



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2007年 8月
博士學位論文

퇴적점토지반에서 조석변화와
선행압밀하중의 상관성 분석

朝鮮大學校 大學院
土 木 工 學 科
辛 泰 旭

퇴적점토지반에서 조석변화와
선행압밀하중의 상관성 분석

*Analysis of Correlation with the Change by the
rise and fall of Tide and Preconsolidation Pressure
on the Sedimentary Clay*

2007年 8月 24日

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

辛 泰 旭

퇴적점토지반에서 조석변화와
선행압밀하중의 상관성 분석

指導教授 沈 泰 燮

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함

2007年 4月

朝鮮大學校 大學院

土 木 工 學 科

辛 泰 旭

辛泰旭의 博士學位 論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校	教授	安鍾源(印)
委員	朝鮮大學校	教授	鄭承同(印)
委員	朝鮮大學校	教授	朴吉敏(印)
委員	朝鮮大學校	教授	吳在承(印)
委員	朝鮮大學校	教授	沈泰燮(印)

2007年 6月

朝鮮大學校 大學院

ABSTRACT

Analysis of Correlation with the Change by the rise and fall of Tide and Preconsolidation Pressure on the Sedimentary Clay

Shin, Tae Wook

Advisor : Prof. Shim, Tae Sup, Ph.D.

Department of civil engineering

Graduate School of Chosun University

This study is performed for finding out the more reasonable approach way during the design of soft ground through the minimization of the difference between the settlement by field measurement result and theoretical settlement using laboratory test result, that is, the confinement of the Terzaghi's 1-dimension consolidation theory which designed, and the derivation of all problems which was foreseen or was happened on site area.

The finite element method analysis at modified Cam-Clay model condition is Carried out using the data which analyzed an effective stress change by downward osmotic pressure and an laboratory test through tidal range and topographical data for this target area. Also, using the results that analyzed of field measurement data and the laboratory test results, the correlation analysis by one-way Factorial Design is performed.

The correlation of the results which analyzed field measurement data regarding a study region and the Overconsolidation Load which occurred by tidal range by rise and fall of tide are as follows.

- 1) According to e - $\log P$ curve with void ratio changed into settlement of the field measurement results, the Overconsolidation appeared over more thicker layer than the designs that constructed. It is caused by the stress relaxation of preconsolidation pressure during the sampling, therefore the characteristic of normal consolidation clay appeared in clay layer of depth 10m or below by this phenomenon as stress relaxation effect grows larger more as deep.
- 2) In this two region always preconsolidation pressure decreases while going from top to base layer as the change of overburden effective stress at low tide is main factors of Overconsolidation load. Also, there is similarity with the results in laboratory tests because load change by the rise and fall of tide always cause excess pore water pressure from upper layer of soft ground to disappear, Overconsolidation range decreases with a nonlinear form while going to deep layer. Also, there is closely similarity between Over-Consolidation Difference (OCD) and a gap with maximum tidal level and ground level. In case of upper stratum, the result has been got that preconsolidation pressure equallize with the change of overburden effective stress by tidal range.
- 3) From the results that carried out finite element method analysis in the condition with downward osmotic pressure at low tides, the reliable consolidation phenomenon did not appear because of the water pressure crushing effect in the clay with very lower permeability. As a result of having reviewed by the change of overburden effective stress at low tide, namely, load change over from saturated state to wet state, there is similar settlement behavior with overconsolidation phenomenon along the measurement results.

Keyword : Tide movement, Wave theory, Mean Sea Level (MSL), Field measurement, Over-Consolidation Ratio (OCR), Over-Consolidation Difference (OCD), One-way Factorial Design

목 차

ABSTRACT	i
목차	iii
표목차	vi
그림목차	viii
기호	xv
제1장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구방법 및 범위	5
제2장 조석이론과 압밀특성	7
2.1 조석 및 과량이론	7
2.1.1 조석이론	7
2.1.2 과량이론	14
2.2 계측자료의 검토와 분석법	38
2.2.1 계측자료의 검토	38
2.2.2 유한요소해석법	45
2.2.3 일원배치법을 이용한 통계분석	56
2.3 조석변화와 압밀방정식	61

2.3.1	조석변화에 의한 유효응력변화	61
2.3.2	유효응력변화에 의한 압밀방정식	68
제3장	사례지역의 지반공학적 특성	74
3.1	영산강 하구언지역	74
3.2	영종도지역	91
제4장	현장계측자료 분석	106
4.1	분석자료	106
4.2	영산강 하구언지역	107
4.3	영종도지역	147
제5장	유한요소해석 및 통계분석	160
5.1	유한요소해석	160
5.1.1	해석조건	160
5.1.2	영산강 하구언지역	167
5.1.3	영종도지역	175
5.2	일원배치법을 이용한 통계분석	181
5.2.1	영산강 하구언지역	181
5.2.2	영종도지역	189
제6장	분석 및 고찰	196
6.1	조위변화와 퇴적환경에 따른 지반특성	196
6.2	유효응력	198
6.2.1	영산강 하구언지역	198

6.2.2 영종도지역	199
6.2.3 결과분석	200
6.3 압축특성	200
6.3.1 영산강 하구언지역	200
6.3.2 영종도지역	201
6.3.3 결과분석	201
6.4 선행압밀하중	202
6.4.1 영산강 하구언지역	202
6.4.2 영종도지역	202
6.4.3 결과분석	203
6.5 상관성 분석	203
제7장 결론	205
참고문헌	207
부록 A. 조석예보자료	213
B. 기본수준점 성과표	239
국문초록	243

표 차례

표 2.1	주요 분조의 조화상수 기호	12
표 2.2	조위에 대한 비조화상수	13
표 2.3	수심에 의한 중력과의 분류	15
표 2.4	랜덤화를 위한 번호 부여	57
표 2.5	One-way Factorial Design의 배열	58
표 3.1	영종도지역의 물리적특성(제2단계)	94
표 3.2	영종도지역의 압밀특성(제2단계)	103
표 3.3	영종도지역의 시설물별 압밀특성 및 투수특성	103
표 4.1	영산강하구언 매립공사의 지반개량공법	108
표 4.2	I Type (연약층 10.0m이하) 매설기준	110
표 4.3	II Type (연약층 15.0m이하) 매설기준	111
표 4.4	III Type (연약층 24.0m이하) 매설기준	111
표 4.5	1구역 측정현황	113
표 4.6	2구역 측정현황	124
표 4.7	3구역 측정현황	128
표 4.8	4구역 측정현황	135
표 4.9	영종도 국제공항건설공사의 지반개량공법	148
표 4.10	계측기 설치 목적 및 이용	150
표 4.11	영종도지역 측정현황	152
표 4.12	압축지수-심도의 관계	153
표 4.13	현장토질정수와 실내시험의 비교(영종도지역)	159
표 5.1	영산강 하구언지역의 해석단계	166
표 5.2	영종도지역의 해석단계	167

표 5.3	성토에 따른 계측침하량과 FEM해석 비교 (영산강 하구언지역)	171
표 5.4	FEM해석에 의한 토질정수(영산강 하구언지역)	174
표 5.5	성토에 따른 계측침하량과 FEM해석 비교 (영종도지역)	178
표 5.6	FEM해석에 의한 토질정수(영종도지역)	180
표 5.7	유의수준에 따른 Anderson-Darling 통계량의 임계값 ...	183
표 5.8	C_c , P_c , $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 대한 기술통계량 (영산강 하구언지역)	186
표 5.9	분산분석결과(영산강 하구언지역)	186
표 5.10	$P_c(\text{Insitu})$ 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 따른 C_c 의 예측 (영산강 하구언지역)	188
표 5.11	C_c , P_c , $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 대한 기술통계량(영종도지역)	193
표 5.12	분산분석결과(영종도지역)	193
표 5.13	$P_c(\text{In-situ})$ 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 따른 C_c 의 예측 (영종도지역)	195

그림 차례

그림 2.1 조석의 형태	8
그림 2.2 기초력 설명도	9
그림 2.3 달과 지구, 태양의 상관관계에 따른 조석변화	10
그림 2.4 각종 조위의 관계	13
그림 2.5 파랑의 제원	14
그림 2.6 주기에 의한 해파의 분류(W.H.Munk, 1950)	16
그림 2.7 파랑이론의 기호설명	18
그림 2.8 진행파의 물입자궤도	24
그림 2.9 중첩시킨 파형의 포락선	26
그림 2.10 중복파의 유선	31
그림 2.11 부분중복파의 파형	31
그림 2.12 파형의 비교	35
그림 2.13 Cnoidal파	36
그림 2.14 고립파	37
그림 2.15 간극비-하중곡선(a), 압축계수-하중곡선(b)	39
그림 2.16 선행압밀압력의 산정	40
그림 2.17 최대조수면시의 응력분포	43
그림 2.18 최저조수면시의 응력분포	43
그림 2.19 수위변화에 따른 단위중량의 변화	44
그림 2.20 Cam-Clay 모델에서의 항복궤적	46
그림 2.21 수정 Cam-Clay 모델에서의 항복궤적	48
그림 2.22 흙에 대한 응력-변형률 곡선	49
그림 2.23 구속응력에 따른 체적변형계수의 변화	50

그림 2.24 Mohr-Coulomb의 파괴규준	51
그림 2.25 제하-재제하 응력-변형을 곡선	52
그림 2.26 CRISP의 pre-processor 및 post-processor 흐름도 ..	55
그림 2.27 수준 A_1 의 데이터	59
그림 2.28 각 수준에서의 데이터의 분포	60
그림 2.29 압밀방정식을 유도하기 위한 미소육면체	63
그림 2.30 압밀에 따른 체적변화	64
그림 2.31 하중 재하 조건	67
그림 2.32 1차원 압밀 형태	68
그림 2.33 깊이에 따라 u_1 가 일정한 경우	71
그림 2.34 깊이에 따라 u_1 가 선형적으로 변하는 경우	72
그림 2.35 깊이에 따라 u_1 가 사인곡선형 분포로 변하는 경우 ...	73
그림 3.1 남악신도시의 연약지반 층후도	74
그림 3.2 남악신도시의 연약지반 구역구분도	75
그림 3.3 영산강 하구언지역의 조간대 횡단현황	75
그림 3.4 소성도표(영산강 하구언지역)	77
그림 3.5 깊이에 따른 자연함수비, W_n (영산강 하구언지역)	78
그림 3.6 깊이에 따른 액성지수, LI (영산강 하구언지역)	79
그림 3.7 깊이에 따른 일축압축강도, q_u (영산강 하구언지역)	81
그림 3.8 깊이에 따른 예민비(영산강 하구언지역)	82
그림 3.9 깊이에 따른 비배수전단강도, C_{uu} (영산강 하구언지역)	83
그림 3.10 깊이에 따른 선행압밀하중, P_c (영산강 하구언지역) ...	85
그림 3.11 깊이에 따른 순과압밀하중, OCD (영산강 하구언지역)	86
그림 3.12 깊이에 따른 과압밀비, OCR (영산강 하구언지역)	87

그림 3.13	깊이에 따른 초기간극비, e_0 (영산강 하구언지역)	88
그림 3.14	깊이에 따른 재압축지수, C_r (영산강 하구언지역)	89
그림 3.15	깊이에 따른 압축지수, C_c (영산강 하구언지역)	90
그림 3.16	인천국제공항 2단계건설 부지조성공사 구역도	92
그림 3.17	영종도지역의 구역별 연약층 및 기반암 심도	92
그림 3.18	소성도표(영종도지역)	95
그림 3.19	깊이에 따른 자연함수비, W_n (영종도지역)	96
그림 3.20	깊이에 따른 액성지수, LI (영종도지역)	97
그림 3.21	깊이에 따른 일축압축강도, q_u (영종도지역)	99
그림 3.22	깊이에 따른 예민비(영종도지역)	100
그림 3.23	깊이에 따른 비배수전단강도, C_{uu} (영종도지역)	101
그림 3.24	깊이에 따른 현장베인시험결과(영종도지역)	102
그림 3.25	깊이에 따른 선행압밀하중, P_c (영종도지역)	104
그림 3.26	깊이에 따른 압축지수, C_c (영종도지역)	105
그림 4.1	현장계측자료 분석흐름도	107
그림 4.2	Type별 계측기 설치도	110
그림 4.3	1구역 매설위치	112
그림 4.4	성토경과에 따른 침하변화(P-WR-1)	114
그림 4.5	성토경과에 따른 침하변화(P-WR-2)	114
그림 4.6	성토경과에 따른 침하변화(P-WR-3)	115
그림 4.7	성토경과에 따른 침하변화(P-2-2)	115
그림 4.8	성토경과에 따른 침하변화(P-2-3)	116
그림 4.9	성토경과에 따른 침하변화(P-2-4)	116
그림 4.10	성토경과에 따른 침하변화(P-2-5)	117
그림 4.11	성토경과에 따른 침하변화(P-2-6)	117
그림 4.12	성토경과에 따른 침하변화(P-2-8)	118

그림 4.13	성토경과에 따른 침하변화(P-2-10)	118
그림 4.14	계측지점별 $e\text{-log}P$ 곡선(1구역)	119
그림 4.15	깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(1구역)	122
그림 4.16	깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(1구역)	122
그림 4.17	깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(1구역)	123
그림 4.18	2구역 매설위치	124
그림 4.19	성토경과에 따른 침하변화(P-1-1)	125
그림 4.20	계측지점별 $e\text{-log}P$ 곡선(P-1-1)	125
그림 4.21	깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(2구역)	126
그림 4.22	깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(2구역)	126
그림 4.23	깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(2구역)	127
그림 4.24	3구역 매설위치	127
그림 4.25	성토경과에 따른 침하변화(P-2-1)	129
그림 4.26	성토경과에 따른 침하변화(P-2-7)	129
그림 4.27	성토경과에 따른 침하변화(P-2-9)	130
그림 4.28	성토경과에 따른 침하변화(P-3-1)	130
그림 4.29	계측지점별 $e\text{-log}P$ 곡선(3구역)	131
그림 4.30	깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(3구역)	132
그림 4.31	깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(3구역)	133
그림 4.32	깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(3구역)	133
그림 4.33	4구역 매설위치	134
그림 4.34	성토경과에 따른 침하변화(P-1-3)	136
그림 4.35	성토경과에 따른 침하변화(P-1-5)	136
그림 4.36	성토경과에 따른 침하변화(P-1-6)	137
그림 4.37	성토경과에 따른 침하변화(P-3-2)	137
그림 4.38	성토경과에 따른 침하변화(P-3-3)	138

그림 4.39	성토경과에 따른 침하변화(P-3-4)	138
그림 4.40	성토경과에 따른 침하변화(P-3-7)	139
그림 4.41	성토경과에 따른 침하변화(P-3-8)	139
그림 4.42	성토경과에 따른 침하변화(P-3-13)	140
그림 4.43	성토경과에 따른 침하변화(P-3-14)	140
그림 4.44	계측지점별 e-logP곡선(4구역)	141
그림 4.45	깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(4구역) ..	144
그림 4.46	깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(4구역)	145
그림 4.47	깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(4구역)	145
그림 4.48	현장토질특성과 실내시험비교	146
그림 4.49	영종도지역의 일반구간 계측기기 설치 표준도	150
그림 4.50	영종도지역의 대표토질특성	151
그림 4.51	압밀하중에 의한 압밀계수의 일반적인 변화 (영종도지역)	154
그림 4.52	계측결과에 의한 압밀계수의 분포(영종도지역)	154
그림 4.53	계측지점별 e-logP곡선(영종도지역)	155
그림 4.54	깊이에 따른 C_c 와 C_r 의 변화(영종도지역)	157
그림 4.55	깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(영종도지역)	158
그림 4.56	깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(영종도지역)	158
그림 5.1	영산강 하구언지역의 조위표 및 유효응력변화	161
그림 5.2	영종도지역의 조위표 및 유효응력변화	163
그림 5.3	Finite Element Types	164
그림 5.4	지역별 매쉬구성	165
그림 5.5	지역별 초기상태	165
그림 5.6	시간에 따른 유효응력변화(영산강 하구언지역)	168
그림 5.7	시간경과에 따른 침하량변화(영산강 하구언지역)	169

그림 5.8 시간경과에 따른 압밀도변화(영산강 하구언지역)	169
그림 5.9 성토고에 의한 침하량(영산강 하구언지역)	170
그림 5.10 영산강 하구언지역의 벡터도	171
그림 5.11 영산강 하구언지역의 변형도	171
그림 5.12 성토에 따른 과잉간극수압변화(영산강 하구언지역) ..	173
그림 5.13 영산강 하구언지역의 간극수압 등고선도	173
그림 5.14 시간에 따른 유효응력변화(영종도지역)	175
그림 5.15 시간경과에 따른 침하량 변화(영종도지역)	176
그림 5.16 시간경과에 따른 압밀도 변화(영종도지역)	176
그림 5.17 성토고에 의한 침하량(영종도지역)	177
그림 5.18 영종도지역의 벡터도	178
그림 5.19 영종도지역의 변형도	178
그림 5.20 성토에 따른 과잉간극수압변화(영종도지역)	179
그림 5.21 영종도지역의 간극수압 등고선도	180
그림 5.22 현장 C_c 의 분포(영산강 하구언지역)	181
그림 5.23 현장 P_c 의 분포(영산강 하구언지역)	182
그림 5.24 현장 OCR의 분포(영산강 하구언지역)	182
그림 5.25 현장 C_c 의 확률분포도(영산강 하구언지역)	184
그림 5.26 현장 P_c 의 확률분포도(영산강 하구언지역)	184
그림 5.27 현장 $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 확률분포도(영산강 하구언지역) ...	185
그림 5.28 C_c , P_c , $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 분산도(영산강 하구언지역)	187
그림 5.29 C_c 에 대한 잔차의 분석결과(영산강 하구언지역)	187
그림 5.30 현장 C_c 의 분포(영종도지역)	189
그림 5.31 현장 P_c 의 분포(영종도지역)	190
그림 5.32 현장 OCR의 분포(영종도지역)	190
그림 5.33 현장 C_c 의 확률분포도(영종도지역)	191

그림 5.34 현장 P_c 의 확률분포도(영종도지역)	191
그림 5.35 현장 $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 확률분포도(영종도지역)	192
그림 5.36 C_c , P_c , $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 분산도(영종도지역)	194
그림 5.37 C_c 에 대한 잔차의 분석결과(영종도지역)	194
그림 6.1 한국서해안의 중요조수퇴적분지 퇴적체의 제4기후기 층서 단위와 부정합(층서)	197
그림 6.2 선행압밀하중과 조수간만차에 의한 상관곡선	204

기 호

a	: 파의 진폭 ($= H/2$)
a_1	: x 의 부(-)방향으로 진행하는 입사파의 진폭
a_2	: x 의 정(+)방향으로 진행하는 반사파의 진폭
a_{\max}, a_{\min}	: 복에서의 진폭
$\underline{a}, \underline{b}$: 절점에서의 변위 및 과잉간극수압
b	: 상수 ($= 1/(\sigma_1 - \sigma_3)$)
c	: 파형이 전진하는 속도, 파속(celerity, $= \sigma/k$)
C_c	: 압축지수 (Compression Index)
C_G	: 파군의 전파속도
C_h, C_v	: 수평, 수직압밀계수 (cm^2/s)
C_r	: 재압축지수 (Recompression Index)
C_u	: 비배수전단강도 (kgf/cm^2)
$\underline{d}, \overline{u}$: 전체절점의 변위, 간극수압
D	: 탄성 매트릭스
DF	: Degree of Freedom (자유도)
E	: 파장당 전 파랑에너지 ($\text{tf} \cdot \text{m}$)
e_1	: 최종간극비
e_c	: 선행압밀하중의 간극비
e_{cs}	: 한계간극비
E_i	: 초기접선탄성계수
e_{ij}	: $N(0, \sigma_E^2)$ 을 따르고 서로 독립인 무작위인자
E_k	: 단위폭, 한 파장당의 운동에너지
e_o	: 초기간극비
E_p	: 단위폭, 한 파장당의 위치에너지

E_t	: 접선탄성계수
E_{ur}	: 제하-재제하 탄성계수
$\overline{E}, \overline{E_p}, \overline{E_K}$: 단위표면적당의 평균에너지, 위치에너지, 운동에너지
f	: 시간의 함수로서, 관측장소에 따른 계수
F	: F distribution (분산비)
g	: 중력가속도
H	: ① 반조차, 즉 각 분조의 조석높이의 반분 ② 파고
h	: ① 수심 (m) ② 전수두, 압력수두(h_p)와 위치수두(h_e)의 합
H_o	: 원지반층 두께
k	: ① 장소에 따라 정해지는 지각(phase lag) ② 파수 ($= 2\pi/L$) ③ 투수계수
k_v, k_h	: 수평, 수직투수계수 (cm/s)
K_r	: 반사율
K_{ur}	: 제하-재제하상수
k_x, k_y	: x, y방향의 투수계수
L	: 파장
LI	: 액성지수 (%)
LL	: 액성한계 (%)
MS	: Mean Sum of Square (SS를 DF로 나눈값)
M_v	: 체적변화계수 (cm^2/kgf)
N, \overline{N}	: 절점의 수와 형상함수
\emptyset	: 속도포텐셜
p, q	: 최대, 최소주응력의 합과 차의 평균응력
P	: ① 압력 ② 파력 (tf/m^2)
P_1	: 최종성토시응력
P_a	: 대기압
P_c	: 선행압밀하중
PI	: 소성지수 (%)

PL	: 소성한계 (%)
P_o	: 초기지중응력상태
p_o	: 축차응력이 0일 때의 평균응력
Q	: 넘치는 파량 (m^3)
q_u	: 일축압축강도
R	: 기어오름 높이 (m)
Residual Error	: 각 자료값과 평균값과의 차
S	: 예민비
SE Coef	: Standard Error Coefficient (표준오차계수)
SS	: Sum of Square (평균값과의 차의 제곱합)
T	: ① 주기 (wave period) ② 1m개의 전체data의 합
T	: t statistics for testing significance of regression coefficients
T_i	: A_i 에서의 m개 data의 합계
T_v	: 시간계수 (time factor, $= C_v \cdot t/H^2$)
u, v	: 물입자의 속도의 x방향, y방향 성분
u_e	: 과잉간극수압
u_{ss}	: 정상상태간극수압
V	: 단위과봉폭당 정수면의 물용적
VIF	: the variance inflation factor(오차허용치의 상보 개념의 수)
V_x, V_y	: x, y방향의 유량
W	: 단위시간당 단위폭에 운송되는 평균에너지 ($tf \cdot m$)
w	: 해수의 단위중량 ($1.03 \text{ tf}/m^3$)
W_n	: 자연함수비 (%)
Z_o	: 평균수면의 높이
γ_{sat}	: 포화단위중량 (tf/m^3)
γ_{sub}	: 수중단위중량 (tf/m^3)
γ_t	: 습윤단위중량 (tf/m^3)
Δe	: 간극비 변화
ΔH	: 침하량 변화

ε	: 축변형률
η	: 정수면으로부터의 수면높이
θ	: 제방선에 대한 파향
κ	: Cam-Clay 재압축지수
λ	: Cam-Clay 압축지수
μ	: 전체의 모평균
μ_1	: A ₁ level에서의 모평균
ρ	: 밀도
σ	: 각주파수 (= $2\pi/T$)
σ_1	: 최대주응력
σ_3	: 최소주응력
$\delta\varepsilon_v$: 체적변형률 (= $d\varepsilon_v$)
$\delta\varepsilon_v^e$: 탄성체적 변형률 (= $d\varepsilon_v^e$)
$\delta\varepsilon_v^p$: 소성체적 변형률 (= $d\varepsilon_v^p$)
$\delta\varepsilon_s$: 전단변형률 (= $d\varepsilon_s$)
$\delta\varepsilon_s^p$: 소성 전단변형률 (= $d\varepsilon_s^p$)

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라가 일제강점기로부터 1945년 8월 15일 해방되어 1950년에 6·25사변을 겪고 제1공화국과 제2공화국을 거쳐 농경사회에서 산업사회로 변화되는 제3공화국에서 경제개발 5개년 계획을 수립하여 경제개발을 시작한 이후 전국토에 광범위하게 공장 및 택지를 확보하기 위한 사업들이 많이 수행되어왔다. 그로 인한 건설붐이 야기되어왔고 국토면적이 제한된 상태에서 국가기간 산업의 발전을 지속적으로 유지하기 위해서는 사회간접시설의 확충과 확보가 무엇보다 필요하여 부득이 해안매립지나 개발이 제한된 연약지반 지역을 적극 활용하여야 하는 상황에 직면하였다.

우리나라의 국토여건상 토지이용률 제고를 위한 토지면적의 확보에 한계가 있어 이에 대한 대책으로 해안지역을 육지로 변화시키는 해안매립공사가 많이 진행되면서 해안매립에 따른 연약지반을 효과적으로 개발할 수 있는 대처방안이 요구되고 있으며, 특히 우리나라의 지리적인 여건상 해수면 심도가 낮고 조위차가 최대 9.0m인 서해안과 남해안의 해안지역의 개발면적이 날로 늘어나고 있다. 따라서, 합리적인 해안지역의 연약지반처리공법의 선정에는 조수간만차와 선행압밀하중의 상관관계규명이 중요하다고 할 수 있다.

1977년부터 1981년까지 전라남도 목포시, 영암군, 무안군, 해남군에 걸쳐있는 영산강하구언 매립공사의 경우, 농경지확보를 최우선 과제로 시작하면서 이들 지역의 강우발생시 해수로 인한 주택지나 농경지가 침수되어 재해 발생이 빈번하여 이를 해소하기 위하여 정부에서는 한국농촌공사로 하여금 영산강 하구언 둑을 건설하게 되었다. 이러한 하구언 둑이나 해안매립공사의 대상지인 연약지반설계에 있어서의 공통적인 문제점은 항상 안전성평가를 압밀도에 의해 결정하거나 계측침하량과 실내시험을 통해 구한 이론침하량이 현장 계측결과와 현격한 차이가 발생한다는 점에 있다.

최근에는 육상에서의 부지확보가 어려운 관계로 많은 해안지역이 주거나

상업 및 관광단지의 택지로 개발되거나 공항 및 항만 등의 기간시설조성의 목적으로 매립공사가 진행되거나 완료된 상태이다.

특히 인천광역시 중구 운서동에 5,619 ha규모의 국제공항건설공사가 1992년 착공하여 8년 4개월만에 2001년 3월 29일 개항하였으며, 최종 목표인 2020년까지의 단계별 건설공사 중 현재 2단계공사인 제3활주로에 대한 연약지반처리공사가 진행중에 있다. 이 지역 또한 섬사이를 매립하여 조성하는 부지로서 근래들어 시행되는 공사 중 계측관리가 비교적 양호하게 진행중이다.

또한, 전라북도 부안군 변산반도에 28,300ha 규모의 거대한 새만금 매립공사 등이 진행중에 있으며, 이에 따른 실내시험 자료 등을 이용한 연구결과는 많이 진행되고 있으나 계측을 이용한 연구결과는 거의 발표되지 않고 있으며, 발표된 연구 또한 침하현상에 대한 직접적인 결과만을 제시하는데 국한되고 있는 실정이다. 결과적으로 현장계측결과를 이용하여 실제 현장지반의 전단강도특성, 압밀특성 등에 대해서는 일부 연구 사례가 발표되고 있으나 본격적인 연구발표는 거의 찾아보기 힘들다.

이와같이 연약지반의 점성토지반은 큰 압축성과 작은 전단강도 등 공학적으로 매우 취약한 특성을 가지고 있어 과거의 각종건설공사에 대한 대상지로서 선호되어지지 않았으나 인구증가와 경제규모의 확대로 필연적으로 다량의 토지 및 시설물에 대한 수요가 발생하였으며 이에 따라 공학적으로 불리한 조건에 있는 지반, 특히 해안매립공사가 급증하고 있다.

현재도 연약지반 구간을 통과하는 고속도로, 일반국도, 철도 등이 지속적으로 건설되고 있으며, 특히 서해안과 남해안 연안에서는 바다를 매립하여 부지를 조성해서 육지화하여 항만이나 공항, 택지, 농경지 또는 산업단지를 건설하는 대규모 프로젝트들이 진행되고 있다. 그러나, 해안매립공사현장에 대한 계측결과 기존설계시 실내시험에 의한 예측값과 차이가 조수간만차가 상대적으로 큰 서해안지역에서 발생하였다. 이러한 결과는 현장계측이 실내시험과는 달리 성토속도 및 변형을 제어 등의 표준화된 시험이 아니고 또한 지하수위변화 등의 자연환경변화 및 시험대상이 현장조사에서 추출한 시료같은 미소크기의 지역이 아닌 현상대지반의 도로, 택지, 단지, 농경지 등의 대단위 지역이라는 데 그 원인이 있으며, 보다 근본적인 원인은 현장계측자료의 분석방법에 있다고 할 수 있다.

본 연구는 현장계측자료를 시험실의 표준화된 시험방법과 거의 동일한 과정으로 정리하여 현장지반에서 발생하는 각종여건 등을 바탕으로 향후 시행되는 연약지반에서의 설계자료나 계측관리자료를 활용하고, 더 나아가 설계 반영된 Terzaghi의 일차원압밀이론의 한계성의 극복과 실제 현장에서 예견되거나 발생한 제반 문제점들을 통해 적극적인 연약지반 개량방법을 찾기 위한 일환으로 수행되었다.

1.2 연구동향

국내에서 지금까지는 조수간만의 차와 선행압밀하중의 상관관계에 대해서 연구한 논문을 찾아보기 힘들고 또한 이에 대한 연구의 진척이 전혀 이뤄지지 않고 있는 실정이라 하겠다. 그러나, 연약지반 처리에 대한 연구와 해안매립지 굴착지역의 불포화 함수특성연구에 대한 이흥길(2006), 낙동강 서해안 지역의 부산점토에 대한 지반특성을 위한 체계적인 지반조사에 대한 K. Ganpathi Rao(2005), 점성토 지반의 공학적 특성 분석에 대한 김주형(2002), 연약 점성토지반의 성토 재하시 변형특성에 대한 조성민(1998) 등에 대한 연구는 진행되었거나 진행중에 있는 사례는 쉽게 찾아 볼 수 있다.

또한, 압밀현상을 설명하는 압밀이론은 Terzaghi(1925)로부터 출발하여 여러가지 이론으로 발전하고 있으며, Biot압밀이론은 평형방정식과 연속 방정식을 제안하여 수학적으로는 정교하나 식 자체가 복잡하고 압밀의 물리적 의미가 모호한 점이 있다. 다차원 압밀이론으로의 확장이 Rendulic (1937), Gibson (1963), Davia (1972), Schiffman (1969)등에 의해 확정되었고 Davis & poulos(1968)는 평균응력의 변화를 무시한 열전도형 방정식으로도 충분한 정도를 갖는 근사해가 구해짐을 밝히고 있다. 또한 한계상태의 이론을 바탕으로 Roscoe 등(1968)이 Cam-Clay Model을 제안하였다. Schiffman & Znidarie(1981, 1982)는 압밀문제는 유한변형보다는 미소변형의 향으로 공식화시킬 수 있다고 하였으며, Gibson(1981)등은 두꺼운 균질층에 대하여 종래의 극소변형이론을 사용하여 얻어진 압밀시간을 과대하게 평가되고 과잉간극수압은 감소하게 평가된다고 보고하였다.

Balasbramanium & Brenner(1981)에 의한 Asaoka 방법의 신뢰성 연구와 Aboshi and Beere의 시료두께 변화에 따른 압밀계수시험, 현장압밀계수가 수

평과 수직배수를 포함한다라는 명제에서 등가압밀계수란 용어를 제안한 오다영(1992)과 송정락(1993)의 연구 등이 있다.

한편, Kavdzanjan & Roepse(1984), Ladd et. al(1994)의 연구에서 계측결과를 토대로 실제 지반의 거동을 기술하고 Modified Cam-Clay Model에 의한 유한요소해석을 수행하였다. Tan(1991, 1995, 1996)은 실측 데이터를 선형회귀시킬 경우 나타나는 초기기울기로 구한 총침하량을 실제보다 과대예측되는 경향이 있다고 주장하고, 지중횡변위는 하중의 크기와 지중응력조건의 영향을 받으며 위치와 깊이에 따라 그 크기가 달라진다는 연구결과를 발표하였다. Hvorslev(1951), Hanna(1985), Dunnidiff(1989), Trembley(1989) 등의 간극수압은 측정원리나 방식에 따라서도 관측값이 서로 차이를 보일 수 있으며 대기압이나 온도의 변화에도 영향을 받는다고 하였다.

일반적으로 해안지역의 연약지반은 일반지역 흙에서 나타나지 않거나 관찰되지 않는 특이한 공학적, 물리적 문제들을 가지고 있는 지반으로서 압축성이 크고 그 현상 또한 시간의존적이며 강도도 작고 교란에 의한 흙의 강도감소 또한 크게 나타내는 특성을 가지고 있다. 그러나, 연약지반에 대한 인식이 생활 속에서 현실화되어 이것에 대한 특성의 연구가 진행되어 기초적인 특성으로부터 고급화 분야로 진행되어 왔다.

이러한 많은 해안매립공사의 공통점은 계측침하량과 현장실내시험에 의한 이론침하량이 항상 상이하게 나타내는 것이라 할 수 있다.

이는 일반적으로 하구언 해안지역의 연약지반을 개량하기 위해서는 필요한 침하량 설계의 경우 현장에서 직접 채취한 불교란 시료와 각종 실내시험을 통하여 연약지반의 토질정수를 결정하게 된다. 그러나 이러한 불교란 시료는 현장에서 직접 채취한 시료의 기계적인 교란과 구속압해제 및 시료팽창에 따른 교란 그리고 운반과정에서 교란으로 인하여 실제 현장에서 필요로 하는 값을 나타내고 있지 못하고 있다.

특히 수치해석 기법에 대한 연구 또한 컴퓨터의 발달로 인해 더불어 활발히 진행되어 왔다. 수치해석기법의 발달은 기존의 단순화된 가정을 뛰어넘어 보다 복잡하고 다양한 현상들은 고려할 수 있는 기초를 마련하였다. 실제 흐름을 분석하는 과정이 다소 비현실적이기는 하나 이러한 수치해석기법의 공사현장에서의 합리적으로 적용하는 것은 아직까지는 신뢰성이 결여되어 있으며, 또한 수치해석을 적용하는 공사가 향상될 것으로 예상하고 있고 컴퓨터

터의 활용 또한 앞으로 지속적이고 급격히 증가되어 가고 있는 추세여서 이들의 지반공학에서의 적용 또한 피할 수 없는 현실이다.

환경친화적인 개발 및 공사상의 경제성제고를 위해 조수간만의 차와 선행하중의 상관관계를 합리적으로 연구하는 것이 필요하나 현재까지 연구가 미흡하여 본 연구를 계획하게 되었다.

1.3 연구방법 및 범위

본 연구에서는 조석운동조사를 통해 해수면이 최고조면고와 최저조면고가 될 때의 해성점토내 발생하는 유효응력변화를 알아내어 지반의 정규압밀 또는 과압밀특성을 연구 규명하기위해 영산강 하구언지역과 영종도지역을 사례지역으로 선정하였으며, 이들 두지역은 우리나라 서해안의 대표적인 연약지반이며 하루 2회 최고조면과 최저조면이 반복되는 간사지이다.

해면은 하루에 1회 또는 2회에 승강운동을 반복하는데, 이때의 최대조면고와 최저조면고를 사례지역인 영산강 하구언지역과 영종도지역에 대해서 조사하고 이를 해성점토지층의 표면지반고와 비교분석하였다. 특히 바다의 저조까지 해수면이 하강하는 동안의 조석을 썰물(ebb tide)이라고 하는데, 이때의 노출높이를 산정하여 조석에 의한 하향침투압을 구하여 이를 통한 유효응력변화가 연약지반의 압밀이력과 압밀특성 및 강도특성 등에 미치는 영향을 규명하는데 역점을 두었다.

본 연구에서의 주된 연구내용과 방법은 다음과 같다.

먼저, 이들 사례지역의 실내시험 자료분석과 연구에 대해서는 실내시험자료를 토대로 통계분석하여 강도특성 및 과압밀이력을 조사하고 이를 구역별로 상세분석하여 현장계측의 초기단계부터의 환경자료로 이용하였다.

그리고 연구지역의 현장계측자료에 대한 분석 및 연구는 현장계측자료를 실내시험과 동일한 $e-\log P$, \sqrt{t} , $\log t$ 로 정리하고, 분석된 $e-\log P$, \sqrt{t} , $\log t$ 를 이용하여 현장압축특성인 압축지수(C_c), 재압축지수(C_r), 선행압밀하중(P_c)과 압밀계수(C_v)의 경향 파악 및 재산정을 하여 기존설계와 비교검토를 통한 대상지역의 과압밀영역을 재정립하였다. 또한, 대상지역을 연약층후 및 조위에 따른 구역으로 나누고, 구역별로 지형특성을 고려하여 과압밀하중, 압밀특성, 강도특성에 대한 분포도를 작성하여 조석과 지형에 따른 각각의 특성변화를

분석하였으며, 각각의 영향인자간의 상관성분석을 위하여 일원배치법을 통한 통계분석을 수행하였다. 그리고 분석자료를 토대로 재산정된 현장압밀특성과 조석운동에 의한 하향침투압으로 발생된 상재하중변화를 검증하기 위한 수단으로 Modified Cam-Clay (MCC) 모델 및 Sage-Crisp 프로그램을 이용한 유효요소해석을 수행하여 대상지역의 조위에 따른 압밀이력을 규명하였으며, 대상지역에 대한 조석에 따른 조위간만차와 그에 따른 유효응력증감관계를 규명하기 위하여 수식화함으로써 전반적인 과압밀현상을 밝혀내고자 한다.

제2장 조석이론과 압밀거동

2.1 조석 및 파랑이론

2.1.1 조석이론

가. 조석의 일반현상

조석(tide)은 주로 천체의 만류인력, 특히 달과 태양에 의해 나타나는 현상으로 천체의 인력을 계산해보면 천체에서 가장 가까운 지구표면상의 한점과 반대로 가장 먼 지점에서 해수면이 상승하고, 그 중간지점에서 해수면이 저하한다. 이와 같이 달과 태양에 의해 일어나는 조석을 천문조(astronomical tide)라 한다.

이와 달리 기상의 급격한 변화, 즉 바람, 기압 등의 기상관계의 영향으로 생기는 해면의 승강을 기상조(meteorological tide)라 하여 구분한다.

조석의 일반현상을 요약하면 첫째, 해면은 하루에 1회 또는 2회에 걸쳐 승강운동을 반복하는데, 이 현상을 조석이라 하면 해면이 가장 높은 상태를 고조(high water) 또는 만조(high tide)라고 하며, 가장 낮은 상태를 저조(low water) 또는 간조(low tide)라고 한다.

둘째, 저조에서 고조로 해수면이 상승하는 동안의 조석을 밀물(flood tide)이라고 하며, 반대로 고조에서 저조까지 해수면이 하강하는 동안의 조석을 썰물(ebb tide)이라고 한다.

셋째, 고조와 저조가 1일에 2회씩 있는 것을 1일2회조(semidiurnal tide), 1회씩 있는 것을 1일1회조(diurnal tide)라 한다. 그림 2.1과 같이 1일2회조에서 고조와 저조의 조위와 발생시간이 다른 현상을 일조부등(diurnal inequality)이라 하고, 그 중에서 높은 고조를 고고조, 낮은 고조를 저고조라고 하며, 저조 중에서 높은 저조를 고저조, 낮은 저조를 저저조라고 한다.

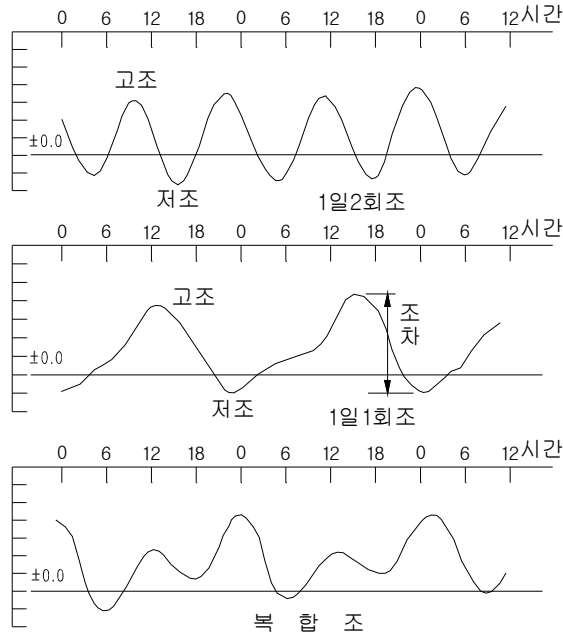


그림 2.1 조석의 형태

마지막으로, 고고조에서 다음 고고조까지의 시간 간격은 날에 따라 변하나 평균 24시간 50분이며, 하루에 50분씩 늦어진다. 따라서, 고고조에서 저저조까지의 시간간격은 평균 12시간 25분이 되는 셈이다.

나. 조석이론

조석의 간만을 일으키는 원인에는 여러가지가 있으나 그 중에서 가장 중요한 것은 달과 태양의 인력이 지구표면의 각 점에 각각 다르게 작용하기 때문이다.

여기서 달의 인력에 대해 살펴보면, 그림 2.2에서 점 E를 지구중심, 점 M을 달의 중심이라고 할 때, 지구의 중심에서 단위질량에 작용하는 달의 인력의 크기와 방향을 \vec{EN} 이라 하고, 지구표면상의 한점 P에 있는 단위질량에 작용하는 힘을 생각하면, 그 힘은 달의 인력과 지구의 중력이다.

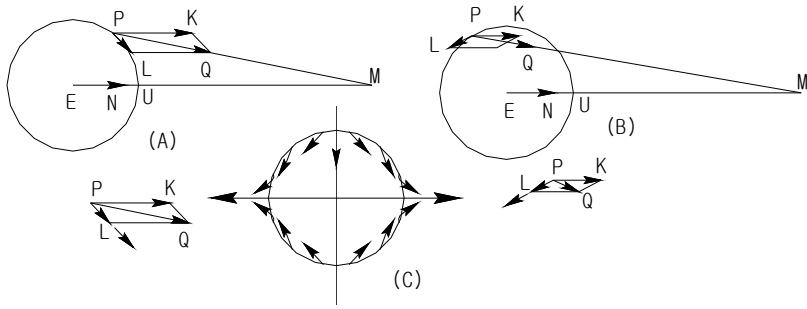


그림 2.2 기조력 설명도

지구의 중력은 지구표면상에서 어느 점이나 거의 동일하며, 지구의 중심을 향하고 있기 때문에 조석을 일으키는 힘은 아니다.

점 P에서의 단위질량에 작용하는 달의 인력이 크기와 방향을 \overrightarrow{PQ} 로 표시하면 이 힘은 뉴턴의 만유인력의 법칙에 의하여 달까지 거리의 제곱에 역비례하기 때문에 위 그림 2.2의 (A)에서 보는 바와 같이, 점 P가 지구중심보다 달에 가까이 있을 경우에는 $\overrightarrow{PQ} > \overrightarrow{EN}$ 이 되며, 반대로 (B)에서와 같이 점 P가 지구중심보다 달에서 멀게 되면 $\overrightarrow{PQ} < \overrightarrow{EN}$ 이 된다. 여기서, \overrightarrow{PQ} 를 $\overrightarrow{PK} // \overrightarrow{EN}$ 이 되도록 \overrightarrow{PK} 와 \overrightarrow{PL} 로 분해하면 힘 \overrightarrow{PK} 는 점 P가 27.3217일 주기로 원운동의 공전을 하는데 필요한 힘이 되며, 나머지 힘 \overrightarrow{PL} 은 조석을 일으키는 힘, 이른바 기조력(tide generating force)이 된다.

이러한 방법으로 지구표면상의 기조력의 분포를 구하면 기조력 설명도의 (C)와 같다. 태양에 의한 기조력도 위와 같이 생각하면 지구표면상의 기조력의 분포상태는 달에 의한 경우와 아주 유사하나, 그 크기가 다를 뿐이다.

앞의 기조력 설명도에서 지구 표면상의 한 점(U)에서의 기조력을 생각할 때 달의 질량을 M, 지구의 반지름을 a, 그리고 달과 지구중심간의 거리를 C라 하면 약 $60.26a$ 이므로, 점 U에서의 기조력은 약 $2Ma/C^3$ 에 비례한다. 즉, 기조력의 크기는 천체의 질량에 비례하고, 그 거리의 세제곱에 역비례한다. 태양에 의한 기조력은 질량면에서 달의 2.7×10^7 배이며, 지구와의 거리가 달과의 거리의 약 389배가 되므로, 달에 의한 기조력의 약 0.46배에 해당된다. 달과 태양을 제외한 다른 천체에 의한 기조력은 미소하기 때문에 고려대상이 되지 않는다.

달과 지구, 태양의 상관관계는 그림 2.3과 같다.

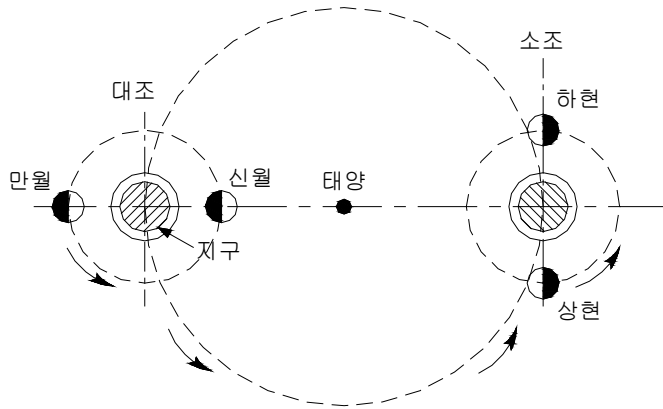


그림 2.3 달과 지구, 태양의 상관관계에 따른 조석변화

다. 조석의 조화분해

기조력은 달과 지구의 자전과 공전에 의하여 변하며, 이 변화는 거의 주기적이기 때문에 몇 가지의 규칙적인 조석의 합성으로 생각할 수 있다. 실제로 달과 태양을 생각하는 대신에 지구의 적도상을 일정한 거리를 두고 운행하는 질량이 다른 많은 위성을 포함한 가상천체를 생각하여 가상천체에 의한 각각의 규칙적인 조석이 지구상에 생기게 된다고 본다. 이와 같은 각각의 조석을 분조(component tide, constituent)라 하며, 어느 지점의 실제의 조위기록에서 분조를 구하는 것을 조석의 조화분해(harmonic analysis of tide)라 한다.

(1) 주요분조

분조의 수는 대단히 많으나 실용적으로는 다음의 4분조가 가장 중요하며, 일조부등이나 대조와 소조의 현상은 다음의 주요 4분조로써 설명할 수 있다.

- ① 주태음반일주조(M_2) : 천구상에서 달의 일조운동에 의해 일어나는 중요한 조석으로서 주기는 12시간 25분이다.
- ② 주태양반일주조(S_2) : 천구상에서 태양의 일주운동에 의해 일어나는 중요한 조석으로서 주기는 12시간이다.

- ③ 일월합성일주조(K_1) : 달과 태양의 상대위치에 따라 발생하는 조석으로서 주기는 23시간 56분이다.
- ④ 부태양일주조(O_1) : 천구상에서 달의 일주운동에 의해 일어나는 조석으로서 주기는 25시간 49분이다.

분조에는 이와같이 반일주조나 일주조 외에 주기가 반달, 한달, 반년, 1년 등의 장주기의 것이 있는데, 이를 장주기조라고 한다. 또, 해만 등의 천해에서는 조석과의 비선형성에 의하여 M_2 , S_2 분조 등의 2배, 3배, ...의 각속도(주기는 $1/2$, $1/3$, ...)를 가지는 것과 같은 분조가 나타나는데, 이것을 배조라고 한다.

(2) 조고의 추정

분조가 어느 정도 정현곡선이라고 하면 조석의 높이는 식(2.1)으로 구한다.

$$\text{조고} = Z_0 + \sum f H \cos(V - k) \quad (2.1)$$

여기서, Z_0 : 평균수면의 높이

\sum : 각분조의 합계

f : 시간의 함수로서, 관측장소에 따른 계수

H : 반조차, 즉 각 분조의 조석높이의 반분

$V - k = V_0 + nt - k$ 로 표시하며, V 는 인수(argument)로서 시간 t 의 함수, V_0 는 기원시에서의 인수, n 은 각 분조의 속도로서 일정한 값, k 는 장소에 따라 정해지는 지각(phase lag)이다.

(3) 조석의 비조화상수

조석현상을 파악함에 있어서는 조화상수에 의한 계산방법이 가장 정확하나, 이밖에도 관측값에서부터 통계적인 계산으로 구하는 방법이 쓰인다. 이 방법으로 구해진 정수를 비조화상수(non-harmonic constants)라 한다.

표 2.1 주요 분조의 조화상수 기호

분 조	반 조 차 (H)	지 각 (κ)
주태음반일주조(M ₂)	H _m	K _m
주태양반일주조(S ₂)	H _s	K _s
일월합성일주조(K ₁)	H'	K'
주태음일주조(O ₁)	H _o	K _o

- ① 대조차(spring range) : 대조의 평균조차, $2(H_m + H_s)$
- ② 소조차(neap range) : 소조의 평균조차, $2(H_m - H_s)$
- ③ 평균조차(mean range) : 조차의 평균값, $2H_m$
- ④ 평균고조간격(mean high water interval) : 고조간격의 평균값, km/28.98시간
- ⑤ 평균저조간격(mean low water interval) : 저조간격의 평균값, km/28.98시간 + 6시간 12분
- ⑥ 기본수준면(standard sea level) : 평균해면에서 M₂, S₂, K₁, O₁분조의 합 ($H_m+H_s+H'+H_o$)만큼 낮은 조위를 기본수준면이라 하며 해도와 조석표의 기준면으로 하고, D.L(datum level)로 약기하며, 약최저간조위 (approx. lowest low water)와 같다.
- ⑦ 대조승(spring rise) : 기본수준면에서 대조의 평균만조위까지의 높이로서 $2(H_m+H_s)+H'+H_o$ 이다.
- ⑧ 소조승(neap rise) : 기본수준면에서 소조의 평균만조위까지의 높이로서 $2H_m+H'+H_o$ 이다.

기타 조위의 비조화상수는 표 2.2와 같이 계산되며, 각 항구의 비조화상수는 조화상수로부터 계산함으로써 얻을 수 있다.

표 2.2 조위에 대한 비조화상수

조 위 명	비 조 화 상 수
고극조위(highest high water)	실측값
약최고만조위(approx. highest high water)	$2(H_m+H_s+H'+H_o)$
대조평균만조위(high water ordinary spring tide)	$2(H_m+H_s)+H'+H_o$
평균만조위(high water ordinary mean tide)	$2H_m+H_s+H'+H_o$
소조평균만조위(high water ordinary neap tide)	$2H_m+H'+H_o$
평균해면(mean sea level)	$H_m+H_s+H'+H_o$
소조평균간조위(low water ordinary neap tide)	$2H_s+H'+H_o$
평균간조위(low water ordinary mean tide)	$H_s+H'+H_o$
대조평균간조위(low water ordinary spring tide)	$H'+H_o$
약최저간조위(기본수준면, approx. lowest low water)	$Z_o-(H_m+H_s+H'+H_o)$
저극조위(lowest low water)	실측값

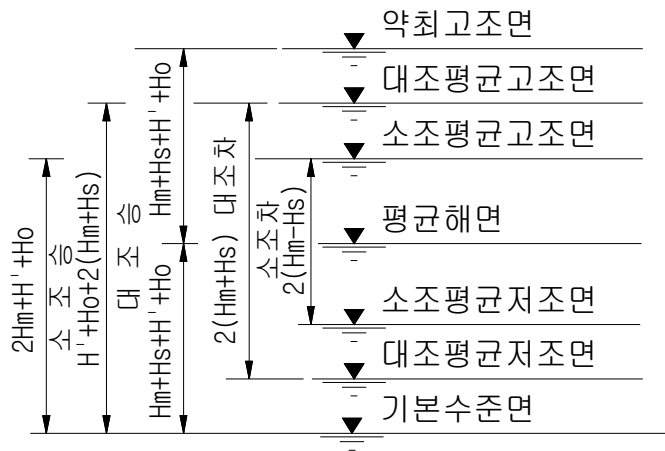


그림 2.4 각종 조위의 관계

2.1.2 파랑이론

가. 파랑의 제원 및 분류

(1) 파랑의 제원

파랑(waves)의 크기는 파장(wave length)과 파고(wave height)에 의하여 표현된다. 파장은 파봉(crest, 수위의 최고점)에서부터 이에 이어진 다음 파봉까지의 수평거리이고, 파고는 파봉과 파곡(trough, 수위의 최저점)과의 수직거리이다.

일반적으로, 그림 2.5와 같이 파장은 L , 파고는 H 로 표시한다. 해면에 어느 한 점을 고정해서 파봉이 온 후부터 다음의 파봉이 올 때까지의 시간간격을 주기(wave period)라고 하며 T 로 표시한다.

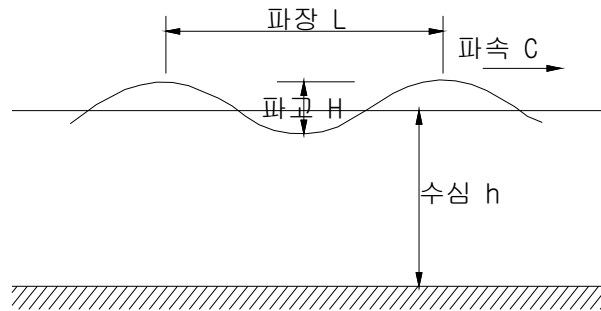


그림 2.5 파랑의 제원

또, 파형이 전진하는 속도를 파속(celerity)이라고 하며 c 로 표시하며, 파장과 파고의 비(H/L)를 파형경사(gradient of wave)라 한다.

기타 설계에 사용되는 기호는 수심 h (m), 제방선에 대한 파향 θ , 파력 P (tf/m^2), 기어오름 높이 R (m), 넘치는 파랑 Q (m^3), 파장당 전파랑에너지 E ($\text{tf} \cdot \text{m}$), 단위시간당 단위폭에 운송되는 평균에너지 W ($\text{tf} \cdot \text{m}$), 해수의 단위중량 w ($1.03 \text{ tf}/\text{m}^3$) 등이며, 심해파의 제원에는 기호 밑에 첨자 o 를 붙인다.

(2) 파랑의 분류

- ① 규칙파와 불규칙파 : 실제로 바다의 파랑은 대단히 복잡한 모양을 하고 있어 큰 물결, 작은 물결, 긴 물결, 짧은 물결이 이어져 서로 합성되어 있다. 파고와 주기가 일정한 파랑이 한 방향에서부터 무한히 계속되어 오는 모델을 생각할 때, 이것이 파랑의 이론으로 취급되는 규칙파이다. 이에 대해서 실제의 파랑은 불규칙파라 한다.
- ② 수심에 의한 분류: 파랑의 운동은 그 파랑이 전하는 수역의 수심과 파장과 비에 의해서 그 양상이 다르다. 그래서 표 2.3과 같이 심해파 · 천해표면파 · 장파로 분류해서 생각한다. 심해파는 수심의 파장의 1/2 이상, 장파는 수심이 파장의 1/25이하, 천해표면파는 그 중간에 있다. 또, 장파와 표면파를 합쳐서 천해파로 부르기도 한다. 심해파는 파랑의 운동이 바다의 깊은 곳까지 이르지 못하므로 수심의 영향을 받지 않고, 장파는 수면으로부터 해저까지 거의 같은 모양의 움직임을 하므로 수심의 영향이 현저하다. 조석 · 고조 · 쓰나미(또는 진파) 등은 장파의 영역에 속한다. 반대로, 표면장력파나 잔물결은 심해파이며, 풍파도 해안도서에서는 심해파이다.

표 2.3 수심에 의한 중력파의 분류

구 분	h/L	$2\pi h/L$	$\tan(2\pi h/L)$
심해파 (deep water)	$> 1/2$	$> \pi$	≈ 1
천해표면파 (transitional water)	$1/25 \sim 1/2$	$1/4 \sim \pi$	$\tan(2\pi h/L)$
천해파 (shallow water)	$< 1/25$	$< 1/4$	$\approx 2\pi h/L$

- ③ 미소진폭파와 유한진폭파 : 규칙파의 이론적 모형은 미소진폭파와 유한진폭파로 대별된다. 미소진폭파는 이론식의 유도 때에 진폭이 대단히

작다고 가정해서 계산은 단순화한 것이다. 그러나 이러한 이론으로 얻어진 결과는 어느 정도의 오차만 허용한다면 파고가 상당히 큰 파랑에 까지 적용이 가능하다. 이 이론으로써는 정밀도가 부족할 것 같은 경우에 파고의 영향을 고려하면서 계산한 것이 유한진폭이다. 이때, 파랑의 모양과 특성에 따라서 Stokes파 · Cnoidal파 · 고립파(solitary wave) 등의 여러 고차이론으로 구분한다.

- ④ 진행파와 중복파 : 장애물이 없는 수역을 한 방향으로 차례로 진행하는 파랑을 진행파(progressive wave)라 하며, 파형이 차례로 전진해 간다. 진행파가 수직벽 등에서 반사되면 진행파와 반사파가 포개어져서 중복파(group wave)가 형성된다. 또, 파형이 다른 두 개의 동일 주기로 포개어져도 중복파가 된다. 중복파는 수면이 상하로 진동할 뿐 파형은 진행하지 않는다.
- ⑤ 주기에 의한 분류 : 실제로 해면에는 대단히 광범위한 주기를 가진 파랑이 존재하고 있다. 그림2.6은 W.H.Munk가 파랑을 주기에 따라 분류한 것으로, 파의 명칭과 발생원인을 알 수 있다.

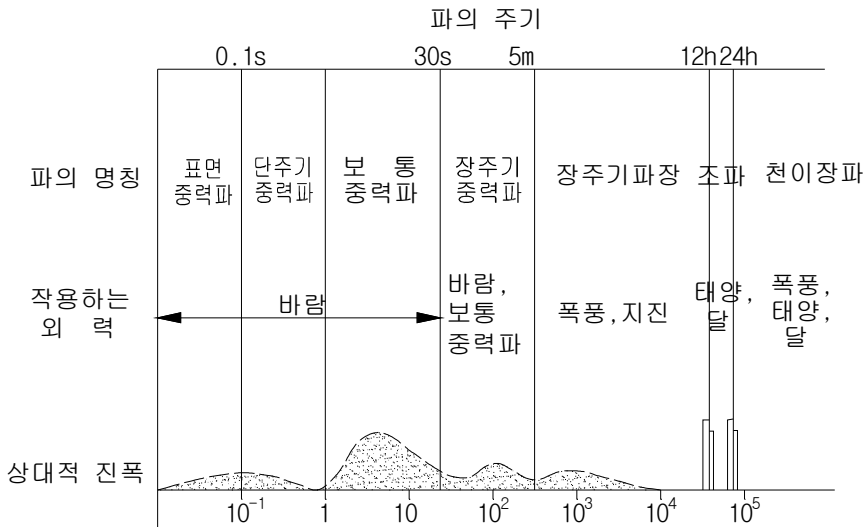


그림 2.6 주기에 의한 해파의 분류(W.H.Munk, 1950)

- 표면장력파(모세관파, capillary wave) : 풍속 약 1m/s 정도에서 일어나는 표면파로서, 중력보다도 표면장력이 주가 되며, 주기는 0.1s 이하이고, 파장은 1.7~3cm 이하이다.
- 단주기표면파 : 바람에 의해 일어나는 파로서 주기는 0.1~1s이며, 폭풍역에서 생성되는 파를 말한다.
- 보통표면파 : 풍속 6~7m/s 이상의 바람에 의해서 생기는 표면파로서 주기는 1~30s이며, 보통 바다에서 볼 수 있다. 보통 5~15s의 주기가 많으며, 풍랑발생역에서 벗어나는 선행나불이 이에 속한다.
- 장주기표면파 : 풍파가 변질되고 해면동요를 수반하며, 주기의 범위는 30s~5min이다.
- 장주기장파 : 주기의 범위는 5min~12h로서 기상상황과 관련되며, 해면진동 · 진파 · 기상조 등이 이에 속한다.
- 조석 : 달과 태양의 인력으로 인한 기조력에 의하여 일어나는 장파, 즉 조석을 말하며, 주기는 12~24h이다.

⑥ 군파(wave group) : 바다의 파랑은 실질적으로 같은 모양으로 이루어지지 않으며, 파장 · 파고 · 주기가 각각 다른 형태로 집합되어 군파의 상태를 이룬다. 이 종류의 모든 파는 규칙성이 있다. 그러나 표면파에 있어서의 파속은 파장에 따라 변화하는 분산성의 파로서, 파장이 다른 파들이 합하여 군파를 이룬다. 군파로서의 전파속도는 각기 파의 속도와 다르며, 이것을 군파속(group velocity)이라 한다.

나. 파랑이론

(1) 파랑의 기본방정식

수심 h 가 일정한 바다에서 다음 그림 2.7과 같이 파가 진행하는 방향을 x 축, 수면에서 연직방향을 y 축으로 한다. 파의 운동에 미치는 점성을 무시한다면 완전유체의 성질에서 알 수 있는 바와 같이, 정지상태에서 중력에 의하여 생기는 유체의 운동은 소용돌이(eddy)는 없으나 속도포텐셜 ϕ 가 존재한다. 물입자의 속도성분 u (x 방향성분), v (y 방향성분)은 다음 그림 2.7과 같이 표시된다.

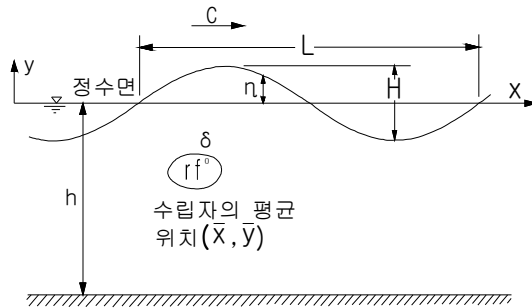


그림 2.7 파랑이론의 기호설명

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2.2)$$

물은 보통 비압축성 유체로 취급하기 때문에 연속방정식은 식(2.3)으로 표현되며,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

식(2.3)을 식(2.2)에 대입하면 ϕ 에 대한 편미분방정식은 다음과 같은 식(2.4)가 얻어진다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.4)$$

여기서, $-h \leq y \leq \eta$, $-\infty < x < \infty$ 의 영역에서만 성립

η : 정수면으로부터의 수면높이

다음으로 경계조건을 고려한다. 우선, 수평인 해저에서는 연직방향의 속도는 0이어야 하므로 다음과 같은 식(2.5)가 성립된다.

$$(v)_{y=-h} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_{y=-h} = 0 \quad (2.5)$$

수면의 경계조건을 생각하기 전에 정상류의 유체운동에 대한 운동방정식의 적분형을 기초로 한 압력방정식은 다음과 같은 식(2.6)이 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 \right] + \frac{P}{\rho} + gy = 0 \quad (2.6)$$

여기서, P : 압력, ρ : 밀도, g : 중력가속도

자유수면 $y = \eta$ 에서의 압력을 P_0 이라고 하면 식(2.6)을 다시 식(2.7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{y=\eta} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 \right]_{y=\eta} + \frac{P_0}{\rho} + g\eta = 0 \quad (2.7)$$

이 식은 수면에서의 경계조건 중 하나이며, 다른 하나의 경계조건은 자유표면이 $F(x, y, z, t) = 0$ 과 같이 표현된다면, $DF/Dt = 0$ 이 성립되어야 한다.

여기서, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial z}$ 가 되며, 이것을 '**Lagrange 미분식**'이라고 한다.

또, 대개의 경우 z 에는 관계가 없으므로 식(2.8)이 성립되어 식(2.9)와 식(2.10)으로 표시할 수 있다.

$$F(x, y, t) = \eta(x, t) - y = 0 \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{DF}{Dt}\right)_{y=\eta} = \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v\right)_{y=\eta} = 0 \quad (2.9)$$

또는,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{y=\eta} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_{y=\eta} \quad (2.10)$$

위의 식(2.5), 식(2.7), 식(2.10)의 경계조건을 만족시키는 식(2.4)의 풀이를 구해야 한다.

(2) 미소진폭과 이론

① 기초방정식의 풀이

자유표면에서의 경계조건인 식(2.7)과 식(2.10)은 비선형으로 되어 있어 파랑의 기초방정식을 풀기 위해서는 비선형 문제를 풀어야 한다. 그러나 현실적으로 존재하는 파랑의 파고는 파장에 비하여 현저하게 작다. 이와 같이, 파고가 지극히 작은 경우를 다루는 것을 미소진폭파이론이라고 한다.

우선 자유표면의 조건인 식(2.7)과 식(2.10)에 나타나 있는 $(\frac{\partial \phi}{\partial t})_{y=\eta}$, $(\frac{\partial \phi}{\partial y})_{y=\eta}$ 를 $y=0$, 즉 정수면 주위에서 Taylor급수전개를 하면 식(2.11)이 된다.

$$\begin{aligned} (\frac{\partial \phi}{\partial t})_{y=\eta} &= (\frac{\partial \phi}{\partial t})_{y=0} + [\frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial \phi}{\partial t})]_{y=0}\eta + \frac{1}{2}[\frac{\partial^2}{\partial y^2}(\frac{\partial \phi}{\partial t})]_{y=0}\eta^2 + \dots \\ (\frac{\partial \phi}{\partial y})_{y=\eta} &= (\frac{\partial \phi}{\partial y})_{y=0} + [\frac{\partial}{\partial y}(\frac{\partial \phi}{\partial y})]_{y=0}\eta + \frac{1}{2}[\frac{\partial^2}{\partial y^2}(\frac{\partial \phi}{\partial y})]_{y=0}\eta^2 + \dots \end{aligned} \quad (2.11)$$

여기서, 2차 이상의 미소항을 생략하고 $y=\eta$ 의 압력을 대기압 P_0 와 같다고 보아 대기압을 기준으로 한다면 $P_0=0$ 이 되어 파랑의 기초방정식은,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0, \quad -h \leq y \leq \eta, \quad -\infty < x < \infty \quad (2.12)$$

$$(\frac{\partial \phi}{\partial y})_{y=-h} = 0 \quad (2.13)$$

$$(\frac{\partial \phi}{\partial t})_{y=0} + g\eta = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = (\frac{\partial \phi}{\partial y})_{y=0} \quad (2.15)$$

가 된다. 다시 식(2.14)과 식(2.15)에서 η 를 소거하면, 식(2.16)이 얻어진다.

$$(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2})_{y=0} = -g(\frac{\partial \phi}{\partial y})_{y=0} \quad (2.16)$$

이를 풀기 위하여 $\eta = a \cos k(x - ct)$ 와 식(2.14)를 고려하여 식(2.17)을 가정한다.

$$\varnothing = f(y) \sin k(x - ct) = f(y) \sin(kx - \sigma t) \quad (2.17)$$

여기서, $a = H/2$ (파의 진폭), $k = 2\pi/L$ (파수)

$$\sigma = 2\pi/T \text{ (각주파수), } c = \sigma/k \text{ (파속)}$$

식(2.17)을 식(2.12)에 대입하면, 식(2.18)이 얻어진다.

$$\frac{d^2 f}{dy^2} - k^2 f = 0 \quad (2.18)$$

이 식의 일반해는 다음과 같은 식(2.19)로 표시된다.

$$f = A e^{ky} + B e^{-ky} \quad (2.19)$$

여기서, A, B : 적분상수

따라서, 식(2.17)은 식(2.20)과 같이 된다.

$$\varnothing = (A e^{ky} + B e^{-ky}) \sin(kx - \sigma t) \quad (2.20)$$

이를 경계조건 식(2.13)과 식(2.16)에 대입하면 식(2.21)과 식(2.22)가 얻어진다.

$$A e^{-kh} - B e^{kh} = 0 \quad (2.21)$$

$$(\sigma^2 - gk)A + (\sigma^2 + gk)B = 0 \quad (2.22)$$

A, B 가 0이 아닌 값을 가지기 위해서는 식(2.23)가 성립되어야 한다.

$$\begin{vmatrix} e^{-kh} & -e^{kh} \\ \sigma^2 - gk & \sigma^2 + gk \end{vmatrix} = 0 \quad (2.23)$$

이를 풀면 식(2.24)을 얻는다.

$$\sigma^2 = gk \frac{e^{kh} - e^{-kh}}{e^{kh} + e^{-kh}} = gk \tanh kh \quad (2.24)$$

여기서, $c = \sigma/k$ 의 관계를 사용하면 식(2.25)가 얻어지며,

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (2.25)$$

$c = L/T$ 의 관계를 고려하면 다음과 같은 식(2.26)과 식(2.27)이 얻어진다.

$$c = \frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2.26)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2.27)$$

식(2.21)에서

$$Ae^{-kh} = Be^{kh} = \frac{D}{2}$$

이라면, 속도포텐셜 ϕ 는 다음과 같은 식(2.28)이 된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{2} D e^{k(h+y)} + e^{-k(h+y)} \sin(kx - \sigma t) \\ &= D \cosh k(h+y) \sin(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.28)$$

식(2.14)에 대입하면 식(2.29)가 되므로

$$\begin{aligned} \eta &= -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{y=0} \\ &= \frac{\sigma}{g} D \cosh kh \cdot \cos(kx - \sigma t) \\ &= a \cos(ky - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.29)$$

식(2.24)를 고려하면 식(2.30)이 되며 속도포텐셜 ϕ 는 다음과 같은 식(2.31)이 된다.

$$D = \frac{ag}{\sigma} \frac{1}{\cosh kh} = \frac{a\sigma}{k} \frac{1}{\sinh kh} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) \\ &= \frac{a\sigma}{k} \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.31)$$

② 물입자의 속도성분과 궤적

물입자의 속도성분은 식(2.2)와 식(2.31)로부터 식(2.32)와 식(2.33)으로 변형된다.

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \phi}{\partial x} = a\sigma \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \\ &= \sigma \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \eta \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = a\sigma \frac{\sinh k(h+y)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.33)$$

식(2.32)에서 수평속도성분 u 는 표면파형 η 와 같은 위상(phase)으로서, 표면이 상승하고 있으면 물입자는 파랑의 진행방향으로, 표면이 하강하고 있으면 역방향으로 움직인다는 사실을 알 수 있다. 시간 t 에서의 물입자의 위치를 $[x(t), y(t)]$ 로 하면 물입자의 수평과 수직방향의 속도는 $dx/dt, dy/dt$ 가 된다. 한편, 어느 한 점 $[x(t), y(t)]$ 에 대한 속도성분은 각각 $\partial\phi/\partial x, \partial\phi/\partial y$ 로 표시되므로 다음과 같은 식(2.34)가 성립한다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial\phi[x(t), y(t); t]}{\partial x}, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{\partial\phi[x(t), y(t); t]}{\partial y} \quad (2.34)$$

이 미분방정식을 만족시키는 $x(t), y(t)$ 가 물입자의 궤적이다. 물입자의 미소한 운동을 고려하기 때문에 물입자의 평균위치를 \bar{x}, \bar{y} 로 하고, 시간 t 에서의 위치에서 수평과 수직방향의 변위를 $\delta(t), \gamma(t)$ 로 하면 다음의 식(2.35)와 같이 표현된다.

$$x(t) = \bar{x} + \delta(t), \quad y(t) = \bar{y} + \gamma(t) \quad (2.35)$$

여기서, \bar{x}, \bar{y} : 물입자의 평균위치

이를 식(2.34)에 대입하여 Taylor급수전개를 하면 다음의 식(2.36)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dt} &= \frac{\partial\phi(\bar{x} + \delta, \bar{y} + \gamma; t)}{\partial x} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_{\bar{x}, \bar{y}} + \delta \left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\right)_{\bar{x}, \bar{y}} + \gamma \left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial y}\right)_{\bar{x}, \bar{y}} + \dots \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \frac{\partial\phi(\bar{x} + \delta, \bar{y} + \gamma; t)}{\partial y} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{\bar{x}, \bar{y}} + \delta \left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x\partial y}\right)_{\bar{x}, \bar{y}} + \gamma \left(\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}\right)_{\bar{x}, \bar{y}} + \dots \end{aligned} \quad (2.36)$$

제1차 근사식을 구하기 위하여 위 식의 우변 제2항 이하를 생략하고 식(2.31)과 관계시키면 식(2.37)이 얻어진다.

$$\left(\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dt} &= a\sigma \frac{\cosh k(\bar{h} + \bar{y})}{\sinh kh} \cos(k\bar{x} - \sigma t) \\ \frac{d\gamma}{dt} &= a\sigma \frac{\sinh k(\bar{h} + \bar{y})}{\cosh kh} \sin(k\bar{x} - \sigma t) \end{aligned} \right) \quad (2.37)$$

위의 식을 적분하고 $\bar{\delta} = 0, \bar{\gamma} = 0$ 이 되는 관계를 고려하면 다음과 같은 식(2.38)과 식(2.39)가 얻어진다.

$$x - \bar{x} = -a \frac{\cosh k(\bar{h} + \bar{y})}{\sinh kh} \sin(k\bar{x} - \sigma t) \quad (2.38)$$

$$y - \bar{y} = -a \frac{\sinh k(\bar{h} + \bar{y})}{\sinh kh} \cos(k\bar{x} - \sigma t) \quad (2.39)$$

위의 식에서 시간 t 를 소거하면 다음과 같은 식(2.40)이 얻어진다.

$$\frac{(x - \bar{x})^2}{\left(a \frac{\cosh k(\bar{h} + \bar{y})}{\sinh kh}\right)^2} + \frac{(y - \bar{y})^2}{\left(a \frac{\sinh k(\bar{h} + \bar{y})}{\sinh kh}\right)^2} = 1 \quad (2.40)$$

최종적으로 위의 식은 다음 그림 2.8에서 보는 바와 같이 타원궤도를 그린다는 사실을 알 수 있다.

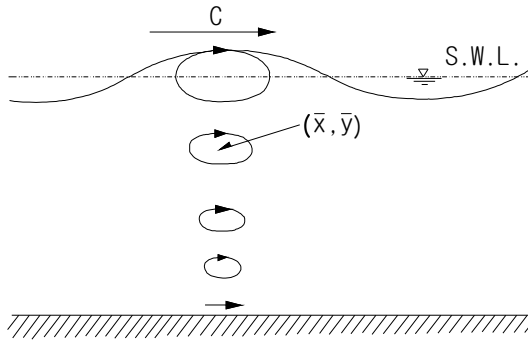


그림 2.8 진행파의 물입자궤도
(\bar{x} , \bar{y} : 물입자의 평균위치)

③ 파랑에 의한 압력의 변동

압력방정식인 식(2.6)에서 2차의 미소항을 생략하면 다음과 같은 식(2.41)이 얻어진다.

$$P = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \rho g y \quad (2.41)$$

위의 식에서 우변의 제2항은 정수압을 가리킨다. 파랑의 운동에 의하여 생기는 압력변화를 ΔP 로 표시하면 식(2.42)을 얻는다.

$$\Delta P = -\rho \frac{\partial \varnothing}{\partial t} = \rho g \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \eta \quad (2.42)$$

이것은 수압식 파랑계의 원리이며 수중에서의 압력변동을 계측하면 수면파형으로 환산할 수 있다.

④ 군속도와 에너지 전파

파고가 같고 파장과 파속이 아주 유사한 두 개의 여현파를 중첩시켜도 선형이론에서는 풀이가 가능하다. 따라서, 두 개의 파랑을 합성한 식은 식(2.42)와 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= a \cos k(x-ct) + a \cos k'(x-c't) \\ &= 2a \cos\left(\frac{k-k'}{2}x - \frac{kc-k'c'}{2}t\right) \cdot \cos\left(\frac{k+k'}{2}x - \frac{kc+k'c'}{2}t\right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

여기서, $\cos\left(\frac{k-k'}{2}x - \frac{kc-k'c'}{2}t\right)$ 파장의 파랑을 주목해 보면, 이 파의 파장은 $\frac{4\pi}{(k-k')}$, 주기는 $\frac{4\pi}{(kc-k'c')}$ 이며, 파속은 $\frac{(kc+k'c')}{(k+k')}$ 로 주어진다. 또한, $\left(\frac{k-k'}{2}x - \frac{kc-k'c'}{2}t\right)$ 의 파랑에 대하여는 파장, 주기 및 파속이 각각 $\frac{4\pi}{(k+k')}$, $\frac{4\pi}{(kc+k'c')}$ 및 $\frac{(kc+k'c')}{(k+k')}$ 로 주어진다. $k \approx k', c \approx c'$ 가 되기 때문에 이들은 각각 $2\pi/k, 2\pi/kc, c$ 로 되어 각 파랑의 특성이 그대로 나타남을 알 수 있다.

다시 $\cos\left(\frac{k+k'}{2}x - \frac{kc+k'c'}{2}t\right)$ 의 파랑에서의 그의 파장과 주기는 개개의 파의 파장과 주기에 비하여 크고, 합성된 파의 어느 순간에서는 다음 그림 2.9와 같이 파형의 포락선을 형성한다. 이러한 파군의 전파 속도를 군속도 C_G 라 하여 식(2.44)과 같이 표현된다.

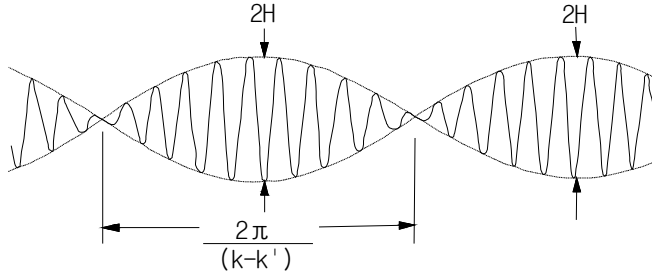


그림 2.9 중첩시킨 파형의 포락선
(H : 파고, k : 파수)

$$C_G = \frac{kc - k'c'}{k - k'} = \frac{\delta(kc)}{\delta k} \quad (2.44)$$

즉,

$$C_G = \frac{d(kc)}{dk} = c + k \frac{dc}{dk} = c - L \frac{dc}{dL} \quad (2.45)$$

이에 식(2.25)를 대입하여 계산하면 다음과 같은 식(2.46), 식(2.47)이 된다.

$$C_G = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi h}{L} \frac{1}{\sinh 4\pi \frac{h}{L}} \right] c = nc \quad (2.46)$$

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi h}{L} \frac{1}{\sinh 4\pi \frac{h}{L}} \right] \quad (2.47)$$

단위폭, 한 파장당의 위치에너지는 다음 식(2.48)과 같이 주어지며,

$$\begin{aligned} E_p &= \int_0^L \int_0^\eta \rho g y dy \cdot dx \\ &= \frac{\rho g}{2} \int_0^L \eta^2 dx \end{aligned} \quad (2.48)$$

파형 $\eta = a \cos(kx - \sigma t)$ 를 대입하면 다음과 같은 식(2.49)가 된다.

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{\rho g}{4} a^2 L \\ &= \frac{\rho g H^2}{16} L \end{aligned} \quad (2.49)$$

여기서, H : 파고 (= 2a)

다음으로 단위폭, 한 파장당의 운동에너지는 다음과 같은 식(2.50)이 된다.

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{\rho}{2} \int_0^L \int_{-h}^{\eta} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] dy dx \\ &= \frac{\rho g a^2}{4} L \\ &= \frac{\rho g H^2}{16} L \end{aligned} \quad (2.50)$$

단위폭, 한 파장당의 전체에너지를 E 라고 하면 다음과 같은 식(2.51)이 된다.

$$E = E_P + E_K = \frac{\rho g H^2}{8} L = 2E_P = 2E_K \quad (2.51)$$

또, 단위표면적당의 평균에너지를 각각 \bar{E} , \bar{E}_P , \bar{E}_K 로 표시하면 다음과 같은 식(2.52)가 된다.

$$\bar{E} = \bar{E}_P + \bar{E}_K = \frac{1}{8} \rho g H^2 = 2\bar{E}_P = 2\bar{E}_K \quad (2.52)$$

연직단면을 고려할 때, 그 단면의 단위폭당 단위시간에 통과하는 에너지유속, 즉 물에 의한 일량 W 를 구하면

$$W = \int_{-h}^{\eta} P u dy = \int_{-h}^{\eta} P \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) dy \doteq \int_{-h}^0 P \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) dy \quad (2.53)$$

여기서, 식(2.31)과 식(2.41)을 대입하면 식(2.54)가 된다.

$$W = \rho g c n \eta^2 + \frac{\rho g c n}{k} \left(\coth kh - \frac{1}{\sinh kh} \right) \quad (2.54)$$

그리고, 한 주기 동안의 평균일량을 구하면 식(2.55)가 된다.

$$\begin{aligned} \bar{W} &= \frac{1}{T} \int_0^T W dt = \frac{1}{2} \rho g c n a^2 = \frac{1}{2} \rho g a^2 C_G \\ &= \frac{1}{8} \rho g H^2 C_G = \bar{E} C_G \end{aligned} \quad (2.55)$$

즉, 파랑에 의하여 수송되는 단위폭당 에너지의 한 주기 동안의 평균값은 단위표면적당 평균에너지 \bar{E} 가 군속도 C_G 로 수송되는 일량과 같다.

⑤ 심해파 · 천해파 · 장파

여기까지는 수심의 효과가 있는 천해파의 경우를 취급하였으나, 지금부터 두가지의 극한상황을 생각해 보자. 첫번째는 파장에 비하여 수심이 대단히

큰 경우($kh \rightarrow \infty$)와 두번째는 파장에 비하여 수심이 대단히 작은 경우 ($kh \rightarrow 0$)를 생각한다. 전자를 심해파(표면파), 후자를 장파(극천해파)라 한다.

심해파의 경우에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\left[\begin{array}{l} \eta = a \cos(kx - \sigma t) \\ \varnothing = \frac{a\sigma}{k} e^{ky} \sin(kx - \sigma t) \\ u = a\sigma e^{ky} \cos(kx - \sigma t) \\ v = a\sigma e^{ky} \sin(kx - \sigma t) \\ c = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} \\ L = \frac{gT^2}{2\pi} \\ (x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 = a^2 e^{2k\bar{y}} \\ n = \frac{1}{2} \end{array} \right] \quad (2.56)$$

장파의 경우에는

$$\left[\begin{array}{l} \eta = a \cos(kx - \sigma t) \\ \varnothing = \frac{ag}{\sigma} \sin(kx - \sigma t) \\ u = \frac{agk}{\sigma} \cos(kx - \sigma t) = \frac{gk}{\sigma} \eta = \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \\ v = 0 \\ c = \sqrt{gh} \\ x - \bar{x} = -\frac{a}{kh} \sin(k\bar{x} - \sigma t) \\ y - \bar{y} = 0 \\ n = 1 \end{array} \right] \quad (2.57)$$

위의 식에서 알 수 있는 바와 같이, 심해파에서의 파속은 파장의 크기에 따라 정해지며, 물입자는 원궤도를 그린다. 원궤도의 반경은 수심에 따라 지수함수의 관계로 감소한다. 파장에서의 유속은 수심에 따른 함수관계가 있으며, 물입자운동은 연직방향에서 동일하다.

수심과 파장의 비를 상대수심이라고 하며, 심해파에서는 $\tanh kh \approx 1$, 장파에서는 $\tanh kh \approx kh$ 의 관계를 사용한다. 일반적으로 $\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$ 을 심해파,

$\frac{h}{L} < \frac{1}{20} \sim \frac{1}{25}$ 을 장파라고 한다.

⑥ 중복파

파고와 주기(또는 파장)가 같은 파랑이 x방향의 (-) 또는 (+)방향으로 진행하는 파형을 각각 η_1, η_2 라 하면, 이에 대응하는 속도포텐셜 ϕ_1, ϕ_2 는 식(2.58)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}\eta_1 &= a \cos(kx - \sigma t), \quad \phi_1 = a \frac{\sigma}{k} \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \\ \eta_2 &= a \cos(kx + \sigma t), \quad \phi_2 = -a \frac{\sigma}{k} \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \sin(kx + \sigma t)\end{aligned}\quad (2.58)$$

이를 합성한 파형 η 와 속도포텐셜 ϕ 는 식(2.59)로 표현된다.

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_1 + \eta_2 = 2a \cos kx \cos \sigma t \\ \phi &= \phi_1 + \phi_2 = -2a \frac{\sigma}{k} \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \cos kx \sin \sigma t\end{aligned}\quad (2.59)$$

이와같이 표현되는 파랑은 진행성의 파가 아닌 정상파 또는 중복파라고 한다. 이 중복파의 물입자의 유속 u, v 는 다음과 같은 식(2.60)이 된다.

$$\begin{aligned}u &= \frac{\partial \phi}{\partial x} = 2a\sigma \frac{\cosh k(h+y)}{\sinh kh} \sin kx \sin \sigma t \\ v &= \frac{\partial \phi}{\partial y} = -2a\sigma \frac{\sinh k(h+y)}{\sinh kh} \cos kx \sin \sigma t\end{aligned}\quad (2.60)$$

위의 식에서 수평속도 u 는 $x = \frac{n\pi}{k}$ 에서 언제나 0이 되므로, 예컨대 $x=0$ 에 직립벽을 설치한 경우의 조건 $(\frac{\partial \phi}{\partial x})_{x=0}$ 을 만족하는 중복파를 나타낸다. $x = \frac{n\pi}{k}$ 부근에서 연직속도 v 는 최대가 되며, 수면변동 η 도 최대가 되므로, 이를 북(loop)이라 한다. 또, $x = \frac{(n+\frac{1}{2})\pi}{k}$ 근처에서 수평속도 u 는 최대, 연직속도 v 는 0, 수면변동 η 도 항상 0이 되므로, 이를 절(node)이라 한다. 북에서는 수평속도 u 는 항상 0이 되므로, 북에서 연직벽으로 막혀도 운동상태는 변하지 않는다.

중복파의 단위면적당 평균위치에너지 \bar{E}_p 와 운동에너지 \bar{E}_k 는 다음과 같은 식(2.61), 식(2.62)로 표현된다.

$$\bar{E}_P = \frac{1}{2} \rho g \bar{\eta}^2 = \frac{\rho g}{2TL} \int_0^T \int_0^L \eta^2 dx dt = \frac{2\rho g}{2} a^2 \quad (2.61)$$

$$\bar{E}_k = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{TL} = \int_0^T \int_0^L \int_{-h}^0 (u^2 + v^2) dy dx dt = \frac{\rho g}{2} a^2 \quad (2.62)$$

이와 같이, 중복파의 에너지는 진폭 a 의 진행파에너지의 2배가 된다. 그러나, 단위폭당 한 파장에 의한 위치에너지 및 운동에너지는 모두 시간의 함수임을 알 수 있다.

식(2.59), 식(2.60)에서 $\sin \sigma t = 0$ 의 순간에는 유체 내의 어느 장소에서나 u 와 v 가 0이 되어 운동에너지는 0이 되나, 이 때의 수면변동은 최대가 되어 위치에너지도 최대가 된다.

한편, $\cos \sigma t = 0$ 의 순간에는 수면변동이 0이 됨에 따라 위치에너지도 0이 된다. 이 때 u, v 는 최대가 되어 운동에너지가 최대의 상태가 된다. 따라서, 에너지는 수송되지 않고 운동에너지와 위치에너지 사이를 시간적으로 왕복한다는 사실을 알 수 있다.

물입자의 평균위치 (\bar{x}, \bar{y}) 에 대한 변위 (δ, γ) 는 다음과 같은 식(2.63)으로 구한다.

$$\left(\begin{array}{l} \delta = -2a \frac{\cosh k(h + \bar{y})}{\sinh kh} \sin k\bar{x} \cos \sigma t \\ \gamma = 2a \frac{\sinh k(h + \bar{y})}{\sinh kh} \cos k\bar{x} \cos \sigma t \end{array} \right) \quad (2.63)$$

여기서, σt 를 소거하면 식(2.64)을 얻는다.

$$\frac{\gamma}{\delta} = -\tanh k(h + \bar{y}) \cot k\bar{x} \quad (2.64)$$

즉, 물입자의 이동궤적은 (\bar{x}, \bar{y}) 를 중심으로 하는 일정한 경사의 직선으로서 물입자의 북에서는 연직, 절에서는 수평방향으로 왕복 운동한다는 사실을 알 수 있다.

유선은 식(2.60)으로부터 얻어진 식(2.65)의 미분방정식을 풀음으로써 식(2.65)와 같이 얻어진다.

$$\frac{v}{u} = \frac{dy}{dx} = -\tanh k(h + y) \cot kx \quad (2.65)$$

따라서, 유선을 나타내는 곡선은 식(2.66)과 같으며, 이 모양은 다음 그림 2.10과 같다.

$$\sinh k(h+y) \sin kx = \text{const} \quad (2.66)$$

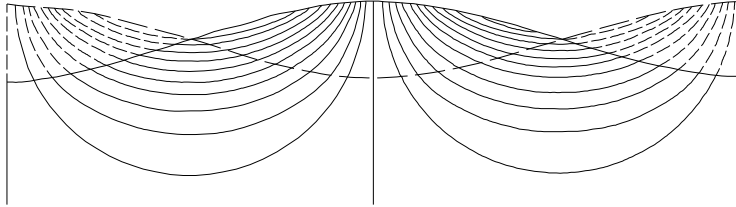


그림 2.10 중복파의 유선

지금까지 취급한 경우는 연직벽에 파랑이 완전반사되어 생기는 중복파에 대한 것으로 이를 완전중복파라고 한다. 이에 반하여, 불완전반사의 경우에는 각각 다른 진폭을 가지는 파랑의 합성을 생각한다. x 의 부(-)방향으로 진행하는 입사파의 진폭을 a_1 , 정(+)방향으로 진행하는 반사파의 진폭을 a_2 라 하면 $a_1 > a_2$ 가 되며, 합성파의 파형은 다음 식(2.67)과 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= a_1 \cos(kx + \sigma t) + a_2 \cos(kx - \sigma t) \\ &= (a_1 + a_2) \cos kx \cos \sigma t - (a_1 - a_2) \sin kx \sin \sigma t \end{aligned} \quad (2.67)$$

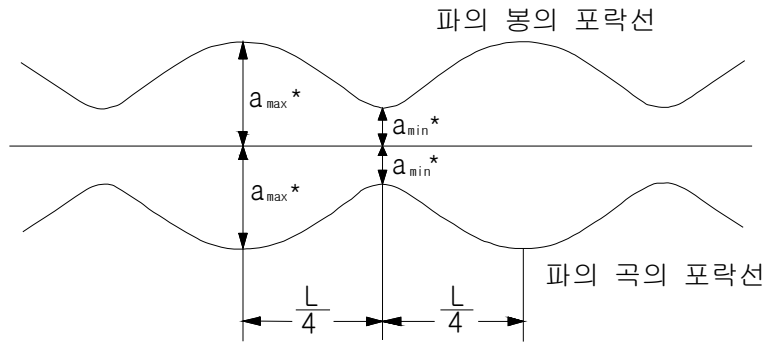


그림 2.11 부분중복파의 파형
(a : 진폭)

앞의 그림 2.11에서 보는 바와 같이 $L/4$ 에서 복과 절이 나타나며, 복에서의 진폭을 a_{\max}^* , a_{\min}^* 라고 하면, 이들의 크기는 식(2.68)과 같다.

$$\begin{cases} a_{\max}^* = a_1 + a_2 \\ a_{\min}^* = a_1 - a_2 \end{cases} \quad (2.68)$$

위의 식으로부터 a_1 과 a_2 의 크기는 식(2.69)와 같이 얻는다.

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{2}(a_{\max}^* + a_{\min}^*) \\ a_2 = \frac{1}{2}(a_{\max}^* - a_{\min}^*) \end{cases} \quad (2.69)$$

또, 반사율 K_r 은 식(2.70)와 같이 된다.

$$K_r = \frac{a_2}{a_1} = \frac{a_{\max}^* - a_{\min}^*}{a_{\max}^* + a_{\min}^*} \quad (2.70)$$

위의 식에서 복에서의 진폭(또는 파고)과 절에서의 진폭(또는 파고)을 측정함으로써 미소진폭파이론이 응용될 경우의 반사율을 구할 수 있는데, 이 방법을 '**Healy의 방법**'이라고 한다.

(3) 유한진폭파 이론

과장에 비하여 파고가 현저하게 작은 파랑에 대해서는 전절에서 논한 바와 같이, 정현파 또는 정현파의 합성으로 파를 표현할 수 있었다. 그러나 파고가 비교적 크게 되면 미소진폭파 이론에서 생략한 비선형항을 무시할 수 없기 때문에 이른바 유한진폭파이론에 의하여 해석한다. 이 절에서는 이에 대하여 기술한다.

① Stokes파 이론

파형이 보존되어지는 유한진폭의 심해파에 대하여는 Stokes가 근사전해법에 의하여 풀이하였다. Rayleigh 방법에 의하여 정상화하면 속도포텐셜 ϕ 및 이에 대응하는 흐름의 관계식 ψ 는 식(2.71)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\varnothing(x, y) &= -cx + c\beta e^{ky} \sin kx \\ \Psi(x, y) &= -cy + c\beta e^{ky} \cos kc\end{aligned}\quad (2.71)$$

흐름의 관계식 Ψ 를 사용한다면 표면에서의 조건은 $(\Psi)_y = \eta = \text{const.}$ 로 쓸 수 있으며, 자유표면에서의 값을 기준으로 한 Ψ 의 값을 찾아내기 위하여서는 $(\Psi)_{y=\eta} = 0$, 즉 식(2.72)가 된다.

$$\eta = \beta e^{k\eta} \cos kx \quad (2.72)$$

다음으로 압력이 자유표면의 내외에 연속해서 있기 위한 조건은 압력방정식을 쓰면 식(2.73)과 같이 표현된다.

$$g\eta + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varnothing}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varnothing}{\partial y} \right)^2 \right]_{y=\eta} = \text{const.} \quad (2.73)$$

위 식을 고려하여 약간의 계산을 가하여 변형하면 식(2.74)이 된다.

$$\left(\frac{2g}{c^2} - 2k \right) \eta + \beta^2 k^2 e^{2k\eta} = \text{const.} \quad (2.74)$$

$|k\eta| < 1$ 의 경우를 생각하면 $e^{k\eta}$ 의 급수전개는 단순해서 식(2.72), 식(2.74)은 식(2.75), 식(2.76)와 같이 표현된다.

$$\eta = \beta \left[1 + k\eta + \frac{1}{2}(k\eta)^2 + \frac{1}{6}(k\eta)^3 + \frac{1}{24}(k\eta)^4 + \dots \right] \cos kx \quad (2.75)$$

$$\begin{aligned}\left(\frac{2g}{c^2} - 2k \right) \eta + \beta^2 k^2 \left[1 + 2k\eta + \frac{1}{2}(2k\eta)^2 + \frac{1}{6}(2k\eta)^3 + \frac{1}{24}(2k\eta)^4 + \dots \right] \\ = \text{const.}\end{aligned}\quad (2.76)$$

위의 식을 기초로 하여 얻어진 제4차 근사해는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\eta = \frac{1}{2}k\beta^2 + k^3\beta^4 + \beta \left(1 + \frac{9}{8}k\beta^2 \right) \cos kx + \left(\frac{1}{2}k\beta^2 + \frac{11}{6}k^3\beta^4 \right) \cos 2kx \\ + \frac{3}{8}k^2\beta^3 \cos 3kx + \frac{1}{3}k^3\beta^4 \cos 4kx\end{aligned}$$

또는 $a = \beta \left(1 + \frac{8}{9}k^2\beta^2 \right)$ 로 놓고 정수항을 무시하여 파형을 표시하면 식(2.77)이 된다.

$$\begin{aligned}\eta = a \cos(kx - \sigma t) + \left(\frac{1}{2}ka^2 + \frac{17}{24}k^3a^4 \right) \cos 2(kx - \sigma t) \\ = \frac{3}{8}k^2a^3 \cos 3(kx - \sigma t) + \frac{1}{3}k^3a^4 \cos 4(kx - \sigma t)\end{aligned}\quad (2.77)$$

다시 파속 c 에 대하여는 다음의 관계식을 얻는다.

$$c^2 = \frac{g}{k} \left(1 + k^2 a^2 + \frac{5}{4} k^4 a^4 \right) \quad (2.78)$$

파고 H 는 식(2.79)와 같이 표시된다.

$$H = 2a + \frac{3}{4} k^2 a^3 \quad (2.79)$$

천해파에 대해서는 많은 학자들이 취급하여 왔으나, 여기에는 대표적인 것으로 SKJELBREIA에 의하여 얻어진 제3차 근사해를 기술한다.

$$\left[\begin{array}{l} \eta = a \cos(kx - \sigma t) + \frac{a^2 k}{2} f_2 \cos 2(kx - \sigma t) + \frac{a^3 k^2}{4} f_3 \cos 3(kx - \sigma t) \\ f_2 = \frac{\cosh kh (\cosh 2kh + 2)}{2(\sinh kh)^2} \\ f_3 = \frac{3}{16} \frac{8(\cosh kh)^6 + 1}{(\sinh kh)^6} \end{array} \right] \quad (2.80)$$

또, 파고 H 와 a 와의 관계는 식(2.81)과 같으며, 파속 c 는 식(2.82)와 같이 표현된다.

$$H = 2a + \frac{1}{2} a^3 k^2 k_3 \quad (2.81)$$

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh kh \left[1 + (ak)^2 \frac{\cosh 4kh + 8}{8(\sinh kh)^4} \right] \quad (2.82)$$

여기서, $k = \frac{2\pi}{L}$, $c = \frac{L}{T}$ 을 계산하면 파장 L 은 식(2.83)으로 나타난다.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L} \left[1 + \left(\frac{2\pi a}{L} \right)^2 \frac{\cosh 8\pi h/L + 8}{8(\sinh 2\pi h/L)^4} \right] \quad (2.83)$$

그러므로 주기 T 와 수심 h 가 주어진 경우 미소진폭과 이론에 근거하여 얻은 파장보다 Stokes파 이론에 의한 파장이 길다는 사실을 알 수 있다. 다음 그림 2.12는 이 두 이론으로 구한 파형을 비교한 것이다.

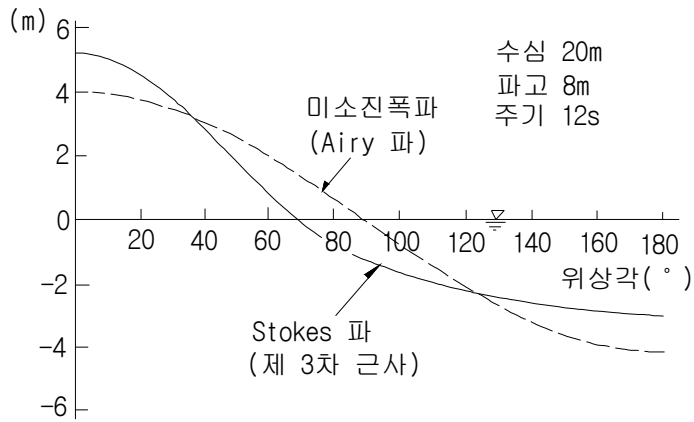


그림 2.12 파형의 비교

② Cnoidal파 이론

Stokes파의 이론에서는 a/L 를 아주 작은 값으로 취급했으나, h/L 가 작은 천해역에서의 유한진폭파를 생각할 경우에는 a/L 이외에 a/h 를 계산해야 한다. a/L 와 a/h 의 두 가지 인수들의 상대적 크기를 표현하는 데에는 U_{RSELL} (1951)의 파라미터 U 가 정의되어 있다.

$$U = \frac{aL^2}{h^3} = \frac{(a/h)^3}{(a/L)^2} \quad (2.84)$$

$U \gg 1$ 의 경우에는 a/L 로 전개한 Stokes파에 해당하나, $U \ll 1$ 의 경우에는 파형을 변화시키지 않는다. 즉, 보존파가 있을 수 없으나 $U=1$ 인 경우에는 보존파가 존재한다. 이를 Cnoidal파라 한다. 이는 파형이 JACOBI(1825)의 타원함수(elliptic cosine function) cn 을 써서 표현하기 때문에 CN파라고 한다. 제2차 근사해는 다음 식들과 같다.

$$\eta = H \operatorname{cn}^2 \left\{ \frac{2K}{L}(x-ct), k \right\} - \frac{3}{4} \frac{H^2}{h_t} \operatorname{cn}^2 \left\{ \frac{2K}{L}(x-ct), k \right\} \times \left[1 - \operatorname{cn}^2 \left\{ \frac{2K}{L}(x-ct), k \right\} \right]$$

$$c = \sqrt{gt_t} \left[1 + \frac{H}{h_t} \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{2} - \frac{E}{K} \right) + \left(\frac{H}{h_t} \right)^2 \frac{1}{k^4} \left\{ \frac{E}{K} \left(\frac{E}{K} + \frac{3k^2}{4} - 1 \right) - \frac{k^4 + 14k^2 - 9}{40} \right\} \right] \quad (2.85)$$

$$L = \frac{4kh_tK}{(3H/h_t)^{0.5}} \left[1 + \frac{H}{h} \frac{7k^2 - 2}{8k^2} \right] \quad (2.86)$$

$$\delta = \frac{H}{k^2} \left[\frac{E}{K} + k^2 - 1 \right] + \frac{H^2}{8k^4h_t} \left[(1 - k^2)(8 - 3k^2) - (8 - 7k^2) \frac{E}{k} \right] \quad (2.87)$$

여기에 사용된 기호는 그림 2.13의 Cnoidal파에서 볼 수 있다.

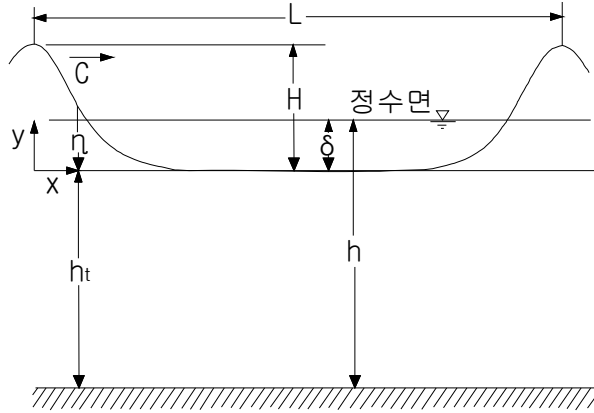


그림 2.13 Cnoidal파

그림 2.13에서 실제 수심 $h = h_t + \delta$ 임에 주의해야 한다. 또, $K(k), E(k)$ 는 식(2.88)과 같이 각각 제1종과 제2종의 완전타원적분(complete elliptic integrals)이며, k 는 모수(modulus)이다.

$$\left[\begin{array}{l} K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{\sqrt{1 - k \sin^2 x}} \\ E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k \sin^2 x} dx \end{array} \right] \quad (2.88)$$

따라서, Cnoidal파의 최대파고 H_{max} 은 $0.73h_t$ 이다.

③ 고립파 이론

앞의 절에서 논한 파랑은 모두 진동파들이다. 파랑의 진행방향의 정(+) 또는 부(-) 방향으로 물입자가 움직이며, 파봉과 파곡이 뚜렷한 파랑이었으나 고립파(solitary wave)는 진동하지 않으며, 파곡도 없이 정지된 수면상에 고

립하여 발생하는 파형들이다.

Cnoidal파의 파형은 주기적이나 $K \rightarrow 1$ 인 극한적인 경우를 생각하면 한 개의 파봉을 가지는 비주기적인 유한파고의 파랑을 얻는데, 이를 고립파라고 한다. RUSSELL(1839, 1844)에 의해 처음으로 실험적으로 발견되어 발표된 이래, 이론적인 발전은 BOSSINESQ(1872), RAYLEIGH(1876), McCOWAN(1891) 등 다수 학자들에 의하여 이루어졌다. MUNK(1949)는 고립파를 적용하여 쇄파점부근의 파랑을 근사적으로 표시하는 유용한 결과를 얻었다. 다음은 제1차 근사해의 결과를 설명하고 있다.

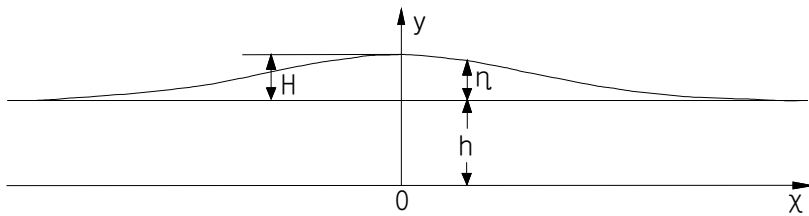


그림 2.14 고립파

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right] \quad (2.89)$$

$$c = \sqrt{g(h + H)} \quad (2.90)$$

$$E = \frac{\rho g}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2 d\theta + \frac{\rho}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-h}^{\eta} (u^2 + v^2) dy \right] d\theta \quad (2.91)$$

$$\doteq \rho f h^3 \left(\frac{4H}{3h} \right)^{\frac{3}{2}} (\theta = x - ct)$$

$$V = \int_{-\infty}^{\infty} \eta dx = 4h^2 \sqrt{\frac{H}{3h}} \quad (2.92)$$

여기서, E : 고립파의 한 파복폭당 전에너지

(total wave energy per unit crest width)

V : 단위파복폭당 정수면의 물용적

이때 파고 대 수심의 비율 $H/h = 0.5$ 로 할 경우, 파봉의 전후면에 $1.6h$ 및 $2.1h$ 영역에 각각 에너지의 90%, 98%가 포함된다. 같은 방법으로 정수면상

의 전체 용적의 90% 및 98%가 파봉 전후면에서 2.4h 및 3.8h의 범위 내에 있다.

따라서, 고립파는 무한이 긴 파장을 가지나 그 에너지와 정수면상의 용적은 파봉의 주위에 집중된다는 사실을 알 수 있다.

또, 고립파의 최대파고 H_{max} 은 0.732h이다.

2.2 계측자료의 검토와 분석법

2.2.1 계측자료의 검토

가. 계측자료의 해석정리

본 연구에서는 계측에 의해 측정된 지층별침하량을 간극비로 변환하여 이를 e - $\log P$ 곡선로 작도한 그래프에서 선행압밀하중(P_c), 압축지수(C_c), 재압축지수(C_r)을 구함으로써 현장계측자료를 분석하였다.

(1) 현장계측에 의한 간극비변화 산정

외부하중으로 인하여 측방유동이나 사면저부파괴없이 연직방향으로 침하된다고 하면 연약층 두께 H_0 에 대한 높이의 변화량 ΔH 는 성토대상지의 침하계측량과 동일한 값을 가질 것이다. 다음 식(2.93)은 수평으로 구축된 일정한 연약층의 침하량에 의한 간극비의 변화이다.

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}, \quad \Delta e = \frac{\Delta h \cdot (1 + e_0)}{H_0} \quad (2.93)$$

여기서, ΔH : 침하량, H_0 : 원지반 층 두께

Δe : 간극비 변화, $1 + e_0$: 비체적

위 식(2.93)에서처럼 발생침하량 또는 예상침하량을 알고 초기간극비를 알

면 간극비의 변화를 알 수 있으며, 지중응력에 성토하중에 대한 증가량을 더 하면 하중증가분이 되며 이를 반대수지에 x축에 지중응력과 성토고에 의한 유효응력 증가량과 y축에 침하량에 의한 간극비의 변화를 도시하면 현장토질 정수를 결정하는 e-logP곡선을 도시할 수 있다.

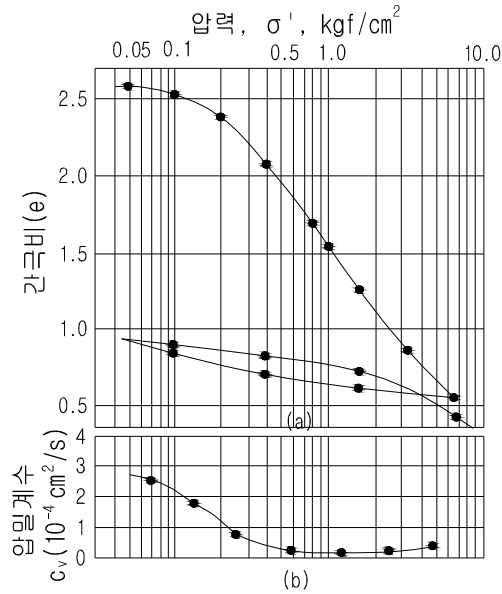
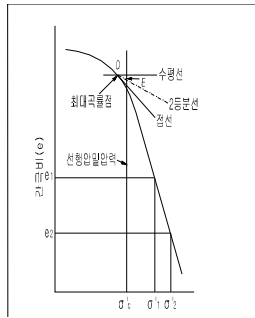


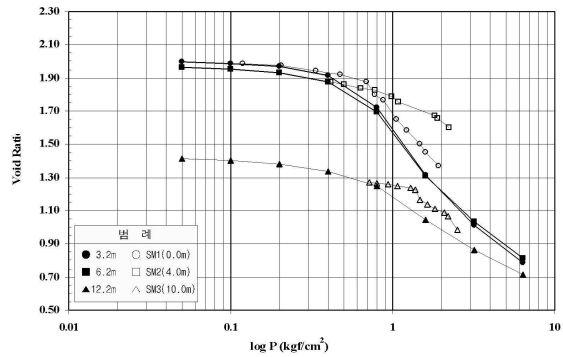
그림 2.15 간극비-하중곡선(a), 압밀계수-하중곡선(b)

(2) 선행압밀하중 결정

흙은 완전탄성체가 아니므로 과거에 작용했던 하중에 일종의 기억능력을 소유하고 있는데, 이중 과거에 경험한 최대하중을 선행압밀하중이라 한다. 이 선행압밀하중은 성토나 구조물 축조시의 침하량에 결정적인 역할을 하는데 이는 선행압밀하중을 기점으로 압밀침하거동이 급격히 바뀌기 때문이다.



(a) 산정방법



(b) 작도예

그림 2.16 선행압밀압력의 산정

Casagrande는 선행압밀하중을 결정하는 방법을 그림 2.16과 같이 제시하고 있다. 먼저, e - $\log P$ 곡선에서 곡률이 최대인 점(D)을 찾아 수평선을 긋고 점(D)의 접선을 그린다. 다음 접선과 수평선의 이등분선을 그리고 처녀압밀곡선의 직선부와 이등분선을 찾아 수선을 내리면 그점의 유효응력이 선행압밀하중이 된다.

실내시험의 처녀압밀곡선은 시료의 채취와 시험과정에서 발생하는 교란의 효과로 인해 처녀압밀곡선은 현장의 처녀압밀곡선보다 기울기가 작아지므로 선행압밀하중은 작아지게 된다. 본 연구에서는 현재 지반이 가지는 실제적인 거동을 중심으로 하여 선행압밀하중을 결정하였다.

(3) 정규압밀과 과압밀점토의 평가

선행압밀하중이 현재 흙이 받고 있는 유효상재하중과 같으면 정규압밀점토 (Normally consolidated Clay), 유효상재하중보다 작으면 압밀진행점토 (under-consolidated clay), 유효상재하중보다 크면 과압밀점토 (Overconsolidated Clay)라 한다. 기존에 정규-과압밀점토를 결정하는 방법에는 과압밀비(OverConsolidation Ratio, OCR)와 본 논문에서 도입하는 순과압밀하중(과압밀차, OverConsolidated Difference, OCD)개념이 있다.

(가) 과압밀비

압밀곡선으로부터 선행압밀압력을 구하면 그 흙의 과거에 받았던 압밀응력을 알 수 있다. 흙이 현재 받고 있는 유효연직응력에 대한 선행압력의 비를 과압밀비라고 한다. 즉 과압밀비는 다음 식(2.94)와 같이 정의된다.

$$OCR = \frac{\bar{p}_c}{p_o} \quad (2.94)$$

여기서, \bar{p}_c : 선행압밀압력, p_o : 유효연직압력

OCR = 1이면 그 흙은 정규압밀점토이고, OCR > 1이면 과압밀점토이나, 일반적으로 OCR < 2.0를 정규압밀점토로 평가한다.

(나) 순과압밀하중

과압밀비가 갖는 최대의 문제점은 동일한 과압밀 또는 정규압밀특성을 가진 점토라 하더라도 심도에 따른 토피하중에 따라 과압밀비가 달라진다는 것이다. 이는 똑같은 토질이라도 지중응력에 따라 과압밀비가 상대적으로 산출되어 현재 공학적인 많은 문제점을 안고 있다. 본 논문에서는 기존의 과압밀비와 더불어 순과압밀하중개념을 도입하여 심도에 따른 과압밀특성을 보다 객관적으로 산출하였다.

순과압밀하중은 선행압밀하중을 구하여 현재 흙이 받고 있는 유효연직응력을 감한 값이며, 따라서, 순과압밀하중을 구하는 식은 다음 식(2.95)와 같다.

$$OCD = \bar{p}_c - p_o = \Delta \bar{p}_c \quad (2.95)$$

OCD는 순선행압밀하중만을 산출한 값이므로 심도에 따른 과압밀특성이 동일하게 나타나며, 침하량산출시에도 과압밀영역과 정규압밀영역이 분리하여 산출되므로 침하량예측에도 장점이 있다.

(4) 압축지수(C_c)

압밀곡선에서 흙의 압축성은 선행압밀압력을 정점으로 바뀐다. 즉 선행압밀 이전의 직선부와 이후의 직선부로 나뉘며 선행압밀 이전의 직선부를 재압축지수(Recompression Index, C_r), 선행압밀이후의 처녀압밀상태의 직선부를 압축지수(Compression Index, C_c)라 한다.

$$C_r = \frac{e_o - e_c}{\log \frac{P_c}{P_o}} : \text{재압축지수}, \quad C_c = \frac{e_c - e_1}{\log \frac{P_1}{P_c}} : \text{압축지수} \quad (2.96)$$

여기서, e_o : 초기간극비, e_c : 선행압밀하중의 간극비, e_1 : 최종간극비
 P_o : 초기지중응력상태, P_c : 선행압밀하중, P_1 : 최종성토시 응력

나. 과압밀 영향인자 분석

과압밀의 영향인자로는 첫째, 지질학적인 침식 또는 인공적인 굴착으로 인한 전응력의 변화, 둘째 지하수위 변동이나 해수면 하강 또는 규칙적인 조수차로 인한 간극수압의 변화, 셋째 2차압밀에 의한 흙 구조의 변화, 마지막으로 이온교환에 의한 화학적 변화가 있으나, 본 논문에서는 조수위의 위상차에 의한 하향침투압과 방조제 축조 이후의 지하수위 변동으로 나누어 연구하였다.

(1) 간조위시의 침투압

연약지반의 대부분은 해안 간사지에 퇴적되며 이 경우 만조위시 조수가 지반위에 있을 경우와 간조위시의 지반선 아래에 조위선이 위치할 경우로 나뉜다.

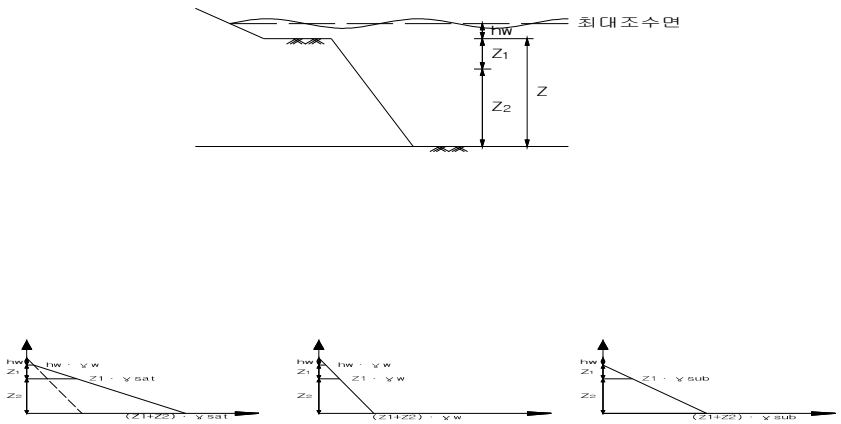


그림 2.17 최대조수면시의 응력분포

해수면이 연약지반위로 있다하더라도 유효응력의 증·감은 발생하지 않는다.

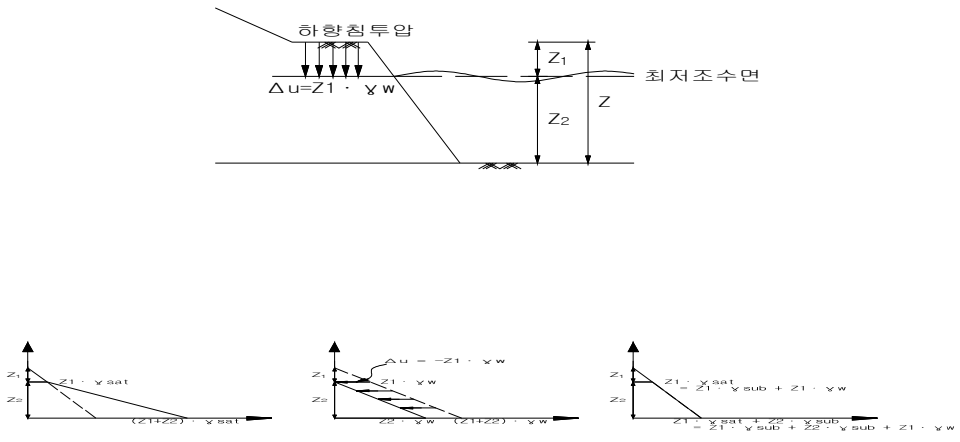


그림 2.18 최저조수면시의 응력분포

해수의 경우, Terzaghi 유효응력이론에 의하면 $\sigma' = \sigma - u + \Delta u$ 이므로 조수가 빠지는 1시간여 동안 지반내에도 침투압 $\Delta u (= z_1 \cdot \gamma_w)$ 만큼 유효응력이 상승하게 된다.

(2) 해수면 하강 후 상승

우리나라의 최근의 빙하기는 15세기로 추정되며 이후 지구 온난화 및 여러 원인으로 인하여 해수면은 계속 상승하는 것으로 나타난다.

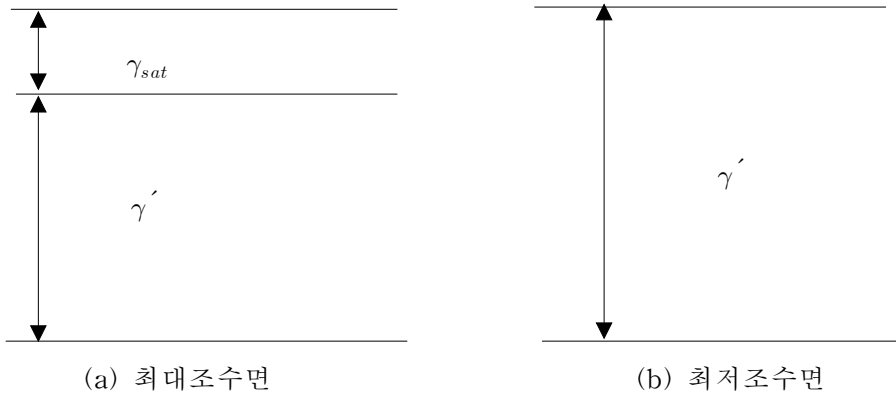


그림 2.19 수위변화에 따른 단위중량의 변화

(3) 화학적 변화

pH, 온도, 염분농도와 같은 환경적 변화와 응고물질(cementing agent)에 의한 강도변화 및 이온교환에 의한 화학적 변화로 나눌 수 있다.

2.2.2 유한요소해석법

가. 연약지반 해석에 대한 압밀모델의 특성

일반적으로 지반상에 축조되는 댐이나 제방 등과 같은 구조물을 해석하는 경우 축조전 구조물의 거동에 대한 예측을 위해서 수치해석적인 방법이 많이 사용되고 있다. 흙의 변형해석이 신뢰받을 수 있는 결과가 되기 위해서는 흙의 응력-변형률 특성해석이 합리적인 방법으로 표현되어야 한다. 그 이유는 응력-변형률 문제가 매우 복잡하고 흙의 거동이 비선형(nonlinear)이고 비탄성(nonelastic)이며 응력에 따라 영향을 크게 받기 때문이다. 따라서 응력-변형률의 특성을 정확하게 고려하기에는 너무나 어렵고 복잡하다.

지반분야의 수치해석에 유한요소법이 도입된 이래로 응력-변형특성을 구성 방정식으로 모델링하는데 있어 여러 가지의 비선형 응력-변형률 모델이 발표되어 왔다. 그 중 대표적인 것으로 Hyperbolic 모델 (Duncan, 1981), Cam-Clay 모델 (Schofield 등, 1968), 수정Cam-Clay 모델 (Roscoe 등, 1968) 등이 있다.

(1) Cam-Clay 모델

흙을 연속적으로 전단하면 최대강도가 발휘된 뒤 체적변화는 발생하지 않고, 일정한 응력아래에서 변형률만이 증가하는 상태를 한계상태라 한다. 이러한 한계상태이론을 바탕으로 Schofield 등(1968)은 Cam-Clay 모델을 제안하였다. 그리고 이들은 Cam-Clay 모델에 대하여 3가지 가정을 세웠다.

첫째, 체적변형률 증분은 일부 회복 가능하지만, 전단변형률 증분은 회복이 불가능하다.

$$\delta \varepsilon_v = \delta \varepsilon_v^e + \delta \varepsilon_v^p, \quad \delta \varepsilon_s = \delta \varepsilon_s^p \quad (2.97)$$

둘째, 항복곡면은 소성포텐셜이다. 즉, 변형률 증분벡터는 항복곡면에 직교한다.

$$\frac{\delta \varepsilon_s^p}{\delta \varepsilon_v^p} = - \frac{1}{dq/dp} \quad (2.98)$$

셋째, 전단중에 소비되는 일은 전부 마찰로 소비된다.

$$p \cdot \delta \varepsilon_v^p = p \cdot \delta \varepsilon_s^p = M \cdot p \cdot \delta \varepsilon_s^p \quad (2.99)$$

여기서, $\delta \varepsilon_v$: 체적변형률

$$\delta \varepsilon_v^e : \text{탄성체적 변형률} \quad (\delta \varepsilon_v^e = -\frac{\delta v^e}{v} = \frac{k}{vp'} \delta p')$$

$$\delta \varepsilon_v^p : \text{소성체적 변형률} \quad (\delta \varepsilon_v^p = \frac{2}{9} \frac{k(1+v)}{vp'(1-2v)} \delta q)$$

$\delta \varepsilon_s$: 전단변형률

$$\delta \varepsilon_s^p : \text{소성 전단변형률} \quad (\delta \varepsilon_s^p = \frac{1}{[M - (\frac{q}{p})]} \delta \varepsilon_v^p)$$

식(2.99)를 $p \cdot \delta \varepsilon_s^p$ 으로 나누면 식(2.100)과 같다.

$$\frac{\delta \varepsilon_v^p}{\delta \varepsilon_s^p} = M - \eta \quad (2.100)$$

정규조건(Normality condition)에 의해 식(2.100)을 식(2.101)로 나타낼 수 있으면, 또한 식(2.100)을 적분하면 식(2.102)와 같이 항복곡선식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dq}{dp} = \frac{\delta \varepsilon_v^p}{\delta \varepsilon_s^p} = -(M - \eta) \quad (2.101)$$

$$q = M \cdot p \cdot \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \quad (2.102)$$

여기서, p_0 : 축차응력이 0일 때의 평균응력

다음 그림 2.20은 Cam-Clay 모델에서의 항복곡적을 보여주고 있다.

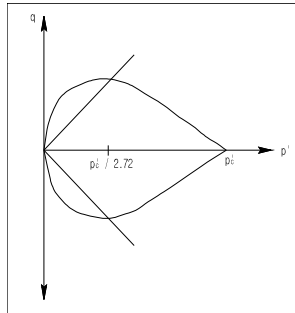


그림 2.20 Cam-Clay 모델에서의 항복곡적
(p, q : 각각 최대, 최소주응력의 합과 차의 평균응력)

(2) 수정 Cam-Clay 모델

Cam-Clay 모델에서 예상된 전단 변형률은 낮은 응력비에서 과대평가하며, 체적팽창비(dilatancy ratio)가 유일한 값을 갖는 모순점을 지니고 있어 실제 시험값과 정확히 일치하지 않는 단점을 내포하고 있다. 이러한 문제점들을 수정하기 위하여 Roscoe & Burland(1968)는 Cam-Clay이론에서 가정한 식(2.99)의 에너지평형방정식을 식(2.103)과 같이 수정하여 수정 Cam-Clay 모델을 제안하였다. Cam-Clay 모델에서는 소산되는 에너지가 전단변형률(shear strain) 향으로만 유도되었으나, 수정 Cam-Clay 모델에서는 소산되는 에너지는 소성체적 변형률(plastic volumetric strain), 전단변형률(shear strain)의 향으로 전개된다.

$$dW = p\sqrt{(d\epsilon_v^p)^2 + (Md\epsilon_s^p)^2} \quad (2.103)$$

에너지평형방정식으로부터 유동법칙을 유도하면 식(2.104)와 같으며, 또한 정규조건을 적용하여 유도하면 식(2.105)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_s^p} = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta} \quad (2.104)$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \quad (2.105)$$

Cam-Clay이론과 동일한 방법으로 식(2.105)를 적분하면, 식(2.106)과 같이 수정 Cam-Clay모델에서의 항복궤적을 구할 수 있다.

$$p = \frac{M^2 p_0}{M^2 + \eta^2} \quad (2.106)$$

수정 Cam-Clay의 항복궤적의 모양은 타원형(그림 2.21 참조)이고, 이것이 Cam-Clay와 수정 Cam-Clay의 주요 차이이다. 이러한 항복궤적의 다른 모양 때문에 등방정규압밀곡선과 한계상태선 사이의 수직거리는 $(\lambda - x)$ 가 아니라 $(\lambda - x)\ln 2$ 가 된다.

체적변형률($d\epsilon_v$)과 전단변형률($d\epsilon_s$)은 각각 다음의 식(2.107) 및 식(2.108)과 같이 유도된다.

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^e + d\epsilon_v^p \quad (2.107)$$

$$= \frac{\lambda}{1+e} \left[\frac{dp}{p} + \left(1 - \frac{x}{\lambda}\right) \frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} d\eta \right]$$

$$d\epsilon_s = \frac{\lambda - x}{1+e} \left(\frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \right) \left[\frac{dp}{p} + \frac{2\eta}{M^2 + \eta^2} d\eta \right] \quad (2.108)$$

다음 그림 2.21은 수정 Cam-Clay 모델에서의 항복궤적을 보여주고 있다.

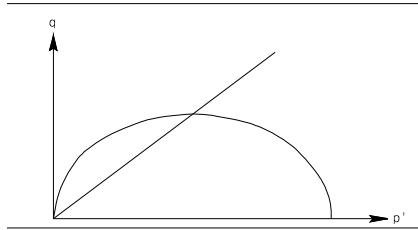


그림 2.21 수정 Cam-Clay 모델에서의 항복궤적

(3) Hyperbolic 모델

Duncan & Chang(1970)은 흙 거동의 비선형(nonlinear), 응력의존성 (stress-dependency)와 비탄성(non-elastic)를 고려하는 간편한 응력-변형률 (stress-strain) 상관관계를 나타내었다.

① 비선형(Nonlinear)

Konder(1963)는 대부분의 흙에 대한 응력-변형률곡선은 다음 그림 2.22과 같이 쌍곡선으로서 잘 나타낼 수 있으며, 다음과 같은 식(2.109)로 제안하였다.

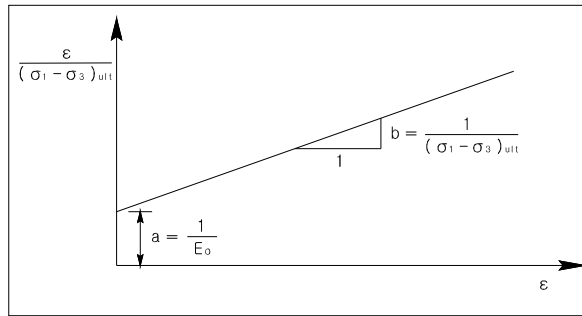


그림 2.22 흙에 대한 응력-변형률 곡선

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{a + b\varepsilon} \quad (2.109)$$

여기서, σ_1 : 최대주응력

σ_3 : 최소주응력

ε : 축변형률

a : 상수 ($= 1/E_i$)

b : 상수 ($= 1/(\sigma_1 - \sigma_3)$)

그림 2.22에서 식(2.109)는 식(2.110)과 같이 변화할 수 있다.

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = a + b\varepsilon \quad (2.110)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (2.111)$$

여기서, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$: 파괴시의 축차응력

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: 극한상태의 축차응력

R_f : 파괴비

식(2.111)과 상수 a, b 의 관계를 식(2.109)에 대입하면

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \cdot \varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \quad (2.112)$$

여기서, E_i : 초기접선탄성계수

② 응력 의존성(Stress-dependency)

비압밀-비배수 조건에서 완전포화토를 제외한 모든 흙은 구속압이 증가하면 응력-변형률 곡선은 경사가 더 급해지고 강도가 더 크게 나타나며, 구속압의 증가에 따라 E_i 와 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 도 증가한다, Janbu(1963)은 E_i 와 σ_3 의 관계를 식(2.113)과 같이 나타내었다.

$$E_i = K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^m \quad (2.113)$$

여기서, K : 상수

P_a : 대기압

m : 상수

K, m은 그림 2.23에서 쉽게 구할 수 있다.

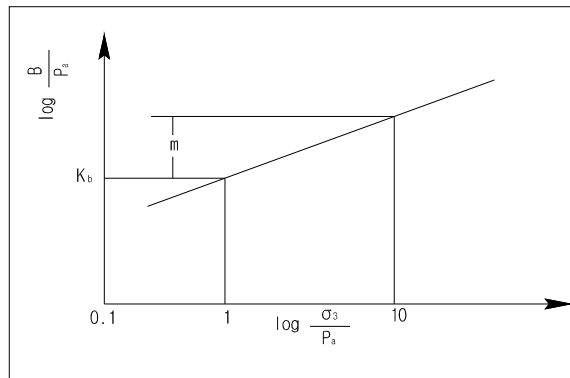


그림 2.23 구속응력에 따른 체적변형계수의 변화

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 와 구속압과의 관계는 다음 그림 2.24의 Mohr-Coulomb의 파괴규준으로부터 식(2.114)와 같이 표현할 수 있다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.114)$$

접선탄성계수(E_t)는 응력-변형률 곡선상의 한점에 대해 계산되어야 함으로 식(2.115)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_t = \frac{\delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\delta\varepsilon} \quad (2.115)$$

식(2.115)에 식(2.112)를 대입하여 미분방정식을 풀면 식(2.116)과 같다.

$$E_t = \frac{\frac{1}{E_i}}{\left[\frac{1}{E_i} + \frac{R_f \cdot \varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2} \quad (2.116)$$

따라서, 식(2.116)에 식(2.112), 식(2.113), 식(2.114)를 대입하여 풀면 식(2.117)과 같다.

$$E_i = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} \right]^2 K P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2.117)$$

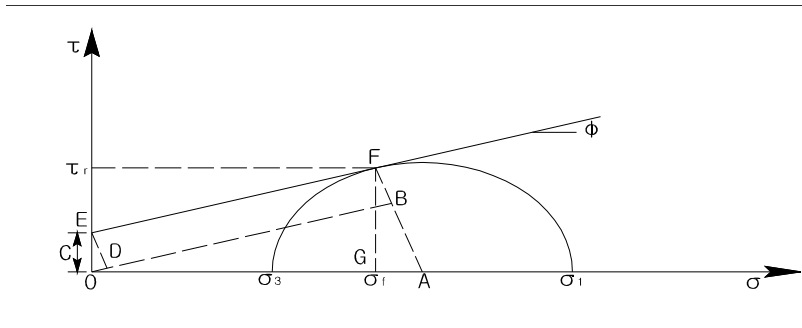


그림 2.24 Mohr-Coulomb의 파괴규준

③ 비탄성 (Inelasticity)

흙에 대해 변형률은 다음 그림에서 보는 바와 같이 제하(unloading)를 하면 단지 일부분만 회복되고, 재제하(reloading)하면 이전의 최대 응력점까지는 거의 탄성적으로 거동한다. 일반적으로 제하/재제하의 강성계수는 근사적으로 거의 같으며 응력 또는 변형률 수준에 종속되지 않는다.

따라서, 쌍곡선 응력-변형률 관계에서 제하-재제하 탄성계수(E_{ur})은 구속 압과의 관계로 식(2.118)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2.118)$$

여기서, K_{ur} : 제하-재제하 상수

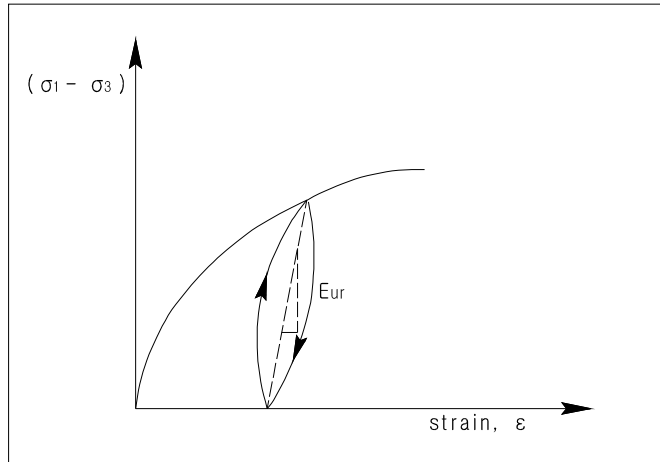


그림 2.25 제하-재제하 응력-변형률 곡선

나. 유한요소해석 프로그램

(1) 프로그램 개요 및 특징

CRISP는 지반공학문제를 해석하기 위한 유한요소 프로그램이다. 본 프로그램의 특징은 2차원, 3차원 및 축대칭 압밀해석을 적용할 수 있으며 압밀이론을 확대한 유한요소법을 적용한 프로그램이다. 또한 지반의 과잉간극수압과 응력분포 및 연직배수공(vertical drain)이 설치된 지역에서의 압밀해석이 가능하다.

외부하중은 시간증분에 따라 일정하게 증가하게 되어 있고, 시공단계를 고려하여 실제 현장상황을 거의 재현할 수 있게 구성되어 있다. 지반공학용 유한요소프로그램인 CRISP는 1975년 Cambridge에서 개발되었다. 개발당시에서는 MZOL로 불리워졌으며, 1976년에는 그 이름이 CRISTINA로 바뀌었다. 그

후 CRISP은 계속 발전하게 되었으며, 1982년에 CRISP (CRITICAL State Program)으로 명명되었다. 1982년 개발된 CRISP version은 CRISP82로 불리워졌으며 세계적으로 여러 연구자들이 많이 사용하게 되었다. 1984년 새로운 version인 CRISP84가 개발되었다. 1990년에는 CRISP93, 1995년에는 windows용인 SAGECRISP이 개발되었다.

(2) 해석종류

장기 압밀변형 해석 프로그램은 1975년 영국 Cambridge 대학 토질역학연구팀에 의해 개발된 한계상태에서의 흙의 거동을 다른 CRISP 프로그램의 기능은 다음과 같다.

- 가. 해석형태 : 2차원 또는 3차원의 평면변형 또는 대칭인 토체의 비배수, 배수 또는 fully-coupled (Biot)압밀해석
- 나. 토질모델 : 탄성모델, 탄소성모델, 한계상태모델
(Cam-Clay, Modified Cam-Clay)
- 다. 요소형태 : 8절점 사각형요소, 6절점 삼각형요소, 20절점 사각형요소 (3차원), 3절점(2절점) 선요소(bar, beam)
- 라. 대변형(large strain)해석 : 단계적(점선강성) 접근, 해석단계에 따라 전단계의 절점(nodal point)의 좌표를 다음단계의 입력좌표로의 이용
- 마. 경계조건 : 요소면에 단계적 변형량이나, 초기간극수압을 지정할 수 있고, 절점에 집중하중과 요소면에 분포하중을 가할 수 있다. 요소가 제거되고 첨가됨에 따라 굴착과 성토를 실시하는 하중을 자동적으로 계산

(3) 압밀해석을 위한 기본 방정식

흙속의 물은 Darcy's 법칙에 의해 흐르고 있으며, 이를 수식으로 나타내면 식(2.119), 식(2.120)과 같다.

$$V_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{k_x}{r_w} \frac{d\bar{u}}{\partial x} \quad (2.119)$$

$$V_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{k_y}{r_w} \frac{d\bar{u}}{\partial y}$$

여기서, k_x : x방향의 투수계수 k_y : y방향의 투수계수

V_x : x방향의 유량 V_y : y방향의 유량

식(2.120)은 2차원 연속체 평형미분방정식을 나타내고 있다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = \omega_x \quad (2.120)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \omega_y$$

그리고, 응력-변형률과의 관계는 식(2.121)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \sigma' = D \cdot \Delta \varepsilon \quad (2.121)$$

여기서, D : 탄성 매트릭스

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

식(2.119)와 식(2.120)을 조합하면 두 개의 미분방정식을 얻을 수 있다.

하나는 평형을 위한 방정식이며, 또 하나는 물의 흐름을 위한 방정식이다. 이러한 적분방정식은 가상일의 원리(virtual work) 또는 Galerkin's weighted 방법을 이용하고 있다. 그리고 유한요소 이산화(discretization)는 다음 식(2.122)와 같이 유도될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} = N \underline{a} \quad (2.122)$$

$$\bar{u} = \bar{N} \underline{b}$$

여기서, \underline{d} , \bar{u} : 전체절점의 변위, 간극수압

N , \bar{N} : 절점의 수와 형상함수

\underline{a} , \underline{b} : 절점에서의 변위 및 과잉간극수압

적분방정식에서 근사해를 유도하여 시간에 관하여 적분하면 다음의 식

(2.123)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{L} \\ \mathbf{N}^T & -\phi\Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{a} \\ \Delta \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{r}_1 \\ \Delta \mathbf{r}_2 \end{bmatrix} \quad (2.123)$$

이러한 방정식은 증분형식(incremented form)을 취하고 있으며, 본 프로그램(CRISP)에서 압밀해석을 수행할 경우, 해석에 이용된 전시간을 증분수로 분할하는 것이 필요하다.

(4) 프로그램의 구성

다음 그림 2.26은 CRISP 프로그램의 흐름도를 나타내고 있다. 이것은 세 개의 CRISP 모듈(CRISPSQ, CRISPGP, CRISPMP)사이에서 데이터 흐름을 나타내고 있다.

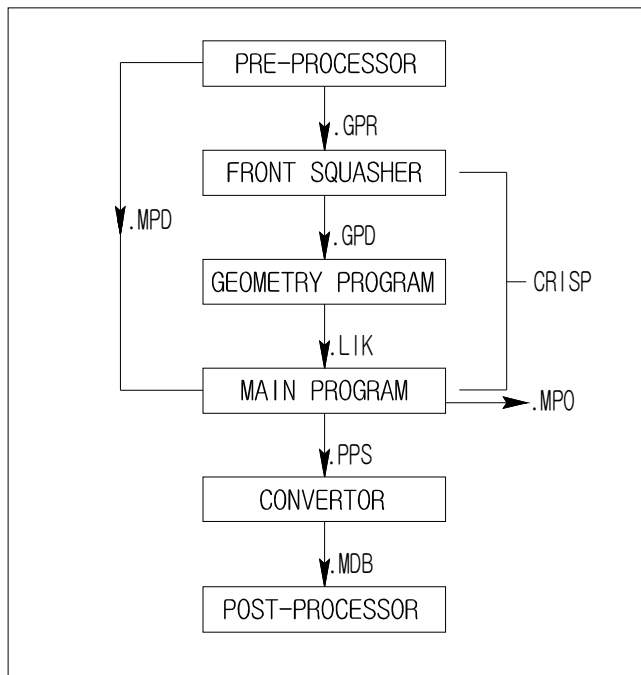


그림 2.26 CRISP의 pre-processor 및 post-processor 흐름도

가. The frontwidth mininiser (Squasher) CRISPSQ : Squasher는 frontal solution 방법을 이용하여 요소(element)수를 재계산한다.

Squasher에 의해 생성된 결과는 geometry program의 입력치로 이용된다.

나. The geometry program CRISP : CRISPGP CRISPSQ에 의해 생성된 파일명.gpd 파일을 이용하여 새로운 요소와 요소형태를 형성한다. 그리고 이 결과는 두 개의 파일(link, gpo)에 저장된다.

다. The main program CRISPMP : CRISPMP는 주해석 프로그램이다. CRISPMP는 Link과 해석데이터 파일(mpd, 매개변수, 초기응력, 경계조건 및 하중조건 등)을 읽어 연산을 수행한다. 그리고 해석결과는 mpo파일에 저장된다.

2.2.3 일원배치법을 이용한 통계분석

(1) 일원배치법(One-way Factorial Design)의 개념

계측자료를 통계적 방법을 사용하여 영향인자를 명확히 하고 해석에 이용하여 결론을 명확히 해석할 수 있을 뿐만 아니라 분석하기도 용이하게 하기 위함이다.

(가) 목적

일원배치법은 어떤 관심있는 특성치에 대한 하나의 인자의 영향을 조사하기 위하여 쓰이는 계획법으로 가장 단순한 실험계획법이다.

일원배치법은 주로 반응값에 많은 인자가 영향을 주고 있다고 인정되지만 어떤 특정한 하나의 인자만의 영향을 조사하고자 할 때와 반응값에 영향을 주는 여러 인자의 조사가 어느 정도 진척되고 이들 인자의 정해진 조건에서 반응값에 큰 영향을 주리라고 예상되는 남은 인자의 영향을 조사하고자 할 때 많이 이용된다.

(나) 특징

일원배치법의 특징은 크게 세가지로 나눌 수 있으며, 첫째 수준수와 각 수준에서 취해지는 측정치의 반복수에는 제한이 없으나, 수준수는 3 ~ 5 수준, 반복수는 3 ~ 10회 정도를 많이 사용한다는 점과 둘째, 반복수는 모든 수준에 대하여 같지 않아도 되고 결측치가 있어도 이를 추정하여 넣어 줄 필요가 없으며 그대로 해석한다는 점이다.

마지막으로 실험의 측정은 실험의 장 전체를 완전히 랜덤화하여 모든 반응값을 랜덤한 순서에 의해 구해 주어야 한다는 점이다.

- ☞ 실험의 랜덤화(randomization)는 DOE에서 매우 중요한 특징이다. 일원 배치법은 이것을 충실히 따라서 계획을 하는데 이런 이유로 완전확률화계획법(completely randomized design)이라고도 부른다.

(다) 랜덤화 계획

인자 A가 3 수준으로 이루어져 있고 4회의 반복을 하는 일원배치법을 계획하면 다음 표 2.4와 같이 번호를 부여할 수 있다.

표 2.4 랜덤화를 위한 번호 부여

	회	인 자 수 준		
		A ₁	A ₂	A ₃
실험의 반복	1	①	⑤	⑨
	2	②	⑥	⑩
	3	③	⑦	⑪
	4	④	⑧	⑫

(라) 랜덤화의 목적

만약 실험의 순서를 위의 표와 같이 부여하고 그대로 실험한다면 번호 ①

~ ④는 오늘 시험하고, ⑤ ~ ⑧은 내일, ⑨ ~ ⑫은 모래 또는 공휴일이 있는 경우는 그 다음날 실험이 진행될 수 있다. 이 경우 인자 A의 수준 간의 차이가 일수가 다름으로 인해 발생하는 일간의 차이와 서로 교란(confounding)된다. 이로 인해 인자 A의 수준 간의 차이를 명백히 아는데 방해요인으로 작용한다. 그러나, 완벽한 무작위성(completely randomized)에 의해 일간의 차이는 서로 상쇄되어 인자수준 간의 차이와 교란(confounding)되지 않으며, 인자수준 간의 차이를 독립적으로 구할 수 있다.

(2) 데이터의 구조(Data Structure)

인자의 수준이 1개 (A_1, A_2, \dots, A_l)이고 각 level에서 반복수가 똑같이 m 인 일원배치법의 데이터는 다음 표 2.5와 같이 배열한다.

표 2.5 One-way Factorial Design의 배열

구 분	인 자 수 준 (l)					비 고
	A_1	A_2	A_3	...	A_l	
실험의 반 복 (m)	x_{11} x_{12} x_{13} ... x_{1m}	x_{21} x_{22} x_{23} ... x_{2m}	x_{31} x_{32} x_{33} ... x_{3m}	...	x_{l1} x_{l2} x_{l3} ... x_{lm}	
합 계	T_1	T_2	T_3	...	T_l	T
평 균	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	...	\bar{x}_l	\bar{x}

여기서, T_i : A_i 에서의 m 개 데이터의 합계 $T_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}$ (2.124)

\bar{x}_i : A_i 에서의 m 개 데이터의 평균 $\bar{x}_i = \frac{T_i}{m}, i = 1, 2, \dots, l$ (2.125)

$$T : lm \text{ 개의 전체 데이터의 합 } T = \sum_{i=1}^l T_i \quad (2.126)$$

$$\bar{x} : lm \text{ 개의 전체 데이터의 평균 } \bar{x} = \frac{T}{l \cdot m} \quad (2.127)$$

A_1 수준에서 m 개의 데이터에 대한 식을 나타내면,

$$x_{1j} = \mu_1 + e_{1j}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.128)$$

여기서, μ_1 : A_1 수준에서의 모평균

e_{1j} : 실험오차에 상당하는 부분으로 확률분포 $N(0, \sigma_E^2)$ 을 따르고, 서로 독립인 무작위 인자(random factor)

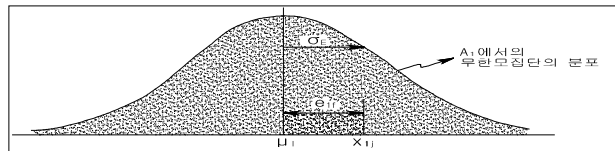


그림 2.27 수준 A_1 의 데이터

또한, 인자수준 1개에 대해 데이터 x_{ij} 를 일반화하여 나타내면

$$x_{ij} = \mu_i + e_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, l, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.129)$$

여기서, e_{ij} : $N(0, \sigma_E^2)$ 을 따르고 서로 독립인 무작위 인자

전체의 모평균 μ 를 이용하여 식(2.129)를 다시 다음 식(2.130)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \mu_i + e_{ij} \\ &= \mu + (\mu_i - \mu) + e_{ij} \\ &= \mu + a_i + e_{ij} \end{aligned} \quad (2.130)$$

여기서, $\mu = \sum_{i=1}^l \frac{\mu_i}{l}$: 전체 모평균

$$a_i = \mu_i - \mu \quad (2.131)$$

식(2.131)의 a_i 는 수준 i 에서의 모평균 μ_i 가 전체의 모평균 μ 로부터 어느 정도의 치우침을 가지는가를 나타내는 수치로 인자 A 의 주결과(main effect)라고 부른다.

주결과 a_i 의 합은 다음 식(2.132)와 같다.

$$\sum_{i=1}^1 a_i = \sum_{i=1}^1 (\mu_i - \mu) = 1 \left[\sum_{i=1}^1 \frac{\mu_i}{1} - \mu \right] = 0 \quad (2.132)$$

따라서, 식(2.130)을 요약하면 다음 식(2.133)과 같이 나타낼 수 있고, 이를 일원배치법의 자료구조식(data structure)이라고 한다.

$$x_{ij} = m + a_i + e_{ij} \quad \left(\text{단, } \sum_{i=1}^1 a_i = 0 \right) \quad (2.133)$$

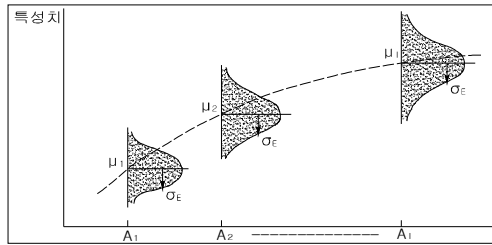


그림 2.28 각 수준에서의 데이터의 분포

(3) 오차(Error)항의 특성

식(2.133)에 나타나 있는 e_{ij} 는 A_i 에서 j 번째 측정된 데이터 x_{ij} 가 수반하는 에러로서 확률변수이다.

① 오차항의 모평균과 분산

- e_{ij} 는 랜덤하게 변하는 값이며 모평균과 분산은 다음과 같다.

$$E(e_{ij}) = 0, \quad \text{Var}(e_{ij}) = \sigma_E^2$$

- e_{ij} 의 분산 σ_E^2 의 정의는 다음 식(2.134) 및 식(2.135)와 같은 식으로 표현된다.

$$(a) \sigma_E^2 = E(e_{ij} - E(e_{ij}))^2 = E(e_{ij} - 0)^2 = E(e_{ij}^2) \quad (2.134)$$

$$(b) \sigma_E^2 = E\left(\frac{1}{lm-1} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m (e_{ij} - \bar{e})\right) \quad (2.135)$$

$$\text{여기서, } \bar{e} = \left(\frac{1}{lm}\right) \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m e_{ij}$$

② 오차항의 성질

e_{ij} 를 $N(0, \sigma_E^2)$ 으로부터 확률추출(random sampling)된 것이라는 가정으로부터 다음의 성질을 갖는다.

(a) Normality : e_{ij} 의 분포는 정규분포를 따른다.

(b) Independence : 임의의 e_{ij} 와 e_{kl} 은 서로 독립적이다.

$$(i \neq k \text{ or } j \neq l)$$

(c) Unbiasedness : e_{ij} 의 기대값은 0이고 편의는 없다.

(d) Equal Variance : e_{ij} 의 분산은 σ_E^2 으로 어떤 i, j 에 대해서도 일정하다.

2.3 조석변화와 압밀방정식

2.3.1 조석변화에 의한 유효응력변화

압밀과정 중에 발생하는 침하량을 결정하는 문제와 더불어 압밀의 진행속도를 파악하는 것이 대단히 중요하다. 압밀과정의 진행속도를 규명하기 위해서는 근본적으로 시간에 따른 침하량을 직접적으로 예측하는 것이 아니라, 상재하중으로 발생한 과잉간극수압의 소산정도를 바탕으로 판단한다. 즉, 무한등분포하중 q 가 작용하면 초기에 하중 q 만큼의 과잉간극수압이 생성되며,

시간이 지남에 따라 생성된 과잉간극수압은 소산된다. 과잉간극수압의 소산 부분만큼 유효응력이 증가하며, 실제로 지반의 변형을 일으키는 것은 흙입자에 가해지는 유효응력의 변화 때문이므로, 과잉간극수압의 소산정도를 파악하면 압밀과정의 진행속도를 예측할 수 있다.

이러한 압밀현상은 흙의 변형과 투수현상이 결합하여 발생되고 압밀이론을 설명하기 위해서 토립자와 간극수는 비압축성이라는 가정을 토대로 포화 점토의 압밀현상을 설명하고 있다. 그리고 이를 수학적으로 표현하기 위해서 간극수의 변동규칙, 연속조건식, 적합방정식, 점토의 구성방정식, 변형률의 적합조건, 간극수와 흙 골조의 응력분담규칙 등과 같은 조건식이 필요하다.

가. Terzaghi의 1차원 압밀방정식

(1) 1차원 압밀 방정식의 유도

외부하중으로 인하여 유발된 과잉간극수압이 소산되는 과정을 시간과 깊이의 함수로서 나타낸 1차원 압밀방정식이 Terzaghi(1925)에 의해 발표되었는데, 이 압밀방정식의 유도과정에서 가정한 내용들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 흙은 균일하다.
- ② 흙은 완전히 포화되어 있다.
- ③ 흙입자와 물의 압축성은 무시할 수 있을만큼 작다.
(즉, 흙입자와 물 자체는 압축성이 없고 흙입자의 파괴 또한 발생하지 않는다.)
- ④ 미소 흙요소의 거동은 큰 토체의 거동과 비슷하다.
- ⑤ 압축은 1차원 수직방향으로 발생하며 횡방향변위는 구속되어 있다.
- ⑥ 물의 흐름도 수직방향으로만 일어난다.
- ⑦ Darcy의 법칙이 유효하며 투수계수는 일정하다.
- ⑧ 흙의 압밀특성은 압밀하중의 크기와 무관하게 일정하다.
- ⑨ 유효응력과 간극비는 선형적 비례관계를 갖는다.
- ⑩ 변형이 작게 발생한다.
- ⑪ 유효응력의 법칙을 따른다.

- ⑫ 토체는 에너지불변의 법칙을 따른다.
- ⑬ 흙의 성질은 시간에 따라 변하지 않는다.

전술한 가정들의 유효성에 대해 살펴보면 ①, ②, ③은 토질역학에서 흔히 사용되는 보편적인 가정들이며, ④는 이론적 모형화를 위한 방편으로서 큰 토체의 경우 비균질한 경우가 많으나 ①의 가정에 의해 정당화된다고 볼 수 있다. ⑤와 ⑥은 횡방향변위가 구속된 실내 1차원 압밀시험에서는 유효하나 변위구속조건이 다양한 현장에 적용할 때는 유효성을 신중히 검토해야 한다. ⑦과 ⑧은 엄밀히 말한다면 압력의 변화에 따라 달라질 수 있지만 거시적으로는 가정의 유효성에 큰 문제는 없다. ⑨의 가정은 유효응력의 미소증분에 대해서는 유효하지만 압력변화범위가 클 경우에는 문제가 된다. 그리고, 압력-변형율의 관계를 비선형으로 볼 경우 실제거동에 근사하게 접근할 수 있지만 해석이 지나치게 복잡해지는데 비해 기여도는 그리 크지 않다.

Terzaghi의 일차원 압밀방정식을 유도해 보면 다음과 같다.

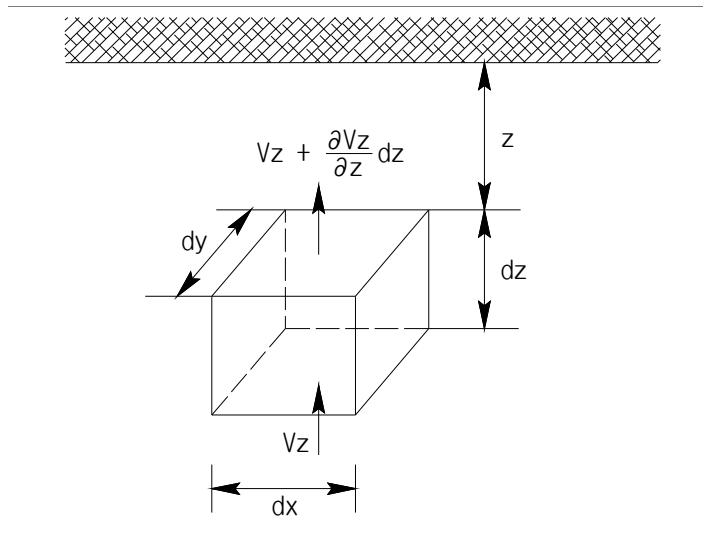


그림 2.29 압밀방정식을 유도하기 위한 미소육면체

그림 2.29에서 미소입방체에 유입되는 단위유량과 유출되는 단위유량은 다음 식(2.136), 식(2.137) 및 식(2.138)과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{in} = V_z dx dy \quad (2.136)$$

$$q_{out} = (V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz) dx dy \quad (2.137)$$

$$q_{in} - q_{out} = \Delta q = - \frac{\partial V_z}{\partial z} dx dy dz \quad (2.138)$$

또한, 시간에 따른 체적변화율 ($\frac{\partial V}{\partial t}$)은 다음 식(2.139)와 같이 유도된다.

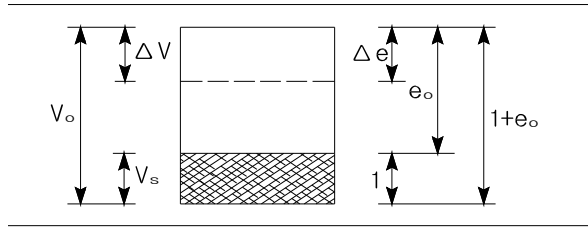


그림 2.30 압밀에 따른 체적변화

$$\frac{\Delta V}{V_o} = \frac{\Delta e}{1+e_o} \quad (2.139)$$

$$\therefore \Delta V = \frac{V_o}{1+e_o} \Delta e = \frac{dx dy dz}{1+e_o} \Delta e$$

따라서, 체적변화 (ΔV)를 시간(t)로 편미분하면 시간에 따른 체적변화율을 다음 식(2.140)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{dx dy dz}{1+e_o} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.140)$$

결국 시간에 따른 체적변화율은 유입되는 단위유량과 유출되는 단위유량의 차와 같아지므로,

$$- \frac{\partial V}{\partial t} dx dy dz = \frac{dx dy dz}{1+e_o} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.141)$$

여기서, 양변의 $dx dy dz$ 를 소거하면, 다음 식(2.142)와 같다.

$$-\frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{1}{1+e_o} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.142)$$

또한, 가정사항에서 Darcy의 법칙이 유효하므로 속도는 다음 식(2.143)과 같이 구할 수가 있다.

$$V_z = ki_z = k\left(-\frac{\partial h}{\partial z}\right) = -k\frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.143)$$

여기서, h : 전수두, k : 투수계수, i_z : 동수경사

깊이에 따른 속도 변화를 구하기 위해 속도(V_z)를 깊이 (z)로 편미분하면

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-k\frac{\partial h}{\partial z}\right) = -k\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (2.144)$$

식(2.140)을 식(2.142)에 대입하면 다음 식(2.145)와 같은 연속방정식을 얻을 수 있다.

$$k\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e_o} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.145)$$

Terzaghi의 일차원 압밀방정식을 유도하기 위한 평형조건, 응력-변형률 조건, 연속조건은 다음과 같다.

$$\text{평형조건} : \sigma_v = \gamma z + \text{surface stress} \quad (2.146)$$

$$\text{응력-변형률 조건} : \frac{\partial e}{\partial \sigma'} = -a_v \quad (2.147)$$

$$\text{연속조건} : k\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e_o} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.148)$$

앞에서 언급한 전수두 h 는 압력수두(h_p)와 위치수두 (h_e)의 합으로 나타내어진다.

$$h = h_e + h_p = h_e + \frac{1}{\gamma_w}(u_{ss} + u_e) \quad (2.149)$$

여기서, u_{ss} : 정상상태 간극수압

u_e : 과잉간극수압

정의에 의해 $\frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2} = 0$ 이고, 깊이에 따라 간극수압이 선형적으로 변화한다면

$$\frac{\partial^2 u_{ss}}{\partial z^2} = 0 \text{ 이 된다.}$$

$$\therefore \frac{\partial^2 h_e}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (2.150)$$

그러므로, 식(2.150)을 식(2.145)에 대입하면 다음 식(2.151)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e_o} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.151)$$

그런데, 응력-변형을 조건에서 $\frac{\partial e}{\partial \sigma'} = -a_v$ 이므로 식(2.151)은 다음 식(2.152), 식(2.153) 및 식(2.154)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = -\frac{a_v}{1 + e_o} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (2.152)$$

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = -m_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (2.153)$$

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = -\frac{\partial \sigma'}{\partial t} \quad (2.154)$$

$$\left(\because m_v = \frac{a_v}{1 + e_o}, \quad C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \right)$$

유효응력의 항을 시간에 대해 편미분하면 다음 식(2.155)과 같다.

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \left(\frac{\partial u_{ss}}{\partial t} + \frac{\partial u_e}{\partial t} \right) \quad (2.155)$$

여기서, $\frac{\partial u_{ss}}{\partial t} = 0$ 이므로

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.156)$$

식(2.152)를 식(2.154)에 대입하면 다음 식(2.157)과 같이 구해진다.

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (2.157)$$

평형조건이 $\sigma = \gamma z + q$ (=surface stress)이므로 이를 시간에 대해 편미분하면 다음 식(2.158)과 같다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial t} \quad \left(\because \frac{\partial}{\partial t}(\gamma z) = 0 \right) \quad (2.158)$$

따라서, 식(2.157)을 식(2.158)에 대입하면 다음 식(2.159)와 같은 방정식을 구할 수 있다.

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.159)$$

여기서, surface stress의 조건에 따라 Terzaghi의 일차원 압밀방정식은 다음과 같이 두 가지 경우로 구분할 수 있다. 그림 2.31에서와 같이 surface stress를 순간재하하중(instantaneous loading)으로 가정할 경우 ($\frac{\partial q}{\partial t} = 0$)는 최종적으로 식(2.160) 형태의 1차원 압밀방정식을 얻을 수 있고, 반면 다음 2.3.2절의 그림 2.32와 같이 surface stress를 점증재하하중(ramp loading)으로 가정할 경우($\frac{\partial q}{\partial t} \neq 0$), 식(2.161)과 같은 형태의 최종적인 압밀방정식을 얻을 수 있다.



(a) 순간재하하중

(b) 점증재하하중

그림 2.31 하중재하조건

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.160)$$

$$C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.161)$$

2.3.2 유효응력 변화에 의한 압밀방정식

가. 초기과잉간극수압(u_i)를 고려하지 않은 경우

다음 그림 2.32에서와 같이 z 는 표면에서 아래로 향하여 측정되는 깊이이고, 배수조건은 양면배수이고, H 는 점토층 중간에서 최대배수거리를 나타낸다. 또한, 방정식을 풀기 위한 경계조건은 다음과 같다.

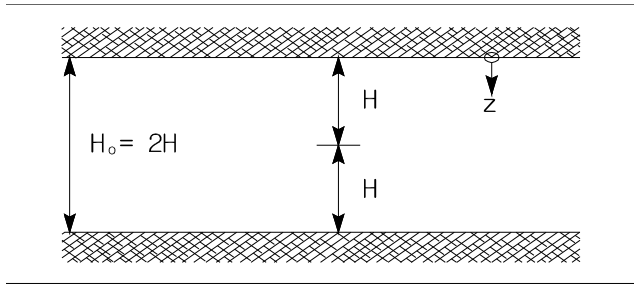


그림 2.32 1차원 압밀형태

- ▷ $t = 0$ 에서 $u_e = u_i$ (임의의 깊이에서의 초기과잉간극수압)
- ▷ $z = 0$ 에서 $u_e = 0$
- ▷ $z = 2H$ 에서 $u_e = 0$

과잉간극수압은 깊이 (z)와 시간 (t)의 함수이므로 변수분리법을 적용하여 다음 식(2.162)로 나타낼 수 있다.

$$u_e = F(z)G(t) \quad (2.162)$$

식(2.162)를 식(2.160)의 좌변에 대해 정리하면

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = F(z) \frac{\partial}{\partial t} G(t) = F(z) G'(t) \quad (2.163)$$

우변을 정리하면 다음 식(2.164)와 같이 표현된다.

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_v \frac{\partial^2}{\partial z^2} F(z)G(t) = C_v F''(z)G(t) \quad (2.164)$$

따라서, 결국 다음 식(2.165)와 같이 정리된다.

$$F(z)G'(t) = C_v F''(z)G(t) \quad (2.165)$$

이것을 좀더 정리하면 다음 식(2.166)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{F''(z)}{F(z)} = \frac{G'(t)}{C_v G(t)} \quad (2.166)$$

식(2.166)의 좌우변은 각각 z 와 t 만의 함수이므로, 이 식이 성립되기 위해서는 상수값이 되어야 하므로 다음 식(2.167)과 같다.

$$\frac{F''(z)}{F(z)} = \frac{G'(t)}{C_v G(t)} = -A^2 \quad (2.167)$$

식(2.166)의 좌변에 대해서 풀면 다음 식(2.168)과 같다.

$$F''(z) = -A^2 F(z) \quad (2.168)$$

따라서, 일반해는 식(2.169)와 같다.

$$F(z) = C_1 \cos Az + C_2 \sin Az \quad (2.169)$$

여기서, C_1, C_2 : 임의의 상수

한편 우변에 대해 풀면 다음 식(2.170)과 같다.

$$G'(t) = -A^2 C_v G(t) \quad (2.170)$$

여기서, 일반해는 다음 식(2.171)과 같다.

$$G(t) = C_3 \exp(-A^2 C_v t) \quad (2.171)$$

식(2.170)과 식(2.171)을 과잉간극수압에 대해 정리하면 식(2.172)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u_e &= (C_1 \cos Az + C_2 \sin Az) C_3 \exp(-A^2 C_v t) \\ &= (C_4 \cos Az + C_5 \sin Az) \exp(-A^2 C_v t) \end{aligned} \quad (2.172)$$

여기서, $C_4 = C_1 \cdot C_3$, $C_5 = C_2 \cdot C_3$

경계조건 $z = 0$ 에서 $u_e = 0$ 에 의해 식(2.172)는 다음 식(2.173)과 같다.

$$u_e = (C_4 \cos Az + C_5 \sin Az) \exp(-A^2 C_v t) = 0 \quad (2.173)$$

$$\therefore C_4 = 0$$

$C_4 = 0$ 을 식(2.173)에 대입하면 다음 식(2.174)를 얻을 수 있다.

$$u_e = C_5 (\sin Az) \exp(-A^2 C_v t) \quad (2.174)$$

경계조건 $z = 2H$ 에서 $u_e = 0$ 에 의해 다음의 식(2.175)가 성립한다.

$$u_e = C_5 \sin 2AH \exp(-A^2 C_v t) = 0 \quad (2.175)$$

식(2.175)가 성립하기 위해서는 $C_5 \cdot \sin 2AH = 0$ 또는 $2AH = n\pi$ (n 은 정수)

이므로 $A = \frac{n\pi}{2H}$ 를 대입하면,

$$u_e = C_5 \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp(-n^2 \pi^2 C_v t / 4H^2) \quad (2.176)$$

n 을 1부터 식(2.176)에 대입하면 다음 식(2.177)과 같은 일련의 해를 구할 수 있다.

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 C_v t}{4H^2}\right) \quad (2.177)$$

여기서, B_n : 임의의 상수

식(2.177)은 경계조건 $t = 0$ 에서 $u_e = u_i$ 에 의해 다음 식(2.178)과 같이 표현된다.

$$u_i = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad (2.178)$$

이 식은 Fourier의 sine 급수이므로 B_n 을 구하면 다음 식(2.179)와 같다.

$$B_n = \frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \quad (2.179)$$

다시 식(2.179)를 식(2.177)에 대입하면 1차원 압밀방정식의 일반해는 식(2.180)과 같다.

$$u_n = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \quad (2.180)$$

여기서, $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$: 시간계수 (time factor)

이상의 과정에서는 점토층의 깊이에 대해 초기과잉간극수압(u_i)의 변화를 고려하지 않았지만 다음과 같이 간극수압분포에 대하여 초기과잉간극수압(u_i)의 변화를 고려한 일차원압밀방정식에 대한 일반해는 다음과 같이 표현된다.

나. 깊이에 따라 초기과잉간극수압(u_i)이

일정하게 증분한 경우

그림 2.33과 같이 양면배수이고 u_i 가 일정한 경우에 대해서 알아보면, $u_i = u_o = q$ 이므로 식(2.180)에서,

$$\frac{1}{H} \int_0^{2H} u_o \sin \frac{n\pi z}{2H} dz = \frac{2u_o}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \quad (2.181)$$

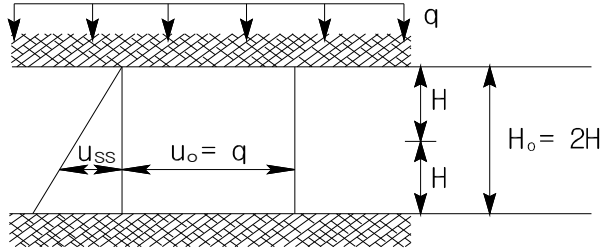


그림 2.33 깊이에 따라 u_i 가 일정한 경우

식(2.181)을 식(2.180)에 대입하면 다음 식(2.182)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_o}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \quad (2.182)$$

상기 식에서 n 이 짝수이면 $u_e = 0$ 이 되므로 $u \neq 0$ 이기 위해서 $n = 2m + 1$ 라고 놓으면 다음 식(2.183)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} u_e &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_o}{(2m+1)\pi} [1 - \cos(2m+1)\pi] \sin \frac{(2m+1)\pi z}{2H} \exp\left[-\frac{(2m+1)^2 \pi^2 T_v}{4}\right] \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_o}{M} \left(\sin \frac{Mz}{H}\right) \exp(-M^2 T_v) \end{aligned} \quad (2.183)$$

여기서, $M = (2m+1)\pi/2$, $T_v = C_v \cdot t/H^2$

다. 깊이에 따라 초기과잉간극수압(u_i)이
선형적으로 변화하는 경우

깊이에 따라 초기과잉간극수압(u_i)이 그림 2.34와 같이 선형적으로 변화할 경우 u_i 에 대한 식은 다음 식(2.184)와 같다.

$$u_i = u_1 + u_2 \frac{H-z}{H} \quad (2.184)$$

식(2.180)에 대해서 풀면 다음 식(2.185)과 같다.

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{H} \int_0^{2H} (u_1 + u_2 \frac{H-z}{H}) \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right] \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \quad (2.185)$$

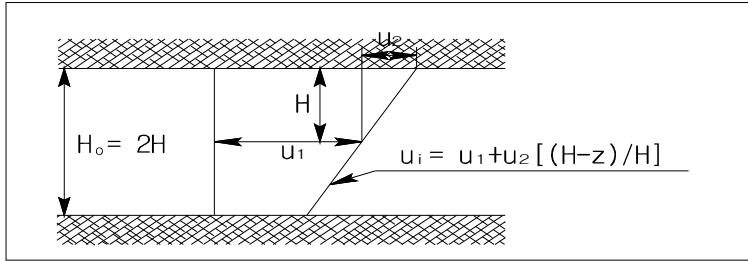


그림 2.34 깊이에 따라 u_i 가 선형적으로 변하는 경우

라. 깊이에 따라 초기과잉간극수압(u_i)이 사인곡선형분포
(*sinusoidal variation*)로 변하는 경우

초기과잉간극수압(u_i)이 그림 2.35와 같이 사인곡선형 분포로 변화할 경우 u_i 에 대한 식은 다음 식(2.186)과 같다.

$$u_i = u_3 \sin \frac{\pi z}{2H} \quad (2.186)$$

식(2.180)에 대해서 풀면 다음 식(2.187)와 같다.

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{H} \int_0^{2H} (u_3 \sin \frac{\pi z}{2H} \sin \frac{n\pi z}{2H} dz) \right] \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \quad (2.187)$$

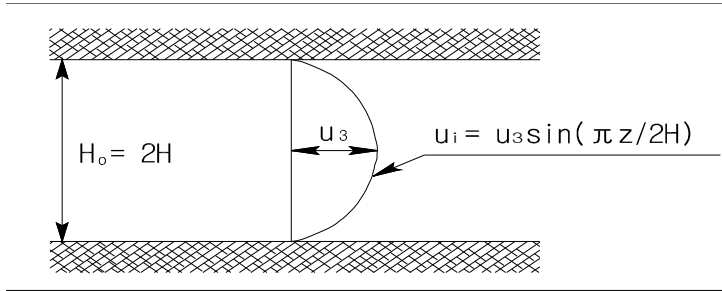


그림 2.35 깊이에 따라 u_i 가 사인곡선형 분포로 변하는 경우

마. 조석에 의한 압밀방정식 제안

본 연구에서의 시간에 따른 조석변화를 고려한 침하특성을 통하여 압밀방정식을 제안하고자, 다음과 같은 절차로 진행하였다.

- 첫째, 비교대상지역의 선정에 있어서 최근의 연약지반조성공사가 진행중인 2개지역을 선정하였으며, 그에 따른 계측자료와 실내시험결과의 비교를 수행하였으며,
- 둘째, 국립해양조사원의 조석자료(인천, 목포) 및 기본수준점 성과표분석을 통한 현지반에 미치는 조석영향시간의 산정하였고,
- 셋째, 조석분석에 따른 원지반고와 조석의 M.S.L의 결과를 반영한 유한요소해석을 통한 시간별 압밀침하량의 산정하였으며,
- 넷째, 해석결과에 따른 침하양상의 원인제시 및 분석수행하여
- 마지막으로 시간별 심도-압밀도곡선분석을 통한 연약점토지반에 미치는 조석변화의 영향을 수식화하였다.

제3장 사례지역의 지반공학적 특성

3.1 영산강 하구언지역

가. 연약층 분포

영산강 하구언지역의 연약지반 분포현황은 다음 그림 3.1과 같으며 연약지반두께는 평균 15m, 깊은 곳은 25m까지 분포하며 남창천 방향, 그리고 영산강 방향으로 갈수록 연약층후가 깊어지고, 대죽도를 중심으로 대죽도 좌측보다 우측의 연약층후가 다소 깊어진다.

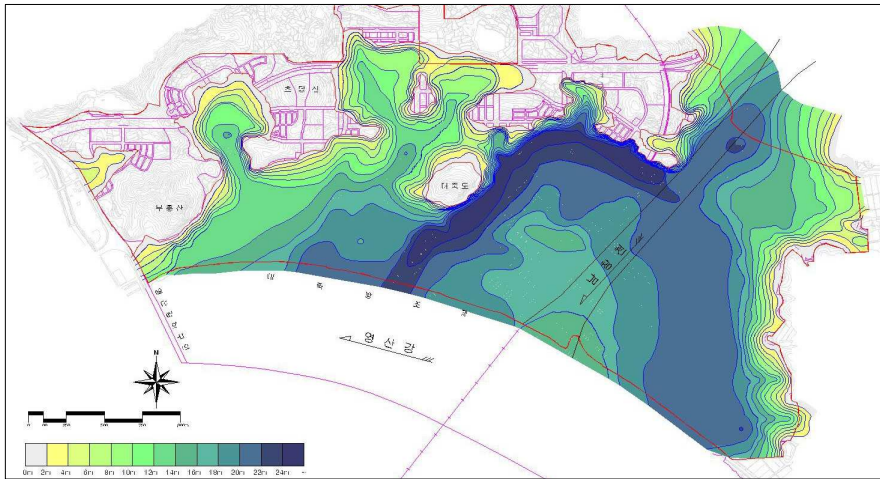


그림 3.1 남악신도시의 연약지반 층후도

나. 연약지반 구역구분

연구대상지역의 구역구분은 그림 3.2와 같이 평균해수면보다 지반고가 높은 곳을 지역에 따라 1, 2구역으로 구분하였고, 지반고가 평균해수면보다 낮고 연약층후가 20m이하 곳은 3구역, 20m이상인 지역은 4구역으로 구분하였다.

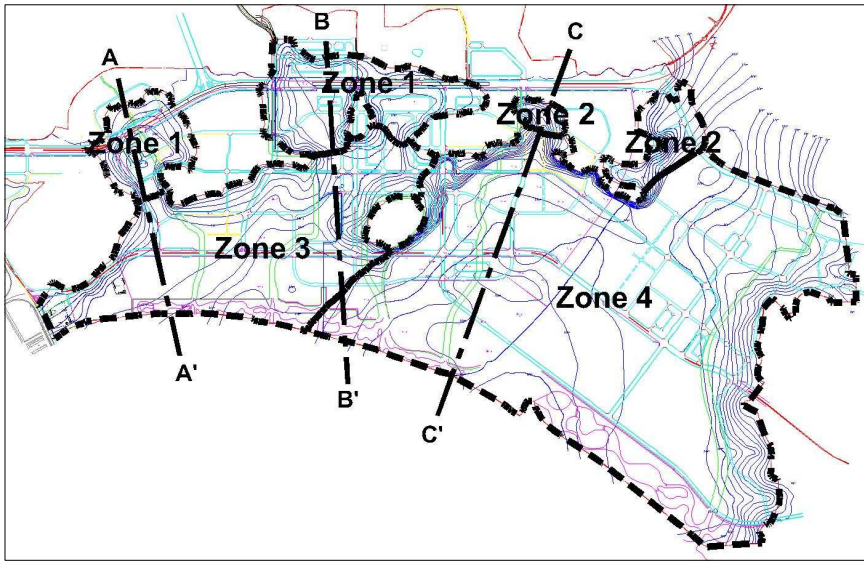


그림 3.2 남악신도시의 연약지반 구역구분도

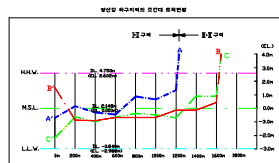


그림 3.3 영산강 하구언지역의 조건대 횡단현황

다. 연약지반 토질특성

(1) 물리적 특성

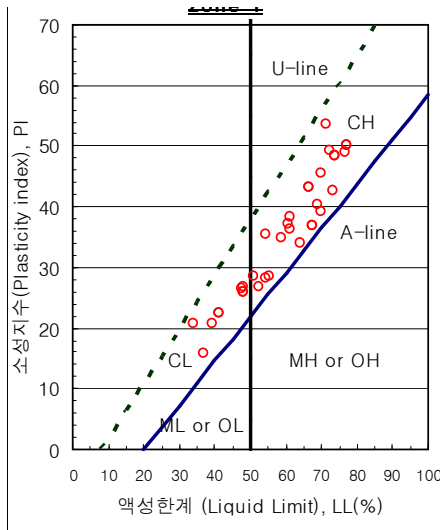
흙의 물리적 특성은 흙의 상태나 기본적인 성질을 구하고 그 흙의 기본적인 물성값의 상호간 계산에 이용되며, 흙의 판별이나 분류를 하는데 있어서 중요한 자료로 활용된다.

또한, 흙의 물리적 특성은 그 자체의 값도 중요하지만, 이 특성값으로 부터 흙의 역학적 성질, 즉 흙의 전단강도 및 압밀특성 등을 추정하는데 중요한 의미를 지니고 있다.

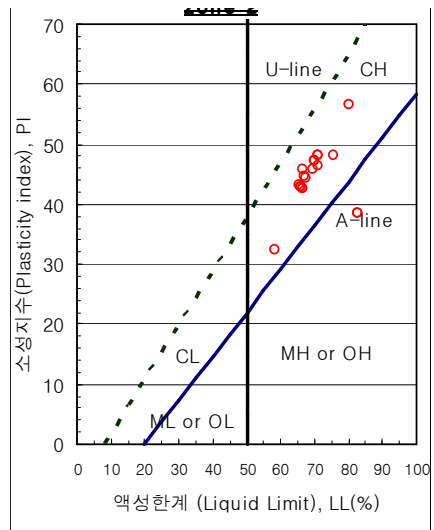
본 연구대상에 분포하는 퇴적점성토는 통일분류상 CH, CL로 분류되며, 그림 3.4에서 알 수 있는 바와 같이 1~2 구역에서는 액성한계(LL=50%)보다 큰 고소성의 상태가 우세하며 3~4 구역에서는 액성한계(LL=50%)을 중심으로 고루 분포한다.

자연함수비의 경우 그림 3.5에 나타내었으며 각 구역별 분포를 보면, 1~2 구역의 함수비는 61.4~61.6% 이며, 3~4구역의 함수비는 50.7~51.7%로 낮게 나타났다. 이는 3~4 구역이 비교적 심도가 깊어지는 관계로 함수비가 낮아지는 경향도 있으나 그림 3.4의 소성도표에 의한 분류에서 보듯이 1~2 구역이 고소성지역과 연관된 것으로 사료된다.

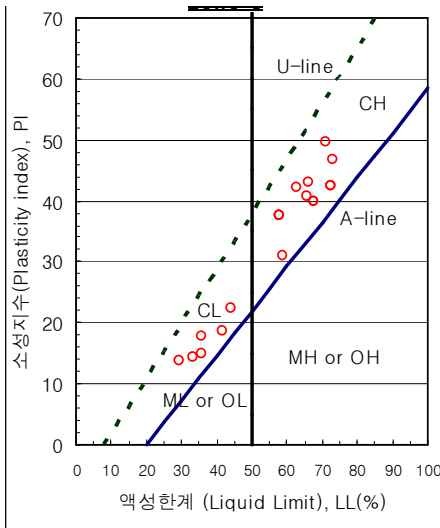
그림 3.6은 해당점성토층의 연경도를 나타낸 것이다. 1~2 구역의 액성한계는 60.1~70.1% 이며, 3~4구역의 액성한계는 54.5~56.3%로 소성지수는 35.8~44.5%, 32.3~33%이고, 평균해수면 아래 구역에서 낮은 값의 분포를 나타내었다.



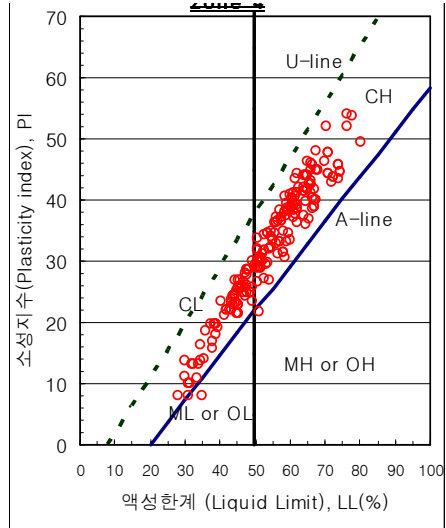
(a) 1 구역



(b) 2 구역

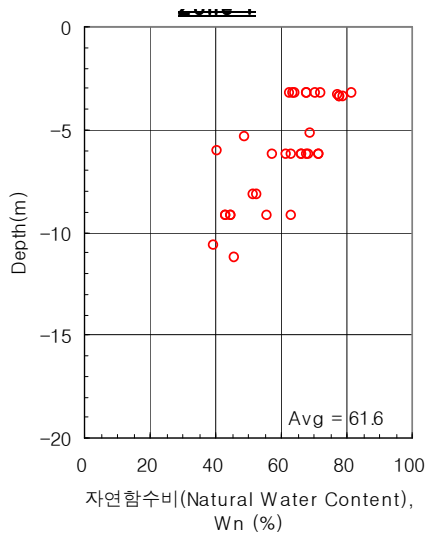


(c) 3 구역

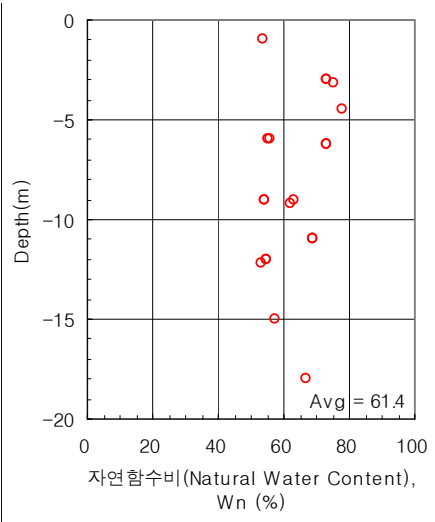


(d) 4 구역

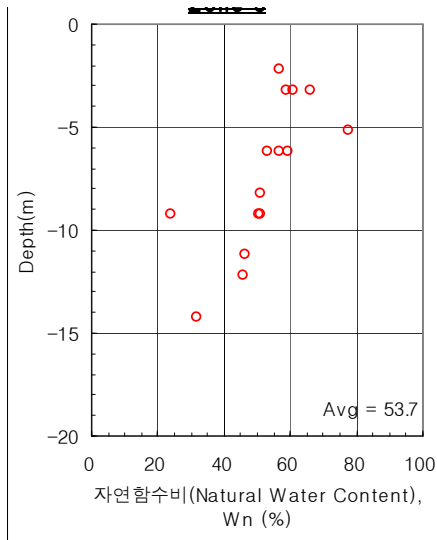
그림 3.4 소성도표(영산강 하구언지역)



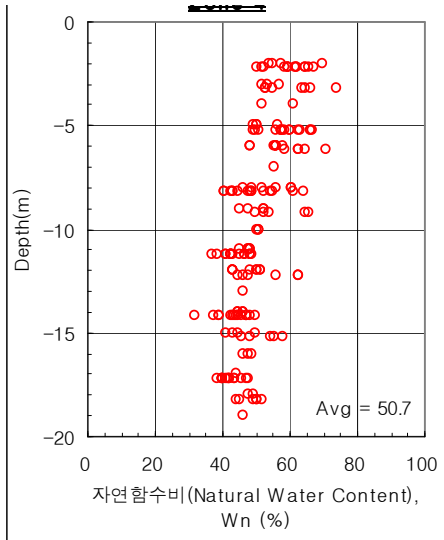
(a) 1 구역



(b) 2 구역

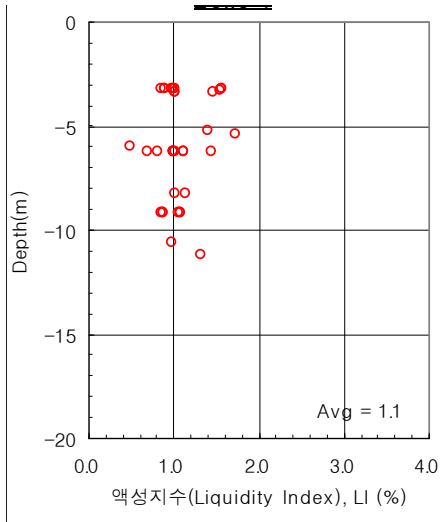


(c) 3 구역

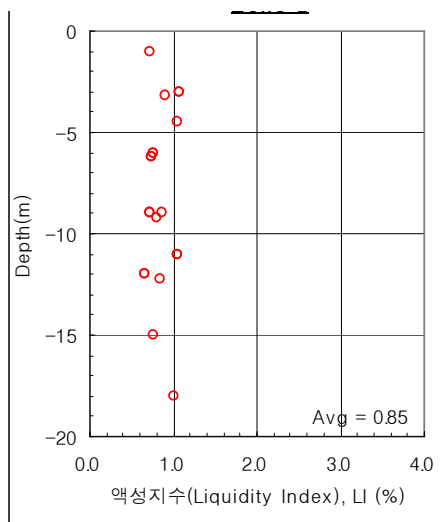


(d) 4 구역

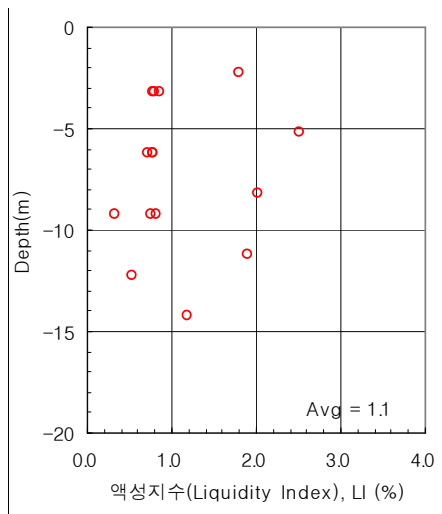
그림 3.5 깊이에 따른 자연함수비, W_n (영산강 하구언지역)



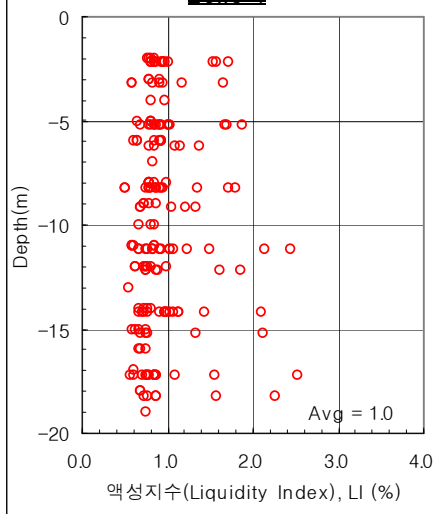
(a) 1 구역



(b) 2 구역



(c) 3 구역



(d) 4 구역

그림 3.6 깊이에 따른 액성지수, LI(영산강 하구언지역)

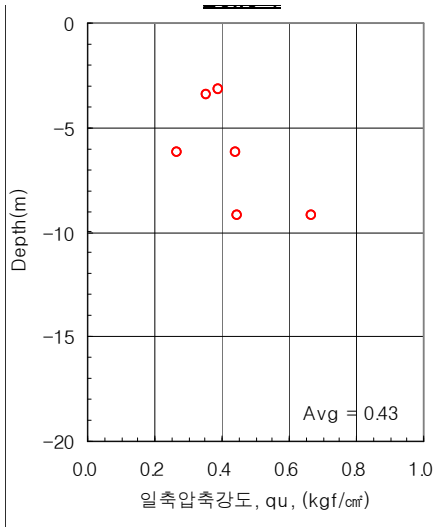
(2) 역학적 특성

흙의 역학적 특성은 불교란시료를 채취하여 흙의 전단강도 특성을 결정하고 흙의 압밀특성을 파악하였다. 본 연구에서는 흙의 역학특성을 파악하기 위하여 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀시험을 통하여 토질특성을 파악하였으며, 이를 평균해수면과 연약층후로 구역을 구분하여 검토하였다.

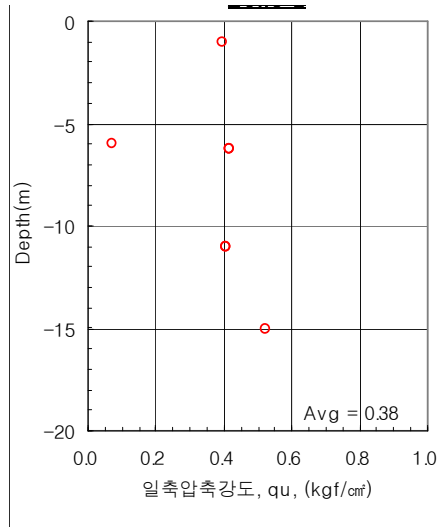
(가) 강도특성

그림 3.7과 그림 3.8은 깊이에 따른 일축압축강도와 예민비 결과를 나타내었다. 본 지역을 평균 일축압축강도(q_u)의 범위는 $0.38 \sim 0.45 \text{ kgf/cm}^2$ 사이에 분포하며 전체 평균이 0.44 kgf/cm^2 로 깊이가 깊어질수록 증가하는 양상을 나타내고 있다. 예민비는 $3.87 \sim 17.44$ 범위로서 평균 9.62로 고예민성(Very Sensitive)점토에 속하고, 약간의 퀵(Slightly Quick)한 점토성질을 띄며 깊이에 따른 변화는 없었다.

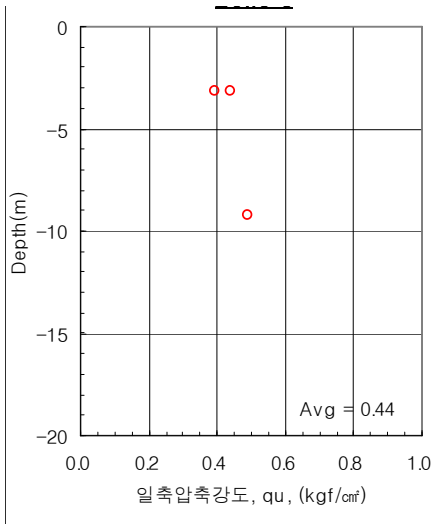
그림 3.9는 깊이에 따른 비배수전단강도(C_{uu}) 결과를 나타내었다. 본 지역을 비배수전단강도의 범위는 $0.05 \sim 0.69 \text{ kgf/cm}^2$ 사이에 분포하며 평균 0.32 kgf/cm^2 며, 깊이가 깊어질수록 증가하는 양상을 나타내고 있다.



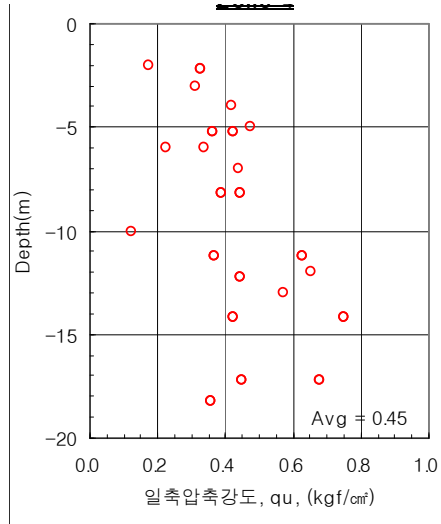
(a) 1 구역



(b) 2 구역

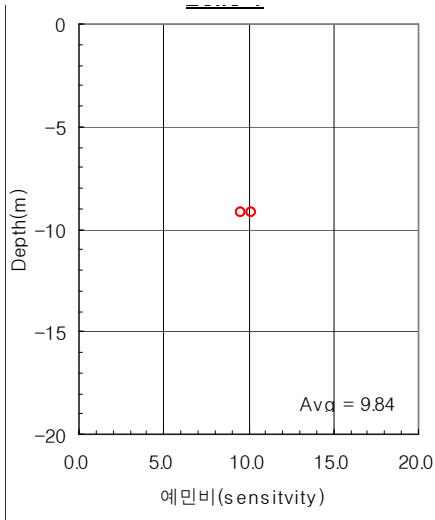


(c) 3 구역

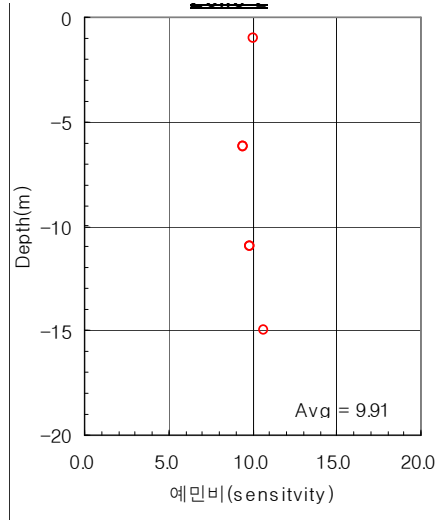


(d) 4 구역

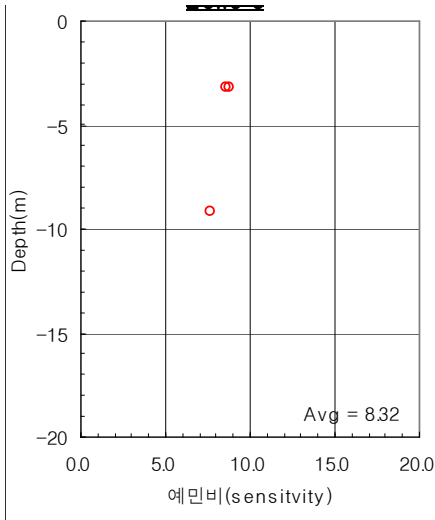
그림 3.7 깊이에 따른 일축압축강도, q_u (영산강 하구언지역)



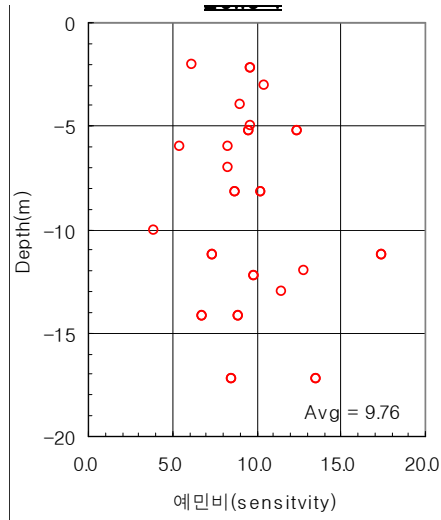
(a) 1 구역



(b) 2 구역

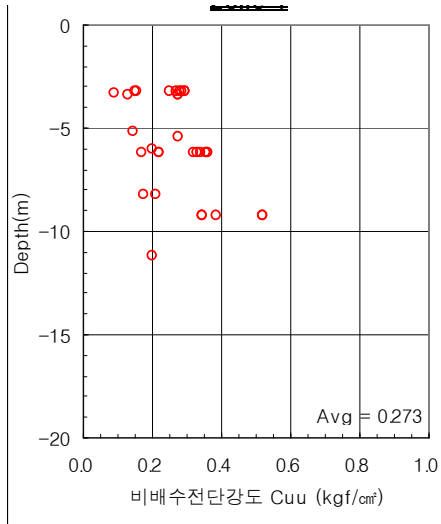


(c) 3 구역

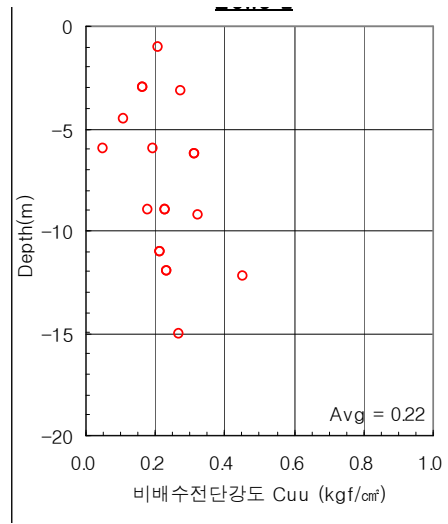


(d) 4 구역

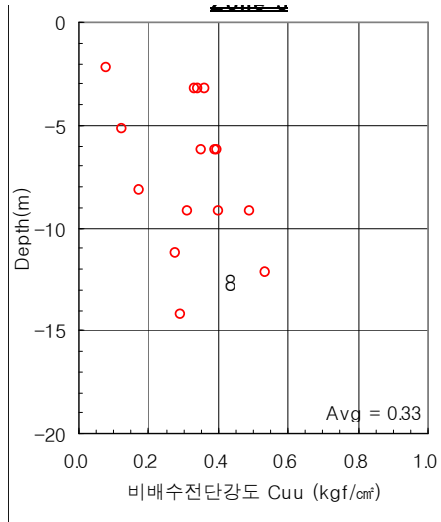
그림 3.8 깊이에 따른 예민비(영산강 하구언지역)



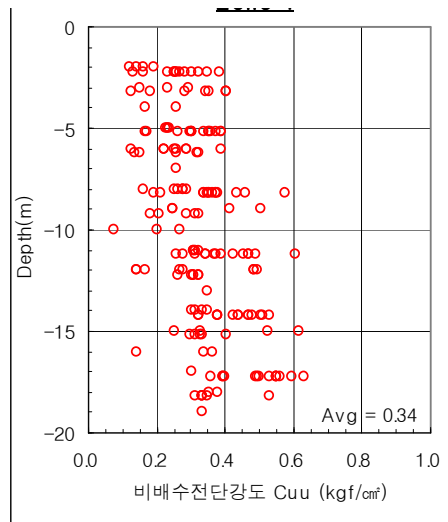
(a) 1 구역



(b) 2 구역



(c) 3 구역



(d) 4 구역

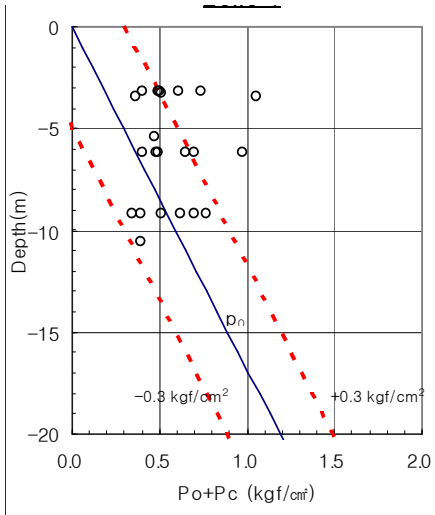
그림 3.9 깊이에 따른 비배수전단강도, C_{uu} (영산강 하구언지역)

(나) 압밀특성

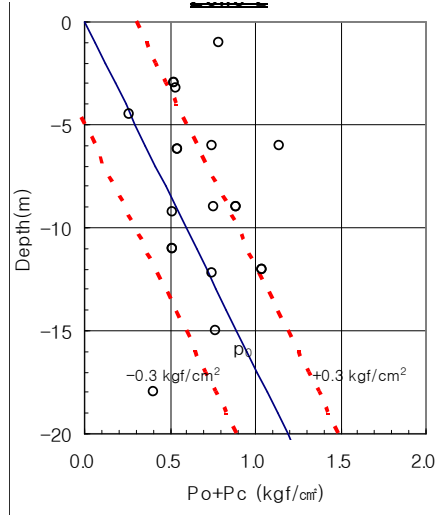
그림 3.10에서 그림 3.12까지는 깊이에 따른 선행압밀하중의 변화와 순과압밀하중 (Overconsolidation Difference, OCD), 과압밀비(Overconsolidation ratio, OCR)순으로 도시하였다. OCR은 심도 4.0m이하에서 2.0이하가 되며 심도 15.0m에서 1.0이하가 된다.

깊이에 따른 순과압밀하중(OCD)의 범위는 $-0.99 \sim 1.05 \text{ kgf/cm}^2$ 사이에 분포하며 평균 0.2 kgf/cm^2 로 깊이가 깊어질수록 감소하는 양상을 나타내고 있다.

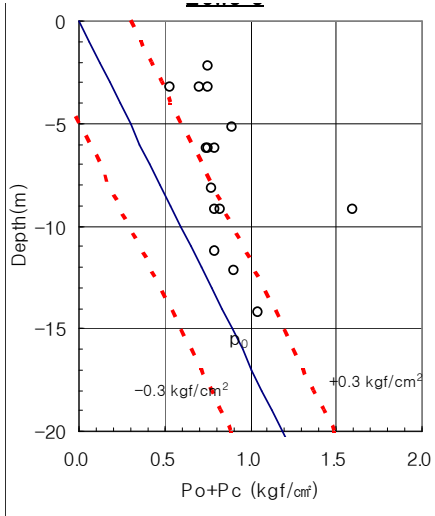
그림 3.13에서 보는 바와같이 초기간극비(e_0)의 범위는 0.65~2.16 사이에 분포(평균 1.44)하며 심도가 깊어질수록 감소하는 양상을 나타내고 있다. 그림 3.14와 그림 3.15는 압축지수와 재압축지수의 분포를 나타낸 것으로 각각의 범위 및 평균값은 재압축지수(Recompression Index, C_r)가 0.01~0.43 (평균 0.05), 압축지수(Compression Index, C_c)는 0.13~1.18 (평균 0.59)의 분포를 보이며, 깊이에 따라 감소하는 경향이 있다.



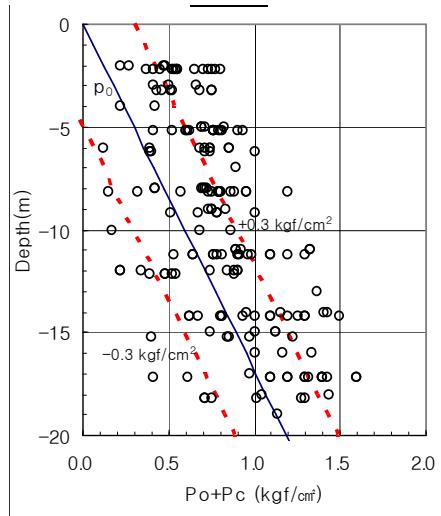
(a) 1 구역



(b) 2 구역

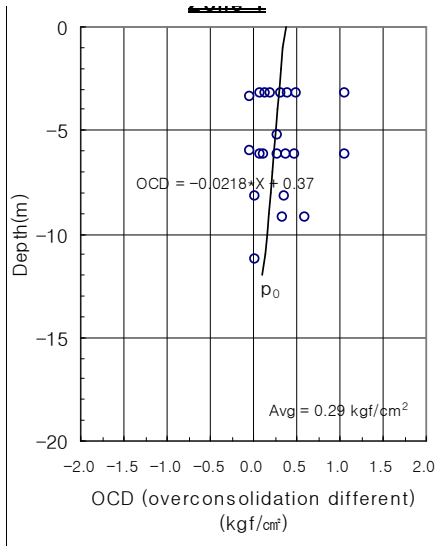


(c) 3 구역

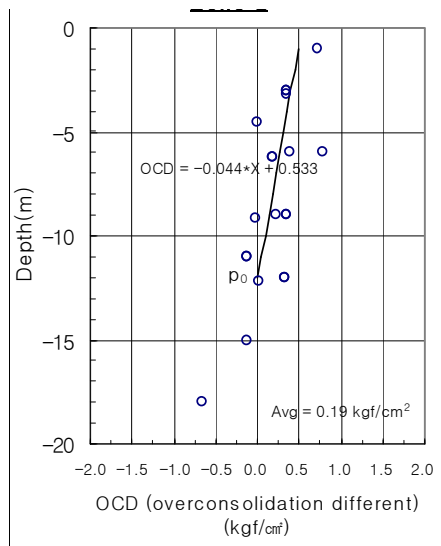


(d) 4 구역

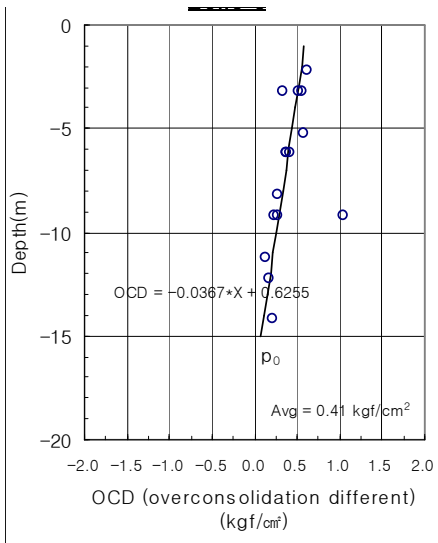
그림 3.10 깊이에 따른 선행압밀하중, P_c (영산강 하구언지역)



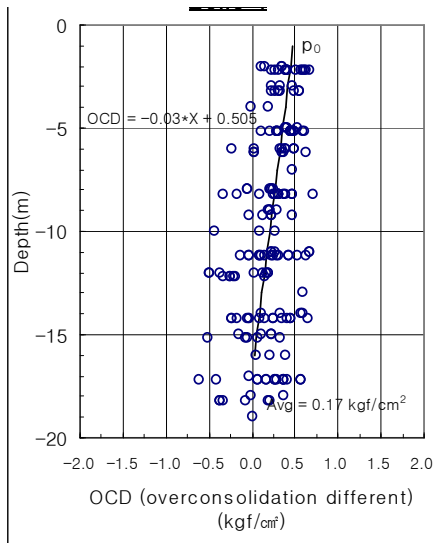
(a) 1 구역



(b) 2 구역

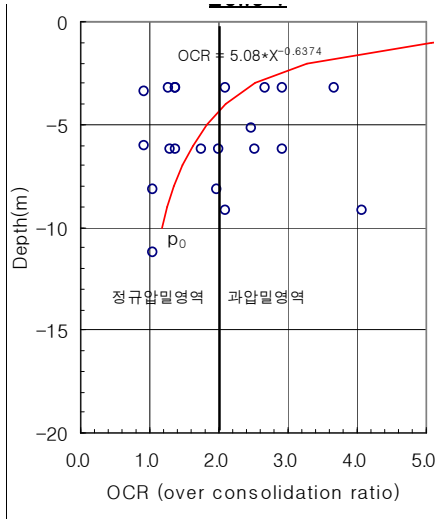


(c) 3 구역

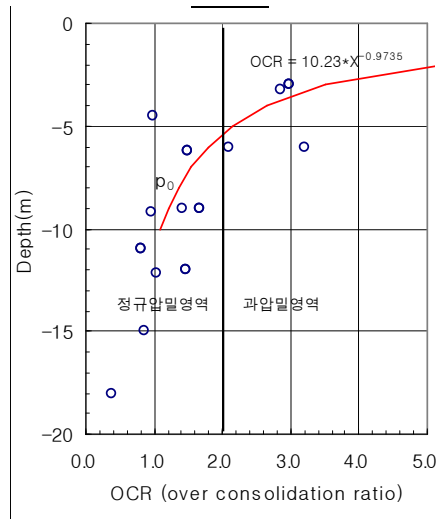


(d) 4 구역

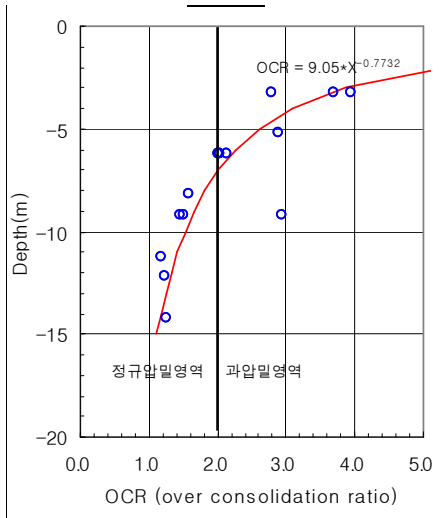
그림 3.11 깊이에 따른 순과압밀하중, OCD(영산강 하구언지역)



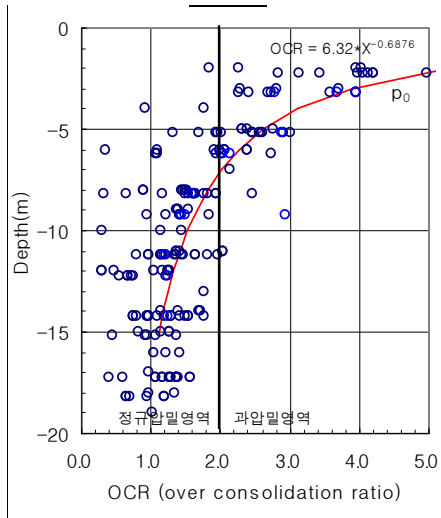
(a) 1 구역



(b) 2 구역

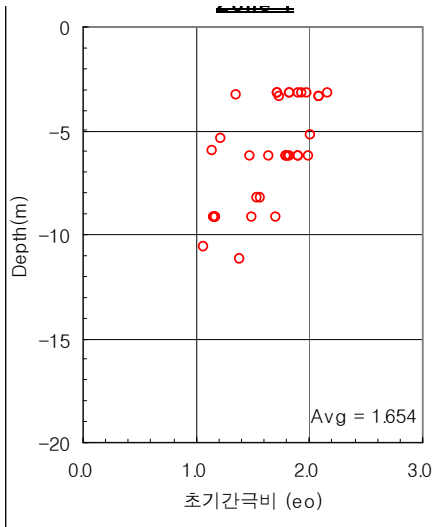


(c) 3 구역

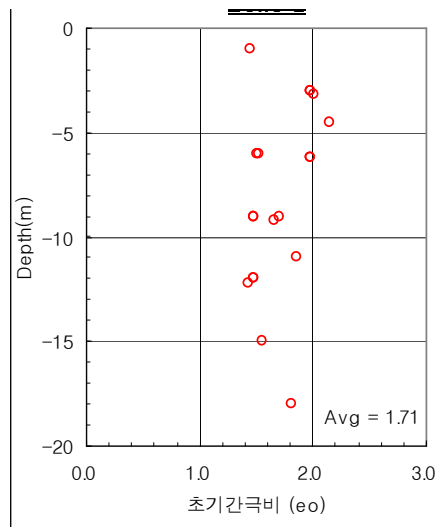


(d) 4 구역

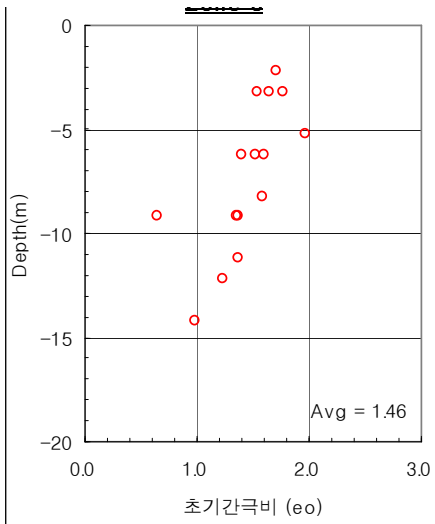
그림 3.12 깊이에 따른 과압밀비, OCR(영산강 하구언지역)



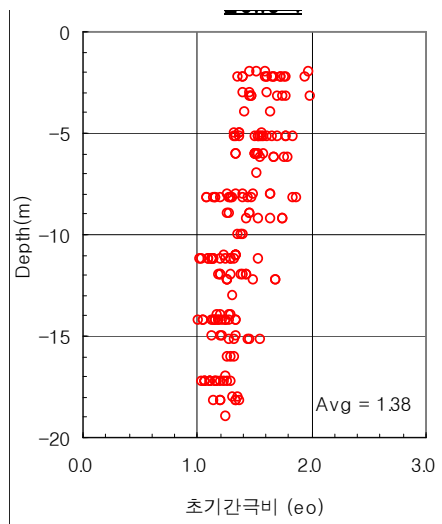
(a) 1 구역



(b) 2 구역

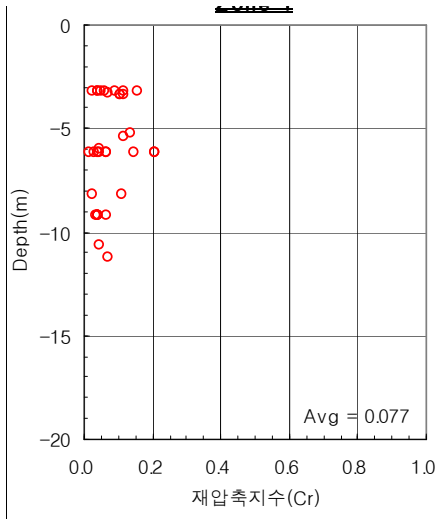


(c) 3 구역

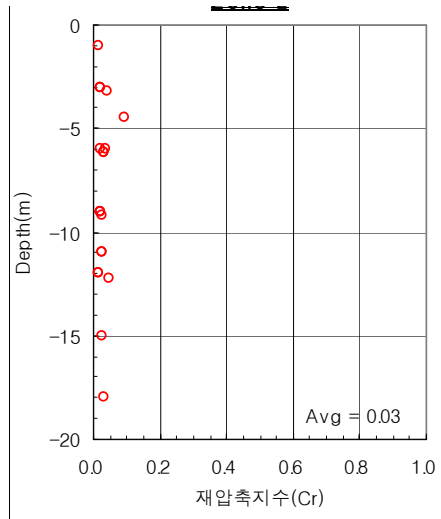


(d) 4 구역

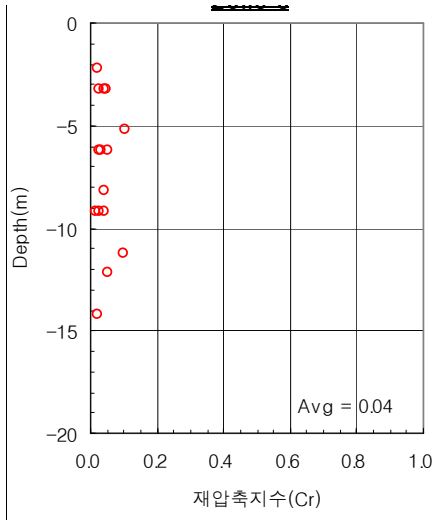
그림 3.13 깊이에 따른 초기간극비, e_0 (영산강 하구언지역)



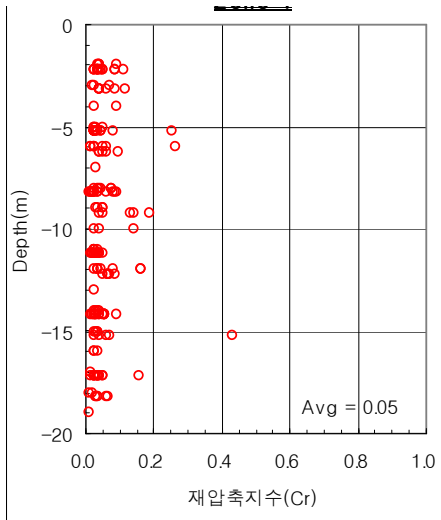
(a) 1 구역



(b) 2 구역

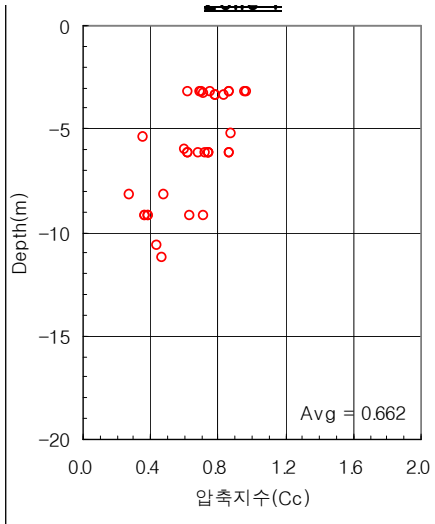


(c) 3 구역

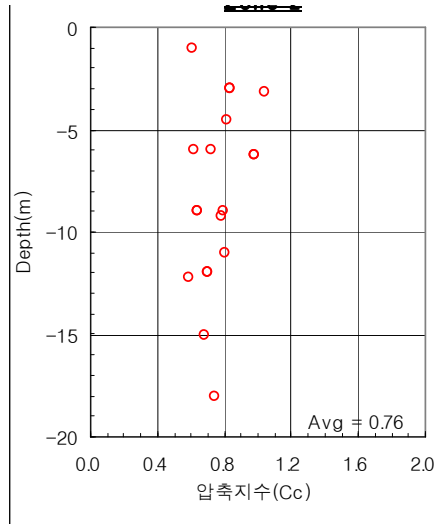


(d) 4 구역

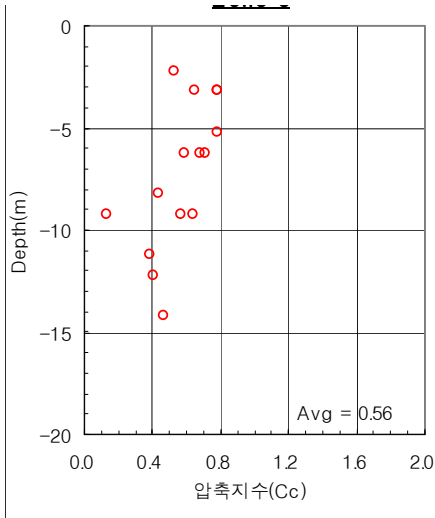
그림 3.14 깊이에 따른 재압축지수, C_r (영산강 하구언지역)



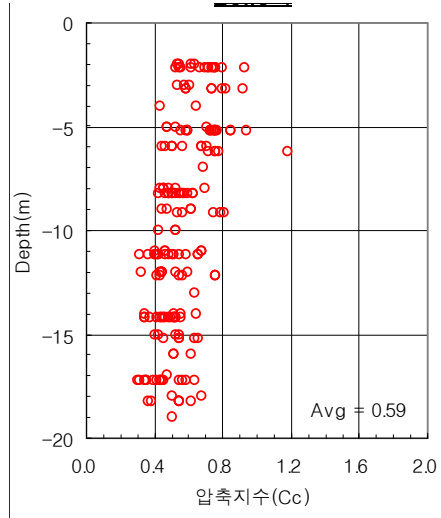
(a) 1 구역



(b) 2 구역



(c) 3 구역



(d) 4 구역

그림 3.15 깊이에 따른 압축지수, C_c (영산강 하구연지역)

3.2 영종도지역

가. 지층조건

본 인천국제공항 2단계 건설부지의 퇴적층은 10.0~40.0m에 걸쳐 분포하며, 퇴적 토립자는 주로 실트, 점토, 실트질 모래로 구성되며 최하부는 Medium (0.425~2.0mm) 또는 Coarse sand (0.2~4.75mm)가 분포하는 특성을 나타낸다.

전반적인 퇴적층의 분포는 활주로 중앙지역에서 남·북측으로 갈수록 깊어지는 경향이 있으며 남측의 경우 주로 실트와 점토가 두껍게 분포하며, 북측의 경우 세사의 분포가 우세하다.

본 지역의 지층상태는 지반조사결과로부터 퇴적층, 풍화토, 풍화암으로 구분할 수 있으며, 퇴적층을 생성기원 및 특성에 따라 상세분류하면 상부해성층, 상부층적층, 하부해성층, 하부층적층의 4개의 층서로 구분할 수 있다.

먼저, 상부해성층의 경우 통일분류법으로 구분해보면, ML(실트), CL(저소성 점토)로 구성되어 있으며, 해저에서 조류의 작용으로 퇴적된 해성층으로 간극비가 큰 압축성 실트 또는 점토로 구성되어 있다.

전반적으로 상부에서 0.0~15.0m 심도까지 연약층이 분포하며, SPT의 N치가 5이하 지층($q_c = 10 \text{ kgf/cm}^2$ 이하지역)으로 되어 있다.

상부해성층의 하부에 위치한 상부층적층은 통일분류상 ML(실트), CL(저소성 점토), SM(실트질모래)로 구성되어 있으며, 주로 육상퇴적 혹은 표면건조(Dessication)가 발생한 지층이다.

연약층은 활주로 남측지역에서 5.0~7.0m정도 분포, 북측으로 갈수록 지층이 두꺼워지며, 전체적으로 N치가 15이상이다.

하부해성층은 주로 ML(실트), CL(저소성점토)로 구성되어 있으며, 해저에서 조류의 작용으로 퇴적된 것으로 N치가 8~15 정도의 견고(Stiff)한 층이다.

마지막으로 하부층적층은 통일분류상 상부층적층과 동일한 ML(실트), CL(저소성점토), SM(실트질모래)로 구성되어 있으며, 잔류토 상부에 퇴적된 지층이며, N치가 15이상의 매우 견고한 층이다.

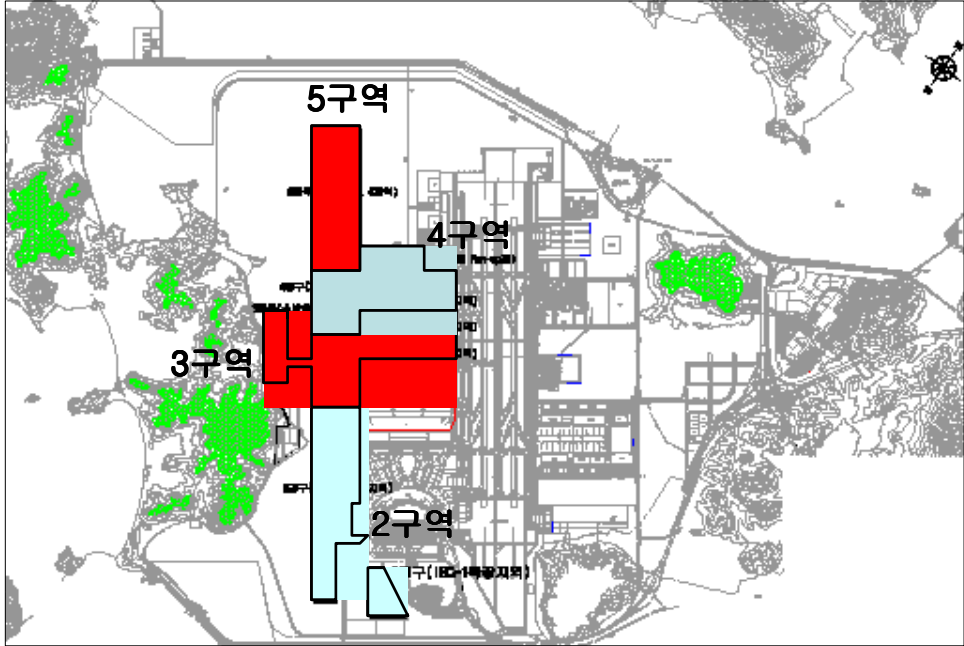


그림 3.16 인천국제공항 2단계건설 부지조성공사 구역도

그림 3.17 영종도지역의 구역별 연약층 및 기반암 심도

나. 지층특성 및 구역구분

본 영종도지역의 구역구분은 그림 3.16과 같으며, 그에 따른 연약지층의 특성 파악을 위한 심도현황은 그림 3.17과 같다.

영종도지역의 구역구분은 영산강 하구언지역과 유사하나, 연약층후의 심도가 10m이며 부지특성상 국부적으로 편차가 크게 나타나므로 연약지반이 5m, 10m로 구분하여 크게 4개구역(2~5구역)으로 나누었다.

2구역은 제3활주로 1지역과 IBC-1지역으로 구성되며, 평균 연약지반심도는 7.4~8.3m이며, 연약지반심도가 깊은 경향이 있고, 제3활주로 1지역의 경우 다소 불규칙적이며 동측면이 서측면에 비해 연약지반 심도가 깊게 분포한다.

3구역은 제3활주로 2지역과 소방훈련장지역 및 여객계류장 1, 2지역으로 구성되고 평균 연약지반심도가 3.4~4.9m로 비교적 심도가 낮으며 동측 및 하부지역에 연약지반 심도가 일부 깊게 분포한다.

서측인 소방훈련장지역은 연약지반이 거의 분포하지 않으나 활주로와 연결도로에 해당하는 부분은 얇게 연약지반이 분포한다.

4구역은 제3활주로 3지역과 북측제빙시설 및 Run-up지역, 그리고 여객계류장 3지역을 포함하고 연약지반심도가 평균 3.9~6.5m로 분포하며, 여객계류장 3지역의 중앙 및 동측부근에 8.7~10.8m의 다소 깊은 연약지반이 존재한다.

5구역은 제3활주로 4지역으로 평균 연약지반 심도는 6.6m이며 전반적으로 균등한 연약지반 분포를 나타낸다.

다. 연약지반 토질특성

(1) 물리적 특성

흙의 물리적 특성은 흙의 상태나 기본적인 성질을 구하고 그 흙의 기본적인 물성값의 상호간 계산에 이용되며, 흙의 판별이나 분류를 하는데 있어서 중요한 자료로 활용된다.

또한, 흙의 물리적 특성은 그 자체의 값도 중요하지만, 이 특성값으로부터 흙의 역학적 성질, 즉 흙의 전단강도 및 압밀특성 등을 추정하는데 중요한 의미를 지니고 있다.

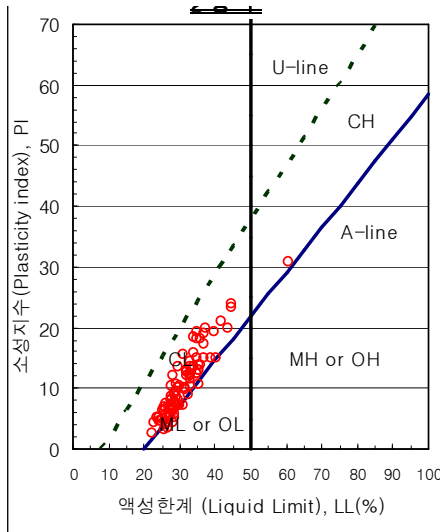
영종도지역의 전체적인 액성한계는 평균 38.66%이며, 소성한계는 평균 14.64%를 나타내며, 통일분류법으로 일부 A-Line아래의 유기질실트(ML)의 분포를 나타내나 그림 3.18에서 보는 바와 같이 전반적으로 CL, CL-ML에 속하며, 저소성특징을 보인다.

자연함수비는 그림 3.19에서 보는 바와 같이 전체적으로 평균 34.10~37.04%의 분포를 보이며, 2구역의 경우 액성한계와 유사하거나, 액성한계보다 크게 나타나며, 3, 4, 5구역은 액성한계보다 작거나 유사하며, 약간의 과압밀 또는 정규압밀 특성을 보인다.

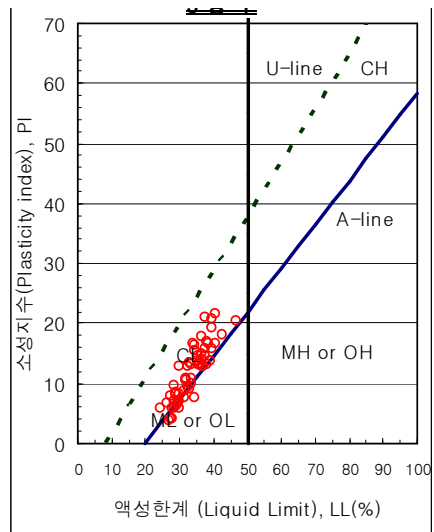
연경도를 경우, 전체적으로 함수비가 액성한계보다 크고 액성지수가 1.0이상이나, 실트질 성분의 다량함유로 인하여 응력변형거동이 액성거동이 아닌 소성거동의 형태를 보이며, flow failure현상은 없다. 그림 3.20에서 활성도는 Atterberg Limit를 보면 보통활성에서 고활성 특성을 보인다.

표 3.1 영종도지역의 물리적특성 (제2단계)

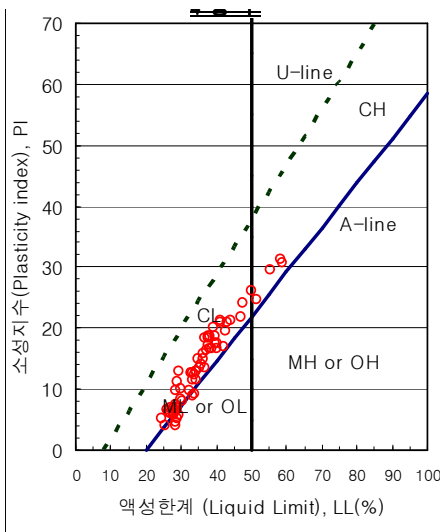
구역명	시 설 물	자연 함수비 ($W_n, %$)	액성 한계 ($LL, %$)	소성 한계 ($PL, %$)	소성 지수 ($PI, %$)	액성 지수 ($LI, %$)	단위 중량 ($\gamma_{u, tf/m^3}$)
2구역	제3활주로 1지역	34.23	30.45	20.60	10.33	1.65	1.86
	IBC-1 확장지역	36.98	29.13	20.07	9.07	1.90	1.83
3구역	제3활주로 2지역	34.10	33.31	21.18	12.53	1.14	1.84
	소방훈련장지역	-	-	-	-	-	-
	여객계류장 1,2지역	37.04	34.4	22.43	11.89	1.48	1.83
4구역	제3활주로 3지역	35.66	35.50	21.70	13.80	1.22	1.86
	북측제빙시설 및 Run-up장	36.88	34.29	20.59	13.70	1.47	1.83
	여객계류장 3지역	37.04	34.4	22.43	11.89	1.48	1.83
5구역	제3활주로 4지역	35.05	32.45	21.57	10.88	1.64	1.86



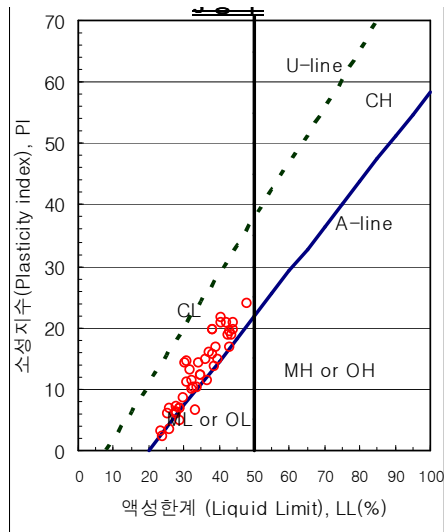
(a) 2 구역



(b) 3 구역

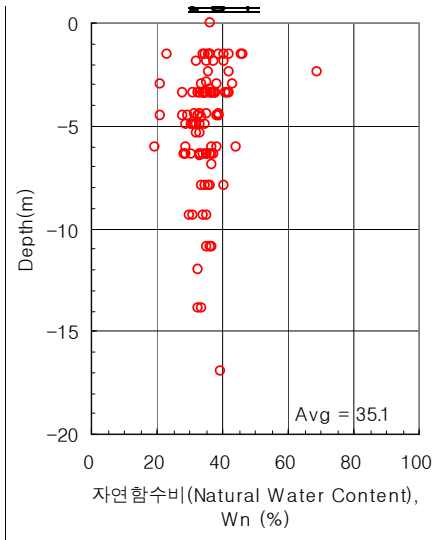


(c) 4 구역

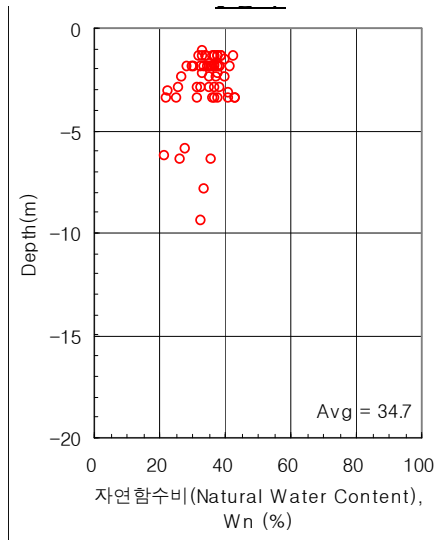


(d) 5 구역

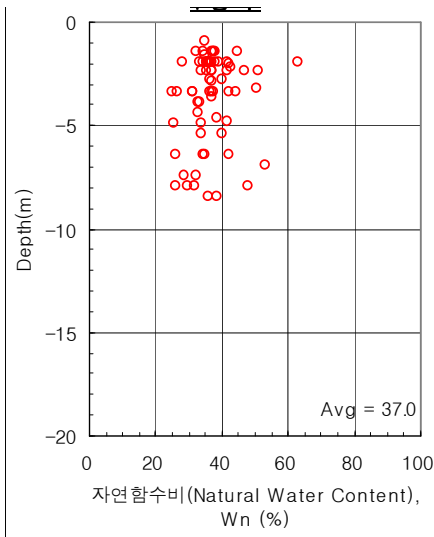
그림 3.18 소성도표(영종도지역)



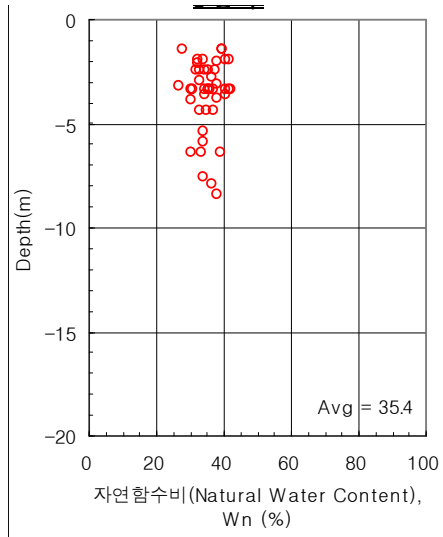
(a) 2 구역



(b) 3 구역

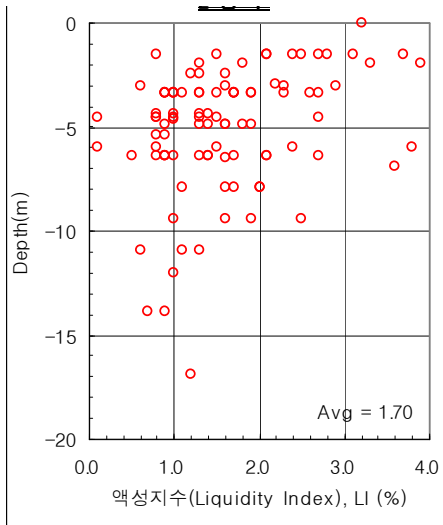


(c) 4 구역

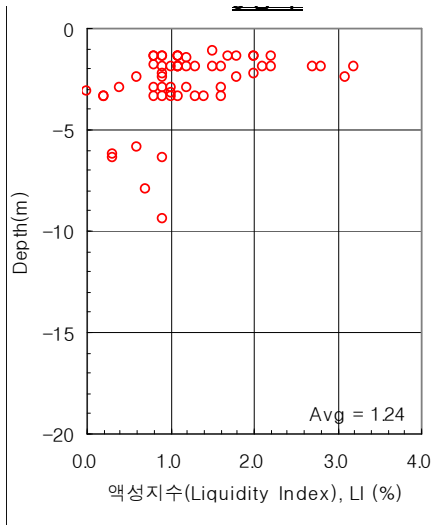


(d) 5 구역

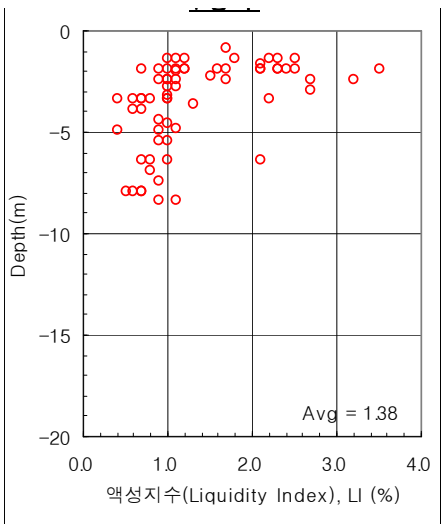
그림 3.19 깊이에 따른 자연함수비, W_n (영종도지역)



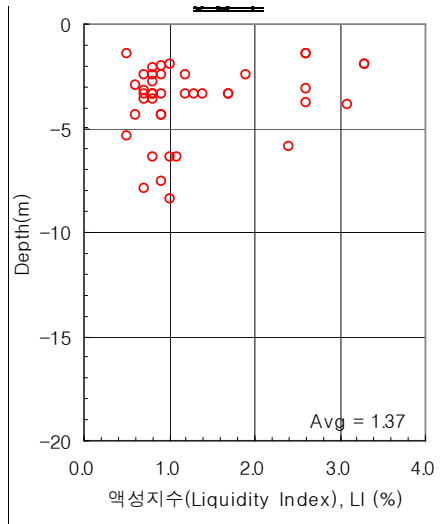
(a) 2 구역



(b) 3 구역



(c) 4 구역



(d) 5 구역

그림 3.20 깊이에 따른 액성지수, LI(영종도지역)

(2) 역학적 특성

흙의 역학적 특성은 불교란시료를 채취하여 흙의 전단강도특성을 결정하고 흙의 압밀특성을 파악하였다. 본 연구에서는 흙의 역학특성을 파악하기 위하여 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀시험을 통하여 토질특성을 파악하였으며, 이를 시공구역별로 구분하여 검토하였다.

(가) 강도특성

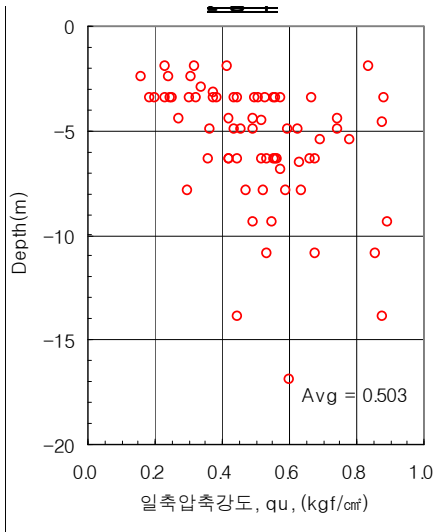
그림 3.21과 그림 3.22는 깊이에 따른 일축압축강도와 예민비 결과를 나타내었다. 본 지역을 평균 일축압축강도(q_u)의 범위로 보면 0.470~0.521 kgf/cm^2 사이에 분포하며 전체평균 0.493 kgf/cm^2 로, 깊이가 깊어질수록 다소 증가하는 양상을 나타내고 있다. 예민비는 3.79~4.14 범위로서 평균 3.96로 낮은 예민성(low Sensitive)점토에 속하고, 약간의 퀵(Slightly Quick)한 점토성질을 띄며 깊이에 따른 변화는 없었다.

그림 3.23은 깊이에 따른 비배수전단강도(C_u) 결과를 나타낸다. 본 지역의 비배수전단강도의 범위는 0.233~0.270 kgf/cm^2 사이에 분포하며 평균 0.250 kgf/cm^2 로 심도가 깊을수록 증가하는 양상을 나타내고 있다.

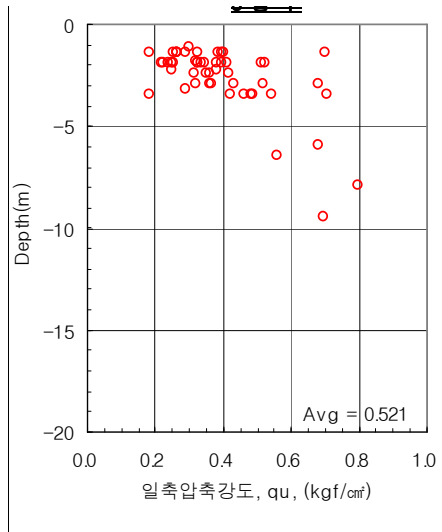
(나) 압밀특성

그림 3.25와 그림 3.26은 깊이에 따른 선행압밀하중 변화와 압축지수를 도시한 것이다.

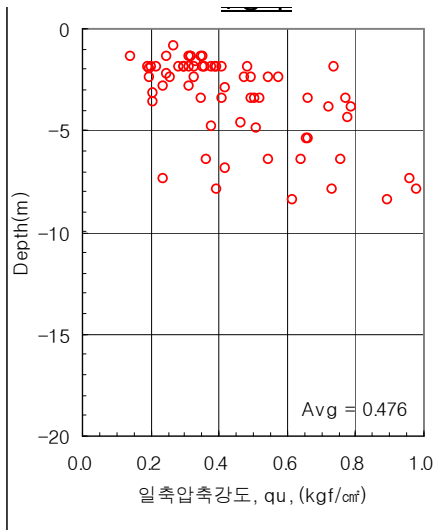
초기간극비(e_0)의 경우 평균적으로 0.94~1.02의 분포를 보이며, 재압축지수(C_r)은 0.022~0.028까지의 분포를 보인다. 압축지수(Compression Index, C_c)는 0.096~0.730 범위(평균 0.256)로서 깊이에 따라 다소 감소하는 경향이 있으나, 거의 일정하다고 볼 수 있다.



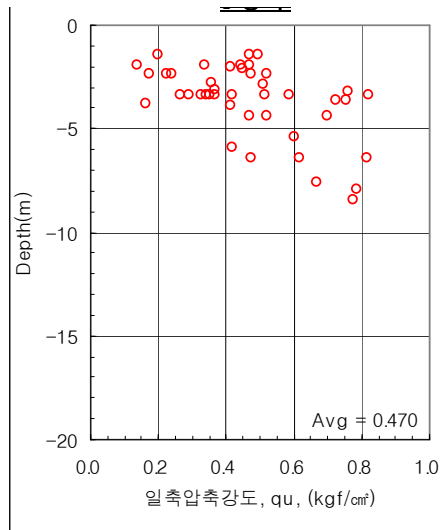
(a) 2 구역



(b) 3 구역

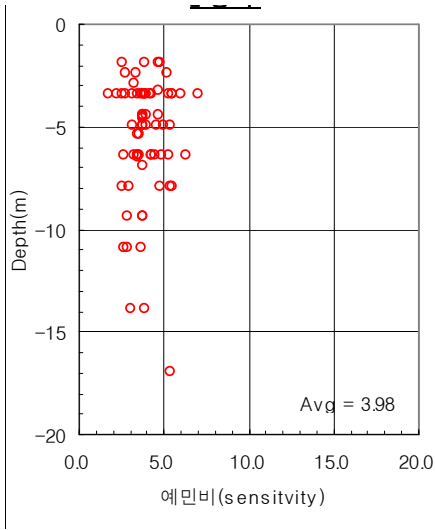


(c) 4 구역

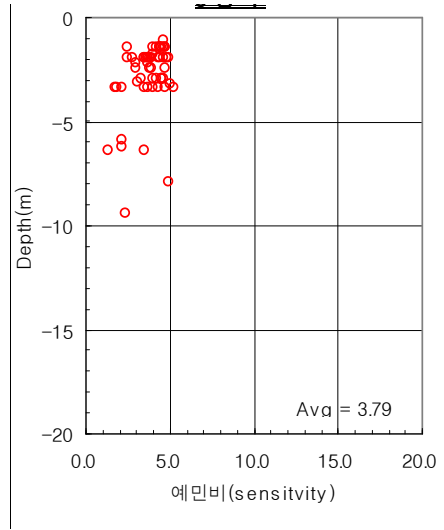


(d) 5 구역

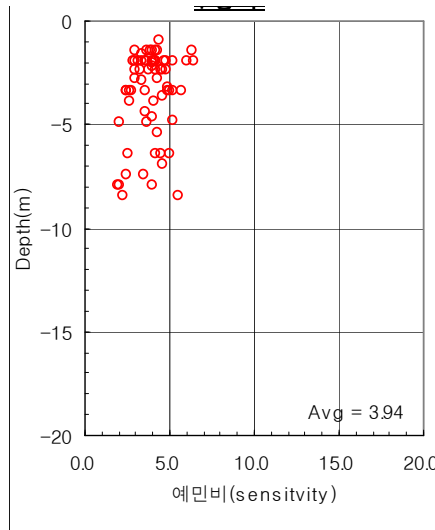
그림 3.21 깊이에 따른 일축압축강도, q_u (영종도지역)



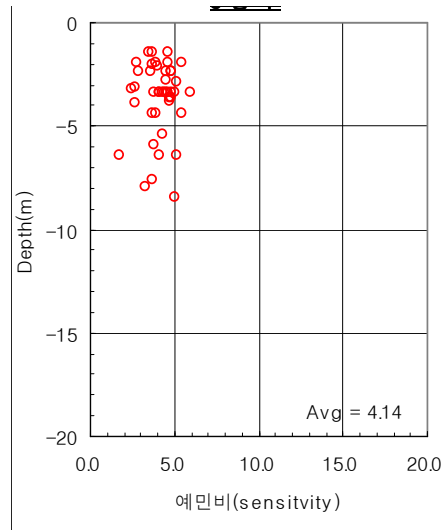
(a) 2 구역



(b) 3 구역

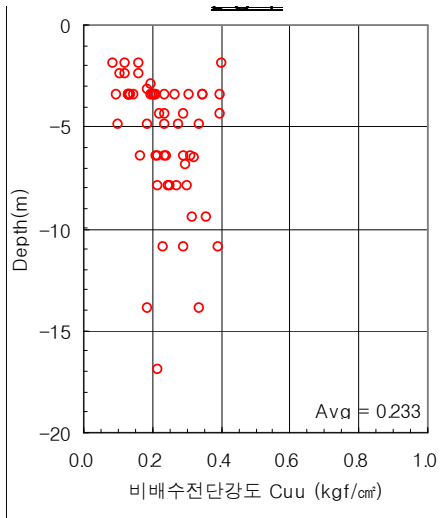


(c) 4 구역

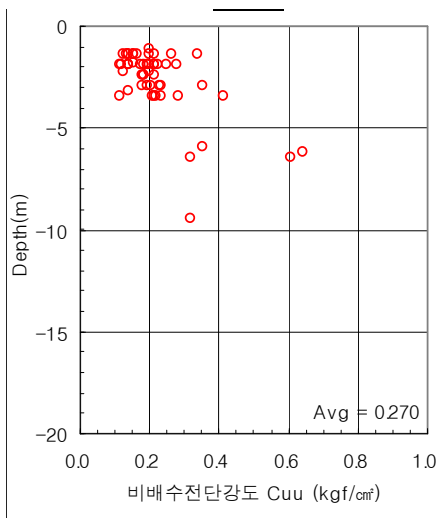


(d) 5 구역

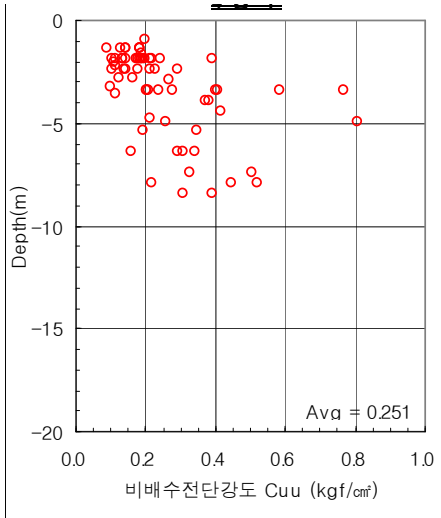
그림 3.22 깊이에 따른 예민비(영종도지역)



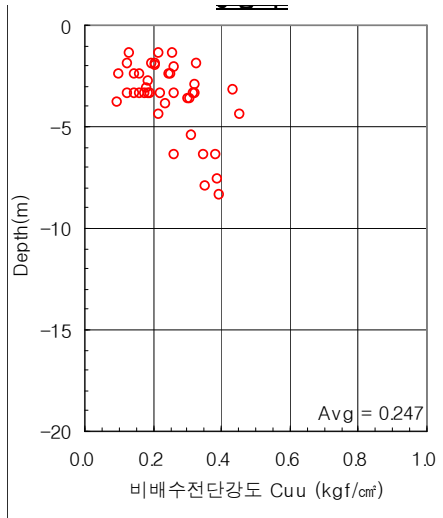
(a) 2 구역



(b) 3 구역

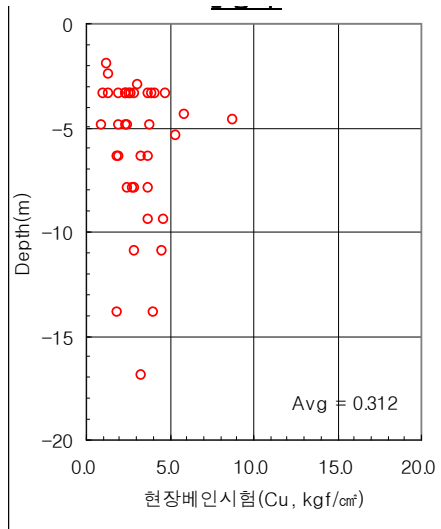


(c) 4 구역

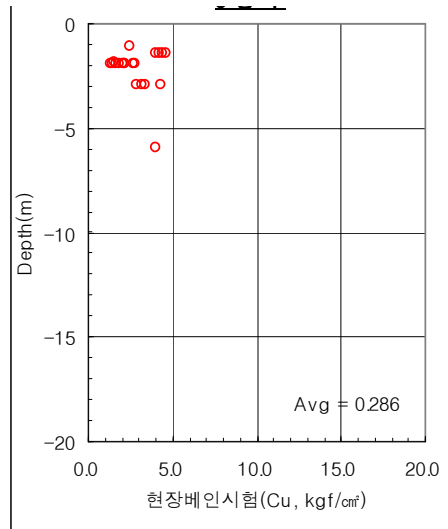


(d) 5 구역

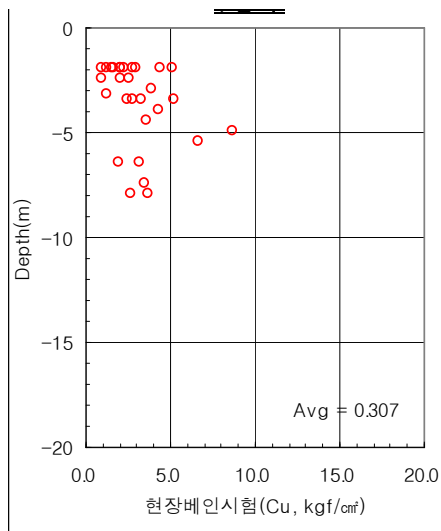
그림 3.23 깊이에 따른 비배수전단강도, C_{uu} (영종도지역)



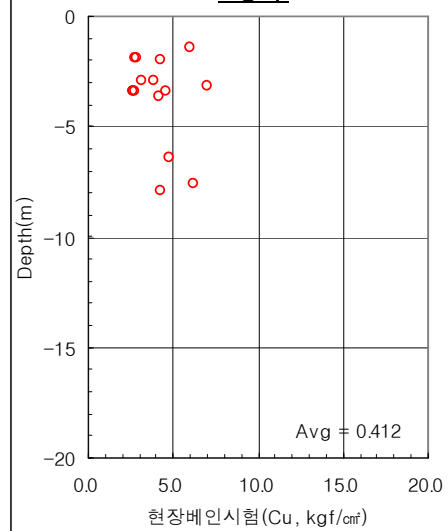
(a) 2 구역



(b) 3 구역



(c) 4 구역



(d) 5 구역

그림 3.24 깊이에 따른 현장베인시험결과(영종도지역)

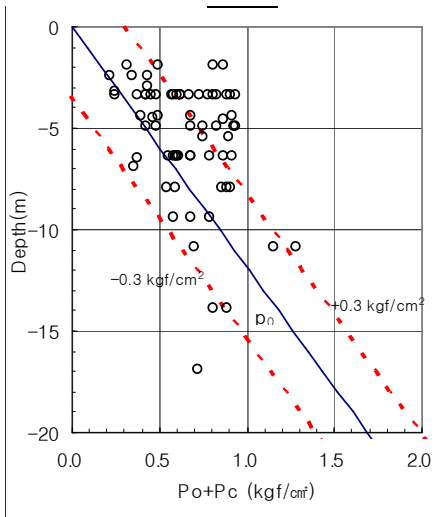
표 3.2 영종도지역의 압밀특성 (제2단계)

구역명	시설물	초기간극비 (e_0)	압축지수 (C_c)	재압축지수 (C_r)
2구역	제3활주로 1지역	0.94	0.22	0.022
3구역	IBC-1 확장지역	1.02	0.28	0.028
	제3활주로 2지역	0.97	0.26	0.026
	소방훈련장 지역	-	-	-
4구역	여객계류장 1,2지역	1.02	0.27	0.027
	제3활주로 3지역	0.98	0.26	0.026
	북측제빙시설 및 Run-up장	1.01	0.28	0.028
5구역	여객계류장 3지역	1.02	0.27	0.027
	제3활주로 4지역	0.97	0.25	0.025

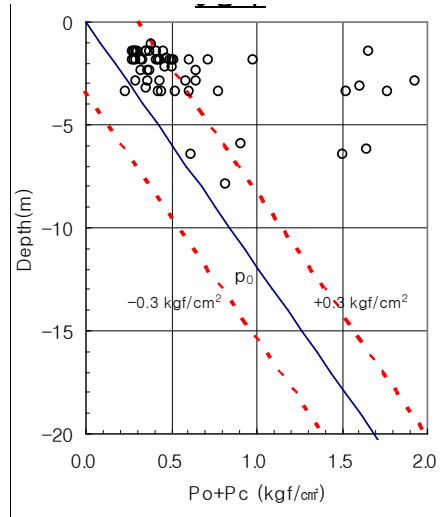
표 3.3 영종도지역의 시설물별 압밀특성 및 투수특성

구역명	시설물	방향*	압밀계수 (cm^2/s)	C_h/C_v	투수계수 (cm/s)	k_h/k_v
2구역	제3활주로 1지역	수직	4.24×10^{-3}	2.0	1.91×10^{-6}	2.0
		수평	8.42×10^{-3}		1.91×10^{-6}	
	IBC-1 확장 지역	수직	7.21×10^{-3}	2.0	4.28×10^{-6}	2.0
		수평	1.44×10^{-2}		8.56×10^{-6}	
3구역	제3활주로 2지역	수직	4.06×10^{-3}	2.0	2.03×10^{-6}	2.0
		수평	8.12×10^{-3}		4.06×10^{-6}	
	소방훈련장 지역	수직	-	2.0	-	2.0
		수평	-		-	
	여객계류장 1,2지역	수직	3.75×10^{-3}	2.0	1.32×10^{-6}	2.0
		수평	7.50×10^{-3}		2.64×10^{-6}	
4구역	제3활주로 3지역	수직	4.44×10^{-3}	2.0	2.18×10^{-6}	2.0
		수평	8.88×10^{-3}		4.36×10^{-6}	
	북측제빙시설 및 Run-up장	수직	2.79×10^{-3}	2.0	1.37×10^{-6}	2.0
		수평	5.58×10^{-3}		2.74×10^{-6}	
	여객계류장 3지역	수직	3.75×10^{-3}	2.0	1.32×10^{-6}	2.0
		수평	7.50×10^{-3}		2.64×10^{-6}	
5구역	제3활주로 4지역	수직	4.36×10^{-3}	2.0	2.01×10^{-6}	2.0
		수평	8.72×10^{-3}		4.02×10^{-6}	

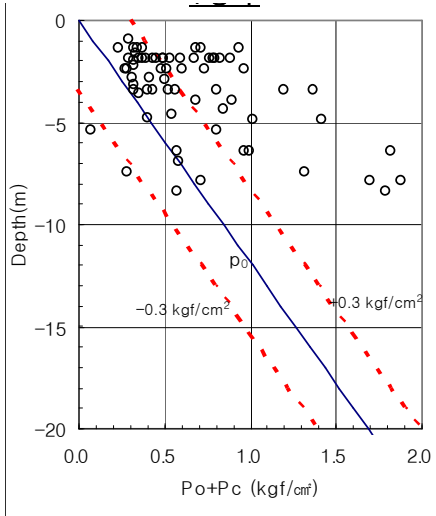
* 방향에 따라 침자구분 : 수직 - C_v , k_v 수평 - C_h , k_h



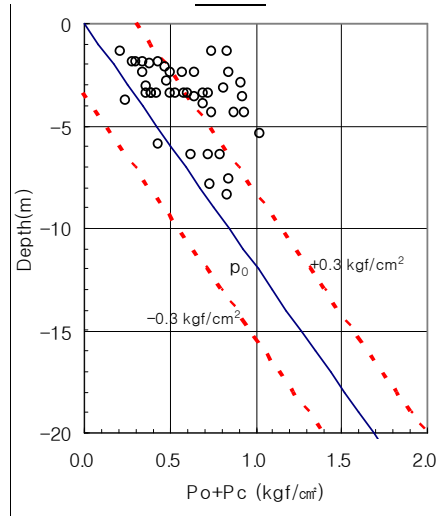
(a) 2 구역



(b) 3 구역

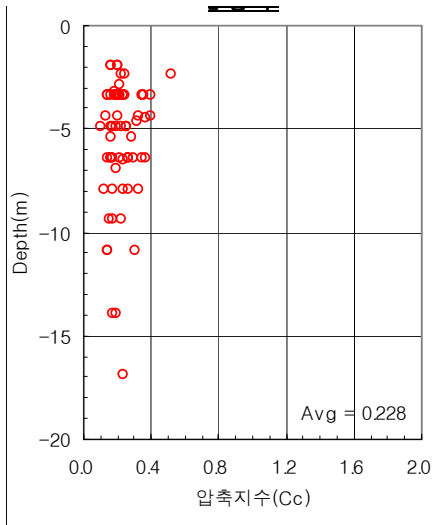


(c) 4 구역

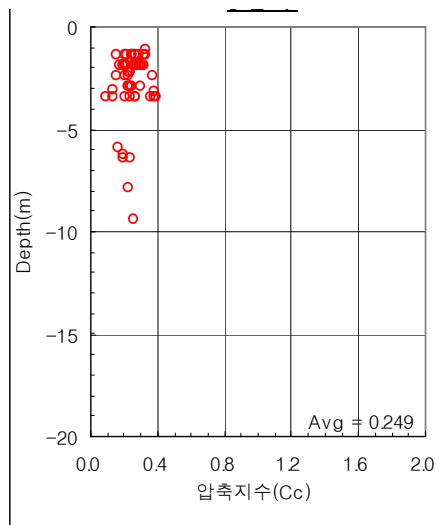


(d) 5 구역

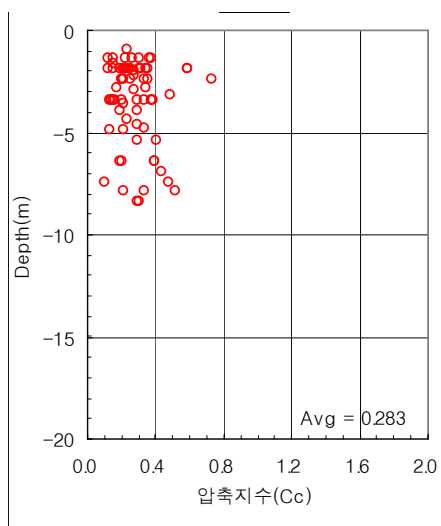
그림 3.25 깊이에 따른 선행압밀하중, P_c (영중도지역)



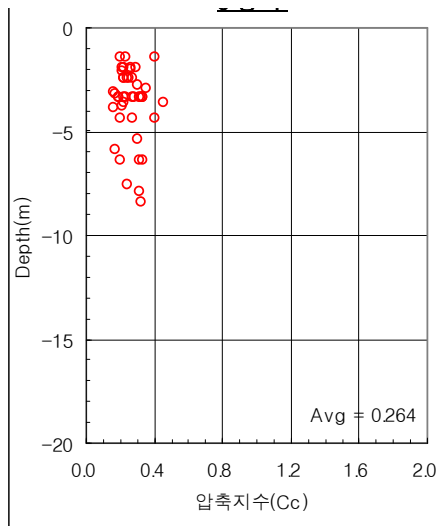
(a) 2 구역



(b) 3 구역



(c) 4 구역



(d) 5 구역

그림 3.26 깊이에 따른 압축지수, C_c (영종도지역)

제4장 현장계측결과 분석

4.1 분석자료

본 연구에 적용된 자료는 영산강하구언 매립공사와 영종도 국제공항건설공사의 설계자료 및 현장계측자료인 지표침하판, 지중침하계, 경사계, 간극수압계에 따른 결과를 이용하여 분석을 실시하였다.

가. 영산강 하구언지역

영산강하구언 매립공사에 대한 분석은 남악신도시 택지개발사업 실시설계 수립용역 보고서(2003. 01)와 남악신도시 침하안정관리 계측월간보고서(2007. 03.)를 토대로 분석하였다.

나. 영종도지역

영종도 국제공항건설공사에 대한 분석은 인천국제공항 2단계건설 부지조성공사 실시설계용역 보고서(2003. 07)와 인천국제공항 2단계건설 부지조성공사 기본 및 실시설계용역 제3활주로지역 부지조성공사 실시설계보고서(2003. 10) 및 인천국제공항 2단계건설 제3활주로지역 북측부지조성공사 전면책임감리용역 계측관리월간보고서(2005. 12)의 자료를 이용하였다.

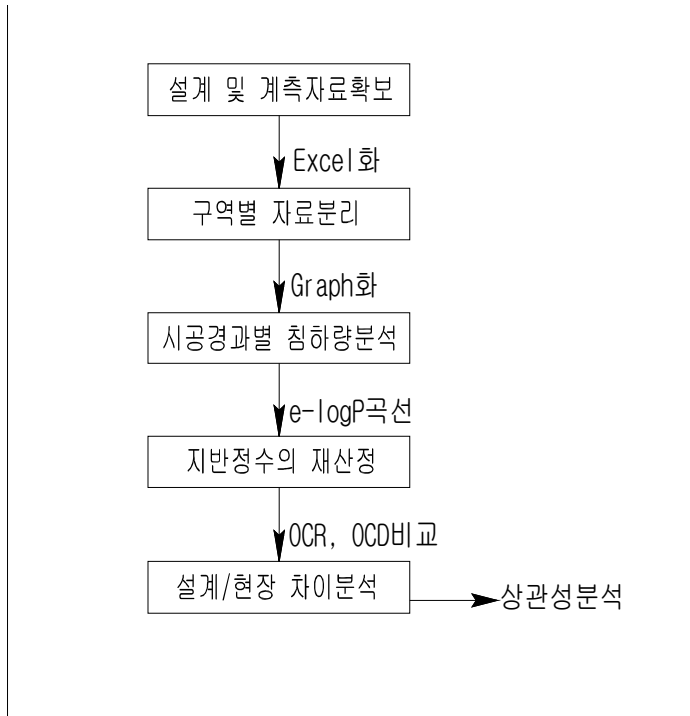


그림 4.1 현장계측자료 분석흐름도

4.2 영산강 하구언지역

가. 지반개량 공법

본 영산강 하구언지역은 남악신도시 조성사업의 일환으로 지반개량공법은 연직배수공법 (Paper Board Drain과 Triangular Paper board Drain)과 프리로딩(Preloading)공법이 병행하여 적용되었다. 각각의 토지이용계획에 따른 공법적용은 다음 표 4.1과 같다.

표 4.1 영산강하구언 매립공사의 지반개량공법

구역명	상세공구명		연약층 심도 (m)	처리공법	
				여성고 (P.L.H, m)	연직배수재 (d, m)
1구역	광로2-1	도로부	10.0m	2.0m	P.B.D:1.2m
		구조물부	10.0m	2.0m	P.B.D:1.0m
	옥암 1공구	도로	4.0~10.0m	3.0m이하	P.B.D:1.0~1.4m
		상업및공공용지	4.0~6.0m	3.0m이하	P.B.D:1.8~2.4m
		공동주택	3.0~9.0m	2.0~5.0m이하	P.B.D:0.8~2.4m
		단독주택	4.0m	3.0m이하	P.B.D:1.4m
		경관배수로	6.0m	3.0m이하	P.B.D:1.2m
	옥암 3공구	도로	10.0~18.0m	4.0m	P.B.D:1.2~2.4m
		상업 및 공공용지	10.0~15.0m	-	P.B.D:1.2~2.4m
		단독주택용지	8.0~18.0m	2.0m	P.B.D:2.0~2.4m
		공동주택용지	4.0~14.0m	2.0m	P.B.D:1.2~1.6m
		경관배수로	12.0~18.0m	-	P.B.D:1.6~2.4m
	남악 2공구	도로	10.0~14.0m	3.0~4.0m	P.B.D:1.0~2.2m
		상업 및 공공용지	8.0~12.0m	3.0~4.0m	P.B.D:1.4~2.4m
단독주택부지		10.0m	-	P.B.D:2.2m	
공동주택부지		11.0~12.0m	-	T.P.D:1.4m	
2구역	남악 1공구	도로	8.0~24.0m	3.0~4.0m	P.B.D:1.0~1.2m
		상업 및 공공용지	6.0m	3.0m	P.B.D:1.6m
		단독주택부지	15.0m	3.0m	P.B.D:1.0m
		공동주택부지	12.0m	3.0m	P.B.D:0.8m
		경관배수로	8.0~24.0m	3.0m	P.B.D:0.8~1.2m
	남악 4공구	도로	10.0~24.0m	-	P.B.D:1.6~2.2m
		상업 및 공공용지	7.0~11.0m	4.0m	P.B.D:2.4m
		공동주택부지	9.0~14.0m	4.0m	P.B.D:2.2~2.4m
3구역	옥암 2공구	도로	12.0~13.0m	-	P.B.D:2.4m
		상업 및 공공용지	8.0m	-	P.B.D:2.4m
		단독주택용지	12.0~13.0m	-	P.B.D:2.4m
		공동주택용지	8.0~16.0m	4.0m	P.B.D:2.4m
		경관배수로	12.0~18.0m	-	P.B.D:1.6~2.4m

※ P.B.D : Paper Board Drain, T.P.D : Triangular Paper board Drain

표 4.1 영산강하구언 매립공사의 지반개량공법 (계속)

구역명	상세공구명		연약층 심도 (m)	처리공법	
				여성고 (P.L.H, m)	연직배수재 (d, m)
3구역	옥암 3공구	도로	19.0m	-	P.B.D:2.2m
		상업 및 공공용지	13.0~19.0m	-	P.B.D:2.2~2.4m
		단독주택용지	19.0m	-	P.B.D:2.2m
		경관배수로	13.0~20.0m	-	P.B.D:1.8~2.4m
	옥암 4공구	공공용지	8.0~12.0m	4.0m	P.B.D:1.4~2.4m
	남악 2공구	도로	10.0~14.0m	3.0~4.0m	P.B.D:1.0~2.2m
		상업 및 공공용지	8.0~10.0m	4.0m	P.B.D:2.4m
		공동주택부지	12.0m	-	T.P.D:1.4m
	남악 3공구	도 로	15.0~24.0m	-	P.B.D:0.8~2.4m
		상업 및 공공용지	10.0m	4.0m	P.B.D:2.4m
		공동주택부지	12.0m	-	P.B.D:1.4m
		경관배수로	12.0~20.0m	4.0m	P.B.D:1.6~2.4m
남악 4공구	상업 및 공공용지	19.0m	-	P.B.D:2.2m	
4구역	남악 1공구	도로	8.0~24.0m	3.0~4.0m	P.B.D:1.0~1.2m
		상업 및 공공용지	8.0~22.0m	2.0~4.0m	P.B.D:1.4m
		단독주택부지	8.0~22.0m	2.0~3.0m	P.B.D:1.0~1.4m
		공동주택부지	12.0~16.0m	3.0~4.0m	P.B.D:0.8~1.8m
		경관배수로	8.0~24.0m	3.0m	P.B.D:0.8~1.2m
	남악 3공구	도 로	15.0~24.0m	-	P.B.D:0.8~2.4m
		상업 및 공공용지	7.0~24.0m	4.0m	P.B.D:1.2~2.0m
		단독주택부지	23.0m	-	P.B.D:2.0m
		공동주택부지	20.0~24.0m	4.0m	P.B.D:1.2~2.0m
		경관배수로	12.0~20.0m	4.0m	P.B.D:1.6~2.4m
	남악 4공구	도 로	10.0~24.0m	-	P.B.D:1.6~2.2m
		상업 및 공공용지	18.0~24.0m	-	P.B.D:1.8~2.2m
		단독주택부지	22.0m	-	P.B.D:2.0m
		경관배수로	20.0~22.0m	4.0m	P.B.D:1.6~2.4m
	남악 5공구	도로	20.0m	-	P.B.D:1.6~2.0m
		공공용지	17.0m	-	P.B.D:2.2m
경관배수로		18.0m	-	P.B.D:1.8~2.4m	

나. 계측기기 매설

(1) 계측기 매설기준

계측기 매설지점은 토지이용계획에 따른 허용잔류침하량, 지반처리공법의 유사성으로 구분되는 지점으로 공사 시공중과 시공후의 토질특성을 대표하는 지점에 매설·설치되었고, 계측기 매설기준은 연약지반심도 10.0m이하, 15.0m이하, 24.0m이하로 구분하여 설치하였다. 그림 4.2는 type별 계측기 설치도를 나타내며, 각 type별 매설기준은 표 4.2~표 4.4와 같다.

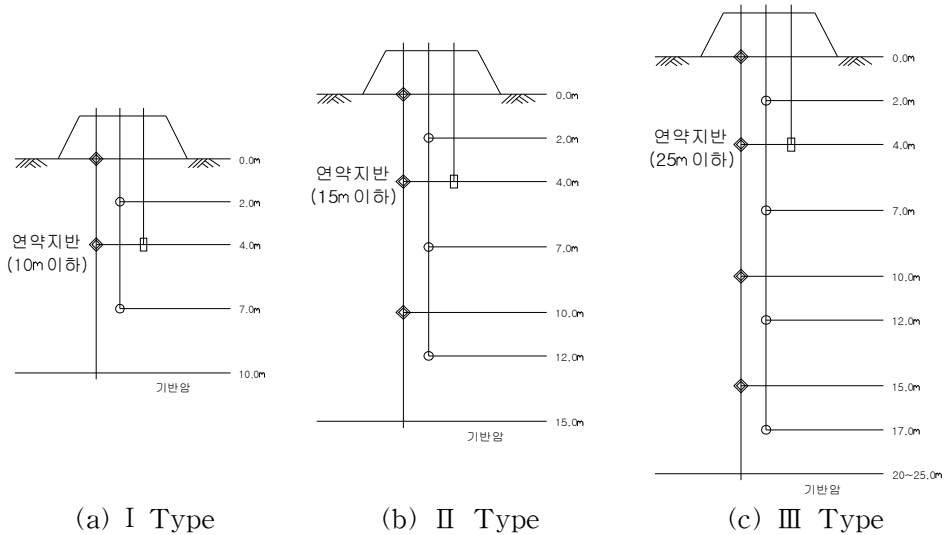


그림 4.2 Type별 계측기 설치도

표 4.2 I Type (연약층 10.0m이하) 매설기준

구 분	층별침하계	간극수압계	지하수위계
매설 기준	<ul style="list-style-type: none"> SM1 : 심도 0.3m 0.0~4.0m 층별침하 SM2 : 심도 4.0m 4.0~10m 층별침하 	<ul style="list-style-type: none"> PP1 : 심도 2.0m 0.0~4.0m 간극수압 PP2 : 심도 7.0m 4.0~10m 간극수압 	<ul style="list-style-type: none"> 연약지반 5.0m 설치 지하수위면 측정

표 4.3 II Type (연약층 15.0m이하) 매설기준

구 분	층별침하계	간극수압계	지하수위계
매설 기준	<ul style="list-style-type: none"> · SM1 : 심도 0.3m 0.0~4.0m 층별침하 · SM2 : 심도 4.0m 4.0~10m 층별침하 · SM3 : 심도 10.0m 10~15m 층별침하 	<ul style="list-style-type: none"> · PP1 : 심도 2.0m 0.0~4.0m 간극수압 · PP2 : 심도 7.0m 4.0~10m 간극수압 · PP3 : 심도 13.0m 10~15m 간극수압 	<ul style="list-style-type: none"> · 연약지반 5.0m 설치 · 지하수위면 측정

표 4.4 III Type (연약층 24.0m이하) 매설기준

구 분	층별침하계	간극수압계	지하수위계
매설 기준	<ul style="list-style-type: none"> · SM1 : 심도 0.3m 0.0~4.0m 층별침하 · SM2 : 심도 4.0m 4.0~10m 층별침하 · SM3 : 심도 10.0m 10~15m 층별침하 · SM4 : 심도 20.0m 15~24m 층별침하 	<ul style="list-style-type: none"> · PP1 : 심도 2.0m 0.0~4.0m 간극수압 · PP2 : 심도 7.0m 4.0~10m 간극수압 · PP3 : 심도 13.0m 10~15m 간극수압 · PP4 : 심도 17.0m 15~24m 간극수압 	<ul style="list-style-type: none"> · 연약지반 5.0m 설치 · 지하수위면 측정

다. 성토 및 시공과정

(1) 1구역 계측결과 분석

지반고가 평균해수면(M.S.L.) 이상 그리고 연약지반심도 10m 내외의 지역을 구분하여 정리하여 분석하였다.

(가) 1구역 매설위치

1구역은 기존제방 내 지역으로서 영산강 하구연 축조 이전, 현재로부터 약 100여년 전에 축조된 것으로 추정되며, 기존제방내부는 최소 100여년 이상

경작이 이뤄진 상태이다. 기존제방을 경계로 토질특성이 차이가 나므로 이에 1구역으로 구분하여 분석하였으며, 매설위치는 그림 4.3과 같다.

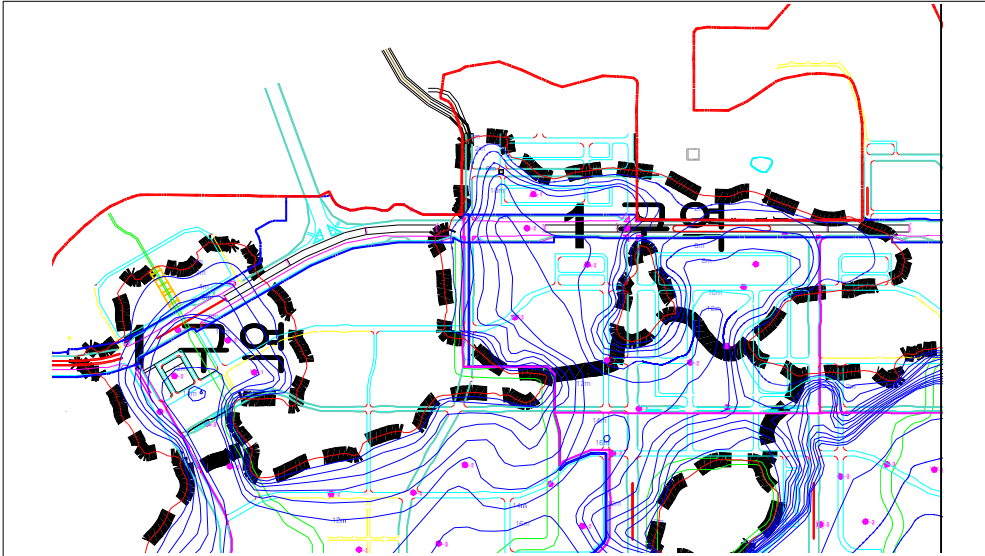


그림 4.3 1구역 매설위치

(나) 1구역 측정현황

1구역은 연약지반심도가 최대14.0m 이며 평균 10.5m이다. 연약지반처리는 주로 P.B.D 공법으로 처리하였으며 일부 구간에서 T.P.D시공을 하였다. 배수재 간격은 1.2~2.4m 간격으로 다양하게 시공하였는데, 이는 연도별 도시개발 이용계획에 따라 연약지반처리기간이 달라지기 때문에 생기는 현상이다.

표 4.5에서 알 수 있는 바와같이 실내시험값을 이용한 계획침하량은 135.0~225.0cm, 평균 198.6cm였으나, 실제 약6.04m를 성토 시공하여 계측한 결과 43.0~115.0cm, 평균 76.6cm로서 계획대비 약 40% 정도의 침하량이 발생할 것으로 예상된다.

경과시간별 성토고에 따른 침하량의 변화는 그림 4.4~그림 4.13와 같다.

표 4.5 1구역 측정현황

측 점	설계내용			시공 성토고	계측현황		
	연약지반 치 리	연약 심도	설 계 침하량		심도	계 측 침하량	예 상 침하량
P-WR-1	P.B.D 1.2× 1.2	13.0m	204cm	5.19m	0.0	113.8	115.0
					4.0	74.2	75.0
					10.0	7.6	12.0
P-WR-2	P.B.D 1.2× 1.2	8.0m	204cm	5.05m	0.0	71.1	72.0
					4.0	37.0	38.0
P-WR-3	P.B.D 1.2× 1.2	11.0m	216cm	7.50m	0.0	55.8	65.0
					3.0	33.3	42.0
					6.0	17.2	17.2
P-2-2	P.B.D 1.4× 1.4	11.0m	216cm	7.50m	0.0	73.2	82.0
					2.7	42.2	47.0
					5.0	17.7	22.0
P-2-3	P.B.D 1.4×1.4	14.0m	225cm	7.48m	0.0	76.1	80.0
					4.0	38.3	40.0
					10.0	6.8	7.0
P-2-4	P.B.D 2.2× 2.2	12.0m	207cm	5.41m	0.0	65	77.0
					4.0	30.5	37.0
					10.0	9.5	13.0
P-2-5	T.P.D 1.4×1.4	11.5m	181cm	4.73m	0.0	40.4	43.0
					4.0	22.0	24.0
					8.6	5.8	6.0
P-2-6	P.B.D 2.0×2.0	14.0m	213cm	5.26m	0.0	37.2	43.0
					4.0	18.9	22.0
					10.0	4.8	6.0
P-2-8	P.B.D 2.0×2.0	10.0m	204cm	6.15m	0.0	80.4	90.0
					4.0	28.5	30.0
P-2-10	P.B.D 2.4×2.4	9.0m	197cm	6.15m	2.0	74.2	99.0
					6.0	21.7	30.0
최소		8.0m	135cm	4.73m		37.2	43.0
최대		14.0m	225cm	7.5m		113.8	115.0
평균		10.5m	198.6cm	6.04m		69.2	76.6

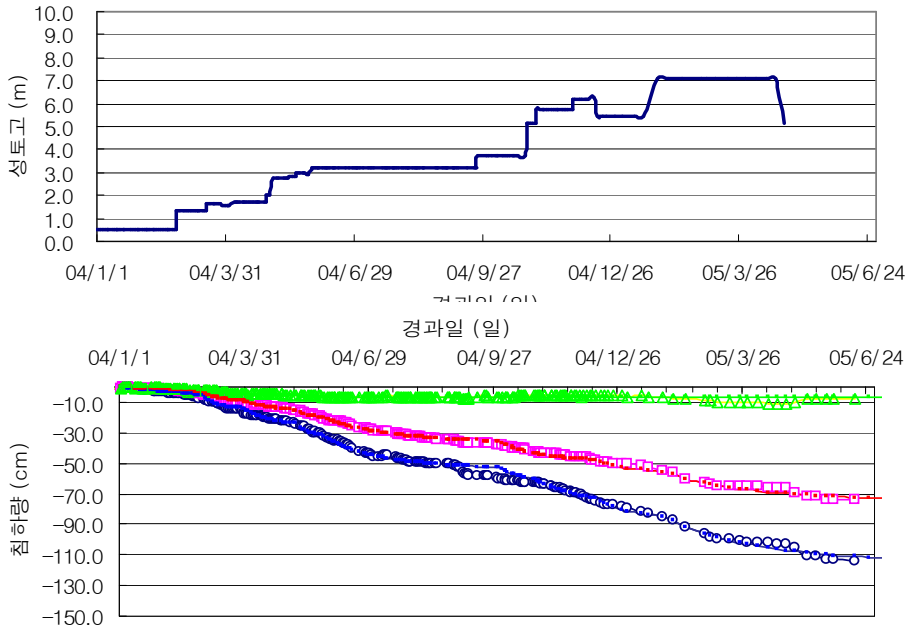


그림 4.4 성토경과에 따른 침하변화(P-WR-1)

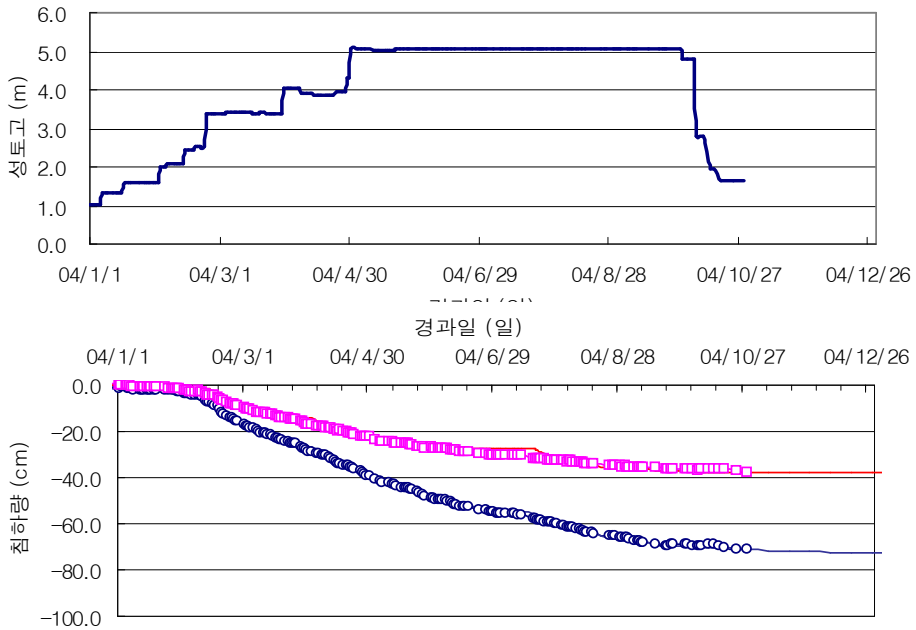


그림 4.5 성토경과에 따른 침하변화(P-WR-2)

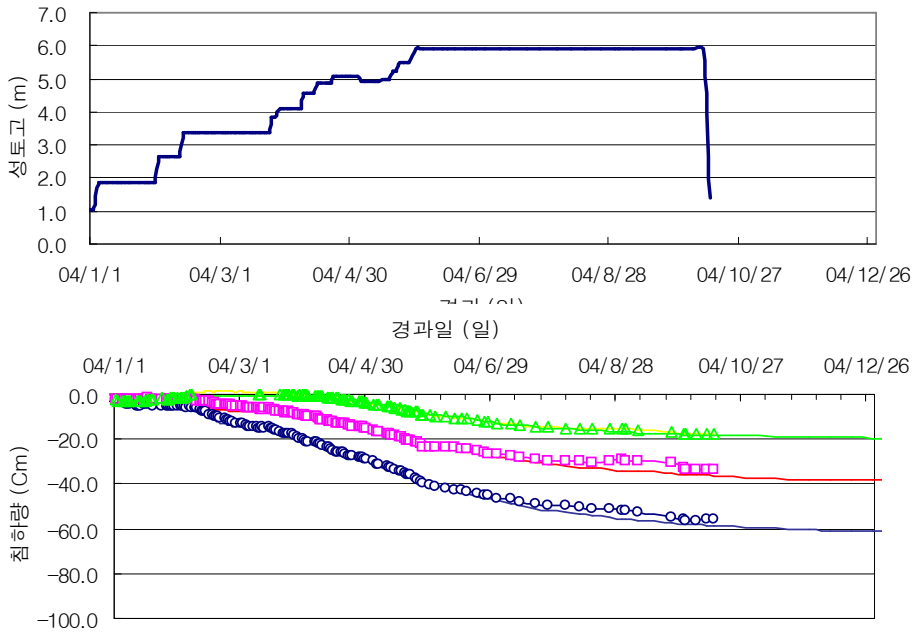


그림 4.6 성토경과에 따른 침하변화(P-WR-3)

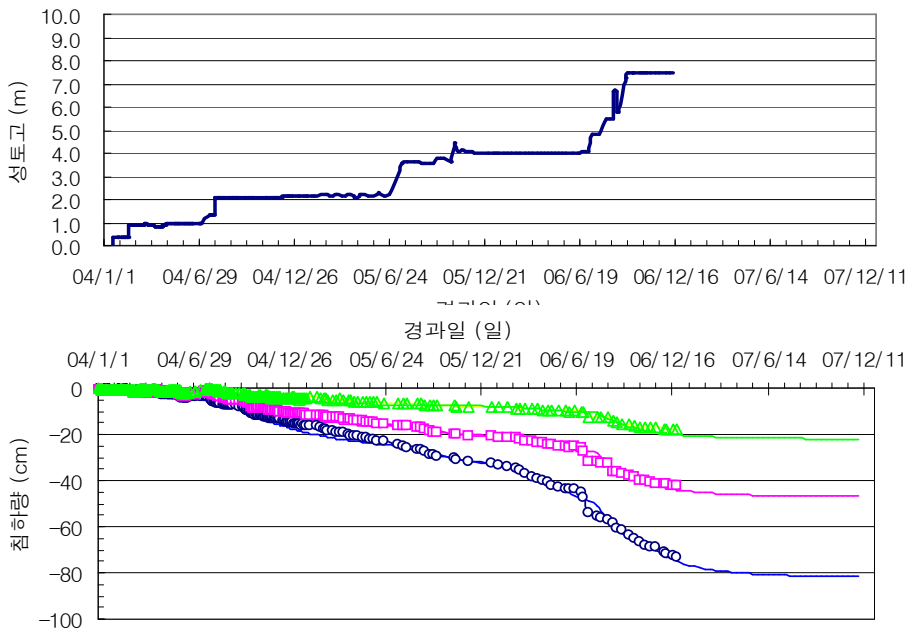


그림 4.7 성토경과에 따른 침하변화(P-2-2)

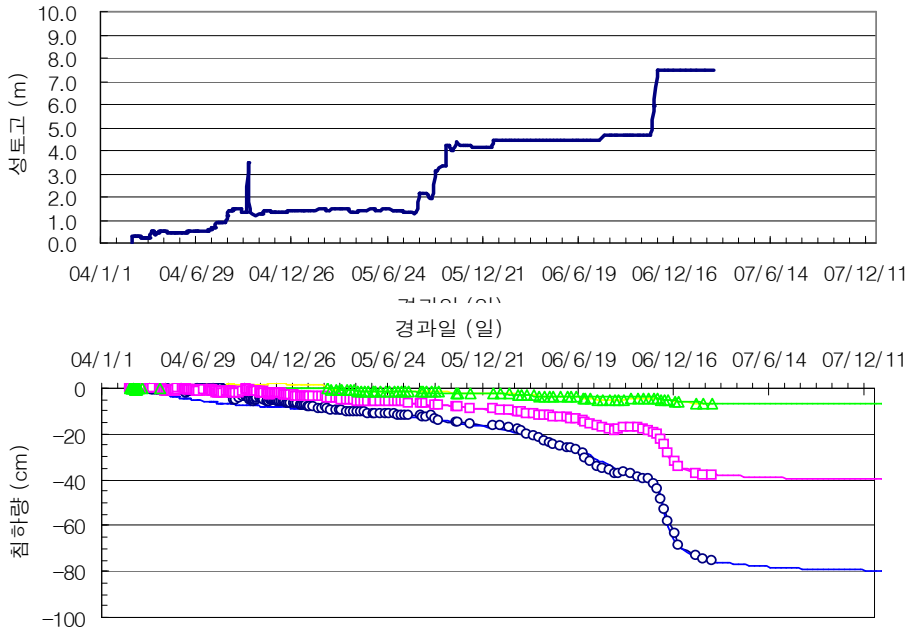


그림 4.8 성토경과에 따른 침하변화(P-2-3)

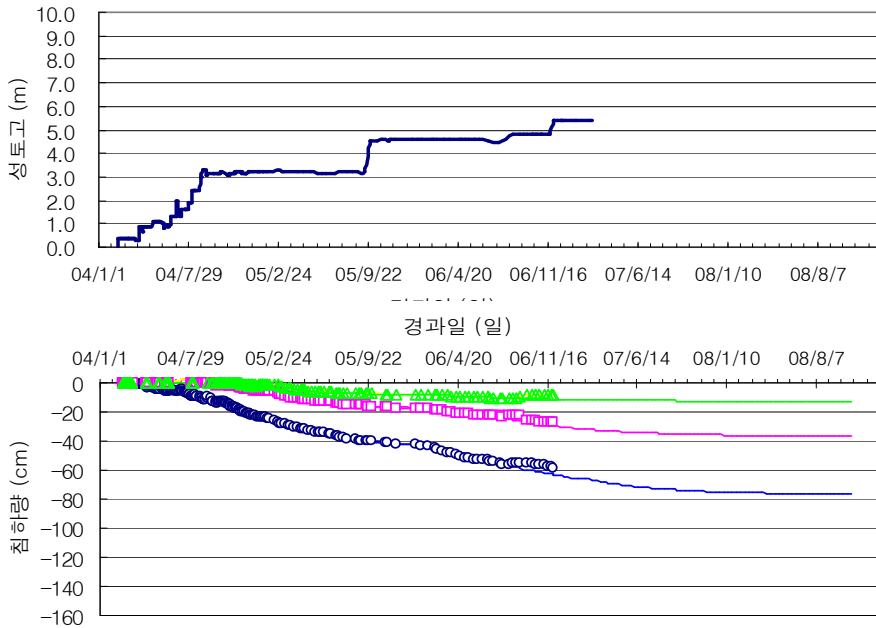


그림 4.9 성토경과에 따른 침하변화(P-2-4)

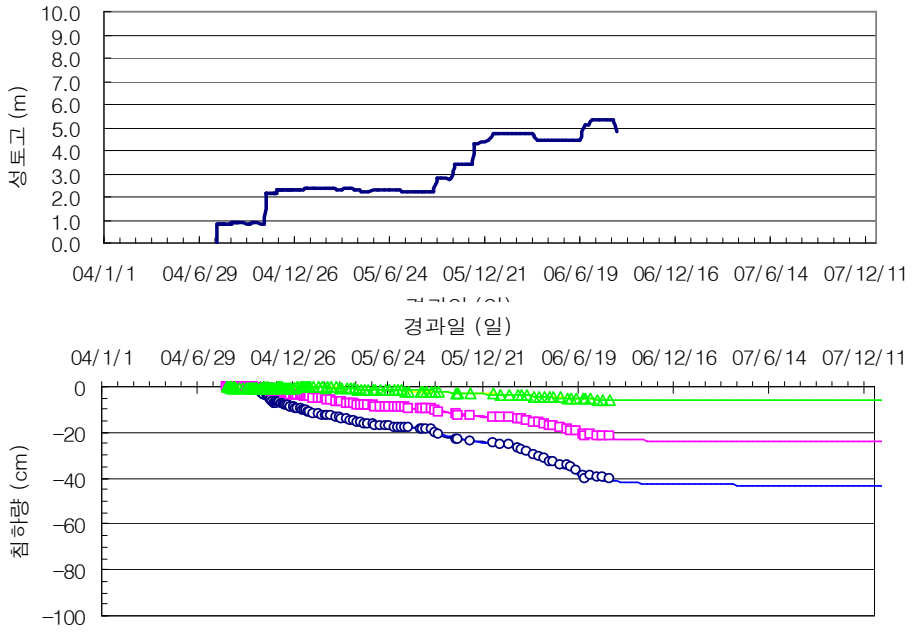


그림 4.10 성토경과에 따른 침하변화(P-2-5)

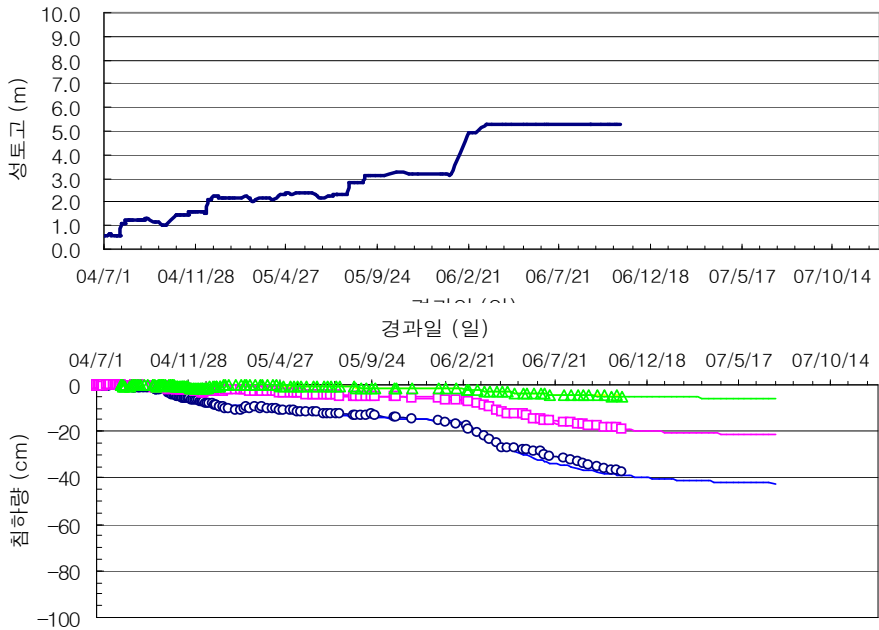


그림 4.11 성토경과에 따른 침하변화(P-2-6)

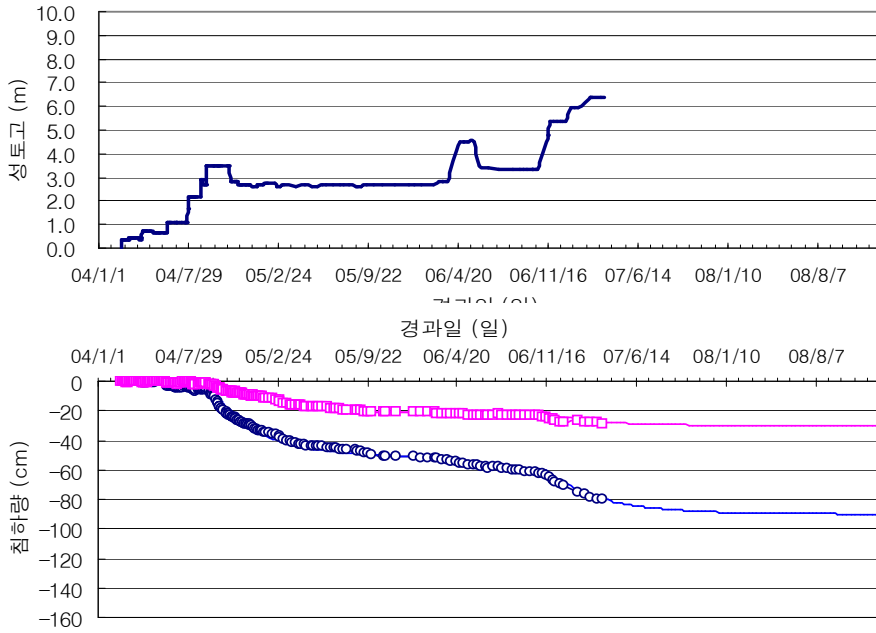


그림 4.12 성토경과에 따른 침하변화(P-2-8)

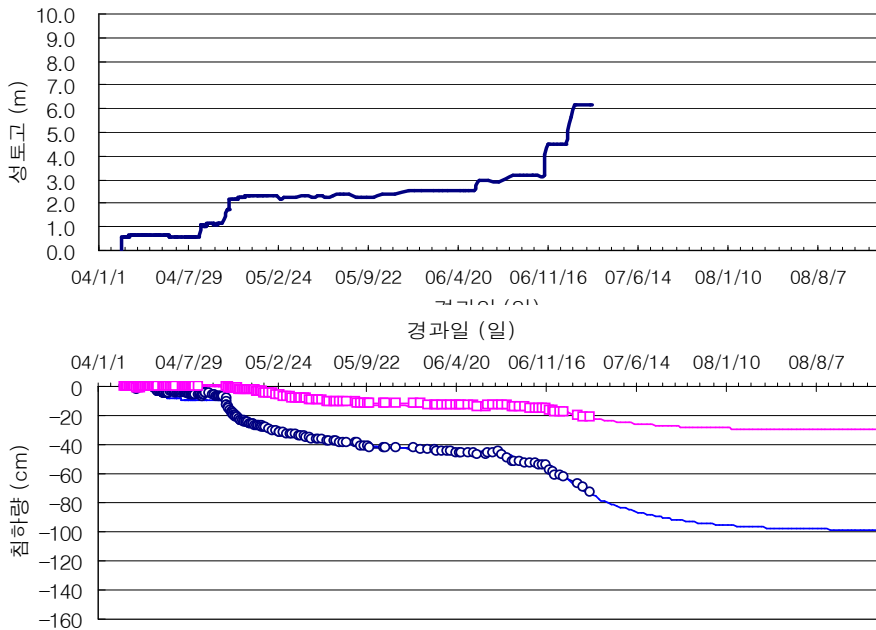
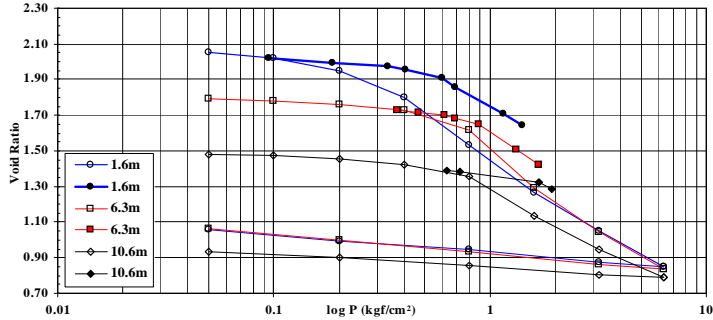


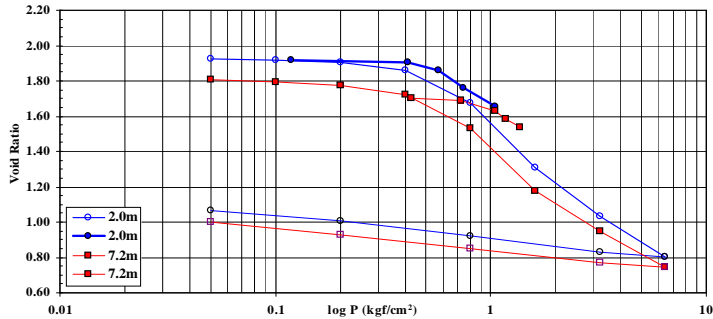
그림 4.13 성토경과에 따른 침하변화(P-2-10)

(다) 현장압밀곡선(e-logP) 작도

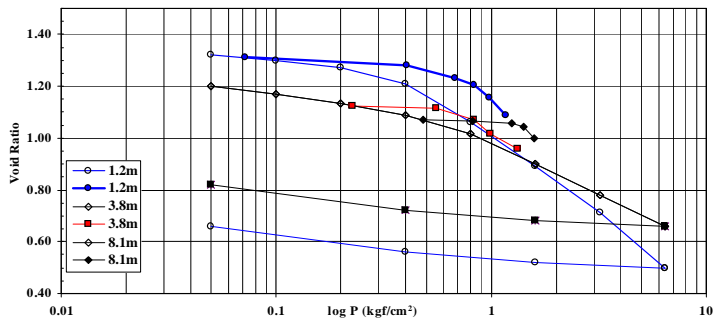
성토단계별로 계측을 실시하여 침하량을 측정하고 각 성토응력별 침하량을 검토하여 간극비를 선정하고 현장압밀(e-logP)곡선을 작성한 것으로 그림 4.14와 같다.



(a) P-WR-1

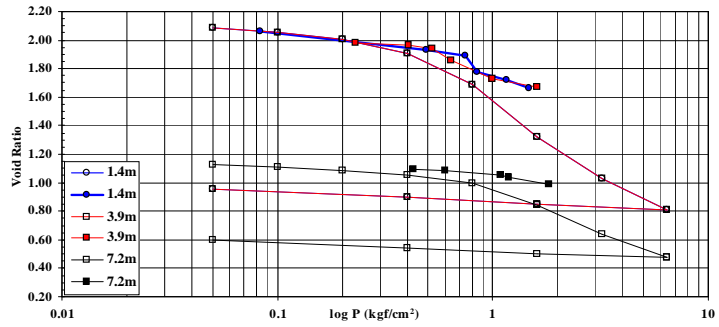


(b) P-WR-2

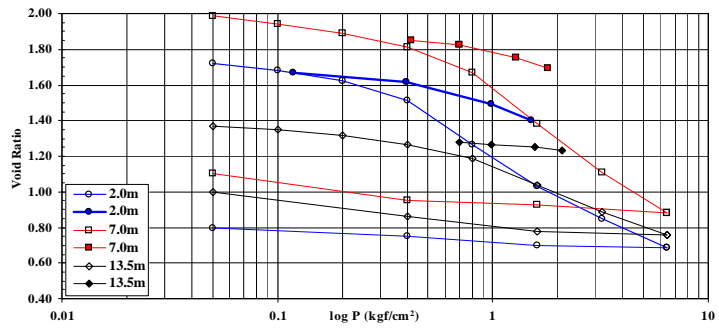


(c) P-WR-3

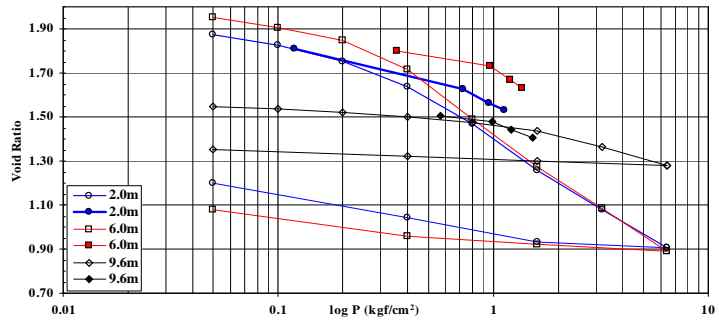
그림 4.14 계측지점별 e-logP곡선(1구역)



(d) P-2-2

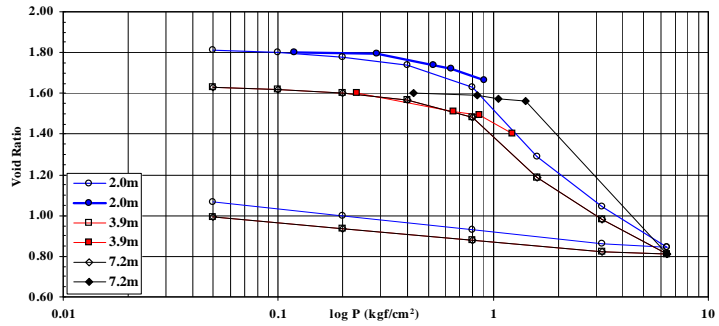


(e) P-2-3

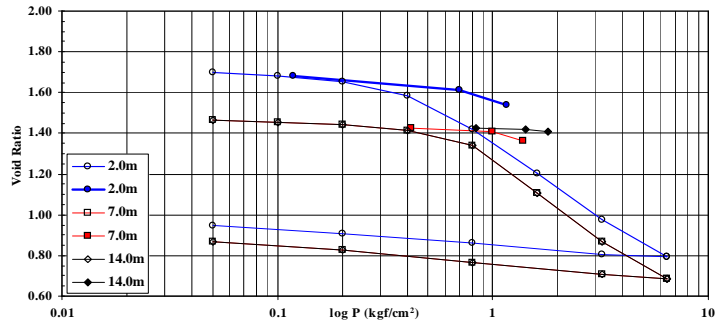


(f) P-2-4

그림 4.14 계측지점별 e - $\log P$ 곡선(1구역) (계속)



(g) P-2-5



(h) P-2-6

그림 4.14 계측지점별 e-logP곡선(1구역) (계속)

(라) 현장토질특성

그림 4.15~그림 4.17은 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수, OCD와 OCR, P_o+P_c 의 변화를 나타낸 것이다.

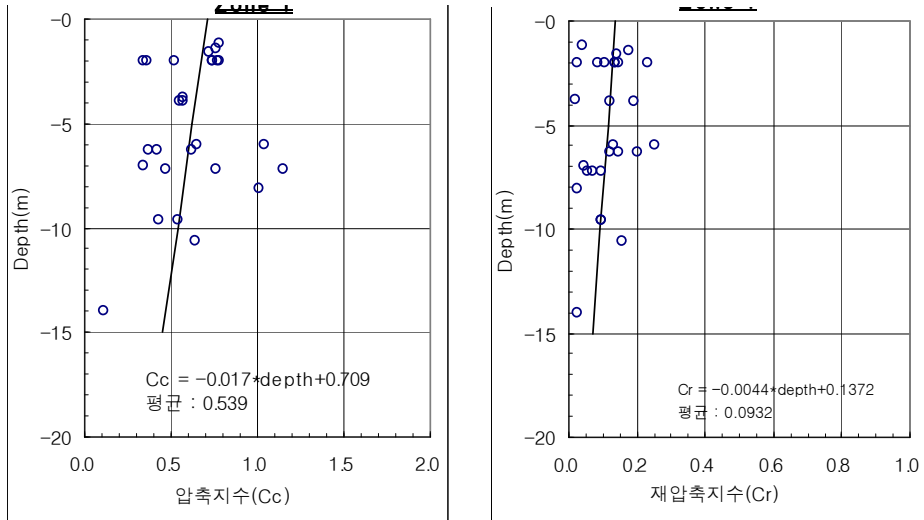


그림 4.15 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(1구역)

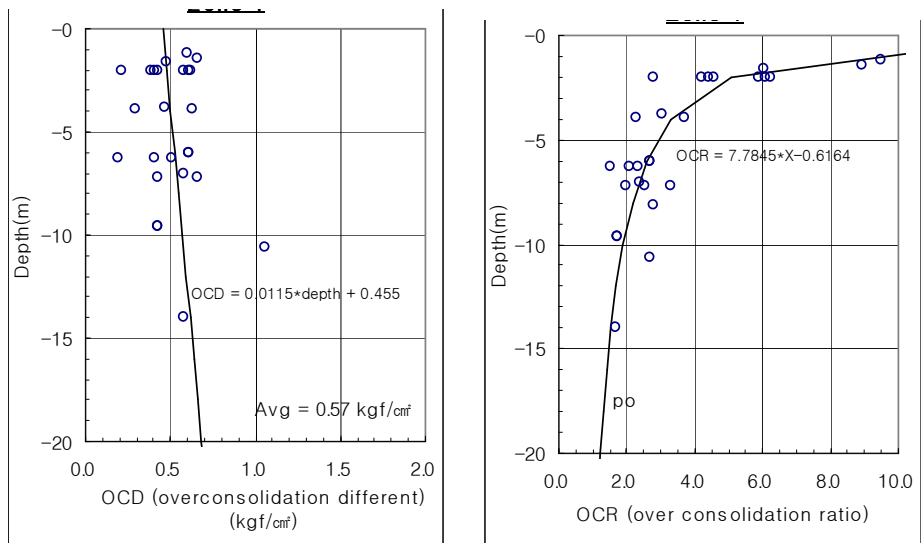


그림 4.16 깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(1구역)

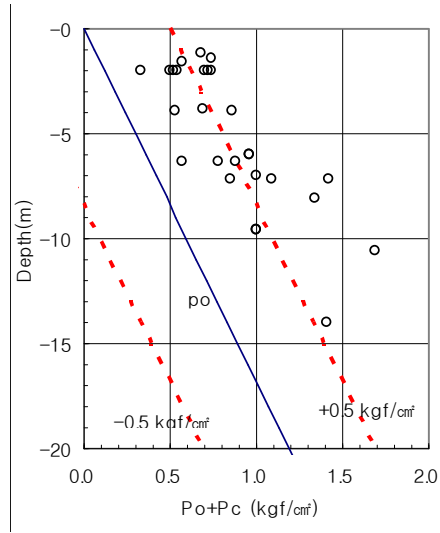


그림 4.17 깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(1구역)

(2) 2 구역 계측결과 분석

지반고가 평균해수면(M.S.L.) 이상 그리고 연약지반심도 14m내외의 지역이며 대죽도 서쪽의 계측기 매설지점을 정리하여 분석하였다.

(가) 2구역 매설위치

2구역 또한 기존제방 내 지역으로서 영산강하구언 축조 이전, 현재로부터 약100여년 전에 축조된 것으로 추정되며, 기존제방내부는 최소 100여년 이상 경작이 이뤄진 상태이다. 기존제방을 경계로 토질특성이 차이가 나므로 이에 2구역으로 구분하여 분석 연구하였으며, 그림 4.18과 같이 매설하였다.

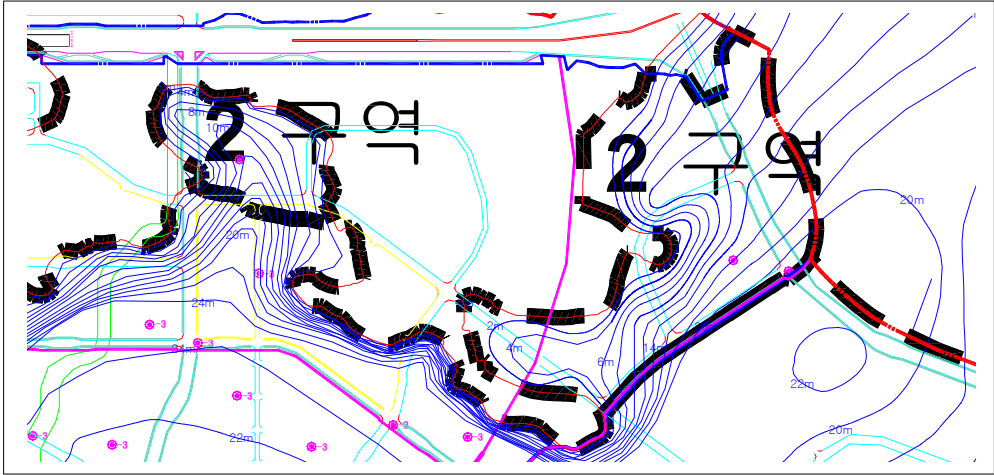


그림 4.18 2구역 매설위치

(나) 2구역 측정현황

2구역은 연약지반심도가 최대 14.0m이며, 연약지반처리는 주로 P.B.D 공법으로 배수재 간격은 0.8×0.8m 간격으로 시공하였는데, 이는 연약지반처리기간이 약 3개월로 비교적 단기간에 연약지반처리를 하여야 하기 때문이다. 실내시험값을 이용한 계획침하량은 254.0cm였으나, 실제 약 9.74m를 성토 시공하여 계측한 결과 190.0cm로서 계획대비 약 74.8% 정도의 침하량이 발생할 것으로 예상된다. 2구역에 대한 측정현황은 다음 표 4.6과 같으며, 성토경과에 따른 침하변화는 그림 4.19에 나타내었다.

표 4.6 2구역 측정현황

측 점	설계내용			시공 성토고	계측현황		
	연약지반 처리	연약심도	설 계 침하량		심도	계 측 침하량	예 상 침하량
P-1-1	P.B.D 0.8× 0.8	14.0m	254cm	9.74m	0.0	190.4	190
					4.0	107.3	107
					10.0	50.3	50
평균		14.0	254	6.04		190.4	190

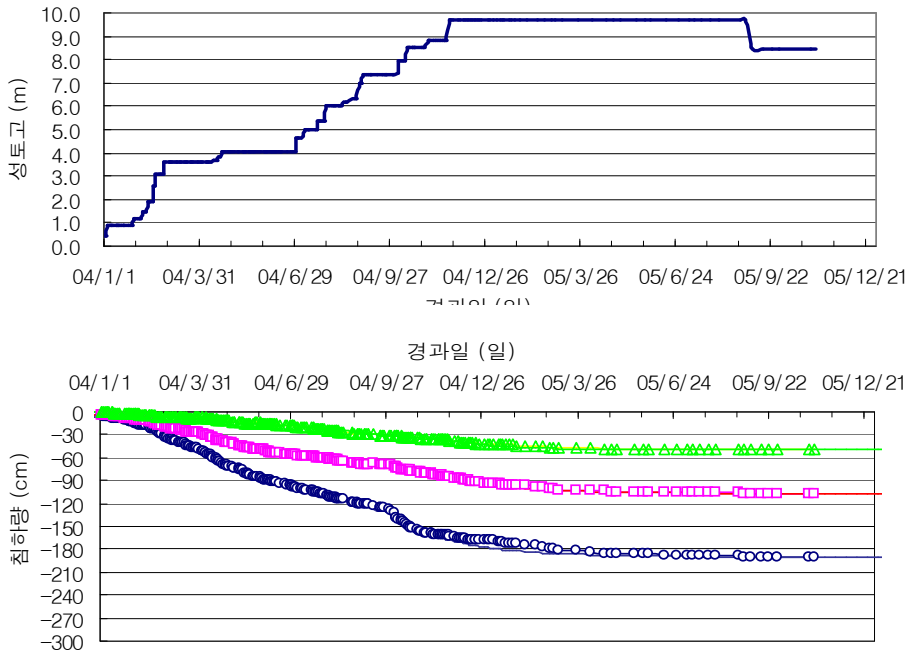


그림 4.19 성토경과에 따른 침하변화(P-1-1)

(다) 현장압밀곡선(e-logP) 작도

성토단계별로 계측을 실시하여 침하량을 측정하고 각 성토응력별 침하량을 검토하여 간극비를 선정하고 현장압밀(e-logP)곡선을 작성하였으며, 그림 4.20과 같다.

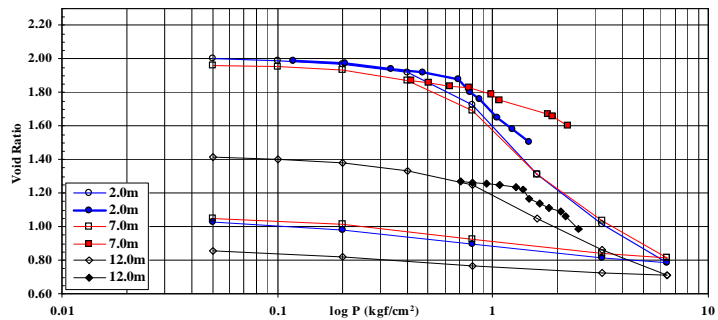


그림 4.20 계측지점별 e-logP곡선(P-1-1)

(라) 현장토질특성

그림 4.21~그림 4.23은 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수, OCD와 OCR, P_o+P_c 의 변화를 나타낸 것이다.

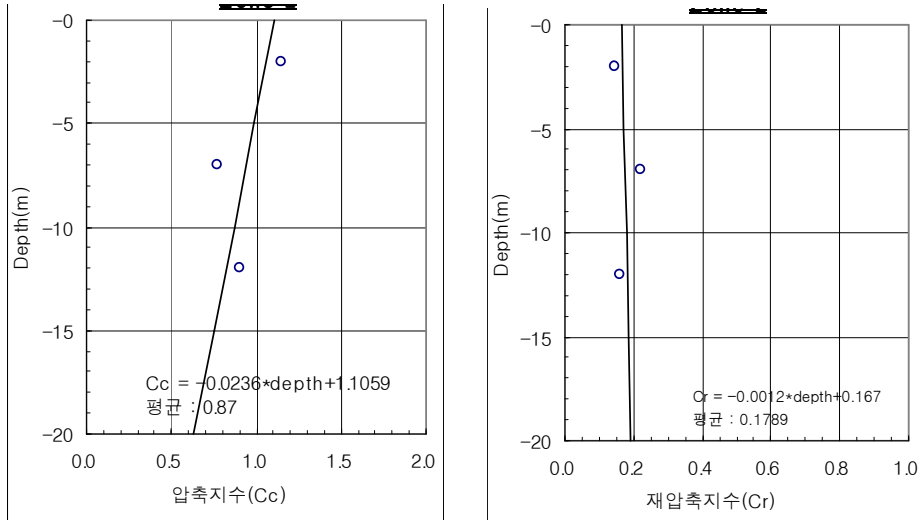


그림 4.21 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(2구역)

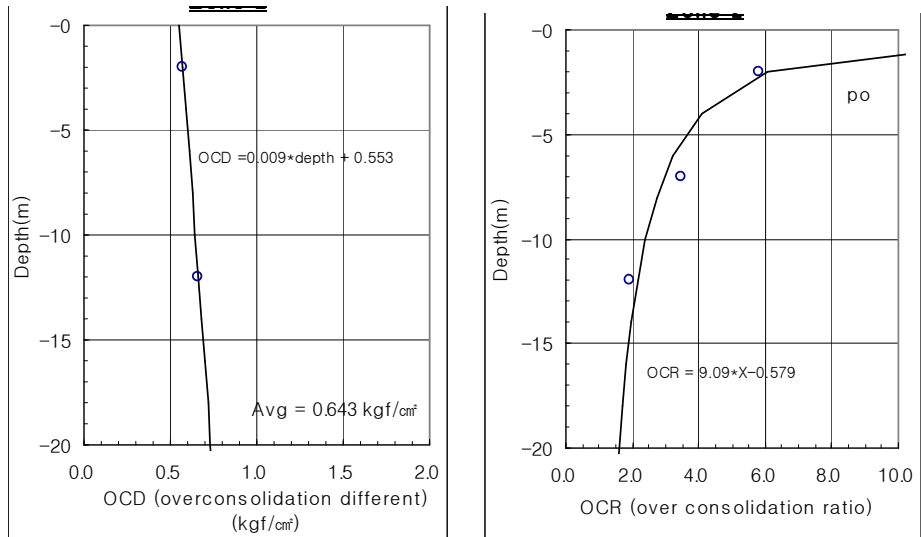


그림 4.22 깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(2구역)

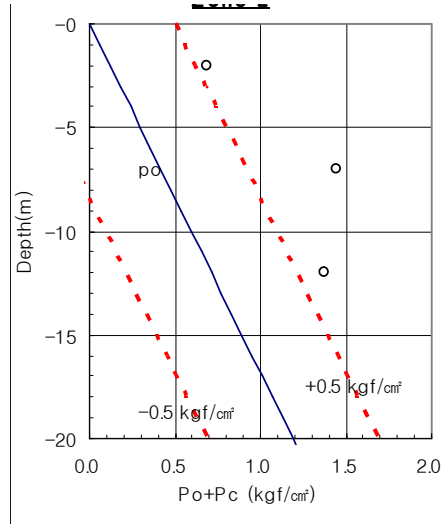


그림 4.23 깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(2구역)

(3) 3 구역 계측결과 분석

지반고가 평균해수면(M.S.L.) 이하, 그리고 연약지반심도 10~20m 내외의 지역이며 대죽도 서측의 계측기 매설지점을 정리하여 분석하였으며, 매설위치는 그림 4.24와 같다.

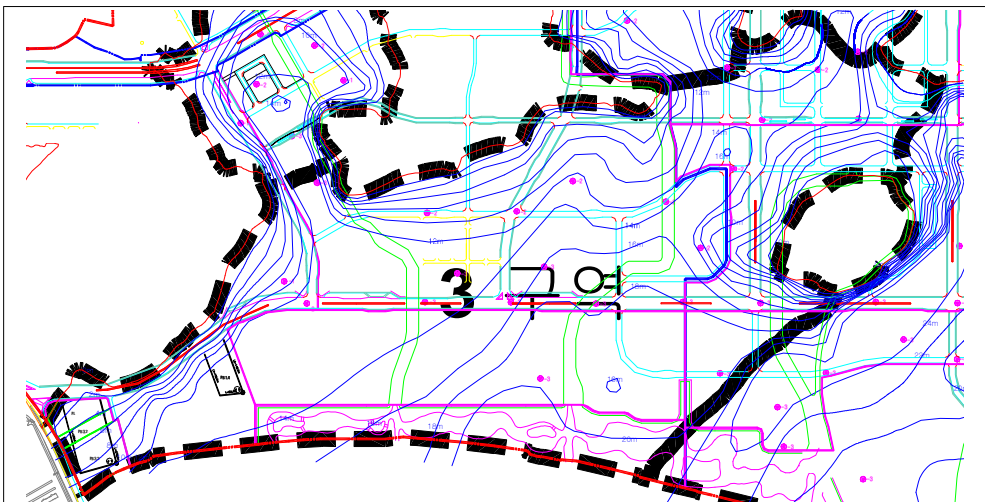


그림 4.24 3구역 매설위치

(가) 3구역 측정현황

3구역은 연약지반심도가 최대 14.0m이며 평균 10.5m이다. 연약지반처리는 주로 P.B.D 공법으로 배수재 간격은 1.2~2.2m 간격으로 다양하게 시공하였다.

실내시험값을 이용한 계획침하량은 189.0~236.0cm, 평균 217.5cm였으나, 실제 약6.14m를 성토 시공하여 측정한 결과 61.0~153.8cm, 평균 92.5cm로서 계획대비 약 42% 정도의 침하량이 발생할 것으로 예상되며, 3구역의 측정현황은 표 4.7에 나타낸 바와 같다.

성토경과에 따른 침하량의 변화는 그림 4.25~그림 4.28에 나타내었다.

표 4.7 3구역 측정현황

측 점	설계내용			시공 성토고	계측현황		
	연약지반 처 리	연약 심도	설 계 침하량		심도	계 측 침하량	예 상 침하량
P-2-1	P.B.D 1.2× 1.2	14.0m	219cm	6.63m	0.0	89.5	95.0
					4.0	46.4	55.0
					10.0	12.4	10.0
P-1-7	P.B.D 2.0× 2.0	11.0m	189cm	4.44m	0.0	54.7	61.0
					4.0	18.8	23.0
					8.0	10.0	11.0
P-2-9	P.B.D 2.2× 2.2	13.2m	236cm	6.01m	0.0	58.3	66.0
					4.0	22.8	26.0
					10.0	3.1	4.0
P-3-1	P.B.D 1.0× 1.0	20.5m	226cm	7.50m	0.0	153.8	148.0
					4.0	115.4	113.0
					10.0	37.6	38.0
					15.0	5.4	4.0
최소		8.0m	189cm	4.44m		54.7	61.0
최대		14.0m	236cm	7.5m		153.8	148.0
평균		10.5m	217.5cm	6.14m		89.0	92.5

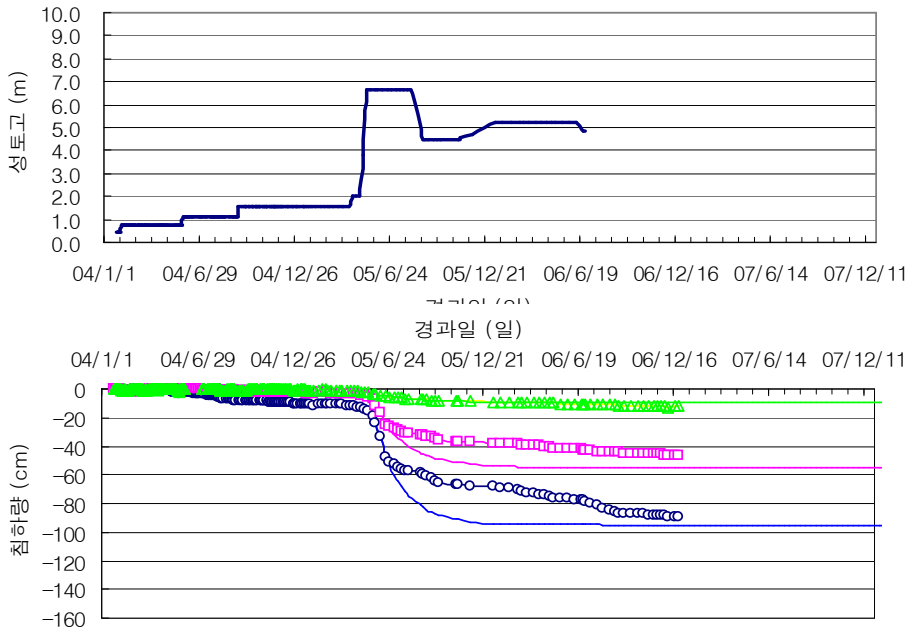


그림 4.25 성토경과에 따른 침하변화(P-2-1)

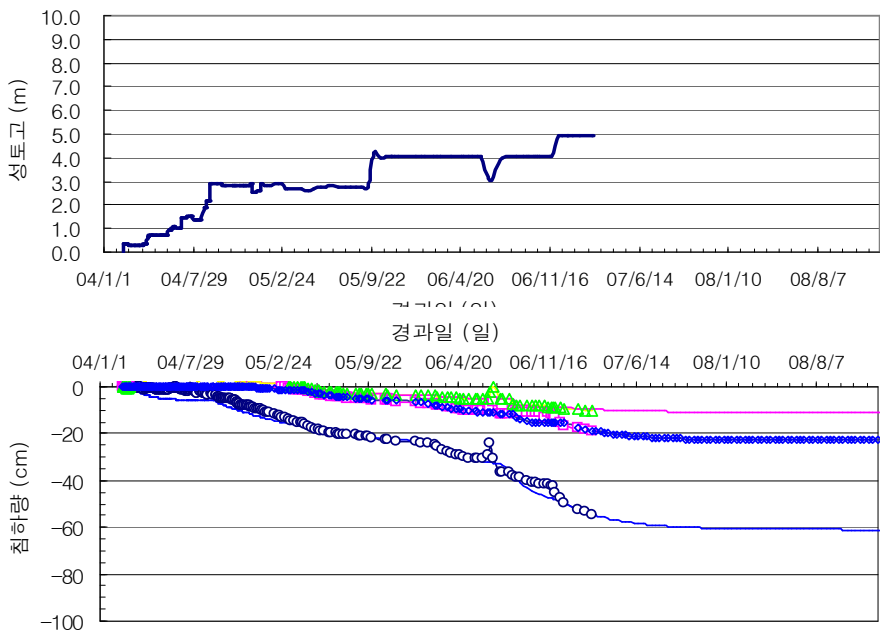


그림 4.26 성토경과에 따른 침하변화(P-2-7)

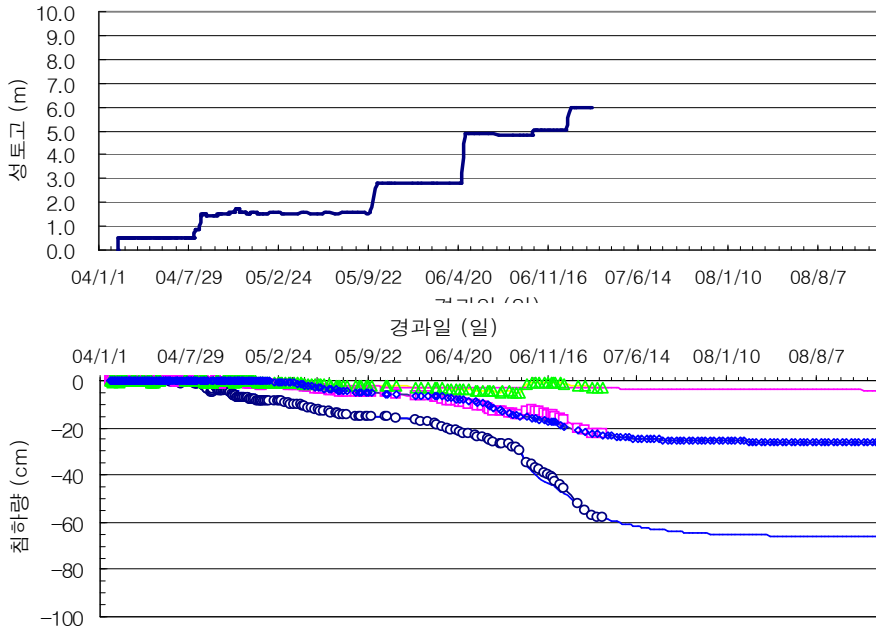


그림 4.27 성토경과에 따른 침하변화(P-2-9)

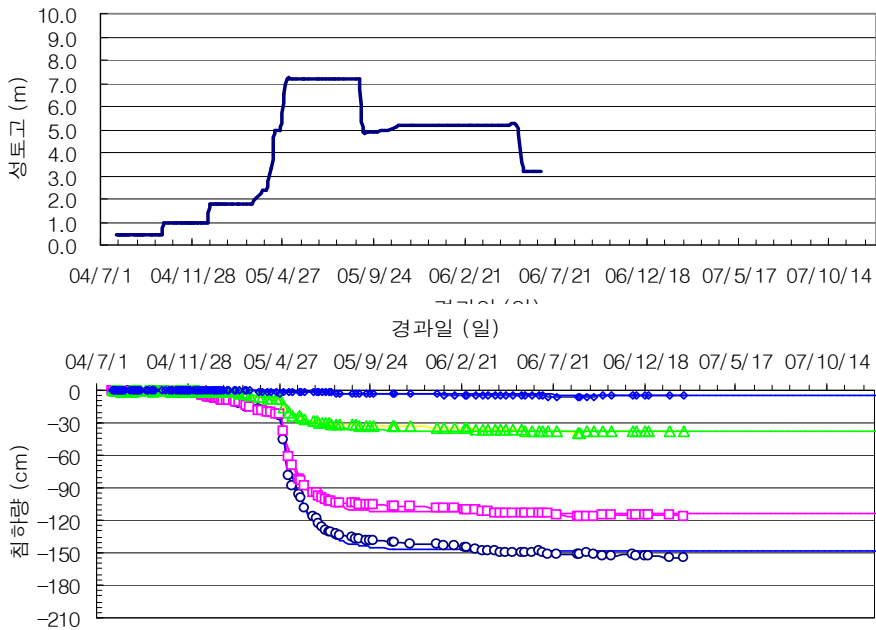
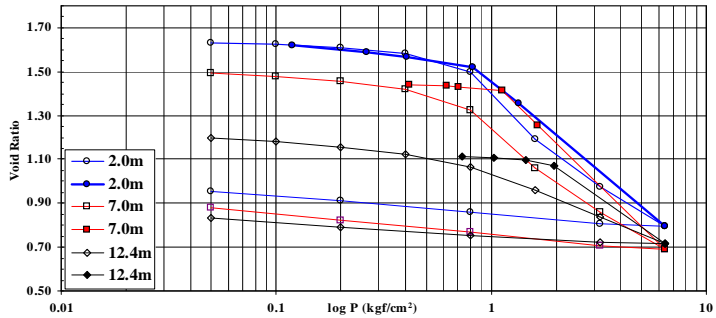


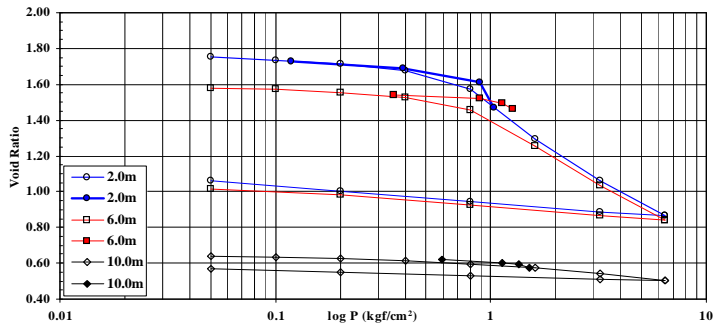
그림 4.28 성토경과에 따른 침하변화(P-3-1)

(나) 현장압밀곡선(e-logP) 작도

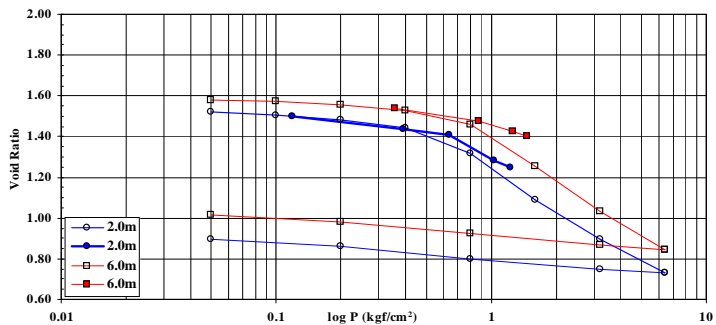
성토단계별로 계측을 실시하여 침하량을 측정하고 각 성토응력별 침하량을 검토하여 간극비를 선정하고 현장압밀(e-logP)곡선을 작성하였으며, 그림 4.29에 나타내었다.



(a) P-2-1

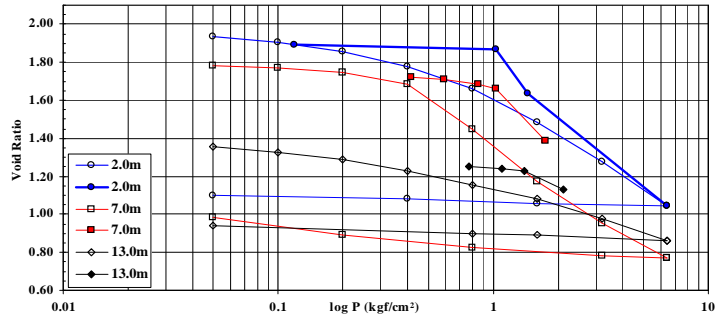


(b) P-2-7



(c) P-2-9

그림 4.29 계측지점별 e-logP곡선(3구역)



(d) P-3-1

그림 4.29 계측지점별 e-logP곡선(3구역) (계속)

(다) 현장토질특성

그림 4.30~그림 4.32는 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수, OCD와 OCR, P_o+P_c 의 변화를 나타낸 것이다.

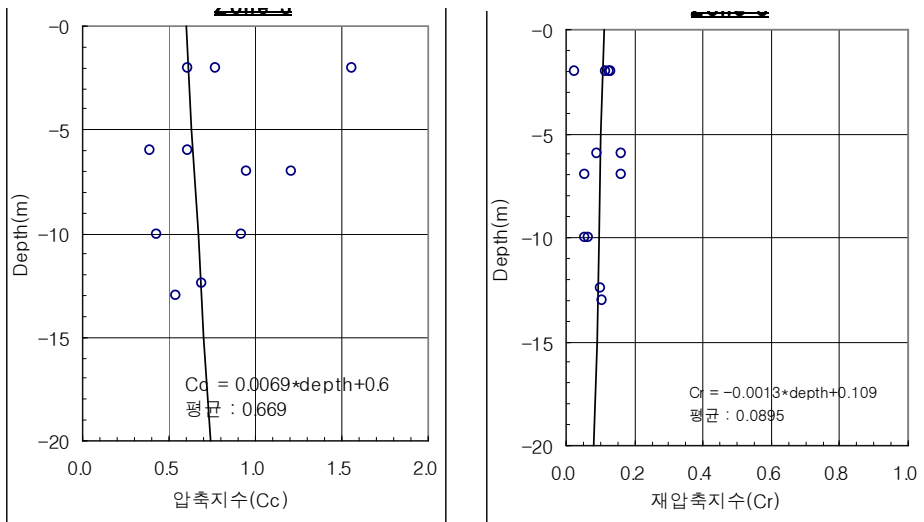


그림 4.30 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(3구역)

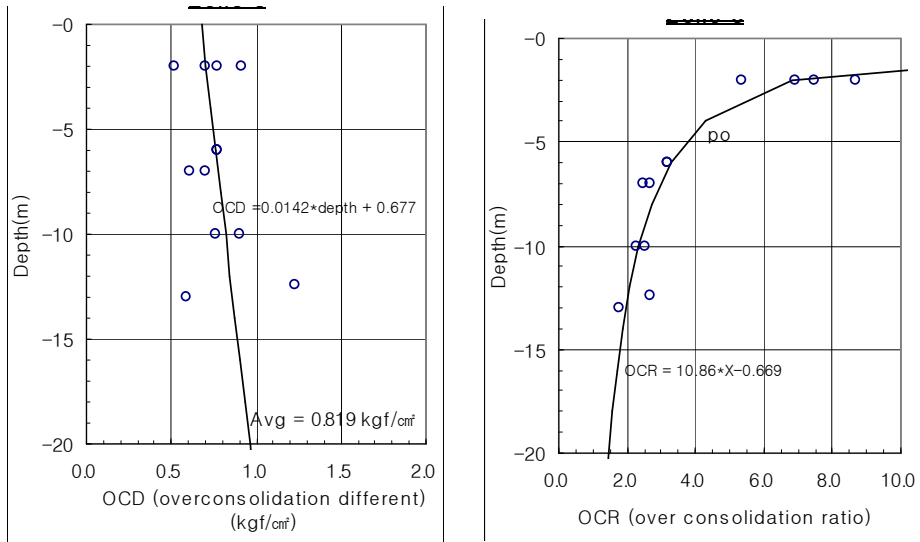


그림 4.31 깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(3구역)

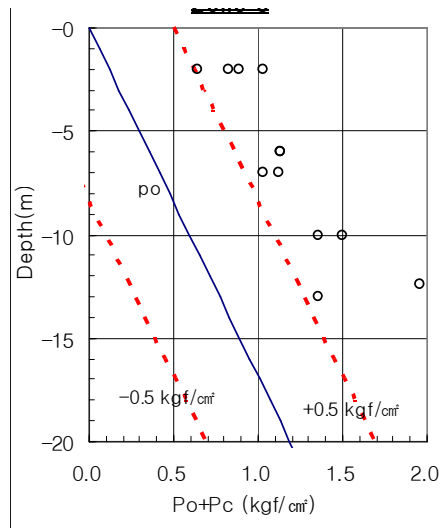


그림 4.32 깊이에 따른 $P_o + P_c$ 의 변화(3구역)

(3) 4구역 측측결과 분석

지반고가 평균해수면(M.S.L.) 이하, 그리고 연약지반심도 20m 내외의 지역이며 대죽도 동측의 측측기 매설지점을 정리하여 분석하였으며, 매설위치는 그림 4.33에 나타내었다.

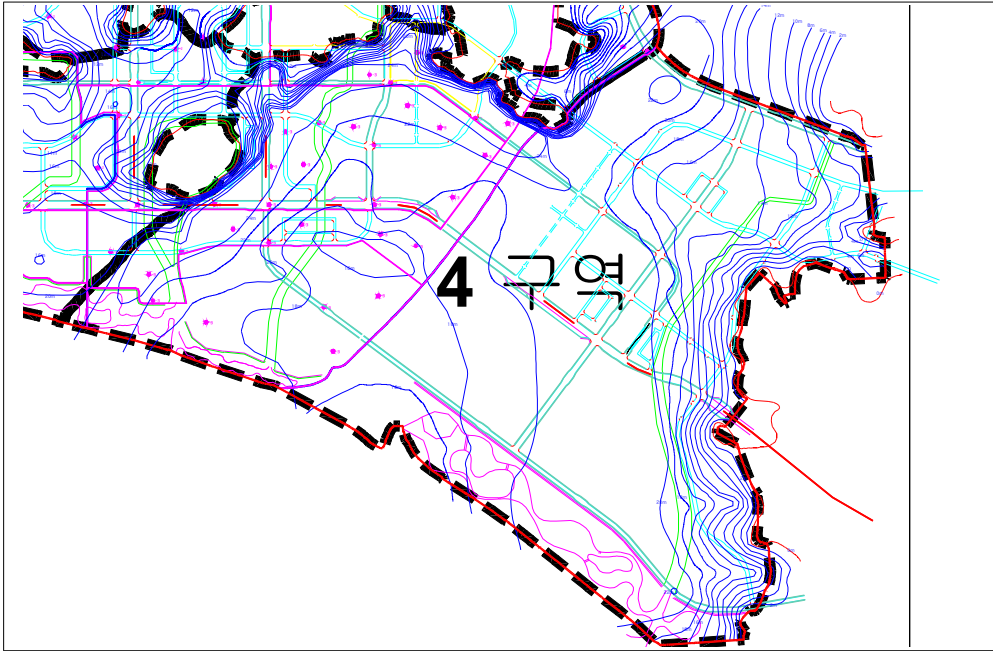


그림 4.33 4구역 매설위치

(가) 4구역 측정현황

연약지반심도가 최대 25.0m이며, 평균적으로는 21.5m이다. 연약지반처리공법은 P.B.D공법으로 1.0~2.0m 간격으로 시공하였다. 계획침하량은 223.0~354.0cm, 평균 282.4cm였으나, 실제 6.4m를 성토하여 측측한 결과 42.0~216.0cm, 평균 133.0cm 로서 계획대비 약 47%의 침하량이 발생할 것으로 예상된다.

한편, 4구역의 측정현황은 표 4.8과 같으며, 그림 4.34~그림 4.43은 성토경과에 따른 침하변화를 나타내었다.

표 4.8 4구역 측정현황

측 점	설계내용			시 공 성 토 고	계 측 현 황		
	연약지반 처 리	연약 심도	설 계 침 하 량		심도	계 측 침 하 량	예 상 침 하 량
P-1-3	P.B.D 1.0× 1.0	25.0m	354cm	7.99m	0.0	141.9	154.0
					4.0	124.3	130.0
					10.0	69.2	74.0
					15.0	39.3	41.0
P-1-5	P.B.D 1.0×1.0	19.0m	352cm	9.55m	0.0	120.4	154.0
					4.0	75.6	99.0
					10.0	39.8	54.0
					15.0	10.0	14.0
P-1-6	P.B.D 1.4× 1.4	23.8m	320cm	6.47m	0.0	197.2	201.0
					4.0	142.4	145.0
					10.0	83.2	85.0
					15.0	37.3	40.0
P-3-2	P.B.D 1.0× 1.0	23.8m	280cm	7.78m	0.0	203.6	216.0
					4.0	139.1	146.0
					10.0	76.4	78.0
					15.0	32.3	34.0
P-3-3	P.B.D 1.0× 1.0	22.0m	278cm	4.64m	0.0	203.6	216.0
					4.0	139.1	146.0
					10.0	76.4	78.0
					15.0	32.3	34.0
P-3-4	P.B.D 1.0× 1.0	18.0m	245cm	6.22m	0.0	90.9	102.0
					4.0	62.6	70.0
					10.0	35.9	45.0
					15.0	8.1	10.0
P-3-7	P.B.D 1.2× 1.2	20.2m	223cm	5.47m	0.0	56.9	61.0
					4.0	37.4	41.0
					10.0	26.3	28.0
					15.0	9.1	10.0
P-3-8	P.B.D 1.2× 1.2	20.3m	256cm	6.39m	0.0	48.3	51.0
					4.0	29.7	32.0
					10.0	18.0	20.0
					15.0	9.1	10.0
P-3-13	P.B.D 2.0× 2.0	21.0m	233cm	3.16m	0.0	39.5	42.0
					4.0	21.4	24.0
					10.0	12.8	14.0
					15.0	5.1	6.0
최소		18.0m	223cm	3.16m		39.5	42.0
최대		25.0m	354cm	9.55m		203.6	216.0
평균		21.5m	282.4cm	6.40m		122.5	133.0

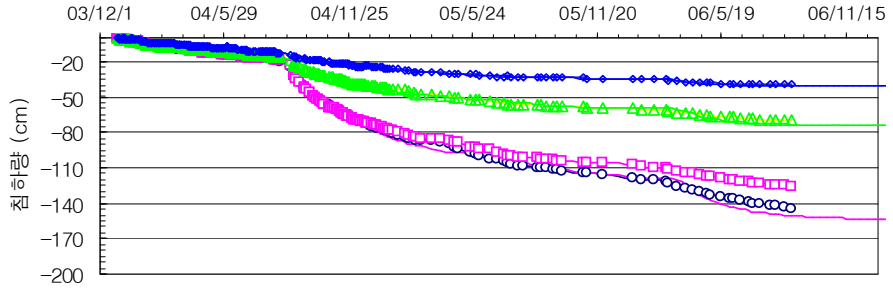
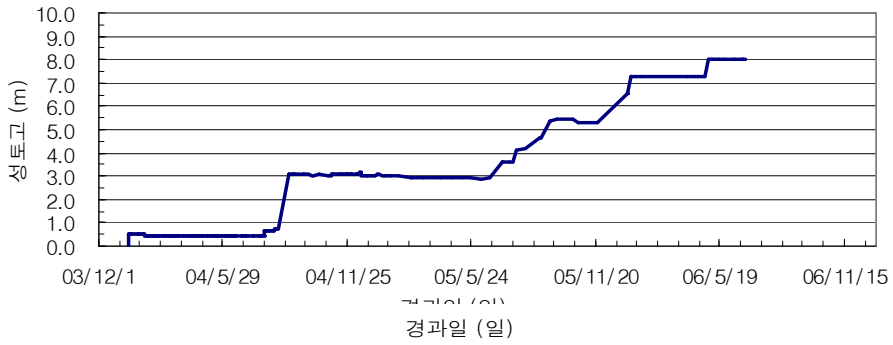


그림 4.34 성토경과에 따른 침하변화(P-1-3)

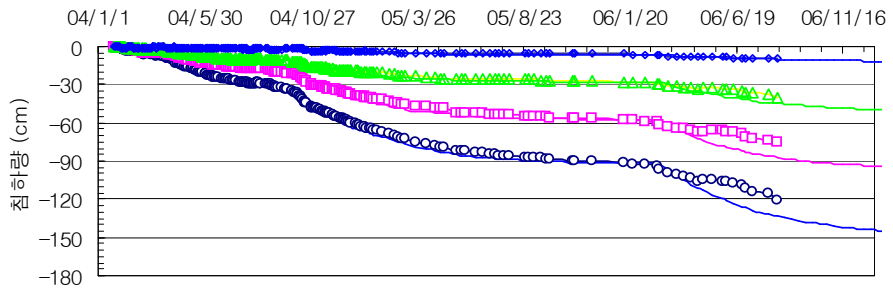
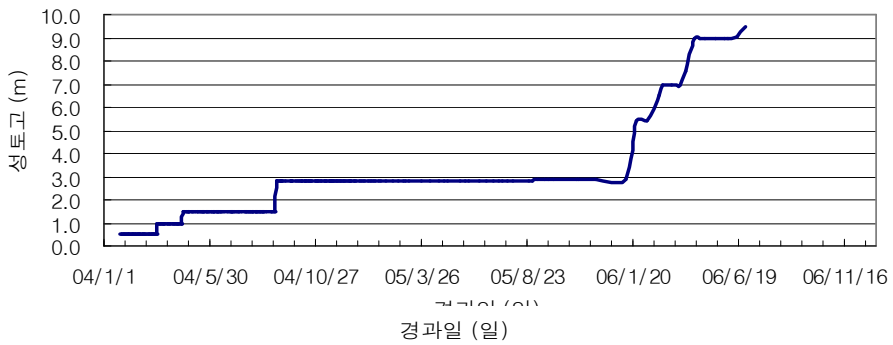


그림 4.35 성토경과에 따른 침하변화(P-1-5)

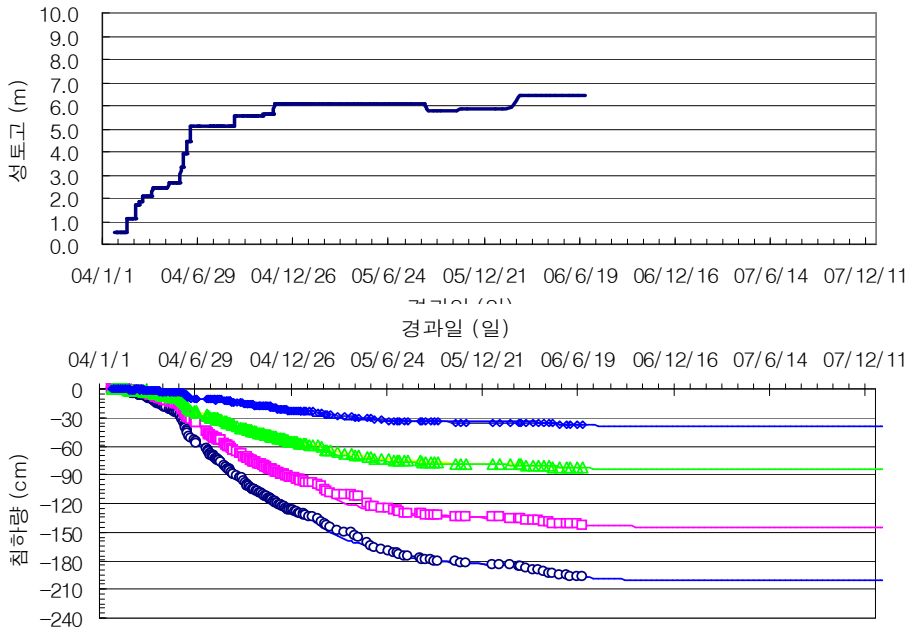


그림 4.36 성토경과에 따른 침하변화(P-1-6)

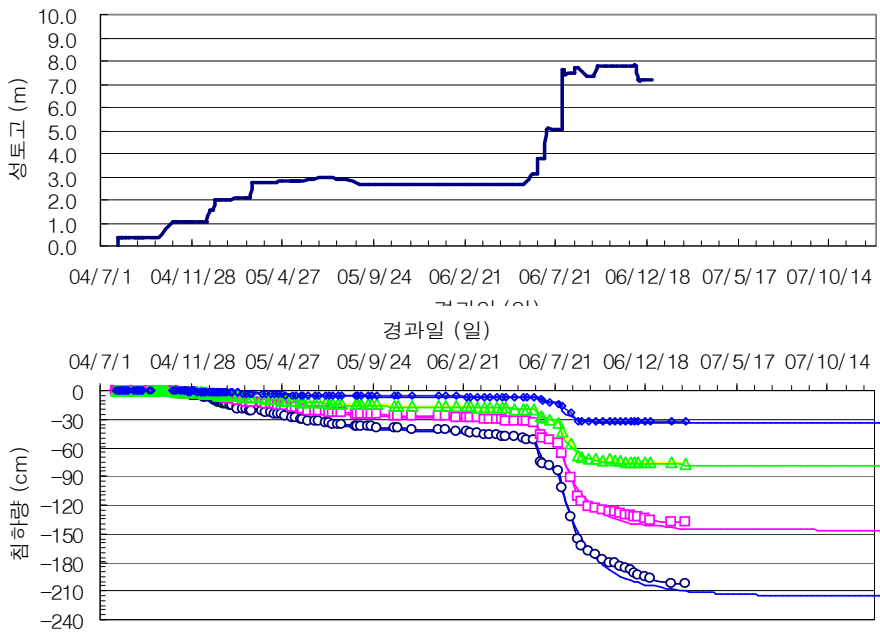


그림 4.37 성토경과에 따른 침하변화(P-3-2)

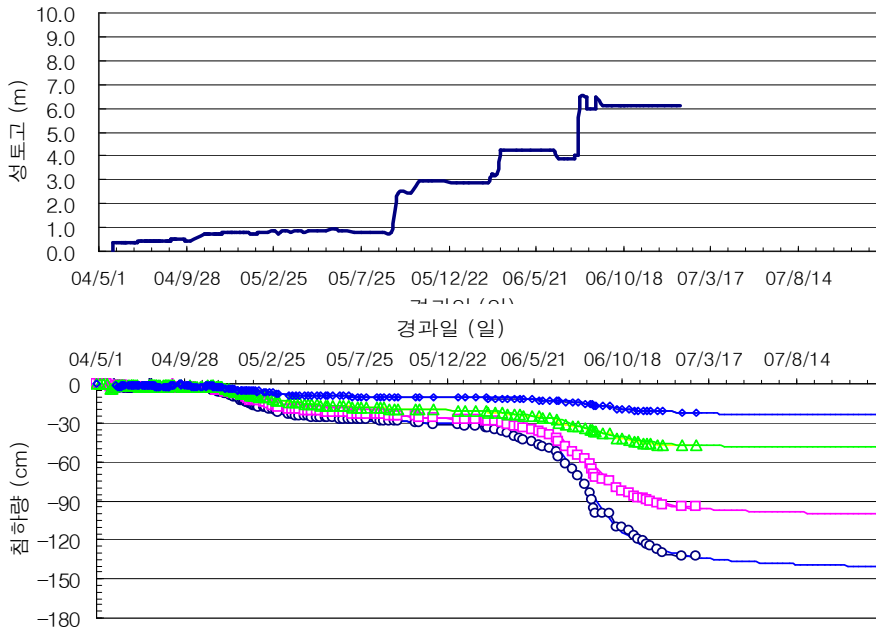


그림 4.38 성토경과에 따른 침하변화(P-3-3)

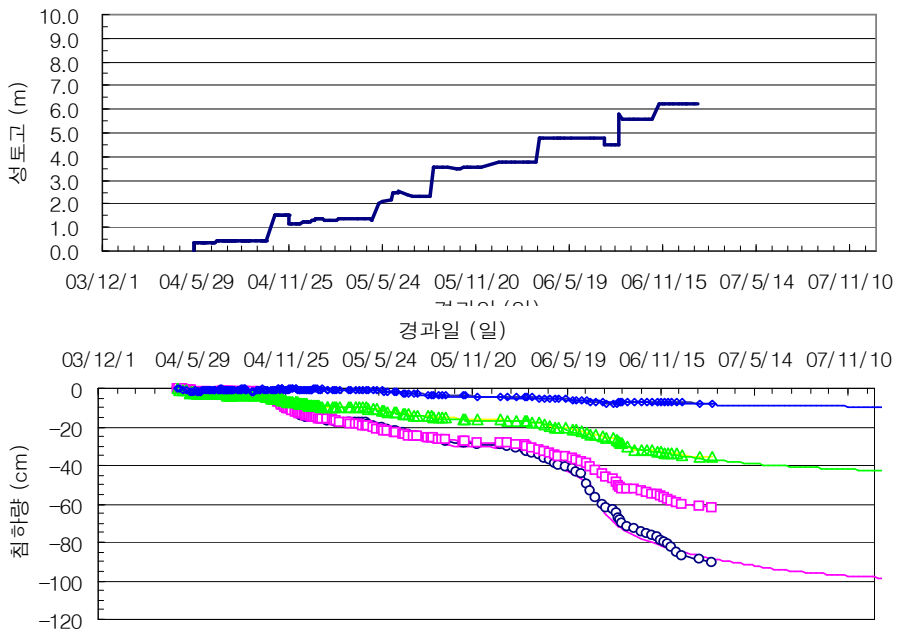


그림 4.39 성토경과에 따른 침하변화(P-3-4)

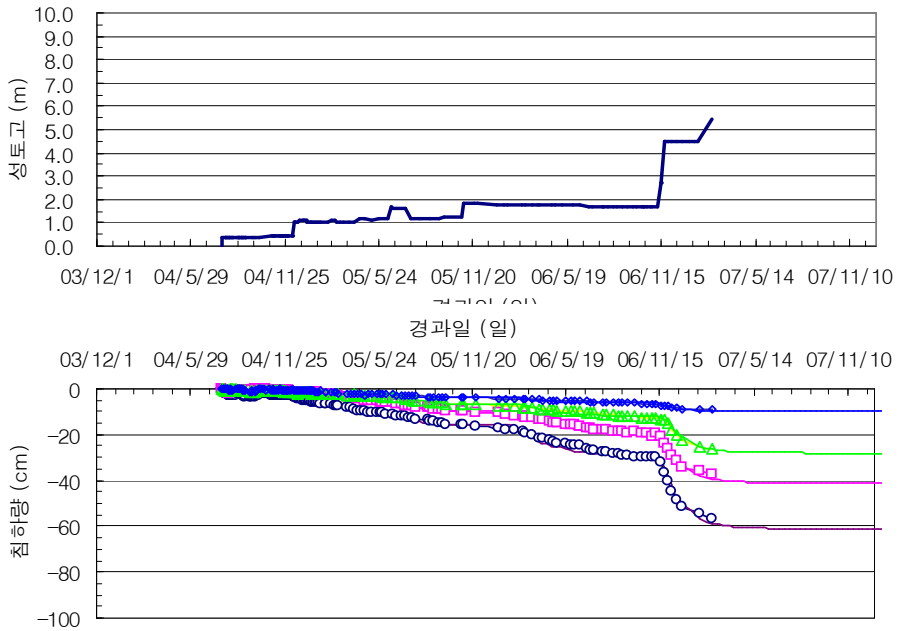


그림 4.40 성토경과에 따른 침하변화(P-3-7)

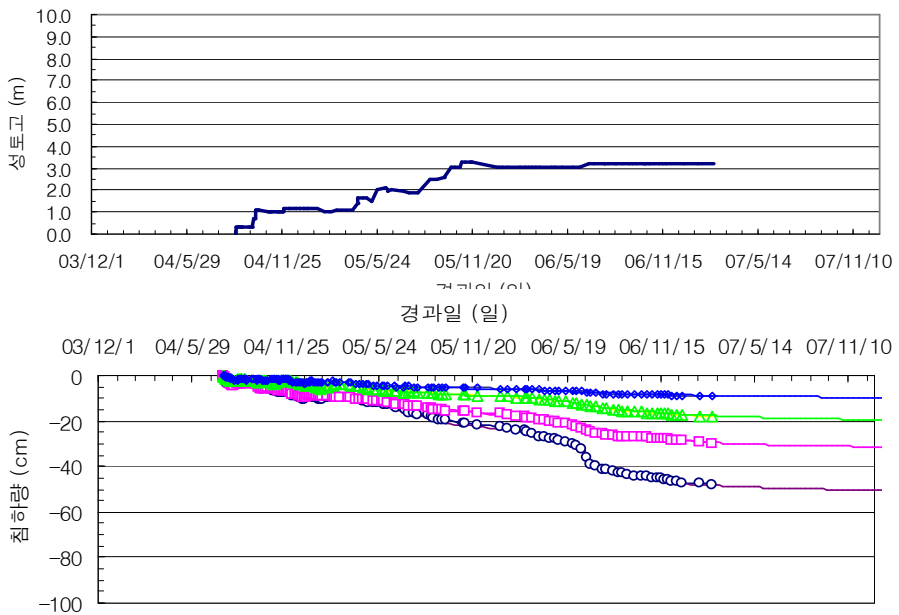


그림 4.41 성토경과에 따른 침하변화(P-3-8)

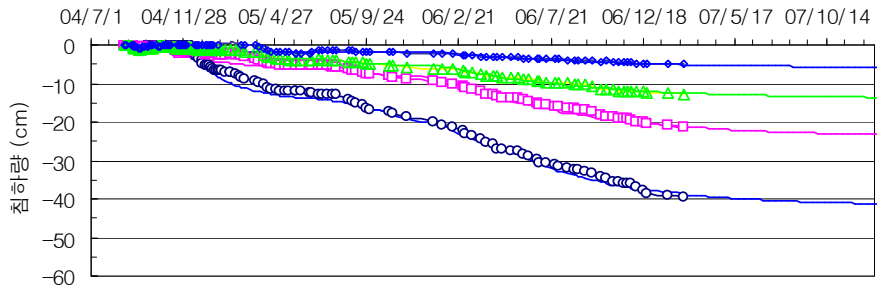
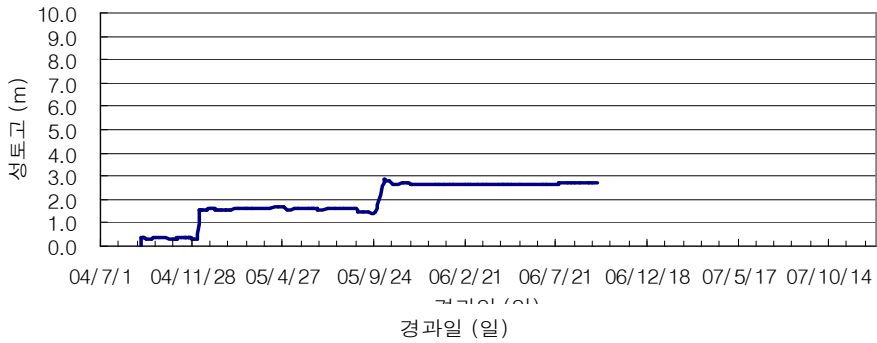


그림 4.42 성토경과에 따른 침하변화(P-3-13)

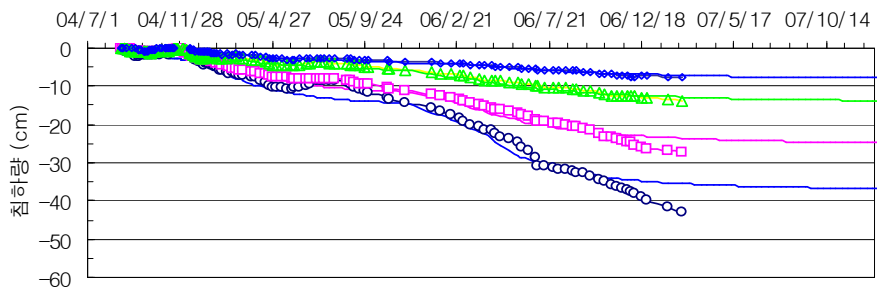
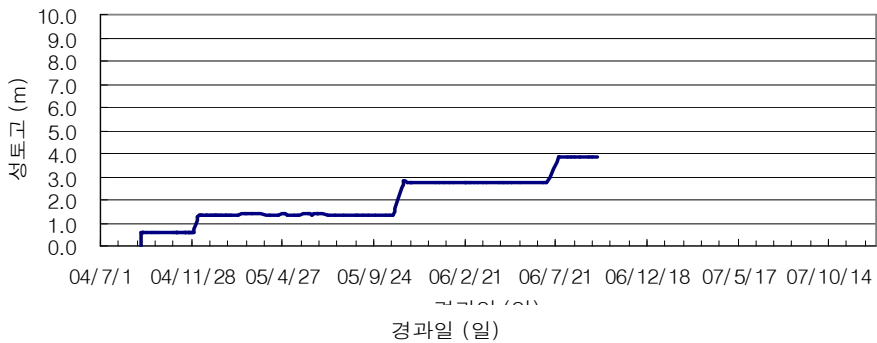
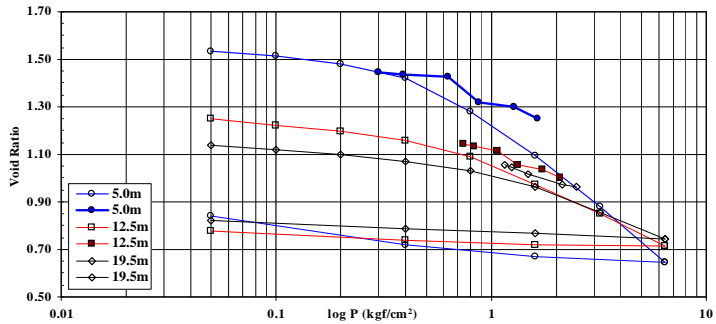


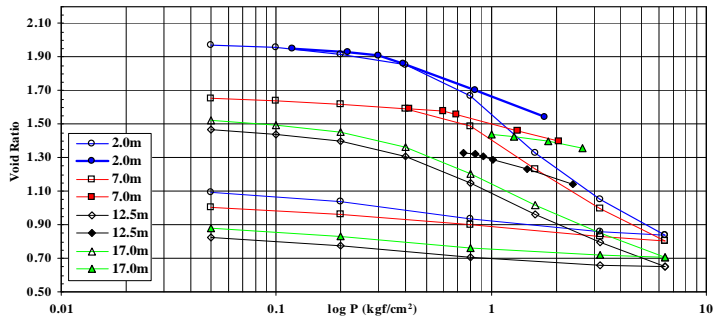
그림 4.43 성토경과에 따른 침하변화(P-3-14)

(나) 현장압밀곡선(e-logP) 작도

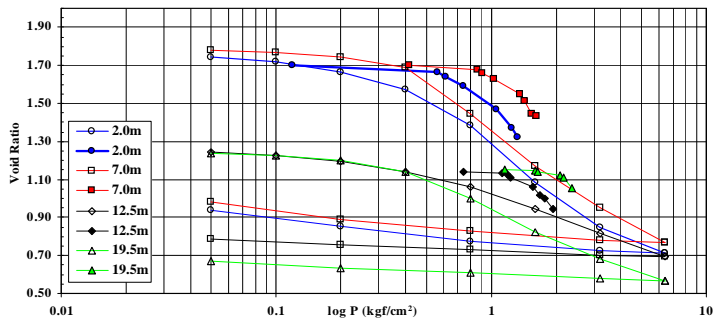
성토단계별로 계측을 실시하여 침하량을 측정하고 각 성토응력별 침하량을 검토하여 간극비를 선정하고 현장압밀(e-logP)곡선을 작성하였으며, 그림 4.44에 나타내었다.



(a) P-1-3

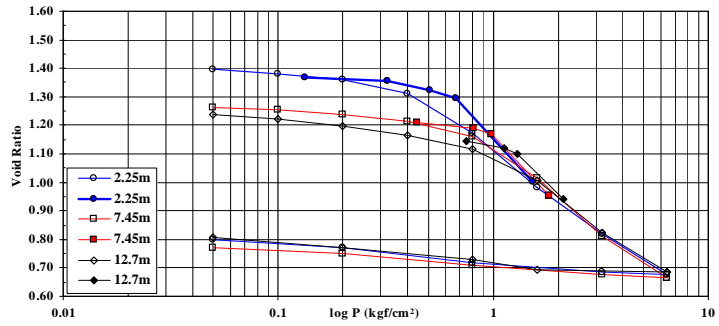


(b) P-1-5

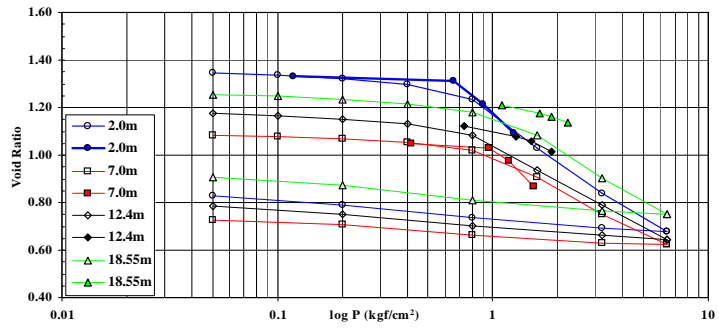


(c) P-1-6

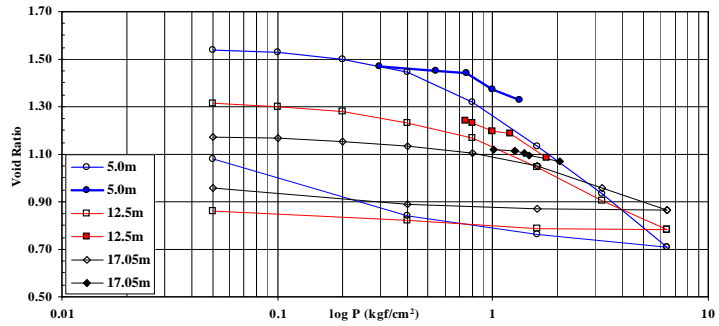
그림 4.44 계측지점별 e-logP곡선(4구역)



(d) P-3-2

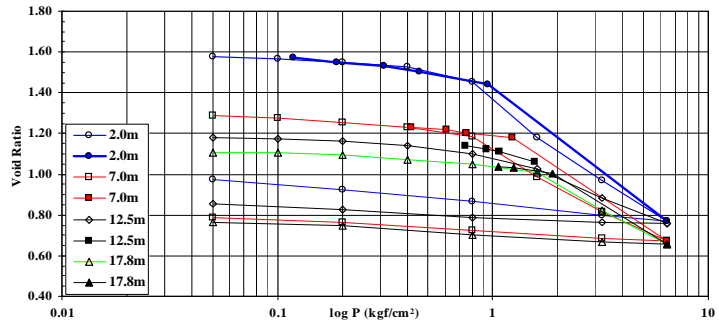


(e) P-3-3

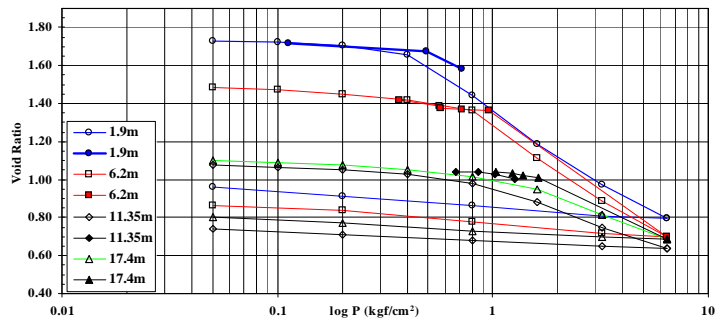


(f) P-3-4

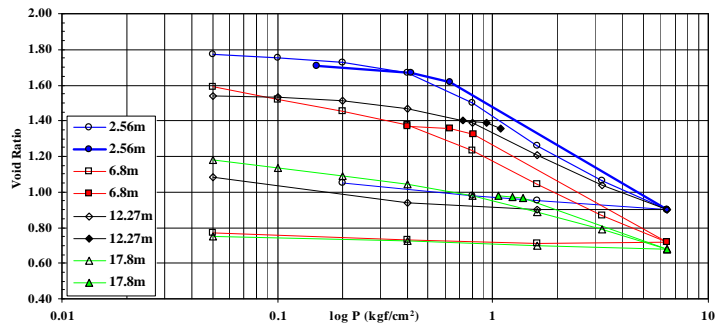
그림 4.44 계측지점별 e-logP곡선(4구역) (계속)



(g) P-3-7

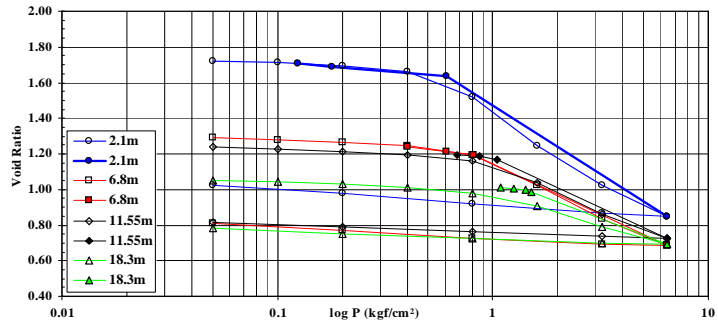


(h) P-3-8



(i) P-3-13

그림 4.44 계측지점별 e-logP곡선(4구역) (계속)



(j) P-3-14

그림 4.44 계측지점별 e-logP곡선(4구역) (계속)

(다) 현장토질특성

그림 4.45~그림 4.47은 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수, OCD와 OCR, P_o+P_c 의 변화를 나타낸 것이다.

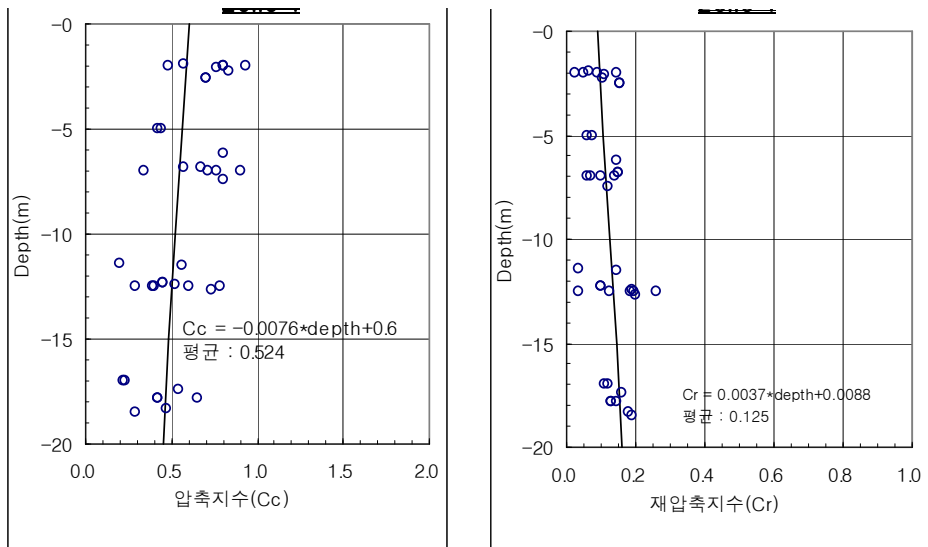


그림 4.45 깊이에 따른 압축지수와 재압축지수의 변화(4구역)

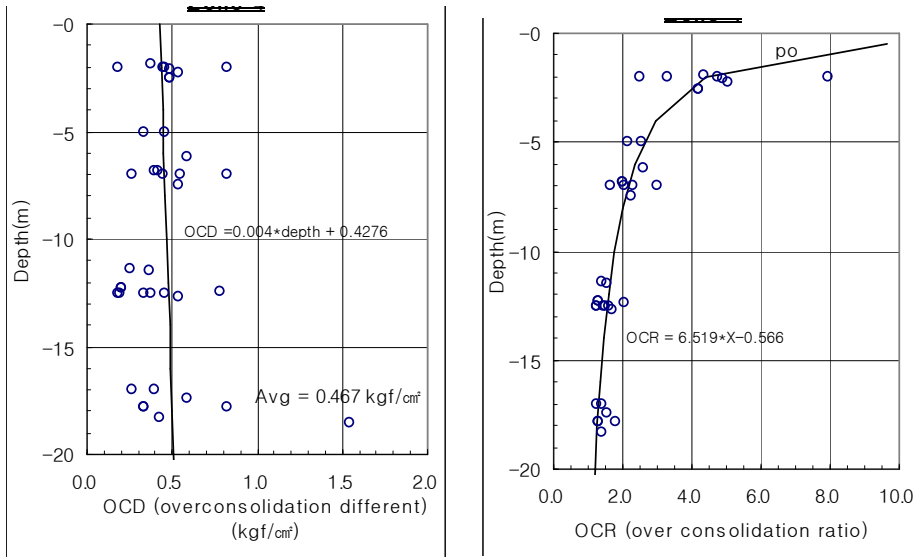


그림 4.46 깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(4구역)

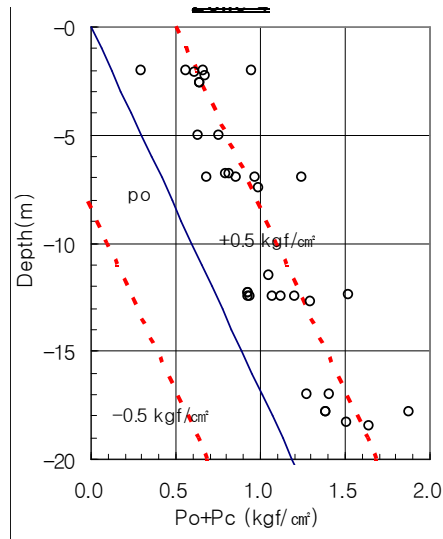
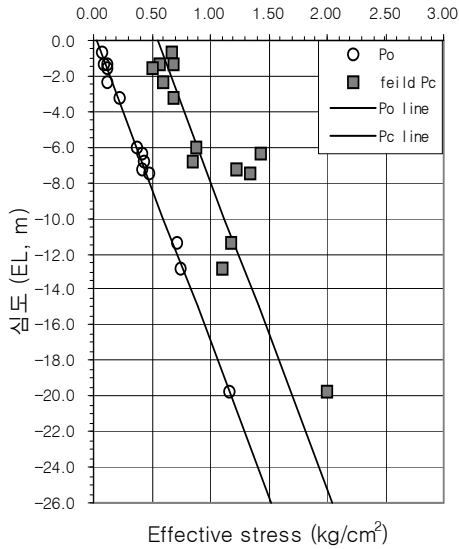


그림 4.47 깊이에 따른 P_o+P_c 의 변화(4구역)

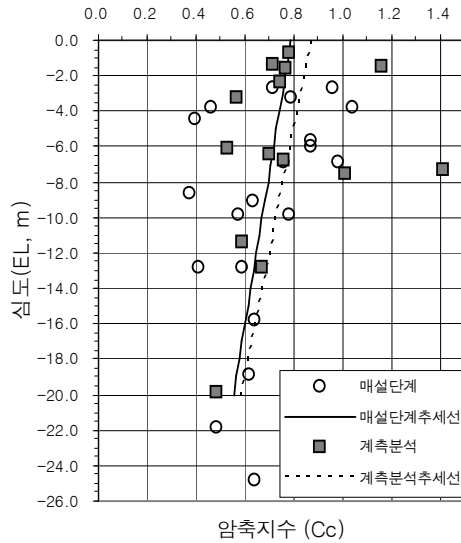
라. 현장토질특성과 실내시험비교

현장토질특성과 실내시험결과를 종합적으로 비교하기 위하여 심도에 따른 유효응력, 압축지수, 재압축지수 및 과압밀비의 변화를 그림 4.48에 나타냈다.

그림 4.48(a)에서 유효응력에 대한 검토결과 연약층후 전반에 0.5 kgf/cm^2 내외의 선행압밀하중이 작용하고 있는 것으로 나타났다. 그림 4.48(b)와 (c)는 압축특성에 대한 비교결과로 상부층의 경우 평균값에 있어서 다소 실내시험값과 현장계측에 의한 재산정값이 차이가 있으나, 전체적으로는 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그림 4.48(d)의 과압밀비(OCR)를 보면 실내시험결과 지표하 4.0m까지 과압밀영역으로 평가되었으나, 계측에 의한 재산정결과 약 3배(지표하 12.0m)까지 과압밀영역이 증가함을 알 수 있다.

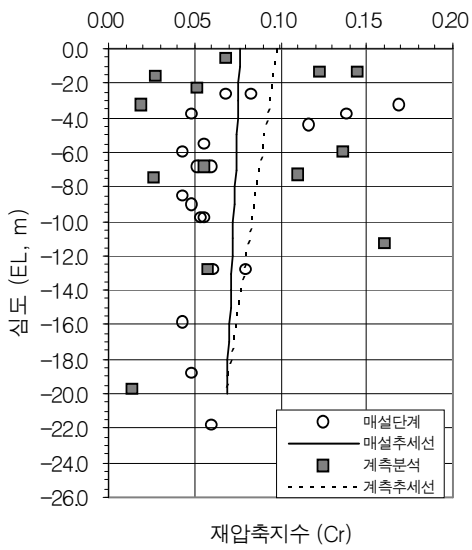


(a) 유효응력

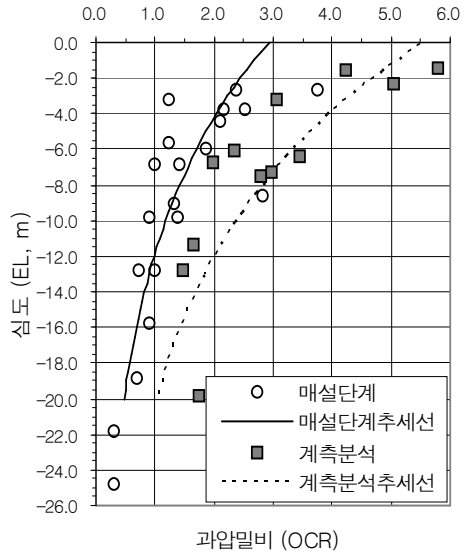


(b) 압축지수

그림 4.48 현장토질특성과 실내시험비교



(c) 재압축지수



(d) 과압밀비

그림 4.48 현장토질특성과 실내시험비교 (계속)

4.3 영종도지역

가. 지반개량공법

본 영종도지역은 인천국제공항 부지조성사업의 지반개량공법은 프리로딩공법과 연직배수공법 중 P.B.D공법을 병행하여 적용하였다. 각각의 토지이용계획에 따른 공법적용은 다음 표 4.9와 같다.

표 4.9 영종도 국제공항건설공사의 지반개량공법

구역명	상세구역명	연약층 심도 (m)	여성고 (P.L.H, m)	Hansbo - P.B.D간격 (m×m)
2구역 (활주로)	활주로	5.2~11.9	4.5	1.6×1.6 ~ 2.0×2.0
	착륙대	5.2~6.4	1.5	1.6×1.6 ~ 2.0×2.0
	제5유도로	7.5~9.0	3.0~3.5	1.9×1.9 ~ 2.0×2.0
	제6유도로	4.9~10.4	3.0~4.0	1.7×1.7 ~ 2.0×2.0
	Decing	6.0	4.0	2.0×2.0
	제7유도로	5.2~6.9	3.0~3.5	2.0×2.0
	GSE도로	2.1~8.3	2.0~3.5	2.0×2.0
	내외곽도로	5.4~6.9	2.0~3.0	2.0×2.0
	배수구조물	3.5~9.5	1.0~2.0	1.8×1.8 ~ 2.0×2.0
2구역 (IBC 지역)	IBC(도로)	8.3	3.5	2.0×2.0
3구역 (활주로)	활주로	2.8~5.2	3.5~4.5	2.0×2.0
	제5유도로	6.7~10.8	3.5	1.6×1.6 ~ 2.0×2.0
	제6유도로	2.3~9.8	2.0~3.5	1.7×1.7 ~ 2.0×2.0
	제7유도로	3.5~7.8	3.0~3.5	2.0×2.0
	GSE도로	4.2~7.0	2.5~3.0	2.0×2.0
	배수구조물	3.2~7.5	1.0~2.0	2.0×2.0
3구역 (소방 훈련장)	소방훈련장	4.1	3.5	2.0×2.0
	연결도로	4.1	3.0	2.0×2.0
	내외곽도로	4.1	2.0~3.0	2.0×2.0

표 4.9 영종도 국제공항건설공사의 지반개량공법 (계속)

구역명	상세구역명	연약층 심도 (m)	여성고 (P.L.H, m)	Hansbo - P.B.D간격 (m×m)
3구역 (여객계류장)	여객계류장	5.4~9.6	2.0	1.9×1.9 ~ 2.0×2.0
	GSE 도로	3.0~6.0	3.5	2.0×2.0
4구역 (활주로)	활주로	2.1~9.6	3.5~5.0	1.8×1.8 ~ 2.0×2.0
	착륙대	9.6	1.5	1.8×1.8
	제5유도로	3.2~4.5	3.0~3.5	2.0×2.0
	제6유도로	3.8~5.8	3.0~3.5	2.0×2.0
	제7유도로	2.0~10.5	2.5~4.0	1.7×1.7 ~ 2.0×2.0
	GSE도로	2.5~5.1	2.0~3.0	2.0×2.0
	배수구조물	2.8~7.5	1.0~1.5	2.0×2.0
4구역 (북측제빙 시설 및 Run-up장)	제빙시설	5.8~9.1	3.5	1.7×1.7 ~ 2.0×2.0
	GSE 도로	5.9	3.0	2.0×2.0
	내외곽도로	6.0~10.0	3.0~3.5	1.6×1.6 ~ 2.0×2.0
	배수구조물	4.0~4.5	1.0~3.5	2.0×2.0
5구역 (활주로)	활주로	6.7~10.9	5.0	1.7×1.7 ~ 2.0×2.0
	착륙대	6.7~10.9	1.5	1.7×1.7 ~ 2.0×2.0
	제5유도로	6.7	3.5	2.0×2.0
	제6유도로	10.1~16.3	3.0~4.0	1.2×1.2 ~ 1.8×1.8
	제7유도로	3.9~7.2	3.0	2.0×2.0
	GSE도로	2.3~8.6	2.5~3.5	1.9×1.9 ~ 2.0×2.0
	내외곽도로	3.7~12.0	2.5~3.5	1.6×1.6 ~ 2.0×2.0
	배수구조물	2.7~12.7	1.0~2.0	1.5×1.5 ~ 2.0×2.0

나. 계측기기 매설

계측기 매설은 대상지반의 층후분포가 연약점토층 10.0m, 모래층 20.0m로서 침하관리대상층인 점토층 10.0m를 3등분하여 설치하였으며, 설치표준도는 그림 4.49와 같다.

또한, 표 4.10은 계측기 설치목적과 이용에 대해서 기술하였다.

표 4.10 계측기 설치목적 및 이용

계측 항목	계측기 선정	설치목적 및 이용
침하	지표침하계	· 최종 침하량 추정 및 Preloading 제거 시기 결정
	층별침하계	· 각 층의 침하량 측정 및 심부의 지반거동 파악 · 최종 침하량 추정 및 Preloading 제거 시기 결정
변위	경사계	· 성토에 따른 지반의 심도별 수평변위량을 측정하여 단계성토시기 및 속도결정 · 수평방향의 지반변위 및 안전도 판단.
수압	간극수압계	· 성토하중에 의한 과잉 간극수압의 변화 측정 등의 지반처리효과 판정 · 침하 진행상황 검토 및 Preloading 제거 시기 결정
수위	지하수위계	· 지하수위를 측정하여 지반내 간극수압으로부터 정수압과 과잉간극수압의 구분에 이용

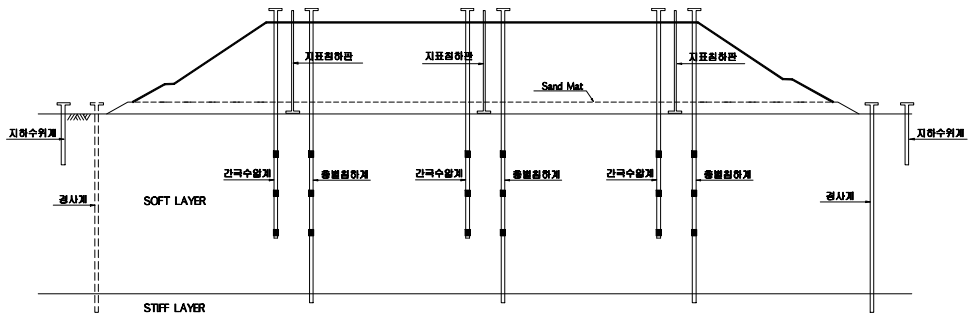


그림 4.49 영종도지역의 일반구간 계측기기 설치표준도

다. 토질특성

현장압밀곡선 검토를 위한 계측결과와 분석은 부지조성 대상지역 중 침하가 완료된 일부 지역에 대하여 분석하였다. 그림 4.50은 대표성을 갖는 1개소에 대한 분석과정을 수록한 것이며, 이 분석결과와 검토는 침하완료지역 전체를 대상으로 하였다.

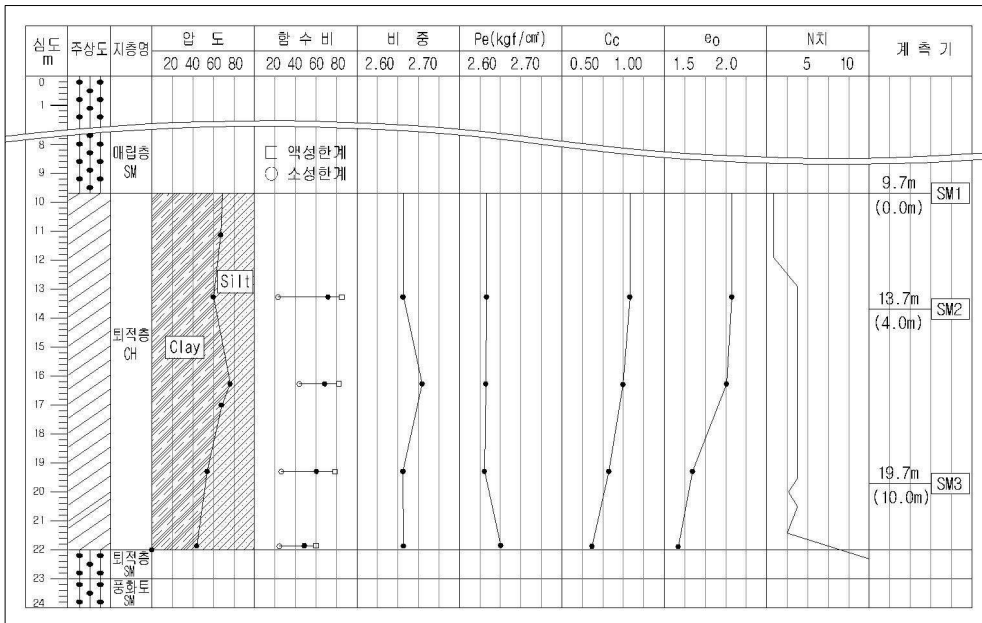


그림 4.50 영종도지역의 대표토질특성

라. 계측결과 분석

(1) 영종도지역 측정현황

영종도지역의 연약지반 심도는 평균 10.0m 내외이다. 연약지반 처리는 P.B.D공법으로 처리하였으며, 배수재 간격은 1.6~2.0m 간격으로 시공하였으며, 표 4.11에는 영종도지역의 측정현황에 대해서 요약하여 기술하였다.

표 4.11 영종도지역 측정현황

측 점	설계내용			시 공 성토고	계측현황		
	연약지반 처 리	연약 심도	설 계 침하량		심도	계 측 침하량	예 상 침하량
2U-5	P.B.D 1.6× 1.6	9.0 m	70 cm	7.05 m	0.0	18.2	19.5
					3.0	10.7	11.5
					7.0	4.5	5.0
3APU-10	P.B.D 1.6× 1.6	9.1 m	70 cm	7.12 m	0.0	13.0	15.0
					3.2	10.5	12.0
					6.1	8.3	9.0
3APU-12	P.B.D 1.6× 1.6	13.3 m	70 cm	7.19 m	0.0	22.0	22.0
					3.9	12.7	13.0
					9.4	3.9	7.0
3APU-14	P.B.D 1.6× 1.6	10.2m	70 cm	7.51 m	0.0	37.5	41.0
					3.0	21.5	24.0
					7.2	5.8	7.0
3U-13	P.B.D 1.6× 1.6	8.2m	70 cm	8.18 m	0.0	26.1	28.0
					2.0	15.1	16.0
					5.2	12.2	13.0
최소		8.2 m	70 cm	7.05 m		3.9	5.0
최대		13.3 m	70 cm	8.18 m		37.5	41.0
평균		10.0 m	70 cm	7.41 m		14.8	16.2

(2) 압축지수 (C_c)

압밀곡선에서 유효하중이 선행압밀 용력을 넘으면 그 곡선은 대략 직선상으로 되는데 이 직선부분의 기울기를 압축지수(Compression Index)라 하며 압밀침하량을 산정하는데 중요한 값이다. 일반적으로 압축지수는 시험실에서 평가한 값보다 현장에서 측정된 값이 크며, 그 이유는 시험실에서는 다소 시료가 다소 교란되어 있으며, 압밀시험시 측방향이 구속되어 있고 현장의 경우에는 실제로 측방향쪽으로 유동이 발생하기 때문이다.

일반적으로 압축지수는 자연함수비(W_n)와 상관관계에 있으며 함수비의 증대와 함께 압축지수도 커진다. 압축지수는 깊이에 따라 표 4.12에 나타낸 바

와 같으며, 거의 일정한 경향을 보이며, 0.4부근의 값을 나타내었다. 이것은 일정하중의 성토를 함수비가 높은 흙으로 구성된 지반과 그것과 같은 층두께로 함수비가 낮은 값은 값의 흙으로 구성된 지반상에 구축하면 압밀침하량은 함수비가 높은 흙이 커진다는 것이다.

일반적으로 점토의 대표적인 압축지수의 값은 0.2 ~ 0.9 범위에 있으나, 예민비가 큰 경우와 유기질 점토는 1보다 훨씬 큰 값을 갖는다.

표 4.12 압축지수-심도의 관계

분포경향	분포범위
	<ul style="list-style-type: none"> • 0.2~0.6의 분포를 보이고 평균값은 0.38의 값을 보인다. • 대체적으로 압축지수값은 심도의 변화에 따라 큰 변화없이 0.4 부근의 값을 가지고 있다.

(3) 압밀계수 (C_v)

압밀계수는 지반의 압밀침하에 소요되는 시간을 측정하는 계수로서 동일위치의 시료 중에서도 그 값이 상당히 변화한다. 그림 4.51에서 보는바와 같이 일반적으로 압밀하중이 증가함에 따라 압밀계수는 감소하며, 선행압밀하중을 넘어선 정규압밀영역에서는 거의 일정한 값을 보인다. 그림 4.52는 계측결과에 따른 압밀계수의 분포를 나타낸 것이다.

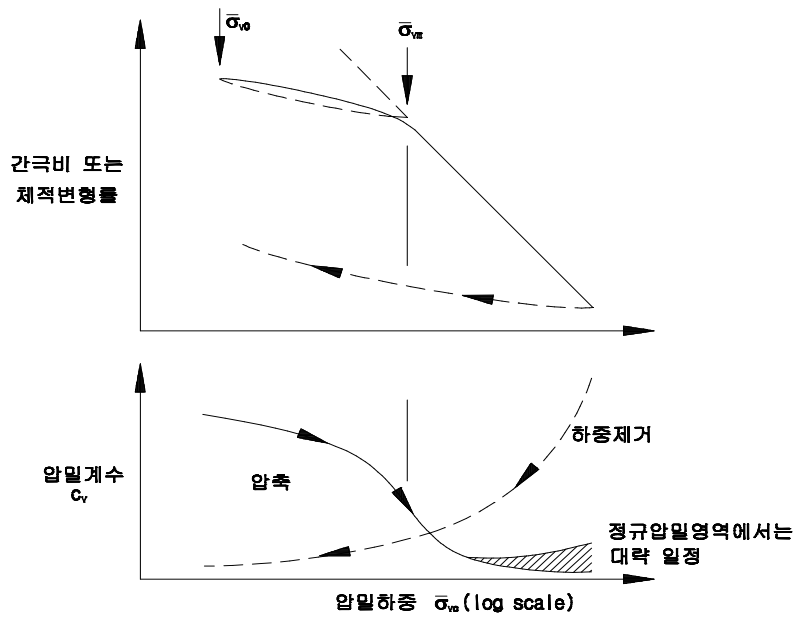


그림 4.51 압밀하중에 의한 압밀계수의 일반적인 변화(영종도지역)

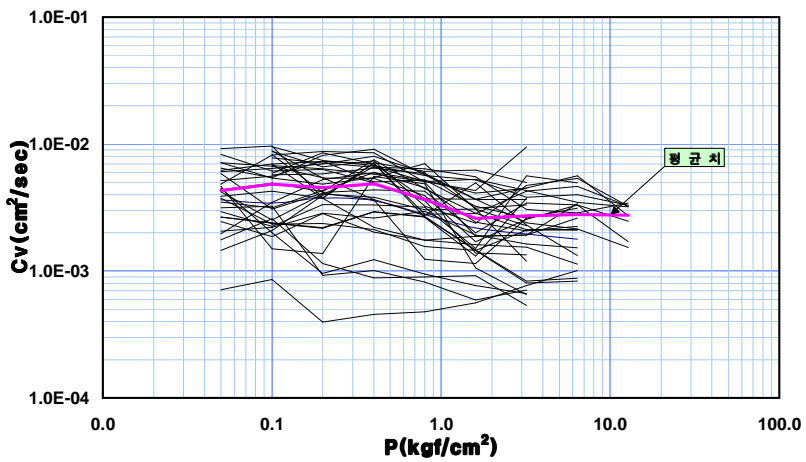
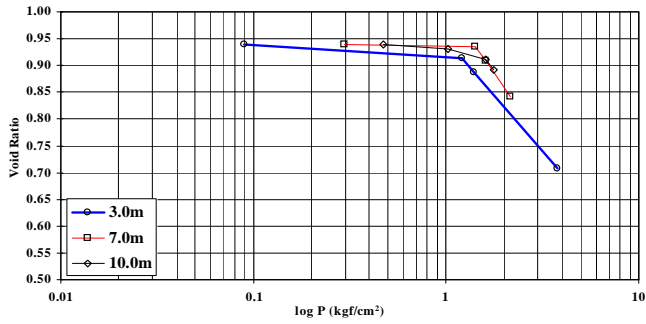


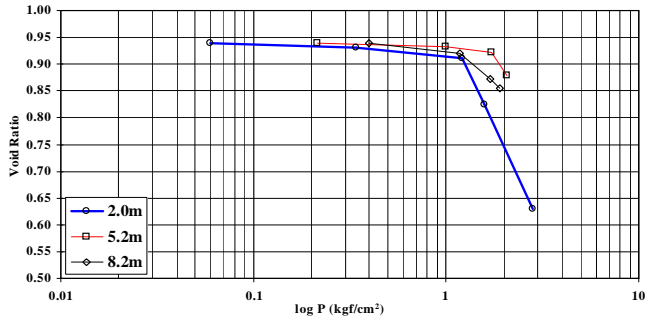
그림 4.52 계측결과에 의한 압밀계수의 분포(영종도지역)

(4) 현장압밀곡선(e-logP)의 작도

성토단계별로 계측을 실시하여 침하량을 측정하고 각 성토응력별 침하량을 검토하여 간극비를 선정하고 현장압밀(e-logP)곡선을 작성하였으며, 그림 4.53에 나타내었다.

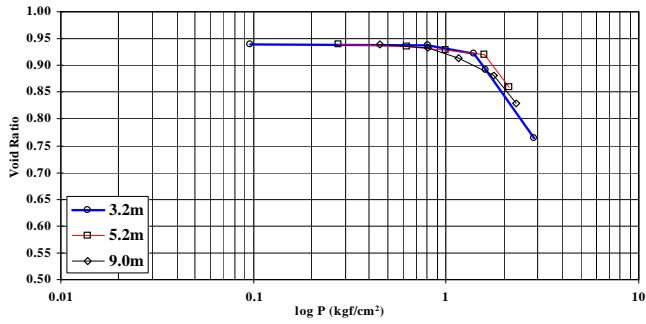


(a) 2U-5

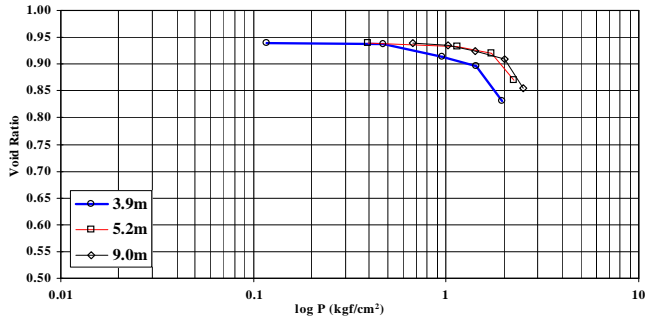


(b) 3U-13

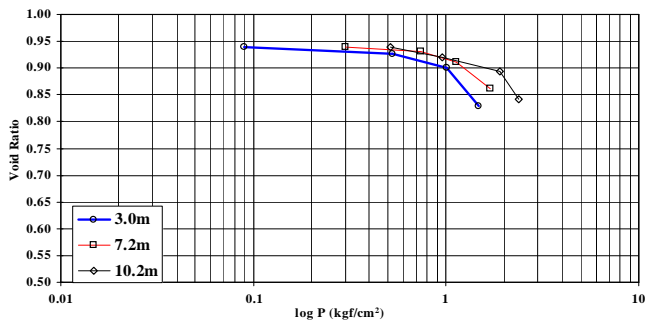
그림 4.53 계측지점별 e-logP곡선(영종도지역)



(c) 3APU-10



(d) 3APU-12



(e) 3APU-14

그림 4.53 계측지점별 e-logP곡선(영중도지역) (계속)

(5) 계측결과 분석

그림 4.54의 현장e-logP압밀곡선에서 압축지수(C_c)를 검토한 결과 0.293~0.767 범위에서 평균 0.475이며 재압축지수(C_r)는 0.007~0.098 범위에 평균 0.041이다.

그림 4.54에서 보는 바와같이 심도와 압축특성간의 추세선을 보면, 압축지수는 심도가 깊어질수록 다소 감소하는 경향을 보이거나 평균값에 근접하며 재압축지수는 심도에 따라 직선으로 증가한다.

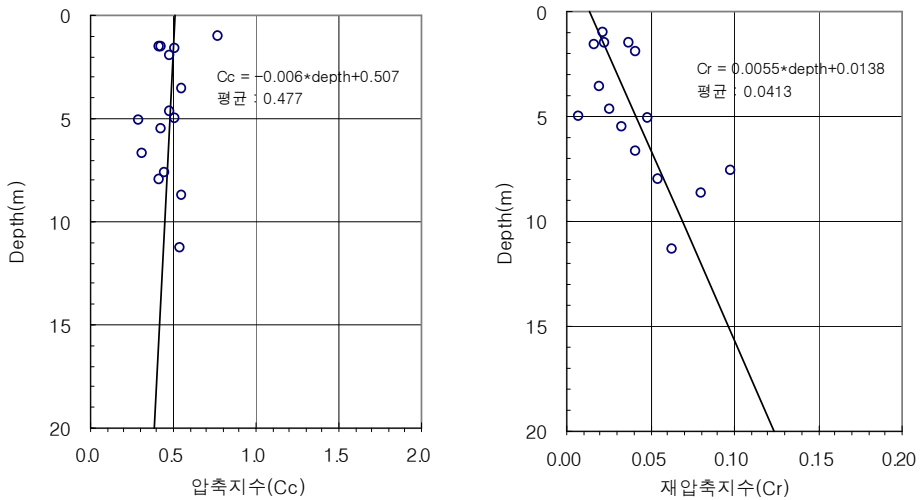


그림 4.54 깊이에 따른 C_c 와 C_r 의 변화(영종도지역)

그림 4.55와 그림 4.56은 각각 OCD, OCR과 선행압밀하중의 변화를 도시한 그래프로 과압밀하중(OCD)을 보면 연약층후 전반에 1.0 kgf/cm^2 내외의 선행하중이 작용하고 있는 것을 알 수 있으며, 과압밀비(OCR)는 지표로부터 15.0m까지 과압밀영역으로 나타났다.

그림 4.56 또한 과압밀하중에서와 같이 1.0 kgf/cm^2 의 선행하중이 작용하는 것으로 나타났다.

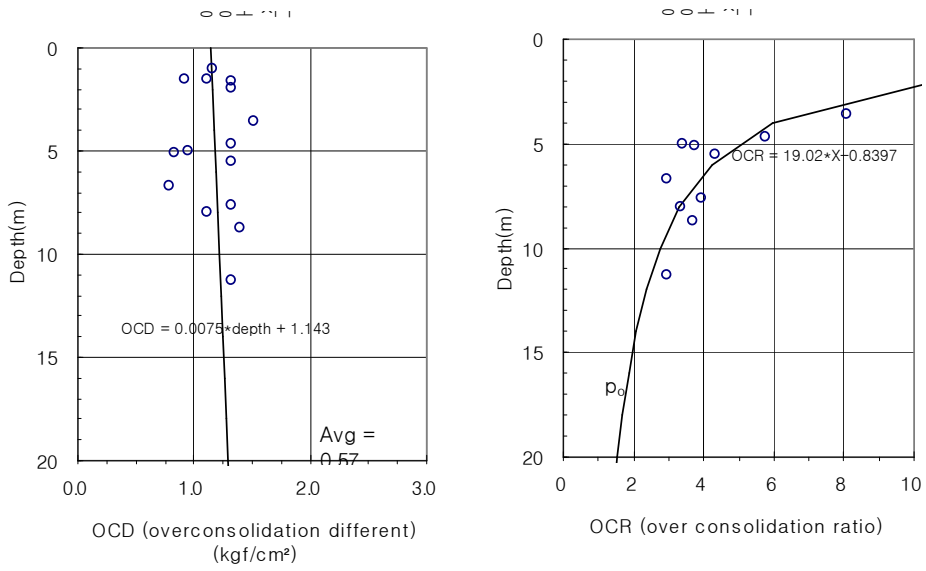


그림 4.55 깊이에 따른 OCD와 OCR의 변화(영종도지역)

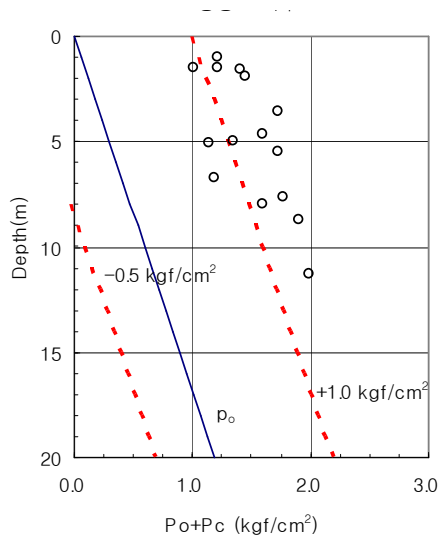


그림 4.56 깊이에 따른 $P_o + P_c$ 의 변화(영종도지역)

마. 현장토질특성과 실내시험비교

다음 표 4.13는 영종도지역에서의 실내시험과 현장계측결과에 의한 재산정 값간의 비교를 한 결과이다.

표에서 보는 바와같이 압축지수는 실내시험에 의한 값보다 25%증가하였으며, 과압밀비(OCR)로 본 과압밀영역의 범위는 약 4배정도 증가함을 알 수 있다. 이는 영산강 하구언지역과 비교할 때 조수간만차가 더 큰 지역이 원인이 된 것으로 판단된다.

또한, 과압밀하중은 지층전체에 걸쳐서 약 1.0 kgf/cm²의 선행압밀하중이 가중되어 작용함을 알 수 있다.

표 4.13 현장토질정수와 실내시험의 비교(영종도지역)

구 분		분포범위	평균	관계식 및 특기사항
압축지수 (C _c)	실내 시험	0.2~0.6	0.38	<ul style="list-style-type: none"> 함수비와 압축지수의 관계 : $C_c = 0.0104 \times W_n - 0.1008$ 액성한계와 압축지수의 관계 : $C_c = 0.054 \times LL + 0.117$
	현장 계측	0.293~0.767	0.475	<ul style="list-style-type: none"> 심도와 압축지수의 관계 : $C_c = -0.006 \times \text{Depth} + 0.507$
과압밀비 (OCR)	실내 시험	0.5 ~ 3.0	-	<ul style="list-style-type: none"> 상부 4.0m 까지 : 과압밀상태 4.0m 이하 : 정규압밀상태
	현장 계측	1.54이상	-	<ul style="list-style-type: none"> 상부 15.0m 까지 : 과압밀상태 심도와 OCR의 관계 : $OCR = 19.02 \times \text{Depth}^{-0.8397}$
과압밀 하 중 (OCD)	실내 시험	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 설계시 고려않함.
	현장 계측	1.143~1.293	-	<ul style="list-style-type: none"> 전체적으로 평균 1.0 kgf/cm²의 선행하중작용 심도와 OCD의 관계 : $OCD = 0.0075 \times \text{Depth} + 1.143$

제5장 유한요소해석과 통계분석

5.1 유한요소해석

5.1.1 해석조건

가. 해수면 변동에 의한 유효응력 변화

하구언은 조간대 지역으로서 평균고조선(M.H.W.L. : mean high water level)과 평균저조선(M.L.W.L. : mean low water level)사이의 완만한 경사의 퇴적환경이다.

또한 해수면은 어느 한 수준에 고정되어 있는 면이 아니라 기후변동, 조석운동 등에 의해 끊임없이 변화하는 면이다. 현재 한반도 성해의 해수면은 현재의 평균해수면을 기준으로 7,000년 전에 6.5m아래, 4,000년 전에 3.0m아래, 그리고 2,000년 전에 2.5m아래에 위치하였고 현세동안 큰 범위의 상승 및 하강변화를 보인 증거는 없었다.

조석에 의한 하구언 조간대지역의 과압밀현상은 Terzaghi의 유효응력으로 설명할 수 있다.

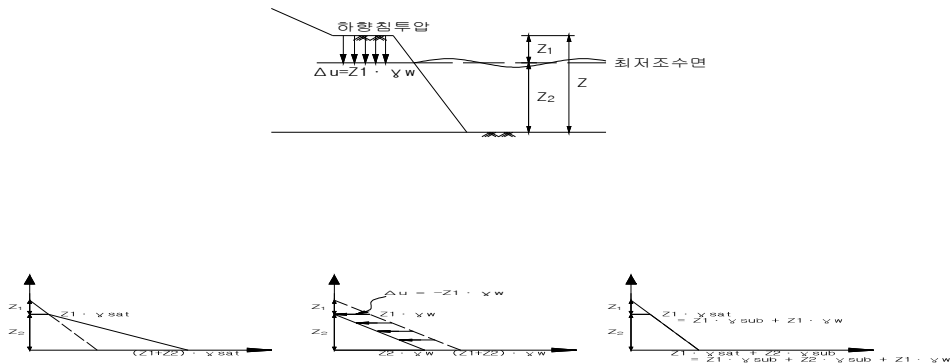
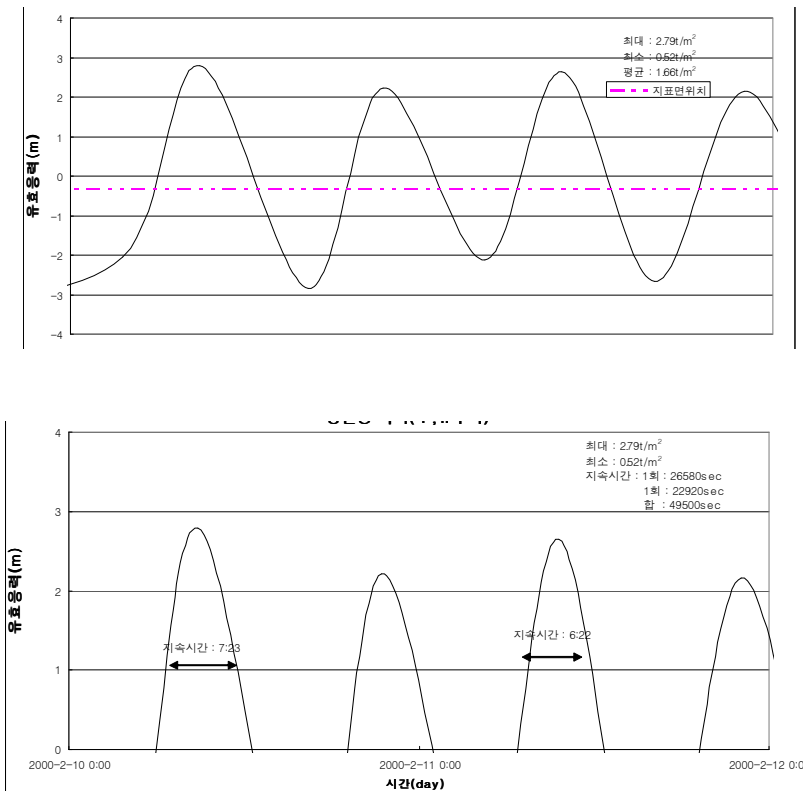


그림 2.18 최저조수면시의 응력분포

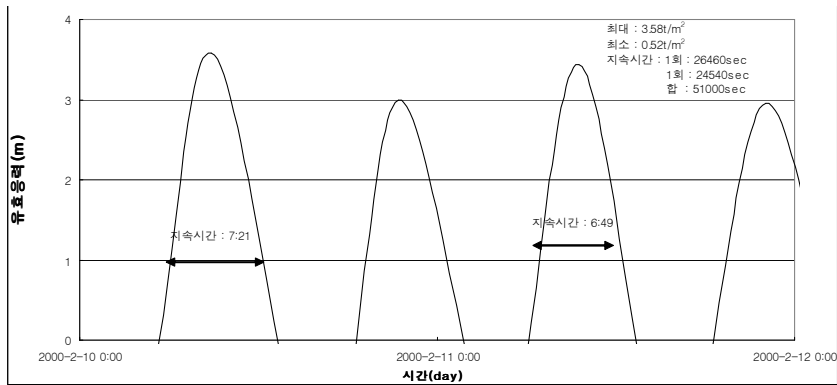
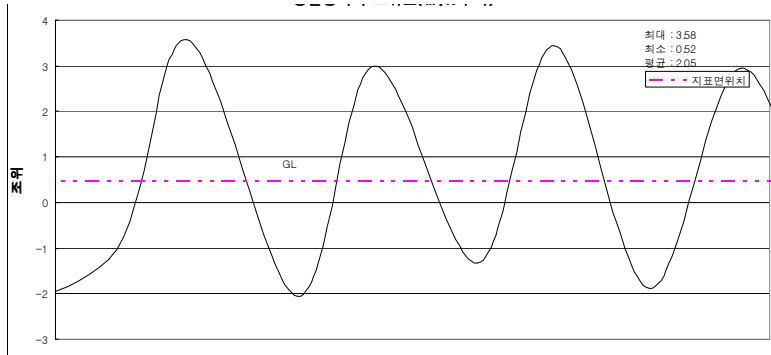
간조위시 해수면이 연약지반아래에 위치한다면 해수면위의 지반은 부력이 작용하는 수중단위중량(γ_{sub})상태에서 부력이 상쇄된 포화단위중량상태(γ_{sat})로 일시적으로 바뀔 것이다. 그러나, 만조위시는 해수면이 지반의 위로 있다 하더라도 유효응력증감은 발생하지 않는다.

조석에 의한 유효응력증가이론은 해수면이 연약지반 아래로 되는 일시적인 시간에 지반이 수면위로 노출되는 시간만큼 수위 차만큼 상재하중이 증가되며, 일 약 24,000~26,000sec 즉 유효응력증가시간이 있는 것으로 영산강 하구 언지역은 조위차에 의한 유효응력증가가 2.72 ~ 3.58 tf/m^2 , 영종도지역은 2.96 ~ 5.97 tf/m^2 이며, 그림 5.1~그림 5.2는 각각의 지역에 대한 조위변화와 그에 따른 유효응력변화를 나타낸 것이다.



(a) 1, 2구역

그림 5.1 영산강 하구언지역의 조위표 및 유효응력변화



(b) 3, 4구역

그림 5.1 영산강 하구언지역의 조위표 및 유효응력변화 (계속)

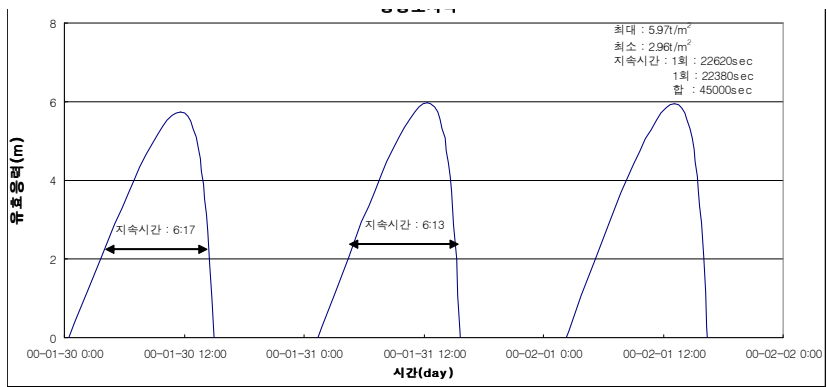
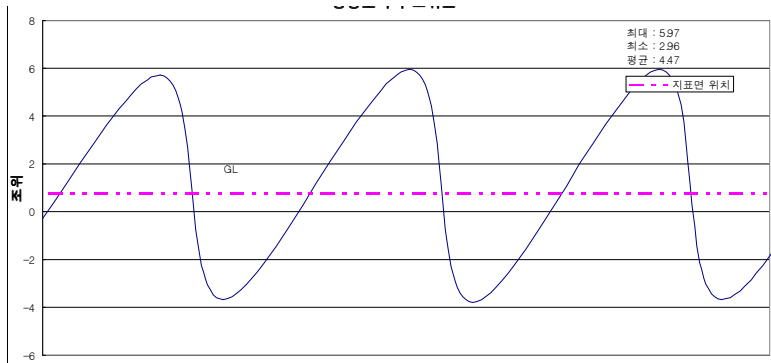


그림 5.2 영종도지역의 조위표 및 유효응력변화

나. 유한요소망 및 경계조건

본 해석을 위한 유한요소망은 그림 5.4과 그림 5.5와 같다. 각각의 유한요소망은 그림 5.3을 토대로 기초지반을 모형화하였으며 영산강 하구언지역과 영종도지역 모두 점토층, 모래, 자갈층 순으로 층서가 구성되었으며, 영산강지역은 심도 0 ~ 20m, 영종도지역은 0 ~ 10m가 점토층으로 구성되었다.

두 지역의 점토층은 간극수압 측정이 가능한 8절점 사각형요소를 사용하였으며, 그림 5.3과 같다.



(a) LSQ(element type 4)

8 nodes, 16 d.o.f

(for drained/undrained analysis and zones)

(b) LSQp(element type 5)

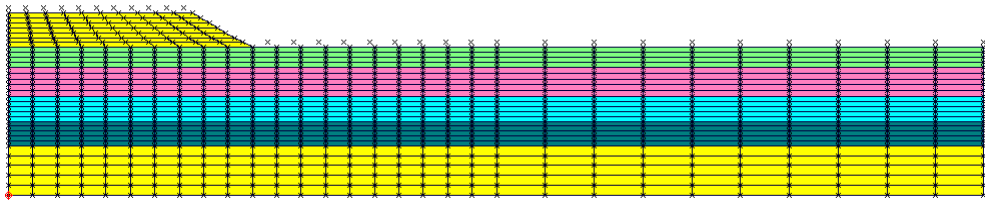
8 nodes, 20 d.o.f

(for consolidation analysis and zones)

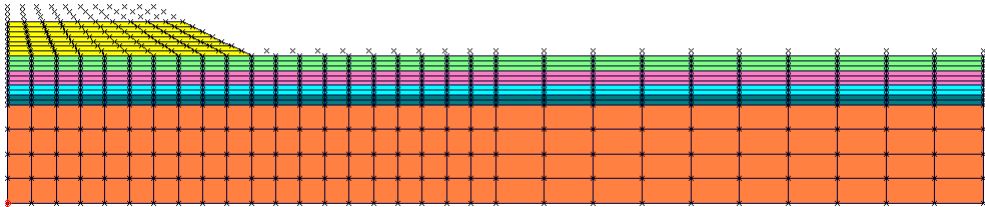
그림 5.3 Finite Element Types

성토체는 Non-Consolidation 8절점 요소를 사용하였으며 연직배수재는 등가폭 $B=18R$ 로 고려하여 과잉간극수압 “0”로 배수재가 설치된 부분에 대하여 선요소를 통하여 배수가 허용되는 것으로 하였다.

경계조건에서 변위는 양측면에서 수평방향만 구속하였고 바닥면에서는 수평 및 연직방향으로 구속하는 조건으로 하였다.

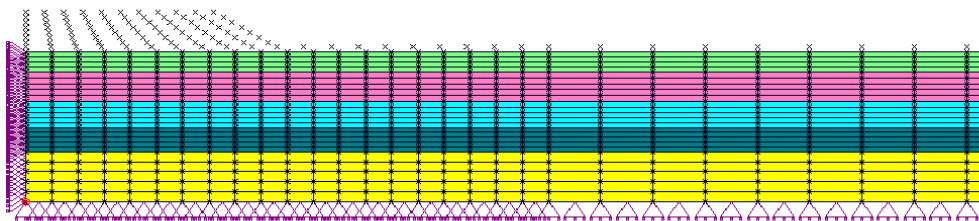


(a) 영산강 하구언지역

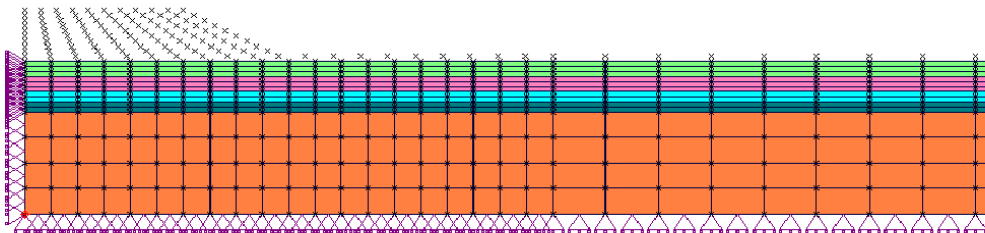


(b) 영종도지역

그림 5.4 지역별 매쉬구성



(a) 영산강 하구언지역



(b) 영종도지역

그림 5.5 지역별 초기상태

다. 해석단계

본 해석단계는 영산강 하구언지역과 영종도지역의 현장계측단면을 역해석하였다.

조석에 의한 유효응력증가를 표현하기 위해 1일 3600sec만큼의 지하수위하강을 주어 약 1,000년간 반복 지속시켰다.

영산강 하구언지역은 약 3.0 tf/m²을 영종도지역은 약 7.0 tf/m²의 유효상재압변화를 반복적으로 지속시켰다. 그리고 계측기측정에서 수행 기록된 공사과정과 계측자료에 부합되는 선행압밀하중과 압축특성을 유한요소해석 프로그램 Sage-CRISP을 이용하여 해석하였다.

표 5.1 영산강 하구언지역의 해석단계

해석단계	내 용	기 간
1~210	약 4.0m 조석에 의한 유효응력 증가	3600sec/일 약 1000년 1,314,000,000 sec
211~213	P.B.D 연직배수재 B=10R(등가폭)타설 1.0m 모래층 포설	259,200 sec
214~293	1.0m 성토대기	6,912,000 sec
294~296	2.0m 성토	259,200 sec
297~261	2.0m 성토대기	5,616,000 sec
362~364	3.0m 성토	259,200 sec
365~428	3.0m 성토대기	5,529,600 sec
429~484	7.0m 성토	4,838,400 sec
485~1,233	7.0m 성토대기	88,387,200 sec

표 5.2 영종도지역의 해석단계

해석단계	내 용	기 간
1~210	약 7.0m 조석에 의한 유효응력 증가	3600sec/일 약 1000년 1,314,000,000 sec
211~213	P.B.D 연직배수재 B=10R(등가폭)타설 2.0m 모래층 포설	259,200 sec
214~308	2.0m 성토대기	8,208,000 sec
309~311	3.0m 성토	259,200 sec
312~334	3.0m 성토대기	1,987,200 sec
335~337	4.0m 성토	259,200 sec
338~551	4.0m 성토대기	18,489,600 sec
552~554	7.0m 성토	259,200 sec
555~936	7.0m 성토대기	33,004,800 sec

5.1.2 영산강 하구언지역

영산강 하구언지역은 1982년 방조제가 축조 완료되었으며, 사업지구내에는 해수유입이 차단되고 1992년 대죽방조제에 의해 관리수위 -1.35m로 통제되고 10여년 이상 농경지로 활용되었다. 2003년 남약신도시 건설이 착공되어 성토가 시작되었고 이에 맞추어 계측기 매설 및 측정이 시작되었다.

본 절에서는 1,000년 이상 조석에 의한 유효응력증가로 과압밀상태가 된 지역에서 P.B.D타설 및 성토에 따른 계측결과를 토대로 유한요소를 실시하여 역해석하였다.

유한요소해석에 의해 역해석된 압밀특성과 계측기에 의한 획득한 압밀특성을 비교하여 조석에 의한 과압밀특성을 규명하였다.

가. 조석에 의한 침하량 분석

조석은 일 1일 2회 만조와 간조를 되풀이하며, 간조시에는 연약지반이 해수면상으로 노출된다. 해수면위의 지반은 노출된 지반고만큼 부력이 없어지므로 지반내에는 상재하중이 증가한다.

영산강 하구언지역의 해수면 하강시 유효상재하중증가량은 약 $0.52\sim 3.58\text{ tf/m}^2$ 으로 조사되었으며, 현장계측자료에서의 선행압밀하중 또한 4.05 tf/m^2 으로 2,000년간 반복재하 및 제하과정을 반복하여 압밀침하량과 심도별 압밀도를 분석하였다.

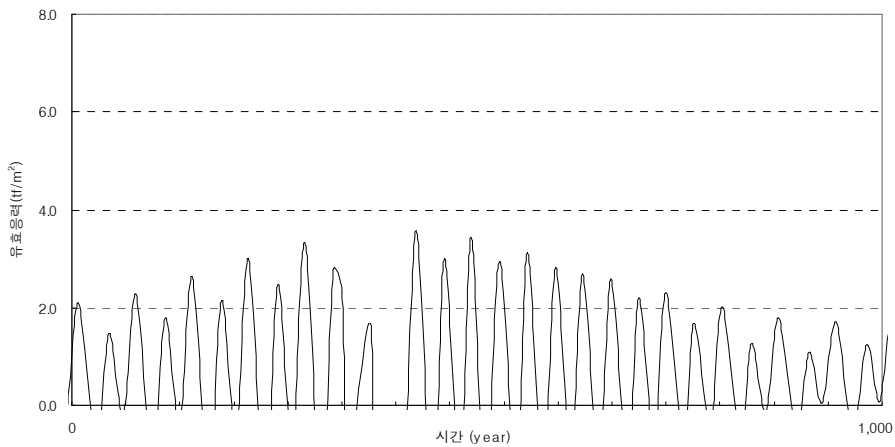


그림 5.6 시간에 따른 유효응력변화(영산강 하구언지역)

그림 5.7에서 보는 바와같이 조석에 의한 유효응력증감에 따른 침하량은 약 1.0m정도로서 조위차의 약 1/4정도가 나오는 것으로 예상되었다.

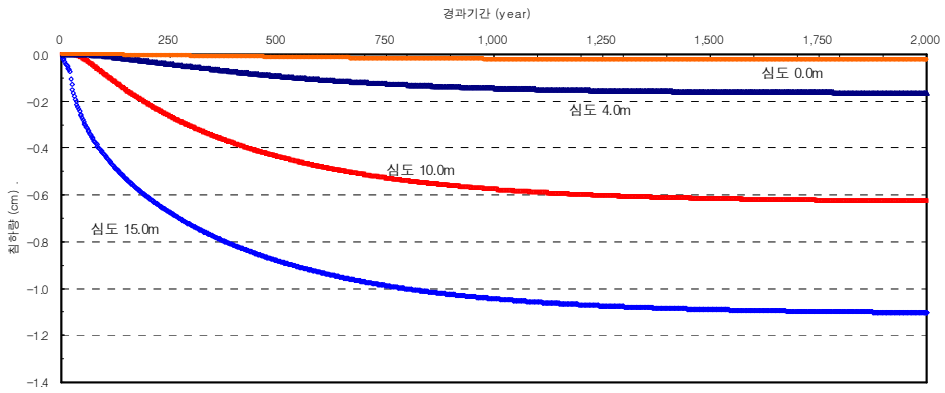


그림 5.7 시간경과에 따른 침하량변화(영산강 하구언지역)

압밀도변화는 200년 이하 경과시 심도 10m이하에서만 증가하나, 300년 이후 상하층에서 모두 압밀도가 증가한다. 이후 모든 심도에서 압밀도가 증가하며 약 1,000년경과시 조석차에 의한 유효응력증가가 종료되는 것으로 나타난다.

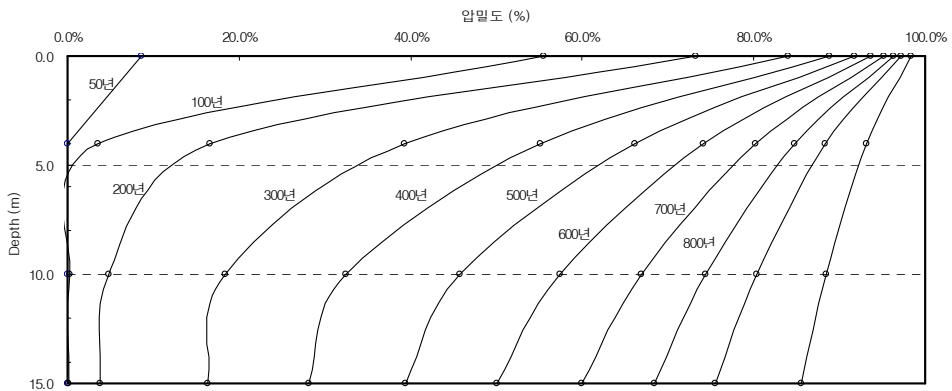


그림 5.8 시간경과에 따른 압밀도변화(영산강 하구언지역)

나. 성토 재하후 침하량 비교

그림 5.9는 유한요소해석결과와 현장의 계측기에 의해 측정된 시간에 따른 침하량을 나타내고 있다.

유한요소해석과 현장의 계측결과는 모두 전형적인 과압밀점토의 침하경향을 보이고 있다.

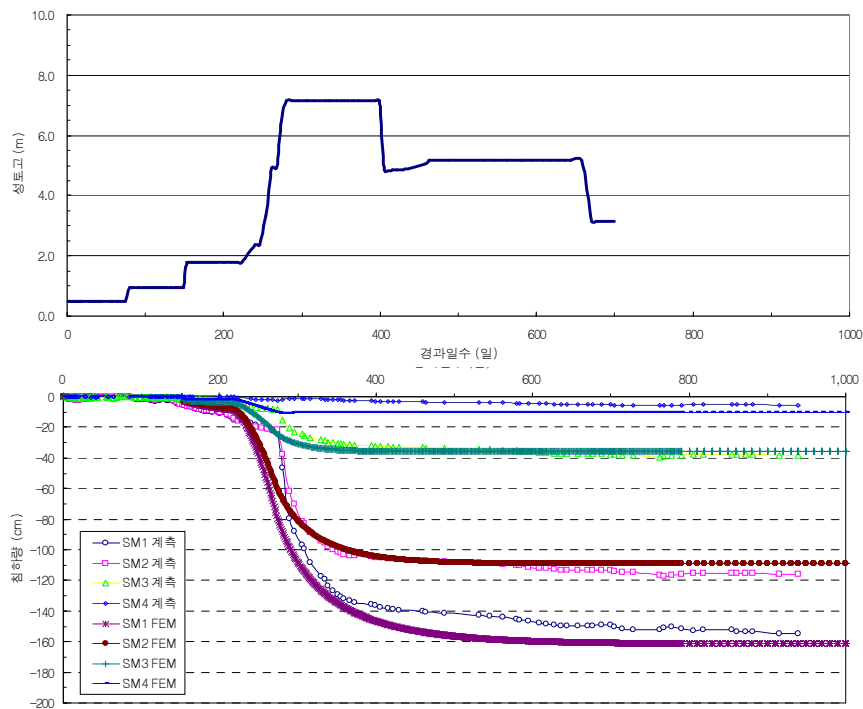


그림 5.9 성토고에 의한 침하량(영산강 하구언지역)

계측 및 FEM해석에 따른 침하량은 성토고 4.0m이하에서는 계측결과가 11.3cm이며, FEM해석값은 15.6cm이다. 현장 성토고 7.0m이상 축조시 성토하중이 선행압밀하중(약 5.0 tf/m²)을 상회하므로 지반은 급격히 침하된다.

표 5.3 성토에 따른 계측침하량과 FEM해석 비교(영산강 하구언지역)

성 토 고	침 하 량 (cm)		비 고
	FEM해석	계 측 값	
1.0 m	-4.9	-5.3	149일
2.0 m	-11.3	-15.6	224일
7.0 m	-160.0	-155.0	

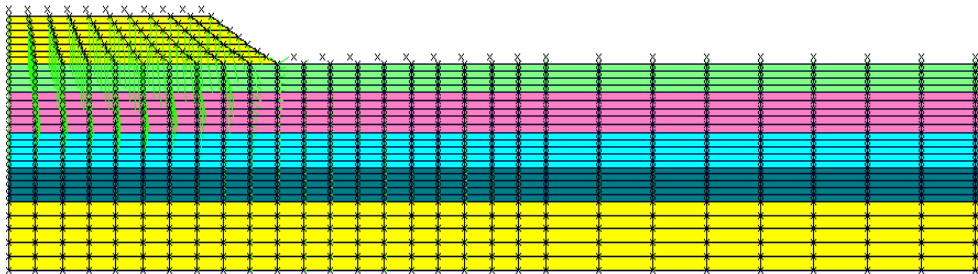


그림 5.10 영산강 하구언지역의 벡터도

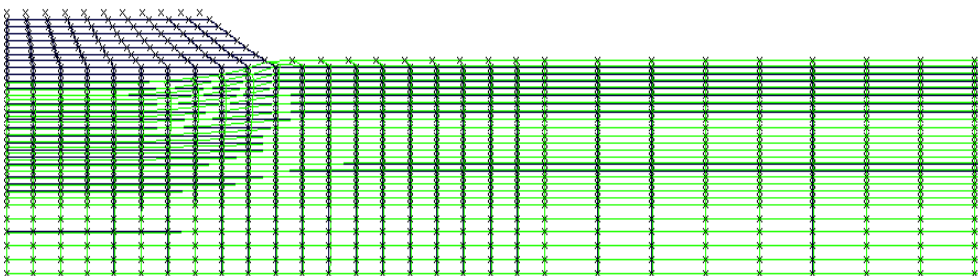


그림 5.11 영산강 하구언지역의 변형도

다. 간극수압 비교

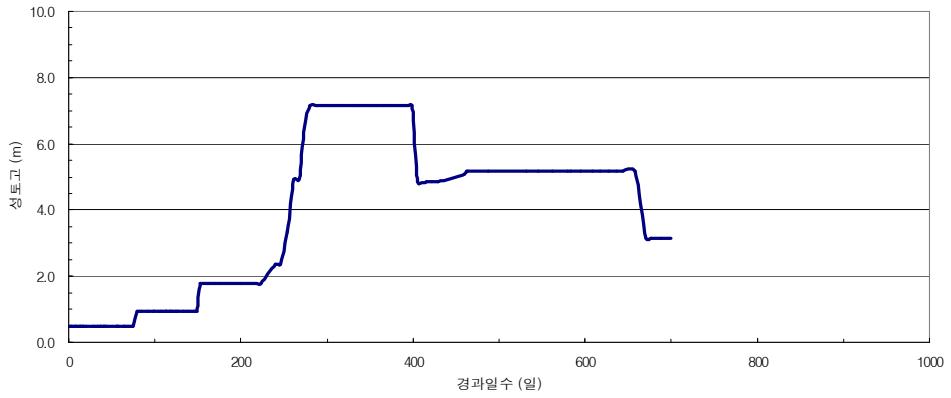
그림 5.29는 성토단계이후 P.B.D타설이 완료된 구간에서 심도 2.0m, 7.0m, 13.0m깊이에 위치한 간극수압계로부터의 계측치와 유한요소해석결과와의 시간별 분포경향을 나타내고 있다.

전반적으로 현장계측치와 유한요소해석결과에 의한 과잉간극수압은 성토후 비교적 좋은 일치를 보이고 있다.

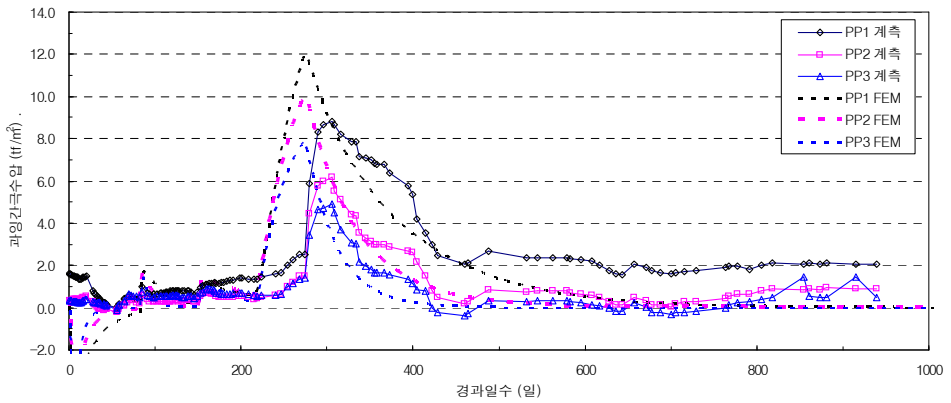
성토단계에서의 과잉간극수압은 정규압밀영역과 과압밀영역으로 나누어지는데 성토고 4.0m이하는 과압밀영역으로 해석된다. 즉 현장계측치와 FEM해석값 모두 과잉간극수압이 2.0 tf/m^2 이상이 발생하지 않는다. 이는 성토하중이 선행압밀하중(P_c)보다 작을 경우에 나타나는 정상적인 현상이며 영산강 하구언지역이 과압밀지역임을 입증하고 있다.

성토고 7.0m이상에서 계측치와 유한요소해석 모두 최대치를 보인다. 그러나, 유한요소해석에서 나타나는 값이 3.0 tf/m^2 이상 크게 나타나는데 이는 실제 성토기간이 30일 이상으로 장기성토조건인데 반해, FEM해석에서는 3일동안의 단기성토조건의 영향으로 현장성토시 FEM해석보다 장기간 성토함으로 인해 과잉 간극수압이 소산이 진행되면서 발생한 까닭으로 분석된다.

최대 발생지점 이후 소산과정에서는 서로 유사한 소산곡선을 보이고 있으나 심도 2.0m의 PP1에서 2.0 tf/m^2 의 잔류간극수압을 보이고 있는데 이는 지반이 침하되면서 상대적으로 지하수면이 상승한 원인으로 분석된다.



(a) 시간경과에 의한 성토고



(b) 성토에 따른 과잉간극수압의 변화

그림 5.12 성토에 따른 과잉간극수압변화(영산강 하구언지역)

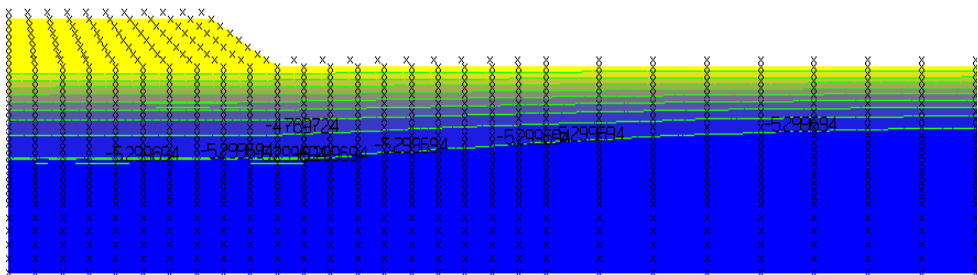


그림 5.13 영산강 하구언지역의 간극수압 등고선도

라. FEM에 의한 현장토질정수

유한요소해석에 의한 선행압밀하중 검토결과, 그 값이 49.05 KN/m^2 으로서 수위차로 환산할 경우 약 5.0m로 분석되어졌다.

표 5.4 FEM해석에 의한 토질정수(영산강 하구언지역)

구 분	Modified Cam-Clay model			
	0~4.0m	4.0~10.0m	10.0~15.0m	15.0~20.0m
Cam-Clay 재압축지수 (κ)	0.04	0.04	0.03	0.0087
Cam-Clay 압축지수 (λ)	0.33	0.37	0.24	0.09
한계간극비 (e_{cs})	2.346	2.076	1.5306	1.4506
수평 투수계수 (k_h , m/s)	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}	3.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}
선행압밀하중 (P_c , KN/m^2)	49.05	49.05	49.05	49.05

표 5.4에서 보는 바와같이 λ 값은 0.24~0.33으로 표준압밀시험의 e - $\log P$ 곡선의 압축지수(C_c)로 환산시 0.55~0.76이며, κ 값은 0.03~0.04로 표준압밀시험의 재압축지수(C_r)값으로 변환시 0.069~0.092로서 압축지수의 1/8인 과압밀점토로 해석되었다.

5.1.3 영종도지역

본 지역은 영종도와 용유도 사이에 17.3km의 방조제를 축조하여 간석지 1,410만평에 활주로를 조성하는 인천국제공항 제2활주로 조성공사이다. 영종도지역은 조수간만차가 하루 약 10m 정도로 매우 큰 지역이다.

영종도지역에서도 1,000년이상 조석에 의한 유효응력증가로 과압밀된 지역을 대상으로 P.B.D타설과 성토에 따른 계측결과를 토대로 유한요소해석을 실시하여 역해석하였다.

유한요소해석에 의해 역해석된 압밀특성과 계측기에 의해 획득한 압밀특성을 비교분석하여 조석에 의한 고압밀특성을 규명하였다.

가. 조석에 의한 침하량 분석

영종도지역의 조수간만차는 3.98~9.75m이며, 간조시 해수면상으로 노출되는 높이는 5.97m이다.

유한요소해석에서는 유효상재압 변화를 현장계측값(10.0 tf/m²)의 조건으로 2,000년간 반복재하 및 제하하여 압밀침하량 및 심도별 압밀도를 조사하였다.

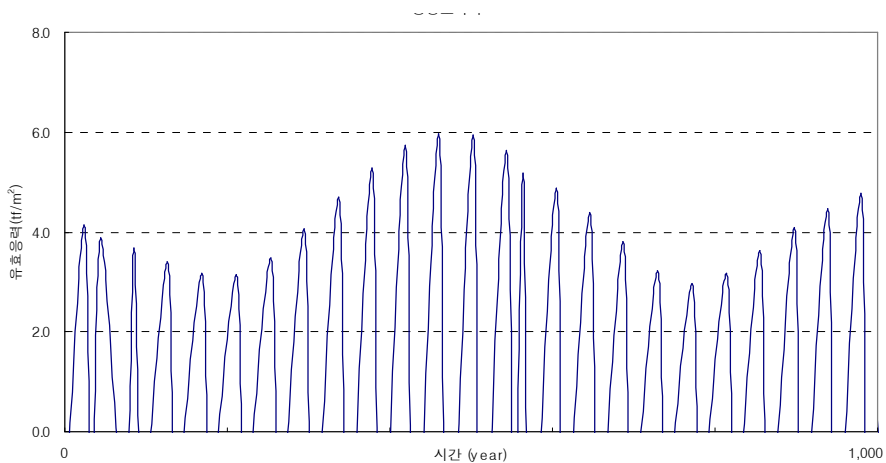


그림 5.14 시간에 따른 유효응력변화(영종도지역)

조석에 의한 유효응력증감에 의한 압밀침하량은 약 1.8m로서 조위차 5.97m의 약 1/3정도가 나오는 것으로 분석된다.

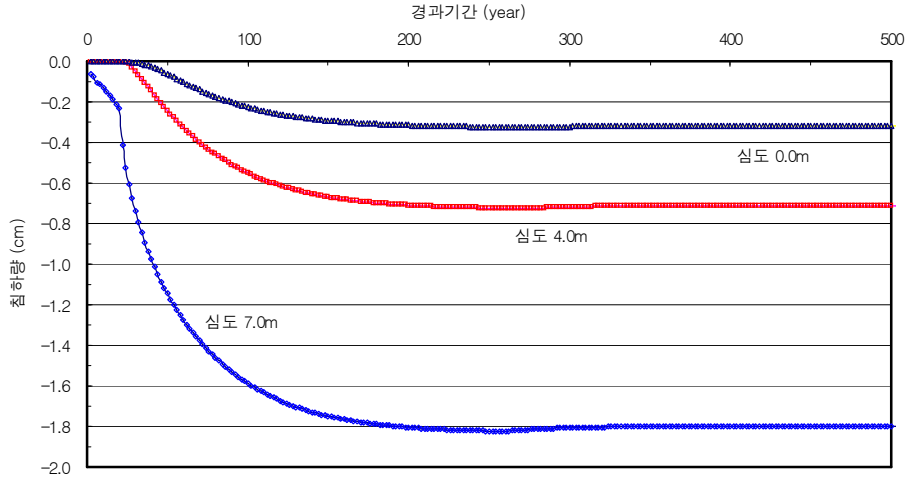


그림 5.15 시간경과에 따른 침하량 변화(영종도지역)

연약지반 심도가 10m이하로 비교적 작은 관계로 압밀도 90%이상 진행되는 데 200년이 경과한다.

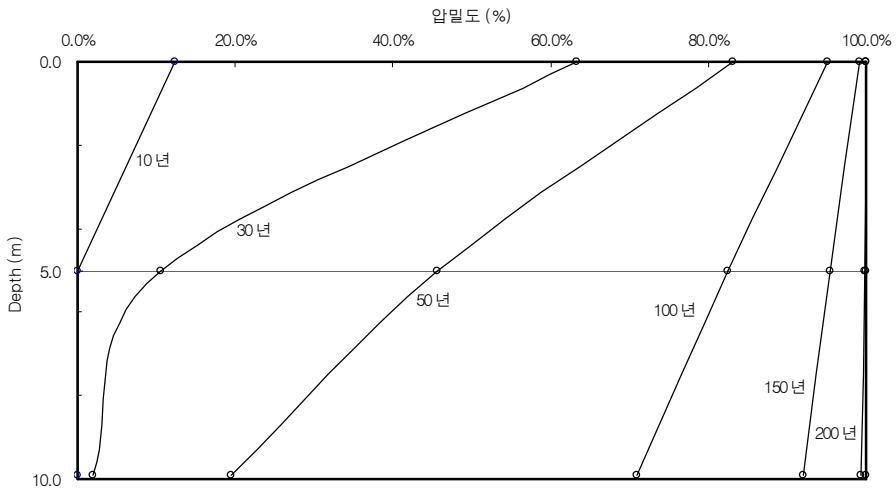


그림 5.16 시간경과에 따른 압밀도 변화(영종도지역)

나. 성토 재하후 침하량 비교

그림 5.17은 유한요소해석결과와 계측기에 의해 측정된 시간에 따른 침하량을 나타내고 있다.

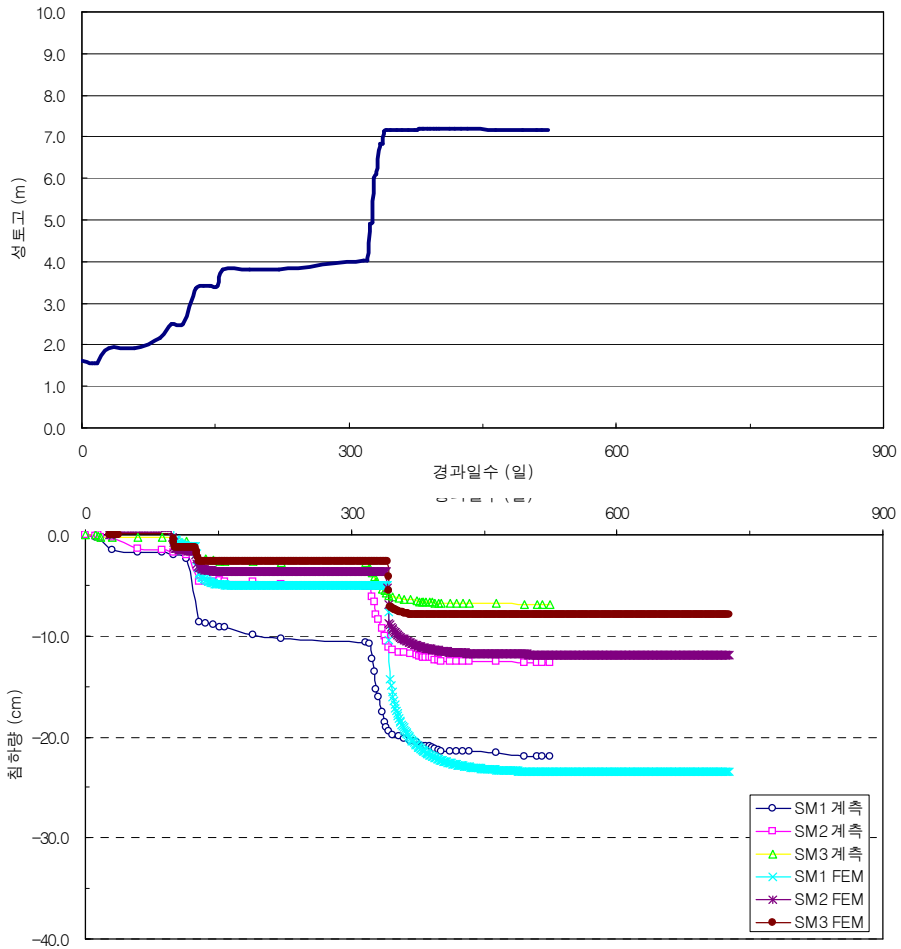


그림 5.17 성토고에 의한 침하량(영종도지역)

계측 및 FEM해석결과 선형압밀하중이 7.0 tf/m^2 으로 비교적 크고 연약층 후가 10.0m 이내로 비교적 작은 관계로 -22.0 cm내외의 작은 값을 보인다.

표 5.5 성토에 따른 계측침하량과 FEM해석 비교(영종도지역)

성 토 고	침 하 량 (cm)		비 고
	FEM해석	계 측 값	
2.0 m	-1.7	0.0	87일
4.0 m	-10.6	-5.1	317일
7.2 m	-22.0	-23.5	524일

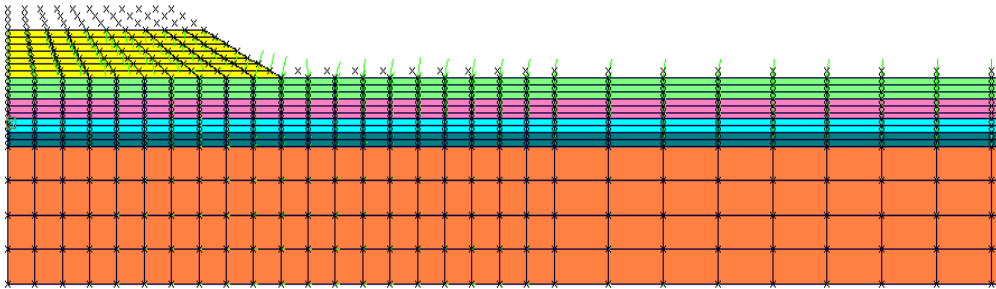


그림 5.18 영종도지역의 백터도

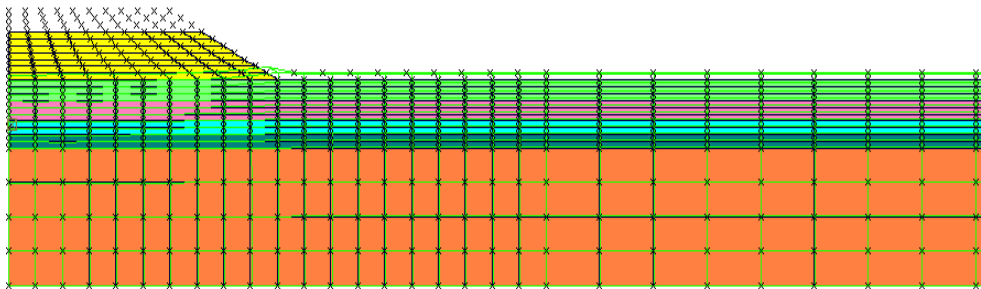


그림 5.19 영종도지역의 변형도

다. 간극수압 비교

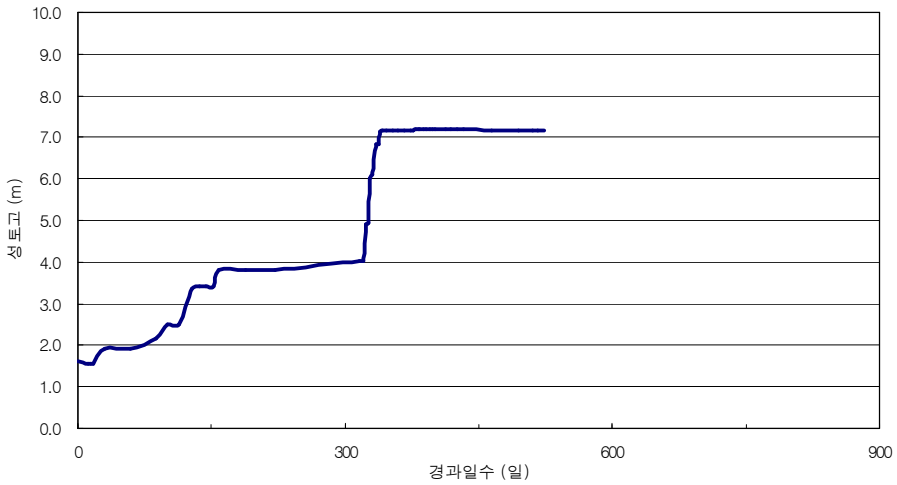
그림 5.20은 2.0m, 7.0m의 심도에서 간극수압계측치와 유한요소해석결과와의 시간별 분포를 나타내고 있다.

현장계측치와 유한요소해석결과에 의한 과잉간극수압은 비교적 좋은 일치성을 보인다.

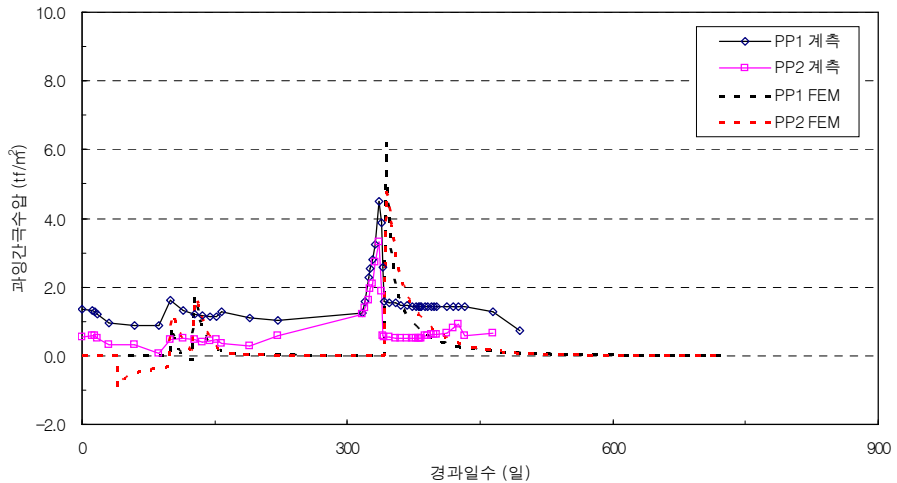
성토하중은 현재 과압밀영역의 경계에 있으므로 현장발생과잉간극수압과

유한요소해석 모두 7.0m 성토시에도 6.0 tf/m²이하로 성토하중의 50%이하가 과잉간극수압이 발생하고 있다. 이는 영산강 하구언지역의 12.0 tf/m²보다도 매우 작은 값으로 영종도지역이 영산강 하구언지역보다 매우 큰 선행압밀하중을 받았었음을 의미한다.

간극수압의 소산과정은 매우 비슷하나 계측값이 더욱 큰 잔류간극수압을 보이는데 이는 성토로 인한 지하수위상승의 영향으로 보인다.



(a) 시간경과에 의한 성토고



(b) 성토에 따른 과잉간극수압의 변화

그림 5.20 성토에 따른 과잉간극수압변화(영종도지역)

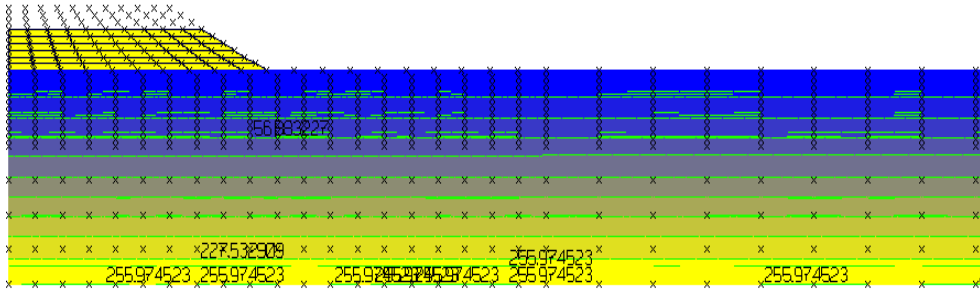


그림 5.21 영종도지역의 간극수압 등고선도

라. FEM에 의한 현장토질정수

유한요소해석에 의한 선행압밀하중 검토결과, 그 값이 129.5 KN/m^2 으로서 수위차로 환산할 경우 약 13.0m로 분석되었다.

표 5.6 FEM해석에 의한 토질정수(영종도지역)

구 분	Modified Cam-Clay model		
	0~3.0m	3.0~6.0m	6.0~10.0m
Cam-Clay 재압축지수 (κ)	0.052	0.0217	0.027
Cam-Clay 압축지수 (λ)	0.3	0.19	0.24
한계간극비 (e_{cs})	1.3869	1.6422	1.08
수평투수계수 ($k_h, \text{ m/s}$)	5.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}
선행압밀하중 ($P_c, \text{ KN/m}^2$)	129.5	129.5	129.5

표 5.6에서 보는 바와같이 λ 값은 0.19~0.30으로 표준압밀시험의 e -logP 곡선의 압축지수(C_c)로 환산시 0.44~0.69이며, κ 값은 0.0217~0.052로 표준압밀시험의 재압축지수(C_r)값으로 변환시 0.05~0.012로서 압축지수의 1/8인 과압밀점토로 해석되었다.

5.2 일원배치법을 이용한 통계분석

5.2.1 영산강 하구언지역

가. 데이터 조사

(1) 현장의 데이터의 분포

현장의 C_c , P_c , OCR에 대하여 도수분포표를 작성하였다. 도수분포표의 수직축은 분포밀도로서 도수를 계급의 구간으로 나눈 값을 의미한다. 그림 5.22, 그림 5.23, 그림 5.24의 분석 결과에서 실선으로 표시된 곡선은 평균값과 표준편차를 이용하여 확률밀도함수로 정규분포곡선을 나타낸 것이다. 그림 5.25, 그림 5.26, 그림 5.27은 확률분포도를 나타낸 것으로 수직축은 정규분포의 확률밀도를 수평축에 대하여 적분한 값으로 누적확률밀도를 나타낸 것이다.

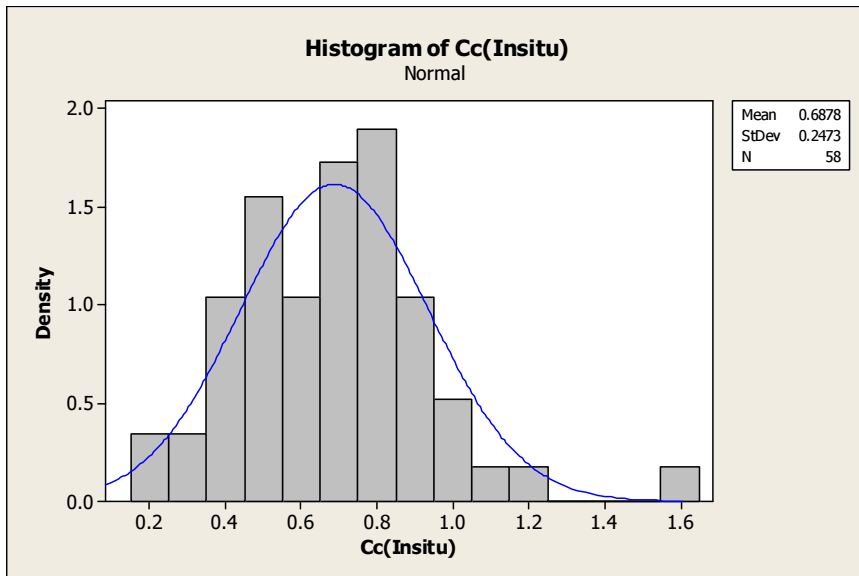


그림 5.22 현장 C_c 의 분포(영산강 하구언지역)

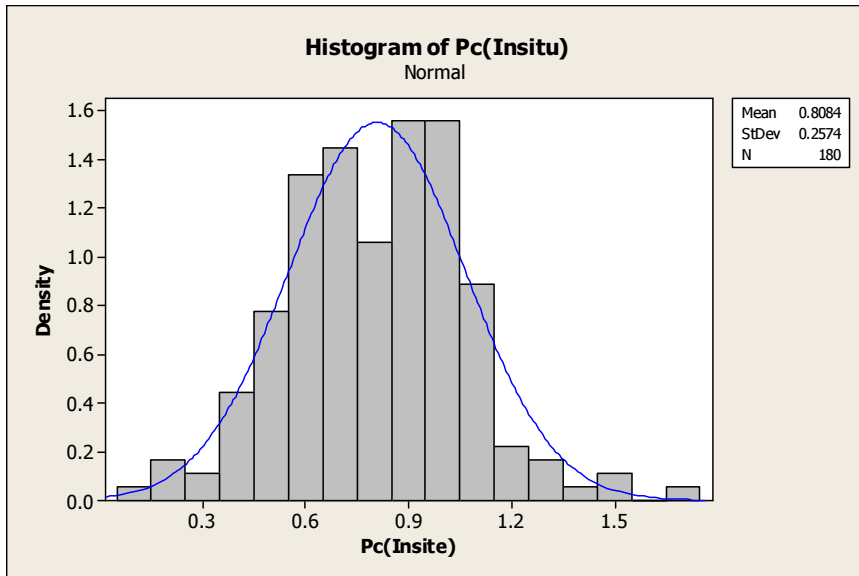


그림 5.23 현장 P_c 의 분포(영산강 하구언지역)

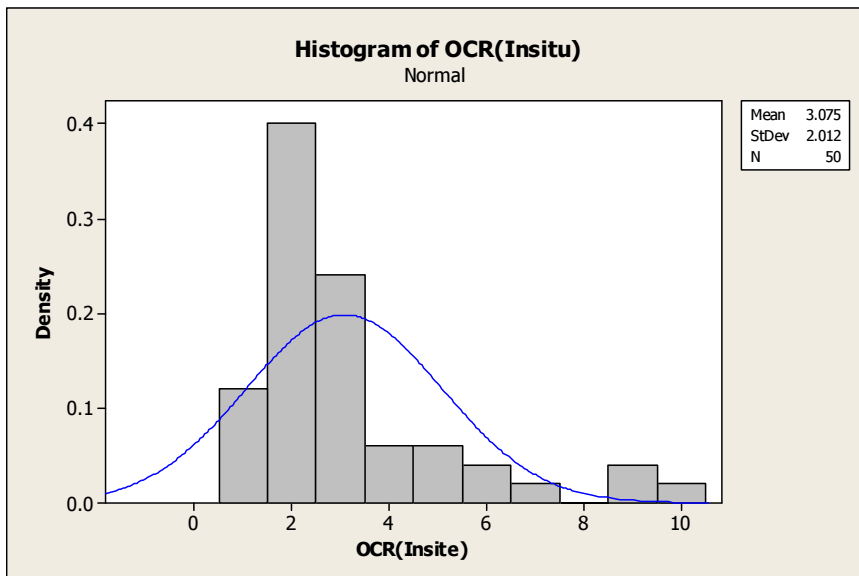


그림 5.24 현장 OCR의 분포(영산강 하구언지역)

(2) 현장데이터의 정규성의 검토

데이터를 낮은 값에서 높은 값으로 정렬한 후에 각 데이터 값들에 대해 누적확률밀도 값을 계산하여 이 값들에 z_1, z_2, \dots, z_n 의 변수를 부여하여 다음 식(5.1)에 의해 Anderson-Darling 통계량을 계산한다.

$$AD = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2n-1) \cdot [\ln(z_i) + \ln(1-z_{n-i+1})] \quad (5.1)$$

Anderson-Darling 통계량 검정을 위한 유의수준에 따른 임계값은 다음 표 5.7과 같다.

표 5.7 유의수준에 따른 Anderson-Darling 통계량의 임계값

유의수준(%)	15.0	10.0	5.0	2.5	1.0
임계값	1.610	1.933	2.492	3.070	3.857

실험자료 분포의 정규성을 나타내는 지표로 유의수준을 기준으로 AD값이 임계값을 넘을 경우 정규분포를 따르지 않는 것으로 판정한다. 그림 5.25의 경우 p-value가 5% 미만이므로 신뢰구간 95%하에서 현장의 C_c 값은 정규분포를 따르지 않는다고 할 수 있다. 그러나, 그림 5.26의 p-value가 8.2%이므로 신뢰구간 95%하에서 현장의 P_c 값은 정규분포를 따른다.

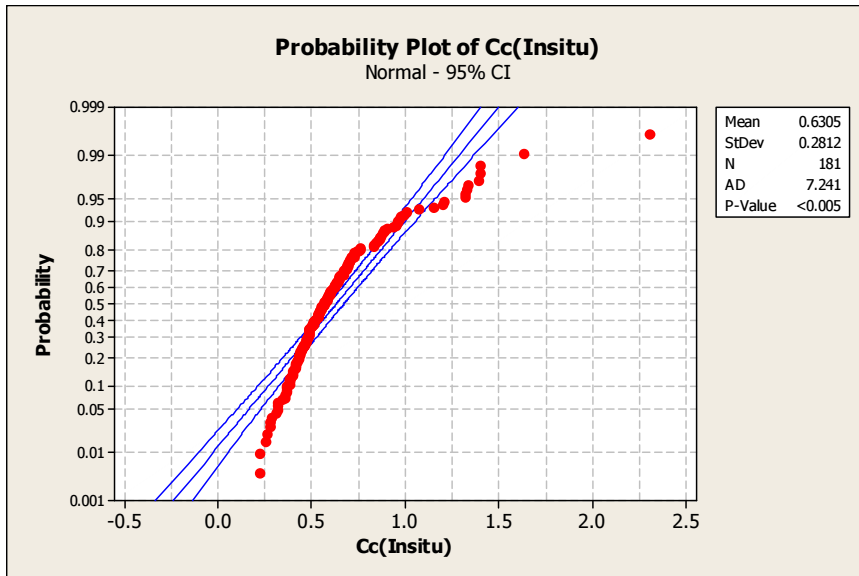


그림 5.25 현장 C_c 의 확률분포도(영산강 하구언지역)

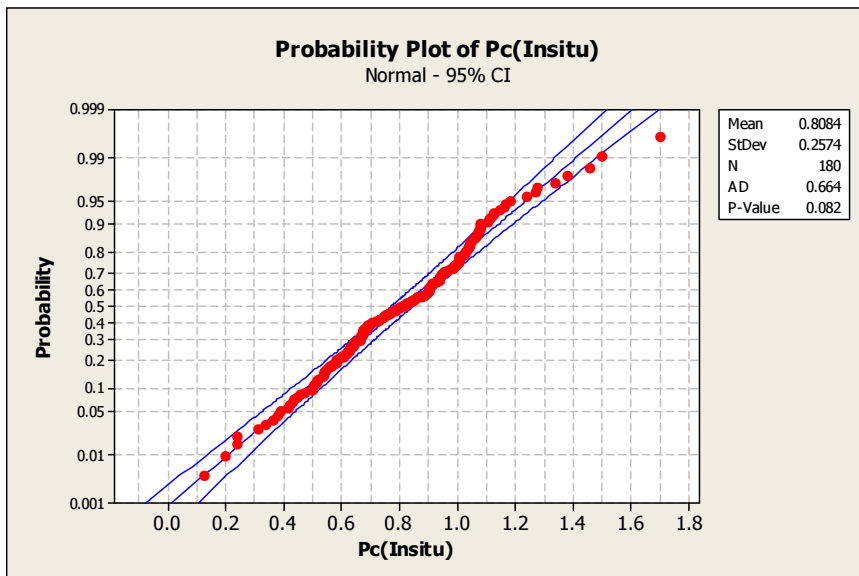


그림 5.26 현장 P_c 의 확률분포도(영산강 하구언지역)

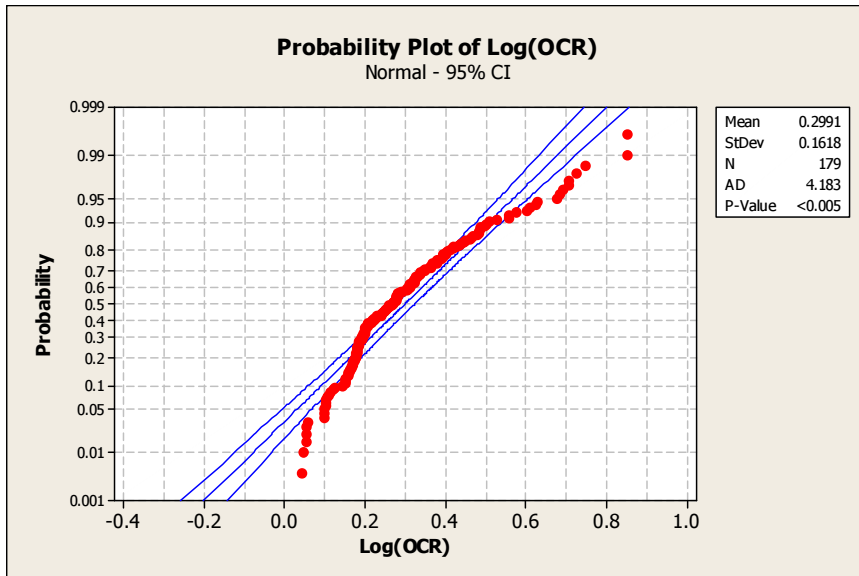


그림 5.27 현장 Log(OCR)의 확률분포도(영산강 하구언지역)

유의수준 5%에 대하여 Anderson-Darling 통계량을 현장 P_c 는 만족하나 C_c , Log(OCR)은 만족하지 못한다. 따라서, C_c 와 Log(OCR)는 정규분포를 따르지 않는다고 할 수 있다.

나. 통계분석결과

현장데이터의 통계분석은 다음 표 5.8과 같다. 변동계수(Coefficient of Variance)는 C_c 가 0.445, Log(OCR)이 0.542, P_c 가 0.318이므로 P_c 의 변동계수 값이 가장 작으므로 평균에 대한 표준 편차의 비가 가장 낮다.

표 5.8로부터 C_c 의 평균은 0.631, 데이터 181개에 대한 표준오차가 0.021이고, Log(OCR)에 대해서는 평균이 0.299, 데이터 수가 179, 표준오차가 0.012, P_c 의 경우 평균이 0.808, 데이터 180개에 대해 표준오차가 0.019로 분석되었다.

표 5.8 C_c , P_c , $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 대한 통계분석(영산강 하구언지역)

분석항목	데이터수	평균	표준오차	표준편차	최소값	최대값
C_c (In-situ)	181	0.631	0.021	0.281	0.220	2.301
$\text{Log}(\text{OCR})$	179	0.299	0.012	0.162	0.044	0.852
P_c (In-situ)	180	0.808	0.019	0.257	0.126	1.700

다. 분산분석

(1) C_c (In-situ)의 ANOVA (Analysis of Variance)

C_c 를 P_c 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 대하여 분산분석한 결과 다음 표 5.9와 같은 결과를 얻었다.

표 5.9 분산분석결과(영산강 하구언지역)

<i>Source</i>	<i>DF</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>Regression</i>	2	4.022	2.011	35.31	0.000
<i>Residual Error</i>	176	10.024	0.057	-	-
<i>Total</i>	176	14.046	-	-	-

※ *DF* : Degree of Freedom (자유도)

SS : Sum of Square (평균값과의 차의 제곱합)

MS : Mean Sum of Square (SS를 DF로 나눈값)

F : F distribution (분산비)

P : P-value

(분산비분포에서 F값에서부터 무한대까지 적분하여 구한 확률값)

Regression : 회기분석

Residual Error : 각 자료값과 평균값과의 차

표 5.9의 결과분석결과로부터 p-value가 0.05보다 작으므로 95%의 신뢰구간에 대해서 C_c 의 값은 P_c 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 값에 대해 상관성이 낮다는 것을 알 수 있다.

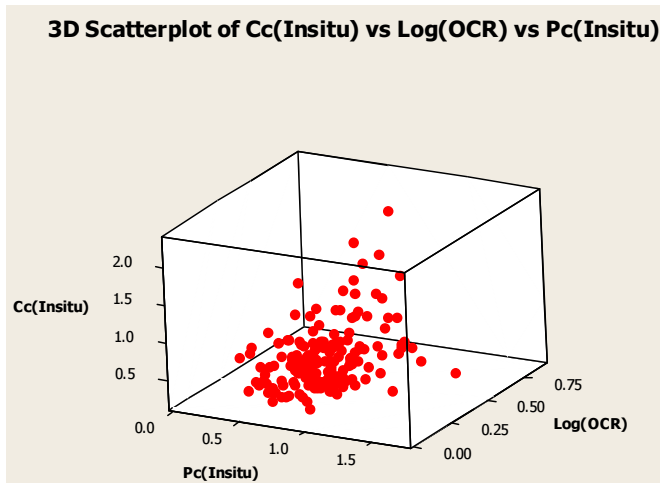


그림 5.28 C_c , P_c , Log(OCR) 의 분산도(영산강 하구언지역)

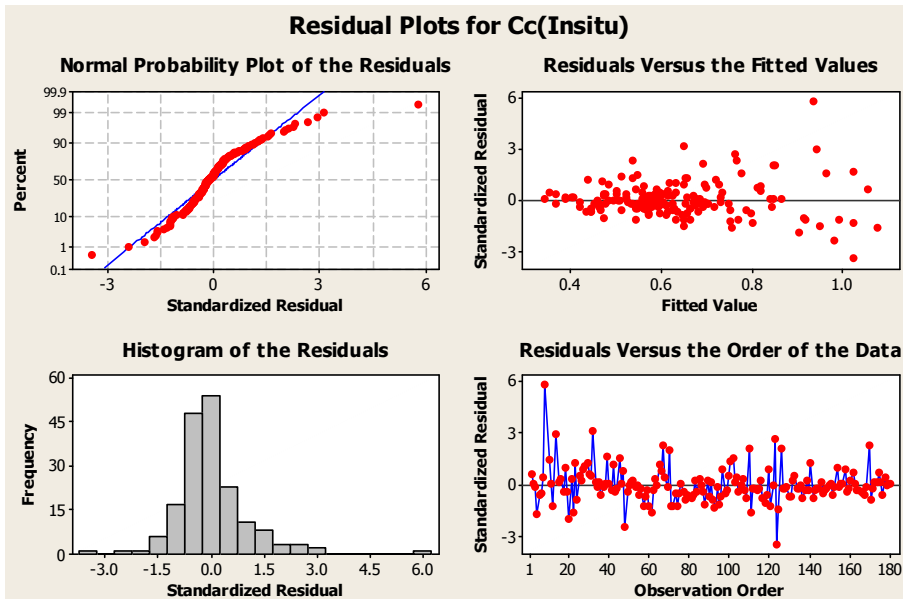


그림 5.29 C_c 에 대한 잔차의 분석결과(영산강 하구언지역)

(2) $C_c(\text{In-situ})$ 의 잔차의 분석

$C_c(\text{In-situ})$ 의 잔차는 fitted value가 증가함에 따라 중심값 0에서 이산되는 정도가 커지므로 $C_c(\text{In-situ})$ 의 모분산과 P_c 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 따른 $C_c(\text{In-situ})$ 의 모분산은 같지 않다고 추정할 수 있으나 잔차의 확률분포가 정규분포를 따르고 있으므로 회귀 방정식에 의한 C_c 의 예측이 가능하다.

라. 실험분석

Minitab의 분석결과를 요약하면 다음 표 5.10과 같다. 이 결과를 이용하여 $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 P_c 에 대하여 식을 구성하면 다음 식(5.2)와 같다.

$$C_c = 0.125 + 0.914\text{Log}(\text{OCR}) + 0.283P_c \quad (5.2)$$

표 5.10 $P_c(\text{In-situ})$ 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 따른 C_c 의 예측(영산강 하구언지역)

<i>Predictor</i>	<i>Coef</i>	<i>SE Coef</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>VIF</i>
<i>Constant</i>	0.125	0.075	1.67	0.096	-
<i>Log(OCR)</i>	0.914	0.113	8.08	0.000	1.0
<i>P_c(in-situ)</i>	0.283	0.071	3.99	0.000	1.0

※ **SE Coef** : Standard Error Coefficient (표준오차계수)

T : t statistics for testing significance of regression coefficients
(회귀계수의 유의검정에 대한 t 통계량)

P : p-values for testing significance of regression coefficients
(회귀계수의 유의검정에 대한 p 값)

VIF : the variance inflation factor, which is simply the reciprocal of tolerance (오차허용치의 상보 개념의 수)

$C_c(\text{In-situ})$ 식에 대한 예측 식(5.2.2)의 표준편차는 0.239, R^2 는 28.6%의 값을 나타내고 있다.

표 5.10으로부터 상수항의 p-value는 0.096, $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 $P_c(\text{In-situ})$ 의 p-value는 각각 0.05이하의 값을 나타내고 있으므로 신뢰구간 95%에 대해 상수항의 Coef는 $C_c(\text{In-situ})$ 의 모집단의 평균값의 변화에 영향을 미치나 $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 $P_c(\text{In-situ})$ 의 Coef는 영향을 적게 미친다는 것을 알 수 있다.

그림 5.28은 $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 $P_c(\text{In-situ})$ 에 대하여 $C_c(\text{In-situ})$ 의 값을 삼차원으로 도시한 것이다. $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 $P_c(\text{In-situ})$ 의 두 변수에 대한 $C_c(\text{In-situ})$ 의 예측은 식(5.2)에 의해 가능하다.

5.2.2 영종도지역

가. 데이터 조사

(1) 현장의 데이터의 분포

현장의 C_c , P_c , OCR 에 대하여 도수분포표를 작성하였다. 도수분포표의 수직축은 Density로서 도수를 계급의 구간으로 나눈 값을 의미한다. 그림 5.30, 그림 5.31, 그림 5.32의 분석 결과에서 실선으로 표시된 곡선은 평균값과 표준편차를 이용하여 확률밀도함수로 정규분포곡선을 나타낸 것이다. 그림 5.33, 그림 5.34, 그림 5.35는 확률분포도를 나타낸 것으로 수직축은 정규분포의 확률밀도를 수평축에 대하여 적분한 값으로 누적확률밀도를 나타낸 것이다.

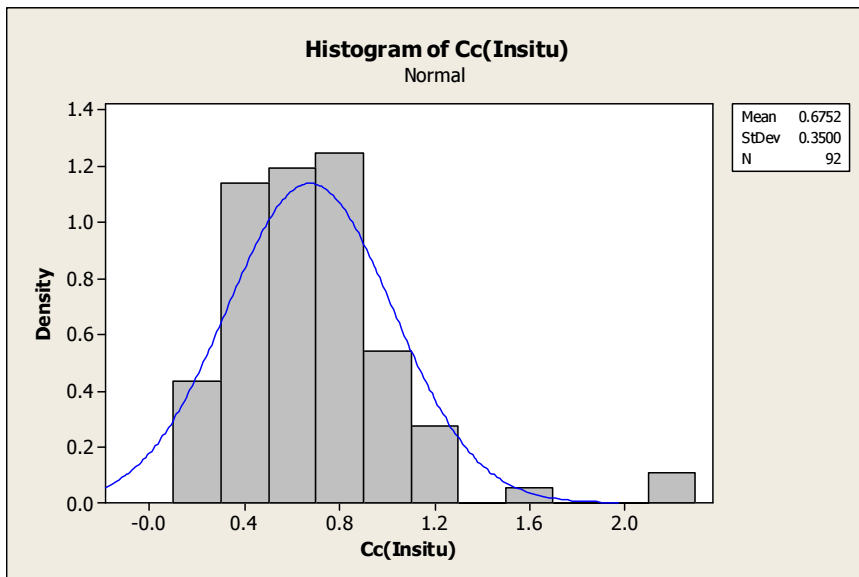


그림 5.30 현장 C_c 의 분포(영종도지역)

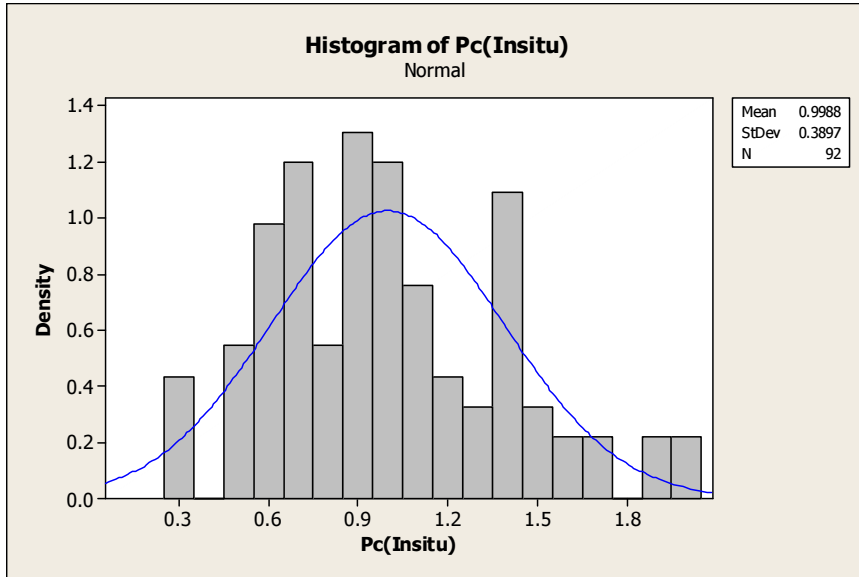


그림 5.31 현장 P_c 의 분포(영종도지역)

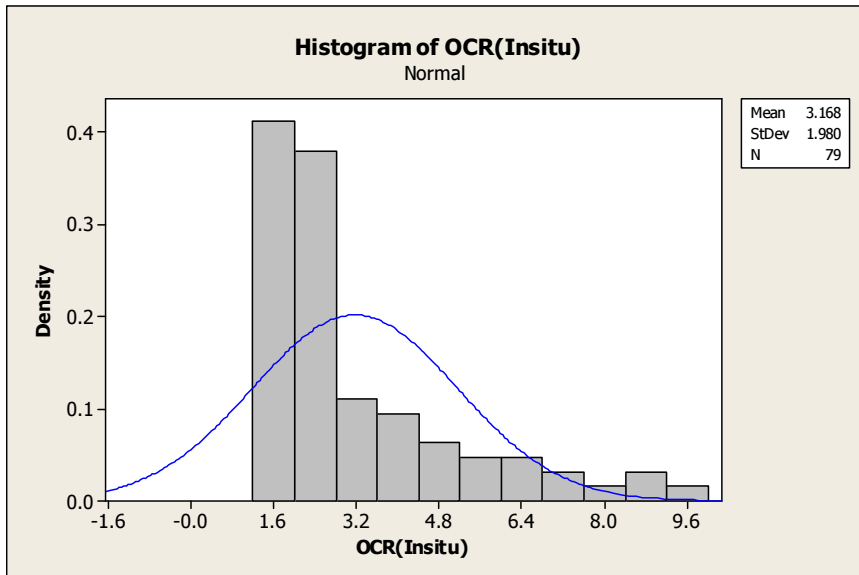


그림 5.32 현장 OCR의 분포(영종도지역)

(2) 현장 데이터의 정규성의 검토

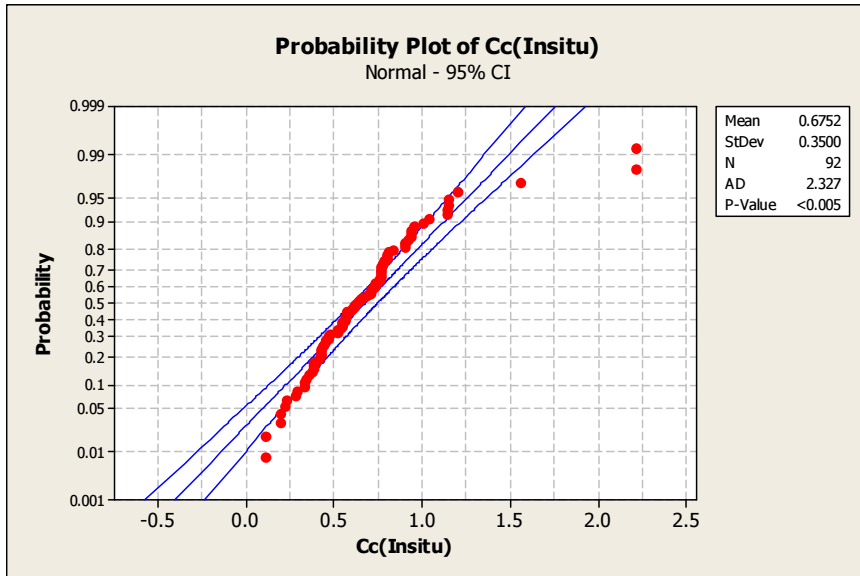


그림 5.33 현장 C_c 의 확률분포도(영종도지역)

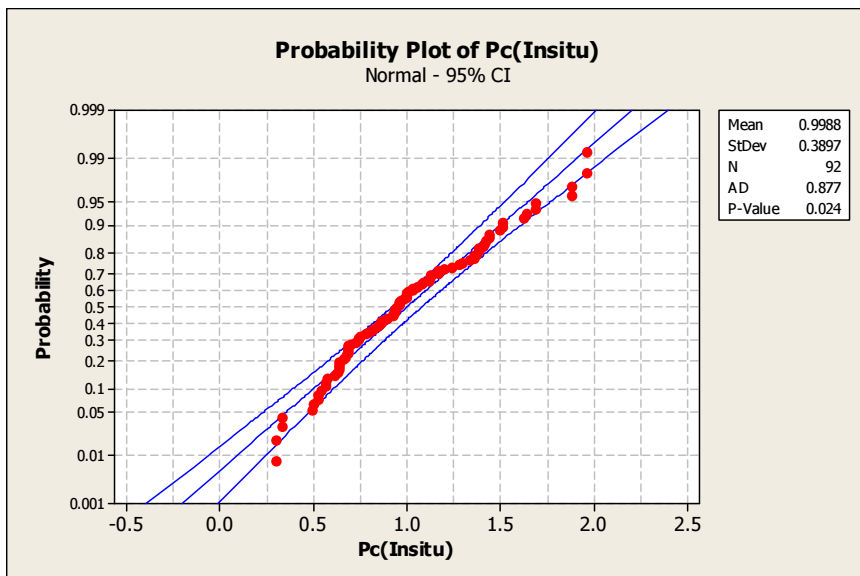


그림 5.34 현장 P_c 의 확률분포도(영종도지역)

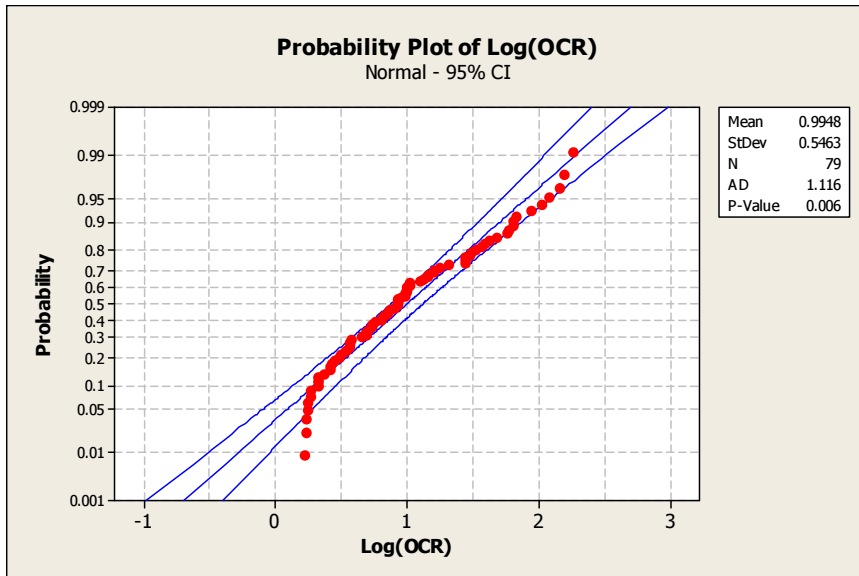


그림 5.35 현장 Log(OCR)의 확률분포도(영종도지역)

유의수준 5%에 대하여 Anderson-Darling 통계량을 현장 P_c , C_c , Log(OCR) 모두 만족하지 못한다. 따라서, P_c , C_c 와 Log(OCR)는 정규분포를 따르지 않는다고 할 수 있다.

나. 통계분석결과

현장데이터의 통계분석은 다음 표 5.11과 같다. 변동계수(Coefficient of Variance)는 C_c 가 0.466, Log(OCR)이 0.549, P_c 가 0.363이므로 P_c 의 변동계수 값이 가장 작으므로 평균에 대한 표준편차의 비가 가장 낮다.

표 5.11로부터 C_c 의 평균은 0.657, 데이터 79개에 대한 표준오차가 0.035이고, Log(OCR)에 대해서는 평균이 0.995, 데이터 수가 79, 표준오차가 0.062, P_c 의 경우 평균이 0.976, 데이터 79개에 대해 표준오차가 0.040로 분석되었다.

표 5.11 C_c , P_c , $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 대한 통계분석(영종도지역)

분석항목	데이터수	평균	표준오차	표준편차	최소값	최대값
C_c (In-situ)	79	0.657	0.035	0.306	0.113	2.216
$\text{Log}(\text{OCR})$	79	0.995	0.062	0.546	0.218	2.252
P_c (In-situ)	79	0.976	0.040	0.354	0.300	1.960

다. 분산분석

(1) C_c (In-situ)의 ANOVA(Analysis of Variance)

C_c 를 P_c 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 대하여 분산분석한 결과 다음 표 5.12와 같은 결과를 얻었다.

표 5.12 분산분석결과(영종도지역)

<i>Source</i>	<i>DF</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>Regression</i>	2	2.182	1.0910	16.15	0.000
<i>Residual Error</i>	76	5.135	0.0676	-	-
<i>Total</i>	78	7.317	-	-	-

표 5.12의 결과분석결과로부터 p-value가 0.05보다 작으므로 95%의 신뢰구간에 대해서 C_c 의 값은 P_c 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 값에 대해 상관성이 낮다는 것을 알 수 있다.

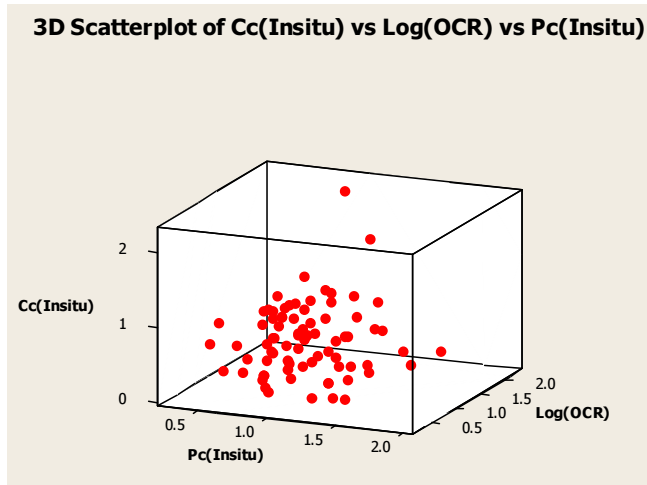


그림 5.36 C_c , P_c , Log(OCR) 의 분산도(영종도지역)

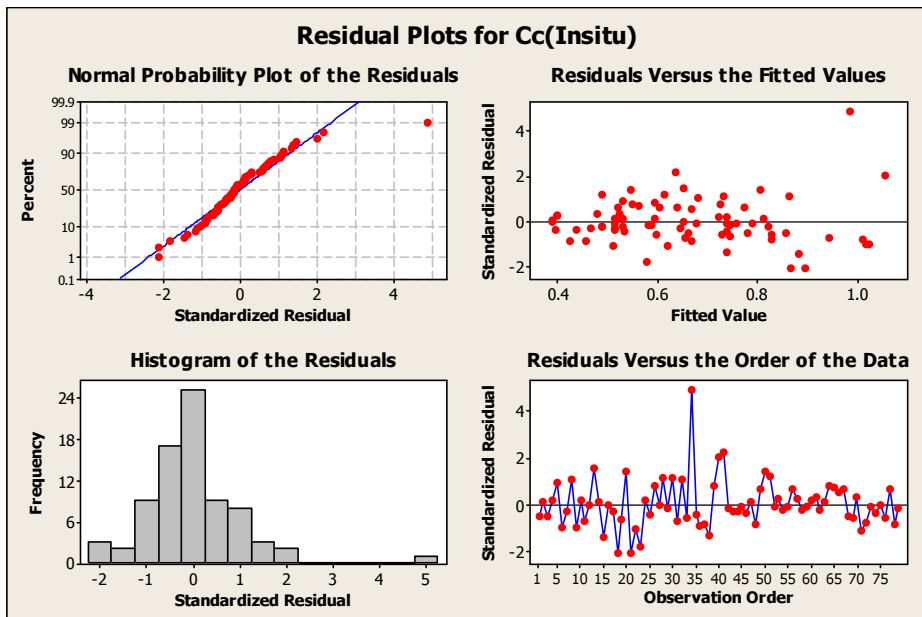


그림 5.37 C_c 에 대한 잔차의 분석결과(영종도지역)

(2) $C_c(\text{In-situ})$ 의 잔차의 분석

$C_c(\text{In-situ})$ 의 잔차는 fitted value가 증가함에 따라 중심값 0에서 이산되는 정도가 커지므로 $C_c(\text{In-situ})$ 의 모분산과 P_c 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 따른 $C_c(\text{In-situ})$ 의 모분산은 같지 않다고 추정할 수 있으나 잔차의 확률분포가 정규분포를 따르고 있으므로 회기방정식에 의한 C_c 의 예측이 가능하다.

라. 실험분석

Minitab의 분석결과를 요약하면 다음 표 5.13과 같다. 이 결과를 이용하여 $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 P_c 에 대하여 식을 구성하면 다음 식(5.3)과 같다.

$$C_c = 0.147 + 0.337\text{Log}(\text{OCR}) + 0.178P_c \quad (5.3)$$

표 5.13 $P_c(\text{In-situ})$ 와 $\text{Log}(\text{OCR})$ 에 따른 C_c 의 예측(영종도지역)

<i>Predictor</i>	<i>Coef</i>	<i>SE Coef</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>VIF</i>
<i>Constant</i>	0.147	0.130	1.13	0.260	-
<i>Log(OCR)</i>	0.337	0.059	5.66	0.000	1.2
<i>P_c (in-situ)</i>	0.178	0.092	1.94	0.056	1.2

표 5.13으로부터 상수항과 $P_c(\text{In-situ})$ 의 p-value는 각각 0.260, 0.056, $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 p-value는 0.05이하의 값을 나타내고 있으므로 신뢰구간 95%에 대해 상수항 및 $P_c(\text{In-situ})$ 의 Coef는 $C_c(\text{In-situ})$ 의 모집단의 평균값의 변화에 영향을 미치나 $\text{Log}(\text{OCR})$ 의 Coef는 영향을 적게 미친다는 것을 알 수 있다. 그림 5.36은 $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 $P_c(\text{In-situ})$ 에 대하여 $C_c(\text{In-situ})$ 의 값을 삼차원으로 도시한 것이다. $\text{Log}(\text{OCR})$ 과 $P_c(\text{In-situ})$ 의 두 변수에 대한 $C_c(\text{In-situ})$ 의 예측은 식(5.3)에 의해 가능하다.

제6장 분석 및 고찰

해안매립지역의 흙은 토립자와 물과 공기가 함유된 간극으로 구성된다. 토립자에 작용하는 힘 즉, 유효응력(effective stress)은 토립자의 접촉면을 통한 응력이며, 이 응력은 롤링(rolling), 슬라이딩(sliding), 인터락킹(interlocking)이 일어나서 구조적으로 재배열하여 흙의 유효응력이 증가한다.

Terzaghi의 유효응력의 변화는 $\sigma' = \sigma - u$ 로서 필수적으로 간극수압의 변화 없이도 유효응력이 변화하지 않는다. 비온 후 땅이 굳는다는 속담처럼 물의 하향침투 또는 상재하중증가는 지반을 파괴하고 토립자를 운반하고 퇴적시키며 종국에는 토립자의 접촉면에 유효응력을 증가시키는 원인으로 작용하여 왔다.

해안매립지역인 영산강 하구언지역과 영종도지역의 조수간만차, 특히 간조시의 유효응력증가량에 대한 계측에서의 과압밀하중결과와 FEM해석에 의한 역해석을 수행하였으며, 각 영향인자에 대한 상관분석법으로 일원배치법을 이용하여 분석하였다.

6.1 조위변화와 퇴적환경에 따른 지반특성

우리나라 서해안은 침수해안(submerged coasts)으로 크고 작은 규모의 만(bay)을 가진 해안 지형모습을 보이며, 이와 같은 지형모습을 리아형(Ria type)해안이라 하는데, 이것은 스페인 서북부 해안의 리아(Ria)지방의 지명에서 유래하였다.

인천에서 목포에 이르는 전체적인 해안·연근해에서의 조차(tidal range)는 평균 4.0m 이상이며 이러한 대조차 해안(macrotidal regime)에서 발달하는 전형적인 연근해안 지형이다. 이러한 서해안의 특징적인 퇴적환경은 밀물과 썰물의 주기적 해수면 상하운동에 지배되는 조수환경(tidal environment)이다.

그림 6.1은 서해안지역의 퇴적환경을 나타낸 것이다.

조간대는 평균고조선(M.H.W.L : mean high water level)과 평균저조선(M.L.W.L : mean low water level)사이 에 위치하는 매우 완만한 경사의 퇴적환경이며, 퇴적물의 특징은 실트질모래(Silty sand), 점토질실트(Clay silt), 실트질점토(Silty Clay) 등이 퇴적되어 있다.

영산강 하구언지역과 영종도지역은 조간대 환경으로써 평균 만조수위(M.H.W.L)와 평균간조수위(M.L.W.L)사이의 공간이다.

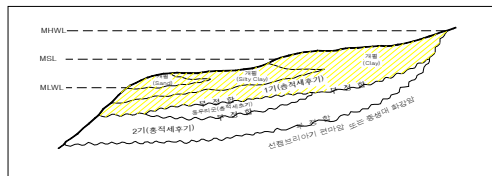


그림 6.1 한국 서해안의 중요조수퇴적분지 퇴적체의 제4기후기 층서단위와 부정합(층서)

제5장의 그림 5.1에서 영산강 하구언지역의 연약지반 지반고는 평균기준면(E.L)기준으로 $-0.32\text{m} \sim 3.18\text{m}$ 이므로 간조위시 해수면위로 지표면이 노출됨으로 인한 유효상재하중증가량은 1, 2구역에서 2.79 tf/m^2 , 3, 4구역에서 3.58 tf/m^2 이며 1회당 지속시간은 6시간 22분에서 7시간 21분으로 관측되었다.

그림 5.2에서 영종도지역의 연약지반 지반고는 $0.5 \sim 0.9\text{m}$ 의 범위이며 평균 0.77m 이다. 영종도지역의 해수면의 변동은 $-3.81 \sim 5.97\text{m}$ 이므로 간조위시 유효상재하중 증가량은 최대 5.97 tf/m^2 이며 지속시간은 6시간 13분에서 6시간 17분으로 관측되었다.

즉, 사례지역인 영산강 하구언지역과 영종도지역의 점토지반은 조위변화에 의하여 2.79~5.97 tf/m²의 유효상재하중증가가 야기되었으며, 이는 지반의 과압밀현상을 초래하여 상부의 인위적인 하중증가로 발생예상되는 침하량을 감소시키는 결과를 나타낸다.

6.2 유효응력

6.2.1 영산강 하구언지역

6.1절에서 분석한 것과 같이 영산강 하구언지역은 해안매립지역으로 조위에 의한 유효응력증가량이 최대 3.58 tf/m²로 나타났다.

현장계측값을 도시하여 분석한 결과, 영산강 하구언지역에서는 유효응력증가량이 상부지층에서 최대 5.0 tf/m² (평균 4.05 tf/m²)로 나타나며, 심도가 깊어질수록 점점 증가되는 경향을 보이거나 그 비율은 감소하는 경향을 보였다. 이는 상재하중이 차후에 일차적으로 작용하며 심도가 깊어질수록 그 영향이 작아지는 경향을 보였다. 순과압밀하중(OCD)을 보면, 영산강 하구언지역에 가해진 유효응력증가량과 유사한 값의 분포를 보이며, 심도가 깊어질수록 다소 증가하나 거의 현장계측값에 의한 유효응력증가량과 비슷한 평균값을 보였다.

현장계측자료에 의해 재산정된 지반정수를 토대로 유한요소해석을 수행하여 실제 현장계측결과와 비교함으로써 조석에 의한 유효상재하중의 증가현상을 규명하고자 하였다. 해석에 사용된 요소망은 간극수압측정이 가능한 8절점 사각형요소를 사용하였으며, 조석에 의한 유효응력증가현상을 구현하기 위해 영산강 하구언지역에는 4.05 tf/m²의 하중을 지속적으로 작용시켰다. 또한 조석의 특성을 반영하여 유효응력증가현상이 발생하는 시간을 1일 3600sec, 즉 1시간으로 가정하여 1000년간 반복지속시켰다.

조석에 의한 유효응력증가에 따른 침하량은 영산강 하구언지역의 경우 조위차의 1/4 (약 1.0m)로 나타났다. 또한, 조위차에 의한 침하현상이 완료되는

시점 즉, 압밀도변화의 경우 연약층후가 상대적으로 깊은 영산강 하구언지역이 약 1,000년이상 경과해야 압밀도 90%이상을 만족시키는 것으로 나타났다. 조석에 의한 유효응력증가로 인해 설계당시보다 과압밀영역의 범위가 설계당시 4.0m에서 약 12.0m로 약 3배 정도 늘어났다.

6.2.2 영종도지역

6.1절에서 분석한 것과 같이 영종도지역은 해안매립지역으로 조위에 의한 유효응력증가량이 5.97 tf/m^2 로 나타났다.

현장계측값을 도시하여 분석한 결과, 유효응력증가량이 최대 11.4 tf/m^2 (평균 7.0 tf/m^2)로 다소 크게 나오며 심도가 깊어질수록 선행압밀하중은 작아지는 경향을 보인다. 이또한 영산강 하구언지역과 동일한 현상으로 조석차에 의한 유효상재하중이 심도가 낮은 구역에 먼저 작용하고 심도가 깊어질수록 작용하는 시간이 길어져서 생기는 현상이라 할 수 있다.

영산강 하구언지역과 마찬가지로 유효응력증가량을 순과압밀하중(OCD)과 비교할 때, 조위에 의한 유효응력증가량이 계측결과자료분석에 의한 순과압밀하중보다 다소 작게 나오나 이는 지난 2,000년간 꾸준한 해수면 상승과 점토지반의 Aging effect로 판단된다.

현장계측자료에 의해 재산정된 지반정수를 토대로 유한요소해석을 수행하여 실제 현장계측결과와 비교함으로써 조석에 의한 유효상재하중의 증가현상을 규명하고자 하였다. 해석에 사용된 요소망은 간극수압측정이 가능한 8절점 사각형요소를 사용하였으며, 조석에 의한 유효응력증가현상을 구현하기 위해 영종도지역에는 10.0 tf/m^2 의 하중을 지속적으로 작용시켰다. 또한 조석의 특성을 반영하여 유효응력증가현상이 발생하는 시간을 1일 3600sec, 즉 1시간으로 가정하여 1000년간 반복지속시켰다.

조석에 의한 유효응력증가에 따른 침하량은 영종도지역의 경우 조위차의 1/3 (약 1.8m)로 나타났다. 또한 조위차에 의한 침하현상이 완료되는 시점 즉, 압밀도변화의 경우 연약층후가 얇은 영종도지역이 약 200년이상 경과해야 압밀도 90%이상을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 조석에 의한 유효응력증가로 인해 설계당시보다 과압밀영역의 범위가 4.0m에서 15.0m로 약 4

배 정도 늘어났다.

6.2.3 결과분석

현장계측자료와 유한요소해석결과를 분석한 결과, 영산강 하구언지역과 영종도지역 모두 조석에 의한 유효응력증가량을 상회하는 재하성토의 경우에 지반이 급격히 침하하는 경향을 현장계측자료 및 유한요소해석에서 동일하게 나타냈다.

성토고 7.0m의 동일조건에서 영산강 하구언지역이 영종도지역보다 과잉간극수압이 크게 나타나며, 이는 영종도지역이 조위차가 상대적으로 큼으로써 과거 더 큰 유효응력을 받았음을 의미한다.

또한, 현상적인 면에서 다소간의 유효응력증가량에 있어서 차이가 발생하나 이는 지난 2,000년간 꾸준한 해수면 상승과 점토지반의 Aging effect로 판단된다.

6.3 압축특성

6.3.1 영산강 하구언지역

제3장에서 본 바와같이 영산강 하구언지역의 압축지수(C_c)는 상부지층에서 계측결과값이 다소 크게 나타나나 심도가 깊어질수록 실내시험과 계측결과가 동일한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다.

압축지수(C_c)가 거의 동일하다는 것은 근본적으로 동일한 압밀특성을 보이기 때문이며, 압밀침하량평가지 선형압밀하중평가가 더욱 중요함을 의미한다.

또한, 재압축지수(C_r)의 경우도 평균값에서는 계측결과가 다소 높은 값을 보이나, 압축지수와 유사하게 실내시험결과와 현장계측자료에 의한 재산정값이 동일한 경향을 나타내었다.

유한요소해석에서의 압축지수(C_c)는 Cam-Clay 압축지수(λ)로, 재압축지수

(C_r)는 Cam-Clay 재압축지수(κ)로 나타낼 수 있다. 표 5.4에서 보는 바와 같이 심도가 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보였다. 영산강 하구언지역의 경우, Cam-Clay 압축지수(λ)값은 0.24~0.33으로 표준압밀시험의 e-logP곡선의 압축지수(C_c)로 환산시 0.55~0.76이며, Cam-Clay 재압축지수(κ)값은 0.03 ~0.04로 표준압밀시험의 재압축지수(C_r)값으로 변환시 0.069~0.092의 분포를 나타낸다. 여기서 변환된 재압축지수가 압축지수의 1/8정도의 분포를 보이므로 과압밀점으로 해석되었다.

6.3.2 영종도지역

영종도지역의 압축지수(C_c)는 영산강 하구언지역과 마찬가지로 상부지층에서 실내시험값이 평균 0.380, 계측결과값이 0.475로 다소 차이를 보이긴 하나 심도가 깊어질수록 실내시험과 계측결과가 비슷한 경향을 보이고 있다.

지층전체적으로 볼 때, 압축지수(C_c)가 거의 동일하다는 것은 근본적으로 동일한 압밀 특성을 보이기 때문이며, 압밀침하량평가시 선행압밀하중평가가 더욱 중요함을 의미한다.

또한, 재압축지수(C_r)의 경우도 압축지수와 같이 평균값에서는 계측결과가 다소 높은 값을 보였으며, 심도가 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다.

유한요소해석에서의 압축지수(C_c)는 Cam-Clay 압축지수(λ)로, 재압축지수(C_r)는 Cam-Clay 재압축지수(κ)로 나타낼 수 있다. 표 5.6에서 보는 바와 같이 심도가 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보였다. Cam-Clay 압축지수(λ)값 0.19~0.30으로 표준압밀시험의 e-logP곡선의 압축지수(C_c)로 환산시 0.44~0.69이며, Cam-Clay 재압축지수(κ)값은 0.0217~0.052로 표준압밀시험의 재압축지수(C_r)값으로 변환시 0.05~0.012의 분포를 나타낸다. 영산강 하구언지역과 마찬가지로 변환된 재압축지수가 압축지수의 1/8정도인 과압밀점으로 해석되었다.

6.3.3 결과분석

종합적으로 볼 때, 실내시험과 계측결과값은 상부지층에서 다소 차이를 보

이나 거의 비슷한 값을 보였으며, 유한요소해석값에 의한 압축지수와 재압축 지수가 더 작게 나타나기는 하나 심도가 깊어질수록 감소하는 경향은 동일하게 나타났다.

6.4 선행압밀하중

6.4.1 영산강 하구언지역

선행압밀하중과 연직유효응력의 차이인 순과압밀하중(OCD)의 범위는 $-0.99 \sim 1.05 \text{ kgf/cm}^2$ 사이에 분포하며 평균 0.2 kgf/cm^2 로 깊이가 깊어질수록 감소하는 양상을 나타내고 있다. 또한, 추세선으로 파악할 때 전체적으로 $0.17 \sim 0.41 \text{ kgf/cm}^2$ (평균 0.3 kgf/cm^2)의 순과압밀하중이 작용하는 것을 나타났다. 즉 조석변화에 의한 하중증가현상이 발생했음을 알 수 있다. 조석과 계측자료의 분석결과를 보면, 해수면 하강에 의한 유효상재하중증가량은 약 $0.052 \sim 0.358 \text{ kgf/cm}^2$ 였으나, 계측자료분석결과 연약층후 전반에 0.5 kgf/cm^2 내외 (평균 0.405 kgf/cm^2)의 선행압밀하중이 작용하는 것으로 나타났다.

계측 및 FEM해석에 따른 침하량은 성토고 4.0m이하에서는 계측결과가 11.3cm이며, FEM해석값은 15.6cm이다. 현장 성토고 7.0m이상 축조시 성토하중이 선행압밀하중(약 5.0 tf/m^2)을 상회하므로 지반은 급격히 침하된다.

유한요소해석에 의한 선행압밀하중 검토결과, 영산강 하구언지역의 경우 49.05 KN/m^2 으로서 수위차로 환산할 경우 약 5.0m로 분석되어졌다.

6.4.2 영종도지역

영종도지역의 경우에도 영산강 하구언지역과 비슷한 경향을 보이며, 일반적인 지반내 유효응력보다 높은 선행압밀하중값을 나타내나 영산강 하구언지역과 평균값은 0.3 kgf/cm^2 으로 비슷하나 편차가 크게 분포함을 알 수 있었다. 계측자료분석결과를 보면, 연약층후 전반에 1.0 kgf/cm^2 내외(평균 0.7

kgf/cm²)의 선행압밀하중이 작용하는 것으로 나타났다.

계측 및 FEM해석에 따른 침하량은 선행압밀하중이 7.0 tf/m²으로 비교적 크고 연약층후가 10.0m 이내로 비교적 작은 관계로 -22.0 cm내외의 작은 값을 보인다.

성토하중은 현재 과압밀영역의 경계에 있으므로 현장발생과잉간극수압과 유한요소해석 모두 7.0m 성토시에도 6.0 tf/m²이하로 성토하중의 50%이하가 과잉간극수압이 발생하고 있다. 이는 영산강 하구언지역의 12.0 tf/m²보다도 매우 작은 값으로 영종도지역이 영산강 하구언지역보다 매우 큰 선행압밀하중을 받았었음을 의미한다.

유한요소해석에 따른 선행압밀하중값은 129.5 KN/m²으로서 수위차로 환산할 경우 약 13.0m로 분석되었다.

6.4.3 결과분석

종합적으로 볼 때, 계측자료분석 및 유한요소해석에 의한 선행압밀하중값은 영산강 하구언지역의 경우 비슷하나 영종도지역의 경우 유한요소해석값이 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 점토지반에 대한 조위차의 영향이 매우 크게 작용함을 알 수 있었다.

또한, 조석에 의한 유효응력보다 지반의 실제 선행압밀하중이 큰 이유는 지난 2,000년간 꾸준한 해수면 상승과 점토지반의 Aging effect로 판단된다.

6.5 상관성 분석

그림 6.2는 조위차에 따른 선행압밀하중의 증가를 보여주는 것으로 조위차와 선행압밀하중과의 상관식은 다음 식(6.1)과 같다.

$$P_c = 1.4273 \times h^{1.1556} \quad (6.1)$$

여기서, h : 조위차 (m)

P_c : 선행압밀하중 (tf/m²)

조위차에 의한 선행압밀하중의 증가량이 더 많은데 그 이유는 조위간만차가 클수록 연약지반이 해수면위로 노출되는 시간이 증가하며, 이로 인해 사례지역인 영산강 하구언지역과 영종도지역의 해수면이 과거로부터 꾸준히 상승하여 나타난 결과이다.

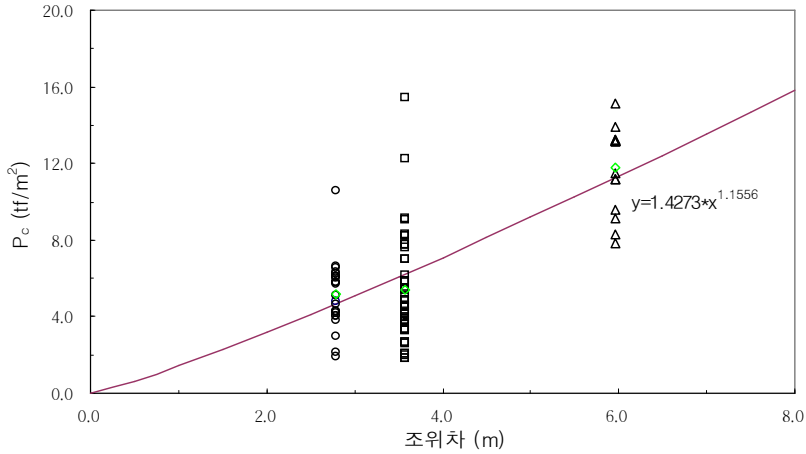


그림 6.2 선행압밀하중과 조위간만차에 의한 상관곡선

또한, 영산강 하구언지역 및 영종도지역에 대한 계측자료로 계산정된 C_c , P_c , OCR에 대한 상호간의 상관관계를 분석하기 위해 일원배치법을 통한 통계 기법이 적용되었다.

먼저 각 인자간의 분포경향을 보면, 대체로 정규분포를 보이지 않으나 영산강 하구언지역의 P_c 의 경우 정규분포를 따른다.

분산분석을 실시한 결과를 보면, 영산강 하구언지역의 경우 C_c 와 P_c 또는 OCR과의 상관성이 낮게 나왔으며, 영종도지역도 동일한 결과를 얻었다.

두 사례지역에 대한 Minitab의 분석결과에 의하여 C_c , P_c , OCR간의 상관식을 구성하면 다음과 같으며, 영산강 하구언지역의 경우 상수항, 영종도지역의 경우 상수항과 P_c 항이 현장 C_c 모집단의 평균값에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

$$\text{영산강 하구언지역} : C_c = 0.125 + 0.914\text{Log}(\text{OCR}) + 0.283P_c \quad (5.2)$$

$$\text{영종도지역} : C_c = 0.147 + 0.337\text{Log}(\text{OCR}) + 0.178P_c \quad (5.3)$$

제7장 결 론

설계시 적용하는 실내시험은 응력조건이 변화, 시험오차 등의 여러 가지 불확실한 요인을 내포하고 있어 실제 현장에서는 계측관리를 통하여 얻은 결과로 예상치 못했던 제반조건들을 보정하고 재해석을 하여 활용하고 있다.

본 연구는 현장계측자료에 대한 재해석방법 중 합리적인 접근모색을 위하여 영산강하구언지역과 영종도지역의 현장계측 및 실내시험자료를 이용하여 각각의 압밀곡선을 분석하고 각 영향인자들의 상관관계를 규명하고 이들 영향인자에 대하여 일원배치법을 이용한 통계분석을 수행하였으며, 조수간만차 즉 간조시의 습윤단위중량으로 인한 상재하중이 작용하는 점과 만조시 상부로 지하수위가 형성되는 조건을 고려하여 유한요소해석을 실시한 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현장계측결과에 의한 침하량을 간극비로 전환한 e -logP곡선에서 기존설계에 비해 심도전체에 걸쳐 과압밀현상이 나타났다. 이는 시료채취시의 응력해방으로 인한 선행압밀하중의 상실이 원인이며, 특히 심도가 깊을수록 응력해방값이 커지고 심도 10m이하의 점토층에서는 정규압밀점토의 특성을 나타내었다.
2. 압축지수 및 재압축지수는 실내시험치와 거의 동일한 값을 보이므로 향후 실내시험 값 적용시 선행압밀 하중은 심도 4.0m의 부근의 값을 선행압밀 하중의 대표적인 값으로 선정함이 타당한 것으로 나타났다.
3. 조수간만차에 의한 간조위시 상재하중변화가 과압밀하중의 주요요인이므로 항상 상부에서 하부로 가면서 선행압밀하중은 적어진다. 또한 조수간만에 의한 하중은 항상 연약지반 상부에서부터 과잉간극수압의 소산을 유발하므로 지층의 심부로 갈수록 과압밀영역은 비선형의 형태로 실내시험에 서와 같이 감소됨을 알 수 있었다.

4. 선행압밀하중과 지중응력을 제한 순과압밀하중(OCD)은 최대조위면과 지반 고의 차와 거의 유사한 값을 보이며, 최상부의 지층의 경우 선행압밀하중과 조위차에 의한 상재하중변화가 같게 나타났으며, 조수간만차가 증가함에 따라 선행압밀하중이 비선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.
5. 조수위가 간조위에 다다를 때의 하향침투압을 적용하여 유한요소해석을 수행한 결과, 투수계수가 매우 작은 점토층에서 수압파쇄현상으로 인하여 안정적인 압밀현상이 나타나지 않았다. 또다른 방법으로 간조위시 상재하중의 변화, 즉 조수위면 상부토층이 수중상태에서 습윤상태로 변화됨으로 인한 하중변화조건으로 해석을 수행한 결과 예측결과에 따른 과압밀현상과 유사한 침하거동을 보였다.
6. 일원배치법에 의한 압축특성인자간의 상관관계분석결과, 압축지수에 대한 선행압밀하중과 과압밀비의 상관성은 매우 낮게 나타났으나, 상대적으로 선행압밀하중이 압축지수의 평균값에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
7. 조위차에 의한 선행압밀하중의 증가량이 많은 것은 조위간만차가 클수록 연약지반이 해수면위로 노출되는 시간이 증가되어 오랫동안 해수면이 상승되는 것으로 규명되었고, 조위차에 의한 선행압밀하중의 상관관계식은 $P_c = 1.4273 \times h^{1.1556}$ 인 것으로 나타났다.

해안지역의 매립공사에서는 실내시험을 적용하여 설계하고 있으나 현장계측을 통해 분석한 자료를 활용하여 공학적이고 경제적인 시공이 될 수 있도록 시행되어야 하며, 본 연구결과에서와 같이 영산강하구언매립공사와 영종도 인천국제공항건설공사에서 적용한 것처럼 현장시공시 계측을 통하여 성토고별로 일정한 기간의 침하를 측정하고 이를 통한 현장 압밀특성의 규명이 가장 이상적이므로 시공초기부터 현장시험시공을 시행하는 것이 바람직할 것으로 본다.

참 고 문 헌

1. 강예목 외 5인(1993), “新制 干拓工學”, 향문사, pp.33~67.
2. 강종범 · 이봉직(2003), “불포화 점성토의 압밀 및 전단특성”, 대한토목학회논문집 제23권 제5C호 2003년 9월, pp.289~298.
3. 국립해양조사원 조석예보 및 기본수준점성과표.
4. 김규중(1998). “낙동강 하구의 초연약 점토에 대한 압밀특성 및 성토재하에 따른 압밀거동”, 석사학위논문. 동아대학교.
5. 김상규(1998), “土質力學 - 理論과 應用”, 청문각, pp.128~130.
6. 김수삼 · 김병일 · 한상재(2002), “과압밀점토의 미소변형 전단강성에 응력이력과 시간이력이 미치는 영향”, 대한토목학회논문집 제22권 제5-C호 2002년 9월, pp.507~516.
7. 김영남 · 이강일(1996), “연직배수공법”, 한국지반공학회 연약지반처리위원회 현지세미나 자료집.
8. 김주형(2002), “영종도 점성토 지반의 공학적 특성 분석 및 현장시험 적용성 연구”, 서울대 대학원 박사학위논문.
9. 김형주(2001), “시험성토에 의한 다차원 압밀특성”, 대한토목학회논문집 제21권 제4-C호 2001년 7월, pp.367~374.
10. 대한지질학회, “한국의 지질”, 시그마프레스, 1998, pp.621~695.
11. 박종오 · 송무영 · 박충화(2006), “서해안 매립지 내 지하수유동과 조석에 관한 상관성 분석”, 대한지질공학회 제16권 제3호 통권 제49호 (2006. 9), pp.293~300.
12. 사단법인 한국지반공학회, “연약지반”, 지반공학시리즈 6, pp.128~131.
13. 심태섭 · 김선학 · 신태욱 · 성경화(2003), “성토재하에 따른 연약지반의 거동양상”, 조선대학교건설기술연구소 건설기술연구(제23-1집) (2003. 12), pp.1~22.
14. 심태섭 · 김선학 · 신태욱 · 이광모(2004), “강우시 불포화 토사사면의 간극수압 변화 특성”, 조선대학교건설기술연구소 건설기술연구(제24-1집)

- (2004. 12), pp.23~45.
15. 심태섭 · 김선학 · 신태욱 · 최용준(2004), “집중강우시 무한사면의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구”, 조선대학교건설기술연구소 건설기술연구(제24-1집) (2004. 12), pp.1~22.
 16. 연약지반의 압밀특성에 관한 연구 I, 한국토지공사, 1999, pp.9~209.
 17. 연약지반의 압밀특성에 관한 연구 II, 한국토지공사, 1999, pp.690~727.
 18. 유남재 · 박병수 · 김근수(2002), “고함수비 준설매립토의 구성관계획득을 위한 역해석기법”, 대한토목학회논문집 제22권 제1-C호 2002년 1월, pp.21~31.
 19. 윤충섭 외 6인(1994), “토질역학”, 건국대학교 출판부, pp.115~149.
 20. 이송 외 2인(2002), “이론토질역학”, 예문사, pp.214~224.
 21. 이홍길(2006), “해안매립지 굴착지역의 불포화 함수특성에 의한 침투거동”, 충북대 대학원 박사학위논문.
 22. 장진호 · 박용안 · 한상준(1996), “한국 서해안 곶소만 조간대의 제4기 층서와 해수면 변화”, 한국해양학회지 ‘바다’ 1,2(’96.10), pp.59~72.
 23. 정성교(1999a), “낙동강 하구점토의 압밀특성”, 연약점토지반에 관한 국제 심포지움, 동아대학교 건설기술연구소.
 24. 정성교 · 백승훈 · 김규중 · 이대명(1999b), “낙동강 삼각주에서 선행하중에 따른 침하예측 및 현장계측”, 한국지반공학회논문집 제15권 제5호 1999. 10., pp.99~110.
 25. 정승용 · 한상재 · 김수삼(2003), “자중과 점성을 고려한 수치해석기법에 의한 압밀특성 분석”, 대한토목학회논문집 제23권 제5C호 2003년 9월, pp.265~271.
 26. 조기영 · 정성교(1999), “연직배수공이 설치된 연약지반의 2차원 등가모형에 대한 비교연구 II”, 동아대학교 공과대학건설기술연구소 研究論文集 22,2(’99.2), pp.65~76.
 27. 조성민(1998), “국내 연약점성토지반의 성토 재하시 변형특성분석”, 서울대 대학원 박사학위논문.
 28. 星野 和(Hoshino)(1962), “最新にあける基礎の諸問題.” 土質學會第17回年次學術, 日本土木學會, 1962.7, pp.63~67.

29. Asaoka, A.(1978), "Observational procedure of settlement prediction", Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.87~101.
30. Balasbramanium, A. S. and Brenner, E. W.(1981). "Consolidation and settlement of soft clay", soft Clay Engineering, Elsevier, pp.479~566.
31. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of fine-grained soils by Drain Wells", Transaction ASCE, Vol. 113, Paper No.2346, pp.718~754.
32. Biot, M. A.(1958). "General theory of three-dimensional consolidation", Journal of Applied Physics, Vol. 12, pp.155~164.
33. Byung-Kee Park, Jin-Seob Jeong, Moon-Soo Lee, Jae-Hyeon Lee, Jae-Seong Jeong, Young-Min Jeong(1994), "A Case Analysis on the Displacement of Soft Foundation - Kwangyang Industrial Highway", KGS Spring '94 National Conference, pp.43~57.
34. Casagrande(1936), "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance", 1st ICSMFE, Vol.3, pp.60~64.
35. Chung-Rak Song, Seung-Hoon Paek, Da-Young Oh(1992), "Assesment of Consolidation Characteristics by Field Instrumentation", KGS Fall '92 National Conference, pp.121~130.
36. Duncan, J. M., Chang, C. Y.(1970), "Nonlinear analysis of stress and strain in soil", J. Geotech. Eng'g., ASCE, Vol.96, No.SM5, pp.1629~1653.
37. Hansbo, S.(1979), "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains", Ground Engineering. Vol.12, No.5, July, pp.16~25.
38. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", Proc. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, Vol.3, pp.677~682.
39. Ho-Kwang Choi, Dae-Myeong Lee, Seung-Hoon Baek, Sung-Gyo Chung(1997), "A New Observational Method and Its Application", KGS Fall '97 National Conference, pp.37~47.
40. Hvorslev, M. J., "Physical Properties of Remolded Cohesive Soils", Transl., 69-5, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Exp. Stn.,

Vicksburg, Miss., June.

41. Janbu N.(1963), "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and T Tests", European Conference on soil Mechanics and Foundation Eng., Wissbaden, Germany, Vol. 1. pp.19~25.
42. Jung-Yoon Won and Pyeong-Wook Chang(2007), "The causes of apparent overconsolidation in the Namak marine deposit, Korea", *Geotechnique* 57, No.4, pp.355~369.
43. K. Ganapathi Rao(2005), "Comprehensive experimental investigation for geotechnical characteristics of Pusan clay in the west coast of the Nakdong river estuary", PhD thesis, Dong-A University, Busan, Korea.
44. Konder R. I.(1963), "Hyperbolic Stress-Strain Response : Cohesive Soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 89, No. SM1., page.1143.
45. Lowe, III, J.(1971), "New concepts in Consolidation and Settlement Analysis", Terzaghi Lecture(8th), ASCE, pp.340~377.
46. NAVFAC(1982), "Design Manual 7.1-soil Mechanics", NAVFAC DM 7.1, U.S Department of Navy, Washington D.C..
47. Onoue, A.(1988a), "Consolidation of Multilayered Anisotropic Soils by Vertical Drains with Well Resistance", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.75~90.
48. Onoue, A.(1988b), "Consolidation of Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165~174.
49. Rendulic, L.(1935), "Der Hydrodynamische Spannungsausgleich in Zentral Entwasserten Tonzylindern", *Wasserwirtsch. Univ. Tech.*, Vol.2, pp.250~253.
50. Roscoe K. H., Burland J. B.(1968), "On the Generalized Stress-Strain Behaviour of Wet Clay", *Engineering Plasticity*, Heyman J. and F. A. Leckie(Eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp.535~609.
51. SAGE(1995), "SAGE CRISP : Users guide and technical reference

- guide”, SAGE Engineering Ltd.
52. Schmertmann J. M.(1955), “The undisturbed consolidation behavior of clay”, Transaction of ASCE, Vol.120, pp.1201~1211.
 53. Schmertmann, J. M.(1953), “Estimating the true consolidation behaviour of clay from Laboratory test results”, Transaction of ASCE, Vol.118, pp.311-1~311-25.
 54. Schofield, A. N., and Wroth, C. P.(1968), “Critical State Soil Mechanics”, McGraw-Hill.
 55. Skempton, A. W. and Bjerrum, L.(1975), “A Contribution to the Settlement Analysis of Foundation on Clay”, Geotechnique, Vol.7, No.4, pp.168~178.
 56. Soo-Sam Kim, Seung-Yong Jung, Myung-Woon Ahn, Hyng-Nam Kim(1995), “The Case Study of Piezocone Test and Its Application in South Korea”, KGS Spring '95 National Conference, pp.121~128.
 57. Sung-Joon Kim, You-Seok Kim, Joong-Bai Park, Han-Jung Jeong, Sung-Woon Kim(1997), “A Case Study on Settlement Predictions of Hyperbolic Method for Initial Measurement Period”, KGS Spring '97 National Conference, pp.117~122.
 58. Tan, S. B.(1971). “An empirical method of estimating secondary and total settlement”, Proceeding of 4th ACSMFE, Bangkok, Vol.2, pp.147~151.
 59. Tan, T. S. et al(1991), “Hyperbolic method for consolidation analysis”, JGE, ASCE, Vol. 117, Np.11 pp.1723~1737.
 60. Tan, S. A.(1995). “Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains”, Soils and Foundations, JASSMFE, Vol.35, No.1, pp.101~113.
 61. Tan, S. A. and Chew S. H.(1996). “Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains”, Soils and Foundations, JGS, Vol. 36, No. 3, pp.31~42.
 62. Terzaghi, K.(1954). “Theoretical Soil Mechanics”, McGraw Hill,

pp.265~296.

63. Ursell, F.(1951), "Trapping Modes in the Theory of Surface Waves", Proc. Cambridge Philos. Soc., Vol.47, pp.347~358.
64. Yoshikuni, H and Nakanodo, H.(1974), "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", Soils and Foundation, Vol.14, No.2, pp.35~46.
65. Young-Nam Lee, H. J. Lee, D. H. Shim(1992), "Ground Treatment case history for Soft Clay layer and Evaluation of Its Improvement", KGS Fall '92 National Conference, pp.113~120.
66. Yung-Mook Na, Jeong-Su Han, Eui Hong, Dong-Hyun Shim(1998), "Improvement and Evaluation of Soft Ground In Large Reclamation Project", KGS Fall '98 National Conference, pp.405~412.

국문 초록

퇴적점토지반에서 조석변화와 선행압밀하중의 상관성분석

설계 반영된 Terzaghi의 일차원압밀이론의 한계성, 즉 현장계측결과에 의한 침하량과 실내시험결과로 얻은 압밀도에 의한 이론침하량과의 차이극복과 실제 현장에서 예견되거나 발생하는 제반문제점들을 도출하여 연약지반설계에 있어서 보다 합리적인 접근방법을 모색하기 위해 연구되었다.

이를 위해 연구대상지역으로 영산강하구언지역과 영종도지역을 선정하여 각각의 지역에 대한 조석 및 지형자료의 분석을 통한 하향침투압에 따른 유효응력변화와 실내시험을 분석한 자료를 토대로 수정Cam-Clay모델조건에서의 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 현장계측자료와 실내시험결과에 대하여 분석한 결과를 토대로 일원배치법을 이용한 상관관계를 분석하였다.

연구대상지역에 대한 현장계측자료를 분석한 결과와 조석에 따른 조위차로 인해 발생한 과압밀하중의 상관관계를 규명한 결과는 다음과 같다.

첫째, 현장계측결과에 의한 침하량을 간극비로 전환한 e - $\log P$ 곡선에서 기존설계에 비해 심도전체에 걸쳐 과압밀현상이 나타났다. 이는 시료채취시의 응력해방으로 인한 선행압밀하중의 상실이 원인이며, 특히 심도가 깊을수록 응력해방값이 커지고 심도 10m이하의 점토층에서는 정규압밀점토의 특성을 나타내었다.

둘째, 조수간만차에 의한 간조위시 상재하중변화가 과압밀하중의 주요요인 이므로 항상 상부에서 하부로 가면서 선행압밀하중은 적어진다. 또한 조수간만에 의한 하중은 항상 연약지반 상부에서부터 과잉간극수압의 소산을 유발하므로 지층의 심부로 갈수록 과압밀영역은 비선형의 형태로 실

내시험에서와 같이 감소됨을 알 수 있었다. 또한, 순과압밀하중(OCD)은 최대조위면과 지반고의 차와 거의 유사한 값을 보이며, 최상부지층의 경우 선행압밀하중과 조위차에 의한 상재하중변화가 동일하게 나타나는 결과를 얻었다.

셋째, 조수위가 간조위에 다다를 때의 하향침투압을 적용하여 유한요소해석을 수행한 결과, 투수계수가 매우 작은 점토층에서 수압파쇄현상으로 인하여 안정적인 압밀현상이 나타나지 않았다. 또다른 방법으로 간조위시 상재하중의 변화, 즉 조수위면 상부토층이 수중상태에서 습윤상태로 변화됨에 따른 하중변화를 해석조건으로 고려하여 수행한 결과 계측결과에 따른 과압밀현상과 유사한 침하거동을 보였다.

주요어 : 조석운동, 파랑이론, 평균해수면(MSL), 현장계측, 과압밀비(OCR), 순과압밀하중(OCD), 일원배치법

감사의 글

오늘날의 결실을 맺기까지 학부과정 4년, 석사과정 2년, 박사과정 5년의 총 11년은 참으로 오랜 기간이었습니다. 그 기간만큼이나 주위분들로부터 받은 커다란 사랑과 은혜를 평생 소중히 간직하겠습니다.

대학원생활의 시작부터 지금까지 내내 지켜봐 주시고, 좋은 마무리를 할 수 있도록 끝까지 지도편달을 아끼지 않으신 심태섭 지도교수님께 충심으로 감사를 드립니다. 본 논문이 완성되기까지 밝은 해안으로 냉철한 가르침을 주신 안종필 교수님, 오재화 교수님, 박길현 교수님과 정년퇴임을 목전에 두고도 좋은 경험과 자상한 가르침을 끝까지 베풀어 주신 정영동 교수님께 다시 한번 감사의 인사를 올립니다.

대학원을 입학한 후로부터 지금까지 큰 관심과 사랑으로 이끌어 주신 김운중 교수님, 박정웅 교수님, 그리고 작년에 정년퇴임하시기까지 지도를 아끼지 않으셨던 김영인 교수님과 해외교환교수로 가신 김성홍 교수님께도 감사를 드립니다. 또한, 이 순간 머릿속을 스쳐가는 동고동락했던 많은 선배님 및 후배님들에게 앞으로 살아가면서 더욱 좋은 모습으로 보여질 것을 다짐하며 감사의 인사를 대신하고자 합니다.

대학원 재학 생활 동안 음으로 양으로 지켜봐 주신 전라남도도청 복구지원과 홍석태 과장님을 비롯하여 많은 직원들, 특히 방재계 소속인 최인규, 정운수, 이창근, 박재성, 김춘심 및 다른 도청 직원, 남악신도시 연약지반계측용역단 직원 여러분들께도 감사를 드립니다.

끝으로 많은 어려움도 참고 인내하며 헌신적인 사랑으로 내조해온 아내 최미순에게 고마움을 전하고 아울러 사랑하는 아들 정호, 연석이와도 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

2007년 8월

