



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](#)

2014年 8月
석사학위논문

신뢰성 기법에 의한 연약지반의
압밀 및 침하해석

조선대학교대학원

토목공학과

안현민

신뢰성 기법에 의한 연약지반의 압밀 및 침하해석

Consolidation and settlement of soft ground based on reliability analysis

2014년 8월 25일

조선대학교대학원

토목공학과

안현민

신뢰성 기법에 의한 연약지반의 압밀 및 침하해석

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 4월

조 선 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

안 현 민

안현민의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김운중 (인) 

위원 조선대학교 교수 박영웅 (인) 

위원 조선대학교 교수 김대현 (인) 

2014 년 5 월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서론

제1절 연구배경 및 목적	1
1. 연구배경	1
2. 연구의 필요성	2
3. 연구동향	2
4. 연구의 목적 및 범위	3

제 2 장 관련 이론 및 문헌 연구

제1절 흠의 압밀론	7
1. 압밀현상	7
2. 압밀시험	8
제2절 신뢰성 설계 방법	33
1. 신뢰성의 개념	33
2. 신뢰성지수	34
3. Level 1의 신뢰성 설계법	37
4. Level 2의 신뢰성 설계법	39
5. Level 3의 신뢰성 설계법	40
6. 일계-이계 신뢰분석법 및 Monte Carlo Simulation	41
7. 민감도 측정	43
8. 신뢰성해석의 평가기준	45
9. 연직배수재를 이용한 압밀침하 이론	48

제 3 장 신뢰성 해석 결과

제1절 서언	53
제2절 확정적 해석결과	54
1. 외곽호안의 침하량 계산결과	54
2. 내부가호안의 침하량 계산결과	55
제3절 신뢰성 해석	61
1. 해석범위	61
2. 입력정수	61
3. 배수재 적정 간격 산정을 위한 신뢰성 해석	67
4. 압밀기간에 따른 허용잔류침하량 신뢰성 해석	75
5. 잔류침하로 인한 부등침하 신뢰성 해석	80
제4절 확정적 해석 및 신뢰성 해석 비교 검토	83
1. 연직배수재의 타설 간격 설정	83
제 4 장 결 론	85

참고문헌

표 목차

표 1.1	확정론적 설계법과 신뢰성 설계법 비교	1
표 2.1	신뢰성 설계법의 Level에 따른 분류	34
표 2.2	신뢰성 설계법의 Level에 따른 분류	40
표 2.3	부분 분산성과 부분 안전율(Meyerhof, 1982)	45
표 2.4	최소 전안전계수(Meyerhof, 1982)	46
표 2.5	지반공학에서의 허용최대 파괴확률과 신뢰성지수(Meyerhof, 1982)	46
표 2.6	통계학적 사면설계기준	47
표 2.7	사면상태에 관한 해석 기준	47
표 3.1	기본물성 및 토층특성	54
표 3.2	목표침하량 산정결과	54
표 3.3	Pre-Loading에 의한 침하량 산정결과	55
표 3.4	내부-1구간에 대한 침하량 산정결과	56
표 3.5	내부-2구간에 대한 침하량 산정결과	56
표 3.6	내부-3구간에 대한 침하량 산정결과	57
표 3.7	내부-4구간에 대한 침하량 산정결과	57
표 3.8	시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-1구간)	58
표 3.9	시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-2구간)	59
표 3.10	시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-3구간)	59
표 3.11	시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-4구간)	60
표 3.12	해석에 필요한 지반의 입력정수	62
표 3.13	배수재료 설계정수	62
표 3.14	구간별 압밀단계에 따른 시공기간(개월)	63
표 3.15	구간별 압밀도 및 배수재 간격	64
표 3.16	구간별 점성토층의 두께	65

표 3.17 구간별 상재하중의 분포	66
표 3.18 배수재 타설간격별 신뢰성 해석결과(배수재 간격 1.0×1.0m)	71
표 3.19 배수재 타설간격별 신뢰성 해석결과(배수재 간격 1.2×1.2m)	72
표 3.20 배수재 타설간격별 신뢰성 해석결과(배수재 간격 1.5×1.5m)	73
표 3.21 신뢰성 해석에 따른 대상구간의 타설간격 설정	74
표 3.22 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률	76
표 3.23 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률	77
표 3.24 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률	78
표 3.25 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률	79
표 3.26 부등침하의 신뢰성 해석결과	81
표 3.27 부등침하의 신뢰성 해석결과	82
표 3.28 부등침하의 신뢰성 해석결과(RMGC의 하단)	82
표 3.29 대상구간의 타설간격 설정 비교검토	84

그림 목차

그림 1.1	검토대상 위치도	3
그림 1.2	검토대상 구간별 단면도	4
그림 1.3	검토대상 및 시설물 상세도	5
그림 2.1	건물축조에 의한 침하발생	7
그림 2.2	모형압밀형상	7
그림 2.3	건물축조에 의한 침하발생	7
그림 2.4	표준압밀시험에 의한 체적변형	7
그림 2.5	압밀과정	8
그림 2.6	현장의 1차원 압밀 형태	9
그림 2.7	압밀 시험 장치	9
그림 2.8	각 하중단계의 침하량 산정	10
그림 2.9	압밀 시험 장치	10
그림 2.10	\sqrt{t} 법	13
그림 2.11	교란효과로 인한 압밀곡선의 변화	14
그림 2.12	정규압밀 점토의 현장 처녀 압밀 곡선	15
그림 2.13	과압밀 점토의 현장 처녀 압밀 곡선	15
그림 2.14	이차 압밀계수의 정의	16
그림 2.15	압밀방정식을 유도하기 위한 미소육면체	18
그림 2.16	압밀에 따른 체적변화	19
그림 2.17	시간변화에 따른 등시곡선의 변화	20
그림 2.18	임의시간에서의 등시곡선	21
그림 2.19	간극비와 유효응력관계	22
그림 2.20	점증하중에 대한 압밀-시간 곡선의 수정	23
그림 2.21	$t=t_c$ 일 때의 침하량 산정	24

그림 2.22 $t > t_c$ 일때의 침하량 산정	25
그림 2.23 $t < t_c$ 일때의 침하량 산정	25
그림 2.24 외부하중으로 인한 지중응력의 증가	26
그림 2.25 점토 지반에서의 즉시침하	26
그림 2.26 압밀 완료 후 ($t \rightarrow \infty$) 유효응력변화	28
그림 2.27 삼상도로부터의 침하량 계산	28
그림 2.28 연직 배수재의 시공 장면	32
그림 2.29 연직배수재 공법의 원리	32
그림 2.30 Limit State Surface에 의한 파괴영역과 안전영역의 구분	36
그림 2.31 신뢰성지수 β 와 R(저항), S(하중)과의 관계	36
그림 2.32 파괴확률과 안정성 지표의 관계	36
그림 2.33 이차원 표준공간에서의 일계신뢰분석시 신뢰성지수의 표현	41
그림 2.34 안전율과 파괴확률사이의 결과	48
그림 3.1 검토대상 및 시설물 상세도 (외곽호안-조망구간)	54
그림 3.2 검토대상 및 시설물 상세도 (내부가호안)	55

ABSTRACT

Consolidation and settlement of soft ground based on reliability analysis

Ahn, Hyunmin

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

In this thesis, reliability analysis was done on the characteristics of consolidation and settlement in the inner temporary dike where a weak ground improvement construction was applied. Through the analysis, PBD optimal space of placement was established, and it was examined if outer arc obtains stability against the residual settlement with the change of consolidation period.

As for the range and method of this study, a consolidation settlement was calculated through the consolidation of underground foundation and settlement analysis, and the data were analyzed in average, variance, and distribution. In reference to analyzed data, the study aimed to proceed the reliability analysis on the optimal space calculation of drains and the permissible residual settlement according to the consolidation period through various application methods and to achieve the stability for the optimal space of placement and residual settlement.

When the consolidation analysis on the foundation ground was done through this study, the following conclusions were obtained as a result from conducting the stability analysis on the effect of space of drains, the effect of consolidation time, and the residual settlement and differential settlement.

When applying the space of drains as 1.0m, 1.2m, and 1.5m for the objective ground, from the result of analysis on the probability of reaching a target

consolidation, the space 1.0m showed 99.9% ~ 100% in all sections, meaning that it is an overestimated construction, and as the space 1.2m obtained a reliability of over 95% in all areas, it showed a stability relatively. Also, when the space 1.5m was applied, as it showed low reliability of 80.22 ~ 84.52%, 50.26% ~ 71.32% by each section, it may be concluded that it is better to apply the drain distance of less than 1.5m for areas in which the probability to reach the target consolidation is lower than 95%.

Also, as a result of analysis on the reliability of differential settlement with nearby area, it exceeded the permissible differential settlement slope (1/600), showing a possibility of occurrence of differential settlement close to 0%. When construction was done with a drain space which satisfied 95% probability of reaching a target consolidation in each divided area and the occurrence of a residual settlement was within the range which did not exceed 10cm, it was shown that there was almost no possibility of the occurrence of differential settlement which was above the permissible differential settlement slope.

제 1 장 서 론

제1절 연구배경 및 목적

1. 연구배경

항만의 하부기초지반 설계과정 중 엔지니어가 접하게 되는 구조물의 안정해석은 현장지반에 대한 불충분한 자료와 파괴 메커니즘의 가변성으로 인하여 그 결과에 불확실성을 내포하고 있다. 안전율(Factor of Safety)의 개념을 기초로 하는 확정론적 방법(Deterministic Analysis)의 경우 어느 정도의 안전여유를 갖고 있는가를 파악하기 위하여 경험적인 안전계수(Safety Factor)를 도입하고 있다. 이 경우 분산(Variability)을 고려하지 않은채 단일 대표 값 만을 이용하여 안전성을 판단하므로 가변성과 불확실성을 효과적으로 정량화하여 해석에 적용할 수 없는 단점이 있다.

이중 신뢰성해석(Reliability Analysis)이란 확률론적 접근방법에 의한 해석으로 토질 정수들이 갖고 있는 불확실성을 고려하기 위하여 각 정수들은 분산성을 갖는 확률변수적인 파괴확률(Probability of Failure)로서 산정하게 되며, 확률변수의 민감도에 따른 파괴확률의 변화도 알 수 있다.

따라서 불확실성을 정량적으로 나타내는 신뢰성 해석은 기존의 정성적인 개념의 안전계수를 이용하는 확정론적인 해석을 보완할 수 있는 방법이라 할 수 있으며, 표 1.1은 확정론적 설계법과 신뢰성 설계법의 의미를 간략하게 정리하였다.

표 1.1 확정론적 설계법과 신뢰성 설계법 비교

구분	확정론적 설계법	신뢰성 설계법
설계변수 및 설계환경	<ul style="list-style-type: none"> • 각종 외력을 설계기준식에 의해 상수로 산정 • 가장 위험한 조건에서의 안정성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 설계변수 등을 모두 조사된 확률분포로 가정하고, 이를 설계기준식의 불확실성으로 고려 • 발생 가능한 모든 외력환경에 대한 각각의 발생확률을 고려하여 파괴확률 산정
안정성 확보	<ul style="list-style-type: none"> • 외력 및 저항관련 각종 불확실성 요소를 하중계수 및 안전율로 확보 	<ul style="list-style-type: none"> • 목표파괴확률 혹은 성능기준을 설정하여 그 값이 초과하지 않도록 설계
경제성	<ul style="list-style-type: none"> • 안정성과 경제성이 균형을 이루는 체계적인 설계가 불가능함 	<ul style="list-style-type: none"> • 공사비용과 파괴로 인해 발생가능 비용(기대파괴위험비용)을 확률적으로 고려하여 경제성과 안정성이 균형화된 설계가능

2. 연구의 필요성

본 연구에서는 항만 부두 준설토 투기장 축조공사 구역의 지반조사결과 및 문헌연구를 통하여 신뢰성 있는 지반정수를 산출한 후 토질정수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석법을 도입 해석하여 실제 시공되는 배수재의 타설 간격에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 안정성을 높이는데 목적이 있다. 또한 주변지반이 연약한 점성토에 시공된 구조물은 지반의 강도가 작고, 침하 등의 변형이 크기 때문에 지반개량공법을 적용할 경우 지반의 압밀 및 침하 특성 해석을 확정론적 해석과 함께 지반정수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 실시하여 구조물기초와 개량된 연약지반의 안정성을 높이고자 하였다.

또한, 통상 불확실성을 고려해 연약지반에 과다설계 적용을 최소화함으로써, 공사비적인 측면에서 경제성 향상에 큰 효과가 기대된다.

3. 연구동향

신뢰성이론은 Freudenthal(1947)과 Pugsley(1955)에 의해 발표되면서 유럽과 북미지역을 중심으로 신뢰성에 기반을 둔 구조물 설계기준에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 특히 Cornell(1969)이 평균 제1계 2차모멘트 방법을 발표한 이래 신뢰성 방법의 적용에 대한 연구가 빠른 속도로 진행되었다. 그러나 Cornell(1969)의 MFOSM방법은 확률분포의 범위가 정규분포라야 한다는 제한, 한계상태 함수의 표현 형태에 따른 해의 유일성 결여 등이 문제점으로 지적되어 사용상에 한계가 있었다. 이 때문에 Hasofer, Lind(1974)가 표현형태에 따른 문제를 해결하였고, Rackwitz와 Fiessler(1978)가 비정규분포를 등가정규 분포로 변환하는 알고리즘을 개발하여 확률변수의 분포에 대한 제한문제를 해결하였다. 또한 Shinozuka(1983)가 이때까지의 연구에 확률변수의 상관관계를 포함시켜 AFOSM방법을 완성하였고, 그 후 구조물의 신뢰성해석에 적용되고 있다. 이러한 신뢰도 기법을 바탕으로 한 설계기준으로는 유럽을 중심으로한 한계상태설계법(LSD; Limited States Design), 미국을 중심으로 한 하중저항계수설계법(Load and Resistance Factor Design)등이 있다.

국내 연구를 살펴보면, 조효남(1983)이 신뢰성 이론에 의한 응력구조물의 안정해석에 관한 연구를 수행하였고, 이증빈(1990)은 신뢰성이론에 의한 말뚝기초의 안정해석에 관한 연구를 수행하였다. 또한 양우식(1992)은 사면의 신뢰성 해석을 수행하였고, 심태섭, 주승완(2000) 등은 점추정법에 의한 암반사면의 신뢰성 해석을 수행하였으며, 안종필(2007)은 측방유동을 받는 교대말뚝기초의 신뢰성 해석을 수행하였다.

또한, 김방식과 김병일(2007)은 배수재 배치간격의 확률론적 해석을 수행하였고, 이규환과 정대석 그리고 박찬덕(2006)은 지반의 불확실성을 고려한 연약지반의 침하해석을 수행하였으며, 이철웅(2007)은 신뢰성 해석 및 부분안전계수 산정에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 최근 장연수(2011)은 Monte Carlo simulation-퍼지근사추론을 이용한 연약지반 침하에 관한 신뢰성 분석 연구를 수행하였다.

4. 연구의 목적 및 범위

본 연구는 설치된 연약지반의 침하특성과 PBD간격 결정에 관한 신뢰성해석에 관한 연구로써 「항만 부두 준설토 투기장 축조공사」를 대상으로 하였다. 신뢰성해석을 하기 위하여 지반의 제반 토질정수 특성을 파악하고, 지반개량공법에 대한 신뢰성해석을 하여 최적의 시설계획 수립을 위한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

그림 1.1 준설토 투기장 축조공사 위치도와 그림 1.2는 준설토 투기장 축조공사 구간별 단면도이다.

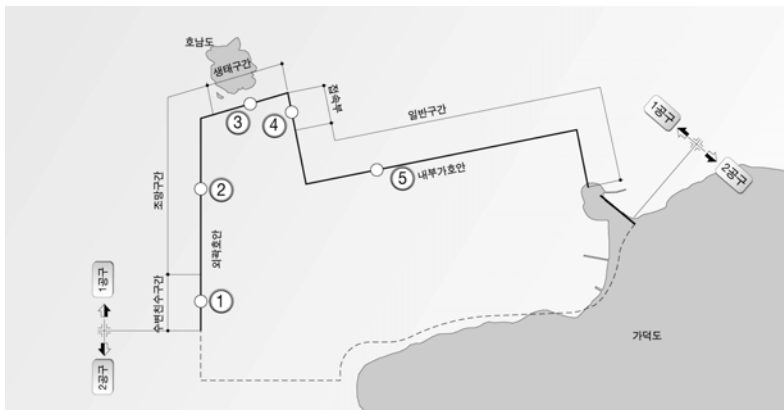
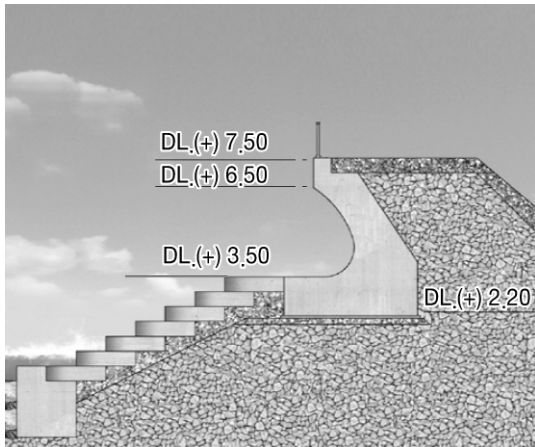
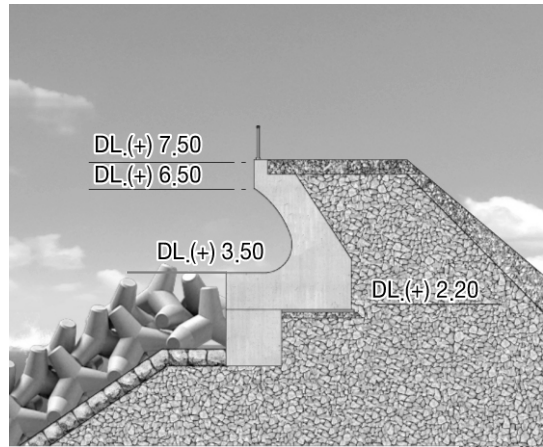


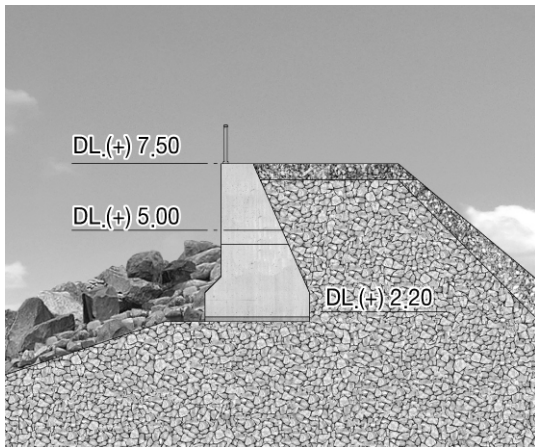
그림 1.1 검토대상 위치도



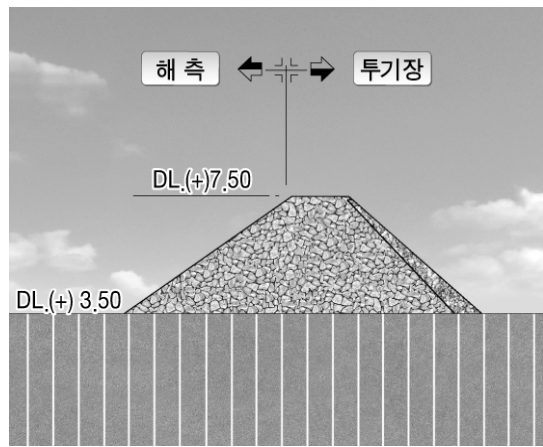
(a) 수변친수구간



(b) 조망구간



(c) 생태구간



(d) 내부가호안

그림 1.2 검토대상 구간별 단면도

가. 관련이론 및 문헌연구

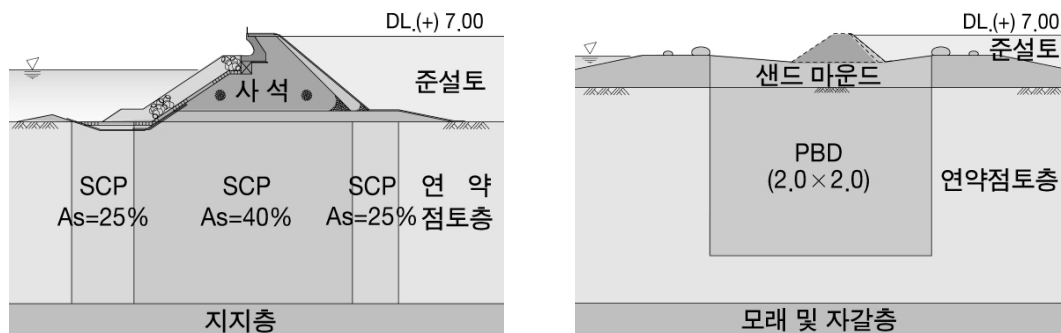
본 논문에서는 신뢰성설계에 필요한 대표적인 지반정수들의 확률분포형태와 분산특성에 대한 기존의 연구 성과를 검토하였으며, 연직배수재(PBD)를 고려한 압밀침하의 기본이론을 소개하였다. 또한 신뢰성해석 이론과 사례를 고찰함으로써 지반공학 분야에 대한 허용파괴확률 및 신뢰성지수 기준을 파악하였다.

나. 대상지역의 지질특성 및 지반정수 고찰

지반조사로 얻어지는 지반정수는 대상지역 전체에 비하여 매우 한정적인 이유로 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 본연구의 대상지역인 부산신항 남컨테이너부두 배후지 준설토 투기장 축조공사의 지질특성을 파악하고 지반정수의 특성을 분석하였다.

다. 신뢰성기법에 의한 지반의 압밀 및 침하해석

본 연구에서는 연약지반 개량공법을 적용한 내부가호안의 압밀침하 특성을 신뢰성 해석을 이용하여 분석하였으며, 이를 통해 PBD 최적 타설 간격을 설정하였고 외곽호안은 압밀기간 변화에 따른 잔류침하에 대해 안정성을 확보하는지를 검토 하였다. 검토대상 및 시설물의 상세단면은 그림 1.3과 같으며, 연구의 범위 및 방법은 하부기초지반의 압밀 및 침하해석을 통해 압밀 지반정수를 산정하여 데이터를 평균, 분산, 분포형태로 분석한다. 분석된 데이터를 참고로 배수재 적정 간격 산정과 압밀기간에 따른 허용잔류 침하량을 다양한 적용기법을 통해 신뢰성 해석을 진행하여 최적타설간격 및 잔류침하에 대한 안정성을 확보를 목표로 한다.



(a) 외곽호안-조망구간 (잔류침하량 분석) (b) 내부가호안(PBD 타설 간격 검토)

그림 1.3 검토대상 및 시설물 상세도

라. 연직배수재(PBD)의 타설 간격 설정

신뢰성 해석에는 배수재와 관련된 설계인자들의 통계적 특성을 고려하여 주어진 시간에 목표하는 압밀도를 만족하는 연직배수재(PBD) 타설 간격을 산정하였다.

마. 압밀기간 변화에 따른 잔류침하량 분석

압밀기간에 따른 압밀도의 관계를 분석하여 시공된 구조물의 안정성에 문제가 발생하지 않는 범위 내에서 경제적인 시공이 될 수 있도록 압밀기간을 산정한다.

바. 부등침하에 대한 신뢰성 분석

지반개량공법 실시 이후에 부등침하 발생 가능성을 신뢰성 해석기법을 이용하여 검토하였다. 부등침하량은 컨테이너 부두의 영역을 분할한 후, 침하에 대한 확률밀도함수를 이용하여 각 셀의 잔류침하량을 산정하였다. 그리고 각 셀 간의 부등침하량 및 지반구배 기준치를 만족하는지에 대한 검토를 수행하였다.

제 2 장 관련 이론 및 문헌 연구

제1절 흙의 압밀론

1. 압밀현상

지표면의 상재하중에 의하여 지반내에는 응력이 증가하게 되고 이러한 상재하중에 의하여 토층이 압축되면서 흙 입자의 상호위치가 변화하게 될 것이다. 토층의 압축은 간극속의 공기나 물이 배출되어 나타나는 현상이라 할 수 있다. 이와 같이 흙 위의 구조물이나 성토하중에 의하여 토중수가 배출되어 지반이 서서히 압축되는 현상을 압밀(Consolidation)이라 한다.

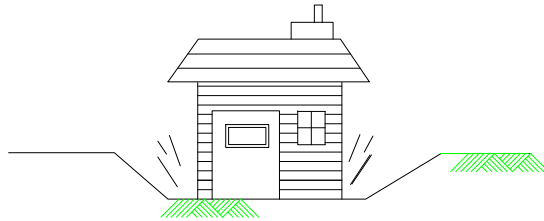


그림 2.1 건물축조에 의한 침하발생

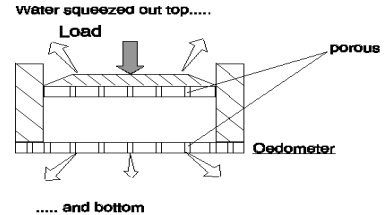


그림 2.2 모형압밀현상

그림 2.1은 실제 지상에 건물을 세울 때 건물의 상재하중에 의해 침하가 발생하는 것을 보여주는 모형도이며, 이와 같은 압밀 현상을 그림 2.2와 같이 형상화하여 실험실에서 침하량과 침하시간을 예측할 수 있다.

그림 2.3과 그림 2.4은 위의 Oedometer에 하중을 계속 2배로 증가시켰을 때의 체적의 변화를 그린 것이다.

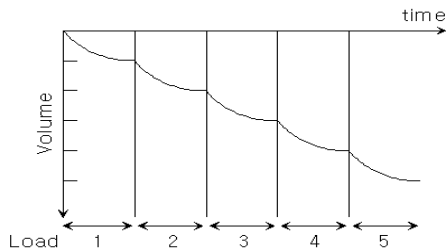


그림 2.3 건물축조에 의한 침하발생

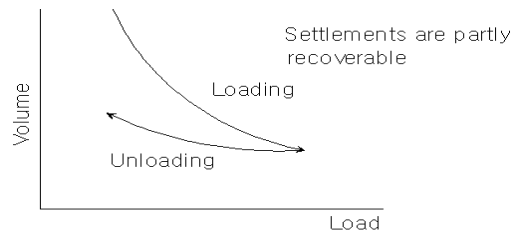


그림 2.4 표준압밀시험에 의한 체적변형

위와 같은 압밀현상을 고려하여야 하는 경우의 현장 조건은 다음과 같은 경우들을 들 수 있다.

- Preloading 공법 / 도로지반의 압밀침하
- Sand drain / Paper drain 공법 / Pack drain 공법
- 침투압밀 / 진공압밀 공법
- Well-point 공법
- 도로, 제방, 방조제, 방파제 등의 침하해석
- 구조물 기초 지반의 침하해석
- 임해공업단지나 충적층의 연약 지반개량 및 침하해석
- 준설매립 연약 지반의 연약 지반개량 공법
- 기타

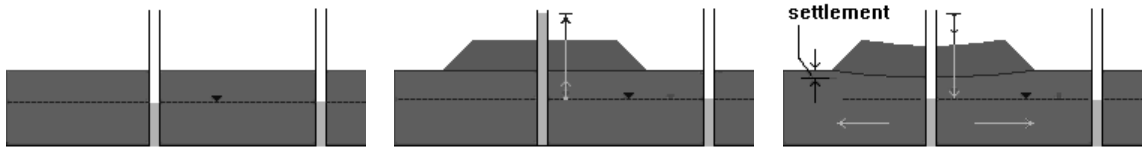


그림 2.5 압밀과정

2. 압밀시험

압밀 현상은 간극 속에서 물이 소산에 의한 체적의 감소 현상이라 할 수 있고, 이러한 소산의 속도는 지반의 투수성에 의존하게 된다. 이처럼 압밀현상을 다룸에 있어 중요한 것은 압밀로 인해 침하의 양이 얼마나 될 것이며, 또한 얼마나 빨리 진행되는가에 대한 문제일 것이다. 예를 들어 연약지반 위에 도로제방 등의 구조물을 축조시 압밀로 인한 최종 침하량과 그 침하속도, 예를 들면 50% 또는 90%까지 일어나는데 소요되는 시간을 추정해야 할 필요가 있다. 이러한 계산은 성토의 높이를 결정하거나 공사기간을 정하는 경우에 반드시 요구된다.

이러한 중요한 2가지의 사항은 실내에서 실시되는 압밀시험을 통하여 압밀정수(압축지수, 선형압밀하중, 체적압축계수, 압밀계수)를 구하고 이 압밀정수를 이용하여 점성토지반이 하중을 받아서 지반전체가 1차원적으로 압축되는 경우에 발생하는 침하특성

(침하량, 침하속도)도 밝힐 수 있다.

가. 압밀시험의 원리

그림 2.6과 같이 반무한 평면에 하중이 작용하면 흙의 압축은 연직 방향으로만 일어난다. 실험실에서 이러한 조건과 동일한 실험을 하기 위해 흙을 그림 2.5와 같이 압밀시험기에 넣어 압축시킨다. 즉, 시료를 강성이 매우 큰 압밀링에 넣고 상하면에 다공판을 놓은 후 가압판을 통해 하중을 가한다.

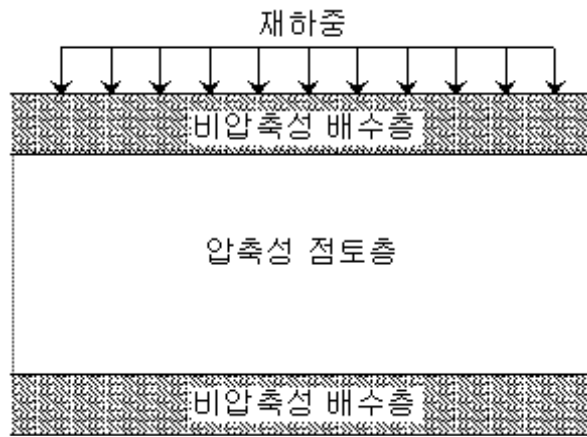


그림 2.6 현장의 1차원 압밀 형태

다공판은 그림 2.6의 배수층에 해당하며, 압밀링은 시험 중 시료의 횡방향변형을 구속하여 실제 1차원 압밀상태를 구현시킨다. 이러한 상태를 정적상태압밀(k_0 , Condition Consolidation)이라 한다.

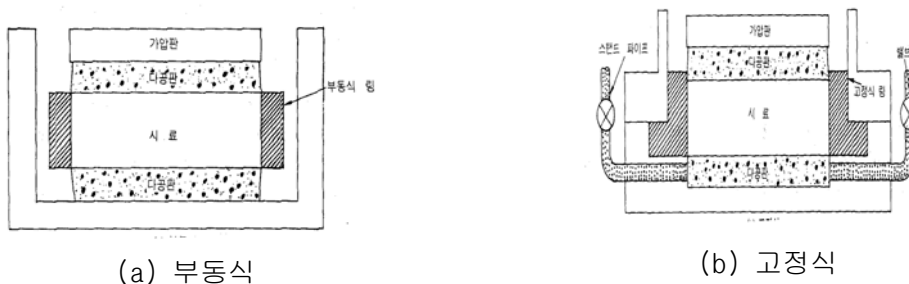


그림 2.7 압밀 시험 장치

그림 2.7과 같이 압밀링은 부동식과 고정식의 두 가지가 있는데, 부동식은 흙의 압축이 시료의 상하면에 발생하므로 고정식에 비해 측면 마찰이 적게 발생하는 장점이 있다.

압밀시험은 이상과 같은 시험 장치를 사용하며, 시험결과는 각 하중단계의 침하량을 그림 2.8

(a)와 같이 간극비의 변화로 나타내는 방법과. 그림 2.8 (b)와 같이 연직방향변형률 (ϵ_v)로 나타내는 두 가지 방법이 있으나, 실제로는 전자인 간극비의 변화로 나타내는 방법이 많이 사용된다.



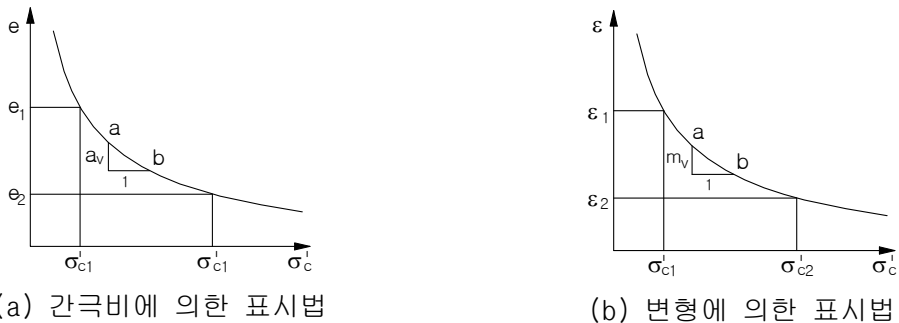
(a) 간극비의 변화로 나타내는 방법 (b) 연직방향 변형률로 나타내는 방법

그림 2.8 각 하중단계의 침하량 산정

나. 압밀정수

(1) 압축계수(Coefficient of Compressibility, a_v)

그림 2.9 (a)는 압밀응력과 공극비의 변화로 도시한 결과로서 ab에 해당하는 압력구간과 같이 압밀압력의 변화가 그리 크지 않은 범위에서는 곡선의 ab부분을 직선으로 간주할 수 있는데, 이때 ab의 기울기를 압축계수라고 한다.



(a) 간극비에 의한 표시법

(b) 변형에 의한 표시법

그림 2.9 압밀 시험 장치

즉, 압축계수는 유효응력의 변화($\Delta \bar{p}$)에 대한 간극비의 변화(Δe)이며 수식적 표현은 다음과 같다.

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \bar{p}} \quad (2.1)$$

(2) 체적압축계수(Coefficient of Volume Change, m_v)

그림 2.9 (b)는 압밀응력과 변형률로서 도시한 결과로서 체적압축계수 m_v 는 유효응력의 단위증가에 대한 단위체적의 변화로 정의된다. 어떤 흙에 대한 m_v 의 값은 일정한 값이 아니며, 그 값은 계산하고자 하는 압력의 범위에 따라 달라진다. 이것을 식 (2.2)로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 m_v &= \frac{\epsilon_v}{\Delta \bar{p}} = \frac{\frac{\Delta H}{H}}{\Delta \bar{p}} = \frac{\Delta H}{H \Delta \bar{p}} \\
 &= \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta \bar{p}} = \frac{\Delta V}{V \Delta \bar{p}} = \frac{1}{1 + e_0} \left(\frac{e_1 - e_2}{\sigma_2 - \sigma_1} \right) = \frac{a_v}{1 + e_0}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

여기서, H : 시료의 높이

(3) 압축지수(Compression Index, c_c)

압축지수는 압밀 시험 결과를 그림 2.10과 같이 도시하였을 때 $e - \log \bar{p}$ 곡선에서 직선 부분의 기울기를 압축지수라고 하며 무차원 값이다. 압축지수는 식 (2.3)으로 표현된다.

$$c_c = \frac{e_1 - e_2}{\log_{10}(p_1/p_2)} = \frac{\Delta e}{\Delta \log_{10} p}
 \tag{2.3}$$

재압축 곡선(CD)의 기울기를 재압축 지수(c_r)이라 하고 식 (2.4)로 나타낼 수 있다.

$$c_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log_{10} p}
 \tag{2.4}$$

이러한 재압축지수(c_r)의 크기는 일반적으로 $c_r \approx \frac{1}{5} \sim \frac{1}{10} c_c$ 의 값을 갖게 된다.

(4) 압밀계수(Coefficient of Consolidation, c_v)

압밀계수는 지반의 압밀침하에 소요되는 시간을 추정하는데 쓰이는 값이며 단위는

cm²/sec 이나 m²/year를 사용한다. 세립분이 많을수록 압밀계수의 값은 작아진다.

$$c_v = \frac{T_v H^2}{t} \quad (2.5)$$

압밀계수의 값은 시료의 시간-침하량 곡선으로부터 구해지며, Taylor (1942)가 제안한 \sqrt{t} 방법과 Casagrande와 Fadum(1940)이 제안한 $\log_{10}t$ 방법의 두 가지가 있다. 그러나 $\log_{10}t$ 방법으로 구한 c_v 의 값이 실제와 잘 부합된다고 알려지고 있으며, 두 방법에서 구한 압밀계수의 평균값을 사용하는 것이 타당하다고 본다. 초기보정치 d_s 는 공시체 내에 있는 기포가 압축되거나 여과지의 압축 등 공시체와 가압판 사이의 밀착성 때문에 발생하는 문제에 대한 보정치이다. 이 두 방법에 대해 살펴보면 다음과 같다.

• \sqrt{t} (Taylor) 방법

- 세로축에 변형량, 가로축에 소요시간의 제곱을 잡아 측정 결과를 Plotting한다.
- 먼저 이 곡선의 직선 부분을 연장하여 세로축과 만나는 점을 초기치 d_0 라 하고, 이 점으로부터 실측직선부 기울기의 1/1.15배 되는 기울기로 선을 그려서 실측곡선과 만나는 점을 90% 압밀이 일어난 d_{90} 으로 한다.
- d_{90} 에 해당하는 시간 t_{90} 을 구한다.
- 압밀계수 c_v 는 다음 식으로 구한다.

$$c_v = H^2 \frac{T_{90}}{t_{90}} = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \quad (2.6)$$

여기서, T_{90} : 90% 압밀도에 해당하는 시간계수

H : 배수거리로 일면 배수일 때에는 시료의 전체 두께를 취하고, 양면배수일 때에는 시료 두께의 절반을 취한다.

- 일차압밀량 d_s' 는 다음과 같이 구한다.

$$d_s' = (d_{90} - d_0) \times 10/9 \quad (2.7)$$

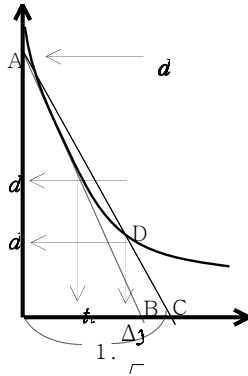


그림 2.10 \sqrt{t} 법

• **log t (Casagrande) 방법**

세로축에 침하량을 가로축에 시간(대수 눈금)을 적어 측정결과를 그린다. 이 곡선의 중간 부분과 마지막 부분은 대략 직선이 되는데, 이 직선의 연장선의 교점을 d_{100} 으로 정한다.

대수눈금에서는 $t = 0$ 인 점을 나타낼 수 없으므로 곡선의 처음 부분은 포물선이 된다고 가정하여 $t = 0$ 되는 보정영점 d_s 를 결정하기 위해 그 곡선에서 시간 t_1 분의 다이얼 읽음 d_{s1} 과 시간 $4t_1$ 분의 다이얼 읽음 d_{s2} 의 차 $\Delta d_s = d_{s2} - d_{s1}$ 만큼, 시간 t_1 의 읽음 d_{s1} 위에 플롯하여 보정 영점 $d_s = d_{s1} - \Delta d_s$ 로 한다. 이때 t_1 을 정하기가 쉽지 않으므로 보통 $t_1 = 1$ 분으로 한다. d_s 와 d_{100} 사이의 중간 값이 $d_{50} = (d_s + d_{100})/2$ 이므로, 이 값에 대응하는 시간 d_{50} 을 결정하면 다음의 공식으로 c_v 를 계산할 수 있다

$$c_v = H^2 \frac{T_{50}}{t_{50}} = \frac{0.197H^2}{t_{50}} \quad (2.8)$$

일차압밀량 d_s' 는 다음과 같이 구한다.

$$d_s' = d_{100} - d_s \quad (2.9)$$

투수계수도 하중단계마다 압밀계수 c_v , 압축계수 a_v 를 이용하여 식 (2.10)으로서 계산할 수 있다.

$$k = c_v \gamma_w m_v = c_v \gamma_w \frac{a_v}{1 + e_0} \quad [\text{cm/sec}] \quad (2.10)$$

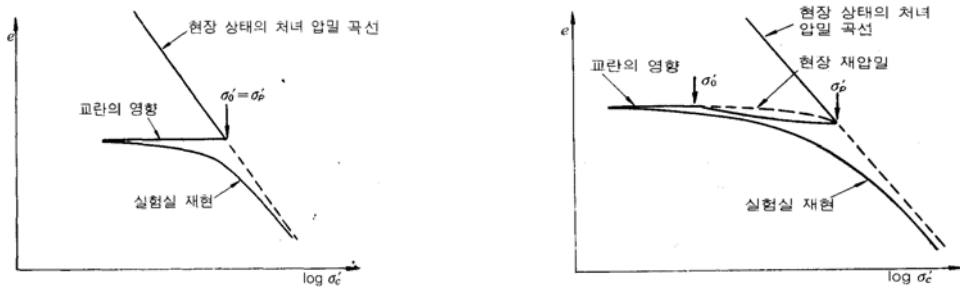
(5) 과압밀비(OCR)

선행압밀하중이 현재 흙이 받고 있는 유효상재하중과 같으면 정규압밀점토(Normally Consolidated Clay), 유효상재하중보다 작으면 압밀진행점토(Under-Consolidated Clay), 유효상재하중보다 크면 과압밀점토(Over Consolidated Clay)라 하며, p_c' 에 대한 p_0' 의 비를 과압밀비(Over Consolidation Ratio, OCR)라 한다.

• 현장상태에 대한 처녀압축곡선의 보정

시료 채취와 성형 과정에서 시료가 교란되는데, 그림 2.10에서와 같이 교란의 정도가 클수록 처녀압밀곡선의 기울기가 감소하게 된다. 따라서, 그림 2.10과 같이 실제 현장상태에서 처녀압밀곡선의 기울기는 실험실에서 구한 값보다 약간 크다는 것을 알 수 있다. 그러나, 시료의 교란에 관계없이 $e=0.4$ 부근에서 모든 처녀압축곡선이 수렴하는 특징이 있다.

Schmertman은 다음과 같이 정규압밀, 과압밀 점토에 대한 현장의 처녀곡선의 보정방법을 제시하였다. 이를 바탕으로 한 침하량 산정은 이후에 설명될 일차원 침하량산정 이론에서 설명된다.



(a) 정규압밀 점토

(b) 과압밀 점토

그림 2.11 교란효과로 인한 압밀곡선의 변화

정규압밀점토 : Casagrande의 방법에 의해 구한 p_c' 에서 연직선을 올려 초기공극비 (e_0)에서 그은 수평선과의 교점 (B)를 구한다. Schmertmann에 의하면 현장압밀곡선과 실험실에서 구한 압밀곡선의 교점의 간극비는 $0.42e_0$ 이므로 점(C)를 구할 수 있다. 점(B)와 점(C)를 직선으로 연결하면 이것이 현장상태의 처녀압밀곡선이다.

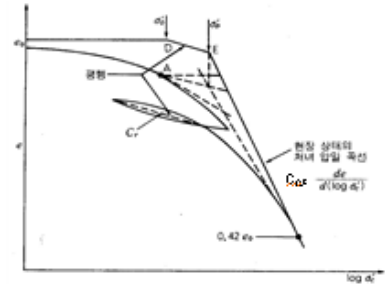
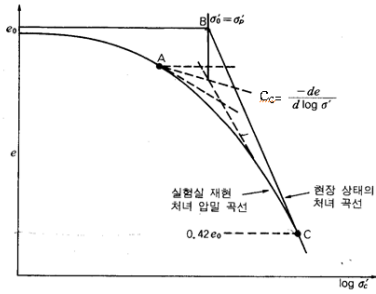


그림 2.12 정규압밀 점토의 현장 처녀 압밀 곡선 그림 2.13 과압밀 점토의 현장 처녀 압밀 곡선

과압밀점토 : 초기간극비 e_0 에서 수평으로 그은 선 위에 유효상재하중 σ'_0 에 해당하는 점(D)를 구하고, Casagrande의 방법에 의해 선행압밀하중을 구해 연직선을 그려, D 점에서 재압축곡선의 기울기(c_r)과 평행한 선과의 교점(E)를 구한다. $0.42e_0$ 되는 C를 구하여 점 (E)와 연결하면 이 직선이 구하고자 하는 현장상태의 처녀압밀곡선이다.

• 1차 압밀비

시료가 외부하중을 받아 발생하는 압축량은 과잉 간극수압이 소산되어 발생하는 압밀량과 과잉간극수압이 완전히 소산된 후 발생하는 2차 압축량의 두 가지로 나뉘어진다. 전자는 Terzaghi의 압밀 이론에 따른 1차 압밀(Primary Consolidation)이라 하고, 후자는 2차 압축(Secondary Compression)이라고 하며, 이것은 압밀 이론을 따르지 않는다. 전체 압축량 중에 1차 압밀로 인한 압축량의 비율을 1차 압밀비 γ_p 라고 하며, 시간-침하량 곡선을 이용하여 \sqrt{t} 방법 또는 $\log t$ 방법에 따라 다음의 공식을 이용하여 구한다.

$$\left. \begin{aligned} \gamma_p &= \frac{10(d_s - d_{90})}{9(d_o - d_f)} \quad (\sqrt{t} \text{ 방법}) \\ \gamma_p &= \frac{d_s - d_{100}}{d_o - d_f} \quad (\log t \text{ 방법}) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

여기서 d_f : 최종 압축량

1차 압밀비가 클수록 실험실에서 측정된 값을 이용하여 계산한 침하속도가 실제와 더 잘 일치한다.

• 2차 압밀비

실제 압밀시험에서는 그림 2.14에서와 같이 시간이 많이 경과되고 간극수압이 0이 되어도 시료의 압밀은 끝나지 않고 더욱 완만한 구배로 연속이 되는데 이것을 2차압밀이라고 한다. Terzaghi의 압밀이론이 적용 안되는 범위로서 접근선이 안되고 계속하여 직선 부분이 내려간다. 하중이 커지면 흡입자가 조밀하게 되며, 이때 흡입자가 위치를 전이한다. 그래서 크리프가 발생하는데 이것이 2차압밀의 주원인이다. 예민하지 않은 점토는 2차 압밀이 거의 없지만 10~15%정도 발생하며, 예민한 해성점토 또는 섬유질, 유기물이 많은 흙은 40~50%까지 2차압밀이 발생한다.

유기질 성분이 높은 흙에서는 크리프 현상이 발생한다. 따라서, 1차압밀이 종료된 후 2차압밀이 발생하는데, 멕시코시티의 점토처럼 2차 압축량이 압밀량보다 크게 발생하는 경우도 있다.

그림 2.14에서 이차압밀부분에서의 기울기를 이차압축지수라 한다. 이차압축지수 c_{α} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

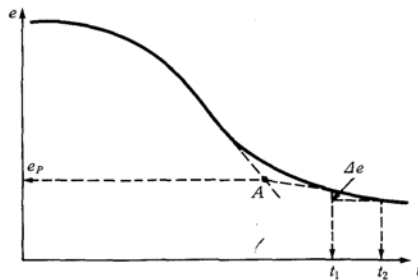


그림 2.14 이차 압밀계수의 정의

다. 압밀 방정식

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 소산 정도를 바탕으로 판단한다. 즉, 무한등분포 하중 q 가 작용하면 초기에 하중 q 만큼의 과잉간극수압이 생성되며, 시간이 지남에 따라 생성된 과잉간극수압은 소산된다. 과잉간극수압의 소산부분만큼 유효응력이 증가하며, 실제로 지반의 변형을 일

으키는 것은 흙 입자에 가해지는 유효응력의 변화 때문이므로, 과잉간극수압의 소산정도를 파악하면 압밀과정의 진행속도를 예측할 수 있다.

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

(1) Terzaghi의 1차원 압밀방정식

• 1차원 압밀 방정식의유도

외부 하중으로 인하여 유발된 과잉간극수압이 소산되는 과정을 시간의 함수로서 나타낸 1차원 압밀방정식이 Terzaghi(1925)에 의해 발표되었는데, 이 압밀방정식의 유도 과정에서 가정한 내용들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 흙은 균질하다.
- ② 흙은 완전히 포화되어 있다.
- ③ 흙입자와 물의 압축성은 무시할 수 있을 만큼 작다. (즉, 흙입자와 물 자체는 압축성이 없고 여기서는 흙입자의 파괴 또한 발생하지 않는다.)
- ④ 미소 흙요소의 거동은 큰 토체의 거동과 비슷하다.
- ⑤ 압축은 1차원 수직방향으로 발생하며 횡방향 변위는 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 에너지 불변의 법칙을 따른다.
- ⑬ 흙의 성질은 시간에 따라 변하지 않는다.

위 가정들의 유효성에 대해 살펴보면 ①, ②, ③은 토질역학에서 흔히 사용되는 보편적인 가정들이며, ④는 이론적 모형을 위한 방편으로서 큰 토체의 경우 비균질한 경우가 많으나 ①

의 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-변형률의 관계를 비선형으로 볼 경우 실제거동에 근사하게 접근할 수 있지만 해석이 지나치게 복잡해지는데 비해 기여도는 그리 크지 않다.

Terzaghi의 일차원 압밀방정식을 유도하면 다음과 같다.

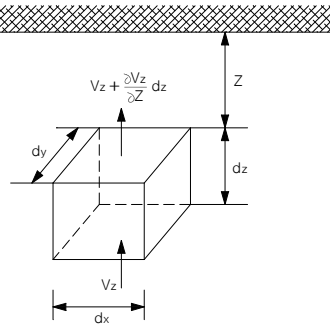


그림 2.15 압밀방정식을 유도하기 위한 미소육면체

그림 2.15에서 미소입방체에 유입되는 단위유량과 유출되는 단위유량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{in} = V_z dx dy \quad (2.12)$$

$$q_{out} = (V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz) dx dy \quad (2.13)$$

$$q_{in} - q_{out} = \Delta q = - \frac{\partial V_z}{\partial z} dx dy dz \quad (2.14)$$

또한, 시간에 따른 체적변화율 ($\frac{\partial V}{\partial t}$)은 다음과 같이 유도된다.

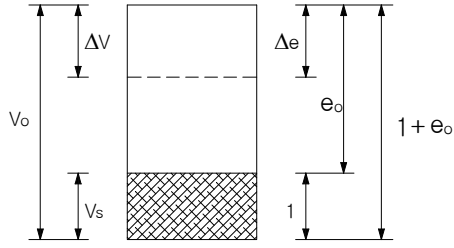


그림 2.16 압밀에 따른 체적변화

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \therefore \Delta V = \frac{V_0}{1 + e_0} \Delta e = \frac{dx dy dz}{1 + e_0} \Delta e \quad (2.15)$$

따라서, 체적변화 (ΔV)를 시간 (t)로 편미분하면 시간에 따른 체적변화율을 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{dx dy dz}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.16)$$

결국 시간에 따른 체적변화율은 유입되는 단위유량과 유출되는 단위유량의 차와 같아지므로

$$-\frac{\partial V_z}{\partial z} dx dy dz = \frac{dx dy dz}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.17)$$

양변의 $dx dy dz$ 를 소거하면,

$$-\frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.18)$$

가정 사항에서 Darcy의 법칙이 유효하므로 속도는 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$V_z = ki_z = k \left(-\frac{\partial h}{\partial z} \right) = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.19)$$

여기서, h : 전수두

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

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-k \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (2.20)$$

식 2.16를 식 2.18에 대입하면 다음과 같은 연속방정식을 얻을 수 있다.

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.21)$$

• 등시곡선(Isochrones)

일차원 압밀방정식의 해는 주어진 경과시간에서 깊이에 대한 간극수압(\bar{u})의 변화를 도출하여 구할 수 있다. 그 결과 얻은 곡선을 등시곡선(isochrones)이라 한다.(여기서 iso 는 동등하다는 뜻이며 kronos 는 시간을 의미한다.) 아래 그림 2.17은 압밀층으로 삽입된 스탠드 파이프를 보여주고 있다. 하중이 재하되기 전에는 배수되는 간극수압은 영이다. 각각의 스탠드 파이프에는 약간의 초기 간극수압 $u = u_0$ 이 있으며 이때의 과잉 간극수압(\bar{u})은 영이다.

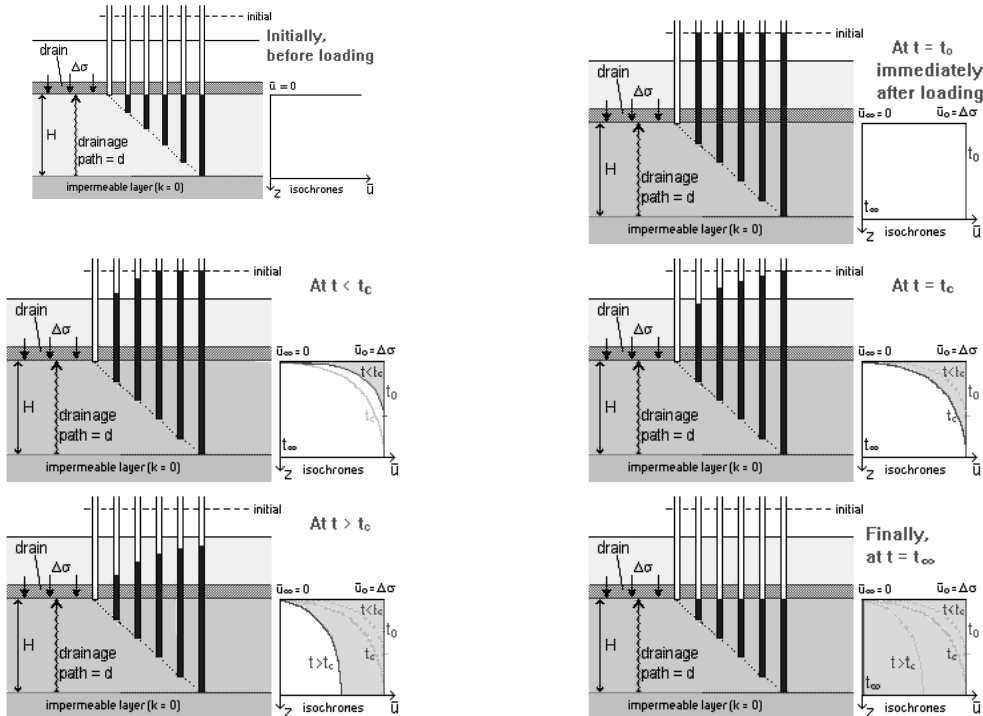


그림 2.17 시간변화에 따른 등시곡선의 변화

하중이 재하된 직후, 각각의 스탠드 파이프는 초기 과잉간극수압 (\bar{u}_i)가 발생되고, 이후 시간의 경과에 따라서 간극수압은 소산될 것이다. 상부 배수층 인근에서는 과잉간극수압이 하중재하 후 즉시 영으로 떨어지나 바닥층에서의 소산은 매우 느리게 된다.

• 등시곡선의 특징

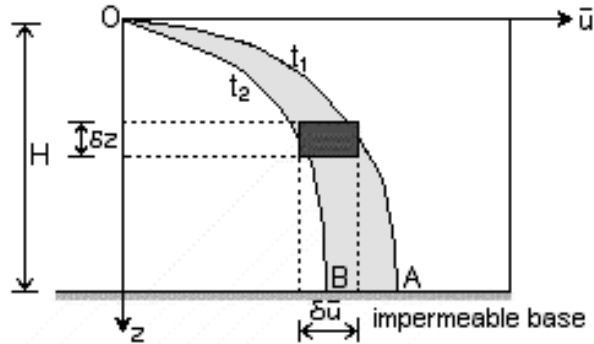


그림 2.18 임의시간에서의 등시곡선

등시곡선은 등수경사(i)와 관련이 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\gamma_w \cdot i \tag{2.22}$$

배수면에서, 등시곡선은 가장 급하며 $\bar{u}=0$ 이다. 불투수층($k=0$) 면에서 침투속도는 영이다.($v=ki$). 그러므로 등시곡선은 불투수성 경계면과 90도 이룬다. 그림 2.18에서 시간 δt (즉, $t_2 - t_1$) 동안의 두 등시곡선 사이의 두께의 변화량은 다음식과 같다.

$$\delta h = -m_v \delta z \delta u \tag{2.23}$$

여기서 $\delta z \cdot \delta \bar{u}$ 는 그림에서 직사각형의 면적이다. 그러므로 토층 표면에서의 침하는 다음식과 같다.

$$\delta = \Delta h = m'_v \cdot \text{면적} OAB \tag{2.1.24}$$

(2) 압밀도

과잉간극수압의 분포는 시간과 깊이에 대한 함수이며, 지반 내의 어떤 점에서 임의 시간에 있어서의 간극수압의 소산 정도를 압밀도라 하고 U_z 로 표시한다. 또한, 압밀도는 어느 시점에서 압밀량과 최종압밀량의 비, 또는 그 백분율표시를 말한다.

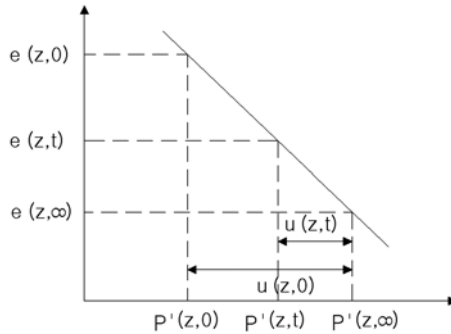


그림 2.19 간극비와 유효응력관계

압밀도는 간극비의 함수로 나타낼 수 있으며, 위의 그림을 통해 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$U_z = \frac{e(z,0) - e(z,t)}{e(z,0) - e(z,\infty)} \quad (2.25)$$

또한, 유효응력의 개념으로 압밀도를 정의해보면 다음과 같다. 식 (2.1.1.25)에서 $e(z,0)$ 는 압밀 전의 초기간극비, $e(z,t)$ 는 압밀 중의 간극비, $e(z,\infty)$ 는 압밀 완료 후의 간극비이다. 그림 2.19와 식 (2.25)을 참고하여 압밀도를 다음과 같이 유효응력의 함수로 나타낼 수 있다.

$$U_z = \frac{p'(z,t) - p'(z,0)}{p'(z,\infty) - p'(z,0)} \quad (2.26)$$

(3) 점증하중(Ramp Loading)에 의한 압밀

앞 절에서 언급한 평균압밀도를 구하는 방법은 그림 2.20 (a)와 같이 시공하는 순간 구조물 전체의 하중(q)이 작용한다는 가정아래 식이 유도되었다. 그러나, 실제의 시공

상태는 그림 2.20 (b)와 같이 초기에는 굴착 등에 의해 하중이 감소한 후 시공 기간이 경과함에 따라 하중이 점차 증가한다. 즉, 하중이 순간적으로 재하 되지 않고 단계적으로 증가하며, 재하 후 압밀이 완료되지 않은 상태에서 다음 단계를 재하하게 되는 점증재하가 되어 거동이 복잡해진다.

이러한 실제 상태에 알맞은 압밀-시간곡선의 수정방법에는 Terzaghi의 경험적인 방법이 있고, 점증재하에 대한 침하량은 순간재하에서 구한 침하량에 의해 산정할 수가 있다.

• Terzaghi의 경험적 방법

- ① 초기에는 굴착에 의해 흙의 자중이 감소함으로 팽창이 일어난 후 감소한 자중만큼의 구조물 하중이 들어선 순간을 2.20 (c)에서 원점으로 선정하며, 이후 시공이 완료되는 시간(t_c)의 하중은 구조물 전하중에서 감소한 자중을 뺀 만큼을 유효하중(p')로 결정한다.

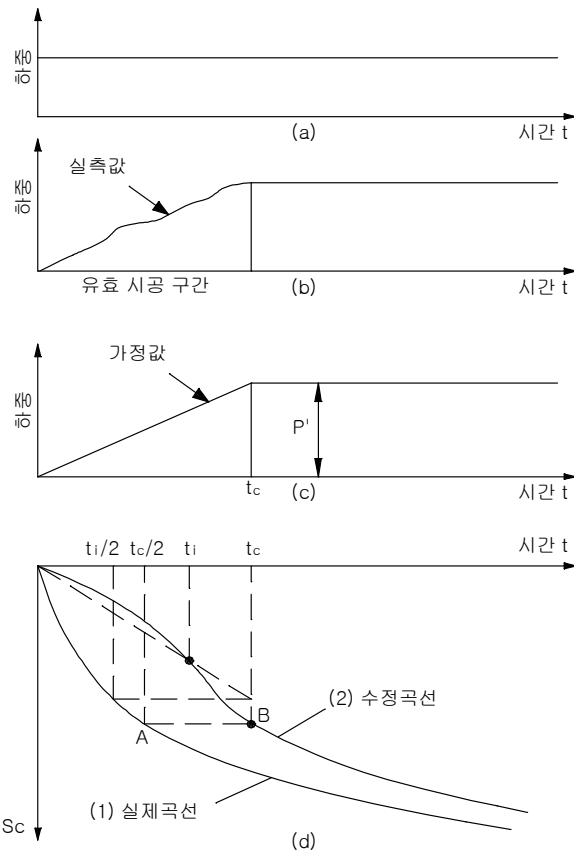


그림 2.20 점증하중에 대한 압밀-시간 곡선의 수정

- ② p' 가 순간 재하 되는 것으로 하여 그림 2.20 (d)와 같은 압밀-침하량곡선(1)을 그릴 수 있다.
- ③ 시간 t_c 에서 압밀도는 p' 가 순간 재하 했을 경우의 $t_c/2$ 의 압밀도와 같을 것이라는 가정에 의해 $t_c/2$ 에서 연직선을 내려 (1)곡선과 만나는 점 A에서 수평선을 그어 t_c 에서 내린 연직선과의 교점 B를 정한다.
- ④ ③의 과정과 동일한 방법으로 $t_i < t_c$ 인 임의의 시간에서 몇 개의 점을 정한다.
- ⑤ t_c 가 지난 후의 수정은 (1)선에서 수평 거리로 $t_c/2$ 만큼 왼쪽으로 이동하여 몇 개의 점을 그려 ②~⑤의 과정에서 구한 점을 연결한 선이 수정곡선 (2)가 된다.

이와 같은 점증재하 하중에 대한 Terzaghi의 경험적 방법에 의해 침하량을 구하는 방법은 순간재하의 침하량을 바탕으로 점증재하의 효과를 고려하여 시간을 수정하여 다음과 같은 방법으로 산정할 수 있다.

- $t=t_c$ 일 때 $S_{c(r)}$ (완공시)

그림 2.21에서와 같이 재하완료시점에서의 침하량은 점증재하의 완료시간(t_c)의 1/2을 순간재하의 시간으로 고려하여 산정할 수 있으며, 식 (2.27)과 같다.

$$[S_{c(r)}]_t = [S_{c(i)}]_{t_c/2} \quad (2.27)$$

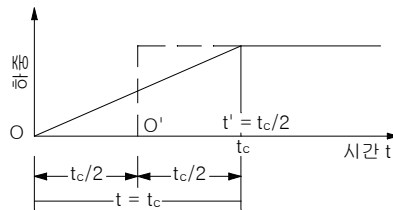


그림 2.21 $t=t_c$ 일 때의 침하량 산정

- $t > t_c$ 일 때 $S_{c(r)}$ (완공후)

그림 2.22에서와 같이 재하완료이후에서의 침하량은 순간재하의 $t' = t - t_c/2$ 의 순간재하 시간으로 고려하여 산정할 수 있으며, 식 (2.28)과 같다.

$$[S_{c(r)}]_t = [S_{c(i)}]_{t - t_c/2} \quad (2.28)$$

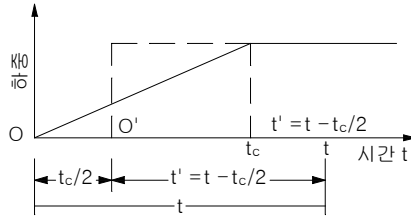


그림 2.22 $t > t_c$ 일때의 침하량 산정

- $t < t_c$ 일 때 $S_c(t)$ (공사중)

그림 2.23에서와 같이 재하완료 이전에서의 침하량은 점중재하 시간(t)을 순간재하의 시간 $t' = t/2$ 로 고려하게 되고, 재하완료시의 하중(q_c)과 그때의 침하량(S_c)과 임의시간($t' = t/2$)에서의 하중과 침하량의 관계를 이용하여 구할 수 있으며, 식 (2.29)와 같다.

$$[S_{c(r)}]_t = \frac{q(t)}{q(c)} [S_{c(i)}]_{t/2} = \frac{t}{t_c} [S_{c(i)}]_{t/2} \quad (2.29)$$

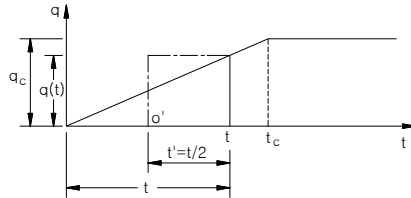


그림 2.23 $t < t_c$ 일때의 침하량 산정

라. 압밀침하

(1) 압밀침하원리

그림 2.24에서와 같이 A 입자에 응력의 증가량이 작용된다고 하면 연직방향 변형율은 다음과 같다.

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \{ \Delta\sigma_z - \mu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y) \} \quad (2.30)$$

외부하중으로 인한 지반의 침하량은 식 (2.30)을 적분하여 침하량 S는 탄성역학적 원리에 의해 식 (2.31)로 산정 할 수 있다.

$$S = \int_0^{\infty} \varepsilon_z dz = \int_0^{\infty} \frac{1}{E} \{ \Delta \sigma_z - \mu (\Delta \sigma_z + \Delta \sigma_y) \} \quad (2.31)$$

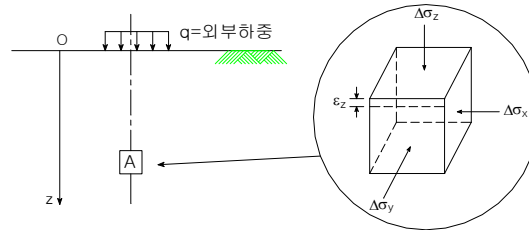


그림 2.24 외부하중으로 인한 지중응력의 증가

(2) 침하의 종류

식 (2.31)로 얻어지는 침하량은 순 탄성역학적인 관점에서 구한 것이다. 그러나 물이 있을 때의 흙의 압축성은 간단하지 않다. 토질역학적인 관점에서 흙의 압축성에 의한 결과인 침하에는 다음과 같은 종류가 있다.

• 즉시침하

즉시침하란 말 그대로 외부하중이 지반에 가해지자마자 발생하는 침하이다. 토질의 종류에 따라 즉시침하의 양상이 달라진다. 먼저, 모래지반에서는 하중증가와 동시에 물이 배수될 수 있기 때문에 지하수가 존재에 상관없이 즉시침하가 발생하고 이 즉시침하가 전체침하량과 같다고 볼 수 있다. 침하량 계산은 식 (2.31)을 사용할 수 있다. 반면에 점토지반은 다르다. 만일, 점토지반에 지하수가 아예 없다면 공기는 쉽게 빠져 나갈 수 있으므로, 역시 즉시침하가 발생하며, 이 침하는 전체 침하량과 같을 것이다.

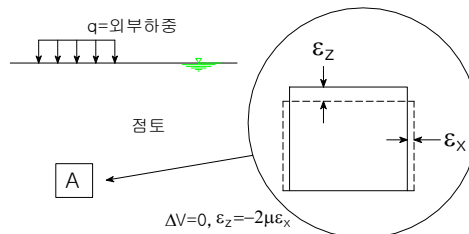


그림 2.25 점토 지반에서의 즉시침하

만일 점토지반이 물로 차 있다면 문제는 달라진다. 점토지반의 투수계수가 작기 때문에 물이 쉽게 빠져나가지 못하게 되고 이때의 포화된 점토지반에서의 즉시침하란 체적변화가 없는 상태에서의 침하를 말한다. 즉 하중이 가해지는 방향으로 흙이 변형하거나, 변형의 양만큼 흙이 옆으로 팽창하여 결과적으로 전체부피의 변화는 발생하지 않을 때의 침하를 말한다. 그림 2.25에서 체적변형 $\Delta V=0$ 이어야 하므로, $\varepsilon_x = -\frac{1}{2}\varepsilon_z$ 의 관계가 성립된다. 즉 배수가 전혀 되지 않을 때의 점토의 포아송비를 μ_u 라고 하며 그 값은 언제나 0.5이다. 또한 배수가 전혀 되지 않을 때의 탄성계수를 E_u 라고 한다.

• 압밀침하

포화된 점토에 외부하중이 가해지면, 즉시 침하가 일어남과 별도로 과잉간극수압도 증가하게 된다. 궁극적으로 외부하중으로 인하여 흙입자는 수축하려는 경향이 있고, 물로 인하여 수축하지 못하는 대신 수압을 상승시키기 때문이다. 생성된 과잉간극수압은 시간이 지남에 따라 점점 소산되어 궁극적으로는 모든 응력의 증가량을 흙이 받게 될 것이다. 처음에는 비록 물이 하중을 받게 되었다고, 물은 천천히 빠져나가게 되고, 물이 빠져나갈수록 증가된 응력을 물이 받는 것으로부터 흙입자가 받아주는 양상으로 변화가 발생하게 된다. 흙입자가 응력을 받으면 가해준 응력으로 인하여 침하를 하게 되는데, 이를 압밀침하라고 한다.

일반적으로 포화된 점토는 즉시침하보다 압밀침하가 크기도 훨씬 크며, 또 침하에 소요되는 시간도 길어져서 주로 문제가 되는 것은 압밀침하이다.

초기에는 유효상재압력만 받게 된다.

$$\sigma'_0 = \text{유효상재압력 } (= \gamma'z) \quad , \quad u_0 = \text{초기 정수압 } (= \gamma_w z)$$

하중재하 직후에는 재하된 전응력 만큼 과잉간극수압이 발생하게 되고 물이 빠져나가지 못하므로 응력상태는 유효응력에 변화가 없다. 이때 포화된 점토입자에서 즉시침하에 관계되는 응력은 응력의 증가량 중에서 과잉간극수압 Δu 를 제외한 것이다. 만약 $\Delta u > \Delta \sigma_3$ 라면 위의 입자에서 수평방향 유효응력은 (-)이다. 즉, 수평방향으로 팽창이 일어날 것이다. 이 팽창되는 양만큼 연직 방향으로 침하가 발생되며 이것이 즉시침하이다.

시간이 경과함에 따라 압밀 현상으로 인하여 생성된 과잉간극수압이 소산되어 궁극에 가서는 발생된 응력의 증가량을 모두 흙이 받아주는 유효응력 증가 현상이 발생하

게 되며 응력상태는 그림 2.26과 같이 된다.

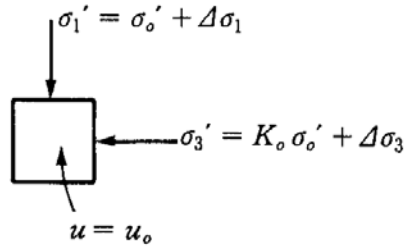


그림 2.26 압밀 완료 후 ($t \approx \infty$) 유효응력변화

(3) 침하량 계산

• 일차압밀침하

침하가 발생하기 전에는 그림 2.27 (a)와 같이 토립자의 부피(V_s)가 1이라면 간극의 부피는 e_0 이며, 침하가 완료된 후에는 그림 2.27 (b)와 같다. 즉, 토립자는 비압축성이므로 부피의 변화가 없으나 간극의 부피는 배수에 의해 Δe 만큼 감소한다. 그러므로, 흙의 변형률(ε_v)은 다음과 같다.

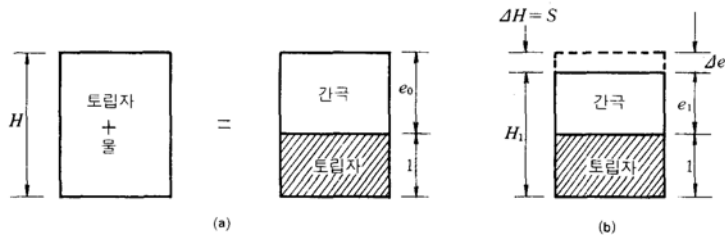


그림 2.27 삼상도로부터의 침하량 계산

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H} = \frac{S}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.32)$$

식 (2.32)을 침하량 S에 대해 정리하면,

$$S = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H = \varepsilon_v H \quad (2.33)$$

식 (2.33)은 침하량을 간극비의 함수로 표현한 식이다. 간극비를 응력항으로 변경하기 위한 것이 e - $\log p$ 곡선이다.

- 일차원 침하량 산정이론

① e - $\log p$ 곡선에 의한 침하량

압력증가에 따른 공극비의 감소는 다음과 같다.

$$\frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = \frac{\Delta e}{\Delta p} = a_v \quad (2.34)$$

체적변화(Volume Change)로 표시하면 다음과 같고 여기서 m_v 를 체적변화계수라고 한다.

$$\begin{aligned} m_v &= \frac{\Delta V/V}{\Delta p} = \frac{\Delta V}{V \Delta p} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \times \frac{1}{p_2 - p_1} \\ &= \frac{1}{1 + e_1} \times \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = \frac{a_v}{1 + e_1} \end{aligned} \quad (2.35)$$

압축은 일축적으로 되므로 높이의 변화로 표시하면 다음과 같이 표현된다.

$$m_v = \frac{\Delta H/H}{\Delta p} = \frac{\Delta H}{\Delta p} \frac{1}{H} \quad (2.36)$$

따라서, 시료의 높이 침하량은 압축계수 또는 체적변화계수를 이용하여 식 (2.37)로 산정할 수 있다.

$$\Delta H = m_v \Delta p H = \frac{a_v}{1 + e} \Delta p H \quad (2.37)$$

e - $\log p$ 곡선의 c_c 와 관련짓기 위해 c_c 의 정의를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$c_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 / p_1}$ 에서, 간극비의 변화량 $\Delta e = c_c \times \log \frac{p_2}{p_1}$ 을 식 (2.34)에 대입하면 침하

량은 식 (2.38)로 산정할 수 있다.

$$S = \frac{c_c}{1+e_0} H \log \frac{p_2}{p_1} \quad (2.38)$$

- 흙의 이력상태에 따른 침하량

① 정규압밀점토에서의 압밀침하량

정규압밀점토는 압축지수 c_c 인 처녀압밀곡선만 존재하므로 다음과 같다. 하중증가분이 정규압밀 상태에 해당되는 경우 식 (2.40)과 같이 산정된다.

$$\Delta e = c_c \log \frac{p_1'}{p_0'} = c_c \log \frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \quad (2.39)$$

$$S = \frac{\Delta e}{1+e_0} H = \frac{c_c H}{1+e_0} \log \frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \quad (2.40)$$

② 과압밀점토에서의 압밀침하량

과압밀점토의 경우에는 외부하중으로 인하여 응력의 증가가 있다하더라도, 유효응력이 선행압밀응력 p_c' 에 도달할 때까지는 재압축 곡선을 따라 침하하므로 침하량이 크지 않으며, p_c' 이상의 응력증가분에 대하여만 처녀압축곡선을 따라 침하할 것이다. 유효응력 증가분이 p_c' 을 넘느냐, 넘지 않느냐에 따라 다음과 같이 침하량 계산식이 달라진다.

$\Delta p \leq p_c' - p_0'$ 인 경우 : 연직응력 증가분이 선행압밀 하중 이전의 경우, 전 침하량은 c_r 에 의해 결정되고 이때 간극비의 변화량은 식 (2.41)와 같고 최종침하량은 식 (2.42)로 산정할 수 있다.

$$\Delta e = c_r \log \left(\frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \right) \quad (2.41)$$

$$S = \frac{c_r H}{1+e_0} \log \frac{p_0' + \Delta p}{p_0'} \quad (2.42)$$

$\Delta p \geq p_c' - p_0'$ 인 경우 : 연직응력 증가분이 선해압밀 하중 이상인 경우 전 침하량은 c_c 와 c_r 에 의해 결정된다. 이때 과압밀 영역에서의 간극비의 변화량은 c_r 을 이용하여 되고, 정규압밀 영역에 대해서는 c_c 를 이용하여 식 (2.32)와 같이 나타낼 수 있고, 최종침하량은 식 (2.44)로서 산정할 수 있다.

$$\Delta e = c_r \log \frac{p_c'}{p_0'} + c_c \log \left(\frac{p_0' + \Delta p}{p_c'} \right) \quad (2.34)$$

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{c_r H}{1 + e_0} \log \frac{p_c'}{p_0'} + \frac{c_c H}{1 + e_0} \log \frac{p_0' + \Delta p}{p_c'} \\ &= \frac{H}{1 + e_0} \left(c_r \log \frac{p_c'}{p_0'} + c_c \log \frac{p_0' + \Delta p}{p_c'} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

● 압밀침하의 시간에 따른 변화

재하 후 시간에 따른 압밀침하량은 앞서 정의한 압밀도를 바탕으로 임의시간에서 침하량 ΔH_t 는 식 (2.45)과 같이 산정할 수 있고, 이때의 압밀도는 식 (2.46)와 같이 압밀계수 c_v 를 이용하여 시간 계수 T_v 를 산정할 수 있고, 산정된 시간계수를 바탕으로 시간계수-압밀도 관계곡선에서 구할 수 있다.

$$\Delta H_t = \Delta H \times U \quad (2.45)$$

여기서, ΔH : 압밀이 완료된 후의 총압밀침하량 , U : 압밀도

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (2.46)$$

● 이차압밀침하

앞서 살펴보았듯이 이차압밀은 과잉간극수압이 소산된 이후에도 계속해서 발생하는 침하를 이차압밀이라고 한다. 이때의 침하량은 이차압밀부분에서의 기울기인 이차압축지수를 이용하여 식 (2.47)로 산정할 수 있다.

$$S = \frac{c_a}{1+e_p} H \log \frac{t_2}{t_1} \quad (2.47)$$

$$= c_a' H \log \frac{t_2}{t_1} ; c_a' = \frac{c_a}{1+e_p} \quad (2.48)$$

여기서, e_p : 일차압밀 완료시의 간극비 , H : 점토층의 두께

마. 압밀의 촉진

압밀의 촉진공법은 압밀시 소산되는 간극수의 배수거리를 인위적으로 단축시킴으로써 보다 빠른 압밀효과를 촉진시키기 위한 공법이라 할 수 있다. 압밀 촉진을 위한 연직배수 공법은 연약한 점성토 지반내에 인공적으로 연직 배수재를 다수 설치하여 배수 거리를 단축시킴으로써 압밀을 촉진시키는 공법으로 사용되는 드레인의 종류에 따라 크게 Sand Drain, Pack Drain, Plastic Board Drain(PBD) 공법 등으로 구분된다.

이들 공법은 모두 Terzaghi의 압밀이론에 따른 유사공법으로 미국 및 스웨덴등지에서 개발되었으며, 본 설계에 적용된 PBD공법은 연직배수재(PBD)를 연약지반내에 일정한 간격으로 타입하여 압밀을 촉진하는 공법이다. 그림 2.28은 PBD공법의 시공 장면을 나타내며, 그림 2.29는 연직배수 공법의 원리를 나타내고 있다.

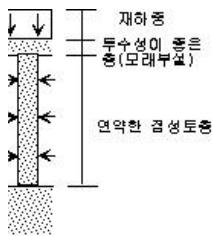


(a) 케이싱 관입

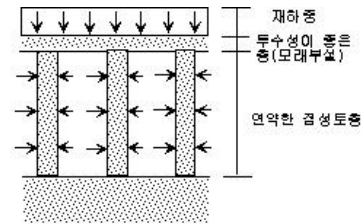


(b) 연직배수재 타입

그림 2.28 연직 배수재의 시공 장면



(a) 케이싱 관입



(b) 연직배수재 타입

그림 2.29 연직배수재 공법의 원리

제2절 신뢰성 설계 방법

1. 신뢰성의 개념

공학문제에 필연적으로 내재될 수밖에 없는 임의성(randomness), 불확실성(uncertainty)에 대한 대비를 위해 기존의 확정론적 방법에서는 주로 경험에 입각한 안전율(safety of factor)을 사용하여 여유강도를 두어 이론상 파괴의 위험이 없는 것으로 가정하지만 실제 현실에서는 붕괴사고가 일어나는 등 모순이 있다. 이에 반해 불확실성 자체를 정량적으로 고려하는 신뢰성 이론에서는 작지만 0이 아닌 파괴의 가능성을 고려하여 공학문제에서의 안전성 평가를 수행하는 것이다. 신뢰성 해석은 파괴의 가능성을 정량적인 파괴확률(probability of failure)로서 표현한다. 신뢰성 해석에 따른 설계는 다음의 3단계 Level이 있다.

Level 1의 방법은 구조물이 한계상태를 넘는 확률이 허용치 이하로 되도록 각 변수의 변동계수를 고려한 특성치와 안전율을 정해서 안정성을 조사한다. 이러한 방법들을 이용함으로써 극단적인 안정성이다 극단적인 위험성을 가진 구조물을 설계 할 위험을 감소시키는 것이 가능하다. Level 1의 방법은 이미 각종의 설계 Code로써 도입되었는데 예를 들어 국제 표준화 기구(ISO)에 제정된 ISO규격에 있어서, 구조물의 설계법의 기본으로서 Level 1의 설계법이 확립되어(ISO 2394 : General Principles on Reliability for Structures).

Level 2의 방법은 각 변수의 확률분포를 자료의 분석이나 추론에 의거하여 정규분포 등 적절한 분포로 가정하여, 내력 및 하중의 평균치와 표준편차로부터 구해지는 안정성 지표인 신뢰성지수(reliability index)가 목표치를 상회하는 것을 확인한다.

Level 3은 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작을 확률, 즉 파괴확률(probability of failure)을 상대적으로 정확하게 산정하는 방법이다. Level 3은 설계에 사용되는 모든 확률변수분포가 명확하게 규명되어야 할 필요가 있다. 이에 비하여 Level 1 및 Level 2의 방법에 있어서는 비교적 쉽게 설계 계산을 하는 것이 가능하다.

표 2.1 신뢰성 설계법의 Level에 따른 분류

구분	해석 및 설계
Level I (하중저항 계수방법)	<ul style="list-style-type: none"> 구조물이 한계상태를 넘는 확률이 허용치 이하로 되도록 각 변수의 변동계수를 고려한 특성치와 안전율에 따라 안정성을 검토 치명적인 위험성을 가진 구조물을 설계할 위험을 감소시키는 것이 가능한 설계 방법으로 이미 각종 설계 Code로써 도입되어 있는 방법임 ▶ 국제 표준화 기구(ISO)에 제정된 구조물 설계법의 기본으로서 Level I의 설계법이 확립되어 있음
Level II (제2모멘트 기법)	<ul style="list-style-type: none"> 각 변수의 확률분포를 데이터 통계분석에 기초하여 적절한 분포로 가정한 후 내력 및 하중의 평균치와 표준편차로부터 구해지는 안정성 지표인 신뢰성지수(Reliability Index) 산정 및 검토
Level III (전확률 분포기법)	<ul style="list-style-type: none"> 구조물의 파괴에 관계된 모든 확률변수들의 평균과 분산 및 결합 확률밀도함수(Joint Probability Density Function)를 이용하여 파괴확률을 정확하게 산정하는 방법 일반적으로 파괴확률을 구하기 위해서는 파괴영역에 대한 결합 확률밀도함수의 적분이 필요하나 이는 수치적으로 산정하기 매우 어려우므로 시뮬레이션(Simulation) 기법이 많이 사용됨
Level IV (신뢰성에 기초한 LCC 최적설계)	<ul style="list-style-type: none"> Level I~III방법에 의한 구조물의 파괴확률과 구조물 파괴시 발생하는 비용을 고려하여 구조물의 중요도에 따른 성능기준설계(Performance Based Design)가 가능 일반적으로 Level IV방법은 파괴확률을 일반설계조건이외 추가적인 제약조건으로 고려하고 공사비용을 최소화하는 설계를 유도하는 방법으로 알려져 있음 하지만 최근에는 공용간 성능저하 및 하중의 발생확률을 고려한 파괴확률을 구하고, 파괴발생시 소요되는 기대비용에 따른 총생애주기비용(Life Cycle Cost: 이하 LCC)을 최소화하는 최적설계가 이루어지고 있음

2. 신뢰성지수

신뢰성 해석방법에서 중요한 의미를 가지는 것이 신뢰성지수인데 이를 계산하기 위하여 구조물의 안전(success)과 파괴(failure)를 판단할 수 있는 설계기준(design criterion) Z 는 구조물에 가해지는 하중요소(load factor) S 와 그에 저항하는 구조물의 저항요소(resistance factor) R 로 표시한다.

$$Z = R - S \quad (2.49)$$

여기서 $R > S$ 이면 구조물이 안전한 경우이고 $R < S$ 이면 구조물의 파괴가 발생한 경우이므로 $Z=0$ 은 구조물의 안전과 파괴의 경계가 된다. R 과 S 는 (+)의 영역을 취하고, 각각 $N(\mu_R, \sigma_R^2)$, $N(\mu_S, \sigma_S^2)$ 의 정규분포를 따른다.

R 과 S 가 서로 독립적이라면 식 (2.50)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N(Z_m, \sigma_z^2) = N(\mu_R - \mu_R \sigma_{2R} + \sigma_{2R}) \quad (2.50)$$

식 (2.50)와 같은 설계기준식은 대개가 해석의 대상이 되는 구조물의 파괴양식(failure mode)에 따라 실행함수(performance function) 또는 한계상태함수(limit state function)식으로 유도되며 식 (2.51)과 같이 표현된다.

$$g(y) = g(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \quad (2.51)$$

여기서, $y = (y_1 + y_2 + y_3, \dots, y_n)$ 는 확률 입력 변수들의 벡터이다.

실행함수인 $g(y)$ 가 '0'일 때를 한계상태라 하고 이때의 곡선 표면을 한계상태면(limit state surface)이라 한다. 이 파괴면을 기준으로 $g(y) > 0$ 일 때의 상태가 안전한 상태가 되고, $g(y) < 0$ 이면 파괴상태가 된다. 설계 변수 $y_1 + y_2 + y_3, \dots, y_n$ 의 안전한 상태, 한계상태, 파괴시의 확률은 식 (2.52) ~ 식 (2.54)과 같은 확률밀도함수의 적분값으로 나타낼 수 있다.

$$P_s = \int_{g(y) > 0} f_y(y) dy \quad (2.52)$$

$$\text{limit state} = \int_{g(y) = 0} f_y(y) dy \quad (2.53)$$

$$P_f = \int_{g(y) < 0} f_y(y) dy \quad (2.54)$$

여기서, P_s : 구조물이 안전한 상태일 확률, P_f : 구조물이 파괴상태에 이를 확률

강도 'R'과 하중 'S'의 관계를 고려한다면 그림 2.30과 같이 파괴영역과 안전영역을 구분 지을 수 있다. 그림 2.30에서 Z 의 평균인 m_z 로부터 파괴 영역까지 떨어진거리($Z=0$)는 Z 의 표준편차인 σ_z 와 신뢰성지수 β 의 곱($=\beta\sigma_z$)으로 표시되는데(식 2.55) 여기서 신뢰성지수 β 는 Z 확률밀도함수

의 중심에서 파괴영역까지 거리 m_z 를 Z 의 표준편차 σ_z 로 정규화하여 표현한 것이며 이것은 시스템의 안전도를 나타내는 지수로 사용한다. 즉 그림 2.31에서 신뢰성지수 β 가 커질수록 시스템의 파괴확률은 더 작아지게 된다. 식 (2.56)은 Z 변수의 평균을 표준편차 R 로 나눈 신뢰성지수이다.

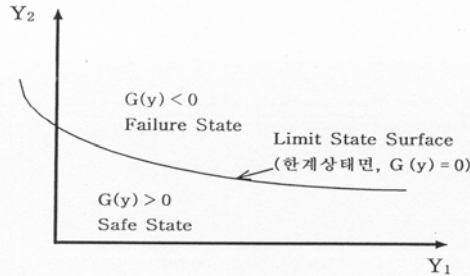


그림 2.30 Limit State Surface에 의한 파괴영역과 안전영역의 구분

$$Z = m_z - \beta\sigma_z = 0 \quad (2.55)$$

여기서, $m_z = m_R - m_S$ 이므로

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} \quad (2.56)$$

여기서, β : 신뢰성지수, m_R : 저항항의 평균, m_S : 하중항의 평균, σ_z : Z 표준편차이다.

안정성 지표인 신뢰성지수 β 는 파괴를 발생시키는 파괴점($z=0$)으로부터 평균치 Z_m 이 어는 정도 떨어져 있는가를 나타내는 척도이다. 그림 2.32에는 파괴확률 P_f 와 신뢰성지수 β 의 관계를 나타내었는데 파괴확률이 작을수록 신뢰성지수 β 는 크게 됨을 알 수가 있다. 통상의 토목구조물이 가지는 신뢰성지수 값은 대략 1.5~4.0 범위에 있다.

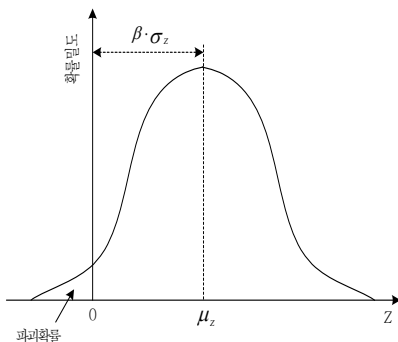


그림 2.31 신뢰성지수 β 와 R (저항), S (하중)과의 관계

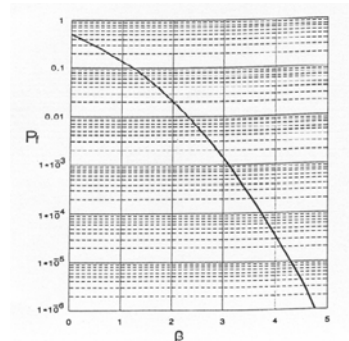


그림 2.32 파괴확률과 안정성 지표의 관계

3. Level 1의 신뢰성 설계법

Level 1의 신뢰성 설계법은 신뢰성 해석에 의한 확률론적 안전성 평가라는 기본틀을 유지하면서 기존의 확정론적 접근법에 기초하여 마련된 설계시방서에서와 유사한 형태의 설계지침을 제공한다. 즉, 이 방법에서는 최종적으로 구조물이 확보해야 할 안전도를 목표 신뢰도 지수(target reliability index)로 삼아 기존의 안전계수 개념과 유사하게 각 저항성분과 하중성분에 대해 목표한 안전성을 확보하기 위한 부분안전계수(partial safety factor)들을 계산하여 이용한다.

우선 다음과 같이 하나의 저항성분 R과 하나의 하중성분 L에 의해 정의되는 한계상태식을 살펴보면,

$$g = R - L \quad (2.57)$$

신뢰도지수 β 는 다음과 같으므로,

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (2.58)$$

하중성분의 평균과 표준편차, 저항성분의 표준편차가 결정된 경우에 목표 신뢰도 지수 β_T 를 보장하도록 하기 위한 저항성분의 평균은 다음과 같이 얻어진다.

$$\mu_R = \mu_L + \beta_T \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2} \quad (2.59)$$

식 (2.59)는 동일한 안전도 β_T 를 위한 설계를 목적으로 하더라도 한계상태식을 정의하는 확률변수의 이산성이 클수록 저항성분의 평균도 증가하므로, 확정론적 입장에서 일반적으로 이용되는 중심안전계수(central safety factor) Θ 가 증가되어야 함을 알 수 있다.

$$\Theta = \frac{\mu_R}{\mu_L} \quad (2.60)$$

한편 식 (2.57)의 한계상태식에 대하여 확률론적으로 신뢰도지수 β_T 이상의 안전도가 보장되기 위해서는 한계상태식의 평균과 표준편차를 각각 μ_G , σ_G 라고 할때, 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\mu_G \geq \beta T \sigma_G \quad (2.61)$$

한계상태식의 평균 μ_G 와 표준편차 σ_G 는 식 (2.62), 식(2.63)로 나타내어진다.

$$\mu_G = \mu_R - \mu_L \quad (2.62)$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2} \approx \alpha(\sigma_R + \sigma_L) \quad (2.63)$$

따라서, 식 (2.61)은 식 (2.64)으로부터 식 (2.65)와 같이 나타내어질 수 있다.

$$\mu_R - \mu_L \geq \beta T \alpha (\mu_R + \mu_L) \quad (2.64)$$

$$\mu_R (1 - \beta T \alpha \delta_R) \geq \mu_L (1 + \beta T \alpha \delta_L) \quad (2.65)$$

여기서, δ_R 과 δ_L : 각각 저항성분과 하중성분의 분산계수(C.O.V : Coefficient of Variation)

설계단계에서 수행되는 구조 안전성을 평가에서는 각 설계변수의 평균값보다는 평균값으로부터 적절하게 편차를 준 공칭값(nominal value)을 이용하는 것이 일반적이므로, 저항성분과 하중성분의 공칭값을 각각 R_n , L_n 으로 표시하고 평균과의 비는 식 (2.66)과 같이 정의할 수 있다.

$$n_R = R_n / \mu_R, \quad n_L = L_n / \mu_L \quad (2.66)$$

또한, 식 (2.65)을 공칭값을 이용하여 표현하면 식 (2.2.19)와 같다.

$$\left(\frac{1 - \beta T \alpha \delta_R}{n_R} \right) R_n \geq \left(\frac{1 + \beta T \alpha \delta_L}{n_L} \right) L_n \quad (2.67)$$

이때 식 (2.65)에서 공칭값 R_n 과 L_n 의 계수를 각각 Φ 와 Υ 로 두면 식 (2.68)과 같다.

$$\Phi R_n \geq \Upsilon L_n \quad (2.68)$$

여기서, Φ : 저항감소계수 / Υ : 하중증가계수, 부분안전계수로 통칭

이러한 Level 1의 신뢰성 설계법에서는 구조물의 파괴확률이 허용치 이하로 되도록 안전계수가 설정된다. 성능함수가 선형이 아닌 경우에는 이러한 상태에서 안전계수를 정하는 것은 곤란한 경우가 있다. Level 1의 방법은 하중강도계수 설계법(Load and Resistance Factor Design : LRFD법)이라고도 한다.

4. Level 2의 신뢰성 설계법

Level 2의 신뢰성 설계법은 신뢰성지수값 자체를 판정기준으로 한 것이다. 즉, 설계된 구조물의 신뢰성지수를 산출해서 이것이 목표치를 넘는가를 확인한다. 수식으로 표현하면 식 (2.69)와 같다.

$$\beta \geq \beta_T \quad (2.69)$$

Level 1의 방법에서는 안전계수와 특성치를 이용해서 안전성을 판정하기 때문에 구조물의 신뢰성지수가 목표치 이상으로 되는가를 간접적으로 확인하는 것 밖에 되지 않는 설계 계산이다. 이것에 비하여 Level, 2의 방법에서는 신뢰성지수가 목표치를 반드시 넘도록 되는 것이 보증되며 신뢰성지수의 계산에는 종래에는 없던 과정이 설계 계산중에서 필요하게 된다.

신뢰함수의 형태가 복잡하여 직접 적분할 수 없는 경우 한계상태함수를 1차 근사화하여 파괴확률을 구하는 방법으로 Level II 방법을 이용하여 신뢰성지수 및 파괴확률을 구하는 과정은 다음과 같다.

우선 (식 2.70)와 같은 한계상태 함수를 평균에 대해 (식 2.71)과 같이 근사화 시킨다.

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.70)$$

$$Z = g(\mu_{x1}, \mu_{x1}, \dots, \mu_{xn}) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{xi}) \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\mu_{xi}} \quad (2.71)$$

(식 2.71)을 이용하여 신뢰함수의 평균과 표준편차를 구하면 각각 다음과 같다.

$$\mu_z = g(\mu_{x1}, \mu_{x2}, \dots, \mu_{xn}) \quad (2.72)$$

$$\sigma_z = \sum_i \sigma_{xi}^2 \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\mu_{xi}} \right)^2 \quad (2.73)$$

(식 2.72)과 (식 2.73)를 이용하여 신뢰성지수와 파괴확률을 구하면 다음과 같이 최종적인 신뢰성지수와 파괴확률을 산정할 수 있다.

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (2.74)$$

$$P_f = 1 - \phi(\beta) \quad (2.75)$$

여기서, $\phi(\cdot)$ = 표준정규분포(평균=1.0, 표준편차=0)에 대한 누적확률밀도함수

5. Level 3의 신뢰성 설계법

한계상태식을 구성하는 모든 확률변수의 결합 확률밀도함수가 주어지면 해석적인 적분을 이용하여 파괴확률을 계산할 수 있으며, 이와 같은 방법으로 주어진 파괴양식의 한계상태식에 대한 파괴확률을 해석적으로 산정하는 방법을 Level 3 방법이라고 한다. 대부분의 경우 적정의되는 파괴확률을 해석적으로 계산하기가 곤란하며, 특히 확률변수가 많을 경우 다중적분의 수행에 많은 어려움이 있다. 이러한 이유로 순수한 의미에서 해석적 접근법을 이용한 파괴확률의 산정은 신뢰성 해석법으로 일반화되지 못하고 단순히 이론적으로 신뢰성 해석의 유효성을 입증하기 위해 사용되며, 대부분 다음에 설명할 추출법(Simulation technique)에 의해 근사적으로 파괴확률을 추정하는 방법을 이용하는 것이 일반적이다.

정리해보면 Level 3 방법은 기본적으로 모든 확률변수의 확률분포가 평균과 분산 또는 표준편차만에 의해 모든 통계적인 특성이 결정되는 정규분포라는 가정을 전제로 하며, 파괴확률의 간접적인 지표인 신뢰성지수(Reliability index)를 계산하는 방법이고 Level 3는 한계상태식을 정의하는 확률변수들의 결합밀도함수를 직접 적분하거나 직접 모의실험(Simulation)을 한 결과를 이용하여 근사적으로 구조물의 파괴확률을 산정하는 방법이라고 할 수 있다. 이상에서 언급한 3개의 신뢰성 설계법의 Level의 안전성 조사식 등을 표 2.2에 나타내었다.

표 2.2 신뢰성 설계법의 Level에 따른 분류

Level	안전성 조사식	기존 Parameter
Level 1	$R_d \geq S_d$	설계용 값
Level 2	$\beta \geq \beta_T$	안전성 지표
Level 3	$P_f \leq P_{fa}$	파괴 확률

6. 일계 · 이계 신뢰분석법 및 Monte Calro Simulation

일반적으로 파괴확률을 계산하기 위해서는 각 변수들이 가지고 있는 함수들의 확률분포를 정확히 알아야 한다. 하지만 실제로는 데이터의 부족으로 인하여 확률분포를 확실히 안다는 것은 어렵다. 더구나 확률분포가 정의되어졌다 할지라도 복잡한 적분식으로 계산한다는 것은 비실용적이기 때문에 일계 신뢰 분석법 또는 이계 신뢰 분석법과 같은 근사법으로 해를 구하는 방법이 널리 사용된다.

가. 일계 신뢰 분석법(First Order Reliability Method)

일계 신뢰 분석법(FORM)에서의 한계상태함수(Limit state function)는 표준 공간에서 원점으로부터 가장 가까운 linearization point에서 tangent 평면으로 대체된다. 이 linearization point를 design point라 하며 파괴 영역상의 모든 점 중에서 제일 큰 확률밀도를 가지고 있고 그림 2.33에 나타나 있다. 일계 신뢰분석법(FORM)에서의 신뢰성지수는 식 (2.76)과 같이 나타내어진다.

$$\beta = \alpha^* \cdot y^* \quad (2.76)$$

여기서 α^* : design point에서 파괴영역으로 향하는 단위수직선

y^* : 표준공간의 design point

일계 신뢰분석법의 파괴 확률 P_n 의 근사해는 식 (2.77)과 같이 나타내어진다.

$$P_n = \phi(-\beta) \quad (2.77)$$

여기서, $\phi(\cdot)$: 누적정규분포함수(cumulative normal distribution function)

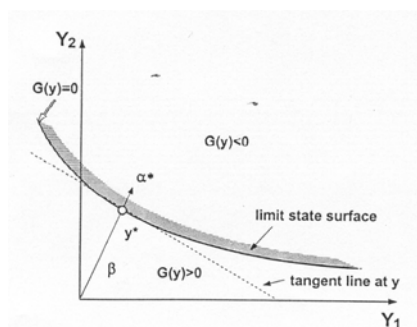


그림 2.33 이차원 표준공간에서의 일계신뢰분석시 신뢰성지수의 표현

나. 이계 신뢰 분석법(Second Order Reliability Method)

일계 신뢰 분석법에서 limit state surface는 가장 최소의 거리를 가지는 한 점으로 표현이 되며 design point의 근처에서는 접선에 의하여 구성된 평면으로 나타내어진다. 하지만 한계 상태 함수가 아주 큰 비선형 특성을 나타내거나 입력변수의 변화 정도가 크게 되면 limit state surface는 변곡점 곡률이 커지거나 여러 개의 곡선이 될 수 있다. 지반 문제 해석 시 변수의 분산폭이 클 경우에는 이러한 비선형 한계상태면이 형성될 수 있어 이계 신뢰 분석법에 의한 해석이 필요하게 된다.

이계 신뢰 분석법(SORM)은 y^* 부근에 대한 파괴면의 곡률을 2차 곡선을 이용하여 표현하는 근사법에 의해 계산하는 방법이다. 계산 방법에는 한계 상태 함수 $g(y)$ 에 대한 Taylor의 전개와 limit state surface의 기하학적 물성치를 바탕으로 한 포물면 근사법을 사용한다(Fiessler et al. 1979).

포물면 근사법(Paraboloid approximation methods)에는 design point에서 포물면의 접근면은 limit state surface 상에서의 $n-1$ 개의 점들의 좌표로 정의한 curvature fitted paraboloid (Breitung, 1984 ; Tvedt, 1988)와 curvature fitted paraboloid의 대안으로 Der Kiureghian(1987) 등이 제안한 point-fitted paraboloid가 있다.

다. Monte Carlo Simulation

Monte Carlo Simulation은 파괴확률을 근사적으로 추정하는 가장 보편적인 기법중 하나이다. 즉 확률변수들의 결합 확률밀도함수를 이용하여 각 확률변수들의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출하여 충분한 수위 확률변수의 표본집단(set)을 생성한 후, 생성된 각 확률변수들을 한계상태식에 대입하여 파괴확률을 산정한다. 그 결과로 모두 N 개의 확률변수 set를 추출하였을 때 한계상태식이 0보다 작은 경우가 nf 번 관측되었다면 파괴확률 P_f 는 식 (2.78)와 같이 근사적으로 추정할 수 있다.

$$P_f \approx \frac{nf}{N} \quad (2.78)$$

여기서, nf : 한계상태식이 0보다 작은 경우의 횟수 / N : 확률변수의 추출횟수

Monte Carlo Simulation의 장점은 한계상태식에 어떠한 변형도 가하지 않고 원래의 형태를 그대로 보존하며 파괴확률을 구할 수 있다는 점과, 한계상태식이 확률변수의 수학적함수의 형태로 주어지지 않은 경우에도 파괴여부에 대한 판단을 내릴 수만 있다면 파괴확률 산정이 가능하다는 점이다.

식 (2.78)로 추정된 파괴확률의 정확성을 보장하기 위해서는 전체 추출횟수 N의 값이 충분히 클 필요가 있다. Shooman은 n번의 추출로부터 추정된 파괴확률이 P_f 일 때 유의 수준 (significance level) 5%에서의 오차 추정식으로 다음과 같은 식을 제안하였다(Shooman, 1968).

$$\text{error } \in \% = 200 \sqrt{\frac{1 - P_f}{n \cdot P_f}} \quad (2.79)$$

Monte Carlo Simulation에서 추정된 파괴확률이 적절한 신뢰도를 갖기 위해서 식 (2.79)에서 표현된 전체 추출회수 N의 값으로 취하는 것이 일반적이다.

$$N \geq \frac{10 \text{ or } 100}{P_f} \quad (2.80)$$

7. 민감도 측정

First order reliability method의 장점은 신뢰성지수와 기본 변수에 대하여 기대되는 파괴확률과 신뢰성지수에 대한 민감도를 측정할 수 있게 해준다. 가장 기본적인 민감도 측정은 표준공간에서 design point의 좌표에 대해서 신뢰성지수, β 의 편미분이고 이것은 식 (2.81)과 같다.

$$\nabla y \cdot \beta = a(y^*)T \quad (2.81)$$

$$\text{여기서, } a(y^*)T = \frac{\nabla G(y^*)}{|\nabla G(Y^*)|}, \quad y_i^* : \text{design point}$$

표준공간에서의 design point의 좌표에 대한 신뢰성지수, β 의 민감도는 연쇄법칙(chain rule)에 의해서 표준편차의 행렬과 단위 벡터를 곱하여 gradient vector의 크기를 다음과 같이 측정하여 상관도를 고려한 순수한 변수의 민감도 벡터 ' γ '를 식 (2.82)과 같이 정의하였다.

$$\gamma(x) = \frac{D \cdot \alpha(y)^T J_{yx}}{|D \cdot \alpha(y)^T J_{yx}|} \quad (2.82)$$

여기서 D는 y의 표준편차의 diagonal matrix이고 J_{yx}는 jacobian 변환값이다. 민감도 벡터는 limit state function(g(x))에서의 deterministic parameter에 대하여도 구할 수 있다. 'n'는 deterministic parameter의 벡터이고, g(x) = (x, n)라면 β의 n에 대한 민감도는 식 (2.83)과 같은 벡터로 나타낼 수 있다.

$$\nabla_n \cdot \beta = \frac{1}{|\nabla G(y^*)|} \nabla_n \cdot g(x^*, n) \quad (2.83)$$

x의 분포함수를 정의하는 계수, θ에 관한 신뢰성지수, β의 민감도는 식 (2.84)와 같다.

$$\nabla_n \cdot \beta = \alpha^* \frac{\alpha y^*(x^*, \theta)}{\alpha \theta} \quad (2.84)$$

여기서, $\frac{\alpha y^*(x^*, \theta)}{\alpha \theta}$ 는 분포계수 θ의 변화에 관한 파괴점에서 표준공간에서의 확률변수의 변화를 나타낸다. 신뢰성지수 β의 확정론적 변수 n나 확률변수 θ에 대한 민감도로부터 일계파괴확률의 민감도는 식 (2.85), 식 (2.86)과 같은 관계로 표현된다.

$$\nabla_n P_f = \phi(-\beta) \nabla_n \beta \quad (2.85)$$

$$\nabla_\theta P_f = \phi(-\beta) \nabla_\theta \beta \quad (2.86)$$

여기서, φ(β) : 표준정규확률분포밀도함수

이러한 민감도 값들은 파괴확률에 가장 많은 영향을 주는 변수들을 확인하는데 사용할 수 있고, 문제의 복잡성을 이해하는데 도움을 준다.

8. 신뢰성 해석의 평가기준

Meyerhof(1982)는 토질 및 기초 공학에서의 안전율을 재조명하였으며, 기초와 지반구조 평가에 있어서 극한한계상태(미끄럼에 대한 불안정, 용기, 침투 및 침식)와 허용한계상태(균열,진동)에 대하여 충분한 안전율의 필요성을 제안하였다.

하중의 종류, 흙의 특성, 구조물 분석에 있어서의 분산계수와 안전율의 관계를 표 2.3와 같이 발표하였으며, 제시된 표 2.4는 허용안전율이며 실험에 의한 값으로써 대상 구조물의 종류, 해석방법, 하중 및 응력의 종류에 따라 허용치가 다를 수 있다. 이에 대응한 각 구조물의 적용 가능한 허용최대 파괴확률은 토공의 경우는 10^{-2} , 옹벽과 호안 구조물은 10^{-3} , 해양구조물은 10^{-4} 이하로 제안하였으며 표 2.5와 같다.

표 2.3 부분 분산성과 부분 안전율(Meyerhof, 1982)

분산계수	하 중	지반정수	해석대상	안전율 (90% 신뢰도)
Very Low < 0.1	Dead loads Static water pressure	Unit weight	Earthworks Earth retaining structure	< 1.1
Low 0.1 - 0.2	Pore water pressure	Index properties (sand), friction	Foundations	1.1 ~ 1.3
Medium 0.2 - 0.3	Live loads Environmental loads	Index properties (clay), Cohesion		1.3 ~ 1.6
High 0.3-0.4		Compressibility, Conolidation, Penetration, Resistance		> 1.6 ~ 2.0
Very high > 0.4		Permeability		> 2.0

$$* \rho = \frac{\sigma}{\mu} \quad (\rho : \text{coefficient of variation, } \sigma : \text{standard deviation, } \mu : \text{mean})$$

표 2.4 최소 전안전계수(Meyerhof, 1982)

파괴형태	해석대상	안전율(Fs)
전 단 (Shearing)	Earthworks	1.3 ~ 1.5
	Earth retaining structure	1.5 ~ 2.0
	Offshore foundation	1.5 ~ 2.0
	Offshore foundation	2.0 ~ 3.0
침 투 (Seepage)	Uplift, Heave	1.5 ~ 2.5
	Piping, Exit gradient	3.0 ~ 5.0

표 2.5 지반공학에서의 허용최대 파괴확률과 신뢰성지수(Meyerhof, 1982)

토질구조물	허용최대 파괴확률(Pf)	신뢰성지수(β)
Earthworks	10 ⁻²	2.33
Earth retaining structure	10 ⁻³	3.10
Offshore foundation	10 ⁻³	3.10
Offshore foundation	10 ⁻⁴	3.80

Whitman(1984)은 지반구조물의 안정성에 영향을 미치는 인자들의 불확실성을 고려하기 위하여 신뢰성계수(coefficient of reliability) CR을 도입하고 CR과 파괴확률 P_f 와의 관계를 아래 식 (2.87)와 같이 나타내었다.

$$CR = 1 - P_f \quad (2.87)$$

신뢰성계수 CR은 구조물의 파괴확률이 1%라는 것보다는 구조물이 99% 안전하다는 것이 사람들에게는 더 허용할 수 있는 심리적인 이유로 많이 사용될 수 있다. 여러종류의 구조물에 대한 인명손실에 따른 파괴의 중요도와 파괴~ 확률과의 관계를 나타내었는데 빌딩과 교량 구조물의 기초의 경우 구조물의 파괴는 국지적으로 제한되어 있어 인명손실이 비교적 적은 관계로 파괴확률의 범위를 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 로 설정하였으며 이에 대한 신뢰성계수 CR의 범위는 99% ~ 99.9%로 나타난다.

댐의 경우는 파괴시 그 피해가 광역적이며 많은 경우 수백-수천명의 인명 피해를 초래하므로 그에 따른 파괴확률은 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 이고 신뢰성 계수 CR의 범위는 99.99% ~ 99.999%로 선정하며 적어도 99.99%이상 파괴가 발생하지 않도록 시공되어야만 한다. 이러한 접근은 신뢰성해석에 의한 접근이 구조물 설계에 유용하게 사용될 수 있는 이유가 될 수 있다.

Priest et al.(1983)은 절토사면의 거동을 판단하기 위한 하나의 가이드 라인으로 인명피해를 기준으로 하여 절토사면을 3가지로 분류하였는데 이표는 분류 경우별 절토사면에 대해 허용할 수 있는 최소안전율과 허용최대 파괴확률을 가지고 사면의 안정성을 판단할 것을 제안하였다.

표 2.6에는 표 2.4에 제시된 최소안전율과 2가지의 파괴확률의 만족여부에 따른 사면의 안정성 및 조치사항을 나타내었다. 예를 들어 사면의 분류기준이 사면이 파괴되었을 때 인명피해가 매우 큰 중요사면에 대해서는 허용할 수 있는 최소안전율이 2.0이고, 최대파괴확률은 안전율 1.0을 기준한 경우 0.3, 1.5를 기준한 경우 0.05를 사용하도록 하고 있다.

표 2.6 통계학적 사면설계기준

Category of slope	Consequences of failure	Examples	Acceptable values		
			Minimum mean F	maximum	
				P (F<1.0)	P (F<1.5)
1	Not serious	Individual benches ; small* temporary slopes not adjacent to haulage roads	1.3	0.1	0.2
2	Moderately serious	Any slope of a permanent or semipermanent nature	1.6	0.01	0.1
3	Very serious	Medium **-size and high*** slopes carrying major haulage roads or underlying permanent mine installations	2.0	0.003	0.05

* : Height < 50m, ** : Height 50 - 150m, *** : Height > 150m

표 2.7 사면상태에 관한 해석 기준

사면의 상태	판 단
Satisfies all three criteria	Stable slope
Exceeds minimum mean F, but violates one of both probabilistic criteria	Operation of slope presents risk that may or may not acceptable ; level of risk can be reduced by comprehensive monitoring programme
Falls below minimum mean F, but satisfies both probabilistic criteria	Marginal slope ; minor modification of slope geometry required to raise mean F to satisfactory level
Falls below minimum mean F and violates one or both probabilistic criteria	Unstable slope : major modification of slope geometry required ; rock improvement and slope monitoring may be necessary

Lacasse et al(1996)은 공간변수(Spatial variability)와 측정방법을 포함한 토질정수의

불확실성에 대해 연구를 하였다. 그림 2.34는 안전율(Safety factor)과 파괴확률(Probability of failure)사이의 관계에 대하여 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 안전율은 동일하지만 지반 물성치의 표준편차 차이에 따라 파괴확률이 크게 차이가 나는 것을 보여주고 있다. 지반물성치에 대한 불확실성이 파괴확률에 크게 영향을 미치기 때문에 안전율만으로는 구조물의 안정성을 평가하는데 한계가 있고 불확실성을 고려한 신뢰성해석이 필요하다는 것을 보여준다.

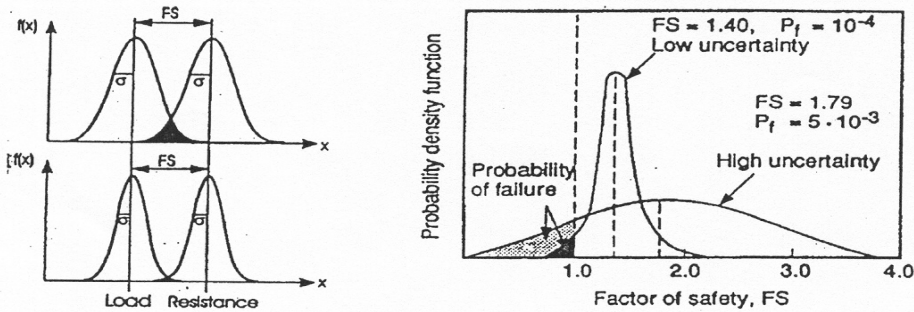


그림 2.34 안전율과 파괴확률사이의 결과

9. 연직배수제를 이용한 압밀침하 이론

Preloading 공법과 연직배수공법은 연약한 점성토지반의 압밀에 소요하는 시간이 배수 거리의 제곱에 비례한다는 압밀이론과 지반퇴적특성에 기인하는 수평방향 투수계수(k_h)가 연직방향투수계수(k_v)보다 큰 특성에 근거하여 지반 중에 일정간격으로 연직방향의 배수재를 설치하여 지반의 압밀촉진, 강도증가를 유발시켜 단기간에 지지력증대, 압밀침하의 조기종료를 목적으로 한다.

가. 일차원 압밀

Terzaghi 압밀이론은 점토지반의 압밀현상을 해석하는데 널리 사용되고 있다. 이 이론은 미소 변형을 압밀론(infinitesimal strain consolidation)으로써 압밀되는 토층의 두께에 비해서 상대적으로 작은 압밀변형을 일으킨다는 가정을 기본으로 한다(Terzaghi, 1943). 본 연구의 경우 원지반에 대해서는 Terzaghi 압밀이론의 적용이 가능한 것으로

로 보아 다음식을 이용하여 침하량 산정을 수행하였다.

$$S_c = \Delta H = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log\left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0}\right) \quad (2.88)$$

여기서, C_c : 압축지수(Compression index)

H : 점토층 두께 (m)

e_0 : 초기간극비

P_0 : 현재의 유효연직압력 (t/m^2)

ΔP : 증가된 연직압력 (상재하중) (t/m^2)

Terzaghi의 미소변형을 압밀이론에서 투수성과 압축성은 압밀이 진행되는 동안 일정한 하중단계에 있어서는 불변의 값으로 가정되고 압밀해석에 있어서 시간에 관계없이 해석대상이 되는 요소의 높이가 항상 일정하다는 가정은 미소한 변위를 일으키는 일차원 압밀침하 현상의 해석에는 어느정도 타당한 것으로 평가된다. 그러나 투기된 준설패립 점성토와 같은 고함수비 상태의 상대적으로 큰 압축성을 갖는 연약지반의 압밀해석에 적용하는 것은 현장조건과 기본가정의 불일치로 인해 적합하지 않다고 판단된다.

기존의 많은 연구에서 Terzaghi 이론의 문제점들을 해결하기 위하여 압밀과정 중에 투수계수나 압축성 등이 변화하는 현상을 고려하여 압밀이론을 구성하는 시도를 하였으나 이론 전개시 미소변형이론에 근거를 두었다는 한계가 있다.(Davis and Raymond, 1965).

Gibson 등은 상당히 큰 변형을 일으키며 압밀 중에 투수계수와 압축성이 변하고 응력-체적 변화의 비선형적인 관계 등을 고려한 일차원 유한 변형률 압밀이론을 제시하였다 (Gibson et al., 1967; Mikasa, 1963).

나. 연직배수 압밀

Preloading 공법의 배수 원리는 표면에 수평배수재(sand mat)를 설치한 후 연약지반에 배수재를 타설하고, 그 상부에 성토 등에 의한 하중을 작용시켜 연약지반 토층내의 과잉간극수압을 유발시킨다. 토층내의 간극수는 성토 하중에 의해 발생한 과잉간극수압의 영향으로 수평으로 이동하여 타설된 배수재의 필터를 통하여 드레인 내부에 침투하여 연직으로 설치된 필터를 따라서 지표면까지 상승한 후 수평배수재를 통하여 배출된다.

배수재가 설치된 지반의 경우 방사형 배수의 경우에 대하여 Barron(1948)은 smear zone과 well resistance의 영향을 고려하지 않은 이상적인 조건 하에 수평방향에 대한 평균 압밀도를 다음과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{F(n)}\right) \quad (2.89)$$

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)(\ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}) \quad (2.90)$$

여기서, U_h : 평균 압밀도
 $F(n)$: 배수재 간격에 대한 factor
 n : 타설 간격비
 T_h : 시간계수

식 (2.89)의 Barron(1948)이 제안한 식을 압밀시간 t 로 표현한다면 다음과 같다.

$$t = \frac{d_e^2}{8C_h} \left[\left(\frac{n^2}{n^2-1}\right)(\ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}) \right] \ln \frac{1}{1-U_h} \quad (2.91)$$

여기서, d_e : 영향원의 직경(cm), C_h : 압밀계수 (cm^2/sec)

Hansbo(1979)는 Barron(1948)이 제안한 식 (2.89)의 $F(n)$ 을 드레인의 간격에 의한 영향, Smer Zone의 영향 그리고 well resistance에 의한 영향을 고려한 상태에서의 수평방향에 대한 평균 압밀도를 다음과 같이 제안하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8T_h}{\mu_{s0}}\right) \quad (2.92)$$

여기서, $\mu_{s0} = \mu_s + \mu_w$

$$\mu_s = \frac{n^2}{n^2-1} \left(\ln \frac{n}{S} + \eta \ln S - \frac{3}{4} \right) + \frac{S^2}{n^2-1} \left(1 - \frac{S^2}{4n^2} \right) + \eta \frac{S^2-1}{n^2-1} \left(1 - \frac{S^2+1}{4n^2} \right)$$

; 교란영역에 대한 factor

$$\mu_{\omega} = \frac{k_h}{q_{\omega}} \pi z (2H - z) \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) : \text{흐름저항에 대한 factor (여러층일 경우)}$$

$$\mu_{\omega} = \frac{2k_h}{3q_{\omega}} \pi H^2 \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) : \text{흐름저항에 대한 factor (한층일 경우)}$$

$$n = \frac{k_h}{k_s} \text{ (Smear Zone의 투수계수비)}$$

$$q_{\omega} = \pi r_{\omega} K_{\omega} \text{ (배수용량)}$$

$$S = \frac{r_s}{r_{\omega}} \text{ (Smear Zone의 직경비)}$$

$$T_h = \frac{t}{de^2} \text{ (시간계수, Time Factor)}$$

$$n = \frac{r_e}{r_{\omega}} \text{ (간격비, Spacing Ratio)}$$

K_h : 교란되지 않은 지반의 수평방향 투수계수 (cm/sec)

K_s : 교란된 지반의 수평방향 투수계수 (cm/sec)

K_{ω} : 연직배수재의 투수계수 (cm/sec)

z : 임의의 깊이 (cm)

H : 압축층의 두께 (cm)

C : 수평방향 압밀계수 (cm²/sec)

r_e : 영향원의 반경 ($r_e = \frac{d_e}{2}$, cm)

t : 압밀도를 구하고자 하는 임의의 시간 (sec)

r_{ω} : 연직배수재의 반경 ($d_{\omega} = 2r_{\omega}$, cm)

Hansbo 제안식을 사용함에 있어 Sand Drain의 경우는 제한 사항이 없으나 Plastic Drain은 띠모양의 Drain(band-shaped prefabricated Drain)이므로 등가원형 배수재로 환산하여 설계에 적용된다. Plastic Drain재의 등가환산직경(equivalent drain diameter)은 현장관측 결과 등으로부터 율변의 0.6~0.9배를 기본직경으로 사용되고 있으며 일반적으로 1.3의 안전율을 갖고 있는 0.75의 등가환산단면적을 많이 사용한다.

$$d_w = \alpha \frac{2(b+t)}{\pi} \quad (2.93)$$

여기서, d_w : 등가환산직경(cm)

b : Plastic Drain의 폭(cm)

t : Plastic Drain의 두께(cm)

α : 0.6~0.9(일반적으로 0.75사용)의 값

연직배수재는 3각형 및 정방형배치로 타설되는데 6각형(3각배치) 혹은 정방형(정방배치)내의 간극수는 각각의 영역의 드레인에 유입된다. 이 경우, 배수구역이 육각형 또는 정방형에서는 해석적 취급이 곤란하기 때문에 배수구역을 같은 면적의 원으로 바꾸어서 고려한다. 이 원을 등가유효원이라고 그 직경 d_e 와 드레인의 타설간격(d)와의 관계는 식 (2.94)과 식 (2.95)로 표현된다.

$$\text{삼각형 배치 : } d_e = 1.05d \quad (2.94)$$

$$\text{정방형 배치 : } d_e = 1.128d \quad (2.95)$$

본 연구에서의 배수재 간격이 압밀시간에 미치는 영향을 계산하는 모델로 위에 설명된 Hansbo의 식 2.92를 이용하여 배수재 타설로 인하여 유발되는 교란영역(Smear Zone)과 흐름저항(well Resistance)을 고려하고자 하였다.

제 3 장 신뢰성 해석 결과

제1절 서언

본 연구에서는 압밀침하를 촉진시키기 위한 연약지반 개량공법으로 연직배수재를 이용하는 방법이 고려되고 있다. 연직배수재는 타설간격에 따라서 연약지반의 압밀침하 속도가 다르게 나타나므로, 연직배수재의 적절한 타설간격을 결정하는 것은 경제적인 시공에 매우 중요한 요소이다. 이에 따라 시간적, 경제적으로 합리적인 연직배수재의 간격을 결정하고, 압밀기간이 압밀도와 잔류침하량에 미치는 영향을 분석하였다.

확정론적 해석의 경우 원지반을 포함한 준설패립지반 지반조사 개수의 제한과 압밀침하 기간에 영향을 미치는 압밀계수(C_h), 수평방향 투수계수(K_h), 교란지역 투수계수(K_s) 등의 분산성을 고려할 수 없기 때문에 연약지반의 기간내 침하정도를 파악하는데 여러 가지 불안요소들을 지니고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 불확실한 분산특성을 지닌 지반정수들을 확률변수로 적용하여 신뢰성 해석을 병행하였다.

신뢰성해석 기법으로는 1계, 2계 신뢰성 분석법, 몬테카를로 시뮬레이션이 있으며, 본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용하여 분석하였다. 또한 신뢰성해석 시 입력되는 확률변수가 목표 압밀도에 미치는 민감도를 구하여 원지반 압밀에 영향을 미치는 인자에 대하여 고찰하였다.

본 연구의 지반개량 신뢰성 해석에서는 압밀에 영향을 미치는 확률변수에 따른 파괴 확률을 위주로 검토하였다.

제2절 확정적 해석결과

1. 외곽호안의 침하량 계산결과

가. 검토대상 시설물

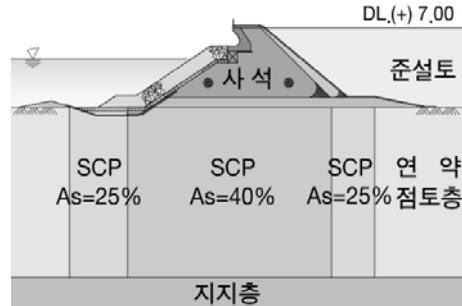


그림 3.1 검토대상 및 시설물 상세도 (외곽호안-조망구간)

(1) 기본물성 및 토층특성

표 3.1 기본물성 및 토층특성

심도 (GL)	비중 G_s	초기간극비 e_0	포화단위중량 γ_{sat}	압축지수 C_c	팽창지수 C_s	침하저감계수 β
0~30	2.72	1.95	1.64	0.91	0.129	0.556
30~	2.72	1.51	1.51	0.70	0.129	0.556

- 목표침하 결정(제체천단 중앙)

외곽호안에 대한 목표침하량 산정결과 총 3.161m로 분석되었다.

표 3.2 목표침하량 산정결과

	심도 구분	침하량(m)
용기토 침하량	2.2m, DL(-)7.3m~DL(-)9.5m	0.579
H1층 침하량	10.0m, DL(-)9.5m~DL(-)19.5m	1.258
H2층 침하량	10.0m, DL(-)19.5m~DL(-)29.5m	0.631
H3층 침하량	10.5m, DL(-)29.5m~DL(-)40.0m	0.388
H4층 침하량	17.0m, DL(-)40.0m~DL(-)57.0m	0.315
총 침하량	-	3.161

• Pre-loading에 의한 침하량 산정(제체천단 중앙)

외곽호안의 Pre-Loading에 의한 침하를 위해 단면축조 2개월, 방치 6개월을 실시할 경우 총 침하량은 3.38m로 8개월 후 100% 침하가 완료되는 것으로 분석되었다.

표 3.3 Pre-Loading에 의한 침하량 산정결과

구분	총침하 (m)	여성완료시		방치완료시	
		U (%)	침하량 (m)	U (%)	침하량 (m)
용기토 침하량	0.588	32.3	0.190	93.0	0.547
H1층 침하량	1.306	32.1	0.419	93.0	1.215
H2층 침하량	0.691	31.9	0.220	92.8	0.641
H3층 침하량	0.438	31.6	0.138	92.6	0.406
H4층 침하량	0.362	39.4	0.142	96.7	0.350
총 침하량	3.380	31.8	1.109	93.2	3.159

2. 내부가호안의 침하량 계산결과

가. 검토대상 시설물



그림 3.2 검토대상 및 시설물 상세도 (내부가호안)

나. 구간별 침하량 산정결과

내부가호안에 대한 확정적해석은 4개구간(내부-1~내부-4구간)으로 구분하여 침하량을 산정하였다. 각 구간별 침하량 산정결과는 표 3.4 ~ 표 3.7과 같다.

내부-1구간 132.670m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총

404.487cm가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 24.713cm인 것으로 분석되었다.

표 3.4 내부-1구간에 대한 침하량 산정결과

층 NO	출력압밀도 (%)	침하량 (cm)	방치기간의 침하압밀도 (%)	방치기간의 침하량 (cm)
2	97.540	176.805	99.915	181.110
3	97.001	90.388	99.896	93.086
4	96.444	61.481	99.877	63.669
5	98.229	45.382	99.981	46.192
7	27.698	11.424	42.073	17.352
9	81.007	2.884	86.420	3.077
계		388.364		404.487
잔류 침하량				24.713

내부-2구간 142.92m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총 485.74cm가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 28.197cm인 것으로 분석되었다.

표 3.5 내부-2구간에 대한 침하량 산정결과

층 NO	출력압밀도 (%)	침하량 (cm)	방치기간의 침하압밀도 (%)	방치기간의 침하량 (cm)
2	96.929	212.777	99.894	219.285
3	96.354	110.489	99.874	114.535
4	95.744	72.589	99.853	75.704
5	97.720	52.139	99.976	53.342
7	27.167	12.655	41.720	19.434
9	80.622	3.213	86.303	3.439
계	463.861			485.740
잔류 침하량				28.197

내부-3구간 156.47m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총 519.393cm가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 29.733cm인 것으로 분석되었다.

표 3.6 내부-3구간에 대한 침하량 산정결과

층 NO	출력압밀도 (%)	침하량 (cm)	방치기간의 침하압밀도 (%)	방치기간의 침하량 (cm)
2	96.593	229.736	99.882	237.558
3	95.827	117.249	99.856	122.179
4	95.083	76.065	99.830	79.863
5	97.195	54.443	99.971	55.998
7	26.743	13.083	41.442	20.205
9	80.276	3.344	86.210	3.591
계		493.876		519.393
잔류 침하량				29.733

내부-4구간 164.61m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총 504.553cm가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 30.410cm인 것으로 분석되었다.

표 3.7 내부-4구간에 대한 침하량 산정결과

층 NO	출력압밀도 (%)	침하량 (cm)	방치기간의 침하압밀도 (%)	방치기간의 침하량 (cm)
2	96.248	216.734	99.870	224.890
3	95.129	113.817	99.831	119.444
4	94.249	75.237	99.801	79.669
5	96.561	54.578	99.964	56.501
7	26.316	13.038	41.165	20.394
9	79.908	3.391	86.117	3.655
계		476.794		504.553
잔류 침하량				30.410

(1) 결과요약

내부-1구간 132.670m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총 404.487cm가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 24.713cm인 것으로 분석되었다.

내부-2구간 142.92m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총 485.74cm가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 28.197cm인 것으로 분석되었다.

내부-3구간 156.47m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총 519.393cm 가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 29.733cm인 것으로 분석되었다.

내부-4구간 164.61m 지점에 대한 침하량 산정결과 방치기간(2,310일)을 포함 총 504.553cm 가 침하되는 것으로 분석되었으며, 그에 따른 잔류침하량은 30.410cm인 것으로 분석되었다.

다. 배수재 간격(2.0m × 2.0m)에 따른 최종침하량에 도달하는 압밀기간

각 구역별 시간의 경과에 따른 압밀도의 변화 양상을 배수재 간격(2.0m×2.0m)에 따라 분석하였으며 그 결과는 다음 표 3.8 ~ 표 3.11 에 나타내었다.

표 3.8 시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-1구간)

구분	압밀도	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
전층	일수	42	90	148	218	301	398	519	713	1184	
	침하량	42.92	85.84	128.76	171.68	214.6	257.52	300.44	343.36	386.28	429.1
2층	일수	37	79	126	181	247	326	423	554	778	
	침하량	18.126	36.253	54.379	72.506	90.632	108.76	126.89	145.01	163.14	181.27
3층	일수	42	89	143	209	284	370	468	603	835	
	침하량	9.318	18.637	27.955	37.273	46.591	55.91	65.228	74.546	83.865	93.183
4층	일수	45	95	156	228	309	397	497	639	885	
	침하량	6.375	12.75	19.124	25.499	31.874	38.249	44.624	50.998	57.373	63.748
5층	일수	35	74	122	182	254	335	425	539	754	
	침하량	4.62	9.24	13.86	18.48	23.1	27.72	32.34	36.96	41.58	46.2
7층	일수	333	793	1378	2131	3075	4247	5762	7898	11550	
	침하량	4.124	8.249	12.373	16.497	20.622	24.746	28.87	32.995	37.119	41.244
9층	일수	9	34	76	176	300	408	677	1171	3603	
	침하량	0.356	0.712	1.068	1.424	1.78	2.136	2.493	2.849	3.205	3.561

표 3.9 시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-2구간)

구분	압밀도	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
전층	일수	49	108	180	265	356	450	571	766	1210	
	침하량	51.394	102.787	154.181	205.575	256.969	308.362	359.756	411.15	462.543	513.937
2층	일수	45	97	158	231	311	397	491	623	849	
	침하량	21.952	43.904	65.855	87.807	109.759	131.711	153.663	175.614	197.566	219.518
3층	일수	50	107	177	257	341	426	522	660	899	
	침하량	11.468	22.936	34.404	45.872	57.34	68.808	80.276	91.744	103.212	114.68
4층	일수	51	110	182	264	350	436	539	688	946	
	침하량	7.582	15.163	22.745	30.326	37.908	45.49	53.071	60.653	68.234	75.816
5층	일수	38	83	137	207	286	370	458	586	824	
	침하량	5.335	10.671	16.006	21.342	26.677	32.013	37.348	42.684	48.019	53.355
7층	일수	358	827	1410	2162	3105	4277	5793	7929	11581	
	침하량	4.658	9.317	13.975	18.633	23.292	27.95	32.608	37.266	41.925	46.583
9층	일수	10	39	86	211	328	444	739	1200	3633	
	침하량	0.398	0.797	1.195	1.594	1.992	2.391	2.789	3.188	3.586	3.985

표 3.10 시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-3구간)

구분	압밀도	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
전층	일수	53	116	197	286	377	471	597	798	1235	
	침하량	54.913	109.825	164.739	219.65	274.563	329.476	384.388	439.301	494.214	549.126
2층	일수	49	106	175	255	338	422	516	650	880	
	침하량	23.784	47.568	71.351	95.135	118.919	142.703	166.487	190.271	214.054	237.838
3층	일수	53	115	192	276	361	445	545	680	941	
	침하량	12.236	24.471	36.707	48.942	61.178	73.413	85.649	97.884	110.12	122.355
4층	일수	53	116	194	280	367	454	555	725	996	
	침하량	8	16	24	32	39.999	47.999	55.999	63.999	71.999	79.999
5층	일수	40	87	145	220	303	389	482	625	889	
	침하량	5.601	11.203	16.804	22.406	28.007	33.609	39.21	44.811	50.413	56.014
7층	일수	373	855	1437	2187	3129	4301	5816	7953	11605	
	침하량	4.875	9.751	14.626	19.502	24.377	29.252	34.128	39.003	43.879	48.757
9층	일수	11	42	93	230	346	496	801	1219	3657	
	침하량	0.417	0.833	1.25	1.666	2.083	2.499	2.916	3.332	3.749	4.166

표 3.11 시간경과 및 압밀도 변화에 따른 침하량 산정결과(내부-4구간)

구분	압밀도	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
전층	일수	51	113	191	280	375	476	615	840	1298	
	침하량	53.496	106.993	160.489	213.985	267.482	320.978	374.474	427.971	481.467	534.963
2층	일수	47	100	163	239	322	410	510	654	903	
	침하량	22.518	45.037	67.555	90.073	112.591	135.11	157.628	180.146	202.664	225.183
3층	일수	52	113	188	272	360	448	559	720	993	
	침하량	11.965	23.929	35.894	47.858	59.823	71.787	83.752	95.716	107.681	119.645
4층	일수	54	117	196	284	374	467	589	767	1054	
	침하량	7.983	15.965	23.948	31.931	39.914	47.896	55.879	63.862	71.845	79.827
5층	일수	41	89	149	227	313	403	507	674	959	
	침하량	5.652	11.304	16.956	22.609	28.261	33.913	39.565	45.217	50.869	56.522
7층	일수	387	883	1460	2211	3135	4325	5840	7977	11628	
	침하량	4.954	9.908	14.863	19.817	24.771	29.725	34.68	39.634	44.588	49.542
9층	일수	12	44	98	246	364	559	857	1236	3681	
	침하량	0.424	0.849	1.273	1.698	2	2.546	2.971	3.395	3.82	4.244

본 연구의 대상구간인 내부-1 ~ 내부-4구간의 압밀기간에 따른 침하량의 변화를 분석한 결과 목표 시간내에 목표 압밀도 99%에 도달하는 것으로 나타났다.

위와 같이 배수재 타설 간격(2.0m×2.0m)에 따른 최종침하량에 도달하는 압밀기간 및 시간경과에 따른 압밀도의 변화를 확정적 방법으로 분석을 실시한 결과 모두 목표기간내에 목표 압밀도인 99%에 도달하는 것으로 분석되었다. 따라서 안정성 측면과 경제성 측면을 모두 고려해 볼 때 배수재를 2.0×2.0m 간격으로 타설할 경우 모든 구역에서 목표 압밀도 99%에 달하는 것으로 분석되어 안정성 측면과 경제성 측면을 모두 만족할 수 있는 것으로 판단, 본 연구구간에 대한 배수재 타설간격을 2.0×2.0m로 결정하였다.

제3절 신뢰성 해석

1. 해석범위

해석대상지역은 그림 3.1과 같이 구획하여 계획되어 있다. 영역에 대하여 지구통계학적 기법을 이용하여 분할된 A구역과 B구역의 구분에 따라 2개의 지역으로 해석영역을 구분 반영하였다.

2. 입력정수

신뢰성해석기법을 이용하여 압밀침하에 대한 해석을 시행하였는바, 확정론적해석의 경우 지반정수의 평균값을 적용하게 되지만, 본 신뢰성해석시에는 압밀 지반정수를 확률변수로 하여 평균, 분산값, 분포를 입력변수로 입력하였다.

해석에 이용된 확률변수는 Terzaghi의 1차원 압밀식에 입력되는 압축지수(C_c), 초기간극비(e_0), 단위중량(γ), 원지반과 준설토의 두께(H)와 Hansbo 식에 입력되는 준설토층의 압밀계수(C_h), 교란지역 투수계수(K_s), 수평투수계수(K_h), 교란지역 직경비(S)이며, 비교적 분산성이 적은 연직배수재 투수계수(K_w), 연직배수재 반경(r_w), 영향원 반경(r_e)등은 확정론적 설계정수로 적용하였다.

압축지수(C_c), 초기간극비(e_0), 단위중량(r)은 베이지안 기법에 의하여 구해진 사후 값(posterior value)를 이용하였고, 준설토층의 압밀계수(C_h), 교란지역 투수계수(K_s), 수평투수계수(K_h), 등은 현장 지반조사자료에 의거하여 계산 산출하였다. 준설토와 원지반 두께는 대상부지를 구역분할한 후 구역의 점토평균두께를 계산하여 이용하였고, 교란지역의 직경비(S)는 관련자료의 부족으로 적합하다고 생각되는 문헌값을 이용하였다. 수평방향 압밀계수(C_h)의 분산계수는 지반자료 조사 사례가 많고 안전측이라고 사료되는 압밀계수(C_v)의 분산값을 적용하였다.

확정론적 설계정수로 사용된 연직배수재의 환산직경과 영향 직경은 Hansbo에 의해 제안된 식을 적용하였고 연직배수재의 투수계수는 통수능 실험에 의해 나타난 값을 사용하였다. 확률변수들의 분포형태는 Kolmogorov-Smirnov을 통하여 분포특성을 파악한 후 적용하였고 이러한 자료가 확보하지 않은 경우는 문헌조사에 의하여 관련된 파라미터 분포에 연구자료를 기초로 결정하였다. 이 경우 로그분포를 나타낸 투수계수를 제외한 확률변수들은 모두 정규분포를 갖는 것으로 파악되었으며, Monte Carlo Simulation 기법을 시스템화하여 판매중인 Palisade Corporation의 @RISK 4.5 프로그램을 활용하여 해석하였다.

압밀해석에 사용된 확률변수 및 설계정수는 다음의 표 3.12, 표 3.13과 같다.

표 3.12 해석에 필요한 지반의 입력정수

parameter		확률변수			분포 형태	
		평균(μ)	표준편차(σ)	분산계수(COV)		
초기 간극비 (e_0)	Zone A	0~10m	1.78	0.344	0.1	정규
		10m이상	1.78	0.344	"	"
	Zone B	0~15m	1.51	0.213	"	"
		15m이상	1.67	0.199	"	"
포화 단위중량 (γ_{sat} , tf/m ³) [$r_w = 1.03$]	Zone A	0~10m	1.62	-	0.1	정규
		10m이상	1.60	-	"	"
	Zone B	0~15m	1.67	-	"	"
		15m이상	1.64	-	"	"
압축지수 (C_c)	Zone A	0~10m	0.820	-	0.2	정규
		10m이상	0.990	-	"	"
	Zone B	0~15m	0.660	-	"	"
		15m이상	0.940	-	"	"
연직 압밀계수 (C_v , cm ² /s)	Zone A	0~15m	0.45×10^{-3}	-	0.2	정규
		15m이상	0.35×10^{-3}	-	0.2	정규
	Zone B	0~15m	0.60×10^{-3}	-	"	"
		15m이상	0.45×10^{-3}	-	0.2	정규
수평 압밀계수 (C_h , cm ² /s)	Zone A	0~15m	0.80×10^{-3}	-	0.2	정규
		15m이상	0.60×10^{-3}	-	-	-
	Zone B	0~15m	1.00×10^{-3}	-	"	"
		15m이상	0.70×10^{-3}	-	-	-
수평 투수계수 (k_h , cm/s) [e : 간극비]	Zone A	0~15m	0.5×10^{-7}	-	0.1	로그정규
		15m이상	0.4×10^{-7}	-	-	-
	Zone B	0~15m	0.7×10^{-7}	-	"	"
		15m이상	0.5×10^{-7}	-	-	-
투수계수비 ($n = k_h/k_s$)	-	-	2.0	-	0.3	정규

표 3.13 배수재료 설계정수

parameter	확률변수			분포 형태
	평균(μ)	표준편차(σ)	분산계수(COV)	
연직배수재 투수계수 (k_w , cm/s)	0.1	-	0.05	정규
교란지역 직경비 ($S = d_s/d_w$)	4.4	-	0.1	정규
연직배수재 환산반경 (r_w , cm)	5.0	-	0.4 (max : 6.0cm)	정규

주) 영향원의 반경은 배수재를 정사각형 배열로 가정하기 때문에 $r_e = 1.13 \times r$ 에서, 환산계수 1.13을 평균으로 하고, 변동계수를 0.05로 가정 (r_e : 영향원 반경, r : 배수재 간격)

표 3.14 구간별 압밀단계에 따른 시공기간(개월)

단계	대상구간	준설	해사 매립	PBD 타설	방치	1단계		2단계		3단계		합계
						성토	방치	성토	방치	성토	방치	
1차	I-A-1		0.50	0.40	1.00	0.30	1.80	0.50	9.50			14.00
	I-A-2		0.50	0.40	1.00	0.30	1.80	0.50	9.50			14.00
	I-A-3		0.40	0.30	1.10	0.20	2.30	0.50	9.20			14.00
	I-A-4		0.40	0.30	1.10	0.20	2.30	0.50	9.20			14.00
	I-C-1		0.50	0.40	1.00	0.30	1.80	0.50	0.00	0.30	9.20	14.00
	I-C-2		0.50	0.40	1.00	0.30	1.80	0.50	0.00	0.30	9.20	14.00
	I-C-3		0.40	0.30	1.10	0.20	2.30	0.50	0.00	0.30	8.90	14.00
	I-C-4		0.40	0.30	1.10	0.20	2.30	0.50	0.00	0.30	8.90	14.00
	I-C-5		0.50	0.40	4.80	0.40	8.00	0.50	8.50			23.10
	I-C-6		0.50	0.40	4.80	0.40	8.00	0.50	8.50			23.10
2차	I-C-7		0.40	0.30	4.80	0.20	8.40	0.50	9.00			23.60
	I-C-8		0.40	0.30	4.80	0.20	8.40	0.50	9.00			23.60
	II-C-1		0.40	0.40	2.80	0.40	0.50	1.00	16.5			22.00
	II-C-2		0.40	0.40	2.80	0.40	0.50	1.00	16.5			22.00
3차	II-C-3		0.20	0.30	2.90	0.30	0.80	1.00	16.0			21.50
	II-C-4		0.20	0.30	2.90	0.30	0.80	1.00	16.0			21.50
	III-C-1		0.50	0.50	2.60	0.40	7.30	0.50	11.0			22.80
	III-C-2		0.50	0.50	2.60	0.40	7.30	0.50	11.0			22.80
	III-C-3		0.50	0.50	2.60	0.40	7.30	0.50	11.0			22.80
	III-E-1		1.00	0.50	0.00	1.0	1.00	0.50	1.0	0.50	14.0	19.50
4차	III-E-3		1.00	0.50	0.00	1.0	1.00	0.50	1.0	0.50	14.0	19.50
	III-E-2		1.00	0.50	17.0	0.50	1.00	0.50	12.5			33.00
	IV-E-2		1.00	0.50	0.00	0.20	0.00	0.30	1.0	1.00	14.0	18.00
	IV-E-4		1.00	0.50	0.00	0.20	0.00	0.30	1.00	1.00	14.	18.00
	IV-E-1		1.00	0.50	16.5	0.50	14.0					32.50
	IV-E-3		1.00	0.50	16.5	0.50	1.00	0.50	12.5			32.50
5차	IV-C-1		0.50	0.40	2.40	0.50	5.00	0.50	10.0			19.30
	IV-C-2		0.50	0.40	2.40	0.50	5.00	0.50	10.0			19.30
	V-A-1	10.0	1.00	0.25	0.00	0.25	11.3					22.75
	V-C-1-1	10.0	1.00	0.25	0.00	0.25	1.25	0.25	9.75			22.75
5차	V-C-1-2		1.00	0.25	0.00	0.25	1.25	0.25	9.75			12.75
	V-C-2		0.40	0.40	2.80	0.40	0.50	0.20	17.3			22.00
	무처리		0.25	1.50	2.00	13.0						16.75

※ 표 3.14의 대상구간은 대상 지역의 토공운용현황에 따라 분할된 설계값을 적용하였음

표 3.15 구간별 압밀도 및 배수재 간격

단계	대상구간	압밀기간 (개월)	압밀도	배수재간격
1차	I-A-1	14.00	88.6	1.2×1.2
	I-A-2	14.00	94.2	1.2×1.2
	I-A-3	14.00	91.8	1.2×1.2
	I-A-4	14.00	93.3	1.2×1.2
	I-C-1	14.00	88.5	1.2×1.2
	I-C-2	14.00	91.6	1.2×1.2
	I-C-3	14.00	90.3	1.2×1.2
	I-C-4	14.00	91.2	1.2×1.2
	I-C-5	23.10	74.90	1.5×1.5
	I-C-6	23.10	78.10	1.5×1.5
	I-C-7	23.60	78.30	1.5×1.5
	I-C-7	23.60	78.60	1.5×1.5
2차	II-C-1	22.00	88.4	1.5×1.5
	II-C-2	22.00	93.5	1.5×1.5
	II-C-3	21.50	91.3	1.5×1.5
	II-C-4	21.50	90.5	1.5×1.5
3차	III-C-1	22.80	74.6	1.5×1.5
	III-C-2	22.80	74.5	1.5×1.5
	III-C-3	22.80	82.7	1.5×1.5
	III-E-1	19.50	94.2	1.2×1.2
	III-E-3	19.50	94.5	1.2×1.2
	III-E-2	33.00	78.5	1.5×1.5
4차	IV-E-2	18.00	99.1	1.2×1.2
	IV-E-4	18.00	98.2	1.2×1.2
	IV-E-1	32.50	94.1	1.5×1.5
	IV-E-3	32.50	86.8	1.5×1.5
	IV-C-1	19.30	82.0	1.5×1.5
	IV-C-2	19.30	81.2	1.5×1.5
5차	V-A-1	22.75	91.8	1.2×1.2
	V-C-1-1	22.75	96.6	1.2×1.2
	V-C-1-2	12.75	87.4	1.2×1.2
	V-C-2	22.00	89.4	1.5×1.5
-	무처리	16.75	84.0	x

표 3.16 구간별 점성토층의 두께

대상구간	침하해석대상층		합 계
	Soft clay (N≤4)	Medium (N>4)	
V-A-1	23.8	7.3	31.1
I-A-1	27.5	4.2	31.7
I-A-2	28.0	3.7	31.7
I-A-3	34.3		34.3
I-A-4	31.0	5.4	36.4
V-C-1	22.3	6.5	28.8
I-C-1	23.3	9.4	32.7
I-C-2	31.8		31.8
I-C-3	35.0		35.0
I-C-4	36.4		38.6
V-C-2	24.0	2.7	26.7
II-C-1	26.0		32.0
II-C-2	28.0		32.0
II-C-3	33.5		33.5
II-C-4	34.5		34.5
III-C-1	27.0		27.0
III-C-2	28.0		28.0
III-C-3	30.4		30.4
IV-C-1	25.0		25.0
IV-C-2	28.8		28.8
III-E-1, 2	26.0		26.0
III-E-3	24.7		24.7
IV-E-1	14.5		14.5
IV-E-2	11.0		11.0
IV-E-3	24.6		24.6
IV-E-4	19.5		19.5
무처리 구간	3.8		3.8

표 3.17 구간별 상재하중의 분포

대상구간	zone 구분	상재하중 (t/m ²)
I-A-1	A	26.42553
I-A-2	B	25.47287
I-A-3	B	27.74910
I-A-4	B	27.08034
I-C-1	A	38.00074
I-C-2	B	34.93202
I-C-3	B	37.09049
I-C-4	B	39.124720
I-C-5	A	38.00074
I-C-6	B	32.62339
I-C-7	B	32.62339
I-C-8	B	32.62339
II-C-1	A	33.02499
II-C-2	B	32.62339
II-C-3	B	32.77583
II-C-4	B	32.75108
III-C-1	A	34.59186
III-C-2	A	35.26016
III-C-3	B	32.85591
III-E-1	A	32.14849
III-E-2	A	24.82001
III-E-3	A	28.35548
IV-E-1	B	21.42798
IV-E-2	B	20.44183
IV-E-3	B	28.19574
IV-E-4	B	25.03843
IV-C-1	B	32.16316
IV-C-2	B	33.34491
V-A-1	A	38.52179
V-C-1-1	A	38.30500
V-C-1-2	A	33.42478
V-C-2	A	28.66355

3. 배수재 적정 간격 산정을 위한 신뢰성 해석

신뢰성 해석은 압밀도, 잔류침하량 및 부등침하량에 대한 목표치(target value)를 결정 후 각각의 경우에 대해서 목표치 도달여부를 1계 및 2계 신뢰성 분석법 및 몬테카를로 시뮬레이션 등을 이용하여 실시하였다. 해석결과를 파괴확률 및 신뢰성지수로 정리하고, 확률변수로 사용된 토질정수들이 안정성에 영향을 미치는 정도는 민감도를 이용하여 분석하였다.

본 신뢰성 해석에는 확률론적 해석에서 허용잔류 침하량 10cm를 만족하는 목표압밀도를 정하고, 배수재(PBD) 간격을 변화시켜가며 신뢰성 해석을 시행하여 확정론적 해석의 결과와 비교·분석하였다.

가. 한계상태함수

본 해석의 압밀에 대한 한계상태함수는 해석구간의 원지반과 준설토에 대해서 각각의 수평방향 투수계수(K_h), 교란지역의 투수계수(K_s)와 수평방향 압밀계수(C_h), 압밀층의 두께(H), 교란지역 직경비(S)를 확률변수로 하여 식 (3.1)과 같이 정의 하였다.

$$G(X) = U_{h1}(K_h, K_s, C_h, H, K_h, S) - U_{target} \quad (3.1)$$

여기서, U_{h1} : 압밀도, U_{h2} :준설토 압밀도, U_{target} :목표압밀도

$$G(X) = 0 \Rightarrow \text{한계상태}$$

$$G(X) > 0 \Rightarrow \text{목표압밀도 도달상태}$$

$$G(X) < 0 \Rightarrow \text{목표압밀도에 도달하지 못한 상태}$$

나. 해석결과

분석대상 구역을 토공운영현황에 따라 5단계로 영역을 구분하였으며, 이에 따라 배수재의 타설간격을 1.0×1.0m, 1.2×1.2m, 1.5×1.5m에 대한 신뢰성 해석을 각각 수행하여 그 결과를 표 3.18에서 표 3.20에 나타내었다.

(1) 배수재 타설간격 1.0×1.0m

분석대상 구역에 따라 배수재의 타설간격을 1.0×1.0m에 대한 신뢰성 해석을 각각 수행하여 그 결과를 표 3.18에 나타내었다. 배수재 타설 간격이 1.0×1.0m의 경우에 모든 구역이 목표압밀도에 도달할 확률이 99 ~ 100%의 신뢰도를 나타내어 다소 과도한 설계임을 알 수 있었다.

1단계의 I-A-1에서 I-A-4구간과 I-C-1에서 I-C-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 모두 100%였으며, 신뢰성지수는 10으로 분석되었다.

2단계의 II-C-1에서 II-C-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 모두 100%였으며, 신뢰성지수는 10으로 분석되었다.

3단계의 III-C-1에서 III-C-3구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 99.91%~99.97%를 보였으며, 신뢰성지수는 3.1088~3.1184의 범위를 나타내었다. III-E-1에서 III-E-3구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 99.91%이며 신뢰성지수는 3.135~3.139범위로 나타났다.

4단계의 IV-E-1에서 IV-E-4에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 99.94~99.98% 정도를 보였으며, 신뢰성지수는 2.9958~3.5402의 범위를 나타내었다. IV-C-1에서 IV-C-2구간에서는 99.88~99.94%의 범위를 나타내었으며 3.0261~3.1454의 범위를 나타내었다.

5단계의 V-A-1에서 V-C-2에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 99.92~100% 정도를 보였으며, 신뢰성지수는 3.1385~10.000의 범위를 나타내었다.

(2) 배수재 타설간격 1.2×1.2m

분석대상 구역에 배수재의 타설간격을 1.2×1.2m에 대한 신뢰성 해석을 각각 수행하여 그 결과를 표 3.19에 나타내었다. 배수재 타설 간격이 1.0×1.0m의 경우에 모든 구역이 목표압밀도에 도달할 확률이 94.73~99.30%의 신뢰도를 나타내어 비교적 신뢰도 있

는 결과를 보였다.

1단계의 I-A-1에서 I-A-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 98.98~99.09%였으며, 신뢰성지수는 2.2995~2.3607으로 분석되었다. I-C-1에서 I-C-4구간은 98.96~99.30%의 범위를 나타내었으며, 신뢰성지수는 2.1328~2.4567로 분석되었다.

2단계의 II-C-1에서 II-C-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 99.03%~99.22%였으며, 신뢰성지수는 2.3997~2.4204으로 분석되었다.

3단계의 III-C-1에서 III-C-3구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 95.84%~99.31%를 보였으며, 신뢰성지수는 2.0197~2.4655의 범위를 나타내었다. III-E-1에서 III-E-3구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 96.07~96.14%이며 신뢰성지수는 1.7596~1.7672범위로 나타났다.

4단계의 IV-E-1에서 IV-E-4에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 94.73~99.23% 정도를 보였으며, 신뢰성지수는 1.6193~2.4214의 범위를 나타내었다. IV-C-1에서 IV-C-2구간에서는 99.08~99.18%의 범위를 나타내었으며 2.3579~2.0920의 범위를 나타내었다.

5단계의 V-A-1에서 V-C-2에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 96.72~99.37% 정도를 보였으며, 신뢰성지수는 1.8420~2.4964의 범위를 나타내었다.

(3) 배수재 타설간격 1.5×1.5m

분석대상 구역을 토공운영현황에 따라 5단계로 영역을 구분하였으며, 이에 따라 배수재의 타설간격을 1.5×1.5m에 대한 신뢰성 해석을 각각 수행하여 그 결과를 표 3.20에 나타내었다. 배수재 타설 간격이 1.5×1.5m의 경우에 목표압밀도에 도달할 확률이 65.32~97.63%의 신뢰도를 나타내어 범위가 크게 나타났다.

1단계의 I-A-1에서 I-A-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 80.22~81.95%였으며, 신뢰성지수는 0.8492~0.9133으로 분석되었다. I-C-1에서 I-C-4구간은 80.58~84.52%의 범위를 나타내었으며, 신뢰성지수는 0.8625~1.0049로 분석되었다.

2단계의 II-C-1에서 II-C-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 96.02~97.48%였으며, 신뢰성지수는 1.7536~1.9577으로 분석되었다.

3단계의 III-C-1에서 III-C-3구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 96.55%~97.61%를 보였으며, 신뢰성지수는 1.8188~1.9798의 범위를 나타내었다. III-E-1에서 III-E-3구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 71.05~95.15%이며 신뢰성지수는 0.5544~1.660의 범위로 나타났다.

4단계의 IV-E-1에서 IV-E-4에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 66.24~97.63% 정도를 보였으며, 신뢰성지수는 0.4177~1.9839의 범위를 나타내었다. IV-C-1에서 IV-C-2구간에서는 96.49~97.30%의 범위를 나타내었으며 1.8105~1.9277의 범위를 나타내었다.

5단계의 V-A-1에서 V-C-2에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 50.26~96.36% 정도를 보였으며, 신뢰성지수는 0.0065~1.7939의 범위를 나타내었다.

III-E-1구간과 III-E-3구간, IV-E-2구간, IV-E-4구간, V-A-1구간, V-C-1-1구간에서 배수재 간격을 1.5×1.5m를 적용할 때 목표압밀도에 도달할 확률이 신뢰도가 50.26%~71.32%로 나타나 비교적 신뢰도가 낮게 나타남을 알 수 있다.

표 3.18 배수재 타설간격별 신뢰성 해석결과(배수재 간격 1.0×1.0m)

배수재간격(m)	단계	구역구분	대상구간	목표압밀도달확률(Ps)	신뢰성지수(β)
1.0m×1.0m	1차	ZoneA	I-A-1	100%	10.0000
		ZoneB	I-A-2	100%	10.0000
		ZoneB	I-A-3	100%	10.0000
		ZoneB	I-A-4	100%	10.0000
		ZoneA	I-C-1	100%	10.0000
		ZoneB	I-C-2	100%	10.0000
		ZoneB	I-C-3	100%	10.0000
		ZoneB	I-C-4	100%	10.0000
		ZoneA	I-C-5	100%	10.0000
		ZoneB	I-C-6	100%	10.0000
		ZoneB	I-C-7	100%	10.0000
	ZoneB	I-C-8	100%	10.0000	
	2차	ZoneA	II-C-1	100%	10.0000
		ZoneB	II-C-2	100%	10.0000
		ZoneB	II-C-3	100%	10.0000
	3차	ZoneB	II-C-4	100%	10.0000
		ZoneA	III-C-1	99.91%	3.1184
		ZoneA	III-C-2	99.91%	3.1088
		ZoneB	III-C-3	99.97%	3.4229
		ZoneA	III-E-1	99.91%	3.1350
		ZoneA	III-E-2	99.91%	3.1350
		ZoneA	III-E-3	99.91%	3.1385
	4차	ZoneB	IV-E-1	99.94%	3.2439
		ZoneB	IV-E-2	99.98%	3.5402
		ZoneB	IV-E-3	99.89%	3.0488
		ZoneB	IV-E-4	99.86%	2.9958
		ZoneB	IV-C-1	99.94%	3.2439
		ZoneB	IV-C-2	99.88%	3.0261
	5차	ZoneA	V-A-1	99.92%	3.1454
		ZoneA	V-C-1-1	99.99%	3.6154
		ZoneA	V-C-1-2	100%	10.0000
		ZoneA	V-C-2	99.91%	3.1385

표 3.19 배수재 타설간격별 신뢰성 해석결과(배수재 간격 1.2×1.2m)

배수재간격(m)	단계	구역구분	대상구간	목표압밀도달확률(Ps)	신뢰성지수(β)
1.2m×1.2m	1차	ZoneA	I-A-1	99.09%	2.3607
		ZoneB	I-A-2	99.04%	2.3428
		ZoneB	I-A-3	98.98%	2.3182
		ZoneB	I-A-4	98.92%	2.2995
		ZoneA	I-C-1	99.07%	2.3527
		ZoneB	I-C-2	99.04%	2.3421
		ZoneB	I-C-3	98.96%	2.3128
		ZoneB	I-C-4	99.30%	2.4567
		ZoneA	I-C-5	99.34%	2.4804
		ZoneB	I-C-6	99.92%	3.1598
		ZoneB	I-C-7	99.93%	3.1949
		ZoneB	I-C-8	99.40%	2.5137
	2차	ZoneA	II-C-1	99.08%	2.3575
		ZoneB	II-C-2	99.03%	2.3397
		ZoneB	II-C-3	99.22%	2.4204
		ZoneB	II-C-4	99.21%	2.4126
	3차	ZoneA	III-C-1	95.92%	1.7415
		ZoneA	III-C-2	95.84%	1.7332
		ZoneB	III-C-3	97.83%	2.0197
		ZoneA	III-E-1	96.07%	1.7596
		ZoneA	III-E-2	96.07%	1.7596
		ZoneA	III-E-3	96.14%	1.7672
	4차	ZoneB	IV-E-1	99.23%	2.4214
		ZoneB	IV-E-2	98.18%	2.0920
		ZoneB	IV-E-3	98.31%	2.1222
		ZoneB	IV-E-4	94.73%	1.6193
		ZoneB	IV-C-1	99.08%	2.3579
		ZoneB	IV-C-2	98.18%	2.0920
	5차	ZoneA	V-A-1	98.48%	2.1650
		ZoneA	V-C-1-1	96.72%	1.8420
		ZoneA	V-C-1-2	99.37%	2.4964
		ZoneA	V-C-2	97.64%	1.9848

표 3.20 배수재 타설간격별 신뢰성 해석결과(배수재 간격 1.5×1.5m)

배수재간격(m)	단계	구역구분	대상구간	목표압밀도달확률(Ps)	신뢰성지수(β)
1.5m×1.5m	1차	ZoneA	I-A-1	81.95%	0.9133
		ZoneB	I-A-2	81.44%	0.8943
		ZoneB	I-A-3	80.78%	0.8696
		ZoneB	I-A-4	80.22%	0.8492
		ZoneA	I-C-1	81.73%	0.9049
		ZoneB	I-C-2	81.42%	0.8934
		ZoneB	I-C-3	80.58%	0.8625
		ZoneB	I-C-4	84.25%	1.0049
		ZoneA	I-C-5	96.26%	1.7822
		ZoneB	I-C-6	96.37%	1.7956
		ZoneB	I-C-7	96.65%	1.8319
		ZoneB	I-C-8	96.36%	1.7947
	2차	ZoneA	II-C-1	96.21%	1.7760
		ZoneB	II-C-2	97.48%	1.9577
		ZoneB	II-C-3	96.02%	1.7536
		ZoneB	II-C-4	97.33%	1.9326
	3차	ZoneA	III-C-1	96.55%	1.8182
		ZoneA	III-C-2	97.61%	1.9798
		ZoneB	III-C-3	96.55%	1.8188
		ZoneA	III-E-1	71.05%	0.5544
		ZoneA	III-E-2	95.15%	1.6601
		ZoneA	III-E-3	71.32%	0.5625
	4차	ZoneB	IV-E-1	97.63%	1.9839
		ZoneB	IV-E-2	66.21%	0.4177
		ZoneB	IV-E-3	95.68%	1.7153
		ZoneB	IV-E-4	66.21%	0.4177
		ZoneB	IV-C-1	96.49%	1.8105
		ZoneB	IV-C-2	97.30%	1.9277
	5차	ZoneA	V-A-1	50.26%	0.0065
		ZoneA	V-C-1-1	65.32%	0.3934
		ZoneA	V-C-1-2	85.24%	1.0468
		ZoneA	V-C-2	96.36%	1.7939

(4) 신뢰성 해석에 따른 대상구간의 타설간격 검토

분석대상 구역의 배수재 간격을 검토한 결과 목표 압밀도에 대한 도달 확률이 95% 이상일 때 안정성을 확보하는 동시에 경제적인 연약지반 개량공법의 형식으로 선정하였다.

표 3.21 신뢰성 해석에 따른 대상구간의 타설간격 설정

대상구간	배수재간격	대상구간	배수재간격
I-A-1	1.2×1.2	III-C-1	1.5×1.5
I-A-2	1.2×1.2	III-C-2	1.5×1.5
I-A-3	1.2×1.2	III-C-3	1.5×1.5
I-A-4	1.2×1.2	III-E-1	1.2×1.2
I-C-1	1.2×1.2	III-E-3	1.2×1.2
I-C-2	1.2×1.2	III-E-2	1.5×1.5
I-C-3	1.2×1.2	IV-E-2	1.2×1.2
I-C-4	1.2×1.2	IV-E-4	1.2×1.2
I-C-5	1.5×1.5	IV-E-1	1.5×1.5
I-C-6	1.5×1.5	IV-E-3	1.5×1.5
I-C-7	1.5×1.5	IV-C-1	1.5×1.5
I-C-8	1.5×1.5	IV-C-2	1.5×1.5
II-C-1	1.5×1.5	V-A-1	1.2×1.2
II-C-2	1.5×1.5	V-C-1-1	1.2×1.2
II-C-3	1.5×1.5	V-C-1-2	1.2×1.2
II-C-4	1.5×1.5	V-C-2	1.5×1.5

다. 확률밀도 함수

배수재 타설간격이 1.0m일 경우 최확 압밀도 대부분이 99~100%의 범위에서 나타나 과대한 설계임을 알 수 있으며, 배수재의 타설간격이 1.2m일 경우에 목표압밀도에 도달할 확률이 전 구간에서 95%이상의 비교적 안정한 결과를 보였다.

배수재의 타설간격이 1.5m일 경우 목표압밀도에 도달할 확률이 1단계의 I-A-1에서 I-A-4구

간은 목표압밀도에 도달할 확률이 80.22~81.95%로 나타나 불안정한 측면이 있음을 알 수 있다.

배수재의 타설간격이 1.5m일 경우 목표압밀도에 도달할 확률이 III-E-1구간, III-E-3구간, IV-E-2구간, IV-E-4구간, V-A-1구간, V-C-1-1구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 50.26~71.32%정도로 나타나 배수재 간격 1.5m가 부적합함을 알 수 있다.

4. 압밀기간에 따른 허용잔류침하량 신뢰성 해석

본 신뢰성해석에서는 허용잔류 침하량 10cm를 만족하기 위한 목표압밀도를 각각의 영역에 정하여, 1계 및 2계 신뢰성 분석법 및 몬테카를로 시뮬레이션 등에 의한 파괴 확률 및 신뢰성지수를 분석하였다.

가. 한계상태함수

시간에 따른 잔류침하량에 대한 한계상태함수(Limit State Function)는 $G(x)$ 에 압밀기간 변화시켜가며 요구압밀도를 만족하는 최적 압밀기간을 산정한다.

$$G(x) = [\delta_1 (C_c(\text{원지반}), e_o(\text{원지반}), \gamma(\text{단위중량}), K_h(\text{원지반}), K_s(\text{원지반}), C_h(\text{원지반}), H(\text{원지반}), S)] - \delta_{\text{target}}$$

여기서, δ_1 : 압밀기간 변화에 따른 지반의 잔류침하량

δ_{target} : 허용잔류침하량의 기준(10cm)

나. 해석결과

구분된 영역에 압밀기간의 변화에 따른 잔류침하량이 10cm이상일 때 파괴확률은 표 3.22 ~ 표 3.25에 정리하였다. 그 결과 잔류침하 발생량이 허용잔류침하량(10cm)이하가 될 때의 기준을 만족하는 압밀기간을 각각의 구역별로 산정하였다.

허용잔류침하량을 초과할 파괴확률이 10%이내인 기간을 압밀기간으로 산정하였으며, 각 구간의 압밀도 산정에 대한 결과는 표 3.22 ~ 표 3.25에 나타내었다.

표 3.22 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률

구분	구간	압밀시간(개월)	발생할 확률(%)	신뢰도지수(β)
ZoneA	I-A-1	12	13.76	1.0912
ZoneA	I-A-1	13	10.30	1.265
ZoneA	I-A-1	14	7.63	1.5308
ZoneA	I-A-1	15	5.43	1.6049
ZoneB	I-A-2	12	11.78	1.1862
ZoneB	I-A-2	13	8.41	1.378
ZoneB	I-A-2	14	5.95	1.5596
ZoneB	I-A-2	15	4.05	1.7448
ZoneB	I-A-3	12	14.36	1.0645
ZoneB	I-A-3	13	10.49	1.2541
ZoneB	I-A-3	14	7.51	1.5394
ZoneB	I-A-3	15	5.29	1.618
ZoneB	I-A-4	12	14.9	1.0406
ZoneB	I-A-4	13	10.93	1.2305
ZoneB	I-A-4	14	7.83	1.4171
ZoneB	I-A-4	15	5.58	1.5911
ZoneA	I-C-1	12	17.52	0.9338
ZoneA	I-C-1	13	13.45	1.1056
ZoneA	I-C-1	14	8.03	1.5031
ZoneA	I-C-1	15	4.94	1.5856
ZoneB	I-C-2	12	16.25	0.9843
ZoneB	I-C-2	13	12.06	1.1718
ZoneB	I-C-2	14	8.71	1.5589
ZoneB	I-C-2	15	6.26	1.6339
ZoneB	I-C-3	12	18.99	0.8782
ZoneB	I-C-3	13	14.36	1.0644
ZoneB	I-C-3	14	8.03	1.5031
ZoneB	I-C-3	15	4.91	1.6111
ZoneB	I-C-4	12	16.77	0.9633
ZoneB	I-C-4	13	12.61	1.1452
ZoneB	I-C-4	14	9.26	1.5250
ZoneB	I-C-4	15	6.71	1.6981
ZoneA	I-C-5	21.1	13.63	1.0969
ZoneA	I-C-5	22.1	10.45	1.2566
ZoneA	I-C-5	23.1	6.45	1.5185
ZoneA	I-C-5	24.1	3.97	1.7549

표 3.23 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률

구분	구간	압밀시간(개월)	발생할 확률(%)	신뢰도지수(β)
ZoneB	I-C-6	21.1	11.14	1.2191
ZoneB	I-C-6	22.1	10.05	1.3110
ZoneB	I-C-6	23.1	5.53	1.5962
ZoneB	I-C-6	24.1	2.72	1.9241
ZoneB	I-C-7	21.6	12.91	1.1305
ZoneB	I-C-7	22.6	10.23	1.2959
ZoneB	I-C-7	23.6	5.85	1.5678
ZoneB	I-C-7	24.6	2.98	1.8846
ZoneB	I-C-8	21.6	13.66	1.0957
ZoneB	I-C-8	22.6	10.60	1.2480
ZoneB	I-C-8	23.6	6.15	1.5430
ZoneB	I-C-8	24.6	3.52	1.8093
ZoneA	II-C-1	20	18.70	0.889
ZoneA	II-C-1	21	14.45	1.0604
ZoneA	II-C-1	22	8.37	1.381
ZoneA	II-C-1	23	5.00	1.4613
ZoneB	II-C-2	20	17.31	0.942
ZoneB	II-C-2	21	12.92	1.1301
ZoneB	II-C-2	22	9.42	1.3155
ZoneB	II-C-2	23	6.76	1.4939
ZoneB	II-C-3	19.5	16.76	0.9635
ZoneB	II-C-3	20.5	12.52	1.1497
ZoneB	II-C-3	21.5	9.16	1.3314
ZoneB	II-C-3	22.5	6.60	1.5064
ZoneB	II-C-4	19.5	17.48	0.9352
ZoneB	II-C-4	20.5	13.12	1.1208
ZoneB	II-C-4	21.5	9.66	1.3014
ZoneB	II-C-4	22.5	6.94	1.4803
ZoneA	III-C-1	20.8	18.25	0.9057
ZoneA	III-C-1	21.8	12.84	1.1339
ZoneA	III-C-1	22.8	8.33	1.3833
ZoneA	III-C-1	23.8	4.78	1.6665
ZoneA	III-C-2	20.8	19.45	0.8612
ZoneA	III-C-2	21.8	13.8	1.0892
ZoneA	III-C-2	22.8	9.12	1.3337
ZoneA	III-C-2	23.8	5.31	1.6162

표 3.24 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률

구분	구간	압밀시간(개월)	발생할 확률(%)	신뢰도지수(β)
ZoneB	Ⅲ-C-3	20.8	15.55	1.0131
ZoneB	Ⅲ-C-3	21.8	11.42	1.2049
ZoneB	Ⅲ-C-3	22.8	8.00	1.5052
ZoneB	Ⅲ-C-3	23.8	5.32	1.6146
ZoneA	Ⅲ-E-1	22.9	16.09	0.9907
ZoneA	Ⅲ-E-1	23.9	11.03	1.2249
ZoneA	Ⅲ-E-1	24.9	6.99	1.5769
ZoneA	Ⅲ-E-1	25.9	3.87	1.7667
ZoneA	Ⅲ-E-2	22.9	12.35	1.1575
ZoneA	Ⅲ-E-2	23.9	8.15	1.3952
ZoneA	Ⅲ-E-2	24.9	4.81	1.6636
ZoneA	Ⅲ-E-2	25.9	2.54	1.9539
ZoneA	Ⅲ-E-3	22.9	14.54	1.0566
ZoneA	Ⅲ-E-3	23.9	9.86	1.2898
ZoneA	Ⅲ-E-3	24.9	6.08	1.5481
ZoneA	Ⅲ-E-3	25.9	3.25	1.8453
ZoneB	Ⅳ-C-1	17.3	13.31	1.1118
ZoneB	Ⅳ-C-1	18.3	9.64	1.3025
ZoneB	Ⅳ-C-1	19.3	6.81	1.5902
ZoneB	Ⅳ-C-1	20.3	4.48	1.6982
ZoneB	Ⅳ-C-2	17.3	15.03	1.0351
ZoneB	Ⅳ-C-2	18.3	11.13	1.2199
ZoneB	Ⅳ-C-2	19.3	7.99	1.5061
ZoneB	Ⅳ-C-2	20.3	5.53	1.5958
ZoneB	Ⅳ-E-1	17.3	16.95	0.9560
ZoneB	Ⅳ-E-1	18.3	12.77	1.1376
ZoneB	Ⅳ-E-1	19.3	9.15	1.5320
ZoneB	Ⅳ-E-1	20.3	6.35	1.5261

표 3.25 압밀시간에 따른 허용잔류침하량(10cm)의 초과 발생확률

구분	구간	압밀시간(개월)	발생할 확률(%)	신뢰도지수(β)
ZoneB	IV-E-2	17.3	12.27	1.1618
ZoneB	IV-E-2	18.3	8.73	1.3575
ZoneB	IV-E-2	19.3	5.93	1.5612
ZoneB	IV-E-2	20.3	3.7	1.7875
ZoneB	IV-E-3	17.3	7.55	1.4361
ZoneB	IV-E-3	18.3	5.24	1.6225
ZoneB	IV-E-3	19.3	3.44	1.8197
ZoneB	IV-E-3	20.3	2.22	2.0107
ZoneB	IV-E-4	17.3	9.93	1.286
ZoneB	IV-E-4	18.3	6.58	1.508
ZoneB	IV-E-4	19.3	4.21	1.7275
ZoneB	IV-E-4	20.3	2.66	1.9337
ZoneA	V-A-1	20.8	9.50	1.311
ZoneA	V-A-1	21.8	7.07	1.4707
ZoneA	V-A-1	22.8	5.19	1.6271
ZoneA	V-A-1	23.8	3.77	1.7779
ZoneA	V-C-1-1	20.8	15.71	1.0065
ZoneA	V-C-1-1	21.8	11.84	1.1833
ZoneA	V-C-1-1	22.8	8.83	1.5513
ZoneA	V-C-1-1	23.8	6.45	1.6813
ZoneA	V-C-1-2	20.8	14.23	1.0702
ZoneA	V-C-1-2	21.8	10.74	1.2407
ZoneA	V-C-1-2	22.8	7.99	1.5057
ZoneA	V-C-1-2	23.8	5.73	1.6778
ZoneA	V-C-2	20	14.25	1.0691
ZoneA	V-C-2	21	9.69	1.2999
ZoneA	V-C-2	22	5.91	1.5630
ZoneA	V-C-2	23	3.16	1.8589

5. 잔류침하로 인한 부등침하 신뢰성 해석

본 절에서는 압밀기간 종료 후 발생하는 잔류침하로 인하여 발생하는 부등침하에 대한 신뢰성 해석을 실시하였다.

부등침하의 안정성 검토

- : 블록별 부등침하량의 차이를 부등침하량으로 산정하였다.
- : 부등침하량과 블록의 중심사이의 거리의 비로 부등침하 경사로 산정하였다.
- : 부등침하의 경사가 허용경사(1/600)을 초과할 경우의 파괴확률을 산출하였다.

가. 한계상태함수

부등침하의 안정성 검토에 대한 한계상태함수(Limit State Function)

$$G(X) = \delta_{\text{target}} - \delta_1(\text{원지반 } C_c, \text{ 원지반 } e, \text{ 단위중량 } Y, \text{ 원지반 } K_h, \text{ 원지반 } C_h, \text{ 원지반 } H, S)$$

여기서, δ_1 : 신뢰성 해석프로그램으로부터 계산되는 원지반 부등침하량

δ_{target} : 허용부등침하량(허용부등침하경사 1/600)

나. 해석결과

각 구역별 신뢰성 해석을 표에 나타내었는데 해석결과 허용부등침하경사(1/600의 경우 8cm)를 초과할 확률은 모두 0%로 배수재 간격에 따라 압밀을 실시할 경우 일차압밀에 의하여 허용부등침하경사 이상의 부등침하가 발생할 가능성은 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

이에 따라 부등침하의 기준을 지극히 보수적으로 본 허용부등침하의 경우에 대하여 신뢰성 해석을 수행하였다.

표 3.26 부등침하의 신뢰성 해석결과

구역구분		허용침하량 초과확률(%)	신뢰성지수(β)
I-A-1	I-A-2	0.000000E+00	10.000
	I-C-1	1.800000E-04	3.5679
	I-C-2	0.000000E+00	10.000
	V-A-1	0.000000E+00	10.000
	V-C-1	0.000000E+00	10.000
I-A-2	I-A-3	0.000000E+00	10.000
	I-C-1	0.000000E+00	10.000
	I-C-2	9.999997E-06	4.2648
I-A-3	I-C-3	0.000000E+00	10.000
	I-A-4	0.000000E+00	10.000
	I-C-2	0.000000E+00	10.000
	I-C-3	1.400000E-04	3.6332
I-A-4	I-C-4	0.000000E+00	10.000
	I-C-3	0.000000E+00	10.000
	I-C-4	7.000002E-05	3.8082
I-C-1	I-C-2	4.999999E-05	3.8906
	II-C-1	4.139999E-03	2.6408
	II-C-2	0.000000E+00	10.000
	III-C-1	0.000000E+00	10.000
	V-A-1	0.000000E+00	10.000
	V-C-1	0.000000E+00	10.000
	V-C-2	1.999999E-05	4.1075
I-C-2	I-C-3	0.000000E+00	10.000
	II-C-1	0.000000E+00	10.000
	II-C-2	1.490001E-03	2.9701
	II-C-3	0.000000E+00	10.000
I-C-3	I-C-4	9.999997E-06	4.2648
	II-C-2	0.000000E+00	10.000
	II-C-3	2.350000E-03	2.8273
	II-C-4	0.000000E+00	10.000
I-C-4	II-C-3	0.000000E+00	10.000
	II-C-4	3.139000E-02	1.8612
II-C-1	II-C-2	1.100000E-04	3.6949
	III-C-1	4.100001E-04	3.3461
	III-C-2	0.120001E-02	2.5370
	III-C-3	0.000000E+00	10.000
	V-C-2	1.999999E-04	3.5402

표 3.27 부등침하의 신뢰성 해석결과

구역구분		허용침하량 초과확률(%)	신뢰성지수(β)
II-C-2	II-C-3	0.000000E+00	10.000
	III-C-2	0.000000E+00	10.000
	III-C-3	3.7829999E-02	1.7768
	IV-C-1	0.000000E+00	10.000
II-C-3	II-C-4	0.000000E+00	10.000
	III-C-3	0.000000E+00	10.000
	IV-C-1	3.7470002E-02	1.7812
	IV-C-2	0.000000E+00	10.000
II-C-4	IV-C-1	1.9999999E-05	4.1075
	IV-C-2	2.0730000E-02	2.0393
III-C-1	III-C-2	3.8500000E-03	2.6653
	III-E-1	0.1000000E-02	1.5714
	III-E-3	4.9000001E-04	3.2964
	V-C-2	0.1500001E-02	2.6158
III-C-2	III-C-3	1.4000000E-04	3.6332
	III-E-1	1.5200000E-03	2.9638
	III-E-3	0.1900000E-02	2.8582
III-C-3	IV-C-1	0.0000000E+00	10.000
III-E-1	III-E-1	0.2100000E-02	3.7792
	III-E-3	1.7000000E-03	2.9294
IV-E-1	IV-E-2	1.7349999E-02	2.1123
	IV-E-3	1.9999999E-05	4.1075
	IV-E-4	0.0000000E+00	10.000
	IV-C-1	4.8439998E-02	1.6605
	IV-C-2	0.0000000E+00	10.000
IV-E-2	IV-E-3	0.0000000E+00	10.000
	IV-E-4	0.0000000E+00	10.000
IV-E-3	IV-E-4	8.6980000E-02	1.3598
	IV-C-2	4.4980001E-02	1.6959
IV-C-1	IV-C-2	1.1000000E-04	3.6949
V-A-1	V-C-1	0.0000000E+00	10.000
V-C-1	V-C-2	7.5240001E-02	1.4381

표 3.28 부등침하의 신뢰성 해석결과(RMGC의 하단)

RMGC의 기초하단 부등침하		허용침하량 초과확률(%)	신뢰성지수(β)
I-C-3	I-C-7	4.760001E-02	1.6317
I-C-5	II-C-1	7.384000E-02	1.5043

제4절 확정적 해석 및 신뢰성 해석 비교 검토

항만 구조물의 안정해석은 현장지반에 대한 불충분한 자료와 파괴 메커니즘의 가변성으로 인하여 그 결과에 불확실성을 내포하고 있다. 안전율(Factor of Safety)의 개념을 기초로 하는 확정론적 방법(Deterministic Analysis)의 경우 어느 정도의 안전여유를 갖고 있는가를 파악하기 위하여 경험적인 안전계수(Safety Factor)를 도입하고 있다. 이 경우 분산(Variability)을 고려하지 않은채 단일 대표 값을 이용하여 안전성을 판단하므로 가변성과 불확실성을 효과적으로 정량화하여 해석에 적용할 수 없는 단점이 있다.

또한, 확정론적 해석의 경우 원지반을 포함한 준설매립지반 지반조사 개수의 제한과 압밀침하 기간에 영향을 미치는 압밀계수(C_h), 수평방향 투수계수(K_h), 교란지역 투수계수(K_s) 등의 분산성을 고려할 수 없기 때문에 연약지반의 기간 내 침하정도를 파악하는데 여러 가지 불안요소들을 지니고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 불확실한 분산특성을 지닌 지반정수들을 확률변수로 적용하여 신뢰성 해석을 병행하였다.

따라서 불확실성을 정량적으로 나타내는 신뢰성 해석은 기존의 정성적인 개념의 안전계수를 이용하는 확정론적인 해석을 보완할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 확정론적 해석과 토질정수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석법을 도입 해석하여 실제 시공되는 배수재의 타설간격에 대한 신뢰성 해석을 수행하여 안정성을 높이고자 하였다.

또한, 주변지반이 연약한 점성토에 시공된 컨테이너 부두 축조는 지반의 강도가 작고, 침하 등의 변형이 크기 때문에 지반개량공법을 적용할 경우 지반의 압밀 및 침하 특성 해석을 확정론적 해석과 함께 지반정수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 실시하여 구조물기초와 개량된 연약지반의 안정성을 높이고자 하였다.

1. 연직배수재의 타설 간격 설정

확정적 해석의 경우 배수재 타설 간격(2.0m×2.0m)에 따른 최종침하량에 도달하는 압밀기간 및 시간경과에 따른 압밀도의 변화를 확정적 방법으로 분석을 실시한 결과 모두 목표기간내에 목표 압밀도인 99%에 도달하는 것으로 분석되었다.

따라서 모든 구역에서 목표 압밀도 99%에 도달하는 배수재 타설간격을 2.0×2.0m

로 결정함으로써 지반정수의 불확실성과 안정성을 모두 모두 만족할 수 있는 것으로 판단되었다.

본 신뢰성 해석에는 확률론적 해석에서 허용잔류 침하량 10cm를 만족한 압밀도 98.6%를 목표 압밀도로 정하고, 목표 압밀도에 대한 도달 확률이 95%이상일 때 안정성을 확보하는 동시에 경제적인 연약지반 개량공법의 형식으로 선정하였다.

분석대상 구역을 토공운영현황에 따라 5단계로 영역을 구분하였으며, 이에 따라 배수재의 타설간격을 1.0×1.0m, 1.2×1.2m, 1.5×1.5m에 대한 신뢰성 해석을 각각 수행하였다.

표 3.29 대상구간의 타설간격 설정 비교검토

확정적 해석 배수재간격	신뢰성 해석			
	대상구간	배수재간격	대상구간	배수재간격
전 구간 2.0×2.0 일괄적용	I-A-1	1.2×1.2	III-C-1	1.5×1.5
	I-A-2	1.2×1.2	III-C-2	1.5×1.5
	I-A-3	1.2×1.2	III-C-3	1.5×1.5
	I-A-4	1.2×1.2	III-E-1	1.2×1.2
	I-C-1	1.2×1.2	III-E-3	1.2×1.2
	I-C-2	1.2×1.2	III-E-2	1.5×1.5
	I-C-3	1.2×1.2	IV-E-2	1.2×1.2
	I-C-4	1.2×1.2	IV-E-4	1.2×1.2
	I-C-5	1.5×1.5	IV-E-1	1.5×1.5
	I-C-6	1.5×1.5	IV-E-3	1.5×1.5
	I-C-7	1.5×1.5	IV-C-1	1.5×1.5
	I-C-8	1.5×1.5	IV-C-2	1.5×1.5
	II-C-1	1.5×1.5	V-A-1	1.2×1.2
	II-C-2	1.5×1.5	V-C-1-1	1.2×1.2
	II-C-3	1.5×1.5	V-C-1-2	1.2×1.2
	II-C-4	1.5×1.5	V-C-2	1.5×1.5

신뢰성 해석을 통해 지반정수의 불확실성을 고려해 과다 적용된 배수재 타설간격을 각 구간별로 구분하여 적용함으로써 지반정수의 불확실성과 안정성을 모두 모두 만족할 수 있는 동시에 확보하는 동시에 공사비 측면에서도 경제적인 연약지반 개량공법의 형식으로 검토되었다.

제 4 장 결 론

본 연구에서는 기초지반의 압밀해석에 대한 압밀해석시 배수재의 간격에 대한 영향, 압밀시간에 대한 영향과 잔류침하와 부등침하에 대해 신뢰성해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대상지반의 영역 구분을 통해 배수재 간격을 1.0m와 1.2m 및 1.5m를 적용하여 목표압밀도에 도달할 확률을 해석하여 배수재 간격의 신뢰도를 검토하였다.

배수재 간격 1.0m를 적용하였을 경우 모든 지역에서 목표압밀도 도달 확률이 99.9%~100%로 나타나 이는 과대한 설계로 나타 제외하였으며, 배수재 간격 1.2m를 적용하였을 경우 거의 모든 지역에서 95%이상의 신뢰성을 확보할 수 있어 비교적 안정된 설계로 나타났다.

배수재 간격 1.5m를 적용하였을 경우 1단계 시공구간인 I-A-1에서 I-C-4구간은 목표압밀도에 도달할 확률이 80.22~84.52%로 나타났으며, III-E-1구간과 III-E-3구간, IV-E-2구간, IV-E-4구간, V-A-1구간, V-C-1-1구간에서는 목표압밀도에 도달할 확률이 50.26%~71.32%로 나타나 비교적 신뢰도가 낮게 나타남을 알 수 있다. 따라서 배수재 간격을 1.5m로 적용하였을 때 목표압밀도에 도달할 확률이 95%이하인 지역에서는 1.2m 배수재 간격을 적용하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

따라서, 신뢰성 해석을 통해 지반정수의 불확실성을 고려해 과다 적용된 배수재 타설간격을 각 구간별로 구분하여 적용함으로써 지반정수의 불확실성과 안정성을 모두 모두 만족할 수 있는 동시에 확보하는 동시에 공사비 측면에서도 경제적인 연약지반 개량공법의 형식으로 검토되었다.

2. 각 영역에서 압밀기간의 변화에 따라서 발생하는 잔류침하량의 발생량이 허용잔류침하량(10cm)을 초과할 확률을 해석하였으며, 허용잔류 침하량을 초과할 확률이 10%이내에 해당하는 압밀기간을 적용하여 잔류침하에 대한 안정성을 확보하는 것이 바람직하다.
3. 인접하는 영역과의 부등침하에 대한 신뢰성 해석한 결과 허용부등침하경사(1/600)를 초과하여 부등침하가 발생될 확률은 거의 0%에 가깝게 나타났다. 각각의 분할

된 영역에서 목표압밀도에 도달할 확률이 95%를 만족하는 배수재 간격으로 시공하고 잔류침하량의 발생량이 10cm를 초과하지 않은 범위일 때는 허용부등침하경사 이상의 부등침하가 발생할 가능성은 거의 없는 것으로 나타났다.

4. RMGC 기초가 움직이는 영역을 선정된 후 경계구역의 좌우 30m 이격거리에 레일이 움직인다고 가정하고 부등침하를 검토한 결과는 다음과 같다. 각각 인접한 두 구간(I-C-3구간 : I-C-7구간, I-C-5구간 : II-C-1구간)의 부등침하에 대한 신뢰성 해석한 결과 허용부등침하경사(1/600)를 초과하여 부등침하가 발생할 확률은 평균 0.04%와 0.07%로 나타났다. 즉, RMGC의 상부하중으로 인하여 발생하는 부등침하에 대한 영향은 무시할 정도로 판단되며, 위의 결과로 살펴보면 설계된 배수재의 타설간격과 재하기간은 부등침하의 발생에 영향을 미치는 제한조건이 되지 않는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김방식, 김병일(2007), "지반 불확실성을 고려한 연직배수재 배치간격의 확률론적 해석과 결정", 한국지반공학회논문집, 제23권, 제4호, pp.125-132
2. 안종필, 홍원표, 이우현, 남정만(1991), "교대 기초말뚝의 안정", 대한토질공학회지, 대한토질공학회, 제7권, 2호, pp. 67~79.
3. 안종필, 홍원표(1994), "측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구", 한국지반공학회지, 한국지반공학회, 제10권, 2호, pp. 25~40
4. 안종필, 박상범, 김규덕(2008), "측방유동을 받는 교대 기초말뚝의 안정성에 관한 연구", 대한토목학회 정기학술대회논문집, pp. 1972~1975
5. 양우식(1992), "FOSM METHOD를 이용한 사면의 신뢰도 해석", 경희대학교 대학원 박사논문
6. 이규환, 정대석, 박찬덕 (2006), "지반의 불확실성을 고려한 연약지반의 침하해석", 한국구조물진단유지관리공학회지, 제11권, 제4호, 통권44호, pp.138-146
7. 이증빈, 신형우(1992), "하중계수에 기초한 최적신뢰성 해석모델 개발", 한국 전산구조 공학회 학술발표 논문집, 제5권, pp. 134~139.
8. 이증빈(1990), "신뢰성이론에 의한 말뚝기초의 안정해석", 한국전산구조공학회 학술발표 논문집, 제3권, pp. 85~90.
9. 이철웅 (2008) 처오름에 대한 신뢰성 해석 및 부분안전계수 산정, 한국해안·해양공학회지, 제 20권, 제 4호, pp.355-362.
10. 이철웅 (2007) 소단형 방파제의 안정성에 대한 신뢰성 해석, 한국해안·해양공학회지, 제 19권, 제 5호, pp.399-407.
11. 조효남, 정태송, 전재명(1983) "신뢰성이론에 의한 R.C옹벽의 안정해석 및 설계기준", 대한토목학회논문집, 제3권, 35호, pp. 77~86.
12. Breitung, K. (1984), "Asymptotic Approximation for Multi-normal Integrals", Journal of Engineering Mechanics ASCE, Vol. 117, No. 12. pp.2904-2923.
13. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells", Transactions of the ASCE, Vol. 113, pp.718-724.
14. Cornell, C.A.(1969), "A Probability-Based Seructural Code", Proceeding of The

American Concrete Institute, Vol. 66, No.12, pp. 974~985.

15. Davis, E. H. and Raymond, C. P. (1965), "A Non-linear Theory of Consolidation", *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp.161-173.
16. Der Kiureghian, A., Lin, H. Z. and Hwang, S. J. (1987), "Second-order Reliability Approximations", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 113, No. 8, pp.1208-1225.
17. Fiessler, B., Rudiger R. and Hans-Jochim N. (1979), "Quadratic Limit States in Structural Reliability", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 105, No. 4, pp.661-696.
18. Freudenthal, A.M.(1947), "The Safety of Structures", *Trans. ASCE*, Vol. 112, pp. 125~180
19. Freudenthal, A.M.(1956). "Safety and the Probability of Structure Failure". *Trans. ASCE*, Vol. 121, pp. 1337~1375
20. Gibson, R. E., England, G. L. and Hussey, M. J. L. (1967), "The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays", *Geotechnique*, Vol. 17, No. 3, pp.261-273.
21. Hansbo, S. (1979), "Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains", *Ground Engineering*, Vol. 5, No. 12, pp.16-25.
22. Kanda, J, and Adachi, TRackwitz.(2001), "Influence of Probability Distribution of Load on Optimum Reliability", *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier Vol. 73, pp. 197~204.
23. Lacasse, S. and Lunne, T. (1986), "Dilatometer Tests in Sands", *Use of in Situ Test in Geotechnical Engineering*, ASCE, pp. 689-699.
24. Lind, N.C. and Hasofer, A.M.(1974), "Exact and Invariant Second-Moment Code Format,". *Journal of the Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 100, No. 1, pp. 11~121.
25. Meyerhof, G. G. (1965), "Shallow Foundations", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation*, ASCE, Vol. 91, pp.21-31.
26. Meyerhof, G. G. (1982), *The Bearing Capacity and Settlement of Foundations*, pp.56-70.
27. Mikasa, M. (1963), *The Consolidation of Soft Clay - A New Consolidation*

Theory and Its Application, Publisher Kajima, Tokyo, Japan. pp.135-152.

28. Pugsley, A.(1995), "Report on Structural Safety", Structural Engineer, Vol. 33, No, 5, pp. 141~149
29. Shooman, M. (1968), Probabilistic reliability: An Engineering Approach, Publishers McGraw-Hill, New York, pp.20-34.
30. Terzaghi, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics, Publishers John Wiley and Sons, New York, pp.151-160.

감사의 글

설렘과 꿈을 안고 인생 계획의 한쪽으로 미루어두었던 대학원 석사과정을 다시 시작한 게 엇그제 같은데, 벌써 3년이라는 시간이 지났습니다. 무사히 대학원 석사과정을 마칠 수 있도록 주변에서 도와주시고 신경써주신 모든 이들에게 감사의 마음을 작게나마 전하고자 합니다.

대학원 생활을 함에 있어 직장생활을 핑계 삼아 소홀하였던 점 그리고 차일피일 논문 작성을 미루어왔던 점에 죄송스러운 마음이 듭니다. 그럼에도 불구하고 한결같은 관심과 애정 어린 지도로 목적지까지 무사히 도착할 수 있도록 지도하여주신 김대현 교수님께 마음속 깊이 감사드립니다. 교수님의 지도를 통해 연구가 무엇인지, 제게 부족한 점이 무엇이고 어떤 방향으로 나아가야 할 지에 대해 알 수 있었던 것 같으며 무사히 논문을 완성할 수 있었습니다.

또한, 대학원 생활을 하는데 있어서 많은 것을 아낌없이 조언해 주시고 바쁘신 가운데서도 논문을 심사해주시고 부족한 부분을 채울 수 있도록 도움주신 교수님들께도 감사의 말씀을 전합니다. 사회생활과 대학원 생활을 병행함에 있어 편의를 봐주시고 많은 걱정을 해주시며 정도의 길을 갈 수 있도록 알려주신 박길현 교수님, 항상 밝고 인자하신 웃음으로 반겨주시고 이해가 쉽도록 차근차근 친절하게 알려주시는 김운중 교수님, 그리고 제가 미처 고려 못한 부분까지 정확하게 짚어주시는 김성홍 교수님, 항상 열정적으로 복잡한 전문지식을 보다 쉽게 이해할 수 있도록 도와주신 박정웅 교수님, 그리고 부족한 부분은 정확하게 짚어주시고 좋은 부분은 기분 좋은 칭찬을 들려주신 박장준 교수님, 부족한 논문의 완성도가 높아질 수 있도록 아낌없는 조언을 주신 이원희 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

대학원 생활동안 곁에서 힘이 되어주시고 차일피일 미루고 있던 학위논문을 완성할 수 있도록 많은 조언과 관심을 주신 김현태 선배님, 허홍균 선배님, 임재춘 선배 그리고 친 형과 같이 관심을 갖고 인생을 삶에 있어서 많은 도움과 조언을 해주신 박경호 박사님, 박상범 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 대학원 생활을 함에 있어 미숙한 부분에 대해 알려주고 도와준 박경호 예비박사, 많은 신경을 못써주었지만 많은 부분을 도와주고 함께했던 후배님들에게도 감사의 말씀드립니다.

마지막으로 지금 곁에는 안계시지만 항상 저를 제일 걱정해주시고 앞으로도 묵묵히 지켜봐주실 거라 믿는 저의 멘토이자 아버지 생각이 제일 많이 듭니다. 저를 건설분야

로 나아갈 수 있도록 도와주시고 인생을 삼에 있어 항상 바른 길을 갈 수 있도록 도와 주신 아버지께 감사하단 말씀과 함께 한번도 해보지 못한 사랑한다는 말을 전해드리고 싶습니다.

아버지의 빈자리가 너무 큼에도 불구하고 내색하지 않으시고 아들까지 걱정해주시는 우리 어머니, 항상 저를 믿어주시고 응원해주시며 힘을 북돋아주시는 어머니께는 감사의 글로는 표현이 부족할 거 같습니다. 앞으로 아버지의 빈자리 제가 채워드릴 수 있도록 앞으로 많이 노력하고 효도하도록 하겠습니다. 그리고 같은 토목과를 나와 지금 자기의 목표를 이루기 위해 힘든 도전을 선택한 우리 동생, 형은 항상 너를 응원하고 믿으니까 뒤는 보지말고 앞만 보고 달리라는 말을 해주고 싶습니다.

이 논문이 완성되기까지 도움주신 모든 분들께 다시 한 번 머리 숙여 감사의 말씀을 드리며, 현실에 만족하지 않고 목표를 위해 열정적으로 달려가는 사람이 될 수 있도록 노력하겠습니다.

2014년 6월
안 현 민