



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2020년 2월

박사학위논문

연약지반의 침하량과 간극수압  
계측을 통한 압밀침하량 예측

조선대학교 대학원

토목공학과

최현석

# 연약지반의 침하량과 간극수압 계측을 통한 압밀침하량 예측

**Prediction of Consolidation Settlement by Measuring Settlement and  
Pore Water Pressure of Soft Ground**

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

최현석

# 연약지반의 침하량과 간극수압 계측을 통한 압밀침하량 예측

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

최 현 석

최현석의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 金雲中 (인)

위 원 조선대학교 교수 朴正雄 (인)

위 원 조선대학교 교수 金聖洪 (인)

위 원 송원대학교 교수 鄭相國 (인)

위 원 조선대학교 교수 金大賢 (인)

2019년 12월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경과 목적 .....	1
1.2 연구동향 .....	3
1.3 연구내용 및 방법 .....	6
제 2 장 이론적 배경 .....	7
2.1 응력경로에 따른 유효응력과 전응력 경로 .....	7
2.1.1 응력경로에 관한 기본사항 .....	7
2.1.2 압밀시험에 관한 기본사항 .....	13
2.2 압밀이론 .....	16
2.2.1 압밀이론의 필요성 .....	16
2.2.2 Terzaghi의 1차원 압밀이론 .....	16
2.2.3 압밀도 .....	19
2.2.4 평균압밀도 .....	19
2.2.5 압밀시험 .....	20
2.2.6 압밀계수의 추정 .....	21
2.2.7 간극비-하중 곡선 .....	24
2.2.8 압밀침하량 산정 .....	28
2.3 현장계측자료에 의한 침하예측 이론 .....	32
2.4 현장계측자료에 의한 새로운 침하예측 이론 .....	34

2.4.1 기존 침하예측 기법의 문제점과 새로운 침하예측 기법의 필요성 .. 34  
 2.4.2 간극수압계 및 침하계를 이용한 새로운 침하예측법 제안 ..... 35

**제 3 장 현장계측분석 및 성과** ..... 38

3.1 연구대상지역 ..... 38

3.2 계측기 관리 기준 ..... 39

3.2.1 매설위치 선정기준 ..... 39

3.2.2 계측기기 선정기준 ..... 39

3.2.3 관리지역별 계측빈도 ..... 40

3.2.4 계측기 사양 및 측정법 ..... 40

3.3 P-1 지점 계측기 결과 및 성과분석 ..... 42

3.3.1 P-1 지점 계측기 매설위치 ..... 42

3.3.2 P-1 지점 지층구성 ..... 42

3.3.3 P-1 지점 연구대상 토질특성 ..... 45

3.3.4 P-1 지점 계측현황 및 분석 ..... 45

3.4 P-2 지점 계측기 결과 및 성과분석 ..... 69

3.4.1 P-2 지점 계측기 매설위치 ..... 69

3.4.2 P-2 지점 지층구성 ..... 69

3.4.3 P-2 지점 토질특성 ..... 71

3.4.4 P-2 지점 계측현황 및 분석 ..... 71

3.5 P-3 지점 계측기 결과 및 성과분석 ..... 95

3.5.1 P-3 지점 계측기 매설위치 ..... 95

3.5.2 P-3 지점 지층구성 ..... 95

3.5.3 P-3 지점 토질특성 ..... 98

3.5.4 P-3 지점 계측현황 및 분석 ..... 99

제 4 장 현장 $e - \log P'$ 곡선의 분석 및 고찰 .....	127
4.1 P-1 지점 $e - \log P'$ 곡선의 분석 및 고찰 .....	127
4.1.1 P-1, 0.0~4.0m 점성토층 .....	127
4.1.2 P-1, 4.0~10.0m 점성토층 .....	129
4.1.3 P-1, 10.0~14.0m 점성토층 .....	131
4.2 P-2 지점 $e - \log P'$ 곡선의 분석 및 고찰 .....	133
4.2.1 P-2, 0.0~4.0m 점성토층 .....	133
4.2.2 P-2, 4.0~10.0m 점성토층 .....	135
4.2.3 P-2, 10.0~16.0m 점성토층 .....	137
4.3 P-3 지점 $e - \log P'$ 곡선의 분석 및 고찰 .....	139
4.3.1 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 .....	139
4.3.2 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 .....	141
4.3.3 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 .....	143
4.3.4 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 .....	145
4.4 성토형태별 $e - \log P'$ 곡선의 고찰 .....	147
 제 5 장 결론 .....	 151
 참고문헌 .....	 153



## 표 목 차

표 3.1 계측기기 종류 및 적용 내용 .....	39
표 3.2 설치된 계측기의 측정빈도 .....	40
표 3.3 층별침하계 .....	40
표 3.4 간극수압계 .....	41
표 3.5 지하수위계 .....	41
표 3.6 지중경사계 .....	41
표 3.7 P-1 지점 지층구성 .....	43
표 3.8 P-1 지점의 토질특성 .....	45
표 3.9 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	48
표 3.10 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	53
표 3.11 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	54
표 3.12 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	59
표 3.13 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	60
표 3.14 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	65
표 3.15 P-1 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수 비교 .....	66
표 3.16 P-1 지점의 침하량 분석결과 .....	67
표 3.17 P-2 지점 지층구성 .....	70
표 3.18 P-2 지점의 토질특성 .....	71
표 3.19 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	74
표 3.20 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	79
표 3.21 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	80
표 3.22 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	85
표 3.23 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	86
표 3.24 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	91
표 3.25 P-2 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수 비교 .....	92
표 3.26 P-2 지점의 침하량 분석결과 .....	93
표 3.27 P-3 지점 지층구성 .....	96

표 3.28 P-3 지점의 토질특성 .....	98
표 3.29 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	101
표 3.30 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	106
표 3.31 P-3, 4.0~1.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	107
표 3.32 P-3, 4.0~1.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	112
표 3.33 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화 .....	113
표 3.34 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	118
표 3.35 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교 .....	123
표 3.36 P-3 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수 비교 .....	124
표 3.37 P-3 지점의 침하량 분석결과 .....	125

## 그 립 목 차

그림 2.1 Mohr응력원과 응력점 .....	7
그림 2.2 $p-q$ 좌표의 일반적 정의 .....	8
그림 2.3 토질역학에서 정의하는 $p-q$ 좌표 .....	8
그림 2.4 Mohr응력원과 응력경로( $p-q$ )의 비교 .....	9
그림 2.5 $p-q$ 평면상의 한점 $M(p, q)$ 또는 $M'(p, -q)$ 의 $\sigma_v, \sigma_h$ 결정 .....	10
그림 2.6 TSP와 ESP의 위치에 따른 $p, q$ 의 대소 및 간극수압 .....	11
그림 2.7 여러방향의 응력경로 .....	12
그림 2.8 압밀시험 각 단계의 응력분포 .....	15
그림 2.9 압밀시험에 대한 응력경로 .....	15
그림 2.10 1차원 압밀흐름 .....	17
그림 2.11 압밀도 구하는 방법 .....	19
그림 2.12 $\log T_v - U$ 의 관계 .....	23
그림 2.13 $\sqrt{T_v} - U$ 관계 .....	24
그림 2.14 간극비-하중곡선 .....	25
그림 2.15 Casagrande의 선행압밀하중 결정 방법 .....	26
그림 2.16 처녀압밀곡선에서의 압축지수 결정 .....	27
그림 2.17 팽창 - 재압축곡선 .....	28
그림 2.18 압밀침하량 산정 .....	29
그림 2.19 정규압밀 상태 압밀침하량 .....	30
그림 2.20 과압밀 상태 압밀침하량 .....	31
그림 2.21 쌍곡선 법 .....	32
그림 2.22 Hoshono 법 .....	33
그림 2.23 Asaoka 법 .....	33
그림 2.24 계측자료를 이용한 새로운 침하관리기법 .....	37
그림 3.1 연구대상 지역 .....	38
그림 3.2 ○○사업지구내 P-1 지점 위치 .....	42
그림 3.3 P-1 지점의 시추주상도 .....	43
그림 3.4 P-1 지점의 침하 및 간극수압 발생현황 .....	47
그림 3.5 P-1, 0.0~4.0m 점성토층 간극수압현황 .....	49

그림 3.6 P-1, 0.0~4.0m 점성토층 침하현황 .....	49
그림 3.7 P-1, 0.0~4.0m 점성토층 간극비 변화현황 .....	50
그림 3.8 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 .....	50
그림 3.9 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험 $e - \log P$ 곡선 .....	52
그림 3.10 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한 $e - \log P'$ 곡선 .....	52
그림 3.11 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 최종침하량 평가 .....	53
그림 3.12 P-1, 4.0~10.0m 점성토층 간극수압현황 .....	55
그림 3.13 P-1, 4.0~10.0m 점성토층 침하현황 .....	56
그림 3.14 P-1, 4.0~10.0m 점성토층 간극비 변화현황 .....	56
그림 3.15 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 .....	57
그림 3.16 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험 $e - \log P$ 곡선 .....	58
그림 3.17 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한 $e - \log P'$ 곡선 .....	58
그림 3.18 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 최종침하량 평가 .....	59
그림 3.19 P-1, 10.0~14.0m 점성토층 간극수압현황 .....	61
그림 3.20 P-1, 10.0~14.0m 점성토층 침하현황 .....	61
그림 3.21 P-1, 10.0~14.0m 점성토층 간극비 변화현황 .....	62
그림 3.22 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 .....	62
그림 3.23 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 실내시험 $e - \log P$ 곡선 .....	64
그림 3.24 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한 $e - \log P'$ 곡선 .....	64
그림 3.25 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 최종침하량 평가 .....	65
그림 3.26 P-1 지점의 실내시험결과 토질정수 .....	66
그림 3.27 P-1 지점의 현장계측결과 토질정수 .....	67
그림 3.28 P-1 지점의 심도별 층별침하량 및 예상 침하량 .....	68
그림 3.29 ○○사업지구내 P-2 지점 위치 .....	69
그림 3.30 P-2 지점의 시추주상도 .....	70
그림 3.31 P-2 지점의 침하 및 간극수압 발생현황 .....	73
그림 3.32 P-2, 0.0~4.0m 점성토층 간극수압현황 .....	74
그림 3.33 P-2, 0.0~4.0m 점성토층 침하현황 .....	75
그림 3.34 P-2, 0.0~4.0m 점성토층 간극비 변화현황 .....	76
그림 3.35 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 .....	76

그림 3.36 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선 ..... 78  
 그림 3.37 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선 .... 78  
 그림 3.38 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 최종침하량 평가 ..... 79  
 그림 3.39 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압현황 ..... 80  
 그림 3.40 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 침하현황 ..... 81  
 그림 3.41 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 간극비 변화현황 ..... 82  
 그림 3.42 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 ..... 82  
 그림 3.43 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선 ..... 84  
 그림 3.44 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선 .... 84  
 그림 3.45 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 최종침하량 평가 ..... 85  
 그림 3.46 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 간극수압현황 ..... 86  
 그림 3.47 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 침하현황 ..... 87  
 그림 3.48 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 간극비 변화현황 ..... 88  
 그림 3.49 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 ..... 88  
 그림 3.50 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선 ..... 90  
 그림 3.51 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선 .... 90  
 그림 3.52 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 최종침하량 평가 ..... 91  
 그림 3.53 P-2 지점의 실내시험결과 토질정수 ..... 92  
 그림 3.54 P-2 지점의 현장계측결과 토질정수 ..... 93  
 그림 3.55 P-2 지점의 심도별 층별침하량 및 예상 침하량 ..... 94  
 그림 3.56 ○○사업지구내 P-3 지점 위치 ..... 95  
 그림 3.57 P-3 지점의 시추주상도 ..... 96  
 그림 3.58 P-3 지점의 침하 및 간극수압 발생현황 ..... 100  
 그림 3.59 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 간극수압현황 ..... 102  
 그림 3.60 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 침하현황 ..... 102  
 그림 3.61 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 간극비 변화현황 ..... 103  
 그림 3.62 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 ..... 103  
 그림 3.63 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선 ..... 105  
 그림 3.64 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선 .... 105  
 그림 3.65 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 최종침하량 평가 ..... 106

그림 3.66 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 간극수압현황 .....	108
그림 3.67 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 침하현황 .....	108
그림 3.68 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 간극비 변화현황 .....	109
그림 3.69 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 .....	109
그림 3.70 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험 $e - \log P$ 곡선 .....	111
그림 3.71 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한 $e - \log P'$ 곡선 .....	111
그림 3.72 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 최종침하량 평가 .....	112
그림 3.73 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 간극수압현황 .....	113
그림 3.74 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 침하현황 .....	114
그림 3.75 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 간극비 변화현황 .....	115
그림 3.76 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 .....	115
그림 3.77 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 실내시험의 $e - \log P$ 곡선 .....	117
그림 3.78 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한 $e - \log P'$ 곡선 .....	117
그림 3.79 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 최종침하량 평가 .....	118
그림 3.80 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 간극수압현황 .....	119
그림 3.81 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 침하현황 .....	120
그림 3.82 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 간극비 변화현황 .....	120
그림 3.83 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출 .....	121
그림 3.84 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의 실내시험 $e - \log P$ 곡선 .....	122
그림 3.85 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한 $e - \log P'$ 곡선 .....	122
그림 3.86 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 최종침하량 평가 .....	123
그림 3.87 P-3 지점의 실내시험결과 토질정수 .....	124
그림 3.88 P-3 지점의 현장계측결과 토질정수 .....	125
그림 3.89 P-3 지점의 심도별 층별침하량 및 예상 침하량 .....	126
그림 4.1 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 $e - \log P'$ 곡선 .....	127
그림 4.2 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 $e - \log P'$ 곡선 .....	129
그림 4.3 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 $e - \log P'$ 곡선 .....	131
그림 4.4 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 $e - \log P'$ 곡선 .....	133
그림 4.5 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 $e - \log P'$ 곡선 .....	135
그림 4.6 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 $e - \log P'$ 곡선 .....	137

그림 4.7 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의  $e-\log P'$  곡선 ..... 139  
 그림 4.8 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의  $e-\log P'$  곡선 ..... 141  
 그림 4.9 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의  $e-\log P'$  곡선 ..... 143  
 그림 4.10 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의  $e-\log P'$  곡선 ..... 145  
 그림 4.11 P-1 지점의 경과일 별 성토고 ..... 147  
 그림 4.12 P-1 지점의  $e-\log P'$  곡선상 간극비 변화 ..... 147  
 그림 4.13 P-2 지점의 경과일 별 성토고 ..... 148  
 그림 4.14 P-2 지점의  $e-\log P'$  곡선상 간극비 변화 ..... 148  
 그림 4.15 P-3 지점의 경과일 별 성토고 ..... 149  
 그림 4.16 P-3 지점의  $e-\log P'$  곡선상 간극비 변화 ..... 149

## ABSTRACT

### Prediction of Consolidation Settlement by Measuring Settlement and Pore Water Pressure of Soft Ground.

Choi, Hyeon Seok

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

The southwestern coastal area of Korea consists of soft ground and the formation of housing and industrial complexes in the area has been actively carried out. At the site of soft ground, the problem of consolidation settlement has frequently been caused in the reclamation of the complexes and the settlement measurement and analysis are very important.

However, the consolidation settlement analysis has not been satisfactory. This is because the consolidation settlement analysis did not reflect the procedure of dissipating the excess pore water pressure as the existing analysis of the compressive characteristics of the soft ground is limited to the analysis based on the subsidence type.

Therefore, the purpose of the study is to predict the final consolidation settlement for threesites P-1, P-2, and P-3 before the final embankment, by comparing the field measurement data and the theoretical data estimated by the hyperbolic method.

When the pore water pressure was dissipated or there was little residual stress, the results were similar but it showed a large difference in the result values between the field measurement data and the theoretical data if the residual pore pressure gap was large.

In addition, the hyperbolic method can only be evaluated after the final



embankment, but the method using the field measurement data can be used for the preparation of the virgin compression curve prior to the final embankment. Therefore it is expected that the final consolidation settlement can be assessed before the final embankment. Furthermore, the final consolidation settlement before the final embankment can be evaluated because the shear strength of the soil can be estimated.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경과 목적

국내 서남해안지역은 연약지반으로 구성되어 있으며 이 지역에 대한 택지 및 산업단지 조성이 활발히 실시되어왔다. 연약지반 현장에서 단지 매립은 필수적으로 압밀침하에 대한 문제가 발생하는데 이에 따른 해결방법으로 계층 및 분석을 수행하였으나, 이에 대한 정확한 성과분석은 기대에 미치지 못하였다. 이는 기존의 연약지반의 압밀특성분석이 침하형태에 따른 해석으로 국한되어 있어 과잉간극수압에 소산에 따른 과정이 해석과정에 반영되어 있지 못하였기 때문이다.

연약지반상의 성토나 구조물 축조 시 가장 중요한 고려사항은 침하관리와 안전관리인데 실제 지반거동과 설계 계획과는 현저한 차이를 보일 때가 많다. 이는 지반이 불균질하고 광범위하여 현장조사 및 실내시험을 수행하여도 실제 거동을 예측하기가 거의 불가능하기 때문이다. 이를 극복하기 위하여 현장에 계층기를 매설하여 침하관리를 통하여 실시하고 있다.

현장에서 침하관리를 하여 장기침하량을 예측하는 방법은 쌍곡선법, Hoshino법( $\sqrt{t}$ 법),  $\log t$ 법 경험에 의한 방법이 있으며, Asaoka법과 Monden법은 이론적으로 유도되었다. 지금까지의 연구는 모든 침하예측연구가 침하계를 이용한 침하경향으로 장래 침하량을 예측한다는 것이다. 문제는 이러한 방법이 Terzaghi가 제안한 압밀 전 과정에 발생하는 과잉간극수압 소산과정을 반영하지 못하고 단지 침하 경향을 반영하고 있다는 것이다.

본 연구에서는 간극수압계와 침하계를 동시에 이용하여 압밀특성을 연구하였다. 성토과정에서 증가하는 전응력(지중응력+성토하중)을 표시하고, 과잉간극수압을 측정하여 유효응력(지중응력+성토하중-과잉간극수압) 변화를 도시하였다. 그리고 침하계에서 나타난 침하량을 간극비로 변환하여 표준압밀시험의  $e-\log P'$  곡선에 동시 작도하였다. 작도된  $e-\log P'$  곡선상에서는 유효응력이 선행압밀하중( $P_c$ ) 이전에는 재압축곡선을 보이며, 성토과정에서는 과잉간극수압으로 인한 유효응력의 감소로 인하여 전응력 곡선의 좌측에 표기하였다. 이후 성토 종료 후 유효응력곡선은 처녀압밀곡선을 따라 이동하게 되는데, 이 처녀압밀곡선의 기울기를 이용하여 전응력과 유효응력이 같아지는 점이 최종간극비 즉 최종침하량이 된다.

따라서 기존의 침하예측방법이 성토 후 일정기간이 경과되어야 가능하나, 본 연구에서의 침하예측 시점은 최종성토 완료 직전 예측이 가능하다. 간극수압 발생 및 소산과정을 유효응력의 감소 및 증가과정으로 도시하고, 유효응력 증·감에 따른 간극비의 감소를  $e - \log P'$  곡선상에 보다 정확하고 빠르게 연약지반 특성을 파악하는데 도움을 줄 뿐만 아니라 연약지반 개량과 연약지반 개량 후에 발생하는 각종 문제점에 대한 시간, 경제적 피해를 최소화하는데 목적이 있다.

## 1.2 연구 동향

연약지반의 압밀문제는 오랫동안 연구의 대상이었으며, 현재까지도 지속적으로 연구되고 있다. Terzaghi(1925)의 일차원 압밀이론이 발표된 이후, Casagrande(1936)가 제안한 선행압밀하중의 결정법, Skempton and Jones(1944)에 의한 액성한계와 압축지수와의 관계 등의 제안, Taylor(1942)의 압밀계수의 결정 방법이 제안되었다. 또한 Mikasa(1963)와 Gibson 등(1967)의 유한변형률 압밀이론, 응력경로법, 탄성이론, 유한요소법 등 여러 방법이 제시되었다.

근래에 들어 침하시간에 관해서는 많은 연구가 진행되어 설계단계에서부터 실측값과 유사한 압밀시간을 예측할 수 있는 많은 방법이 제안되기도 하였으며(Rendulic, 1935; Carrillo, 1942; Barron, 1948; Yoshikuni and Nakanodo, 1974; Hansbo, 1981; Onoue, 1988a, 1988b; Zeng and Xie, 1989; Lo, 1991; Chung et al., 2009), 국내에서도 많은 연구자들이 연약지반 압밀에 대한 침하특성 및 침하량 예측에 관한 연구를 수행하였으나(이희훈 등, 1997; 윤찬영 등, 2007; 이택수, 2008; 박철호, 2009; 류승석, 2012; 차지연, 2013; 권덕희, 2014), 이들 연구는 연약지반 개량과정에서 발생하는 침하예측에 국한된 연구이다.

침하해석법의 이론적 발달에도 불구하고 해석법의 매개변수는 현장에서는 물론이고 실험실 수준에서조차 결정하기 매우 어려우므로 아직도 연약지반의 침하해석에는 비교적 간략한 방법인 Terzaghi의 일차원 압밀이론과 Barron의 압밀이론이 적용되고 있다. 따라서 압밀침하해석 결과는 방법상의 제한, 매개변수의 불확실성 등에 의해서 실제와 차이가 발생하는 것은 불가피하다.

Terzaghi가 제안한 탄성압밀이론의 한계로 지적되고 있는 가정에 대한 문제점의 인식과 실험조건에 따른 압축곡선 및 장기압밀특성에 대해 더욱 신뢰성 있는 해석방법의 제안이 요구되는 실정이다.

이러한 문제들 때문에 현장 침하량 실측치를 이용한 침하량 예측기법이 사용되고 있으며, 실측자료를 이용한 압밀침하량 추정방법을 이용하면 토질 특성의 다양성, 하중의 크기와 분포의 불확실성 등이 최소화되어 실제 침하량을 더욱 잘 예측할 수 있다.

실측치에 의한 침하량의 예측기법은 크게 1) 통계적 방법, 2) 도형적 방법, 3) 실물레이션 방법으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 쌍곡선(Hyperbolic method), 성구법(Hoshino method), 천강법(Asaoka method), 문전법, log-t법 등이 사용되고 있다. 장기

침하량 예측법을 사용하여 신뢰성이 높은 침하예측을 위해서는 그 예측법의 신뢰성을 파악하는 것이 필요하나, 이에 관하여 검토한 사례는 적다.

Bjerrum(1967)은 점성토지반의 퇴적연대 또는 시간지연에 따른 압축 크리프의 거동을 모델화하였으며 간극비·응력·시간 사이에 유일한 관계가 있음을 밝혔으며, 유효응력의 관점에서 흙의 구조변화를 즉시압축 및 지연압축으로 분류하였다.

Mesri(1973), Mersi and Rokhsar(1974), Mesri and Godlewski(1977), Mesri and Choi(1985), Mesri et al.(2011)은 일차원 압밀시험을 통한 이차압축지수와 응력레벨의 무관함을 주장하였고 퇴적지반의 수정 이차압축지수의 영역이 0.1~10%의 범위에 있으며, 일차압축지수에 대한 이차압축지수의 비가 일정함을 밝혔다. 또한, 일차압밀이 클수록 이차압축량도 크다고 분석하였고, 수정 이차압축지수에 영향을 주는 인자들 가운데 특히 선행압축, 지속하중 및 온도의 영향이 매우 크다고 주장하였다.

Ladd et al.(1977)은 이차압밀이 발생하는 시점에 대한 관점에서 실제 일차압밀완료 후 이차압밀이 일어난다는 가정 A와 이차압밀이 일차압밀과 상관없이 일어난다는 가정 B로 가정 A로 구한 시간~변형률 곡선과 가정 B로 구한 시간~변형률곡선을 비교하면 후자가 더 큰 변형률 값을 나타낸다고 하였다.

그리고 Aboshi(1973)는 압밀침하 변형률과 시간곡선에 미치는 점성토층의 두께를 변화시킨 압밀시험을 수행하고 점성토층 두께에 대한 영향을 검토하여 시간~침하곡선이 Ladd et al.(1977)이 제안한 가정 A와 가정 B의 중간에 존재한다고 하는 가정 C를 제안한 바 있다.

Jamiolkowski et al.(1985)은 가정 A는 과잉간극수압이 소산되어 일차압밀 종료 후에 크리프 과정이 나타난다고 하였다. 또한, Leroneil et al.(1985)은 가정 A의 이론은 타당성이 없고 이차압밀은 간극수압이 소산되는 전체과정 동안에 이루어지며, 이는 일차압밀 동안에 크리프 거동이 유발된다는 가정 B와 일치한다고 하였으며, 심도가 깊을수록 일차압밀의 변형은 증가한다고 하였다.

Kabbaj et al.(1988)은 성토 후 현장유효응력이 선행 압밀하중에 도달된 후에 간극수압이 증가하고 유효응력이 감소하는 현상을 보고하였다. 이와 같은 간극수압이 증가하는 원인을 크리프에 의한 소성변형으로 설명하였는데, 즉 전응력이 일정한 상태에서의 유효응력이 감소하는 응력완화를 의미한다고 하였다.

점성토 지반의 압밀현상에 대한 정규압밀영역의 크리프 현상의 연구로는 Taylor and Merchant(1940)의 점탄성 모델, Sekiguchi and Torihara(1976)의 점·탄소성 모델 및 Kabbaj et al.(1986)의 점소성 이론에 근거한 탄·점소성 모델이 있다. 또한, 과압밀 영

역의 크리프 현상에 관한 연구로는 Yoshikuni et al.(1994, 1995)의 탄·점성 압밀이론, Isotache 법칙에 근거한 Imai(1989), Imai et al.(2003)의 압밀이론과 등가 시간개념을 이용하여 비선형 탄·점소성 모델을 제안한 Yin and Graham(1989, 1994)의 모델이 있다.

Yoshikuni et al.(1994, 1995)은 과잉간극수압은 외부하중뿐만 아니라 응력완화에 의해서도 유발되며, 압밀은 과잉간극수압의 단순한 소산과정이 아니라 배수에 의한 간극수압의 소산과 점소성 변형에 의한 생성의 복합적인 과정이라고 하였다.

Yin and Graham(1994, 1994)은 실내시험 및 점소성 크리프 수치모델을 이용한 결과를 토대로 이차압축에 의한 침하량은 끝이 있으며 대수함수로 표현하는 이차압축은 장기압밀을 평가하는데 있어서 한계가 있다고 주장하였다. 즉 시간이 무한하면 침하가 계속 발생하므로 이러한 한계를 극복하기 위해서는 쌍곡선 함수를 이용하여 이차압축을 평가해야 한다고 하였다.

Baker and Crosbie(1994)는 무처리 연약지반 위에 3m와 6m의 성토를 한 후 Asaoka 법을 적용한 결과, 30일 간격으로 1년간 측정한 압밀침하량 예측치는 좋은 예측결과를 주나 성토가 높은 경우에는 측방변위의 영향으로 침하율을 30% 과대하게 추정되었다고 발표하였다.

지금까지의 연약지반의 침하량 예측 방법이 침하경향을 쌍곡선이나 평방근( $\sqrt{t}$ )으로 가정함으로 이론적 배경이 빈약하고 토질역학 압밀이론의 간극수압의 소산과정을 적용하지 않아 압밀도와 유효응력 증가에 대한 평가가 매우 어려웠다.

새로운 침하예측법은 간극수압계와 층별침하계를 동시에 하나의 자료에 취합하고 간극수압의 소산과정과 이에 따른 유효응력 증가와 간극비의 감소과정을 하나의 그래프 즉  $e - \log P'$  곡선에 도시하여 현장 토질특성인 압축지수( $C_c$ ), 재압축지수, 선행압밀응력을 규명하고 이에 따른 각 하중에 따른 단계별 침하량을 규명하는데 있다.

### 1.3 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 지금까지의 연구성과에서 미미하였던 간극수압계의 활용하여 연구 및 분석하였다. 국내 OO지구 단지 조성공사에서 계측하였던 간극수압계와 층별 침하계를 설치함으로써 현장압밀시험( $e-\log P$ )의 그래프에 간극수압계( $\Delta u$ )를 이용하여  $e-\log P'$  곡선에 도시하였다. 간극수압( $\Delta u$ )을 배제한 전응력경로  $e-\log P$  곡선을 조기에 분석하여 현장 토질특성인 재압축지수( $C_r$ ), 선형압밀하중( $P_c$ ), 압축지수( $C_c$ )을 검토하였으며, 향후 추가 유효상재하중에 대한 침하량과 침하대기 기간을 예측하는 기법을 연구 분석하였다.

본 연구에는 다음과 같은 순서로 연구를 진행하였다.

- (1) 간극수압 발생 및 소산과정을 유효응력의 감소 및 증가과정으로 도시하고, 유효응력 증·감에 따른 간극비의 감소를  $e-\log P'$  곡선에 표기하여 압밀특성을 분석 연구하였다.
- (2) 현장 계측자료를 활용하여 완속 성토 시공, 매우 짧은 급속 성토 시공 및 성토 후 발생 간극수압이 크거나 간극수압 소산이 더딜 경우의 연약지반 압밀특성에 대하여 분석하였다.
- (3) 현장  $e-\log P'$  곡선법과 쌍곡선법을 비교·검토하여 본 연구의  $e-\log P'$  곡선법이 기존 쌍곡선법보다 최종침하량 예측을 더욱 빠르게 할 수 있음을 제시코자 하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 응력경로에 따른 유효응력과 전응력 경로

#### 2.1.1 응력경로에 관한 기본사항

##### (1) $p-q$ 좌표에 관한 정의

한 요소에 작용하고 있는 응력상태는 Mohr응력원으로 나타낼 수 있다. 그림 1과 같이 Mohr응력원을 그리는 대신 이 원의 꼭지점(정점)  $M$  또는  $M'$ 만 알면 이들 꼭지점에서 그린 연직선이  $\sigma$ 축과 만나는 점  $C$ 를 중심으로  $\overline{CM}$ (또는  $\overline{CM'}$ )을 반경으로 원을 그려 즉시 Mohr응력원을 얻을 수 있다. Mohr응력원의 꼭지점을 응력점(Stress point)이라 하고 응력점의 좌표를 간편하게 나타내기 위하여  $p-q$  좌표를 사용한다.

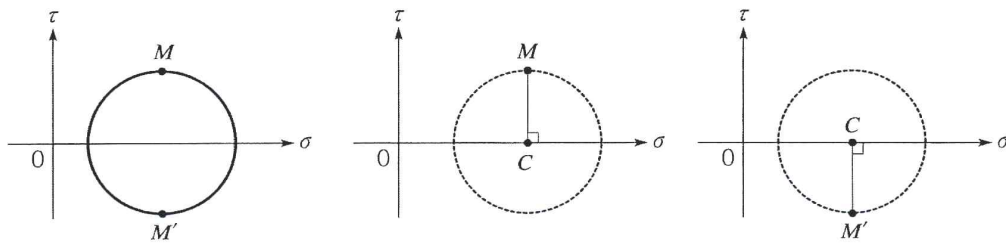


그림 2.1 Mohr응력원과 응력점(백영식, 2013)

##### ① 일반적 정의

Mohr 응력원의 정점, 즉 응력점  $M$ 과  $M'$ 의 좌표  $(p, q)$ 를 최대주응력  $\sigma_1$ 과 최소주응력  $\sigma_3$ 항으로 나타내는 좌표로 식 (2.1)과 같다.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad q = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2.1)$$

단, 그림 2와 같이  $q$ 가 양(+ )이면  $M$ ,  $q$ 가 음(-)이면  $M'$ 이 된다. 여기서,  $q$ 의 +, -부



호는 다음과 같이 결정한다.  $\sigma_1$ 의 작용방향이 연직선 기준  $\pm 45^\circ$  이내이면 (+),  $\sigma_3$ 의 작용방향이 연직선 기준  $\pm 45^\circ$  밖이면 (-)이다.

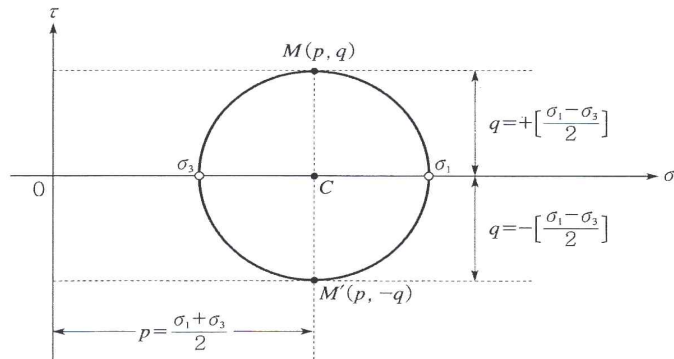
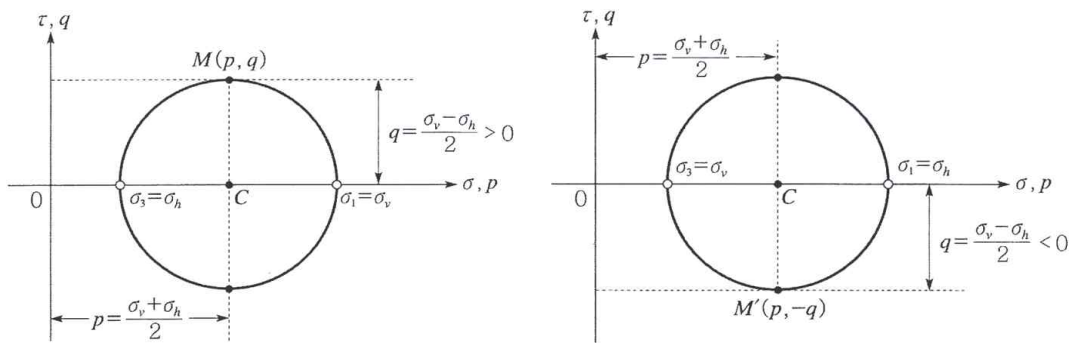


그림 2.2  $p-q$  좌표의 일반적 정의 (백영식, 2013)

② 토질역학적 정의

$p-q$ 좌표의 일반적 정의에 포함된  $q$ 의 부호(+, -)는 토질역학 문제의 특성을 고려하여 다음과 같은 제약조건을 설정하여 그림 2.3과 같이  $p-q$ 좌표를 정의한다.

이때 주응력면이 연직면과 수평면이라고 가정하고, 연직응력과 수평응력이 주응력이라고 가정한다. 좌표( $p, q$ )는 Mohr 응력원의 응력점  $M(p, q)$ ,  $M'(p, -q)$ 의 좌표이며 주응력  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$  항으로 표시한다.



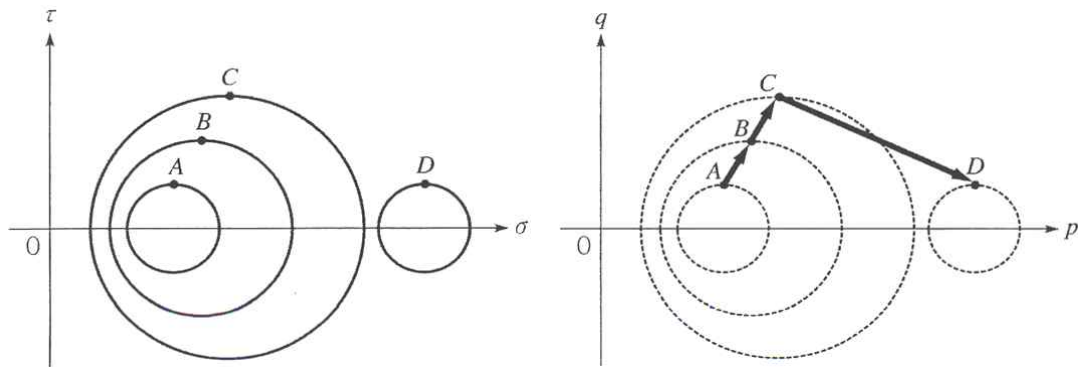
(a)  $\sigma_v > \sigma_h$ 의 경우

(b)  $\sigma_v < \sigma_h$ 의 경우

그림 2.3 토질역학에서 정의하는  $p-q$ 좌표 (백영식, 2013)

응력점 M 또는 M'이 결정되면 Mohr 응력원은 즉시 결정된다. 즉 응력점에서 그린 연직선과  $\sigma$ 축과의 교점을 중심으로 하고 응력점까지 거리를 반경으로 하는 원을 그리면 Mohr 응력원이 얻어진다. 응력경로(Stress path)는 한 요소에 작용하는  $(p, q)$ 값의 변화, 즉 응력의 변화과정을  $p-q$  Diagram으로 표시한 그림 2.4와 같다.

그림 2.4는 응력의 변화과정을 Mohr응력원을 그려서 표시한 것이고 그림은 응력경로로 나타낸 것이다. 응력경로가 훨씬 더 간명하며 응력변화 순서를 나타내는데도 편리함을 알 수 있다.



(a) Mohr응력원

(b) 응력경로

그림 2.4 Mohr응력원과 응력경로( $p-q$ )의 비교 (백영식, 2013)

(2) 응력경로에 관한 기본사항

전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP) 사이에는 다음과 같은 식 (2.2)와 식 (2.3)의 관계가 성립한다.

$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{(\sigma_v - u) + (\sigma_h - u)}{2} = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} - u \quad \therefore p' = p - u$$

(유효응력의 방정식이 성립) (2.2)

$$q' = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2} = \frac{(\sigma_v - u) - (\sigma_h - u)}{2} = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \quad \therefore q' = q$$

(TSP와 ESP의  $q$ 값은 동일) (2.3)

응력경로에 관한 중요사항을 요약하면, 먼저 만약  $q = 0$ 이면 등방응력상태(수평응력 = 연직응력)가 되며, 만약  $q < 0$ 이면, 연직응력 < 수평응력 된다. 또한  $q > 0$ 이면, 연직응력 > 수평응력 된다. 마지막으로  $p-q$  평면상의 한 점  $M(p, q)$ 의  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$  값은 그림 2.5와 같이 결정할 수 있다.

$M$ (또는  $M'$ )에서 그린 연직선 기준 좌우로 각각  $45^\circ$ (1:1 경사)되는 직선을 그려  $p$ 축과의 교점을 구하면 이 교점들이  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$ 이다. 즉,  $q > 0$ 이면  $\sigma_v > \sigma_h$  이므로 오른쪽 교점은  $\sigma_v$ , 왼쪽 교점은  $\sigma_h$  (그림 2.5(a)),  $q < 0$ 이면  $\sigma_v < \sigma_h$  이므로 오른쪽 교점은  $\sigma_h$ , 왼쪽 교점은  $\sigma_v$  (그림 2.5(b))이다.

그림 2.5(a)와 같이 유효응력경로(ESP)가 전응력경로(TSP)보다 왼쪽에 있으면( $p > q'$ ), 간극수압은 양(+의) 값이다( $u > 0$ ). 그리고 유효응력경로(ESP), 전응력경로(TSP) 사이의 수평거리가 간극수압 값이 된다.

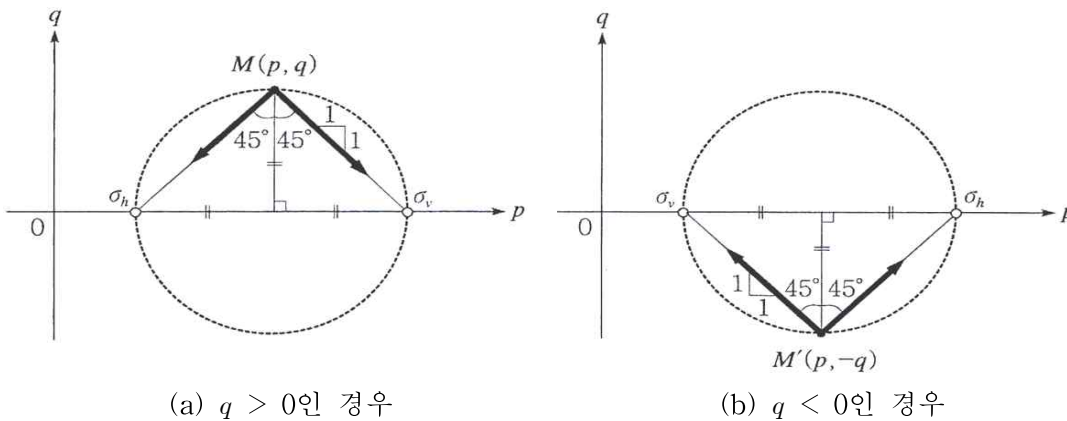


그림 2.5  $p-q$ 평면상의 한점  $M(p, q)$  또는  $M'(p, -q)$ 의  $\sigma_v, \sigma_h$  결정 (백영식, 2013)

다음과 같이 식 (2.4)과 식 (2.5)로 계산할 수 있다.

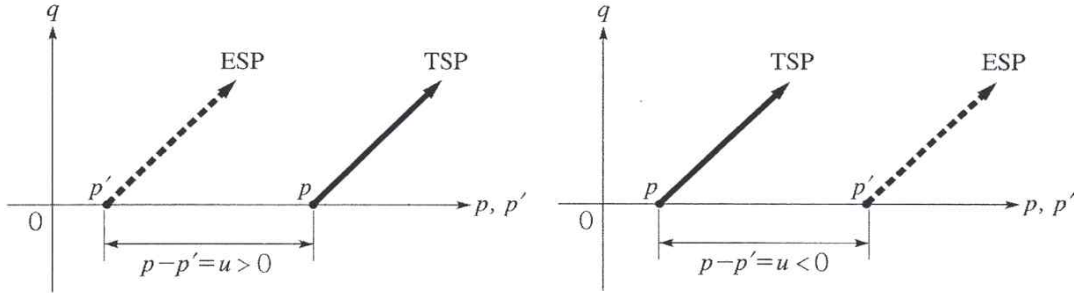
$p = (\sigma_v + \sigma_h)/2, q = (\sigma_v - \sigma_h)/2$ 로부터 두 식을 연립하여 풀면,

$$\sigma_v = p+q, \sigma_h = p-q \tag{2.4}$$

위의 관계는 그림에서 확인할 수 있다. 유효응력경로에 대해서도 같은 방법으로

$$\sigma'_v = p'+q, \sigma'_h = p'-q \tag{2.5}$$

만약 그림 2.6(b)와 같이 유효응력경로(ESP)가 전응력경로(TSP)보다 오른쪽에 있으면( $p < p'$ ), 간극수압은 음(-)의 값이다( $u < 0$ ). 그리고 TSP와 ESP 사이의 수평거리가 간극수압 값이다.



(a) ESP가 TSP보다 왼쪽에 있는 경우      (b) ESP가 TSP보다 오른쪽에 있는 경우

그림 2.6 TSP와 ESP의 위치에 따른  $p, q$ 의 대소 및 간극수압 (백영식, 2013)

토압계수(Coefficient of lateral earth pressure)는 연직유효응력  $\sigma'_v$ 에 대한 수평유효응력  $\sigma'_h$ 의 비(Ratio)로 정의한다. 즉 토압계수는 연직유효응력의 비이다. 토압계수에는 정지토압계수  $K_o$ , 주동토압계수  $K_A$  및 수동토압계수  $K_P$ 가 있다.

따라서 정지토압상태에서는,

$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma'_v + K_o \sigma'_v}{2} = \frac{\sigma'_v}{2}(1 + K_o) \quad (2.6)$$

$$q' = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma'_v - K_o \sigma'_v}{2} = \frac{\sigma'_v}{2}(1 - K_o) \quad (2.7)$$

$$\frac{q}{p'} = \frac{(1 - K_o)}{(1 + K_o)} \quad (2.8)$$

$$q = p' \frac{(1 - K_o)}{(1 + K_o)} = p' \tan \beta \quad (2.9)$$

이 식은  $p'-q$  평면에서 원점을 지나는 직선이며  $K_o$ 선( $K_o$ -line)이라 한다.  $K_o$ 선은 그림에 제시되어 있다.  $\beta$ 는  $K_o$ 선의 경사각이며  $\tan \beta$ 는 기울기이다.

따라서 정지토압상태, 즉  $K_o$ 상태의 유효응력을  $p'=q$  평면에 나타내 이들 응력은  $K_o$ 선( $K_o$ -line)상에 있게 된다. 나중에 다시 설명하겠지만 압밀시험 모든 과정의 유효응력경로(ESP)는  $K_o$ -line을 따라 움직이게 된다.

### 3) 응력경로에 따른 연직응력과 수평응력의 변화

그림 2.7에는 여러 방향의 응력경로가 제시되어 있다. 각 응력경로에 대한 연직응력의 변화  $\Delta\sigma_v$ 와 수평응력의 변화  $\Delta\sigma_h$ 를 보면, 우선  $q < 0$ 이면  $\sigma_v < \sigma_h$  이고,  $q > 0$ 이면  $\sigma_v > \sigma_h$  임을 알 수 있다.

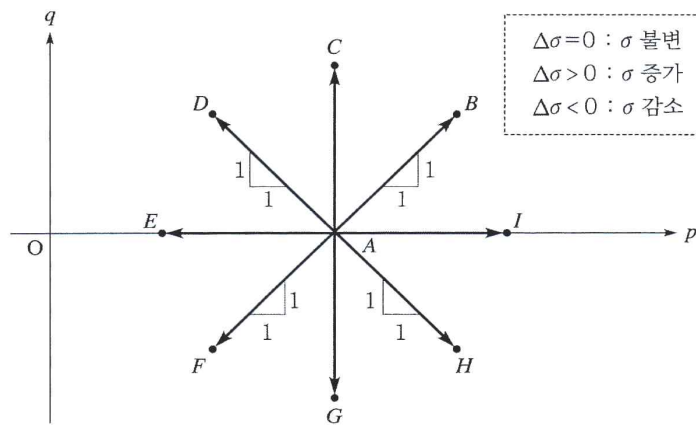


그림 2.7 여러방향의 응력경로 (백영식, 2013)

$$q < 0 \Rightarrow \sigma_v < \sigma_h \quad (2.10)$$

$$q > 0 \Rightarrow \sigma_v > \sigma_h \quad (2.11)$$

$$q = 0 \Rightarrow \sigma_v = \sigma_h \quad (2.12)$$

또한, 응력경로상의 한 점( $p, q$ )에 대응하는  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$ 는 이 점에서 그린 연직선과 좌우로 각각  $45^\circ(1:1$  경사)가 되는 직선을 그렸을 때  $q$ 축과의 교점의 좌표와가 곧  $\sigma_v$ 와  $\sigma_h$ 가 된다는 것을 상기한다.

### 2.1.2 압밀시험에 관한 기본사항

1) 유효응력경로(ESP)

압밀링(Oedometer) 안에 있는 시료는 가로방향 변위가 일어날 수 없는 상태이므로 ( $\epsilon_h=0$ ) 정지토압상태에 있다. 따라서

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_v \quad (2.13)$$

그러므로,

$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma'_v}{2}(1 + K_o), \quad q' = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma'_v}{2}(1 - K_o)$$

$q$ 와  $p'$ 사이에는

$$\frac{q'}{p'} = \frac{(1 - K_o)}{(1 + K_o)} = \tan\beta \quad \text{또는} \quad q' = p' \tan\beta \quad (2.14)$$

여기서 위의 식을  $K_o$ 선( $K_o$ -line)의 방정식이라 한다.

그럼 2.7에서 알 수 있는 것처럼  $K_o$ -line은 원점을 지나는 직선이며 그 기울기는  $\tan\beta$ 이다.

$K_o$ -line의 방정식을 보면 압밀시험과정에서 유효응력경로(ESP)는  $K_o$ -line을 따라 움직이고,  $K_o$ -line 밖으로는 벗어날 수 없음을 알 수 있다.

$K_o$ -line의 경사  $\tan \beta$ 를 알면 식 (2.15)과 같이 정지토압계수를 알 수 있다.

$$K_o = \frac{1 - \tan\beta}{1 + \tan\beta} \quad (2.15)$$

즉  $K_o$ 를 알면  $\tan \beta$ 를 알 수 있고  $\tan \beta$ 를 알면  $K_o$ 를 구할 수 있다.

$$K_o \rightleftharpoons \tan\beta \quad (2.16)$$

압밀시험과정에서 공시체에 작용하는 정수압은 대단히 작으므로 이를 무시한다. 그러면 간극수압은 과잉간극수압과 같다.

2) 전응력경로(TSP)

$$p = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} = p' + u, \quad q = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \quad (2.17)$$

압밀완료 시에는  $u=0$ (정수압 무시)이므로  $(p, q)$ 와  $(p', q')$ 가 일치한다. 압밀진행 중에는 정수압을 무시하면  $p - p' = u = u_e$ 가 성립된다. 압밀완료시를 제외하면 전응력경로는  $K_o$ -line상에 있지 않다.

3) 압밀시험 각 단계에서의 응력분포와 응력경로

전 단계 하중  $\sigma_i$ 으로 압밀이 완료된 상태에서 하중을  $\Delta\sigma$ 만큼 증가시켜 압밀을 진행시키는 과정에 대하여 각 단계별 응력분포를 그림 2.8에 제시하였다. 공시체에 작용하는 전응력, 간극수압 및 유효응력은 다음 그림 2.8과 같이 순서대로 결정할 수 있다.

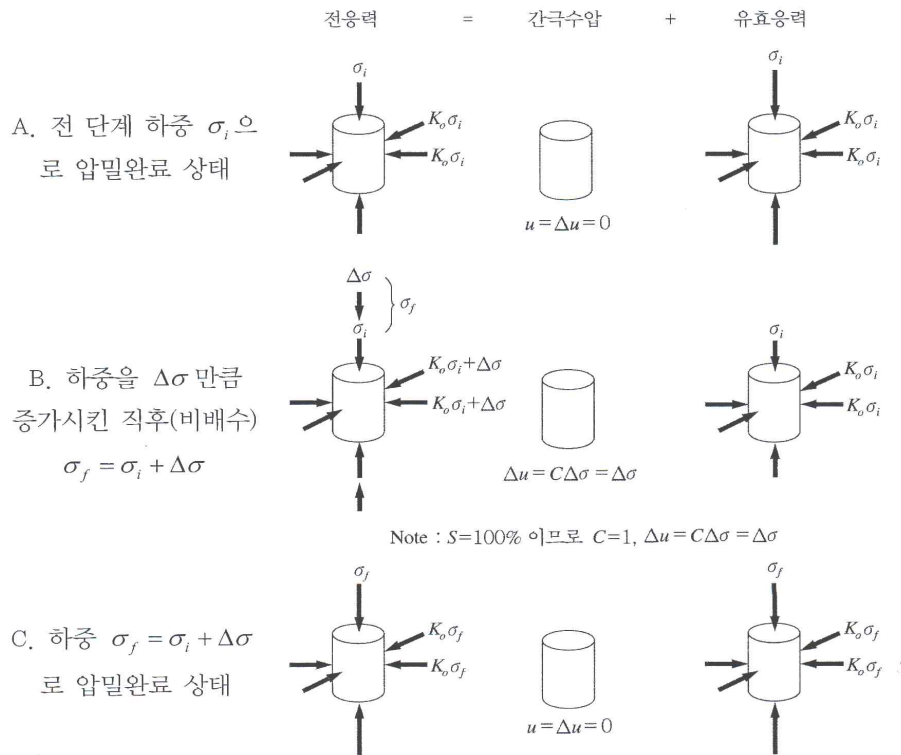


그림 2.8 압밀시험 각 단계의 응력분포 (김상규, 2007)

압밀시험에 대한 TSP와 ESP는 그림 2.9와 같으며 결과적으로 전응력 경로와 유효 응력경로는 압밀이 종료시 일치하게 된다.

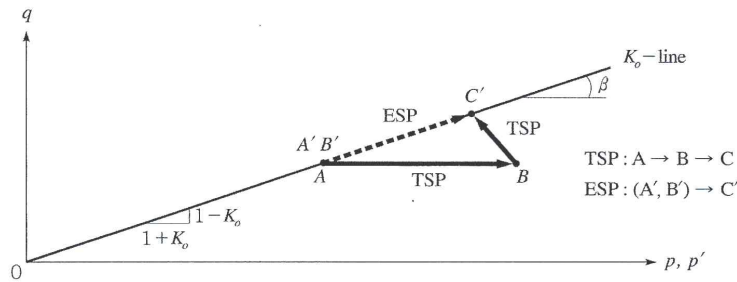


그림 2.9 압밀시험에 대한 응력경로 (이경준, 2008)



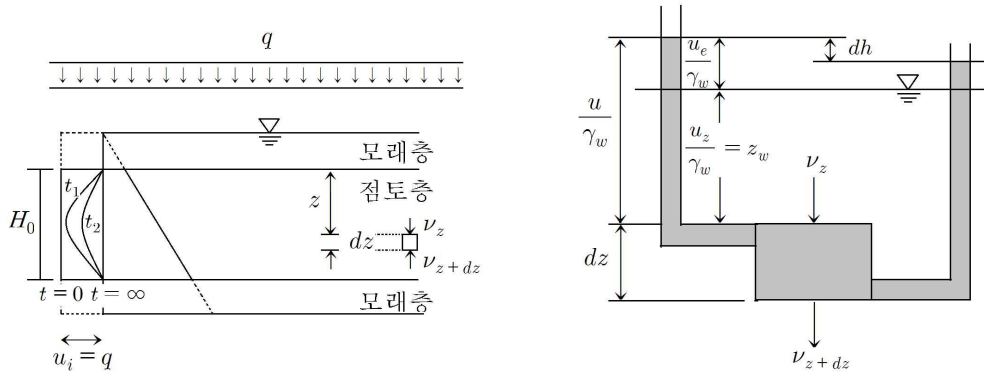
## 2.2 압밀이론

### 2.2.1 압밀이론의 필요성

포화된 지반이 하중을 받으면 하중은 간극수압을 유발하여 정수압보다 커지므로 물은 흐르기 시작하는데 하중에 의해 생긴 간극수압을 과잉간극수압이라 한다. 물의 흐름은 과잉간극수압이 완전히 소산되어 정수압 상태로 돌아올 때까지 계속되며 이때 배출된 물의 부피만큼 지반은 침하하게 된다. 이러한 현상을 압밀현상이라 하며 포화점성토지반에서 최종침하량과 침하속도를 규명하는 것이다.

### 2.2.2 Terzaghi의 1차원 압밀이론

그림 2.10은 모래층 사이에 끼어있는 두께  $H_0$ 인 점성토층을 보여주고 있다. 지표면에 대단히 넓은 등분포 하중  $q$ 가 순간적으로 작용한 직후의 과잉간극수압분에 대하여 생각해 보자, 무한 등분포하중으므로 하중은 그대로 지반에 전달되고 하중작용 직후에는 모든 하중은 물이 담당하게 되므로 깊이와 관계없이  $u_e = u_i = q$ 가 작용하게 된다. 그런데 모래층은 투수계수가 대단히 크므로  $u_i$ 는 즉시 소산되는 반면 점성토층은 투수성이 대단히 낮으므로 초기 과잉간극수압  $u_i$ 가 점성토층의 전체 두께에 걸쳐  $u_i = q$ 로 일정하게 분포하게 된다. 이 사실이 그림 2.10(a)에 제시되어 있다. 즉 모래층에는  $u_i$ 가 즉시 소산되므로 점선으로 나타나 있고 점성토층에는 실선으로 나타나 있다. 이러한  $u_i$ 의 분포가 초기과잉간극수압이 깊이에 무관하게 일정하게 분포하는 경우이다.



(a) 시간과 깊이에 따른 과잉간극수압 (b) 미소요소에 대한 유입 및 유출속도  
**그림 2.10 1차원 압밀흐름 (백영식, 2013)**

이제 간극수압의 분포는 음영처리된 정수압과 점성토층에 작용하는 과잉간극수압만 남게 된다. 이때 모래와 점성토의 접촉면에는 전수두가  $u_i$ 만 큼 차이 나므로 물은 점성토층에서 모래층을 향해 연직방향으로 흐르게 된다. 즉 점성토층 표면부터 과잉간극수압은 소산되기 시작하여 점차 점성토층 중앙면 쪽으로 과잉간극수압 감소현상이 진행된다, 따라서 시간  $t$ 일 때 과잉간극수압의 분포는 깊이에 따라 sine곡선 같은 형태를 하게 된다. 그림 2.10(a)에는 시간과 깊이에 따른 과잉간극수압의 분포가 등시선 형태로 제시되어 있다. 점성토층 중앙면의 과잉간극수압은 최대이고 상하표면에서는  $u_e = 0$  이 된다. 이것은 점성토층 중앙면은 모래층까지 최대이고 점성토층 표면은 모래층과 접하고 있기 때문이다. 따라서 과잉간극수압은 시간과 깊이에 따라 다른 값을 가지게 되므로  $u_e = u_e(z, t)$ 로 쓸 수 있다.

지표면에 무한히 넓은 등분포 하중이 작용하므로 점성토층은 횡방향 변위는 일어나지 않는다( $\epsilon_h = 0; k_o$ ). 따라서 침하는 연직방향으로만 일어나게 되므로 일차원 압밀 침하가 일어나게 된다. 또한 점성토층에서 물의 흐름은 하중이 작용하는 방향, 즉 연직방향으로 일어난다고 가정한다, 즉 일차원 흐름을 가정한다. 점성토층 중앙면의 과잉간극수압이 가장 크므로 이곳의 전수두도 최대가 된다, 그러므로 물은 점성토층 중앙면을 기준으로 하여 상부에서는 연직상향, 하부에서는 연직하향 침투가 발생한다. 물은 절대 점성토층 중앙면을 관통할 수 없다.

그림 2.10(a)와 같이 점성토층 윗면을 좌표의 원점으로 잡고 연직하향으로  $z$  축을 잡

는다. 점성토층 하반부에 그림과 같이  $(dx \times dz \times 1)$ 인 미소요소를 생각하되 이 요소의 윗면 좌표가  $z$ , 아랫면은  $z+dz$ 로 한다. 물은 유속  $v_z$ 로 요소의 윗면에서 이 미소요소에 유입하고  $v_{z+dz}$ 의 유속으로 유출된다.

그림 2.10(b)에는 미소요소에 대한 유입 및 유출속도가 그려져 있다. 또한, 유입부의 유출부에 세운 물기둥의 높이도 제시되어 있다. 지하수면에서 측정된 물기둥 끝까지의 높이가 과잉간극수압  $u_e$ 에 대응하는 압력수두  $\frac{u_e}{\gamma_w}$ 이다. 유입부와 유출부의 전수두차는  $dh$ 이다.

압밀이란 과잉간극수압의 소산되는 과정이라 정의하였다. 그리고 과잉간극수압은 시간과 위치에 따라 다르게 분포하게 된다. 압밀방정식은 하중 작용 후  $t$ 시간 경과시 좌표  $z$ 가 되는 곳의 과잉간극수압  $u_e(z, t)$ 가 시간  $t$ 와 좌표  $z$ 에 따라 어떻게 분포되는가를 나타내는 방정식이다.

이제 Terzaghi의 일차원 압밀방정식을 유도해 보기로 한다. Terzaghi 일차원 압밀방정식을 유도하기 위하여 다음과 같은 가정을 설정한다.

- ① 점성토층은 균질하다.
- ② 점성토는 포화상태이다( $S=100\%$ ).
- ③ 흙입자와 물은 비압축성이며, 흙의 부피감소량은 물은 순배출량이다.
- ④ 물의 흐름은 Darcy의 법칙을 따른다.
- ⑤ 물은 일차원 흐름 즉 연직방향으로만 흐른다.
- ⑥ 투수계수  $k$ 는 압밀 전과정에 걸쳐 일정하다.
- ⑦ 유효응력  $\sigma$  과 간극비  $e$  사이에는 직선거리에 반비례 관계가 성립된다. 즉,

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} = \frac{de}{d\sigma} = constant, \quad a_v : \text{압축계수}$$

### 2.2.3 압밀도

하중 작용 후 주어진 시간까지 압밀층내에 깊이가  $z$  가 되는 곳의 압밀 진행 정도를 압밀도(Degree of consolidation)라 한다. 압밀의 진행 정도는 과잉간극수압의 소산정도로 나타낸다. 그리고 과잉간극수압 소산 정도란 압밀 완료시까지 소산된 과잉간극수압의 비이다.

압밀 완료시까지 소산되어야 할 과잉간극수압의 크기는 초기 과잉간극수압과 같고 주어진 시간까지 소산된 과잉간극수압은 결국 초기 과잉간극수압에서 그때의 과잉간극수압에서 뺀 값과 같다.

$U_z$ 를 직접 계산하는 것은 대단히 번거로움으로 그림 2.11에서  $U_z$ 를 구한다. 즉 그림 2.11에는  $Z - T_v - U_z$ 의 관계가 제시되어 있다. 예를 들어 주어진 깊이  $z$ 에서 시간때의 압밀도  $U_z$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$Z$  와  $T_v$  가 주어졌을 때  $U_z$ 를 구하는 방법이 그림 2.11과 같다.  $Z, T_v, U_z$  중 2개가 주어지면 나머지 하나는 위와 같은 방법으로 결정할 수 있다.

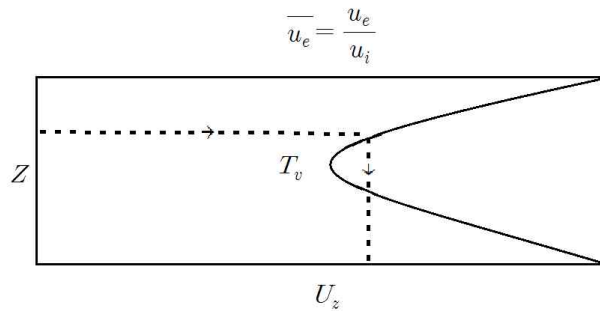


그림 2.11 압밀도 구하는 방법 (백영식, 2013)

### 2.2.4 평균압밀도

압밀도  $U_z$ 는 압밀층 표면에서 깊이  $z$  되는 곳에서의 과잉간극수압 소산정도를 의미한다. 그림 2.11에서 등시선은 특정 시간에 있어서 깊이에 따른 과잉간극수압과 압밀도의 분포를 보여주고 있다.

특정한 깊이에서의 압밀진행정도  $U_z$  보다는 압밀층 두께 전체에 걸쳐 진행된 압밀의 정도가 더 현실적인 관심사이다. 즉 압밀층 전체에 대한 평균 압밀 진행 정도가 관심사이며 이를 평균압밀도(Average degree of consolidation 또는  $U$ )이라 한다. 평균압밀도는 결국 압밀층 전체 걸쳐 압밀 완료시까지 소산되어야 할 과잉간극수압에 대한 특정기간까지 소산된 과잉간극수압의 비이다.

압밀에 관한 직접적 관심사는 과잉간극수압 소산의 정도가 아니라 압밀 침하의 진행 정도이다. 이러한 입장에서 평균압밀도는 다음과 같이 정의한다.

$$U = \frac{S_c(t)}{S_c} \times 100\% \quad (2.18)$$

최종 압밀침하량  $S_c$  일 때  $U$  를 구하면 시간  $t$  일 때의 압밀침하량은

$$S_c(t) = U \cdot S_c \quad (2.19)$$

따라서, 평균압밀도는 침하속도에 관한 대답을 제시하고 있다.

위에서 평균압밀도를 두 가지 방법으로 정의하였다. 그러나 압밀침하량 과잉간극수압 소산량, 즉 유효응력 증가량에 비례한다고 가정하면 두 정의는 같게 된다. 이 사실은 Terzaghi의 압밀 모델에서 과잉간극수압이 소산한양만큼 스프링이 받는 힘으로 즉, 유효응력은 증가하고 스프링의 압축량, 즉 피스톤의 침하량이 받는 힘에 비례하게 됨을 생각하면 명확하게 이해할 수 있다.

### 2.2.5 압밀시험

점성토의 압밀특성은 압밀시험기를 사용하여 압밀시험을 실시함으로써 압밀시험이기의 주요 부분은 압밀링이다. 압밀링은 보통 놋쇠로 만들어진 직경 6.0cm, 높이 약 2.0cm인 링이다.

압밀링 속에서 시료는 포화상태에 있으며 공시체 상하면에는 다공질판을 배치한다. 다공질 판은 투수계수가 대단히 크므로 결국 공시체는 양면 배수 상태가 된다. 압밀링 안에 있는 공시체는 가로변위를 일으킬 수 없으므로 정지 토압상태에 있고 일차원 흐

름, 일차원 압축이 일어나게 된다. 압밀하중은 커버를 통해 가해지고 침하량은 다이알 게이지를 읽어서 측정한다.

표준 압밀시험은 하중을 단계적으로 증가시켜 가면서 일련의 시험을 실시한다. 즉 처음에는 압밀하중 0.1을 가하고 적당한 시간 간격으로 침하량을 측정하되 약 24시간 후에 측정을 마친다. 0.1의 압밀하중으로 압축이 완료되면 하중을 2배로 증가시켜 즉 0.2의 압밀하중으로 시험을 계속한다. 따라서, 압밀시험에만 최소 7일이 소요된다. 전 단계 압밀하중에 대한 하중 증가량의 비를 하중증가비(*LIR, Load Increment Ratio*)라 한다. 즉

$$LIR = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} \quad (2.20)$$

여기서  $\Delta\sigma$  : 초기의 압밀하중.  $\Delta\sigma$  : 다음 단계 하중 증가량

표준 압밀시험에서는  $LIR=1$  로 한다.

즉, 압밀하중은 전단계 압밀하중의 2배가 되게 한다.  $LIR$ 이 커야 Terzaghi의 압밀이론이 잘 적용된다. 즉  $LIR$ 을 임의로 선택하면 압밀계수를 정확하게 측정하기 어렵게 된다.

일련의 압밀하중들에 대한 압밀시험이 끝나면 각 하중별로 시간-침하량관계를 얻을 수 있게 된다. 이 결과를 이용하여 압밀계수-하중 및 간극비 하중 관계를 얻을 수 있다. 최대하중으로 압밀 완료시킨 후 하중을 단계적으로 감소시키면 공시체는 팽창하게 되는데 이 과정을 팽창시험이라 한다. 팽창시험을 각 하중단계마다 4시간에 걸쳐 실시한다. 하중  $1kN/cm^2$ 까지 팽창이 완료된 후 다시 하중을 0.2등 단계별로 다시 증가시키면 공시체는 다시 압축되는데 이 과정을 재압축시험이라 한다. 재압축량은 상대적으로 대단히 적으며 팽창시험과 재압축시험의 결과도 간극비-히중곡선에 함께 제시한다.

### 2.2.6 압밀계수의 추정

압밀계수는 압밀속도를 지배하는 흙의 특성이다. 물론 압밀계수가 크면 압밀속도가 커진다.

압밀계수는 시험실에서 실측한 시간-침하량 관계의 이론상의 시간-침하량 관계가

동일한 특성을 가진다는 가정 아래 이론상의 시간-침하량 관계의 특정한 특성을 실측 관계에 적용하여 결정하고 있다.

(1) 이론상의 시간-침하량 관계( $T_v$ 와  $U$  사이의 관계)

시간계수  $T_v = \frac{c_v t}{H^2}$ 는 시간  $t$ 대신 사용되는 무차원 계수이다. 즉  $T_v$ 를 알면 시간  $t$

를 알 수 있다( $t = \frac{T_v H^2}{c_v}$ ). 평균압밀도  $U = S_c(t)/S_c$ 는 무차원의 침하량 계수라 할 수

있다.  $S_c$ 는 상수이므로  $U$ 를 알면 즉  $S_c(t)$ 를 알 수 있다.

즉, 이론상 시간-침하량 관계는  $T_v - U$ 관계이다.

(2) 시험실 실측-침하량 관계

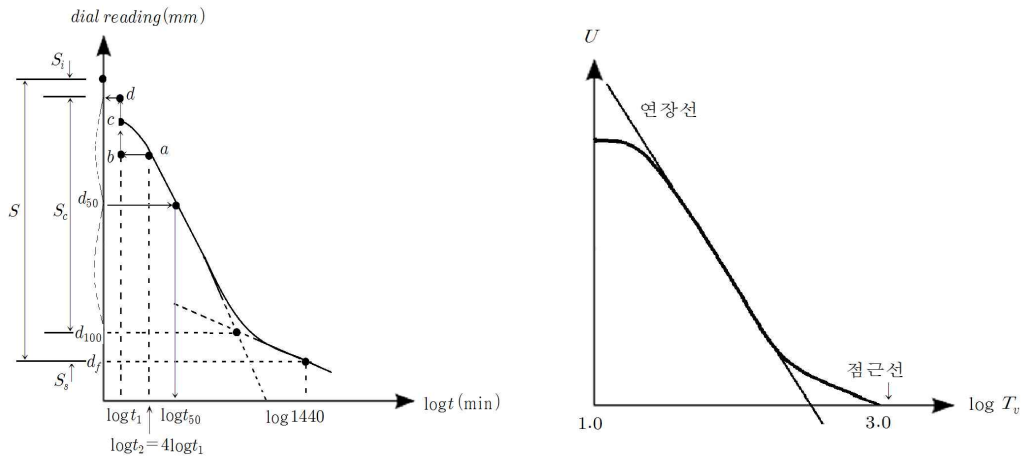
각 하중 단계별로 측정하는 시간-침하량 실측관계이다. 시간-침하량 관계를 표현하는 방법에 따라  $\log t$  법과  $\sqrt{t}$  법이 있다.

가.  $\log t$  법

Casagrande(1940)가 고안한 방법으로 시간-침하량 관계를 시간의 대수-침하량으로 선택하였다. 그림 2.12(b)의 이론 곡선은  $\log T_v - U$ 의 관계를 제시하고 있다. 이론 곡선의 특성은 중간부의 직선부분의 연장선과 말기의 점근선의 교점이 평균압밀도 100%에 대응한다는 사실이다. 이 특성을 시험실의 실측 곡선에 적용하여 압밀계수를 구한다.

실측 곡선은 그림 2.12(a)와 같이  $\log t$ -diagram을 읽는다. 실측 곡선의 형상은 대략 다음과 같이 4가지 구간으로 이루어져 있다.

초기 부분 포물선+급경사의 직선부분+곡선부분+말기의 직선부분이며, 그림의  $d_s$ ,  $d_f$ 의 의미는 다음과 같다.



(a) log t법 읽는 방법                      (b) 이론 곡선에 따른  $\log T_v - U$ 의 관계

그림 2.12  $\log T_v - U$ 의 관계 (김승일, 2014)

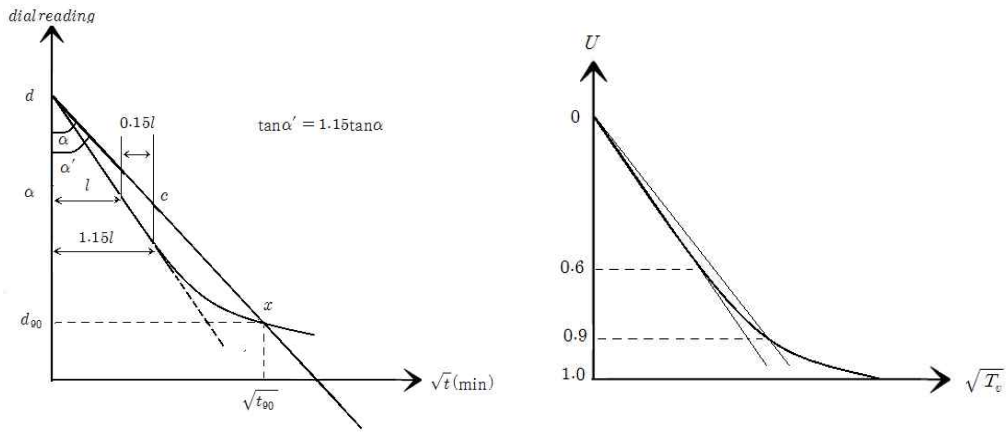
$d_s$  : 현 단계 하중으로 압밀 하기 전의 다이얼 읽음=전 단계 하중에 의한 압밀 종료 시의 log t-dial을 읽음

$d_f$  : 현 단계 하중에 의한 압밀 종료시(24시간 후)의 다이얼 읽음=이론상 다음 단계 하중에 의한 압밀 시작시의 다이얼 읽음

나.  $\sqrt{t}$  법( $\sqrt{t}$  Fitting Method)

Taylor(1942)가 고안한 방법으로 시간-침하량 관계를 시간의 평방근-침하량으로 표현하였다. 그림 2.13(b)는  $\sqrt{T_v} - U$ 관계를 그린 이론 곡선이다. 이론 곡선은 압밀도 약 60%까지는 직선이 된다. 이 직선의 기울기를 1이라 할 때 U축 절편을 지나 기울기 1/1.15인 직선을 그려 곡선과의 교점을 구하면 이 교점에 대응하는 평균 압밀도가 90%가 된다. 다시 말하면, 이론 곡선의 초기 직선부가 U 축과 이루는 각도를  $\alpha$ 라 하고 기울기 1/1.15 되게 그린 직선과 U축 사이의 각도를  $\alpha'$ 이라 하면 기울기 1/1.15 또는 각도  $\alpha'$ 으로 그린 직선이 이론 곡선과 만나는 점의 평균압밀도 90%가 된다. 이론 곡선에서 얻은 이 특성을 실측곡선에 적용하여 압밀계수를 구할 수 있다. 시간-침하량 관계가  $\sqrt{t}(\text{min})$ -다이얼 읽음의 형태로 되어 있어서 이론 곡선  $\sqrt{T_v} - U$ 와 대응하고 있다.





(a)  $\sqrt{T_v}$  법 읽는 방법

(b) 이론 곡선에 따른  $\sqrt{T_v} - U$ 의 관계

그림 2.13  $\sqrt{T_v} - U$  관계 (오익주, 2002)

### 2.2.7 간극비-하중 곡선

압밀시험에서 각 단계의 하중으로 압밀이 완료되었을 때의 간극비와 유효응력은 쉽게 알 수 있으며, 간극비-유효응력 관계를 반대수 방안에  $e - \log \sigma'$ 으로 그린 곡선을 간극비-하중곡선이라 한다.

그림 2.14는 간극비-하중곡선을 그린 것이다. 이 그림을 보면 응력이 적은 초기 부분 ①에서는 간극비의 감소가 적어서 완만한 경사의 곡선을 이루고 있다. 그러다가 응력이 특정한 값  $\sigma'_c$ 에 도달하면 간극비가 급격히 감소하면서 급경사인 직선 ②을 그린다. 이때 특정한 응력  $\sigma'_c$ 을 선행압밀하중 또는 선행압밀압력이하 하고, 선행압밀하중보다 큰 응력에서 나타나는 직선인 간극비-하중곡선을 처녀압밀곡선 또는 처녀압축곡선이라 한다. 선행압밀하중  $\sigma'_c$ 은 이 흙이 땅속에서 지금까지 받아온 최대 연직 유효응력이다.

응력  $\sigma'^*_c$ (보통  $64 \text{ kN/m}^2$ )에서 하중을 순차적으로 제거해가면 팽창곡선 ③을 얻고 팽창이 끝난 뒤 다시 하중을 단계적으로 증가시키면 재압축 곡선 ④가 그려진다. 그런데 곡선 ③과 ④에 대해서는 선행압밀하중은  $\sigma'^*_c$ 이다.

따라서, 이 재압축곡선 ④는 경사가 완만하 곡선이며 곡선 ①과 거의 평행이나, 재압축곡선 ④가 선행압밀하중  $\sigma'^*_c$ 에 도달하면 간극비-하중곡선은 급경사인 처녀압밀곡선

⑤가 된다. 특히 주의할 점은 직선 ⑤는 직선의 ②의 연장선상에 있다는 점이다. 즉 처  
 년압밀곡선은 선행압밀하중의 크기에 무관하게 동일한 직선의 연장선상에 있게 된다.  
 다시 응력  $\sigma'^{**}_c$ 에서 팽창시험을 실시하여 팽창곡선 ⑥이 그려지고 이어서 재압축 곡  
 선 ⑦이 그려진다. 주의할 점은 재압축곡선 ④와 ⑦은 서로 평행하고 이들은 다시 곡  
 선 ①과도 거의 평행하다는 사실이다. 이는 곧 곡선 ①이 일종의 재압축곡선이라는 것  
 을 시사하고 있다.

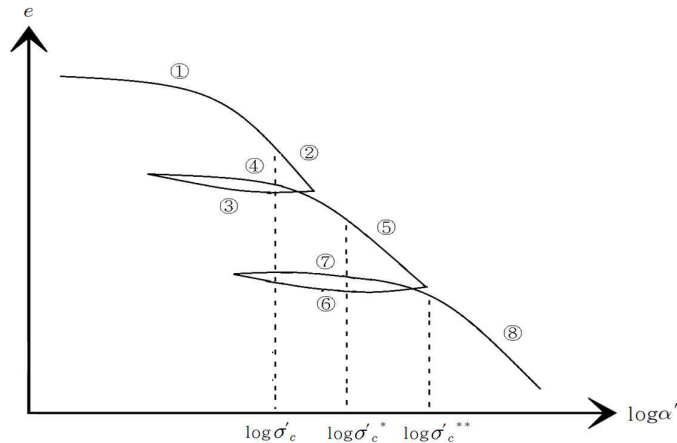


그림 2.14 간극비-하중곡선 (백영식, 2013)

(1) 선행압밀하중의 결정

압밀시험은 지층 속에서 채취한 불교란시료에 대하여 실시한다. 만약 지층의 구성  
 상태를 파악하고 시료채취 깊이를 알면 이 흙이 현재 받고 있는 유효응력( $\sigma'_v$ )은 쉽게  
 산정할 수 있다. 그런데 지층에 과거 침식과 퇴적이 거듭 일어났거나 지하수위의 변동  
 이 있었다면 이 흙이 받았던 연직유효응력의 크기는 그때마다 달라졌을 것이다.

흙에 작용해 온 응력이력을 파악하는 것은 중요하다. 어떤 흙이 지금까지 받은 적이  
 있는 최대 연직유효응력을 선행압밀하중이라 한다. 모래의 경우에는 선행압밀하중 결  
 정이 극히 어려운 반면 점성토의 경우에는 시험실 간극비-하중곡선에서 이 값을 결정  
 하는 경험적 방법이 제안되어 있다. 그림 2.15에는 Casagrande가 고안한 선행압밀하중  
 결정 방법이 제시되어 있다.

선행압밀하중  $\sigma'_c$ 의 결정 순서는 다음과 같다.

- ① 곡률이 최대(곡률반경 최소)인 점  $a$  선택
- ②  $a$  점에서 수평선  $\overline{ah}$
- ③  $a$  점에서 접선  $\overline{at}$
- ④  $\angle hat$  의 2등분선  $\overline{am}$ 을 작도
- ⑤ 직선부 연장선과  $\overline{am}$ 의 교점 :  $b$
- ⑥  $b$  에 대응하는  $\sigma'_c$ 을 얻음

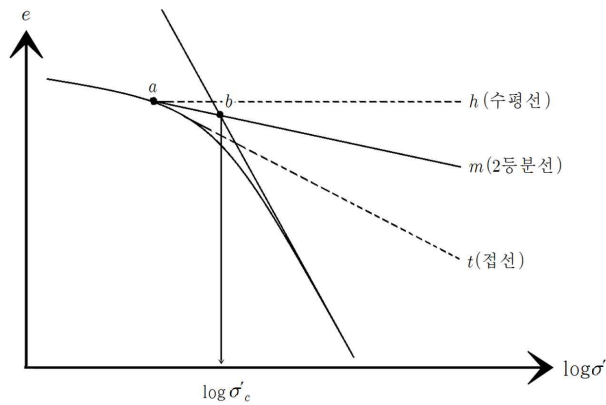


그림 2.15 Casagrande의 선행압밀하중 결정 방법 (장윤석, 2004)

(2) 압축지수

그림 2.16과 같이 하중이 선행압밀하중보다 커지면 정규압밀상태가 되며 이때의 간극비-하중곡선은 직선이 된다. 즉 교란되지 않은 점성토가 지금까지 받은 최대하중보다 더 큰 하중을 받게 되면 간극비-하중곡선은 직선이 되며 이를 처녀압밀곡선 또는 처녀압축곡선이라 한다. 그리고 간극비-하중곡선의 직선부, 처녀압밀곡선의 기울기를 압축지수라 하고 기호  $C_c$  로 나타낸다.

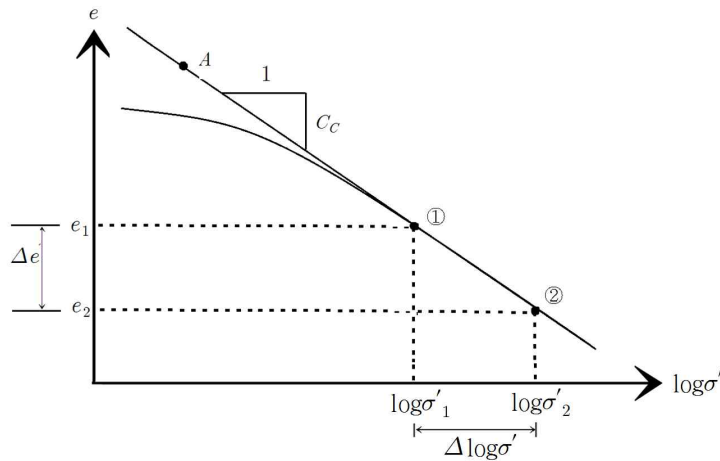


그림 2.16 처녀압밀곡선에서의 압축지수 결정 (백영식, 2013)

그림 2.16에서 점 ①과 ②에 대하여

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \quad (2.21)$$

$C_c$ 는 압밀침하량 산정에 사용되는 중요한 지수이다.  $C_c$ 가 큰 점성토는 동일한 응력 변화량에 대하여 큰 간극비 감소를 일으키므로 압밀침하량이 더 커진다.

### (3) 재압축 지수

압밀시험에서 하중을 단계별로 증가시켜가면서 시험을 진행하여 마지막 단계의 하중  $64kN/m^2$ 로 압밀 완료시킨 다음 하중을  $32kN/m^2$ ,  $16kN/m^2$  등과 같이 감소시켜가면서 각 하중 단계별 간극비-하중 관계( $e - \log \sigma'$ )를 구하면 팽창곡선이 얻어진다. 즉 하중감소에 따라 간극비는 약간씩 증가하여 시료는 다시 부풀어 오른다.

팽창시험이 끝난 후 하중을 다시 단계별로 증가시켜 가면 시료는 재 압축되어 간극비는 다시 감소한다. 이 과정의  $e - \log \sigma'$  관계를 재압축곡선이라 하고 이들 구간은 직선이 아니라 곡선이 된다.

그림 2.17에서 보는 것과 같이 팽창 및 재압축곡선은 완만하며 그 기울기는 압축지

수에 비해 대단히 작다. 팽창 및 재압축 과정에 있는 흙은 과압밀상태이며, 선행압밀하중은 팽창 시작의 하중이 된다.

선행압밀하중보다 적은 응력 범위 즉 과압밀 상태에서 하중을 증가시켜 선행압밀에 이르는 간극비-하중곡선이 재압축 곡선이며 재압축 곡선의 기울기를 재압축지수라 하고 기호  $C_r$ 로 표시한다.

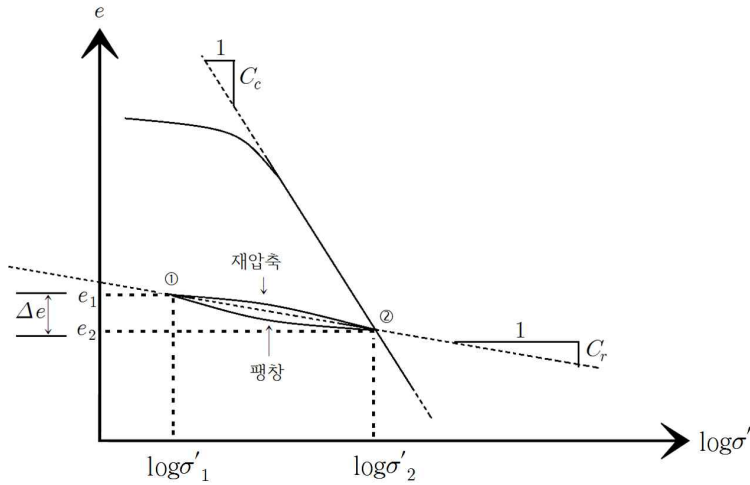


그림 2.17 팽창 - 재압축곡선 (장윤석, 2004)

그림 2.17에서 점 ①, ②에 대하여

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \quad (2.22)$$

$C_r$ 은 재압축 침하량을 산정하는 중요한 지수이다.  $C_r$ 이 크면 물론 재압축 침하량은 크다. 재압축지수는 압축지수보다 대단히 작다(Holtz and Kovacs, 1981).

### 2.2.8 압밀침하량 산정

지금까지는 압밀 시작 후 시간 t 까지의 침하량은 그 때의 평균압밀도에 최종침하량

을 곱하여 구하였다. 그리고 최종 압밀침하량의 결정 방법은 다음과 같다.

그림 2.18과 같이 두께  $H_0$  인 압밀층이 있으며, 압밀층의 평균간극비는  $e_0$ 이다.

지표면에 무한 등분포하중  $q$  가 작용하면 이 하중에 의하여 점성토층에는 횡방향 변형은 일어나지 않고 연직방향 일차원 침하만 발생하게 된다( $K_0$  상태).

재하 직후 하중은 그대로 초기 과잉간극수압이 되며 그 값은 깊이에 무관하게 일정하게 분포한다. 과잉간극수압이 소산되면서 물이 배출되고 배출된 물의 부피만큼 지반은 침하하게 된다.

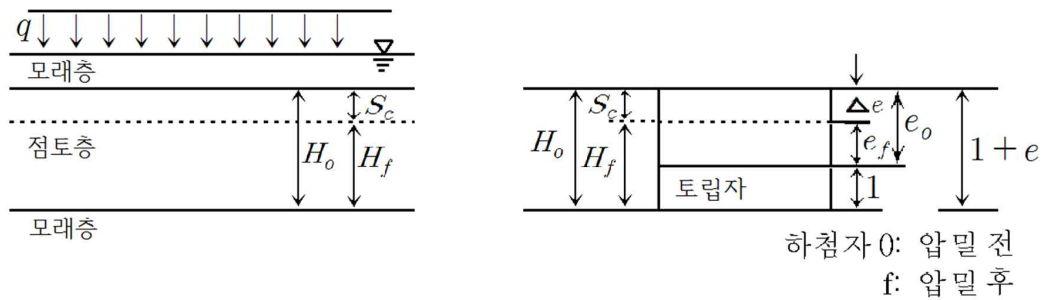


그림 2.18 압밀침하량 산정 (차지연, 2013)

(1) 압밀침하량 산정에 관한 일반사항

가. 정규압밀(NC)인 경우( $\sigma'_o = \sigma'_c$ )

정규압밀상태란 선행압밀하중과 현재의 지중응력이 동일한 상태이다. 그림 2.19와 같이 현재의 연직유효응력  $\sigma'_o$  에서 하중 등에 의하여 응력이  $\sigma'_o + \Delta\sigma'$  으로 증가하였다면 이러한 응력변화 상태는 처녀압밀곡선상의 A→X에 대응한다.

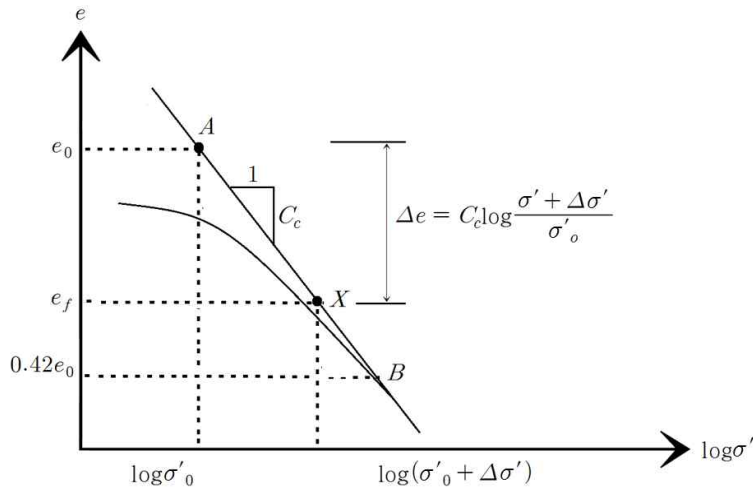


그림 2.19 정규압밀 상태 압밀침하량 (백영식, 2013)

압밀침하량  $S_c$ 는

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H_0 \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \quad (2.23)$$

$e_0$ 는 점토층의 초기 간극비,  $C_c$ 는 압축 지수,  $H_0$ 는 점토층의 두께,  $\Delta\sigma'$ 는 기초 축조로 인해,  $\sigma'_0$ 는 기초 축조 전 점토층이 받는 평균유효응력 점토층이 받는 평균응력증가량

나. 과압밀인 경우( $\sigma'_0 < \sigma'_c$ )

과압밀 상태에 대한 실제 간극비-하중 곡선은 그림 2.20에 제시한 것과 같다. 압밀침하는 재압축과 처녀압밀로 이루어지며 간극비-하중곡선은 굴곡되어 있다.

선행압밀하중은 압밀층의 깊이에 따라 다르지만, 압밀층 전체의 평균치 또는 압밀층 중앙면에서의 값으로 가정한다.

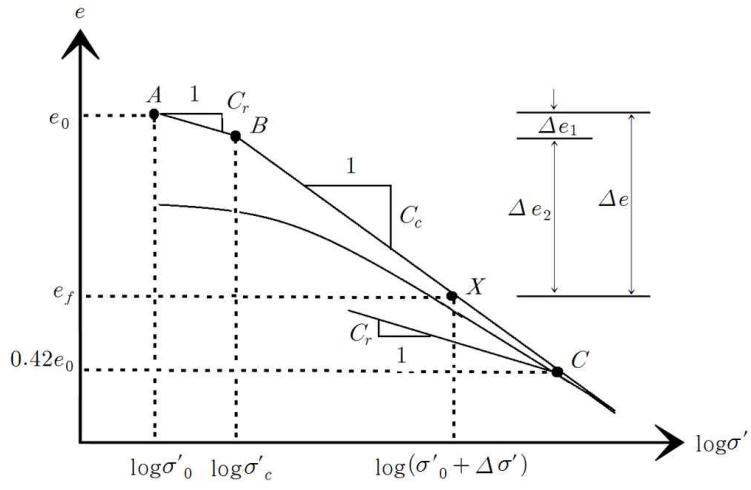


그림 2.20 과압밀 상태 압밀침하량 (백영식, 2013)

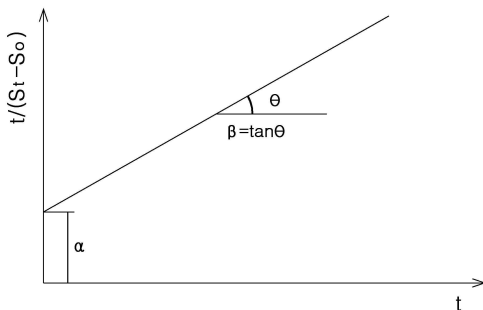


## 2.3 현장계측자료에 의한 침하예측 이론

현장계측자료를 이용한 침하예측법이 필요한 가장 주된 요인은 실험실에서 획득된 이론침하량이 실제 현장에서는 부합되지 않고 있기 때문이다. 이론침하량과 실제발생 침하량에 있어서 차이가 나는 주요 요인은 시료 채취시 시료의 교란으로 인해 토질정수가 실제지반과 달라질 경우가 많으며, 연약지반의 지층이 두꺼울 경우 상부층 시료에서 획득된 토질정수가 전체 지반을 대표하지 못하는 문제점이 있다. 이러한 문제점으로 인해 실제 지반에서 획득된 계측자료를 이용 장기침하량을 예측하는 방법들이 제시되었는데 이러한 침하관리의 방법으로 쌍곡선법, Hoshino법( $\sqrt{t}$  법), Asaoka법, terzaghi의 curve fitting법 등이 있으며, 상기 관리기법은 다음과 같다.

### (1) 쌍곡선법

쌍곡선법은 침하의 평균속도가 쌍곡선적으로 감소한다는 가정하에 초기의 실측침하량에 의해 장래의 침하량을 예측하는 방법으로서 쌓기 종료 후 실측침하량을 기초로 시간( $t$ )과  $t/(S_t - S_0)$ 를 Plot하고 이 점들 중 후반부의 직선부분을 연결하는 직선을 결정하여 그림 2.21과 같이 침하량을 계산한다.



$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t}$$

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta}$$

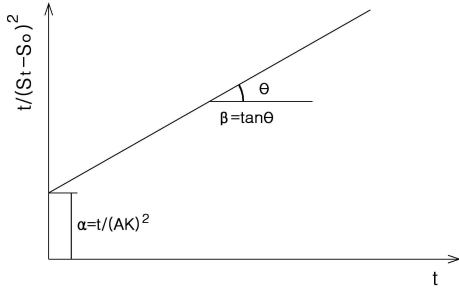
(a) 그래프

(b) 계산방법

그림 2.21 쌍곡선 법 (김현태, 1997)

(2) Hoshino법( $\sqrt{t}$  법)

Hoshino법( $\sqrt{t}$  법)은 쌍곡선법과 유사하나 유동변형을 포함한 침하량은 시간의 평방근에 비례한다는 가정으로부터 장래의 침하량을 예측하는 방법으로서 쌓기 종료 후 실측침하량을 기초로 시간(t)과  $t/(S_t-S_0)^2$ 를 Plot하고 이 점들 중 후반부의 직선부분을 연결하여 그림 2.22와 같이 미지수 A, K에 의해 침하량을 계산하는 방법이다.



$$S_t = S_0 + S_d$$

$$= S_0 + \frac{A \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{1+K^2} \cdot t}$$

$$S_f = S_0 + A = S_0 + \sqrt{1/\beta}$$

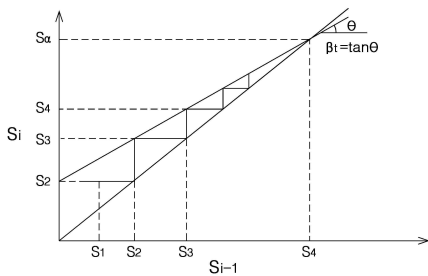
(a) 그래프

(b) 계산방법

그림 2.22 Hoshino 법 (한국도로공사, 2001)

(3) Asaoka법

Asaoka법은 1차원 압밀방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 간편식으로서 실측침하-시간곡선에서 동일 간격의 시간( $\Delta t$ )에 대응하는 침하량  $S_1, S_2, \dots, S_i$ 를 구하여  $(S_1, S_2), (S_2, S_3), \dots, (S_{i-1}, S_i)$ 를 Plot하고 그 점들을 연결하는 직선을 구하여 그림 2.23과 같이 침하량을 계산한다.



$$S_t = \beta_0 + \beta_f \cdot S_{i-1}$$

$$S_f = \frac{\beta_0}{1 - \beta_f}$$

(a) 그래프

(b) 계산방법

그림 2.23 Asaoka 법 (강민수, 2008)

## 2.4 현장계측자료에 의한 새로운 침하예측 이론

### 2.4.1 기존 침하예측 기법의 문제점과 새로운 침하예측 기법의 필요성

연약지반 현장에서 성토 및 구조물 축조는 필수적으로 압밀침하에 대한 문제가 발생되는데 이에 따른 해결방법으로 계측 및 분석을 수행하였으나, 이에 대한 정확한 성과 분석은 기대에 미치지 못하였다. 이는 기존의 연약지반의 압밀특성분석이 침하형태에 따른 해석으로 국한되어 있어 과잉간극수압에 소산에 따른 과정이 해석과정에 반영되어 있지 못하였기 때문이다.

쌍곡선법의 문제점은 침하의 평균속도가 쌍곡선적으로 감소한다는 가정하에 초기의 실측침하량에 의해 장래의 침하량을 예측하는 방법으로서 침하의 형태가 쌍곡선적으로 감소하지 않는 침하의 형태에서는 침하량이 과소하게 평가된다는 것이다. 즉 연약지반 두께가 얇거나 연약지반내 실트질의 함유량이 높아 침하량이 적거나 침하속도가 비교적 빠른 지반의 경우 침하의 형태는 비교적 쌍곡선에 가깝거나 유사하지만, 연약층의 두께가 두껍거나 점성토의 함유량이 90% 이상이 되는 소성점성토의 경우 침하의 형태는 쌍곡선의 형태보다는 긴 포물선 형태를 보이므로 쌍곡선법의 예측한 침하량보다 실측침하량이 초과해 버리는 현상이 발생하기 때문이다. 또한, 일정 성토 조건으로서의 예상침하량으로 다음 단계의 침하량을 예측은 예초에 불가능 하여 최종성토 이후에나 적용이 가능하므로 현장 시공여건을 개선을 위한 방법으로 부적합한 결점이 있다. 그리고 쌍곡선법은 과잉간극수압 소산에 따른 압밀도 증가를 전혀 반영하고 있지 못하다. 그로 인해 쌍곡선법은 압밀도에 따른 유효응력증가를 전혀 반영하고 있지 않아 이론적 배경이 매우 부실한 단점이 있다.

Hoshino법( $\sqrt{t}$  법) 문제점은 전침하량이 시간의 평방근에 비례한다는 가정으로부터 즉 침하의 저감속도가  $\sqrt{t}$  만큼 감소되어 간다는 가정이다. 하지만 연약지반의 침하속도는 압밀계수( $C_v$ ,  $cm^2/sec$ )에 지배되며 침하저감 속도는 연약지반 두께에 따라 또는 점성토의 입자의 크기에 따른 투수성에 따라 결코 일정하지 않다. 즉, 연약지반의 기본 특성인 압밀계수가 무시되며 이러한 것으로 인해 압밀계수가 매우 작거나, 연약지반 두께가 매우 두껍고 압축지수가 커서 침하량이 매우 클 경우 침하량이 평방근에 비례한다는 가정으로 인해 최종침하량이 과소평가 될 가능성이 매우 커서 현장에서 쌍곡선법에 비해 적용사례가 매우 작다. 또한, 쌍곡선법과 동일하게 과잉간극수압에 소산에

따른 압밀이론이 반영되어 있지 않으므로 이론적 배경 또한 매우 빈약한 편이다.

Asaoka법은 1차원 압밀방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 간편 식으로써 동일 간격의 시간( $\Delta t$ )에 일정하게 침하량이 감소한다. 실제 적용 시 시간( $\Delta t$ )에 따른  $S_1$  vs  $S_{i-1}$  추세선이 분석자에 따라 매우 임의로 설정될 가능성이 매우 크다. 특히 발생침하량이 매우 크고 침하발생 속도가 매우 작은 경우 시간( $\Delta t$ )에 따른  $S_1$  vs  $S_{i-1}$  추세선은 최종침하예측 지점인  $45^\circ$  선과 이격거리가 매우 작으므로 그 최종침하량인  $S_1 = S_{i-1}$  을 선정하는데 어려움이 존재한다. 연구자가 이 방법을 적용하여 보면 침하가 속도가 비교적 빠른 점성토질 실트에서는 최종침하량 예측이 비교적 정확하나 압밀속도가 늦어질수록 적용성이 현저히 저하되는 단점이 있다.

지금까지의 연약지반의 침하량의 예측 방법이 침하경향을 쌍곡선이나 평방근( $\sqrt{t}$ )으로 가정함으로써 이론적 배경이 빈약하고 토질역학 압밀이론의 간극수압의 소산과정을 적용하지 않아 압밀도와 유효응력 증가에 대한 평가가 매우 어려웠다.

새로운 침하예측법은 간극수압계와 층별침하계를 동시에 하나의 자료에 취합하고 간극수압의 소산과정과 이에 따른 유효응력 증가와 간극비의 감소과정을 하나의 Graph 즉  $e - \log P'$  곡선에 도시하여 현장 토질특성인 압축지수( $C_c$ ), 재압축지수( $C_p$ ), 선행압밀하중( $P_c$ )을 구하고 이에 따른 각 하중별 단계별 침하량을 규명하는데 있다.

## 2.4.2 간극수압계 및 침하계를 이용한 새로운 침하예측법 제안

간극수압계를 이용한 새로운 침하예측방법은 기존의 침하예측방법이 침하량만을 이용한 방법으로 침하경향을 일정한 형태로 가정한다는 것이다. 하지만 압축성의 범위가 큰 점성토에서는 압밀응력에 따라 10배 이상 차이가 나므로 침하형태가 일정하게 구현되지 않는다. 또한, 압밀속도를 좌우하는 압밀계수의 경우도 선행압밀응력에 따라 보통 20배이상 작아진다.

본 연구에서는 기존의 침하예측방법을 유효응력 이론과 일차원 압밀이론을 이용하여 보다 이론에 부합되고 현장에서도 실험실에서와 같이 현장토질정수를 획득하여 성토단계 즉 압밀응력에 따라 침하를 예측하고 평가하고자 한다.

### (1) 유효응력 원리

본 논문에서는 현장 연약지반의 거동 전체를 유효응력의 증감에 따라 연구하였다.

점성토는 압밀 전 과정에서 과잉간극수압의 소산에 따라 유효응력이 증가한다. 즉, 유효응력이 변화하면서 간극비의 감소가 발생하게 된다. 유효응력이 흙의 거동, 특히 침하와 강도를 지배한다. 유효응력이 증가하면 지반은 압축(침하)되고 강도는 증가한다.

(2) 간극수압계와 침하계를 이용한 침하예측방법

본 연구에서는 간극수압계와 침하계를 동시에 이용하여 유효응력과 간극비 변화를  $e - \log P'$  곡선에 도시하여 압밀특성을 분석하였다. 작도하는 방법은 다음과 같다.

점성토의 원지반 상태 지중응력을 계산하고, 성토로 인한 상재하중 변화를 계산한다. 또한 간극수압을 측정하여 성토와 압밀과정에서의 유효응력을 계산하고, 침하를 측정하여 간극비 변화를 산출하며, 유효응력 및 간극비 변화를 도시한다.

상기의 순서대로 측정된 계측자료를 통해 계산된 유효응력과 간극비의 변화를  $e - \log P'$  곡선에 도시하면 그림 2.24와 같으며, 실내압밀시험의 압밀형태와 거의 유사한 곡선이 작도됨을 알 수 있다.

지금까지 이용 실적이 미미하였던 간극수압 발생 및 소산과정을 유효응력의 감소 및 증가과정으로 도시하고, 유효응력 증·감에 따른 간극비의 감소를  $e - \log P'$  곡선으로 표기하여 압밀특성을 분석 연구하였다.

성토과정에서 증가하는 전응력( $P = P_0 + \Delta P$ )을 표시하고, 과잉간극수압을 측정하여 유효응력( $P' = P_0 + \Delta P - \Delta U$ )변화를 도시한다. 그리고 침하계에서 나타난 침하량( $\Delta S$ )을 간극비 ( $\Delta e$ )로 변환하여 표준압밀시험의  $e - \log P'$  곡선에 동시 작도한다.

작도된  $e - \log P'$  곡선상에서는 유효응력이 선행압밀하중( $P_c$ ) 이전에는 재압축곡선을 보이며, 성토과정에서는 과잉간극수압으로 인한 유효응력의 감소로 인하여 전응력 곡선의 좌측에 표기된다. 이후 성토 종료 후 유효응력곡선은 처녀압밀곡선을 따라 이동하게 된다.

그림 2.24는 계측자료를 이용한 새로운 침하관리기법의 흐름도이다.

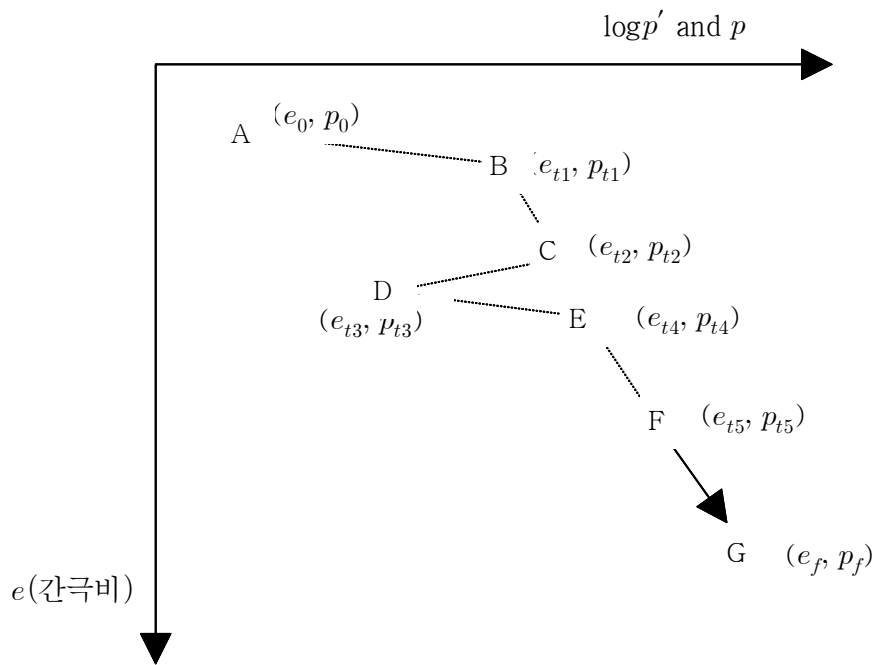


그림 2.24 계측자료를 이용한 새로운 침하관리기법

기존의 침하예측방법(쌍곡선법 등)의 최종침하량 예측시점이 성토 후 일정기간이 경과되어야 가능하나, 본 연구의  $e - \log P'$  곡선법은 성토완료 이전에 최종침하량 예측이 가능하여 현장 침하관리에 유리하다.

본 연구에서는 유효응력과 간극비의 변화를 도시한  $e - \log P'$  곡선을 이용하여 새로운 침하예측기법을 제안하고자 한다.

## 제 3 장 현장계측분석 및 성과

### 3.1 연구대상지역

본 연구 대상지역은 영산강 하구언에 인접한 OO지구로써 북쪽에 오룡산, 북서방향에 부주산, 부흥산으로 둘러싸여 있으며, 남쪽에는 영산강이 동서방향으로 흐르고 있다.

전체적인 지형은 서쪽의 산지를 제외하고는 대부분 넓은 평야로 구성되어 있으며 평야 중간에 영산강 하구언 공사 이전에 섬이었던 소도들이 존재한다. 사업지구내의 평야들은 논으로 경작되었던 지역이고 중소규모의 수로들과 농로들이 경작자들의 필요에 따라 생성, 소멸되어 지형의 인위적인 변화가 예상된다. 아래 그림 3.1은 본 연구의 대상지역인 OO지역 및 인근 지역에 대한 위치도를 나타내며, 점선으로 표시된 지역이 본 연구의 대상지역이다.

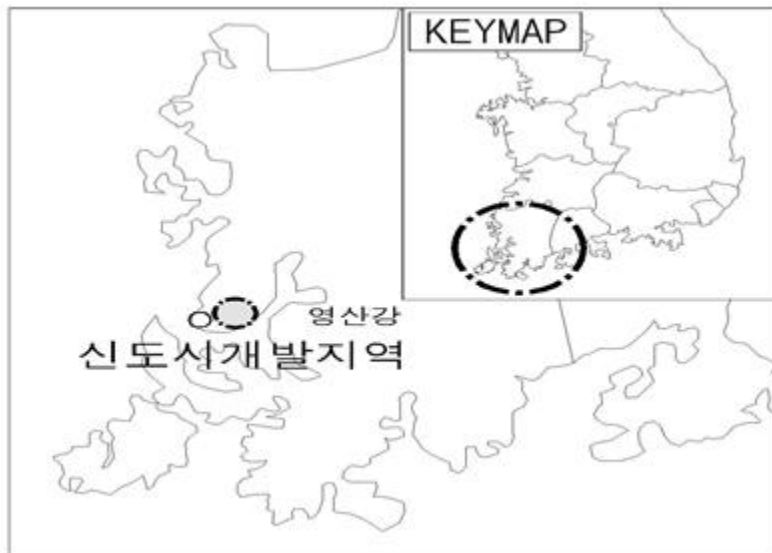


그림 3.1 연구대상 지역

## 3.2 계측기 관리 기준

### 3.2.1 매설위치 선정기준

지역의 대표성을 고려하고 가능한 격자상 배치, 지형특성상 지층변화가 예상되는 곳이어야 한다.

### 3.2.2 계측기기 선정기준

계측항목은 지반개량 상황 및 설계시의 불확실성을 충분히 검토하여 정해야 한다. 표 2.1은 계측기에 따른 적용내용을 나타낸 것이다.

**표 3.1 계측기기 종류 및 적용 내용**

계측 항목	계 측 기	계 측 내 용 및 적 용
침 하	지표면침하관 지중침하계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 재하성토부의 침하 측정을 통하여 최종침하량 결정</li> <li>· 현재까지의 압밀도 및 향후 임의 시점에서의 압밀도 추정</li> <li>· 하중 작용시 발생될 잔류침하량을 추정하여 연약지반 개량공사 완료시기와 성토제거시기 결정</li> </ul>
수평변위	경 사 계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 성토사면부의 지반내 연직방향의 변형량과 변형속도를 측정하여 성토중양부의 최대침하량과 병행하여 성토사면의 안정관리 실시</li> </ul>
간극수압	간극수압계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 재하성토 하중에 의한 지반내 간극수압의 변화 측정</li> <li>· 배수공법으로 인한 압밀 효과 확인</li> <li>· 압밀진행 및 강도 증대 상황을 파악</li> </ul>
지하수위	지하수위계	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 대지조성 지역의 지하수위 변화 측정</li> <li>· 간극수압 측정자료와 비교하여 과잉간극수압 추정</li> </ul>



### 3.2.3 관리지역별 계측빈도

침하 및 안정관리를 위하여 설치한 계측기의 측정빈도는 다음 표 2.2에 제시한 빈도를 기준으로 하되 연약지반의 정도, 공사의 중요성, 공정 등에 따라 조정할 수 있다.

표 3.2 설치된 계측기의 측정빈도

구 분	준비 및 관리단계	쌓기기간중	쌓기완료후			
			처음 1개월	2~3개월	4~5개월	6개월이후
지표침하계 지하수위계 간극수압계 층별침하계	2회/2일	1회/1일	1회/3일	1회/1주	1회/2주	1회/월
경 사 계	2회/2일	1회/1일	1회/3일	1회/1주	1회/2주	1회/월

### 3.2.4 계측기 사양 및 측정법

표 3.3 ~ 3.6은 각 계측기의 사양 및 측정 방법을 나타낸 것이다.

표 3.3 층별침하계

종 류	항 목	시 방
층별침하계 (M.C Type)	설치기준	· 지지층(기반암층)까지 천공(보링내경 126mm이상)하여 기준소자를 설치하고 분석대상층에 측정소자를 매설함
	Spider magnetic sensor	· Anchor 확장외경(O.D Anchor Fully Extended):22cm 이상 · 양날개 방식(상,하 각3개), 날개끝이 90°이상 꺾여 원지반에 고착이 잘되는 형태일 것

**표 3.4 간극수압계**

종 류	항 목	시 방
진동현식 간극수압계	설치기준	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 분석대상 연약층의 중앙심도 또는 연직배수재 간격의 중앙</li> <li>· 1공(보링 내경 100mm이상)에 1개의 Sensor 설치</li> </ul>
	지시계 (측정기)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Sensor와 동일한 정밀도 및 측정범위를 가질 것</li> <li>· Ram기억용량 : 1회분이상의 측정치를 저장할수 있어야 함</li> <li>· 사용시간 : 12시간 이상</li> </ul>

**표 3.5 지하수위계**

종 류	항 목	시 방
지하수위계	설치조건	· 심도 5.0m 굴진후 설치, Open Type
	Stand Pipe	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 재질 및 규격 : PVC관, 외경 26mm/두께 3.0mm, 길이 3.0m</li> <li>· 염분 및 태양광에 대한 내부식성을 가져야 함.</li> </ul>
	파이쥬미터 텃	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 30cm 길이로 지표수의 영향을 받지 않는 심도에 설치</li> <li>· Casagrande식</li> </ul>
	수위감지기	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 구성 : 센서와 연결된 감지기, 1cm 단위로 연결된 cable, Readout이 있는 릴</li> <li>· 측정범위 : 20m 이상</li> <li>· 정밀도 : 1.0cm</li> </ul>

**표 3.6 지중경사계**

종 류	항 목	시 방
경사계	설치조건	· 지지층(기반암)까지 천공(보링 내경 100mm이상)후 설치
	지시계 (측정기)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 정밀도 : 0.1% F.S이상</li> <li>· 최소측정단위 : 0.1% F.S 이하</li> <li>· 기억용량 : 1회분 이상의 측정치를 0.5m간격으로 저장 가능</li> <li>· 사용시간 : 12시간 이상</li> <li>· 케이블은 50m 이상, PE피복, 내습, 내염, 전자파차폐 기능이 있고 저항이 작은 것으로 Sensor제작회사와 동일회사 제품일 것</li> </ul>

### 3.3 P-1 지점 계측기 결과 및 성과분석

#### 3.3.1 P-1 지점의 계측기 매설위치

P-1 지점의 매설위치는 OO지구 신도시 개발사업지구내 1-2공구 BL.225 위치한다. 그림 3.2은 개발사업지구내 P-1의 위치를 나타낸 것이다.

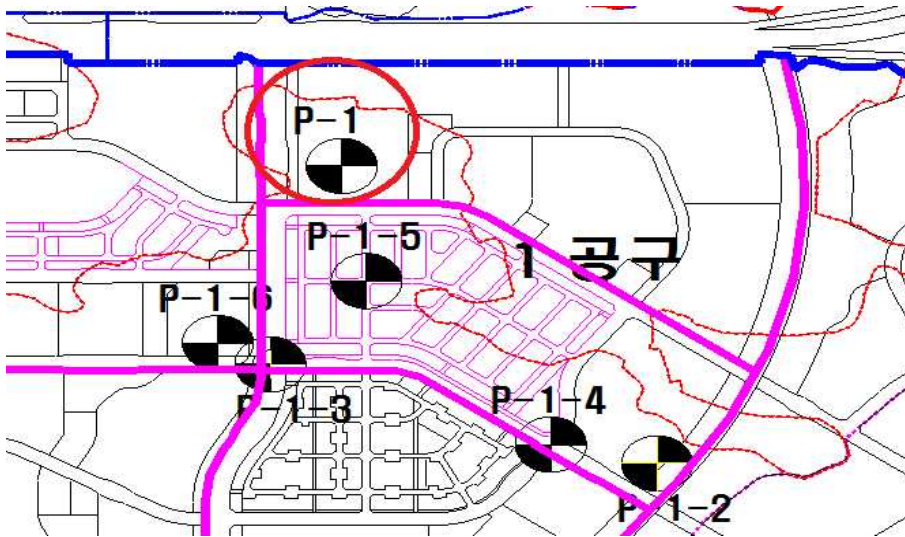


그림 3.2 OO사업지구내 P-1 지점위치

#### 3.3.2 P-1 지점의 지층구성

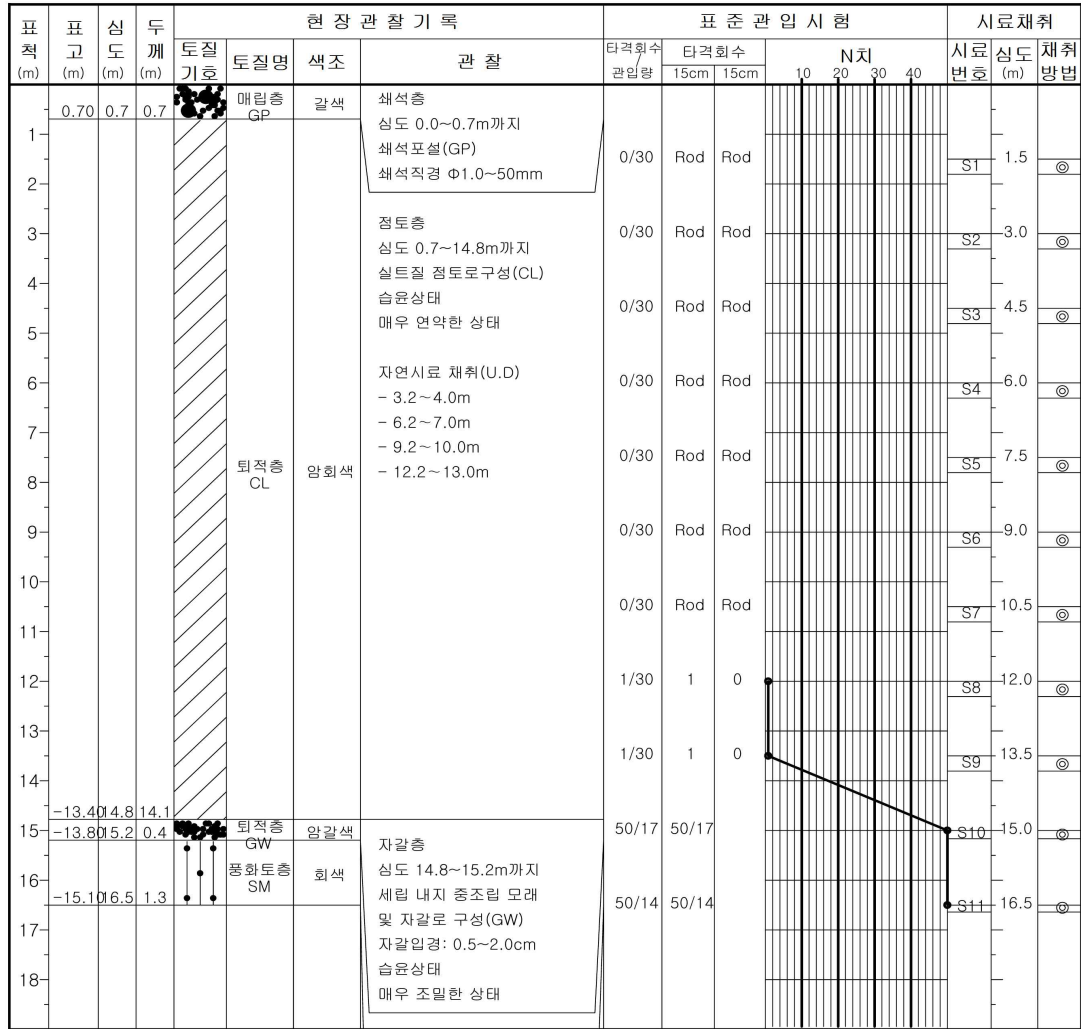
매립층, 점성토층, 모래자갈층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있다. 매립층은 쇄석으로 구성되어 있으며, 연약지반 처리를 위한 상부배수층으로 약 0.7m의 두께를 가지고 있으며 색조는 회갈색이다. 표토층 하부에 존재하는 점성토층은 14.1m의 두께를 가지고 있으며 실트질 점성토층(CH)으로 구성되어 있다. 연경도는 매우 연약하고 N값은 0~1로 매우 낮은값을 보이고 있으며 상당히 큰 침하량이 발생하는 지층이다.

퇴적층하부는 모래자갈층으로 구성되었고 두께는 약 0.4m, 대단히 조밀한 지층으로 색상은 암갈색 N값은 50/17이다.

표 3.7은 P-1 지점의 지층구성을 그림 3.3은 P-1 지점의 주상도를 나타낸 것이다.

표 3.7 P-1 지점 지층구성

분포심도 GL(-), (m)	분포표고 EL(+), (m)	두께(m)	지층상태			N치
			연경/조밀도	색깔	구성토질	
0.0	1.4	0.7	-	갈색	쇄석, 배수층(GP)	-
0.7	0.7	14.1	매우연약	암회색	실트질 점성토(CH)	0/30~1/30
14.8	13.4	0.4	대단히조밀	암갈색	모래질 자갈(GW)	50/17



(a) P-1 (1/2)

그림 3.3 P-1 지점 시추주상도(계속)

표 척 (m)	표 고 (m)	심 도 (m)	두 께 (m)	현 장 관 찰 기 록				표 준 관 입 시 험					시 료 채 취					
				토질 기호	토질명	색조	관 찰	타격회수 관입량	타격회수		N치				시료 번호	심도 (m)	채취 방법	
									15cm	15cm	10	20	30	40				
20							풍화도층 심도 15.2~16.5m까지 실트질 모래로 구성(SM) 완전풍화, 습윤상태 매우 조밀한 상태											
21																		
22							심도16.5m에서 굴진종료.											
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		
30																		
31																		
32																		
33																		
34																		
35																		
36																		
37																		

(b) P-1 (2/2)

그림 3.3 P-1 지점 시추주상도

### 3.3.3 P-1 지점의 토질특성

연구대상 지점에 대한 토질특성을 정리하면 다음과 같다.

점성토 지반의 함수비( $W_N$ , %)는 62.3~75.3%로 평균 70.2%의 고함수비 점성토이다. 액성한계(LL, %)는 71.1~82.7%로 평균 78.0%이다. 보통 액성한계가 50%가 초과 시 고압축성이라 칭하는데 연구대상 지점의 점성토는 고압축성의 실트 또는 점성토로 구성되어 있다. 점성토 지반의 비배수전단강도( $C$ , kgf/cm<sup>2</sup>)는 0.276~0.322로 평균 0.303kgf/cm<sup>2</sup>의 연약점성토이다. 압축지수( $C_c$ )는 0.78~1.04로 평균 0.930의 매우 압축성이 큰 점성토이다.

표 3.8은 P-1 지점의 토질특성을 나타낸 것이다.

표 3.8 P-1 지점의 토질특성

Depth (m)	$W_N$ (%)	$G_s$	LL	PI	UU	CU		Consolidation Test			USCS
					$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (deg.)	$P_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$C_c$	$e_0$	
3.2~4.0	75.30	2.68	80.40	56.50	0.276			0.54	1.040	2.017	CH
6.2~7.0	73.10	2.71	82.70	38.60	0.311	0.06 0.05	15.0 19.3	0.55	0.980	1.979	MH
9.2~10.0	62.30	2.67	71.10	46.50	0.322			0.52	0.780	1.666	CH

### 3.3.4 P-1 지점의 계층현황 및 분석

#### (1) 계층현황

점성토 지반의 심도가 14.1m인 대상지점의 연약지반개량을 위해 경제성 및 시공성을 고려하여 P.B.D 공법을 채택하였다. 배수재 직경 0.05m, 스미어 효과로 인한 투수계수 감소는  $\eta$  은 5.0, 스미어 효과 영향원은  $0.16 \times 2.5 = 0.4m$ 로 가정하여 검토된 연직 배수재의 간격은 0.8m×0.8m 심도 14.1m 타입으로 시공하였다.

본 단지의 최초 성토는 2004년 1월 7일 높이 0.87m 실시하였으며, 2004년 2월 28일에 3.58m, 2004년 7월 30일에 6.00m, 2004년 9월 6일에 7.35m, 2004년 10월 13일에 8.50m, 2004년 11월 26일에 9.74m를 최종 성토 시공 완료하였으며, 약 10개월 압밀침

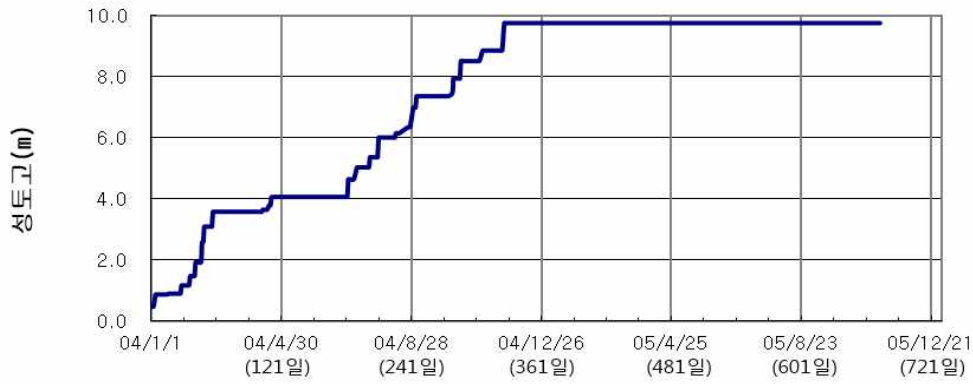
하 종료 후 8.44m로 절취하였다.

침하특성을 파악하기 위한 계측기기로써 지중침하계를 매설하였다. 지중침하계는 먼저 지지층인 모래자갈층까지 14.5m를 천공하고 고정소자인 RM(Ring Magnetic Sensor)을 설치하였다. 침하측정소자인 SM(Spider Magnetic Sensor)를 총 14.1m인 연약지반을 4.0~5.0m 간격으로 나누어 설치하였다.

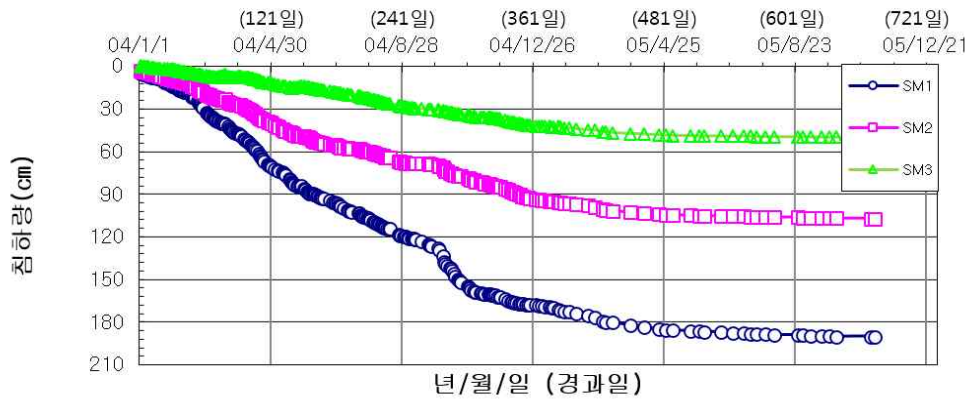
연약층 최상부인 0.0~4.0m 층의 침하거동 측정을 위해 SM1을 설치하였고 침하량은 190.4cm 발생하였다. 그 하부 연약층인 4.0~10.0m 두께의 침하거동 측정을 위해 SM2을 설치하였으며 침하량은 107.3cm 발생하였다. 최하부 연약층 10.0~14.1m 침하 측정을 위해 SM3를 설치하였으며 침하량은 50.3cm 발생하였다.

간극수압계는 진동현 방식으로써 연약지반의 압밀특성을 파악하기 위하여 매설하였다. 먼저 PP1은 심도 2.0m에 매설하여 SM1~SM2사이에 0.0~4.0m 층의 침하 및 변형 시 간극수압 변화를 측정할 수 있도록 하였으며 최대  $5.47\text{t/m}^2$ 이 발생하였다. PP2는 심도 7.0m에 매설하여 SM2~SM3의 4.0~10.0m 층의 침하 및 변형 시 간극수압의 변화를 측정할 수 있도록 하였으며 최대  $7.17\text{t/m}^2$ 이 발생하였다. PP3는 심도 12.0m에 매설하여 SM3~SM4의 10.0~14.1m 층의 간극수압의 변화를 측정하여 분석할 수 있도록 하였으며 최대  $4.08\text{t/m}^2$ 이 발생하였다.

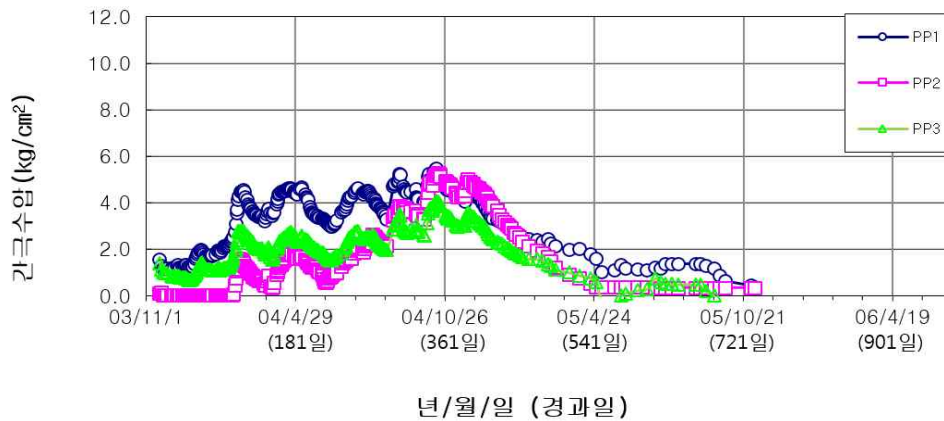
그림 3.4는 P-1 지점의 침하 및 간극수압 발생현황을 나타낸 것이다.



(a) 성토현황도



(b) 층별침하현황도



(c) 간극수압현황도

그림 3.4 P-1 지점의 침하 및 간극수압 발생현황



(2) 0.0~4.0m 점성토층 계층분석

상부점성토 지반은 심도 0.0~4.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 2.0m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 4.0m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.9는 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

**표 3.9 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화**

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/02/24	3.09	0.368
04/04/20	3.79	0.381
04/07/09	5.03	0.361
04/08/31	6.96	0.441
04/10/13	8.50	0.465
04/11/20	9.74	0.395
05/09/06	8.44	0.395~(-)0.040

성토과정 중에서는 간극수압은 0.360~0.470kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토시 최댓값을 보이다가 성토중간에는 소산되면서 감소하는 경향을 보인다. 최종 9.74m에서 최대 간극수압 0.395을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.5는 상부점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.

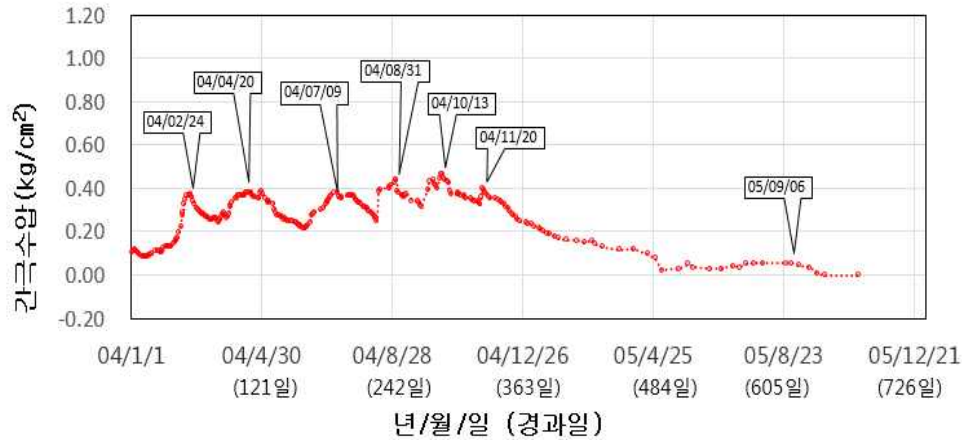


그림 3.5 P-1, 0.0~4.0m 점성토층 간극수압현황

상부점성토 지반은 심도 0.0~4.0m의 지반으로 구분하였다. 상부점성토층을 구분한 이유는 지표면에 근접되어 있어 표면건조 영향을 받으며 지반 내 지중응력이 작고 성토에 의한 재하중의 영향을 직접받기 때문에 압밀침하가 가장 많이 발생하기 때문이다. 상부점성토층의 침하량은 SM1-SM2으로 구할 수 있으며, SM1은 190.4cm, SM2는 107.3cm 이므로 상부 점성토층의 침하량은 83.1cm이다.

그림 3.6은 상부점성토층의 침하현황을 그림 3.7은 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.

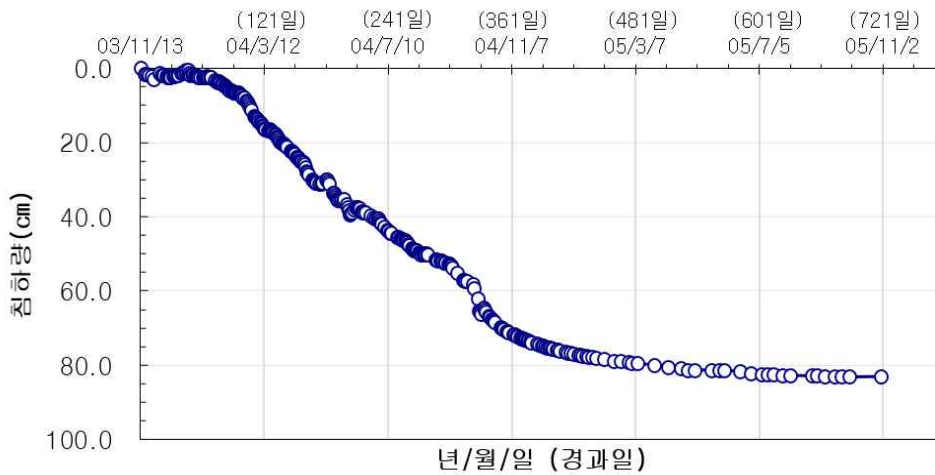


그림 3.6 P-1, 0.0~4.0m 점성토층 침하현황

상부점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 상부점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.988에서 1.367로 감소하였다.

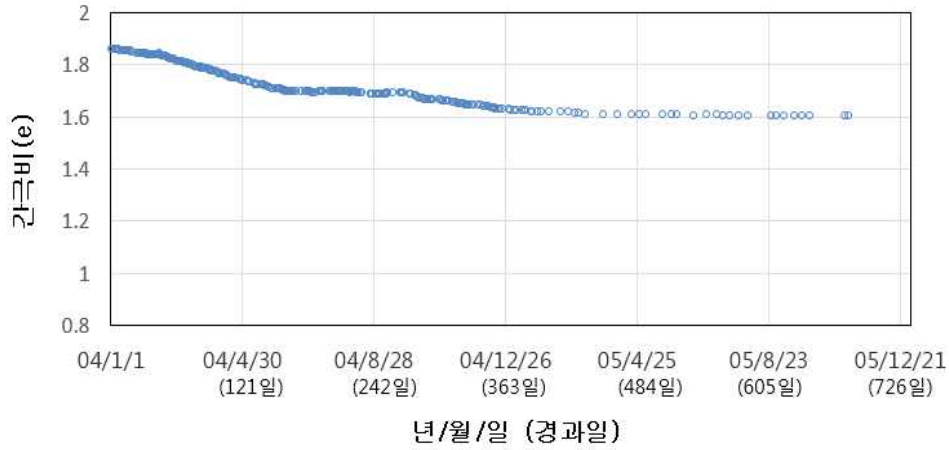


그림 3.7 P-1, 0.0~4.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.8은 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

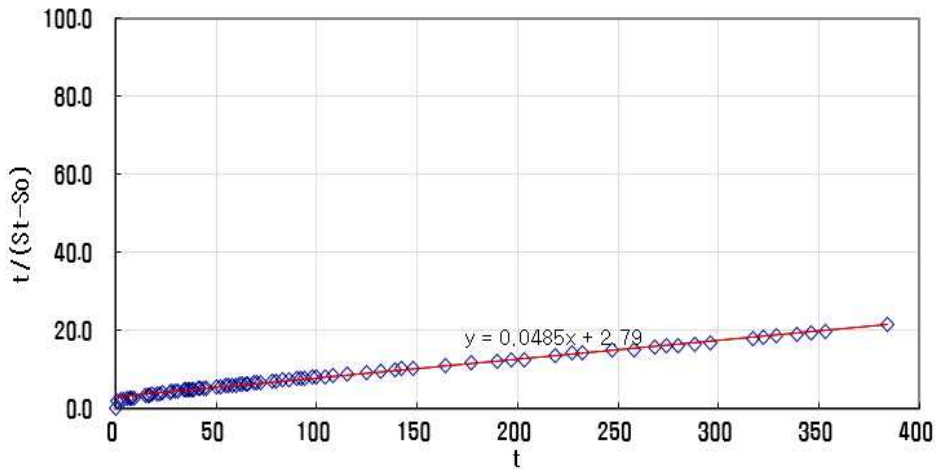


그림 3.8 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량  $s_0 = 65.8\text{cm}$ ,  $\beta = 0.048$ ,  $\alpha = 2.79$ ,  $1/\beta = 20.8\text{cm}$ 로서 쌍곡선 법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 86.6\text{cm}$ 이다.

그림 3.9는 실내시험의  $e-\log P$  곡선을 그림 3.10은 간극수압계 및 침하계의  $e-\log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.10과 같이 현장장계측자료를 유효응력경로로 검토하면 성토과정에서는 A점( $P_0$ )에서 B( $P_c$ )으로 경로이동하며 B점( $P_c$ )에서 급격히 간극비가 감소하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 0.475가 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.136 이다.

B점( $P_c$ )에서 C점( $P_y$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.899$ )이다.

C점( $P_y$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 D( $P_p$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다.

D( $P_p$ )점에서 E( $P_f$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따르므로, 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며, 최종성토에 의한 간극비( $e_f$ )는 1.921이며, 침하량  $S = 84\text{cm}$  이다.

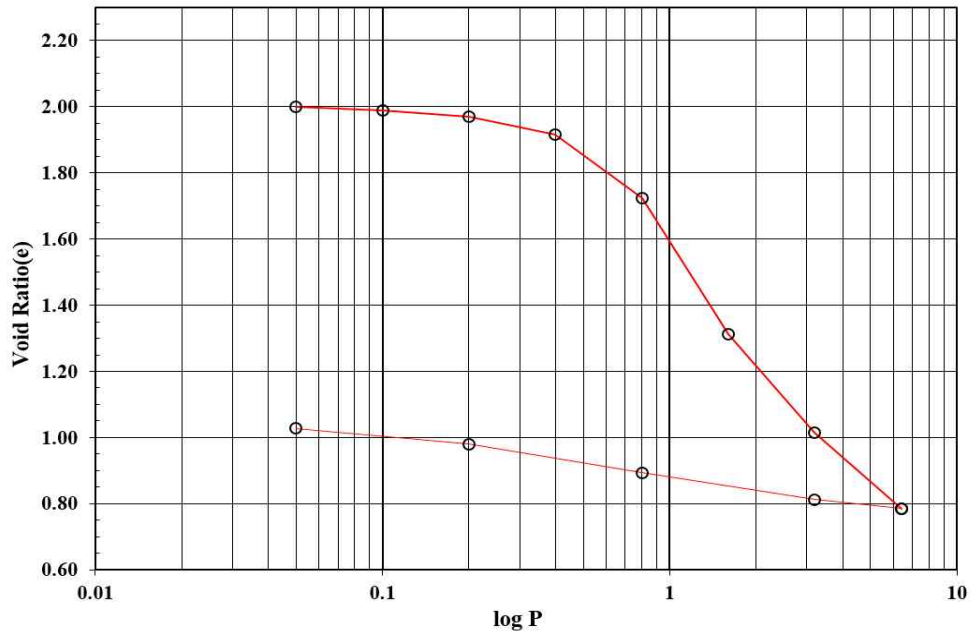


그림 3.9 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

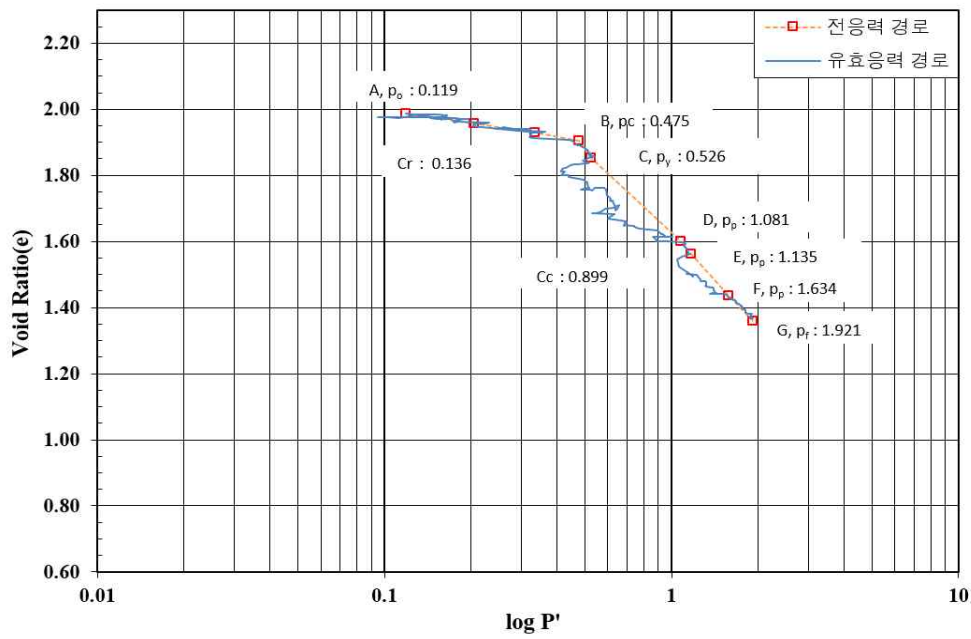


그림 3.10 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 최종침하량을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 82.6cm, 예상 최종침하량은 84.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.10은 0.0~4.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.10 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.214	0.119
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.540	0.450
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.326	0.331
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	0.526
압 축 지 수 $C_c$	1.040	0.899
재압축지수 $C_r$	0.092	0.136

그림 3.11은 점성토의 최종침하량 평가를 나타낸 그래프이다.

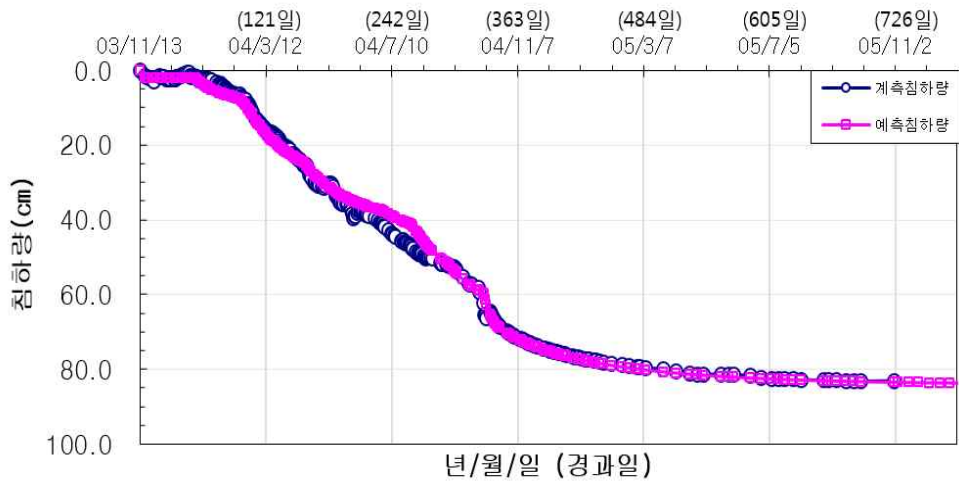


그림 3.11 P-1, 0.0~4.0m 점성토층의 최종침하량 평가

(3) 4.0~10.0m 점성토층 계층분석

상부점성토 지반은 심도 4.0~10.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 2.0m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 8.0m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수가 되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.11은 4.0~10.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

**표 3.11 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화**

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/02/24	3.09	0.350
04/04/20	3.79	0.370
04/070/9	5.03	0.390
04/08/31	6.96	0.570
04/10/13	8.50	0.710
04/11/20	9.74	0.670
05/09/06	8.44	0.670~0.120

성토과정 중에서는 간극수압은 0.350~0.710kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토시 최댓값을 보이다가 성토 중간에 소산되면서 감소하는 경향을 보인다. 최종 9.74m에서 최대간극수압 0.67을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.12는 중간점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.

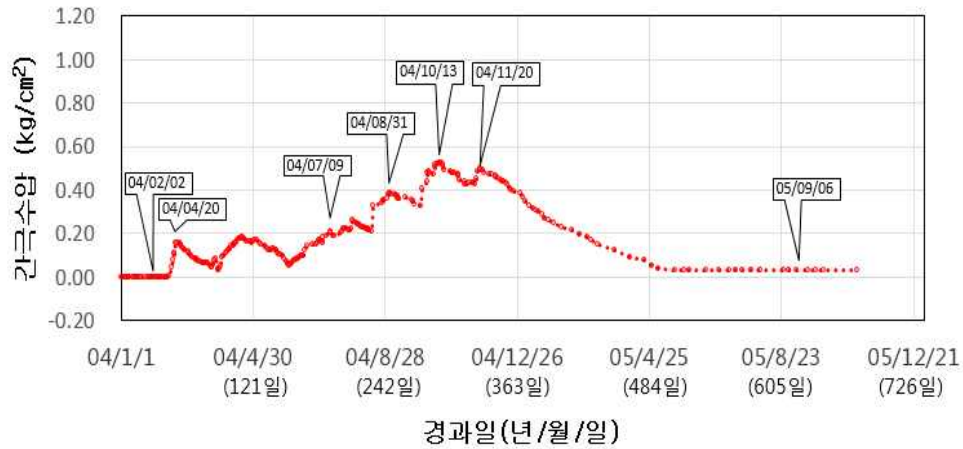


그림 3.12 P-1, 4.0~10.0m 점성토층 간극수압현황

중간점성토 지반은 심도 4.0~10.0m의 지반으로 구분하였다. 중간점성토층을 구분한 이유는 지표면에서 4.0m이상 심도로 이격되어 표면건조 영향을 받지 않으며 지반 내 지중응력이 커지면서 성토에 의한 재하중의 영향을 간접적으로 받기 때문이다. 또한, 압밀침하도 상부 점성토층에 비해 적게 발생하였기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM2-SM3으로 구할 수 있으며, SM3은 107.3cm, SM2는 50.3cm 이므로 상부 점성토층의 침하량은 57.0cm이다.



그림 3.13은 점성토층의 침하현황을 그림 3.14는 간극비 변화현황을 나타낸 것이다.

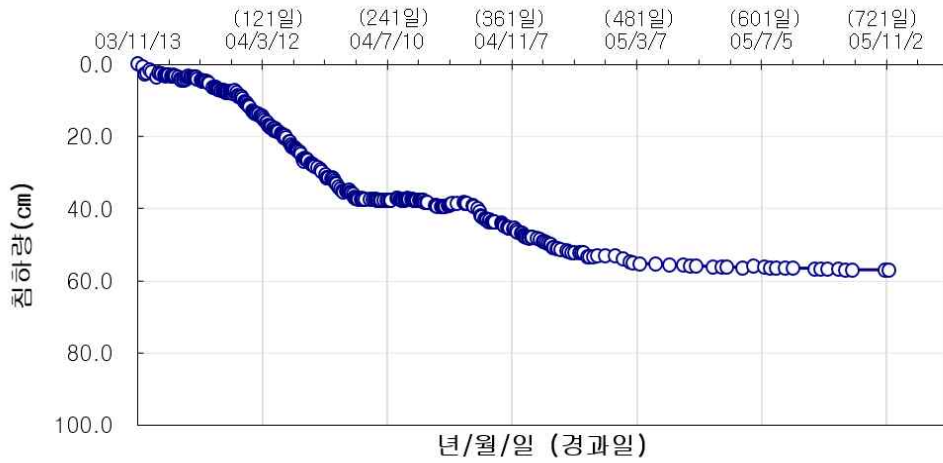


그림 3.13 P-1, 4.0~10.0m 점성토층 침하현황

중간점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 감소로 표기하였다. 침하발생시 간극비는 감소하게 되며 침하량의 발생 더불어 반비례하게 된다. 중간점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.875에서 1.602로 감소하였다.

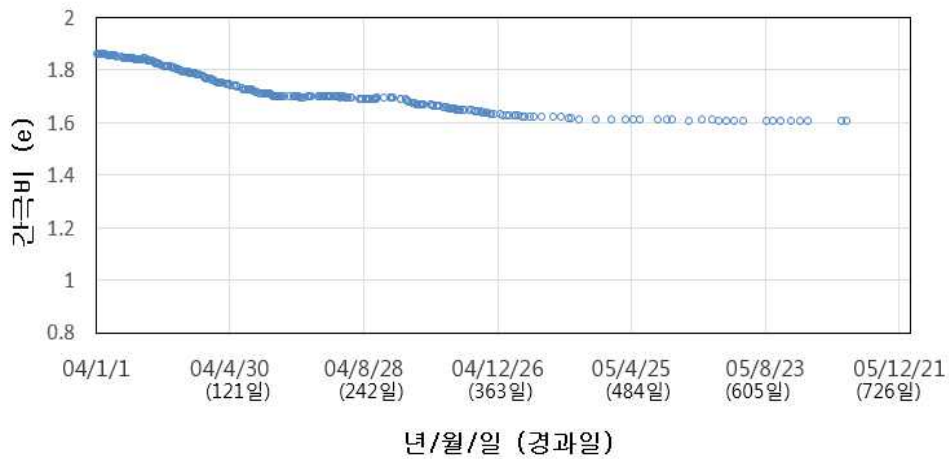


그림 3.14 P-1, 4.0~10.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.15는 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

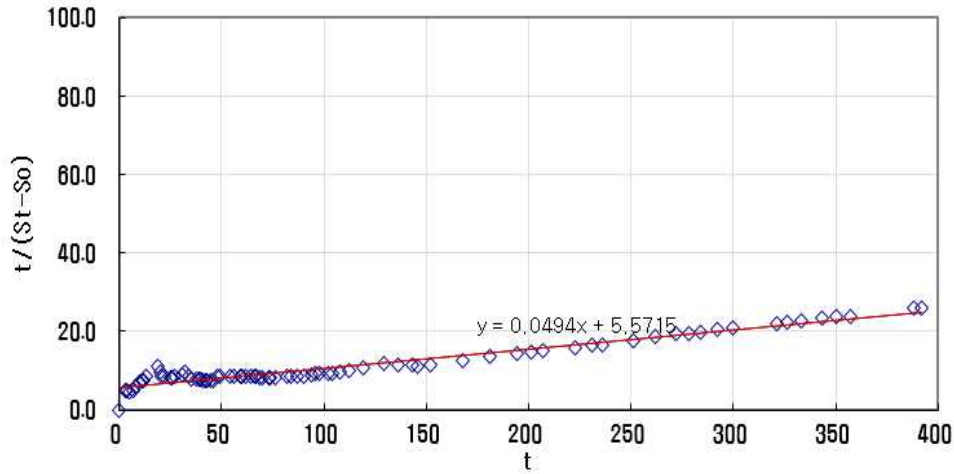


그림 3.15 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $s_0 = 42.0\text{cm}$ ,  $\beta = 0.049$ ,  $\alpha = 5.571$ ,  $1/\beta = 20.41\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 62.4\text{cm}$  이다.

그림 3.16는 실내시험의  $e - \log P$  곡선을 그림 3.17은 간극수압계 및 침하계의  $e - \log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.17과 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 0.416$ )에서 B( $P_c = 0.952$ )으로 경로이동하며 B점( $P_c = 0.952$ )에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 0.952이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.016 이다.

B점( $P_c$ )에서 C점( $P_y$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.60$ )이다.

C점( $P_y = 1.063$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 D( $P_p = 1.970$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다. D( $P_p = 1.970$ )점에서 E( $P_f = 2.218$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따르므로 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종성토에 의한 간극비( $e_f = 1.597$ )이며 침하량은  $S = 58\text{cm}$ 이다.

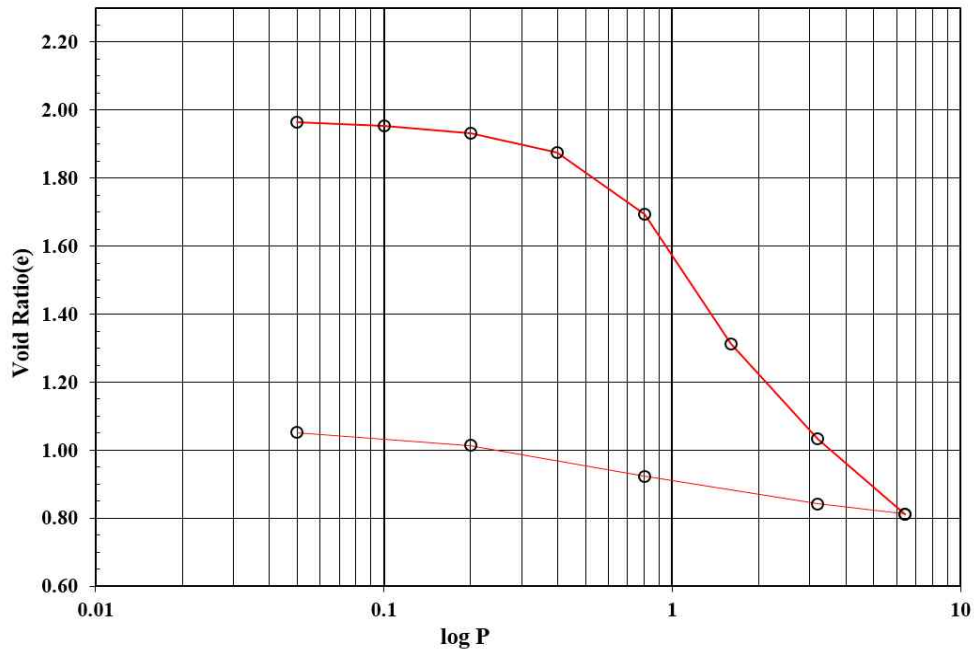


그림 3.16 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

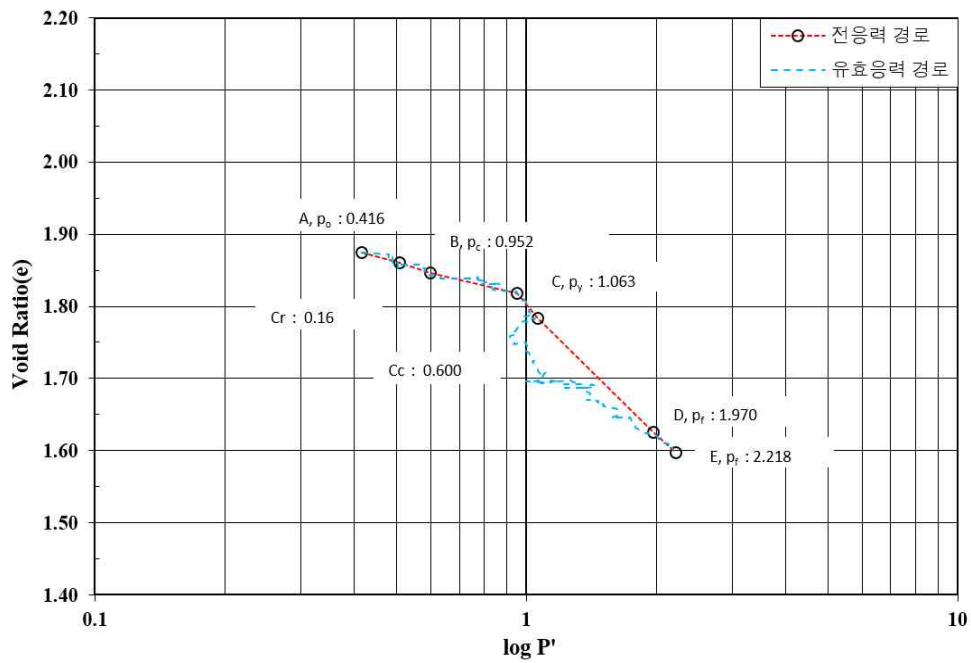


그림 3.17 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 57cm, 장기 침하량은 58.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $7.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.12는 4.0~10.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.12 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.392	0.416
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.550	0.952
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.158	0.536
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	1.063
압 축 지 수 $C_c$	0.980	0.600
재압축지수 $C_r$	0.099	0.160

그림 3.18은 4.0~10.0m 점성토의 최종침하량 평가를 나타낸 그래프이다.

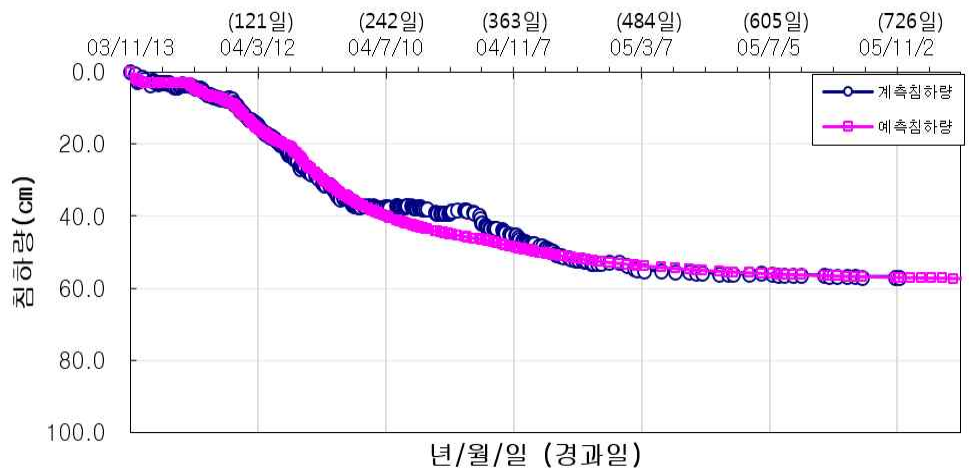


그림 3.18 P-1, 4.0~10.0m 점성토층의 최종침하량 평가

(4) 10.0~14.0m점성토층 계측분석

하부점성토 지반은 심도 10.0~14.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 12.0m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 12.0m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.13은 10.0~14.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

**표 3.13 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화**

날 짜	성토고(m)	간극수압(kg/cm <sup>2</sup> )
04/02/02	0.47	0.278
04/04/20	3.79	0.273
04/07/09	5.03	0.278
04/08/31	6.96	0.346
04/10/13	8.50	0.405
04/11/20	9.74	0.351
05/09/06	8.44	0.351~0.0

성토과정 중에서는 간극수압은 0.278~0.405kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토시 최댓값을 보이다가 성토 중간에 소산되면서 감소하는 경향을 보인다. 최종 9.74m에서 최대간극수압 0.351을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.19는 하부점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.

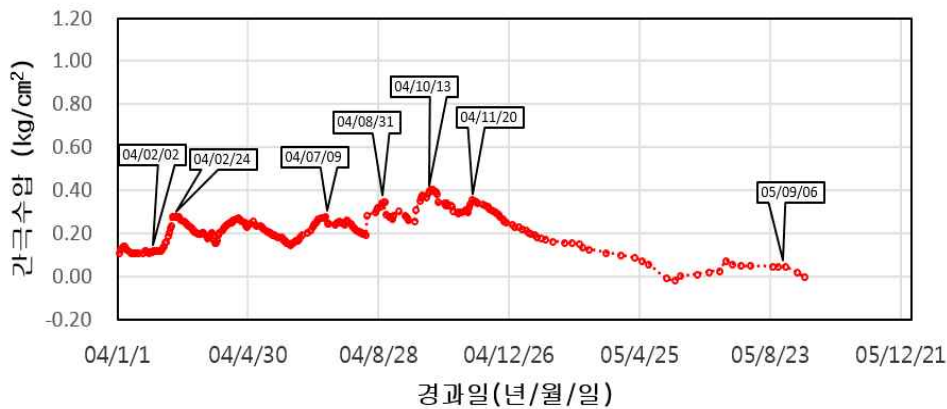


그림 3.19 P-1, 10.0~14.0m 점성토층 간극수압현황

하부점성토 지반은 심도 10.0~14.0m의 지반으로 구분하였다. 하부점성토층을 구분한 이유는 지표면에서 10.0m 이상 심도로 이격되어 표면건조 영향을 받지 않으며 지반 내 지중응력이 커지면서 성토에 의한 재하중의 영향을 간접적으로 받기 때문이다. 또한, 압밀침하도 상부 점성토층에 비해 적게 발생하였기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM3으로 구할 수 있으며, SM3은 50.3cm 이므로 하부 점성토층의 침하량은 50.3cm이다.

그림 3.20은 점성토층의 침하현황을 그림 3.21은 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.

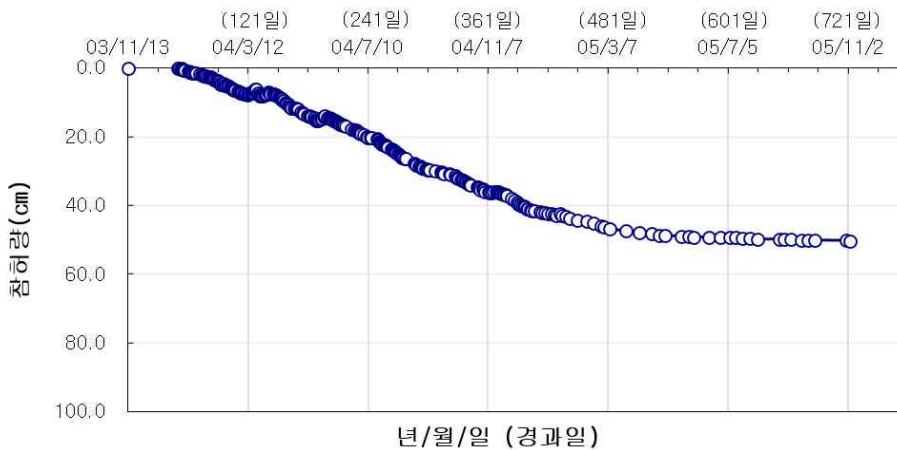


그림 3.20 P-1, 10.0~14.0m 점성토층 침하현황

하부점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 감소로 표기하였다. 침하발생시 간극비는 감소하게 되며 침하량의 발생 더불어 반비례 하게 된다. 하부점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.27에서 0.984로 감소하였다.

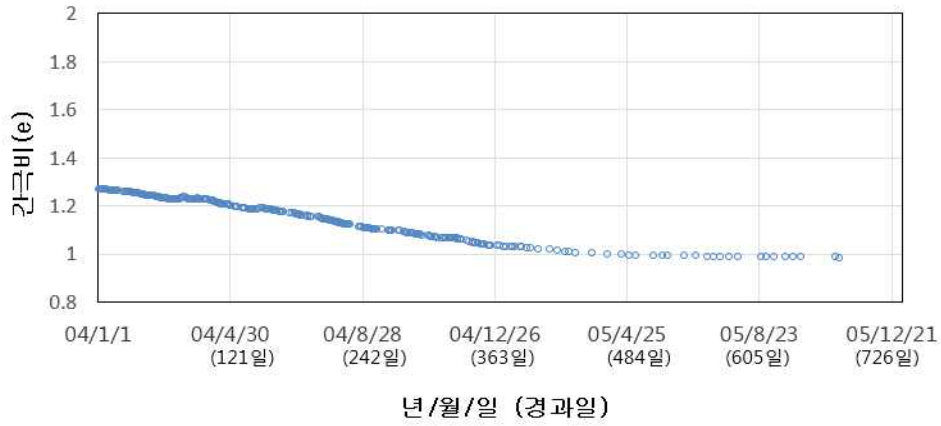


그림 3.21 P-1, 10.0~14.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.22는 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

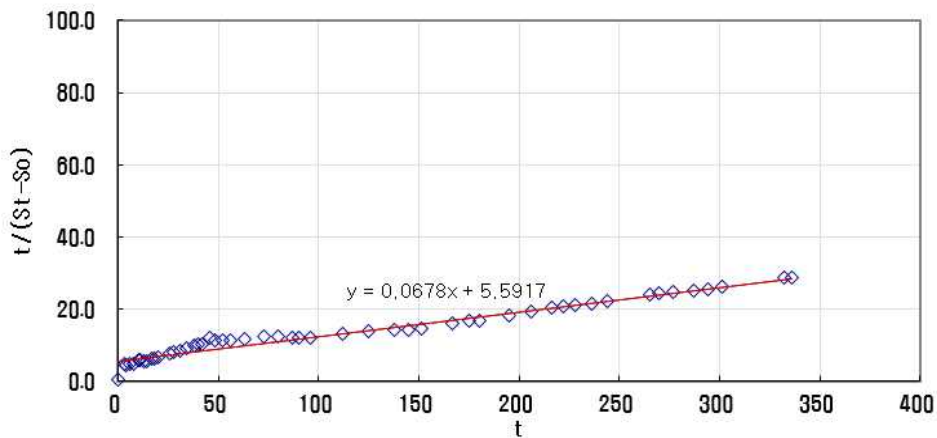


그림 3.22 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $s_0 = 38.6\text{cm}$ ,  $\beta = 0.067$ ,  $\alpha = 5.591$ ,  $1/\beta = 14.93\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 53.5\text{cm}$ 이다.

그림 3.23은 실내시험의  $e-\log P$ 곡선, 그림 3.24는 간극수압계 및 침하계의  $e-\log P'$  곡선이다. 그림 3.24와 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검토하면 성토 과정에서는 A점( $P_0 = 0.713$ )에서 B( $P_c = 1.12$ )으로 경로이동하며 B점( $P_c = 0.952$ )에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 1.12이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.0174 이다.

B점( $P_c$ )에서 C점( $P_y$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.711$ )이다.

C점( $P_y = 1.323$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 D( $P_p = 1.527$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따라 가게 된다. D( $P_p = 1.527$ )점에서 E( $P_f = 2.145$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따라 가므로 최종 간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종성토에 의한 간극비( $e_f = 0.986$ ) 이며 침하량  $S = 50\text{cm}$  이다.



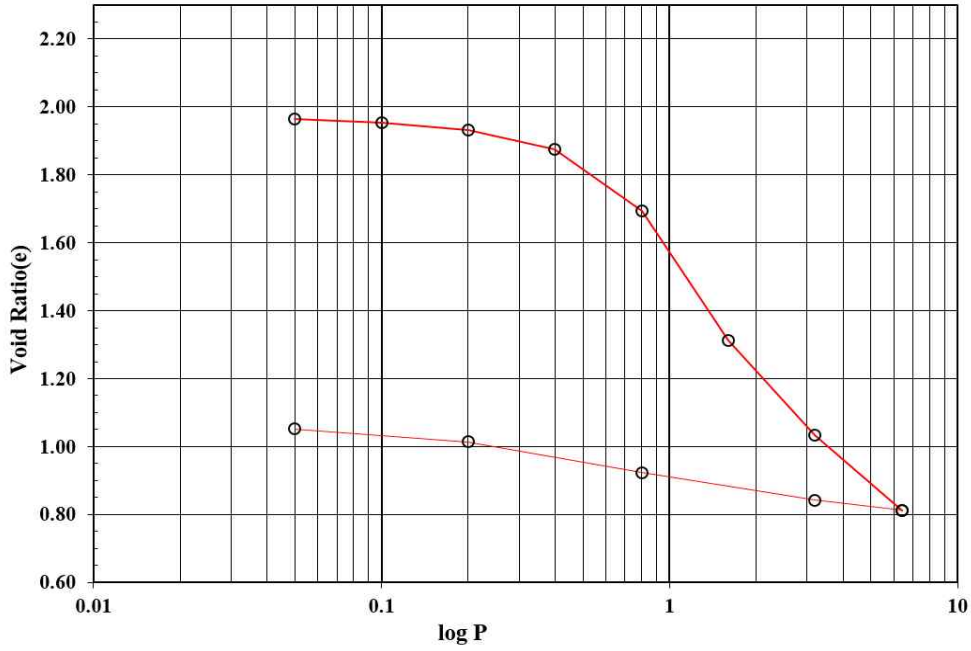


그림 3.23 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

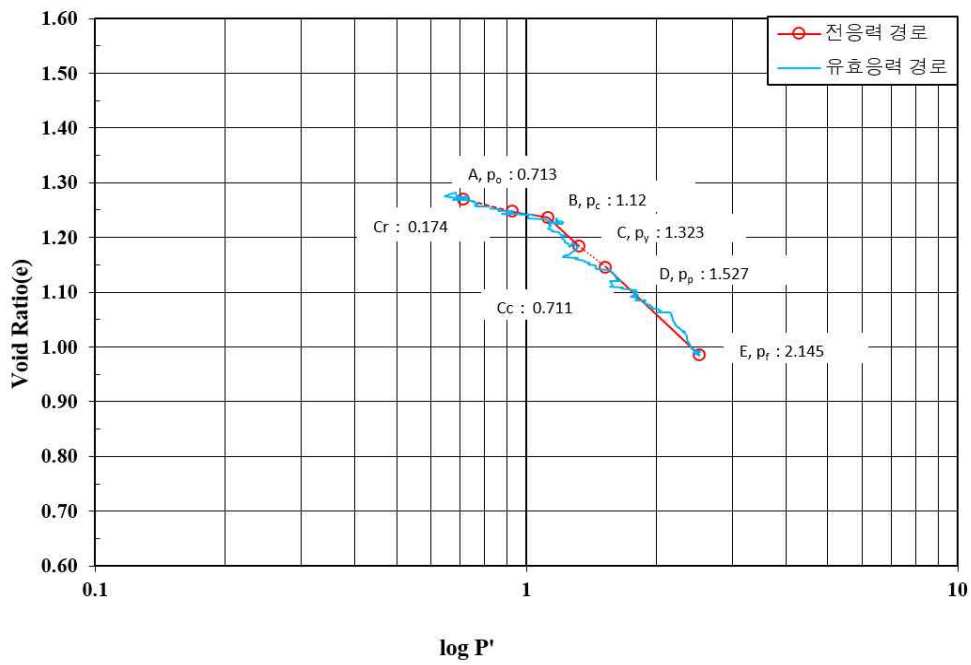


그림 3.24 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 50.3cm, 장기 침하량은 50.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $1.9 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.14는 10.0~14.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.14 P-1 지점, 10.0~14.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.748	0.713
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.750	1.120
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.002	0.407
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	1.323
압 축 지 수 $C_c$	0.590	0.711
재압축지수 $C_r$	0.090	0.174

그림 3.25는 점성토층의 최종침하량을 나타낸 것이다.

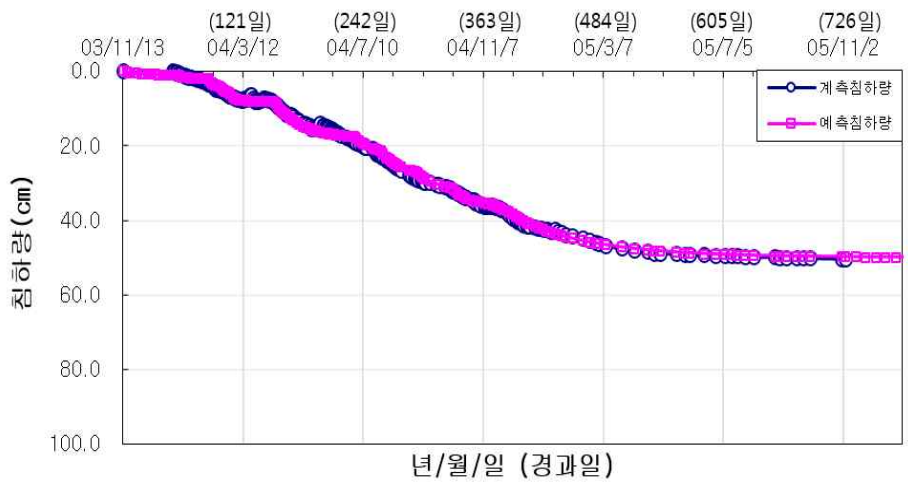


그림 3.25 P-1, 10.0~14.0m 점성토층의 최종침하량 평가

(5) P-1 지점 계측분석

실내시험자료에서 구한 토질정수와 현장계측자료의  $e-\log P'$  도표를 이용한 토질정수를 표 3.9에 표기하였다. 표준압밀자료와  $e-\log P'$  곡선의 압축지수와 재압축지수는 모두 거의 유사한 양상을 보이나, 선행압밀하중과 지중응력의 차는 표준압밀시험에서 심도가 깊어질수록 감소하여 12.0m 이하에서는 거의 0이 된다. 표 3.15는 P-1 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수를 비교, 그림 3.26은 실내시험결과 토질정수를, 그림 3.27은 현장계측결과 토질정수를 나타낸 것이다.

표 3.15 P-1 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수 비교

구 분	실내시험			$e-\log P'$		
	응력차 ( $P_c - P_0$ )	재압축지수 ( $C_r$ )	압축지수 ( $C_c$ )	응력차 ( $P_c - P_0$ )	재압축지수 ( $C_r$ )	압축지수 ( $C_c$ )
0.0~4.0m	0.326	0.092	1.040	0.331	0.136	0.899
4.0~10.0m	0.158	0.099	0.980	0.536	0.160	0.600
10.0~14.0m	0.002	0.090	0.590	0.407	0.174	0.711
평 균	0.162	0.094	0.870	0.425	0.157	0.737

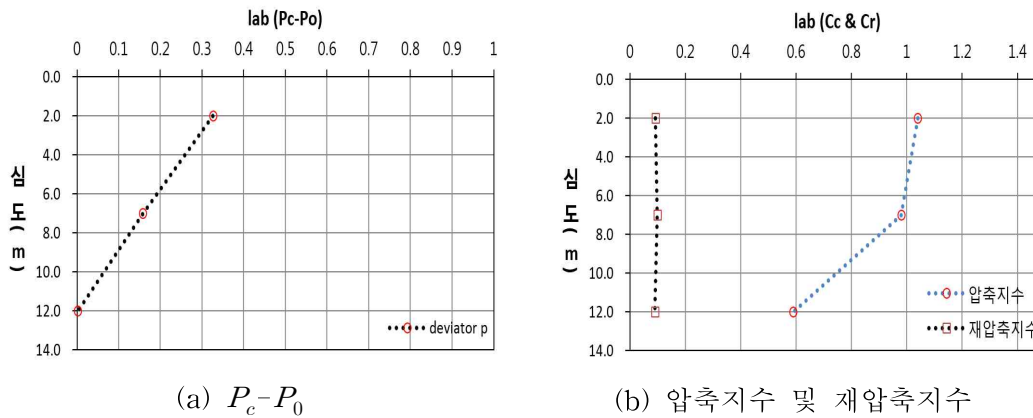


그림 3.26 P-1 지점의 실내시험결과 토질정수

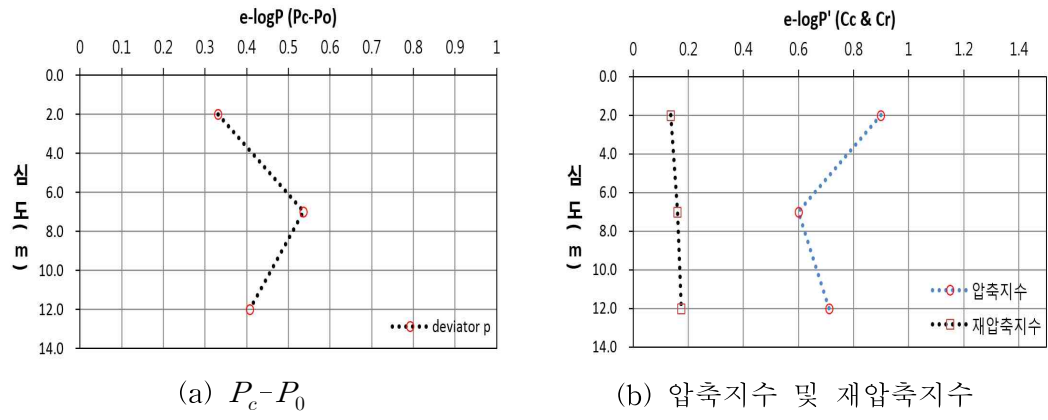


그림 3.27 P-1 지점의 현장계측결과 토질정수

계측자료와 실내시험자료를 이용하여 최종침하량을 산출하였다. 본 지점의 과잉간극 수압은 PP1은 0.037kg/cm<sup>2</sup>, PP2는 0.039kg/cm<sup>2</sup>, PP3은 0.001kgf/cm<sup>2</sup> 잔류되어 있으며, 쌍곡법의 예상침하량과 거의 비슷한 값을 보인다.

실내시험에 의한 예상침하량은 토질을 선행압밀하중을 적용하지 않는 정규압밀상태와 선행압밀하중을 포함하여 산출하는 과압밀 상태로 구분하여 검토하였다. 검토결과 정규압밀로 계산 시 침하량이 과도하게 산출되었다.

표 3.16은 P-1 지점의 침하량 분석을 나타낸 것이다.

표 3.16 P-1 지점의 침하량 분석결과

구 분	계측된 침하량	최종 침하량 분석		실내시험	
		쌍곡선법	$e - \log P'$	정규압밀	과압밀
0.0~4.0m	82.6	86.6	84.0	166.7	84.0
4.0~10.0m	57.0	62.4	58.0	143.5	121.9
10.0~14.0m	50.3	53.5	50.0	53.2	51.4
합 계	189.9	202.5	192.0	363.4	257.3

$e - \log P'$  곡선에서 산출한 최종 평가 침하곡선을 그림 3.28에 도시하였다. 설계기준의 침하량은 363.4cm로 과하게 침하게 발생된다고 하였으나 현장에서 실제계측된 침

하량과 쌍곡선법과의 비교내용을 비교하였을 때 실제 침하량은 192cm라는 값이 나온다. 쌍곡선법의 경우 간극수압에 대한 소산정도를 읽을 수 없기 때문에  $e-\log P'$  곡선법을 통해 나온 값이 보다 정확한 값이 된다.

그림 3.28은 심도별 층별침하량 및 예상 침하량을 나타내 것이다.

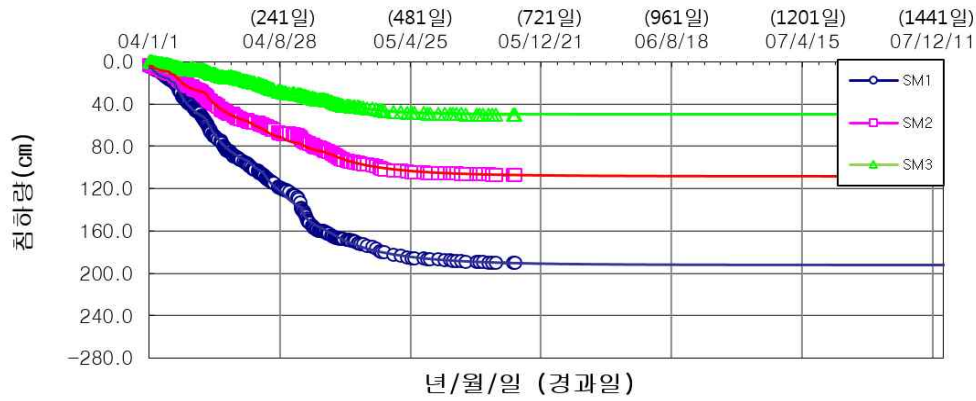


그림 3.28 P-1 지점의 심도별 층별침하량 및 예상 침하량

### 3.4 P-2 지점 계측기 결과 및 성과분석

#### 3.4.1 P-2 지점의 계측기 매설위치

P-2 지점의 매설위치는 OO지구 신도시 개발사업지구내 3-1공구 대로1-1 sta.103 위치한다.

그림 3.29는 개발사업지구내 P-2의 공구위치를 나타낸 것입니다.

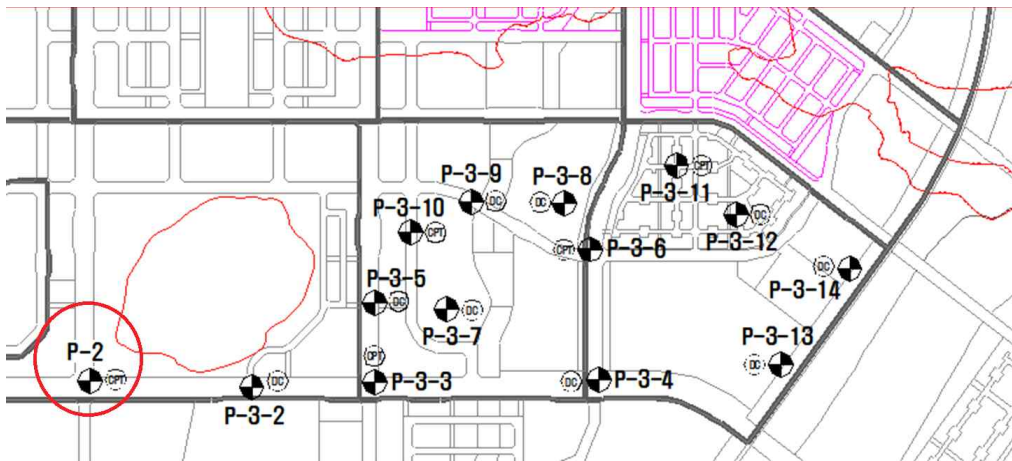


그림 3.29 OO사업지구내 P-2 지점 위치

#### 3.4.2 P-2 지점의 지층구성

매립층, 점성토층, 모래자갈층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있다. 매립층은 쇄석으로 구성되어 있으며, 연약지반 처리를 위한 상부배수층으로 약0.5m의 두께를 가지고 있으며 색조는 회갈색이다.

표토층 하부에 존재하는 점성토층은 15.7m의 두께를 가지고 있으며 실트질 점성토층(CL)으로 구성되어 있다. 연경도는 매우 연약하고 N값은 0~1로 매우 낮은값을 보이고 있으며 다량의 침하량이 발생하는 지층이다.

퇴적층하부는 점성토질실트로 구성되어있고 두께는 약 3.3m, 매우단단함 지층으로

색상은 암갈색 N값은 21/30~35/30이다.

표 3.17은 P-2 지점의 대상지점 그림 3.30은 P-2 지점의 주상도를 나타낸 것이다.

표 3.17 P-2 대상지점 지층구성

분포심도 GL(-), (m)	분포표고 EL(+), (m)	두께 (m)	지층상태			N치
			연경/조밀도	색깔	구성토질	
0.0	-0.3	0.5	-	갈색	쇄석, 배수층(GP)	-
0.5	-0.8	15.7	매우연약	암회색	실트질 점성토(CL)	0/30~22/30
16.2	-16.5	3.3	대단히조밀	암갈색	점성토질 실트(ML)	21/30~35/30

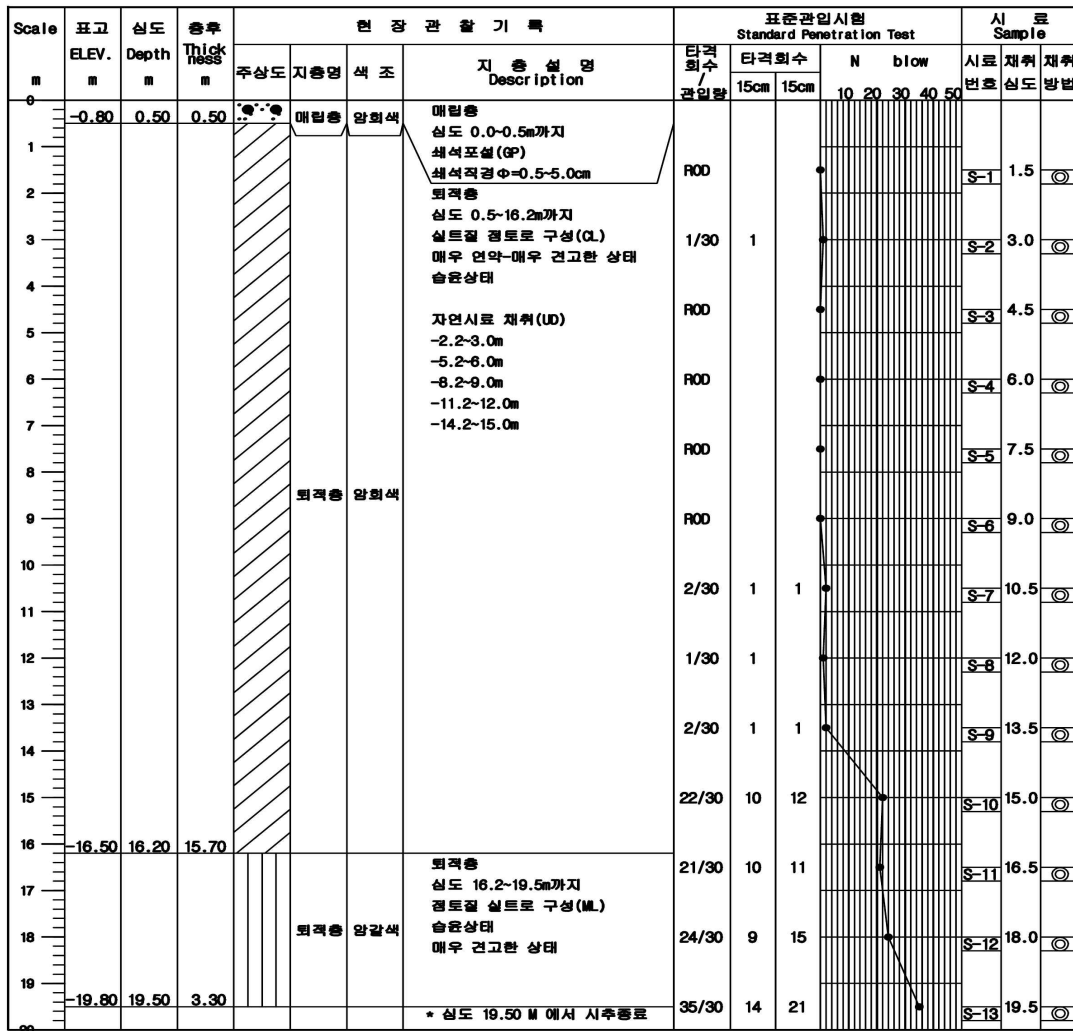


그림 3.30 P-2 지점의 시추주상도

### 3.4.3 P-2 지점의 토질특성

연구대상 지점에 대한 토질특성을 정리하면 표 3.12와 같다.

점성토 지반의 함수비( $W_N$ , %)는 31.7~77.8%로 평균 52.7%의 고함수비 점성토이다. 액성한계(LL, %)는 29.2~44.1%로 평균 36.9%이다. 보통 액성한계가 50% 미만 시 저압축성이라 칭하는데 연구대상 지점의 점성토는 저압축성의 점성토로 구성되어 있다. 점성토 지반의 비배수전단강도( $c$ )는 0.078~0.29kgf/cm<sup>2</sup>로 평균 0.19kgf/cm<sup>2</sup>의 연약점성토이다. 압축지수( $C_c$ )는 0.38~0.78로 평균 0.52의 보통의 압축성 점성토이다.

표 3.18은 P-2 지점의 토질특성을 나타낸 것이다.

표 3.18 P-2 지점의 토질특성

Depth (m)	$W_N$ (%)	$G_s$	LL	PI	UU	Consolidation Test			USCS
					$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$P_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$C_c$	$e_0$	
2.2~3.0	56.63	2.69	41.86	18.65	0.078	0.75	0.523	1.711	CL
5.2~6.0	77.86	2.700	44.15	22.33	0.125	0.89	0.780	1.973	CL
8.2~9.0	50.87	2.69	35.78	14.81	0.175	0.77	0.438	1.584	CL
11.2~12.0	46.51	2.70	33.48	14.38	0.275	0.79	0.387	1.371	CL
14.2~15.0	31.77	2.70	29.24	13.75	0.290	1.05	0.464	0.982	CL
평균	52.70	2.696	36.90	16.80	0.190	0.85	0.520	1.520	

### 3.4.4 P-2 지점의 계층현황 및 분석

#### (1) 계층현황

점성토 지반의 심도가 19.0m인 대상지점의 연약지반개량을 위해 경제성 및 시공성을 고려하여 P.B.D 공법을 채택하였다. 배수재 직경 0.05m, 스미어 효과로 인한 투수계수 감소는  $\eta$ 는 5.0, 스미어 효과 영향원은  $0.16 \times 2.5 = 0.4m$ 로 가정하여 검토된 연직 배수재의 간격은 1.0m×1.0m 심도 19.0m 타입으로 시공하였다.

본 단지의 최초 성토는 2004년 10월 15일 높이 0.94m 실시하였으며 2004년 12월 30일에 1.78m, 2005년 3월 25일에 2.36m, 2005년 4월 15일에 4.93m, 2005년 5월 4일에 7.16m를 최종성토 시공 완료하였으며, 약 12개월 압밀침하 종료 후 5.17m로 절취하였



다.

침하특성을 파악하기 위한 계측기기로써 지중침하계를 매설하였다. 지중침하계는 먼저 지지층인 모래자갈층까지 19.0m를 천공하고 고정소자인 RM(Ring Magnetic Sensor)을 설치하였다. 침하측정소자인 SM(Spider Magnetic Sensor)를 총19.0m인 연약지반을 4.0~5.0m간격으로 나누어 설치하였다.

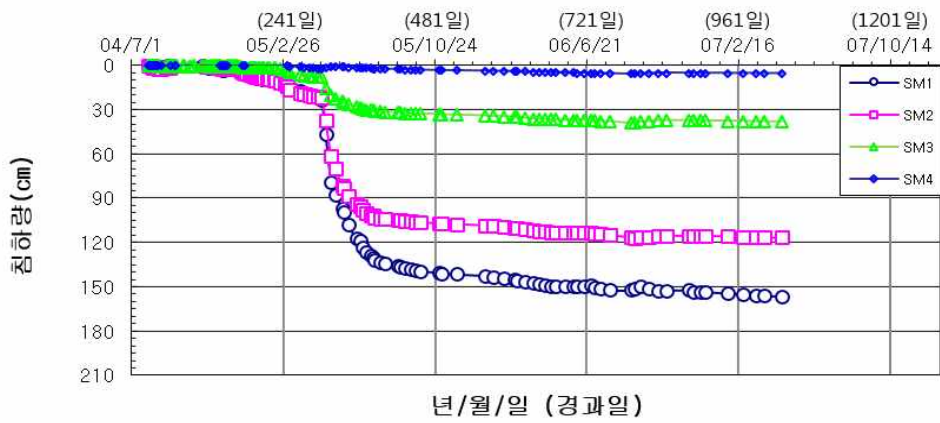
연약층 최상부인 0.0~4.0m층의 침하거동 측정을 위해 SM1을 설치하였고 침하량은 156.3cm발생하였다. 그 하부 연약층인 4.0~10.0m두께의 침하거동 측정을 위해 SM2를 설치하였으며 침하량은 116.7cm발생하였다. 연약층 10.0~16.0m 침하 측정을 위해 SM3을 설치하였으며 침하량은 38.4cm발생하였다. 연약층 16.0~19.0m침하 측정을 위해 SM4을 설치하였으며 침하량은 5.6cm 발생하였다.

간극수압계는 진동현 방식으로써 연약지반의 압밀특성을 파악하기 위하여 매설하였다. 먼저 PP1은 심도 1.5m에 매설하여 SM1~SM2사이에 0.0~4.0m층의 침하 및 변형 시 간극수압 변화를 측정할 수 있도록 하였으며 최대  $8.40\text{t/m}^2$ 이 발생하였다. PP2는 심도 6.5m에 매설하여 SM2~SM3의 4.0~10.0m층의 침하 및 변형 시 간극수압의 변화를 측정할 수 있도록 하였으며 최대  $7.48\text{t/m}^2$ 이 발생하였다. PP3는 심도 13.5m에 매설하여 SM3~SM4의 10.0~16.0m층의 간극수압의 변화를 측정하여 분석할 수 있도록 하였으며 최대  $6.36\text{t/m}^2$ 이 발생하였다.

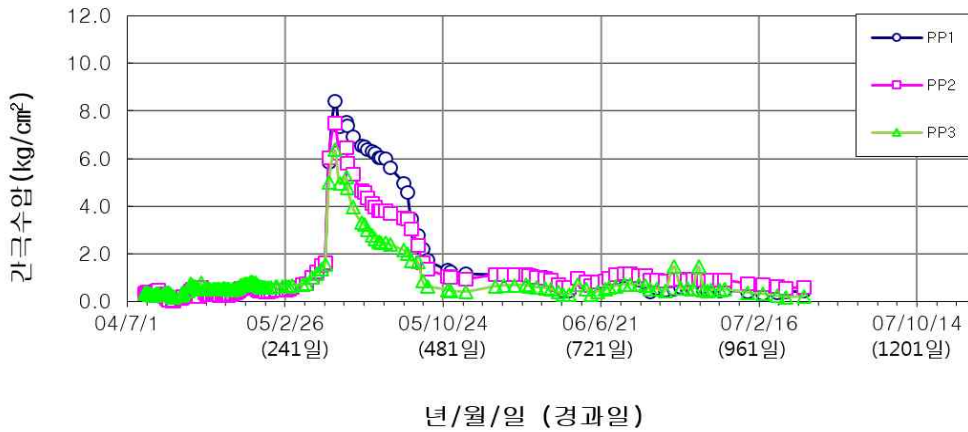
그림 3.31은 P-2 지점의 침하 및 간극수압 발생현황을 나타낸 것이다.



(a) 성토현황도



(b) 층별 침하현황도



(c) 간극수압현황도

그림 3.31 P-2 지점의 침하 및 간극수압 발생현황

(2) 0.0~4.0m 점성토층 계층분석

상부점성토 지반은 심도 0.0~4.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 1.5m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 4.0m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.19는 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

표 3.19 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/04/15	4.93	0.0~0.585
05/05/14	7.16	0.840
05/11/04	5.17	0.125
06/05/30	7.16	0.790
07/04/25	7.16	0.350

성토과정 중에서는 간극수압은 0.0~0.753kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토와 동시에 간극수압이 증가하는 경향을 보인다. 최종 7.16m에서 최대간극수압 0.84 을 보이고 이후 추가성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.32는 상부점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.

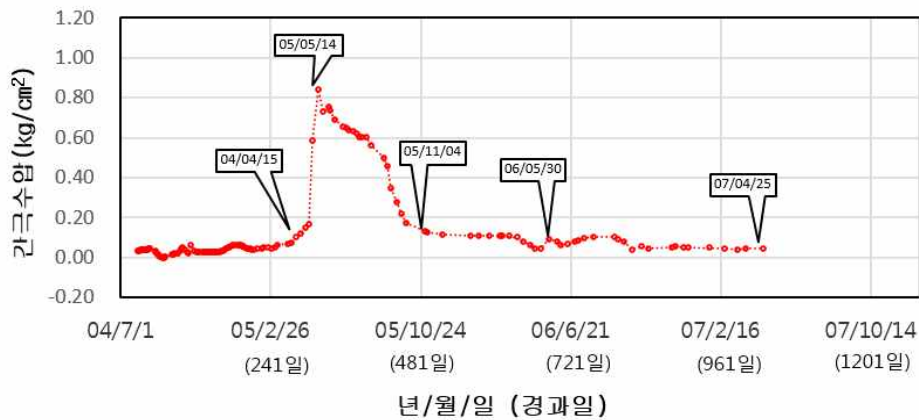


그림 3.32 P-2, 0.0~4.0m 점성토층 간극수압현황

상부점성토 지반은 심도 0.0~4.0m의 지반으로 구분하였다. 상부점성토층을 구분한 이유는 지표면에 근접되어 있어 표면건조 영향을 받으며 지반 내 지중응력이 작고 성토에 의한 재하중의 영향을 직접받기 때문에 압밀침하가 가장 많이 발생하기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM1-SM2으로 구할 수 있으며, SM1은 156.3cm, SM2는 116.7cm 이므로 상부 점성토층의 침하량은 39.6cm이다.

그림 3.33은 점성토층의 침하현황을 그림 3.34는 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.

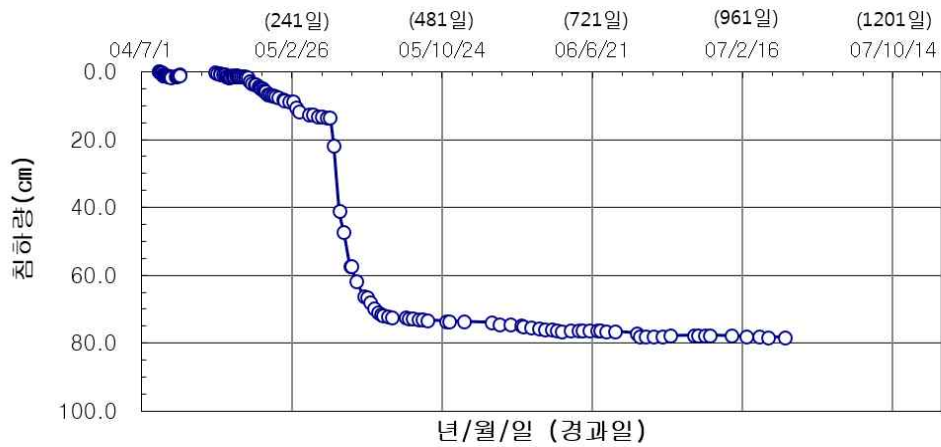


그림 3.33 P-2, 0.0~4.0m 점성토층 침하현황

상부점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 상부점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.89에서 1.599로 감소하였다.

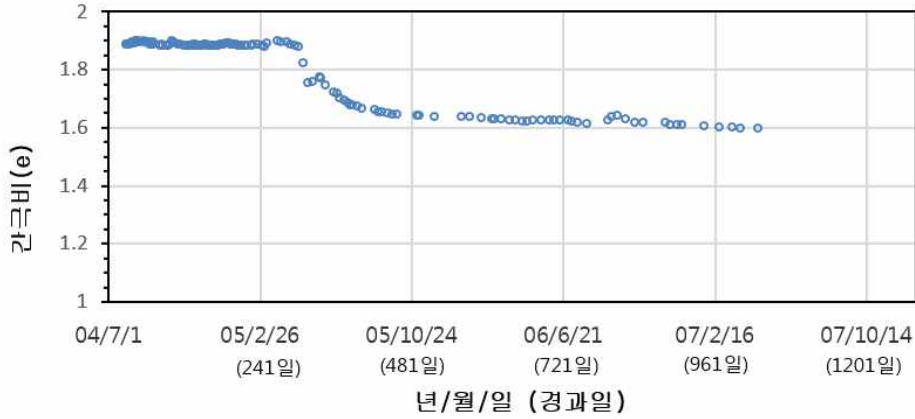


그림 3.34 P-2, 0.0~4.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.35는 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

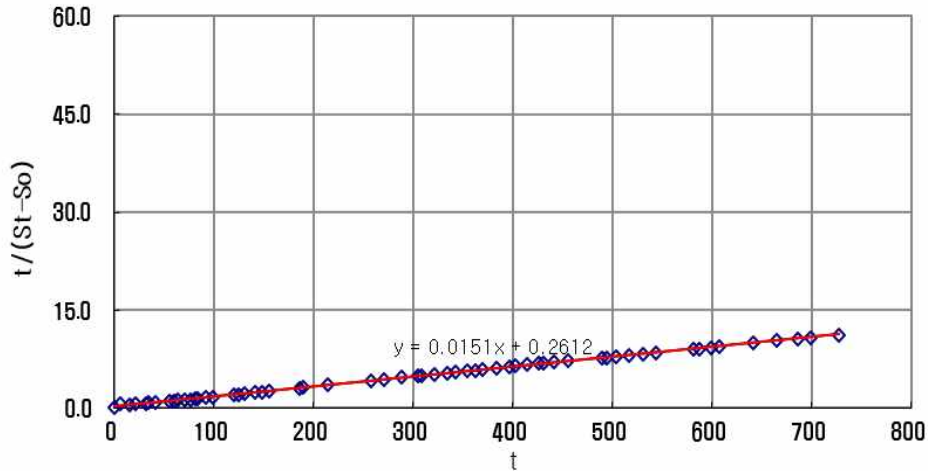


그림 3.35 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $S_0 = 1.5\text{cm}$ ,  $\beta = 0.026$ ,  $\alpha = 1.005$ ,  $1/\beta = 38.46\text{cm}$  로써 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 40.0\text{cm}$ 이다.

그림 3.36은 실내시험의  $e - \log P$  곡선, 그림 3.37은 간극수압계 및 침하계의  $e - \log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.37과 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검

토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 0.119$ )에서 B( $P_c = 0.896$ )으로 경로이동하며 B점( $P_c = 0.896$ )에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 0.896이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.017이다.

B점( $P_y = 0.896$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 C( $P_p = 1.34$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다. C( $P_p = 1.34$ )점에서 D( $P_f = 1.143$ )점까지 일정한 기울기를 가진 처녀압축선을 따르므로 이때의 압축지수는 1.435이다. 이 처녀압축선을 따라 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종 성토에 의한 간극비( $e_f = 1.558$ ) 이며 침하량은  $S = 43\text{cm}$ 이다.

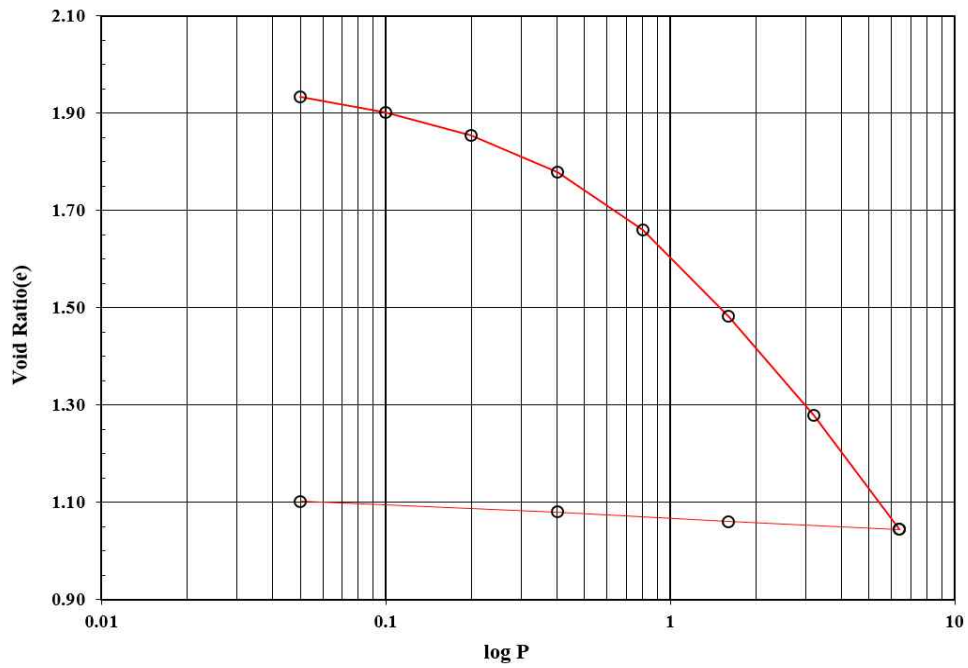


그림 3.36 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

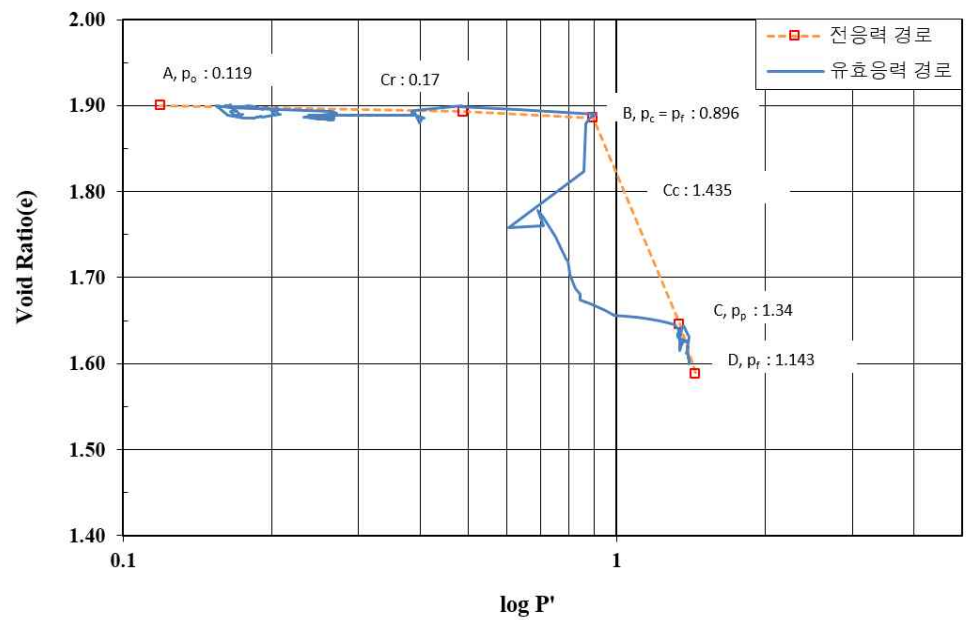


그림 3.37 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 39.6cm, 장기침하량은 43.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $3.5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.20은 0.0~4.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.20 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.154	0.119
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.890	0.896
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.736	0.777
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	0.896
압 축 지 수 $C_c$	0.890	1.435
재압축지수 $C_r$	0.130	0.017

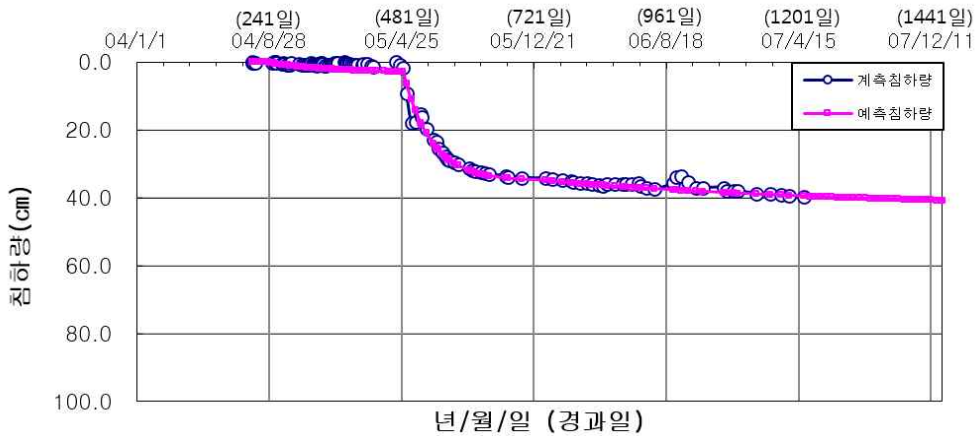


그림 3.38 P-2, 0.0~4.0m 점성토층의 최종침하량 평가

(3) 4.0~10.0m 점성토층 계측분석

중간점성토 지반은 심도 4.0~10.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 6.5m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 6.5m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수



압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수채를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.21은 4.0~10.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

표 3.21 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/04/15	4.93	0.0~0.164
05/05/14	7.16	0.748
05/11/04	5.17	0.099
06/05/30	7.16	0.089
07/04/25	7.16	0.087

성토과정 중에서는 간극수압은 0.0~0.164kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토와 동시에 간극수압이 증가하는 경향을 보인다. 최종 7.16m에서 최대간극수압 0.748을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.39는 중간점성토층의 간극수압 현황을 나타낸 것이다.

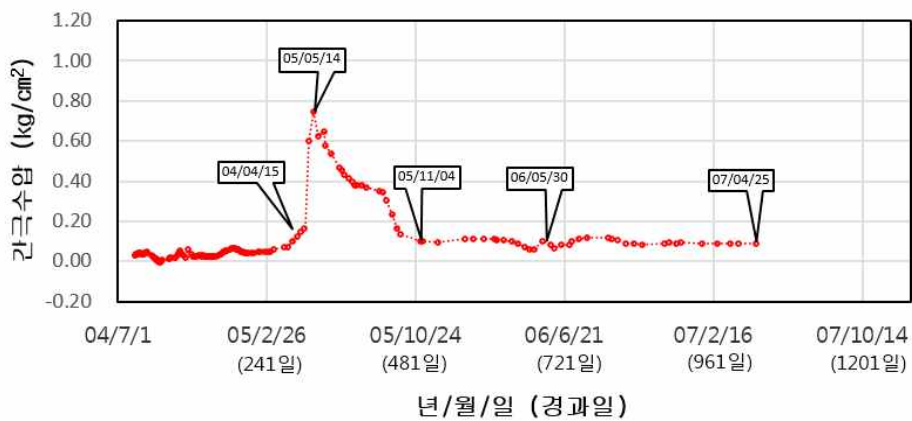
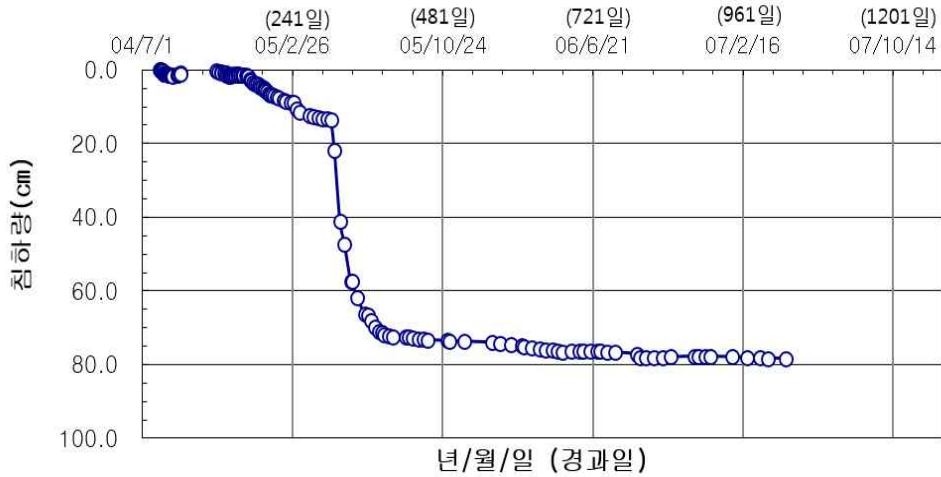


그림 3.39 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압현황

중간점성토 지반은 심도 4.0~10.0m의 지반으로 구분하였다. 중간점성토층을 구분한 이유는 지표면에서 4.0m이상 심도로 이격되어 표면건조 영향을 받지 않으며 지반 내 지중응력이 커지면서 성토에 의한 재하중의 영향을 간접적으로 받기 때문이다. 또한, 압밀침하도 상부 점성토층에 비해 적게 발생하였기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM2-SM3으로 구할 수 있으며, SM2는 116.7cm, SM3은 38.3cm 이므로 중간 점성토층의 침하량은 78.3cm이다.

그림 3.40은 중간점성토층의 침하현황을 그림 3.41은 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.



**그림 3.40 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 침하현황**

중간점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 중간점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.725에서 1.367로 감소하였다.

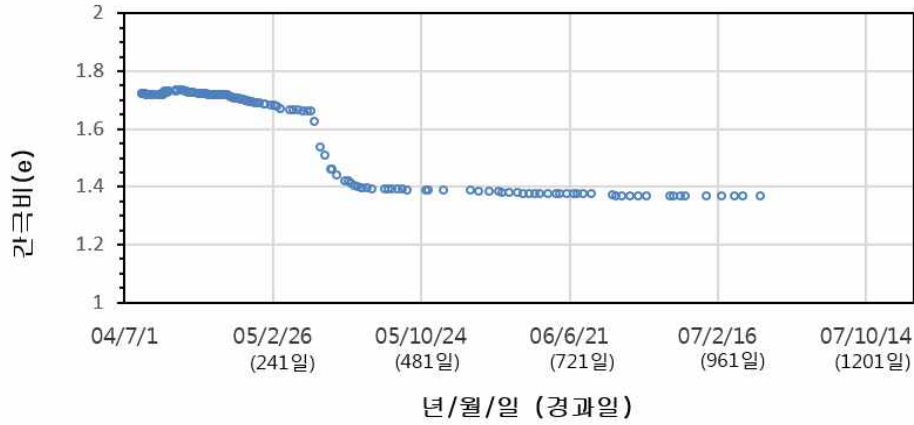


그림 3.41 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 간극비 변화현황

그림 3.42은 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

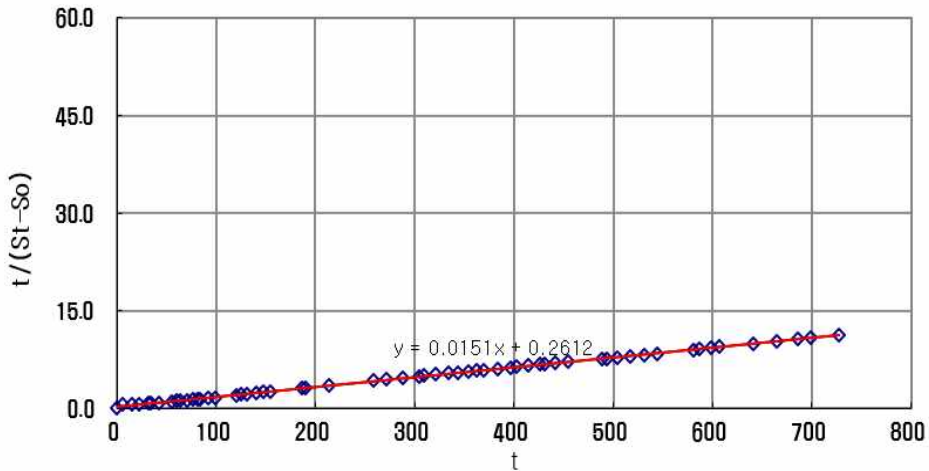


그림 3.42 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $S_0 = 13.5\text{cm}$ ,  $\beta = 0.015$ ,  $\alpha = 0.261$ ,  $1/\beta = 66.67\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 80.2\text{cm}$ 이다.

그림 3.43은 실내시험의  $e - \log P$  곡선, 그림 3.44는 간극수압계 및 침하계의  $e - \log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.44와 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검

토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 0.416$ )에서 B( $P_c = 1.156$ )으로 경로이동하며 B점( $P_c = 1.156$ )에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 1.156이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.225이다.

B점( $P_y = 1.156$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 C( $P_p = 1.637$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다. C( $P_p = 1.637$ )점에서 D( $P_f = 1.74$ )점까지 일정한 기울기를 가진 처녀압축선을 따르므로 이때의 압축지수는 1.587이다. 이 처녀압축선을 따라 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종 성토에 의한 간극비( $e_f = 1.348$ ) 이며 침하량은  $S = 84\text{cm}$ 이다.

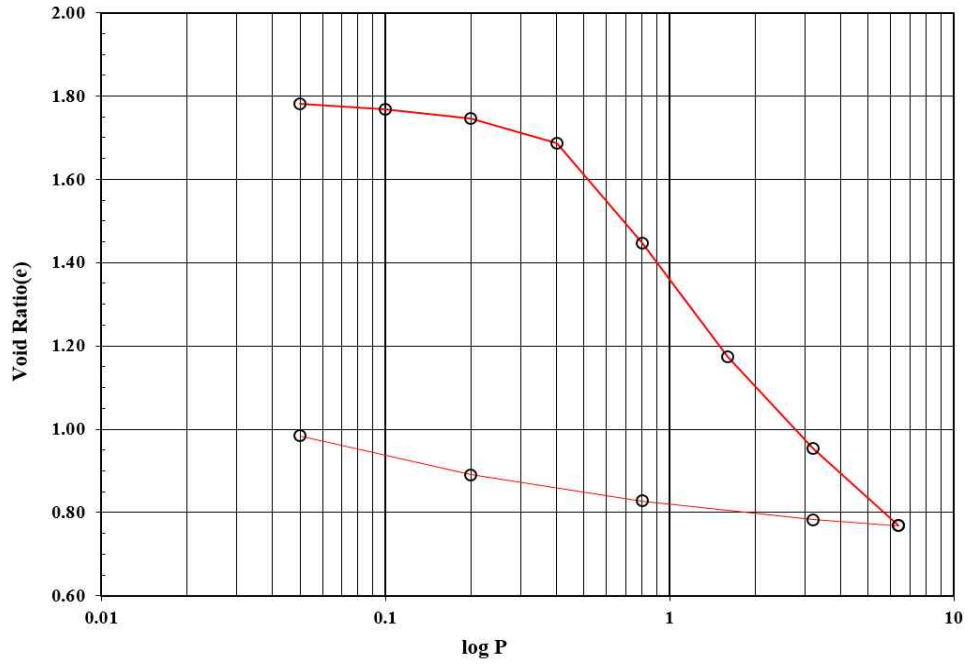


그림 3.43 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

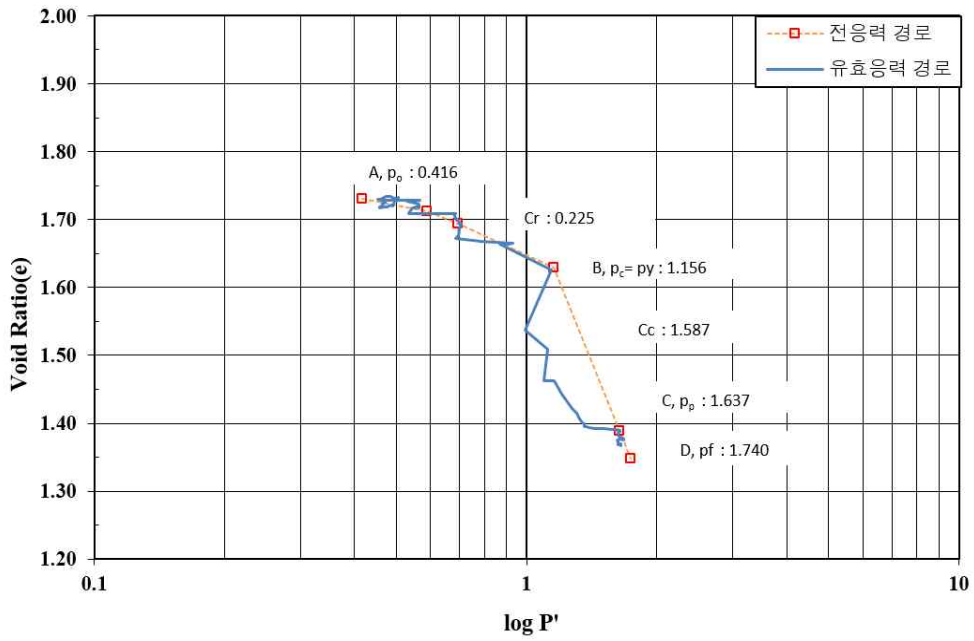


그림 3.44 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 78.3cm, 장기침하량은 84.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $3.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.22는 4.0~10.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.22 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.390	0.416
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.392	1.156
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.002	0.740
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	1.156
압 축 지 수 $C_c$	0.760	1.587
재압축지수 $C_r$	0.060	0.225

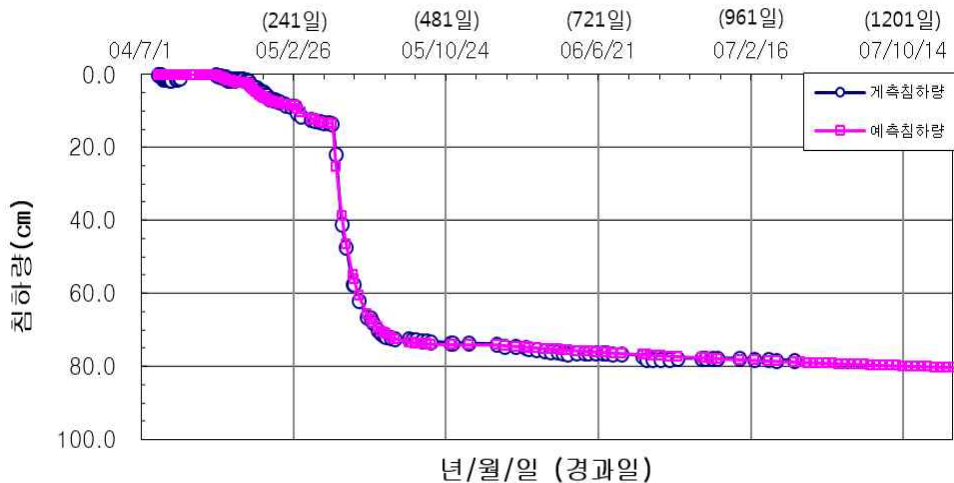


그림 3.45 P-2, 4.0~10.0m 점성토층의 최종침하량 평가

(4) 10.0~16.0m점성토층 계측분석

하부점성토 지반은 심도 10.0~16.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도

13.5m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 13.5m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.23은 10.0~16.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

표 3.23 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/04/15	4.930	0.0~0.155
05/05/14	7.160	0.636
05/11/04	5.170	0.045
06/05/30	7.160	0.044
07/04/25	7.160	0.040

성토과정 중에서는 간극수압은 0.0~0.155kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토와 동시에 간극수압이 증가하는 경향을 보인다. 최종 7.16m에서 최대간극수압 0.636을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.46은 하부점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.

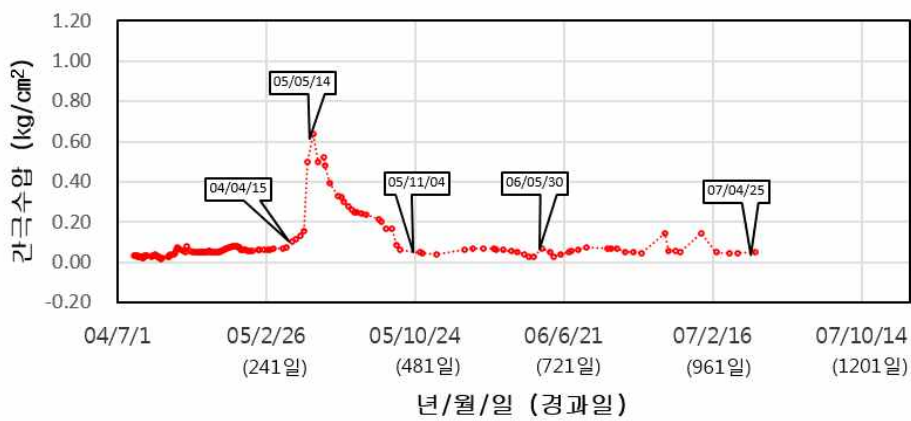


그림 3.46 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 간극수압현황

하부점성토 지반은 심도 10.0~16.0m의 지반으로 구분하였다. 하부점성토층을 구분한 이유는 지표면에서 10.0m이상 심도로 이격되어 성토에 의한 재하중의 영향을 간접적으로 받기 때문이다. 또한, 압밀침하도 상부나 중간 점성토층에 비해 적게 발생하였기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM3-SM4으로 구할 수 있으며, SM3은 38.4cm, SM4는 5.6cm 이므로 하부 점성토층의 침하량은 32.8cm이다.

그림 3.47은 하부점성토층의 침하현황을 그림 3.48은 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.

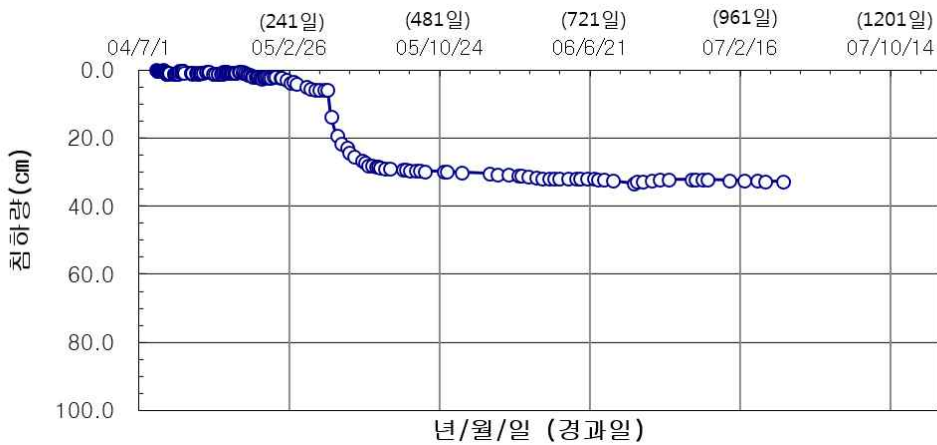


그림 3.47 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 침하현황

중간점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 중간점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.255에서 1.125로 감소하였다.



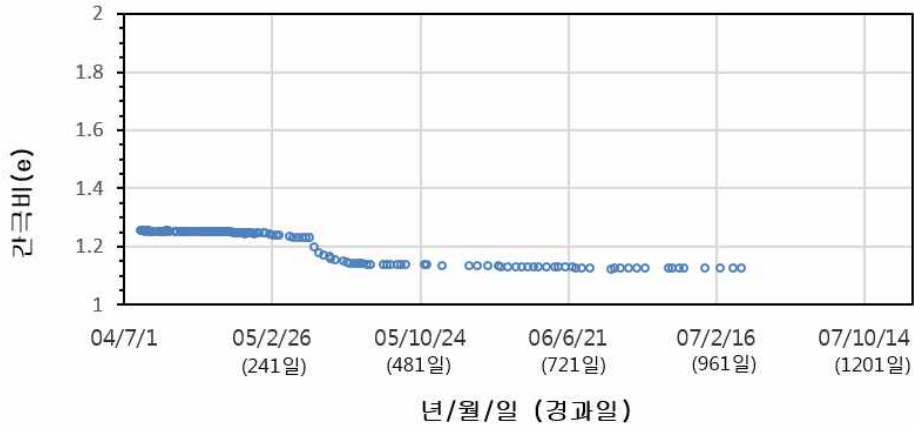


그림 3.48 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 간극비 변화현황

그림 3.49는 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

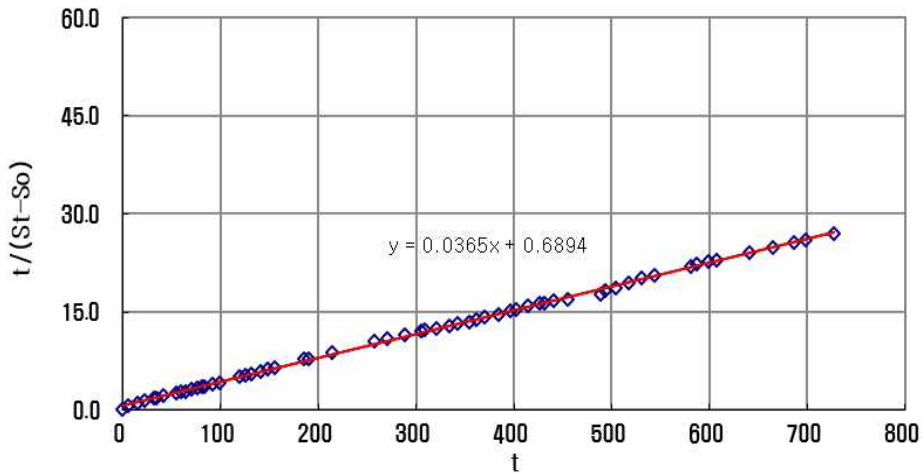


그림 3.49 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $S_0 = 5.8\text{cm}$ ,  $\beta = 0.036$ ,  $\alpha = 0.689$ ,  $1/\beta = 27.78\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 33.6\text{cm}$ 이다.

그림 3.50은 실내시험의  $e - \log P$  곡선, 그림 3.51은 간극수압계 및 침하계의  $e - \log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.51과 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검

토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 0.772$ )에서 B( $P_c = 1.013$ )으로 경로이동하며 B점( $P_c = 1.013$ )에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 1.013이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.064이다.

B점( $P_c$ )에서 C점( $P_y$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.393$ )이다.

C점( $P_y = 1.105$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 D( $P_p = 1.512$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다. D( $P_p = 1.512$ )점에서 E( $P_f : 2.093$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따르며 최종간극비와 최종 침하량을 평가 가능하며 최종성토에 의한 간극비( $e_f = 1.123$ )이며 침하량은  $S = 35\text{cm}$ 이다.

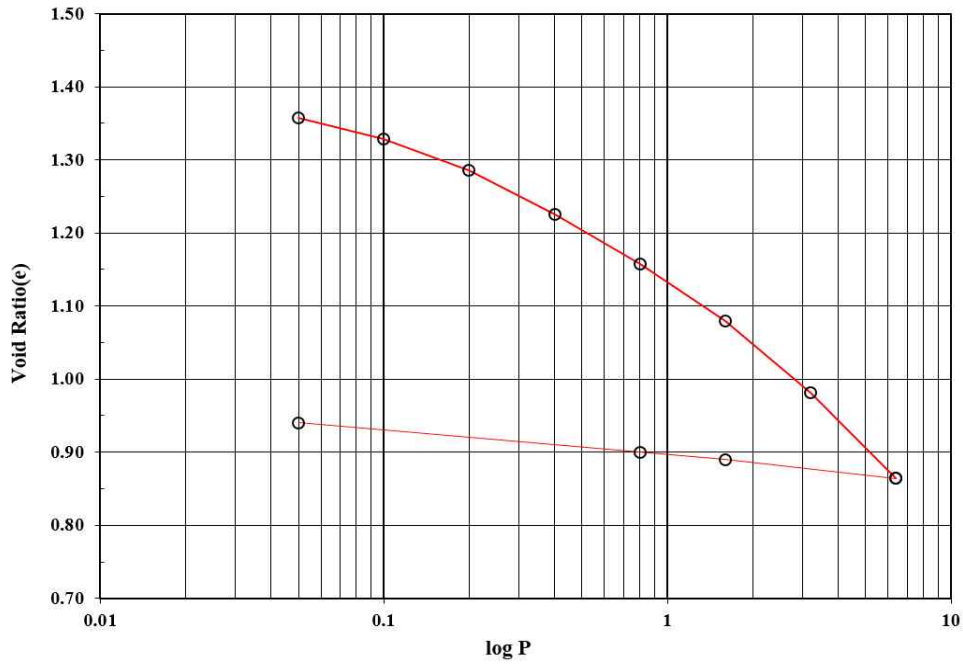


그림 3.50 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

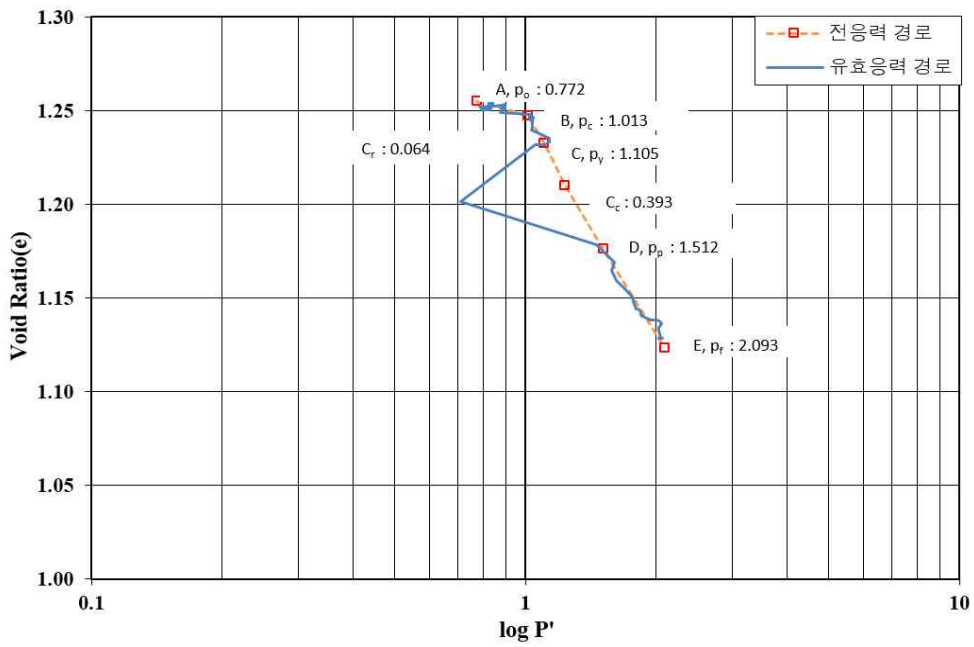


그림 3.51 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 32.8cm, 장기침하량은 35cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $4.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.24는 10.0~16.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.24 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.748	0.772
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.790	1.013
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.042	0.241
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	1.105
압 축 지 수 $C_c$	0.464	0.393
재압축지수 $C_r$	0.120	0.064

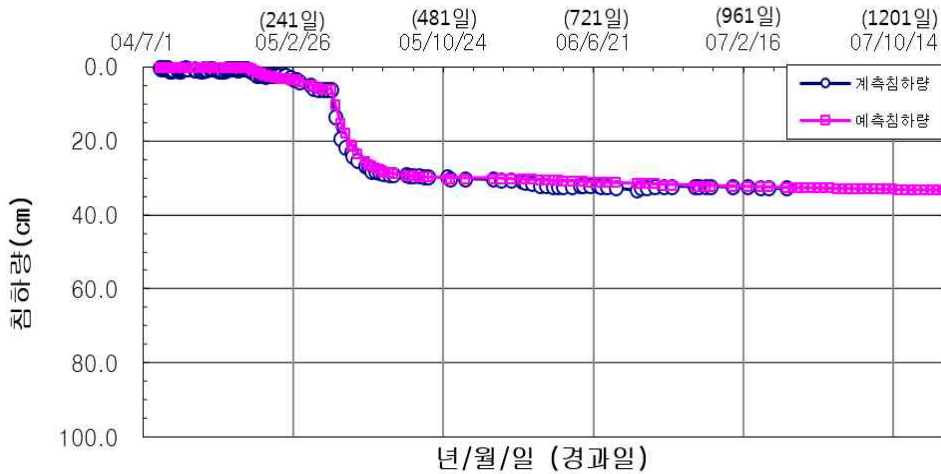


그림 3.52 P-2, 10.0~16.0m 점성토층의 최종침하량 평가

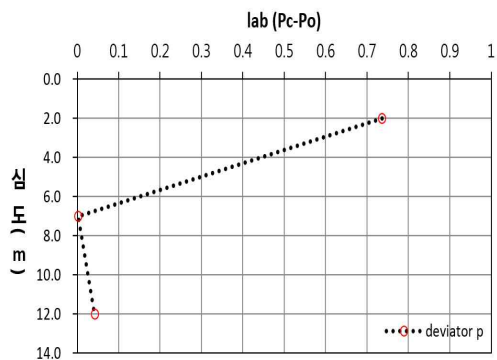
(5) P-2 지점 계측분석

실내시험자료에서 구한 토질정수와 현장계측자료의  $e-\log P'$  곡선을 이용한 토질정수를 표 3.19에 표기하였다. 표준압밀자료와  $e-\log P'$  곡선의 압축지수와 재압축지수는 모두 거의 유사한 양상을 보이나, 선행압밀하중과 지중응력의 차는 표준압밀시험에서 심도가 깊어질수록 감소하여 12.0m 이하에서는 거의 0이 된다.

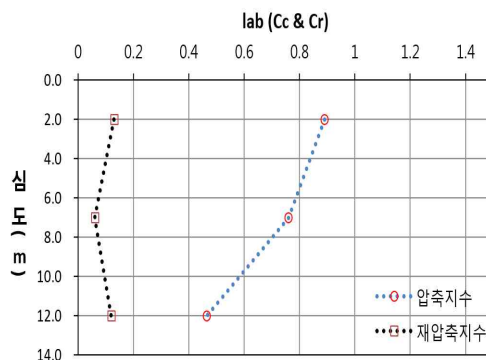
표 3.25는 P-2지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수 비교를, 그림 3.53은 실내시험결과 토질정수를, 그림 3.54는 현장계측결과 토질정수를 나타낸 것이다.

표 3.25 P-2 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수 비교

구 분	실내시험			$e-\log P'$		
	응력차 ( $P_c - P_0$ )	재압축지수 ( $C_r$ )	압축지수 ( $C_c$ )	응력차 ( $P_c - P_0$ )	재압축지수 ( $C_r$ )	압축지수 ( $C_c$ )
0.0~4.0m	0.736	0.130	0.890	0.777	0.017	1.435
4.0~10.0m	0.002	0.060	0.760	0.740	0.225	1.587
10.0~14.0m	0.042	0.120	0.464	0.241	0.064	0.393
평 균	0.260	0.103	0.705	0.586	0.102	1.138

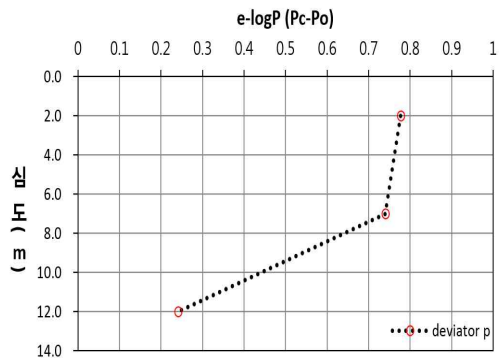


(a)  $P_c - P_0$

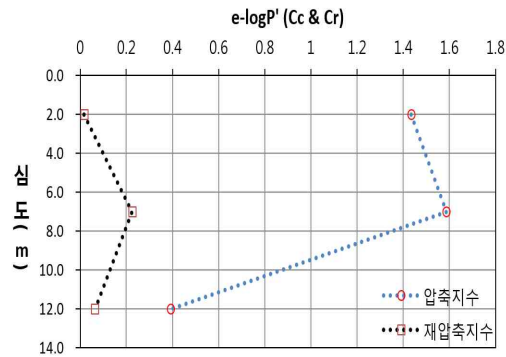


(b) 압축지수 및 재압축지수

그림 3.53 P-2 지점의 실내시험결과 토질정수



(a)  $P_c - P_0$



(b) 압축지수 및 재압축지수

그림 3.54 P-2 지점의 현장계측결과 토질정수

계측자료와 실내시험자료를 이용하여 최종침하량을 산출하였다. 본 지점의 과잉간극수압은 PP1은  $0.042\text{kgf/cm}^2$ , PP2는  $0.058\text{kgf/cm}^2$ , PP3은  $0.02\text{kgf/cm}^2$  잔류되어 있으며, 쌍곡법의 예상침하량과 거의 비슷한 값을 보인다. 실내시험에 의한 예상침하량은 토질을 선행압밀하중을 적용하지 않는 정규압밀상태와 선행압밀하중을 포함하여 산출하는 과압밀 상태로 구분하여 검토하였다. 검토 결과 정규압밀로 계산시 침하량이 과도하게 산출되었다.

표 3.26은 P-2 지점의 침하량 분석결과를, 그림 3.55는 P-2 지점의 심도별 층별침하량 및 예상침하량을 나타낸 것이다.

표 3.26 P-2 지점의 침하량 분석결과

구 분	계측된 침하량	최종 침하량 분석		실내시험	
		쌍곡선법	$e - \log P'$	정규압밀	과압밀
0.0~4.0m	39.6	40.0	43.0	129.9	40.8
4.0~10.0m	78.3	80.2	84.0	101.4	101.4
10.0~14.0m	32.8	33.6	35.0	50.8	50.0
합 계	150.7	153.8	162.0	282.1	192.2

$e-\log P'$  곡선에서 산출한 최종 평가 침하곡선을 그림 3.55에 도시하였다. 설계기준의 침하량은 282.1cm로 과하게 침하게 발생된다고 하였으나 현장에서 실제측된 침하량과 쌍곡선법과의 비교내용을 비교하였을 때 실제 침하량은 150.7cm라는 값이 나온다. 쌍곡선법의 기울기는 급하고  $e-\log P'$  곡선법은 완만하게 진행되기 때문에 최종 침하량이 다르게 측정된다. 쌍곡선법의 경우 기울기만 가지고 판단하지만  $e-\log P'$  곡선법의 경우 간극수압이 소산되는 과정을 측정해서 확정을 시킨 것이기 때문에 추가침하가 예측침하량보다 9cm 더 일어났다는 것을 확인할 수 있다.

그림 3.55은 심도별 층별침하량 및 예상 침하량을 나타내 것이다.

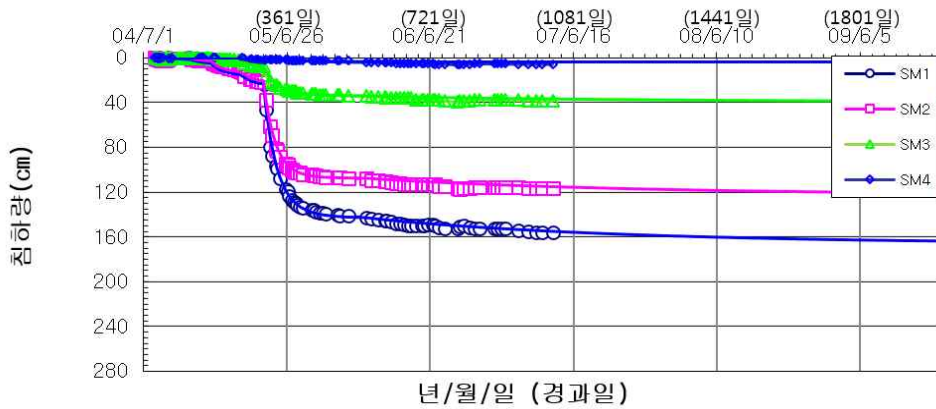


그림 3.55 P-2 지점의 심도별 층별침하량 및 예상 침하량

### 3.5 P-3 지점 계측기 결과 및 성과분석

#### 3.5.1 P-3 지점의 계측기 매설위치

P-3 지점의 매설위치는 OO지구 신도시 개발사업지구내 1공구 BL.205 위치한다. 그림 3.56은 개발사업지구내 P-3의 공구위치를 나타낸 것입니다.

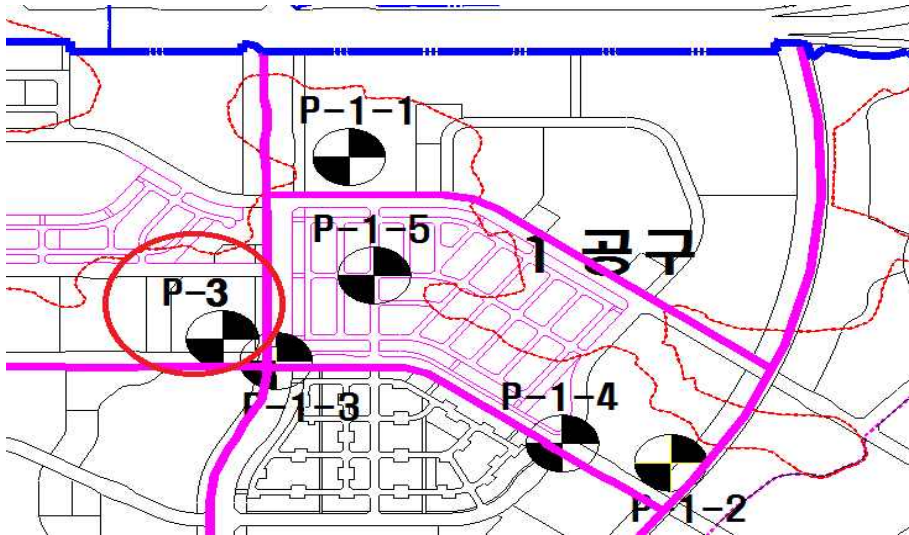


그림 3.56 OO사업지구내 P-3 지점 위치

#### 3.5.2 P-3 지점의 지층구성

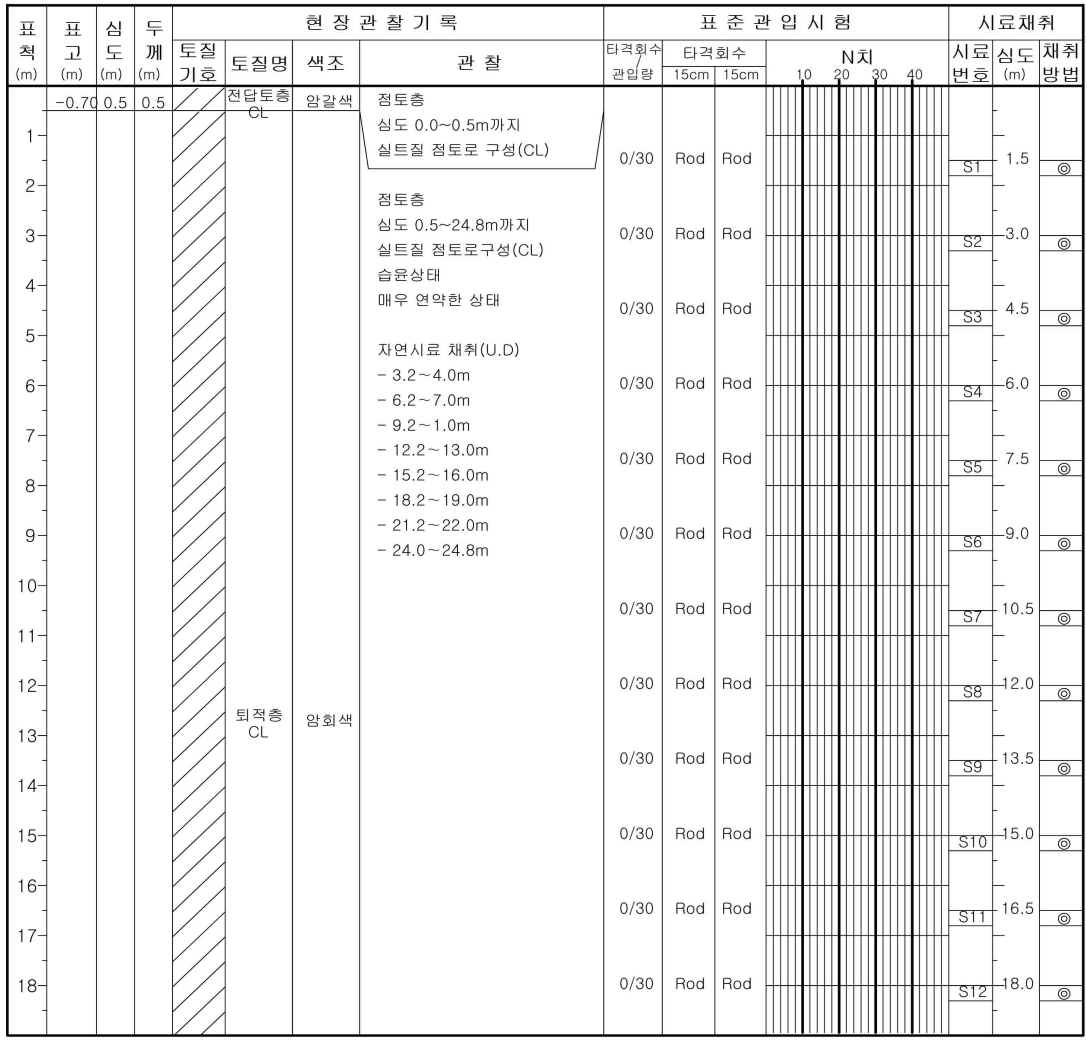
매립층, 점성토층, 풍화암층으로 구성되어 있다. 매립층은 쇄석으로 구성되어 있으며, 연약지반 처리를 위한 상부배수층으로 약 0.5m의 두께를 가지고 있으며 색조는 회갈색이다. 표토층 하부에 존재하는 점성토층은 24.3m의 두께를 가지고 있으며 실트질 점성토층(CH)으로 구성되어 있다. 연경도는 매우 연약하고 N값은 0~1로 매우 낮은 값을 보이며 다량의 침하량이 발생하는 지층이다. 퇴적층하부는 풍화암층으로 구성되었고 두께는 약 1.2m, 대단히 조밀한 지층으로 색상은 암갈색 N값은 50/7이다.



표 3.27은 P-3 지점의 지층구성을 그림 3.3은 P-3 지점의 주상도를 나타낸 것이다.

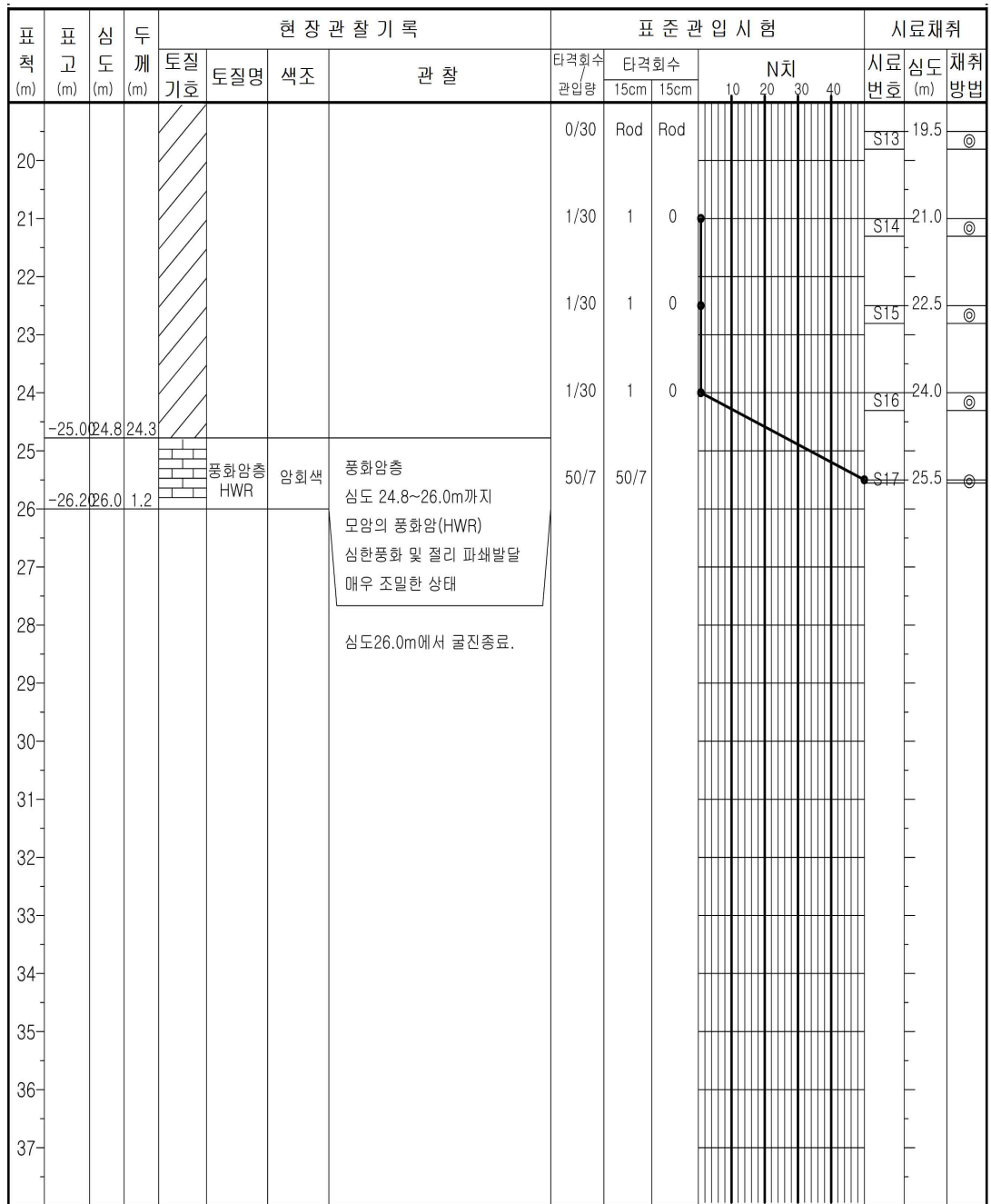
표 3.271 P-3 지점 지층구성

분포심도 GL(-), (m)	분포표고 EL(+), (m)	두께 (m)	지층상태			N치
			연경/조밀도	색깔	구성토질	
0.0	-0.2	0.5	-	갈색	쇄석, 배수층(GP)	-
24.3	-0.7	24.3	매우연약	암회색	실트질 점성토(CH)	0/30~1/30
25.5	-25.4	1.2	대단히조밀	암회색	풍화암	50/7



(a) P-3 (1/2)

그림 3.57 P-3 지점의 시추주상도(계속)



(a) P-3 (2/2)  
그림 3.57 P-3 지점의 시추주상도

### 3.5.3 P-3 지점의 토질특성

연구대상 지점에 대한 토질특성을 정리하면 표 3.22와 같다.

점성토 지반의 함수비( $W_N$ , %)는 62.3~75.3%로 평균 70.2%의 고함수비 점성토이다. 액성한계( $LL$ , %)는 71.1~82.7%로 평균 78.0%이다. 보통 액성한계가 50%가 초과 시 고압축성이라 칭하는데 연구대상 지점의 점성토는 고압축성의 실트 또는 점성토로 구성되어 있다. 점성토 지반의 비배수전단강도( $C$ )는 0.276~0.322kgf/cm<sup>2</sup>으로 연약점성토이다. 압축지수( $C_c$ )는 0.78~1.04 평균 0.930으로 매우 압축성이 큰 점성토이다.

표 3.28은 P-3 지점의 토질특성을 나타낸 것이다.

**표 3.28 P-3 지점의 토질특성**

Depth (m)	$W_N$ (%)	$G_s$	$LL$	$PI$	UU	Consolidation Test			USCS
					$C$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$P_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$C_c$	$e_0$	
3.2~4.0	66.3	2.673	73.9	43.5	0.354	0.46	0.74	1.772	CH
6.2~7.0	70.8	2.678	66.9	39.0	0.320	0.39	0.76	1.797	CH
9.2~10.0	54.1	2.676	66.4	40.2	0.315	0.78	0.57	1.435	CH
12.2~13.0	47.5	2.665	50.7	26.7	0.323	0.54	0.41	1.266	CH
15.2~16.0	55.5	2.683	66.2	41.2	0.334	0.84	0.64	1.455	CH
18.2~19.2	52.0	2.675	58.8	30.5	0.334	0.75	0.62	1.375	CH
21.2~22.0	54.1	2.665	43.7	23.0	0.260	0.39	0.48	1.259	CH
24.2~25.0	66.0	2.681	74.6	44.5	0.194	0.45	0.64	1.769	CH

### 3.5.4 P-3 지점의 계측현황 및 분석

#### (1) 계측현황

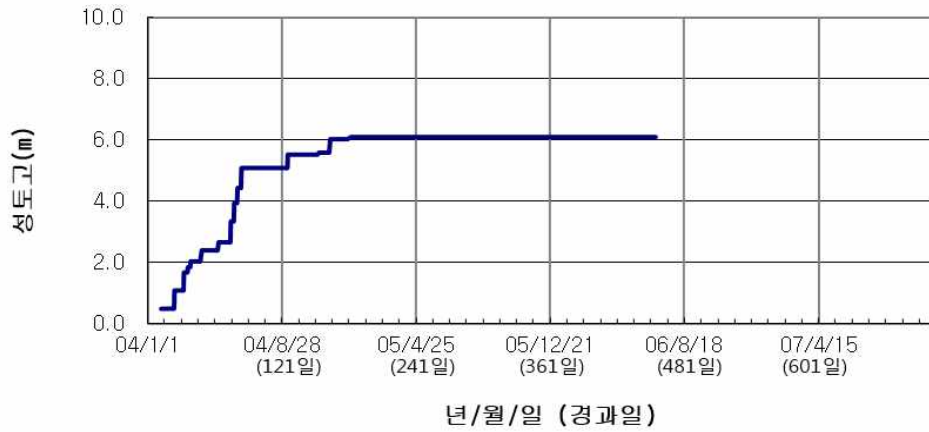
점성토 지반의 심도가 23.4m인 대상지점의 연약지반개량을 위해 경제성 및 시공성을 고려하여 P.B.D 공법을 채택하였다. 배수재 직경 0.05m, 스미어 효과로 인한 투수계수 감소는  $\eta$  은 5.0, 스미어 효과 영향원은  $0.16 \times 2.5 = 0.4\text{m}$ 로 가정하여 검토된 연직 배수재의 간격은  $1.4\text{m} \times 1.4\text{m}$  심도 23.4m 타입으로 시공하였다.

본 단지의 최초 성토는 2004년 1월 4일 높이 0.5m로 실시하였으며 2004년 4월 6일에 2.41m, 2004년 6월 9일에 4.45m, 2004년 11월 2일에 5.6m, 2006년 2월 27일에 6.48m를 최종 성토 시공 완료하였다.

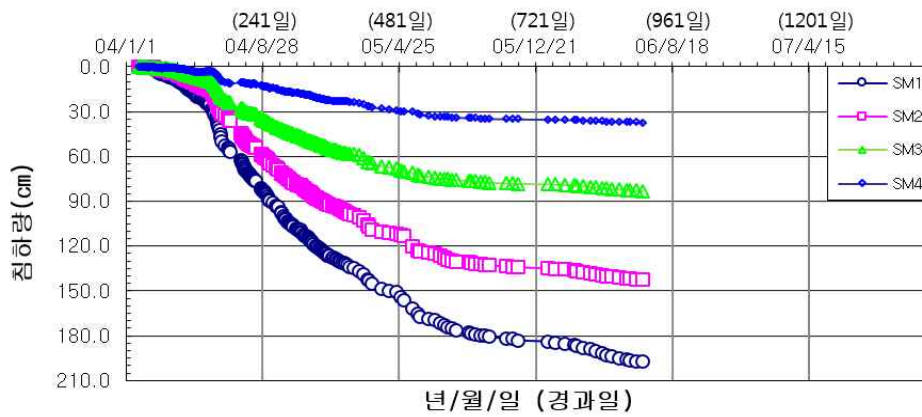
침하특성을 파악하기 위한 계측기로서 지중침하계를 매설하였다. 지중침하계는 먼저 지지층인 모래사갈층까지 23.4m를 천공하고 고정소자인 RM(Ring Magnetic Sensor)을 설치하였다. 침하측정소자인 SM(Spider Magnetic Sensor)를 총 19.0m인 연약지반을 4.0~5.0m 간격으로 나누어 설치하였다. 연약층 최상부인 0.0~4.0m층의 침하거동 측정을 위해 SM1을 설치하였고 침하량은 197.2cm 발생하였다. 연약층인 4.0~10.0m 두께의 침하거동 측정을 위해 SM2를 설치하였으며 침하량은 142.4cm 발생하였다. 연약층 10.0~15.0m 침하 측정을 위해 SM3을 설치하였으며 83.2cm 발생하였다. 연약층 15.0~23.4m 침하 측정을 위해 SM4를 설치하였으며 침하량은 37.3cm 발생하였다.

간극수압계는 진동현 방식으로써 연약지반의 압밀특성을 파악하기 위하여 매설하였다. 먼저 PP1은 심도 2.0m에 매설하여 SM1~SM2 사이에 0.0~4.0m층의 침하 및 변형 시 간극수압 변화를 측정할 수 있도록 하였으며 최대  $10.33\text{t/m}^2$ 이 발생하였다. PP2는 심도 7.0m에 매설하여 SM2~SM3의 4.0~10.0m층의 침하 및 변형 시 간극수압의 변화를 측정할 수 있도록 하였으며 최대  $10.0\text{t/m}^2$ 이 발생하였다. PP3는 심도 13.5m에 매설하여 SM3~SM4의 10.0~15.0m층의 간극압의 변화를 측정하여 경시변화를 분석할 수 있도록 하였으며 최대  $7.982\text{t/m}^2$ 이 발생하였으며, PP4는 심도 19.0m에 매설하여 SM4~RM 15.0~23.4m층의 간극압의 변화를 측정하여 분석할 수 있도록 하였으며 최대  $10.84\text{t/m}^2$ 이 발생하였다.

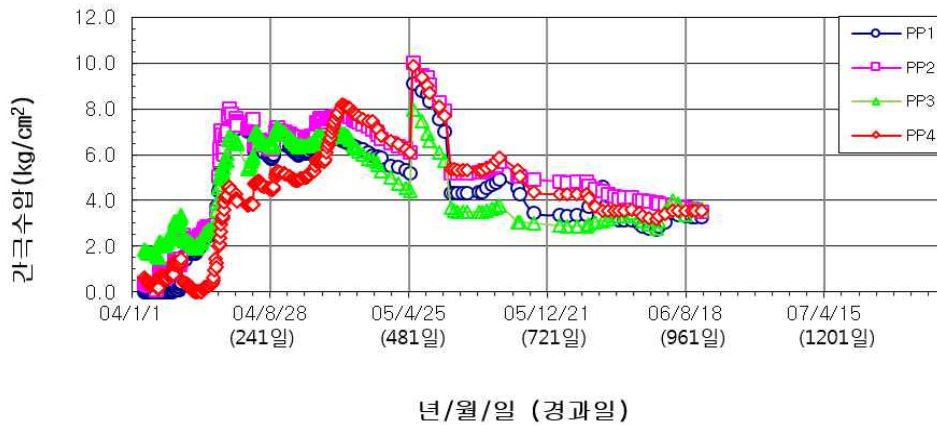
그림 3.58은 P-3 지점의 침하 및 간극수압 발생현황을 나타낸 것이다.



(a) 성토현황도



(b) 층별 침하현황도



(c) 간극수압현황도

그림 3.58 P-3 지점의 침하 및 간극수압 발생현황

(2) 0.0~4.0m점성토층 계층분석

상부점성토 지반은 심도 0.0~4.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 2.0m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 4.0m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.29는 0.0~4.0m의 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

**표 3.29 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화**

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/07/02	5.10	0.0~0.613
04/08/17	5.10	0.716
04/11/25	6.04	0.815
05/04/27	6.11	1.032
06/06/28	6.11	0.390

성토과정 중에서는 간극수압은 0.0~0.815kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토와 동시에 간극수압이 증가하는 경향을 보인다. 최종 6.48m에서 최대간극수압 1.032을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.59는 상부점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.



그림 3.59 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 간극수압현황

상부점성토 지반은 심도 0.0~4.0m의 지반으로 구분하였다. 상부점성토층을 구분한 이유는 지표면에 근접되어 있어 표면건조 영향을 받으며 지반 내 지중응력이 작고 성토에 의한 재하중의 영향을 직접받기 때문에 압밀침하가 가장 많이 발생하기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM1-SM2으로 구할 수 있으며, SM1은 197.2cm, SM2는 142.4cm 이므로 상부 점성토층의 침하량은 54.8cm이다.

그림 3.60은 상부점성토층의 침하현황을 그림 3.61은 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.

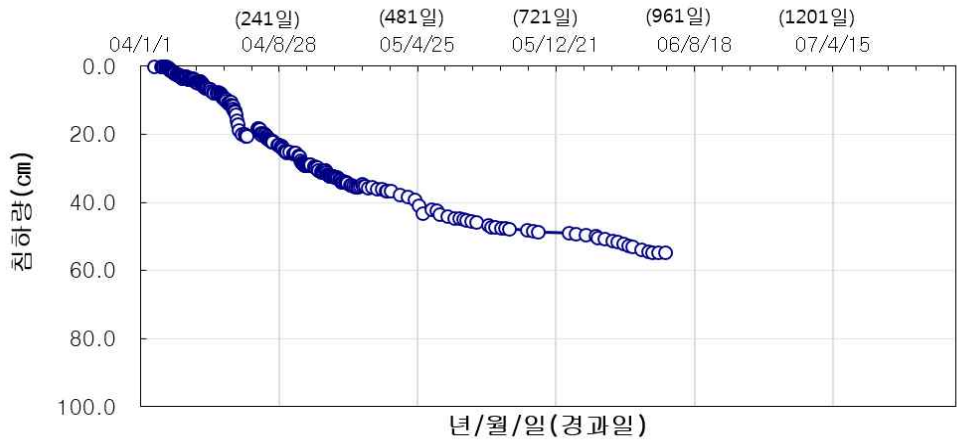


그림 3.60 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 침하현황

상부점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 상부점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.7에서 1.33으로 감소하였다.

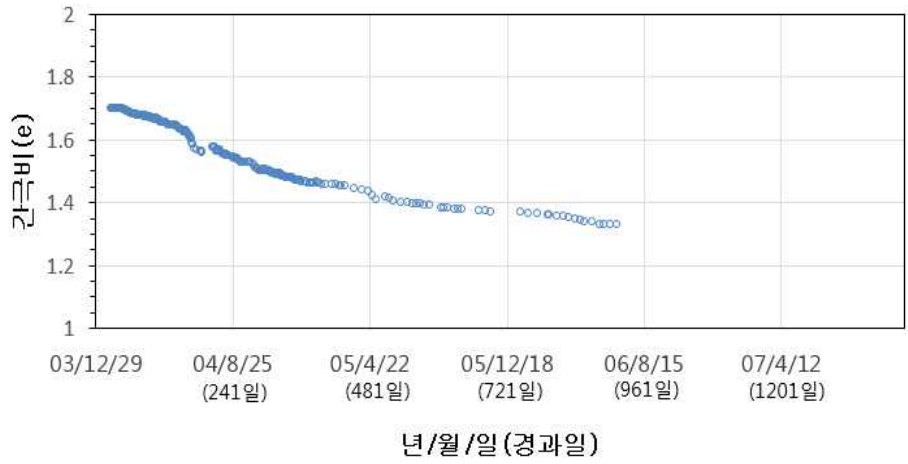


그림 3.61 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.62는 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

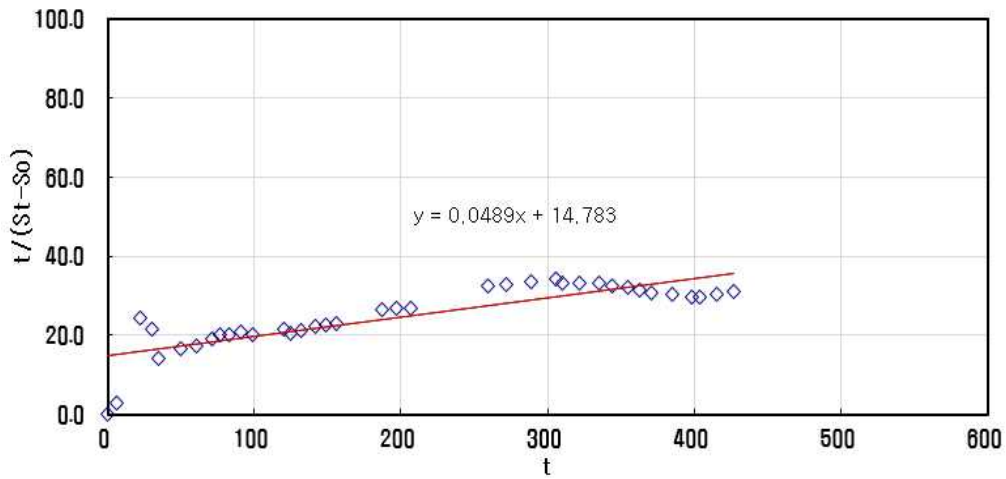


그림 3.62 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출



분석결과, 초기침하량은  $S_0 = 41.0\text{cm}$ ,  $\beta = 0.048$ ,  $\alpha = 14.78$ ,  $1/\beta = 20.83\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty : 61.8\text{cm}$ 이다.

그림 3.63은 실내시험의  $e-\log P$  곡선을, 그림 3.64는 간극수압계 및 침하계의  $e-\log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.64와 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 0.119$ )에서 B( $P_c = 0.415$ )으로 이동하며 B점( $P_c = 0.415$ )에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 0.415이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.025이다.

C점( $P_p$ )에서 D점( $P_f$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.959$ )이다.

B점( $P_y = 0.415$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 C( $P_p = 0.692$ )점에서 재차 처녀압밀곡선을 따른다. C( $P_p = 0.692$ )점에서 D( $P_f : 1.249$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따르므로 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종성토에 의한 간극비( $e_f = 1.228$ )이며 침하량  $S = 70\text{cm}$ 이다.

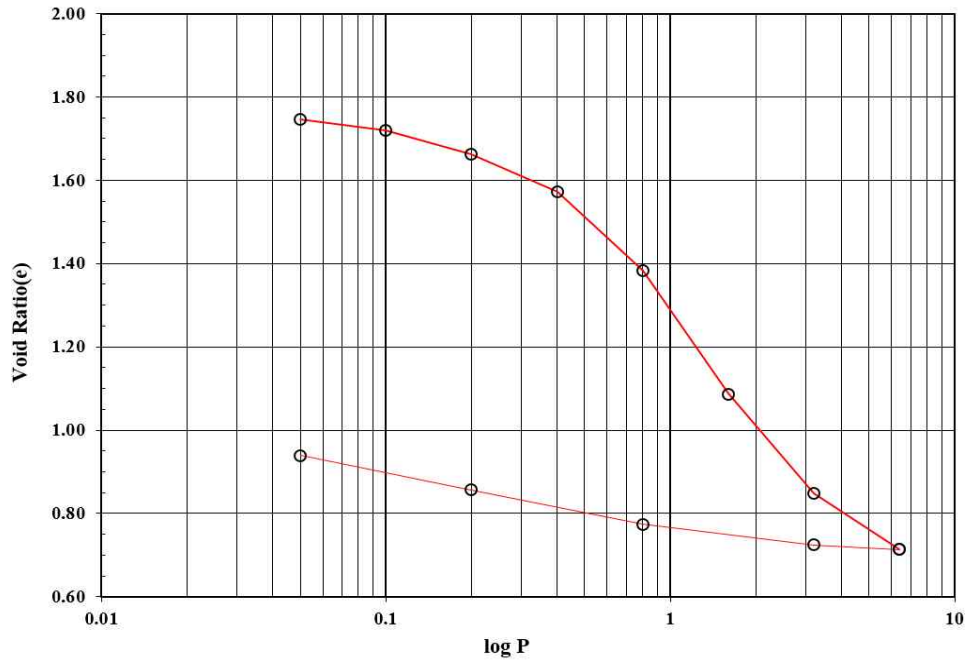


그림 3.63 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

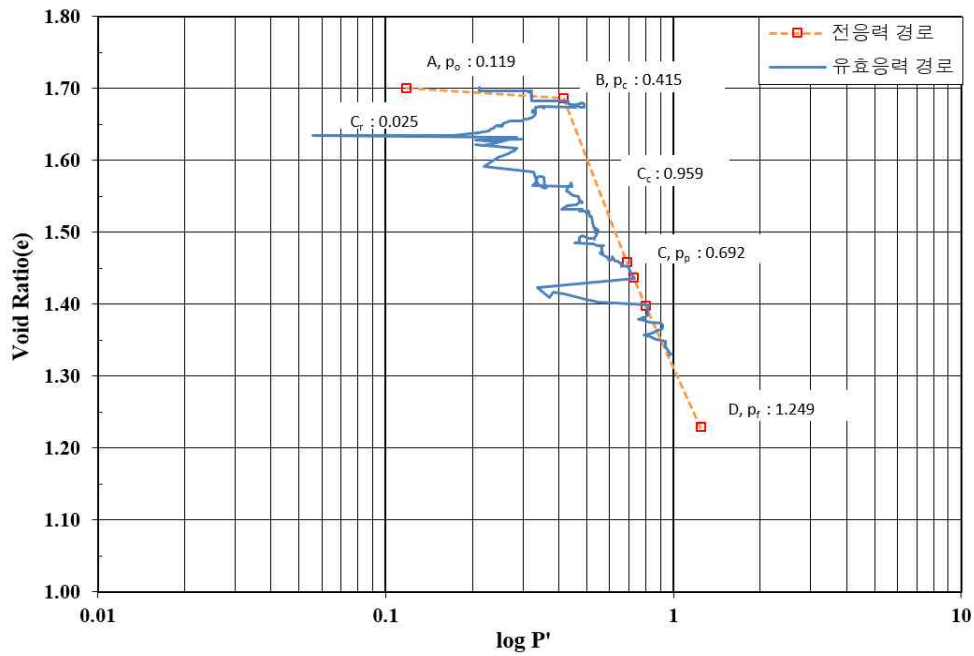


그림 3.64 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 54.8cm 장기 침하량은 70.0cm 이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $1.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.30은 0.0~4.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.30 P-3, 0.0~4.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측의 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.214	0.119
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.406	0.415
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.192	0.296
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	-
압 축 지 수 $C_c$	0.740	0.959
재압축지수 $C_r$	0.138	0.025

그림 3.65는 점성토의 최종침하량 평가를 나타낸 그래프이다.

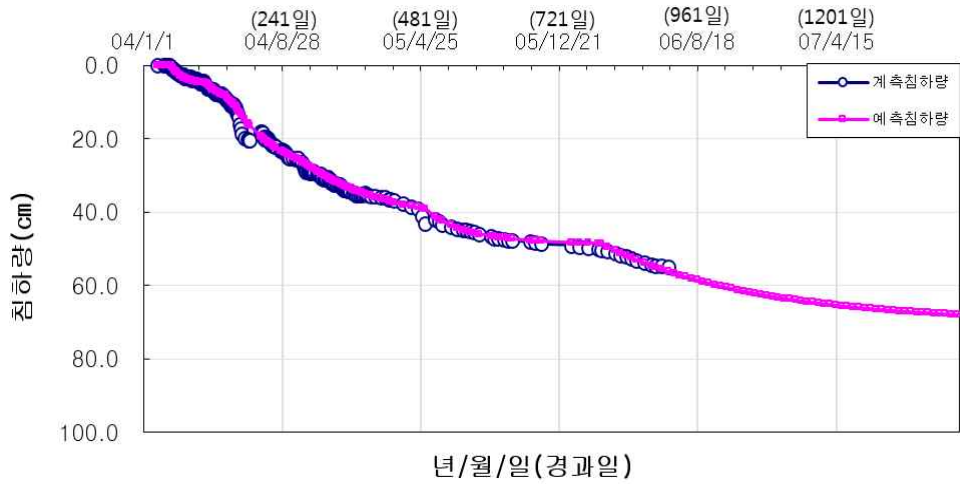


그림 3.65 P-3, 0.0~4.0m 점성토층 최종침하량 평가

(3) 4.0~10.0m 점성토층 계층분석

중간점성토 지반은 심도 4.0~10.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 6.5m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 7.0m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수채를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.31은 4.0~10.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

**표 3.31 P-3, 4.0~1.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화**

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/04/07	2.41	0.0~0.237
04/06/16	5.10	0.780
04/09/24	5.36	0.690
05/01/14	6.11	0.753
06/06/16	6.11	0.394

성토과정 중에서는 간극수압은 0.0~0.237kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토와 동시에 간극수압이 증가하는 경향을 보인다. 최종 6.48m에서 최대간극수압 0.753을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.66은 중간점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.

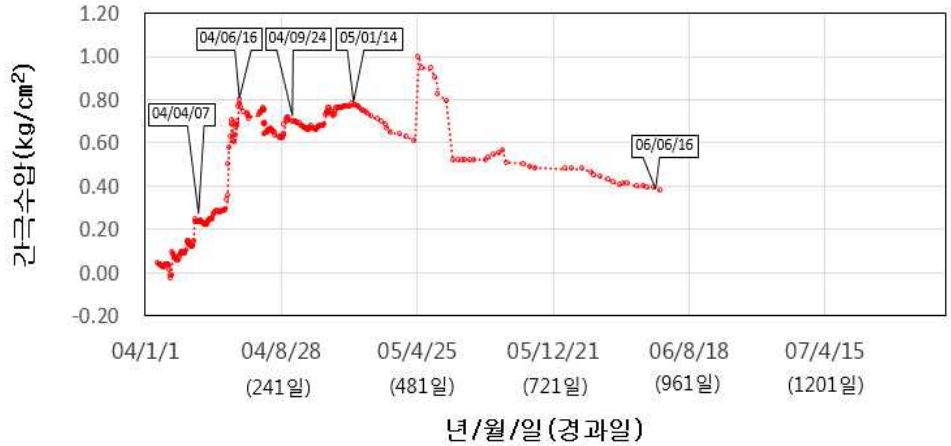


그림 3.66 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 간극수압현황

중간점성토 지반은 심도 4.0~10.0m의 지반으로 구분하였다. 중간점성토층을 구분한 이유는 지표면에서 4.0m이상 심도로 이격되어 표면건조 영향을 받지 않으며 지반 내 지중응력이 커지면서 성토에 의한 재하중의 영향을 간접적으로 받기 때문이다. 또한, 압밀침하도 상부 점성토층에 비해 적게 발생하였기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM2-SM3으로 구할 수 있으며, SM2는 142.4cm, SM3은 83.2cm이므로 중간 점성토층의 침하량은 59.2cm이다.

그림 3.67은 중간점성토층의 침하현황을 그림 3.68은 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.

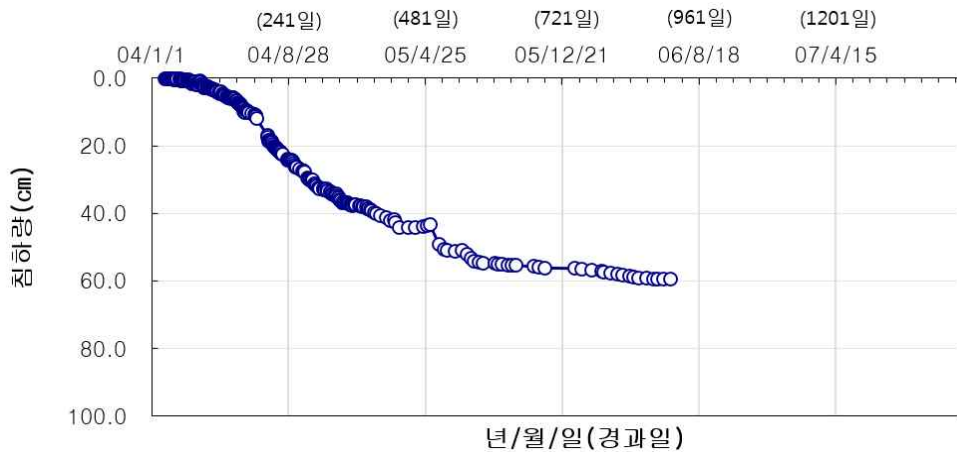


그림 3.67 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 침하현황

중간점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 중간점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비 1.7에서 1.43로 감소하였다.

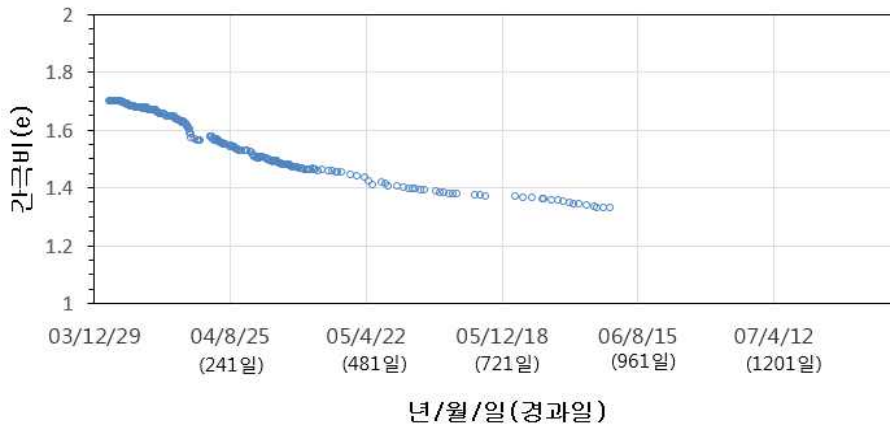


그림 3.68 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.69는 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

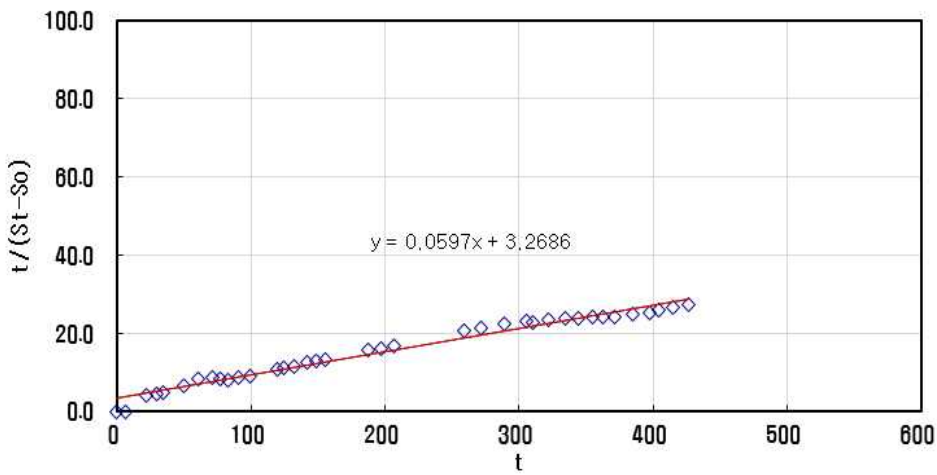


그림 3.69 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $S_0 = 43.6\text{cm}$ ,  $\beta = 0.059$ ,  $\alpha : 3.268$ ,  $1/\beta = 16.95\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 60.5\text{cm}$ 이다.

그림 3.70은 실내시험의  $e-\log P$  곡선을, 그림 3.71은 간극수압계 및 침하계의  $e-\log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.71과 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 0.416$ )에서 B( $P_c = 0.564$ )으로 경로이동하며 B점에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 0.564이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.034이다.

C점( $P_p$ )에서 D점( $P_f$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.842$ )이다.

B점( $P_y = 0.564$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 C( $P_p = 0.712$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다. C( $P_p = 0.712$ )점에서 E( $P_f = 1.546$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따르므로 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종성토에 의한 간극비( $e_f = 1.327$ )이며 침하량  $S = 83\text{cm}$ 이다.

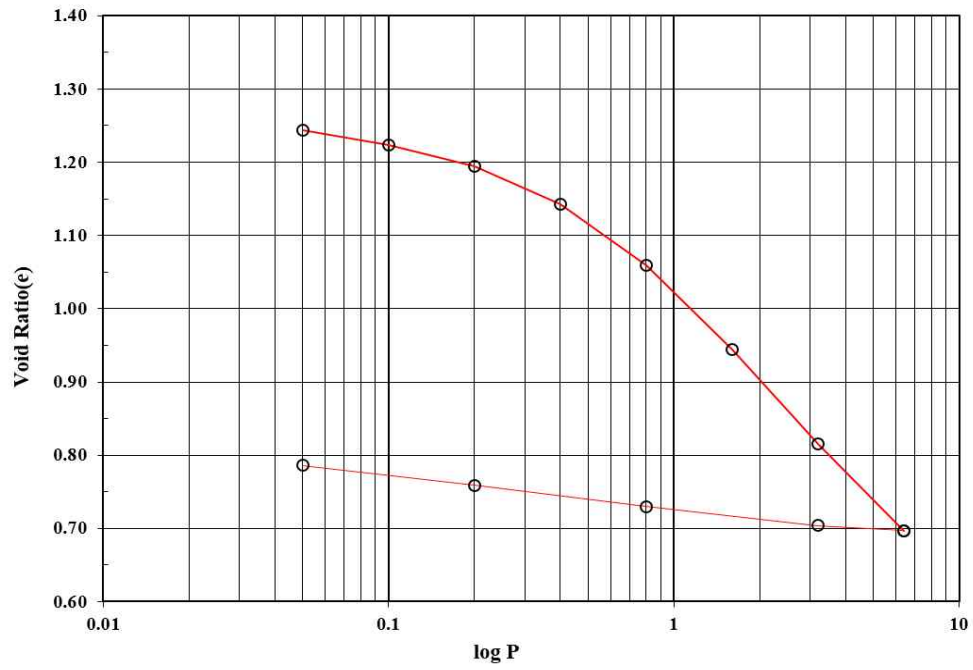


그림 3.70 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

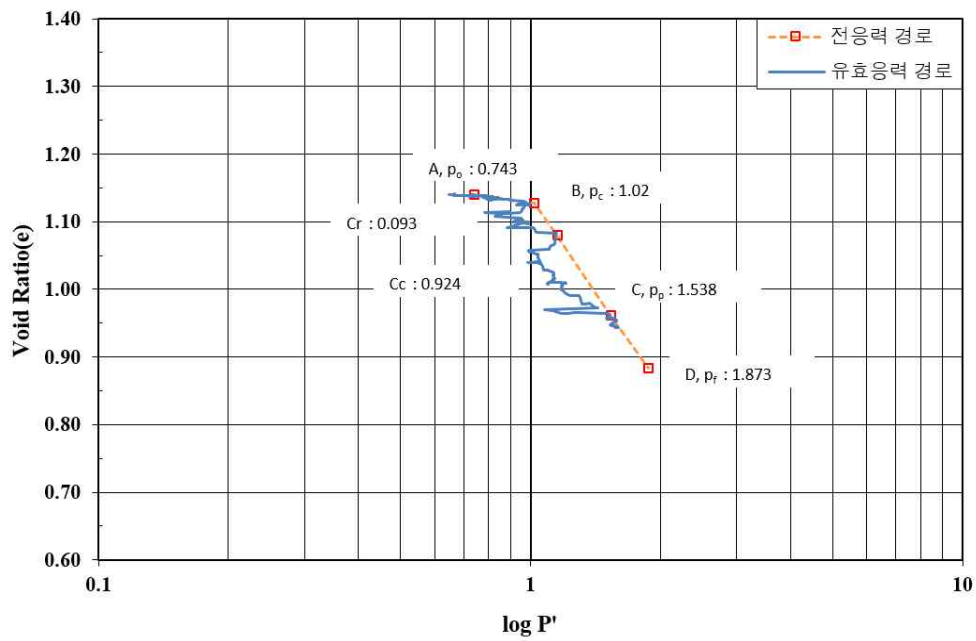


그림 3.71 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선



현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 예측된 실측침하량은 59.2cm 장기 침하량은 83.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $4.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.32는 4.0~1.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.32 P-3, 4.0~10.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.390	0.416
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.390	0.564
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	0.148
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	-
압 축 지 수 $C_c$	0.760	0.842
재압축지수 $C_r$	0.060	0.034

그림 3.72는 점성토의 최종침하량을 나타낸 것이다.

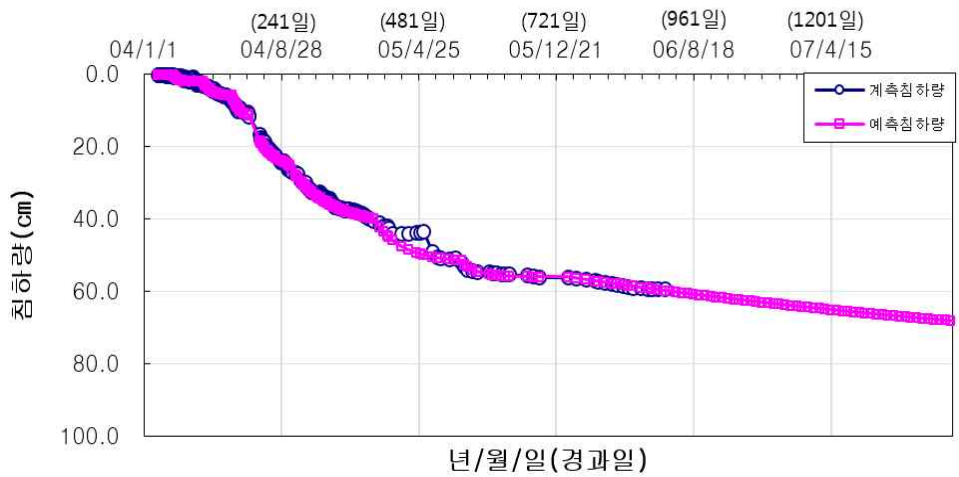


그림 3.72 P-3, 4.0~10.0m 점성토층 최종침하량 평가

(4) 10.0~15.0m 점성토층 계층분석

최하부점성토 지반은 심도 10.0~15.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 12.5m에 매설하였는데, 이는 지표면에서 심도 12.5m까지의 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

표 3.33은 4.0~1.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화를 나타낸 것이다.

표 3.33 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 성토변화에 따른 간극수압변화

날 짜	성토고(m)	간극수압(kgf/cm <sup>2</sup> )
04/04/07	2.41	0.0~0.219
04/06/16	5.10	0.671
04/09/24	5.36	0.677
05/01/14	6.11	0.643
06/06/16	6.11	0.278

성토과정 중에서는 간극수압은 0.0~0.671kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토와 동시에 간극수압이 증가하는 경향을 보인다. 최종 6.48m에서 최대간극수압 0.6433을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.73은 하부점성토층의 간극수압현황을 나타낸 것이다.

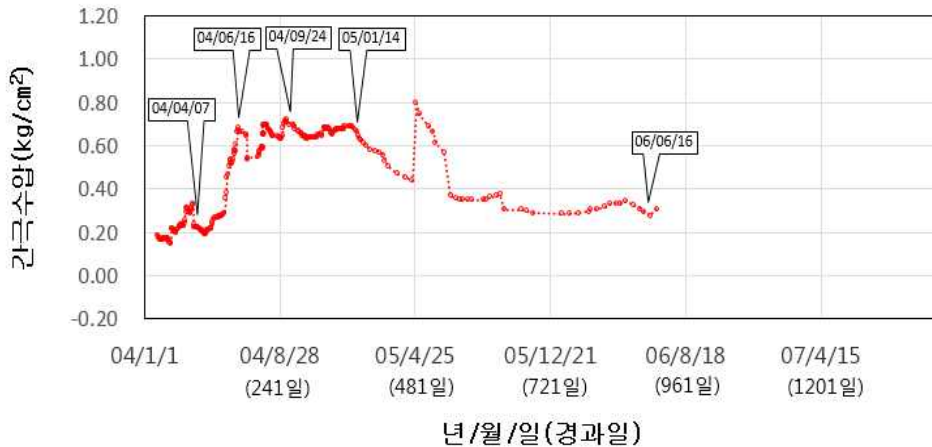


그림 3.73 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 간극수압현황

하부점성토 지반은 심도 10.0~15.0m의 지반으로 구분하였다. 하부점성토층을 구분한 이유는 지표면에서 10.0m이상 심도로 이격되어 성토에 의한 재하중의 영향을 간접적으로 받기 때문이다. 또한, 압밀침하도 상부나 중간 점성토층에 비해 적게 발생하였기 때문이다.

상부점성토층의 침하량은 SM3-SM4으로 구할 수 있으며, SM3은 83.2cm, SM4는 37.3cm 이므로 하부 점성토층의 침하량은 45.9cm이다.

그림 3.74는 하부점성토층의 침하현황을 그림 3.75는 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.

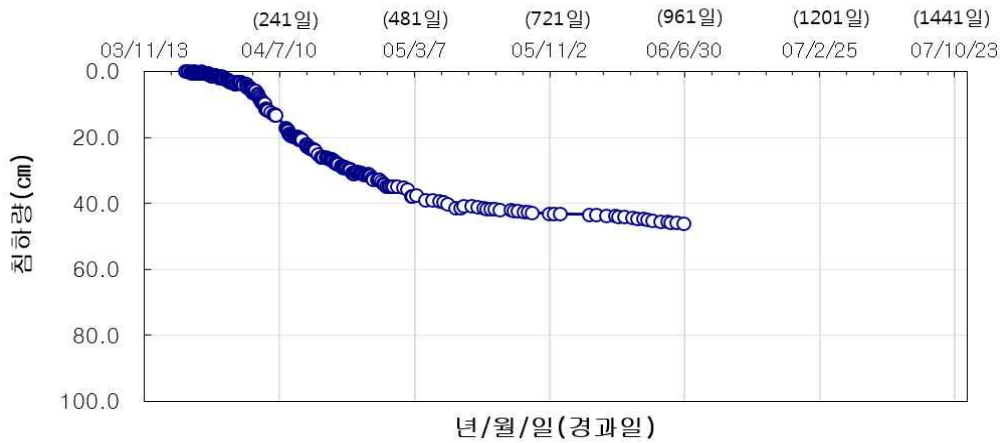


그림 3.74 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 침하현황

하부점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 중간점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비: 1.14에서 0.943로 감소하였다.

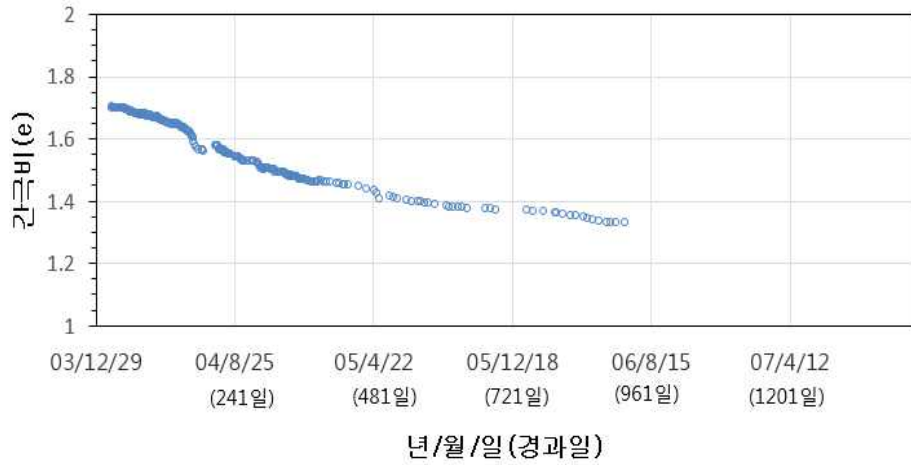


그림 3.75 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.76은 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

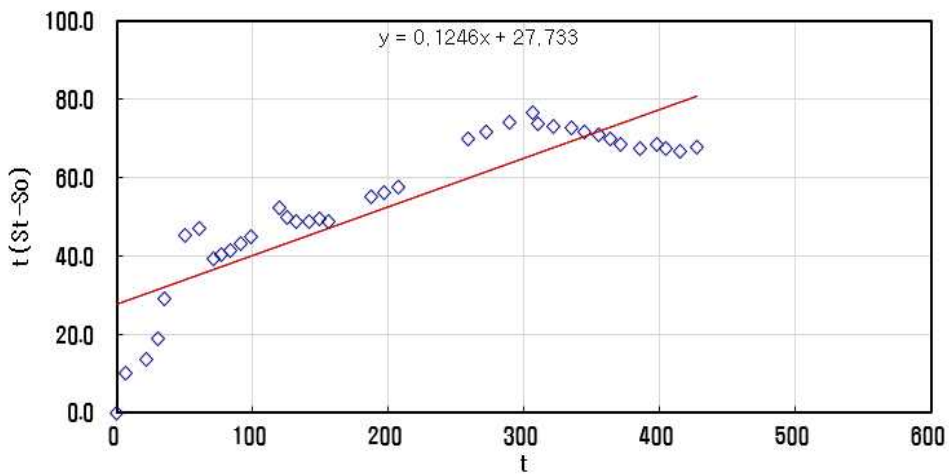


그림 3.76 P-3, 10.0~15.0m 점성토층 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $S_0 = 39.6\text{cm}$ ,  $\beta = 0.124$ ,  $\alpha = 27.73$ ,  $1/\beta = 8.06\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 47.7\text{cm}$ 이다.

그림 3.77은 실내시험의  $e - \log P$  곡선을, 그림 3.78은 간극수압계 및 침하계의

$e - \log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.78과 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 0.743$ )에서 B( $P_c = 1.02$ )으로 경로이동하며 B점에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 1.02이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.093이다.

C점( $P_p$ )에서 D점( $P_f$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.924$ )이다.

B점( $P_y = 1.02$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 C( $P_p = 1.538$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다. C( $P_p = 1.538$ )점에서 D( $P_f = 1.873$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따르므로 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종성토에 의한 간극비( $e_f = 0.883$ )이며 침하량은  $S = 60\text{cm}$ 이다.

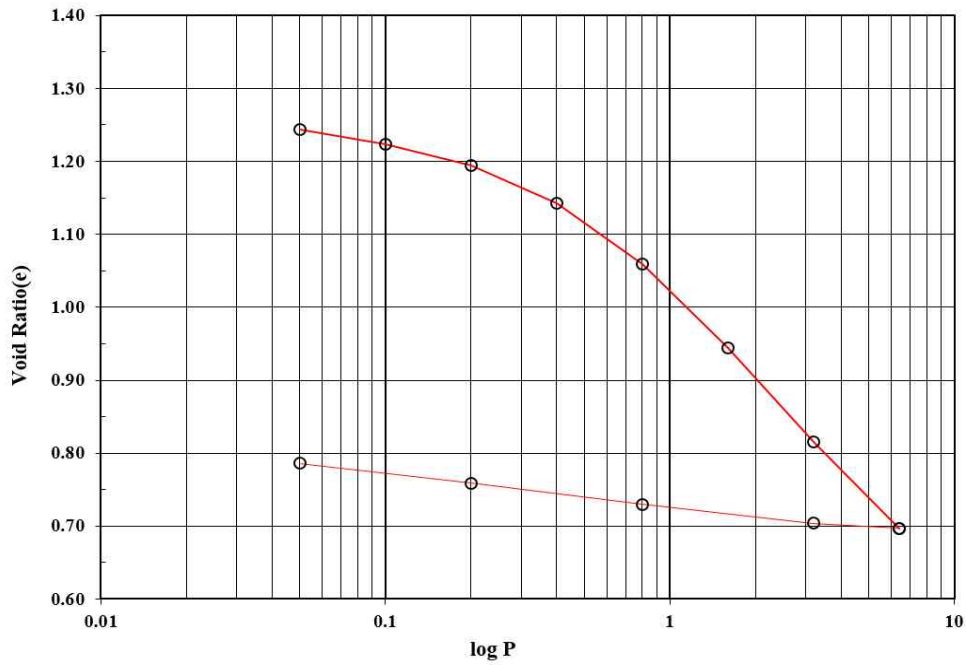


그림 3.77 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 실내시험의  $e - \log P$  곡선

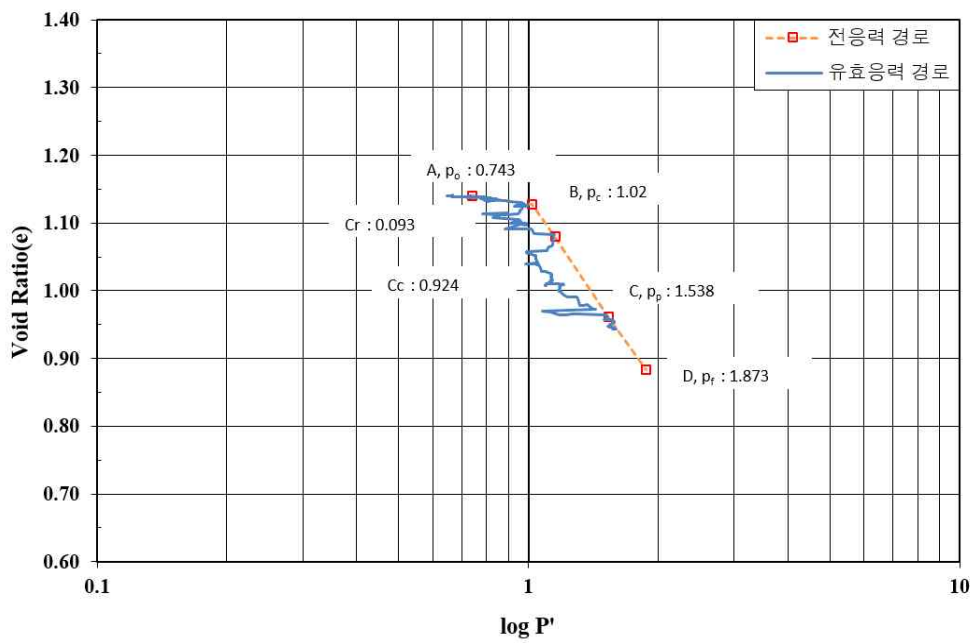


그림 3.78 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 계측된 실측침하량은 45.9cm 장기 침하량은 60.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $7.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다.

표 3.34는 10.0~15.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

표 3.34 P-3, 10.0~15.0m 점성토층의 실내시험과 현장계측 비교

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.748	0.743
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.540	1.020
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	0.227
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	1.020
압 축 지 수 $C_c$	0.410	0.942
재압축지수 $C_r$	0.083	0.093

그림 3.79는 점성토의 최종침하량을 평가한 것이다.

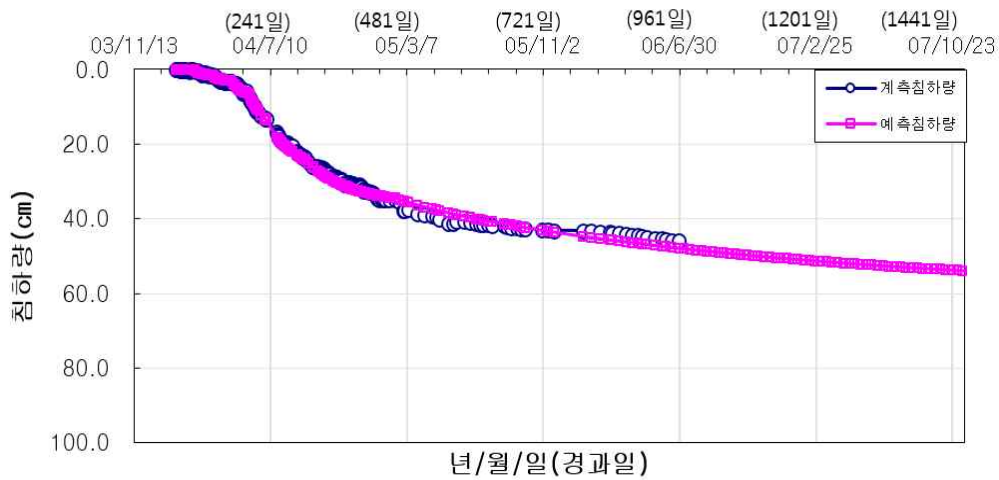


그림 3.79 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 최종침하량 평가

(5) 15.0~24.0m 점성토층 계층분석

최하부점성토 지반은 심도 15.0~24.0m의 두께로 구분하였으며, 간극수압계는 심도 19.5m에 매설하였는데, 이는 점성토층 중앙에서의 간극수압을 측정하여 두께의 중앙값에서 간극수압과 전응력 및 유효응력을 측정하기 위함이다. 간극수압은 성토고의 진행에 따라 증가하며, 성토대기 시 간극수압이 연직배수재를 통하여 배수되면서 간극수압이 감소한다.

성토과정 중에서는 간극수압은 0.0~0.815kgf/cm<sup>2</sup>의 범위를 보이며, 성토와 동시에 간극수압이 증가하는 경향을 보인다. 최종 6.11m에서 침투간극수압 0.815kgf/cm<sup>2</sup> 을 보이고 이후 추가 성토가 없으므로 서서히 소산이 되는 경향을 보인다.

그림 3.80은 점성토의 간극수압현황을 나타낸 것이다.



그림 3.80 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 간극수압현황

심도 15.0~24.0m의 점성토지반으로 구분하였다. 최하부점성토층을 구분한 이유는 지표면에서 15.0m이상 심도로 이격되어 성토에 의한 재하중의 영향을 간접적으로 받기 때문이다. 또한, 압밀침하도 상부나 하부 점성토층에 비해 적게 발생하였기 때문이다.

최하부점성토층의 침하량은 SM4으로 구할 수 있으며, 하부 점성토층의 침하량은 37.3cm이다.

그림 3.81은 점성토층의 침하현황을 그림 3.82는 간극비의 변화현황을 나타낸 것이다.



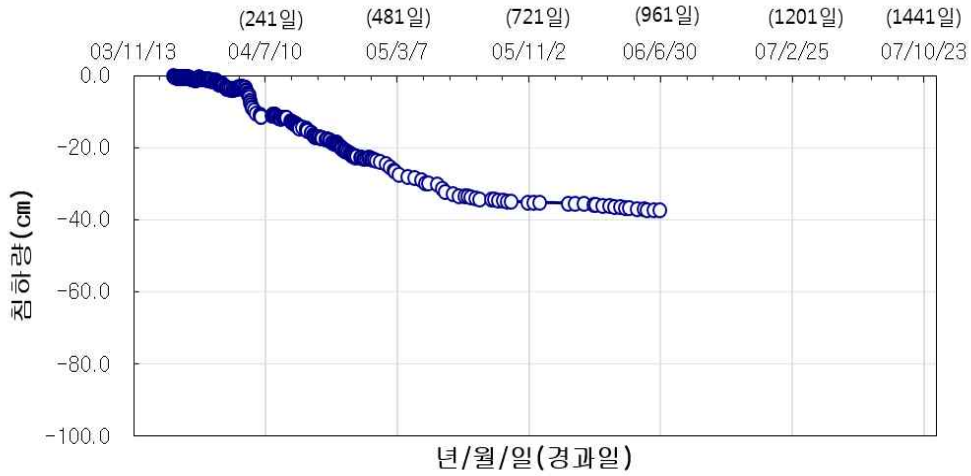


그림 3.81 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 침하현황

하부점성토 압밀침하량을 점성토지반의 간극비( $e_0$ ) 변화로 표기하였다. 침하발생중 간극비의 변화는 침하량의 발생과 비례한다. 중간점성토층의 간극비( $e_0$ )는 초기간극비: 1.15에서 1.06로 감소하였다.

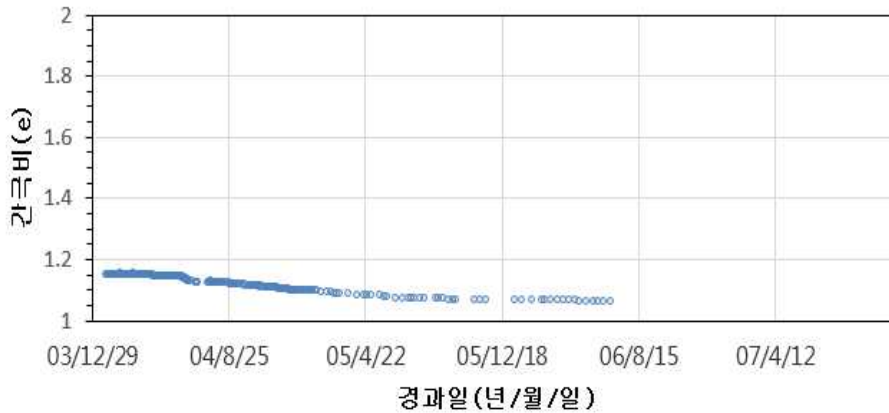


그림 3.82 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 간극비 변화현황

그림 3.83은 쌍곡선법에 의한 최종침하량을 나타낸 것이다.

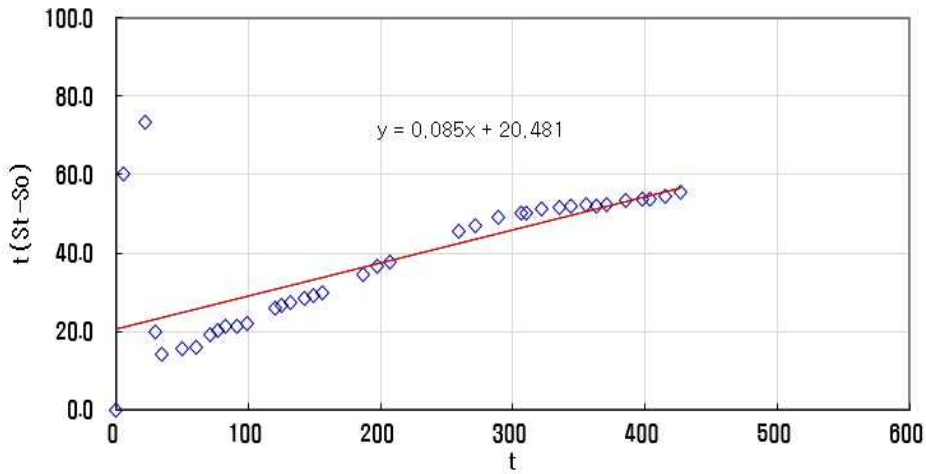


그림 3.83 P-3, 15.0~24.0m 점성토의층 쌍곡선법에 의한 최종침하량 산출

분석결과, 초기침하량은  $S_0 = 29.6\text{cm}$ ,  $\beta = 0.085$ ,  $\alpha = 20.48$ ,  $1/\beta = 11.76\text{cm}$ 로서 쌍곡선법에 의한 최종 예측 침하량은  $S_\infty = 41.4\text{cm}$ 이다.

그림 3.84는 실내시험  $e - \log P$  곡선을, 그림 3.85는 간극수압계 및 침하계의  $e - \log P'$  곡선을 나타낸 것이다. 그림 3.85와 같이 현장계측자료를 유효응력경로로 검토하면 성토과정에서는 A점( $P_0 = 1.158$ )에서 B( $P_c = 1.528$ )으로 경로이동하며 B점에서 급격히 간극비가 감소 현상이 발생하는데 이 값이 선행압밀하중( $P_c$ ) 1.528이 된다. 이때 A에서 B의 기울기는 재압축지수( $C_r$ )가 되며 그 값은 0.020이다.

B점( $P_c$ )에서 C점( $P_y$ )까지 직선의 경로를 보이는데 이는 이 구간이 처녀압축선이며 이 기울기는 압축지수( $C_c = 0.667$ )이다.

C점( $P_y = 1.713$ )에서 유효응력경로는 갑자기 처녀압축선 안쪽으로 이동하며 이는 간극수압이 급격히 증가한 결과로 보인다. 처녀압밀선 안쪽에서 이동하던 경로는 간극수압이 소산됨에 따라 D( $P_p = 2.083$ )점에서 재차 처녀압밀선을 따른다. D( $P_p = 2.083$ )점에서 E( $P_f = 2.289$ )점까지 일정한 기울기를 가진 압축선을 따르므로 최종간극비와 최종침하량을 평가 가능하며 최종성토에 의한 간극비( $e_f = 1.031$ )이며 침하량  $S = 50\text{cm}$ 이다.

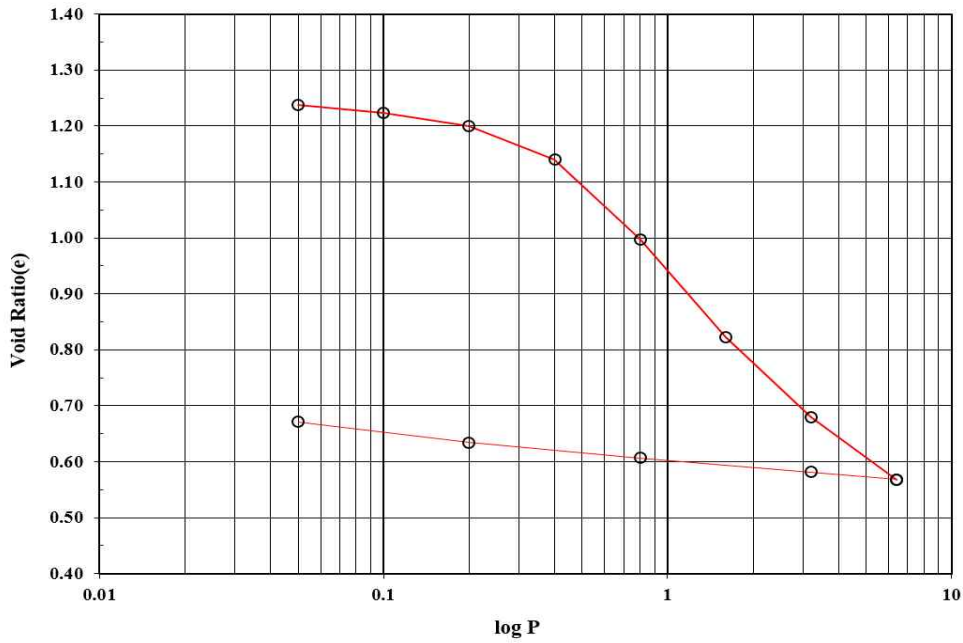


그림 3.84 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의 실내시험  $e - \log P$  곡선

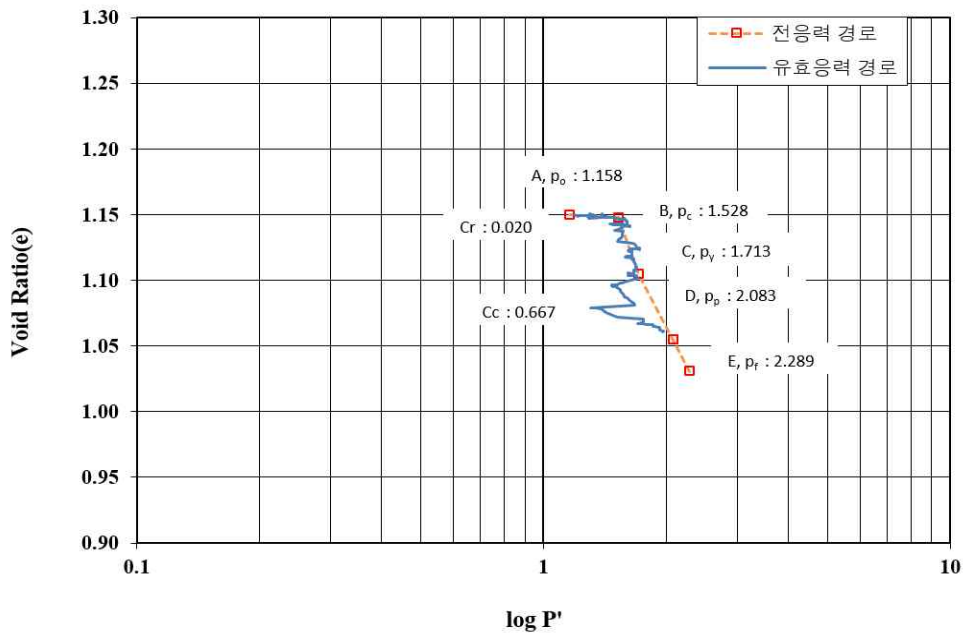


그림 3.85 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의 간극수압계 및 침하계를 이용한  $e - \log P'$  곡선

현장계측자료를  $e - \log P'$  곡선을 검토하여 최종유효응력점과 그 점에 대응하는 침

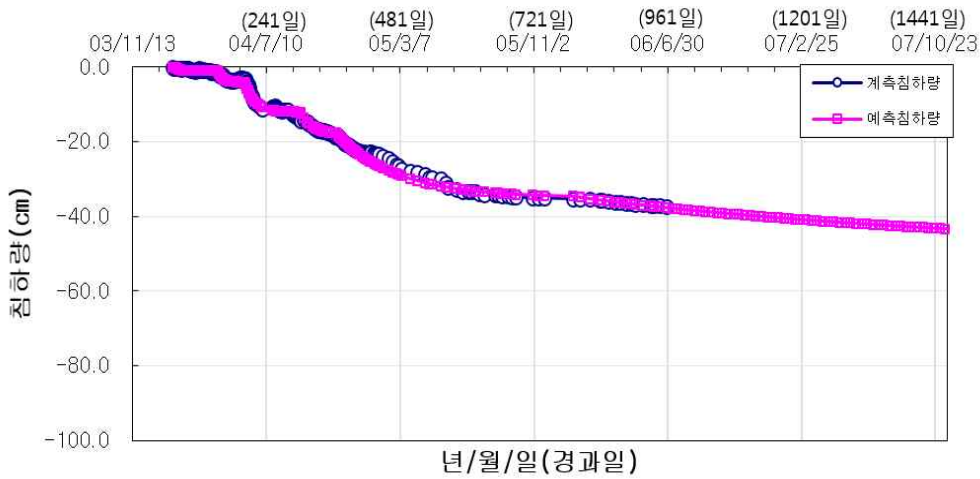
하량을 이용하여 장기 예상 침하곡선을 예측하였다. 예측된 실측침하량은 37.3cm 장기 침하량은 50.0cm이며 침하곡선에 의한 압밀계수는  $8.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이다

표 3.35는 15.0~24.0m 점성토층의 토질정수에 대하여 실내시험 및 현장계측 결과를 비교한 것이다.

**표 3.35 P-3, 15.0~24.0m 점성토층의 실내시험 및 현장계측 비교**

구 분	실내시험	현장계측
지 중 응 력 $P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	1.283	1.158
선행압밀하중 $P_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	0.390	1.528
응 력 차 $P_c - P_0$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	0.370
항 복 응 력 $P_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	-	1.173
압 축 지 수 $C_c$	0.480	0.667
재압축지수 $C_r$	0.061	0.020

그림 3.86은 점성토의 최종침하량을 나타낸 것이다.



**그림 3.86 P-3, 15.0~24.0m 점성토층 최종침하량 평가**

(5) P-3 지점 계측분석

실내시험자료에서 구한 토질정수와 현장계측자료의  $e - \log P'$  곡선을 이용한 토질정수를 표 3.30에 표기하였다.

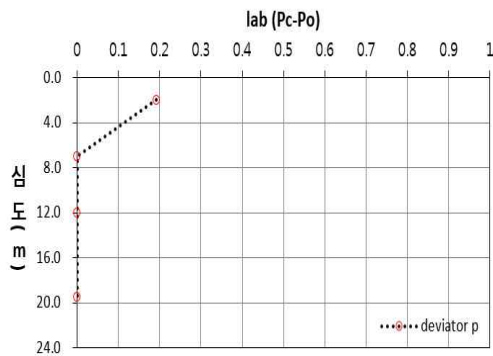
표준압밀자료와  $e - \log P'$  곡선의 압축지수와 재압축지수는 모두 거의 유사한 양상을 보이나, 선행압밀하중과 지중응력의 차는 표준압밀시험에서 심도가 깊어질수록 감소하여 7.0m 이하에서는 거의 0이 된다.

표 3.36은 P-3 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수를 비교한 것이다.

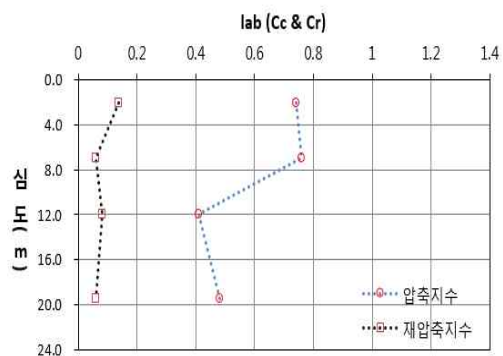
표 3.36 P-3 지점의 실내시험과 현장계측자료의 토질정수 비교

구 분	실내시험			$e - \log P'$		
	응력차 ( $P_c - P_0$ )	재압축지수 ( $C_r$ )	압축지수 ( $C_c$ )	응력차 ( $P_c - P_0$ )	재압축지수 ( $C_r$ )	압축지수 ( $C_c$ )
0.0~4.0m	0.192	0.138	0.740	0.296	0.025	0.959
4.0~10.0m	-	0.060	0.760	0.148	0.034	0.842
10.0~15.0m	-	0.080	0.410	0.227	0.093	0.924
15.0~24.0m	-	0.060	0.480	0.370	0.020	0.667
평 균	0.064	0.094	0.637	0.224	0.051	0.908

그림 3.87은 실내시험결과 토질정수를, 그림 3.88은 현장계측결과 토질정수를 나타낸 것이다.

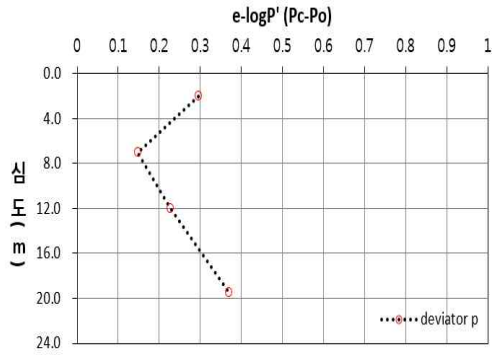


(a)  $P_c - P_0$

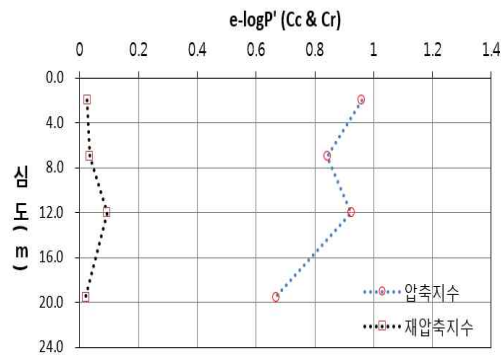


(b) 압축지수 및 재압축지수

그림 3.87 P-3 지점의 실내시험결과 토질정수



(a)  $P_c - P_0$



(b) 압축지수 및 재압축지수

그림 3.88 P-3 지점의 현장계측결과 토질정수

계측자료와 실내시험자료를 이용하여 최종침하량을 산출하였다.

본 지점의 과잉간극수압은 PP1은  $0.3267 \text{kgf/cm}^2$ , PP2는  $0.3522 \text{kgf/cm}^2$ , PP3은  $0.3633 \text{kgf/cm}^2$ , PP4는  $0.353 \text{kgf/cm}^2$  으로 상당히 많은 잔류간극수압이 남아 있다. 잔류간극수압의 영향을 고려하는  $e - \log P'$  곡선이 쌍곡법의 예상침하량보다 큰 값을 보인다.

실내시험에 의한 예상침하량은 토질을 선행압밀하중을 적용하지 않는 정규압밀상태와 선행압밀하중을 포함하여 산출하는 과압밀 상태로 구분하여 검토하였다. 검토 결과 정규압밀로 계산 시 침하량이 과도하게 산출되었다.

표 3.37은 P-3 지점의 침하량을 분석하여 나타낸 것이다.

표 3.37 P-3 지점의 침하량 분석결과

구 분	계측된 침하량	최종 침하량 분석		실내시험	
		쌍곡선법	$e - \log P'$	정규압밀	과압밀
0.0~4.0m	54.8	61.8	70.0	109.1	58.0
4.0~10.0m	59.2	60.5	83.0	93.0	93.0
10.0~15.0m	45.9	47.7	60.0	36.4	36.4
15.0~24.0m	37.3	41.4	50.0	56.6	56.6
합 계	197.2	211.4	263.0	295.1	244.0

$e-\log P'$  곡선에서 산출한 최종 평가 침하곡선을 그림 3.89에 도시하였다. 설계기준의 침하량은 295.1cm로 과하게 침하가 발생된다고 하였으나 현장에서 실제계측된 침하량과 쌍곡선법과의 비교내용을 비교하였을 때 실제 침하량은 3.0cm라는 값이 나온다. 최종 계측 침하량과 비교하였을 때 잔류침하가 70cm가까이 일어났다고 확인된다. 이러한 경우 쌍곡선법은 간극수압을 고려하지 않기 때문에 잔류침하를 정확하게 예측할 수가 없어  $e-\log P'$  곡선법을 이용한 예측이 중요하다고 판단된다.

그림 3.89는 P-3 지점의 심도별 층별침하량 및 예상 침하량을 나타낸 것이다.

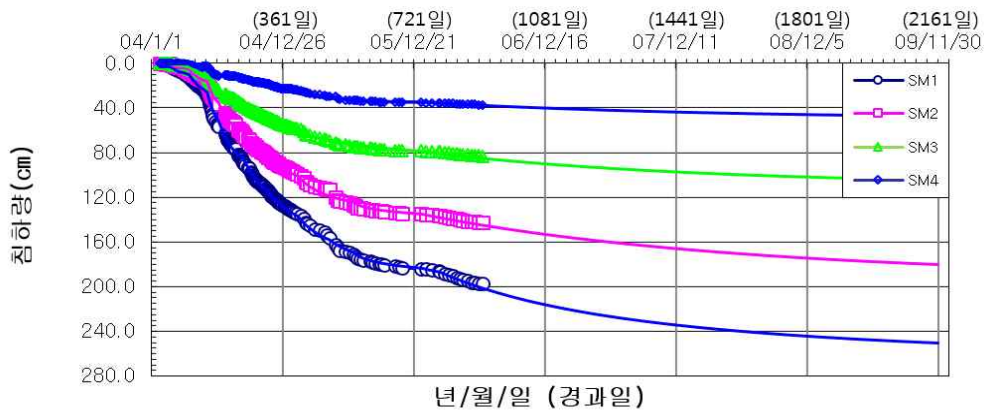


그림 3.89 P-3 지점의 심도별 층별침하량 및 예상 침하량

## 제 4 장 현장 $e-\log P'$ 곡선의 분석 및 고찰

### 4.1 P-1 지점 $e-\log P'$ 곡선의 분석 및 고찰

#### 4.1.1 P-1, 0.0~4.0m 점성토층

P-1 지점의 상부 0.0~4.0m 두께의 점성토층의 현장  $e-\log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.1은  $e-\log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

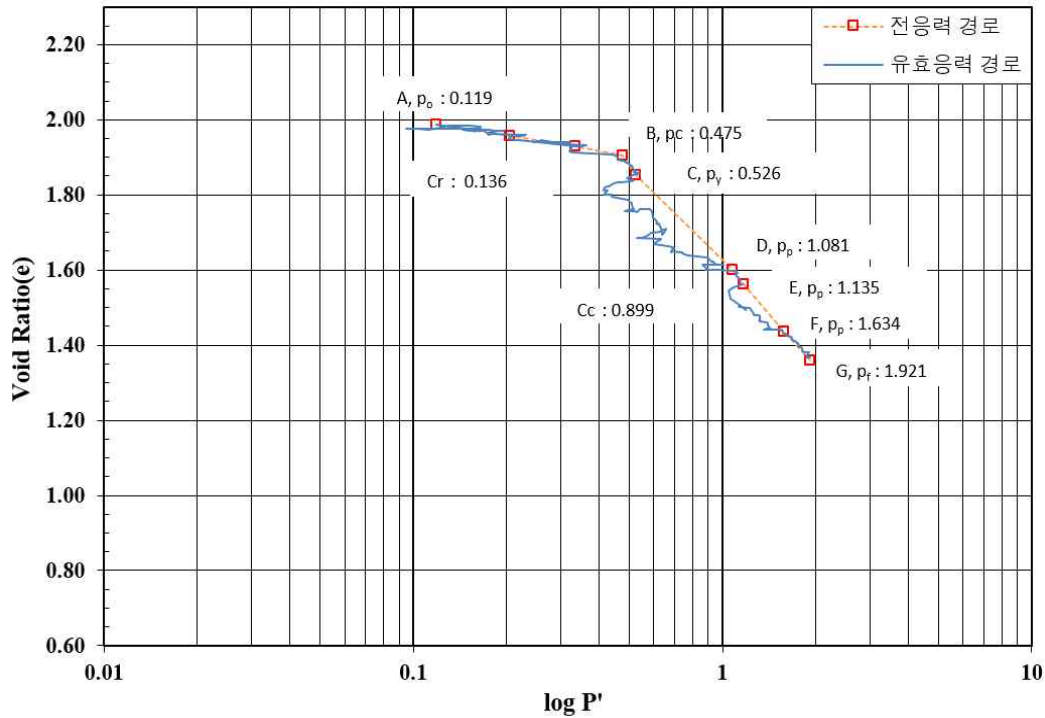


그림 4.1 P-1 지점, 0.0~4.0m 점성토층의  $e-\log P'$  곡선



A에서 B구간은 성토고 0.4~3.57m 성토 구간이다. 경과기간은 03/11/13~04/3/2 기간으로 약 110일 동안 경과되었으며 성토속도는 3.25cm/일 이다. 유효응력 경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약 0.475kgf/cm<sup>2</sup> 으로서 이때의 성토고는 3.57m이다.

B에서 C구간은 성토고 3.57m로 유지되었으며, 경과기간은 04/3/2~04/3/23 경과기간은 110~131일로 약 21일이다. 비교적 단기간이지만 초기에 처녀압축선을 보여주고 있다.

C에서 D구간은 성토고 3.57~6.14m 성토구간이다. 경과기간은 04/3/23~04/8/14이며 경과일은 131~275일로 약 144일이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경로와 전응력경로는 서로 이격되었다.

D에서 E구간은 성토고 6.14~7.35m 성토구간이다. 경과기간은 04/8/14~04/9/21이며 경과일은 275~313일로 약 38일 이다. 유효응력경로과와 전응력경로는 같은 경로를 보이며 처녀압축선을 따른다.

E에서 F구간은 성토고 7.35~9.742m 성토구간이다. 경과기간은 04/9/21~04/12/31이며 경과일은 313~414일로 약 101일이다. 성토의 진행에 따라 유효응력경로와 전응력경로는 다른 경로를 보인다.

F에서 G구간은 성토고 9.742m로 성토 종료 후 대기기간이다. 경과기간은 04/12/31~05/10/31이며 경과일은 414~718일로 약 304일이며  $e-\log P'$  곡선상에서는 가장 짧게 보이나 실제로는 약 10개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e-\log P'$  곡선을 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선행압밀하중( $P_c$ )평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

### 4.1.2 P-1, 4.0~10.0m 점성토층

P-1 지점의 상부 4.0~10.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.2는  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

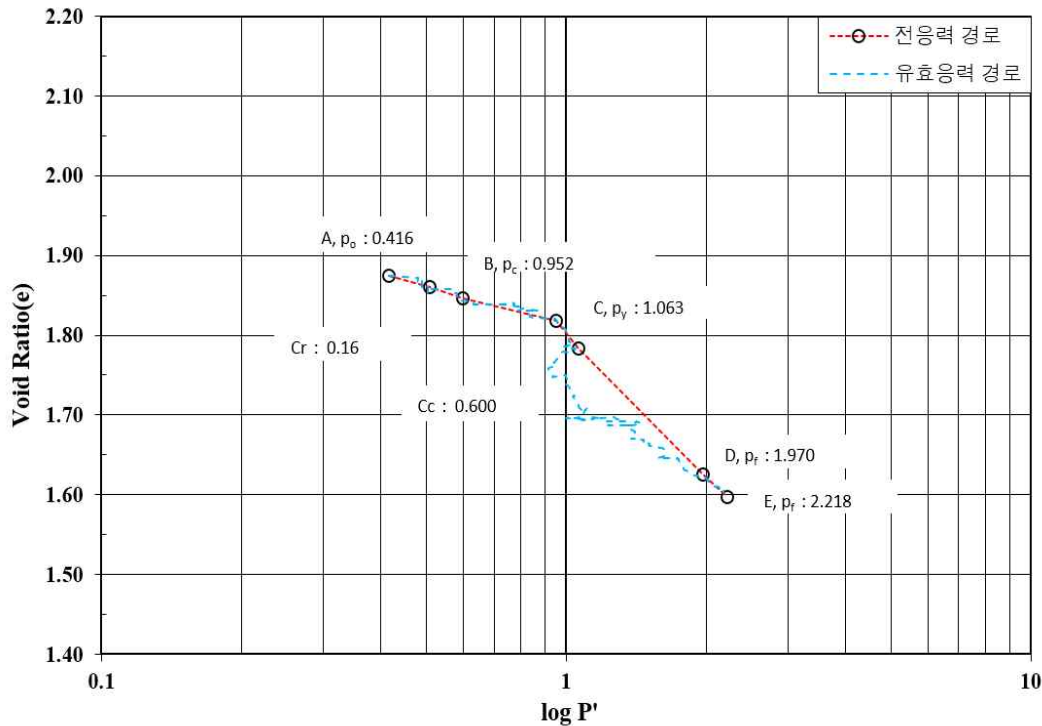


그림 4.2 P-1 지점, 4.0~10.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.4~3.57m 성토구간이다. 경과기간은 03/11/13~04/3/2 기간으로 약 107일이 경과되었으며 성토속도는 3.25cm/일이다. 유효응력 경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약 0.952kgf/cm<sup>2</sup>으로 이때의 성토고는 3.57m이다.

B에서 C구간은 성토고 3.57m로 유지되었으며, 경과기간은 04/3/23~04/4/1 경과기간은 107~140일로 약 33일이다. 비교적 단기간이지만 초기에 처녀압축선을 보여주고 있다.

C에서 D구간은 성토고 3.57~9.74m 성토구간이다. 경과기간은 04/4/1~05/1/14이며 경과일은 140~428/일로 약 288일 기간이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경로과와 전응력경로는 서로 이격되었다.

D에서 E구간은 성토고 9.742m로 성토 종료 후 대기기간이다. 경과기간은 05/1/14~05/11/14이며 경과일은 428~722일로 약 294일이며  $e-\log P'$  곡선상에서는 가장 짧게 보이나 실제로는 약 10개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e-\log P'$  곡선을 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선행압밀하중( $P_c$ )로 평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종 침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

### 4.1.3 P-1, 10.0~14.0m 점성토층

P-1 지점의 상부 10.0~14.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.3은  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

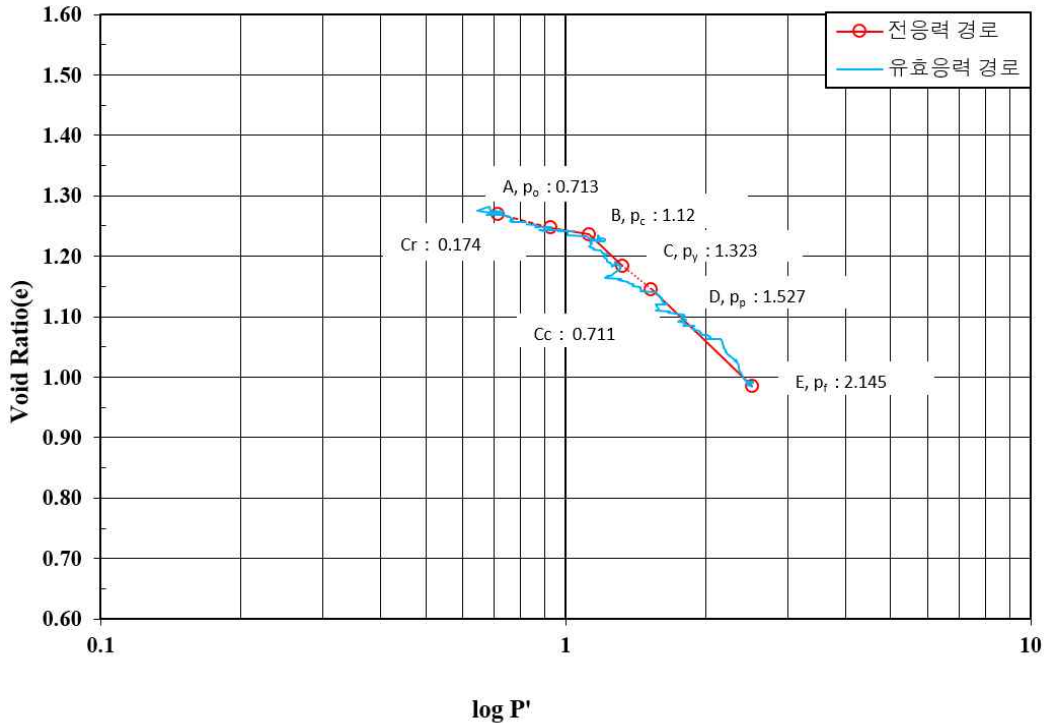


그림 4.3 P-1 지점, 10.0~14.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.4~3.57m 성토 구간이다. 경과기간은 03/11/13~04/3/15 기간으로 약 123일이 경과되었으며 성토속도는 3.25cm/일이다. 유효응력 경로와 전응력 경로는 거의 동일한 경로로 이동한다.

B점은 선행압밀하중( $P_e$ )으로 약 1.12kgf/cm<sup>2</sup>으로 이때의 성토고는 3.57m이다.

B에서 E구간은 성토고 3.57~9.74m로 성토기간 및 대기기간이 포함되었으며, 경과일은 04/3/15~05/11/14 경과기간은 123~722일 약 599일이다. B-E 구간은 유효응력경로

와 전응력 경로가 비교적 잘 일치되는 결과를 보인다. 이는 본 P-1 지점의 성토가 비교적 단계성토로 완속 시공되었고 계측기가 심도 10m 이하의 지반으로 성토로 인한 상재하중에 비해 지중응력이 크기 때문이다. 경과기간이 약 20개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e - \log P'$  곡선을 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선형압밀하중( $P_c$ )으로 평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

## 4.2 P-2 지점 $e - \log P'$ 곡선의 분석 및 고찰

### 4.2.1 P-2, 0.0~4.0m 점성토층

P-2 지점의 상부 0.0~4.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.4는  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

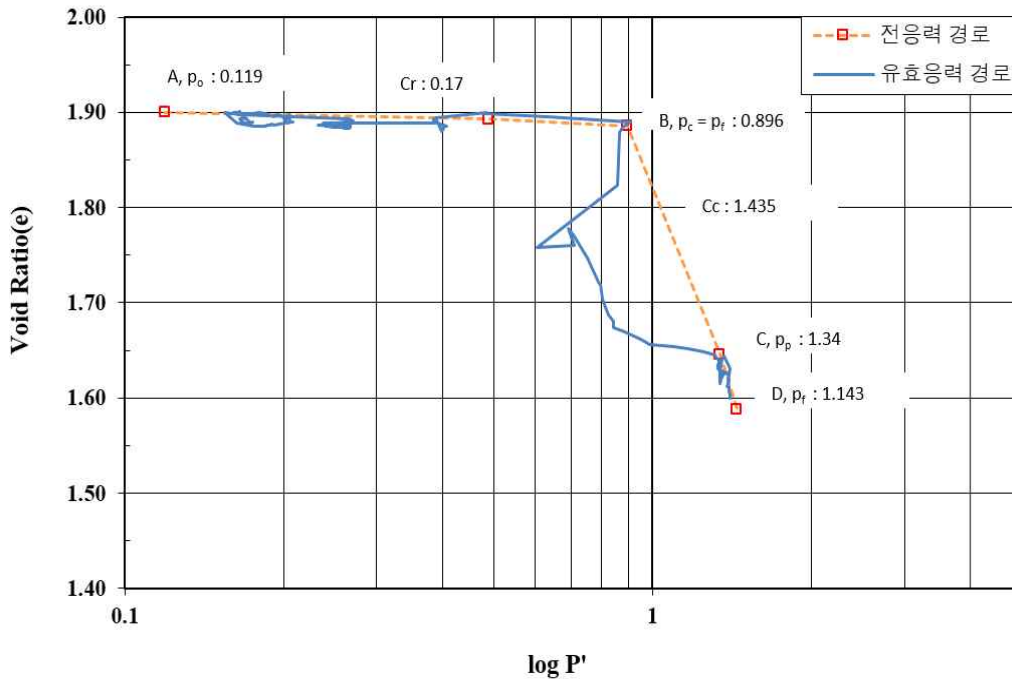


그림 4.4 P-2 지점, 0.0~4.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.47~3.57m 성토 구간이다. 경과기간은 04/7/28~06/5/30 기간으로 약 268일이 경과되었으며 성토속도는 1.84cm/일이다. 유효응력 경로와 전응력 경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약  $0.896\text{kgf/cm}^2$ 으로 이때의 성토고는 4.93m이다.

B에서 C구간은 성토고 4.93~7.16m 성토기간이다. 경과기간은 06/5/30~06/1/24이며 경과일은 268~545일로 약 277일이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경로와 전 응력경로는 서로 이격되었다.

C에서 D구간은 성토고 7.16m 성토구간이다. 경과기간은 06/1/24~07/4/25이며 경과일은 545~1001일로 약 456일이며  $e - \log P'$  곡선상에서는 가장 짧게 보이나 실제로는 약 15개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀 압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e - \log P'$  곡선을 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선행압밀하중( $P_c$ )으로 평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

### 4.2.2 P-2, 4.0~10.0m 점성토층

P-2 지점의 4.0~10.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.5는  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

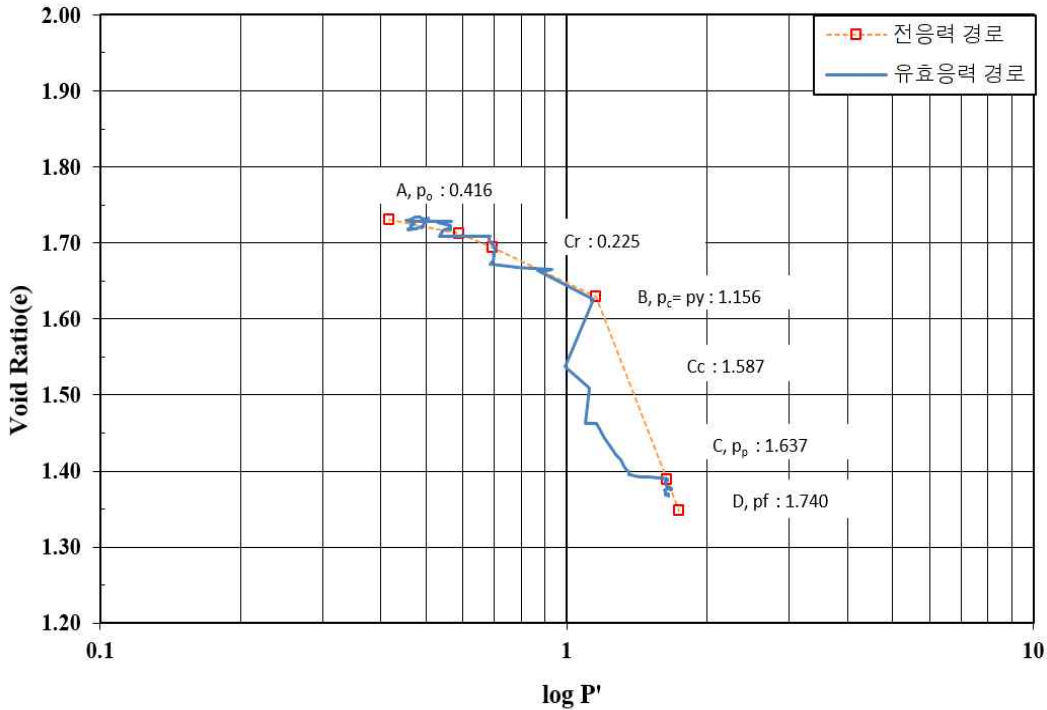


그림 4.5 P-2 지점, 4.0~10.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.47~7.16m 성토 구간이다. 경과기간은 04/7/28~06/5/30 기간으로 약 268일이 경과되었다. 유효응력경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약  $1.156 \text{ kgf/cm}^2$  으로서 이때의 성토고는 4.93m이다.



B에서 C구간은 성토고 4.93~7.16m 성토구간이다. 경과기간은 06/5/4~05/9/30이며 경과일은 280~429일로 약 149일이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경과와 전 응력경로는 서로 이격되었다.

C에서 D구간은 성토고 7.16m 성토구간이다. 경과기간은 05/9/30~07/4/25이며 경과일은 429~1001일로 약 572일이며  $e-\log P'$  곡선상에서는 가장 짧게 보이나 실제로는 약 19개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀 압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가 점이다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e-\log P'$  곡선상에서 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선형압밀하중( $P_c$ )평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

### 4.2.3 P-2, 10.0~16.0m 점성토층

P-2 지점의 10.0~16.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.6은  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

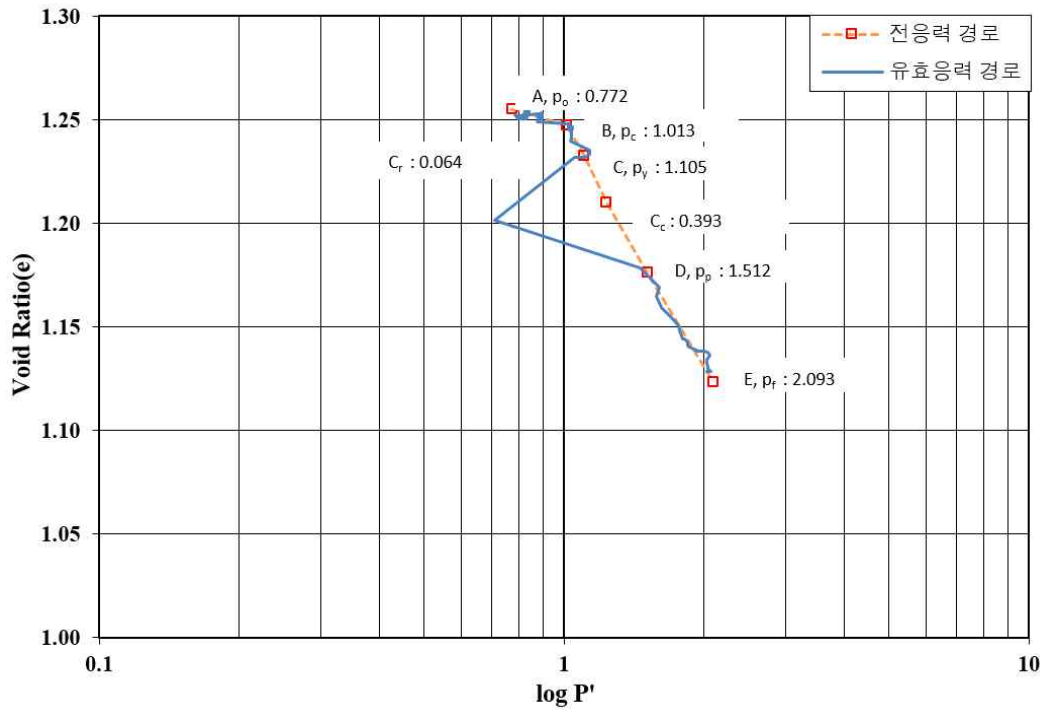


그림 4.6 P-2 지점, 10.0~16.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.47~1.78m 성토 구간이다. 경과기간은 04/7/28~05/2/14 기간으로 약 201일이 경과되었다. 유효응력 경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약  $1.013 \text{kgf/cm}^2$  으로서 이때의 성토고는 1.78m이다.

B에서 C구간은 성토고 1.78~4.93m로 성토기간이며, 경과기간은 05/2/14~05/3/31 경

과기간은 201~246일로 약 45일이다. 비교적 단기간이지만 초기에 처녀압축선을 보여 주고 있다.

C에서 D구간은 성토고 4.93~7.16m 성토구간이다. 경과기간은 05/3/31~05/5/13이며 경과일은 246~289일로 약 43일이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경과와 전 응력경로는 서로 이격되었다.

D에서 E구간은 성토고 7.16m 성토구간이다. 경과기간은 05/5/31~07/4/25이며 경과 일은 289~712일로 약 712일이며  $e-\log P'$  곡선상에서 약 23개월로서 매우 긴 기간 이다. 이 기간중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e-\log P'$  곡선상에 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선형압밀하중( $P_c$ )평가가 가능하여 현장토질상태의 응 력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침 하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

### 4.3 P-3 지점 $e - \log P'$ 곡선의 분석 및 고찰

#### 4.3.1 P-3, 0.0~4.0m 점성토층

P-3 지점의 상부 0.0~4.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.7은  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

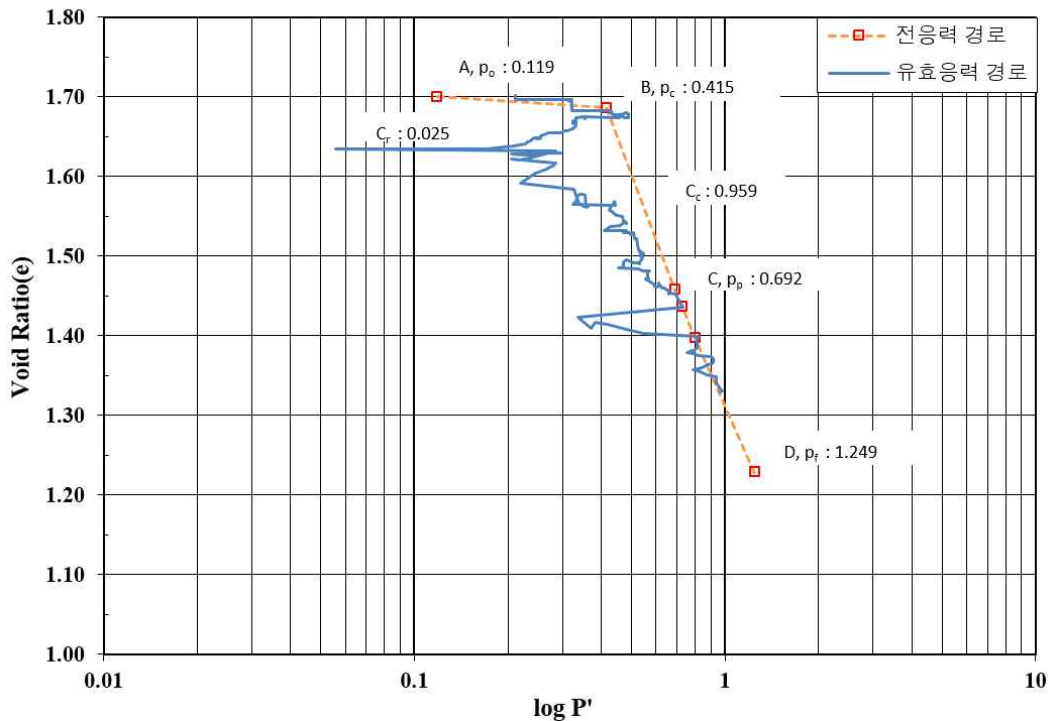


그림 4.7 P-3 지점, 0.0~4.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.5~2.05m 성토 구간이다. 경과기간은 04/1/24~04/3/26 기간으로 약 26일이 경과되었다. 유효응력 경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약  $0.465\text{kgf/cm}^2$ 으로 이때의 성토고는 2.05m이다.

B에서 C구간은 성토고 2.05~6.11m 성토기간이다. 경과기간은 04/3/26~05/3/9이며 경과일은 62~410일로 약 348일이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경과와 전 응력경로는 서로 이격되었다.

C에서 D구간은 성토고 6.11m 성토 종료 후 대기기간이다. 경과기간은 05/3/9~06/6/28이며 경과일은 410~886일로 약 410일이며  $e - \log P'$  곡선상에서 약 13개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간 중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

본 연구지점은 쌍곡선법으로 예측한 최종 침하량에 도달되었음에도 잔류간극수압이 많이 남아 있어 잔류침하가 장기적으로 발생되었고 이로인한 관로, 포장등의 기반시설이 손괴되는등의 문제점이 발생되었다.

### 4.3.2 P-3, 4.0~10.0m 점성토층

P-3 지점의 4.0~10.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.8은  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

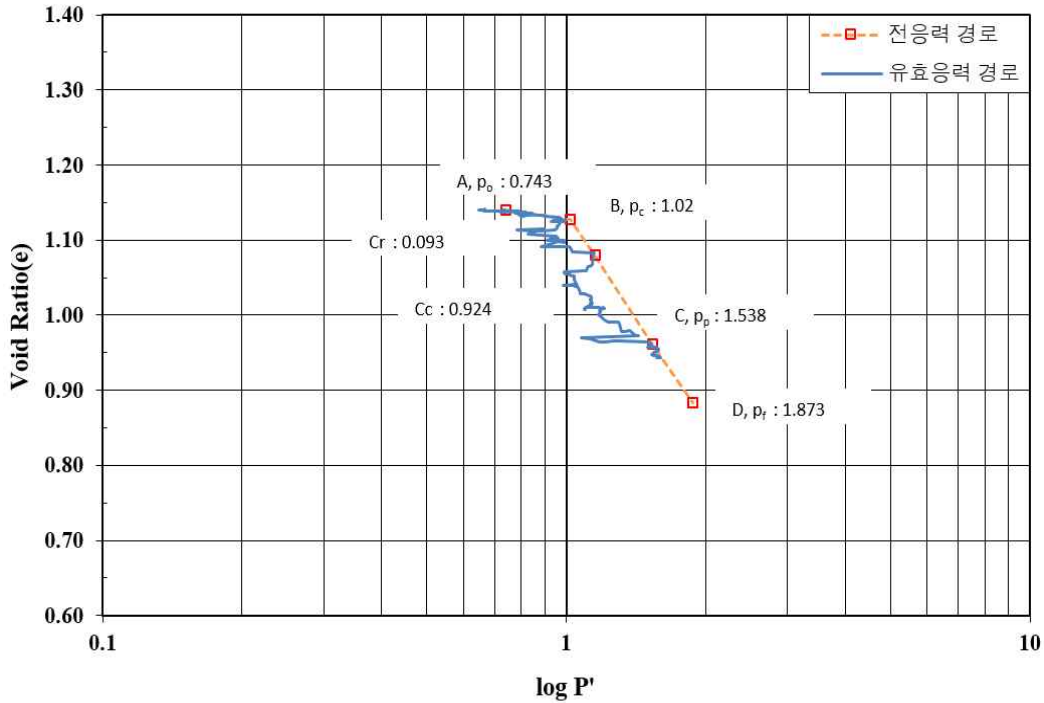


그림 4.8 P-3 지점, 4.0~10.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.5~2.05m 성토구간이다. 경과기간은 04/1/24~04/3/11 기간으로 약 47일 동안 경과되었다. 유효응력경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약  $0.564\text{kgf/cm}^2$ 으로 이때의 성토고는 2.05m이다.

B에서 D구간은 성토고 2.05~6.11m 성토구간이다. 경과기간은 04/3/11~05/3/9이며

경과일은 47~410일로 약 363일이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경로와 전 응력경로는 서로 이격되었다.

D에서 E구간은 성토고 6.11m 성토구간이다. 경과기간은 05/3/9~06/6/28이며 경과일은 410~886일로 약 410일이며  $e - \log P'$  곡선상에서 약 13개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간 중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀 압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

본 연구지점은 잔류간극수압이 많이 남아 있어 잔류침하량이 과도하게 남아 있으나 쌍곡선법으로 예측한 침하량은 잔류침하량이 거의 남아 있지 않은 것으로 검토되어 후속공정을 진행하였으나 단지 곳곳에 침하가 발생하였다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e - \log P'$  곡선을 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선행압밀하중( $P_c$ )으로 평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

### 4.3.3 P-3, 10.0~15.0m 점성토층

P-3 지점의 10.0~15.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.9는  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

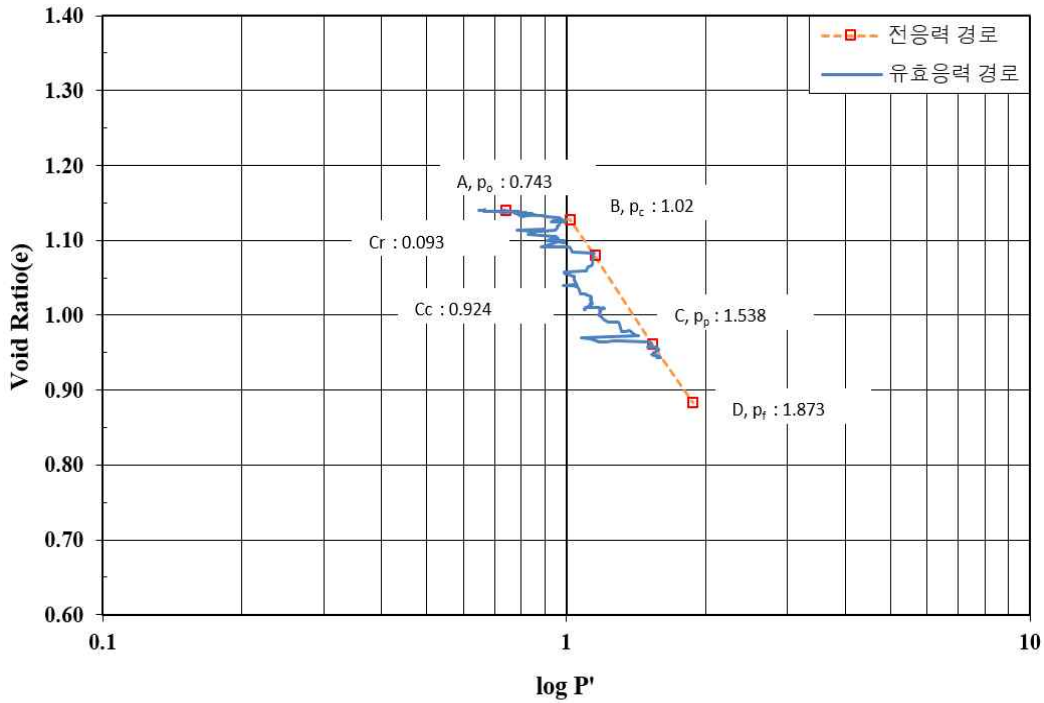


그림 4.9 P-3 지점, 10.0~15.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.5~2.05m 성토 구간이다. 경과기간은 04/1/24~04/4/9 기간으로 약 76일이 경과되었다. 유효응력경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약  $1.02\text{kgf/cm}^2$ 으로 이때의 성토고는 2.4m이다.

B에서 C구간은 성토고 2.05~6.11m 성토구간이다. 경과기간은 04/4/9~05/5/3이며 경



과일은 76~465일로 약 389일 기간이다. 과잉간극수압이 발생에 따라 유효응력경로와 전응력경로는 서로 이격되었다.

C에서 D구간은 성토고 6.11m 성토구간이다. 경과기간은 05/5/3~06/6/28이며 경과일은 465~886일로 약 421일이며  $e - \log P'$  곡선상에서 약 13개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간 중 성토의 진행에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

본 연구지점은 잔류간극수압이 많이 남아 있어 잔류침하량이 과도하게 남아 있으나 쌍곡선법으로 예측한 침하량은 잔류침하량이 거의 남아 있지 않은 것으로 검토되어 후속공정을 진행하였으나 단지 곳곳에 침하가 발생하였다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e - \log P'$  곡선을 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선행압밀하중( $P_c$ )으로 평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

### 4.3.4 P-3, 15.0~24.0m 점성토층

P-3 지점의 15.0~24.0m 두께의 점성토층의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다.

그림 4.10은  $e - \log P'$  곡선상에서의 간극수압의 발생과 소산 그리고 간극비 감소에 따른 유효응력경로를 표기하였다.

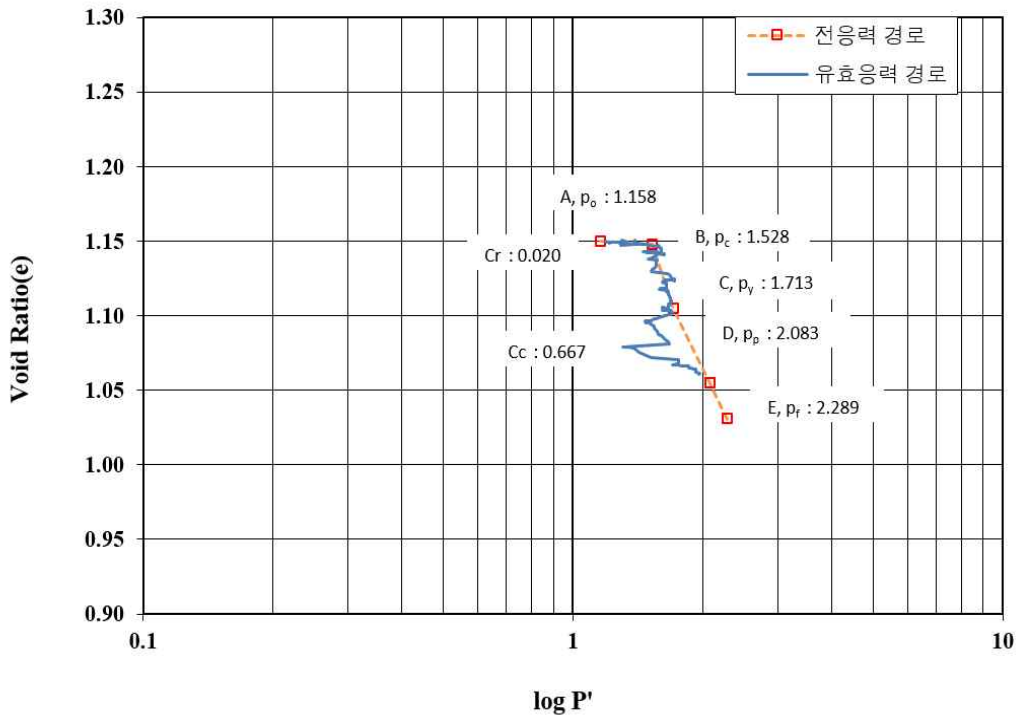


그림 4.10 P-3 지점, 15.0~24.0m 점성토층의  $e - \log P'$  곡선

A에서 B구간은 성토고 0.5~2.05m 성토구간이다. 경과기간은 04/1/24~04/4/3 기간으로 약 70일이 경과되었다. 유효응력경로와 전응력경로는 거의 동일한 경로를 가지며 이는 선행압밀하중 이전구간으로 간극비 변화가 적고 발생간극수압이 작아 생기는 현상이다.

B점은 선행압밀하중( $P_c$ )으로 약  $1.528\text{kgf/cm}^2$ 으로 이때의 성토고는 2.4m이다.

B에서 C구간은 성토고 2.05~5.6m 성토구간이다. 경과기간은 04/4/9~04/11/20이며

경과일은 70~301일로 약 2319일이다. 유효응력경로와 전응력경로는 서로 일치하는 처녀압밀곡선을 따라 진행한다.

C에서 D구간은 성토고 5.6m에서 6.11m로 성토구간이다. 경과기간은 04/11/20~06/6/28이며 경과일은 301~886일로 약 585일이며  $e-\log P'$  곡선상에서 약 19개월로서 매우 긴 기간이다. 이 기간 중 유효응력경로는 전응력경로로 접근하고 있다. 이는 과잉간극수압의 소산이 매우 느리게 진행되어 발생하는 현상이다.

압밀이 진행됨에 따라 유효응력경로는 처녀압밀선을 따라 이동한다. 이 처녀압밀선과 간극수압의 소산된 점이 최종침하량이 평가점이다.

본 연구지점은 잔류간극수압이 많이 남아 있어 잔류침하량이 과도하게 남아 있으나 쌍곡선법으로 예측한 침하량은 잔류침하량이 거의 남아 있지 않은 것으로 검토되어 후속공정을 진행하였으나 단지 곳곳에 침하가 발생하였다.

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e-\log P'$  곡선을 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선행압밀하중( $P_c$ )으로 평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종성토 후 단기에 바로 압축지수( $C_c$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있다.

#### 4.4 성토형태별 $e-\log P'$ 고찰

P-1 현장  $e-\log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다. 성토고는 8.84m 이며 일평균 성토속도는 약 2.5cm/일이다. 간극수압을 고려한 유효응력 경로는 성토단계를 제외하곤 비교적 전응력 경로를 잘 따르고 있다.



그림 4.11 P-1 지점의 경과일 별 성토고

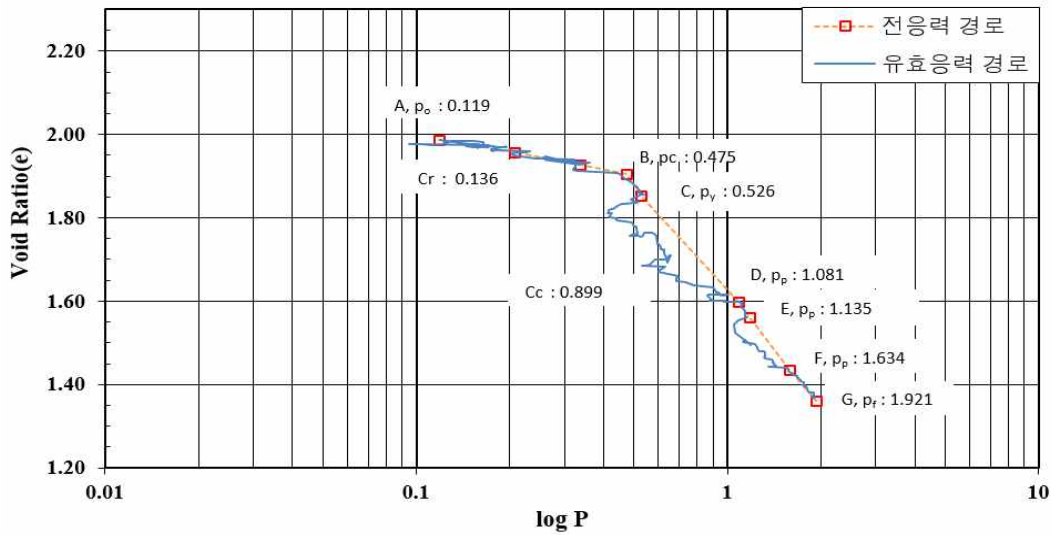


그림 4.12 P-1 지점의  $e-\log P'$  곡선상 간극비 변화

P-2 지점의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다. 성토고는 7.16m 이며 일평균 성토속도는 약 12cm/일이다. 간극수압을 고려한 유효응력경로는 급속성토로 인하여 전응력에서 크게 이격되어 진행하며 간극수압 소산에 따라 전응력 경로로 복원되어 압밀이 진행된다.



그림 4.13 P-2 지점의 경과일 별 성토고

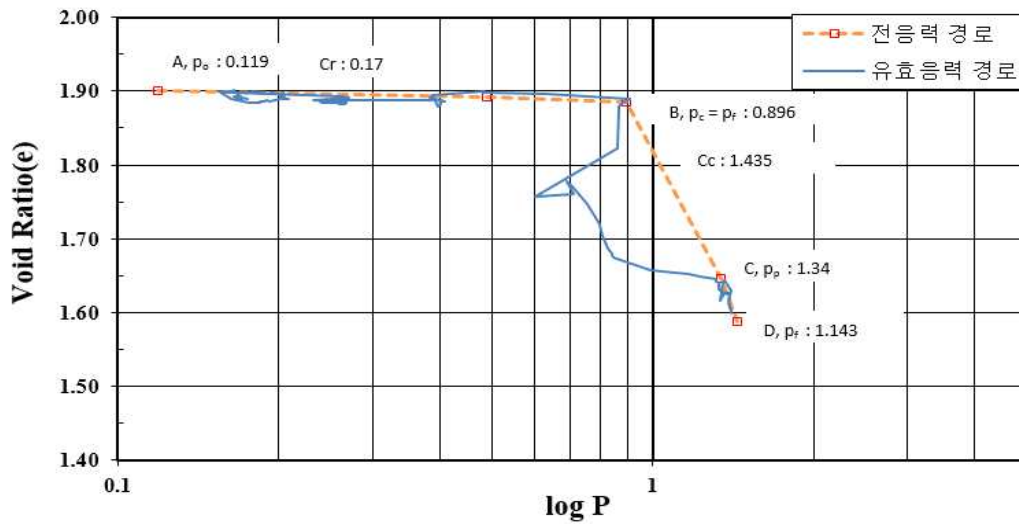


그림 4.14 P-2 지점의  $e - \log P'$  곡선상 따른 간극비 변화

P-3 지점의 현장  $e - \log P'$  곡선을 성토단계에 따라 간극비 변화의 양상을 분석하였다. 성토고는 6.11m 이며 일평균 성토속도는 약 1.9cm/일이다. 과잉 간극수압이 과다하게 발생하였고 이의 소산 또한 완속으로 진행되었다. 그리고 쌍곡선법으로 예측한 평가침하량에 도달되었어도 잔류간극수압 소산으로 인하여 크리프침하로 보이는 침하가 장기적으로 발생하였다.



그림 4.15 P-3 지점의 경과일 별 성토고

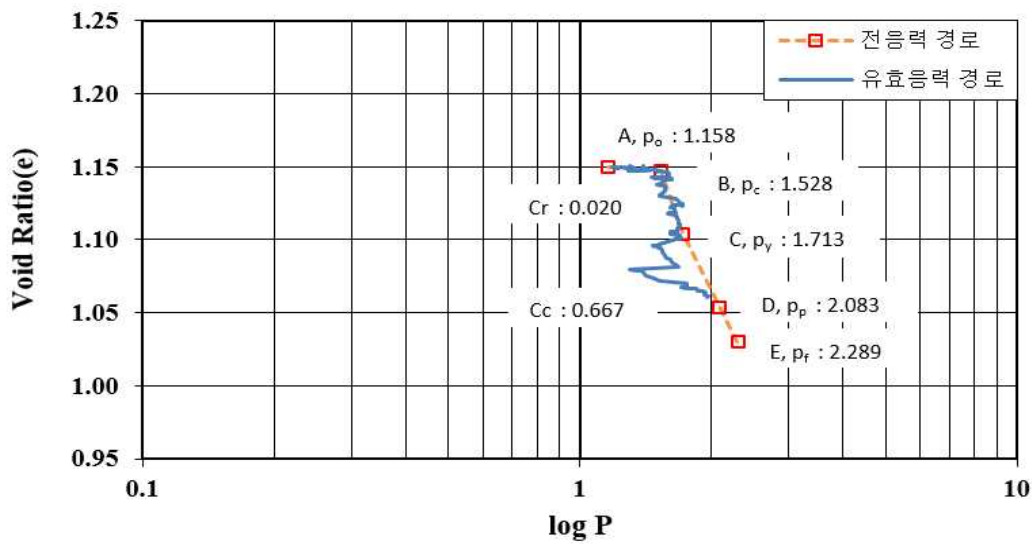


그림 4.16 P-3 지점의  $e - \log P'$  곡선상 따른 간극비 변화

간극수압계와 침하계를 이용하여  $e - \log P'$  도표를 작도하여 침하평가를 수행하면 성토과정에서 재압축지수( $C_r$ )와 선행압밀하중( $P_c$ )으로 평가가 가능하여 현장토질상태의 응력이력을 평가할 수 있으며 최종 성토전이나 성토완료 후 단기에 바로 압축지수( $C_e$ )를 평가하여 최종침하량을 도출할 수 있었고 이에 따라 압밀진행여부를 정량적으로 산출할 수 있었다.

본 연구에서 최종 압밀진행 전 약 10개월 이전부터 연약지반 압밀진행 과정의 모니터링이 가능하였고 완속성토, 급속성토 등 지점별 성토형태에 따라 곡선의 형태가 달라지므로 시공중 성토관리에도 도움이 될 것으로 판단된다.

## 제 5 장 결 론

본 연구는 지금까지 계측침하량을 활용한 쌍곡선법 등의 기존 이론에만 의존했던 침하량 예측 기법 대신 간극수압계 및 층별침하계를 동시에 활용함으로써 간극수압의 소산 정도를 Terzaghi 유효응력이론에 적용하여 현장 압밀  $e-\log P'$  곡선으로 작도하고 그 결과값을 이용한 새로운 침하예측기법을 정립하였으며 그 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 간극수압계와 층별침하계를 이용한 현장 계측자료로  $e-\log P'$  곡선을 작도한 결과 재압축지수( $C_r$ ), 선행압밀하중( $P_c$ ), 압축지수( $C_c$ )의 현장토질정수를 구할 수 있었으며, 구해진 현장 토질정수는 표준압밀시험에서의 토질정수와 비교하여 시료 추출과정에서 발생하는 교란 효과가 배제되어 현장여건을 보다 잘 반영하고 있다.
2. 또한  $e-\log P'$  곡선법을 이용한 분석결과, 완속 성토시 곡선경로는 재압축선과 처녀압축선의 범위를 크게 벗어나지 않았으며, 이는 간극수압의 소산이 충분이 이루어진 결과로 판단된다. 반대로 급속 성토시에는 곡선경로가 재압축선과 처녀압축선의 범위를 크게 벗어나는데, 이는 성토속도가 시방기준보다 너무 빨라 간극수압 소산이 충분이 이루어지지 않는 원인으로, 이러한 현상을 종합적으로 볼때  $e-\log P'$  곡선을 이용하여 성토속도 조절등의 시공관리 또한 가능할 것으로 판단된다.
3. 본 연구에서는 지금까지 국내외 현장에서 많이 사용된 쌍곡선법과의 비교를 통해  $e-\log P'$  곡선법의 적용성과 신뢰성을 검토하였다. 분석결과 과잉간극수압의 소산 정도에 따라 쌍곡선법의 결과와  $e-\log P'$  곡선법의 결과가 상이하게 나타났다. 과잉간극수압의 소산이 원활하여 잔류간극수압이 매우 작을 경우에는 쌍곡선법과  $e-\log P'$  곡선법의 분석값이 거의 일치하였으나 잔류간극수압이 상대적으로 클 경우 쌍곡선법으로 예측한 최종침하량 값이  $e-\log P'$  곡선법보다 작게 산출되었다. 이는 잔류간극수압이 장기간에 걸쳐 소산되면서 추가적인 침하가 발생할 수 있는 것을 나타내는 결과이다. 대상지점의 장기 관찰결과 추가 침하가 발생하여 기반시설 손괴등의 문제점을 초래하였다.



4. 상기 내용을 종합적으로 분석한 결과 본 연구의  $e-\log P'$  곡선법은 간극수압계와 층별침하계를 이용한 유효응력이론으로 평가함으로, 침하계만을 이용한 쌍곡선법보다 더욱 논리적이고 정확한 침하예측이 가능하며, 계측결과에 얻어진 토질정수를 이용해 최종 침하량 예측 시기 또한 최종 성토 이전으로 앞당겨 현장의 침하안정 관리에 유익할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 강민수(2008), “압밀이론과 현장계측 침하량의 차이에 의한 전단변형 침하량 산정”, 석사학위논문, 공주대학교
2. 김승일(2014), “CRS와 표준압밀시험에 위한 석분의 압밀특성 비교 연구”, 석사학위논문, 대전대학교
3. 김상규(2007), “토질역학-이론과응용”, 청문각
4. 김현태(1997), “압밀이론과 현장계측 침하량의 차이에 의한 전단변형 침하량 산정”, 석사학위논문, 명지대학교
5. 권덕희(2014), “김포지역 연약지반의 압밀침하 특성과 장래침하량 예측”, 석사학위논문, 중앙대학교
6. 류승석(2012), “실내시험과 현장계측에 의한 연약 점성토 지반의 압밀특성 연구”, 박사학위논문, 전남대학교
7. 박철호(2009), “연약지반 압밀침하예측에 관한 연구”, 석사학위논문, 부경대학교
8. 백영식(2013), “강의식으로 풀어쓴 토질역학”, 구미서관
9. 오익주(2002), “알정변형률과 표준압밀시험을 통한 재구성된 점토의 압밀특성 연구”, 석사학위논문, 전남대학교
10. 윤찬영, 이상인, 백승경, 정충기(2007), “점중하중 재하 지반의 계측기반 침하 예측 방법의 개발”, 대한토목학회논문집, 제 27권, 6호, pp.425~432.
11. 이경준(2008), “삼축압축시험(CU)에서 정규압밀 해성점토의 압밀소요시간과 강도증가율에 관한 연구”, 박사학위논문, 부산대학교
12. 이택수(2008), “연약지반에서의 실측침하량과 신뢰성이론을 고려한 예측압밀침하량의 비교”, 석사학위논문, 대전대학교
13. 이희훈, 광수정, 김형주, 장인규(1997), “실측에 의한 압밀침하예측법의 평가”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제 1997권, 3호, pp.289~292.
14. 장윤석(2004), “점토층의 압밀침하량 산정을 위한 초기간극비와 간극비 증분의 크기에 관한 고찰”, 석사학위논문, 부산대학교
15. 차지연(2013), “남해안 준설매립지반의 압밀 특성치 분석”, 석사학위논문, 고려대학교
16. 한국도로공사(2001), “도로설계요령 제 2권 토공 및 배수편”, pp.299~318.

17. Aboshi, H. (1973), "An Experimental Investigation on The Similitude in The Consolidation of A Soft Clay, Including The Secondary Creep Settlement", Proceedings, 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Specialty Session 2, Vol. 4, No. 3, p.8.
18. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Transaction ASCE, Vol. 113, No. 2346, pp.718~742.
19. Baker, G. A. and Crosbie, P. J. (1994), "Consumer Preferences for Food Safety Attributes: A Market Segment Approach.
20. Bjerrum, L. (1967), "Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings", 7th Rankine Lecture, Geotechnique, Vol. 17, No. 2, pp.81~118.
21. Carrillo, N. (1942), "Simple Two and Three Dimensional Case in the Theory of Consolidation of Soils", Journal of Mathematics and Physics, Vol. 21, pp.1~5.
22. Casagrande, A. (1936), "The determination of The Preconsolidation Load and It's Practical Significance", Proceedings 1st ICSMF, Vol. 3 p.60.
23. Chung, S. G., Lee, N. K. and Kim, S. R. (2009), "Hyperbolic Method for Prediction of Prefabricated Vertical Drains Performance", J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 10, pp.640~642.
24. Gibson, R. E., England, G. L. Hussey, M. J. L. (1967), "The Theory of Onedimensional Consolidation of Saturated Clays", Geotechnique, Vol. 17, No. 3, pp.261~273.
25. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", Proc. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 3, pp.677~682.
26. Imai G. (1989), "A Unified Theory of One Dimensional Consolidation with Creep", Proceedings, 12th ICSMF Vol. 1, pp.57~60.
27. Imai, G., Tanaka, Y. and Saegusa, H. (2003), "One Dimensional Consolidation Modeling Based on The Isotache Law for Normally Consolidated Clays." Soils and Foundations, Vol. 43, No. 4, pp.173~188.
28. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. and Lancellotta, R.(1985), "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils", Proc., 11th Int. Conf.

- Soil Mech. Found. Eng., 1, San Francisco, pp.57~154.
30. Kabbaj, M., Oka, F., Leroueil, S. and Tavenas, F. (1986), "Consolidation of Natural Clays and Laboratory Testing, Consolidation of Soils : Testing and Evaluation", ASTM, Special Technical Publication No. 829, pp.378~404.
  31. Kabbaj, M., Tavenas, F., Leroueil, S. (1988), "In-situ and Laboratory Stress-strain Relationships", Geotechnique, Vol. 38, No. 1, pp.83~100.
  32. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlessor, F. and Poulos, H. G.(1977), "Stress Deformation and Strength Characteristics", State-of-art-report, Proc., 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 2, Tokyo, pp.421~494.
  33. Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R. (1985), "Stress Strain Rate Relation for The Compressibility of Sensitive Natural Clays." Geotechnique, Vol. 35, No. 2, pp.159~180.
  34. Lo, D. O. K. (1991), "Soil Improvement by Vertical Drains". PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp.190~231.
  35. Mesri, G. (1973), "Coefficient of Secondary Compression", ASCE, Vol. 99, No. 1, pp.123~137.
  36. Mesri, G. and Rokhsar, A. (1974), "Theory of Consolidation for Clays", ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, No. 8, pp.889~904.
  37. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), "Time and Stress-compressibility Interrelationship", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. 5, pp.417~430.
  38. Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985), "The Uniqueness of The End-of-primary (EOP) Void Ratio Effective Stress Relationship", Discussion Session 1/A, Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, pp.587~590.
  39. Mesri, G., Ajlouni, M. A., Feng, T. W. and Lo, D. O. K. (2001), "Surcharging of Soft Ground to Reduce Secondary Settlement". Int. Conf. on Soft Soil Engineering, Hong Kong, pp.55~65.
  40. Mikasa, M. (1963), "The Consolidation of Soft Clay A New Consolidation Theory and Its Application". Kajima Institution Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan, pp.126~140.

41. Onoue, A. (1988a), "Consolidation of Multilayered Anisotropic Soils by Vertical Drains with Well Resistance", *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 3, pp.75~90.
42. Onoue, A. (1988b), "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 4, pp.165~174.
43. Rendulic, L. (1935), "Der Hydrodynamische Spannungsausgleich in Zentral Entwässerten Tonzylindern", *Wasserwirtsch. U. Tech.*, Vol. 2, pp.250~253.
44. Sekiguchi, H. and Torihara, M. (1976), "Theory of One Diemsional Consolidation of Clays with Consideration of Their Rheological Properties", *Soils and Foundations*, Vol. 16, No. 1, pp.27~44.
45. Skempton, A. W. and Jones, O. T. (1944), "Notes on The Compressibility of Clays", *Quarterly Journal of the Geological Society*, Vol. 100, pp.119~135.
46. Taylor, D. W. (1942), "Research on Consolidation of Clays." Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Sanitary Engineering, Serial, Vol. 82, p.147.
47. Taylor, D. W. and Merchant, W. (1940), "A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression." *J. Maths. and Physics*, Vol. 19, No. 3, pp.167~185.
48. Terzaghi, K. (1925), "Erdbaumechanik auf Boden Physikalischen Grundlagen". Deuticke, Vienna.
49. Yin, J. H. and Graham, J. (1989). "Viscous Elastic Plastic Modelling of One Dimensional Time Dependent Behavior of Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, No. 2, pp.199~209.
50. Yin, J. H. and Graham, J. (1994), "Equivalent Times and One Dimensional Elastic Visto Plastic Modeling of Time Dependent Stress-strain Behavior of Clays", *Canadian Geotechnique Journal*, Vol. 31, pp.42~52.
51. Yoshikuni, H and Nakanodo, H. (1974), "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp.35~46.
52. Yoshikuni, H., Kusakabe, O., Hirao, T. and Ikegami, S. (1994). "Elasto viscous Modeling of Time Dependent Behaviour of Clay." *Proc. of the 13th ICSMFE*, New Delhi, Vol. 1, pp.417~420.

53. Yoshikuni, H., Okada, M., Ikegami, S. and Hirao, T. (1995). "One Dimensional Consolidation Analysis Based on An Elasto-viscous Liquid Model." Proc. of The International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima 1995, Vol. 1, pp.233~238.
54. Zeng, G. X. and Xie, K. H. (1989), "New Development of the Vertical Drain Theories", Proc. 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 2, pp.1435~1438.