



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](#)

2023년 8월

박사학위논문

계측데이터를 이용한 연약지반의 역해석 침하량 예측

조선대학교 대학원

토목공학과

조준호

계측데이터를 이용한 연약지반의 역해석 침하량 예측

**Estimation of Back Analyzed Settlement of Soft Ground Using
Measured Data**

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원

토목공학과

조준호

계측데이터를 이용한 연약지반의 역해석 침하량 예측

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함


2023년 4월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

조 준 호


조준호의 박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 金 聖 洪  (인)

위 원 조선대학교 교수 鄭 明 薰  (인)

위 원 조선대학교 교수 朴 正 雄  (인)

위 원 조선이공대학교 교수 朴 晁 浩  (인)

위 원 조선대학교 교수 金 大 聖  (인)

2023년 6월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 국내·외 연구동향	3
1.3 연구내용 및 방법	6
제 2 장 이론적 배경	7
2.1 압밀이론	7
2.1.1 압밀이론의 필요성	7
2.1.2 Terzaghi의 1차원 압밀이론	7
2.1.3 압밀도	10
2.1.4 평균압밀도	11
2.1.5 압밀시험	12
2.1.6 압밀계수의 추정	13
2.1.7 간극비-하중 곡선	16
2.1.8 압밀침하량 산정	21
2.2 현장계측자료에 의한 침하예측 이론	24
2.2.1 쌍곡선법	24
2.2.2 Hoshino법	25
2.2.3 Asaoka법	26
2.2.4 Monden법	27

2.2.5 Terzaghi(Curve fitting)법	28
2.3 역해석 이론	29
2.3.1 개요	29
2.3.2 역해석의 기법의 종류	30
2.3.2 역해석의 기법을 이용한 최종침하량 산정	31
2.4 계측기 관리 기준	32
제 3 장 실내실험 및 침하량 산정	36
3.1 개요	36
3.2 연구대상지역	36
3.3 연구대상지역의 지반조사 및 실내실험	37
3.3.1 시추 및 현장시험	38
3.3.2 기본물성시험	39
3.3.3 역학적 시험	40
3.4 설계침하량 산정	41
3.5 계측기를 통한 최종침하량 산정	42
제 4 장 실험결과 및 침하량 검토	45
4.1 지층구성	45
4.2 실내실험 결과	49
4.3 설계 및 계측침하량 검토	60
4.3.1 해석결과	60
4.3.2 설계침하량의 계측침하량 검토결과	66
4.4 역해석침하량 검토 결과	70
4.4.1 계측값을 이용한 압밀곡선 작도	70

4.4.2 설계침하량, 역해석하량, 계측침하량 비교	76
4.4.3 압축지수와 침하량과의 관계	82
4.4.4 선행압밀하중과 침하량과의 관계	83
4.5 통계분석에 따른 침하량 신뢰도 검토	84
4.5.1 RMSE 분석	84
4.5.2 선형회귀 분석	86
제 5 장 결 론	88
참고문헌	90

표 목 차

표 2.1	계측기기 종류 및 적용 내용	33
표 2.2	설치된 계측기의 측정빈도	33
표 2.3	층별침하계	34
표 2.4	지하수위계	34
표 2.5	간극수압계	35
표 2.6	지중경사계	35
표 3.1	계측항목 및 수량	43
표 4.1	지층심도표	46
표 4.2	표준관입시험 결과	47
표 4.3	기본물성실험 - 얇은구간	50
표 4.4	기본물성실험 - 깊은구간	53
표 4.5	역학적시험 - 얇은구간	56
표 4.6	역학적시험 - 깊은구간	58
표 4.7	연약지반의 설계 및 계측결과 - 도로구간(1-1공구)	61
표 4.8	연약지반의 설계 및 계측결과 - 도로구간(1-2공구)	62
표 4.9	연약지반의 설계 및 계측결과 - 도로구간(1-3, 1-4공구)	63
표 4.10	연약지반의 설계 및 계측결과 - 단지구간	64
표 4.11	연약지반의 설계 및 계측결과 - 배수로구간	65
표 4.12	T-1-01단면의 실내실험과 현장계측결과의 비교(0.0 ~ 4.14m구간)	72
표 4.13	T-1-01단면의 실내실험과 현장계측결과의 비교(4.14m ~ 10.13m구간)	73
표 4.14	T-1-01단면의 실내실험과 현장계측결과의 비교(10.13m ~ 14.97m구간)	74
표 4.15	T-1-01단면의 실내실험과 현장계측결과의 비교(14.97m ~ 21.18m구간)	75
표 4.16	집중공 내 설계침하량 결과	76
표 4.17	집중공 내 역해석침하량 결과	77
표 4.18	집중공 내 계측침하량 결과	78
표 4.19	계측항목 및 수량	84
표 4.20	침하량간 상관관계 분석결과	86

그림 목 차

그림 2.1 1차원 압밀흐름	8
그림 2.2 압밀도 구하는 방법	10
그림 2.3 $\log T_v - U$ 의 관계	14
그림 2.4 $\sqrt{T_v} - U$ 관계	15
그림 2.5 간극비-하중곡선	17
그림 2.6 Casagrande의 선행압밀하중 결정 방법	18
그림 2.7 처녀압밀곡선에서의 압축지수 결정	18
그림 2.8 팽창 - 재압축곡선	20
그림 2.9 압밀침하량 산정	21
그림 2.10 정규압밀 상태 압밀침하량	22
그림 2.11 과압밀 상태 압밀침하량	23
그림 2.12 쌍곡선 법	24
그림 2.13 Hoshino 법	25
그림 2.14 Asaoka 법	26
그림 2.15 Terzaghi의 Curve fitting법	28
그림 2.16 계측기를 이용한 침하곡선 작도	31
그림 3.1 연구대상지역	36
그림 3.2 지반조사 위치도	37
그림 3.3 시추 및 현장시험 전경	38
그림 3.4 기본물성실험 전경	39
그림 3.5 역학적 시험 전경	40
그림 3.6 수치해석을 위한 연약지반 모델링	41
그림 3.7 계측기 매설 위치도	42
그림 3.8 계측기 매설 전경	44
그림 4.1 목표설계침하량과 계측분석침하량 비교	66
그림 4.2 계측기 매설 위치도(집중공)	71
그림 4.3 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(0.0 ~ 4.14m구간)	72
그림 4.4 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(4.14m ~ 10.13m구간)	73

그림 4.5 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(10.13m ~ 14.97m구간) 74
 그림 4.6 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(14.97m ~ 21.18m구간) 75
 그림 4.7 설계침하량, 역해석침하량, 계측침하량 비교 79
 그림 4.8 실내실험과 계측값의 압축지수 비교 80
 그림 4.9 실내실험과 계측값의 선행압밀하중 비교 81
 그림 4.10 압축지수와 최종침하량과의 관계 82
 그림 4.11 선행압밀하중과 최종침하량과의 관계 83
 그림 4.12 RMSE분석 결과 85
 그림 4.13 침하량 상관관계 분석곡선 86

ABSTRACT

Estimation of Back Analyzed Settlement of Soft Ground Using Measured Data

Jo, Joon Ho

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

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

When constructing buildings or structures on soft ground, the most important considerations are settlement management and safety management, which often differ significantly from actual ground behavior and design plans because the ground is uneven and wide, making it almost impossible to predict the actual behavior even if field surveys and laboratory tests are conducted. Thus, measuring instruments are buried in the site and implemented through settlement management.

In the case of the existing soft ground design, the design settlement was predicted using the results of ground surveys and laboratory experiments on the project area. However, the difference between the design settlement derived through this and the measurement settlement measured using the instrument was not narrowed. This can be seen as a difference due to the scale effect, and intact undisturbed soil is that it is impossible to collect a soil at the same time as the soil is drilled, and the laboratory experimental value derived with these samples is believed to affect the accurate prediction of design settlement.

Therefore, this study attempted to compare and analyze the difference between the design settlement estimated by the theoretical formula during the design of soft ground and the measurement settlement measured during construction, along with the settlement prediction through back analysis. In the case of

design settlement, K-embank, a design ground constant and soft ground analysis program calculated through laboratory experiments after ground investigation, was used. In the case of measurement settlement, a sub-surface plate, a stratum settlement meter, and a pore water pressure meter were buried in the study area. Analysis of each final settlement was performed using the Asaoka and Hoshino methods.

As a result of comparing and analyzing design settlement and measurement settlement after calculating the design settlement amount, the design settlement amount was higher than the measurement settlement amount in all 81 surface settlement plates. This confirmed that the clay layer among Terzaghi theory was not actually homogeneous by layer in that the clay layer was homogeneous and that the one-dimensional compression theory was an infinite plane, which differed from the theory because local compression existed in the actual field.

In addition, even if the design performs a precise and theoretical primary compact design, many variables that occur in the actual field should be considered because of the difference caused by the scale effect. Scale effect can be considered in general academic research, but it is common not to consider it in practice.

Other environmental factors include all situations that can be considered in the design, such as the drainage material's characteristics and the soil's properties. In the case of drainage materials, the performance of vertical drainage materials, the permeability coefficient and thickness of horizontal drainage materials, and the soil speed are also different from those of the design. In addition, unlike the ideal conditions of the horizontal drainage material installation design, there are equal installation in the field and a decrease in the permeability of the horizontal drainage material. In addition, unlike the design, the soil volume and soil speed may differ from the design soil speed due to the securing of the soil site, weather conditions, and various conditions of the construction company, so there is a limit that the design and site conditions cannot be accurately matched.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

국토이용의 효과를 증대시키기 위하여 임해지역을 매립하고 인공적인 공단을 조성하여 도로를 건설하는 등 연약지반 이용이 증대되고 있다. 그러나 우리나라의 서·남해안은 주로 연약한 점성토층으로 형성되어 있어 토목공사 수행 시 연약지반을 개량할 경우가 날로 증가하고 있으며 이로 인한 공사비가 증가하고 있을 뿐만 아니라 연약지반 개량공법이 토목공사의 큰 비중을 차지하고 있다.

국내 서해안지역은 연약지반으로 구성되어 있으며 이 지역에 대한 택지 및 산업단지 조성이 활발히 수행되어왔다. 연약지반 현장에서 단지 매립은 필수적으로 압밀침하에 대한 문제가 발생하는데 이에 따른 해결방법으로 계측 및 분석을 수행하였으나, 이에 대한 정확한 성과분석은 기대에 미치지 못하였다. 이는 기존의 연약지반의 압밀특성분석이 침하형태에 따른 해석으로 국한되어 있어 과잉간극수압의 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 계측기를 매설하여 침하관리를 통하여 실시하고 있다.

일반적으로 도로나 단지에 대한 연약지반 설계에 있어서 신뢰성이 낮은 지반정수의 산정은 연약지반개량 공사비 또는 공용 이후 유지보수비의 증가를 초래하므로 그 지역을 대표할 수 있는 시험결과를 토대로 명확히 결정되어야 한다. 그러나 실제 현장지반의 정확한 지반정수를 산정한다는 것은 대단히 어려운 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 근래 대두되고 있는 방법이 계측자료를 이용한 역해석(Back-analysis)기법이다.

기존의 연약지반 설계의 경우 해당 사업지역에 대하여 지반조사 및 실내시험을 수행한 결과값을 이용하여 설계침하량을 예측하였으나, 이를 통해 도출된 설계침하량과 계측기를 이용해 계측한 계측침하량의 차이가 좁혀지지 않았다. 이는 Scale effect에 의한 차이로 볼수 있으며, 시료의 시추와 동시에 온전한 비교란 시료의 채

취가 불가능하다는 점이 있고, 이러한 시료를 가지고 도출된 실내실험 값이 정확한 설계침하량 예측에 영향을 주는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 연약지반 설계시 이론식에 의해 추정된 설계침하량과 시공시 계측되는 계측침하량의 차이를 역해석을 통한 침하량 예측과 함께 비교·분석하고자 하였다. 설계침하량의 경우 지반조사 후 실내실험을 통해 산정되는 설계지반정수와 연약지반해석프로그램인 K-embank를 사용하였으며, 계측침하량의 경우 연구대상지역에 대하여 지표침하판, 지층침하계, 간극수압계를 매설하여 현장계측 침하량 예측기법인 쌍곡선법, Asaoka법, Hoshino법 등을 이용하여 각각의 최종침하량에 대한 분석을 수행하였다.

역해석 침하량의 경우 계측데이터를 통한 $e - \log P$ 곡선을 작도하여 실내실험 상의 $e - \log P$ 곡선과 비교·분석하였으며, 침하량에 영향을 주는 설계정수 등을 검토하여 기존 설계의 문제점을 보완하고 본 논문의 연구대상지역과 유사한 지역의 시공관리에 참고가 될 수 있는 자료를 제공하는데 목적이 있다.

1.2 국내·외 연구동향

연약지반에 대한 연구는 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 제안되었다(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).

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 해석 방법의 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. 장기침하량 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~침하 곡선이 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 영역의 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 측정치는 좋은 예측결과를 주나 성토가 높은 경우에는 측방변위의 영향으로 침하율을 30% 과대하게 추정되었다고 발표하였다.

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.

역해석에 관한 연구는 임성훈(1998)이 Terzaghi 피팅법을 이용한 역해석을 연구하였고, 이승래(2006)이 Baron의 압밀이론을 이용한 연약점토지반의 침하예측을 수행하였다. 김철수(2005), 안대건(2006)은 연약지반의 성토에 따른 압밀침하량 역해석에 대한 연구를 수행하였고, 이재욱(2010)은 복합퇴적 점토지반에 대한 역해석을 수행하였다.

박기환(2013)은 역해석을 이용한 지반이완하중 산정에 대한 연구를 수행하였다. 유상호(2016)는 역해석기법에 근거한 모래다짐말뚝(SCP)복합지반의 침하예측에 대한 연구를 수행하였으며, 황대영(2017)은 연직배수공으로 개량된 지반의 압밀정수에 대한 연구를 수행하였다.

최근에는 이용상(2020)이 역해석을 통한 흙막이 구조물 설계지반 정수평가에 대한 연구를 수행하였으며, 송충현(2022)은 PBD공법이 적용된 연약지반에 대한 지표침하관 침하의 역해석에 대한 연구를 수행하였다.

이와 같이 역해석에 대한 연구는 최근까지도 여러 연구자들에 의해 수행되었으나, 그 설계값과 계측값을 이용한 역해석에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구의 경우 실제 설계시 산정된 설계침하량과 시공 중 계측을 통한 역해석침하량, 계측을 통한 계측침하량을 모두 고려한 것이므로 기존 연구와의 차별성일 확인할 수 있다.

1.3 연구내용 및 방법

본 연구에서는 기존 연약지반 설계시 적용하는 설계침하량과 계측기를 통해 산정되는 최종계측침하량을 역해석 분석을 통한 침하량과 비교·분석하고자 하였다.

시공전 설계시 반영되는 설계침하량의 경우 실내실험 결과의 지반의 물성값을 적용하기 때문에 시료의 운반이나 환경적 요인에 변형되는 Scale effect에 대한 부분이 고려되지 않는 실정이다. 이러한 문제점을 보완하고자, 역해석을 이용한 침하량 산정방법을 통하여, 기존 설계보다 과다하게 설계되는 침하량에 대한 검토를 수행하고자 하였다.

본 연구에서 수행된 연구방법 및 내용은 다음과 같다.

- (1) 전라남도 ○○지구 택지개발 현장에 대하여 지반조사 데이터를 통한 설계침하량과 계측기 계측을 통한 계측침하량을 비교·분석하였다.
- (2) 현장계측을 통해 침하계와 간극수압을 고려한 $e - \log P$ 곡선을 작도하여 도출되는 설계지반정수를 산정하여, 역해석침하량을 확인하였다.
- (3) 설계침하량, 계측침하량, 역해석침하량 결괏값을 비교하여 설계침하량 검토시 과다하게 검토되는 부분에 대하여 공학적인 검증을 수행하고, 침하량에 영향을 주는 설계지반정수들에 대한 공학적 상관관계를 확인하고자 하였다.

제 2 장 이론적 배경

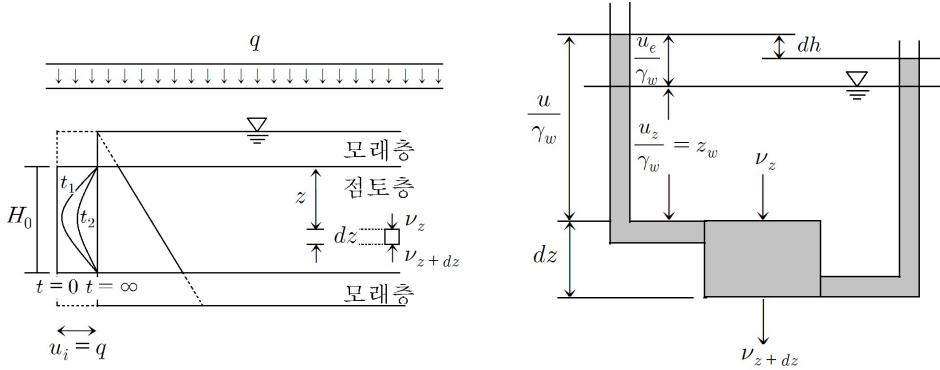
2.1 압밀이론

2.1.1 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 포화 점성토지반에서 최종침하량과 침하속도를 규명하는 것이다.

2.1.2 Terzaghi의 1차원 압밀이론

그림 2.1은 모래층 사이에 끼어있는 두께 H_o 인 점성토층을 보여주고 있다. 지표면에 대단히 넓은 등분포 하중 q 가 순간적으로 작용한 직후의 과잉간극수압분에 대하여 생각해 보자, 무한 등분포하중으므로 하중은 그대로 지반에 전달되고 하중 작용 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 2.1(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 2.1 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 sine 곡선 같은 형상을 하게 된다. 그림 2.1(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 상반부에서는 연직상향, 하반부에서는 연직하향 침투가 발생한다. 물은 절대 점성토층 중앙면을 관통할 수 없다.

그림 2.1(a)와 같이 점성토층 윗면을 좌표의 원점으로 잡고 연직하향으로 z 축을

잡는다. 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 2.1(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 경과 시 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 흡입자와 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 σ' 과 간극비 e 사이에는 직선거리에 반비례 관계가 성립된다. 즉,

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} = \frac{de}{d\sigma} = constant \quad (2.1)$$

여기서, a_v = 압축계수

2.1.3 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 를 직접 계산하는 것은 대단히 번거로움으로 그림 2.2에서 U_z 를 구한다. 즉 그림 2.2에는 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 2.2와 같다. Z, T_v, U_z 중 2개가 주어지면 나머지 하나는 위와 같은 방법으로 결정할 수 있다.

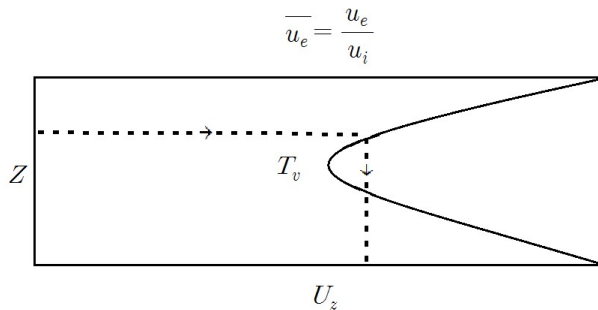


그림 2.2 압밀도 구하는 방법(Terzaghi and Peck, 1967)

2.1.4 평균압밀도

압밀도 U_z 는 압밀층 표면에서 깊이 Z 되는 곳에서의 과잉간극수압 소산정도를 의미한다. 그림 2.2에서 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 진행정도이다. 이러한 입장에서 평균압밀도는 다음과 같이 정의한다.

$$U = \frac{S_c(t)}{S_c} \times 100\% \quad (2.2)$$

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

$$S_c(t) = U \times S_c \quad (2.3)$$

여기서, $S_c(t)$: 임의의 시간 t 에서의 압밀침하량(cm)

U : 임의의 시간에서의 압밀도(%)

S_c : 압밀침하량(cm)

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.

2.1.5 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. 압밀링안에 있는 공시체는 가로변위를 일으킬 수 없으므로 정지 토압상태에 있고 일차원 흐름, 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 (*Load Increment Ratio*, 이하 *LIR*)라 한다. 즉,

$$LIR = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} \quad (2.4)$$

여기서 σ_i : 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 단

계별로 다시 증가시키면 공시체는 다시 압축되는데 이 과정을 재압축시험이라 한다. 재압축량은 상대적으로 대단히 적으며 팽창시험과 재압축시험의 결과도 간극비-하중곡선에 함께 제시한다.

2.1.6 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 실측관계에 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

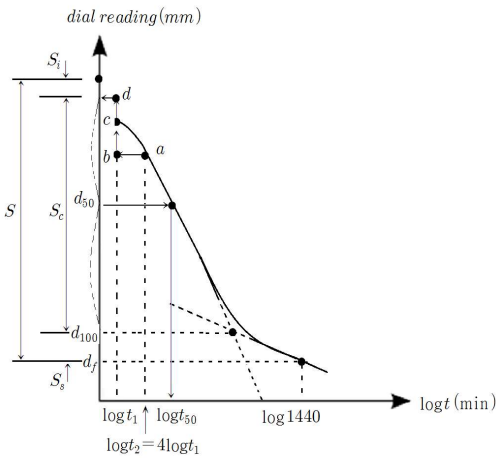
각 하중 단계별로 측정하는 시간-침하량 실측관계이다. 시간-침하량 관계를 표현하는 방법에 따라 $\log t$ 법과 \sqrt{t} 법이 있다.

가. $\log t$ 법

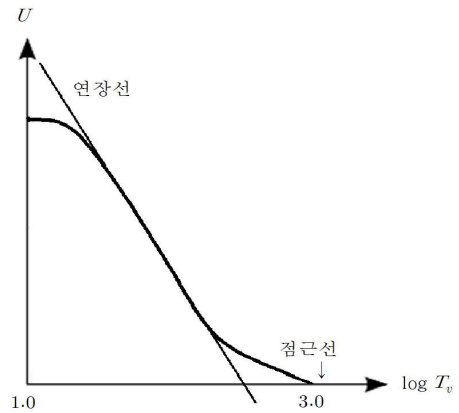
Casagrande(1940)가 고안한 방법으로 시간-침하량 관계를 시간의 대수-침하량으로 선택하였다. 그림 2.3(b)의 이론 곡선은 $\log T_v - U$ 의 관계를 제시하고 있다. 이론 곡선의 특성은 중간부의 직성부분의 연장선과 말기의 점근선의 교점이 평균압밀도 100%에 대응한다는 사실이다. 이 특성을 시험실의 실측 곡선에 적용하여 압밀계수를 구한다.

실측 곡선은 그림 2.3(a)와 같이 log t-dial을 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 2.3 $\log T_v - U$ 의 관계(김승일, 2014)

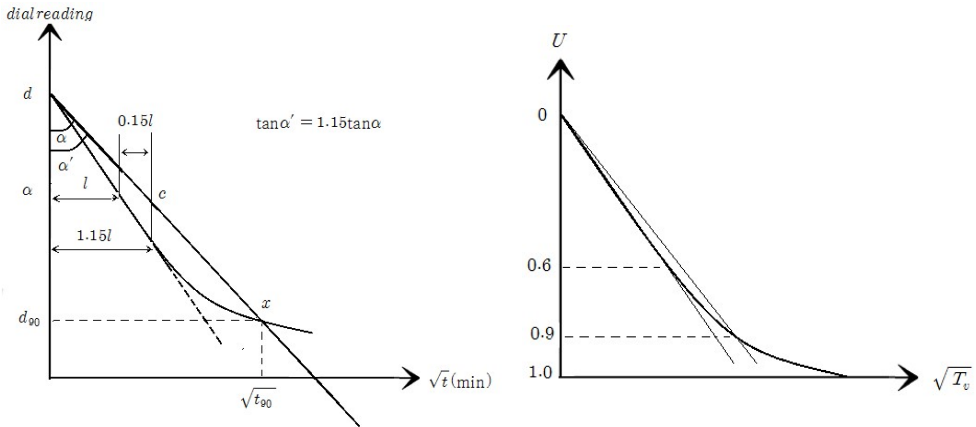
d_s : 현 단계 하중으로 압밀 하기 전의 다이얼 읽음=전 단계 하중에 의한 압밀 종료시의 log t-dial을 읽음

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 2.4(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 α 라 하고 기울기 1/1.15 되게 그린 직선과 U축 사이의 각도를 α' 이라 하면 기

울기 1/1.15 또는 각도 α' 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 2.4 $\sqrt{T_v} - U$ 관계(오익주, 2002)

2.1.7 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 2.5는 간극비-하중곡선을 그린 것이다. 이 그림을 보면 응력이 적은 초기 부분 ①에서는 간극비의 감소가 적어서 완만한 경사의 곡선을 이루고 있다. 그러다가 응력이 특정한 값 σ'_c 에 도달하면 간극비가 급격히 감소하면서 급경사인 직선 ②을 그린다. 이때 특정한 응력 σ'_c 을 선행압밀하중 또는 선행압밀압력이하 하고, 선행압밀하중보다 큰 응력에서 나타나는 직선인 간극비-하중곡선을 처녀압밀곡선 또는 처녀압축곡선이라 한다. 선행압밀하중 σ'_c 은 이 흙이 땅속에서 지금까지 받아 온 최대 연직 유효응력이다.

응력 σ'^*_c (보통 64 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 σ'^*_c 이다.

따라서, 이 재압축곡선 ④는 경사가 완만하 곡선이며 곡선 ①과 거의 평행이나, 재압축곡선 ④가 선행압밀하중 σ'^*_c 에 도달하면 간극비-하중곡선은 급경사인 처녀압밀곡선 ⑤가 된다. 특히 주의할 점은 직선 ⑤는 직선의 ②의 연장선상에 있다는 점이다. 즉 처녀압밀곡선은 선행압밀하중의 크기에 무관하게 동일한 직선의 연장선상에 있게 된다. 다시 응력 σ'^{**}_c 에서 팽창시험을 실시하여 팽창곡선 ⑥이 그려지고 이어서 재압축 곡선 ⑦이 그려진다. 주의할 점은 재압축곡선 ④와 ⑦은 서로 평행하고 이들은 다시 곡선 ①과도 거의 평행하다는 사실이다. 이는 곧 곡선 ①이 일종의 재압축곡선이라는 것을 시사하고 있다.

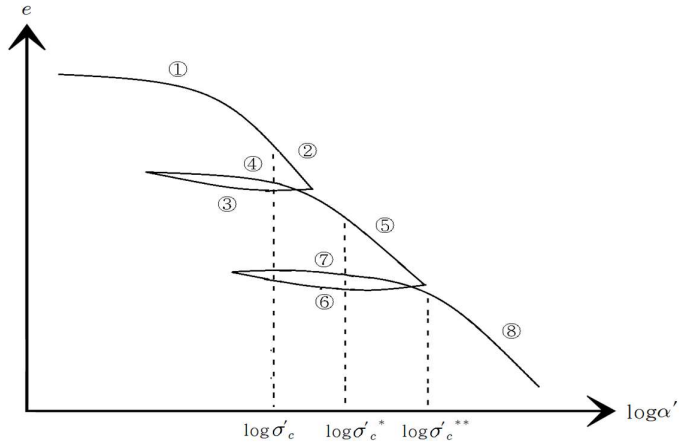


그림 2.5 간극비-하중곡선(Terzaghi and Peck, 1967)

(1) 선행압밀하중의 결정

압밀시험은 지층 속에서 채취한 불교란시료에 대하여 실시한다. 만약 지층의 구성 상대를 파악하고 시료채취 깊이를 알면 이 흙이 현재 받고 있는 유효응력(σ'_v)은 쉽게 산정할 수 있다. 그런데 지층에 과거 침식과 퇴적이 거듭 일어났거나 지하수위의 변동이 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 결정이 극히 어려운 반면 점성토의 경우에는 시험실 간극비-하중곡선에서 이 값을 결정하는 경험적 방법이 제안되어 있다. 그림 2.6에는 Casagrande가 고안한 선행압밀하중 결정 방법이 제시되어 있다.

선행압밀하중 σ'_c 의 결정 순서는 곡률이 최대(곡률반경 최소)인 점 a 선택하고, a 점에서 수평선 \overline{ah} 를 작도한 후, 접선 \overline{at} 를 작도한다. 이후, $\angle hat$ 의 2등분선 \overline{am} 을 작도, 직선부 연장선과 \overline{am} 의 교점 b 에 대응하는 σ'_c 을 찾는다.

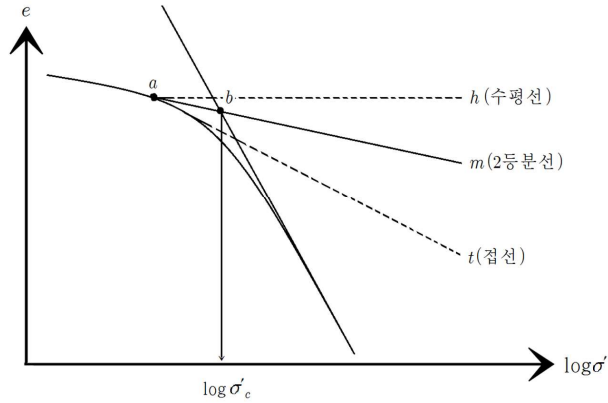


그림 2.6 Casagrande의 선행압밀하중 결정 방법(Casagrande, 1936)

(2) 압축지수

그림 2.7과 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.

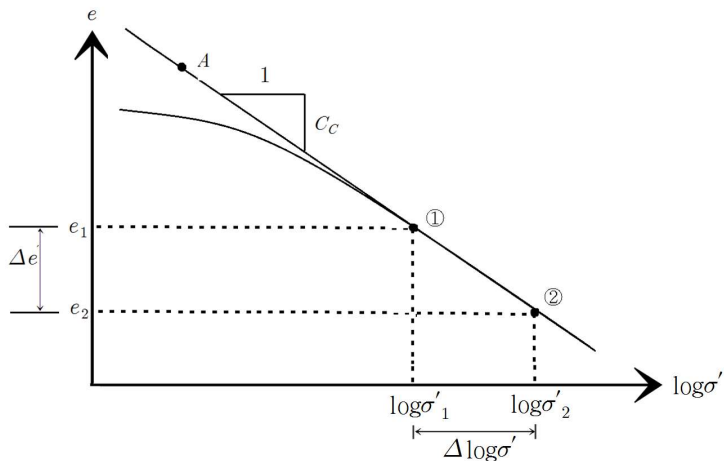


그림 2.7 처녀압밀곡선에서의 압축지수 결정(Casagrande, 1936)

그림 2.7에서 점 ①과 ②에 대하여

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \quad (2.5)$$

C_c 는 압밀침하량 산정에 사용되는 중요한 지수이다. C_c 가 큰 점성토는 동일한 응력변화량에 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 2.8에서 보는 것과 같이 팽창 및 재압축곡선은 완만하며 그 기울기는 압축 지수에 비해 대단히 작다. 팽창 및 재압축 과정에 있는 흙은 과압밀상태이며, 선행 압밀하중은 팽창 시작의 하중이 된다.

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

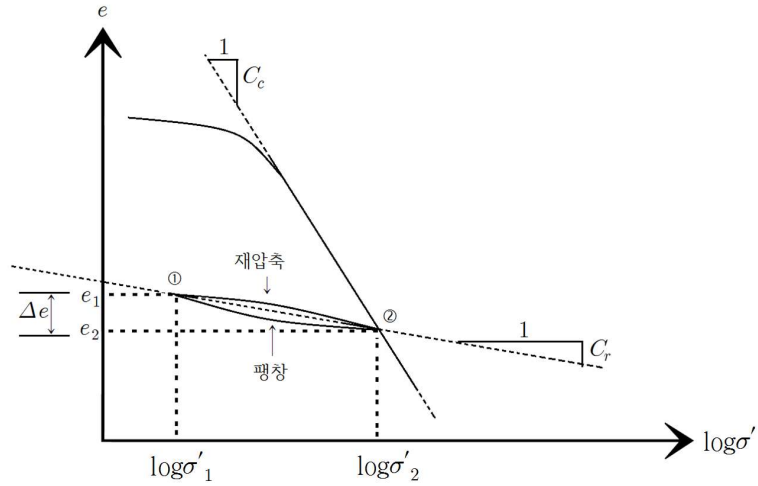


그림 2.8 팽창 - 재압축곡선(Terzaghi and Peck, 1967)

그림 2.8에서 점 ①, ②에 대하여

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \quad (2.6)$$

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

2.1.8 압밀침하량 산정

지금까지는 압밀 시작 후 시간 t 까지의 침하량은 그 때의 평균압밀도에 최종침하량을 곱하여 구하였다. 그리고 최종 압밀침하량의 결정 방법은 다음과 같다. 그림 2.9와 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.

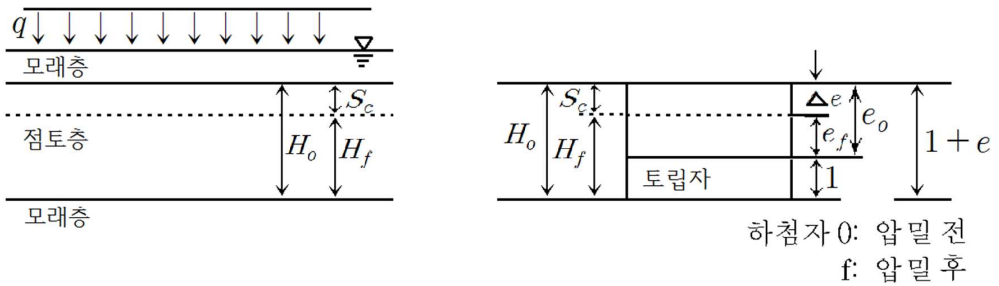


그림 2.9 압밀침하량 산정(차지연, 2013)

(1) 압밀침하량 산정에 관한 일반사항

가. 정규압밀인 경우($\sigma'_o = \sigma'_c$)

정규압밀상태란 선행압밀하중과 현재의 지중응력이 동일한 상태이다. 그림 2.10와 같이 현재의 연직유효응력 σ'_o 에서 하중 등에 의하여 응력이 $\sigma'_o + \Delta\sigma'$ 으로 증가하였다면 이러한 응력변화 상태는 처녀압밀곡선상의 A→X에 대응한다.

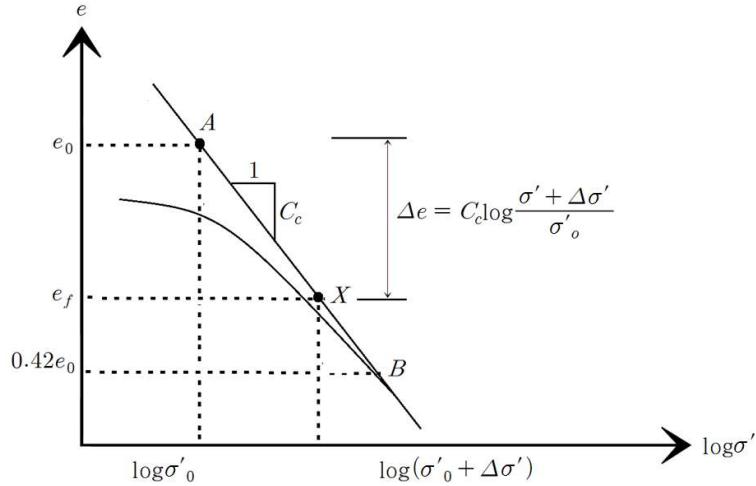


그림 2.10 정규압밀 상태 압밀침하량(Terzaghi and Peck, 1967)

압밀침하량 S_c 는

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H_0 \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \quad (2.7)$$

여기서, e_0 는 점토층의 초기 간극비, C_c 는 압축 지수, H_0 는 점토층의 두께, $\Delta\sigma'$ 는 기초 축조로 인해, σ'_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 2.11에 제시한 것과 같다. 압밀침하는 재압축과 처녀압밀로 이루어지며 간극비-하중곡선은 굴곡되어 있다. 선행 압밀하중은 압밀층의 깊이에 따라 다르지만, 압밀층 전체의 평균치 또는 압밀층 중앙면에서의 값으로 가정한다.

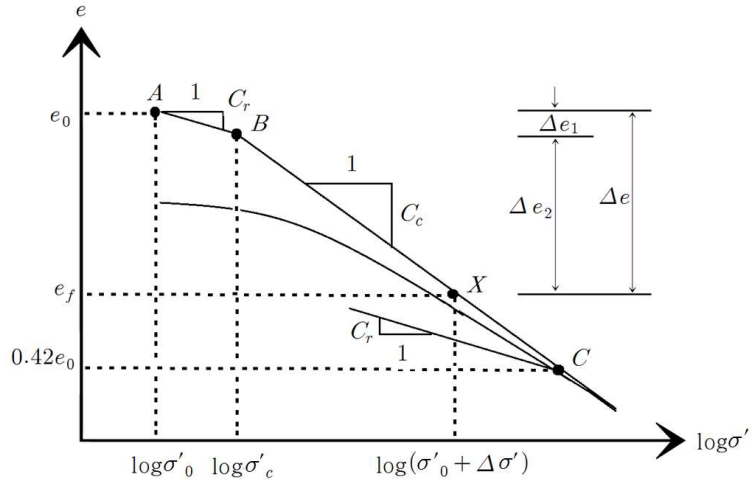


그림 2.11 과압밀 상태 압밀침하량(Terzaghi and Peck, 1967)

2.2 현장계측자료에 의한 침하예측 이론

현장계측자료를 이용한 침하예측법이 필요한 가장 주된 요인은 실험실에서 획득된 이론침하량이 실제 현장에서는 부합되지 않고 있기 때문이다. 이론침하량과 실제발생침하량에 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.

2.2.1 쌍곡선법

쌍곡선법은 침하의 평균속도가 쌍곡선적으로 감소한다는 가정하에 초기의 실측 침하량에 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 2.12와 같이 침하량을 계산한다.

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t}, \quad S_f = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2.8)$$

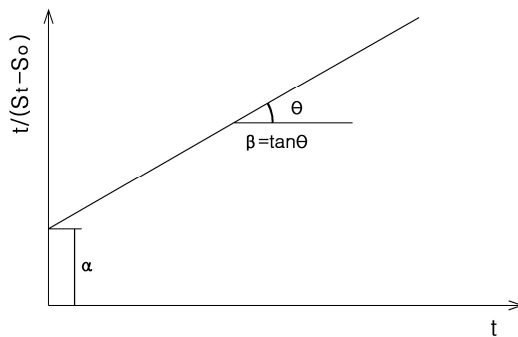


그림 2.12 쌍곡선 법(Tan et al, 1991)

2.2.2 Hoshino법(\sqrt{t} 법)

Hoshino법(\sqrt{t} 법)은 쌍곡선법과 유사하나 유동변형을 포함한 전침하량은 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 2.13과 같이 미지수 A , K 에 의해 침하량을 계산하는 방법이다.

$$S_t = S_0 + S_d = S_0 + \frac{A \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{1 + K^2 t}}, \quad S_f = S_0 + A = S_0 + \sqrt{1/\beta} \quad (2.9)$$

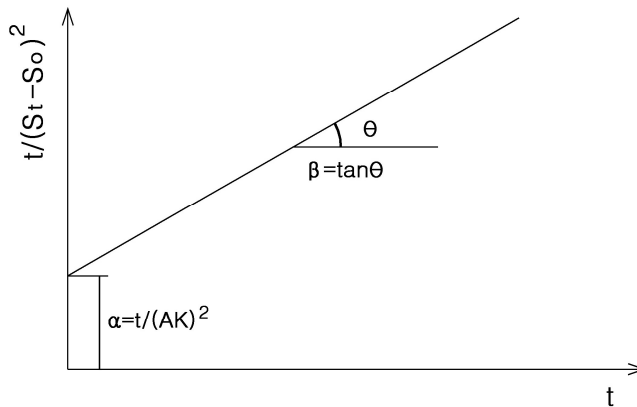


그림 2.13 Hoshino 법(Hoshino, 1962)

2.2.3 Asaoka법

Asaoka법은 1차원 압밀방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 간편식으로서 실측침하-시간곡선에서 동일 간격의 시간(Δt)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 2.14와 같이 침하량을 계산한다.

$$S_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{i-1}, \quad S_f = \frac{\beta_0}{1 - \beta_f} \quad (2.10)$$

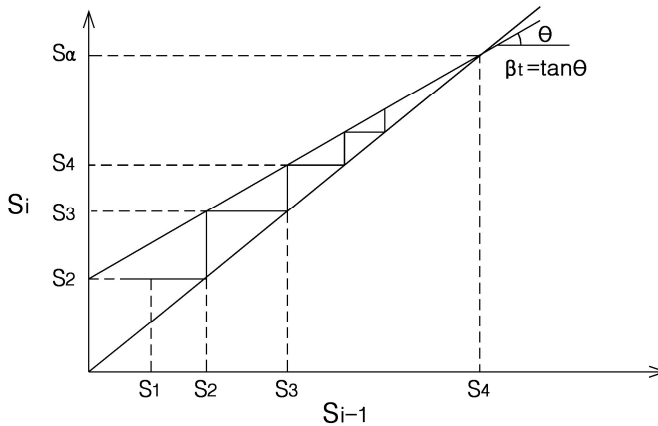


그림 2.14 Asaoka 법(Asaoka, 1978)

2.2.4 Monden법

Monden법은 Barron(1948)이 Terzaghi의 압밀이론을 기본으로 하여 제안한 방법이다. 압밀층 전체에 대한 평균압밀도는 등방위압밀(equal strain consolidation)조건에서 식 (2.11)과 같이 계산된다고 하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (2.11)$$

여기서, U_h = 평균압밀도

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

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (d_e : \text{영향원의 직경}, d_w : \text{연직배수재의 직경})$$

$$T_h = \text{수평방향 시간계수} : \frac{C_h \times t}{d_e^2}$$

$$C_h = \text{수평방향 압밀계수}$$

연직방향의 압밀도와 수평방향의 압밀도를 고려한 전 압밀층에 대한 평균압밀도는 다음 식 (2.12)와 같이 계산할 수 있다.

$$U_{v,h} = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (2.12)$$

2.2.5 Terzaghi(Curve fitting)법

Terzaghi의 Curve fitting법은 Terzaghi 압밀이론을 적용하여 성토하중과 선행압밀하중의 관계를 고려한 압축지수, 재압축 지수, 압밀계수 등을 시행착오법으로 조정하여 계측에 따른 시간-침하 거동에 부합하도록 C_s , C_r , C_v 등을 선정하고, 성토하중 및 성토량에 대한 최종침하를 산정하는 방법으로 그림 2.15와 같다.

$$S_c = \frac{C_s \times H}{1+e_0} \times \log\left(\frac{P_c}{P_o}\right) + \frac{C_c \times H}{1+e_0} \times \log\left(\frac{P_o + \Delta P}{P_c}\right) \quad (2.13)$$

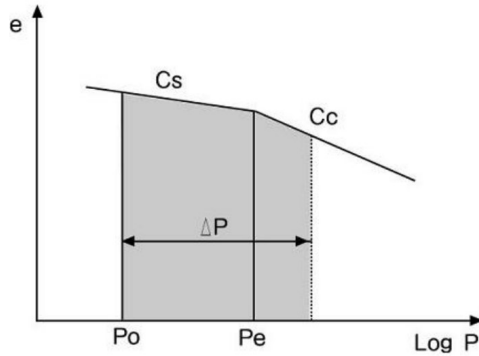


그림 2.15 Terzaghi의 Curve fitting법(Terzaghi and Peck, 1967)

2.3 역해석 이론

2.3.1 개요

지반구조물의 충분치 못한 지반조사 채취된 시료의 설계대표정수의 부적성, 실내 시험 조건 및 방법의 현장여건과의 차이 등 불충분한 지반정보로 설계가 되는데 현장에서는 수많은 예상치 못한 이유로 설계와 동일한 결과값과 지반거동이 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있다.

실측치를 이용하여 투수계수, 압밀계수 등의 토질정수를 역으로 산정하여 지반의 거동을 가장 적절하게 판단할 수 있는 방법을 역해석에 의한 방법이라고 한다. 터널에서는 주로 탄성계수 및 초기응력값의 추정, 지보재 변형측정으로 지반의 변형을 역추적하는 기법 등의 역해석 방법을 주로 이용하였으며, 연약지반에서는 축방향의 비선형관계를 이용하는 방법이 주로 사용한다.

본 연구에 이용된 역해석 프로그램의 원리는 먼저 연약지반에서의 압밀침하량에 대한 설계측값과 압밀시험에 의한 해석지반의 특성값을 고려하여 현재 최종 측정된 원지반의 침하량이 최대한 근접토록 이론적으로 계산된 시간-침하량 곡선과 설계측값에 의한 침하량곡선을 그래픽 처리하여 압축지수(C_c)와 압밀계수(C_v)값의 조정으로 설계측값에 근접하도록 시행착오기법으로 실제 지반의 거동을 가장 잘 나타낼 수 있는 토질 정수값을 찾는다.

Terzaghi and Peck(1967)이 제안한 관측설계방법은 현장 계측치로부터 설계변수들을 역으로 추적하고, 이렇게 실제 현장을 반영한 새로운 설계변수들을 사용하여 다시 정해석을 함으로써 잔여 시공과정에서의 예측에 대한 신뢰도를 증대시키는 방법인데 이를 위해서는 역해석 기법의 이용이 필수적이다.

2.3.2 역해석의 기법의 종류

1) 역산법

수치해석에 적용되는 계산과정의 역순으로 방정식을 재구성하여 실측된 변위나 응력으로부터 직접 지반의 물성치 및 초기응력등 설계변수를 계산하는 방법이다. 연산시간을 절약할 수 있다는 장점이 있지만, 탄성문제에만 적용이 가능하고 대상 구조체의 비선형성이나 점탄성 문제 등에는 적용할 수 없는 제한성, 프로그램을 작성하는데 많은 시간이 소요된다.

2) 직접법

계측변위와 계산에 의해 얻어진 변위의 차이를 목적함수로 정의하고 이 목적함수가 최소값을 가질 때까지 입력변수를 수정하는 반복적인 해석을 통해 입력변수를 얻는 방법이다.

수치해석을 통해 목적함수가 최소가 되는 지반물성을 찾는 방법으로 지반공학 문제에 있어서의 목적함수는 대부분 비선형이기 때문에 미분계수를 정의하는데 많은 어려움이 따른다.

최적의 입력변수를 구하는 방법으로 미분을 하지 않는 직접탐색법이 많이 사용되고 있다. 또한 직접법은 역산의 과정이 필요없으므로 역산법에 비해 보다 간단한 방법으로 평가된다.

반복계산에 의해 최적치를 구하므로 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있지만, 복잡한 수학적 바탕 없이도 기존의 프로그램을 약간의 수정, 보완함으로써 역해석을 수행할 수 있고, 비선형 문제의 적용 및 제한된 실측자료만으로 역해석이 가능하다는 장점이 있다.

3) 통계적 방법

계측결과의 불확실성이 해석에 큰 영향을 미치게 되는 경우에는 확률론적 방법이 필수적인 방법이다. 결정론적인 방법에는 직접법과 역산법이 해당되며, 확률론적인 방법에는 Bayesian법과 Kalman-filter법이 사용된다.

2.3.3 역해석기법을 이용한 최종침하량 산정

역해석 분석을 통한 최종침하량의 산정은 지표침하판 측정시 매설한 집중공 18개소의 경우 각 층별침하계 및 간극수압계를 고려하여 현장 $e-\log P$ 곡선을 도출하고, 그에 따른 역해석 결과값을 분석하였다.

계측된 자료 중 1차원변위량(침하량)과 간극수압계에서 측정된 간극수압을 이용하여 새로운 $e-\log P$ 곡선을 그려서 구할 수 있는 새로운 지반특성 압축지수(C_c), 압밀계수(C_v), 초기간극비(e_0), 선행압밀하중(P_c), 과압밀비(OCR) 등을 구하여 Terzaghi 1차원 압밀이론공식에 대입하여 1차원 압밀량을 역해석하는 방법을 사용하였다.

현장에서 계측된 변위값과 간극수압값을 이용하여 아래그림과 같은 압밀곡선을 얻었다. 간극비는 간극수압계를 통하여 구한 값을 입력하였고 초기압밀하중(P_0) 및 선행압밀하중(P_c)값을 $e-\log P$ 곡선을 통하여 구하였고, 그 지반정수값들을 이용하여 압밀이론식에 대입하여 압밀침하값을 역해석하였다.

그림 2.16은 간극수압계와 침하계를 이용하여 $e-\log P$ 곡선을 작도한 것으로, 여기서 도출된 물성값을 통해 역해석을 수행하였다.

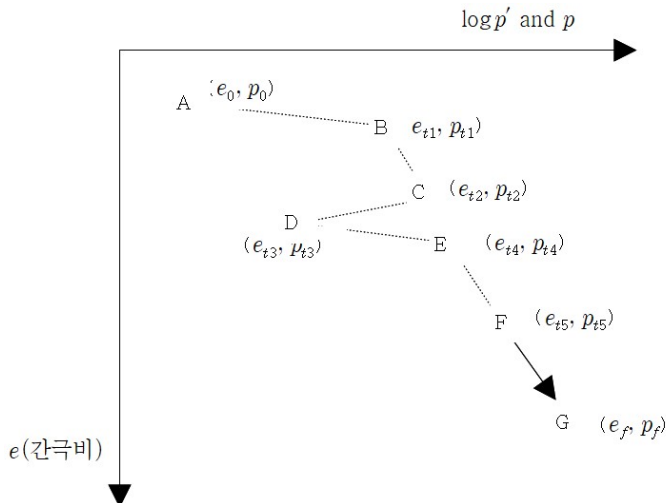


그림 2.16 계측기를 이용한 침하곡선 작도

2.4 계측기 관리 기준

1) 개요

본 연구대상지역에서 사용된 계측기는 지표침하계, 지하수위계, 간극수압계, 층별 침하계로 총 5가지 계측기를 사용하였으며, 정확한 계측침하량을 산정하기 위해 사용된 계측기를 간극수압계와 지표침하계이다.

2) 계측기 매설기준

지역의 대표성을 고려하고 가능한 격자상 배치, 지형특성상 지층변화가 예상되는 곳이어야하며 다음과 같은 기준에 따라 매설하였다.

먼저, 토지이용계획에 따른 허용잔류침하량, 지반처리공법의 유사성으로 구분되는 지점, 공사 시공중, 시공후 장기계측을 위해 계측기 보존이 용이한 지점에 매설한다. 또한 연약층 심도가 깊은 곳, 침하량이 크게 예상되는 지점 등 토질특성을 대표하는 지점 이거나 주거용지, 상업용지, 공공용지 등 토지용도 및 개발 시기 등으로 구분되는 지점에 주로 매설한다.

3) 계측기기 선정기준

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

표 2.1 계측기기 종류 및 적용 내용

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

4) 관리지역별 계측빈도

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

표 2.2 설치된 계측기의 측정빈도

구 분	준비 및 관리단계	쌓기기간중	쌓기완료 후			
			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

5) 계측기 사양 및 측정법

표 2.3 ~ 표 2.6은 각 계측기의 사양 및 측정 방법을 나타낸 것이다.

표 2.3 층별침하계

종 류	항 목	시 방
층별침하계 (M.C Type)	설치기준	<ul style="list-style-type: none"> · 지지층(기반암층)까지 천공(보링내경 126mm이상)하여 기준소자를 설치하고 분석대상층에 측정소자를 매설함
	Spider magnetic sensor	<ul style="list-style-type: none"> · Anchor 확장외경(0.D Anchor Fully Extended):22cm 이상 · 양날개 방식(상,하 각3개), 날개끝이 90° 이상 꺾여 원지반에 고착이 잘되는 형태일 것

표 2.4 지하수위계

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

표 2.5 간극수압계

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

표 2.6 지중경사계

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

제 3 장 실내실험 및 침하량 산정

3.1 개요

본 장에서는 연구대상지역에 대하여 지반조사를 수행한 후, 실내실험 결과값을 통한 설계 침하량계산, 역해석을 통한 역해석 침하량, 현장계측을 통한 계측침하량의 3가지 침하량 데이터에 대한 내용을 수록하였다.

3.2 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. 사업지구 내의 평야들은 논으로 경작되었던 지역이고 중소규모의 수로들과 농로들이 경작자들의 필요에 따라 생성, 소멸되어 지형의 인위적인 변화가 예상된다. 그림 3.1은 본 연구의 대상지역인 OO지역 및 인근 지역에 대한 위치도를 나타낸 것이다.



그림 3.1 연구대상지역

3.3 연구대상지역의 지반조사 및 실내실험

본 연구의 연구대상지역의 토질특성상 연약점토층이 15.0~20.0m 두께로 분포하고 있다. 지반조사 공의 총 38개 공을 수행하였으며, 각각의 시추공에 대하여 표준관입시험 및 현장시험을 수행하였다.

그림 3.2는 연구대상지역의 지반조사 위치도를 나타낸 것이다.

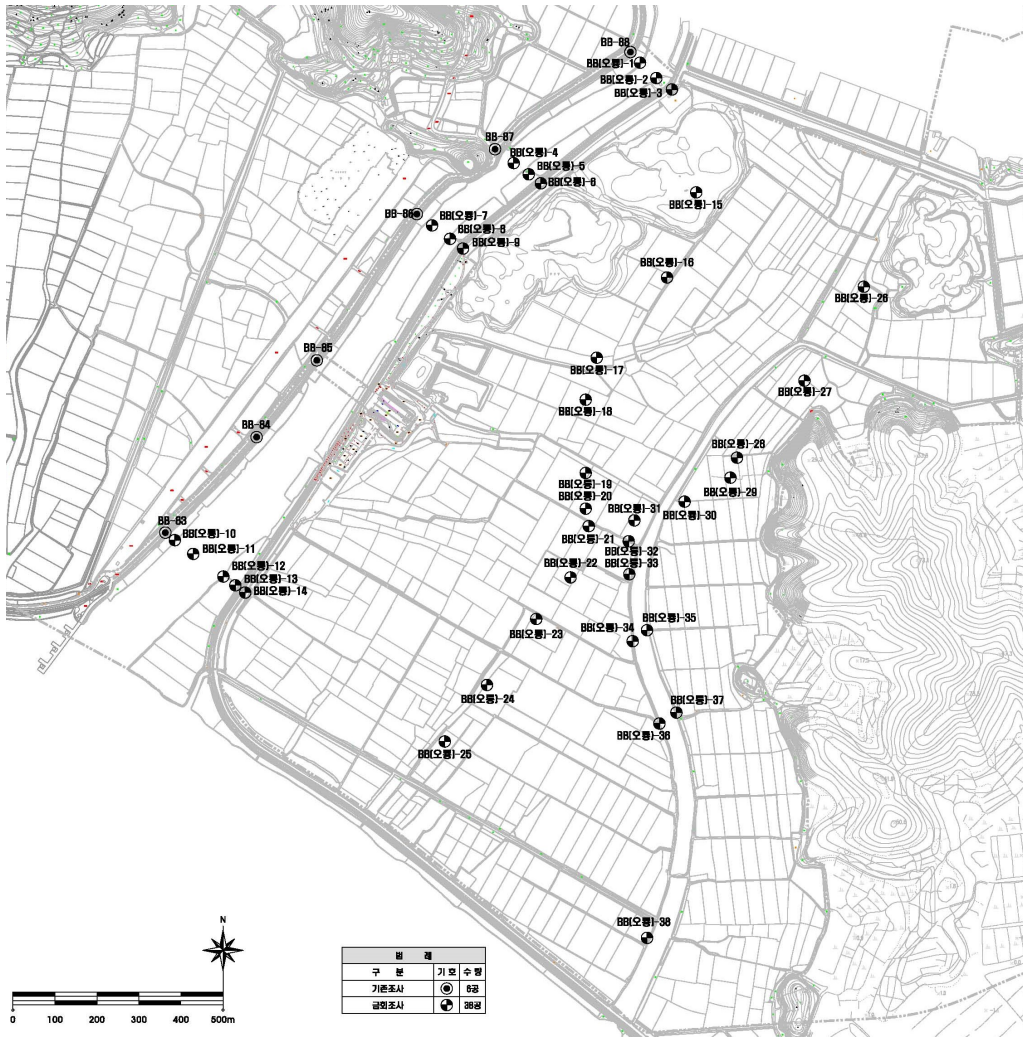


그림 3.2 지반조사 위치도(38공)

3.3.1 시추 및 현장시험

본 연구의 연구대상지역에 대하여 38개소의 지반조사를 수행하였으며, 지반조사를 위해 수행한 보링과정에서 베인전단시험, 공내재하시험 등을 통한 현장시험을 추가로 수행하였다.

그림 3.3은 시추 및 현장시험 전경을 나타낸 것이다.



(a) 시추원경



(b) 표준관입시험



(c) 베인전단시험



(d) 공내재하시험

그림 3.3 시추 및 현장시험 전경

3.3.2 기본물성시험

기본물성시험의 경우 설계침하량 산정시 필요한 기본 물성값을 도출하기 위해 KS F기준에 근거하여 그림 3.4와 같이 실내시험을 수행하였다.

비중시험(KS F 2308), 함수비시험(KS F 2306), 애터버그한계시험(KS F 2303), 체분석(KS F 2502) 등을 수행하였으며, 그 결과값을 토대로 통일분류법(USCS)에 의해 흙을 분류하였다.



(a) 비중시험



(b) 액성한계 시험



(c) 소성한계 시험



(d) 체분석(흙씻기) 시험

그림 3.4 기본물성시험 전경

3.3.3 역학적 시험

역학적 시험 또한 마찬가지로 KSF 기준에 근거하여 그림 3.5와 같이 실내시험을 수행하였으며, 일축압축강도시험(KS F 2314), 삼축압축시험(KS F 2346), 표준압밀 시험(KS F 2316)에 대한 결과를 도출하고자 하였다.



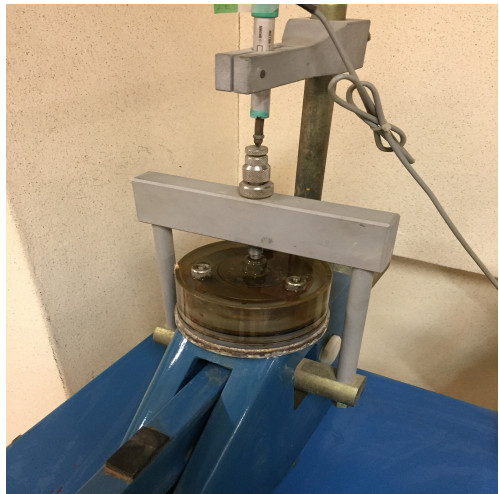
(a) 일축압축강도 시험



(b) 예민비 측정



(c) 삼축압축시험



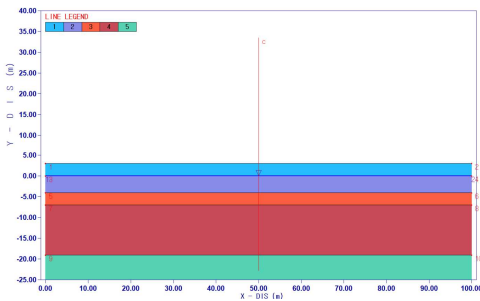
(d) 압밀시험

그림 3.5 역학적 시험 전경

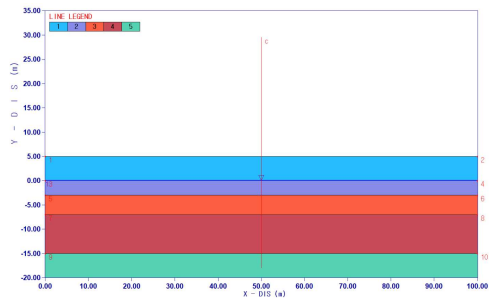
3.4 설계침하량 산정

본 연구에서는 연약지반 해석프로그램인 K-embank를 사용하여 연구대상지역의 단면별 침하량 검토를 수행하였다. K-embank는 연약점성토 압밀침하계산, 사질토를 이용한 즉시침하계산, 무처리 및 처리시 압밀시간/압밀도 계산, 점증하중을 고려한 하중단계별, 압밀시간별 침하량/잔류침하량 계산 등이 가능한 연약지반 설계프로그램이다.

연약지반 해석을 위한 모델링의 경우 각 설계 단면별 대표단면을 선정하여 지반 조사 데이터를 기반으로 한 지층두께를 고려하여 해석을 수행하였다. 입력 데이터의 경우 실내실험을 통해 도출된 설계지반정수들을 고려하여 반영하였으며, 그림 3.6은 수치해석을 수행한 대표단면을 나타낸 것이다.



(a) 대표단면 T-1-01



(b) 대표단면 T-2-01

그림 3.6 수치해석을 위한 연약지반 모델링

3.5 계측기를 통한 최종침하량 산정

본 연구에서는 연구대상지역에 대하여 지표침하계, 간극수압계, 층별침하계, 지하수위계, 경사계의 총 5가지 침하계를 매설하였으며, 각 침하계의 매설위치와 수량은 그림 3.7과 표 3.1에 나타내었다.

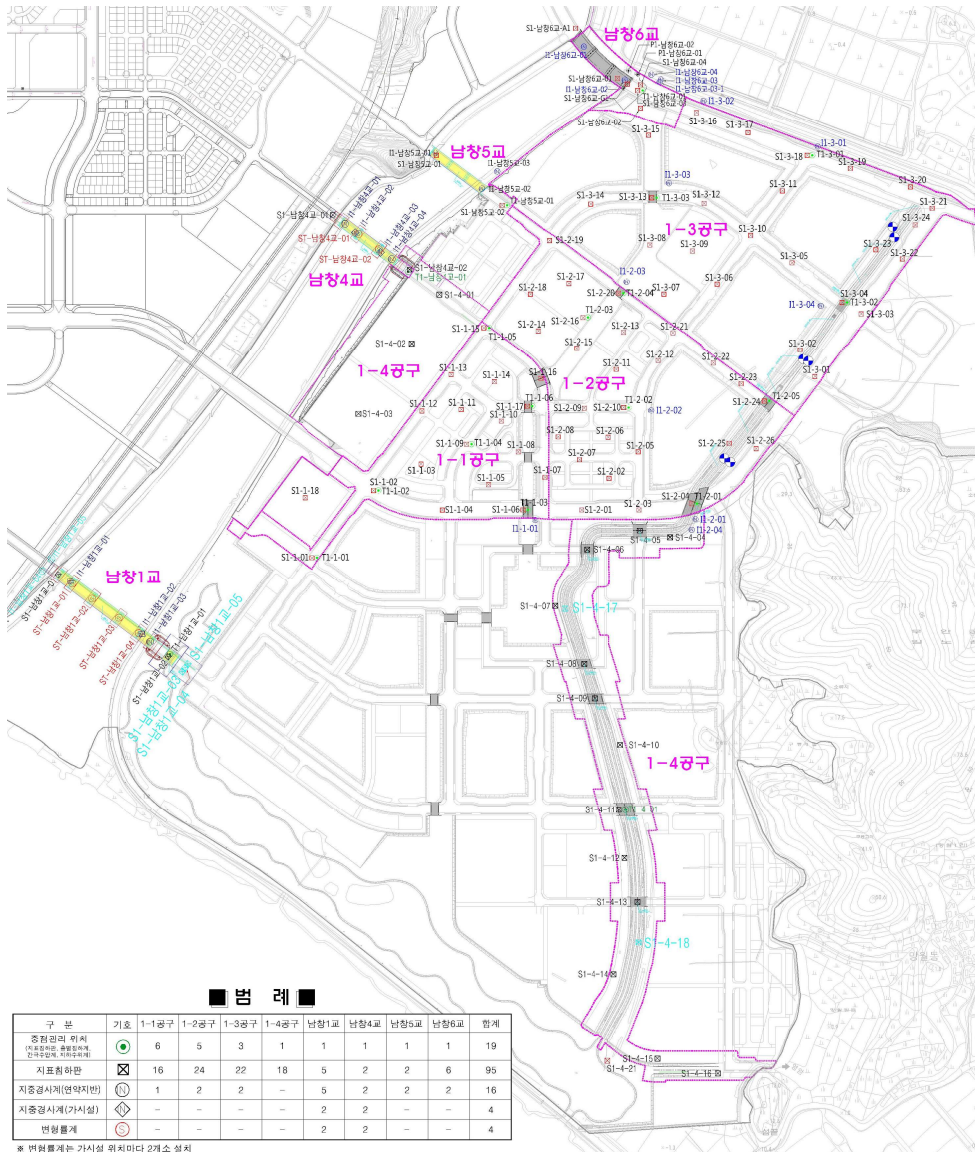


그림 3.7 계측기 매설 위치도

본 연구에서는 연구대상지역에 81개공에 대하여 지표침하판을 매설하였으며, 그 중 집중공 18개공에 대하여 간극수압계, 층별침하계, 지하수위계, 경사계를 매설하였다. 매설된 지표침하판은 현장계측 침하량을 산정하기 위한 것으로 본 연구대상 지역 대부분에 현장계측에 의한 침하량 예측법인 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법, Terzaghi의 피팅법을 적용하여 그 결괏값을 확인하고자 하였다.

표 3.1은 본 연구대상지역에 매설한 계측항목 및 수량을 나타낸 것이고, 그림 3.8은 계측기 매설전경을 나타낸 것이다.

표 3.1 계측항목 및 수량

(단위 : EA)

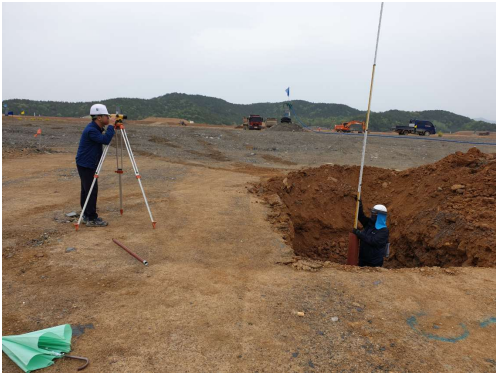
항 목	지표침하판	간극수압계	층별침하계	지하수위계	경사계	
총 계	81	18	18	18	28	
도 로	소 계	48	13	13	13	9
	1-1 공 구	12	6	6	6	1
	1-2 공 구	17	4	4	4	4
	1-3 공 구	18	3	3	3	4
	1-4 공 구	1	-	-	-	-
단 지	소 계	19	4	4	4	-
	1-1 공 구	5	-	-	-	-
	1-2 공 구	7	3	3	3	-
	1-3 공 구	5	-	-	-	-
	1-4 공 구	2	1	1	1	-
배 수 로	소 계	14	4	4	4	19
	1-1 공 구	-	1	1	1	7
	1-2 공 구	-	1	1	1	4
	1-3 공 구	-	1	1	1	3
	1-4 공 구	14	1	1	1	5



(a) 계측기 매설 전경(1)



(b) 계측기 매설 전경(2)



(c) 계측기 매설 전경(3)



(d) 계측기 매설 전경(4)



(e) 계측기 매설 전경(5)



(f) 계측기 매설 전경(6)

그림 3.8 계측기 매설 전경

제 4 장 실험결과 및 침하량 검토

본 장에서는 지반조사를 통해 도출된 지반의 지층상태 및 물리·역학적 시험결과와 설계침하량, 시공중 계측을 통한 역해석침하량, 계측기 계측을 통한 계측침하량에 대한 내용을 수록하였다.

4.1 지층구성

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

표 4.1은 지반조사를 수행한 38개공에 대한 지층상태를 요약한 것으로, 대부분의 매립토층 및 퇴적토층이 대부분이 점성토로 분포되어 있음을 확인하였다. 표 4.2는 표준관입시험 결과를 나타낸 것으로, 0.0 ~ 15.0m까지 연약지반이 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

표 4.1 지층심도표

구분	매립토층(m)			퇴적토층(m)			풍화 토층 (m)	풍화 암층 (m)	연암 (m)	보통 암 (m)	경암 (m)	시추 심도 (m)	비고
	점성토	모래	자갈	점성토	모래	자갈							
BB-1	0.5	-	-	22.6	-	0.5	-	-	2.0	-	-	25.6	
BB-2	-	-	-	19.9	-	0.5	-	-	3.1	-	-	23.5	
BB-3	-	1.9	-	21.1	-	1.8	-	-	2.6	-	-	27.4	
BB-4	-	-	-	20.4	-	1.0	-	-	3.0	-	-	24.4	
BB-5	-	0.9	-	21.1	1.0	-	-	-	3.0	-	-	26.0	
BB-6	-	-	1.5	20.5	3.0	-	-	-	3.0	-	-	28.0	
BB-7	-	-	-	22.6	-	0.5	-	-	3.0	-	-	26.1	
BB-8	-	0.7	-	21.9	-	0.9	-	0.7	3.0	-	-	27.2	
BB-9	-	-	1.5	22.5	-	0.5	1.0	-	4.0	-	-	29.5	
BB-10	1.3	-	-	14.2	7.0	-	-	-	3.0	-	-	25.5	
BB-11	-	-	-	12.5	-	6.7	-	-	3.0	-	-	22.2	
BB-12	1.0	-	-	14.7	-	5.5	0.8	-	3.0	-	-	25.0	
BB-13	0.6	-	-	15.4	-	6.0	-	-	3.0	-	-	25.0	
BB-14	-	-	2.0	15.2	2.8	-	3.0	7.0	3.0	-	-	33.0	
BB-15	3.5	-	-	20.5	-	-	-	-	1.0	-	-	25.0	
BB-16	0.3	-	-	17.0	-	1.2	-	-	1.0	-	-	19.5	
BB-17	0.3	-	-	23.0	-	1.0	-	-	1.0	-	-	25.3	
BB-18	0.3	-	-	23.1	-	0.9	-	1.0	1.0	-	-	26.3	
BB-19	0.4	-	-	23.6	-	1.0	-	-	1.0	-	-	26.0	
BB-20	0.3	-	-	25.2	-	-	-	-	1.0	-	-	26.5	
BB-21	0.5	-	-	19.7	3.6	-	-	0.7	1.5	-	-	26.0	
BB-22	0.3	-	-	22.8	1.5	-	-	-	1.0	-	-	25.6	
BB-23	0.2	-	-	17.8	3.5	0.5	-	-	1.0	-	-	23.0	
BB-24	0.2	-	-	17.8	2.0	2.7	-	-	1.0	-	-	23.7	
BB-25	0.2	-	-	18.3	2.5	1.0	-	-	1.0	-	-	23.0	
BB-26	0.3	-	-	14.7	-	0.8	-	1.2	3.0	-	-	20.0	
BB-27	0.4	-	-	11.6	1.0	1.0	-	-	1.5	-	-	15.5	
BB-28	0.5	-	-	9.5	1.0	-	-	-	3.0	-	-	14.0	
BB-29	0.6	-	-	18.4	1.0	-	-	-	3.0	-	-	23.0	
BB-30	0.5	-	-	19.5	1.0	-	-	-	3.0	-	-	24.0	
BB-31	0.4	-	-	22.6	-	1.1	-	0.7	3.0	-	-	27.8	
BB-32	0.6	-	-	22.2	-	1.5	-	2.0	3.0	-	-	29.3	
BB-33	0.4	-	-	23.5	-	0.7	-	-	3.0	-	-	27.6	
BB-34	0.9	-	-	23.0	-	0.9	-	-	3.0	-	-	27.8	
BB-35	0.8	-	-	22.2	1.0	-	-	1.0	2.0	-	-	27.0	
BB-36	0.5	-	-	22.7	-	0.8	-	-	3.0	-	-	27.0	
BB-37	1.0	-	-	17.0	1.5	-	-	-	2.0	-	-	21.5	
BB-38	0.3	-	-	22.3	0.6	-	-	1.1	3.0	-	-	27.3	

표 4.2 표준관입시험 결과(계속)

구분	심도 $GL, (-)m$								
	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	
	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0	22.5	24.0	
BB-1	1/30	1/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	0/30	0/30	1/30	8/30	8/30		
BB-2	0/30	0/30	0/30	0/30	1/30	1/30	0/30	0/30	
	0/30	0/30	0/30	0/30	1/30				
BB-3	20/30	1/30	1/30	1/30	0/30	0/30	1/30	0/30	
	0/30	0/30	0/30	0/30	1/30	3/30	8/30	50/28	
BB-4	1/30	1/30	2/30	2/30	2/30	2/30	2/30	2/30	
	2/30	2/30	3/30	3/30	6/30	27/30			
BB-5	1/30	1/30	0/30	1/30	1/30	1/30	2/30	2/30	
	1/30	1/30	2/30	2/30	2/30	2/30	33/30		
BB-7	1/30	1/30	1/30	2/30	2/30	1/30	2/30	2/30	
	2/30	2/30	2/30	3/30	4/30	5/30	50/13		
BB-8	1/30	0/30	0/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	
	1/30	2/30	2/30	2/30	2/30	2/30	28/30	50/9	
BB-10	2/30	0/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	
	1/30	3/30	26/30	33/30	50/23	50/18			
BB-11	1/30	1/30	2/30	1/30	1/30	1/30	2/30	3/30	
	15/30	7/30	8/30	12/30					
BB-12	1/30	0/30	0/30	0/30	0/30	1/30	1/30	1/30	
	2/30	3/30	39/30	50/27	50/21	50/14			
BB-13	0/30	0/30	0/30	0/30	1/30	1/30	2/30	2/30	
	2/30	3/30	50/29	50/14	50/25	50/20			
구분	심도 $(GL, -m)$								
	1.0	2.5	4.0	5.5	7.0	8.5	10.0	11.5	13.0
	14.5	16.0	17.5	19.0	20.5	22.0	23.5	25.0	26.5
BB-9	50/3	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	0/30	1/30	2/30	23/30	26/30		
BB-14	50/2	0/30	0/30	0/30		0/30	0/30		0/30
	0/30		40/30	40/30	45/30	50/30	50/5	50/4	
BB-15	2/30	3/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30		
BB-16	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	1/30	1/30	50/14						
BB-17	1/30	1/30	1/30	2/30	2/30	1/30	2/30	2/30	
	2/30	2/30	2/30	3/30	4/30	5/30	50/13		
BB-18	1/30	0/30	0/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	
	1/30	2/30	2/30	2/30	2/30	2/30	28/30	50/9	
BB-19	2/30	0/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	
	1/30	3/30	26/30	33/30	50/23	50/18			
BB-20	1/30	1/30	2/30	1/30	1/30	1/30	2/30	3/30	
	15/30	7/30	8/30	12/30					

표 4.2 표준관입시험 결과

구분	심도 $GL, (-)m$								
	1.0	2.5	4.0	5.5	7.0	8.5	10.0	11.5	13.0
	14.5	16.0	17.5	19.0	20.5	22.0	23.5	25.0	26.5
BB-21	1/30	1/30	1/30	2/30	2/30	1/30	1/30	1/30	2/30
	1/30	1/30	1/30	1/30	11/30	15/30	37/30		
BB-22	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	1/30	1/30	2/30	1/30	1/30	1/30	15/30		
BB-23	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	0/30	4/30	5/30				
BB-24	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	0/30	6/30	27/30				
BB-25	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	0/30	5/30	4/30				
BB-26	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	1/30	50/5							
BB-27	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	4/30	50/6
BB-28	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	11/30		
BB-29	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	10/30	12/30					
BB-30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	12/30	11/30	16/30				
BB-31	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	1/30	1/30	2/30	1/30	1/30	2/30	26/30		
BB-32	1/30	1/30	1/30	1/30	2/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	1/30	2/30	1/30	1/30	2/30	2/30	43/30	50/9	
BB-33	1/30	1/30	1/30	1/30	2/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	2/30	1/30	1/30	2/30	2/30	2/30	2/30		
BB-34	2/30	2/30	1/30	2/30	1/30	1/30	1/30	2/30	1/30
	1/30	2/30	2/30	1/30	1/30	2/30	2/30		
BB-35	1/30	1/30	1/30	1/30	2/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	2/30	1/30	1/30	2/30	2/30	15/30	21/30		
BB-36	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	2/30	1/30	2/30	1/30	2/30	2/30	31/30		
BB-37	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30
	0/30	0/30	0/30	50/3					
BB-38	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30	1/30
	2/30	1/30	1/30	1/30	1/30	2/30	50/7		

4.2 실내시험 결과

1) 기본물성시험(얇은구간)

표 4.3은 시추공 38개소의 저심도 구간에 대한 기본 물성시험 결과값을 나타낸 것이다.

기본물성시험의 경우 지반의 심도를 기준으로 자연함수비(W_n), 비중(G_s), 애터버그한계(액성한계(LL), 소성한계(PL)), 체분석에 대한 결과값을 토대로 통일분류법(USCS)에 의한 흙의 분류를 나타내었다. 지반의 심도는 얇은 구간(약 0.0~7.0, 8.0m)과 깊은구간(약 7.0~15.0m 이하)으로 나누어 그 결과를 확인하였다.

자연함수비의 경우 최소 36.3%에서 최대 74.2%로 확인되었으며, 대부분 높은 함수율을 확인하였다. 이외 액성한계, 소성한계 또한 점성토 구간으로 확인되었고, #200 통과량은 최소 97% 이상으로 통일분류법상 흙의 종류는 대부분 점성토(CH , CL)성분을 확인할 수 있고, 각각의 시험결과를 수치해석을 통한 설계침하량을 산정하는데 사용하였다.

표 4.3 기본물성실험 - 얇은구간(계속)

구분	심도 $GL, (-)m$	W_n (%)	G_s	애터버그 한계(%)		입도분포 시험					USCS	비고
				LL	PL	#4	#10	#40	#200	2μ		
BB-1	3.0~3.8	61.0	2.707	71.4	48.7	100	100	99.87	99.78	53.09	CH	
BB-2	2.0~2.8	57.9	2.712	75.8	51	100	100	100.0	99.57	55.13	CH	
BB-3	6.0~6.8	57.3	2.709	72.6	49.7	100	100	100.0	99.9	59.96	CH	
BB-4	3.5~4.3	65.7	2.706	75.8	51.8	100	100	99.74	99.52	33.37	CH	
BB-5	6.5~7.3	61.0	2.695	79	55.3	100	100	99.84	99.67	28.06	CH	
BB-6	3.0~3.8	58.6	2.693	79.5	55	100	100	99.93	99.87	37.08	CH	
BB-7	3.5~4.3	43.7	2.684	47.3	27.5	100	100	99.89	99.56	25.25	CL	
BB-8	5.0~5.8	52.8	2.692	61	32.5	100	99.87	99.78	99.63	26.73	CH	
BB-9	3.0~3.8	62.3	2.697	72.2	46.8	100	100	99.94	99.83	37.32	CH	
BB-10	6.5~7.3	52.2	2.695	60.6	33.7	100	99.97	99.89	99.77	22	CH	
BB-11	4.0~4.8	48.9	2.707	55.6	34.3	100	100	99.91	99.38	24.76	CH	
BB-12	5.0~5.8	47.8	2.696	54.4	30.8	100	100	99.97	99.76	23.73	CH	
BB-13	3.5~4.3	56.0	2.691	59.5	34.4	100	99.95	99.86	99.59	21.32	CH	
BB-14	2.5~3.3	55.4	2.702	61.8	40.7	100	99.97	99.90	99.84	36.48	CH	
BB-15	7.5~8.3	56.7	2.695	69.9	44.7	100	99.44	99.01	98.33	30.99	CH	
BB-16	3.0~3.8	46.2	2.698	74.2	50	100	99.97	99.29	97.36	25.27	CH	
BB-17	5.0~5.8	45.5	2.701	65.7	43.6	100	99.97	99.84	99.49	29.13	CH	
BB-18	6.0~6.8	54.7	2.697	65.9	43.3	100	99.88	99.67	98.8	26.94	CH	
BB-19	4.0~4.8	59.1	2.703	68.9	43.9	100	100	99.9	98.68	27.92	CH	
BB-20	5.0~5.8	45.6	2.698	53.6	28.3	100	100	99.87	99.57	31.03	CH	

표 4.3 기본물성실험 - 얇은구간

구분	심도 $GL, (-)m$	W_n (%)	G_s	애터버그 한계(%)		입도분포 시험					USCS	비 고
				LL	PL	#4	#10	#40	#200	2μ		
BB-21	3.0~3.8	55.6	2.702	72.6	53.5	100	100	99.84	98.85	27.32	CH	
BB-22	4.0~4.8	52.0	2.707	80.4	58.8	100	100	99.94	99.73	21.07	CH	
BB-23	5.0~5.8	48.7	2.708	51.8	27.6	100	100	99.94	99.8	30.51	CH	
BB-24	4.0~4.8	42.3	2.700	50.8	26.4	100	100	99.93	99.78	25.84	CH	
BB-25	3.0~3.8	44.3	2.695	54.8	31.6	100	100	99.94	99.7	36.96	CH	
BB-26	4.0~4.8	55.4	2.710	66.4	45.6	100	100	100	99.89	26.85	CH	
BB-27	2.0~2.8	74.2	2.699	84.9	63	100	100	99.87	99.49	32.89	CH	
BB-28	2.0~2.8	61.1	2.705	87.5	65.3	100	100	98.75	97.57	35.45	CH	
BB-29	3.0~3.8	63.1	2.700	84.4	60.9	100	100	99.93	99.72	32.29	CH	
BB-30	4.0~4.8	63.6	2.698	79.5	55.9	100	100	99.97	99.43	32.94	CH	
BB-31	5.0~5.8	62.4	2.702	81.2	59.5	100	100	97.62	96.85	31.29	CH	
BB-32	3.0~3.8	65.3	2.699	77.9	53.2	100	100	99.97	99.74	48.21	CH	
BB-33	5.0~5.8	47.9	2.695	58.2	33.4	100	100	99.95	99.86	25.74	CH	
BB-34	6.0~6.8	50.7	2.702	66.4	42.6	100	100	99.92	99.82	31.47	CH	
BB-35	3.0~3.8	61.0	2.713	96.4	73.4	100	100	99.93	99.84	42.25	CH	
BB-36	5.0~5.8	51.1	2.695	63.6	37.4	100	100	99.97	99.74	27.71	CH	
BB-37	5.0~5.8	56.4	2.692	62.4	39.8	100	100	99.92	99.76	27.32	CH	
BB-38	4.0~4.8	49.6	2.69	60.1	39.2	100	100	99.94	99.83	19.78	CH	

2) 기본물성시험(깊은구간)

표 4.4는 시추공 38개소의 고심도 구간에 대한 기본 물성시험 결과값을 나타낸 것이다. 지반의 심도는 약 7.0~15.0m 구간에 대해 실험을 수행하였다.

자연함수비의 경우 최소 36.3%에서 최대 73.6%로 확인되었으며, 얕은구간과 마찬가지로 대부분 높은 함수율을 확인하였다. 이외 액성한계, 소성한계 또한 점성토 구간으로 확인되었고, #200 통과량은 최소 97% 이상으로 통일분류법상 흙의 종류는 대부분 점성토(*CH*, *CL*) 성분을 확인할 수 있고, 각각의 실험결과를 수치해석을 통한 설계침하량을 산정하는데 사용하였다.

표 4.4 기본물성실험 - 깊은구간(계속)

구분	심도 $GL, (-)m$	W_n (%)	G_s	애터버그 한계(%)		입도분포 시험					USCS	비 고
				LL	PL	#4	#10	#40	#200	2μ		
BB-1	15.0~15.8	47.4	2.693	62.6	40.9	100	100	100	99.87	48.34	CH	
BB-2	5.0~5.8	61.2	2.718	76.4	52.6	100	100	100	99.86	63.14	CH	
BB-3	15.0~15.8	45.8	2.698	60.3	37.9	100	100	100	99.82	49.47	CH	
BB-4	8.0~8.8	64	2.704	68.6	45.7	100	100	99.92	99.67	36.12	CH	
BB-5	14.0~14.8	57.9	2.694	62.9	36.9	100	100	99.92	99.79	26.34	CH	
BB-6	7.5~8.3	57.5	2.694	78.9	53.1	100	100	99.97	99.85	37.39	CH	
BB-7	9.5~10.3	53.0	2.693	55.1	34	100	100	99.84	99.15	29.59	CH	
BB-8	9.5~10.3	53.9	2.697	61.7	31.9	100	100	99.89	99.69	28.42	CH	
BB-9	10.5~11.3	40.5	2.69	47.8	23.9	100	100	99.9	99.65	28.44	CL	
BB-10	12.5~13.3	49.6	2.698	55.2	32.4	100	100	99.95	99.5	26.02	CH	
BB-11	8.0~8.8	49.8	2.7	55.1	34.2	100	100	99.91	99.25	20.71	CH	
BB-12	11.0~11.8	55.2	2.693	56.3	34	100	100	99.85	99.35	22.34	CH	
BB-13	9.5~10.3	47.4	2.695	51.9	27.6	100	100	99.91	99.61	22.88	CH	
BB-14	11.5~12.3	49.4	2.691	61.3	36	100	100	99.94	99.53	33.63	CH	
BB-15	12.5~13.3	49.9	2.698	66.1	44	100	100	99.92	99.81	29.85	CH	
BB-16	11.0~11.8	45.1	2.699	72.6	48.4	100	99.95	99.88	99.72	25.82	CH	
BB-17	11.0~11.8	63.4	2.705	75.5	53.5	100	99.97	99.88	99.68	27.52	CH	
BB-18	13.0~13.8	33.5	2.686	47.2	29	100	99.33	99.21	98.55	23.38	CL	
BB-19	9.0~9.8	40.1	2.682	48.6	25.1	100	100	99.94	99.7	19.34	CL	
BB-20	10.0~10.8	42.8	2.7	52.8	30.1	100	100	99.94	99.78	23.77	CH	

표 4.4 기본물성실험 - 깊은구간

구분	심도 $GL_s (-)m$	W_n (%)	G_s	애터버그 한계(%)		입도분포 시험					USCS	비고
				LL	PL	#4	#10	#40	#200	2μ		
BB-21	8.0~8.8	36.3	2.695	58.4	37.1	100	100	99.88	99.48	23.64	CH	
BB-22	10.0~10.8	45.8	2.694	54.5	32	100	99.95	99.77	99.44	19.22	CH	
BB-23	8.0~8.8	48.4	2.699	78.6	56.6	100	100	98.5	97.6	20.52	CH	
BB-24	10.0~10.8	39.3	2.687	50.9	24.2	100	100	99.94	99.54	17.55	CH	
BB-25	12.0~12.8	59.2	2.705	67.3	45.3	100	99.95	99.86	99.71	41	CH	
BB-26	9.0~9.8	53.6	2.694	57.6	35.2	100	100	99.75	97.81	27.29	CH	
BB-27	8.0~8.8	66.3	2.704	89.1	67.9	100	100	99.73	99.31	36.92	CH	
BB-28	8.0~8.8	52.5	2.702	69.2	48	100	100	99.89	99.67	23.55	CH	
BB-29	5.0~5.8	46.8	2.706	58.6	37.2	100	100	99.85	99.73	29.45	CH	
BB-30	10.0~10.8	73.6	2.705	86.6	66.1	100	100	99.95	99.77	35.84	CH	
BB-31	12.0~12.8	58.7	2.696	75.8	51.4	100	100	100	99.42	34.74	CH	
BB-32	9.0~9.8	46.6	2.695	55	29.9	100	100	100	99.88	32.77	CH	
BB-33	14.0~14.8	40.3	2.694	53.4	31.5	100	100	99.91	99.69	21.84	CH	
BB-34	16.0~16.8	41.6	2.695	51	29	100	100	99.96	99.54	25.9	CH	
BB-35	12.0~12.8	67.7	2.706	85.1	59.3	100	100	99.97	99.86	45.68	CH	
BB-36	10.0~10.8	45.9	2.693	57.1	29.9	100	100	99.94	99.82	32.72	CH	
BB-37	10.0~10.8	64.6	2.694	78.7	56.4	100	99.97	99.75	98.88	30.37	CH	
BB-38	13.0~13.8	44.9	2.688	58.8	37.6	100	99.97	99.88	99.75	17.53	CH	

3) 역학적시험(얕은구간)

표 4.5는 시추공 38개소의 저심도 구간에 대한 역학적시험 결과값을 나타낸 것이다. 지반의 심도는 기본물성시험과 마찬가지로 얕은 구간(약 0.0~7.0, 8.0m)과 깊은 구간(약 7.0~15.0m 이하)으로 나누어 그 결과를 확인하였다.

역학적시험의 경우 지반의 심도를 기준으로 일축압축시험을 이용한 일축압축강도(q_u), 예민비(S_t)를 산정하였으며, 삼축압축시험에 따른 점착력(c), 내부마찰각(ϕ)을 산정하였다. 설계침하량 산정을 위하여 압밀시험을 수행하여 선행압밀하중(P_c), 압축지수(C_c), 초기간극비(e_0)를 산정하였다.

실험결과, 일축압축강도의 경우 최소 $0.34kgf/cm^2$ 에서 최대 $0.63kgf/cm^2$ 를 확인하였으며, 삼축압축시험을 통한 점착력의 경우 최소 $0.18kgf/cm^2$ 에서 최대 $0.336kgf/cm^2$ 를 확인하였다. 압밀시험의 경우 선행압밀하중이 최소 $0.57kgf/cm^2$ 에 최대 $1.173kgf/cm^2$ 를 확인하였다.

표 4.5 역학적시험 - 얽은구간(계속)

구분	심도 $GL_s (-)m$	입축압축강도시험			삼축압축시험		표준압밀시험			비고
		q_u	q_{ur}	S_t	c_u	ϕ	P_c	C_c	e_0	
BB-1	3.0~3.8	0.352	0.05	7.04	-	-	0.64	0.67	1.658	
BB-2	2.0~2.8	0.341	0.062	5.5	0.18	-	0.87	0.66	1.575	
BB-3	6.0~6.8	0.348	0.05	6.96	0.199	-	0.79	0.63	1.553	
BB-4	3.5~4.3	0.654	0.2	3.26	0.336	-	1.173	0.834	1.798	
BB-5	6.5~7.3	0.34	0.09	3.78	0.177	-	0.734	0.697	1.647	
BB-6	3.0~3.8	0.373	0.097	3.86	0.202	-	0.597	0.698	1.592	
BB-7	3.5~4.3	0.439	0.12	3.65	0.24	-	0.517	0.354	1.177	
BB-8	5.0~5.8	0.474	0.13	3.64	0.249	-	0.982	0.646	1.445	
BB-9	3.0~3.8	0.224	0.037	6.06	0.121	-	0.547	0.506	1.483	
BB-10	6.5~7.3	0.61	0.174	3.5	0.313	-	0.942	0.589	1.415	
BB-11	4.0~4.8	0.632	0.2	3.16	0.331	-	0.763	0.482	1.346	
BB-12	5.0~5.8	0.501	0.158	3.16	0.256	-	0.75	0.505	1.329	
BB-13	3.5~4.3	0.462	0.116	3.98	0.239	-	0.729	0.601	1.526	
BB-14	2.5~3.3	0.379	0.115	3.29	0.197	-	0.445	0.559	1.615	
BB-15	7.5~8.3	0.496	0.167	2.96	0.235	-	0.759	0.651	1.514	
BB-16	3.0~3.8	0.547	0.144	3.79	0.287	-	1.006	0.641	1.415	
BB-17	5.0~5.8	0.448	0.128	3.51	0.302	-	1.067	0.481	1.302	
BB-18	6.0~6.8	0.464	0.114	4.06	0.239	-	1.111	0.71	1.516	
BB-19	4.0~4.8	0.439	0.088	4.99	0.246	-	0.57	0.58	1.587	
BB-20	5.0~5.8	0.635	0.149	4.26	0.322	-	1.068	0.473	1.235	

표 4.5 역학적시험 - 얇은구간

구분	심도 $GL_s (-)m$	입축압축강도시험			삼축압축시험		표준압밀시험			비고
		q_u	q_{ur}	S_t	c_u	ϕ	P_c	C_c	e_0	
BB-21	3.0~3.8	0.257	0.047	5.48	0.138	-	0.607	0.664	1.613	
BB-22	4.0~4.8	0.285	0.055	5.14	0.148	-	0.488	0.632	1.553	
BB-23	5.0~5.8	0.438	0.117	3.75	0.232	-	0.848	0.455	1.324	
BB-24	4.0~4.8	0.581	0.183	3.17	0.314	-	0.908	0.367	1.145	
BB-25	3.0~3.8	0.526	0.109	4.81	0.281	-	0.557	0.446	1.285	
BB-26	4.0~4.8	0.507	0.122	4.15	0.263	-	0.634	0.652	1.534	
BB-27	2.0~2.8	0.089	-	-	0.054	-	0.392	0.745	2.046	
BB-28	2.0~2.8	0.068	-	-	0.032	-	0.315	0.579	1.82	
BB-29	3.0~3.8	0.098	-	-	0.056	-	0.273	0.48	1.841	
BB-30	4.0~4.8	0.129	0.031	4.12	0.082	-	0.216	0.588	1.881	
BB-31	5.0~5.8	0.31	0.076	4.09	0.282	-	0.441	0.625	1.749	
BB-32	3.0~3.8	0.146	0.032	4.58	0.077	-	0.329	0.613	1.783	
BB-33	5.0~5.8	0.538	0.112	4.82	0.276	-	0.893	0.501	1.295	
BB-34	6.0~6.8	0.565	0.131	4.3	0.278	-	1.077	0.575	1.371	
BB-35	3.0~3.8	0.06	-	-	0.033	-	0.205	0.56	1.769	
BB-36	5.0~5.8	0.415	0.115	3.6	0.228	-	0.756	0.604	1.401	
BB-37	5.0~5.8	0.106	0.021	5.03	0.145	-	0.275	0.443	1.533	
BB-38	4.0~4.8	0.281	0.059	4.79	0.141	-	0.628	0.707	1.418	

4) 역학적시험(깊은구간)

표 4.6은 시추공 38개소의 깊은구간에 대한 역학적시험 결과값을 나타낸 것이다. 깊은구간의 경우 약 7.0~15.0m 이하 분포에 대한 실험결과를 수록하였다.

실험결과, 일축압축강도의 경우 최소 0.20kgf/cm²에서 최대 0.90kgf/cm²를 확인 하였으며, 삼축압축시험을 통한 점착력의 경우 최소 0.13kgf/cm²에서 최대 0.36 kgf/cm²를 확인하였다. 압밀시험의 경우 선형압밀하중이 최소 0.22kgf/cm²에 최대 1.65kgf/cm²를 확인하였다.

표 4.6 역학적시험 - 깊은구간(계속)

구분	심도 GL, (-)m	일축압축강도시험			삼축압축시험		표준압밀시험			비고
		q_u	q_{ur}	S_t	c_u	ϕ	P_c	C_c	e_0	
BB-1	15.0~15.8	0.432	0.053	8.15	0.230	-	0.95	0.54	1.294	
BB-2	5.0~5.8	0.388	0.075	5.17	0.340	-	0.73	0.68	1.665	
BB-3	15.0~15.8	0.621	0.063	9.86	0.332	-	1.13	0.52	1.238	
BB-4	8.0~8.8	0.416	0.109	3.84	0.214	-	0.948	0.749	1.739	
BB-5	14.0~14.8	0.551	0.162	3.41	0.286	-	1.072	0.734	1.578	
BB-6	7.5~8.3	0.426	0.125	3.4	0.24	-	1.133	0.631	1.42	
BB-7	9.5~10.3	0.549	0.144	3.8	0.274	-	0.801	0.566	1.44	
BB-8	9.5~10.3	0.522	0.143	3.64	0.267	-	1.162	0.652	1.455	
BB-9	10.5~11.3	0.487	0.113	4.3	0.252	-	0.612	0.428	1.215	
BB-10	12.5~13.3	0.905	0.207	4.37	0.463	-	1.178	0.546	1.34	
BB-11	8.0~8.8	0.644	0.161	3.99	0.328	-	0.89	0.49	1.35	
BB-12	11.0~11.8	0.62	0.165	3.75	0.365	-	0.678	0.451	1.497	
BB-13	9.5~10.3	0.776	0.194	4	0.375	-	1.655	0.539	1.288	
BB-14	11.5~12.3	0.653	0.15	4.36	0.333	-	1.106	0.558	1.393	
BB-15	12.5~13.3	0.738	0.177	4.18	0.369	-	1.08	0.651	1.375	
BB-16	11.0~11.8	0.383	0.086	4.47	0.195	-	0.917	0.58	1.374	
BB-17	11.0~11.8	0.377	0.095	3.95	0.2	-	0.645	0.707	1.718	
BB-18	13.0~13.8	0.23	0.053	4.38	0.131	-	0.556	0.327	1.024	
BB-19	9.0~9.8	0.498	0.138	3.61	0.251	-	0.702	0.436	1.17	
BB-20	10.0~10.8	0.438	0.107	4.09	0.236	-	1.073	0.422	1.166	

표 4.6 역학적시험 - 깊은구간

구분	심도 $GL, (-) m$	입축압축강도시험			삼축압축시험		표준압밀시험			비고
		q_u	q_{ur}	S_t	c_u	ϕ	P_c	C_c	e_0	
BB-21	8.0~8.8	0.5	0.155	3.22	0.256	-	1.018	0.277	1.051	
BB-22	10.0~10.8	0.485	0.098	4.95	0.25	-	0.546	0.412	1.22	
BB-23	8.0~8.8	0.457	0.103	4.44	0.243	-	1.098	0.528	1.321	
BB-24	10.0~10.8	0.616	0.17	3.62	0.345	-	0.924	0.365	1.119	
BB-25	12.0~12.8	0.515	0.115	4.48	0.255	-	0.584	0.642	1.643	
BB-26	9.0~9.8	0.176	0.038	4.66	0.245	-	0.358	0.702	1.718	
BB-27	8.0~8.8	0.2	0.036	5.55	0.102	-	0.402	0.663	1.859	
BB-28	8.0~8.8	0.492	0.143	3.45	0.249	-	0.585	0.508	1.452	
BB-29	5.0~5.8	0.375	0.08	4.67	0.2	-	0.549	0.484	1.372	
BB-30	10.0~10.8	0.146	0.031	4.63	0.074	-	0.226	0.642	2.052	
BB-31	12.0~12.8	0.327	0.081	4.02	0.178	-	0.424	0.598	1.678	
BB-32	9.0~9.8	0.636	0.128	4.96	0.325	-	1.171	0.532	1.258	
BB-33	14.0~14.8	0.729	0.151	4.83	0.371	-	1.399	0.469	1.107	
BB-34	16.0~16.8	0.644	0.208	3.09	0.346	-	1.219	0.414	1.187	
BB-35	12.0~12.8	0.085	-	-	0.057	-	0.576	0.694	1.884	
BB-36	10.0~10.8	0.592	0.152	3.91	0.305	-	1.246	0.525	1.25	
BB-37	10.0~10.8	0.096	0.028	3.44	0.055	-	0.755	0.825	1.754	
BB-38	13.0~13.8	0.545	0.118	4.61	0.283	-	1.064	0.416	1.209	

4.3 설계 및 계측침하량 검토

설계 및 계측침하량 분석 결과에서는 수치해석프로그램을 통한 설계침하량과 계측기를 통해 도출한 계측침하량에 대한 분석결과를 나타내었으며, 이는 기존의 연약지반 설계시 적용되는 설계 프로세스와 동일하다.

설계침하량과 계측침하량의 차이를 비교·분석하여 각 지반설계정수들에 따른 상관관계를 확인하고자 하였다.

4.3.1 해석결과

표 4.7 ~ 표 4.11은 K-embank를 통한 연약지반 해석시 설계침하량과 지표침하판 설치에 따른 계측값을 반영하여 현장계측에 따른 연약지반 예측법인 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법 등을 이용하여 계측침하량을 나타낸 것이다.

각각의 침하량은 도로구간, 단지구간, 배수로구간에 대하여 구분을 하였으며, 표 4.7 ~ 표 4.9는 도로구간, 표 4.10은 단지구간, 표 4.11은 배수로 구간에 대한 침하량 분석 결과를 나타낸 것이다.

표 4.7~4.9는 도로구간의 연약지반 설계에 따른 설계침하량과 계측을 통한 계측 침하량 결과를 나타낸 것이다.

각 공구별 설계 및 계측결과에 따른 침하량 결과를 나타낸 것으로, 차이비율은 설계침하량 대비 계측침하량의 백분율을 나타낸 것이다.

표 4.7 연약지반의 설계 및 계측결과 - 도로구간(1-1공구)

구분		설계 침하량 (cm)	지표 침하량 침하량 (cm)	분석기법 적용							설계 대비 침하량 차이 (cm)	차이 비율 (%)
공구	공 번			쌍곡선 법	\sqrt{t} 법	Asaoka 법	Monden 법	적용 평균값	허용 침하량 (cm)	목표 침하량 (cm)		
1-1	S1-1-01	168.0	144.0	148.0	147.0	148.0	151.0	148.5	10.0	138.5	29.5	17.6
	S1-1-02	247.0	173.0	184.0	183.0	182.0	183.0	183.0	10.0	173.0	74.0	30.0
	S1-1-04	247.0	152.0	154.0	157.0	161.0	159.0	157.8	10.0	147.8	99.3	40.2
	S1-1-05	275.0	161.0	168.0	167.0	164.0	165.0	166.0	10.0	156.0	119.0	43.3
	S1-1-06	331.0	263.0	269.0	267.0	264.0	264.0	266.0	5.0	261.0	70.0	21.1
	S1-1-07	331.0	261.0	263.0	264.0	265.0	268.0	265.0	10.0	255.0	76.0	23.0
	S1-1-09	275.0	185.0	187.0	191.0	187.0	190.0	188.8	10.0	178.8	96.3	35.0
	S1-1-12	243.0	175.0	183.0	184.0	177.0	180.0	181.0	10.0	171.0	72.0	29.6
	S1-1-13	260.0	207.0	213.0	212.0	209.0	210.0	211.0	10.0	201.0	59.0	22.7
	S1-1-15	260.0	193.0	193.0	194.0	198.0	195.0	195.0	10.0	185.0	75.0	28.8
	S1-1-16	329.0	234.0	241.0	242.0	235.0	238.0	239.0	5.0	234.0	95.0	28.9
S1-1-17	324.0	247.0	248.0	251.0	251.0	250.0	250.0	5.0	245.0	79.0	24.4	

표 4.8 연약지반의 설계 및 예측결과 - 도로구간(1-2공구)

구분		설계 침하량 (cm)	지표 침하판 침하량 (cm)	분석기법 적용							설계 대비 침하량 차이 (cm)	차이 비율 (%)
공구	공 번			쌍곡선 법	\sqrt{t} 법	Asaoka 법	Monden 법	적용 평균값	허용 침하량 (cm)	목표 침하량 (cm)		
1-2	S1-2-01	326.0	250.0	256.0	252.0	258.0	255.0	255.3	10.0	245.3	80.8	24.8
	S1-2-03	272.0	185.0	188.0	191.0	190.0	192.0	190.3	10.0	180.3	91.8	33.7
	S1-2-04	180.0	111.0	111.0	113.0	113.0	114.0	112.8	5.0	107.8	72.3	40.1
	S1-2-05	212.0	131.0	134.0	132.0	134.0	136.0	134.0	10.0	124.0	88.0	41.5
	S1-2-07	277.0	202.0	203.0	202.0	204.0	205.0	203.5	10.0	193.5	83.5	30.1
	S1-2-09	276.0	197.0	199.0	198.0	201.0	200.0	199.5	10.0	189.5	86.5	31.3
	S1-2-10	226.0	154.0	157.0	156.0	158.0	156.0	156.8	10.0	146.8	79.3	35.1
	S1-2-12	209.0	106.0	109.0	110.0	112.0	113.0	111.0	10.0	101.0	108.0	51.7
	S1-2-18	171.0	113.0	114.0	115.0	114.0	114.0	114.3	10.0	104.3	66.8	39.0
	S1-2-19	166.0	74.0	78.0	79.0	81.0	83.0	80.3	10.0	70.3	95.8	57.7
	S1-2-20	290.0	165.0	167.0	166.0	167.0	168.0	167.0	5.0	162.0	128.0	44.1
	S1-2-21	209.0	119.0	122.0	121.0	121.0	117.0	120.3	10.0	110.3	98.8	47.2
	S1-2-22	153.0	83.0	88.0	89.0	87.0	87.0	87.8	10.0	77.8	75.3	49.2
	S1-2-23	153.0	88.0	93.0	94.0	92.0	94.0	93.3	10.0	83.3	69.8	45.6
	S1-2-24	154.0	130.0	131.0	132.0	133.0	134.0	132.5	5.0	127.5	26.5	17.2
	S1-2-26	42.0	27.0	35.0	34.0	34.0	35.0	34.5	10.0	24.5	17.5	41.7
S1-2-02	224.0	170.0	171.0	171.0	171.0	170.0	170.8	10.0	160.8	63.3	28.2	

표 4.9 연약지반의 설계 및 예측결과 - 도로구간(1-3, 1-4공구)

구분		설계 침하량 (cm)	지표 침하판 침하량 (cm)	분석기법 적용							설계 대비 침하량 차이 (cm)	차이 비율 (%)
공구	공 번			쌍곡선 법	\sqrt{t} 법	Asaoka 법	Monden 법	적용 평균값	허용 침하량 (cm)	목표 침하량 (cm)		
1-3	S1-3-01	135.0	148.0	153.0	153.0	156.0	155.0	154.3	10.0	144.3	-9.3	-6.9
	S1-3-03	164.0	106.0	114.0	113.0	112.0	114.0	113.3	10.0	103.3	60.8	37.0
	S1-3-04	182.0	175.0	195.0	194.0	195.0	194.0	194.5	5.0	189.5	-7.5	-4.1
	S1-3-05	158.0	132.0	143.0	143.0	142.0	141.0	142.3	10.0	132.3	25.8	16.3
	S1-3-06	209.0	137.0	148.0	143.0	146.0	146.0	145.8	10.0	135.8	73.3	35.0
	S1-3-10	217.0	164.0	168.0	167.0	167.0	167.0	167.3	10.0	157.3	59.8	27.5
	S1-3-11	217.0	123.0	132.0	131.0	131.0	132.0	131.5	10.0	121.5	95.5	44.0
	S1-3-12	239.0	133.0	131.0	131.0	131.0	131.0	131.0	10.0	121.0	118.0	49.4
	S1-3-13	325.0	221.0	226.0	226.0	226.0	226.0	226.0	5.0	221.0	104.0	32.0
	S1-3-14	166.0	102.0	111.0	110.0	111.0	110.0	110.5	10.0	100.5	65.5	39.5
	S1-3-16	196.0	182.0	184.0	182.0	185.0	182.0	183.3	10.0	173.3	22.8	11.6
	S1-3-17	171.0	127.0	134.0	131.0	138.0	137.0	135.0	10.0	125.0	46.0	26.9
	S1-3-18	171.0	102.0	112.0	111.0	111.0	110.0	111.0	10.0	101.0	70.0	40.9
	S1-3-19	114.0	96.0	100.0	100.0	103.0	96.0	99.8	10.0	89.8	24.3	21.3
	S1-3-20	72.0	12.0	14.0	14.0	12.0	13.0	13.3	10.0	3.3	68.8	95.5
	S1-3-21	72.0	8.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.5	10.0	-1.5	73.5	102.1
	S1-3-22	101.0	36.0	45.0	44.0	46.0	44.0	44.8	10.0	34.8	66.3	65.6
	S1-3-23	56.0	21.0	38.0	37.0	40.0	38.0	38.3	30.0	8.3	47.8	85.3
	1-4	S1-4-01	225.0	168.0	181.0	182.0	181.0	181.0	181.3	10.0	171.3	53.8

표 4.10은 단지구간의 연약지반 설계에 따른 목표설계침하량과 계측을 통한 계측 침하량 결과를 나타낸 것이다.

각 공구별 설계 및 계측결과에 따른 침하량 결과를 나타낸 것으로, 차이비율은 설계침하량 대비 목표침하량의 백분율을 나타낸 것이다.

표 4.10 연약지반의 설계 및 계측결과 - 단지구간

구분		설계 침하량 (cm)	지표 침하량 (cm)	분석기법 적용							설계 대비 침하량 차이 (cm)	차이 비율 (%)
공구	공 번			쌍곡선 법	\sqrt{t} 법	Asaoka 법	Monden 법	적용 평균값	허용 침하량 (cm)	목표 침하량 (cm)		
1-1	S1-1-03	192.0	107.0	112.0	113.0	111.0	112.0	112.0	30.0	82.0	110.0	57.3
	S1-1-10	256.0	187.0	189.0	189.0	189.0	188.0	188.8	10.0	178.8	77.3	30.2
	S1-1-11	200.0	131.0	131.0	131.0	133.0	132.0	131.8	10.0	121.8	78.3	39.1
	S1-1-14	234.0	159.0	159.0	159.0	160.0	160.0	159.5	10.0	149.5	84.5	36.1
	S1-1-18	152.0	164.0	168.0	168.0	168.0	167.0	167.8	10.0	157.8	-5.8	-3.8
1-2	S1-2-06	231.0	130.0	130.0	131.0	131.0	130.0	130.5	10.0	120.5	110.5	47.8
	S1-2-11	187.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	10.0	130.0	57.0	30.5
	S1-2-13	169.0	95.0	97.0	97.0	96.0	97.0	96.8	10.0	86.8	82.3	48.7
	S1-2-14	215.0	103.0	104.0	104.0	103.0	103.0	103.5	10.0	93.5	121.5	56.5
	S1-2-15	141.0	78.0	80.0	80.0	80.0	79.0	79.8	30.0	49.8	91.3	64.7
	S1-2-16	194.0	78.0	83.0	84.0	82.0	83.0	83.0	10.0	73.0	121.0	62.4
	S1-2-18	171.0	113.0	114.0	115.0	114.0	114.0	114.3	10.0	104.3	66.8	39.0
1-3	S1-3-02	60.0	83.0	82.0	82.0	80.0	83.0	81.8	30.0	51.8	8.3	13.8
	S1-3-07	133.0	69.0	148.0	143.0	146.0	146.0	145.8	30.0	115.8	17.3	13.0
	S1-3-08	78.0	49.0	148.0	143.0	146.0	146.0	145.8	30.0	115.8	-37.8	-48.4
	S1-3-09	190.0	134.0	148.0	143.0	146.0	146.0	145.8	10.0	135.8	54.3	28.6
	S1-3-15	84.0	134.0	111.0	110.0	111.0	110.0	110.5	30.0	80.5	3.5	4.2
1-4	S1-4-02	165.0	168.0	175.0	175.0	175.0	174.0	174.8	10.0	164.8	0.3	0.2
	S1-4-03	137.0	143.0	147.0	148.0	147.0	147.0	147.3	10.0	137.3	-0.3	-0.2

표 4.11은 배수로구간의 연약지반 설계에 따른 목표설계침하량과 계측을 통한 계측침하량 결과를 나타낸 것이다.

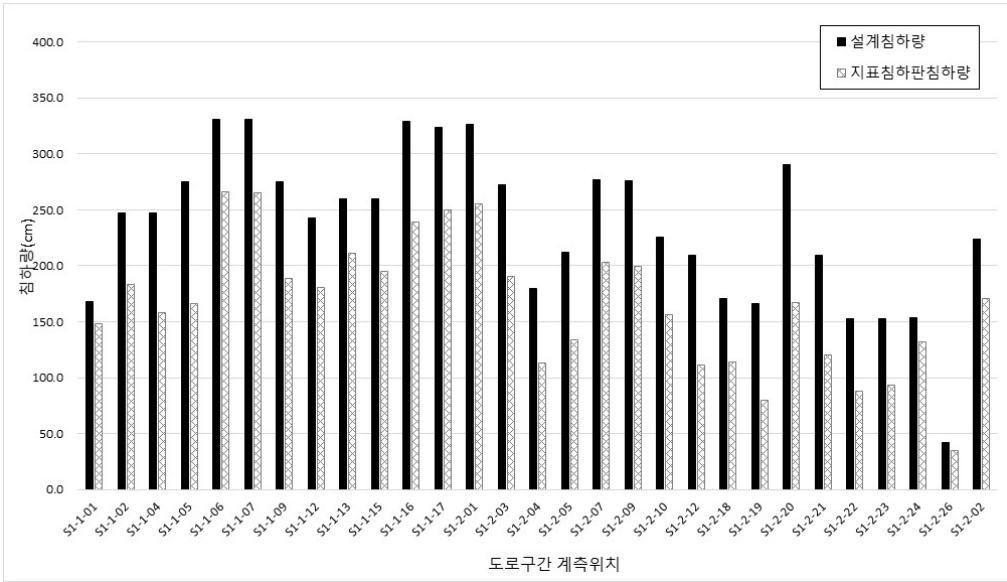
각 공구별 설계 및 계측결과에 따른 침하량 결과를 나타낸 것으로, 차이비율은 설계침하량 대비 목표침하량의 백분율을 나타낸 것이다.

표 4.11 연약지반의 설계 및 계측결과 - 배수로구간

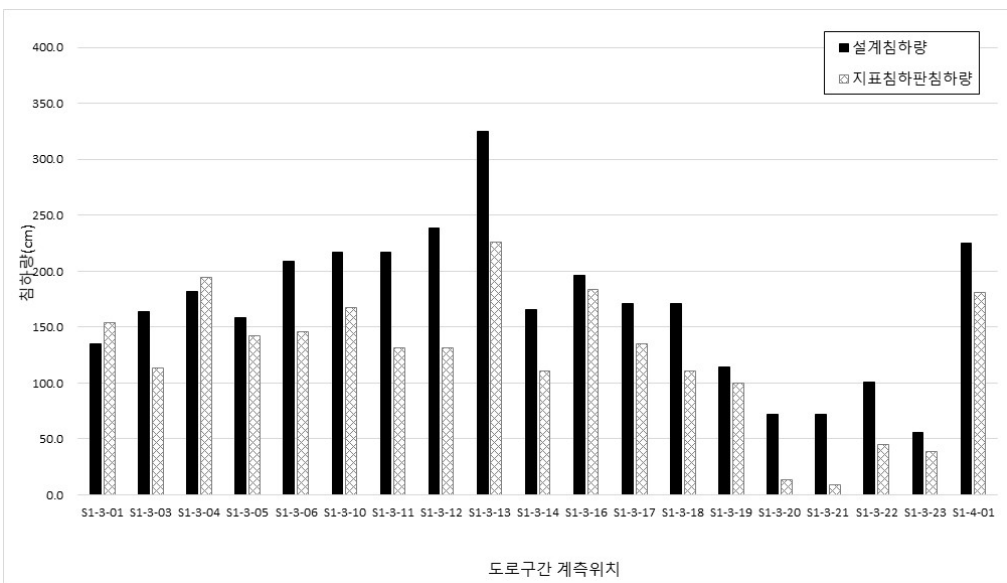
구분		설계 침하량 (cm)	지표 침하량 침하량 (cm)	분석기법 적용							설계 대비 침하량 차이 (cm)	차이 비율 (%)
공구	공 번			쌍곡선 법	\sqrt{t} 법	Asaoka 법	Monden 법	적용 평균값	허용 침하량 (cm)	목표 침하량 (cm)		
배수로	S1-4-04	95.0	104.0	105.0	105.0	105.0	105.0	105.0	10.0	95.0	0.0	0.0
	S1-4-05	224.0	204.0	197.0	198.0	198.0	197.0	197.5	10.0	187.5	36.5	16.3
	S1-4-06	217.0	266.0	269.0	269.0	269.0	269.0	269.0	10.0	259.0	-42.0	-19.4
	S1-4-07	217.0	103.0	104.0	105.0	105.0	105.0	104.8	10.0	94.8	122.3	56.3
	S1-4-08	267.0	247.0	249.0	249.0	249.0	249.0	249.0	10.0	239.0	28.0	10.5
	S1-4-09	267.0	276.0	278.0	278.0	279.0	278.0	278.3	10.0	268.3	-1.3	-0.5
	S1-4-10	151.0	148.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	10.0	140.0	11.0	7.3
	S1-4-11	261.0	252.0	256.0	256.0	254.0	255.0	255.3	10.0	245.3	15.8	6.0
	S1-4-12	113.0	155.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	10.0	150.0	-37.0	-32.7
	S1-4-13	232.0	255.0	256.0	256.0	254.0	255.0	255.3	10.0	245.3	-13.3	-5.7
	S1-4-14	111.0	145.0	151.0	151.0	151.0	151.0	151.0	10.0	141.0	-30.0	-27.0
	S1-4-15	72.0	109.0	114.0	114.0	113.0	115.0	114.0	10.0	104.0	-32.0	-44.4
	S1-4-16	72.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	39.0	10.0	29.0	43.0	59.7
S1-4-21	101.0	21.0	141.0	141.0	141.0	141.0	141.0	10.0	131.0	-30.0	-29.7	

4.3.2 설계침하량의 예측침하량 검토결과

그림 4.1은 총 81개 단면에 대한 단면별 설계침하량과 지표침하계에 따른 예측침하량을 나타낸 것이다.

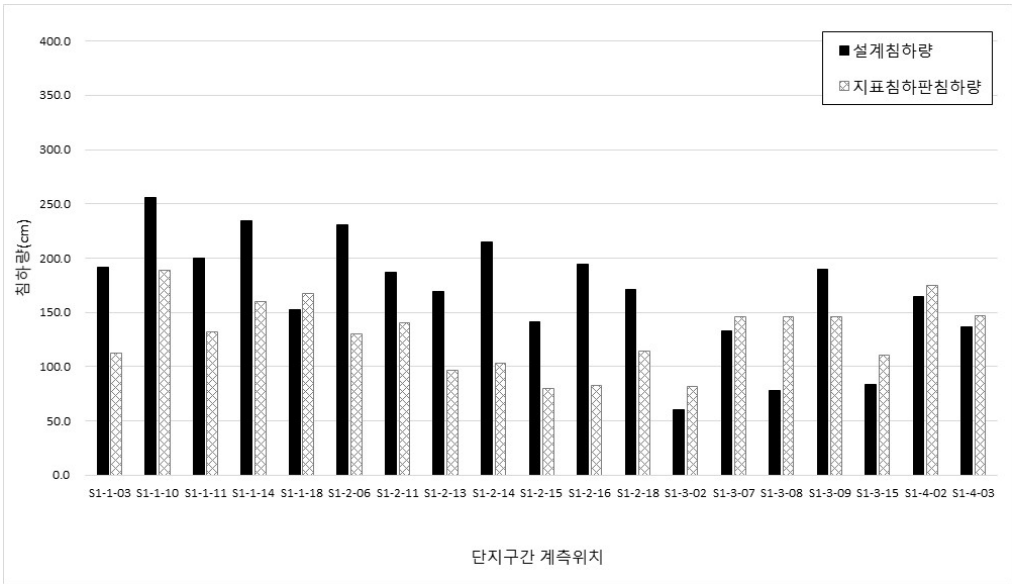


(a) 도로구간(1-1 ~ 1-2공구)

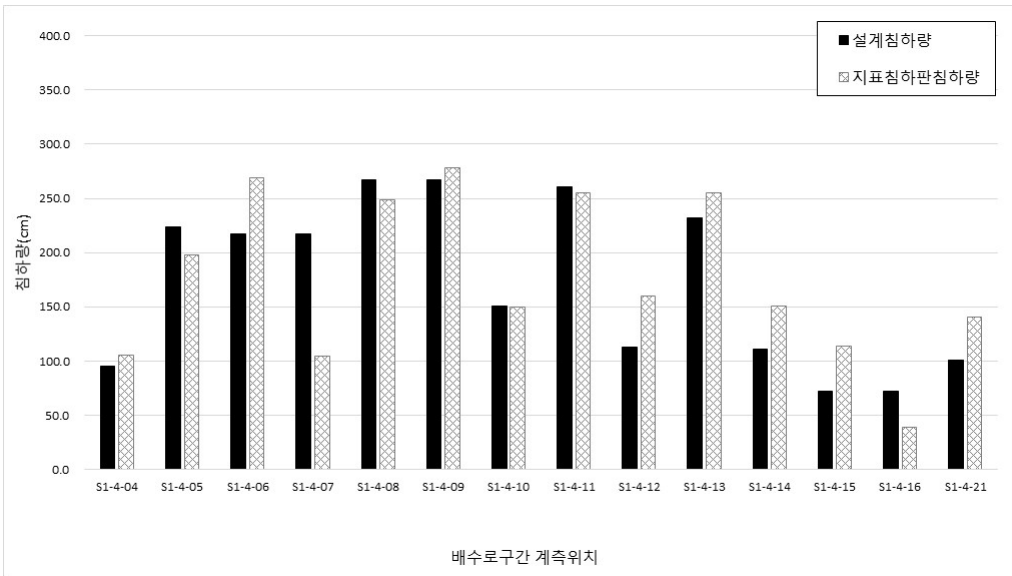


(b) 도로구간(1-3 ~ 1-4공구)

그림 4.1 목표설계침하량과 예측분석침하량 비교(계속)



(c) 단지구간(1-1 ~ 1-4공구)



(d) 배수로구간

그림 4.1 목표설계침하량과 계측분석침하량

대부분 구간에서 계측침하량 대비 설계침하량이 높은 경향을 보이며, 그 차이는 다음과 같다.

(1) Terzaghi의 1차원 압밀이론

이렇게 설계침하량과 계측기를 통한 침하량의 차이는 Terzaghi의 1차압밀 이론으로 정립되어진 기본식에서 유래되는데 이 이론에 의한 기본식을 풀면 과잉간극수압의 시간에 따른 소산정도를 알 수 있게 된다. Terzaghi 압밀이론식의 기본가정은 다음과 같다.

- ① 점토층은 균질(homogeneous)하다.
- ② 점토층은 완전히 포화되어 있다.
- ③ 물 자체의 압축성은 무시한다.
- ④ 흙입자 자체도 비압축성이다.
- ⑤ 물의 흐름은 1방향(연직방향)이라고 가정하며 압축되는 방향과 일치한다.
- ⑥ Darcy의 법칙은 성립한다.
- ⑦ 1차압밀이론의 가정은 무한한 평면이다.

위와 같은 가정에서 ①, ⑤, ⑦ 항목에서 실제와는 차이가 있다.

먼저 첫째로 점토층은 균질하여야 하지만 실제로는 층별로 균질하지 못하다. 둘째로 물의 흐름은 1방이라고 가정하고 압축되는 방향과 일치한다라고 가정하지만 실제로는 연직방향의 압축만 발생하지는 않는다. 마지막으로 1차압밀이론의 가정은 무한한 평면으로 가정하였지만 실제로는 무한하지 않고 국부적인 압밀하는 현상도 많이 존재한다. 이런 Terzaghi의 1차압밀이론의 기본가정에서 오는 오류가 있다.

(2) 불교란시료의 변형

현장지반의 불균등성 및 이방성으로 인하여 통계적인 방법으로 산정한 대표지반정수에 대한 불확실성이 있다. 보통은 현장에서 직접적인 시험 혹은 시료채취를 통하여 실내시험실로 이동하여 시험실에서 압밀시험, 전단시험 등을 통하여 지반정수를 정한다.

하지만 시료를 가지고 이동 중에 교란이 발생하고 지하수위 아래의 시료를 채취하였을 때 수위의 상황이 현장과 상이하기 때문에 발생할 수 있는 한계성이 있다.

또한 어느 지점의 지반조사결과가 모든 지반을 대표하기에는 의외성이 많기 때문에 설계와 실제가 다른 경우가 발생할 수 있다. 따라서 설계를 위한 지반조사 단

계에서 발생하는 오류가 현장거동의 예측에 대한 신뢰성을 저해하는 원인이 된다.

(3) Scale effect

세 번째는 설계에서 아무리 정확하고 이론에 적합한 1차압밀 설계를 수행한다 하더라도 Scale effect에 의한 차이가 발생하기 때문에 실제 현장에서 발생하는 많은 변수를 고려하여야 한다.

일반적인 학술연구에서는 Scale effect를 고려할 수 있으나, 실무에서는 명확히 고려되지 않는 것이 일반적이다.

(4) 이외 환경적 요인

앞서 언급한 3가지 요인 이외에는 배수재의 특성, 성토 속도 등 설계에서 고려할 수 있는 모든 상황을 말할 수 있다. 배수재의 경우 수직배수재의 성능, 수평배수재의 투수계수 및 두께, 성토 속도에서도 설계와 다르기 때문이다. 설계에서는 수직배수재의 성능에서 Smear effect, well resistance 등을 고려하여 설계를 수행하지만 현장에서는 이외에 더 많은 변수가 존재하기 때문에 설계배수능력을 상실할 수 있다.

또한, 수평배수재 포설도 설계의 이상적인 조건과는 달리 현장에서는 균등한 포설, 수평배수재의 투수능력 저하 등이 존재한다. 그리고 성토량과 성토속도도 설계와는 달리 현실에서는 토취장 확보 및 기상조건, 시공사의 여러조건 등으로 설계 성토속도와 달라질 수 있으므로 설계와 현장의 조건을 정확히 일치시킬 수 없는 한계가 있다.

4.4 역해석침하량 검토 결과

4.4.1 계측값을 이용한 압밀곡선 작도

본 연구에서는 역해석침하량 산정시 필요로하는 계측결과에 따른 설계정수값을 산정하고자, 지표침하판이 설치된 81개소 내에 집중공 18개소를 선정하여 층별침하계, 간극수압계 등을 매설하였다.

표 4.12 ~ 표 4.15는 집중공 내 대표단면인 T-1-01번의 실내실험 및 현장계측 결과를 나타낸 것으로 실내실험 결과의 경우 하중-간극비의 관계를 통하여 P_c , P_o , C_c , C_r 등의 설계지반정수를 산정할 수 있고, 현장계측의 경우 침하계와 간극수압계를 이용하여 설계지반정수를 산정할 수 있다.

대표단면의 경우 18개 계측단면 중 첫 번째 구간에 대한 단면을 선정하였으며, 대부분 실내실험과 유사한 경향을 보이나, 본 연구에서는 내용의 설명을 위하여 한 개소에 대한 자료를 수록하였다.

그림 4.3 ~ 그림 4.6은 실내실험결과와 현장계측결과를 통하여 $e - \log P$ 곡선을 작도한 것으로 두 그래프 모두 유사한 경향을 확인할 수 있다.

그림 4.2는 연구대상지역내 집중공 18개소에 대한 계측기 매설 위치도를 나타낸 것이다.

집중공의 경우 총 81개지 지표침하관 매설지역내에 18개소를 선정하여 매설하였으며, 역해석침하량 분석을 위해 설계지반정수를 산정하고자 하였다.

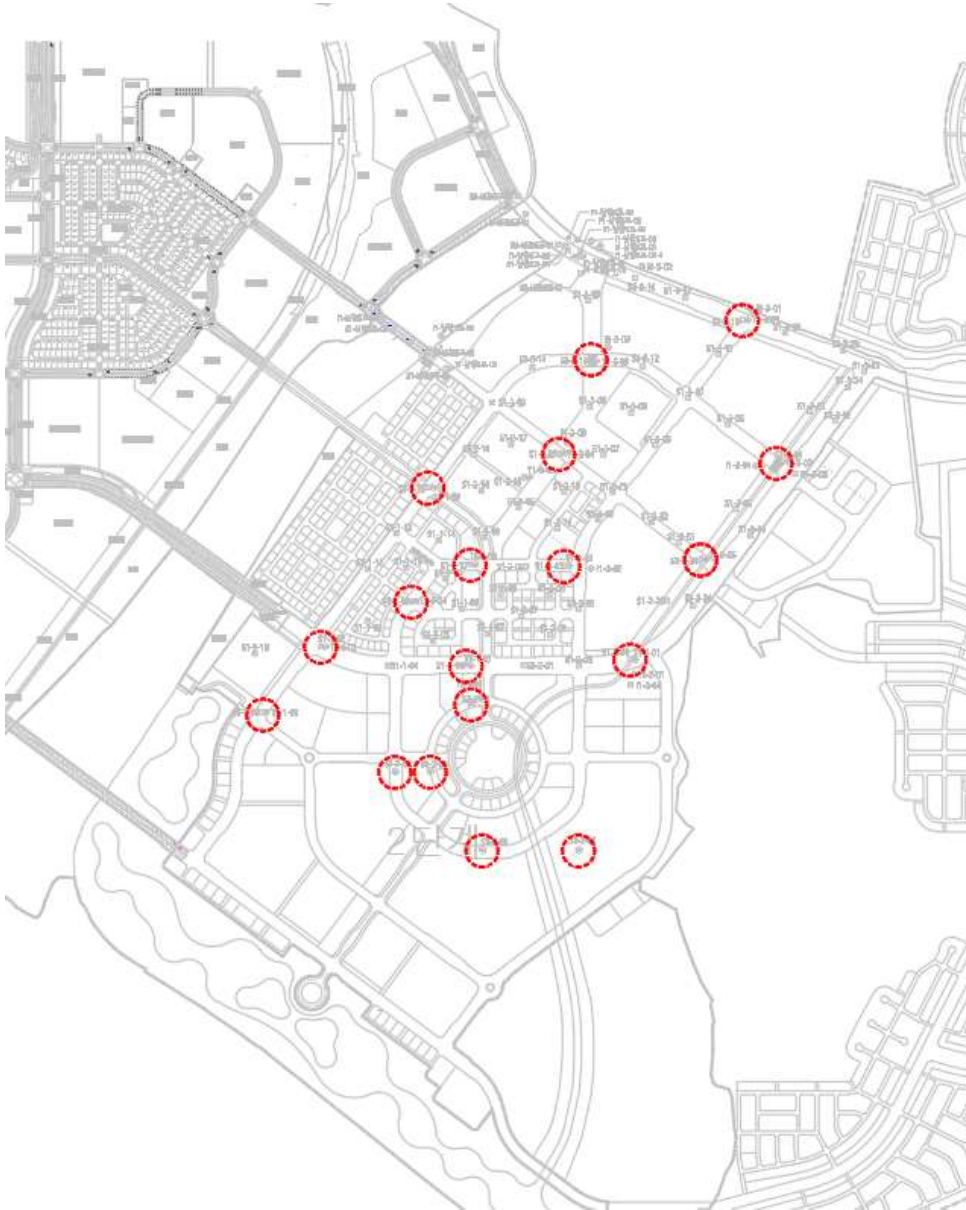


그림 4.2 계측기 매설 위치도(집중공)

그림 4.3과 표 4.12는 대표단면인 T-1-01의 0.0~4.1m 구간의 압밀곡선 그래프와 설계지반정수를 비교한 것이다.

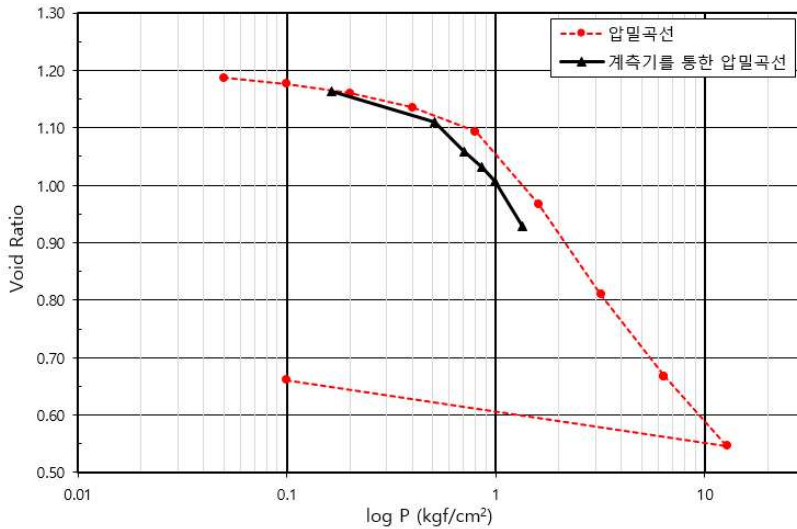


그림 4.3 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(0.0 ~ 4.14m구간)

표 4.12 T-1-01단면의 실내실험과 현장계측결과의 비교(0.0 ~ 4.14m구간)

실내실험 결과				현장계측결과			
P_c	0.970	C_c	0.536	P_c	0.501	C_c	0.537
P_o	0.261	C_r	0.055	P_o	0.163	C_r	0.055
OCR	3.716	C_r / C_c	0.103	OCR	3.074	C_r / C_c	0.102
P (하중)	e	$C_v(Lab)$		성토고 (m)	P (하중)	S (침하량)	e (간극비)
0.00	1.199	0.00E+00		0.000	0.163	0.0	1.163
0.05	1.187	7.03E-03		1.812	0.507	10.0	1.111
0.10	1.177	6.96E-03		2.880	0.710	20.0	1.059
0.20	1.160	3.93E-03		3.652	0.857	25.0	1.032
0.40	1.136	4.49E-03		4.359	0.991	30.0	1.006
0.80	1.094	4.36E-03		6.202	1.341	45.0	0.928
1.60	0.967	1.10E-03					
3.20	0.810	8.02E-04					
6.40	0.668	1.10E-03					
12.80	0.546	1.26E-03					
0.10	0.661	0.00E+00					

그림 4.4와 표 4.13은 대표단면인 T-1-01의 4.14~10.13m 구간의 압밀곡선 그래프와 설계지반정수를 비교한 것이다.

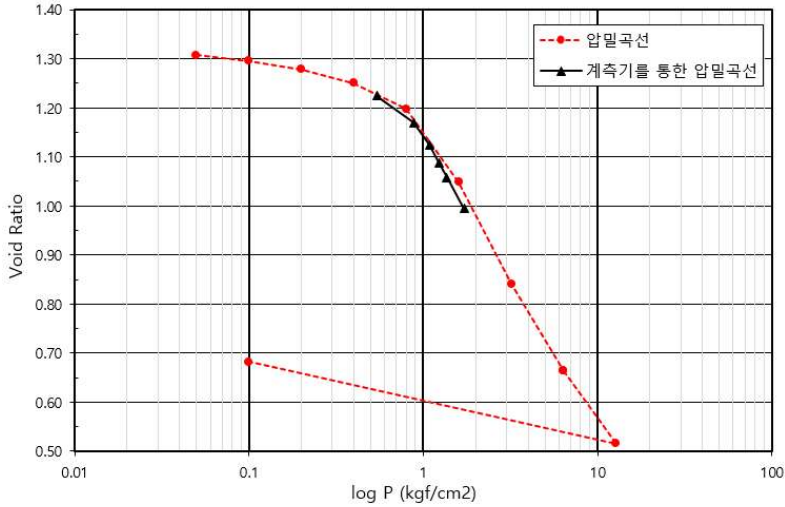


그림 4.4 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(4.14m ~ 10.13m구간)

표 4.13 T-1-01단면의 실내시험과 현장계측결과 비교(4.14m ~ 10.13m구간)

실내시험 결과				현장계측결과			
P_c	1.000	C_c	0.697	P_c	0.770	C_c	0.655
P_o	0.591	C_r	0.079	P_o	0.540	C_r	0.079
OCR	1.692	C_r / C_c	0.113	OCR	1.426	C_r / C_c	0.121
P (하중)	e	$C_v(Lab)$		성토고 (m)	P (하중)	S (침하량)	e (간극비)
0.00	1.315			0.000	0.540	0.0	1.225
0.05	1.307	8.28E-04		1.812	0.883	15.0	1.169
0.10	1.296	4.66E-03		2.880	1.086	27.0	1.125
0.20	1.278	2.30E-03		3.652	1.232	37.0	1.088
0.40	1.250	2.46E-03		4.359	1.366	45.0	1.058
0.80	1.197	2.37E-03		6.202	1.714	62.0	0.995
1.60	1.048	8.20E-04					
3.20	0.841	3.32E-04					
6.40	0.664	4.50E-04					
12.80	0.516	5.56E-04					
0.10	0.682	0.00E+00					

그림 4.5와 표 4.14는 대표단면인 T-1-01의 10.13~14.97m 구간의 압밀곡선 그래프와 설계지반정수를 비교한 것이다.

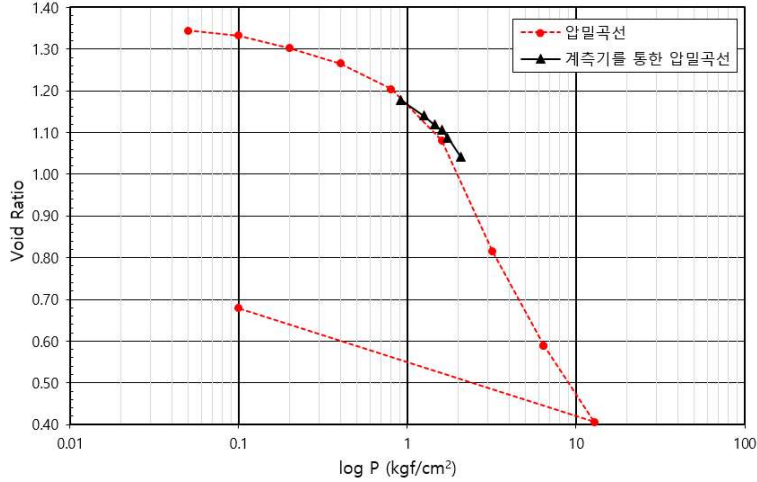


그림 4.5 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(10.13m ~ 14.97m구간)

표 4.14 T-1-01단면의 실내실험과 현장계측결과와의 비교(10.13m ~ 14.97m구간)

실내실험 결과				현장계측결과			
P_c	1.480	C_c	0.915	P_c	1.100	C_c	0.495
P_o	0.936	C_r	0.129	P_o	0.910	C_r	0.129
OCR	1.581	C_r / C_c	0.141	OCR	1.209	C_r / C_c	0.261
P (하중)	e	$C_v(Lab)$		성토고 (m)	P (하중)	S (침하량)	e (간극비)
0.00	1.351			0.000	0.910	0.0	1.178
0.05	1.345	2.82E-03		1.812	1.249	8.2	1.141
0.10	1.333	4.66E-03		2.880	1.449	13.0	1.120
0.20	1.303	4.58E-03		3.652	1.593	16.0	1.106
0.40	1.266	4.45E-03		4.359	1.725	20.0	1.088
0.80	1.204	1.60E-03		6.202	2.069	30.0	1.043
1.60	1.081	9.79E-04					
3.20	0.815	1.73E-04					
6.40	0.590	2.65E-04					
12.80	0.406	3.38E-04					
0.10	0.679	0.00E+00					

그림 4.6과 표 4.15는 대표단면인 T-1-01의 14.97~21.18m 구간의 압밀곡선 그래프와 설계지반정수를 비교한 것이다.

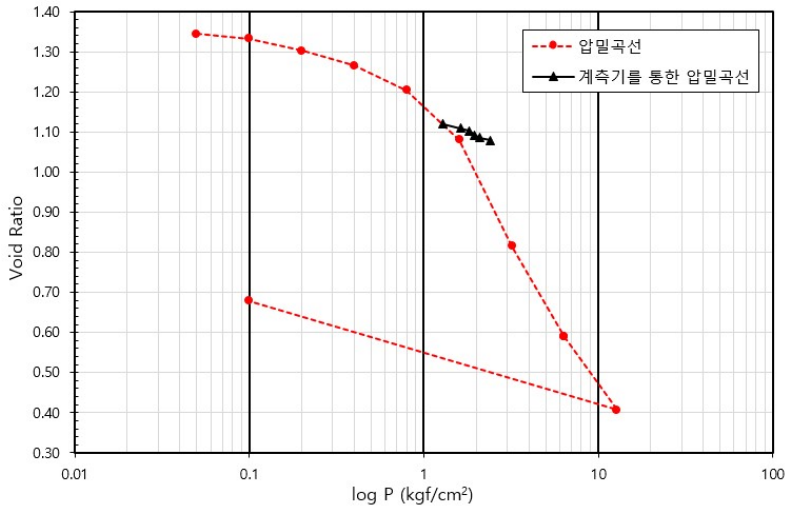


그림 4.6 T-1-01단면의 압밀곡선 산정(14.97m ~ 21.18m구간)

표 4.15 T-1-01단면의 실내실험과 현장계측결과 비교(14.97m ~ 21.18m구간)

실내실험 결과			
P_c	1.480	C_c	0.915
P_o	0.936	C_r	0.129
OCR	1.581	C_r / C_c	0.141
P (하중)	e	$C_v(Lab)$	
0.00	1.351		
0.05	1.345	2.82E-03	
0.10	1.333	4.66E-03	
0.20	1.303	4.58E-03	
0.40	1.266	4.45E-03	
0.80	1.204	1.60E-03	
1.60	1.081	9.79E-04	
3.20	0.815	1.73E-04	
6.40	0.590	2.65E-04	
12.80	0.406	3.38E-04	
0.10	0.679	0.00E+00	

현장계측결과			
P_c	2.100	C_c	0.192
P_o	1.290	C_r	0.103
OCR	1.628	C_r / C_c	0.536
성토고 (m)	P (하중)	S (침하량)	e (간극비)
0.000	1.290	0.0	1.120
1.812	1.621	3.0	1.110
2.880	1.816	5.0	1.103
3.652	1.956	8.0	1.093
4.359	2.084	10.0	1.086
6.202	2.417	12.0	1.079

4.4.2 설계침하량, 역해석하량, 계측침하량 비교

다음 표 4.16~4.18은 집중공 내 설계침하량, 역해석침하량, 계측침하량의 결과를 나타낸 것이다.

표 4.16 집중공 내 설계침하량 결과

구분		실내실험 설계정수					설계침하량(cm)			
		C_c	C_v	e_0	P_c	C_r	OCR	최종 침하량 (cm)	허용 침하량 (cm)	목표 침하량 (cm)
집중공 1	T1-1-01	0.675	0.003	1.421	0.776	0.061	1.625	178.0	10	168.0
집중공 2	T1-1-02	0.675	0.003	1.421	0.776	0.061	1.625	257.0	10	247.0
집중공 3	T1-1-03	0.670	0.004	1.549	0.636	0.071	1.625	336.0	5	331.0
집중공 4	T1-1-04	0.670	0.004	1.549	0.856	0.071	1.625	285.0	10	275.0
집중공 5	T1-1-05	0.670	0.004	1.549	1.055	0.071	1.625	270.0	10	260.0
집중공 6	T1-1-06	0.670	0.004	1.549	0.856	0.071	1.625	329.0	5	324.0
집중공 7	T1-2-01	0.693	0.004	1.582	0.405	0.072	1.833	185.0	5	180.0
집중공 8	T1-2-02	0.670	0.004	1.549	1.253	0.071	1.625	236.0	10	226.0
집중공 9	T1-2-04	0.675	0.003	1.421	0.856	0.061	1.625	295.0	5	290.0
집중공 10	T1-2-05	0.693	0.003	1.421	0.405	0.061	1.833	159.0	5	154.0
집중공 11	T1-3-01	0.693	0.003	1.421	0.665	0.061	1.833	181.0	10	171.0
집중공 12	T1-3-02	0.693	0.003	1.421	0.450	0.061	1.833	187.0	5	182.0
집중공 13	T1-3-03	0.670	0.004	1.549	0.920	0.071	1.625	330.0	5	325.0
집중공 14	T2-1-01	0.675	0.003	1.421	0.427	0.061	1.625	174.0	10	164.0
집중공 15	T2-2-01	0.675	0.003	1.421	0.813	0.061	1.625	294.0	10	284.0
집중공 16	T2-2-02	0.670	0.004	1.549	0.427	0.071	1.625	274.0	10	264.0
집중공 17	T2-2-03	0.670	0.004	1.549	0.636	0.071	1.625	268.0	10	258.0
집중공 18	T2-2-04	0.670	0.004	1.549	1.055	0.071	1.625	226.0	10	216.0

표 4.17 집중공 내 역해석침하량 결과

구분		역해석 설계정수					역해석 침하량 (cm)
		C_c	e_0	P_c	C_r	OCR	
집중공 1	T1-1-01	0.470	1.172	1.118	0.114	1.834	130.0
집중공 2	T1-1-02	0.415	1.228	0.802	0.077	1.187	172.0
집중공 3	T1-1-03	0.600	1.186	0.993	0.063	2.184	261.0
집중공 4	T1-1-04	0.545	1.178	0.874	0.068	1.490	179.0
집중공 5	T1-1-05	0.635	1.169	1.038	0.065	1.555	181.0
집중공 6	T1-1-06	0.576	1.179	0.898	0.052	2.080	232.0
집중공 7	T1-2-01	0.298	1.233	0.543	0.069	1.784	110.0
집중공 8	T1-2-02	0.431	1.176	0.706	0.060	1.365	141.0
집중공 9	T1-2-04	0.372	1.215	0.423	0.050	1.397	147.0
집중공 10	T1-2-05	0.274	1.192	0.679	0.049	1.300	132.0
집중공 11	T1-3-01	0.278	1.227	0.751	0.071	1.521	93.0
집중공 12	T1-3-02	0.673	1.421	0.935	0.212	2.484	161.0
집중공 13	T1-3-03	0.533	1.202	1.128	0.109	2.522	189.0
집중공 14	T2-1-01	0.787	1.317	1.280	0.095	1.940	184.0
집중공 15	T2-2-01	0.625	1.407	1.045	0.122	1.492	233.0
집중공 16	T2-2-02	0.487	1.224	0.888	0.120	1.151	220.0
집중공 17	T2-2-03	0.505	1.295	1.020	0.111	1.330	221.0
집중공 18	T2-2-04	0.437	1.190	1.380	0.166	1.858	184.0

표 4.18 집중공 내 계측침하량 결과

구분		계측침하량				
		테르자기 피팅법 (cm)	쌍곡선법 (cm)	Hoshino법 (cm)	Asaoka법 (cm)	계측침하량 (cm)
집중공 1	T1-1-01	151.0	148.0	147.0	148.0	149.0
집중공 2	T1-1-02	183.0	184.0	183.0	182.0	183.0
집중공 3	T1-1-03	264.0	269.0	267.0	264.0	266.0
집중공 4	T1-1-04	190.0	187.0	191.0	187.0	189.0
집중공 5	T1-1-05	195.0	193.0	194.0	198.0	195.0
집중공 6	T1-1-06	250.0	248.0	251.0	251.0	250.0
집중공 7	T1-2-01	114.0	111.0	112.0	112.0	112.0
집중공 8	T1-2-02	156.0	157.0	156.0	158.0	157.0
집중공 9	T1-2-04	168.0	167.0	166.0	167.0	167.0
집중공 10	T1-2-05	134.0	131.0	132.0	133.0	133.0
집중공 11	T1-3-01	110.0	112.0	111.0	111.0	111.0
집중공 12	T1-3-02	194.0	194.0	194.0	195.0	194.0
집중공 13	T1-3-03	226.0	226.0	225.0	226.0	226.0
집중공 14	T2-1-01	169.0	170.0	170.0	170.0	170.0
집중공 15	T2-2-01	244.0	243.0	244.0	243.0	244.0
집중공 16	T2-2-02	229.0	229.0	229.0	229.0	229.0
집중공 17	T2-2-03	233.0	235.0	234.0	234.0	234.0
집중공 18	T2-2-04	176.0	175.0	175.0	175.0	175.0

그림 4.7은 집중공 내 설계침하량, 역해석침하량, 계측침하량의 결과를 비교한 것이다.

역해석 침하량은 계측침하량과 유사한 결과값을 확인하였으나, 설계침하량의 경우 계측침하량 대비 높은 침하량 값을 확인하였다. 설계침하량의 경우 계측값을 통해 도출된 역해석 침하량, 실내침하량 보다 1.2~1.4배 이상 높은 값을 보였다. 설계침하량값이 과다하다 명확히 말할순 없으나, 역해석을 이용한 침하량 검토가 실제 설계에 더 적절하다고 판단할 수 있다.

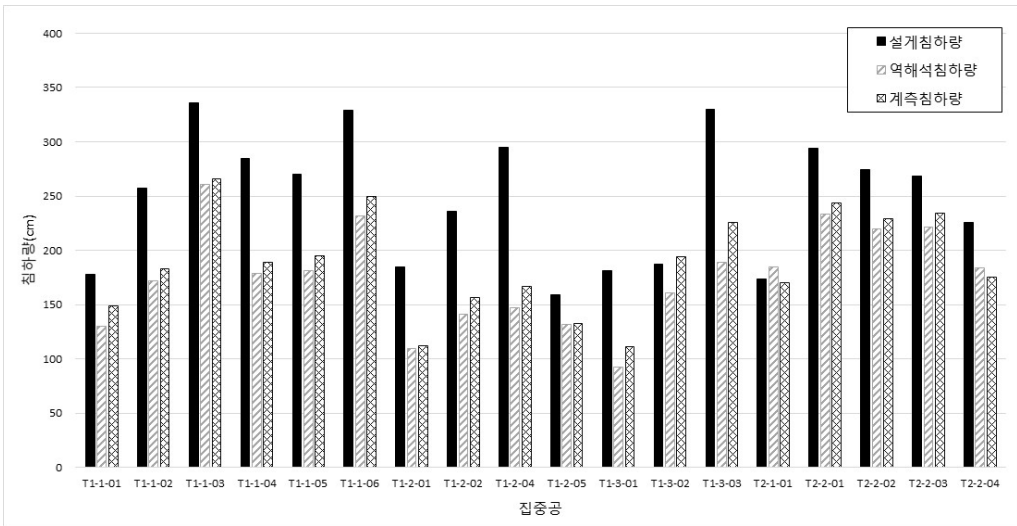


그림 4.7 설계침하량, 역해석침하량, 계측침하량 비교

그림 4.8, 그림 4.9는 실내실험과 계측값을 통한 역해석 설계지반정수인 압축지수와 선행압밀하중을 비교한 것이다.

압축지수와 선행압밀하중의 경우 침하량에 가장 큰 영향을 주는 인자로서, 그림 4.8의 경우 역해석시 사용된 압축지수가 설계시 반영된 압축지수보다 전체적으로 낮은 경향성을 보이며, 반대로 그림 4.8에서는 역해석시 사용된 선행압밀하중이 설계시 사용된 선행압밀하중보다 높은 값을 보인다.

이는 압축지수와 선행압밀하중이 침하량에 영향을 준다는 것을 뒷받침하며, 선행압밀하중이 크다는 것은 과거에 큰 하중을 받은 과압밀 점토로 계측침하량과 역해석 침하량의 침하량이 설계침하량보다 낮음이 그 이유이다.

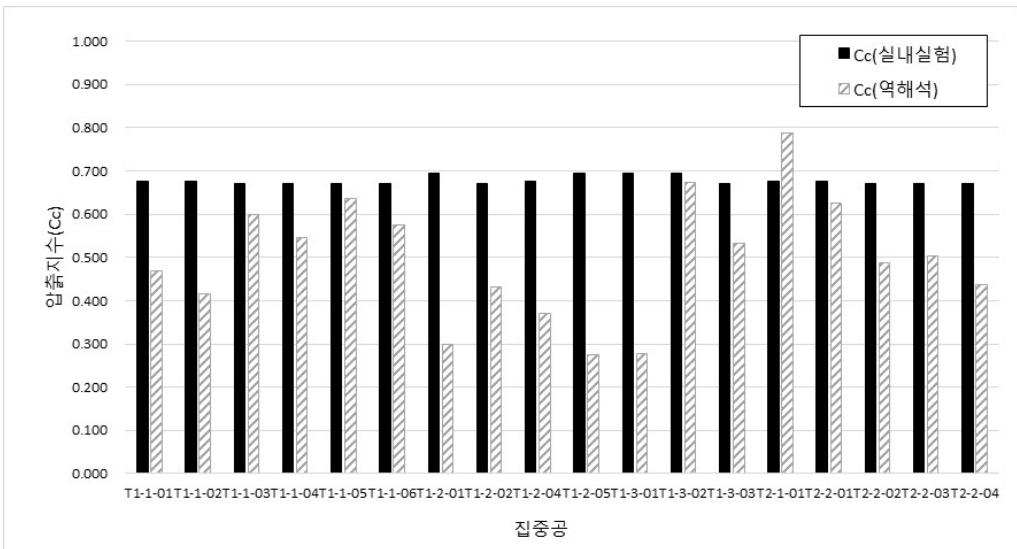


그림 4.8 실내실험과 계측값의 압축지수 비교

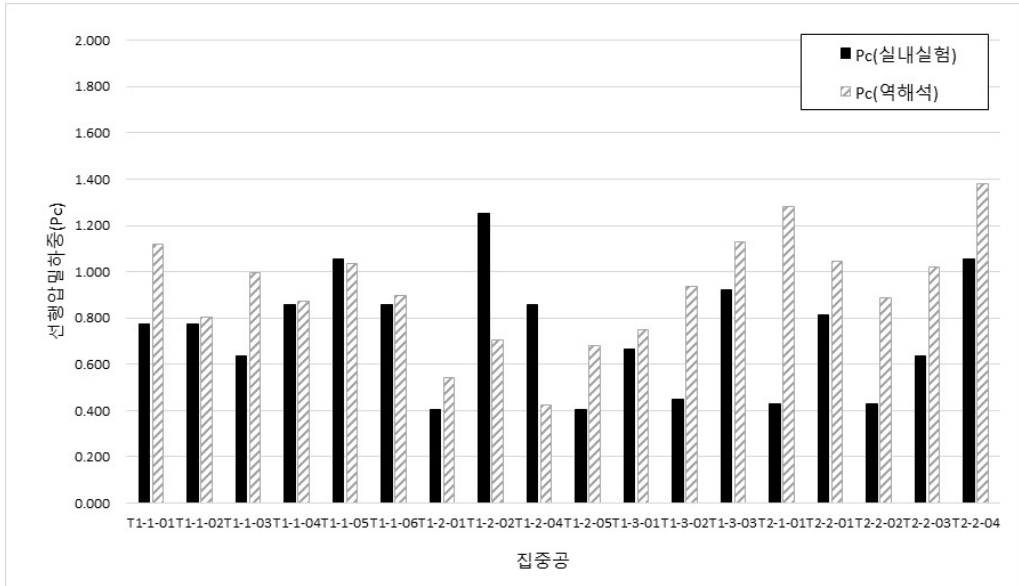


그림 4.9 실내실험과 예측값의 선형압밀하중 비교

4.4.3 압축지수와 침하량과의 관계

그림 4.10은 압축지수와 최종침하량과의 관계를 나타낸 것이다.

역해석침하량곡선과 계측침하량곡선의 경우 최종설계침하량과의 차이를 그래프화 한 것이며, 그림으로 미루어보아 설계침하량 대비 역해석침하량이 실제 침하 계측데이터 결핍값인 계측침하량과 더 유사함을 확인할 수 있다.

압축지수변화량의 경우 당초 설계에 반영되었던 압축지수(C_c)와 역해석시 사용된 압축지수($C_{c(R)}$)의 차이를 그래프화 한 것이다. 압축지수의 경우 설계시 반영되었던 C_c 값이 역해석시 반영된 $C_{c(R)}$ 값보다 대체적으로 높은 값을 확인할 수 있었다. 압축지수의 경우 지반침하에 영향을 주는 주요인자로서, 역해석시 압축지수가 설계시 압축지수보다 낮다는 것은 역해석시 침하량이 설계시 침하량보다 낮다는 것을 의미하므로, 그래프상 압축지수의 경향과 침하량의 경향이 유사함을 뒷받침하는 근거가 된다.

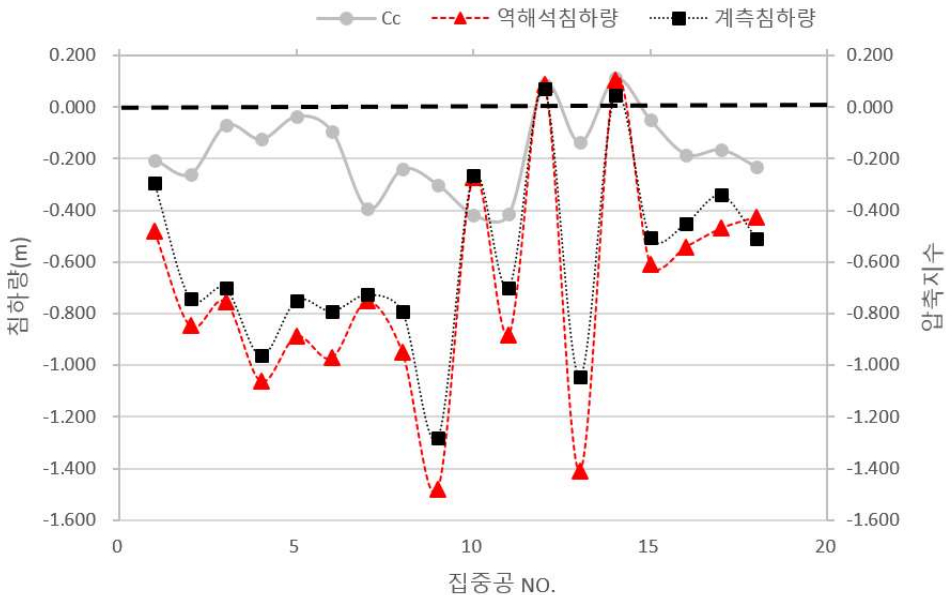


그림 4.10 압축지수와 최종침하량과의 관계

4.4.4 선행압밀하중과 침하량과의 관계

그림 4.11은 선행압밀하중과 최종침하량과의 관계를 나타낸 것이다. 그림 4.10과 마찬가지로 설계침하량 대비 역해석침하량이 실제 침하 계측데이터 결과값과의 경향성을 확인하기 위해 각각의 결과값을 그래프화 한 것이다.

선행압밀하중 변화량의 경우 당초 설계에 반영되었던 선행압밀하중(P_c)과 역해석시 사용된 선행압밀하중($P_{c(R)}$)의 차이를 그래프화 한 것이다.

선행압밀하중의 경우 설계시 반영되었던 P_c 값이 역해석시 반영된 $P_{c(R)}$ 값보다 대체적으로 낮은 값을 확인할 수 있었다. 선행압밀하중은 압축지수와 같이 지반의 침하량 산정에 영향을 주는 주요인자로서, 역해석시 $P_{c(R)}$ 가 설계시 P_c 보다 높다는 것은 설계에 적용한 지반조건이 설계자의 생각보다 더 과압밀상태였다는 것을 확인할 수 있다.

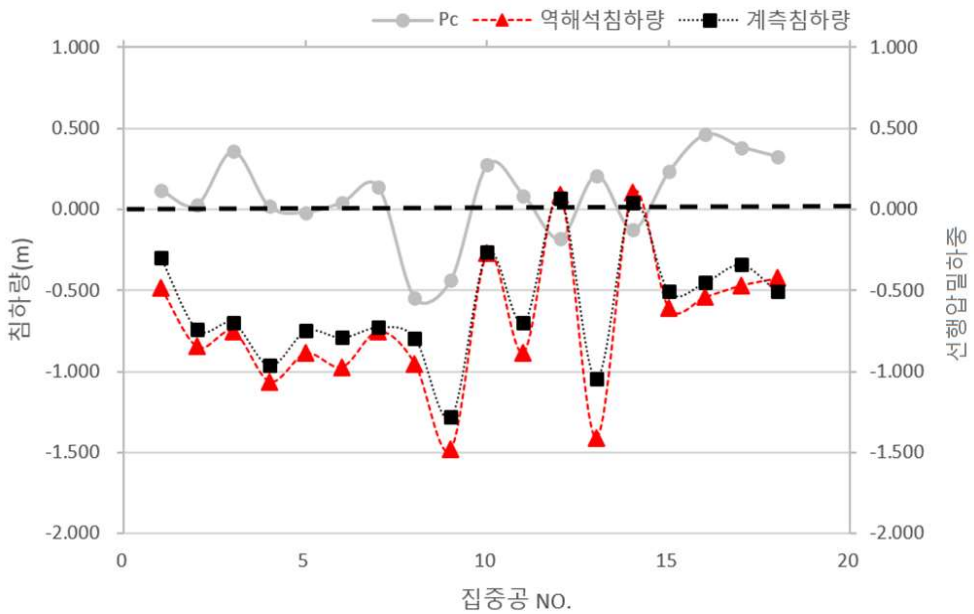


그림 4.11 선행압밀하중과 최종침하량과의 관계

4.5 통계분석에 따른 침하량 신뢰도 검토

4.5.1 RMSE 분석

평균 제곱근 오차 제곱(Root Mean Square Error, 이하 RMSE)은 관측값의 불일치도를 나타내기 위해 오차의 제곱을 산술 평균한 값의 제곱근이다. RMSE 분석법은 식 4.1과 같이 나타낼 수 있으며, 0에 가까울수록 그 신뢰도가 높다고 판단할 수 있다.

표 4.19와 그림 4.12와 같이 설계침하량과 계측침하량의 차이, 역해석침하량과 계측침하량의 차이를 비교하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_1 - y_1)^2} \quad (4.1)$$

여기서, n : 계측데이터 전체수량

x_1 : 예측값(설계, 역해석침하량)(m)

y_1 : 실제값(계측침하량)(m)

표 4.19 계측항목 및 수량

분석기법	RMSE	
	구 분	설계침하량-계측침하량
	0.6216m	0.1697m

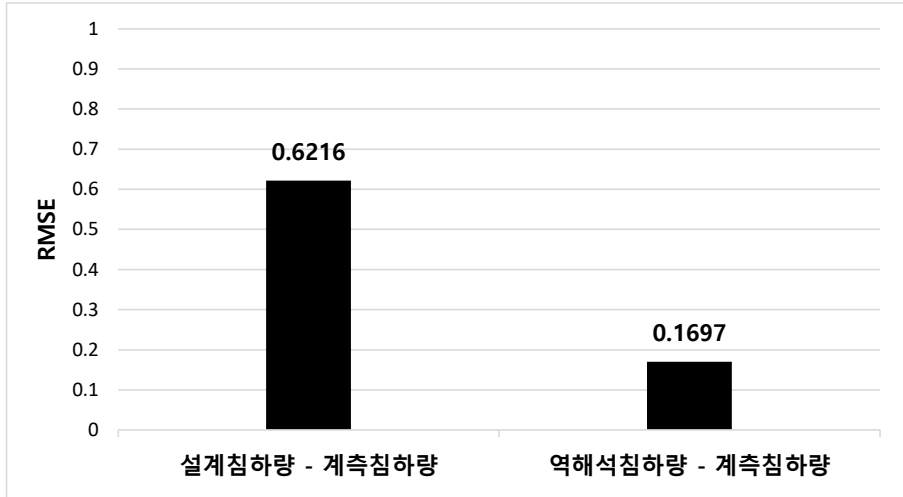


그림 4.12 RMSE분석 결과

RMSE 분석결과, 설계침하량의 경우 0.6212m, 역해석침하량의 경우 0.1697m로 확인되었다. 각각의 결과값은 실제값인 계측침하량과의 차이를 비교한 것으로, 역해석침하량의 경우 설계침하량 대비 70%이상 낮은 값을 확인할 수 있다. 이는 역해석침하량 값이 설계침하량보다 더 낮은 오차율을 이야기하며, 그로 인한 신뢰도 또한 더 높음을 이야기한다.

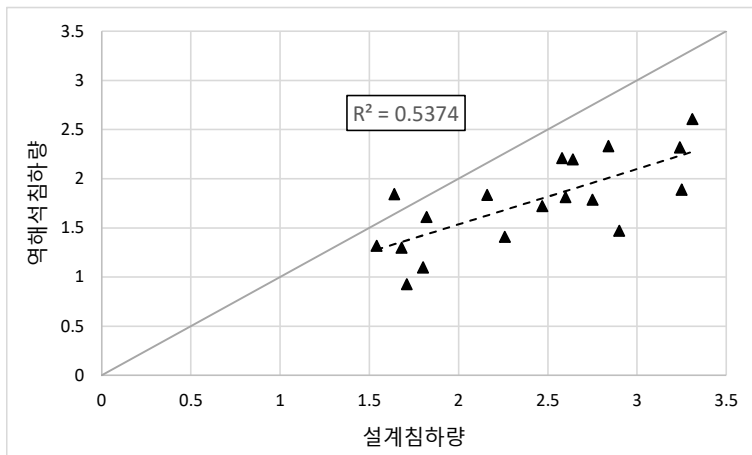
4.5.2 선형회귀 분석

선형회귀는 종속변수와 한 개 이상의 독립변수의 선형상관관계를 모델링하는 분석기법이다. 본 연구에서는 각각의 침하량 결과값들의 관계를 명확히 확인하고자 회귀분석을 수행하였으며, 선형회귀 결과는 표 4.20과 그림 4.13과 같이 나타낼 수 있으며, 1에 가까울수록 그 상관관계가 밀접하다고 판단할 수 있다.

설계침하량과 역해석침하량은 0.7331로 가장 낮은 분석값을 보였으며, 역해석침하량과 계측침하량은 0.9631로 가장 높은 상관관계를 보였다. 이는 RMSE분석법과 마찬가지로 역해석침하량과 계측침하량이 가장 높은 신뢰도를 보인다고 판단할 수 있다.

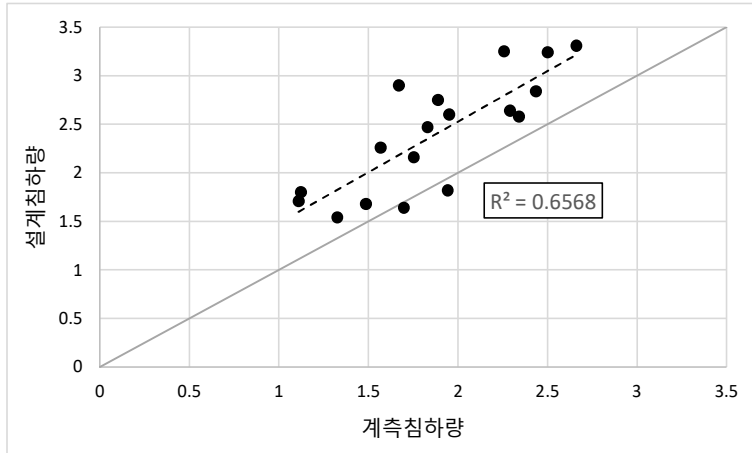
표 4.20 침하량간 상관관계 분석결과

구 분	설계침하량	역해석침하량	계측침하량
설계침하량	1	0.7331	0.8104
역해석침하량	0.7331	1	0.9631
계측침하량	0.8104	0.9631	1

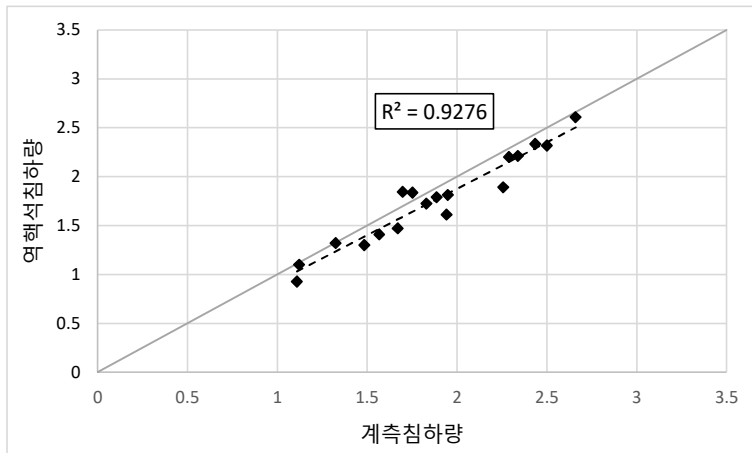


(a) 설계침하량 - 역해석침하량

그림 4.13 침하량 상관관계 분석곡선(계속)



(b) 설계침하량 - 계측침하량



(c) 역해석침하량 - 계측침하량

그림 4.13 침하량 상관관계 분석곡선

제 5 장 결 론

본 연구에서는 기존 연약지반 설계시 적용하는 설계침하량과 계측기를 통해 산정되는 최종계측침하량에 대한 검토를 수행하고 이를 역해석을 통한 침하량과의 분석을 수행하고자 하였다.

현장조사, 실내실험 및 현장계측을 통한 각각의 설계지반정수를 도출하여 설계침하량, 역해석침하량, 계측침하량을 확인하였고, 그에 대한 내용을 비교·분석하였다. 본 연구에서 수행된 연구방법 및 내용은 다음과 같다.

1. 설계침하량과 계측침하량을 산정한 후 비교·분석한 결과, 지표침하관 81개소에서 모두 설계침하량이 계측침하량보다 높은 침하량 값을 보였다. 이는 Terzaghi 이론 중 점토층은 균질하다는 점에서 실제로 층별로 균질하지 않음을 확인하였고, 1차원 압밀이론이 무한한 평면이라는 점에서는 실제 현장의 경우 국부적인 압밀이 존재하기에 이론과 차이가 있음을 확인하였다.
2. 집중공 18개소에 대한 침하량 분석결과, 역해석 침하량은 계측침하량과 유사한 결과값을 확인하였으나, 설계침하량의 경우 계측침하량 대비 높은 침하량 값을 확인하였다. 설계침하량의 경우 계측값을 통해 도출된 역해석 침하량, 실내침하량 보다 1.2~1.4배 이상 높은 값을 보였다. 이는 불교란시료의 변형으로 인한 원인으로 판단되며, 현장에서 직접계측하는 계측침하량과는 다르게 시료채취 후 실험실로 이동하여 실험에서 실험하는 경우, 이동중 시료의 교란이 발생할수 있다는 점과 지하수위 조건 및 현장상황과 상이하기 때문에 발생하는 한계점이라고 판단할 수 있다.
3. 압축지수의 경우 설계시 반영되었던 C_c 값이 역해석시 반영된 $C_{c(R)}$ 값보다 대체적으로 높은 값을 확인할 수 있었다. 압축지수의 경우 지반침하에 영향을 주는 주요인자로서, 역해석시 압축지수가 설계시 압축지수보다 낮다는 것은 역해석시 침하량이 설계시 침하량보다 낮다는 것을 의미하므로, 그래프상 압축지수의 경향과 침하량의 경향이 유사함을 뒷받침하는 근거가 된다.

4. 선행압밀하중의 경우 설계시 반영되었던 P_c 값이 역해석시 반영된 $P_{c(R)}$ 값보다 대체적으로 낮은 값을 확인할 수 있었다. 선행압밀하중은 압축지수와 같이 지반의 침하량 산정에 영향을 주는 주요인자로서, 역해석시 $P_{c(R)}$ 가 설계시 P_c 보다 높다는 것은 설계에 적용한 지반조건이 설계자의 생각보다 더 과압밀상태였다는 것을 확인할 수 있다.
5. RMSE 분석결과, 설계침하량의 경우 0.6212m, 역해석침하량의 경우 0.1697m로 확인되었다. 역해석침하량과 계측침하량의 차이가 설계침하량과 계측침하량의 차이보다 70%이상 낮은 결과를 보였으며, 이는 역해석침하량 값이 설계침하량보다 더 낮은 오차율을 보인다는 것을 확인할 수 있다.
6. 선형회귀 분석결과, 설계침하량과 역해석침하량은 0.7331로 가장 낮은 분석값을 보였으며, 역해석침하량과 계측침하량은 0.9631로 가장 높은 상관관계를 보였다. 이는 RMSE분석법과 마찬가지로 역해석침하량과 계측침하량이 가장 높은 신뢰도를 보인다고 판단할 수 있다.

본 연구결과를 통해, 추후 연약지반 설계시 계측기를 이용한 역해석의 반영이 시급하다고 판단되며, 이를 현장에 적용한다면 실제 설계과정에서 발생하는 여성토의 물량과 그로 인해 발생하는 공사비, 공사기간 등의 문제점에 대해 공학적인 해결이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김승일(2014), “CRS와 표준압밀시험에 위한 석분의 압밀특성 비교 연구”, 석사학위 논문, 대전대학교
2. 김상규(2007), “토질역학-이론과응용”, 청문각
3. 김철수(2005), “연약지반상의 성토에 따른 압밀침하량의 역해석에 관한 연구”, 석사학위논문, 전남대학교
4. 권덕희(2014), “김포지역 연약지반의 압밀침하 특성과 장래침하량 예측”, 석사학위논문, 중앙대학교
5. 류승석(2012), “실내시험과 현장계측에 의한 연약 점성토 지반의 압밀특성 연구”, 박사학위논문, 전남대학교
6. 박기환(2013), “역해석을 이용한 콘크리트라이닝 지반이완하중 산정방법 연구”, 석사학위논문, 한양대학교 대학원
7. 박철호(2009), “연약지반 압밀침하예측에 관한 연구”, 석사학위논문, 부경대학교
8. 백영식(2013), “강의식으로 풀어쓴 토질역학”, 구미서관
9. 송충현(2022), “PBD 공법이 적용된 연약지반에 대한 지표침하량 침하계측 역해석”, 석사학위논문, 경남대학교 대학원
10. 안대건(2006), “역해석을 이용한 연약지반의 침하예측에 관한 연구”, 석사학위논문, 전남대학교
11. 오익주(2002), “일정변형률과 표준압밀시험을 통한 재구성된 점토의 압밀특성 연구”, 석사학위논문, 전남대학교
12. 유상호(2016), “역해석기법에 근거한 모래다짐말뚝(SCP)복합지반의 침하예측에 관한 연구”, 박사학위논문, 부산대학교 대학원
13. 윤찬영, 이상인, 백승경, 정충기(2007), “점층하중 재하 지반의 계측기반 침하 예측 방법의 개발”, 대한토목학회논문집, 제 27권, 6호, pp.425~432.
14. 이경준(2008), “삼축압축시험(CU)에서 정규압밀 해성점토의 압밀소요시간과 강도증가율에 관한 연구”, 박사학위논문, 부산대학교
15. 이승래(2006), “역해석 기법에 근거한 수직배수재로 개량된 연약점토지반의 침하예측”, 대한토목학회, 제 26권 4호, pp.229~238.
16. 이용상(2020), “역해석을 통한 흙막이 구조물 설계지반 정수 평가”, 석사학위논문, 한양대학교 공학대학원
17. 이재욱(2010), “역해석 기법을 이용한 복합퇴적 점토지반의 압밀특성 평가”, 석사학

위논문, 대전대학교

18. 이택수(2008), “연약지반에서의 실측침하량과 신뢰성이론을 고려한 예측압밀침하량의 비교”, 석사학위논문, 대전대학교
19. 이희훈, 곽수정, 김형주, 장인규(1997), “실측에 의한 압밀침하예측법의 평가”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제 1997권, 3호, pp.289~292.
20. 임성훈(1998), “역해석에 의한 연약지반 최종침하량 추정”, 충남대학교 공학기술연구원, 제25권 2호, pp.247~259.
21. 차지연(2013), “남해안 준설매립지반의 압밀 특성치 분석”, 석사학위논문, 고려대학교
22. 황대영(2017), “연직배수공으로 개량된 지반의 압밀정수에 대한 역해석”, 석사학위논문, 동아대학교 대학원
23. 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.
24. Asaoka, A. (1978), “Observational procedure of settlement prediction”, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.18, No.4, pp.87~101.
25. Barron, R. A. (1948), “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells”, Transaction ASCE, Vol. 113, No. 2346, pp.718~742.
26. Baker, G. A. and Crosbie, P. J. (1994), “Consumer Preferences for Food Safety Attributes: A Market Segment Approach.
27. 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.
28. 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.
29. Casagrande, A. (1936), “The determination of The Preconsolidation Load and It’s Practical Significance”, Proceedings 1st ICSMFE, Vol. 3 p.60.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
 33. Hoshno (1962), “Problems of foundation s in recent years”, *Society of civil engineering*, Vol.47, No.7, pp.63~67.
 34. Imai G. (1989), “A Unified Theory of One Dimensional Consolidation with Creep”, *Proceedings, 12th ICSMFE Vol. 1*, pp.57~60.
 35. 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.
 36. 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.
 37. 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.
 38. Kabbaj, M., Tavenas, F., Leroueil, S. (1988), “In-situ and Laboratory Stress-strain Relationships”, *Geotechnique*, Vol. 38, No. 1, pp.83~100.
 39. 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.
 40. 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.
 41. Lo, D. O. K. (1991), “Soil Improvement by Vertical Drains”. *PhD. Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign, pp.190~231.
 42. Mesri, G. (1973), “Coefficient of Secondary Compression”, *ASCE*, Vol. 99, No. 1, pp.123~137.
 43. 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.

44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Onoue, A. (1988a), "Consolidation of Multilayered Anisotropic Soils by Vertical Drains with Well Resistance", Soils and Foundations, Vol. 28, No. 3, pp.75~90.
49. Onoue, A. (1988b), "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", Soils and Foundations, Vol. 28, No. 4, pp.165~174.
50. Rendulic, L. (1935), "Der Hydrodynamische Spannungsausgleich in Zentral Entwasserten Tonzylindern", Wasserwirtsch. U. Tech., Vol. 2, pp.250~253.
51. Sekiguchi, H. and Torihara, M. (1976), "Theory of One Diemnsional Consolidation of Clays with Consideration of Their Rheological Properties", Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp.27~44.
52. 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.
53. Tan T. S., Inoue. T., Lee. S. L. (1991), "Hyperbolic method for consolidation analysis", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.117, No.11, pp.1723~1737.
54. Taylor, D. W. (1942), "Research on Consolidation of Clays." Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Sanitary Engineering, Serial, Vol. 82, p.147.
55. 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.

56. Terzaghi, K. (1925), "Erdbaumechanik auf Boden Physikalischen Grundlagen". Deuticke, Vienna.
57. Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967), "Soil Mechanics in engineering practice, 2nd ed. Jhon Wiley & Sons, New York.
58. 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.
59. 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.
60. 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.
61. Yoshikuni, H., Kusakabe, O., Hirao, T. and Ikegami, S. (1994). "Elasto viscous Modeling of Time Dependent Behaviour of Clay." Proc. of the 13th ICSMFEE, New Delhi, Vol. 1, pp.417~420.
62. 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.
63. 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.