



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](#)

공학석사 학위논문

최종압밀침하 결정 요소별 민감도에 관한 연구

Sensitivity of the Parameters Affecting Estimation of the
Final Consolidation Settlement



2012년 2월

한국해양대학교 해사산업대학원

토목환경공학과
강 승 찬

本 論文을 姜承燦의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 서 영 교 (印)
委 員 경 갑 수 (印)
委 員 김 태 형 (印)

The seal of Korea Maritime University is a circular emblem. It features a stylized ship's mast and funnel in the center, with the year '1945' below it. The text 'KOREA MARITIME UNIVERSITY' is written in an arc at the top, and '한국해양대학교' is written in an arc at the bottom.

2012年 2月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

목 차

목차	i
표 목차	iii
그림 목차	iv
Abstract	vi
요약	viii
제 1 장 서론	1
1.1. 연구의 배경 및 목적	1
제 2 장 연약지반에서의 침하 예측	2
2.1 압밀이론의 개요	2
2.1.1 Terzaghi의 일차원 압밀이론	3
2.1.2 압밀도 산정	7
2.1.3 평균압밀도	9
2.1.4 지반의 전단변형	13
2.2 현장 계측에 의한 장래침하량의 예측 방법	19
2.2.1 쌍곡선법(Hyperbolic method)	19
2.2.2 Hoshino법(\sqrt{t} 법)	23
2.2.3 Asaoka법	24
2.2.4 log t법	26
2.2.5 Tan법	27
2.2.6 Monden에 의한 방법	32
2.2.7 Terzaghi(Curve fitting)방법	33
2.3 해석 예측의 정도	38
제 3 장 최종 압밀침하 결정 요소별 민감도 분석	40
3.1 민감도 분석의 필요성	40
3.2 검토단면 산정 및 민감도 분석 방법	41

3.3 민감도 분석 44

 3.3.1 압밀도에 따른 침하 예측 정도 분석 44

 3.3.2 침하속도에 따른 침하 예측 정도 분석 50

 3.3.3 침하크기에 따른 침하 예측 정도 분석 51

 3.3.4 침하측정 오차 및 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측 정도 분석 52

제 4 장 결론 56

참고문헌 57

감사의 글 58



표 목 차

표 2.1 침하의 분류	2
표 2.2 평균압밀도와 시간계수의 관계	12
표 2.3 U 와 T_v 의 대표적 관계	27
표 3.1 검토단면에 적용된 토질 정수	41
표 3.2 검토단면 침하량 산정	42
표 3.3 압밀도에 따른 침하 예측 정밀도 분석결과	44
표 3.4 침하 예측에 사용된 자료의 양에 따른 오차율	49
표 3.5 압밀계수 변화에 따른 침하 예측 정밀도 분석결과	50
표 3.6 압축지수 변화에 따른 침하 예측 정밀도 분석결과	51
표 3.7 측정오차에 따른 침하 예측 범위의 크기 및 표준편차	53
표 3.8 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측 범위의 폭	54
표 3.9 침하 예측자료의 양에 따른 침하 예측의 표준편차	55

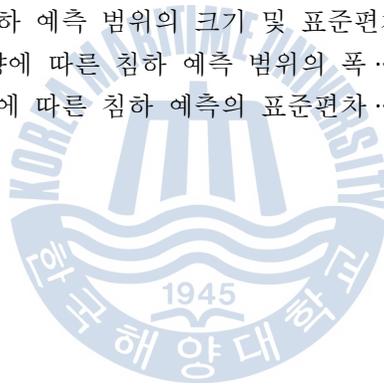


그림 목차

그림 2.1	정하중에 의한 침하의 원리	3
그림 2.2	압밀모형	4
그림 2.3	압밀침하시간곡선	4
그림 2.4	배수조건에 따른 배수거리(H_{dr}) 정의	8
그림 2.5	등시곡선(시간계수 T_v 와 압밀도 $U(t, z)$ 의 관계, H는 압밀층 두께)	9
그림 2.6	초기과잉간극수압 $u_{e0}(z)$ 가 깊이에 따라 일정하게 u_{e0} 인 경우의 분포형태	11
그림 2.7	평균압밀도와 시간계수의 관계	12
그림 2.8	하중-침하-시간관계와 지반의 변형	13
그림 2.9	성토에 의한 지반의 변위	15
그림 2.10	성토하중에 의한 지반의 변형	16
그림 2.11	B_m/D 에 의한 변형성상의 비교	17
그림 2.12	전단변형과 측방유동량	18
그림 2.13	지반에 생긴 전단변형의 모형실험	19
그림 2.14	쌍곡선법에 의한 침하의 추정방법의 모식도	20
그림 2.15	식(2.25)의 α, β 를 구하는 방법	20
그림 2.16	시간-침하의 실측치와 쌍곡선법에 의한 예측치의 비교(연약층 두께가 얇은 경우)	22
그림 2.17	시간-침하의 실측치와 쌍곡선법에 의한 예측치의 비교(연약층 두께가 두꺼운 경우)	22
그림 2.18	호시노법에 의한 침하량 예측방법	24
그림 2.19	Asaoka에 의한 침하 예측법	25
그림 2.20	$\log t$ - 침하량 곡선	26
그림 2.21	Terzaghi의 일차원 압밀이론을 이용하여 나타낸 $T_v \sim \frac{T_v}{U}$ 의 관계	28
그림 2.22	Monden 방법	33
그림 2.23	Terzaghi 방법	35
그림 2.24	예측의 시기와 정도	39
그림 3.1	검토단면	41
그림 3.2	검토단면의 시간-침하 곡선(C_c 0.3~1.0, C_v 0.0003 cm ² /sec 적용)	43
그림 3.3	검토단면의 시간-침하 곡선(C_c 0.0001~0.0010, C_v 0.3 cm ² /sec 적용)	43
그림 3.4	이론침하자료 중 압밀도 80~90% 자료 적용 시 쌍곡선법에 의한 예측 최종	

침하량	45
그림 3.5 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE1)	45
그림 3.6 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE2)	46
그림 3.7 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE3)	46
그림 3.8 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE4)	47
그림 3.9 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE5)	47
그림 3.10 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE6)	48
그림 3.11 압밀도 평가 자료의 양에 따른 정밀도	48
그림 3.12 침하 예측에 사용된 자료의 양에 따른 오차율	49
그림 3.13 압밀계수 변화에 따른 정밀도	51
그림 3.14 압축지수 변화에 따른 정밀도	52
그림 3.15 오차범위에 따른 침하 예측 범위의 폭 및 표준편차	53
그림 3.16 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측범위(최대값-최소값)의 크기	54
그림 3.17 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측의 표준편차 그림	55



Sensitivity of the Parameters Affecting Estimation of the Final Consolidation Settlement

by
Kang, Seung Chan

*Department in Civil and Environmental Engineering
Graduate School of Maritime Industrial Studies
Korea Maritime University*

Abstract

If road, bridge, and building are constructed on a soft ground, the estimation of long term settlement should be conducted. However, it is very unusual to predict exactly for embankment over the deep thick soft ground. In Korea, hyperbolic method, which is generally over prediction for the long term settlement, has been widely used. However, the measured settlement in deep thick soft ground tends to be higher than the estimated one predicted by hyperbolic method. This tendency is closely related to the factors used for prediction of settlement. However, a study about the sensitivity of these factors has not been conducted. Therefore, in this study, these factors are analyzed, and sensitivity of each factor is compared in estimation of the long term settlement.

To do this, a random section of embankment on the soft ground is selected and a time-settlement curve is predicted. Using this, sensitivity analyses of each of four factors including degree of consolidation,

coefficient of consolidation, compression index, and measurement error are conducted, and comparative analyses are conducted with the data measured in the field.

Based on the results of this study, the following things can be concluded. First, the accuracy of long term settlement depends on the certain amount of data obtained in latter part of the consolidation period, not the amounts of data. This fact is also confirmed by the field data. Second, the coefficient of consolidation related to the settlement speed affects the accuracy of prediction based on the results of prediction on the magnitude of settlement velocity. However, the compression index related to the settlement amount not affects the accuracy of prediction. For such a reason, the accuracy depends on the settlement speed, not settlement amount. Thus, when predicting settlement a site, the accuracy can improve using the data obtained from the site having similar settlement speed rather than settlement amount. Third, based on the results of analysis the effect of the measurement error on the accuracy of prediction, if the error has more than 1.5cm, the accuracy is too low and the error analysis is required. In addition, in case of 1.5cm error occurred, if the data analysis is conducted with less than 20 numbers, the accuracy is also very low and unreliable. Therefore, more than 20 numbers of analysis data should be required for prediction.

최종압밀침하 결정 요소별 민감도에 관한 연구

강 승 찬

한국해양대학교 산업대학원

토목환경공학과

요 약

연약한 지반으로 구성된 지반위에 도로, 교량, 건물 등이 축조되는 경우 성토에 따른 장기 침하량 예측은 필수적인 사항이다. 그러나, 대심도 연약지반 성토 현장에서 잔류침하량을 정확히 예측한 사례는 극히 이례적인 경우에 속한다. 현재 국내에서는 장래침하량이 다른 방법보다 비교적 크게 예측되는 쌍곡선법을 주로 사용하고 있지만, 그럼에도 불구하고 대심도에서는 실측침하량이 예측 침하량보다 크게 발생하는 경향이 있다. 이렇듯 연약지반 현장에서 잔류침하량 예측의 정도가 낮게 나오는 것은 예측에 사용된 인자의 영향이 크다. 하지만 지금까지 예측에 영향을 주는 인자의 민감도에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다. 그래서 본 연구에서는 장기 침하량 예측에 영향을 주는 인자를 분석하여, 장기 침하량 예측시 각 인자마다 민감도를 고려하여 적용하고자 한다.

연구 방법은 임의의 단면을 선정하여 이론 침하~시간 곡선을 산정하였다. 이를 이용하여 침하량 예측에 영향을 미칠 수 있는 4가지 요소인 압밀도, 압밀계수, 압축지수, 계측자료의 오차에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 그 결과를 현장 계측사례와 비교하여 분석하였다.

연구 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 첫째, 단순히 많은 자료를 사용하여 장기 침하량을 분석하는 것보다 압밀기간 후반부 일정구간 자료를 사용하여 분석하는 것이 정도가 높은 것으로 나타났다. 이는 현장 계측결과 분석에서도 유사한 경향을 보였다. 둘째, 침하속도 크기에 따른 예측결과의 정도를 분석한

결과, 침하속도 관련 주인자인 압밀계수에 따라서는 예측 정도가 달라지는 것으로 분석되었지만, 침하크기 관련 주인자인 압축지수는 예측 정도에 영향을 주지 않았다. 이와 같이 침하속도에 따라 분석 정도가 달라지므로 현장 침하 예측시 침하크기보다는 침하속도가 유사한 현장 분석사례를 참고하여 분석하는 것이 정밀도가 높을 것으로 판단된다. 셋째, 침하량 측정시 발생하는 계측오차가 예측결과의 정도에 미치는 영향을 분석한 결과 오차가 1.5cm 이상일 경우 예측침하량의 정밀도가 너무 낮아 신뢰할 수 없으므로 매 계측시마다 결합 및 폐합측량을 통하여 오차분석을 실시하여야 한다. 또한 1.5cm 오차가 발생한 경우도 분석자료가 약 20회 미만인 경우 예측 최대오차에 대한 정도가 낮아 신뢰할 수 없으므로 계측 분석시 최소 20회 이상의 자료를 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.



제 1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

연약한 점성토나 유기질토로 구성된 지반위에 도로, 교량, 건물 등이 축조되는 경우 과도한 잔류침하량이나, 지지력 부족 등으로 지반 공학적인 문제가 발생할 수 있다. 극단적인 경우, 축조된 구조물의 전단파괴 또는 붕괴로 까지 나타날 수 있고, 잔류침하량이 과도한 경우 지중구조물에 심각한 손상이 발생할 수 있어, 지반의 강도증가 및 잔류침하 제어 등을 위한 지반개량공법이 필수적으로 요구된다.

국내의 경우 침하축진 및 강도증가를 위한 대표적인 공법으로 연직배수재를 이용한 지반개량공법이 주를 이루고 있다. 이러한 연약지반개량공법을 적용하기 위해서는 우선 대상지반의 토층 구성상태 및 압밀침하 해석에 필요한 지반물성치의 결정을 위하여 각종 현장시험 및 실내시험이 선행되어야 한다. 또한 성도에 따른 침하량 예측과 성도 사면의 안정관리 및 장기 침하량 예측을 위한 계측이 필수적이다. 일반적으로 압밀침하량 및 시간은 여러 형태의 압밀이론을 적용하여 예측할 수 있으나 지반의 불균질성, 압밀이론의 제한사항, 지반 정수 산정의 불확실성 및 수치해석상의 문제, 현장 특성을 고려하지 않는 일률적인 분석 등 여러 요소로 인하여 예측침하속도 및 침하량은 실제 침하시간 및 침하량과 일치하지 않은 경우가 많이 발생한다. 또한, 장래예상침하량 추정방법에 따라 잔류침하량이 과소 및 과대 평가되는 경우가 많고, 장래예상침하량 산정에 기여하는 데이터의 정밀도나 축적된 데이터의 양에 따라서도 예상최종침하량의 편차가 크게 발생한다.

따라서 본 연구에서는 연약지반현장의 침하량 예측 시 예측침하량을 결정하는 요소가 침하량 분석결과에 미치는 영향을 분석하여 보다 합리적인 분석방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 임의의 단면을 선정하여 침하량 예측에 영향을 미칠 수 있는 4가지 요소 압밀도, 압축계수, 압축지수, 계측자료의 오차에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 그 결과를 현장 계측사례 비교하여 분석하였다.

제 2 장 연약지반에서의 침하 예측

2.1 압밀이론의 개요

지반이 어떤 원인에 의해 연직방향으로 이동될 때, 즉 연직변위가 발생할 때, 이 연직변위를 침하(settlement)라고 한다. 침하는 발생요인에 따라 표 2.1과 같이 나눌 수 있으며, 그림 2.1은 정하중에 의한 침하의 원리를 나타내었다.

표 2.1 침하의 분류(임종철, 2010)

대분류	소분류		설 명	주된 검토대상 지반
주로 정하중 (static load)에 의한 침하	전단 침하	즉시침하(또는 탄성침하)	재하에 의해 발생하는 지반의 진단변형에 의해 발생.	모든 종류의 지반
		소성침하	즉시침하는 탄성적으로 재하순간에 발생하고, 소성침하는 소성적으로	
		점성(전단 크리프)침하	재하순간에 발생하나 점성침하는 시간이 경과하면서 발생한다.	
	압밀침하 (consolidation settlement)		재하에 의해 발생하는 간극의 감소, 즉 압축(compression)에 의해 발생. 사질토는 재하 후 단기간에, 점성토는 재하 후 장기간에 걸쳐 발생.	점성토 지반
진동이나 함수비 변화에 의한 침하	다짐(compaction)		입자의 하향 이동에 의해 발생하는 체적감소 현상	사질토 지반
하향 침투수에 의한 침하	-		하향 침투에 의해 발생하는 증가유효응력에 의한 재하 효과에 의해 발생.	모든 지반

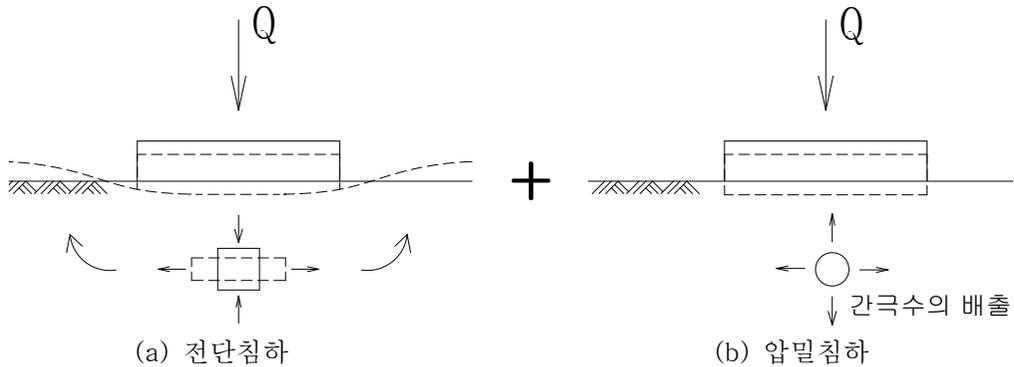


그림 2.1 정하중에 의한 침하의 원리(임종철, 2010b)

2.1.1 Terzaghi의 일차원 압밀이론

1924년 Terzaghi는 1차원 압밀이론을 발표하고 압밀의 메카니즘을 해석적으로 설명하였다. 압밀현상을 설명하기 위해 Terzaghi는 그림 2.2와 같이 스프링과 작은 구멍을 가진 피스톤에서 실린더에 물이 차 있는 압밀 모형을 나타내었다. 스프링은 점토 골조 구조의 변형저항을 나타내고 작은 구멍이 붙은 피스톤은 점토의 투수성을 나타낸다. 이 모형에 압축응력이 작용하면 압축응력의 증분 Δp 는 스프링(점토의 골조)에 작용하는 유효응력의 증분 $\Delta\sigma'$ 과 실린더 내의 수압(간극수압)의 증분 Δu 로 지지된다.

$$\Delta p = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (2.1)$$

이 수압의 증분 Δu 는 실린더내의 물이 배수됨에 따라 소실되며 최종적으로 수압은 원래의 정수압으로 돌아간다는 의미로 과잉간극수압이라 한다. 피스톤의 구멍(점토의 투수성)이 작고 물의 압축성도 극히 작으므로 재하 직후에는 거의 압축변형률이 생기지 않아 스프링(점토의 골조)에는 거의 응력이 생기지 않는다. 식 (2.1)에서 알 수 있는 것처럼 실린더 내에는 Δp 와 동일한 과잉간극수압이 발생하고 이 과잉간극수압을 초기 과잉간극수압이라 부른다. 시간의 경과에 따라 실린더 내의 물은 상부의 피스톤(배수면)의 작은 구멍을 통하여 외부로 배출되고 스프링에는 압축 변형율이 생긴다. 그 사이 과잉간극수압으로 지탱하고 있던 Δp 의 일부를 압축변형율에 따라 스프링이 부담하고 그 비율만큼 과잉간극수압은 감소한다. 시간이 경과하여 Δp 전부를 스프링이 지지하면 과잉간극수압은 0이 되고 물의 배출이나 피스톤의 침하도 정지해서 압밀은 완료된다. 이 모형의 압밀과정은 간극수압에서 점토의 골조에 응력을 전환하는 과정이며 응

력의 전환에 따라서 점토의 골조는 변형한다. 또 한, 전환이 완료했을 때 압밀은 완료된다.

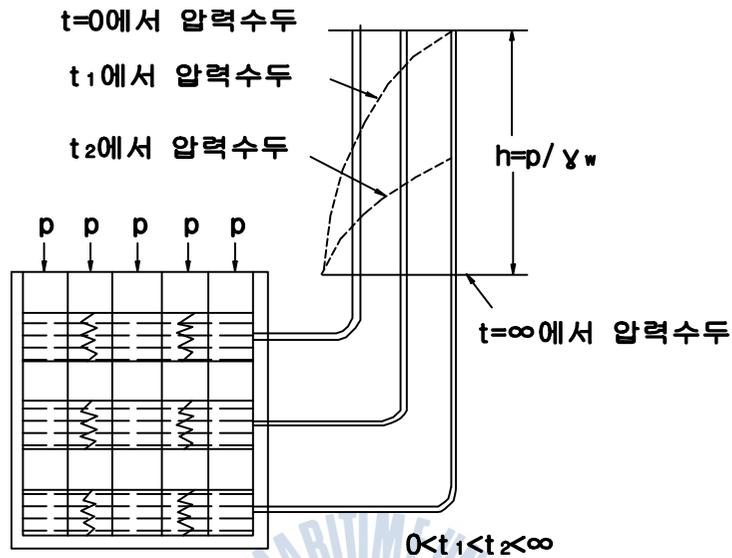


그림 2.2 압밀모형

Terzaghi는 점토 골조 구조의 변형특성을 탄성적이라 보고 이론을 세우고 압밀현상을 나타냈으나 실제의 점토의 변형특성은 탄성적이라기 보다 오히려 비탄성적이다. 따라서, 그림 2.3과 같이 실제 침하하는 일정치에 머물지 않고 과잉간극수압이 거의 소실한 후에도 계속 침하를 보인다. 이 같은 점토의 거동을 2차 압밀이라 한다.

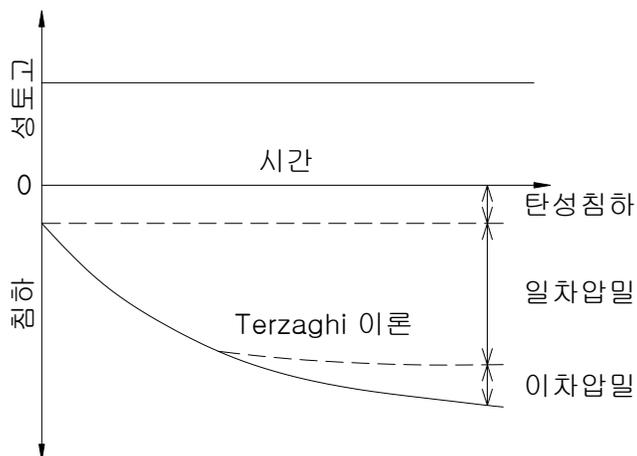


그림 2.3 압밀침하시간곡선

Terzaghi의 압밀이론은 다음의 가정을 토대로 하고 있다.

- 1) 점토는 균질하다.
- 2) 점토는 완전포화이다.
- 3) 점토입자와 간극수는 비압축성이다.
- 4) 점토에 걸리는 압밀하중은 압밀기간 동안 점토층 중 어디를 취해도 동일한 일정치를 갖는다. 또한 점토층의 자중에 의한 응력은 무시한다.
- 5) 간극수의 흐름은 Darcy의 법칙을 따르고 투수계수는 유효응력에 의존하지 않는다.
- 6) 점토 골조의 변형은 선형탄성이다.
- 7) 토층의 변형은 미소하고, 연직방향으로만 압축된다.
- 8) 간극수는 연직방향으로만 흐른다.

이들 가정을 토대로 전개한 압밀식을 식 (2.2) ~ 식 (2.7)에 나타내었다.

$$n_z = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} (\because v_x = v_y = 0) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = \frac{\partial v_z}{\partial z} (\because v_x = v_y = 0) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 (\because \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0) \quad (2.4)$$

$$\sigma_z' = \frac{1}{m_v} \epsilon_z = \frac{1}{m_v} e_v (\because \epsilon_x = \epsilon_y = 0) \quad (2.5)$$

$$\epsilon_z = -\frac{\partial u_z}{\partial z} (\because u_x = u_y = 0) \quad (2.6)$$

$$\sigma_z = \sigma_z' + u \quad (2.7)$$

가정에 기초한 식 (2.4)를 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_z = \text{const} \quad (2.8)$$

$z=0$ (표면)에서 $\sigma_z = P$ 인 것과 식 (2.7)을 고려하면 식 (2.8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_z = \sigma_z' + u = p \quad (2.9)$$

식 (2.9)에 식 (2.5)를 대입하여 식 (2.10)과 식 (2.11)을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{m_v} \epsilon_z + u = p \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{m_v} e_v + u = p (\because e_v = \epsilon_z) \quad (2.11)$$

위의 식 (2.11)을 단위시간에 있어서의 변화로 생각하면 식 (2.12)를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{m_v} \frac{\partial e_v}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{dp}{dt} \quad (2.12)$$

식 (2.2) 및 식 (2.3)에 의하여 식 (2.13)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.13)$$

또한 식 (2.13)을 식 (2.12)에 대입하면 식 (2.14)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{dp}{dt} \quad (2.14)$$

여기서 $c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$ 이고 이를 압밀계수라 부르며, 이는 압밀진행의 속도를 나타내는 정

수이다. 하중이 일정($\frac{dp}{dt} = 0$)하다면 압밀방정식은 식 (2.15)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.15)$$

식 (2.15)를 통하여 체적의 변화가 간극수압의 변화에 비례한다는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (2.15)를 도입하는 과정에서 미소변형과 변형율의 적합조건을 나타내는 식 (2.6)을 사용하지 않아도 변형율의 적합조건은 자동적으로 만족하며, 미소 변형율은 식 (2.6)을 적분해서 연직방향의 변위를 구하는데 사용된다. 즉, 정하중을 토대로 압밀방정식을 도입하는 과정에서 나타난 식 (2.14)는 하중이 시간적으로 변동하는 경우의 압밀방정식이다.

2.1.2 압밀도 산정

Terzaghi의 일차원 압밀의 기본방정식은 식 (2.16)이다.

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} : \text{Terzaghi의 일차원 압밀의 기본방정식} \quad (2.16)$$

여기서, c_v (압밀계수) = $\frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$ (cm^2/s)

식 (2.16)을 경계조건인 식 (2.17)을 이용해서 풀면, 재하직후인 초기 과잉간극수압이 깊이에 따라 일정한 값(u_{e0})으로 발휘되는 경우에 한해서 식 (2.18)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \text{식 (2.16)의 경계조건: } z = 0, 2H_{dr} \text{ 일때 } u_e &= 0 \\ t = 0 \text{ 일때 } u_e &= u_{e0} \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$u_e = \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \frac{2u_{e0}}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) \right\} e^{-M^2 T_v} \quad (2.18)$$

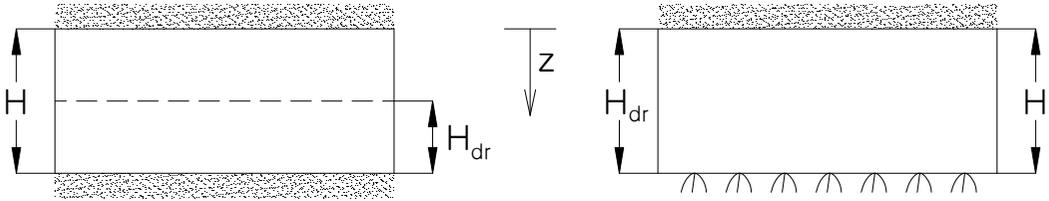
여기서, $u_e = u_e(t, z)$

$$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H_{dr}^2} \quad (H_{dr} \text{에 대해서는 그림 2.4 참조})$$

식 (2.18)의 u_e 는 깊이와 압밀시간에 따라 달라지므로 $u_e(t, z)$ 로 나타내기로 하며, 이를 이

용하여 압밀시간 t 일 때 깊이 z 에서의 압밀도 $U(t, z)$ 는 식 (2.19)와 같이 정의된다.



$$H_{dr} = \frac{H}{2}$$

(a) 양면배수

$$H_{dr} = H$$

(b) 일면배수

그림 2.4 배수조건에 따른 배수거리(H_{dr})의 정의 (임종철, 2010c)

$$U(t, z) = \frac{u_{e0}(z) - u_e(t, z)}{u_{e0}(z)} = 1 - \frac{u_e(t, z)}{u_{e0}(z)} = \frac{\Delta\sigma'_v(t, z)}{\Delta\sigma'_v(z)} \quad (2.19)$$

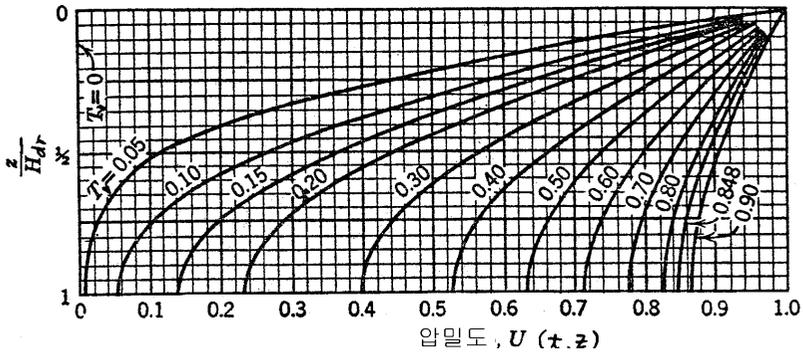
여기서, $u_{e0}(z)$: 재하 직후(압밀 직후, 즉 시간 $t=0$ 일 때) 깊이 z 에서의 과잉간극수압으로 깊이에 따라 일정할 경우는 식 (2.18)에서의 u_0 와 동일.

$u_e(t, z)$: 재하 후 t 시간 경과 후 깊이 z 에서의 과잉간극수압

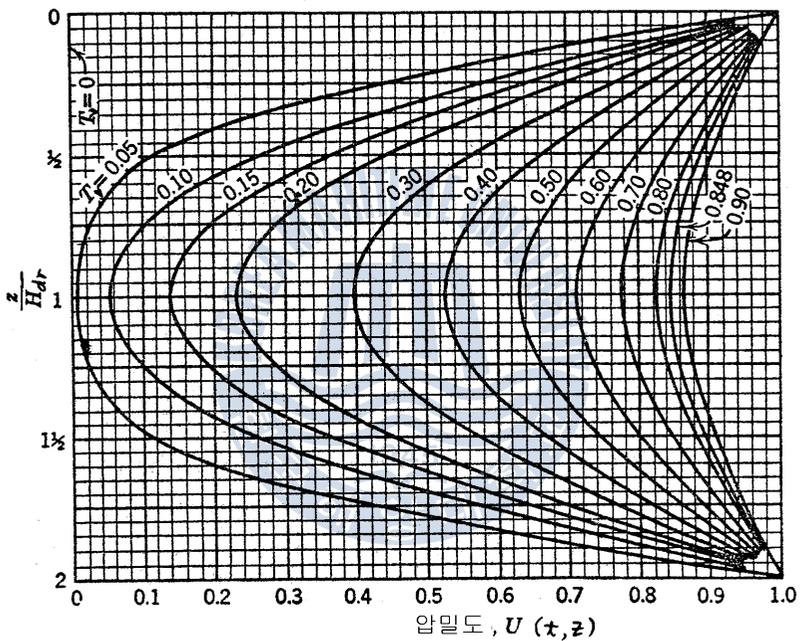
$\Delta\sigma'_v(t, z)$: 재하 후 t 시간 경과 후 깊이 z 에서의 유효응력의 증가량

$\Delta\sigma'_v(z)$: 재하에 의해 증가된 전응력(또는 압밀완료시의 유효응력의 증가량)

초기 과잉간극수압이 깊이에 따라 일정한 경우에는, 식 (2.18)에서 $t=0$ 을 대입해서 u_e 를 구하여 식 (2.19)의 $u_{e0}(z)$ 에 대입하면 압밀도가 구해진다. 그리고 식 (2.18)에서 구한 $u_{e0}(z)$ 와 $u_e(t, z)$ 를 식 (2.19)에 대입하되, 간략화하기 위해 t 대신 T_v 의 함수로 표현하면 $U(t, z)$ 는 $U(T_v, z)$ 로 나타내어지며, 이 값의 깊이 비(z/H_{dr})에 따른 변화를 나타낸 곡선 그림 2.5를 등시곡선(等時曲線; isochrone)이라고 한다.



(a) 일면배수일 때($H = H_{dr}$)



(b) 양면배수일 때($H = 2H_{dr}$)

그림 2.5 등시곡선(시간계수 T_v 와 압밀도 $U(t, z)$ 의 관계, H는 압밀층 두께(임종철, 2010c)

2.1.3 평균압밀도

식 (2.19)를 이용해서 압밀시간 t 에서의 점토층 전체 두께에 대한 평균압밀도 $U_{av}(t)$ 를 구하면 식 (2.20)과 같이 된다. 이 때 적분하는 깊이의 범위를 $2H_{dr}$ 로 하면 양면배수, 일면배수에 관계없이 동일한 평균치를 얻을 수 있다. 양면배수일 때는 시료두께가

H_{dr} 이어서 H_{dr} 로 평균해도 되지만 그렇게 되면 평균압밀도를 일면배수와 양면배수로 나누어서 정리해야 하므로 일면배수의 경우에도 그림 2.4(b)와 그림 2.5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 $2H_{dr}$ 로 평균하더라도 상하가 대칭이므로 동일한 결과가 나오므로 양면배수, 일면배수의 구분 없이 식 (2.20)과 같이 정의하는 것이 편리하다.

$$U_{av}(t) = 1 - \frac{\frac{1}{2H_{dr}} \int_0^{2H_{dr}} u_e(t, z) dz}{\frac{1}{2H_{dr}} u_{e0}(z) dz} \quad (2.20)$$

특히 $u_{e0}(z)$ 가 깊이에 따라 일정할 경우에는 $u_{e0}(z) = u_{e0}$ 로 나타내어서 식 (2.20)의 분모가 u_{e0} 로 되며 이 때 식 (2.20)의 $u_e(t, z)$ 에 식 (2.18)의 u_e 를 대입하면 식 (2.21)이 얻어진다.

$$U_{av}(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (2.21)$$

식 (2.20)에서 $u_{e0}(z)$ 의 깊이에 따른 분포가 그림 2.6과 같을 때, 즉 깊이에 관계없이 일정할 때의 평균압밀도와 시간계수의 관계를 식 (2.21)에서 구하여 정리하면 그림 2.7 또는 표 2.2와 같다. 또한 이때의 식 (2.21) 또는 그림 2.7을 간략식으로 나타내면 식 (2.22)와 같다.

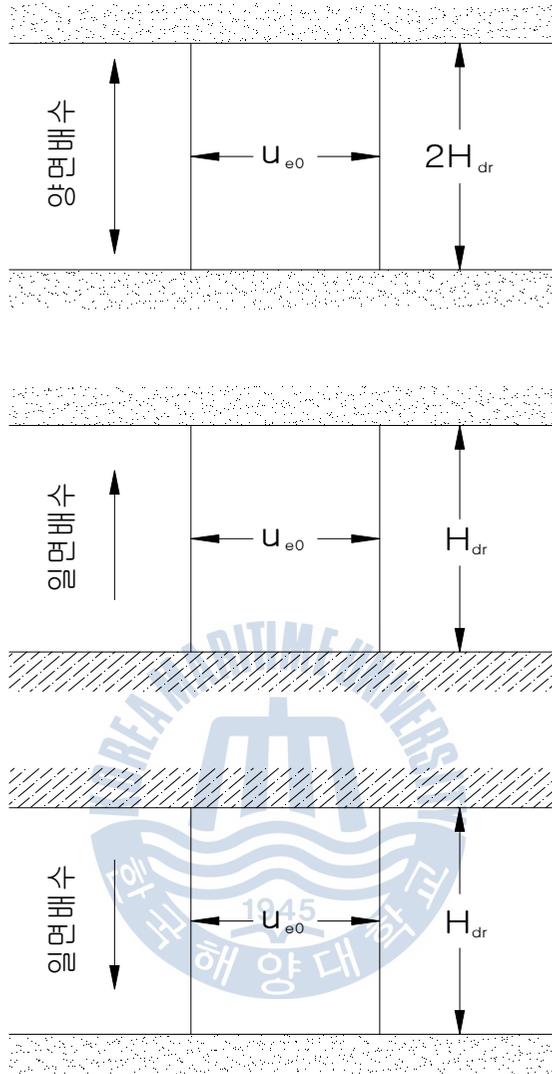


그림 2.6 초기과잉간극수압 $u_{e0}(z)$ 가 깊이에 따라 일정하게 u_{e0} 인 경우의 분포형태
(임종철, 2010d)

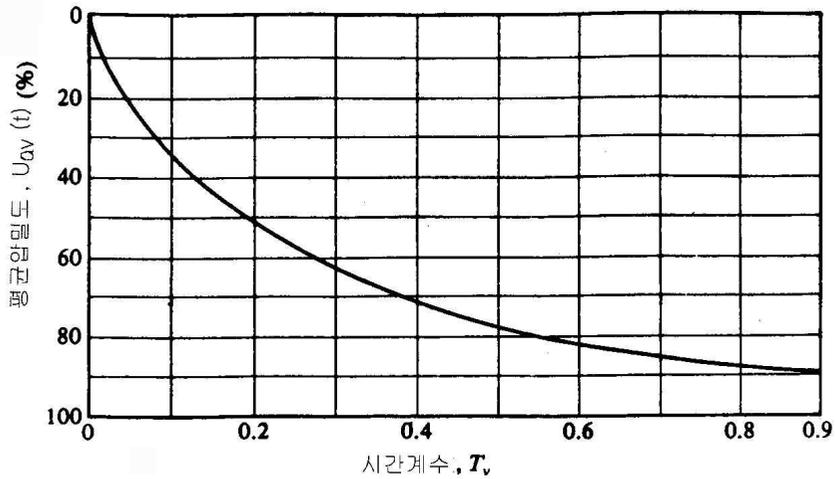


그림 2.7 평균압밀도와 시간계수의 관계
(초기과잉간극수압 $u_{e0}(z)$ 가 깊이에 따라 일정하게 u_{e0} 인 경우)

표 2.2 평균압밀도와 시간계수의 관계

평균압밀도, $U_{av}(t)$ %	시간계수, T_v
0	0.000
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197
60	0.287
70	0.403
80	0.567
90	0.848
100	∞

$$\begin{aligned}
 U_{av}(t) = 0 \sim 60\% \text{일 때: } T_v &= \frac{\pi}{4} \left[\frac{U_{av}(t)}{100} \right]^2 \\
 U_{av}(t) > 60\% \text{일 때: } T_v &= 1.781 - 0.933 \log[100 - U_{av}(t)]
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

2.1.4 지반의 전단변형

(1) 전단변형과 압밀변형

포화된 점토지반상에 놓여진 구조물이나 성토 등의 하중이 밀면 에 가해지면 이 하중 증가로 기초지반이 변형되고, 지표면 혹은 지반 내의 흙은 점차로 변위를 일으킨다. 이와 같이 생기는 변위의 연직 성분이 침하이다.

지반에서 배수가 거의 이루어지지 않을 정도의 급속도로 그림 2.8(a)에 나타낸 점증 재하 A 를 가했을 때, 시간-침하곡선 A' 가 얻어진다. 즉, 하중이 p_l 이하일 때는 침하도 극히 소량이지만 p_l 에서 p_u 로 증가됨에 따라서 점차 증대해가고, 하중이 p_f 에 가까웠을 때에는 하중의 미소한 증가에 의해 침하가 급격히 진행 되어 마침내 지반이 파괴된다. 이 경우의 하중 p_l 을 하한항복하중, p_u 를 상한항복하중, p_f 를 파괴하중이라 부르고 있다. 이것과 대응하여 p_l 까지의 하중증가, p_l 에서 p_u 까지의 하중증가 및 p_u 부터 p_f 까지의 하중증가에 의해 생기는 침하를 각각 탄성침하, 탄소성침하 및 파괴침하라 부르기도 한다.

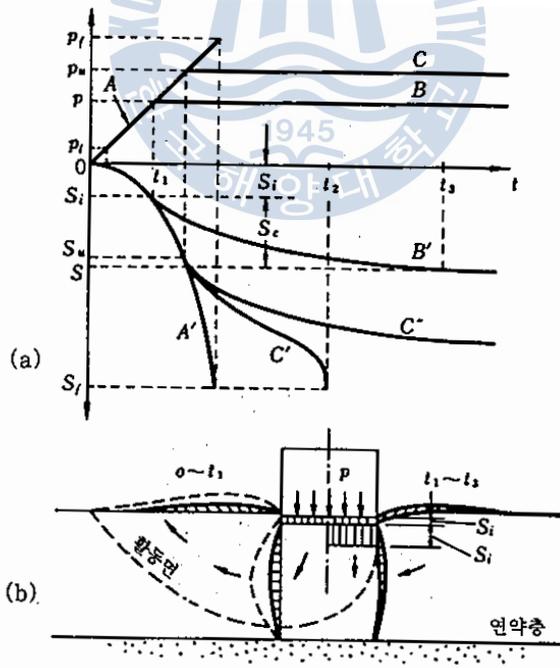


그림 2.8 하중-침하-시간관계와 지반의 변형(박병기등, 1995)

이상의 침하는 비배수 또는 비배수에 가까운 상태로 놓여진 지반이 재하에 의한 전단응력의 증가에 따라 주로 전단변형(체적불변의 형상변화)에 의해 생기는 것이다.

다음에 재하하중을 서서히 증가하여 그림 2.8(a)에 나타낸 t_1 시간에 하중 $p_l \sim p_u$ 간의 임의 하중 p 에 달한 후 하중을 증가하지 않고 그대로 방치해 두어도 시간-침하곡선 B 와 같이 시간과 함께 증가하는 이와 같은 현상이 주로 지반의 압밀변형(압밀에 의한 체적변화)에 의한 것이라는 것은 이미 Terzaghi에 의해 밝혀졌다. 또, 침하의 성격을 보다 명확히 하는 의미에서 t_1 시간까지의 점중 재하단계에서 생기는 침하 S_i 를 즉시 침하, 일정하중에서 방치 중에 생기는 S_c 침하를 압밀침하라 한다.

항복하중 p_u 까지 재하한 후 지반을 비배수로 유지하여 방치하면 그림 2.8(a)에 나타낸 곡선 C 를 따라 침하하여 t_2 시간에서 파괴한다. 이 파괴를 크리프 파괴라 부르고, S_u 이하에 생기는 침하가 크리프 침하이다. 일반적인 지반은 완전히 비배수상태로 유지되는 것은 아니므로 압밀에 의해서 지반의 강도가 증가하여서 파괴하는 일 없이 곡선 C' 를 따라 침하가 진행된다.

그림 2.8(b)는 위에서 서술한 지반의 전단변형과 압밀변형을 모식적으로 나타낸 것이다. 즉, 점중재하가 되는 시간 t_1 까지 생기는 전단변형에 의한 지반의 변위를 (b)의 좌측에 나타내 놓고, 구조물 저면 아래 흙은 하향의 변위를, 구조물 측방의 흙은 측방으로의 변위를, 구조물 측방 지표면의 흙은 경사진 위쪽으로의 변위를 각각 일으키고 있다. 이 상태로 하중을 계속 증가하면 각각의 변위는 더욱 증대하여 지반은 그림에 나타낸 경사면을 따라 파괴한다. 그림 2.8(b)의 오른쪽은 하중 p 로 방치된 t_1 부터 t_3 까지 생기는 압밀변형에 의한 지반의 변위를 나타내고 있다. 이 경우에는 압밀에 의해 구조물 저면 아래 흙에는 하향변위가 생기지만 구조물 측방의 흙에는 안쪽을 향하는 변위가 또 측방 지표면에는 경사진 아래쪽을 향하는 변위가 각각 생기게 된다.

(2) 성토 기초지반의 변형

① 성토의 침하 현상

매립이나 부지조성과 같이 연약층의 두께에 비해 충분히 넓은 재하를 한 경우에 생기는 기초지반의 변형은 연직방향만의 1차원적인 변형에 한정된다. 그러나, 도로, 철도의 성토나 하천제방과 같은 유한폭의 대상 재하나 건물 등의 좁은 면상 재하가 된 기초지반에는 2차원적 또는 3차원적인 변형이 생긴다. 그림 2.9는 Maysin 고속도로, Tomei 고속도로 및 건설부 일반국도 개량공사 등에서 실제로 관측된 성토의 침하형상 및 측방으로 영향을 나타낸 것이다. 단, 성토의 부설폭은 30~60m, 성토시공 기간은

50~200일로 시공된 예이다. 기초지반의 변형 형상은 연약층 두께나 재하 폭 및 시공 속도 등에 좌우된다. 그림 2.9에 의하면 최종 침하는 성토 중앙 바로 아래를 1로 했을 때, 노면 바로 아래에서는 약 0.8, 비탈끝 부분에서는 약 0.25의 값이다. 그러나, 성토 시공 완료시에 침하는 지반의 압밀속도나 시공속도에 따라 다음과 같이 크게 다르다.

- (i) 시공속도가 늦고 압밀속도가 빠른 경우 : 최종침하 형상과 유사한 침하(그림 2.9에서 성토완료시를 나타내고 있는 파선)
- (ii) 시공속도가 빠르고 압밀속도가 늦을 경우 : 침하량이 적고 노면직하의 침하가 현저하다(그림 2.9에서 성토 완료시를 나타내는 실선)

또, 그림 2.9에서 성토 완성직후 측방지반의 최대융기는 성토 중앙 바로 아래의 최종 침하를 1로 했을 때 약 0.1이하이고, 최대 수평변위는 약 0.2이하라는 것을 알 수 있다. 또한 성토 측방 지반에 압밀변형이나 전단변형 등에 의해서 변위가 미치는 범위는 법면 끝에서의 거리 $L = (1.5 \sim 2)D$ 정도 이하이다. 단, D 는 연약층의 두께이다.

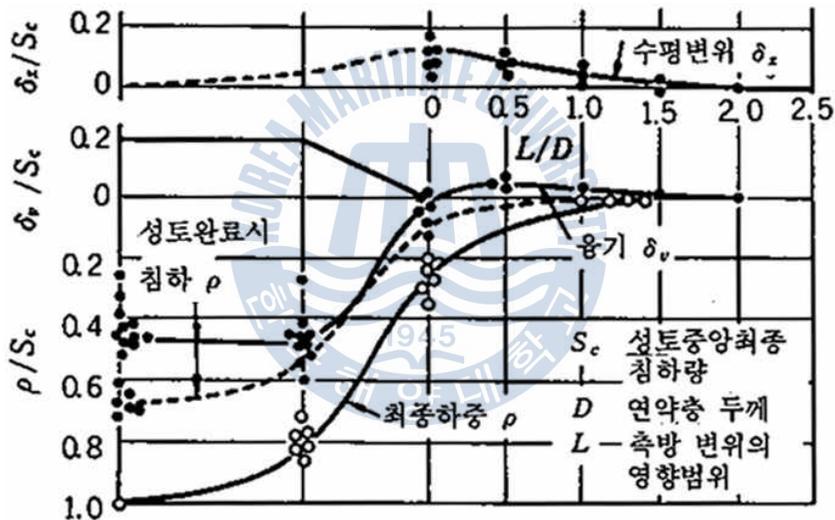


그림 2.9 성토에 의한 지반의 변위(박병기 등, 1995)

② 성토기초지반에 생긴 전단변형과 압밀변형의 분리

성토의 재하에 의해 기초지반을 구성하는 개개의 흙 요소에는 그림 2.10에 나타난 전단변형 및 압밀변형이 생긴다. 도로·철도의 성토나 하천제방과 같은 대상하중과 같은 평면변형률 문제에서는 중간주응력 방향의 변형을 증분 $\Delta\epsilon_2 = 0$ 이고 중간유효주응력 $\Delta\sigma_2' = \nu(\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_3')$ 이 된다. 따라서 전단변형 및 압밀변형에 기인하는 그림 2.10의 최대주변형률 $\Delta\epsilon_1$ 및 최소주변형률 $\Delta\epsilon_3$ 은 각각 식 (2.23)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\epsilon_1 &= \frac{\Delta\epsilon_v}{2} + \Delta\epsilon_s = \Delta\epsilon_v + \Delta\epsilon_3 \\ \Delta\epsilon_3 &= \frac{\Delta\epsilon_v}{2} - \Delta\epsilon_s\end{aligned}\tag{2.23}$$

- 여기서, ϵ_1 : 최대주변형을
 ϵ_2 : 최소주변형을
 ϵ_v : 체적변형을
 ϵ_s : 전단변형을

만약, 측방으로 변위가 구속되어 $\Delta\epsilon_3=0$ 인 경우는 $\Delta\epsilon_1 = \Delta\epsilon_v = 2\Delta\epsilon_s$ 이 된다. 그림 2.10은 대상 성토하중하의 지반면에 생기는 변형을 나타낸다. 즉, 파선은 압밀에 의해 생기는 체적변형을 나타내고, 실선은 지반의 전단에 의해 생기는 변형을 더한 전 변형을 나타내고 있다.

이 경우 전단에 의해 생기는 변형은 등체적으로 이루어지는 형상만의 변화이므로 성토 아래의 변형량과 성토 양측의 변형량은 서로 같은 값이다. 그림 2.10에 나타냈듯이 성토 중앙 아래의 변형율이 현저하게 크게 생기는 것은 그림 2.11(a)에서 나타낸 바와 같이 성토 평균폭 B_m 과 연약층 두께 D 의 비 B_m/D 이 작은 경우이다. B_m/D 이 매우 클 때는 성토 중앙 아래의 지반에 생기는 형상의 변형이 구속되므로 $\Delta\epsilon_3 \approx 0$ 이 되기 때문에 그림 2.11(b)에 나타냈듯이 성토 중앙부에서는 최대 주변형을 $\Delta\epsilon_1$ 과 체적변형을 $\Delta\epsilon_v$ 는 거의 같은 값이 되어 압밀 조건이 만족된다.

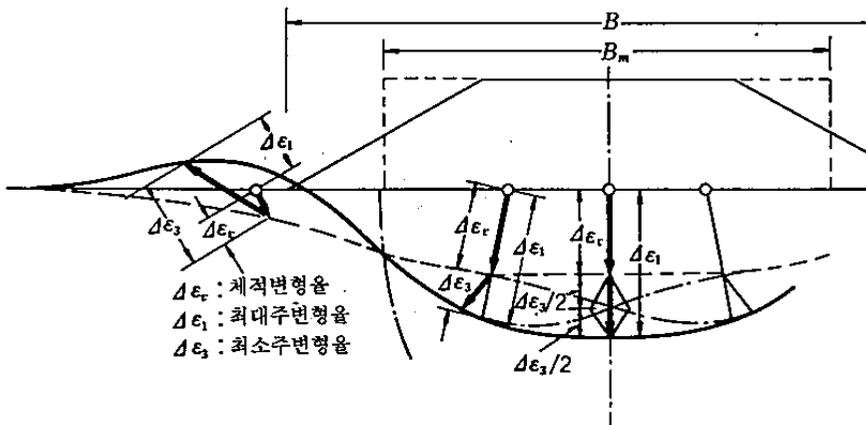


그림 2.10 성토하중에 의한 지반의 변형(박병기 등, 1995)

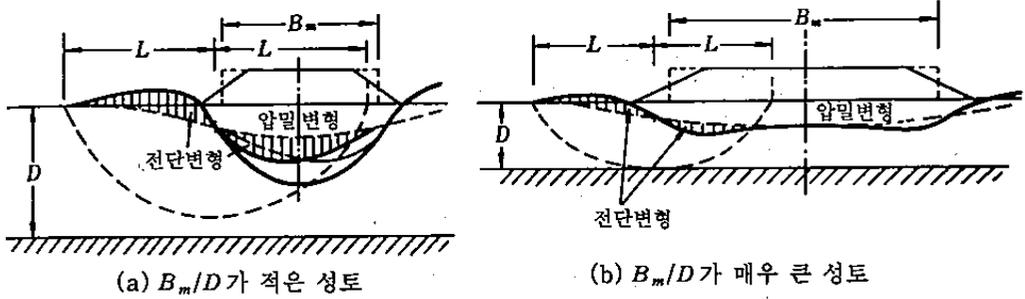


그림 2.11 B_m/D 에 의한 변형성상의 비교(박병기 등, 1995)

이상과 같은 생각에 의해서 변형 형상의 특징으로 기초지반에 생긴 변형을 전단변형과 압밀변형으로 분리한 예가 그림 2.12이다. 즉, 침하판 및 변위말뚝에 의해 실측된 지표면의 전변형량에 포함되는 각 점의 압밀침하량을 가정하여 그림 2.12(a)에서 나타내는 성토 아래 및 측방의 전단변형량 A 및 B 가 같아지도록 압밀침하량을 수정한다. 또, 성토 법면 끝 바로 아래의 측방유동량 C 를 지중변위계의 측정으로 구한다. 그림 2.12(b)는 측방 유동토량 C 와 변위말뚝에 의해 측정된 측방지표면의 용기토량을 비교한 것으로 유동토량이 용기토량의 약 1.8배이고, 양자의 차가 법면 끝부분 측방 압밀침하량에 해당 한다는 것을 알 수 있다. 그림 2.12(c)는 성토 아래의 전침하토량과 유동토량 C 의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 전단변형량 $A=B$ 인 조건에서 추정하여 계산한 토량의 시간에 따른 변화도 그림 2.12(c)에 나타냈지만, 시간에 상관없이 $B=C$ 의 조건이 대개 만족되어 B 를 전단 변형에 기인하는 토량, 전침하토량과 B 의 차를 압밀변형에 기인하는 토량으로 간주해도 좋을 듯하다. 덧붙여 말하면, 전침하토량에 대한 유동토량의 비는 1차 성토의 쌓기에 20%에 달해 있지만 방치 후는 약 10%까지 감소해 있다.

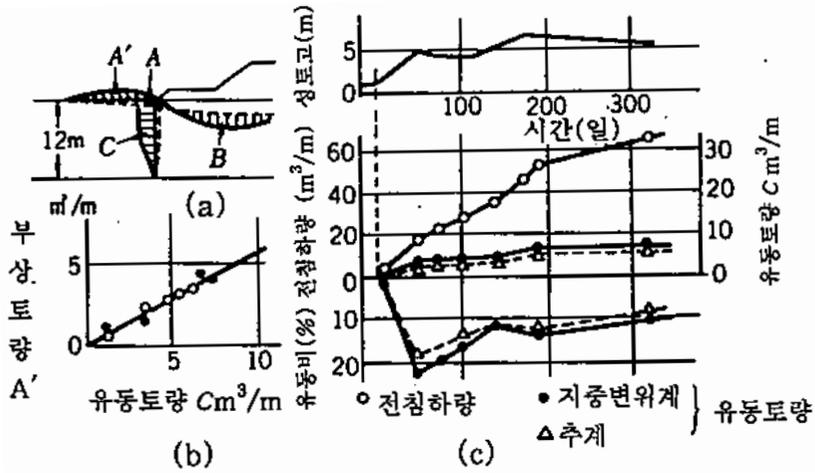


그림 2.12 전단변형과 측방유동량(北海道 岩見澤試盛, 1977)

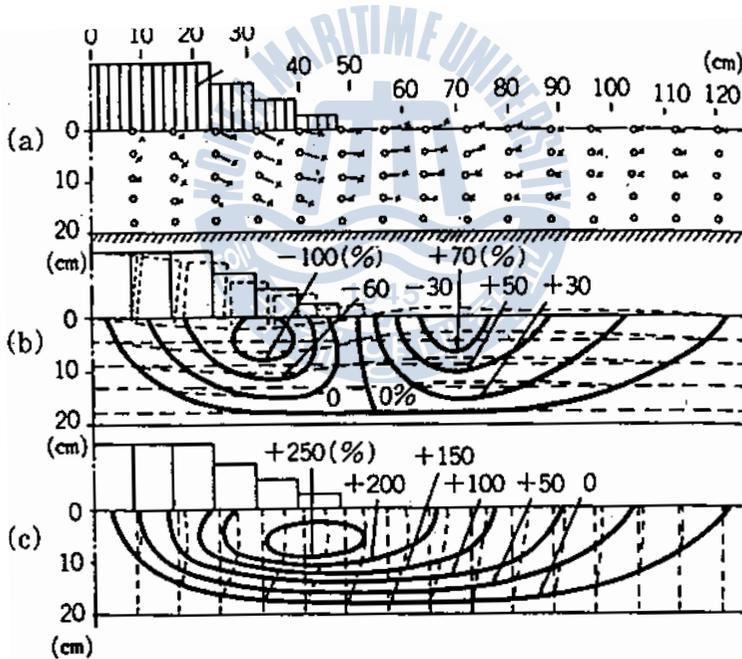


그림 2.13 지반에 생긴 전단변형의 모형실험(持永龍一郎, 山本武夫, 1968)

③ 지반에 생기는 전단변형의 모형실험

그림 2.13은 넓은 대상(띠모양)의 성토가 얇은 연약지반에 재하 되었을 때 생기는 전단변형을 알기 위해 실시한 모형실험의 결과를 나타낸 것이다. (a)는 하중이 q 에 달하기까지 생긴 지반 내 각 점의 변위를 나타낸 것이다. 이 변위에서 수직변위량 및 수평변위량을 구해 각각 재하중 저면의 최대 침하량에 대한 백분율을 등고선으로 나타낸 것이 (b) 및 (c)이다. 이와 같이 성토가 착수됨에 따라 전단변형은 성토 아래에서 측방 지반을 향해 넓은 지역으로 퍼져간다.

2.2 현장 계측에 의한 장래침하량의 예측 방법

2.2.1 쌍곡선법(Hyperbolic method)

(1) 쌍곡선법에 의한 장래 침하량의 예측

쌍곡선법은 침하의 평균속도가 쌍곡선적으로 감소해 간다고 하는 가정 하에서, 초기의 실측침하량을 사용하여 장래의 침하량을 예측하는 것이다. 그림 2.14는 시간~침하곡선을 모식적으로 나타낸 것으로, 재하로부터 임의 시간 t 후의 침하량 S_t 는 식 (2.24)와 같이 된다. 이 쌍곡선 근사는 재하가 완료된 시점부터의 시간에 따른 침하량에 적용되는데, 이는 재하가 완료되기 전까지인 점중재하 시의 침하량은 그림 2.14에서 알 수 있는 바와 같이 쌍곡선과 전혀 다른 거동을 하기 때문이다(Tan, S.A, 1970).

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (2.24)$$

여기서, S_0 : 재하 완료 시점에서의 침하량(초기침하량)

t : 재하 완료 시점으로부터의 경과 시간

α, β : 실측침하량으로부터 구해지는 계수

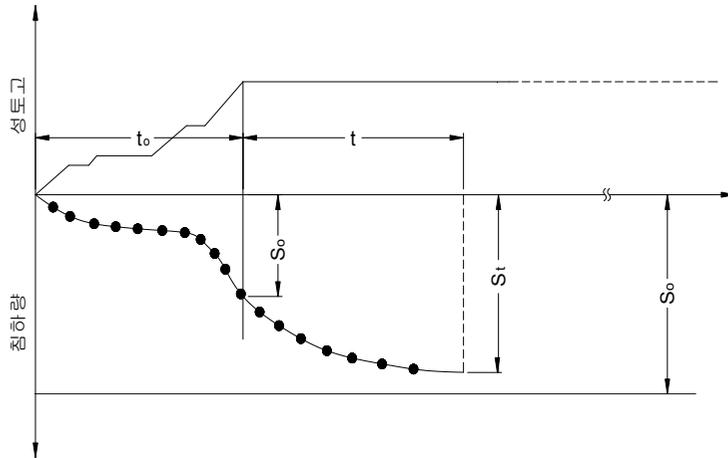


그림 2.14 쌍곡선법에 의한 침하의 추정방법의 모식도

식 (2.24)를 변형하면,

$$\frac{t}{S_t - S_0} = \alpha + \beta t \quad (2.25)$$

가 되고, 그림 2.15에 나타낸 바와 같이 $t \sim \frac{t}{S_t - S_0}$ 의 관계를 도시하면 직선이 얻어진다. 이 직선의 종축 절편 및 구배로부터 각각 α , β 를 구할 수 있다. 이 경우, 재하 후 초기 단계(약 1개월 이하)에서의 실측치는 산만하고, 또 직선으로부터 벗어나므로 적어도 재하 후 3개월 정도 이상 경과하는 것이 바람직하다.

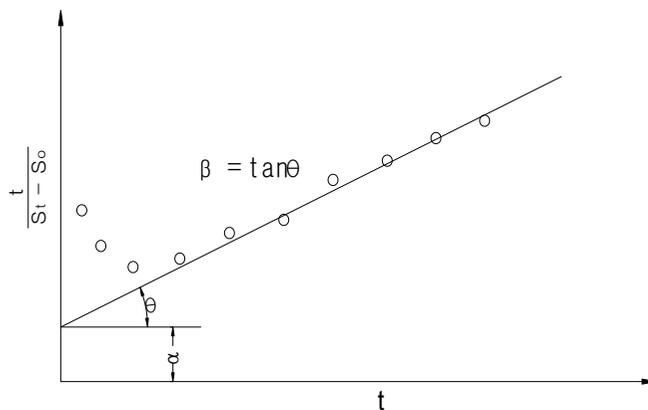


그림 2.15 식(2.25)의 α , β 를 구하는 방법

또, $t = \infty$ 일 때, 즉 최종침하량 S_{∞} 는 식 (2.24)에서부터 식 (2.26)와 같이 되며, 재하 후 t 시간 경과했을 때의 잔류침하량 ΔS 는 식 (2.27)과 같다.

$$S_{\infty} = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2.26)$$

$$\Delta S = S_{\infty} - S_t \quad (2.27)$$

(2) 실측치와 쌍곡선법에 의한 예측치의 비교

세자이(Sejai, 1986)에 의하면 고속도로에서의 시간~침하 곡선에 대한 많은 실측치로부터, 침하 형식은 연약층의 두께가 10m 정도를 경계로 천층형과 심층형으로 대별할 수 있다. 즉, 연약층 두께가 10m 이하인 천층형의 경우는, 성토가 진행되면서부터 반년 정도 되면 거의 침하가 수렴하는 경향이 있다. 한편, 연약층 두께가 10m 이상인 심층형의 경우에는, 성토가 시작되면서부터 반년 이상 경과해도 침하가 진행하며, 공용 후의 장기침하는 10m보다 깊은 위치의 연약층이 발생원이 되며, 또 하부의 연약층 두께가 두꺼울수록 장기간에 걸쳐서 계속된다(瀨在 武, 1986).

그림 2.16, 2.17에 천층형과 심층형의 두 가지 침하형식의 시간~침하 곡선의 대표적인 사례를 나타내었다. 이 중 천층형의 경우에는 그림 2.16에 나타낸 바와 같이 실측치와 쌍곡선법에 의한 예측치와의 차이는 비교적 적고, 실용상 문제가 되는 일은 그다지 없는 것 같다. 한편, 심층형의 경우에는 그림 2.17에 나타낸 바와 같이, 단기간의 침하 예측을 하는 경우에는 정도는 좋지만, 장기침하의 경우에는 침하량이 시간의 대수($\log t$)에 직선적으로 변화하는 경향을 나타내므로, 실측치와 예측치와의 차이가 시간의 경과에 따라 커진다. 따라서 쌍곡선법에서는 연약층의 두께가 두껍고 2차압밀적 침하가 큰 지반에서, 성토 시작 후 반년 정도의 실측치만으로 장기 침하를 예측할 수는 없다. 이 때문에 쌍곡선법을 채용하는 경우, 실측한 침하량을 근거로 예측치를 순차적으로 수정하거나, $\log t$ 법에 의한 장기침하를 예측하는 것이 현장의 실태에 맞는 것 같다.

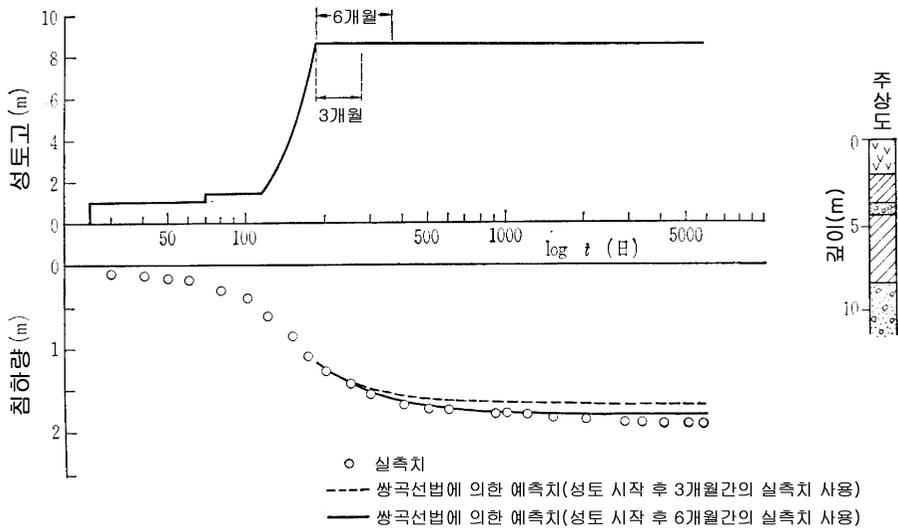


그림 2.16 시간-침하의 실측치와 쌍곡선법에 의한 예측치의 비교(연약층 두께가 얇은 경우)

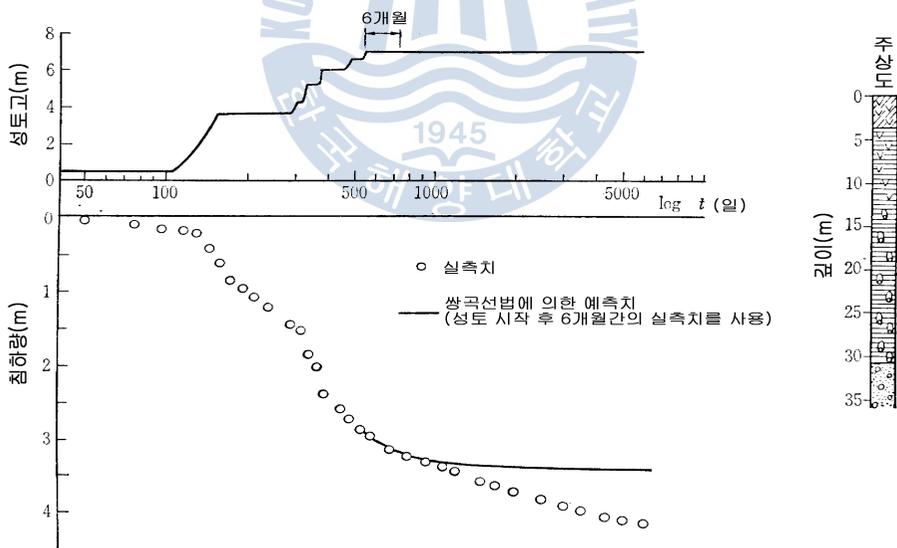


그림 2.17 시간-침하의 실측치와 쌍곡선법에 의한 예측치의 비교(연약층 두께가 두꺼운 경우)

2.2.2 Hoshino법 (\sqrt{t} 법)

Hoshino는 침하량이 시간의 평방근에 비례한다고 가정하고 초기의 실측침하량으로부터 장래침하량을 예측하는 방법을 제안하고 있어 \sqrt{t} 법이라고도 한다. 침하 예측 모델로서 식 (2.28)을 사용한다.

$$S_t - S_0 = \frac{AK\sqrt{t}}{\sqrt{1+K^2t}} \quad (2.28)$$

여기서, t : 즉시침하나 점증재하 등의 재하가 완료된 후부터의 경과시간

S_t : t 시각 후의 전침하량

S_0 : 즉시침하나 점증재하 등에 의해 발생하는 재하 완료 이전의 침하

A, K : 침하실측치로부터 구해지는 계수

식 (2.28)을 다시 쓰면 식 (2.29)와 같이 되며 최종침하량 S_∞ (식 (2.28)에서 $t \rightarrow \infty$ 일 때의 S_t)를 구하면 식 (2.30)과 같이 된다. 식 (2.29)를 그래프로 나타내면 그림 2.18과 같다.

$$\frac{t}{(S_t - S_0)^2} = \frac{1}{(AK)^2} + \frac{1}{A^2}t \quad (2.29)$$

$$S_\infty = S_0 + A \quad (2.30)$$

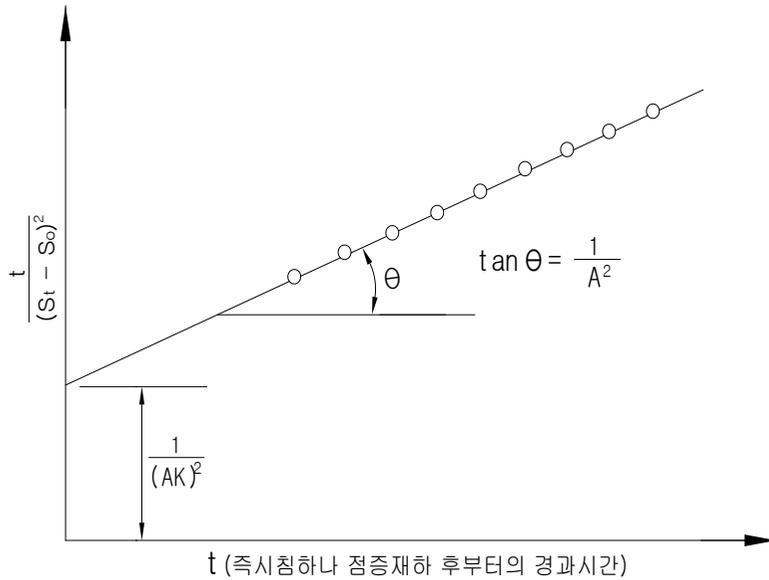


그림 2.18 호시노법에 의한 침하량 예측 방법(星柵 和, 1962)

Hoshino법은 쌍곡선법에 비해 더 잘 정의된 직선을 나타내지만 일반적으로 실측된 데이터와의 부합성은 쌍곡선법에 낮은 것으로 알려져 있다. 또한 이 방법은 S 와 t 의 선정방법에 따라 추정결과가 달라지므로 회귀분석 시 직선성이 좋도록 계측 결과를 수정할 필요가 있다. Yoshikuni 등(1962)은 얻어진 침하실측치에 대해서 $(S_t - S_0)$ 의 값이 크게 되도록 (t_0, S_0) 를 선택하면 예측 정도가 향상된다고 하였다.

2.2.3 Asaoka법

Asaoka는 일차원 압밀방정식에 기초해서 침하 예측모델을 다음과 같이 제안했다.

$$S_i = \beta_0 + \sum_{s=1}^n \beta_s S_{i-s} \quad (2.31)$$

여기서 S_i 는 시간 t 를 $t_i = \Delta t \times i$ ($i = 0, 1, 2, \dots$)와 같이 표현할 때 t_i 에서의 침하량, n 은 침하 예측을 위한 차분모델의 최고차수, β_0, β_s 는 실측침하량으로 부터 구해지는 정수이다. 차분모델의 차수 n 은 클수록 예측정도는 높아지는데, 1~2차근사를 이용하면 실용상 충분하다고 생각된다. 여기서, t 는 즉시침하나 점증재하가 완료된 시점에서부터의 경과시간을, S_i 는 전침하량, S_0 는 즉시침하나 점증재하 등에 의해 발생하

는 $t=0$ 시의 침하량을 의미한다.

가장 간단한 1차 근사의 경우의 관계식은 식 (2.32)와 같다. 그림 2.19와 같이 초기의 침하실측치를 S_i 와 S_{i-1} 의 관계로써 도시하면 거의 일직선상에 놓이므로 이것으로부터 β_0 와 β_1 을 구해서 이 β_0 와 β_1 을 이용하면 임의시각에서의 침하량이 예측될 수 있다. 또, 이 직선과 45° 선과의 교점이 최종침하량을 나타낸다. 즉, 최종침하량 S_∞ 은 $S_{i-1} = S_i$ 일 때의 S_i 가 되며, 식 (2.33)과 같이 나타내어진다. 여기서, 2차근사식 이상을 사용한 경우의 침하 예측모델의 계수를 구하는 방법도 같은 방법으로 행할 수 있다.

$$S_i = \beta_0 + \beta_1 S_{i-1} \quad (2.32)$$

$$S_\infty = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (2.33)$$

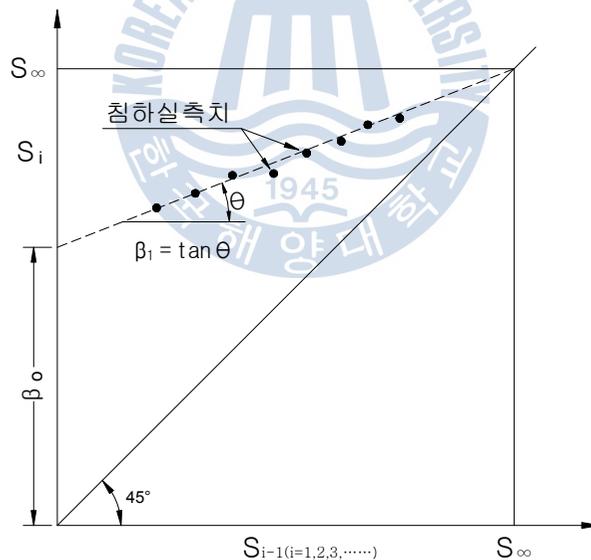


그림 2.19 Asaoka에 의한 침하 예측법(Asaoka, A., 1978)

2.2.4 log t법

Casagrande와 Fadum은 log t방법을 이용하여 장래침하량을 추정하는 방법을 제안하였다.

log t ~ 침하량 관계 곡선은 그림 2.20에서와 같이 시간이 경과함에 따라 침하량이 구간에 따라 일정한 특성을 보이고 있다. 구간은 크게 초기압축 구간, 1차 압밀구간, 2차 압밀구간 3부분으로 이루어져 있으며, 곡선상의 두개의 변곡점이 각 구간을 나누고 있다. 곡선의 기울기는 초기압축 구간에서는 완만한 경사의 곡선형태를 보이다가 1차 압밀 구간에 이르면 초기압축 구간에 비해 급한경사의 직선형태를 이루며, 두 번째 변곡점을 지나면서 마지막 2차 압밀 구간에 이르면 다시 완만한 경사의 곡선형태를 보이게 된다.

log t법은 현장 계측결과 중 일차 압밀구간의 data에 대한 회귀곡선의 관계식을 분석하여 식 (2.34)와 같이 임의 시점의 시간 t_i 를 회귀곡선식에 대입함으로써 장래 침하량을 예측할 수 있다.

$$S_i = a \times \log(t_i) + b \quad (2.34)$$

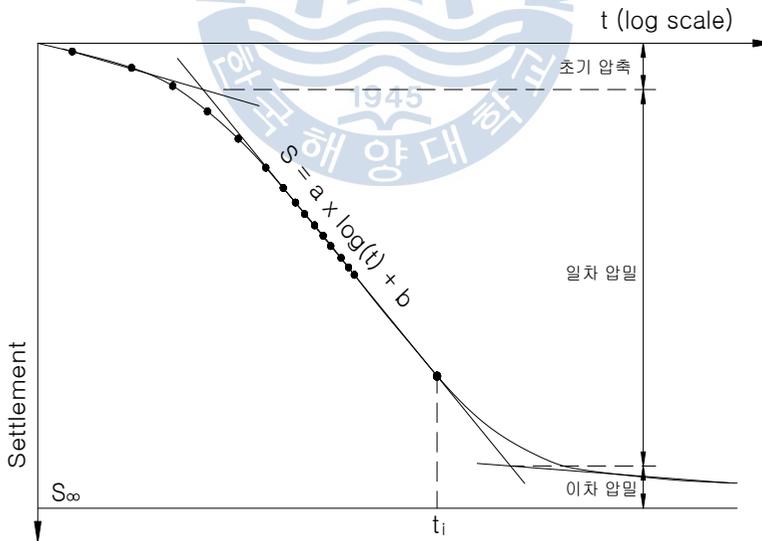


그림 2.20 log t - 침하량 곡선(竹鴨 正勝, 1979)

2.2.5 Tan법

(1) Terzaghi의 일차원 압밀이론의 응용

Sridharan 등(1981)은 Terzaghi의 일차원 압밀이론의 식 (2.35)를 이용하여 T_v 와 $\frac{T_v}{U}$ 의 관계를 그림 2.21과 같이 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 초기에는 위로 볼록한 곡선관계를 갖다가 $U_{0.6}$ 과 $U_{0.9}$ 에 상응하는 T_v 인 0.287과 0.848 사이에서 거의 직선이 된다. 그 이후인 $T_v > 0.848$ (또는 $U > 0.9$)에서는 기울기 1.0에 접근하는 두 번째 직선이 존재한다. 첫 번째 직선부의 평균 기울기는 0.824이며, 각 U 에서의 $\Delta(\frac{T_v}{U})/\Delta T_v$ 를 계산하면 이 기울기의 편차는 ± 0.04 이며, 이는 0.824의 약 5%에 해당하는 크기이다.

$$U = 1 - \frac{\frac{1}{2H} \int_0^{2H} u_z dz}{\frac{1}{2H} \int_0^{2H} u_0 dz} \quad (2.35)$$

표 2.3 U 와 T_v 의 대표적 관계

U	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
T_v	0.000	0.008	0.031	0.071	0.126	0.197	0.287	0.403	0.567	0.848	∞
$\frac{T_v}{U}$	—	0.080	0.155	0.237	0.315	0.394	0.478	0.576	0.709	0.942	∞

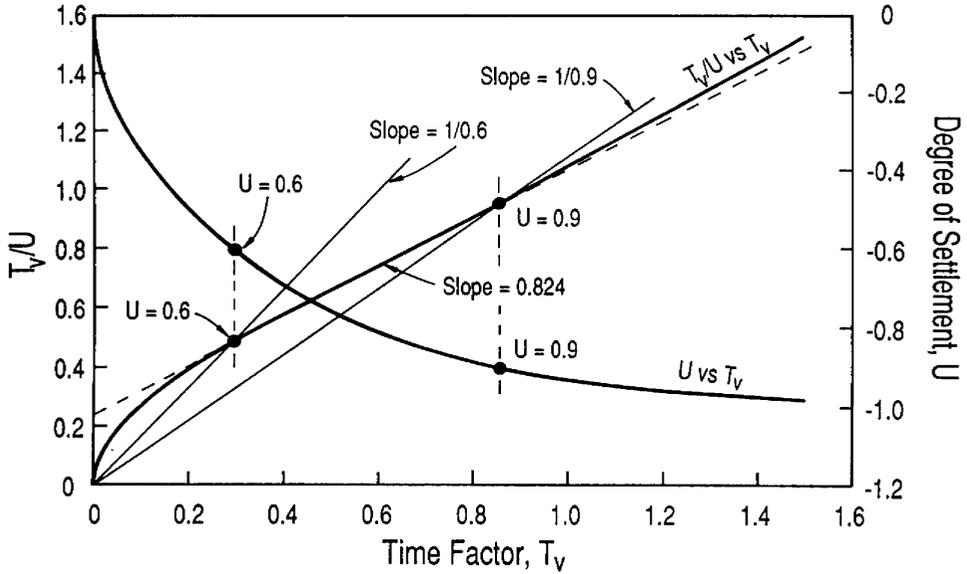


그림 2.21 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 이용하여 나타낸 $T_v \sim \frac{T_v}{U}$ 의 관계
(Tan, S.A., 1995)

그림 2.21의 첫 번째 직선부를 쌍곡선형에서 변형된 직선의 식으로 나타내면 식 (2.36)과 같다.

$$\frac{T_v}{U} = \alpha_1 + \beta_1 T_v \quad (2.36)$$

여기서, α_1, β_1 : 그림 2.21의 직선구간의 기울기와 절편

식 (2.36)을 본래의 쌍곡선형의 식으로 나타내면 식 (2.37)과 같다.

$$U = \frac{T_v}{\alpha_1 + \beta_1 T_v} \quad (2.37)$$

식 (2.37)에서 $\lim_{T_v \rightarrow \infty} U = \frac{1}{\beta_1}$ 이고, 표 2.3에서 $\lim_{T_v \rightarrow \infty} U = 1$ 이므로 $\beta_1 = 1$ 이어야 한다.

그러나, 그림 2.21의 이론적 관계에서 압밀이론곡선을 쌍곡선으로 근사시킬 때의 $U = 0.6 \sim 0.9$ 사이의 직선구간의 기울기 $\beta_1 = 0.824$ 로서 일차압밀 완료 시의 압밀도는

$\lim_{T_v \rightarrow \infty} U = \frac{1}{0.824} \approx 1.21$ 이 되어 약 21%가 과대평가된다. 따라서, 실측침하량으로 구한

최종 일차압밀침하량 식의 $\frac{1}{\beta}$ 에 0.824(또는 β_1)를 곱한 값 $\frac{1}{\beta} \times 0.824$ (또는 $\frac{1}{\beta} \times \beta_1$)이 정확한 최종 일차압밀량이 된다. 물론 이것은 연직배수만에 의한 압밀침하에 관한 경우에 해당한다. 즉 최종압밀침하량은 식 (2.38)과 같이 된다.

$$S_{\infty} = S_0 + \frac{1}{\beta} \times \beta_1 = S_0 + \frac{1}{\beta} \times 0.824 \quad (2.38)$$

원점에서부터 쌍곡선 상의 $U_{0.6}$, $U_{0.9}$ 인 점을 연결한 직선의 기울기는 각각 $\frac{1}{0.6}$, $\frac{1}{0.9}$ 즉, 1.67, 1.11이다. 그림 2.23과 같이 현장에서의 시간과 침하에 대한 관계곡선에 이들 기울기를 갖는 선들을 그어서 만나는 점을 찾으면 각각 압밀도 0.6, 0.9에서의 침하량 $(S_{0.6} - S_0)$ 와 $(S_{0.9} - S_0)$ 을 구할 수 있다. 또한 최종 압밀침하량은 $(\frac{S_{0.6}}{0.6} + S_0)$ 또는 $(\frac{S_{0.9}}{0.9} + S_0)$ 로서 계산될 수 있다.

(2) 연직배수공법이 적용된 압밀이론의 응용

연직배수에 의해 압밀이 가속화된 낮은 투수성 지반의 압밀과정은 Barron의 해(Barron, 1948)에 의해서 나타낼 수 있다. Hansbo(1981)에 의하면 어떤 시각 t 와 어떤 깊이 z 에서의 평균압밀도(연직배수가 없이 수평배수만 있을 때의 압밀도) U_h 에 대해서 smear effect와 well resistance가 없는 이상적인 경우에 대해서 식 (2.39)를 제안하였다.

$$U_h(t) = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (2.39)$$

여기서, T_h : 시간계수로서 $T_h = \frac{c_h t}{D_e^2}$

c_h : 수평방향 압밀계수

D_e : 드레인의 유효경으로 드레인재가 정방형 배치일 때는 1.13D,
정삼각형 배치일 때는 1.05D

D : 드레인 간격

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

n : 드레인 간격비로서 D_e/d_w

d_w : 샌드드레인의 직경이나 다른 드레인의 등가경을 말하며, 한스보
는 폭이 b 이고 두께가 t 인 사각형 횡성 보드드레인재인 경우에

$$d_w = \frac{2(b+t)}{\pi} \text{를 추천했다.}$$

Carrillo(1942)에 의하면 연직배수와 수평배수가 동시에 발생하는 경우의 평균압밀도
(일차압밀의 압밀도)는 식 (2.40)과 같다.

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \quad (2.40)$$

Tan(1995)은 연직방향의 압밀도 U_v 를 나타내는 Terzaghi의 식 (2.39)과 식 (2.40),
식 (2.41)을 사용하여 연직드레인이 설치되어 있을 때의(즉 연직 및 수평배수가 동시에
발휘될 때의) 이론적인 $T_v \sim \frac{T_v}{U}$ 의 관계인 식 (2.42)를 이용하여 시간에 따른 압밀침
하량을 추정하는 방법을 제안했다. 이 식은 T_h 를 제외한 T_v 만에 의한 관계를 정의한
것으로 앞으로 T_h 의 영향을 이 그래프에 포함시키는 문제에 대해 연구할 필요가 있다
고 생각한다.

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} = f(T_v) \quad (2.41)$$

$$\frac{T_v}{U} = \alpha_2 + \beta_2 T_v \quad (2.42)$$

여기서, 이 식의 직선부 형태는 그림 2.21과 유사하나 α_2, β_2 는 α_1, β_1 과 다르므로
첨자 2로서 구별하였다.

또, 실측치에 의한 $t \sim \frac{t}{S_t - S_0}$ 관계에서 구한 직선구간($U = 0.6 \sim 0.9$ 사이의 구간)
의 기울기 β 로부터 최종침하량 S_∞ 를 구하면 식 (2.43)과 같이 된다.

$$S_{\infty} = S_0 + \frac{1}{\beta} \times \beta_2 \quad (2.43)$$

여기서, β_2 를 곱하는 의미는 식 (2.38)과 동일

위와 같이 Tan은 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 충실한 예측식을 제안하였으며 근본적으로 일차압밀에 대한 예측방법이므로 이차압밀에 의한 장기적인 침하 예측은 할 수 없다는 단점이 있다.

(3) 연직배수공법이 적용된 지반의 압밀침하 예측을 위한 쌍곡선법의 적용 순서

- 1) 현장 실측치로써 $t \sim \frac{t}{S_t - S_0}$ 의 관계 그래프를 그린다. 여기서, t 는 재하가 일정하게 된 이후부터의 경과 시간, S_t 는 침하량, S_0 는 재하가 일정하게 될 때까지의 초기침하량을 의미한다.
- 2) 위에서 얻은 관계 그래프의 직선구간을 결정하고 그 기울기 β 를 구한다. 이 기울기는 압밀도가 0.6 ~ 0.9 사이에서 얻은 직선의 기울기가 된다.
- 3) 식 (2.39)에서의 이론적인 β_2 의 값을 구한다. 이 값은 현장 설계값인 n , H/D , c_h/c_v 등에 따라 달라진다.
- 4) 최종 일차압밀침하량은 $\frac{\beta_2}{\beta}$ 가 되며, 시간에 따른 침하량은 $S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t}$ 에서 구해진다. 이 때의 압밀도는 $\frac{S_t - S_0}{\beta_2/\beta}$ 이다.

2.2.6 Monden에 의한 방법

Monden방법은 Barron에 제안한 수직배수재와 관련된 평균압밀도를 구하는 제안식 $U_r = 1 - \exp(-8T_h)/F(n)$ 을 변형하여 수직배수재 설치지역의 침하 예측 모델을 제시

하였다. 여기서, $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$, $T_h = C_h \frac{t}{d_e^2}$

T_h 와 $\ln(1 - U)$ 의 관계가 직선임을 이용하여 정리하면 식 (2.44)와 같다.

$$\ln(1 - U) = \frac{-8T_h}{F(n)} = \frac{-8C_h t}{F(n) d_e^2} \quad (2.44)$$

여기서, $T_h =$ 시간계수

$$n = \frac{d_e}{d_w}$$

$d_e =$ 수직배수재의 등가직경

(사각형 배치 : 1.13d, 삼각형 배치 : 1.05d)

$d =$ 드레인 타설간격

$d_w =$ 드레인 직경

즉, 임의의 시간 t_i 의 압밀도 U_i 를 가정하여 각 측정치(t_i, U_i)를 도시하여 가정된 U_i 가 적절하면 다음 식으로 부터 직선적인 분포를 나타내는 바, 시산법으로 U_i 를 결정하여 식 (2.45)와 같이 최종침하량을 산정할 수 있다.

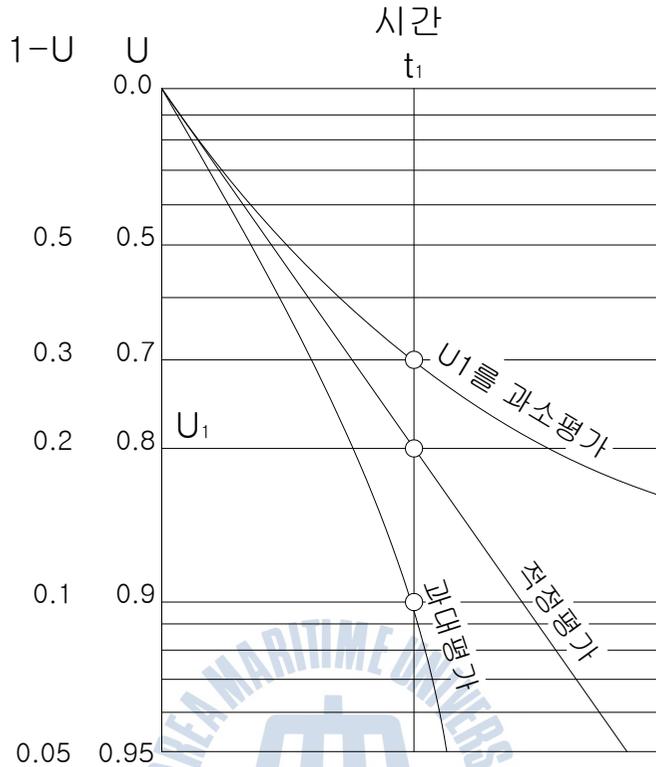


그림 2.22 Monden 방법(Monden, H., 1963)

$$S_{\infty} = \frac{S_i}{U_i} \quad (2.45)$$

여기서, S_{∞} = 최종 침하량

S_i = 임의 시간 t_i 에서의 침하량

U_i = 임의 시간 t_i 에서의 압밀도

2.2.7 Terzaghi(Curve fitting)방법

현장 침하측정 자료를 Terzaghi 압밀이론을 적용하여 압밀 특성계수들을 구하고, 이를 이용하여 최종침하량을 구한다. 이 방법은 재하성토의 경우 일반적으로 설계 시에는 압밀침하(C_c =압축지수) 및 2차 침하(C_a =2차 압축지수)를 고려하여 설계하고 있는데, Preload가 제거되면 지반은 Rebound되고 다시 설계하중이 가해지면 재압축(C_r =

재압축지수)하면서 과압밀토의 특성을 나타나게 된다. 이와 같은 특성으로 인하여 설계 시에 사용되고 있는 허용잔류침하량은 Rebound의 영향이 상당히 크게 작용하고 있기 때문에 설계하중에 대하여 고려해 주는 것이 합리적인 방법이다. 그러나 Hyperbolic, Asaoka, Hoshino방법 등은 Rebound를 고려할 수 있는 방법이 없고, 설계하중에 대한 잔류침하량을 예측할 수 없다.

따라서, 현장 침하 계측곡선을 Terzaghi 압밀 이론에 적용하여 Trial Error법에 의하여 각 하중 단계별 압축지수(C_c)와 압밀속도(C_v)값을 구하고, Rebound도 고려하여 다음식에 의해 임의의 시간에서의 침하량을 계산할 수 있다.

- 정규압밀토의 경우

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

- 과압밀토의 경우

$\sigma_0 + \Delta\sigma < \sigma_c$ 일 때

$$S_f = \frac{C_r}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

$\sigma_0 + \Delta\sigma > \sigma_c$ 일 때

$$S_f = \frac{C_r}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_c}{\sigma_0} + \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_c}$$

(C_c, C_r, C_v : Trial Error법에 의하여 구함)

여기서, S_f = 최종 침하량

C_c = 압축지수

C_r = 재압축지수(과압밀 구간)

e_0 = 초기간극비

σ_0 = 토층중심부에서의 초기 유효 구속압력

σ_c = 선행 압밀하중

$\Delta\sigma$ = 증가된 유효응력

$$S_t = S_f \times U_t$$

(U_t = 배수조건과 T_v 로부터 찾는다)

여기서, $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$

C_v = 압밀계수

t = 경과시간

H = 압밀층 두께

S_t = 임의의 시간에서의 침하량

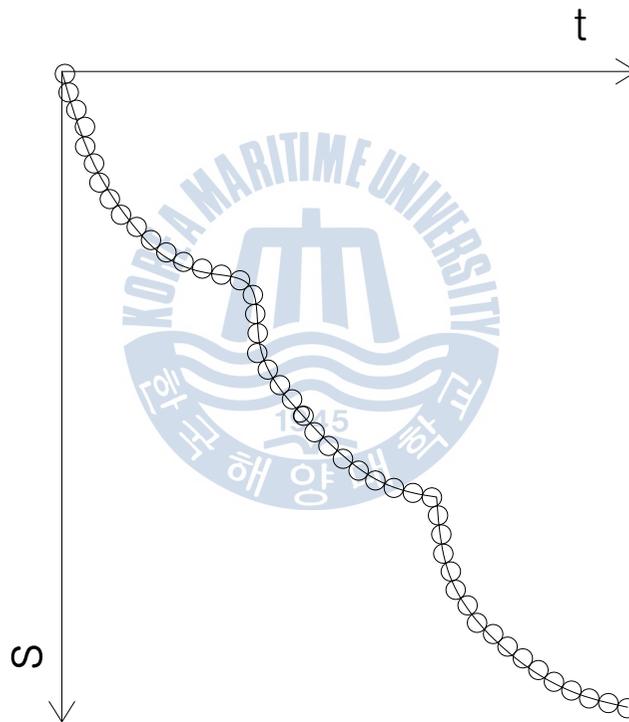


그림 2.23 Terzaghi 방법(Terzaghi, K., 1943)

- ① 간극수압측정으로부터 C_v 를 결정한다.
- ② 실측된 간극수압 자료로부터 구한 C_v 는 시간에 따라 다르므로 통계 처리하여 가장 빈도수가 높은 값을 측정한다.
- ③ 압밀계수를 이용하여 침하 측정자료에 적합한 압축지수와 2차압밀계수를 시행착오법에 의하여 구한다.
- ④ C_v , C_c , C_α 값에 의하여 임의의 시점에서의 침하를 예측한다.
- ⑤ C_v , C_r 의 경험적 관계로부터 C_α 값을 검증한다.
- ⑥ 잔류침하량으로부터 Preload의 제거시기 및 추가성토 여부를 결정한다.

연약지반 개량 시 지반개량효과의 판단에 소요되는 시간은 압밀계수에 의하여 결정된다. 일반적으로 압밀계수는 실내압밀시험에 의하여 구하지만 현장압밀계수보다는 작고, 지반의 이방성으로 인하여 수직보다는 수평압밀계수가 더 크게 나타난다.

Terzaghi 압밀이론에 의한 압밀계수는 본래 과잉간극수압의 소산으로부터 산정하나 침하량 자료로부터 산정되는 압밀계수와 동일한 것으로 가정한다.

- ① 실내시험에 의한 압밀계수
- ② 현장침하자료로부터의 압밀계수

i) 무처리 지역

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t}$$

T_v 를 결정하기 위한 U 의 계산

$$U = \frac{(S_{100} - S_t)}{(S_{100} - S_0)} \quad (\text{단, } S_{100} \text{은 장래 침하량 추정방법으로부터 계산})$$

- Casagrande(1938)와 Taylor(1948)에 의한 $T_v \sim U$ 의 간편식

$$U < 60\% : T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U(\%)}{100} \right)^2, \quad U = 100 \times \sqrt{\frac{4 \times T_v}{\pi}} (\%)$$

$$U > 60\% : T_v = 1.781 - 0.933 \log[100 - U(\%)],$$

$$U = 100 - 10^{\frac{1.781 - T_v}{0.933}} (\%)$$

- Sivaram and Swamee(1977)에 의한 $T_v \sim U$ 의 간편식

$$U = 0 \sim 100\% : \frac{U}{100} = \frac{\left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{0.5}}{\left[1 + \left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{2.81}\right]^{0.179}}$$

ii) 드레인 처리지역

$$C_h = \frac{T_h d_c^2}{t}$$

$$U_{vr} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_r)$$

T_h 를 결정하기 위한 U_r 의 계산

$$U_v = 1 - \Sigma\left(\frac{2}{M^2}\right)\text{Exp}(-M^2 T_v)$$

$$U_r = 1 - \text{Exp}\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right)$$

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

③ 현장간극수압 자료로부터의 압밀계수

Terzaghi 압밀이론에 의하면 과잉간극수압이 소산되는 과정과 압밀침하가 발생하는 과정을 동일하게 간주되기 때문에 압밀기간 중 과잉간극수압의 소산속도와 침하속도는 일치하여야 한다. 그러나 실제현장시험결과에 의하면 지반의 압밀특성이 Terzaghi의 압밀이론과 다르기 때문에 상당한 차이가 나타나고 있다.

$$U = \frac{\Delta u_0 - \Delta u_t}{\Delta u_0}$$

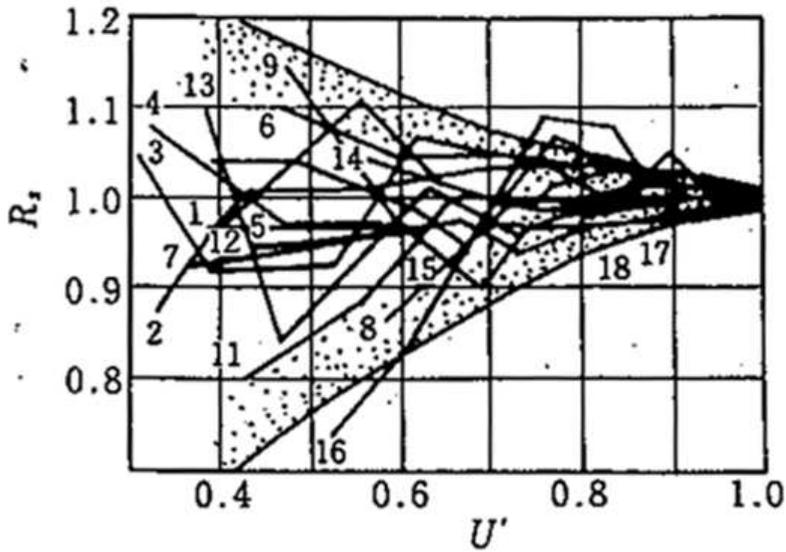
여기서, Δu_0 = 성토직후의 초기과잉간극수압 = 관측자료에서 얻은 최대과잉
간극수압

Δu_t = 임의시간 t에서의 과잉간극수압

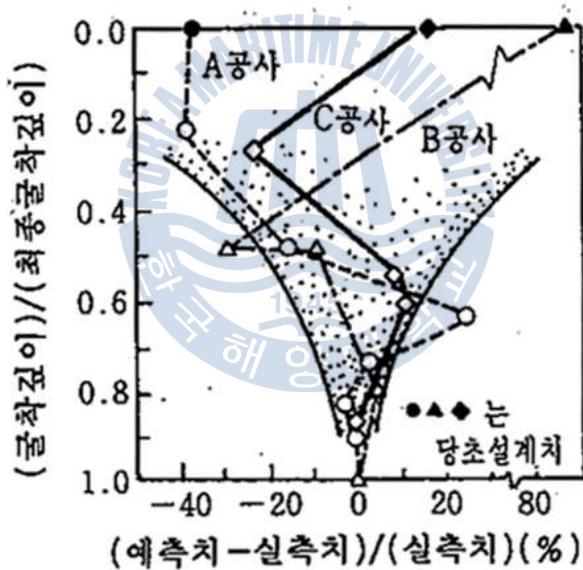
2.3 해석 예측의 정도

해석 예측의 운용계획에서 유의할 사항은 계측결과를 이용한 예측의 정확도이며, 이 정확도는 데이터가 집적됨에 따라 정확도로 개선된다. 그림 2.24는 그 모습을 나타낸 예로, (a)는 성토의 최종 침하량을 Hoshino법을 이용하여 예측한 것이며, (b)는 굴착공사에서 흙막이의 변형을 예측한 것이다. (a)에서 최종 침하량과 예측 침하량의 비가 0.9 ~ 1.1, 즉 $\pm 10\%$ 이내의 정확도로 되는 것은, 압밀도가 70% 정도일 때까지의 관측 데이터가 필요하다는 것을 나타내고 있다. (b)에서도 정확도가 $\pm 10\%$ 이내로 되는 것은 굴착이 70% 정도까지 진행된 후라는 것을 알 수 있다. 현장 계측 데이터에 의한 최종 상황의 예측이 얼마나 정확해 지느냐는, 이와 같이 공사가 70% 정도 진행된 후라고 생각할 수 있으므로 이러한 상황을 고려하여 운용 계획을 세워야 한다.





(a) $U' - R_s$ 관계도



(b) RCC시스템에 의한 예측치와 실측치 추이의 사례

그림 2.24 예측의 시기와 정도(이은수 등, 1998)

제 3 장 최종 압밀침하 결정 요소별 민감도 분석

3.1 민감도 분석의 필요성

대심도 연약지반 성토 현장에서 잔류침하량을 정확히 예측한 사례는 극히 이례적인 경우에 속한다. 앞에서 이미 언급된 것처럼 연약지반 성토현장의 잔류침하량을 예측하는 기법은 여러 가지가 있지만 현재 국내에서는 장래침하량이 다른 방법보다 비교적 크게 예측되는 쌍곡선법을 주로 사용하고 있다. 하지만 이 방법도 2.2 절에 소개한 것처럼 대심도에서는 실측침하량이 예측침하량보다 크게 발생하는 경향이 있다. 이렇듯 연약지반 현장에서 잔류침하량 예측의 정도는 낮다. 이것은 적용된 침하량 예측 방법의 문제이기도 하지만, 침하량 예측에 영향을 미치는 인자의 역할이 더 크다고 볼 수 있다. 그렇지만 예측에 영향을 주는 인자의 민감도에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 잔류침하량 분석에 영향을 주는 인자를 분석하여, 침하량 예측 시 각 인자마다 민감도를 고려하여 적용하고자 한다.

연약지반 성토현장에서는 목표침하량 도달 후 재하토를 제거하여 후속 공정을 진행하기 때문에 장기적으로 침하관리를 실시하는 사례는 거의 없고, 장래예측기법에 의해 예상된 최종예상침하량의 정확도를 확인할 수 있는 현장 사례를 찾아 비교, 분석하기는 곤란한 상황이다. 본 연구에서는 하중의 변화 없이 비교적 장기간(2002.11.26 ~ 2005.5.26) 계측을 실시한 ○○방과제 축조공사 현장의 사례를 참조하여 현장에서 적용한 장래침하량 예측기법으로 장래침하량을 예상하고, 일정 압밀도 구간의 자료를 이용하여 정밀도를 분석하였으며, 이를 본 연구 내용과 비교 분석하고자 한다.

잔류침하량 분석에 영향을 주는 인자에는 다음과 같다.

- 계측자료의 압밀도
- 압밀계수 및 압축지수
- 계측자료의 오차 및 수량
- 계측자료의 수집기간
- 성토완료 초기 전단침하의 영향

3.2 검토단면 산정 및 민감도 분석 방법

연약지반의 압밀특성에 따른 예측침하량을 검토하기 위한 조건은 표 3.1, 그림 3.1과 같다. 검토단면에 대하여 식 2.39(Hansbo(1981))를 이용하여 이론침하량 및 이론침하곡선을 표 3.2, 그림 3.2와 같이 산정하였다.

표 3.1 검토단면에 적용된 토질 정수

구분	적용 값	비고
점토층 두께(H)	28.0m	
초기간극비(e_0)	1.54	
점토 단위중량(γ_t)	1.65 tf/m ³	
성토체 단위중량(γ_t)	1.80 tf/m ³	
압축지수(C_c)	0.3 ~ 1.0	
압밀계수(C_v)	$1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$ cm ² /sec	
드레인 간격	1m × 1m	정방형
s	1.5	스미어존 직경/케이싱 직경
kh/ks	3	수평투수계수/수직투수계수
드레인 직경(d_w)	0.05m	
성토기간	30일	점증재하

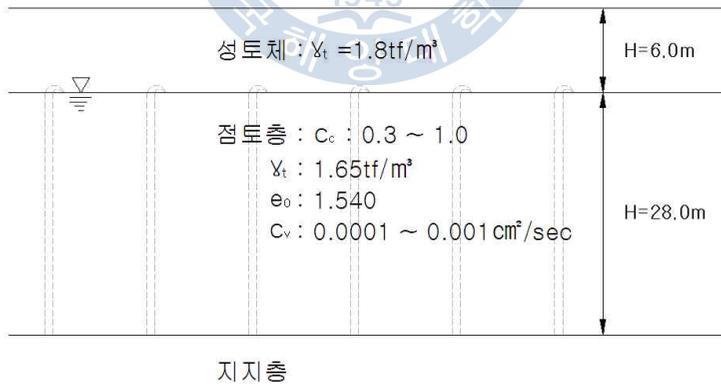


그림 3.1 검토단면

표 3.2 검토단면 침하량 산정(C_c 0.3, C_v 0.0003 cm²/sec 적용)

기간 (day)	$n(d_e/d_w)$	F(n)	시간계수 (T_v)	압밀도 (U)	총 침하량 S_f (cm)	침하량 S_t (cm)
0	22.56	3.18	0.000	0.000	112	0.0
5	22.56	3.18	0.015	0.038	112	4.2
10	22.56	3.18	0.031	0.074	112	8.3
15	22.56	3.18	0.046	0.109	112	12.2
20	22.56	3.18	0.061	0.142	112	15.9
25	22.56	3.18	0.076	0.175	112	19.6
30	22.56	3.18	0.092	0.206	112	23.0
40	22.56	3.18	0.153	0.319	112	35.7
50	22.56	3.18	0.214	0.416	112	46.6
60	22.56	3.18	0.275	0.499	112	55.9
70	22.56	3.18	0.336	0.570	112	63.9
80	22.56	3.18	0.397	0.631	112	70.7
90	22.56	3.18	0.458	0.684	112	76.6
100	22.56	3.18	0.519	0.729	112	81.6
110	22.56	3.18	0.581	0.767	112	85.9
120	22.56	3.18	0.642	0.800	112	89.7
130	22.56	3.18	0.703	0.829	112	92.8
140	22.56	3.18	0.764	0.853	112	95.6
150	22.56	3.18	0.825	0.874	112	97.9
200	22.56	3.18	1.131	0.942	112	105.5
250	22.56	3.18	1.436	0.973	112	109.0
300	22.56	3.18	1.742	0.987	112	110.6
350	22.56	3.18	2.047	0.994	112	111.3
400	22.56	3.18	2.353	0.997	112	111.7
450	22.56	3.18	2.658	0.999	112	111.9
500	22.56	3.18	2.964	0.999	112	111.9
600	22.56	3.18	3.575	1.000	112	112.0
700	22.56	3.18	4.186	1.000	112	112.0
800	22.56	3.18	4.797	1.000	112	112.0
900	22.56	3.18	5.409	1.000	112	112.0
1000	22.56	3.18	6.020	1.000	112	112.0

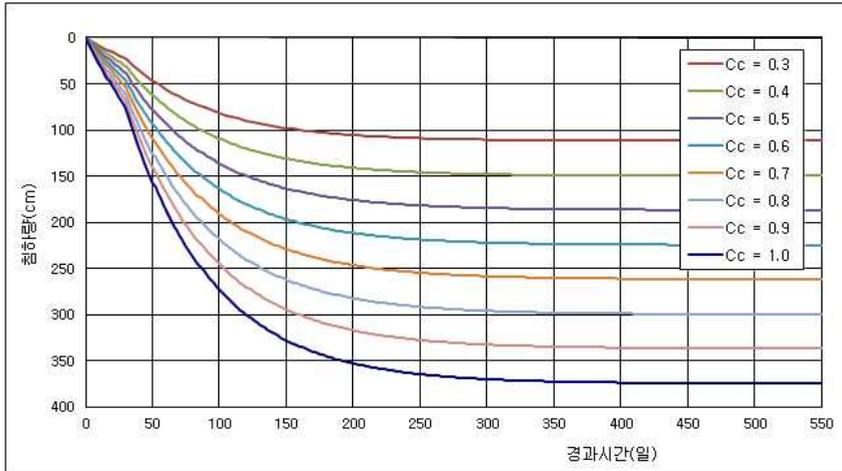


그림 3.2 검토단면의 시간-침하 곡선(C_c 0.3 ~ 1.0, C_v 0.0003 cm²/sec 적용)

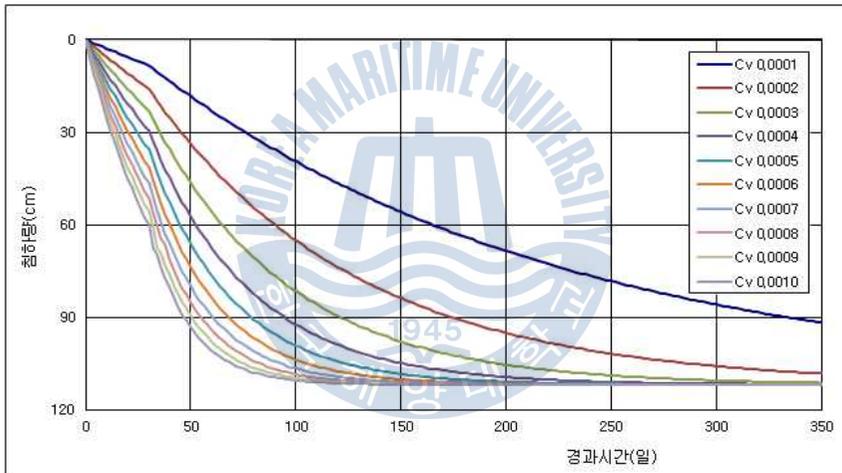


그림 3.3 검토단면의 시간-침하 곡선(C_v 0.0001 ~ 0.0010, C_c 0.3 cm²/sec 적용)

본 연구에서의 민감도 분석 방법은 표 3.2, 그림 3.2, 그림 3.3에서 구해진 이론 침하자료를 이용하여 일정 압밀도 구간(30 ~ 90%) 자료 적용 시, 압밀계수의 변환 시, 압축지수의 변환 시, 예측자료의 오차 발생 시 등을 주요 인자로 보고, 최종침하량을 산정하여 이론 침하량과 비교하여 민감도를 분석하였다. 예측침하량 산정방법은 쌍곡선법을 적용하였다.

3.3 민감도 분석

3.3.1 압밀도에 따른 침하 예측 정도 분석

표 3.2에서 이론침하자료(C_c 0.3, C_v 0.0003 cm^2/sec 적용)에 대하여 일정 압밀도 범위의 data를 적용하여 쌍곡선법으로 침하 예측 정도를 분석한 결과, 침하분석에 사용된 자료의 양이 많을수록 정도가 높아지는 것으로 나타났다(표 3.3, 그림 3.5 ~ 그림 3.9). 또한, 압밀도가 높은 자료를 이용할수록 정도가 높아지는 것으로 나타나, 단순히 많은 자료를 사용하여 분석하는 것보다 후반부 일정구간 자료를 사용하여 분석하는 것이 정도가 높은 것으로 나타났다(표 3.3, 그림 3.10 ~ 그림 3.11).

표 3.3 압밀도에 따른 침하 예측 정밀도 분석결과

구 분	침하분석에 사용된 침하량의 압밀도 범위(%)	예측최종침하량 (cm)	정밀도 (%)	비 고
1	30 ~ 40	189.9	59.0	CASE1
2	30 ~ 50	185.2	60.5	
3	30 ~ 60	180.2	62.2	
4	30 ~ 70	174.2	64.3	
5	30 ~ 80	166.0	67.5	
6	30 ~ 90	155.5	72.0	
7	40 ~ 50	181.6	61.7	CASE2
8	40 ~ 60	176.8	63.4	
9	40 ~ 70	171.1	65.5	
10	40 ~ 80	163.3	68.6	
11	40 ~ 90	153.2	73.1	
12	50 ~ 60	172.9	64.8	CASE3
13	50 ~ 70	167.5	66.8	
14	50 ~ 80	160.2	69.9	
15	50 ~ 90	150.7	74.3	
16	60 ~ 70	163.7	68.4	CASE4
17	60 ~ 80	156.8	71.4	
18	60 ~ 90	147.9	75.7	
19	70 ~ 80	152.3	73.5	CASE5
20	70 ~ 90	144.2	77.7	
21	30 ~ 40	189.9	59.0	CASE6
22	40 ~ 50	181.6	61.7	
23	50 ~ 60	172.9	64.8	
24	60 ~ 70	163.7	68.4	
25	70 ~ 80	152.3	73.5	
26	80 ~ 90	140.0	80.0	

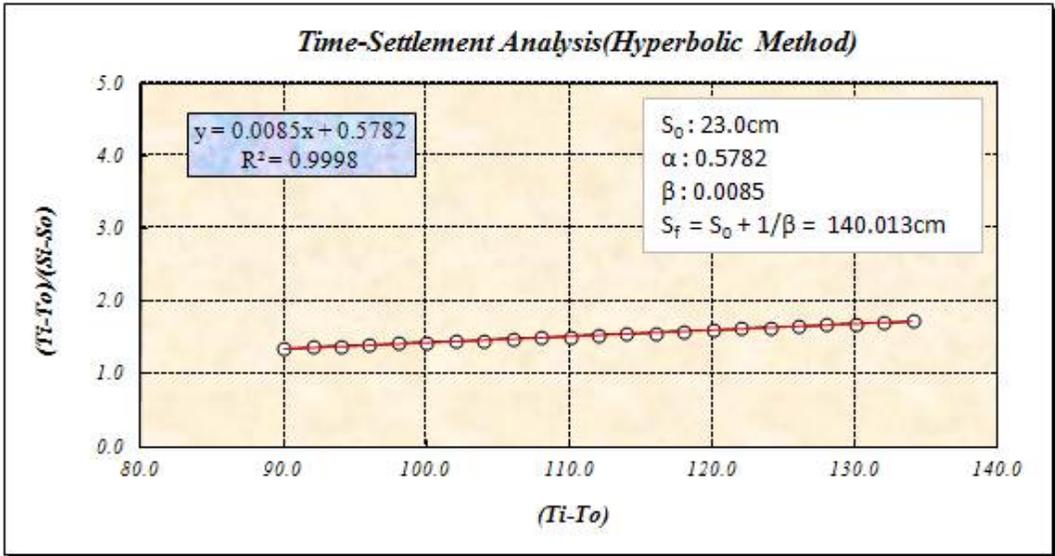


그림 3.4 이론침하자료 중 압밀도 80 ~ 90% 자료 적용시 쌍곡선법에 의한 예측 최종침하량

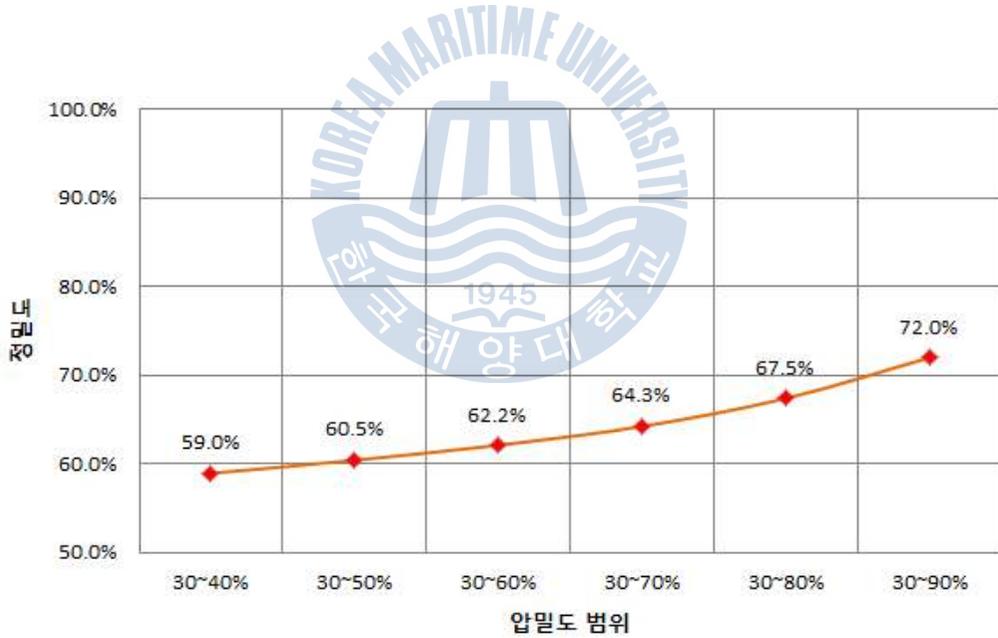


그림 3.5 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE1)

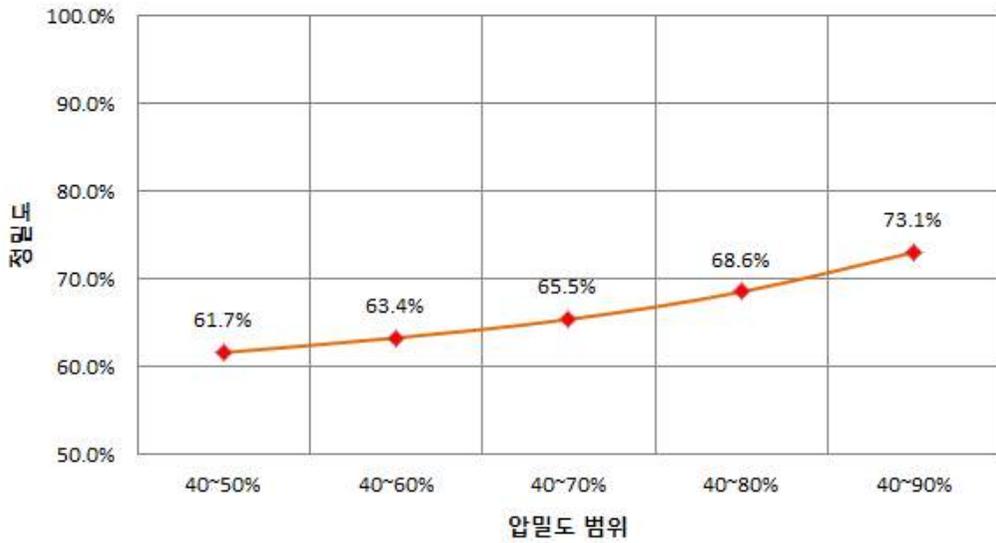


그림 3.6 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE2)

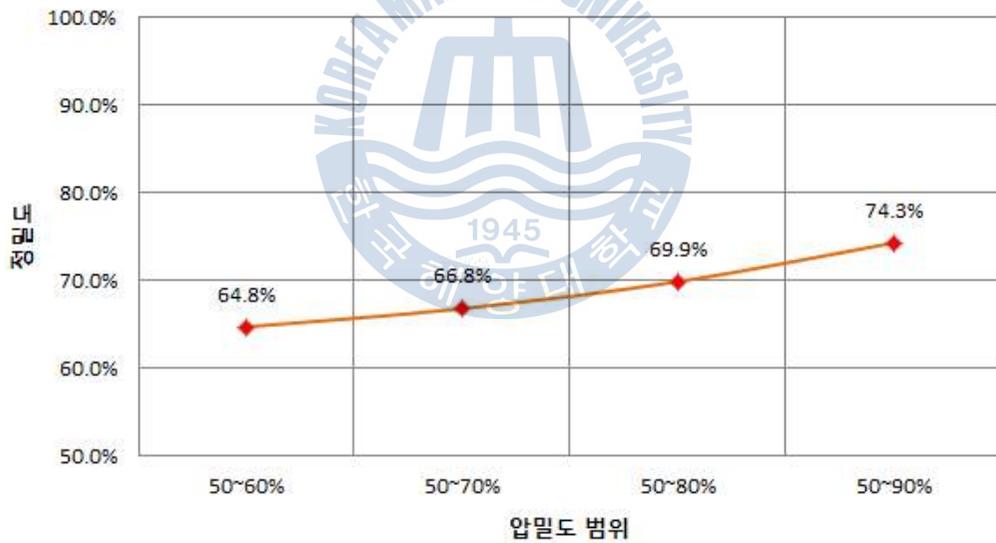


그림 3.7 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE3)

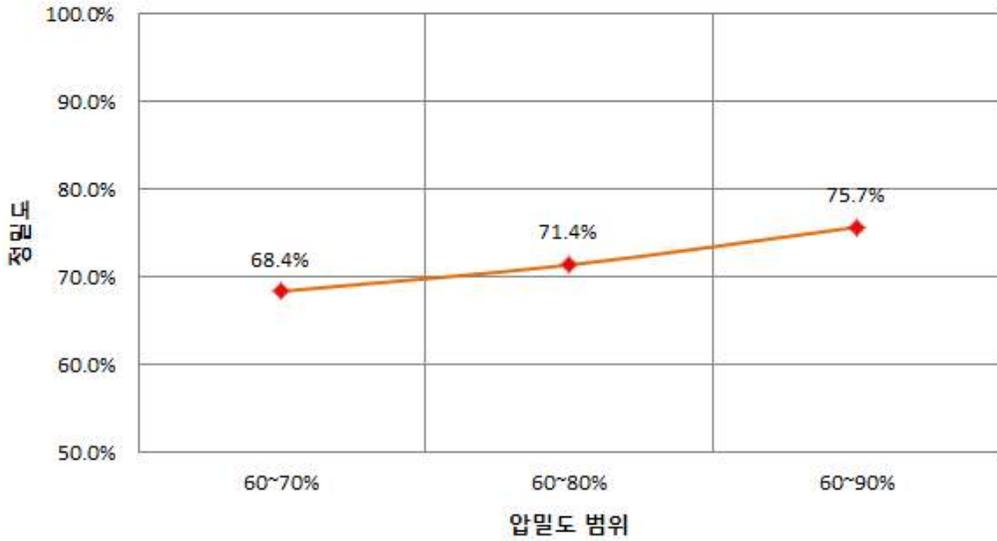


그림 3.8 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE4)

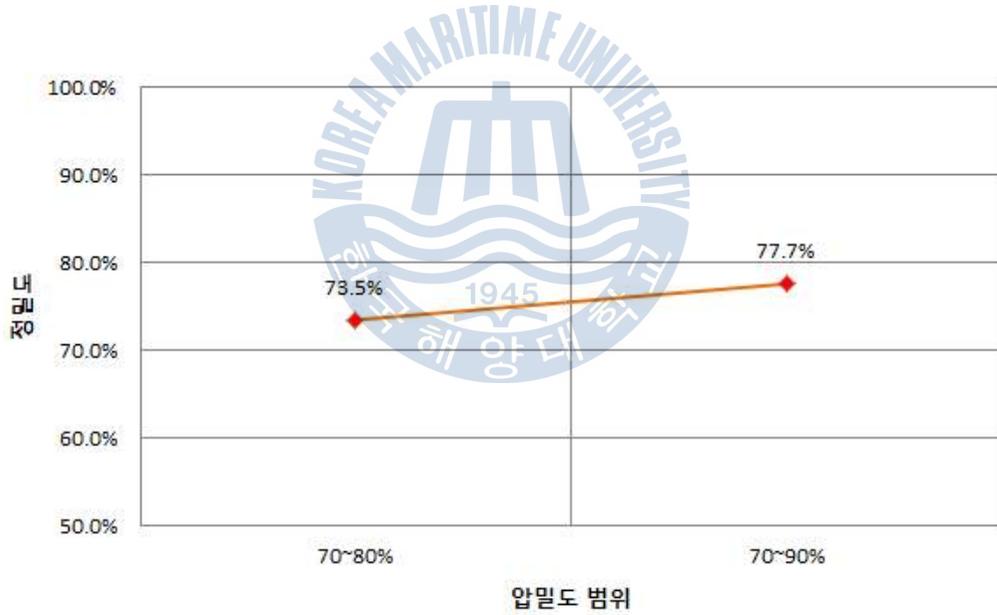


그림 3.9 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE5)

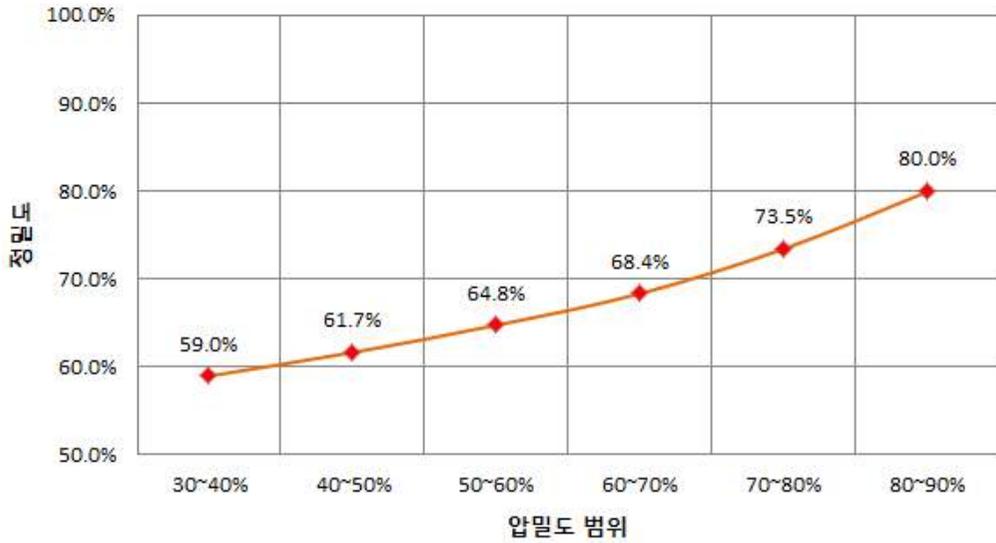


그림 3.10 압밀도 범위에 따른 정밀도(CASE6)

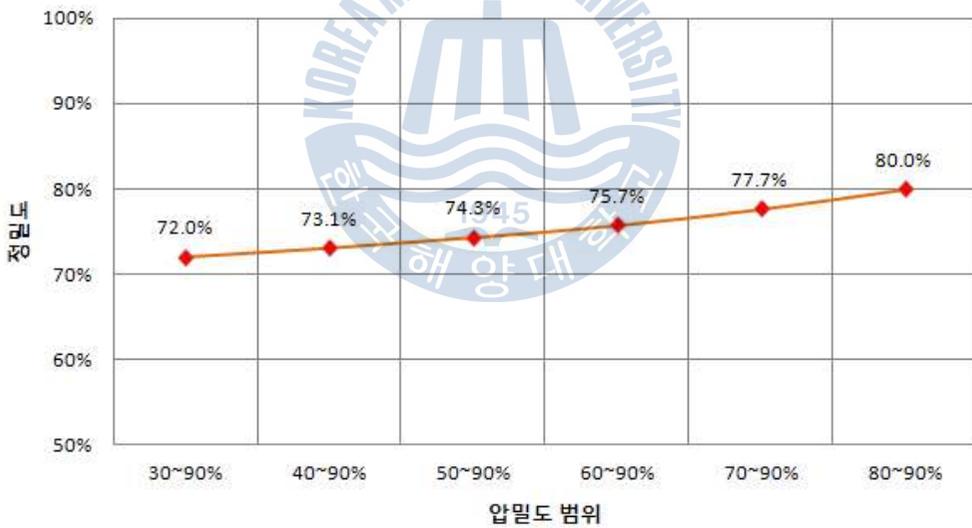


그림 3.11 압밀도 평가 자료의 양에 따른 정밀도

표 3.4 침하 예측에 사용된 자료의 양에 따른 오차율(○○방파제 축조공사 현장)

침하판 No.	실측 침하량 (m) (07.03.27)	침하 예측에 사용된 자료의 양							
		초기자료 사용 (02.11.26 ~ 04.5.26)		초기~중반부 자료 사용 (02.11.26 ~ 04.11.25)		초기~후반부 자료 사용 (02.11.26 ~ 05.5.26)		후반부 일정 자료 사용 (04.11.25 ~ 05.5.26)	
		예측 침하량 (m)	오차율 (%)	예측 침하량 (m)	오차율 (%)	예측 침하량 (m)	오차율 (%)	예측 침하량 (m)	오차율 (%)
ASP-1	1.741	1.689	3.0	1.697	2.5	1.691	2.9	1.797	3.2
ASP-2	2.366	2.258	4.6	2.312	2.3	2.362	0.2	2.327	1.6
ASP-3	2.457	2.304	6.2	2.344	4.6	2.373	3.4	2.528	2.9
ASP-4	2.407	2.296	4.6	2.327	3.3	2.347	2.5	2.467	2.5
ASP-5	3.107	3.026	2.6	3.028	2.5	3.044	2.0	3.138	1.0
ASP-6	2.32	2.317	0.1	2.316	0.2	2.317	0.1	2.347	1.2
BSP-1	2.019	1.987	1.6	1.937	4.1	1.971	2.4	2.070	2.5
BSP-3	1.359	1.21	11.0	1.225	9.9	1.253	7.8	1.396	2.7
BSP-4	1.434	1.201	16.2	1.253	12.6	1.303	9.1	1.476	2.9
BSP-6	2.423	2.27	6.3	2.277	6.0	2.309	4.7	2.453	1.2
BSP-7	2.321	2.215	4.6	2.206	5.0	2.228	4.0	2.356	1.5
평균			5.5		4.8		3.6		2.1

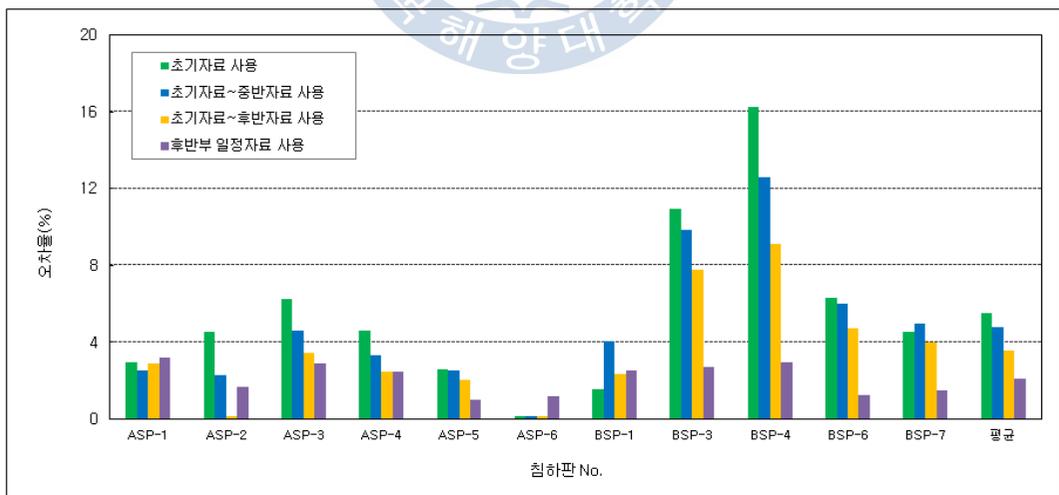


그림 3.12 침하 예측에 사용된 자료의 양에 따른 오차율

○○방과제 실측 최종 계측자료(2007.3.29)를 기준으로 하여 상치 콘크리트 타설 완료(2002.11.26)후 초기자료(2002.11.26 ~ 2004.5.26)를 적용하여 최종 계측자료를 추정 한 결과, 초기자료부터 중반부 자료(2002.11.26 ~ 2004.11.25)까지 적용하여 최종 계측자료를 추정한 결과, 초기자료부터 후반부 자료(2002.11.26 ~ 2005.5.26)까지 적용하여 최종 계측자료를 추정한 결과, 후반부 일정자료(2004.11.25 ~ 2005.5.26)를 적용하여 최종 계측자료를 추정한 결과를 비교해 본 결과, 후반부 일정자료를 적용하여 분석하는 것이 가장 낮은 오차율을 보였으며, 분석 정도가 높은 것으로 나타났다(표 3.4, 그림 3.12). 이와 같은 결과는 본 연구와 일치하는 경향이다.

3.3.2 침하속도에 따른 침하 예측 정도 분석

침하속도 차이에 따른 침하 예측 정도를 분석하기 위해서 압축지수를 0.3으로 고정 하고, 압밀계수를 0.001 ~ 0.010cm²/sec 까지 변화시켜 이론침하량을 산정하였다. 산정된 이론침하량에서 압밀도 범위 60 ~ 90%에 해당하는 data를 적용하여 쌍곡선법으로 침하 예측 정도를 분석한 결과, 압밀계수가 높아질수록 예측결과의 정도는 높아지는 것으로 나타났다(표 3.5, 그림 3.13).

표 3.5 압밀계수 변화에 따른 침하 예측 정밀도 분석결과

구분	압밀계수 (C _v , cm ² /sec)	예측최종침하량 (cm)	정밀도 (%)
1	0.001	149.3	75.0
2	0.002	148.5	75.4
3	0.003	147.5	75.9
4	0.004	146.5	76.5
5	0.005	145.8	76.8
6	0.006	144.9	77.3
7	0.007	144.1	77.7
8	0.008	143.1	78.3
9	0.009	142.5	78.6
10	0.010	142.0	78.9

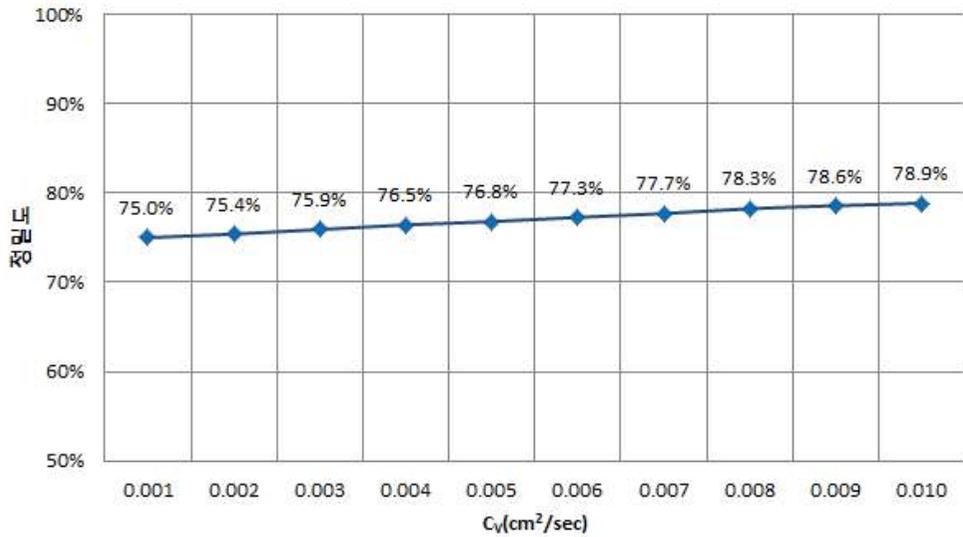


그림 3.13 압밀계수 변화에 따른 정밀도

3.3.3 침하크기에 따른 침하 예측 정도 분석

침하크기 차이에 따른 침하 예측 정도를 분석하기 위해서 압밀계수를 $0.003\text{cm}^2/\text{sec}$ 으로 고정하고, 압축지수를 0.3 ~ 1.0 까지 변화시켜 이론침하량을 산정하였다. 산정된 이론침하량에서 압밀도 범위 60 ~ 90%에 해당하는 data를 적용하여 쌍곡선법으로 침하 예측 정도를 분석한 결과, 압축지수의 크기는 침하 예측의 정도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(표 3.6, 그림 3.14).

표 3.6 압축지수 변화에 따른 침하 예측 정밀도 분석결과

구분	압축지수 (C _c)	이론최종침하량 (cm)	예측최종침하량 (cm)	정밀도(%)
1	0.3	112	147.5	75.9
2	0.4	150	197.6	75.9
3	0.5	187	246.3	75.9
4	0.6	225	296.4	75.9
5	0.7	262	345.1	75.9
6	0.8	300	395.1	75.9
7	0.9	337	443.9	75.9
8	1.0	375	493.9	75.9

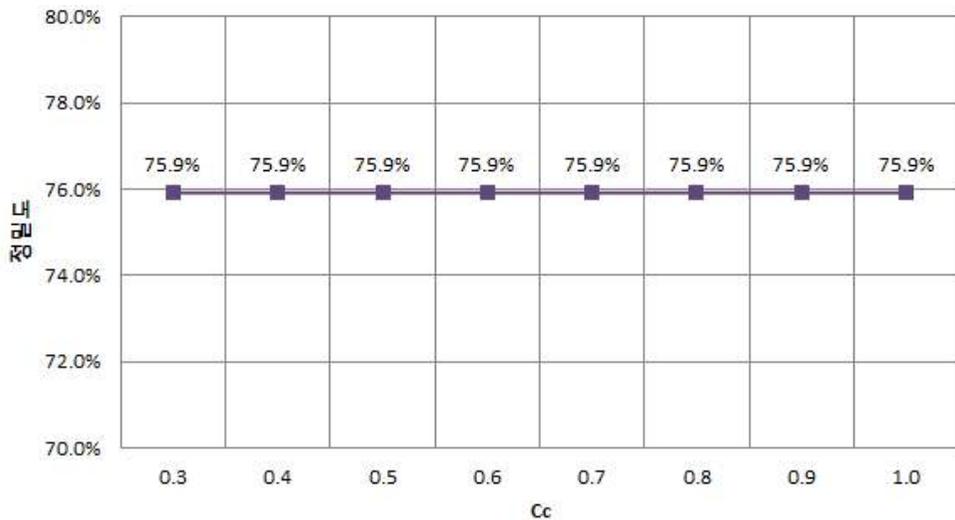


그림 3.14 압축지수 변화에 따른 정밀도

3.3.4 침하 측정 오차 및 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측 정도 분석

침하 측정 오차에 따른 침하 예측 정도를 분석하기 위해서 압축지수를 0.3, 압밀계수를 $0.003\text{cm}^2/\text{sec}$ 으로 각각 고정하고 이론침하량을 산정하였다. 산정된 이론침하량에서 오차를 0.0 ~ 5.0cm 까지 임의로 발생시키고, 압밀도 범위 60 ~ 90%에 해당하는 data를 적용하여 쌍곡선법으로 침하 예측을 30회 실시하여 평균한 결과, 침하 측정 오차가 커질수록 예측침하량의 정도는 낮아지는 것으로 나타났다(표 3.7, 그림 3.15). 또한 동일한 조건으로 압밀도 범위 60 ~ 90%에 해당하는 data의 양을 4 ~ 66개까지 조절하여 분석한 결과, 침하 예측 자료의 양이 작을수록 정도는 낮아지는 것으로 나타났다(표 3.8 ~ 3.9. 그림 3.16 ~ 3.17).

표 3.7 측정오차에 따른 침하 예측 범위의 폭 및 표준편차(침하자료 20개 적용시)

구분	오차범위 (cm)	예측 최종침하량 범위(cm)	침하 예측 범위의 폭(cm)	평균 최종침하량 (cm)	표준편차 (cm)
1	0.0 ~ 0.5	145.233 ~ 150.274	5.041	147.263	1.147
2	0.0 ~ 1.0	144.216 ~ 153.112	8.896	147.761	2.137
3	0.0 ~ 1.5	139.798 ~ 152.069	12.271	147.114	3.299
4	0.0 ~ 2.0	137.427 ~ 155.456	18.029	147.195	4.810
5	0.0 ~ 3.0	135.695 ~ 161.828	26.133	147.344	7.279
6	0.0 ~ 4.0	133.769 ~ 172.012	38.243	150.316	10.103
7	0.0 ~ 5.0	130.210 ~ 181.637	51.427	148.926	12.150

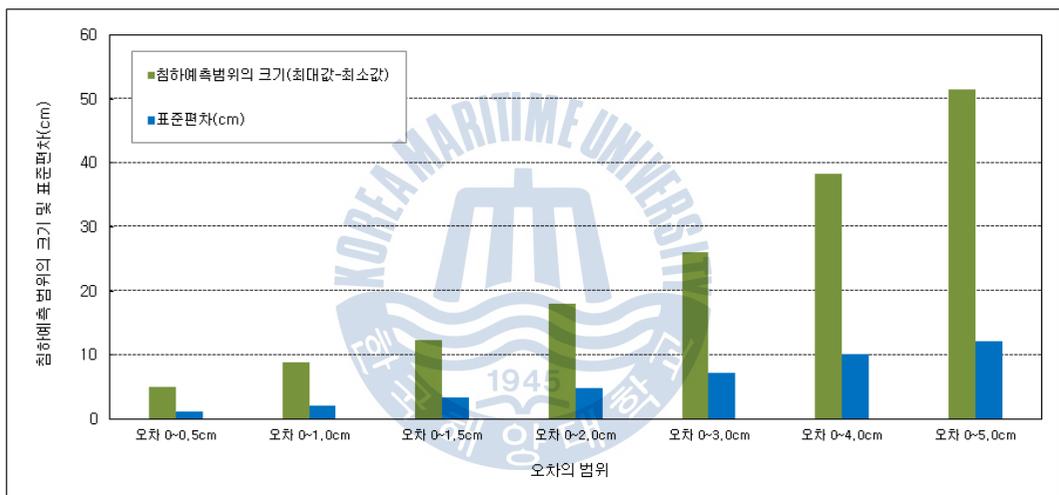


그림 3.15 오차범위에 따른 침하 예측 범위의 폭 및 표준편차

표 3.8 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측 범위의 폭

(단위:cm)

자료의 양	오차의 범위						
	0~0.5	0~1.0	0~1.5	0~2.0	0~3.0	0~4.0	0~5.0
자료 4개	15.2	33.7	46.2	67.9	72.7	117.1	183.8
자료 7개	10.7	13.8	24.3	37.8	61.4	77.7	88.7
자료 10개	6.9	12.7	21.0	24.5	38.0	56.9	60.9
자료 13개	5.0	10.9	17.1	24.8	33.1	50.0	51.5
자료 17개	4.7	9.8	14.6	17.8	37.6	45.8	49.1
자료 23개	4.4	8.4	11.1	18.4	24.3	34.3	46.0
자료 34개	2.9	7.1	10.2	14.1	19.4	31.1	33.1
자료 46개	2.9	6.3	10.7	12.4	14.0	18.9	28.2
자료 55개	3.0	6.0	10.1	10.6	15.2	18.1	27.8
자료 63개	2.4	4.6	5.9	8.0	18.4	21.8	26.7

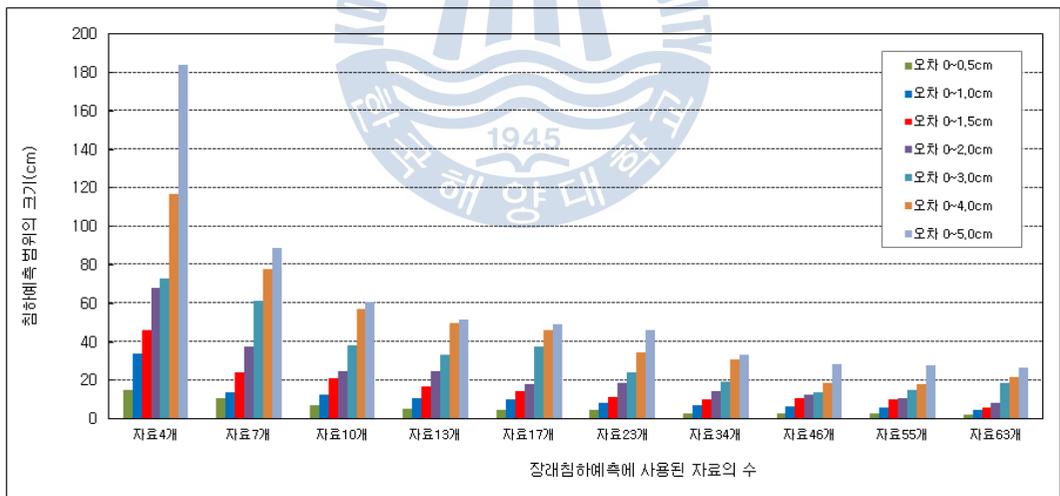


그림 3.16 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측범위(최대값-최소값)의 폭

표 3.9 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측의 표준편차 (단위:cm)

자료의 양	오차의 범위						
	0~0.5	0~1.0	0~1.5	0~2.0	0~3.0	0~4.0	0~5.0
자료 4개	3.8	8.3	11.7	17.2	17.3	29.0	45.9
자료 7개	2.6	3.9	6.8	10.9	15.2	21.0	24.2
자료 10개	1.7	3.2	5.5	6.6	10.1	12.4	16.2
자료 13개	1.3	2.5	4.0	5.5	8.4	10.9	11.9
자료 17개	1.1	2.3	3.5	4.6	7.2	10.9	13.8
자료 23개	1.0	2.4	2.9	4.2	6.0	7.1	11.4
자료 34개	0.6	1.8	2.6	3.4	4.9	7.7	7.4
자료 46개	0.6	1.6	2.3	3.0	3.6	4.2	6.7
자료 55개	0.8	1.4	2.0	2.7	3.9	4.5	6.6
자료 63개	0.7	1.2	1.6	2.3	4.5	4.7	6.9

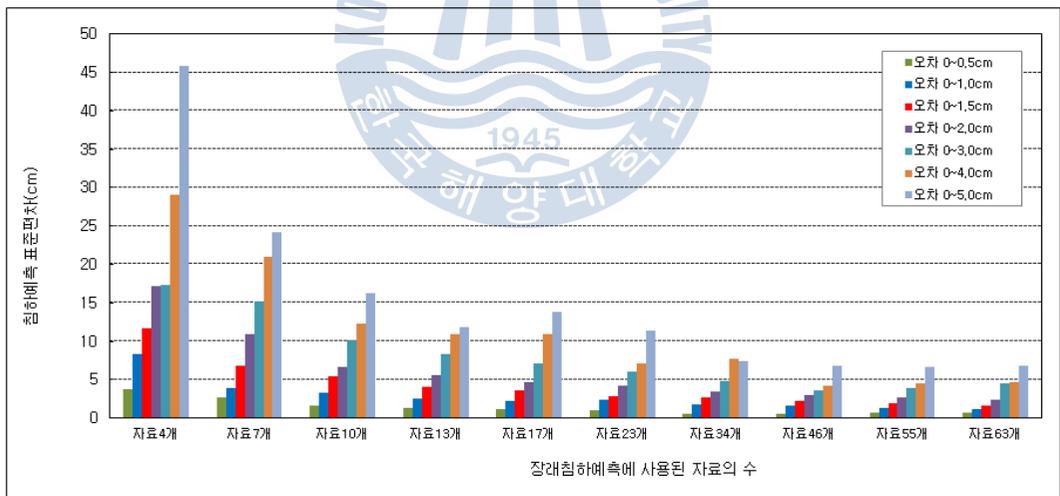


그림 3.17 침하 예측 자료의 양에 따른 침하 예측의 표준편차 그림

제 4 장 결 론

연약지반 성토 시 현장 계측을 통한 장래침하 예측에 영향을 미치는 인자에 대하여, 이론 및 실측침하량을 이용하여 민감도를 분석하였다.

- (1) 이론침하량에 대하여 압밀도 30 ~ 90% 범위의 자료를 활용하여 최종침하량을 예측한 결과, 압밀도 30 ~ 90% 범위의 자료를 이용한 경우 이론 최종침하량의 72%의 정도의 정밀도를 보였고, 압밀도 40 ~ 90% 범위의 자료를 이용한 경우 이론 최종침하량의 73.1%, 압밀도 50 ~ 90% 범위의 자료를 이용한 경우 이론 최종침하량의 74.3%, 압밀도 60 ~ 90% 범위의 자료를 이용한 경우 75.7%, 압밀도 70 ~ 90% 범위의 자료를 이용한 경우 77.7%, 압밀도 80 ~ 90% 범위의 자료를 이용한 경우 이론 최종침하량의 80.0%의 정밀도를 보였다. 따라서 단순히 많은 자료를 사용하여 분석하는 것보다 후반부 일정구간 자료를 사용하여 분석하는 것이 정도가 높은 것으로 나타났다. 이는 현장 계측결과 분석에서도 유사한 경향을 보였다. 그러므로 성토종료 후 전 침하자료를 분석하는 것보다, 최종 침하자료에서 직선성이 양호한 일부구간의 자료를 사용하여 분석하는 것이, 정밀도를 높일 수 있는 방안으로 판단된다.
- (2) 침하속도 크기에 따른 예측결과의 정도를 분석한 결과, 침하속도 관련 주인자인 압밀계수에 따라서는 예측 정도가 달라지는 것으로 분석되었지만, 침하크기 관련 주인자인 압축지수는 예측 정도에 거의 영향을 주지 않았다. 이와 같이 침하속도에 따라 분석 정도가 달라지므로 현장 침하 예측 시 침하크기보다는 침하속도가 유사한 현장 분석사례를 참고하여 분석하는 것이 정밀도가 높을 것으로 판단된다.
- (3) 침하량 측정 시 발생하는 계측오차가 예측결과의 정도에 미치는 영향을 분석한 결과 오차가 1.5cm 이상일 경우 예측침하량의 정밀도가 너무 낮아 신뢰할 수 없었다. 따라서 매 계측시마다 결함 및 폐합측량을 통하여 오차분석을 실시하여야 한다. 또 1.5cm 오차가 발생한 경우도 분석자료가 약 20회 미만인 경우 예측 최대오차에 대한 정도가 낮아 신뢰할 수 없으므로 계측 분석 시 최소 20회 이상의 자료를 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이은수, 남순성, 이승호(1998), "토목건축 현장계측계획", 탐구문화사, pp.76~77.
2. 임종철(2010a), "토목공학의 길잡이", 도서출판 새론, pp.196.
3. 임종철(2010b), "토목공학의 길잡이", 도서출판 새론, pp.197.
4. 임종철(2010c), "토목공학의 길잡이", 도서출판 새론, pp.234~237.
5. 임종철(2010d), "토목공학의 길잡이", 도서출판 새론, pp.236~238.
6. 박병기, 장용채, 이강일(1995), "연약지반에서의 토질공학", 도서출판 새론, pp.176~181.
7. Tan, S.A.(1970), "An empirical method of estimating secondary and total settlement", Proceedings of 4th ACSMFE, Bangkok, Vol. 2, pp.147~151.
8. 瀬在 武(1986), "壓密沈下における雙曲線法," 土と基礎, Vol.34, No.6, pp.89-90.
9. 星埜 和(1962), 最近における基礎の諸問題, 土木學會誌, Vol.47, No.7, pp.63~67.
10. Asaoka, A.(1978), "Observational Procedure of Settlement Prediction, Soils and Foundations," Vol.18, No.4, pp.87~101.
11. 竹嶋 正勝(1979), "軟弱地盤盛土における長期沈下に關する二, 三の知見," 土と基礎, Vol.27, No.3, pp.37~44.
12. Tan, S.A. (1995), "Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains," Soils and Foundations, Vol.35, No.1, pp.101-113.
13. Monden, H.,(1963) "A new Time-fitting Method for the settlement Analysis of Foundation on Soft Clays", Memoir Faculty of Engrg. Hiroshima Univ., 2-1, 21, pp.21~29, quoted by 藤田圭一(1995), 軟弱地盤對策工法 總技術 東和技術, pp.389~390.
14. Terzaghi, K.,(1943) "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, pp.286~289.

감사의 글

우선 본 논문을 완성하기까지 많은 도움과 지도 조언을 해주신 모든 분들께 짧은 글이나마 지면을 통해서 감사의 마음을 전하고자 합니다.

대학원에 입학할 때가 엇그제 같은데 벌써 2년이 흘러 졸업을 앞두고 이 글을 적으니, 만감이 교차하는 듯 합니다.

오늘의 결과가 있기까지 논문의 시작에서부터 완성에 이르기까지 학문적으로 세심한 지도를 해주시고, 대학원 생활동안 진정한 공학도로서의 정신과 인격적으로 많은 가르침을 주신 서영교 교수님, 경갑수 교수님, 김도삼 교수님, 김태곤 교수님, 이중우 교수님, 박이근 박사님께 감사를 드리고, 부족한 저를 끝까지 이끌어주신 우리 지도교수님, 김태형 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 앞으로의 사회생활에 있어서도 교수님의 가르침을 실천하고 항상 배움에 임하는 자세로 거듭나도록 노력하겠습니다.

또한, 사회생활을 하면서 학업에 열중 할 수 있게 배려 해주신 박정호 사장님, 장지건 상무님, 허성훈 차장 및 (주)광림엔지니어링건설 직원들 모두에게 감사의 마음을 전합니다.

그리고 나이 많은 대학원 후배라, 불평도 없이 자신의 일인양 도와준 연구실 옹기, 영준이, 성규, 민아 등에게도 감사한 마음을 전하고 강성현 선배님, 최명호 선배님께도 감사의 말씀을 올립니다.

새로운 시작을 꿈꾸며 시작했던 대학원 생활도 벌써 마무리를 할 시간이 되어 버렸지만 이곳에서의 받은 가르침 및 추억은 영원히 기억되리라 생각이 됩니다.

끝으로 옆에서 자식만을 바라보시며 한결같은 관심과 사랑으로 보살피 주신 아버님, 어머님 은혜에 깊은 감사를 드리며, 저를 아끼시고 사랑해주시는 모든 사람들을 위하여 끊임없이 노력하며 살아가도록 하겠습니다.

2011 년 12 월

강 승 찬