



압밀이론에서 2차 압축 적용 시점에 관한 연구

A Study on the Beginning Point of Secondary Compression in Consolidation Theory

권병해^a · 임성훈^{b,†}

Kwon, Byenghae · Eam, Sunghoon

ABSTRACT

To improve the problem that the settlement curve of the consolidation theory of Terzaghi does not match well with the actual settlement curve, we included a secondary compression settlement and analyzed it by varying the beginning point and then obtained the following results. The current methods of calculating the compression index from the $e - \log \sigma$ curve and the coefficient of consolidation from the time-dependent settlement curve for each consolidation pressure proved that the final settlement amount will be consistent after a long time, but the actual settlement amount will always be smaller than the predicted settlement amount during the settlement progress stage. The consolidation factors estimated by the curve fitting with the condition that the secondary compression begins in the second half of the primary compression showed similar values to the consolidation factors estimated by the curve fitting for the primary compression only, and the settlement curves were in better agreement throughout the compression. It showed different values, showing low validity. It can be inferred that secondary compression acts from the point when a significant portion of the excess pore water pressure is dissipated, and the loading stress begins to have more influence on the skeletal structure of the soil. Analysis results show that secondary compression begins at the range of 91 % to 98 % on the average degree of primary consolidation.

Keywords: Consolidation; degree of consolidation; secondary compression

1. 서론

거의 1세기 전에 Terzaghi (1923)가 유효응력 개념을 도입하고 공극수압의 소산과정으로 압밀이론을 제시한 이래 지금까지 압밀에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. Terzaghi 이론은 점성토를 탄성체로 보고 압밀이 진행되는 동안 흙의 압축을 무시하는 미소변형압밀이론으로 실제 현상을 크게 단순화한 것이다. 이 이론에서 공극수압의 소산과 흙 구조의 압축이 연결이 되지 않는 결함이 있기 때문에 이를 개선한 유한변형압밀이론 (Biot, 1941)과 비선형압밀이론 등이 개발되었다. Terzaghi (1923; 1943)는 그의 압밀이론에서 2차 압축에 대해 언급하고 있지 않으나 Buisman (1936)은 두께 2 cm 시료를 500일 동안 압밀시험을 실시한 결과에서 반대수 시간-침하 그래프의 후반부에서 기울기가 일정한 직선구간이 나타났고 도로 성토현장에서 2년간 측정한 결과에서도 나타났으며 그

크기가 상당하므로 침하량 계산에 고려해야 한다고 하였다.

1차 압밀은 간극수압이 소산되는 과정이고 2차 압축은 간극수압이 소산된 후에도 유효응력이 일정한 상태에서 계속해서 침하가 나타나는 현상으로 구분하고 있다. 많은 연구자들 (Taylor and Merchant, 1940; Taylor, 1942; Tan, 1957; Gibson and Lo, 1961; Schiffman et al., 1964; Barden, 1965; 1968)들이 2차 압축을 압밀현상에 반영하기 위해서 유동학적인 접근을 시도하였다. 그러나 이러한 모델들은 수학적 정해가 존재하지 않는 경우가 많고 수식이 복잡하며 실무에 적용하기 위한 입력 정수를 구하는 것이 쉽지 않기 때문에 잘 사용되지 않고 있다. 국가건설기준 얇은기초 설계기준 (일반설계법)에서는 여전히 1차 압밀에 의한 최종침하량은 압축지수나 체적변화 계수 등을 적용하여 계산하도록 하고 있으므로 사실상 Terzaghi의 압밀이론을 채택하고 있다 (KDS 11 50 05 : 2021).

Terzaghi et al. (1996)은 2차 압축이 진행되는 중에도 흙의 골격이 압축되면서 전해지는 압력에 의한 동수경사에 따라서 간극수가 배출되는 것이 사실이기는 하지만 그 크기가 매우 작으므로 2차 압축 해석에서 무시할 수 있으며 1차 압밀이 종료된 후에 2차 압축이 시작되는 것으로 간주하였다. 이러한 견해는 동수경사에 대한 고려 없이 1차 압밀이 종료된 후에 2차 압축이 진행되는 것으로 간주한 초기의 견해(Taylor, 1948)보다는 진실보한 것이지만 여전히 1차 압밀과 2차 압축

^a Department manager, Korea Rural Community Corporation

^b Professor, Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-330-1264, Fax: +82-41-330-1269

E-mail: geotechkor@kongju.ac.kr

Received: September 01, 2023

Revised: October 02, 2023

Accepted: October 24, 2023

을 명확하게 구분하고 있다. Mesri (1973)와 Mesri et al. (1997) 등 2차 압축에 대한 많은 연구자들도 1차 압밀과 2차 압축을 명확하게 분리하고 연구를 진행하였다. ‘얇은기초 설계기준 (일반설계법) 4.2.5 이차압축침하량’에서는 ‘이차압축침하량은 일차압밀침하 완료 후의 시간-침하량 관계 곡선의 기울기를 적용하여 계산한다.’고 규정하고 있다. 그러나 Olson (1998)은 짧은 시간 동안 얇은 시료를 사용하는 표준압밀시험에서는 1차 압밀과 2차 압축이 명확하게 구분되는 것처럼 보이지만 실제 현장에서 진행되는 압밀에서는 구분이 모호하며 2차 압축은 1차 압밀이 진행되는 동안에도 발생하며 1차 압밀을 지연시키는 효과가 있다고 주장하였다. Muni (2011)는 흙의 2차 압축에 대한 물리적인 원인은 아직까지 완전하게 이해되고 있지 않지만 미세공극에서 공극수가 배출되거나 흙 구조의 점성변형이 원인일 가능성이 있다고 하였다. Kooi and Erkens (2020)는 Terzaghi의 $e - \log \sigma$ 관계를 수정하여 Isotache model을 만들고 상용소프트웨어의 모듈로 구현하였다. 그러나 기본적으로 Mesri (1973)의 개념과 비슷한 개념이다. Saleh et al. (2021)은 또 다른 상용소프트웨어의 흙의 경화 모델의 적용성을 검토하기 위해서 압밀배수삼축압축시험과 Oedometer 압밀시험으로 입력 정수를 구하고 삼축배수시험을 소프트웨어로 모사하여 검증하였다. Li et al. (2022)은 공극수의 온도가 해성점토의 2차 압축에 미치는 영향을 실험하였다. 이처럼 2차 압축은 최근까지도 그 기작이 명확하게 규명되지 않고 있다.

2차 압축은 유효응력이 일정한 상태에서 진행되는 creep 거동으로 표현하고 있으므로 소성변형으로 생각할 수 있으나 1차 압밀과 2차 압축을 분리하는 이론에서 2차 압축으로 간주하는 3번째 직선구간에 진입한 표준압밀시험 상태에서 하중을 제거하면 압축량의 일부는 다시 팽창하여 변형이 회복되므로 2차 압축에도 탄성변형 소성변형이 함께 포함되어 있으며 시간에 따라서 서서히 진행되므로 매우 복잡한 점탄소성 거동이 진행되고 있다는 것을 알 수 있다.

Kim and Eam (2014)은 표준압밀시험 결과로부터 curve fitting에 의해서 압밀계수와 압축지수를 산정하는 소프트웨어를 개발하였다. 이 소프트웨어는 시간에 따른 이론 침하 곡선에 1차 압밀 침하량뿐만 아니라 즉시 침하량까지 반영하고 시험 결과에서 2차 압축에 의한 침하를 해석에서 배제하기 위해서 마지막 시간-침하 측정값부터 시간의 역순으로 1 측정씩 순차적으로 curve fitting에서 제외하면서 결과를 비교하는 방법으로 1차 압밀과 2차 압축을 구분하였다.

이 연구에서는 2차 압축이 시작되는 시점을 달리 적용하면서 즉시침하, 1차 압밀 침하, 2차 압축 침하 등을 모두 고려한 이론적인 침하 곡선과 표준 압밀시험에 의한 실측 시간-침하

곡선을 curve fitting에 의해서 해석하여 실제 압밀현상에 적합한 적용 방법을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 해석에 사용한 압밀시험 자료

이 연구에서 사용한 압밀시험 자료 (Fig. 1)는 경남 양산 일원에서 채취한 점토 시료를 시험한 결과이며 Kim and Eam (2014)의 자료가 일부 포함되어 있다. 5 kPa~1255 kPa까지 9단계의 압밀 응력을 하중 증가율을 1로 재하하였고 각 단계의 재하 시간은 24시간을 유지하였다. 시료의 물리 역학적 토질 정수는 Table 1에 나타내었다. 이 시료는 국내에서 매우 느슨하고 압축성이 큰 점토에 속하기 때문에 압밀이론에 관한 연구에 적합하다고 판단하여 선택하였다.

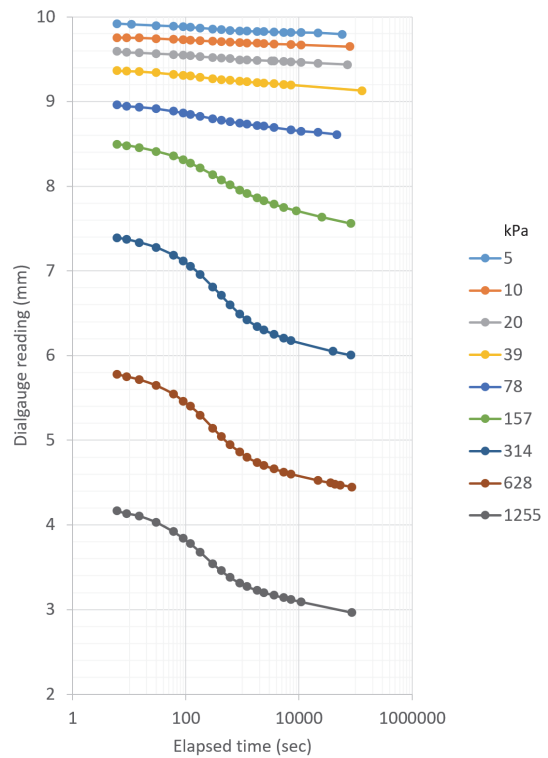


Fig. 1 Settlement over time curves on each load steps from the Oedometer test

2. 압밀이론

식 (1)은 Terzaghi의 압밀이론을 나타낸 것이다. 이 식에 $t = 0$ 인 초기조건으로 공극수압 u 의 크기와 $z = 0$ 인 경계조건으로 공극수압 u 의 크기를 적용하여 해석하면 특정시간 t

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

Water content (%)	Dry density (kg/m ³)	Specific gravity	Initial void ratio	Soil classification (USCS)	Compression index	Preconsolidation pressure (kPa)
58.88	997	2.64	1.647	CL	0.67	80

와 특정 깊이 z 에서 공극수압 u 를 구할 수 있는 해를 얻을 수 있다. 이 해의 형태는 각각의 초기조건과 경계조건에 따라서 다른 형태의 정해가 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서 t : 압밀경과시간
 u : 과잉공극수압
 C_v : 압밀계수

Terzaghi의 압밀이론은 오랜 기간 동안 적용되어 왔으므로 세부적인 전개 과정은 생략하고 시간에 따른 침하 곡선을 표현하면 다음과 같다. 최종침하량 (S_{pf})을 구하고 식 (1)에 초기조건과 경계조건을 적용하여 얻은 평균압밀도 (U_{avg})를 곱하면 시간에 따른 침하곡선 (S_p)을 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$S_p = S_{pf} \times U_{avg} \quad (2)$$

Mesri (1973)에 의해서 제시된 2차 압축지수로부터 시간의 경과에 따른 2차 압축 침하량 (S_s)은 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_p} \times H_p \times \log \frac{t_3}{t_p} \quad (3)$$

여기서 e_p : 2차 압축 시작 공극비
 H_p : e_p 에 대응하는 시료의 두께
 t_p : 2차 압축 시작 시점
 t_3 : 재하 후 경과시간 ($t_3 > t_p$)
 C_α : 2차 압축지수

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \quad (4)$$

여기서 Δe : 2차 압축에 의한 공극비의 변화량
 $\Delta \log t$: Δe 에 대응하는 $\log t$ 의 변화량

식 (2)와 식 (3)을 더하고 재하 직후에 일어나는 즉시침하량 (S_i)을 추가하면 최종적으로 시간의 경과에 따른 실제 침하곡

선은 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$S_t = S_i + S_p + S_s \quad (5)$$

식 (5)는 단순한 형태로 정리되어 있으나 실제 사용하기 위해서는 즉시 침하량, 최종 침하량, 임의의 시간에서의 평균 압밀도, 2차 압축 침하량을 모두 산정해야 하는 복잡한 수식이다. 압밀 이론에서 1차 압밀은 무한히 진행되므로 2차 압축이 시작된 이후에는 1차 압밀과 2차 압축이 동시에 진행되는 것으로 표현하고 있다.

식 (5)를 curve fitting으로 해석하기 위해서 Microsoft EXCEL에서 즉시 침하량, 압밀계수, 압축지수, 2차 압축지수, 2차 압축 시작 시점을 모두 미지수로 하는 계산 절차를 세우고 식 (5)의 산출 결과를 시험 결과와 동일한 그래프에 표현한 후 미지수들을 변경하면서 이론 곡선과 시험 결과와의 편차를 관찰하는 시행 착오법으로 curve fitting을 하였다. Kim and Eam (2014)이 제시한 즉시 침하량, 압밀계수, 압축지수를 초기값으로 설정하고 2차 압축 지수는 압축지수의 1/10을 초기값으로 설정한 후 시험 결과에서 2차 압축을 나타내는 세 번째 직선구간이 명확해지는 시점부터 시간의 역순으로 2차 압축 시작 시점을 탐색하였다. 일반적으로 curve fitting은 미지수들의 가능한 범위의 모든 값들에 대해서 계산하고 목적함수가 최대 또는 최소가 되는 가장 최적의 결과를 산출하는 것이 정확하지만 이 연구에서는 초기값으로 설정할 수 있는 선행 연구 (Kim and Eam, 2014)가 있었기 때문에 소프트웨어를 수정하는 것보다 수작업으로 진행하는 것이 효율적이었다.

III. 결과 및 고찰

1. 1차 압밀만을 고려한 경우

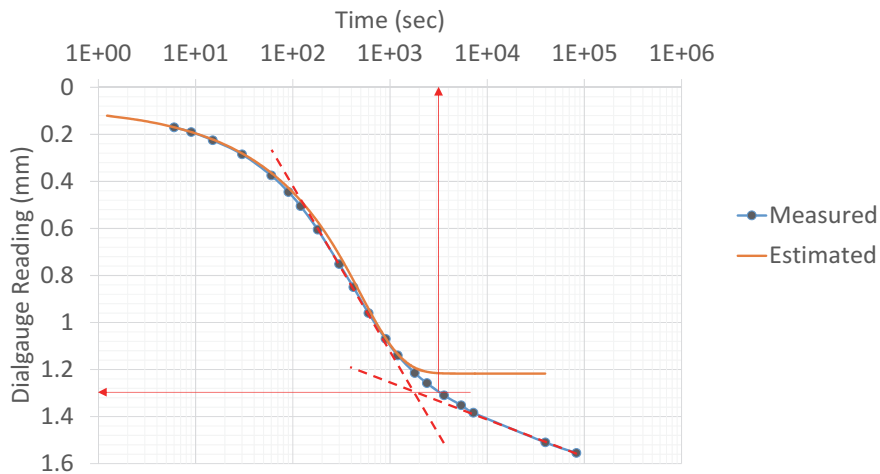
Fig. 2(a)는 157 kPa에서 314 kPa로 재하한 침하곡선과 1차 압밀과 즉시침하량만을 고려하여 curve fitting한 결과를 함께 나타낸 것이다. KS F 2316 : 2022에서 규정하고 있는 $\log t$ 법에 의한 압밀계수 산정 방법과 동일한 방법이다. Kim and Eam (2014)은 curve fitting법에 최적화된 소프트웨어를 개발하여 정량적인 curve fitting을 하고 시험 결과에서 어느 범위까지 해석 자료로 사용할 것인지에 따라서 결과가 달라진다고

하였다. Kim and Eam (2014)의 해석 결과에서는 1800 sec까지의 자료만을 해석한 경우 압밀계수 $C_v = 5.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 압축지수 $C_c = 0.5$, 즉시침하량은 0.13 mm로 제시하였다. Kim and Eam (2014)의 최적화 소프트웨어는 보통 축척에서의 면적의 편차를 최소화하도록 되어 있기 때문에 시간 간격이 커지는 압밀 후반부의 측정값들에 가중치가 주어진다. 압밀은 전반부에 큰 변화를 나타내므로 시간 축척을 확대하고 후반부에서는 변화가 느리므로 시간 축척을 압축해서 관찰하는 것이 편리하기 때문에 Terzaghi의 압밀이론은 관행적으로 반대수 축척을 사용하고 있다. 이 연구에서는 반대수 축척에서 각 측정값들을 동등한 가중치로 반영하기 위해서 반대수 축척에서 육안으로 curve fitting를 하여 연구를 수행하였다. 압밀계수와 압축지수는 각각 $C_v = 5.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $C_c = 0.50$ 로 Kim and Eam (2014)과 동일한 값으로 나타났으나 초기침하량은 0.08 mm인 경우에 더 많이 일치하여 시간을 보통 축척으로 표시하고 산정한 경우와는 약간 다른 값을 나타내었다. 1차 압밀이 종료되는 시점은 약 2000 sec로 나타났다. 압밀 시험 결과에서 두 번째 직선구간의 연장선과 세 번째 직선구간의 연장선의 교차점을 기준으로 하면 1차 압밀이 약 1.3mm 침하하고 종료된 이후에도 1차 압밀침하량의 약 20%에 해당하는 0.26mm의 2차 압축 침하가 발생하고 있으므로 그 크기를 무시할 수 없으며 1차 압밀과 2차 압축의 경계도 명확하지 않다. $\log t$ 법에 의한 압밀침하량은 curve fitting법으로 구한 침하량보다 크게 산정하고 있다. 두 번째 직선과 세 번째 직선의 교차점에 대응하는 침하량 기준으로 압밀이 종료되는 시점은 약 3100 sec이며 해석 결과에서 3115.2 sec일 때 압밀도 99.85 %이다.

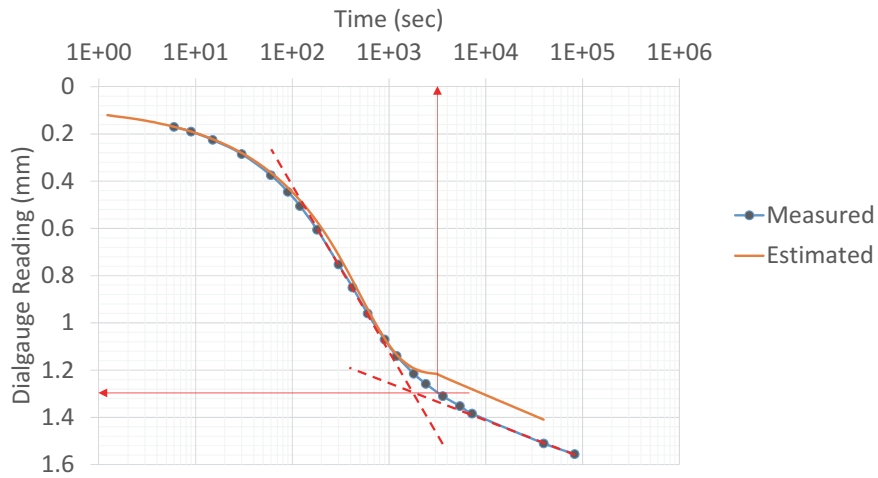
Fig. 2(b)는 1차 압밀이 종료된 후에 2차 압축이 진행되는

것으로 설정하고 해석한 결과이다. 1차 압밀이 종료되고 2차 압축이 시작되는 시점 (End of Primary Consolidation : EOP)을 3100 sec로 하고 2차 압축지수는 $C_\alpha = 0.023$ 인 경우에 2차 압축 구간의 기울기가 가장 잘 일치하였다. 1차 압밀이론 종료 부근에서의 기울기가 2차 압축지수 C_α 와 다르기 때문에 해석된 곡선이 완만하게 이어질 수가 없으며 시험 결과와의 편차도 나타나고 있어서 이후 연구에서 이 조건은 배제하였다.

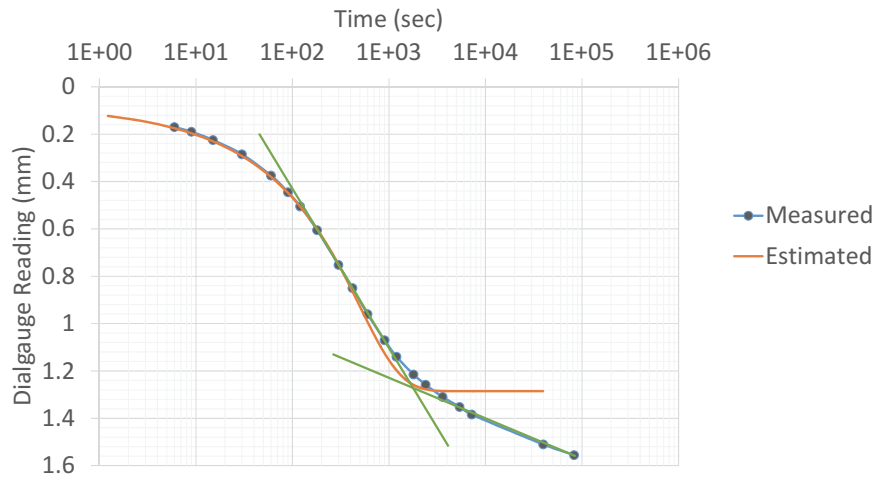
Fig. 2(c)는 침하곡선에서 $\log t$ 법에 의한 압밀계수 산정 방법으로 압밀도 100 %인 침하량을 산정하여 curve fitting 곡선이 이 침하량에 도달하도록 제한하고 압축지수, 압밀계수, 즉시침하량 등은 측정된 곡선과 편차가 최소가 되도록 최적화하여 산출한 것이고 Table 2는 Fig. 1의 8개 침하 곡선에 대해서 산출된 압밀 정수들을 나타낸 것이다. 5 kPa로 재하한 1단계는 재하판과 공시체를 밀착시키는 과정에 의미를 부여하므로 압밀정수는 검토하지 않았다. 재하응력이 선형압밀응력 80 kPa 보다 작은 과압밀 영역에서는 탄성침하가 지배적이고 탄소성침하가 동시에 일어나는 것으로 알려진 1차 압밀 침하 해석은 할 필요가 없었으나 산출되는 압축지수의 크기를 정규압밀 영역에서와 비교하기 위해서 수행하였다. 2차 압축지수는 그 크기가 1차 압축지수의 1/10 정도인 것으로 알려져 있으며 과압밀영역에 적용한 curve fitting에 의해 산출된 압축지수도 비슷한 경향을 나타내고 있다. 정규압밀영역에서 압축지수는 Table 1의 0.67보다 작은 0.33~0.53의 범위로 나타났다. $e - \log \sigma$ 곡선은 2차 압축 침하를 포함한 최종침하량에 대응하는 공극비를 적용하므로 2차 압축 침하가 반영이 되지만 curve fitting에서는 2차 압축 침하가 배제되기 때문에 나타나는 결과로 생각된다. KS F2316 에서는 이때 적용하는 공극비를 '각 재하 단계의 압밀 종료 시의 간극비'로 지정하고



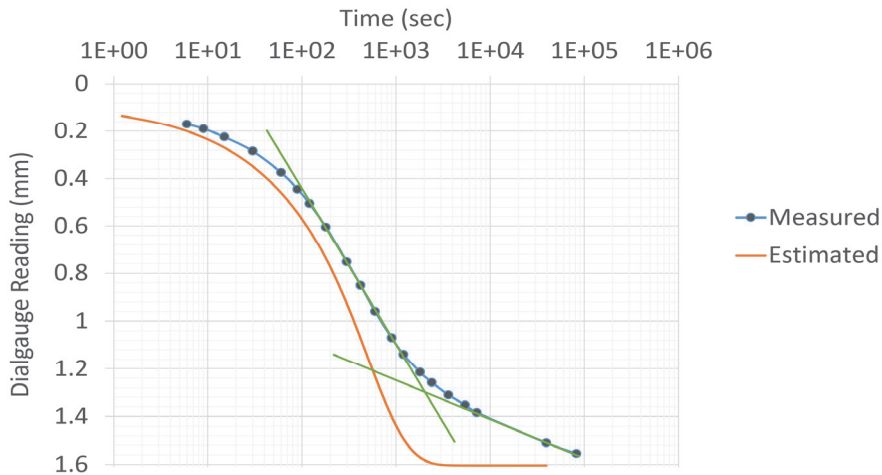
(a) The measured settlement curve and the curve estimated with the equation (5) on the condition of $S_s = 0$



(b) The measured curve as in figure (a) and the estimated curve of the average degree of consolidation according to Terzaghi's theory with the condition that secondary compression begins after the end of primary consolidation at 3100 second



(c) Curve fitting result considering the instant settlement and the primary consolidation settlement by $\log t$ method



(d) The result of applying a compression index of 0.67 to the theoretical equation analyzed by considering the instant settlement and the primary consolidation settlement

Fig. 2 The analysis result of consolidation curve on loading pressure of 314 kPa

Table 2 Consolidation factors estimated by curve fitting considering only the primary consolidation and instant settlement

Consolidation pressure (kPa)	Initial void ratio	Compression index	Coefficient of consolidation (m ² /s)	Primary consolidation ratio (%)
5	1.647	-		
10	1.629	0.028	2.5×10 ⁻⁷	43.62
20	1.610	0.041	1.5×10 ⁻⁷	43.58
39	1.581	0.054	3.0×10 ⁻⁷	39.88
78	1.541	0.102	1.5×10 ⁻⁷	44.96
157	1.472	0.330	7.0×10 ⁻⁸	71.42
314	1.333	0.530	5.8×10 ⁻⁸	77.52
628	1.128	0.500	7.0×10 ⁻⁸	73.09
1255	0.922	0.450	7.0×10 ⁻⁸	68.97

있다. ‘압밀 종료 시’의 의미가 1차 압밀 종료를 뜻하는 것인지 각 재하 단계의 종료를 뜻하는 것인지 명확하지 않지만 비슷한 기울기로 전자의 곡선이 후자의 곡선보다 위에 있게 되므로 압축지수는 크게 변하지 않는다.

Fig. 2(d)는 압밀계수는 즉시침하와 1차 압밀 침하만 고려한 Fig. 2(c)의 curve fitting 결과를 적용하고 압축지수는 KS F 2316의 $e - \log \sigma$ 곡선에서 얻은 결과를 사용하여 해석한 이론 곡선과 314 kPa로 재하한 침하곡선을 나타낸 것이다. 압밀 시공 현장에서 나타나는 전형적인 조건이다. 최종침하량은 1차 압밀 침하와 2차 압축 침하가 모두 반영이 된 압축지수를 사용하게 되므로 현장에서 진행되는 침하는 2차 압축 단계를 포함한 오랜 시간이 경과하면 설계된 1차 압밀 침하량에 근접하게 되지만 시공 당시의 시간에 따른 침하량은 설계에서 예측한 침하량보다 항상 작게 나타날 수 밖에 없고 현장에서 압밀 설계를 불신하는 근본적인 원인 중의 하나이다.

2. 1차압밀 후기에 2차압축이 시작되는 것으로 고려한 경우

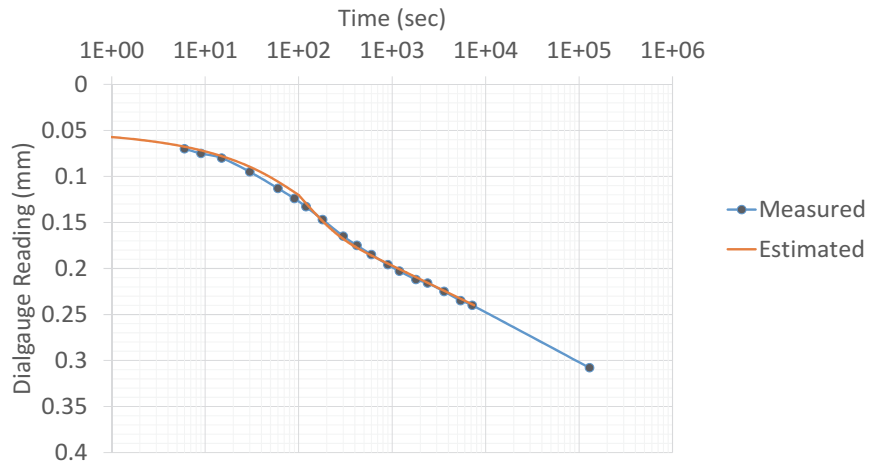
1차 압밀의 후반부에 2차 압축이 시작되고 침하곡선의 후반부는 1차 압밀과 2차 압축이 동시에 진행된 결과로 간주하여 즉시침하, 1차 압밀 침하, 2차 압축 침하를 포함한 이론 곡선을 실제 침하 곡선 (Fig. 1)에 curve fitting을 실시하였다. Fig. 3은 과압밀 영역의 일부인 압밀응력이 39 kPa인 침하곡선과 정규압밀영역의 침하곡선들에 대한 결과를 나타낸 것이다. 두 번째 직선구간과 세 번째 직선구간에서 서로 반대 방향의 작은 편차가 있으나 모든 curve fitting 들이 잘 일치하고 있다. Table 3은 모든 곡선에 대한 curve fitting에 의해서 얻은 압밀 정수들을 나타낸 것이다. 5 kPa로 재하한 1단계 침하곡선은 앞에서와 마찬가지로 재하판과 시료를 밀착시키는 역할

만 있는 것으로 고려하여 해석 결과를 분석하지 않았다.

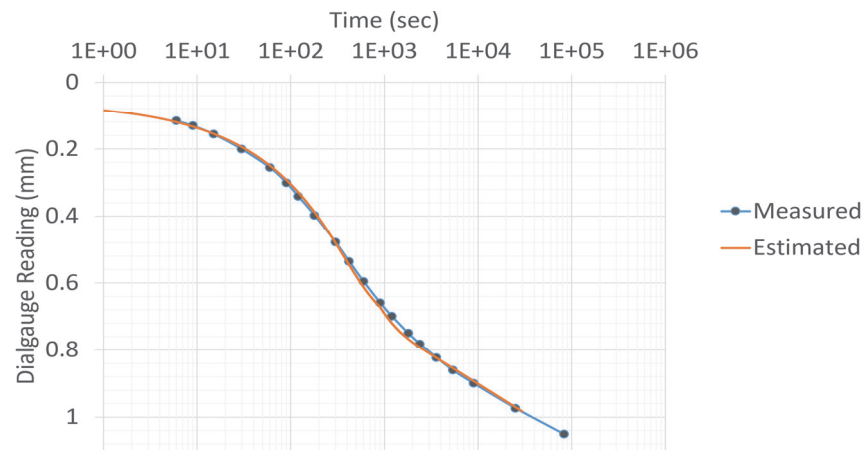
과압밀영역에서는 소성변형에 해당하는 1차 압밀이 이미 일어난 상태이므로 이론적으로는 1차압밀 침하가 진행되는 것으로 해석하는 것은 부적절하지만 시간에 따른 침하곡선이 약한 S곡선의 경향을 나타내기 때문에 curve fitting이 가능한지를 확인하기 위해서 해석을 하였으며 적용 조건의 적정성과는 무관하게 두 곡선을 비교적 잘 일치시킬 수 있었다.

2차 압축 시작 시점을 인위적으로 1차 압밀 후반부로 제한한 것이 아니고 curve fitting 결과가 실제 침하 곡선과 가장 일치하도록 육안 관찰과 시행착오에 의해서 탐색한 결과 2차 압축 시작 시점이 정규압밀 영역에서는 91%~98%의 범위로 나타났다. 이 curve fitting 방법을 실무에 적용한다면 제시한 범위의 중간값을 초기값으로 하고 상황에 따라서 가감하는 것이 적합할 것으로 생각된다. 당연히 1차 압밀만을 고려한 경우보다는 실제 침하 곡선과 잘 일치하지만 세밀하게 관찰하면 곡선의 기울기에 관한 이론 곡선의 형태가 근본적으로 실제 침하 곡선과는 다르기 때문에 정확하게 일치시킬 수는 없으며 반대수 축척상에서의 미세한 차이가 보통 축척에서는 매우 크게 나타남을 고려할 때 압밀이론의 근본적인 한계 또한 인식할 수 있다. Taylor (1948), Mesri (1973) 및 Mesri et al. (1997)은 1차 압밀이 종료된 후에 2차 압축이 시작된다는 전제하에서 압밀계수를 구하는 방법을 연구하거나 2차 압축지수를 구하는 방법 등에 대해서 연구하였다. 그러나 Olson (1998)은 표준압밀시험에서는 1차 압밀과 2차 압축이 뚜렷하게 구분되는 것처럼 보이지만 2차 압축은 1차 압밀이 진행되는 동안에 함께 진행되며 1차 압밀을 지연시키는 효과가 있다고 하였다.

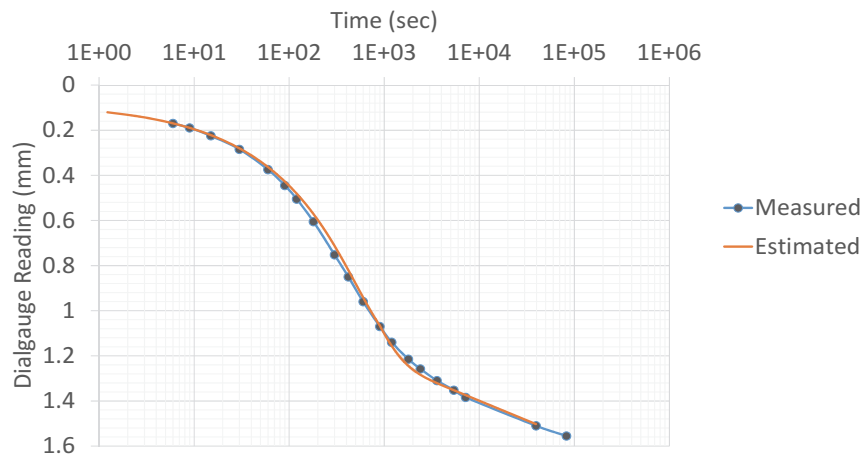
Mesri (1973)는 퇴적토에서 재하 응력이 커지면 2차 압축지수가 작아진다고 하였으나 이 연구의 결과에서는 일정한 값



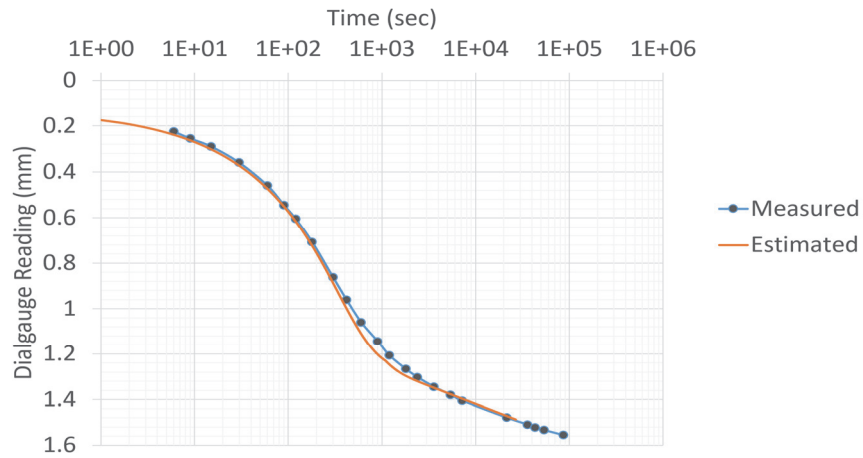
(a) Consolidation pressure of 39 kPa



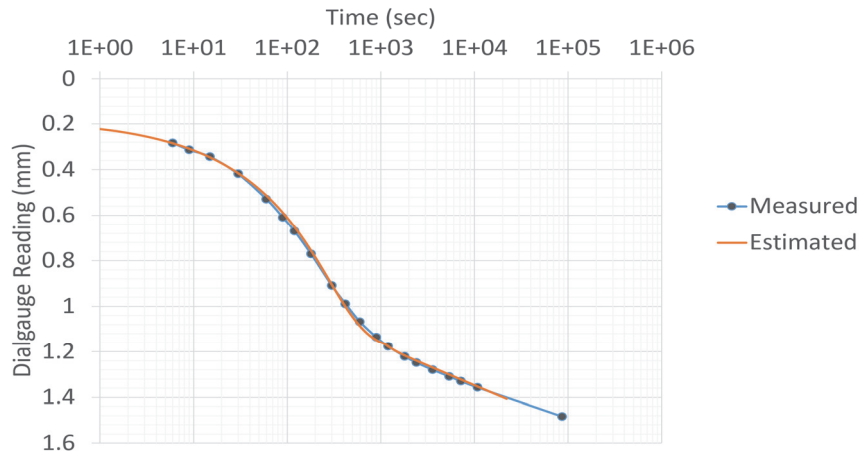
(b) Consolidation pressure of 157 kPa



(c) Consolidation pressure of 314 kPa



(d) Consolidation pressure of 628 kPa



(e) Consolidation pressure of 1255 kPa

Fig. 3 Curve fitting result considering the instant settlement, the primary consolidation settlement by $\log t$ method and the secondary compression beginning in the second half of primary consolidation

Table 3 Consolidation factors estimated by curve fitting considering the instant settlement, the primary consolidation settlement by $\log t$ method and the secondary compression beginning in the second half of primary consolidation

Consolidation pressure (kPa)	Initial void ratio	Compression index	Coefficient of consolidation (m^2/s)	Secondary compression index	Primary consolidation ratio (%)	Secondary compression beginning point (second)
5	1.647					
10	1.629	0.025	3.0×10^{-7}	0.0032	38.95	300
20	1.610	0.036	3.0×10^{-7}	0.0039	33.26	300
39	1.581	0.050	3.0×10^{-7}	0.0065	36.92	200
78	1.541	0.075	4.0×10^{-7}	0.0120	33.06	150
157	1.472	0.290	9.0×10^{-8}	0.0230	62.76	900
314	1.333	0.500	5.8×10^{-8}	0.0230	73.14	900
628	1.128	0.500	7.0×10^{-8}	0.0210	73.09	1100
1255	0.922	0.440	7.0×10^{-8}	0.0230	67.44	1100

Table 4 The result of analyzing the consolidation factors calculated by curve fitting on the condition that the secondary compression begins in the second half of the primary consolidation

Consolidation pressure (kPa)	The degree of consolidation at the beginning point of the secondary compression (%)	C_a/C_c
5		
10	79.3	0.200
20	86.8	0.167
39	72.0	0.151
78	84.6	0.160
157	90.5	0.079
314	86.7	0.046
628	94.4	0.042
1255	97.9	0.052

을 갖는 것으로 나타났다. 2차 압축지수의 범위는 Mesri (1973)의 연구에서는 0.032 이하의 범위가 제시되어 있으며 이 연구에서는 최대값이 0.023으로 Mesri (1973)가 제시한 범위 내에 있다.

1차 압밀이 각 재하 단계별 1차 압밀과 2차 압축을 포함한 전체 침하량에서 차지하는 비율을 1차압밀비로 정의하면 정규압밀영역에서 63 %~73 % 범위의 값을 나타내고 있다.

Table 4는 curve fitting에 의해서 산출된 2차 압축 시작 시점에서의 1차 압밀도를 나타낸 것이다. 정규압밀영역에서는 87 %~98 % 범위로 나타났으나 다른 정수들에 비해서 상대적으로 분포 범위가 작고 전반적으로 2차 압축은 1차 압밀 후반부에 시작되는 것으로 설정할 경우에 실제 침하곡선과 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 2차 압축지수와 1차 압축지수의 비는 정규압밀 영역에서는 Mesri (1973)가 제시한 0.04~0.075의 범위와 비슷한 범위로 나타났다.

3. 1차 압밀과 2차 압축이 동시에 진행되는 경우

1차 압밀과 2차 압축이 동시에 진행되는 것으로 설정하고 즉시침하를 추가하여 이론 곡선을 측정된 곡선에 curve fitting을 하였다. log 축척에서 0점을 표시할 수 없으므로 2차 압축 적용 시점을 실제 침하 곡선에서 최초의 자료가 측정된 6 sec로 하였다. 식 (3)에서 2차 압축은 시간에 대해서 log 관계로 정의되어 있으므로 2차 압축 시작 시점을 1 sec, 0.1 sec, 0.01 sec 등으로 설정해도 계산이 진행될 수 있다. 그러나 0에 근접한 지나치게 작은 값을 설정하면 2차 압축 침하량이 너무 크게 산출되므로 실제 자료가 존재하는 첫 번째 시간인 6 sec를 2차 압축 시작 시점으로 설정하였다. 따라서 6 sec에서는 2차 압축 침하량이 0.0mm이다. 1차 압밀 후반부에 2차 압축이 시작되는 것으로 해석한 결과에서 2차 압축 시작 시점은 특정

기준으로 고정되지는 않았다. Olson (1998)은 2차 압축은 1차 압밀이 진행되는 중에도 발생한다고 하였으며, 이론적 근거가 제시되지 못한 채 특정 시간 또는 특정 압밀도에서 2차 압축이 시작되는 것을 전제하는 것은 근거가 부족하므로 1차 압밀 초기부터 2차 압축도 동시에 진행된다는 조건을 부여하고 후반부에 시작되는 것으로 해석한 결과와 비교하였다.

선형압밀응력보다 작은 재하응력으로 압축하는 과압밀영역은 $e - \log \sigma$ 곡선에서 탄성영역에 해당하고 creep 거동은 $e - \log \sigma$ 곡선 자체를 상향 또는 하향으로 이동시킨다. 탄소성 압축에 해당하는 1차 압밀이 일어날 수 없다고 설정하고 과압밀영역에서는 2차 압축만 일어나는 것으로 해석하였으며 정규압밀영역에서는 1차 압밀과 2차 압축이 동시에 진행되는 것으로 해석하였다. 그러나 서론에서 기술한 것처럼 1차 압밀과 2차 압축을 구분하는 이론에서 3번째 직선구간에 해당하는 2차 압축 단계에도 탄성변형과 소성변형이 함께 일어나므로 실제 현상을 많이 근사화한 것이다.

과압밀영역인 5~78 kPa의 압밀응력에서는 2차 압축만 일어나는 것으로 가정하였으므로 이론곡선은 반대수 축척에서 직선을 나타내며 실제 침하곡선의 약한 S 곡선 형태가 무시되고 있으나 그 차이가 매우 크지는 않다. 정규압밀영역에서는 일관되게 압밀의 전반부에서 실제침하곡선과 편차가 발생하고 있다. Fig. 4는 정규압밀영역인 314 kPa의 압밀압력으로 측정된 곡선을 curve fitting 한 것이고 Table 5에 전체 결과를 나타내었다. 정규압밀영역에서 압축지수는 0.14~0.330의 범위이며 2차 압축을 무시한 경우와 후반부에 반영한 경우와는 큰 차이를 나타내고 있으며 $e - \log \sigma$ 곡선에서의 압축지수 0.67 보다 매우 작은 값이다. 압밀이 진행되는 전 구간에서 2차 압축도 발생하는 것으로 설정하여 1차 압밀량의 영향이 축소되었기 때문이다. 압밀계수는 $4.0 \times 10^{-8} \sim 6.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 의

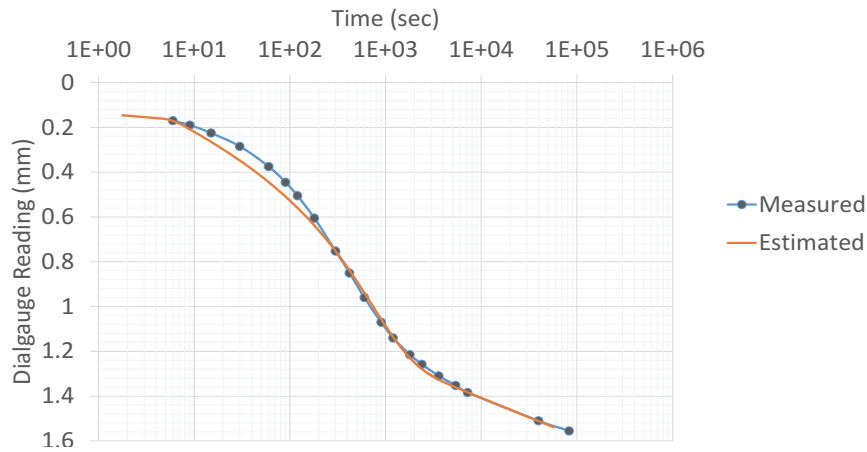


Fig. 4 Curve fitting results for a curve with a consolidation stress of 314 kPa, considering instant settlement, primary consolidation settlement by $\log t$ method, and the second compression beginning at 6 seconds

Table 5 Consolidation factors estimated by curve fitting considering the instant settlement, the primary consolidation settlement by $\log t$ method and the secondary compression beginning at 6 seconds

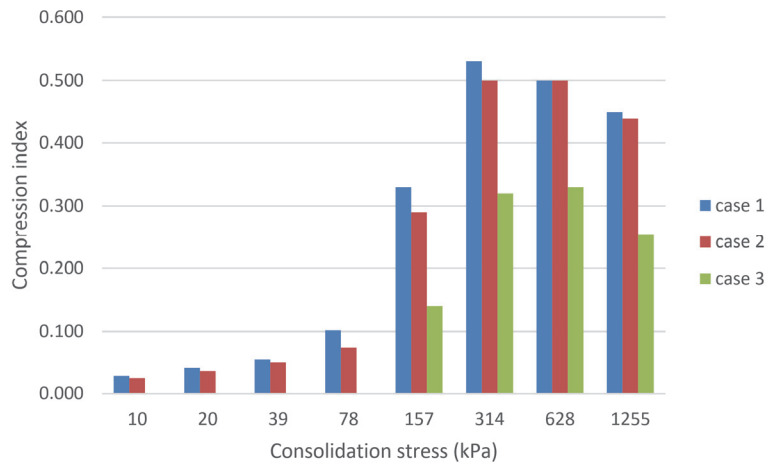
Consolidation pressure (kPa)	Initial void ratio	Compression index	Coefficient of consolidation (m^2/s)	Secondary compression index	Primary consolidation ratio (%)	Secondary compression beginning point (second)
0.05	1.647					
0.1	1.629			0.0035		6
0.2	1.610			0.0055		6
0.4	1.581			0.0075		6
0.8	1.541			0.0130		6
1.6	1.472	0.140	4.0×10^{-8}	0.0210	62.76	6
3.2	1.333	0.320	4.0×10^{-8}	0.0230	73.14	6
6.4	1.128	0.330	5.0×10^{-8}	0.0210	73.09	6
12.8	0.922	0.255	6.0×10^{-8}	0.0230	67.44	6

범위로 나타났으나 상대적으로 매우 좁은 범위이므로 일관된 값을 갖는 경향이 있고, 2차 압축지수는 과압밀영역에서는 0.0035에서 재하응력에 따라서 점차로 증가하여 0.013까지 증가하였으나 정규압밀영역에서는 0.021~0.023의 범위에 있는 것으로 나타났고 매우 좁은 범위이므로 일정한 값을 갖는 경향이 있는 것으로 판단할 수 있다. 전체 침하량에서 1차 압밀에 의한 침하량의 비를 나타내는 1차 압밀비는 63%~73%의 범위로 나타났다.

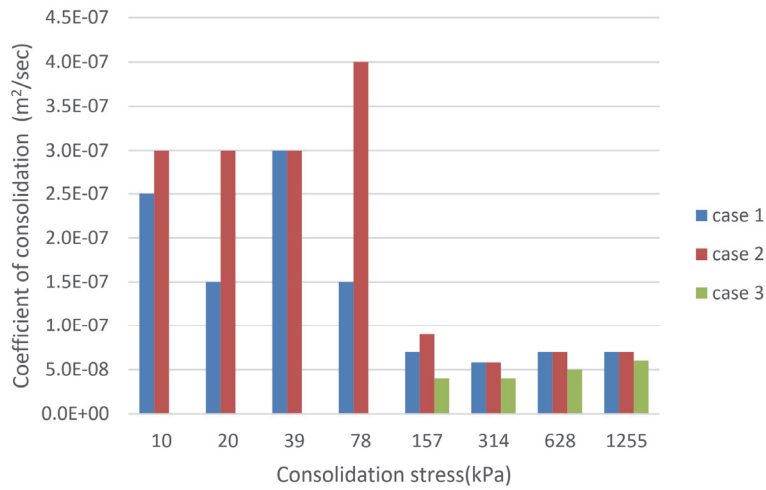
해석 결과 압축지수가 나머지 경우와 큰 차이를 나타내고 있고 곡선의 편차가 크므로 1차 압밀과 2차 압축이 재하 시점부터 동시에 진행된다는 가설은 타당성이 부족한 것으로 판단된다.

4. 2차 압축 포함 유무 및 적용 시점에 따른 압밀정수 비교

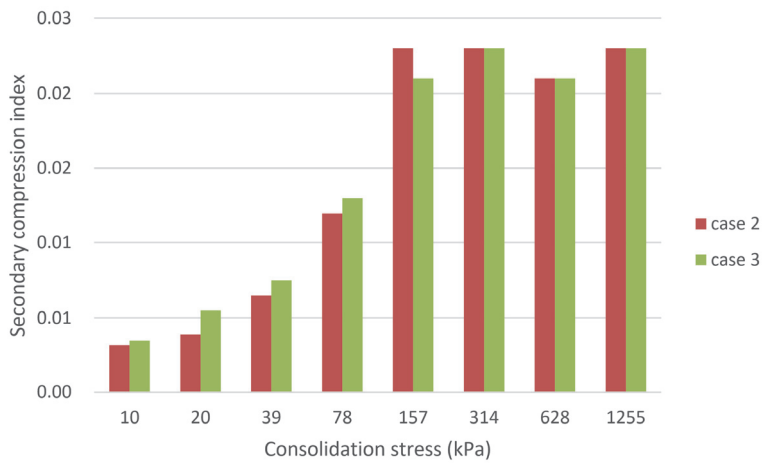
앞에서 해석한 결과들 중 압축지수, 압밀계수 및 2차 압축지수 등을 상호 비교하였다. 2차 압축은 제외하고 1차 압밀만을 고려한 조건을 case 1, 1차 압밀 후반부에 2차 압축이 시작되는 것으로 고려한 조건을 case 2, 1차 압밀과 2차 압축이 압밀 전 구간에 걸쳐 동시에 진행되는 것으로 고려한 조건을 case 3으로 표시하였다. 압축지수를 비교한 Fig. 5(a)에서 case 1과 case 2에서 비슷한 값들이 산출되었고 case 3에서는 작은 값들이 산출되었다. 정규 압밀 영역에서 재하 응력에 따라서 2차 압축 침하를 압밀 전 구간에 반영한 결과로 인해 값이 작게 산출되었다. case 3의 경우 과압밀 영역에서는 1차 압밀이 발생하지 않는 것으로 설정하여 압축지수를 산출하지 않았다.



(a) The variation of the compression index



(b) The variation of the coefficient of consolidation



(c) The variation of the secondary compression index

Fig. 5 The variations of the consolidation factors according to the secondary compression analysis conditions

$e - \log \sigma$ 곡선에 의한 압축지수는 재하 응력에 무관하게 정규 압밀 영역에서 일정한 값을 갖는 것으로 간주하고 있으나 각 재하 단계별로 해석한 결과에서는 약간씩 다른 값을 나타낸다.

Fig. 5(b)는 압밀계수를 비교 분석한 것이다. case 1의 경우에 과압밀영역에서는 정규압밀을 전제로 한 Terzaghi의 압밀이론을 적용하는 것이 적합하지 않았기 때문에 불규칙적인 경향을 나타내고 정규압밀영역에서는 일정해지는 경향을 나타내고 있다. case 2의 경우에 압밀계수는 case 1보다 전반적으로 큰 값을 나타내고 압밀응력 78 kPa를 예외로 하면 과압밀영역에서 일정한 값을 나타내고 정규압밀영역에서도 비교적 일정한 경향을 나타내어 안정성이 있는 것으로 평가할 수 있다. 그러나 과압밀영역에 정규압밀이론을 적용하는 것은 적합하지 않으므로 실무적용에서는 주의하여야 한다. case 3의 경우는 1차 압밀은 정규압밀 영역에서만 해석되었으며 압밀계수가 비교적 일정한 경향을 나타내지만 미세하게 재하응력의 증가에 따라서 증가하며 case 1과 case 2보다는 작은 값들을 나타내고 있다.

Fig. 5(c)는 2차 압축지수를 비교 분석한 것이다. 1차 압밀만을 고려하여 해석한 case 1에서는 2차 압축지수가 산출되지 않아서 case 2와 case 3만을 비교하였다. 과압밀 영역에서는 두 경우 모두 재하 응력의 증가에 따라서 증가하다가 정규압밀영역에서는 일정해지는 경향을 나타내고 있다. 2차 압축 지수가 일정한 값을 나타내지 않고 경향성을 보이는 것으로부터 과압밀 영역에서의 재압축 과정은 2차 압축만으로는 설명할 수 없는 복합적인 거동이라는 것을 추론할 수 있다.

IV. 결론

Terzaghi의 압밀이론이 실제 압밀 침하 곡선과 잘 일치하지 않는 문제점을 개선하기 위해서 압밀해석에 2차 압축 침하를 포함시키고 시작 시점을 변화시키면서 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. $e - \log \sigma$ 곡선에서 압축지수를 산출하고 각 재하 응력별로 시간에 따른 침하곡선에서 압밀계수를 산출하는 현재의 방법은 오랜 시간이 경과하면 최종침하량이 일치하는 시점이 도래하지만 압밀 진행 단계에서는 실제 침하량이 예측 침하량보다 항상 작게 된다는 것을 증명하였다.
2. 1차 압밀의 후반부에 2차 압축이 시작된다는 조건으로 curve fitting에 의해서 해석한 결과 압밀 정수들은 1차 압밀만 curve fitting에 의해 해석한 압밀 정수들과 비슷한 값을 나타내었으며, 침하곡선은 압밀 전 구간에서 더 잘 일치하였다.

3. 1차 압밀과 2차 압축이 동시에 진행된다는 조건으로 curve fitting에 의해서 해석한 결과 압밀 정수들은 1차 압밀 후반부에 2차 압축이 시작되는 조건과 1차 압밀만 일어나는 조건으로 해석한 경우와는 상이한 값들을 나타내어 타당성이 낮은 것으로 나타났다.
4. 2차 압축은 과잉공극수압이 상당 부분 소산되어서 재하 응력이 흙의 골격 구조에 좀 더 많은 영향을 주기 시작하는 시점부터 작용하는 것으로 추론할 수 있으며 해석 결과에서는 1차 압밀도 91%~98% 범위에서 2차 압축이 시작되는 것으로 나타났으므로, 향후 현장 계측자료를 역해석하는 경우에 이 범위에서 2차 압축이 시작되는 것으로 설정하고 압축지수와 압밀계수를 curve fitting으로 탐색할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 압밀 특성이 잘 나타나는 점토 시료를 대상으로 하고 있으므로 위 결론을 일반화하기 위해서는 좀 더 다양한 시료에 대한 추가 분석이 필요하다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 2021~2023년 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (321067-3 연약지반 저수지 제체의 장기거동 분석 및 설계 모델 개발).

REFERENCES

1. Barden, L., 1965. Consolidation of clay with non-Linear viscosity. *Geotechnique ICE* 15(4): 345-362.
2. Barden, L., 1968. Primary and secondary consolidation of clay and peat. *Geotechnique ICE* 18(1): 1-14.
3. Biot, M. A., and F. M. Clingan, 1941. Consolidation settlement of a soil with an impervious top surface. *Journal of Applied Physics* 12: 578-581.
4. Buisman, A. S., 1936. Results of long duration settlement tests. *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, 1: 103.
5. Gibson, R. E., and K. Y. Lo, 1961. A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression. *Acta Polytechnica Scandinavica*, 296/1961, Ci 10. Reprinted by Norwegian Geotechnical Institute.
6. Kim, C. S., and S. H. Eam, 2014. The study on determination of the coefficient of Terzaghi's consolidation

- by curve fitting. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(1): 101-107. (in Korean).
7. Kooi, H., and G. Erkens, 2020. Creep consolidation in land subsidence modelling; integrating geotechnical and hydrological approaches in an new MODFLOW package (SUB-CR). *Tenth International Symposium on Land Subsidence*, 382: 499-503.
 8. Korea Construction Standards Center, 2021. KDS 11 50 05: 2021 Shallow foundation design standard (general design method). (in Korean).
 9. Korean Agency for Technology and Standards, 2022. KS F 2316 : 2022 Test method for one dimensional consolidation test. (in Korean).
 10. Li, S., C. Wang, F. Guo, X. Liu, S. Han, and R. Gao, 2022. Effect of bound water content on secondary compression of three marine silty clays. *Journal of Marine Science and Engineering* 10(2): 261. published online.
 11. Mesri, G., 1973. Coefficient of secondary compression. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 99(SM1): 123-137.
 12. Mesri, G., T. D. Stark, M. A. Ajlouni, and C. S. Chen, 1997. Secondary compression of peat with or without surcharging. *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 123(5): 411-421.
 13. Muni, B., 2011. *Soil Mechanics and Foundations 3rd edition*, 140, 234. John Wiley Sons.
 14. Olson, R. E., 1998. The thirty-first Terzaghi lecture settlement of embankments on soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 124(8): 659-669.
 15. Saleh, S., N. Z. Mohd Yunus, K. Ahmad, and K. N. Mat Said, 2021. Numerical simulation with hardening soil model parameters of marine clay obtained from conventional tests. *SN Applied Sciences*, 3(156). published online.
 16. Schiffman, R. L., C. C. Ladd, and A. T. F. Chen, 1964. The Secondary consolidation of clay, *Symposium on Rheology and Soil Mechanics*, IUTAM, 1: 273-298.
 17. Tan, T. K., 1957. Three-dimensional theory on the consolidation and flow of clay-layers. *Scientia Sinica* 6(1): 203-215.
 18. Taylor, D. W., 1942. *Research on consolidation of clays*, Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Publication No. 82.
 19. Taylor, D. W., 1948. *Fundamentals of soil mechanics*, 234. Wiley, New York.
 20. Taylor, D. W., and W. Merchant, 1940. A theory of clay consolidation accounting for secondary compression. *Journal of Mathematics and Physics* 19(3): 167-185.
 21. Terzaghi, K., 1923. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydrodynamischen. *Spannungserscheinungen, Sitz, Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-Naturwissenschaftliche*, 132, 125-138. Klasse, Vienna, Austria, Part IIa.
 22. Terzaghi, K., 1943. *Theoretical soil mechanics*, 286-289. John Wiley & Sons.
 23. Terzaghi, K., R. B. Peck, and G. Mesri, 1996. *Soil mechanics in engineering practice*, Third Edition, 223-229. US, John Wiley & Sons.