



## 표준압밀시험에 의한 점토의 초기탄성계수 산정

### The Estimation of Initial Elastic Modulus of Clay by Standard Consolidation Test

권병해<sup>a</sup> · 임성훈<sup>b,†</sup>

Kwon, Byenghae · Eam, Sunghoon

#### ABSTRACT

Unlike artificially created homogeneous materials, the process of calculating the elastic modulus of natural soil involves the possibility of errors. Because the stress-strain behavior of soil is nonlinear, the secant modulus of elasticity is often used based on 1/2 of the stress at failure. Since soil has the property of changing its elastic modulus depending on the confining pressure, numerical analysis models that analyze its behavior inevitably include complex elements. The hyperbolic model, which relatively accurately simulates the behavior immediately after loading in soft ground, assumes that the stress-strain curve of the consolidated undrained triaxial test is hyperbolic and requires the slope of the tangent line at the starting point. However, the slope of the initial tangent in the stress-strain curve obtained from an actual triaxial test is difficult to have regularity according to changes in confining pressure. Additionally, due to the characteristics of a hyperbola, even small changes in related factors cause large changes in the hyperbola. Therefore, there is a lot of randomness in the process of calculating model parameters from the triaxial test results, which causes large differences in the results. Therefore, the method of calculating the initial elastic modulus by the consolidation test presented in this study is also used to verify the method by the triaxial test. It can be applied. However, since this study was applied to only one sample showing typical consolidation characteristics, it is necessary to check samples with various physical properties in the future.

**Keywords:** Consolidation; oedometer; elastic modulus; hyperbolic model; soft clay ground

#### 1. 서론

연약지반을 조사하고 실험하는 경우에 표준관입시험, 콘관입시험 등 현장 시험과 흙의 분류를 위한 입도시험 및 일축압축시험, 비압밀 비배수 삼축압축시험, 압밀시험 등은 관행적으로 실시하지만 압밀 비배수 삼축압축시험은 특별히 지정하지 않는 한 실시하지 않는 경우가 많다. 연약지반의 성토 안정성을 검토하는 경우에 공극수압이 소산되지 않은 재하 직후에 대해서 검토하므로 비배수 전단강도가 필요하기 때문이다. 그러나 이와 같이 제한된 실험은 설계법을 고전적인 한계평형 해석법으로 제한한다. 한계평형 해석법은 재하 직후의 안전율은 얻을 수 있으나 시간에 따른 지반의 거동을 예측할 수는 없다. 따라서 압밀 해석에 의한 압밀 소요 시간을 산출하고 개략적인 성토계획을 수립할 수는 있으나 구체적인 단계

성토 일정은 공사 착공 후 현장계측에 의해서 진행하게 된다. 현장 계측에 의한 성토 안정관리로 진행되는 공사 일정이 설계에서 제시한 것과 다른 경우에는 공사 주체들 간에 불필요한 갈등을 유발할 수 있고 설계를 변경해야 할 수도 있으며 부적절한 현장 조치로 지반이 파괴되는 경우도 발생한다. 문제가 발생한 연약지반 시공 현장을 재검토하려면 기왕의 설계에서 사용한 방법보다는 정교한 해석 방법이 필요하며 수치해석 등에 의해 정밀한 현황 파악과 성토 일정 등 대책을 제시해야 할 필요성이 있다. 많은 수치해석 모델들이 제시되어 있고 현재도 개선되거나 새로운 모델들이 발표되고 있으나 이러한 수치해석 모델들을 사용하려면 각 모델별로 고유한 입력 정수들을 산출해야 하고 이를 위해서는 적합한 토질 시험을 해야 한다. 여러 모델들 중에서 널리 사용되고 있는 Duncan and Chang (1970)의 hyperbolic model이나 Roscoe et al. (1958), Roscoe and Burland (1968) 등의 modified cam-clay model 등은 압밀 비배수 삼축압축시험 결과로부터 모델 정수를 산출해야 한다. 그러나 전술한 것과 같이 관행적으로 압밀 비배수 삼축압축시험을 실시하지 않고 있으며 이러한 현실을 반영하여 한국산업규격도 「삼축압축시험에서 점성토의 비압밀, 비배수 강도 시험방법」은 규격 (KS F 2346:2022)이 있으나 압밀 비배수 삼축압축시험을 하려는 경우에는 관련 규격

<sup>a</sup> Department Manager, Korea Rural Community Corporation

<sup>b</sup> Professor, Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University

<sup>†</sup> Corresponding author

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

E-mail: [geotechkor@kongju.ac.kr](mailto:geotechkor@kongju.ac.kr)

Received: October 27, 2023

Revised: November 10, 2023

Accepted: November 14, 2023

이 없어서 ASTM D4767-11 (2020) 등 해외 규격을 참고해야 한다. hyperbolic model은 공극수압이 소산되지 않은 재하 직후의 거동을 잘 묘사하고 modified cam-clay model은 압밀이 진행되는 과정을 잘 묘사한다 (Lim, 1999). 압밀 비배수 삼축 압축 시험을 하지 않은 경우에도 hyperbolic model에 필요한 정수를 구할 수 있다면 실무에서 성토 안정 관리를 위한 수치 해석을 좀 더 수월하게 사용할 수 있을 것이다. Lee et al. (2007)은 피에조 콘 관입시험결과에 따른 구속탄성계수, 압밀 계수 산정에 관한 연구를 하였으나 그들이 사용한 구속탄성 계수는 Terzaghi 압밀이론의 체적압축계수의 역수를 일컫는 데 사용된 용어이다. Yoon et al. (2010)은 전단파 속도를 이용한 원지반 탐사에 의한 구속탄성계수가 20~65 MPa 라고 하였다. Terzaghi의 체적압축계수는 탄성과 압밀에 의한 압축을 포함한 용어이므로 구속 탄성계수라는 용어는 실제 의미를 정확하게 표현하지 못하는 용어이다. 이와 같이 탄성계수가 점토에서는 중요하게 평가되지 않았기 때문에 모래나 불포화 풍화토 등에서 주로 연구되었다. Kim and Kim (2004)은 모래에서 변형률 0.05 % 이전의 할선탄성계수가 261.50~1388.68 kPa의 범위에서 aging effect를 나타낸다고 했다. Oh (2012)는 풍화토의 초기 할선탄성계수가 400~700 MPa를 제시하여 큰 차이를 나타내고 있다.

이 연구는 수치해석에 필수적인 압밀 비배수 삼축압축시험을 대체할 수 있는 방법을 제시할 목적으로 표준압밀시험 결과를 정밀하게 해석하여 산출한 즉시침하량이 압밀시험 중에 흙의 탄성에 의해서 발현되는 거동이라고 전제하고 이를 이용하여 hyperbolic model의 초기탄성계수를 산출하는 방법을 제시하려고 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 해석에 사용한 압밀 시험 즉시 침하량 자료

이 연구에서 사용한 압밀 시험에 의한 즉시 침하량 자료 (Table 1)는 Kwon and Eam (2023)이 점토 시료의 표준압밀시험 결과를 Terzaghi (1923)의 압밀이론과 Mesri (1973)의 2차 압축 이론을 적용하여 정밀하게 산출한 결과이다. 여기서 즉시침하량은 1차 압밀침하 및 2차 압축침하에 의한 실측 자료의 curve fitting을 향상시키기 위해서 도입한 인자이므로 시간적 범위나 할선탄성계수와 같은 변형 범위가 없고 문자 그대로 이론적인 즉시침하량이다. Kwon and Eam (2023)은 2차 압축은 1차 압밀도 91~98 %인 압밀 중반기에 시작된다고 하였으므로 이 연구에서도 같은 조건에서 산출된 즉시 침하량을 이용하여 초기탄성계수를 산출하는데 이용하였다.

**Table 1** The Instant settlements from the curve fitting on standard consolidation test results

Consolidation stress (kPa)	Initial void ratio	Instant settlement $S_i$ (mm)	Initial thickness of sample $H_0$ (mm)
5	1.647	0	20
10	1.629	0.031	19.865
20	1.610	0.055	19.719
39	1.581	0.050	19.505
78	1.541	0.140	19.197
157	1.472	0.060	18.681
314	1.333	0.080	17.630
628	1.128	0.130	16.075
1255	0.922	0.180	14.519

삼축압축시험은 압밀 후 전단시킴으로 여러 개의 시료를 사용하지만 압밀시험은 탄성계수를 구하기 위해서 동일한 시료를 반복해서 사용하므로 조건이 일치하지 않는다. 압밀시험을 각 하중별로 다른 시료를 사용한다면 하중이 0에서 임의의 값으로 증가하게 되고 하중증가율을 산정할 수 없게 된다. 압밀시험은 하중증가율이 1인 경우에 이론과 실험이 비슷한 경향을 나타낸다 (Leonards and Altschaeffl, 1964). 각각 다른 시료로 압밀을 진행한다면 Terzaghi의 압밀이론을 적용할 수 없게 된다.

### 2. 수치해석모델

식 (1)은 Duncan and Chang (1970)의 hyperbolic numerical analysis model이다.

$$E_t = \left[ 1 - \frac{R_f \times (1 - \sin\phi') \times (\sigma_1' - \sigma_3')_f}{2c' \cdot \cos\phi' + 2\sigma_3' \cdot \sin\phi'} \right]^2 \cdot K \cdot P_a \cdot \left( \frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

여기서  $E_t$  : 탄성계수가 변하는 비선형 탄성해석 ( $\epsilon = \frac{1}{E_t} \sigma$ )

에서 여러 조건에 의해서 결정되는 점선탄성계수

$R_f$  : 삼축압축시험에서 축차응력의 최대값  $\sigma_{d,max}$ 의

hyperbolic curve의 점근선에 해당하는 응력( $\sigma_{ult}$ )에 대한 비

$\phi'$  : 유효응력에 의한 흙의 내부마찰각

$\sigma_1'$  : 삼축압축시험에서 유효 최대주응력

$\sigma_3'$  : 삼축압축시험에서 유효 최소주응력

$c'$  : 유효응력에 의한 흙의 점착력

$P_a$  : 대기압

$K, n$  : 삼축압축시험에 의해 초기탄성계수를 산출하고 가로축에  $\log(\sigma_3')$ 를 표시하고 세로축에  $\log(\text{초기탄성계수})$ 를 나타낸 그래프의 회귀직선에서 세로 절편이  $K$ 이고 직선의 기울기가  $n$ 이다.

hyperbolic model은 기본적으로 변형에 따른 축차응력이 쌍곡선을 따른다는 가정에서 출발하고 압밀 비배수 삼축압축시험의 결과도 쌍곡선으로 curve fitting을 한다.

따라서 변형에 따른 축차응력의 관계를 쌍곡선 형태인 식 (2)로 근사화한다.

$$\sigma_d = \frac{\epsilon}{a + b \cdot \epsilon} \quad (2)$$

여기서  $\sigma_d$  : 삼축압축시험의 축차응력  
 $\epsilon$  : 축변형률  
 $a, b$  : 쌍곡선 계수

식 (2)의 양변을  $\epsilon$ 으로 나누면 식 (3a)이고 다시 역수를 취하면 식 (3b)가 된다.

$$\frac{\sigma_d}{\epsilon} = E = \frac{1}{a + b \cdot \epsilon} \quad (3a)$$

$$\frac{\epsilon}{\sigma_d} = a + b \cdot \epsilon \quad (3b)$$

식 (2)의 우변에서 분모와 분자를 모두  $\epsilon$ 으로 나누면 식 (3c)가 된다.

$$\sigma_d = \frac{1}{\frac{a}{\epsilon} + b} \quad (3c)$$

식 (3a)에서  $\epsilon = 0$ 을 적용하면 초기탄성계수 식 (4)가 된다.

$$E_i = \frac{1}{a} \quad (4)$$

식 (3c)에서  $\epsilon = \infty$ 를 적용하면 점근선 응력에 해당하는 쌍곡선의 극한응력은 식 (5)가 된다.

$$\sigma_{d,ult} = \frac{1}{b} \quad (5)$$

쌍곡선의 점근선 응력과 실험 결과에서 파괴시의 응력  $\sigma_{d,max}$ 와의 비를 나타내는  $R_f$ 는 식 (6)이 된다.

$$R_f = \frac{\sigma_{d,max}}{\sigma_{d,ult}} \quad (6)$$

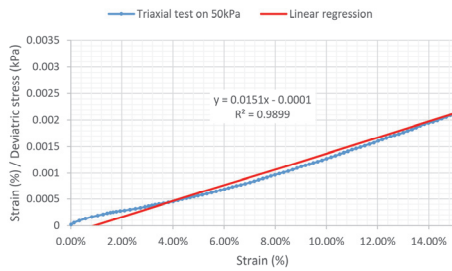
### 3. 검증을 위한 압밀 비배수 삼축압축시험 결과

Fig. 1은 압밀 비배수 삼축압축시험 결과로부터 hyperbolic model parameter인  $K$ 와  $n$ 을 산출하는 과정이다. 시료는 압밀 시험에 사용한 시료와 같은 시료이다. Fig. 1(a)는 최소주응력 ( $\sigma_3$ , 또는 구속압력)을 50 kPa 가한 상태에서 24시간 동안 압밀을 시키고 비배수 조건으로 변경한 후에 시료 내부의 공극수압이 균일한 상태를 유지할 수 있는 정도로 충분히 느린 속도 (ASTM D4767-11, 이 연구에서는 0.2 %/min를 적용)로 일정하게 유지하면서 축방향 압축을 하고 일정한 시간 간격으로 축차응력 ( $\sigma_d$ )을 측정한다. 압밀 비배수 삼축압축시험 결과를 식 (3b)의 형태로 나타내기 위해서 가로축은 축변형률로 설정하고 세로축은  $\epsilon/\sigma_d$ 로 설정하여 표시한 그래프이다. 그래프 전체에 대해서 회귀직선을 구하면 식 (3b)의  $a$ 에 해당하는 값이 음수를 나타내어 실험 결과와 유사한 패턴의 쌍곡선을 얻을 수 없다. 따라서 실험 결과의 일부만 쌍곡선과 일치시키기 위해서 Fig. 1(a)의 일부 구간만 선별하여 회귀직선을 구하고 식 (3b)의 세로축 절편에 해당하는  $a$ 와 기울기에 해당하는  $b$ 를 구해야 한다. 실험 결과로부터 쌍곡선을 얻기 위해서 회귀직선을 이용하는 방법은 Tan (1994)의 방법에서도 적용하고 있는 일반적인 방법이지만 여러 가지 오류들이 포함되어 있어서 이론과 정확하게 일치하지 않는 실제 실험 결과에 적용하면 약간의 변화만으로도 전혀 다른 형태의 쌍곡선이 나타나므로 실험 결과와 일치하는 정도를 확인하면서 반복적으로 조정을 해야 하는 단점이 있다. Fig. 1(b)는 이러한 과정을 거쳐서 시료가 파괴되기 전까지만 쌍곡선이 일치하도록 조정된 결과이다. 이 과정에서 hyperbolic model parameter인  $K$ 와  $n$ 을 구하는데 필요한 초기탄성계수  $E_i$ 가 식 (4)에 의해서 산출이 되므로 함께 표시하였다. Fig. 1(c)~(f)는 Fig. 1(b)에서와 동일한 과정을 통해  $\sigma_3$ 를 각각 100, 150, 200, 300 kPa로 유지하면서 시험한 결과에 쌍곡선을 적용한 것이다. 압밀 비배수 전단시험이므로 전단을 시작할 때는  $\sigma_3 = \sigma_3'$ 였고 전단이 진행되면서 시료 내부의 공극수압이 0에서 점진적으로 상승하다가 전단 중반부에서는 대체로 일정한 값을 유지하였다. Fig. 1(g)는  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위해서  $\log_{10}(\sigma_3)$ 를 가로축으로 하고  $\log_{10}(E_i)$ 를 세로축으로 한 관계를 나타낸 것이다. 비교적 양호한 직선 경향을 나타내고 있다. 전술한 과정과 식

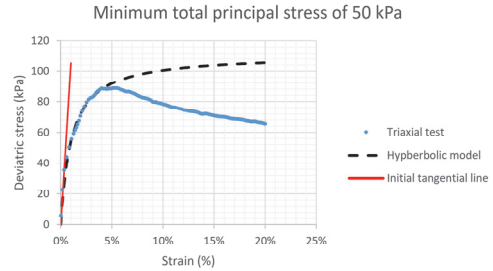
(5) 및 식 (6)에 의한  $R_f$ 값까지 산출한 모든 parameter들을 Table 2에 나타내었다.

압밀시험은 측방 변위가 구속되는 반면 삼축압축시험은 측방 변위가 진행이 되지만 압밀시험은 정지토압 상태에서부터

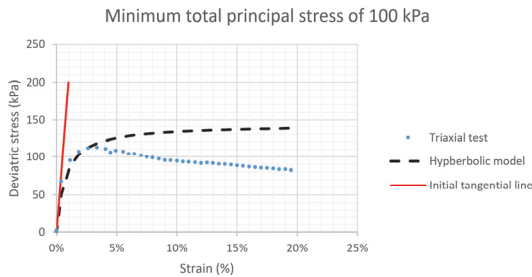
구속압력을 산출하고 삼축압축시험은 구속압력을 기계적으로 일정하게 유지시켜주므로 정확하게 동일한 조건은 아니지만 비슷한 조건이 형성된다고 설정하였다. 횡방향 변위가 구속된 압밀시험에서의 탄성계수 ( $E_{oed}$ )와 구속되지 않은 삼축



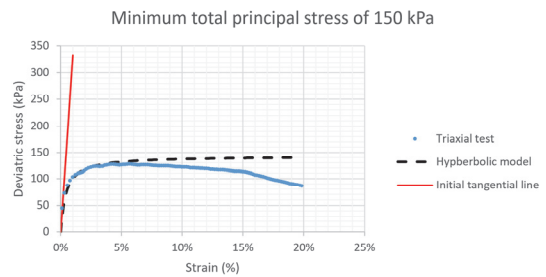
(a) The regression line of hyperbolic curve on triaxial test result



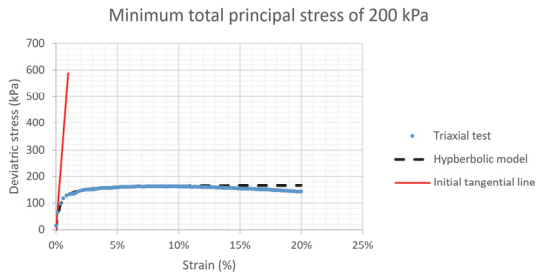
(b) Initial tangential line of hyperbolic curve on  $\sigma_3 = 50$  kPa



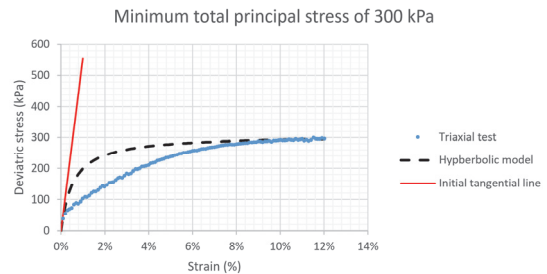
(c) Initial tangential line of hyperbolic curve on  $\sigma_3 = 100$  kPa



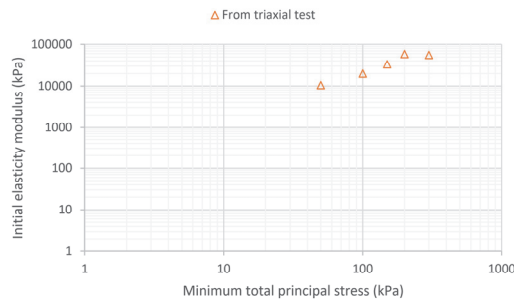
(d) Initial tangential line of hyperbolic curve on  $\sigma_3 = 150$  kPa



(e) Initial tangential line of hyperbolic curve on  $\sigma_3 = 200$  kPa



(f) Initial tangential line of hyperbolic curve on  $\sigma_3 = 300$  kPa



(g) The graph for estimating hyperbolic model parameters of K and n

Fig. 1 The estimation process of hyperbolic model parameters

**Table 2** Hyperbolic model parameters from laboratory triaxial tests

$\sigma_3'$	50	100	150	200	300
$a$ (Intercept)	9.503E-05	5.000E-05	3.000E-05	1.700E-05	1.800E-05
$b$ (Slope)	0.0090	0.0070	0.0070	0.0060	0.0032
$E_i$	10523	20000	33333	58824	55556
$\sigma_{d,ult}$	111	143	143	167	309
$\sigma_{d,max}$	89	112	127	161	299
$R_f$	0.80	0.79	0.89	0.96	0.97

압축시험에서의 초기탄성계수 ( $E_i$ )의 관계는 아래 식 (7)로 나타낼 수 있다 (MIDAS).

$$E_i = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} E_{ocd} \quad (7)$$

**4. 압밀시험결과 해석에 필요한 정지토압계수 산출 방법**

압밀시험은 정지 토압 상태에서 진행이 되고 어느 재하 단계가 종료되면 공극수압은 0이 되므로 다음 단계 재하 직전의 응력 상태는  $\sigma_3 = \sigma_3'$  인 압밀 비배수 삼축압축시험의 전단 직전의 상태와 동일하다. 압밀에서의 즉시침하량은 재하에 의해 발생한 과잉공극수압이 소산되는 기간이 매우 짧으므로 압밀 비배수 삼축압축시험에서의 초기탄성계수  $E_i$ 가 작용하는 상태와 비슷하다. 따라서 압밀 재하 직후의  $\sigma_3'$ 를 알기 위해서 정지토압계수  $K_0$ 를 산정하는 Brooker and Ireland (1965)의 식 (8)을 사용하였다. Fig. 1(b)~(f)로부터 산출한 유효응력에 의한 흙의 내부마찰각  $\phi'$ 는 29 °이다.

$$K_0 = 0.95 - \sin(\phi') \quad (8)$$

식 (8)을 사용하려면 압밀 비배수 삼축압축시험을 해야  $\phi'$ 를 구할 수 있으므로 상호참조를 하는 무한 순환 과정이 형성이 되어서 압밀시험만으로 점선탄성계수를 구하려는 목적에 부합하지 않지만 이 논문에서 제안하는 방법의 정확한 검증 을 위해서 사용하였으며 압밀 비배수 삼축압축시험을 하지 않아서  $\phi'$ 를 모를 경우에는 Kenney (1959)가 제시하고 Alpan (1967)이 추천한 식 (9)를 사용할 수 있다.

$$K_0 = 0.19 + 0.233 \log(P_I) \quad (9)$$

여기서  $P_I$  : 소성지수

**III. 결과 및 고찰**

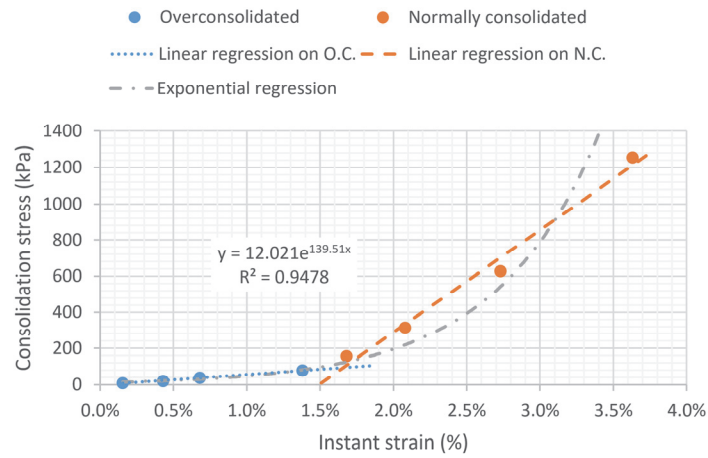
**1. 압밀응력과 누적즉시침하량에 의한 탄성계수**

Table 3에서 5~1255 kPa까지 압밀 전체 재하 단계에서 발

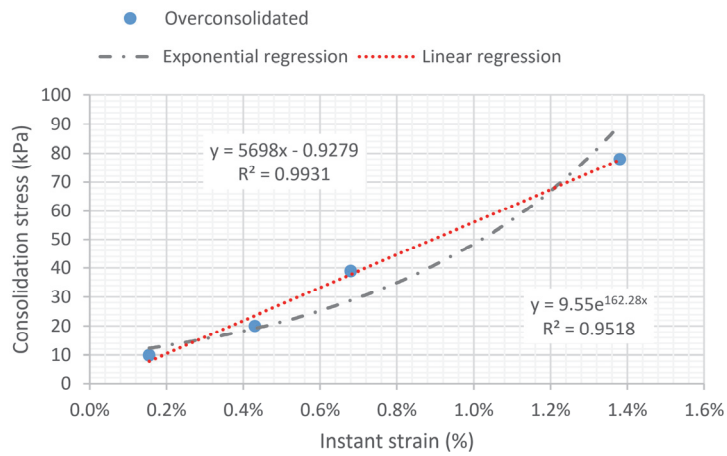
**Table 3** The strain of the accumulated instant settlement

$n$	① Consolidation stress (kPa)	② Initial void ratio	③ Instant settlement $S_i$ (mm)	④ Initial height of sample $H_0$ (mm)	⑤= $\sum_{i=1}^n$ ③ Accumulated instant settlement (mm)	⑥=⑤/ $H_{0(n=1)}$ strain of the accumulated instant settlement (mm)
1	5	1.647	0	20	0	0.00%
2	10	1.629	0.031	19.865	0.031	0.16%
3	20	1.610	0.055	19.719	0.086	0.43%
4	39	1.581	0.050	19.505	0.136	0.68%
5	78	1.541	0.140	19.197	0.276	1.38%
6	157	1.472	0.060	18.681	0.336	1.68%
7	314	1.333	0.080	17.630	0.416	2.08%
8	628	1.128	0.130	16.075	0.546	2.73%
9	1255	0.922	0.180	14.519	0.726	3.63%

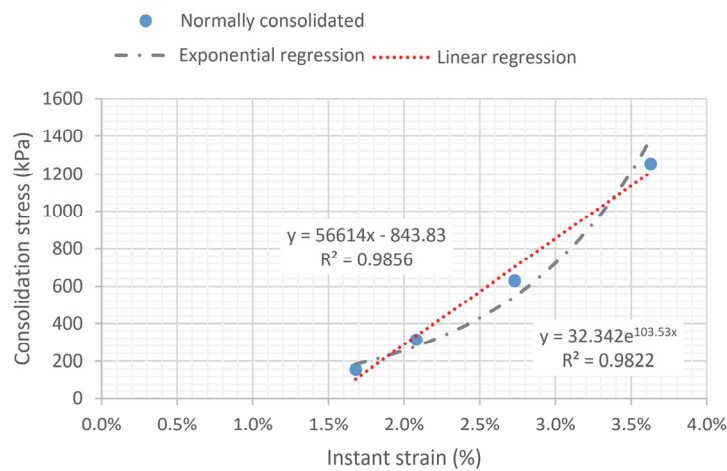




(a) Different elastic modulus before and after preconsolidation stress



(b) Elastic modulus on overconsolidated stress range



(c) Elastic modulus on normally consolidated stress range

**Fig. 2** The comparisons of elastic modulus between the overconsolidated and normally consolidated ranges and the linear and nonlinear relationships

생하는 즉시침하를 성질이 동일한 하나의 시료로 보고 각 단계별로 산출된 즉시침하량을 누적한 후에 시료의 압밀시험 전 두께를 기준으로 변형률을 산정하였다. 실제로는 각 단계별로 압밀이 진행되었기 때문에 단계가 증가할수록 밀도도 증가하는 물리적 성질이 다른 시료이지만 분석 결과 즉시침하에 관한 한 물리적 성질이 동일한 하나의 시료로 간주할 수도 있는 결과가 나타났다. 즉시침하량을 유발하는 원인은 압밀재하응력이므로 압밀응력의 탄성재료의 변형률에 대응하는 축방향 응력으로 설정하였다. Fig. 2는 Table 3의 결과로부터 탄성계수를 파악하기 위해서 가로축에 누적변형률 (⑥)을 나타내고 세로축에 압밀응력 (①)을 나타내어 탄성계수를 비교한 것이다.

Fig. 2(a)는 압밀 전체 단계에 대해서 변형률과 압밀응력을 나타낸 것이며 이 시료의 선행압밀응력인 80 kPa (Kwon and Eam, 2023)를 기준으로 탄성계수를 의미하는 직선의 기울기가 구분되고 있다. 과압밀 영역은 과거에 소성 압축이 발생하여 재하응력에 비해 조직이 상대적으로 치밀한 상태이므로 즉시침하량이 정규압밀 영역보다 더 클 것으로 예상하였으나 반대의 결과를 얻었다. 이것은 판상형 흙 입자의 치합 구조가 과압밀영역 범위에서는 이미 파괴되었기 때문이라고 원인을 규명할 수도 있을 것이다. 한편 당초 세웠던 가설대로 압밀에 의해서 밀도가 증가하므로 각 재하 단계별로 물성이 단단한 다른 시료라면 탄성계수도 지수적 관계로 나타날 것으로 예상되어서 지수함수 곡선으로 추세선을 탐색하였으며 결정계수 값이 0.9 이상으로 높은 상관성을 나타내고 있다. Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)는 이상의 두 가지 해석을 좀 더 상세하게 살펴보기 위해서 과압밀영역에 해당하는 네 개의 점과 정규압밀영역에 해당하는 네 개의 점을 분리하여 나타낸 것이다. 점의 수가 각각 다섯 개 미만이므로 통계적인 의미를 부여할 수는 없다는 것에 유의해야 한다. 과압밀영역인 Fig. 2(b)에서는 선형추세선의 결정계수가 지수 추세선의 결정계수보다 더 높았으나 그 차이는 미미했다. Fig. 2(c)에서도 비슷한 경향이 나타났으나 그 차이는 더욱 좁혀져서 선행압밀응력을 기준으로 구분하는 것은 명확한 차이점을 만들어 낼 수 없었으며 Fig. 2(a)에서 비록 직관적으로는 선행압밀응력을 기준으로 탄성계수가 구분되는 것처럼 보이지만 시료의 상태가 변하면 변화율은 현재의 시료 상태에 비례한다는 일반적인 사실과 이에 따라서 압밀시험의 압축지수도 반대수 축척에서 선형관계를 나타낸다는 점들을 고려하면 전체를 하나의 지수함수 관계로 보는 것이 타당할 것으로 판단된다. Park and Jeong (2018)은 점토질 흙 165개, 모래질 흙 117개, 자갈질 흙 9로 총 291개의 시료에 대해서 직접전단시험을 하고 할선탄성계수 등에 대해서 분석하였다. 모래질 흙에서는 하중이 2배씩

증가할수록 탄성계수는 약 80%씩 증가하는 경향을 나타내었다고 하였다. 점토에서는 하중이 2배씩 증가할수록 탄성계수는 10%, 20%, 40%씩 증가하는 경향을 나타낸다고 하였다.

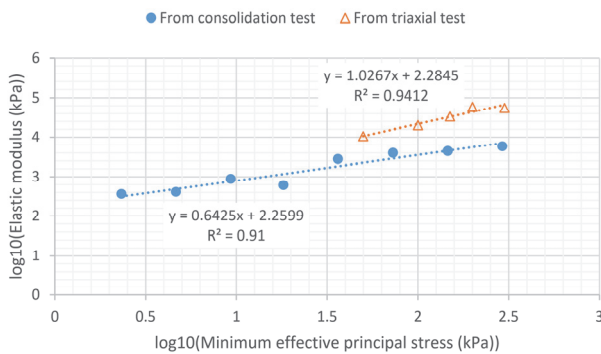
Fig. 2(a)의 지수함수 곡선 관계는 각각의 단계별 압밀에 의한 압축을 무시하였기 때문에 흙의 응력-변형 거동에 직접적으로 사용할 수는 없으나 재하응력이 커지면 선행압밀응력과 무관하게 탄성계수의 역수인 강성도 지수적으로 커지기 때문에 탄성 변형은 더 작아진다는 것을 정성적으로 인식할 수 있다.

## 2. 압밀시험에서의 최소주응력과 즉시침하량에 의한 초기탄성계수

압밀시험결과를 분석하여 얻은 각 재하 단계별 즉시침하량 (Kwon and Eam, 2023)으로부터 초기탄성계수를 산정하여 Table 4에 나타내었다. Duncan and Chang (1970)의 hyperbolic model parameter인  $K$ 와  $n$ 은  $\sigma_3'$ 와 초기탄성계수  $E_i$ 의 관계로부터 산출한다. 압밀시험의 각 재하 단계에서 압밀이 종료된 상태의 압밀응력을 초기의 최대 주응력으로 볼 수 있고 식 (8)을 이용해서 최소주응력  $\sigma_3'$ 를 구할 수 있다. 이 상태에서 추가되는 압밀응력  $\Delta\sigma$ 가 하중 증가율 1:1을 유지하면서 주어지므로  $\Delta\sigma = \sigma_1'$ 이다. hyperbolic model parameter인  $K$ 와  $n$ 은 가로축과 세로축이 모두 log 축척인 관계로부터 산출이 되지만 분석에 사용한 Microsoft EXCEL의 추세선은 지원하지 않는 기능이므로  $\sigma_3'$ 와  $E_i$ 의 상용로그 값을 각각 계산하고 추세선을 분석하여 Fig. 3에 나타내었고 압밀 비배수 삼축압축시험으로부터 직접 얻은 Fig. 1(g)의 결과도 함께 나타내었다. 표준압밀시험에 의한 탄성계수 ( $E_{ocd}$ )를 삼축압축시험의 초기탄성계수 ( $E_i$ )로 변환하려면 포아송비 ( $\nu$ )가 필요하다. 포화된 흙에서 물과 흙입자는 실용적인 범위에서 각각 비압축성으로 간주하므로 포아송비를 0.5로 생각할 수 있으나 수치해석 오류가 발생하지 않도록 0.49를 적용하는 것이 일반적이다. 그러나 이 연구에서는 재료 (Kwon and Eam, 2023)의 물리적 성질로 산출한 포화도가 약 94%임을 고려하여 포아송비를 0.48를 적용하였다. 압밀시험에 의한 방법은 여덟 단계의 재하 단계로 인해서 구속압력을 다섯 단계만 적용한 삼축압축시험보다 더 명확한 선형성을 나타내고 있다. 좌측 하부에 표시한 회귀식은 압밀시험에 의한 자료를 분석한 결과이고 우측 상부에 표시한 회귀식은 삼축압축시험에 의한 자료를 분석한 결과이다. 압밀시험의 회귀식에서 세로 절편값은  $\log_{10}(K)=2.2599$ 으로  $K=10^{2.2599} \approx 182$ 이고 회귀직선의 기울기  $n=0.64$ 이다. 삼축압축시험의 회귀식에서 세로 절편값은  $\log_{10}(K)=2.2845$ 으로  $K=10^{2.2845} \approx 193$ 이고 회귀직선

**Table 4** The initial elastic modulus estimated from the instant settlement obtained by analyzing the results of the standard consolidation test

① Initial maximum effective principal stress $\sigma_1'$ (kPa)	$K_0 = 0.95 - \sin(29^\circ) \approx 0.47$		④=③(Table 3) / ④(Table 3) Strain of instant settlement (%)	⑤=③/④ Initial elastic modulus $E_{ocd}$ (kPa)	⑥ $E_i$ from equation (7) at $\nu = 0.48$	⑦ $\log_{10}(\sigma_3')$	⑧ $\log_{10}(E_i)$
	②=①× $K_0$ $\sigma_3'$ (kPa)	③ $\Delta\sigma$ (kPa)					
5	2.32595	5	0.16%	3204	365	0.36660	2.56202
10	4.65190	10	0.28%	3585	408	0.66763	2.61084
20	9.30381	20	0.26%	7802	888	0.96866	2.94852
39	18.14242	39	0.73%	5348	609	1.25870	2.78449
78	36.28485	78	0.32%	24285	2765	1.55973	3.44166
157	73.03489	157	0.45%	34599	3939	1.86353	3.59538
314	146.06978	314	0.81%	38827	4420	2.16456	3.64546
628	292.13956	628	1.24%	50655	5767	2.46559	3.76094



**Fig. 3** The relationship between elastic modulus and minimum effective principal stress

의 기울기  $n = 1.03$ 으로 큰 차이를 나타내고 있다. Duncan and Chang (1970)은 느슨한 모래에서  $K$ 를 295,  $n$ 은 0.65를 제시하고 있으므로 점토의 압밀시험으로부터 산출한 값들이 느슨한 모래와 비슷한 것으로 나타났다.  $K$ 는 세로 절편값이므로 삼축압축시험결과를 분석하는 과정에서도 회귀직선에 사용할 자료를 어떻게 선정하느냐에 따라서도 큰 차이를 나타낼 수 있고 Fig. 1에 대한 기술에서도 언급한 것처럼 쌍곡선의 특성이므로 적용에 주의를 해야 한다. 현장에서 작용할 것으로 예상되는 응력 범위에서 분석을 하면 오차를 줄일 수 있다.

### 3. 흙의 내부마찰각의 민감도 분석

이 연구의 목적은 압밀 비배수 삼축압축시험을 하지 않은 현장에 대해서도 정밀한 수치해석을 할 수 있도록 압밀시험

**Table 5** The sensitivity analysis of  $\phi'$

$\phi'$	$K$	$n$	Rate of change	
			$\phi'$	$K$
20	153	0.64	0%	0%
22	159	0.64	10%	4%
24	165	0.64	20%	7%
26	171	0.64	30%	12%
28	178	0.64	40%	16%
30	186	0.64	50%	21%
32	194	0.64	60%	27%
34	203	0.64	70%	33%
36	214	0.64	80%	39%

결과로부터 필요한 정보를 산출하는 것인데 산출 과정에 식 (8)을 적용하여 삼축압축시험에 의한 흙의 내부마찰각을 사용하였으므로 검증에 위해서 필요한 과정이지만 목적에 부합하지는 않는다. 따라서 소성지수를 이용하는 경험식 식 (9)를 함께 제시하고 있으나 경험식은 정확성이 떨어질 수 있으므로 흙의 내부 마찰각이 결과에 미치는 영향을 분석하여 그 중요성을 평가하였다. Table 5는 흙의 내부마찰각  $\phi'$ 를  $20^\circ \sim 36^\circ$ 까지 변화시킬 때  $K$ 와  $n$ 의 변화를 나타낸 것이다.  $\phi'$ 는  $\sigma_3'$ 를 산출하는 과정에서만 이용되므로 Fig. 3의 그래프에서 초기탄성계수  $E_i$ 는 같은 값을 유지하면서 수평 이동을 하고 기울기  $n$ 은 변동이 없다.  $\phi'$ 가 80% 변화하는 경우에  $K$ 는 39%만 변했으므로 민감도는 약 1/2 정도로 평가할 수 있다. 그러므로 다른 차선택이 없는 경우에 경험식인 식 (9)를 사용하는 것도 고려해볼 수 있다.



## IV. 결론

인공적으로 만든 균질한 재료들과는 다르게 자연 상태인 흙의 탄성계수를 구하는 과정은 오차가 발생할 가능성을 내포하고 있다. 흙의 응력-변형 거동이 비선형적이기 때문에 파괴시 응력의 1/2을 기준으로 할선탄성계수를 사용하는 경우도 많다. 흙은 구속압력에 따라서 탄성계수가 변하는 특성이 있으므로 거동을 해석하는 수치해석 모델들도 필연적으로 복잡한 요소들을 포함하고 있다. 연약 지반에서 재하 직후의 거동을 비교적 정확하게 모사하는 hyperbolic model은 압밀 비배수 삼축압축시험의 응력-변형 곡선이 쌍곡선이라고 전제하고 시작점에서의 접선의 기울기를 필요로 한다. 그러나 실제 삼축시험에서 구한 응력-변형 곡선에서 초기 접선의 기울기는 구속압력의 변화에 따른 규칙성을 갖기 어렵다. 또한 쌍곡선의 특성에 의해서 관련 인자들의 작은 변화에도 쌍곡선의 변화는 크다. 그러므로 삼축시험 결과에서 모델 인자들을 산출하는 과정에 많은 임의성이 있고 그로 인해서 결과에도 큰 차이를 발생시키므로 이 연구에서 제시한 압밀시험에 의한 초기탄성계수 산정 방법은 삼축시험에 의한 방법을 검증하는 데에도 적용될 수 있다. 그러나 이 연구에서는 전형적인 압밀 특성을 나타내는 한 가지 시료에 대해서만 적용하였으므로 향후에 다양한 물리적 성질을 갖는 시료에 대해서도 확인할 필요가 있다.

## 감사의 글

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

## REFERENCES

- Alpan, I., 1967. The empirical evaluation of the coefficient  $K_0$  and  $K_{0R}$ . *Soil and Foundation* 7(1): 31-40.
- American Standard Testing Material, 2020. ASTM D4767-11 : 2020 Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils.
- Brooker, E. W., and H. O. Ireland, 1965. Earth pressures at rest related to stress history. *Canadian Geotechnical Journal* 2(1): 1-15.
- Duncan, J. M., and C. Y. Chang, 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* 96(SM5): 1629-1653.
- Kenney, T. C., 1959. Discussion of "Geotechnical properties of glacial lake clays". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 85(3): 67-79.
- Kim, Y. S., and D. M. Kim, 2004. Characteristics of undrained static shear behavior for sand due to aging effect. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 20(6): 137-150. (in Korean).
- Korean Agency for Technology and Standards, 2022. KS F 2346 : 2022 Test method for unconsolidated undrained strength of cohesive soils in triaxial compression test. (in Korean).
- Kwon, B. H., and S. H. Eam, 2023. A Study on the beginning point of secondary compression in consolidation theory. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 65(6): 51-63. (in Korean).
- Lee, K. S., N. Ku, and W. Han, 2007. The estimation of the constrained modulus and the coefficient of consolidation from the piezocone penetration test data. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society* 8(4): 47-55. (in Korean).
- Leonards, G. A., and A. G. Altschaeffl, 1964. Compressibility of clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 90(SM5): 133-155.
- Lim, S. H., 1999. Final settlement prediction methods of embankment on soft clay by back analysis. A thesis for the degree of Master of Agriculture, Chungnam National University. (in Korean).
- Mesri, G., 1973. Coefficient of secondary compression. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 99(SM1): 123-137.
- MIDAS. GTS NX USER MANUAL > Mesh > Property, Coordinate, Function > Material > Material Property(General). <http://manual.midasuser.com/KR/GTS%20NX/340/GTX.htm>. Accessed 27 Oct. 2023
- Oh, B. S., 2012. Evaluation of deformation characteristics of residual soils under  $K_0$  condition at full strain ranges. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 12(5): 121-126. (in Korean).
- Park, C. S., and J. G. Jeong, 2018. Characteristics of shear strength parameters of various soils by direct shear test. *Tunnel and Underground Space* 31: 584-595. (in Korean).
- Roscoe, K. H., and J. B. Burland, 1968. On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay. In *Engineering Plasticity* ed Heyman, J., and F. A. Leckie, des, 535-609. Cambridge University Press, Cambridge.

17. Roscoe, K. H., A. N. Schofield, and C. P. Wroth, 1958. On the Yielding of Soils. *Geotechnique* 8: 22-53.
18. Tan, S. A., 1994. Hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 125-131.
19. 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.
20. Sharma, L. K., R. Singh, R. K. Umrao, K. M. Sharma, and T. N. Singh, 2017. Evaluating the modulus of elasticity of soil using soft computing system. *Engineering with Computer: An International Journal for Simulation-Based Engineering* 33(3): 497-507.
21. Yoon, H. K., D. H. Kim, W. J. Lee, and J. S. Lee, 2010. Field elastic wave and electrical resistivity penetrometer for evaluation of elastic moduli and void ratio. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C* 30(2C): 85-93. (in Korean).