다층지반의 지중응력산정기술에 대한 현장 적용성 평가

Field Application for Evaluating Vertical Stress of Soil in Multilayered Ground

김지성* · 임은상** · 강기천***

Kim, Jiseong*, Im, Eun-Sang**, and Kang, Gichun***

Abstract

In the west coast and the coast of Busan, at several locations, an overconsolidated layer exists above the soft ground. For soft ground with an upper overconsolidated clay layer, significant errors exist between the design and the actual settlements in the field. For multilayered ground, although Boussinesq's theory is applied, significant errors still exist. In this study, ground settlements in the overconsolidated clay layer were predicted using the Burmister and Hirai method. Based on comparisons with field measurements, it was confirmed that the accuracy could be increased by more than 90%.

Key words : Multi-layered, Overconsolidation, Vertical Stress, Ground Settlement

요 지

우리나라 서해안 및 부산연안의 경우 연약지반 상부에 과압밀층이 존재하는 경우가 많다. 상부 과압밀층이 존재하는 연약지반의 경우 설계침하량과 실측침하량의 오차가 크게 발생하고 있다. 특히 다층지반의 경우 Boussinesq의 이론을 적용하고 있지만, 이 역시 오차가 크게 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 Burmister와 Hirai의 이론식을 과압밀층이 연약지반 상부에 존재하는 지층에 적용 가능한지에 대한 검증을 실시하였고, 현장 계측치와 비교한 결과 정확도를 90% 이상 높일 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 다층지반, 과압밀, 지중응력, 압밀침하량

1. 서 론

연약지반위에 성토 등의 하중이 재하 되면 지반 내부에서는 하중에 상당하는 응력이 발생하게 된다. 이 지중응력의 예측은 장비 주행성 등의 지지력 안정성에 대한 평가뿐만 아니라 침하량 산정에도 활용이 되기 때문에 정확하고 신뢰성 있는 지중응력 산정은 연약지반 설계에 있어 중요한 요인이 된다. 일반적으로 지중응력을 산정하는 방법으로 탄성해석법, 근사해법 등 수치해석법이 주로 사용되며, 이중 탄성해석법으로서 Boussinesq (1885) 이론식이, 근사해법으로는 Kögler (1927) 이론식이 가장 널리 사용되고 있다.

그러나 이들 이론식은 지반이 균질하다는 가정하에서 도입되었기 때문에 본 연구에서 다루고자 하는 연약지반의 상부에 과압밀층이 존재하는 지반조건 즉 지반의 특성이 서로 다른 토층으로 이루어진 지역에서는 상재하중의 지중 전달 메커니즘이 달라질 수밖에 없기 때문에 신뢰성 있는 지중응력을 산정하기에 부족한 부분들이 있다. 그럼에도 불구하고 도로성토에 대한 압밀침하량 설계기법은 이러한 지반조건의 차이를 고려하지 않고 있으며, 압밀침하량 설계시 Boussinesq (1885) 이론식을 적용함에 따라 침하량이 과대 평가되는 경우들이 발생하고 있다.

기존의 다층지반에서 지중응력의 산정은 도로나 비행장

*정회원, 전주비전대학교 지적토목학과 조교수(E-mail: sea166@naver.com)

Member, Assistant Prof., Dept. of Cadastre & Civil Eng., Vision College of Jeonju

**정회원, K-water연구원 물인프라안전연구소 책임연구원

Member, Principal Researcher, Water Infrastructure Research Center, KWRI, K-water

***교신저자, 정회원, 경상국립대학교 공과대학 토목공학과 부교수(Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: gkang@gnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, College of Engineering, Gyeongsang National University

의 설계를 위한 연구로 진행되었으며, 그 중 지반공학 분야에 적용 가능한 이론은 Burmister (1958)가 제안한 이론식이라 할 수 있다. Burmister (1958)의 이론식은 Palmer and Barber (1940)가 제시한 이중탄성지반에 대한 등가심도개념을 도입하고 Boussinesq (1885) 이론을 적용하여 연직지중응력을 산정하였다. 또한 Hirai (2007)는 2:1분포법을 적용하여 지중 응력 및 침하를 산정할 수 있는 방안을 제시하였다.

국내의 부산 및 서해안의 경우 연약한 토층의 상부에 단단한 토층이 존재하는 지역들이 다수 분포되어 있다. 이와 같은 환경에서는 상부의 견고한 토층으로 인하여 상부에 하중이 작용하더라도 하부의 연약한 토층에서의 응력이 집중되는 경향은 줄어들 것이라고 예상된다. 실제로 Burmister (1943)는 휨성토층 구조를 갖는다고 가정하여 이와 같은 다층지반에서의 지중응력 문제를 다루었으며, 이후 Fox (1948) 및 Mehta and Veletsos (1959) 등에 의해 보다 심도있는 연구로 발전시켰다.

본 연구에서는 Burmister (1958)과 Hirai (2007)의 이론식이 국내 연안에 분포해있는 과압밀층이 연약지반 상부에 존재하는 지층에 적용 가능한지에 대한 검증을 하고자 하며, 이를 위해 서해안 ○○지구의 실제 침하량 값과 비교분석을 통해 적용성을 검증하고자 한다.

2. 2층 지반에서의 지중응력 산정이론 적용을 위한 현장조사

2.1 Burmister (1958) 및 Hirai (2007)의 이론식 적용

○○지구의 압밀침하 설계량 및 다층지반의 지중응력산정 방법에 대한 신뢰성 검토를 위하여 Boussinesq (1885) 이론에 등가심도이론을 적용한 Burmister (1958)의 이론식 Eq. (1)과 근사해법인 2:1분포법에 등가심도이론을 적용한 Hirai (2007)의 이론식 Eq. (2)를 적용하여 지중응력을 산정하였다.

상부 및 하부지반의 강성비 즉 탄성계수비(E_H/E_n)에 의존성을 분석하기 위하여 지반공학에서 가장 널리 적용되고 있는 Das (1998)가 제안한 탄성계수를 고려할 경우에는 점성토의 탄성계수비는 $E_H/E_n = 1 \sim 25$ 의 범위에 있기 때문에 이를 감안하여 직사각형 하중에 대하여 $E_H/E_n = 1, 10, 100$ 에서의 연직응력을 산정하였고, 기타 입력인자는 Table 1과 같이 적용하였다.

Table 1. Input Value for Calculating Vertical Stress

Width of surcharge load	20 m
Length of surcharge load	1,000 m
Elastic modulus ratio	1 / 10 / 100
Depth of overconsolidated clay layer	5 m

$$\Delta\sigma_z = \frac{2q}{\pi} \left[\frac{mn}{\sqrt{1+m^2+n^2}} \frac{1+m^2+2n^2}{(m^2+n^2)(1+n^2)} + \sin^{-1} \frac{m}{\sqrt{m^2+n^2} \sqrt{1+n^2}} \right] \quad (1)$$

여기서, $m = L/B$

$n = 2z/B$

B : 기초의 폭(m)

L : 기초의 길이(m)

z : 심도(m)

q : 등분포하중(kN/m²)

$$\Delta\sigma_v = \left(\frac{B \cdot L}{B_{je} \cdot L_{je}} \right) q \quad (2)$$

여기서, $B_{je} = B - D_f + \sum_{k=1}^{j-1} H_{ke}$

$L_{je} = L - D_f + \sum_{k=1}^{j-1} H_{ke}$

Fig. 1은 Burmister의 이론식으로 산정한 각 탄성계수비에 의한 상재하중폭·과압밀심도 비의 영향을 보여주는 그림으로써 상재하중폭이 감소하거나 과압밀심도가 증가할수록 연직응력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 예를 들어 Table 1의 지반조건인 $B/z = 4$ 인 경우, 탄성계수비가 $E_H/E_n = 1$ 인 경우에는 상재하중의 96%, $E_H/E_n = 10$ 일 경우에는 79%, $E_H/E_n = 100$ 일 경우에는 상재하중의 49%만 지중에서 연직응력으로 작용하게 된다.

Fig. 2는 Hirai이론식을 적용한 경우로, 이 이론식 역시 상재하중폭이 감소하거나 과압밀심도가 증가할수록 연직응력이 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 상기의 Burmister이론식에서와 마찬가지로 Table 1의 지반조건인 $B/z = 4$ 인 경우일 때의 지중 연직하중의 비를 살펴보면 탄성계수비가 $E_H/E_n = 1$ 인 경우, 80%, $E_H/E_n = 10$ 일 경우에

Fig. 1. Calculation Result of Vertical Stress by Applying Burmister's Theory

는 64%, $E_H/E_n = 100$ 일 경우에는 45%로서 **Bumister**이론식보다 더 작은 연직응력이 지중에 발생하는 것을 알 수 있다.

3. 현장 적용성 검증

○○지구 시험성토 부지는 Fig. 3과 같이 성토고 9 m, 6 m, 3 m, 1.5 m 구간으로 나뉘어져 있다. ○○지구 시험성토 구간에 대한 침하량을 산정하기 위하여 압축지수(C_c), 팽창지수(C_r) 및 과압밀비(OCR), 초기간극비(e_0) 등을 역학시험결과로부터 Table 2와 Fig. 4에 나타난 바와 같이 산정하였다. 지반정수는 Kim et al. (2020)이 제안한 수정된 압축지수와 과압밀비를 적용하였다. 지반정수 값을 구하기 위한 시험위치는 성토전(NH-1, NH-2) 및 성토후(NNH-1, NNH-2)로 나타냈으며, NH-1과 NNH-1은 성토고 9 m의 위치이며, NH-2와 NNH-2는 성토고 6 m의 위치다.

3.1 기존 압밀설계

○○지구 시험성토구간은 과압밀상태에 있기 때문에 과압밀 조건($P_o \leq P_c$)에서의 압밀침하량을 산정하기 위하여 Terzaghi and Peck (1967)의 압밀침하량 산정식 Eqs. (3), (4)를 적용하였다.

- $P_c > P_o + \Delta P$ 의 경우

$$S_c = \frac{C_r}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \quad (3)$$

- $P_c < P_o + \Delta P$ 의 경우

$$S_c = \frac{H}{1 + e_0} \cdot \left[C_r \cdot \log \frac{P_c}{P_o} + C_c \cdot \log \frac{P_o + \Delta P}{P_c} \right] \quad (4)$$

여기서, S_c : 압밀층의 최종압밀침하량

C_r : 압축지수

e_0 : 압밀층의 초기 간극비

H : 압밀층의 두께(m)

P_o : 압밀층 중앙단면에 작용하는 연직유효응력 (kN/m^2)

P_c : 선행압밀응력(kN/m^2)

ΔP : 상재하중에 의한 압밀층 중앙단면의 연직유효응력 증가량(kN/m^2)

압밀침하량 산정결과 Table 3에서처럼 $P_c < P_o + \Delta P$ 조건인 성토고 9 m, 6 m, 3 m 구간에서는 설계침하량이 과대평가되는 결과를 얻었다. 이는 연약지반 상부에 존재하는 고강도의 Crust층(0~1.5 m) 및 과압밀층(1.5~3.0 m)의 영향으로 상재성토하중에 하부연약층까지 전달되지 못하기 때문에 나타난 결과라고 판단된다.

또한 연약지반 압밀침하 실무에서는 성토하중형상에 의한 영향을 평가하기 위하여 Boussinesq (1885)의 이론식을 적용하여 압밀침하량을 산정하고 있으나 ○○지구처럼 연약지반의 심도가 얇은 경우에는 Table 4에서와 같이 설계침하량이 과대하게 산정된다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2. Calculation Result of Vertical Stress by Applying Hirai's Theory

Fig. 3. Cross-Sectional Plan for Field Tests

Table 2. Soil Parameters

C_c	C_r	OCR	e_0	Soft ground, γ_{sub} (kN/m^3)	Embankment, γ_t (kN/m^3)
0.245	0.033	3.2 (<3 m) 1.6 (>3 m)	0.9 (<3 m) 1.1 (>3 m)	0.9 (<3 m) 0.8 (>3 m)	19

Fig. 4. Calculation Result of Vertical Stress by Applying Hirai's Theory

Table 3. Consolidation Settlements by Existing Design Procedure

Types	Measured settlement (A)	Design settlement (B)	Settlement ratio (A/B*100)	Remarks
Section I	41.00 cm	51.30 cm	79.9%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section II	30.45 cm	38.82 cm	78.4%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section III	8.14 cm	19.72 cm	41.3%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section IV	3.50 cm	4.63 cm	75.6%	$P_c > P_o + \Delta P$

Table 4. Consolidation Settlements by Boussinesq (1885)

Types	Measured settlement (A)	Design settlement (B)	Settlement ratio (A/B*100)	Remarks
Section I	41.00 cm	50.9	80.6%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section II	30.45 cm	38.4	79.3%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section III	8.14 cm	19.99	42.0%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section IV	3.50 cm	4.44	78.8%	$P_c > P_o + \Delta P$

3.2 Burmister (1958) 및 Hirai (2007)의 제안식

○○지구 시험성토부지는 현장조사 및 시추시험결과, 심도 -3.0 m까지 고결도의 고결된 Crust층 및 과압밀층이 존재하고 있어 그 전단저항으로 상재하중을 하부의 연약지반으로 충분히 전달하지 못한다고 할 수 있다. 따라서 지중응력을 고려한 압밀침하설계가 필요하며 Burmister (1958)의 지중응력 산정방법을 적용하였다. Burmister (1958)의 제안식을 적용하기 위해 우선 탄성계수비 $E_{상부}/E_{하부}$ 를 산정해야 한다. 상부연약지반층은 Crust층(0~1.5 m) 및 과압밀층(1.5~3.0 m)으로 구분할 수 있으며, 과압밀층과 하부연약층의 탄성계수비는 삼축압축시험으로부터 Fig. 5와 같이 $E_{과압밀층}/E_{하부연약층} = 5$ 로 산정하였다. 또한, 고결된 Crust층과 과압밀층의 탄성계수비는 Schmertmann (1970)이 제안한 SPT결과인 N치와 탄성계수의 제안식 Eq. (5)와 Fig. 6으로부터 $E_{Crust층}/E_{과압밀층} = 10$ 으로 추정하였으며, 이는 고결된 Crust층과 하부연약층의 탄성계수비 $E_{Crust층}/E_{하부연약층} = 50$ 을 의미한다고 할 수 있다.

$$E_s = \alpha N \quad (5)$$

따라서 고결된 Crust층과 과압밀층의 심도가 각각 1.5 m임을 고려하고 아래의 Eq. (6)을 적용하여 상부연약지반층의 평균 탄성계수비 $E_{상부}/E_{하부} \approx 30$ 으로 가정하였다.

$$E_{상부} = \frac{(E_{Crust} \times h_{Crust}) + (E_{과압밀} \times h_{과압밀})}{h_{Crust} + h_{과압밀}} \quad (6)$$

그 결과 Fig. 7에서와 같은 깊이에 따른 지중응력 증가율을 얻을 수 있었다. 또한 보다 간편하게 과압밀층을 고려한 압밀침하량 산정을 위해 근사해법의 2층지반의 지중응력 계산방법인 Hirai (2007)의 제안식을 적용하였으며, 그 결과 Burmister (1958)의 제안식보다 조금 더 작은 지중응력을 얻을 수 있었다.

또한 이 지중응력 산정결과를 적용하여 ○○지구 시험성

Fig. 5. Results of Triaxial Compression Tests

(a) Embankment of 9 m

(b) Embankment of 6 m

Fig. 6. SPT N-Valuse Before and After

Fig. 7. Vertical Stress of Soil by Burmister and Hirai

Table 5. Consolidation Settlements by Burmister ($E_1/E_2 = 30$)

Types	Measured settlement (A)	Design settlement (B)	Settlement ratio (A/B*100)	Remarks
Section I	41.00 cm	45.47	90.2%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section II	30.45 cm	33.45	91.0%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section III	8.14 cm	15.36	53.0%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section IV	3.50 cm	3.35	99.4%	$P_c > P_o + \Delta P$

Table 6. Consolidation Settlements by Hirai ($E_1/E_2 = 30$)

Types	Measured settlement (A)	Design settlement (B)	Settlement ratio (A/B*100)	Remarks
Section I	41.00 cm	45.47	90.2%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section II	30.45 cm	33.45	91.0%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section III	8.14 cm	15.36	53.0%	$P_c < P_o + \Delta P$
Section IV	3.50 cm	3.35	99.4%	$P_c > P_o + \Delta P$

토에 대한 압밀침하량 계산을 수행하였으며 그 결과 Table 5와 같이 나타났다. Burmister (1958)의 제안식을 적용하여 산정된 압밀침하량은 기존의 압밀침하량 산정방법에 비해 90% 이상의 신뢰성 있는 침하량 예측결과를 보인다는 것으로 확인할 수 있었다. 다만, 성토고 3 m 구간에서의 오차는 압밀침하량 산정에 적용한 지반정수를 전체 성토구간의 평균으로 산정하였기 때문에 지반의 불균질성을 반영하지 못하여 발생한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 기존의 압밀침하량 산정방법에서도 동일하게 보이고 있는 오차이다. Table 6과 같이 Hirai (2007)의 제안식을 적용하여 산정된 압밀침하량은 Burmister (1958)의 제안식과 비교하여 좀 더 작은 침하량 예측결과를 보이고 있지만, 지반공학적인 관점에서는 보다 합리적인 침하량 예측결과라 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연약지반 상부가 과압밀층으로 형성되어 있는 경우 압밀침하량을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 이론식들을 검증하였다. 제안된 이론식들을 통해 지중연직하중을 산정하였고 그 값을 적용하여 압밀침하량을 예측하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) Boussinesq (1885)의 이론식을 적용하여 다층지반의 압밀침하량을 산정한 결과 계측 침하량에 비해 19.4~21.2% 과대하게 산정되었다.
- (2) Burmister (1958)의 제안식을 적용하여 다층지반의 압밀침하량을 산정한 결과 계측 침하량의 90.2~99.4%에 달하는 정확도를 나타내었다.
- (3) Hirai (2007)의 제안식을 적용하여 다층지반의 압밀침

하량을 산정한 결과 계측 침하량의 98.8~107.4%에 달하는 정확도를 나타내었다.

- (4) 따라서 서해안지역인 ○○지구와 같이 상부에 고결층 및 과압밀층 등이 존재하는 지역에서는 2층 지반구조에 대한 지중응력 계산식으로부터 지중연직하중을 산정한 후, 이 지중연직하중을 적용하여 압밀침하량을 설계하면 보다 신뢰할 수 있는 압밀침하량 설계치를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Boussinesq, J. (1885). *Application des potentiels a L'Etude de L'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques*. Paris: Gauthier-Villars.
- Burmister, D.M. (1943). The theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of airport runways. *Proc. 23rd Annual Meeting of the Highway Research Board*, Vol. 23, pp. 126-148.
- Burmister, D.M. (1958). Evaluation of pavement systems of the washo road test by layered system methods. *Highway Research Board Bulletin*, Vol. 177, pp. 26-54.
- Das, B.M. (1998). *Principles of geotechnical engineering*. Boston: PWS, pp. 263-277.
- Fox, L. (1948). Computation of Traffic Stresses in a Simple Road Structure. *Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 236-246.
- Hirai, H. (2007). Settlements and stresses of multi-layer ground and improved grounds by equivalent elastic

- method. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*
- Kim, J., Im, E.S., Kang, S.Y., and Kang, G. (2020). Study on the Design Settlement of Over-Consolidated Clay for a Complex Development. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 4, pp. 219-230.
- Kögler, F. (1927). Ergebnisse neuer Versuche über Druckverteilung im Baugrund. *Verhandlungen des 2. intern. Kongresses für Mechanik*. Zürich.
- Mehta, M.R., and Veletsos, A. (1959). *Stresses and displacements in layered systems*. Civil Engineering Studies: Structural Research Series No. 178, University of Illinois, pp. 116.
- Palmer, L.A., and Barber, E.S. (1940). Soil Displacement under a loaded circular area. *HRB Proc.*, Vol. 20, pp. 279-286.
- Schmertmann, J.H. (1970). Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. 3, pp. 1011-1042.
- Terzaghi, K., and Peck, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice 2nd edition*. New York: John Wiley and Sons, Inc., pp. 394-413.

Received	May 18, 2021
Revised	May 20, 2021
Accepted	June 7, 2021