

압축지수를 이용한 압밀침하량 계산식의 압밀층 두께 분할효과

Stratum Division Effect of Consolidation Settlement Formula Using Compression Index

김기웅* Kim, Khi-Woong

ABSTRACT

The final consolidation settlement is important factor in soft ground improvement because of settlement management and completion time. The compression index, which is slope of primary consolidation curve, is commonly used for the calculation of final consolidation settlement in clay layer. The existing final consolidation settlement is calculated in total consolidation layer that is assumed as one layer. This paper describes analysis result of the acquired settlement, when the consolidation layer is divided as several layer. The consolidation settlement increased according to increase of the divided layer and then it is converged. This result was unrelated to surcharge load. The division effect of layer is very high when the surcharge load is less than the consolidation layer thickness. The division effect of layer is 1.2 to 1.4 in the general surcharge load, and this value can be apply as safety factor in the calculation of final consolidation settlement.

요 지

연약지반 개량공사에서 최종압밀침하량은 침하관리와 준공시기를 결정하는 데 중요하다. 설계 시 점토층의 최종압밀침하량의 산정은 압축지수를 이용하는 방법이 가장 많이 이용되고 있다. 압축지수는 압밀시험으로 얻어진 하중-침하 관계를 반대수 좌표에 나타냈을 때 처녀압축곡선의 기울기이다. 종래에는 압밀층 전체를 한 개의 층으로 보고 최종압밀침하량을 산정해 왔으나, 압밀층을 여러 개의 층으로 분할했을 때 얻어지는 침하량의 차이를 알아보았다. 분할층 수와 상재하중의 크기가 압밀 침하량에 미치는 영향에 대하여 분석한 결과는 다음과 같다.

분할층 수가 증가할수록 침하량은 증가하여 일정한 값에 수렴하며 이러한 양상은 상재하중의 크기와 무관하게 나타났다. 상재하중이 압밀층 두께에 비해 상대적으로 작을 때는 충분분할효과가 매우 크게 나타났다. 보편적인 성토하중의 경우 충분분할효과는 1.2~1.4 정도로 나타났으며 이 값은 최종압밀침하량 산정 시 안전율의 의미로 사용할 수 있을 것이다.

Keywords : Soft stratum, Settlement, Stratum division

1. 서 론

해안을 매립하여 지반을 조성할 때 연약지반을 개량하여 지반을 안정화하여야 하며, 이 때 공기를 단축하기 위하여 성토에 의한 압밀축진 공법을 적용하게 된다. 연약지반을 개량할 때 대표적인 단면이 그림 1에 제시되어 있다.

연약지반의 최종압밀침하량 산정은 잔류침하량에 따른 지반개량 공법의 적용 여부, 압밀도 산정, 여성고의 계획

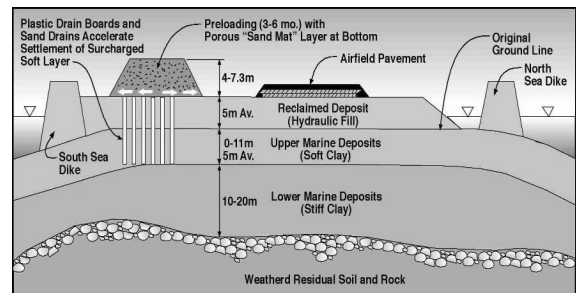


그림 1. 연약지반 개량 사례(인천국제공항)

1* 정희원, 인천대학교 도시과학대학 도시환경공학부 교수 (Member, Professor, College of Urban Science, School of Urban Construction Engrg., Univ. of Incheon, E-mail: kwkim8722@incheon.ac.kr)

등에 필요하다. 최종압밀침하량은 압축지수를 이용한 계산식이 주로 설계에 사용되고 있다. 압밀침하량은 설계치와 현장계측치가 상당한 차이를 보이며 그 오차가 심지어 100%를 상회하는 경우도 발생한다. 이러한 현상은 대부분 압밀층의 토성치를 과대 또는 과소평가하는 데서 기인하지만 동일한 토성치를 적용하여 이러한 영향을 배제하고 침하량 계산과정에서 압밀층 두께를 분할했을 때도 침하량은 증가하는 것으로 나타난다.

본 연구에서는 압밀침하량에 영향을 미치는 압밀층 두께 및 토질정수의 영향 이외에 압밀층 분할로 인한 영향에 대하여 알아보려고 한다. 현재 설계에 사용되고 있는 압축지수를 이용한 압밀침하량 계산식의 수학적 정리와 분석을 통해 압밀층 분할의 효과를 밝히고자 한다.

압축지수는 처녀압축곡선의 기울기로서, 하중-침하 관계를 반대수 용지에 나타냈을 때 선형관계로 가정하여 압밀침하량 산정식을 유도한 결과이므로 자중에 의한 유효응력과 상재하중에 의한 응력증가량의 범위에 따라 log 값의 성질로 인한 차이가 발생한다.

2. 압밀층 분할에 의한 침하량 변화

그림 2는 두께 $H(m)$ 인 점토층 위에 무한 등분포 상재하중 $q(t/m^2)$ 가 작용할 때 압밀층 중앙단면에서 작용하는 연직 유효응력과 상재하중에 의해 발생하는 증가응력을 나타내고 있다.(김기웅, 2008, B. M. Das, 1998)

2.1 최종 압밀침하량 계산

연약지반 설계 시 상재하중에 의한 최종압밀침하량을 산정하는 식은 Terzaghi(1923, 1996) 1차원 압밀이론의

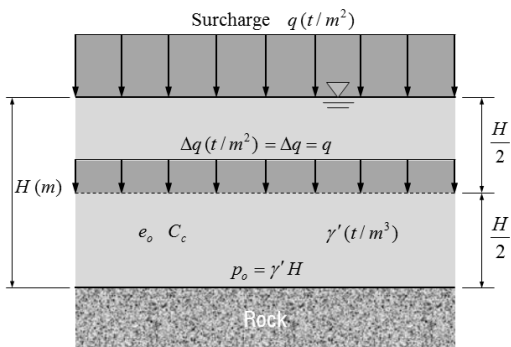


그림 2. 압밀층 중앙단면에 작용하는 증가응력과 하단에 작용하는 유효 연직응력

압축지수의 정의에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e_o} H \cdot \log \frac{p_o + \Delta p}{p_o} \quad (1)$$

여기서, ΔH : 압밀층의 최종압밀침하량

C_c : 압축지수

e_o : 압밀층의 초기 간극비

H : 압밀층의 두께(m)

p_o : 압밀층 중앙단면에 작용하는 연직유효응력(t/m^2)

Δp : 상재하중에 의한 압밀층 중앙단면의 연직유효응력 증가량(t/m^2)

상재하중의 크기는 성토하중으로 무한 등분포하중이며 이를 점토층 하단의 유효 연직응력에 대한 비례식으로 표현할 수 있다.

$$q = a \gamma' H \quad (2)$$

즉, 상재하중비는

$$a = \frac{q}{\gamma' H} \quad (3)$$

무한 등분포 상재하중에 의한 지중응력 증가량은 상재하중의 크기와 같으므로

$$\Delta p = \Delta q = q = a \gamma'_2 H \quad (4)$$

식 (1)에 식 (3)과 식 (4)를 대입하면 식 (5)와 같이 된다.

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e_o} H \cdot \log(1+2a) \quad (5)$$

또한 그림 3과 같이 압밀층을 N 개로 균등분할한 경우의 점토층의 최종 압밀침하량은 다음과 같다.

1) 압밀층을 1개로 균등분할한 경우, $N=1$ (압밀층을 분할하지 않은 경우와 같음)

$$m = 1, p_{o1} = \frac{1}{2} \gamma' H, \Delta H_1 = \frac{C_c}{1+e_o} H \cdot \log \left(1 + \frac{a \gamma' H}{\frac{1}{2} \gamma' H} \right)$$

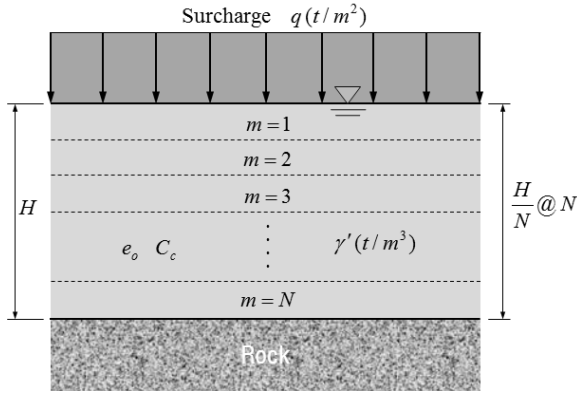


그림 3. 압밀층의 분할

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e_o} H \cdot \log\left(1 + \frac{2}{1} a\right) \quad (6)$$

2) 압밀층을 2개로 균등분할한 경우, $N=2$

$$\begin{aligned} m=1, p_{o1} &= \frac{1}{4} \gamma' H, \\ \Delta H_1 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{2} \cdot \log\left(1 + \frac{a \gamma_2' H}{\frac{1}{4} \gamma_2' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{2} \cdot \log\left(1 + \frac{4}{1} a\right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} m=2, p_{o2} &= \frac{3}{4} \gamma' H, \\ \Delta H_2 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{2} \cdot \log\left(1 + \frac{a \gamma' H}{\frac{3}{4} \gamma' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{2} \cdot \log\left(1 + \frac{4}{3} ab\right) \end{aligned} \quad (8)$$

3) 압밀층을 3개로 균등분할한 경우, $N=3$

$$\begin{aligned} m=1, p_{o1} &= \frac{1}{6} \gamma' H, \\ \Delta H_1 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{3} \cdot \log\left(1 + \frac{a \gamma' H}{\frac{1}{6} \gamma' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{3} \cdot \log\left(1 + \frac{6}{1} a\right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} m=2, p_{o2} &= \frac{3}{6} \gamma' H, \\ \Delta H_2 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{3} \cdot \log\left(1 + \frac{a \gamma' H}{\frac{3}{6} \gamma' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{3} \cdot \log\left(1 + \frac{6}{3} a\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} m=3, p_{o3} &= \frac{5}{6} \gamma' H, \\ \Delta H_3 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{3} \cdot \log\left(1 + \frac{a \gamma' H}{\frac{5}{6} \gamma' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{3} \cdot \log\left(1 + \frac{6}{5} a\right) \end{aligned} \quad (11)$$

4) 압밀층을 4개로 균등분할한 경우, $N=4$

$$\begin{aligned} m=1, p_{o1} &= \frac{1}{8} \gamma' H, \\ \Delta H_1 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{\gamma' abH}{\frac{1}{8} \gamma' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{8}{1} a\right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} m=2, p_{o2} &= \frac{3}{8} \gamma' H, \\ \Delta H_2 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{\gamma_2' abH}{\frac{3}{8} \gamma_2' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{8}{3} a\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} m=3, p_{o3} &= \frac{5}{8} \gamma' H, \\ \Delta H_3 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{a \gamma' H}{\frac{5}{8} \gamma' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{8}{5} a\right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} m=4, p_{o4} &= \frac{7}{8} \gamma' H, \\ \Delta H_4 &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{a \gamma' H}{\frac{7}{8} \gamma' H}\right) \\ &= \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{4} \cdot \log\left(1 + \frac{8}{7} a\right) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (6)~식 (15)에 의하여 압밀층을 N 개의 층으로 분할하여 계산할 때 m 번째 층의 압밀침하량의 일반식은 식 (16)과 같이 된다.

$$\Delta H_m = \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{N} \cdot \log\left(1 + \frac{2N}{2m-1} a\right) \quad (16)$$

또한 N 개의 층으로 분할하여 계산할 때 전체층의 압밀 침하량은 각 층 압밀침하량의 합이므로

$$\Delta H_N = \frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{N} \cdot \sum_{m=1}^N \log \left(1 + \frac{2N}{2m-1} a \right) \quad (17)$$

2.2 압밀침하량 계산식의 비교

압밀층을 1개로 보는 경우 최종 압밀침하량은 식 (5)와 같이 지반정수(C_c, e_o)와 압밀층의 두께(H) 및 상재하중의 크기($a = \frac{q}{\gamma H}$)의 함수가 된다.

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e_o} H \cdot \log(1+2a) \quad (5)$$

압밀층을 N 개로 분할하여 계산하는 경우 최종 압밀침하량은 식 (17)과 같이 지반정수(C_c, e_o)와 압밀층의 두께(H) 및 상재하중의 크기($a = \frac{q}{\gamma H}$) 외에도 분할층의 수(N)의 함수가 됨을 알 수 있다.

이와 같이 압밀층을 여러 층으로 나누어 최종 압밀침하량을 계산하면 한 개의 층으로 본 경우와 다른 최종 압밀침하량을 얻을 뿐만 아니라 몇 개의 층으로 나누었느냐에 따라서 다른 결과를 얻게 됨을 암시하고 있다.

압밀층을 N 개의 층으로 나누어 계산한 최종 압밀침하량과 한 개 층으로 본 경우 얻어진 최종 압밀침하량에 대한 비는 식 (17)을 식 (5)로 나누어 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta H_N}{\Delta H} = \frac{\frac{C_c}{1+e_o} \frac{H}{N} \cdot \sum_{m=1}^N \log \left(1 + \frac{2N}{2m-1} a \right)}{\frac{C_c}{1+e_o} H \cdot \log(1+2a)}$$

$$\frac{\Delta H_N}{\Delta H} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \log \left(1 + \frac{2N}{2m-1} a \right)}{\log(1+2a)} \quad (18)$$

식 (18)의 $\frac{\Delta H_N}{\Delta H}$ 을 ‘(압밀)층분할효과’라고 하자.

식 (18)에서 보는 바와 같이 압밀침하량비는 식 (17)을 식 (5)로 나누는 과정에서 지반정수(C_c, e_o)와 압밀층 두께(H)가 소거됨으로써 층분할효과에는 영향이 없음을 보여 준다.

또한 상재하중비($a = \frac{q}{\gamma H}$)와 분할층의 수(N)가 층분할 효과에 영향을 미치는 요소임이 명백해 졌다.

2.3 압밀층 분할효과에 영향을 미치는 요소

압밀층 상부에 재하되는 상재하중의 크기와 압밀층 분할 수가 층분할효과에 미치는 영향을 분석하기 위해 식 (18)에 대하여 다음과 같은 조건으로 계산하였다.

상재하중비 : $a = \frac{q}{\gamma H} = 0.1 \sim 10$

분할층 수 : $N=1 \sim$ 식 (18)의 분모값이 수렴할 때까지

즉, $\frac{1}{N-1} \sum_{m=1}^{N-1} \log \left(1 + \frac{2(N-1)}{2m-1} a \right)$
 $\approx \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \log \left(1 + \frac{2N}{2m-1} a \right)$ 인 때

위와 같은 조건으로 식 (18)을 계산한 결과 데이터를 정리하여 분석하였다.

여기서,

$$K_N = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N \log \left(1 + \frac{2N}{2m-1} a \right) \quad (19)$$

라 하고, 분할층 수와 침하량의 관계를 그림 4에 제시하였다.

그림 4에서 보는 바와 같이 식 (18)에서 검토한 바와 같이 분할층 수가 침하량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 분할층 수가 증가해 감에 따라 압밀침하량에 해당하는

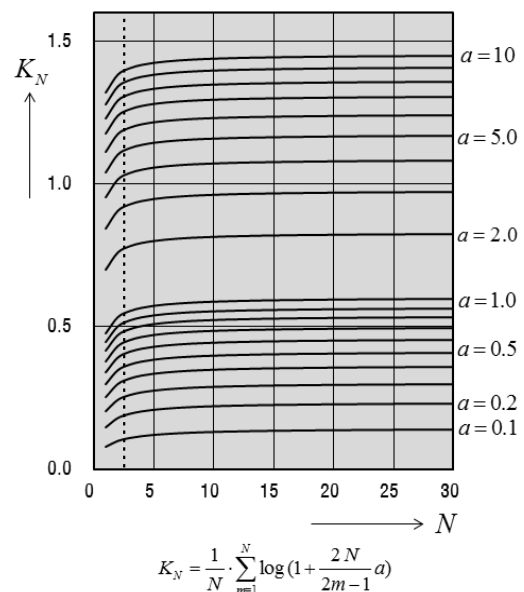


그림 4. 분할층 수의 영향

K_N (식(19))값이 증가해 나가다가 일정한 값에 수렴하고 있다. 분할층 수가 $N=2 \sim 3$ 까지 급격히 증가해 나가다가 $N=10$ 까지 경사가 완만해 지며, $N=20$ 이후로는 거의 변화가 없다. $N=5$ 이상이면 대략적으로 충분할효과가 최대값에 근접하였다고 볼 수 있다.

이러한 경향은 상재하중비($a = \frac{q}{\gamma H}$)가 0.1에서 10까지 모든 경우에 대하여 동일한 경향을 보이고 있다. 또한 상재하중비($a = \frac{q}{\gamma H}$)가 증가할수록 곡선의 경사가 약간씩 더 급해지는 경향을 보이고 있다. 이는 연약지반 공사 시 성토하중이 클수록 최종 압밀침하량 산정에 분할층 수의 영향이 커진다는 것을 의미한다.

그림 5와 같이 상재하중비($a = \frac{q}{\gamma H}$) 즉, 성토하중의 크기는 K_N 값과 비례하여 커지고 결국은 충분할효과($\frac{\Delta H_N}{\Delta H}$ 값(식(18)))는 에 영향을 미치게 된다. 이를 규명하기 위해 상재하중비에 따른 충분할효과의 관계를 산정하여 그림 6에 나타내었다.

그림 5에서 보는 바와 같이 상재하중비($a = \frac{q}{\gamma H}$)가 증가할 때 충분할효과($\frac{\Delta H_N}{\Delta H}$)는 급격히 감소하다가 일정한 값에 수렴하고 있다.

$a = \frac{q}{\gamma H} = 0$ 인 경우는 상재하중이 재하되지 않은 경우로 압밀침하가 발생하지 않으므로 고려의 대상이 되지 않는다.

$0 < a = \frac{q}{\gamma H} < 1$ 구간에서는 충분할효과가 크게 나타나고, $2 < a = \frac{q}{\gamma H}$ 이면 충분할효과가 작아서 무시할 수도 있다.

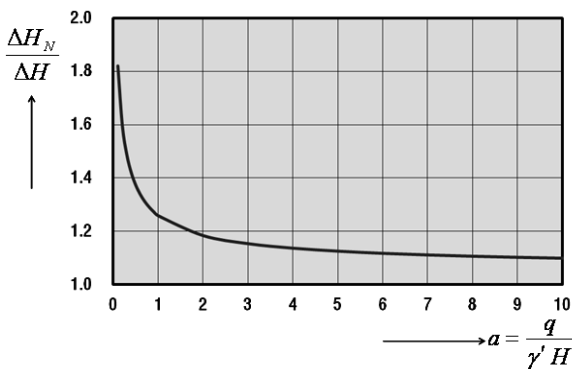


그림 5. 상재하중비와 충분할효과의 관계

즉, 연약지반 설계 시 성토하중이 상대적으로 크면 충분할을 고려하지 않아도 되지만 상대적으로 작은 경우는 충분할효과가 크므로 이를 설계에 반영할 지 심각하게 고민하여야 할 것이다.

3. 충분할효과 분석

그림 5를 참고로 하여 연약지반 설계 시 안전측 설계를 위하여 충분할효과를 반영하여야 할지에 대한 판단을 하기 위해 현실적인 설계조건을 대입하여 검토해 보기로 한다.

상재하중비가 $a = \frac{q}{\gamma H} = 0.1$ 인 경우는 충분할효과가 $\frac{\Delta H_N}{\Delta H} = 1.8$ 정도이다. 이는 압밀층 두께가 $H=10m$ 이고 $\gamma' = 1.0t/m^3$ 일 때 성토하중이 $q=1.0t/m^2$ 인 경우와 같으며 이 때 충분할효과는 1.8배가 됨을 의미한다. 충분할로 인하여 최종 압밀침하량이 1.8배가 된다는 것은 매우 큰 오차로서 심각한 문제일 수 있지만 현실적으로는 성토하중 $q=1.0t/m^2$ 인 경우는 별로 없다는 점에서 고려의 대상이 되지 않는다.

상재하중비 $a = \frac{q}{\gamma H} > 3$ 인 경우는 충분할효과가 $\frac{\Delta H_N}{\Delta H} = 1.1$ 에 수렴해 가는데 이는 압밀층 두께가 $H=10m$ 이고 $\gamma' = 1.0t/m^3$ 일 때 성토하중이 $q > 30t/m^2$ 인 경우이고 또한 성토고가 $H'=20m$ 정도에 해당하는데 이와 같은 경우는 현실적으로 흔히 있는 경우가 아니므로 역시 고려의 대상에서 제외할 수 있다.

현실적으로 연약지반 설계에서 많이 발생하는 경우는 압밀층 두께 $H=10m$, 상재하중 $q=10t/m^2$ 정도로 가상하면 $a = \frac{q}{\gamma H} = 1.0$ 이 되고, 충분할효과는 $\frac{\Delta H_N}{\Delta H} = 1.26$ 이 되어 충분할을 하면 최종 압밀침하량이 26% 증가한다. 이러한 결과는 그 동안의 설계방법(압밀층 전체를 1개의 층으로 봄)이 충분할효과가 최대인 경우에 비해 80% 정도로 과소평가함으로써 불안전측 설계를 해 왔음을 의미한다.

현실적이고 보편적인 설계조건으로 상재하중비가 $0.4 < a = \frac{q}{\gamma H} < 1.8$ 인 경우에서는 충분할효과가 $\frac{\Delta H_N}{\Delta H} = 1.2 \sim 1.4$ 정도이다. 이 값은 충분할효과를 종래의 설계방법에 반영하고자 할 때는 압밀층을 전체층 1개로 고려하여 구한 최종 압밀침하량에 1.2~1.4배를 해주어야 한다는 것을 의미한다.

즉, 충분할효과를 고려한 최종 압밀침하량은

$$\Delta H_N = (1.2 \sim 1.4) \Delta H \quad (20)$$

이 값은 안전율의 의미로 받아들일 수 있는 값이다.

4. 결론

압축지수를 이용한 연약지반의 최종 압밀침하량 산정 식 (1)에 대하여 수학적 분석을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

$$\Delta H = \frac{C_c}{1+e_o} H \cdot \log \frac{p_o + \Delta p}{p_o} \quad (21)$$

- (1) 식 (21)을 적용하여 연약지반 최종 압밀침하량을 산정할 때 압밀층 전체를 1개의 층으로 보는 경우에 비해 충분할을 많이 할수록 최종 압밀침하량은 커지고 이 값은 일정한 값에 수렴한다.
- (2) 상재하중의 크기가 압밀층에 작용하는 유효응력에 비해 상대적으로 작은 경우 충분할효과가 크게 나타난다.
- (3) 현실적이고 보편적인 연약지반 설계조건에서는 충분할효과가 1.2~1.4정도로 나타났다. 따라서 압밀층 분

할효과를 고려한 안전율 설계를 하고자 할 때는 식 (21)을 이용한 종래의 최종 압밀침하량 산정결과에 1.2~1.4를 곱해서 사용할 수 있다.

$$\Delta H_N = (1.2 \sim 1.4) \Delta H \quad (22)$$

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2010년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1. 김기웅, 문홍득 (2008), *토질역학*, 구미서관.
- 2. Das, B. M. (1998), *Principle of geotechnical engineering*, 4th edition, PWS Publishing Company.
- 3. Terzaghi, K. (1923), *Die Berechnung Der Durchlassigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydrodynamischen Spannungsercheinungen*, *Akademic der Wissenchafton In Wein*, Sitzungsberichte, Mathematisch-Naturwissenschaftlichs, Klasse, Part IIa, Vol.139, No.3/4, pp.125-138.
- 4. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. (1996), *Soil Mechanicas in Engineering Practice*, 3rd Edition, John Wiley&Sons, Inc. pp.106-108.

(논문접수일 2012. 4. 23, 심사완료일 2012. 5. 14)