

깊이 별 초기유효응력 차이를 고려한 1차원 압밀침하량 산정공식

Consolidation Settlement in One-Dimensional Condition Considering the Variation of Initial Effective Stresses with Depth

윤찬영* · 김주형** · 오명학*** · 정영훈****

Yune, Chan-Young · Kim, Ju-Hyong · Oh, Myoung-Hak · Jung, Young-Hoon

Abstract

A series of analytical formula to compute settlements accounting for possible variations of initial effective stresses were derived. The comparison of computed values from conventional and newly-derived equations shows that computed settlements via the conventional equation unrealistically vary with the chosen number of layers in a clay stratum and also are 45~100% less than the value obtained from the newly-derived equation with exact mathematical integration.

Keywords : consolidation, settlement, initial effective stress, soft clay

요 지

본 연구에서는 정규압밀 및 과압밀 지반에 대하여 깊이에 따른 초기유효응력 변화를 고려한 압밀침하량 산정식을 새롭게 제안하였다. 제안된 해석이론을 다양한 측면에서 검토하고 기존의 점성토층 중앙부의 초기유효응력을 이용한 압밀침하량 산정방법과 비교, 분석하였다. 분석결과 기존의 침하량 산정방법은 층을 나누는 개수에 따라서 침하량이 다르게 산정되며 정해에 비하여 45~100% 정도로 침하량을 과소평가하는 것으로 나타나 제안된 방법이 기존의 산정방법에 비하여 경제적이며 합리적인 방법이라는 결론을 얻었다.

핵심용어 : 압밀, 침하량, 초기 유효응력, 연약지반

1. 서 론

연약지반의 압밀거동 분석은 수십 년 동안 이론적 연구뿐만 아니라 다양한 실내 및 현장시험을 통해 밝혀내고자 했던 지반공학자의 주된 관심사이다. Terzaghi(1923)의 압밀 이론에서 출발한 연약지반의 침하량, 즉 점성토의 압축과 관련된 연구는 현재까지도 계속 진행되고 있다. Terzaghi의 압밀 방정식의 유효성에 대한 논의는 1960년대에 본격적으로 시작되었는데, Mikasa(1963)는 변형률의 식으로 표현된 압밀 지배 방정식을, Gibson 등(1967)은 간극비의 식으로 표현된 지배식을 제시하였다. 점성토의 압축 현상에서 점탄성 현상을 함께 고려하려는 시도는 일찍이 Taylor 등(1940)에 의해 시작되었고, 이후 Taylor(1942)와 Barden(1965)에 의해 스프링과 대시포트를 이용하는 점탄성 모델이 제시되었다. 하지만 점탄성 모델에 필요한 변수를 기존의 압밀 변수와 직접적으로 연관시키기 어려워 제한적인 연구만이 진행되었다.

실험적으로 관측되는 초기 일차 압밀과 이차 압축 현상을 일관적으로 설명할 수 있었던 것은 Bjerrum(1967)의 개념 모델이 제시된 후부터이다. 이후 Garlanger(1972)은 Bjerrum의 개념 모델을 정식화시키는데 성공하였지만, 이 경우 Bjerrum의 모델을 근간으로 하였기 때문에 일차 압밀 과정에서 점성의 영향은 배제되었다. 점성을 고려한 문제를 보다 쉽게 다루기 위해 변형률 또는 간극비가 시간에 대한 미분항으로 압밀 방정식에 표현된 것은 Hawley와 Borin(1973)에 의해서이며 압밀의 전과정에서 점성이 고려되었다. Leroueil 등(1985)은 응력-변형률-변형률 속도의 관계를 심층적으로 연구하였고, 압밀 중 점성의 영향과 변형률 속도를 고려한 다양한 실험적 연구 결과가 Leroueil(1996)에 의해 정리되었다. 현재까지도 매듭지지 않은 문제로 남아있는 점은 1차 압밀 과정에서 점성의 영향이다. 점성의 영향이 1차 압밀 과정에 나타난다는 실험적 확증 자료가 불확실하므로 1차 압밀 종료 시점(end of primary; EOP)에서 간극비-유효응력의 관계는 항상 일정하다고 가정한 것은 Mesri와

*정회원 · 강릉대학교 토목공학과 전임강사 (E-mail : yune@kangnung.ac.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 토질 및 기초연구실 선임연구원 (E-mail : haitink@kict.re.kr)

***정회원 · 한국해양연구원 연안개발 · 에너지연구부 선임연구원 (E-mail : omyhak@kordi.re.kr)

****정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원 (E-mail : jyounghoon@kict.re.kr)

표 1. 부산점토에 대한 예측 및 계측침하량 비교(정성교, 1999; Beak 등, 2005)

| | 연약층 두께 (m) | 설계시 추정침하량 (cm) | 계측 후 추정침하량 (cm) | 증가율 (%) | |
|--------------------------|------------|----------------|-----------------|---------|-----|
| 신호지방공단 | 38.8 | 79.7 | 228.5 | 287 | |
| 녹산국가산단 | 43.9 | 131.0 | 217.3 | 166 | |
| 양산물금택지 | 30.0 | 290.5 | 389.5 | 134 | |
| 녹산산단진입로 | 38.5 | 128.6 | 260.0이상 | 202 | |
| 신호진입로 | 33.7 | 184.1 | 250.9 | 136 | |
| 명지주거단지 | 29.8 | 106.0 | 171.0 | 161 | |
| 일본간사이공항 | 180.0이상 | 800.0 | 1,150.0 | 144 | |
| 부산신항 복측배후지 (준설토포함) | A-1 구역 | 41.8 | 528.0 | 667.2 | 126 |
| | M-1 구역 | 39.0 | 543.8 | 692.5 | 127 |
| | M-2 구역 | 39.0 | 575.7 | 662.2 | 115 |
| | M-3 구역 | 41.8 | 437.5 | 589.4 | 135 |
| | M-4 구역 | 40.6 | 440.9 | 502.5 | 114 |
| | M-5 구역 | 47.2 | 504.3 | 696.9 | 138 |

Godlewski(1977)에 의해서이다.

현재까지도 점성토의 압밀 현상과 관련하여 많은 논의가 진행되고 있으며, 최근에는 여러 가지 수치적 기법이 개발되어 다양한 영향인자를 고려한 점성토 지반의 거동 예측을 시도하고 있다. 그러나 현장의 설계에서는 여전히 기초적인 1차원 압밀식에 근거하여 계산하고 있고 연약지반의 침하량 및 간극수압 예측에 대한 신뢰성은 만족할 만한 수준이 아니다. 정성교(1999)와 Beak 등(2005)은 표 1과 같이 낙동강 유역 부산 점토지역을 중심으로 1차원 압밀식에 근거한 설계 시 예측 침하량과 시공 후 현장 계측 침하량을 비교한 결과, 계측 침하량이 설계 침하량보다 1.5배에서 최대 3배까지 크게 관측됨을 보고한 바 있다.

점성토 지반의 설계 침하량과 현장 계측 침하량의 차이를 한 가지 요인만으로 설명하기는 어렵다. Leroueil(1996)에 따르면 점성토 지반의 침하량 예측치는 변형률 속도, 온도, 실내 압밀 시험 시료의 교란, 현장 지반의 불균질성 및 이방성, 이차 압축과 점탄소성 영향에 대한 가정 조건 등 다양한 이유에 의해 현장 계측치와 차이가 나타날 수 있음을 지적하였다. 하지만 이런 복잡한 요인들을 차지하더라도, 기존의 일차원 조건을 가정한 연약지반 설계 방법에서 점토층 중앙부의 대표 응력점 하나로 대상층의 유효응력 상태를 가정하는 기존의 관행적 방법이 설계 압밀침하량에 큰 오차를 발생시킬 수 있음을 간과하고 있다. 본 논문에서는 이러한 관행적인 방법으로 지층의 평균 응력 상태를 가정하여 계산한 경우와 깊이에 따라 변하는 초기유효응력상태를 고려하였을 때의 경우를 서로 비교하였을 때 어떤 크기의 차이가 발생하는지 정량적으로 분석하고, 이를 토대로 1차원 압밀침하 산정의 올바른 계산식을 제안하고자 한다.

2. 기존의 압밀침하량 산정이론

Terzaghi(1923)는 간극비 변화와 그에 따른 연직변형률을 근간으로 하며 다음 식 (1)과 같이 압밀로 인한 총 침하량 계산식을 제안하였다.

$$S = H_0 \frac{a_v}{1+e_0} \Delta\sigma'_v = H_0 m_v \Delta\sigma'_v \quad (1)$$

여기서, S : 침하량
 H_0 : 초기 층두께
 a_v : 압축계수
 m_v : 체적압축지수
 e_0 : 초기 간극비
 $\Delta\sigma'_v$: 연직 유효응력 증분

그러나 식 (1)에서 a_v 혹은 m_v 는 점성토의 비선형적 압축 특성으로 인하여 압밀진행에 따라 연속적으로 변화하는 값이다. 일반적으로 점성토는 유효응력을 대수좌표계에 표시하였을 때, $e - \log\sigma'_v$ 선형관계를 가지므로 압밀진행에 따라서 변하지 않는 압축지수(정규압밀조건) C_c , 혹은 재압축지수(과압밀조건) C_r 를 도입하면 유효응력 변화에 따른 압축성 변화를 고려하여 침하량을 계산할 수 있다. Holtz와 Kovacs(1981), Das(1984), Terzaghi 등(1996)은 정규압밀 조건에서 식 (2)로, 과압밀 조건에서는 식 (3), (4)로 압밀침하량을 계산하도록 제안하였다.

$$S = H_0 \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

$$S = H_0 \frac{C_r}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \quad (\text{이 때, } \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v \leq \sigma'_p) \quad (3)$$

$$S = H_0 \frac{C_r}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + H_0 \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_p} \quad (\text{이 때, } \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v > \sigma'_p) \quad (4)$$

여기서, σ'_{v0} : 초기 연직유효응력
 σ'_p : 선행압밀응력

이 식은 점성토의 비선형적 압축거동을 고려하여 침하량을 산정하도록 제안된 식이지만, 점성토층이 두꺼워 초기유효응

력 σ'_{v0} 가 깊이에 따라 일정하지 않은 경우에는 큰 오차를 유발할 수 있다. 따라서 Brand와 Brenner(1981)와 Das (2002)는 식 (5)와 같이 대상 지반을 다수의 층으로 분할하여 계산할 것을 제안하고 있다.

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_c}{1+e_0} \Delta z \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \right)_i \quad (5)$$

하지만 Lambe과 Whitman(1979), Das(2002), NAVFAC 설계법(1982)에서는 실무적인 관점에서 점성토층의 중앙부에서 초기 연직유효응력을 대상층의 대표 응력 σ'_{v0} 으로 간주하고, 이를 식 (2), (3), (4)에 대입하여 침하량을 계산하도록 제안하고 있으며 대부분의 국내 연약지반 설계에서도 이를 따르고 있다. 다만, 기초하부의 압밀침하와 같이 1차원 조건이 아니어서 기초 하부의 응력증가량이 깊이에 따라 일정하지 않은 것이 분명한 경우 대상층을 분할하여 각 층의 중앙부에서 초기유효응력을 계산한 후 식 (5)를 이용하여 압밀침하량을 산정하는 경우도 있으나(한국지반공학회, 2003), 어떤 하중 조건에서 층을 나누어야 하는지 그리고 층을 나누다면 몇 개의 층으로 나누어야 하는지에 대한 구체적인 기준이 제시된 바 없다.

그림 1은 표 1에 제시된 신호지방공단의 지역의 시공조건을 나타내었고, 이때 침하량 산정에서 대상층을 분할하였을 때 분할층 수에 따라 계산 침하량이 어떻게 변하는지 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 동일한 지반특성 및

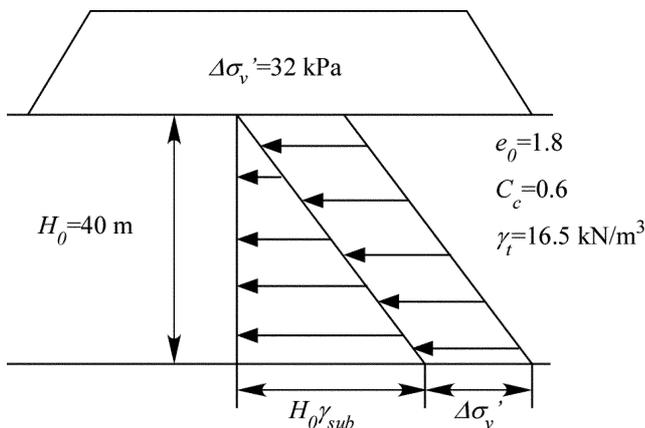


그림 1. 신호지방공단의 지반특성 및 하중재하조건

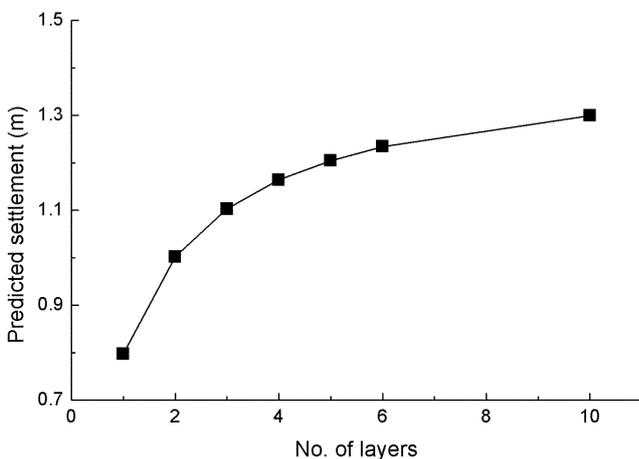


그림 2. 신호지방공단의 침하량 산정 결과

하중조건에서 동일한 이론해를 이용하였음에도 불구하고, 식 (5)에서 대상층을 1층으로 나누었을 때와 10층으로 나누었을 때 침하량은 각각 0.8m와 1.3m로 계산되며, 계산 상의 이유로 63%의 차이를 보이게 된다.

3. 깊이에 따른 초기 유효응력 변화가 고려된 압밀 침하량 산정공식

2장에서 논의된 바와 같이 현재 압밀침하량을 산정하기 위하여 보편적으로 쓰이고 있는 방법은 전체 압밀 층에서의 깊이에 따라 변화하는(증가하는) 초기유효응력에 대하여 전체 토층의 초기유효응력을 대표할 수 있는 값인 압밀층 중앙부의 초기유효응력이라고 가정하고 식 (2), (3), (4)에 적용하는 방법이다. 하지만 이들 식에서 초기 연직유효응력 σ'_{v0} 이 대수(log)항 안에 있으므로 초기 연직유효응력이 깊이에 따라 선형적인 분포를 가질지라도 점토층 중앙부에서의 값이 전체층을 대표하는 값이 될 수 없으며, 따라서 기존의 침하량 산정방법과 같이 중앙부에서의 초기유효응력 값을 이용하여 침하량을 산정하는 것은 정해에 비해 큰 오차를 발생시킬 여지가 있다.

3.1 정규압밀 지반의 침하량 산정공식

정규압밀 지반은 다음과 같이 크게 두 가지 경우로 나누어 침하량을 산정할 수 있다. 첫 번째는 지표면부터 일정깊이(H_0)까지 정규압밀 지반이 분포하는 경우이고, 두 번째는 상부층은 점성토가 아니지만 일정깊이(H_1)부터 정규압밀 점성토층이 존재하는 경우이다. 이러한 두 경우에 대하여 깊이에 따른 초기 유효응력 변화가 고려된 압밀침하량 산정이론을 유도하면 다음과 같다.

3.1.1 지표면부터 정규압밀지반이 존재하는 경우(NC Case I)

완전히 포화되어있는 균질한 점성토 지반에 대하여 $\gamma_t - \gamma_w = \gamma_{sub}$ 라고 하면, 초기 유효응력은 임의의 깊이 z 에 대하여 $\gamma_{sub}z$ 로 계산되므로 점성토층의 깊이를 H_0 라고 하면 층 압밀침하량은 다음 식 (6)과 같이 계산된다.

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} \int_0^{H_0} \log \left(\frac{\gamma_{sub}z + \Delta\sigma'_v}{\gamma_{sub}z} \right) dz$$

$$= \frac{C_c}{1+e_0} \left\{ \left(H_0 + \frac{\Delta\sigma'_v}{\gamma_{sub}} \right) \log \left(1 + \frac{H_0 \gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_v} \right) - H_0 \log \left(\frac{H_0 \gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_v} \right) \right\} \quad (6)$$

이 식에서 $A_0 = \Delta\sigma'_v / (H_0 \gamma_{sub})$ 로 정의하고 정리하면 식 (6)은 다음 식 (7)과 같이 A_0 만의 함수로 정리할 수 있다.

$$S = \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}} \quad (7)$$

여기서 A_0 는 점성토층 하부에서의 유효응력에 대한 재하하중비를 나타내는 값이며, 재하하중이 클수록 그리고 대상점토층의 두께가 얇고 수중단위중량이 작을수록 큰 값을 가진다. 1차원 압밀조건, 즉 넓은 영역의 성토재하를 통하여 지반이 압밀되고, 성토체의 높이를 H_{fill} , 성토층의 전체단위중량을 γ_{fill} 이라고 하였을 때, A_0 는 다음과 같이 정의된다.

$$A_0 = \frac{\Delta\sigma'_v}{H_0\gamma_{sub}} = \frac{H_{fill}\gamma_{fill}}{H_0\gamma_{sub}} \quad (8)$$

국내의 경우 개량 대상 점성토층의 두께가 대략 10~70m 정도이고 상재하중 재하를 위한 성토체의 높이는 일반적으로 3~12m 정도이므로 실무적인 관점에서 A_0 값이 가질 수 있는 범위는 0.05~3.0이다. A_0 값은 연약지반의 특성뿐만 아니라 재하하중크기에 의해서 영향을 받는다. 따라서 지역에 따라 일정한 값을 갖는 것이 아니라 동일한 지반특성을 갖는 같은 지역이라도 재하하중 등의 현장상황에 따라서 다양한 값을 가질 수 있다. 1장에서 분석한 부산지역의 경우 A_0 값은 약 0.12~0.5정도의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

기존 침하량 산정방법의 경우, 점성토 층 중앙부에서의 유효응력이 초기 유효응력이므로 식 (2)에서 $\sigma'_{v0}=1/2(H_0\gamma_{sub})$ 를 대입하고 계산하면 식 (9)와 같이 A_0 만의 함수로 정리할 수 있다.

$$S_{conventional} = \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log(1+2A_0) \quad (9)$$

3.1.2. 일정 깊이부터 점성토층이 존재하는 경우(OC Case II)

그림 3과 같이 일정 깊이(H_1)부터 점성토 층이 존재하고 점성토층 하부면의 깊이가 H_0 이며 점토층 상부에서의 초기 유효응력을 σ'_{v01} 이라고 하면, 초기 유효응력 변화가 고려된 압밀침하량 산정공식은 다음 식 (10)과 같이 A_{h0} 와 A_{h1} 의 함수로 유도할 수 있다(부록 A).

$$S = \frac{C_c(H_0-H_1)}{1+e_0} \left\{ \begin{array}{l} \log(1+A_{h0}+A_{h1})^{1+A_{h0}+A_{h1}} + \log A_{h1}^{A_{h1}} - \log(A_{h0}+A_{h1})^{A_{h0}+A_{h1}} \\ -\log(1+A_{h1})^{1+A_{h1}} \end{array} \right\} \quad (10)$$

(단, $H_0 > H_1$)

여기서, $A_{h0} = \frac{\Delta\sigma'_v}{(H_0-H_1)\gamma_{sub}}$
 $A_{h1} = \frac{\sigma'_{v01}}{(H_0-H_1)\gamma_{sub}}$

점성토층 중앙부의 응력을 초기 유효응력으로 가정하는 기존의 침하량 산정방법에서 점성토 중앙부에서의 유효응력은 $\sigma'_{v0} = \sigma'_{v01} + ((H_0-H_1)\gamma_{sub})/2$ 이므로 식 (2)에 대입하고 A_{h0}

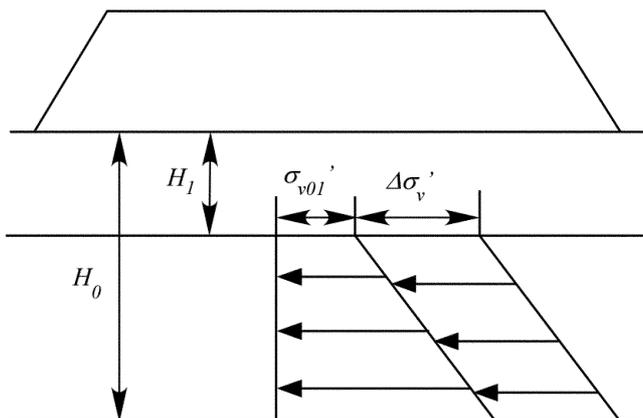


그림 3. 일정깊이 이후 정규압밀 점토층이 존재하는 지반 조건

과 A_{h1} 의 함수로 정리하면 다음 식 (11)과 같다.

$$S_{conventional} = \frac{C_c(H_0-H_1)}{1+e_0} \log \left\{ \frac{1+2(A_{h1}+A_{h0})}{1+2A_{h1}} \right\} \quad (11)$$

3.2 과압밀지반의 침하량 산정공식

과압밀 지반의 경우에는 정규압밀지반에 비하여 이론해의 전개가 복잡하다. 초기유효응력에 추가로 재하된 하중이 선행압밀응력보다 작거나 클 수 있으며, 깊이에 따라 과압밀비가 변화할 수 있다. 또한 선행압밀응력도 깊이에 따라 변화할 수 있으며, 선행압밀응력의 크기에 따라서 지층의 상부는 과압밀 상태, 하부는 정규압밀 상태로 나뉘어 질 수도 있다.

3.2.1 선행압밀응력 이내에서 하중이 재하된 경우(OC Case I)

과압밀 지반의 경우에도 증가된 유효응력이 대상 지층의 모든 깊이에서 선행압밀응력보다 작은 경우($\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v < \sigma'_p$)에는 비교적 간단히 침하량 공식을 유도할 수 있다. 즉, 정규압밀 조건의 식 (6)과 (7)에서 C_c 를 C_r 로 바꾸면 식 (12)와 같이 계산할 수 있다.

$$S' = \frac{C_r H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}} \quad (12)$$

하지만 증가된 유효응력이 선행압밀응력 이상이 될 경우($\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v > \sigma'_p$)에는 고려할 사항이 많아진다. 본 연구에서는 현장에서 쉽게 나타날 수 있는 대표적인 3가지 경우에 대하여 다음의 이론해를 유도하였다.

3.2.2 지표 상부만 과압밀 상태에 있는 경우(OC Case II)

그림 4처럼 전체 지층 깊이 H_0 에 대하여 지표 상부 H_1 만 크이 과압밀 상태에 있고, 선행압밀응력은 상부 층에 대하여 σ'_p 로 일정할 때 다음과 같이 두개 층으로 나누어 깊이에 따른 유효응력 변화가 고려된 정해를 산정할 수 있다.

먼저 깊이 H_1 까지의 상부과압밀 층에서의 침하량은 식 (13)과 같이 A_1 의 함수로 유도할 수 있으며, 깊이 $H_1 \sim H_0$ 사이 하부 정규압밀층에서의 침하량은 식 (14)와 같이 A_0 와

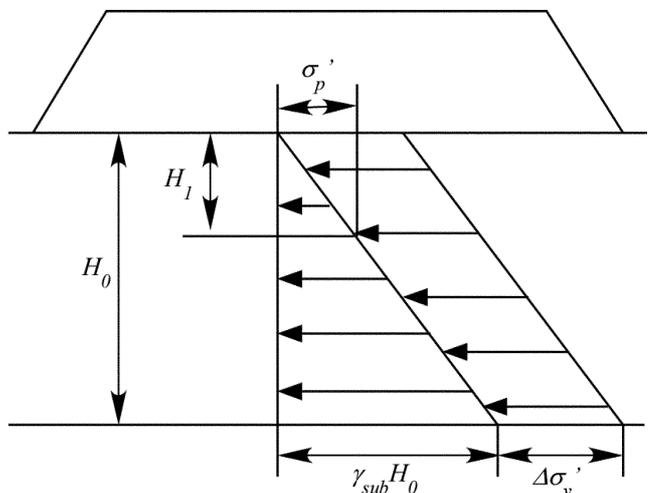


그림 4. 과압밀의 상부 지반 하부에 정규압밀 지반이 존재하는 경우

A_1 의 함수로 유도된다(부록 A 참조). 따라서 총 침하량은 식 (15)와 같이 A_0 만의 함수로 정리된다.

$$S_1 = \frac{(C_r - C_c)H_1}{(1+e_0)\ln 10} + \frac{C_c H_1}{1+e_0} \left\{ \log \frac{(1+A_1)^{1+A_1}}{A_1^{A_1}} \right\} \quad (13)$$

$$S_2 = \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}} - \frac{C_c H_1}{1+e_0} \log \frac{(1+A_1)^{1+A_1}}{A_1^{A_1}} \quad (14)$$

여기서, $A_1 = \frac{\Delta \sigma'_v}{H_1 \gamma_{sub}}$

$$S = S_1 + S_2 = \frac{(C_r - C_c)H_1}{(1+e_0)\ln 10} + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}} \quad (15)$$

(단, $H_0 > H_1$)

역시 앞의 경우와 동일하게 기존의 침하량 산정방법으로 침하량을 계산하면 상부층의 중앙부 유효응력을 이용하여 계산되는 상부층 침하량은 식 (16), 하부층 중앙의 유효응력을 이용하여 계산되는 하부층의 침하량은 식 (17)과 같다.

$$S_1 = \frac{C_r H_1}{(1+e_0)} \log 2 + \frac{C_c H_1}{1+e_0} \log \left(\frac{1}{2} + A_1 \right) \quad (16)$$

$$S_2 = \frac{C_c (H_0 - H_1)}{1+e_0} \log \left(1 + \frac{2A_1 A_0}{A_1 + A_0} \right) \quad (17)$$

따라서 총 침하량은 다음 식 (18)로 계산할 수 있다.

$$S_{conventional} = \frac{C_r H_1}{(1+e_0)} \log 2 + \frac{C_c H_1}{1+e_0} \log \left(\frac{1}{2} + A_1 \right) + \frac{C_c (H_0 - H_1)}{1+e_0} \log \left(1 + \frac{2A_1 A_0}{A_1 + A_0} \right) \quad (18)$$

3.2.3 전체 지반이 과압밀 상태이고 깊이에 따라 선행압밀응력이 일정한 경우(OC Case III)

그림 5와 같이 전체지반이 과압밀 상태이고 선행압밀응력은 깊이에 상관없이 σ'_p 로 일정한 경우의 깊이에 따른 초기 유효응력 변화가 고려된 침하량은 다음 식 (19)과 같이 A_0 와 A_p 의 함수로 유도된다(부록 A 참조).

$$S = \frac{(C_r - C_c)H_0}{\ln 10(1+e_0)} + \frac{C_r H_0}{1+e_0} \log A_p + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0} A_p} \quad (19)$$

(단, $A_p < A_0$, $A_p > 1$)

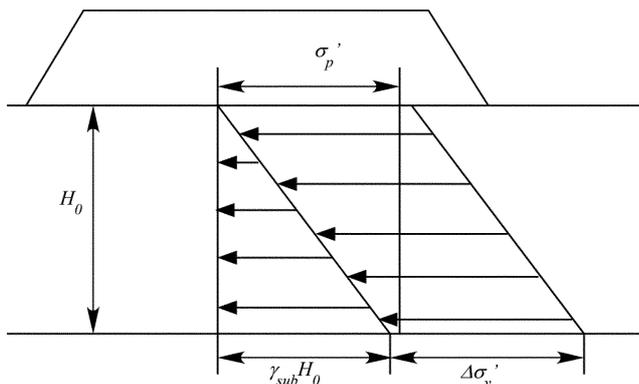


그림 5. 전체지반이 과압밀 상태이고 선행압밀응력이 깊이에 따라 일정한 경우

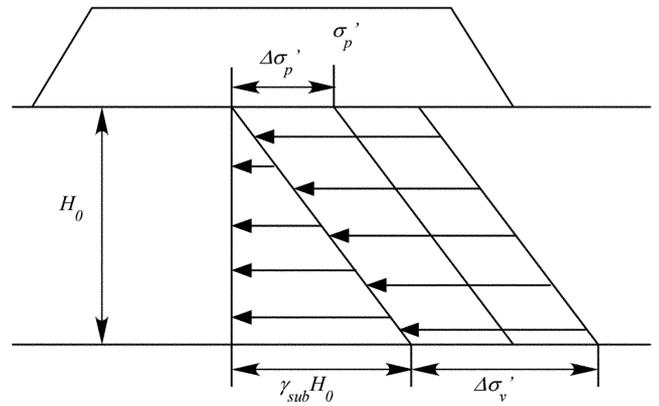


그림 6. 전체 지반이 과압밀 상태이고 선행압밀응력과 초기유효응력의 차가 일정한 경우

여기서, $A_p = \frac{\sigma'_p}{H_0 \gamma_{sub}}$

기존의 해석방법으로 침하량을 산정하면 식 (4)에서 $\sigma'_{v0} = 1/2(H_0 \gamma_{sub})$ 이므로 압밀침하량은 다음 식 (20)과 같다.

$$S_{conventional} = \frac{C_r H_0}{1+e_0} \log 2 A_p + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \left(\frac{1+2A_0}{2A_p} \right) \quad (20)$$

3.2.4 전체 지반이 과압밀 상태이고 선행압밀응력과 초기 유효응력의 차가 일정한 경우(OC Case IV)

그림 6과 같이 전체지반이 과압밀 상태이고 선행압밀응력과 초기 유효응력과의 차가 깊이에 따라 $\Delta \sigma'_p$ 로 일정한 경우의 깊이에 따른 초기유효응력 변화가 고려된 침하량은 다음 식 (21)과 같이 A_0 와 A_{p1} 의 함수로 유도된다(부록 A 참조).

$$S = \frac{C_r H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_{p1})^{1+A_{p1}}}{A_{p1}^{A_{p1}}} + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \left\{ \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}} - \log \frac{(1+A_{p1})^{1+A_{p1}}}{A_{p1}^{A_{p1}}} \right\} \quad (21)$$

(단, $A_{p1} < A_0$)

여기서, $A_{p1} = \frac{\Delta \sigma'_p}{H_0 \gamma_{sub}}$

기존의 해석방법을 적용하면 식 (4)는 다음 식 (22)와 같이 A_0 와 A_{p1} 의 함수로 다시 정리할 수 있다.

$$S_{conventional} = \frac{C_r H_0}{1+e_0} \log(1+2A_{p1}) + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \left(\frac{1+2A_0}{1+2A_{p1}} \right) \quad (22)$$

4. 결과 분석

비교적 이론해의 형태가 간단한 정규압밀 점토의 침하량 산정식인 식 (7) (즉, NC Case I)에서 점성토 층의 특성에 따라 결정되는 상수인 $(C_c H_0)/(1+e_0)$ 로 양변을 나누어주고 무차원항으로 표현된 침하량을 도시하면 그림 7과 같다. 무차원항으로 표현된 침하량은 A_0 값이 커질수록 증가한다. 이때 A_0 값은 식 (8)과 같이 압밀층 하부의 초기 유효응력에 대하여 추가로 재하되는 하중의 비와 동일한 개념이므로, 연약지반의 초기 유효응력에 대하여 재하되는 하중이 증가할수록 무차원 침하량도 증가한다는 사실을 알 수 있다.

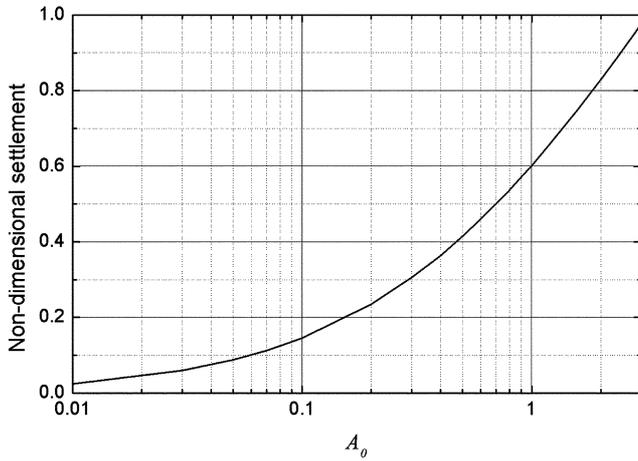


그림 7. 정규압밀 점토에서 무차원함으로 표현된 침하량과 A_0 값과의 관계(NC Case I)

기존 방법으로 구한 침하량에 대한 이론적 정해의 비율은 식 (23)과 같고 이를 그래프에 도시하면 그림 8과 같다.

$$S_{exact}/S_{conventional} = \frac{\log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}}}{\log(1+2A_0)} \quad (23)$$

여기서, S_{exact} 은 식 (7)로 정의되며 $S_{conventional}$ 는 식 (9)로 정의된다.

그림 8에 의하면 기존 침하량 산정방법은 항상 침하량을 과소평가하며, 기존 침하량 산정 결과에 비해 정해는 1.15~2.8배 정도로 크게 산정되었다. 또한 A_0 값이 감소할수록 즉, 압밀층의 초기 유효응력에 비해 추가 재하하중이 작을수록 오차가 증가한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 비교적 작은 재하하중이 점성토층 개량 공법에 사용될 경우, 기존의 방법으로 구한 근사적 예측치는 유효응력의 분포를 고려한 경우에 비해 매우 작은 값으로 계산되는 문제가 발생할 수 있다.

3장에서 제안된 다른 이론해에 대해서도 기존의 침하량 산정방법에 의한 침하량 산정결과와 비교하면 그림 9와 같다. 일정 깊이 이후부터 정규압밀 지반이 존재하는 경우는 NC Case II로 명명하였으며, 과압밀 지반의 경우에는 앞에서 제

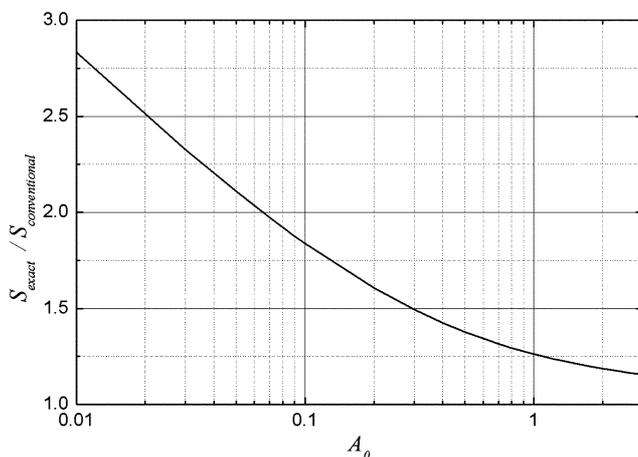


그림 8. 정규압밀 점토의 기존 침하량 산정방법에 대한 제안된 방법의 비율(NC Case I)

안된 4가지 경우를 각각 차례대로 OC Case I 부터 OC Case IV라고 명명하였다. 여기서 OC Case I은 그림 8(NC Case I)의 분석결과와 동일하므로 생략하였다. 과압밀 지반의 경우에 침하량 산정결과 비율은 A_0, A_1, A_h, A_p 등의 변수뿐만 아니라 C_r/C_c 와 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 C_r/C_c 는 1/5~1/10이므로 $C_r/C_c=1/5$ 및 $C_r/C_c=1/10$ 의 경우에 대하여 분석을 수행하였다. 그림 9에서 실선은 $C_r/C_c=1/10$, 점선은 $C_r/C_c=1/5$ 의 결과이다. 그림 9의 결과로부터 알 수 있듯이 정규압밀뿐만 아니라 과압밀조건에 대해서도 기존 침하량 산정방법은 항상 침하량을 과소평가하며, 그 오차도 1~2.2배 정도로 매우 크게 나타난다. 또한 C_r/C_c 의 변화에 의한 차이는 OC Case III를 제외하고는 크지 않은 것으로 나타났으며, 대부분의 경우 A_0 , 및 A_{h0} 값의 감소에 따라 오차가 증가하는 것으로 나타났다.

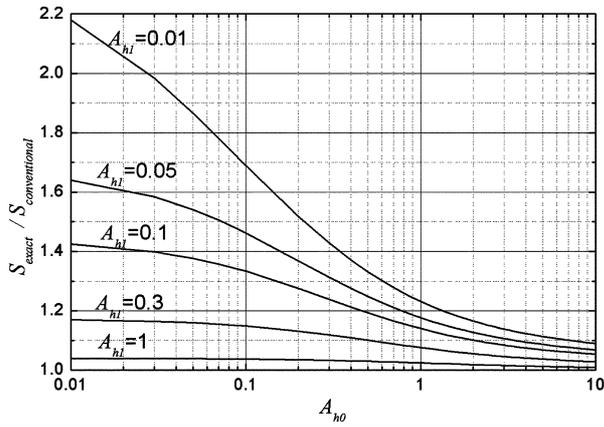
이상의 분석결과로부터 기존의 압밀침하량 산정방법이 오차가 매우 크며 침하량을 항상 과소평가하는 것으로 나타나, 본 연구에서 제안된 정해를 사용하는 것이 압밀침하량 산정 결과의 오차를 줄일 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

또한 기존의 침하량 산정방법은 항상 침하량을 과소평가하므로 만약 기존의 방법, 즉 점성토층 내부에서 특정 대표 심도를 설정하는 방법을 그대로 사용하고자 한다면, 침하량을 평가하는 기준 깊이를 기존의 점성토층 중앙부보다 더 얇은 위치로 결정해야 한다. 이에 대한 분석을 위하여 정해진 식 (7)과 기본적인 1차원 압밀 침하 공식인 식 (2)에서 동일한 침하량이 계산되는 기준 깊이 z 를 계산하면 식 (24)과 같으며, 이를 도시하면 그림 10과 같다.

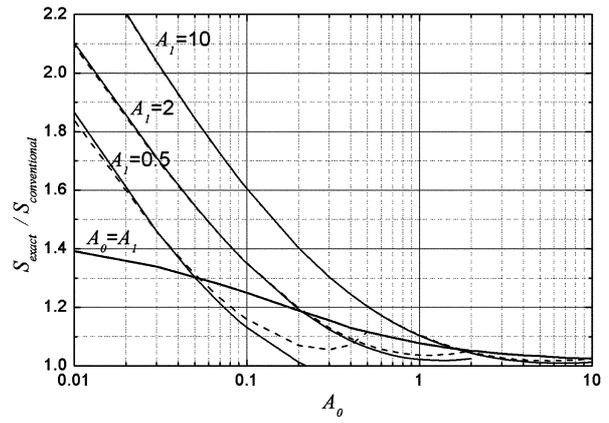
$$\frac{z}{H_0} = \frac{A_0^{1+A_0}}{(1+A_0)^{1+A_0} - A_0^{A_0}} \quad (24)$$

즉 지표면부터 점성토로 이루어진 정규압밀 점성토의 경우에는 전체 점성토 층의 두께 H_0 에 대하여 중앙부가 아닌 지표에서 약 0.23~0.35 H_0 정도의 깊이에서 초기유효응력을 산정하고 기존의 방법을 적용할 때 정해와 동일한 결과를 얻을 수 있으며, 이 때의 기준 깊이는 A_0 값이 증가할수록 깊어진다. 또한 NC Case II~OC Case IV의 경우에도 중앙부보다 얇은 위치를 대표 심도로 설정해야 한다.

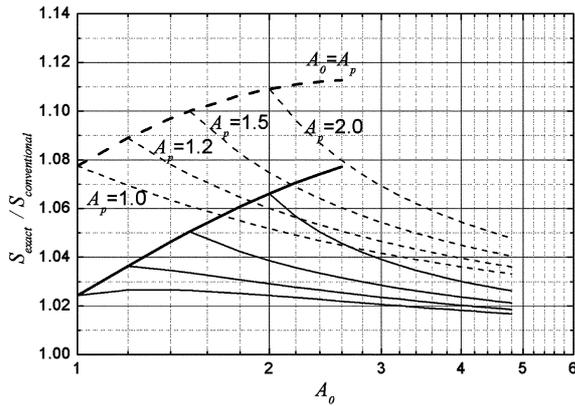
앞서 그림 1에 제시된 신호지방공단의 지반 물성치를 이용하여 3장에서 제안된 이론해를 적용하여 보았다. 다만 각각의 이론해 적용을 위하여 현장 조건을 6가지의 단순한 경우로 가정한 후 이를 바탕으로 제안된 이론해를 이용한 침하량 계산을 수행하고 기존의 침하량 계산 방법의 결과와 비교하여 보았다. NC Case I의 기본 조건은 그림 1과 같으며, NC Case II는 상부 5m 이하부터 점성토가 존재하는 것으로 가정하였다. OC Case I의 경우에는 전체 층을 $C_r=0.1$ 인 과압밀 지반으로 가정하였으며, OC Case II의 경우에는 전체 연약층 두께 40m 중 5m를 과압밀의 상부층으로 가정하여 계산하였고, OC Case III의 경우에는 전체 과압밀 지반에 대하여 층두께 10m, 선행압밀응력 70kPa, 재하하중을 100kPa로 가정하였으며, OC Case IV의 경우에는 과압밀의 전체 층에 대하여 초기 유효응력과 선행압밀응력과의 차를 20kPa로 가정하였다. 계산결과를 표 2에 정리하였다. 또한 제안된 해의 검증을 위하여 추가적으로 기존방법



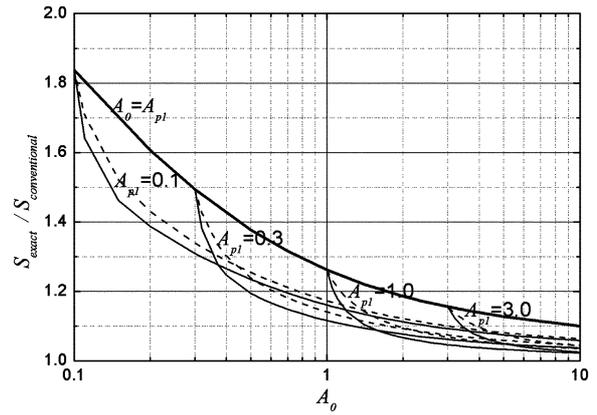
(a) NC Case II (S_{exact} : 식 (10), $S_{conventional}$: 식 (11))



(b) OC Case II (S_{exact} : 식 (15), $S_{conventional}$: 식 (18))



(c) OC Case III (S_{exact} : 식 (19), $S_{conventional}$: 식 (20))



(d) OC Case IV (S_{exact} : 식 (21), $S_{conventional}$: 식 (22))

그림 9. 기존 침하량 산정방법에 대한 제안된 이론의 침하량 비율(실선: $C_r/C_c=1/10$, 점선: $C_r/C_c=1/5$)

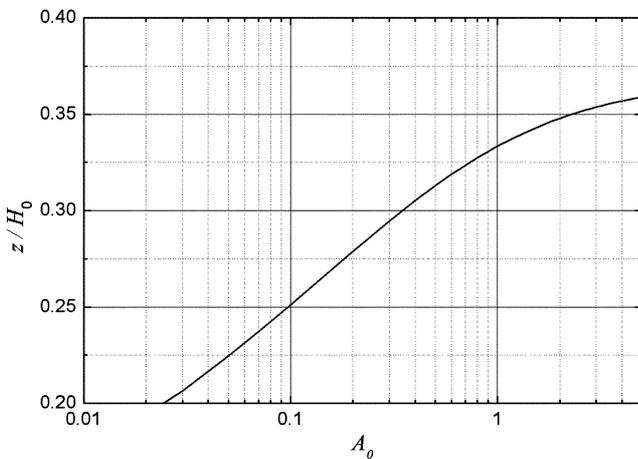


그림 10. 정규압밀 점토에서 정해와 동일한 침하량 산정을 위한 기준깊이 z

에서 층을 세분화하면서 침하량을 계산하였고 층을 세분화할수록 정해에 접근한다는 것을 확인하였다. 표 2에 층을 세분화하면서 정해와의 오차가 1% 이내로 수렴하는 층수를 같이 정리하였다.

표 2의 결과에서 보인 바와 같이, 정규압밀 조건뿐만 아니라 과압밀 조건에서도 기존의 침하량 산정방법은 깊이에 따른 유효응력 변화를 고려한 이론적 정해에 비하여 침하량을 과소평가하고 있으며, 그 차이는 약 5~77% 정도이다. 또한 그림 1에서 보인 바와 같이 한 개의 지층을 10개의 층으로 나누어 계산하여도 예측치와 정해의 차이가 9%로 여

전히 크며, 표 2의 결과와 같이 그 차이가 1% 이내로 수렴하는 층의 수가 7개 이상, 최대 92개까지도 나타난다는 점을 토대로 보았을 때, 본 연구에서 제안된 산정공식을 이용하는 것이 침하량 산정에서 가장 경제적이며 합리적인 방법이라고 판단된다.

본 연구에서 제안된 방법은 기존의 1차원 압밀침하량 산정공식을 적용할 수 있는 지반 즉, 지반물성치, 깊이별 응력 증가 및 초기 지반두께가 일정한 조건에서 적용할 수 있으며, 기초하부의 지반과 같이 1차원 조건이 아닌 경우에는 추후 더욱 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 정규압밀 및 과압밀 지반에 대하여 깊이에 따른 초기유효응력 변화를 고려한 압밀침하량 산정식을 새롭게 제안하였다. 제안된 해석이론을 다양한 측면에서 검토하고 기존의 점성토층 중앙부의 초기유효응력을 이용한 압밀침하량 산정방법 및 층 분할 계산방법과 비교·분석하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 침하량 산정방법에서는 동일한 지반특성, 하중조건과 이론해를 이용하더라도 계산 과정 중 분할한 층의 개수에 따라 침하량이 다르게 산정되며, 그 값은 정해와 큰 차이를 보일 수 있다. 계산에 소요되는 시간과 노력을 고려하였을 때 적절한 기준 없이 층을 분할하여 침하량을 계산하는 방법보다 본 연구에서 제안된 정해를 이용하는 것이

표 2. 기존의 침하량 산정 방법 및 제안된 이론해로 계산된 침하량

| | | 기존 침하량 산정방법 ($S_{conventional}$) (m) | 제안된 방법 (S_{exact}) | | 침하량 비 $S_{exact}/S_{conventional}$ | 층분할 계산시 오차 1% 이내 수렴 층수 | |
|----------|-------------|--|------------------------|---------|------------------------------------|------------------------|----|
| | | | A값 | 침하량 (m) | | | |
| 정규 압밀 | NC Case I | 0.7979 | A_0 | 0.1195 | 1.4157 | 1.7742 | 92 |
| | NC Case II | 0.6276 | A_{h0} | 0.1366 | 0.7850 | 1.2508 | 8 |
| | | | A_{h1} | 0.1429 | | | |
| 과압밀 | OC Case I | 0.1330 | A_0 | 0.1195 | 0.2359 | 1.7742 | 92 |
| | OC Case II | 0.8562 | A_0 | 0.1195 | 1.0279 | 1.2005 | 16 |
| | OC Case III | 0.7150 | A_0 | 1.4941 | 0.7524 | 1.0527 | 7 |
| | | | A_p | 1.0459 | | | |
| | OC Case IV | 0.3660 | A_0 | 0.1195 | 0.5743 | 1.5693 | 40 |
| A_{p1} | | | 0.0747 | | | | |

경제적이며 합리적인 침하량 산정방법이라고 판단된다.

2. 깊이에 따른 초기유효응력 변화를 고려한 정해와 기존의 침하량 산정식과의 차이는 1~5배 정도로 매우 크게 나타나며, 기존의 침하량 산정방법은 항상 침하량을 과소평가하는 결과를 보인다.
3. 대상 지층에 대해 대표 심도의 유효응력만을 고려한 기존의 방법을 이용할 경우, 계산치가 정해와 동일한 결과를 얻기 위해서는 대표 심도를 점성토층의 중앙부보다 더 얇은 위치에서 결정하여야 한다. 정규압밀 점성토의 경우 A_0 값이 증가할수록 대표 심도가 깊어진다. 기존 침하량 산정방법이 항상 정해보다 침하량을 과소평가하는 기타 경우(NC Case II ~ OC Case IV)에서는 중앙부보다 얇은 위치를 대표 심도로 정해야 한다.
4. 본 연구에서 제안된 방법은 기존의 1차원 압밀침하량 산정공식을 적용할 수 있는 지반, 즉 지반 물성치, 깊이별 응력증가 및 초기 지반두께가 일정한 조건에서 적용할 수 있으며, 기초하부의 지반과 같이 1차원 조건을 만족하지 못하는 경우에는 추후 더욱 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 강릉대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 한국건설기술연구원 과제번호 2008-0025-11-1에 의해 지원 받았음을 알립니다.

참고문헌

정성교(1999) 낙동강 하구 점토의 압밀특성, 연약점토지반에 관한 국제심포지움, 동아대학교.
 한국지반공학회(2003) 구조물 기초설계기준 해설, 한국지반공학회.
 Barden, L. (1965) Consolidation of clay with nonlinear viscosity, *Geotechnique*, Vol. 15, pp. 345-362.
 Bjerrum, J. (1967) Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clay as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, Vol. 17, No. 2, pp. 83-118.
 Brand, E.W. and Brenner, R.P. (1981) *Soft Clay Engineering*,

Elsevier Science Publishing Company, pp. 485-491.
 Beak, S.K., Park, K, Yune, C.-Y., Chun, S.-H., Chung, C.-K. (2005) *Estimation and Prediction of the Settlement Behavior of Test Fill on Back Site of Busan New Port*, ISSMGE, ATC-7 Symposium, pp. 411-413.
 Das, B.M. (1984) *Principles of Foundation Engineering*, 3rd Edition, PWS Publishing Company, pp. 42-44.
 Das, B.M. (2002), *Principles of Geotechnical Engineering*, Fifth Edition, Brooks/Cole.
 Garlanger, J.E. (1972) The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress, *Geotechnique*, Vol. 22, No. 1, pp. 71-78.
 Hawley, J.G. and Borin, D.L. (1973) A unified theory for consolidation of clays, *Proc. 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 107-119.
 Gibson, R.E., England, G.L.E., and Hussey, M.J.L. (1967) The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers, *Geotechnique*, Vol. 17, pp. 261-273.
 Holtz, R.D. and Kovacs, W.D. (1981) *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc. pp. 309-326.
 Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979) *Soil Mechanics*, SI Version, pp. John Wiley & Sons, Inc.
 Leroueil, S. (1996) Compressibility of clays: Fundamental and practical aspects, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE*, Vol. 122, No. 7, pp. 534-543.
 Leroueil, S., Kabbaj, M., Teavenas, F., and Bouchard, R. (1985) Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 180-195.
 Mesri, G. and Godlewski, P.M. (1977) Time- and stress-compressibility interrelationship, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE*, Vol. 103, No. 5, pp. 417-430.
 Mikasa, M. (1963) *The consolidation of clay - a new consolidation theory and its application*, Kajima (in Japanese).
 NAVFAC (1982) *Soil Mechanics*, DM-7.1, pp. 223-231.
 Taylor, D. W. (1942) *Research on consolidation of clays*, Pub. No. 82, Department of Civil Engineering, MIT.
 Terzaghi, K. (1923) Dei Berechnug Der Darchlassigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der Hydrodynamicschen pannungsercheinungen, Akademisch der Wissenschaften In Wien, Sitzungsberichte, Mathematisch-Naturwissenschaftlichs, Klasse, PartIIa, Vol. 139, No. 3/4, pp. 125-138.
 Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc. pp. 106-108.

(접수일: 2008.3.11/심사일: 2008.5.7/심사완료일: 2008.8.9)

부 록 A : 각 Case 별 압밀침하량 산정공식의 유도

1) NC Case II

그림 3과 같이 일정 깊이부터 정규압밀 점성토층이 존재하는 경우의 침하량은 다음 식 (A.1)과 같이 계산된다.

$$S = \frac{C_c}{1+e_0} \int_{H_1}^{H_0} \log \left\{ \frac{\sigma'_{v01} + \gamma_{sub}(z-H_1) + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v01} + \gamma_{sub}(z-H_1)} \right\} dz$$

$$= \frac{C_c(H_0-H_1)}{1+e_0} \left[\frac{\Delta\sigma'_v}{(H_0-H_1)\gamma_{sub}} \log \left\{ 1 + \frac{(H_0-H_1)\gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_v + \sigma'_{v01}} \right\} + \left\{ 1 + \frac{\sigma'_{v01}}{(H_0-H_1)\gamma_{sub}} \right\} \log \left\{ \frac{\Delta\sigma'_v + \sigma'_{v01} + (H_0-H_1)\gamma_{sub}}{(H_0-H_1)\gamma_{sub} + \sigma'_{v01}} \right\} - \frac{\sigma'_{v01}}{(H_0-H_1)\gamma_{sub}} \log \left(\frac{\Delta\sigma'_v + \sigma'_{v01}}{\sigma'_{v01}} \right) \right]$$

(단, $H_0 > H_1$) (A.1)

여기서, 식 (7)과 유사하게 $A_{h0} = (\Delta\sigma'_v) / ((H_0-H_1)\gamma_{sub})$ 와 $A_{h1} = \sigma'_{v01} / ((H_0-H_1)\gamma_{sub})$ 를 정의하면, 이 식은 식 (A.2)와 같이 A_{h0} 와 A_{h1} 의 함수로 간단히 정리할 수 있다.

$$S = \frac{C_c(H_0-H_1)}{1+e_0} \left\{ \log(1+A_{h0}+A_{h1})^{1+A_{h0}+A_{h1}} + \log A_{h1}^{A_{h1}} - \log(A_{h0}+A_{h1})^{A_{h0}+A_{h1}} - \log(1+A_{h1})^{1+A_{h1}} \right\}$$

(A.2)

2) OC Case II

그림 4와 같이 상부 과압밀 지반 하부에 정규압밀 지반이 존재하는 경우의 침하량은 다음과 같이 2개의 층에 대하여 각각 계산된다.

i) 깊이: 0~ H_1

상부과압밀 층에서의 침하량은 다음 식 (A.3)과 같이 계산할 수 있다.

$$S_1 = \frac{C_r}{1+e_0} \int_0^{H_1} \log \left(\frac{\sigma'_p}{\gamma_{sub}z} \right) dz + \frac{C_c}{1+e_0} \int_0^{H_1} \log \left(\frac{\gamma_{sub}z + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_p} \right) dz$$

$$= \frac{C_r H_1}{1+e_0} \left\{ \frac{1}{\ln 10} + \log \left(\frac{\sigma'_p}{H_1 \gamma_{sub}} \right) \right\} + \frac{C_c}{1+e_0} \left[\frac{\Delta\sigma'_v}{\gamma_{sub}} \log \left(1 + \frac{H_1 \gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_v} \right) + H_1 \left\{ \log \left(\frac{H_1 \gamma_{sub} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_p} \right) - \frac{1}{\ln 10} \right\} \right]$$

(A.3)

그림 4에서 $\sigma'_p = H_1 \gamma_{sub}$ 이므로 식 (A.3)에서 $A_1 = (\Delta\sigma'_v) / (H_1 \gamma_{sub})$ 로 정의하고 정리하면 식 (A.3)는 다음 식 (A.4)와 같이 A_1 의 함수로 간단히 정리할 수 있다.

$$S_1 = \frac{(C_r - C_c)H_1}{(1+e_0)\ln 10} + \frac{C_c H_1}{1+e_0} \left\{ \log \frac{(1+A_1)^{1+A_1}}{A_1^{A_1}} \right\}$$

(A.4)

ii) 깊이: $H_1 \sim H_0$

하부 정규압밀 층에서의 침하량은 다음 식 (A.5)와 같이 계산할 수 있다.

$$S_2 = \frac{C_c}{1+e_0} \int_{H_1}^{H_0} \log \left(\frac{\gamma_{sub}z + \Delta\sigma'_v}{\gamma_{sub}z} \right) dz$$

$$= \frac{C_c H_0}{1+e_0} \left\{ \frac{\Delta\sigma'_v}{H_0 \gamma_{sub}} \log(\Delta\sigma'_v + H_0 \gamma_{sub}) + \log \left(1 + \frac{\Delta\sigma'_v}{H_0 \gamma_{sub}} \right) \right\} - \frac{C_c H_1}{1+e_0} \left\{ \frac{\Delta\sigma'_v}{H_1 \gamma_{sub}} \log(\Delta\sigma'_v + H_1 \gamma_{sub}) + \log \left(1 + \frac{\Delta\sigma'_v}{H_1 \gamma_{sub}} \right) \right\}$$

(A.5)

$A_0 = (\Delta\sigma'_v) / (H_0 \gamma_{sub})$ 와 $A_1 = (\Delta\sigma'_v) / (H_1 \gamma_{sub})$ 를 정의하면, 식 (A.5)는 식(A.6)과 같이 간단히 정리할 수 있으며, 따라서 총 침하량 S는 식 (A.7)과 같이 A_0 만의 함수로 간단히 정리된다.

$$S_2 = \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}} - \frac{C_c H_1}{1+e_0} \log \frac{(1+A_1)^{1+A_1}}{A_1^{A_1}}$$

(A.6)

$$S = S_1 + S_2 = \frac{(C_r - C_c)H_1}{(1+e_0)\ln 10} + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}}$$

(단, $H_0 > H_1$) (A.7)

3) OC Case III

그림 5와 같이 전체지반이 과압밀 상태이고 선행압밀응력이 깊이에 따라 일정한 경우의 침하량은 다음 식 (A.8)과 같이 계산된다.

$$S = \frac{C_r}{1+e_0} \int_0^{H_0} \log \left(\frac{\sigma'_p}{\gamma_{sub}z} \right) dz + \frac{C_c}{1+e_0} \int_0^{H_0} \log \left(\frac{\gamma_{sub}z + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_p} \right) dz$$

$$= \frac{C_r H_0}{1+e_0} \left\{ \frac{1}{\ln 10} + \log \left(\frac{\sigma'_p}{H_0 \gamma_{sub}} \right) \right\} + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \left\{ \frac{\Delta\sigma'_v}{H_0 \gamma_{sub}} \log \left(\frac{H_0 \gamma_{sub} + \Delta\sigma'_v}{\Delta\sigma'_v} \right) + \log \left(\frac{H_0 \gamma_{sub} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_p} \right) - \frac{1}{\ln 10} \right\}$$

(A.8)

이 식에서 $A_0 = (\Delta\sigma'_v) / (H_0 \gamma_{sub})$ 와 $A_p = (\sigma'_p) / (H_0 \gamma_{sub})$ 를 정의하면 다음 식 (A.9)와 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$S = \frac{(C_r - C_c)H_0}{\ln 10(1+e_0)} + \frac{C_r H_0}{1+e_0} \log A_p + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0} A_p}$$

(단, $A_p < A_0, A_p > 1$) (A.9)

4) OC Case IV

그림 6과 같이 전체지반이 과압밀 상태이고 깊이에 따라 선행압밀응력과 초기 유효응력의 차가 일정한 경우의 침하량은 다음 식 (A.10)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
S &= \frac{C_r}{1+e_0} \int_0^{H_0} \log\left(\frac{\gamma_{sub}z + \Delta\sigma'_p}{\gamma_{sub}z}\right) dz + \frac{C_c}{1+e_0} \int_0^{H_0} \log\left(\frac{\gamma_{sub}z + \Delta\sigma'_v}{\gamma_{sub}z + \Delta\sigma'_p}\right) dz \\
&= \frac{C_r H_0}{1+e_0} \left\{ \left(1 + \frac{\Delta\sigma'_p}{H_0 \gamma_{sub}}\right) \log\left(1 + \frac{H_0 \gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_p}\right) - \log\left(\frac{H_0 \gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_p}\right) \right\} \\
&+ \frac{C_c H_0}{1+e_0} \left\{ \log\left(\frac{H_0 \gamma_{sub} + \Delta\sigma'_v}{H_0 \gamma_{sub} + \Delta\sigma'_p}\right) - \frac{\Delta\sigma'_p}{H_0 \gamma_{sub}} \log\left(\frac{H_0 \gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_p} + 1\right) + \frac{\Delta\sigma'_v}{H_0 \gamma_{sub}} \log\left(\frac{H_0 \gamma_{sub}}{\Delta\sigma'_v} + 1\right) \right\}
\end{aligned}
\tag{A.10}$$

앞의 식과 동일한 방법으로 $A_0 = (\Delta\sigma'_v)/(H_0 \gamma_{sub})$ 와 $A_{p1} = (\Delta\sigma'_p)/(H_0 \gamma_{sub})$ 를 정의하면, 식 (A.10)은 식 (A.11)과 같이 A_0 와 A_{p1} 의 함수로 간단히 정리할 수 있다.

$$S = \frac{C_r H_0}{1+e_0} \log \frac{(1+A_{p1})^{1+A_{p1}}}{A_{p1}^{A_{p1}}} + \frac{C_c H_0}{1+e_0} \left\{ \log \frac{(1+A_0)^{1+A_0}}{A_0^{A_0}} - \frac{(1+A_{p1})^{1+A_{p1}}}{A_{p1}^{A_{p1}}} \right\}
\tag{A.11}$$

(단, $A_{p1} < A_0$)