

포화 점성토지반 침하량의 합리적 평가를 위한 실용적인 응력경로법 적용방법 : Part II (침하량 평가절차와 적용예제)

A Practical Approach of Stress Path Method for Rational Settlement Estimation of Saturated Clay Deposits : Part II (Settlement Estimation Procedure and Application Examples)

김 창 엽¹ Kim, Chang-Youb

정 충 기² Chung, Choong-Ki

Abstract

In Part I of this paper, a conceptual approach of the stress path method was newly proposed for a rational estimation of settlements of saturated clay deposits. A detailed procedure for effective evaluation and use of settlement-related characteristic deformation behaviors was developed in order to provide practicality to the new approach. In this Part II, on the basis of the results of Part I, the concept of the new approach was embodied in the form of a detailed settlement estimation procedure. The applicability and usefulness of the new procedure were strongly supported by various application examples. In addition, possible errors of other conventional settlement estimation methods were investigated by comparing with the new procedure. Because of its flexible applicability for wide range of field conditions, the new procedure will have great usefulness in the practical side. For example, a reasonable foundation design based on allowable settlement criteria can be easily performed and modification of design factors can be readily reflected even during the subsequent construction stage. Especially, the new procedure will be of great use for preliminary work in a large scale construction site where various structures are planned to be constructed on a nearly identical ground condition.

요 지

본 연구의 Part I에서는 포화 점성토지반 침하량의 합리적인 평가를 위한 새로운 개념의 응력경로법 적용방법을 제안하였으며, 이러한 새로운 개념의 실용화와 관련하여 포화 점성토지반의 침하관련 특성변형거동을 효율적으로 평가하고 활용하는 구체적인 방법을 개발하였다. 본 Part II에서는 이러한 선행 연구결과를 바탕으로 실제 침하량 평가에 활용가능한 수준의 침하량 평가절차를 개발하였으며, 다양한 예제에 대한 침하량 분석을 통해 그 적용성과 유용성을 확인하였다. 이와 더불어 개발된 평가방법과의 비교를 통해 기존 평가방법들의 한계 또한 명확히 제시하였다. 본 연구에서 개발된 침하량 평가절차는 그 뛰어난 유연한 적용성으로 인해 향후 여러 관련 시공현장에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 대표적인 예로, 개발된 평가절차는 특정 구조물에 대해 허용침하량 기준을 만족하도록 다양한 설계대안을 검토하거나 또는 시공과정에서 발생하는 각종 설계변경이 침하량에 미치는 영향을 즉각적으로 평가할 필요가 있는 경우 등에 효과적으로 활용될 수 있으며, 특히 동일한 지반 상에 다양한 구조물이 들어서게 될 대규모 부지에 대한 사전 검토작업에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

Keywords : Characteristic deformation behaviors, Saturated clay deposit, Settlement, Stress path method

1 정회원, 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 박사후 연구원 (Member, Post Doc., Coastal Engrg. and Harbour Research Division, Korean Ocean Research and Development Institute, macy2000@snu.ac.kr)

2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

1. 서론

본 연구의 Part I에서는 포화 점성토지반의 침하량 평가와 관련하여 응력경로법(Lambe 1964, 1967, Lambe & Marr 1979)에 근거한 보다 합리적인 침하량 평가방법의 개념을 새롭게 제안하였다. 그리고 그 실용성을 확보하기 위한 현실적인 방안으로 특정 점성토지반의 침하 관련 특성변형거동을 효율적으로 평가하고 활용하는 구체적인 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 이러한 선행 연구결과를 바탕으로 실제 침하량 평가에 활용가능한 수준의 침하량 평가절차를 개발하였으며, 다양한 예제에 대한 침하량 분석을 통해 그 적용성과 유용성을 확인하였다. 이와 더불어 개발된 평가방법과의 비교를 통해 기존 평가방법들의 한계 또한 명확히 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 먼저 원형기초 또는 정방형기초 등의 하부지반에서 나타나는 축대칭조건에 대해 전체 구조물하중이 일시에 재하되는 경우를 대상으로 기본적인 침하량 평가절차를 개발하였으며, 이를 실제 시공현장에서 보다 자주 접하게 되는 평면변형률조건과 다단계 재하조건에 대해 적용 가능하도록 확장하였다.

2. 새로운 침하량 평가방법의 개념

본 연구에서 새롭게 제안된 침하량 평가방법(그림 1)에서는 먼저 일련의 응력경로시험을 통해 구조물 건설에 따라 현장에서 나타날 수 있는 모든 응력변화 조건을 포괄하는 대상 지반의 특성변형거동을 선행하여 평가한다. 이후 특정 구조물의 침하량은 그 구조물의 하부지반이 경험하게 될 응력변화를 예측하여 이를 선행 평가된 특성변형거동에 대입하는 방식으로 평가한다. 즉 제안된 침하량 평가방법은 대상 지반의 전반적인 변형거동만을 실험적으로 평가한 다음, 구조물 건설에 따른 하부지반의 응력변화를 예측, 반영하는 단순한 계산과정의 반복만으로 발생가능한 다양한 현장조건에 대해 침하량

을 평가하는 매우 유연하고 능동적인 접근방법이다.

본 연구의 Part I에서는 이와 같은 새로운 침하량 평가방법의 실용성을 확보하기 위한 현실적인 방안으로 점성토지반의 정규화된 거동특성과 새롭게 고안된 응력경로시험기법 및 압밀변형률 예측기법을 구성요소로 하는 효율적인 특성변형거동 평가 및 활용방법을 제시하였다. 즉 대상 점성토지반의 침하 관련 특성변형거동을 최소한의 실험을 통해 파악하고, 이를 바탕으로 임의의 응력변화 조건에 대응하는 변형거동을 손쉽게 예측하는 구체적인 방법을 개발하였다.

개발된 방법에 채택된 응력경로시험기법은 비배수상태에서 시료의 연직방향 응력만을 연속적으로 증가시키는 단순화된 비배수 재하과정, 비배수 재하과정에서 발생한 과잉간극수압 만큼 배압을 증가시킨 후 배수밸브를 개방하는 배압평형과정 그리고 배압평형과정을 통해 구현된 배수조건 하에서 시료 외부에 가해지는 연직방향 및 횡방향 압밀응력을 능동적으로 제어하는 방식으로 수행되는 능동압밀과정으로 구성되어 있으며, 포화 점성토지반의 일반적인 응력변화를 보다 정확하고 효과적으로 재현할 수 있도록 고안되었다. 또한 채택된 압밀변형률 예측기법은 동일한 출발점을 가지는 다양한 압밀응력경로를 최소한의 시험을 통해 포괄할 수 있도록 고안되었으며, 직교이방 탄성체의 구성방정식과 함께 동일 변형에너지밀도를 기준으로 하는 체계적인 입력변수 선정절차를 도입함으로써 점성토지반의 이방적이고 비선형적인 거동특성을 합리적으로 반영할 수 있도록 구성되었다.

3. 축대칭조건 및 일시 재하조건에 대한 침하량 평가절차

본 연구의 Part I을 통해 제시된 특성변형거동의 평가 및 활용방법을 바탕으로, 축대칭조건하에서 전체 구조물하중이 일시에 재하되는 경우에 대해 적용 가능하도록 개발된 침하량 평가절차는 다음의 그림 2와 같다.

먼저 첫 번째 응력경로시험 단계와 두 번째 특성변형거동 평가단계에서는 Part I에 제시된 방법에 따라 대상 지반의 응력이력을 대변하는 하나의 대표 초기응력상태와 몇 개의 선택된 비배수 재하수준(비배수 축차응력 증분 수준) 그리고 각각의 비배수 재하수준에 대해 서로 다른 두 가지 압밀응력증분비[$K_I^* = (\Delta\sigma'_h)_I / (\Delta\sigma'_v)_I$, $K_{II}^* = (\Delta\sigma'_h)_{II} / (\Delta\sigma'_v)_{II}$]를 재현하는 최소한의 응력경

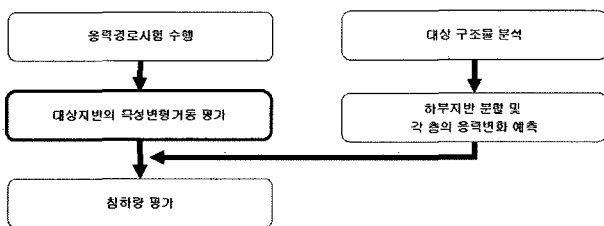


그림 1. 본 연구에서 제안된 새로운 응력경로법 적용방법

로 시험만을 수행한다. 그리고 그 결과를 초기 연직유효응력(σ'_{vi})으로 정규화하여 정규화된 형태의 축차응력증분-즉시변형을 관계(①)와 축차응력증분-축차과잉간극수압 관계(②) 및 네 가지 평균압밀응력증분-축차응력증분-압밀변형을 관계(③~⑥)로 제시한다. [①

$$\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}, \quad \text{②} \quad \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}}, \quad \text{③} \quad \frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_I,$$

$$\text{④} \quad \frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_I, \quad \text{⑤} \quad \frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_{II},$$

$$\text{⑥} \quad \frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_{II}]$$

세 번째 응력경로 평가단계에서는 침하량을 구하고자 하는 특정 구조물의 하부지반을 지층변화나 깊이에 따른 응력감소 양상을 감안하여 몇 개의 층으로 나누고 각 층의 중앙점을 대표점으로 선정한다. 그리고 선정된 각 대표점의 응력변화를 현장의 초기응력상태(σ'_{vi} , σ'_{hi}), 구조물하중 재하 직후의 응력증분($\Delta\sigma_v$, $\Delta\sigma_h$), 압밀완료 후의 응력증분($\Delta\sigma_v^*$, $\Delta\sigma_h^*$) 항으로 평가한다. 이때 필요한 응력증분들은 일반적으로 이용되는 탄성해로부터 큰 어려움 없이 계산될 수 있다.

마지막 네 번째 침하량 평가단계에서는 각 대표점의

Step 1 : 응력경로시험 단계

- 시험조건
 - 하나의 대표 초기응력상태와 몇 개의 선택된 비배수 재하수준
 - 각각의 비배수 재하수준에 대해 두 가지 서로 다른 압밀응력증분비 (K_I^* , K_{II}^*)
- 총 시험수 = 1 * 선택된 비배수 재하수준의 수 * 2

Step 2 : 특성변형거동 평가단계

- 정규화를 통한 비배수 특성변형거동 평가
 - ① $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$ 관계 & ② $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}}$ 관계
- 정규화와 비배수 재하수준에 대한 보간을 통한 압밀 특성변형거동 평가
 - K_I^* 에 대한 ③ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_I$ 관계 & ④ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_I$ 관계
 - K_{II}^* 에 대한 ⑤ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_{II}$ 관계 & ⑥ $\frac{(\Delta\sigma'_m)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_{II}$ 관계

Step 3 : 응력경로 평가단계

- 대상 점성토층을 몇 개의 층으로 분할하고 각 층의 중앙점을 대표점으로 선정
- 각 대표점의 응력상태 변화 평가
 - 초기응력상태 (σ'_{vi} , σ'_{hi})
 - 구조물하중 재하 직후의 응력증분 ($\Delta\sigma_v$, $\Delta\sigma_h$)
 - 압밀완료 후의 응력증분 ($\Delta\sigma_v^*$, $\Delta\sigma_h^*$)

Step 4 : 침하량 평가단계

즉시변형률과 과잉간극수압의 평가

- 각 대표점에 대하여,
 - 각 대표점의 $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}}$ 을 ① 관계에 대입하여 ϵ_{vu} 평가
 - 각 대표점의 $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}}$ 을 ② 관계에 대입하여 Δu_d 평가
 - $\Delta u_v = \Delta u_d + \Delta\sigma_h$ 관계를 이용하여 Δu_v 계산

압밀변형률 평가

- $\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma_v^* - \Delta\sigma_v + \Delta u_v$ & $\Delta\sigma'_h = \Delta\sigma_h^* - \Delta\sigma_h + \Delta u_v$ 관계를 이용하여 압밀응력증분 계산
- 축대칭조건을 압밀변형률 예측기법과 ③~⑥ 관계를 이용하여 ϵ_{vc} 예측

연직변형률 적분을 통한 침하량 평가

- ϵ_{vu} 를 층두께에 대해 적분하여 즉시침하량 S_i 평가 $S_i = \int \epsilon_{vu} dz = \Sigma \epsilon_{vu} \Delta z$
- ϵ_{vc} 를 층두께에 대해 적분하여 압밀침하량 S_c 평가 $S_c = \int \epsilon_{vc} dz = \Sigma \epsilon_{vc} \Delta z$
- 즉시침하량 S_i 와 압밀침하량 S_c 를 합산하여 전체 침하량 S_t 평가

그림 2. 침하량 평가절차 (축대칭조건)

정규화된 축차응력증분($\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}}$)을 선행평가된 비배수 특성변형거동(①, ②)에 대입하여 연직방향 즉시변형률(ϵ_{vi})과 축차간극수압(Δu_d)을 평가한다. 다음으로 식 (1)을 통해 전체 과잉간극수압(Δu_e)을 계산하고, 식 (2)와 식 (3)을 통해 각 대표점의 압밀 중 압밀응력증분($\Delta\sigma'_v$, $\Delta\sigma'_h$)을 결정한다. 결정된 압밀응력증분에 대응하는 연직방향 압밀변형률(ϵ_{vc})은 Part I에 제시된 축대칭조건의 압밀변형률 예측기법에 따라 예측되며, 이러한 예측과정에 필요한 입력변수들은 선행 평가된 압밀 관련 특성변형거동(③~⑥)으로부터 선정된다. 최종적으로 대상 구조물의 즉시침하량(S_i)과 압밀침하량(S_p)은 각 대표점의 연직방향 즉시변형률과 압밀변형률을 깊이에 따라 적분하여 평가되며, 전체 침하량(S_t)은 그 합으로 평가된다.

$$\Delta u_e = \Delta u_d + \Delta\sigma_h \quad (1)$$

$$\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma_v^* - \Delta\sigma_v + \Delta u_e \quad (2)$$

$$\Delta\sigma'_h = \Delta\sigma_h^* - \Delta\sigma_h + \Delta u_e \quad (3)$$

이와 같은 단계적인 침하량 평가절차와 관련하여 다시 한번 주목해야 할 점은 대상지반의 기본적인 특성변형거동을 파악하기 위한 첫 번째, 두 번째 단계는 단 한 번만 수행되며, 이후 다양한 구조물 또는 설계대안에 대한 침하량 평가는 단순한 계산과정인 세 번째, 네 번째 단계의 반복만으로 손쉽게 수행될 수 있다는 점이다.

4. 개발된 침하량 평가절차의 적용사례

본 연구에서는 개발된 침하량 평가절차의 적용성과 유용성을 확인하기 위하여 다음의 그림 3과 같이 이상화된 지반조건과 하중조건에 대해 실제로 침하량 평가를 수행하였다. 대상 점성토층은 2m 두께의 매립층 아래에 놓인 10m 두께의 포화 점성토층이며, 그 아래에는 견고한 암반층이 존재한다. 대상 점성토층은 표 1에 제시된 기본적인 물성치를 가지는 저소성 점성토(kaolinite 점토)로 구성되어 있으며, 정규압밀상태인 것으로 가정한다. 지하수위는 점성토층의 상단에 위치하며, 구조물

하중은 원형의 완전연성기초를 통해 가해진다. 본 연구에서는 이와 같은 기본적인 지반조건과 하중조건하에서 다양한 구조물하중(Q_{net}), 기초반경(R), 근입깊이(D_f)를 가지는 여러 가지 경우에 대해 침하량 평가를 수행하였다.

대상 점성토층의 특성은 초기 함수비 75%의 kaolinite 슬러리를 대형 1차원 시료성형기(직경 350mm, 높이 600mm) 내에서 140kPa의 연직 압밀압으로 압밀하여 제작된 시료에 대한 실제 시험을 통해 파악되었다. 사용시료의 단위중량과 초기함수비, 압밀특성, 투수특성은 표 2에 제시한 바와 같다.

4.1 침하량 평가과정 및 결과

대상 점성토층에 대한 침하량 평가과정을 135t의

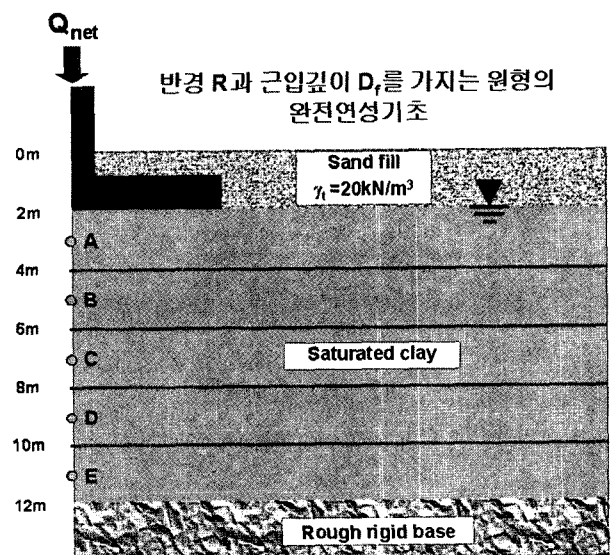


그림 3. 침하량 평가예제의 기본적인 지반조건과 하중조건

표 2. 사용시료의 단위중량, 초기함수비, 압밀특성, 투수특성

단위중량 γ_t (kN/m ³)	1.71~1.76
초기함수비 w_o (%)	37.6~40.2
선행압밀하중 p'_c (kPa)	98~116
압축지수 C_c	0.253~0.286
재압축지수 C_r	0.110~0.126
연직방향 투수계수 k_v (m/s)	$5.24 \times 10^{-9} \sim 2.93 \times 10^{-8}$
방사방향 투수계수 k_r (m/s)	$1.07 \times 10^{-8} \sim 2.95 \times 10^{-8}$

표 1. 대상 점성토층의 기본 물성치

비중 G_s	액성한계 LL	소성한계 PL	소성지수 PI	200번체 통과량 (%)	통일분류
2.59	44.4	21.1	23.3	98.0	CL

구조물하중과 5m의 기초반경 그리고 2m의 근입깊이 ($Q_{net} = 135t$, $R = 5m$, $D_f = 2m$)를 가지는 대표적인 경우에 대해 설명하면 다음과 같다.

첫 번째 응력경로시험 단계에서는 표 3에 제시된 바와 같이 대상 점성토층의 가정된 응력이력 즉 정규압밀상태를 대변하는 하나의 대표 초기응력상태와 5가지 선택된 비배수 재하수준 그리고 각각의 비배수 재하수준에 대해 2가지 서로 다른 압밀응력증분비($K_I^* = 0.57$, $K_{II}^* = 1$)를 재현하는 총 10회의 응력경로시험을 수행하였다. 그림 4는 이와 같이 수행된 응력경로시험의 비배수 재하과정에서 측정된 연직방향 즉시변형률과 축차과잉간극수압을 축차응력증분에 대해 나타낸 결과이며, 그림 5는 압밀과정에서 측정된 연직방향 및 횡방향 압밀변형률을 각각의 압밀응력증분비에 대해 평균압밀응력증분($\Delta\sigma'_m$)

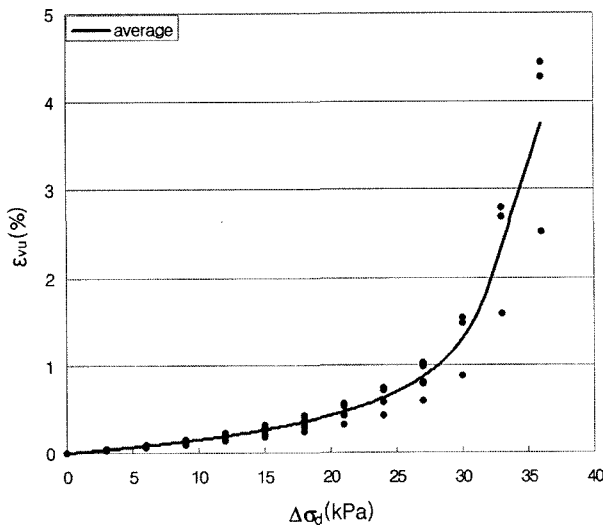
을 수평축으로 하여 나타낸 결과이다.

두 번째 특성변형거동 평가단계에서는 그림 4에 제시된 연직방향 즉시변형률과 축차과잉간극수압의 평균적인 변화경향을 초기 연직유효응력으로 정규화하여, 그림 6과 같이 정규화된 형태의 축차응력증분-연직방향 즉시변형률 관계와 축차응력증분-축차과잉간극수압 관계로 제시하였다. 또한 그림 5에 제시된 압밀변형률 거동을 초기 연직유효응력으로 정규화한 다음 이를 비배수 재하수준에 대해 보간하여, 그림 7과 같이 네 가지 정규화된 평균압밀응력증분-축차응력증분-압밀변형률 관계로 제시하였다.

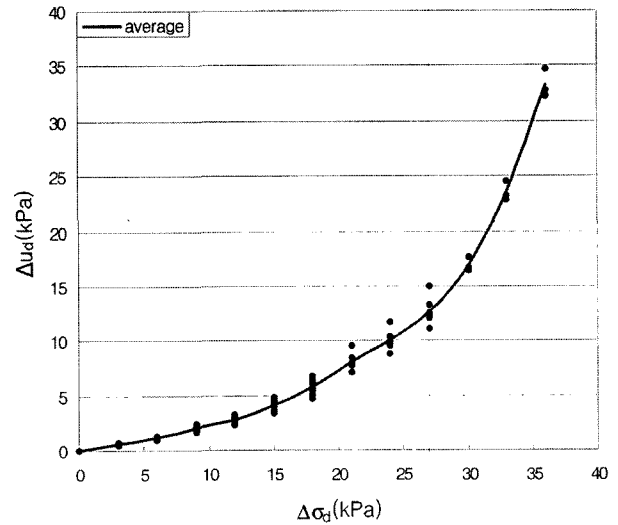
세 번째 응력경로 평가단계에서는 그림 4에 나타낸 바와 같이 대상 점성토층을 5개의 층으로 나누어 각 층의 중앙점을 대표점으로 선정하였다. 그리고 각 대표점

표 3. 특성변형거동 평가를 위해 수행된 응력경로시험 조건

시험명	K_o 압밀과정			비배수 재하과정 $\Delta\sigma_d$ (kPa)	압밀과정 $K^* = \frac{\Delta\sigma'_h}{\Delta\sigma'_v}$
	σ'_{vs} (kPa)	σ'_{hs} (kPa)	K_o		
SP-U1-C1	200	100	0.5	0	0.57
SP-U1-C3					1
SP-U2-C1				9	0.57
SP-U2-C3					1
SP-U3-C1				18	0.57
SP-U3-C3					1
SP-U4-C1				27	0.57
SP-U4-C3					1
SP-U5-C1				36	0.57
SP-U5-C3					1

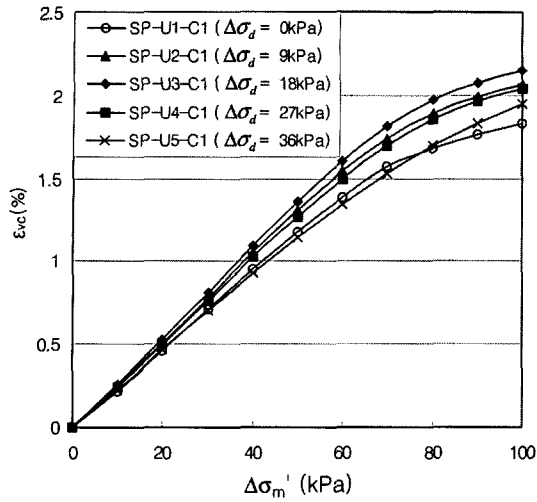


(a) $\Delta\sigma_d - \epsilon_{vu}$ 관계

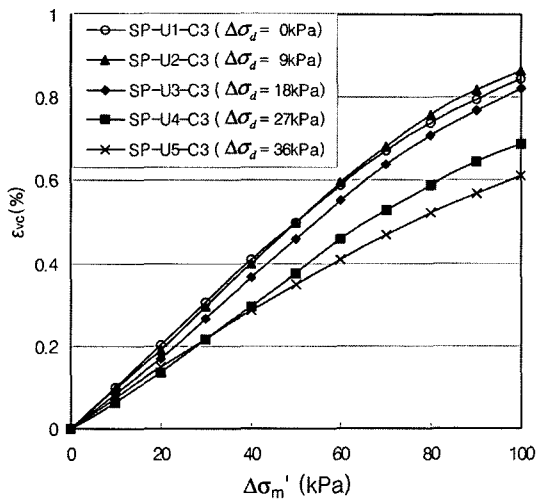
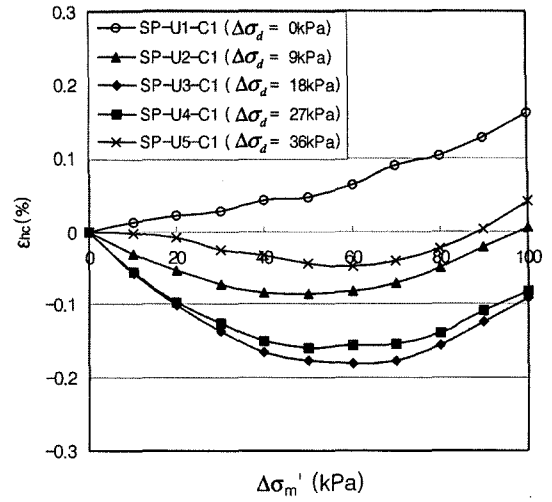


(b) $\Delta\sigma_d - \Delta u_d$ 관계

그림 4. 응력경로시험의 비배수 재하결과



(a) $K_{\gamma}^* = 0.57$ 인 C1계열의 압밀변형을 거동



(b) $K_{\gamma}^* = 1$ 인 C3계열의 압밀변형을 거동

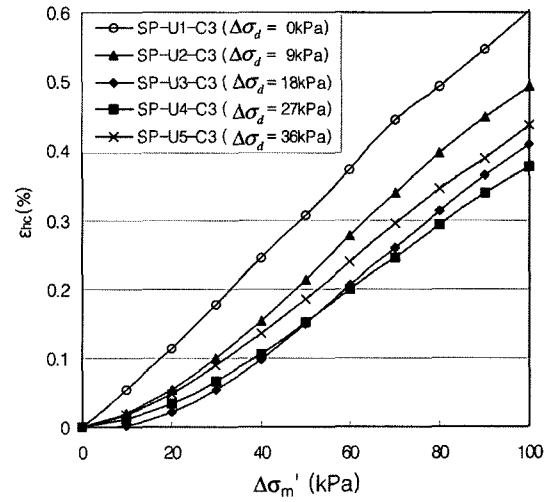
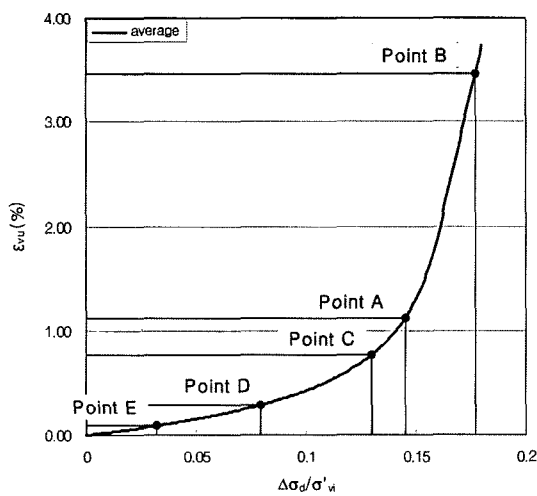
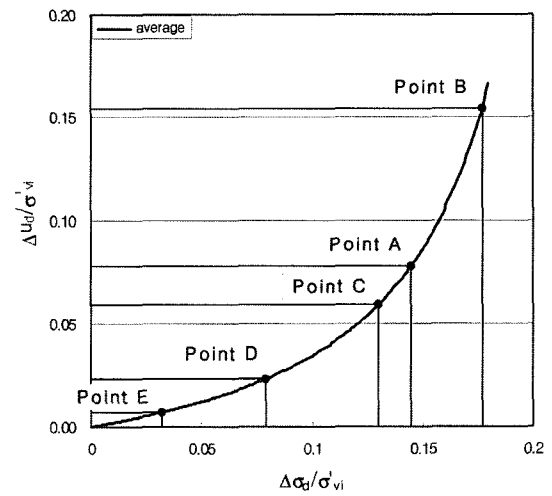


그림 5. 응력경로시험의 압밀결과



(a) $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$ 관계



(b) $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_0}{\sigma'_{vi}}$ 관계

그림 6. 비배수 특성변형거동

의 응력상태 변화를 탄성해를 이용하여 다음의 표 4와 같이 평가하였다. 이때 구조물하중 재하 직후의 응력증분 평가에는 비배수상태의 포아송비($\nu_u = 0.5$)가 탄성해의 입력값으로 이용되었으며, 압밀완료 후의 응력증분 평가에는 배수상태의 포아송비($\nu' = K_o / (1 + K_o) = 0.33$)가 이용되었다.

마지막 네 번째 침하량 평가단계에서는 먼저 각 대표점의 정규화된 축차응력증분을 그림 6에 나타난 바와 같이 선행 평가된 비배수 특성변형거동에 대입하여, 표 5의 3열과 5열에 제시된 연직방향 즉시변형률과 축차과잉간극수압을 평가하였다. 다음으로 식 (1)~식 (3)을 이용하여 각 대표점의 전체 과잉간극수압과 연직방향

및 횡방향 압밀응력증분을 표 5의 6열~8열에 제시된 바와 같이 결정하였다. 결정된 압밀응력증분에 대응하는 각 대표점의 연직방향 압밀변형률은 Part I에 제시된 축대칭조건의 압밀변형률 예측기법과 그림 7의 압밀 관련 특성변형거동을 이용하여 표 5의 마지막 열에 제시된 바와 같이 평가하였다. 최종적으로 대상 점성토층의 즉시침하량(S_i)과 압밀침하량(S_c)은 각 대표점의 연직방향 즉시변형률과 압밀변형률을 깊이에 따라 적분하여 각각 114.56mm와 29.64mm로 평가하였으며, 전체 침하량(S_t)은 그 합인 144.20mm로 평가하였다.

다음의 그림 8~그림 10은 앞의 대표 예제와 동일한 과정을 거쳐 평가된 다양한 구조물하중, 기초크기, 근입

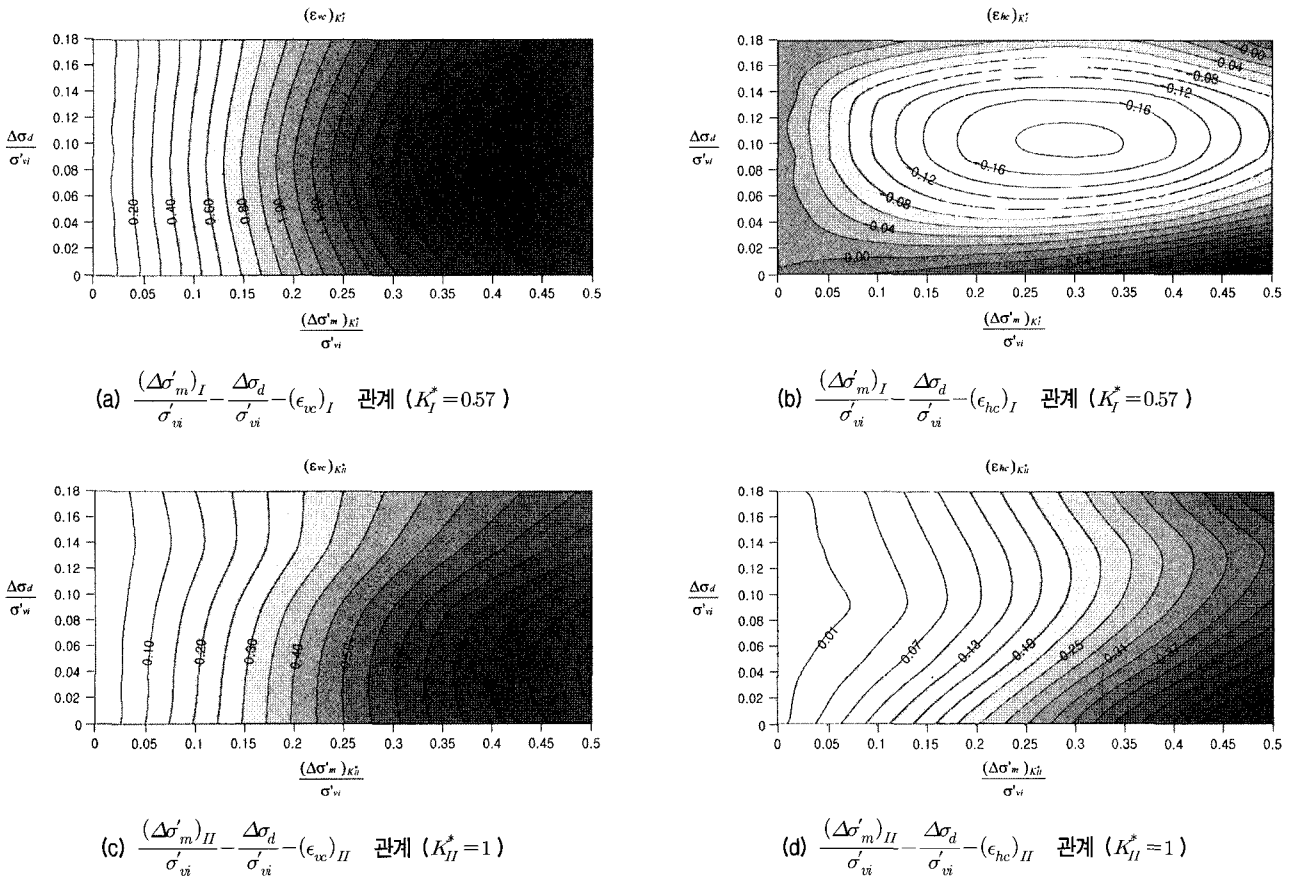


그림 7. 압밀 관련 특성변형거동

표 4. 대표점의 응력상태 변화

	초기응력상태		구조물하중 재하 직후의 응력증분		압밀완료 후의 응력증분	
	σ'_{vi} (kPa)	σ'_{hi} (kPa)	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$\Delta\sigma_h$ (kPa)	$\Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\Delta\sigma'_h$ (kPa)
A	47.20	23.60	16.86	10.03	16.81	8.23
B	61.60	30.80	15.19	4.30	15.02	2.93
C	76.00	38.00	12.24	2.40	11.89	1.09
D	90.40	45.20	9.89	2.74	9.37	1.09
E	104.80	52.40	8.14	4.83	7.62	2.25

표 5. 침하량 평가 ($Q_{net} = 135t, R = 5m, D_f = 2m$)

	$\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vt}}$	$\epsilon_{vu}(\%)$	$\frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vt}}$	Δu_d (kPa)	Δu_e (kPa)	$\Delta\sigma'_v$ (kPa)	$\Delta\sigma'_h$ (kPa)	K^*	$\epsilon_{vc}(\%)$
A	0.145	1.118	0.078	3.67	13.70	13.64	11.90	0.872	0.609
B	0.177	3.465	0.154	9.45	13.75	13.58	12.38	0.912	0.401
C	0.130	0.771	0.059	4.46	6.85	6.50	5.55	0.853	0.179
D	0.079	0.286	0.023	2.10	4.84	4.32	3.19	0.740	0.138
E	0.032	0.088	0.007	0.72	5.55	5.03	2.97	0.590	0.155

$$S_i = \int \epsilon_{vu} dz = \Sigma \epsilon_{vu} \Delta z = (1.118 + 3.465 + 0.771 + 0.286 + 0.088) / 100 * 2000 = 114.56mm$$

$$S_c = \int \epsilon_{vc} dz = \Sigma \epsilon_{vc} \Delta z = (0.609 + 0.401 + 0.179 + 0.138 + 0.155) / 100 * 2000 = 29.64mm$$

$$S_t = S_i + S_c = 144.20mm$$

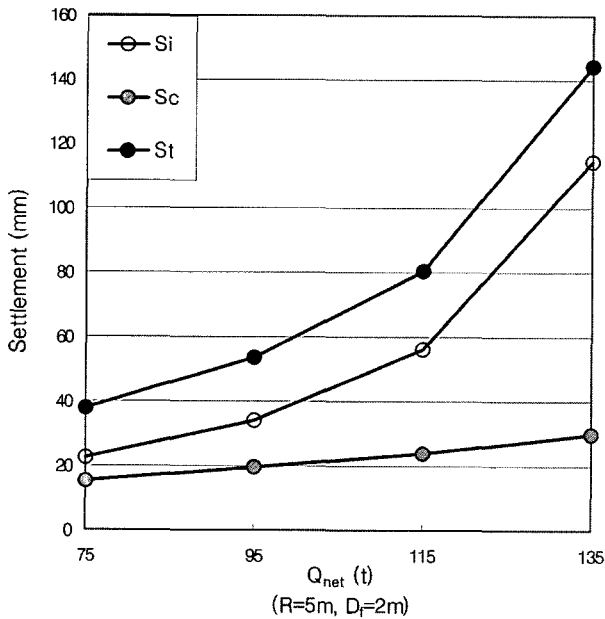


그림 8. 다양한 구조물하중에 대한 침하량 평가결과

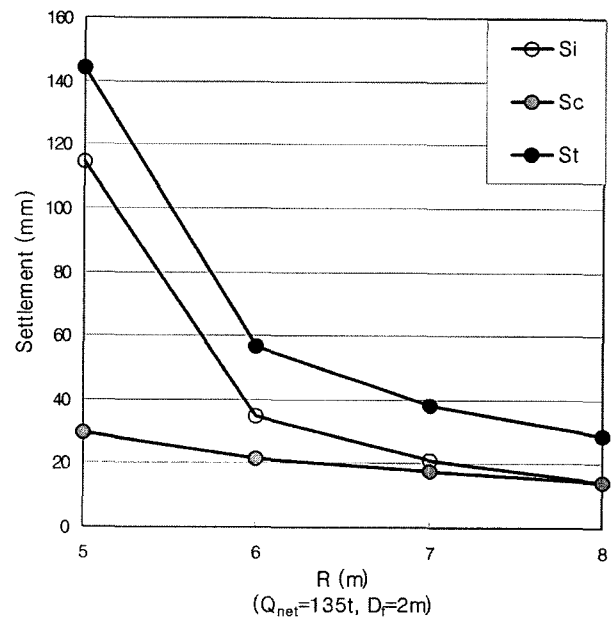


그림 9. 다양한 기초크기에 대한 침하량 평가결과

깊이에 대응하는 즉시침하량(S_i), 압밀침하량(S_c), 전체 침하량(S_t)을 요약하여 제시하고 있다. 제시된 결과와 관련하여 특히 강조해야 할 점은 이와 같이 다양한 침하량 평가결과가 대표 예제를 위해 수행된 총 10회의 응력 경로시험 결과만을 이용하여 얻어졌다는 점이다. 즉 대표 예제 분석과정에서 파악된 그림 6과 그림 7의 특성변형거동만으로 이 모든 침하량 평가가 이루어졌다는 점이다. 참고로 만약 각각의 경우에 대해 하부지반의 응력 변화 조건을 개별적으로 모사하는 기존의 응력경로법 적용방법에 따라 이와 동일한 수준의 침하량 평가를 수행하고자 하였다면, 10회가 아니라 적어도 60회 이상의 응력경로시험을 반드시 수행해야만 했을 것이다. 따라서 본 절에 제시된 다양한 침하량 평가예제는 개발된 절차를 따르는 경우, 구조물 침하와 관련된 대상 지반의 기본적인 특성변형거동을 제한된 수의 시험만으로 총

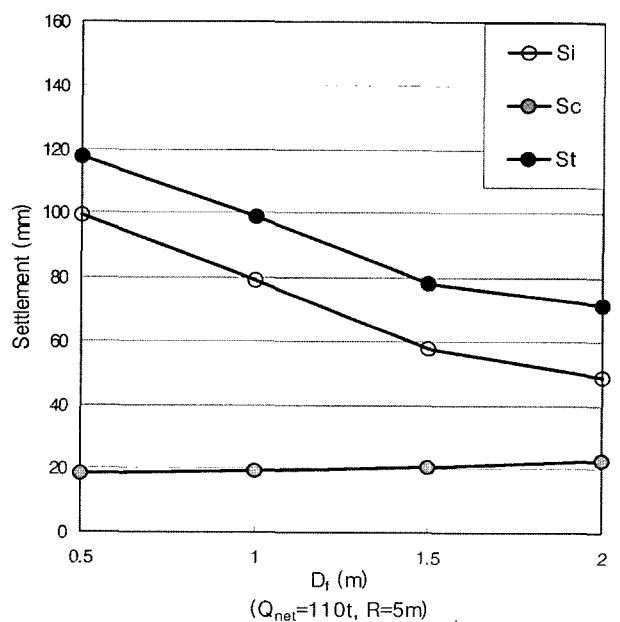


그림 10. 다양한 근입깊이에 대한 침하량 평가결과

분히 파악할 수 있으며, 또한 그 이후에는 발생가능한 다양한 현장조건에 대해 일체의 추가적인 시험 없이 손쉽게 그리고 즉각적으로 침하량 평가가 가능함을 명확히 보여준다.

개발된 침하량 평가절차는 이와 같이 뛰어나고 유연한 적용성으로 인해 향후 여러 관련 시공현장에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 대표적인 예로, 개발된 평가절차는 특정 구조물에 대해 허용침하량 기준을 만족하도록 여러 가지 설계대안을 검토하거나 또는 시공과정에서 발생하는 각종 설계변경이 침하량에 미치는 영향을 즉각적으로 평가할 필요가 있는 경우 등에 효과적으로 활용될 수 있으며, 특히 동일한 지반 상에 다양한 구조물이 들어서게 될 대규모 부지에 대한 사전 검토작업 시 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

4.2 기존 침하량 평가방법과의 비교

그림 11은 4.1절의 예제들에 대해 본 연구에서 개발된 평가절차와 기존의 일반적인 평가방법들을 적용하여 평가된 침하량을 비교하여 제시하고 있다. 제시된 결과에 따르면 모든 경우 표준압밀시험은 개발된 절차에 비해 상당히 큰 압밀침하량을 제시하는 것으로 나타났으며, 지반 내의 실제 과잉간극수압 크기를 고려하여 표준압밀시험의 결과를 보정하는 Skempton-Bjerrum법(1957) 역시 표준압밀시험에 비해서는 작지만 개발된 절차에 비해서는 여전히 큰 압밀침하량을 제시하는 것으로 나타났다. 이와 같은 비교결과는 현장조건이 1차원이 아닌 경우, 1차원 변형조건을 가정하는 표준압밀시험이나 Skempton-Bjerrum법은 압밀침하량의 과대평가를 초래할 가능성이 있음을 의미한다. 따라서 이와 같이 과대평가된 압밀침하량에 즉시침하량을 더하여 전체 침하량을 평가하는 기존의 방법들 또한 전체 침하량의 과대평가를 초래할 가능성이 있다. 이와 더불어 표준압밀시험에 의한 1차원 압밀침하량은 개발된 평가절차에 의한 전체 침하량에 비해서는 일관되게 작은 값으로 나타났는데, 이는 1차원이 아닌 현장조건에 대해 비배수 전단 변형에 따른 즉시침하를 무시하고 표준압밀시험에 의한 압밀침하량을 전체 침하량으로 간주하는 경우에는 전체 침하량이 크게 과소평가될 가능성이 있음을 의미한다.

앞의 그림 7에 제시된 대상 점성토층의 압밀변형거동에 따르면 연직방향과 횡방향의 압밀응력증분이 동일

한 C3계열의 시험들에서도 연직방향의 압밀변형률은 횡방향에 비해 더 크게 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 곧 대상 점성토층이 연직방향에 비해 횡방향의 강성

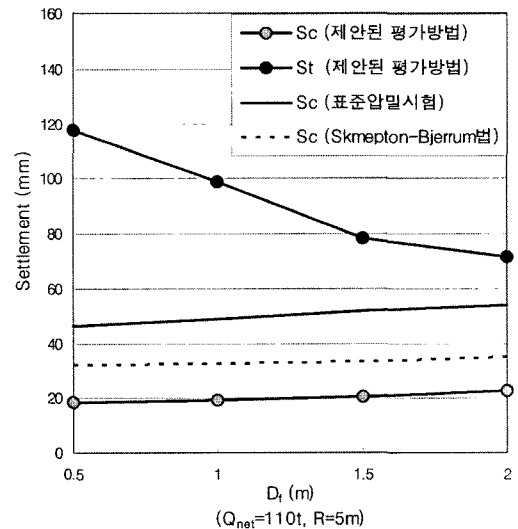
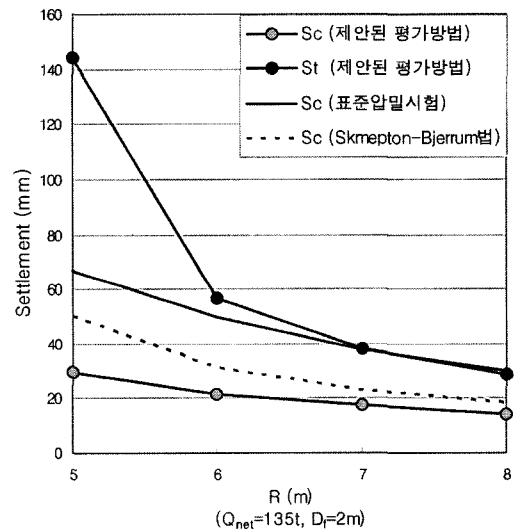
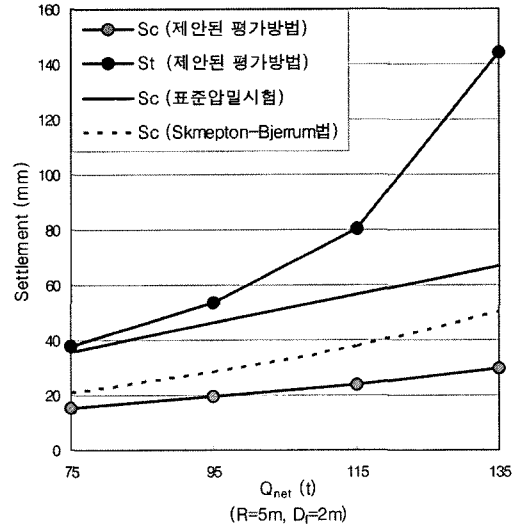


그림 11. 개발된 침하량 평가절차와 기존 침하량 평가방법의 비교

이 상대적으로 큰 이방성을 지니고 있음을 나타낸다. 대상 점성토층의 이러한 이방성은 연직방향 탄성계수(E_v)에 대한 횡방향 탄성계수(E_h)의 비(E_h/E_v)로 정량화될 수 있으며, 그림 12는 Graham과 Houlsby(1983)가 제안한 근사적 방법에 따라 그림 7의 결과로부터 파악된 대상 점성토층의 탄성계수비를 보여 주고 있다.

제시된 결과에 따르면, 대상 점성토층의 탄성계수비는 변형에너지밀도가 증가함에 따라 즉 압밀응력의 크기가 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 시험이 수행된 압밀응력의 범위 내에서는 언제나 1 보다 큰 값으로 나타났으며, 이는 대상 점성토층이 연직방향에 비해 횡방향의 강성이 상대적으로 큰 이방성을 지니고 있음을 다시 한번 명확히 보여 준다. 이와 더불어 대상 점성토층의 탄성계수비는 기존

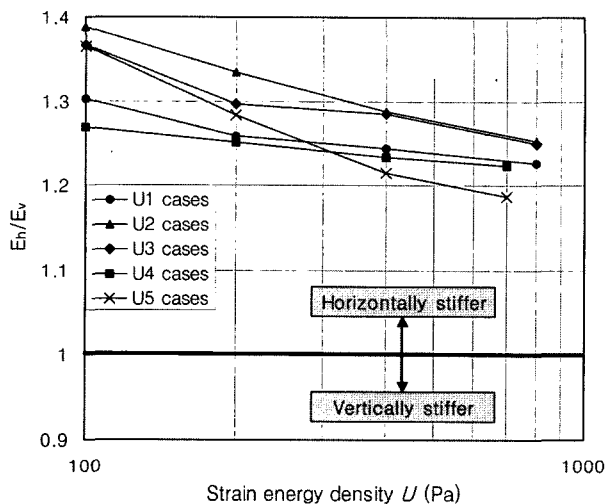


그림 12. 대상 점성토층의 탄성계수비

에 보고된 다양한 자연상태 점성토지반의 탄성계수비(표 6)와 그 범위가 대체로 일치하는 것으로 나타났다. 이는 본 연구의 대상 점성토층이 일반적인 자연상태 점성토지반의 이방적 거동특성을 대변할 수 있음을 의미한다. 따라서 그림 11의 비교결과로부터 파악된 기존 침하량 평가방법들의 오차는 대부분의 자연상태 점성토지반에 대해서도 동일한 경향으로 발생할 것으로 예상된다.

5. 개발된 침하량 평가절차의 확장된 적용방안

그림 2의 침하량 평가절차는 기본적으로 축대칭조건 하에서 전체 구조물하중이 일시에 재하되는 경우에 대해 적용 가능하도록 개발되었다. 본 절에서는 그 확장된 적용방안으로 실제 시공현장에서 보다 자주 접하게 되는 평면변형률조건과 다단계 재하조건에 대해 적용 가능한 침하량 평가절차를 추가로 제시하였다.

5.1 평면변형률조건에 대한 침하량 평가절차

평면변형률조건 또는 이로써 단순화될 수 있는 변형 조건은 옹벽, 성토, 기초, 굴착 등 다양한 지반구조물 시공현장에서 매우 빈번하게 나타난다. 따라서 축대칭조건을 대상으로 개발된 기본적인 침하량 평가절차(그림 2)를 평면변형률조건에 대해 적용 가능하도록 확장하는 것은 매우 유용할 것이다. 본 절에서는 이러한 측면에 주목하여 평면변형률조건을 대상으로 하는 수정된 형태의 침하량 평가절차를 그림 13과 같이 제시하였다.

표 6. 다양한 자연상태 점성토지반의 탄성계수비*(Yimsiri & Soga 2002)

Soil type	Soil condition	OCR	Stiffness anisotropy (G_{hh}/G_{vh} or E_h/E_v)	References
Panigaglia clay	Undisturbed	NC	1.4	Jamiolkowski et al. (1995)
		OCR=1.7~5	1.5	
		OCR=12~27	2.0	
		OCR at $K_o=1$	1.7	
Pisa clay	Undisturbed	NC	1.3	Jamiolkowski et al. (1995)
		OCR=1.5~4	1.4	
		OCR=8~16	1.6	
		OCR at $K_o=1$	1.4	
Gault clay	Undisturbed	OCR>30	2.0	Pennington et al. (1997)
London clay	Undisturbed	Heavily OC	1.5	Jovicic and Coop (1998)
Gault clay	Undisturbed	Heavily OC	2.25	Ling et al. (2000)
			4.0	

* 표에 제시된 탄성계수비는 미소변형수준에서 측정된 값임.

제시된 침하량 평가절차의 전체적인 흐름은 앞선 축대칭조건의 평가절차와 큰 차이가 없으며, 다만 일반적인 삼축시험장비 대신 평면변형률 시험장비를 활용하여 필요한 응력경로시험을 수행한다는 점 그리고 축대칭조건 대신 평면변형률조건에 대해 적용 가능하도록 고안된 압밀변형률 예측순서도(그림 14)를 이용한다는 점에서 약간의 차이가 있을 뿐이다. 또한 그림 14에 제시된 압밀변형률 예측순서도 역시 평면변형률조건에 대해 단순화된 직교이방 탄성체의 구성방정식(식 (4))을 근간으로 하며, 매개변수(a, b, c, d)의 결정과 이를 이용한 압밀변형률($\epsilon_{vc}, \epsilon_{hc}$)의 계산에 식 (5)와 식 (6)을 이용한다는

점 외에는 축대칭조건의 예측순서도와 큰 차이가 없다. 따라서 본 절에서 제시된 침하량 평가절차의 적용성과 유용성에 관해서는 축대칭조건과 마찬가지로 별다른 의문의 여지가 없을 것으로 생각된다. 다만 하나 고려해야 할 점은 그림 13의 침하량 평가절차를 실제로 활용하기 위해서는 평면변형률조건하에서 발생가능한 다양한 응력변화 조건을 자유롭게 재현할 수 있는 시험장비가 반드시 필요하다는 점이며, 김창엽(2004)은 이러한 목적에 적합한 평면변형률 시험장비를 새롭게 개발하고 그 적용성을 이론적, 실험적으로 검증한 바 있다.

Step 1 : 평면변형률시험장비를 이용한 응력경로시험 단계	
· 시험조건	→ 하나의 대표 초기응력상태와 몇 개의 선택된 비배수 재하수준 → 각각의 비배수 재하수준에 대해 두 가지 서로 다른 압밀응력증분비 (K_I^* , K_{II}^*)
· 총 시험수	= 1 * 선택된 비배수 재하수준의 수 * 2
Step 2 : 특성변형거동 평가단계	
· 정규화를 통한 비배수 특성변형거동 평가	→ ① $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$ 관계 & ② $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}}$ 관계
· 정규화와 비배수 재하수준에 대한 보간을 통한 압밀 특성변형거동 평가	→ K_I^* 에 대한 ③ $\frac{(\Delta\sigma'_v)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_I$ 관계 & ④ $\frac{(\Delta\sigma'_v)_I}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_I$ 관계 → K_{II}^* 에 대한 ⑤ $\frac{(\Delta\sigma'_v)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{vc})_{II}$ 관계 & ⑥ $\frac{(\Delta\sigma'_v)_{II}}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - (\epsilon_{hc})_{II}$ 관계
Step 3 : 응력경로 평가단계	
· 대상 점성토층을 몇 개의 층으로 나누고 각 층의 중앙점을 대표점으로 선정	
· 각 대표점의 응력경로 평가	→ 초기응력상태 ($\sigma'_{vi}, \sigma'_{hi}$) → 구조물하중 재하 직후의 응력증분 ($\Delta\sigma_v, \Delta\sigma_h$) → 압밀완료 후의 응력증분 ($\Delta\sigma_v^*, \Delta\sigma_h^*$)
Step 4 : 침하량 평가단계	
즉시변형률과 과잉간극수압의 평가	
각 대표점에 대하여,	
· 각 대표점의 $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}}$ 을 ① 관계에 대입하여 ϵ_{vu} 평가	
· 각 대표점의 $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}}$ 을 ② 관계에 대입하여 Δu_d 평가	
· $\Delta u_e = \Delta u_d + \Delta u_i = \Delta u_d = \Delta\sigma_i (= \Delta\sigma_h)$ 관계를 이용하여 Δu_e 계산	
압밀변형률 평가	
· $\Delta\sigma'_v = \Delta\sigma_v^* - \Delta\sigma_v + \Delta u_e$ & $\Delta\sigma'_h = \Delta\sigma_h^* - \Delta\sigma_h + \Delta u_e$ 관계를 이용하여 압밀응력증분 계산	
· 그림 13의 압밀변형률 예측순서도와 ③~⑥ 관계를 이용하여 ϵ_{vc} 예측	
연직변형률 적분을 통한 침하량 평가	
· ϵ_{vu} 를 층두께에 대해 적분하여 즉시침하량 S_i 평가 $S_i = \int \epsilon_{vu} dz = \Sigma \epsilon_{vu} \Delta z$	
· ϵ_{vc} 를 층두께에 대해 적분하여 압밀침하량 S_c 평가 $S_c = \int \epsilon_{vc} dz = \Sigma \epsilon_{vc} \Delta z$	
· 즉시침하량 S_i 와 압밀침하량 S_c 를 합산하여 전체 침하량 S_t 평가	

그림 13. 침하량 평가절차 (평면변형률조건)

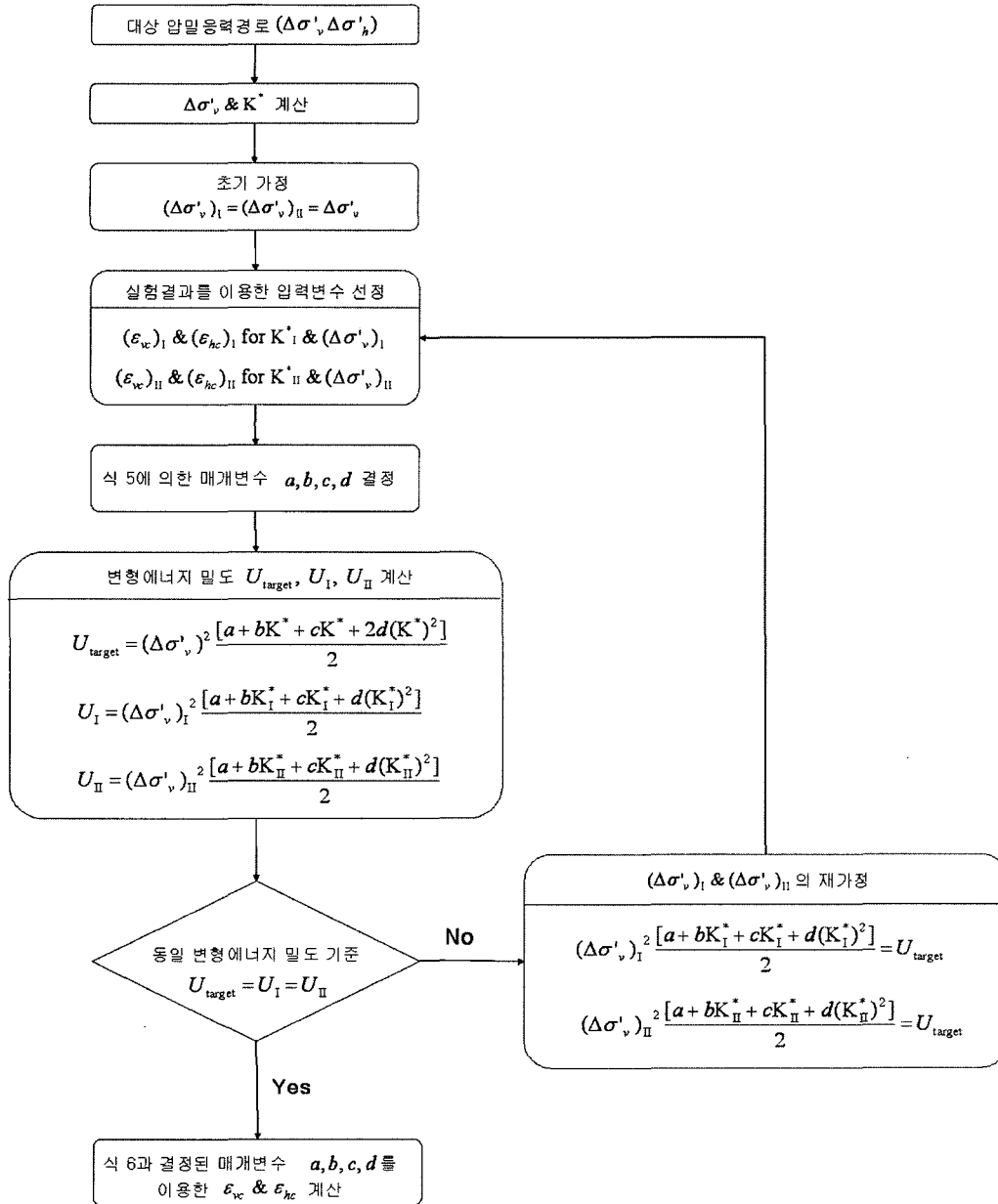


그림 14. 압밀변형을 예측순서도(평면변형률조건)

$$\begin{pmatrix} \epsilon_v \\ \epsilon_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_v} & -\frac{\nu_{hv}}{E_h} & -\frac{\nu_{hv}}{E_h} \\ -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_{vh}}{E_h} \\ -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & -\frac{\nu_{vh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\sigma'_v \\ \Delta\sigma'_p \\ \Delta\sigma'_h \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \epsilon_v \\ \epsilon_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\sigma'_v \\ \Delta\sigma'_h \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} (\epsilon_v)_I \\ (\epsilon_h)_I \\ (\epsilon_v)_{II} \\ (\epsilon_h)_{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & 0 & 0 \\ c & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & b \\ 0 & 0 & c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\Delta\sigma'_v)_I \\ (\Delta\sigma'_h)_I \\ (\Delta\sigma'_v)_{II} \\ (\Delta\sigma'_h)_{II} \end{pmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{pmatrix} (\Delta\sigma'_v)_I \\ K_I^* (\Delta\sigma'_v)_I \\ (\Delta\sigma'_v)_{II} \\ K_{II}^* (\Delta\sigma'_v)_{II} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{vc} &= a^* \Delta\sigma'_v + b^* \Delta\sigma'_h \\ \epsilon_{hc} &= c^* \Delta\sigma'_v + d^* \Delta\sigma'_h \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\Delta\sigma'_p$: 평면변형방향 유효응력증분

$$a : \frac{1 - \nu_{hv}\nu_{vh}}{E_v}, \quad b : -\frac{\nu_{hv}(1 + \nu_{hh})}{E_h},$$

$$c : -\frac{\nu_{vh}(1 + \nu_{hh})}{E_v}, \quad d : \frac{1 - \nu_{hh}^2}{E_h}$$

5.2 다단계 재하조건에 대한 침하량 평가절차

포화된 점성토지반 상에 구조물을 시공하는 경우, 시공 중의 안정성 확보와 침하량 경감을 위해 다단계 재하

방식이 널리 이용된다. 대표적인 예로 포화 점성토지반 상에 도로성토를 수행하는 경우, 최종성토고까지 일시에 성토를 진행하는 경우는 매우 드물며 일반적으로 현장의 침하계측 결과에 따라 단계적으로 성토고를 높여간다. 다단계 재하조건하에서 나타나는 점성토지반의 응력상태 변화는 다음의 그림 15와 같이 단순화될 수 있으며, 본 절에서는 이러한 응력변화 조건을 반영하여 하중단계별로 침하량을 평가하는 체계적인 절차를 제시하였다.

현장의 재하조건이 다단계 재하조건이라 할지라도 첫 번째 하중단계에 의한 침하량은 앞서 설명한 기본적인 침하량 평가절차에 따라 별다른 어려움 없이 평가될 수 있다. 그러나 이어지는 하중단계들에 대해서는 기본적인 평가절차를 그대로 적용할 수 없다. 이는 각 하중단계에 의한 응력경로가 K_0 초기상태가 아니라 이전 하중단계에 의한 최종적인 응력상태로부터 시작되기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 다음의 두 가지 가정을 추가함으로써 일시 재하조건 특성 변형거동만으로 다단계 재하조건 침하량까지 근사적으로 평가할 수 있는 절차를 개발하였다.

① 특정 하중단계의 실제 비배수 응력경로($C_1U_2, C_2U_3, \dots, C_{n-1}U_n, \dots$)에 대응하는 즉시변형률 및 축차과잉간극수압은 각 하중단계의 가상 초기응력점($O_2, O_3, \dots, O_n, \dots$)에서 출발하는 가상의 비배수 응력경로($O_2U_2, O_3U_3, \dots, O_nU_n, \dots$)와 가상의 선형 비배수 응력경로($O_2C_1, O_3C_2, \dots, O_nC_{n-1}, \dots$)에 대응하는 즉

시변형률 및 축차과잉간극수압의 차와 동일한 것으로 가정한다. 이때 각 하중단계의 가상 초기응력점은 그 점에서 출발하는 비배수 응력경로가 이전 하중단계에 의한 최종응력점을 지나는 K_0 선상의 점으로 정의된다.

② 특정 하중단계의 실제 비배수 응력경로($C_1U_2, C_2U_3, \dots, C_{n-1}U_n, \dots$)에 이어지는 압밀응력경로($U_2C_2, U_3C_3, \dots, U_nC_n, \dots$)와 가상의 비배수 응력경로($O_2U_2, O_3U_3, \dots, O_nU_n, \dots$)에 이어지는 압밀응력경로($U_2C_2, U_3C_3, \dots, U_nC_n, \dots$)에 해당하는 압밀변형률은 동일한 것으로 가정한다.

이상의 두 가지 가정조건과 앞서 개발된 기본적인 침하량 평가절차를 바탕으로 구성된 n번째 하중단계에 대한 침하량 평가절차는 다음과 같다.

먼저 다음의 식 (7)~식 (10)을 연립하여 가상 초기응력점 $O_n(=[(\sigma'_{vi})_n, (\sigma'_{hi})_n])$ 의 위치를 결정한다. 아래의 식들 중 식 (7)과 식 (8)은 O_n 점에서 출발하는 비배수 응력경로가 이전 단계에 의한 최종응력점 $C_{n-1}(=[(\sigma'_{vi})_{n-1}, (\sigma'_{hi})_{n-1}])$ 을 지나게 됨을 의미하며, 식 (9)는 O_n 점이 K_0 선상에 있음을 의미한다. 마지막 식 (10)은 O_n 점에서 출발하는 가상의 비배수 응력경로(O_nC_{n-1})에 대응하는 축차과잉간극수압 $[(\Delta u_d)_{O_nC_{n-1}}]$ 이 해당 축차응력증분 $[(\Delta \sigma_d)_{O_nC_{n-1}}]$ 에 의해서만 결정됨을 의미하며, 그 정량적인 관계는 일시 재하조건 비배수 특성 변형거동으로 얻어진 $\frac{\Delta \sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \frac{\Delta u_d}{\sigma'_{vi}}$ 관계로 정의될 수 있다.

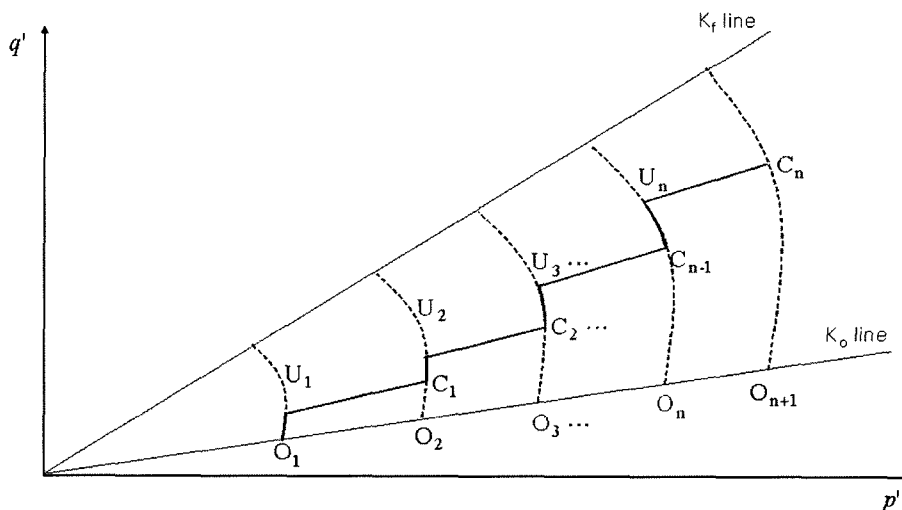


그림 15. 다단계 재하조건 하에서 나타나는 점성토지반의 전형적인 응력변화

$$(\sigma'_{vi})_n + (\Delta\sigma_d)_{O_n C_{n-1}} - (\Delta u_d)_{O_n C_{n-1}} = (\sigma'_v)_{n-1} \quad (7)$$

$$(\sigma'_{hi})_n - (\Delta u_d)_{O_n C_{n-1}} = (\sigma'_h)_{n-1} \quad (8)$$

$$(\sigma'_{hi})_n = K_o(\sigma'_{vi})_n \quad (9)$$

$$(\Delta u_d)_{O_n C_{n-1}} = \text{function of } (\Delta\sigma_d)_{O_n C_{n-1}} \quad (10)$$

O_n 점의 위치가 결정되면, 앞의 첫 번째 가정에 근거하여 n번째 하중단계의 실제 비배수 응력경로($C_{n-1}U_n$)에 대응하는 연직방향 즉시변형률 $[(\epsilon_{vm})_{C_{n-1}U_n}]$ 은 다음의 식 (11)을 통해 평가된다. 식 (11)에서 가상의 비배수 응력경로 $O_n U_n$ 과 $O_n C_{n-1}$ 에 대응하는 연직방향 즉시변형률 $(\epsilon_{vu})_{O_n U_n}$ 와 $(\epsilon_{vu})_{O_n C_{n-1}}$ 는 일시 재하조건의 비배수 특성변형거동으로 얻어진 $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma'_{vi}} - \epsilon_{vu}$ 관계를 이용하여 쉽게 결정할 수 있다. 또한 연직방향 압밀변형률 $[(\epsilon_{vc})_{U_n C_n}]$ 은 앞의 두 번째 가정에 근거하여 가상의 비배수 응력경로($O_n U_n$)에 이어지는 압밀응력경로($U_n C_n$)에 대응하는 압밀변형률을 예측함으로써 평가할 수 있으며, 이러한 예측과정에는 일시 재하조건의 압밀변형률 예측기법과 압밀 관련 특성변형거동이 그대로 이용될 수 있다. 최종적으로 n번째 하중단계에 의한 즉시침하량과 압밀침하량은 위의 과정을 통해 평가된 각 대표점의 연직방향 즉시변형률과 압밀변형률을 깊이에 따라 적분하여 평가할 수 있다.

$$(\epsilon_{vu})_{C_{n-1}U_n} = (\epsilon_{vu})_{O_n U_n} - (\epsilon_{vu})_{O_n C_{n-1}} \quad (11)$$

그림 16과 같은 지반조건과 하중조건에 대해 본 절에서 개발된 절차를 적용하여 평가된 점성토층의 하중단계별 침하량 및 누적 침하량은 표 7에 제시한 바와 같다. 대상 예제의 기본적인 지반조건과 하중조건은 앞선 그림 3의 예제와 동일하다. 다만 본 예제에서는 점성토층 상부에 2m 대신 5m 두께의 매립층이 존재하는 것으로 가정하였으며, 280t의 동일한 구조물하중이 각각 일시 재하조건, 2단계 재하조건, 3단계 재하조건, 4단계 재하조건으로 가해지는 경우를 고려하였다. 이때 다단계 재하 시의 각 하중단계는 이전 하중단계에 의한 압밀이 완료된 후에 진행되는 것으로 가정하였다.

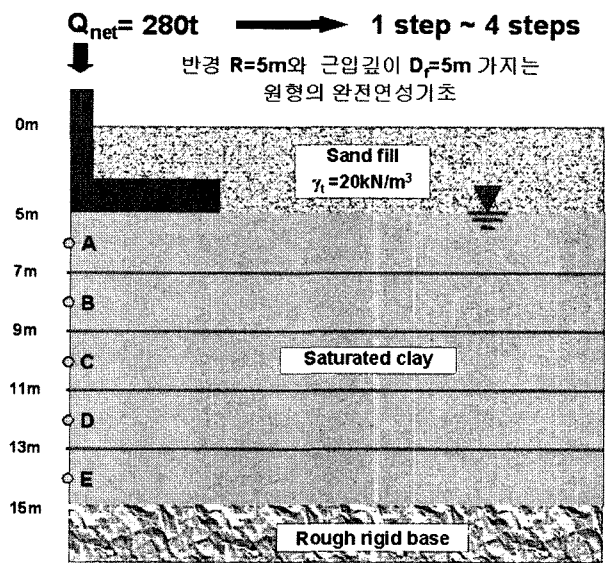


그림 16. 대상 예제의 지반조건과 하중조건

표 7. 다단계 재하조건에서의 하중단계별 침하량 및 누적 침하량

		일시 재하조건	2단계 재하조건	3단계 재하조건	4단계 재하조건
첫 번째 하중단계	s_i (mm)	109.1	21.4	12.2	8.7
	s_c (mm)	32.0	14.2	9.2	6.8
	s_t (mm)	141.1	35.6	21.4	15.5
두 번째 하중단계	s_i (mm)	-	38.0	15.9	10.3
	s_c (mm)	-	14.3	9.4	7.1
	s_t (mm)	-	52.3	25.3	17.4
세 번째 하중단계	s_i (mm)	-	-	23.0	12.8
	s_c (mm)	-	-	9.1	7.2
	s_t (mm)	-	-	32.1	20.0
네 번째 하중단계	s_i (mm)	-	-	-	16.7
	s_c (mm)	-	-	-	6.8
	s_t (mm)	-	-	-	23.5
누적 침하량	s_i (mm)	109.1	59.4	51.1	48.5
	s_c (mm)	32.0	28.5	27.8	27.9
	s_t (mm)	141.1	87.9	78.9	76.4

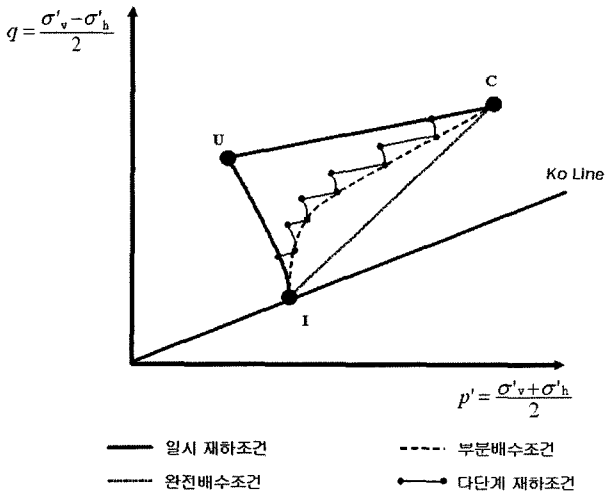


그림 17. 재하조건에 따른 점성토지반의 응력경로

표 7에 제시된 결과는 개발된 침하량 평가절차의 잠재적인 활용가능성을 명확히 보여 주고 있다. 즉 제안된 평가절차를 따름으로써 일시 재하조건 특성변형거동(그림 6과 그림 7)만으로 다단계 재하조건 하중단계별 침하량과 누적 침하량 나아가 하중단계의 수를 증가시킬 때 얻게 되는 침하량 경감효과까지 정량적으로 평가할 수 있음을 보여주고 있다. 또한 표 7에 제시된 전체 누적 침하량은 하중단계의 수가 증가함에 따라 특정 침하량에 접근하게 되는데, 이러한 침하량은 구조물하중이 완전 배수상태에서 매우 느리게 재하되는 경우의 침하량 즉 대상 현장에서 발생할 수 있는 최소 침하량으로 간주될 수 있다. 또 하나의 활용가능성으로 제안된 평가절차는 재하 중의 부분배수조건을 고려한 침하량 평가에도 이용될 수 있다. 즉 그림 17에 제시된 바와 같이 부분배수조건에서 나타나는 응력경로를 다단계 재하조건 응력경로로 적절히 대체함으로써 해당하는 침하량을 근사적으로 평가할 수 있다. 따라서 본 절에서 개발된 침하량 평가절차는 향후 다단계 재하조건을 포함한 다양한 재하조건에 대해 침하량 또는 그 경감 효과를 정량적으로 평가하는데 매우 유용하게 활용 가능할 것이다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 포화 점성토지반 침하량의 합리적인 평가를 가능하게 하는 실용적인 응력경로법 적용방법의 개념을 새롭게 제안하고, 이를 실제 침하량 평가에 활용가능한 수준으로 구체화하였다. 이와 관련하여 본

연구의 Part I에서는 특정 점성토지반의 침하 관련 특성 변형거동을 효율적으로 평가하고 활용하는 구체적인 방법을 개발하였으며, Part II에서는 이를 바탕으로 먼저 축대칭조건하에서 전체 구조물하중이 일시에 재하되는 경우에 대해 기본적인 침하량 평가절차를 개발하였다. 또한 이를 실제 시공현장에서 보다 자주 접하게 되는 평면변형률조건과 다단계 재하조건에 대해 적용 가능하도록 확장하였다.

본 연구를 통해 개발된 침하량 평가절차는 특정 점성토지반의 침하 관련 특성변형거동을 제한된 수의 시험만으로 효과적으로 파악할 수 있으며, 그 이후에는 다양한 현장조건에 대해 일체의 추가적인 시험 없이 손쉽게 또한 즉각적으로 침하량을 평가할 수 있다는 큰 장점을 지니고 있다. 개발된 침하량 평가절차의 이와 같이 장점은 다양한 예제에 대한 실제 침하량 평가를 통해 명확히 확인되었다. 이와 더불어 본 연구에서는 침하량 평가결과에 대한 분석을 통해 기존의 표준압밀시험이나 Skempton-Bjerrum 보정법이 1차원이 아닌 현장조건에 대해서는 압밀침하량의 과대평가를 초래할 가능성이 있음을 확인하였다. 또한 비배수 전단변형에 의한 즉시침하를 무시하고 표준압밀시험에 의한 1차원 압밀침하량을 전체 침하량으로 간주하는 경우에는 전체 침하량이 크게 과소평가될 수 있음도 확인하였으며, 나아가 기존 평가방법들의 이와 같은 오차의 경향이 대부분의 자연상태 점성토지반에 대해서 동일하게 나타날 가능성이 있음을 밝혔다.

본 연구를 통해 개발된 침하량 평가절차는 그 뛰어난 유연한 적용성으로 인해 향후 여러 관련 시공현장에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 대표적인 예로, 개발된 평가절차는 특정 구조물에 대해 허용침하량 기준을 만족하도록 다양한 설계대안을 검토하거나 또는 시공과정에서 발생하는 각종 설계변경이 침하량에 미치는 영향을 즉각적으로 평가할 필요가 있는 경우 등에 효과적으로 활용될 수 있으며, 특히 동일한 지반 상에 다양한 구조물이 들어서게 될 대규모 부지에 대한 사전 검토작업에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문에 대한 서울대학교 공학연구소의 각종 지원에 깊이 감사드립니다.

기 호

γ_i : 전체 단위중량
 Δu_d : 축차과잉간극수압
 Δu_e : 전체 과잉간극수압
 $\Delta \sigma_d$: 축차응력증분
 $\Delta \sigma_v, \Delta \sigma_h$: 구조물하중 재하직후의 연직방향 및 횡방향
 응력증분
 $\Delta \sigma_v^*, \Delta \sigma_h^*$: 압밀완료 후의 연직방향 및 횡방향 응력증
 분
 $\Delta \sigma'_m$: 평균유효응력증분(또는 평균압밀응력증분) =

$$\frac{\Delta \sigma'_v + 2\Delta \sigma'_h}{3}$$

 $\Delta \sigma'_p$: 평면변형방향 유효응력증분
 $\Delta \sigma'_v, \Delta \sigma'_h$: 연직방향 및 횡방향 유효응력증분(또는 압
 밀응력증분)
 ϵ_v, ϵ_h : 연직방향 및 횡방향 변형률
 $\epsilon_{ve}, \epsilon_{hc}$: 연직방향 및 횡방향 압밀변형률
 ϵ_{vu} : 연직방향 즉시변형률
 $\sigma'_{vi}, \sigma'_{hi}$: 초기 연직방향 및 횡방향 유효응력
 ν_{hv} : 횡방향 변형이 연직방향 변형에 미치는 영향을 나
 타내는 포아송비
 ν_{vh} : 연직방향 변형이 횡방향 변형에 미치는 영향을 나
 타내는 포아송비
 ν_{hh} : 횡방향 변형이 직교하는 횡방향 변형에 미치는
 영향을 나타내는 포아송비
 ν_u : 비배수상태의 포아송비
 ν' : 배수상태의 포아송비
 a, b, c, d : 직교이방 탄성체 구성방정식의 매개변수(평
 면변형률조건)
 C_c : 압축지수
 C_r : 재압축지수
 E_v, E_h : 연직방향 및 횡방향 탄성계수
 G_{hh} : 수평면 내의 전단탄성계수
 G_s : 비중
 G_{vh} : 수직면 내의 전단탄성계수
 K_o : 정지토압계수
 k_v, k_r : 연직방향 및 방사방향 투수계수

$$K^* : \text{유효응력증분비(또는 압밀응력증분비)} = \frac{\Delta \sigma'_h}{\Delta \sigma'_v}$$

LL : 액성한계

PI : 소성지수

PL : 소성한계

$$p', q : \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2}, \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$$

p'_c : 선형압밀하중

S_c : 압밀침하량

S_i : 즉시침하량

S_t : 전체 침하량

U : 변형에너지밀도

w_o : 초기 함수비

참 고 문 헌

1. 김창엽 (2004), “포화 점성토지반 침하량의 합리적 평가를 위한 새로운 응력경로법 적용”, 박사학위논문, 서울대학교.
2. Graham, J. and Housby, G. T. (1983), “Anisotropic Elasticity of a Natural Clay”, *Geotechnique*, Vol.33, No.2, pp.165-180.
3. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Lo Presti, D. C. F. (1995), “Remarks on the Stiffness at Small Strains of Six Italian Clays”, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Rotterdam, pp.817-836.
4. Jovicic, V. and Coop, M. R. (1998), “The Measurement of Stiffness Anisotropy in Clays with Bender Element Tests in the Triaxial Apparatus”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.21, No.1, pp.3-10.
5. Lambe, T. W. (1964), “Method of Estimating Settlement”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.90, No.SM5, pp.43-67.
6. Lambe, T. W. (1967), “The Stress-Path Method”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.93, No.GT6, pp.309-331.
7. Lambe, T. W. & Marr, W. A. (1979), “Stress-Path Method : Second Edition”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No.SM6, pp.727-738.
8. Ling, M. L., Pennington, D. S. and Nash, D. F. T. (2000), “Anisotropic Stiffness Parameters and their Measurement in a Stiff Natural Clay”, *Geotechnique*, Vol.50, No.2, pp.109-125.
9. Pennington, D. S., Nash, D. F. T. and Ling, M. L. (1997), “Anisotropy of G_o Shear Stiffness in Gault Clay”, *Geotechnique*, Vol.47, No.3, pp.391-398.
10. Yimsiri, S. & Soga, K. (2002), “Application of Micromechanics Model to Study Anisotropy of Soils at Small Strains”, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.15-26.

(접수일자 2005. 2. 16, 심사완료일 2005. 6. 1)