

# 축대칭 조건하에서의 변형형상을 고려한 정규압밀 점성토 지반의 침하량 평가방법

## Estimation Method for Settlements of NC Clays Considering Deformation Modes Under Axis-symmetric Conditions

김 창 엽\*  
권 오 순\*\*  
정 충 기\*\*

Kim, Chang-Youb

Kwon, O-Soon

Chung, Choong-Ki

### Abstract

For the reasonable estimation of settlements, the probable deformation mode in subsoils, resulting from real stress paths caused by structural load, should be properly considered. In this study, based on the soil behaviors of a normally consolidated remolded clay estimated from stress path tests reflecting possible stress increments, a simplified method to predict immediate and consolidation settlements under axis-symmetric conditions was developed.

Its resultant settlements were compared with the results based on conventional methods, with an example of circular footing on semi-infinite soil mass. In addition, the numerical analysis using FEM based on MCC model and Biot theory was performed. From these results, the limitations and problems of conventional methods were clearly evaluated and the effects of the stress increment estimation method were studied.

### 요 지

구조물 하중에 의한 점성토 지반의 침하량을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 지반 내의 흩소가 경험하는 실제적인 응력경로와 이에 따른 변형양상이 적절하게 고려되어야만 한다. 따라서 본 연구에서는 축대칭 조건의 다양한 응력경로를 따라 발생하는 정규압밀 점성토의 변형 거동을 고찰한 기존의 실험적 연구결과를 바탕으로 응력경로법에 근거한 보다 간편하고 합리적인 침하량 평가기법을 제시하였다.

또한 본 연구에서는 제시된 평가기법을 기존의 1차원적인 침하량 평가기법들과 함께 실제와 유사한 조건을 가지는 가상지반의 침하량 산정에 적용해 보았으며, 동일한 조건에 대해 소성모델(MCC 모델)과 혼합압밀이론에 바탕을 둔 유한요소해석을 실시하였다. 그리고 이를 통해 얻어진 결과들을 비교·분석함으로써 기존 평가기법들의 문제점과 한계를 명확히 제시하였으며, 응력증분 평가방법이 침하량 평가에 미치는 영향을 분석하였다.

**Keywords** : Deformation mode, NC clay, Settlement, Stress path method

### 1. 서 론

구조물 하중에 의한 점성토 지반의 침하량은 일반적

으로 1차원 변형 형상 즉 횡방향 변형이 억제되고 연직 방향으로만 변형이 발생된다는 전제조건하에서 평가된다. 그러나 실제 지반의 침하는 재하된 하중에 의해 나

\*1 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 대학원 박사과정

\*2 정희원, 한국해양연구원 선임연구원

\*3 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 부교수

표 1. 사용된 kaolinite시료의 기본물성치와 압밀특성

$\gamma_s$ (kg/cm <sup>3</sup> )	w (%)	$G_s$	PL	LL	PI	200번체 통과율 (%)	통일분류	$C_c$	$C_r$	$p_c'$ (kPa)
1.66	46.2	2.60	22	51	29	94.2	CH	0.266	0.059	100

나타나는 지중 내 응력비 즉 응력경로와 지반의 이방적 변형 특성에 따라 횡방향 변형과 더불어 발생한다. 이를 감안하여 Lambe(1979)은 응력경로법을 이용한 침하량 산정방법을 제안하였으나, 이 방법은 실험적 방법론을 중심으로 제시되었으며 응력경로에 따른 점성토의 변형특성에 대한 체계적인 분석은 이루어지지 못하였다. 또한 실제 침하량 산정을 위해서는 적용 사례마다 상당히 많은 수의 실험이 필요하다는 문제점이 있다. 그 후 여러 학자들에 의하여 다양한 응력경로에 따른 흙의 거동특성에 대한 연구(권오엽, 1988; Gangopadhyay 등, 1980)가 이루어져 왔지만 체계적인 침하량 평가방법은 아직까지 제시되지 못하고 있는 실정이다.

김창엽 등(1999)은 정규압밀 점성토에 대하여 삼축시험기를 이용한 다양한 응력경로시험들을 수행하고 그 결과들을 분석하여 정규압밀 점성토의 변형 및 침하 거동 특히 즉시 및 압밀 변형 특성을 연구한 바 있다. 이를 토대로 본 연구에서는 하중 재하시 발생 가능한 하부지반의 변형특성에 근거하여 정규압밀 점성토 지반에 적용 가능한 즉시 및 압밀침하량 예측기법을 제시하고자 한다. 특히 적용이 까다로운 다양한 응력경로에 대한 실험을 수행하지 않고 일반적인 삼축시험기로 수행 가능한 최소한의 실험결과만으로 침하량을 예측할 수 있도록 하였다. 다만 활용된 응력경로법은 삼축시험을 근거로 하기 때문에 축대칭적인 응력 및 변형 조건인 원형기초의 침하거동에 중점을 두고 있다. 그러나 향후 락기초나 직사각형 기초 등의 보편적인 재하조건과 과압밀 점성토 및 다층 지반 등에도 그 거동양상에 대한 실험적 연구결과가 체계화되면 쉽게 적용할 수 있도록 고려하였다.

제안된 침하량 산정방법의 적용성을 확인하기 위하여 예제 해석을 수행하였으며, 그 결과를 기존 침하량 평가기법에 의한 결과와 비교하였다. 이와 함께 제안된 침하량 산정방법을 적용하는데 있어서 중요한 영향 요소인 구조물 하중에 의한 지중내의 연직 및 횡방향 응력 증분의 평가가 침하량 평가에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 동일한 조건에 대해 소성모델(Modified Cam Clay Model)과 Biot 이론에 근거한 수치해석을 실시하고 그 결과를 활용하였다.

## 2. 응력경로시험 결과에 근거한 침하량 평가기법

구조물에 의한 하중이 기초를 통해 급속도로 재하되면 포화된 점성토 지반 내에는 과잉간극수압의 발생과 함께 비배수 재하에 따른 변형이 발생하게 된다. 이러한 변형은 결과적으로 기초의 즉시침하로 나타나게 되며, 이후 시간 경과에 따른 발생간극수압의 소산은 기초의 압밀침하를 유발하게 된다.

기존의 실험적 연구(김창엽 등, 1999)에서는 원형기초의 중심에서 발생할 수 있는 다양한 축대칭 조건의 응력경로들을 정규압밀상태의 성형 kaolinite 시료(표 1)에 적용해 보고, 이를 통해 비배수 재하과정과 이어지는 압밀과정에서 나타나는 정규압밀 점성토의 변형거동을 고찰하였다. 이 연구에 따르면 비배수 재하에 따른 연직방향의 즉시변형률( $\epsilon_{vu}$ )과 축차발생간극수압( $\Delta u_{ed} = \Delta u_e - \Delta u_{ei}$ ,  $\Delta u_e$ : 전체발생간극수압,  $\Delta u_{ei}$ : 등방압에 의한 발생간극수압)은 다음의 그림 1과 그림 2에 제시한 바와 같이 축차응력증분( $\Delta \sigma_d$ )에 의해서만 좌우되며, 비배수 재하 이후의 압밀과정에서 나타나는 연직방향의 압밀변형률( $\epsilon_{vc}$ )은 그림 3에 제시한 바와 같이 동일한 연직응력증분( $\Delta \sigma_v$ ) 하에서는 응력증분비( $K^* = \frac{\Delta \sigma_h}{\Delta \sigma_v}$ )에 대해 선형적인 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 또한 그림 1에서 그림 3에 제시된 정규압밀점성토의 변형특성은 기존 연구(김창엽 등, 1999)를 통해 CL-ML계열로 평가되는 불교란점성토 시료에 대

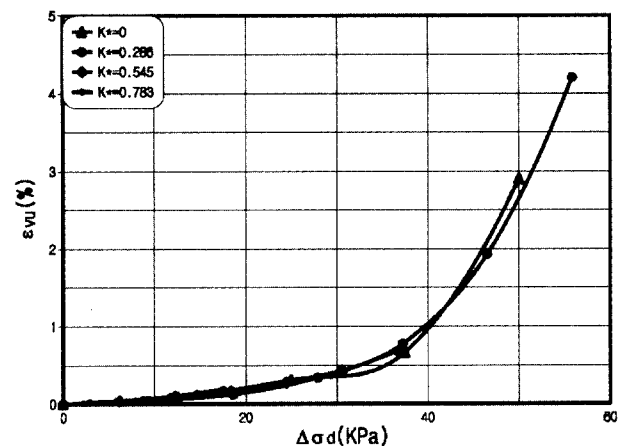


그림 1. 축차응력증분-연직방향 즉시변형률 ( $\Delta \sigma_d - \epsilon_{vu}$ )

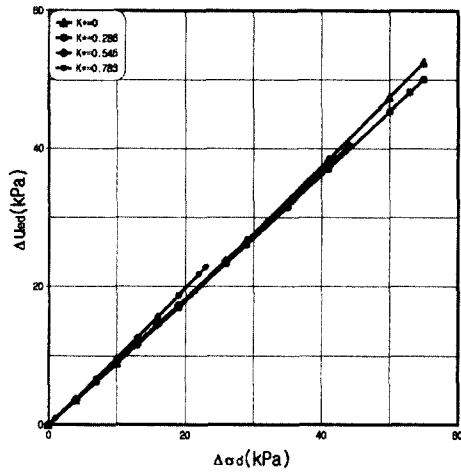


그림 2. 축차응력증분-축차발생간극수압 ( $\Delta\sigma_v - \Delta u_{wv}$ )

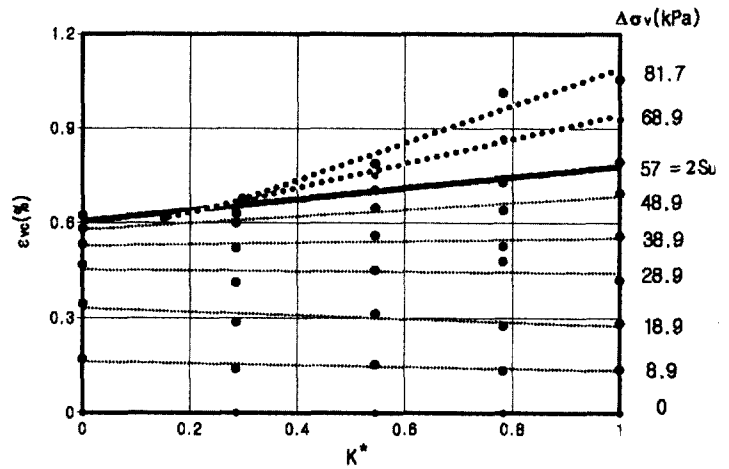


그림 3. 응력증분비-연직방향 압밀변형률 ( $K^* (= \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\sigma_v} - \epsilon_{vc})$ )

해서도 실험적으로 확인된 바 있다.

본 연구에서는 그림 1에서 그림 3에 제시된 기존의 실험결과들에 근거하여, 정규압밀점성토 지반상에 하중이 급속도로 재하될 때 발생하게 되는 즉시침하량과 이후의 장기적인 압밀침하량을 평가하는 기법을 다음의 표 2, 표 3과 같이 새롭게 제시하였다. 제시된 평가기법

의 적용을 위해 필요한 응력경로시험의 수행과정에서는 시료를  $K_0$  상태로 압밀하는 과정이 반드시 선행되어야 하는데, 이는  $K_0$  압밀과정을 통해 현장의 초기 유효응력상태를 현실적으로 모사하여야만 이어지는 비배수 재하과정과 압밀과정에서도 이방적 변형특성을 포함하는 지반의 정확한 변형거동을 재현할 수 있기 때문이다.

표 2. 즉시침하량 평가기법

- 1) 각 깊이에서의 재하 전 현장 연직유효응력 ( $\sigma_{v'}$ )의 평가
- 2) 하중 재하에 따른 각 깊이에서의 응력증분 ( $\Delta\sigma_v, \Delta\sigma_h, \Delta\sigma_d = \Delta\sigma_v - \Delta\sigma_h$ ) 평가
- 3)  $K_0$  압밀 비배수 삼축압축시험 실시  $\Rightarrow \Delta\sigma_d - \epsilon_{vc}$  관계 결정  
 $\Rightarrow$  정규화 비배수 변형 관계 ( $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma_{v'}} - \epsilon_{vc}$ ) 결정
- 4) 1), 2)  $\Rightarrow$  각 깊이에서의  $\frac{\Delta\sigma_d}{\sigma_{v'}}$  계산
- 5) 3), 4)  $\Rightarrow$  각 깊이에서의  $\epsilon_{vc}$  계산(그림 1 참조)
- 6) 깊이에 따라  $\epsilon_{vc}$ 를 적분하여 즉시침하량  $S_c$  평가

표 3. 압밀침하량 평가기법

- 1) 각 깊이에서의 재하 전 현장 연직유효응력 ( $\sigma_{v'}$ )의 평가
- 2) 하중 재하에 따른 각 깊이에서의 응력증분 ( $\Delta\sigma_v, \Delta\sigma_h, \Delta\sigma_d$ ) 평가
- 3)  $K_0$  압밀 동방압축 압밀시험의 실시  $\Rightarrow K^*=1$ 인 경우의  $\Delta\sigma_v - \epsilon_{vc}$  관계 결정  
 $\Rightarrow K^*=1$ 인 경우의 정규화  $\frac{\Delta\sigma_v}{\sigma_{v'}} - \epsilon_{vc}$  관계 결정
- 4) 연직응력증분을 달리하는  $K_0$  압밀 비배수 삼축압축 및 배수 시험(연직압축 압밀시험)들의 실시  
 $\Rightarrow K^*=0$ 인 경우의  $\Delta\sigma_v - \epsilon_{vc}$  관계 결정  
 $\Rightarrow K^*=0$ 인 경우의 정규화  $\frac{\Delta\sigma_v}{\sigma_{v'}} - \epsilon_{vc}$  관계 결정
- 5) 1), 2)  $\Rightarrow$  각 깊이에서의  $\frac{\Delta\sigma_v}{\sigma_{v'}}$  계산
- 6) 2)  $\Rightarrow$  각 깊이에서의  $K^*$  계산
- 7) 3), 4), 5)  
 $\Rightarrow$  각 깊이에서의  $\frac{\Delta\sigma_v}{\sigma_{v'}}$ 에 대한  $K^*=0$ 인 경우와  $K^*=1$ 인 경우의  $\epsilon_{vc}$  계산
- 8) 6), 7)  $\Rightarrow$  각 깊이에서의  $\epsilon_{vc}$  계산(그림 3 참조)
- 9) 깊이에 따라  $\epsilon_{vc}$ 를 적분하여 압밀침하량  $S_c$  평가

또한 궁극적으로는 이를 바탕으로 침하량 역시 보다 합리적이고 정확하게 평가할 수 있기 때문이다.

제시된 침하량 평가기법에 따라 즉시침하량을 산정하기 위해서는(표 2 참조) 정규압밀상태까지  $K_0$ 압밀한 후 시료에 가해지는 연직응력을 연속적으로 증가시키는 일반적인  $K_0$ 압밀 비배수 삼축압축시험( $CK_0U$  TXC 시험)의 수행이 최소 1회 필요하다. 이 시험을 통해서 특정한 초기 연직유효응력( $\sigma_{v1}'$ ) 상태하에서의 축차응력증분( $\Delta\sigma_d$ )과 연직방향 즉시변형률( $\epsilon_{vu}$ ) 간의 상관관계를 얻게 되며, 얻어진 상관관계는 정규압밀점성토의 정규화 거동과 그림 1에 제시된 결과에 근거하여 표 2의 절차에 따라 즉시침하량을 평가하는데 적용할 수 있다.

압밀침하량을 산정하기 위해서는  $K_0$ 압밀 후 등방압축 압밀시험( $K^*=1$ )과 연직압축 압밀시험( $K^*=0$ )이 필요하며, 표 3에 제시된 시험방법에 따라  $K^*=0$ 인 경우와  $K^*=1$ 인 경우의 연직응력증분과 연직방향 압밀변형률의 상관관계가 설정되면 그림 3에 제시된 기존 연구결과에 의거하여 표 3의 절차에 따라 압밀침하량을 평가할 수 있다.

압밀시험시 재하방법으로는 일정 압력증가율 배수시험, 즉 시료 내에 과잉간극수압이 발생하지 않도록 압력증가율을 충분히 느리게 조절하여 시험하거나 또는 표준압밀시험에서와 같이 단계적, 순간적으로 하중을 재하하고 배수를 허용하는 방법이 적용 가능하다. 이때 등방압축 압밀시험의 경우 하중재하에 의해 전단력이 발생하지 않으므로 재하방법에 상관없이 일관된 결과를 얻을 수 있으나, 연직압축 압밀시험의 경우 재하방법에 따라 압밀거동이 영향을 받을 수 있다. 즉 단계적으로 하중을 재하하는 경우 전단력에 의해 발생하는 비배수 전단변형으로 인하여 압밀시 시료의 변형특성(압축성)이 일정 압력증가율로 하중을 재하하는 경우와 달라질 수 있다. 일반적으로 점성토 지반에 실제 구조물이 시공되는 경우 비배수에 가까운 조건으로 하중이 재하되고, 이후에 압밀이 발생한다는 점을 고려할 때 일정 압력증가율 배수시험에 비해 단계재하 압밀시험 방법이 현시점에서는 바람직한 것으로 판단되며, 본 연구에서도 이러한 관점에서 압밀침하량 평가방법을 제안하였다. 그러나 향후 하중재하 속도의 변화에 따른 영향을 합리적으로 고려하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 3. 침하량 평가기법의 적용사례와 분석

본 연구에서는 제시한 침하량 평가기법을 기존의 침하량 평가기법들과 함께 정규압밀점성토 지반 위에 놓인 원형기초 중심에서의 침하량을 평가하는데 실제로 적용해 보았으며, 다음에 제시한 바와 같이 실제 현장과 유사한 지반조건과 시공조건들을 고려하였다.

- ① 대상 지반은 매립층과 매립층 하부의 정규압밀점성토 지반으로 구성되어 있다.
- ② 대상 점성토 지반은 포화상태이고 반무한하며, 기존의 연구(김창엽 등, 1999)에서 사용되었던 kaolinite 시료와 지반공학적으로 동일한 성질을 가지는 점성토로 구성되어 있다.
- ③ 대상 원형기초는 매립층을 굴착한 후 점성토 지반 위에 시공된다.
- ④ 대상 원형기초는 완전 연성기초이다. 따라서 상부구조물에 의한 전체 순증가 하중( $Q_{net}$ )은 기초의 전체 면적에 걸쳐 등분포하중( $\Delta q = Q_{net}/A$ )으로 작용한다.

이와 함께 본 연구에서의 침하량 평가과정에서는 계산의 편의를 위하여 기초저면 위에 존재하는 매립층을 그림 4와 같이 40kPa의 유효상재하중으로 치환하였으며, 기초의 시공과정은 굴착과 매립에 따른 팽창과 재압축의 영향을 무시할 수 있을 만큼 충분히 빠른 것으로 가정하였다. 이러한 추가적인 가정조건들은 직접적인

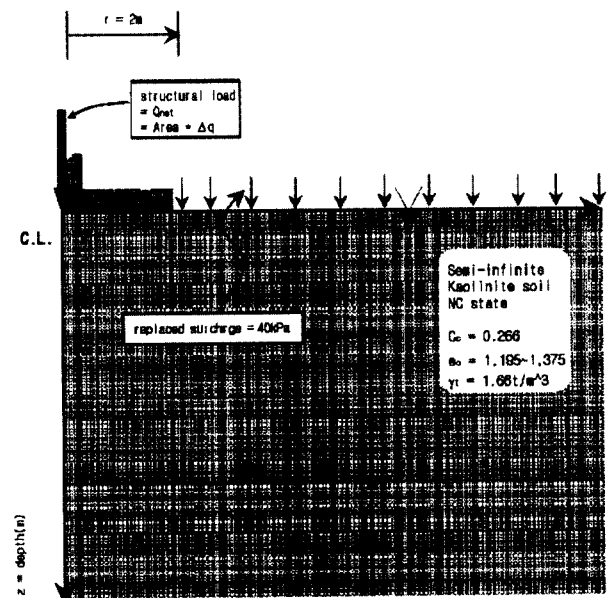


그림 4. 지반조건과 시공조건

관심의 대상이 되는 상부구조물에 의한 전체 순증가 하중 ( $Q_{net}$ )에 의해 발생하는 침하거동에는 그다지 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

### 3.1 제시된 평가기법과 기존 평가기법들에 의한 압밀침하량의 비교

주어진 조건하에서 일차원 표준압밀시험에서 얻어진 압축지수 ( $C_c$ ), Skempton-Bjerrum 보정법(Skempton & Bjerrum 1957) 그리고 본 연구에서 제시된 침하량 평가 기법에 근거하여 평가된 원형기초 중심에서의 압밀침하량은 다음의 그림 5에 제시한 바와 같다. 이때 침하량 평가에 적용된 응력증분은 일반적으로 널리 이용되는 탄성이론에 근거하여 평가되었으며, Skempton-Bjerrum 보정법의 적용과정에서 필요한 발생간극수압은 응력경로시험에서 실측된 값을 이용하였다.

그림 5에 따르면 표준압밀시험은 하중 수준에 관계없이 제시된 평가기법에 비하여 압밀침하량을 매우 과대 평가하는 것으로 나타났으며, 실측된 발생간극수압의 크기를 고려하여 표준압밀시험 결과를 보정한 Skempton-Bjerrum 보정법의 결과 역시 제시된 평가기법에 비해서는 압밀침하량을 매우 과대 평가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 일차원적인 표준압밀시험이 축대칭적인 실제의 압밀변형양상을 제대로 모사할 수 없으며, 이러한 표준압밀시험의 한계를 단순히 응력경로에 따른 과잉간극수압 발생양상의 차이만으로 설명하기에는 무리가 따른다는 사실을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 침하량 평가방법들의 이러한 근본적인 한계를 다음에 제시한 여러 요인들의 복합적인 효과로 설명해 보고자 한다.

기존의 실험적 연구결과(김창엽 등, 1999)에 따르면, 압밀과정에서의 평균유효응력 증가량 ( $\Delta p'$ )이 동일한 경우에도 발생하는 체적변형률( $\epsilon_{vol}$ )은 다음의 그림 6에 제시한 바와 같이 표준압밀시험의 경우가 응력경로 시험들에 비해 훨씬 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시료의 체적압축성이 압밀과정의 응력경로에 따라 크게 변화함을 단적으로 보여 주고 있으며, 이와 같은 체적압축성의 응력경로 의존성은 기존의 다른 실험적 연구 결과들(권오엽, 1988; Simon and Som 1969)과도 잘 일치하는 것이다. 등방 탄성적인 재료의 경우 체적변형률이 응력경로에 상관없이 평균유효응력의 증가

량에 의해서만 좌우된다는 사실을 고려한다면 이러한 체적압축성의 응력경로 의존성은 근본적으로는 정규압밀점성토의 이방적 압축특성 등의 요인에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 자연상태에서 등방탄성적인 거동을 보이지 않는 실제 지반에 대하여, 실제의 응력경로에 비해 과도한 체적압축성을 나타내는 응력경로를 모사하는 표준압밀시험을 적용하거나 그 결과를 단순히 평균유효응력의 증가량(또는 발생간극수압) 관점에서 보정하는 Skempton-Bjerrum 법을 적용하는 것은 1차원 변형조건이 아닌 경우에는 실제의 압밀침하량을 과대평가할 수 있다.

또한 압밀과정에서는 동일하게 등방적인 압밀응력경로를 따르는 다양한 응력경로시험들에 있어서도 그림 6에 제시된 바와 같이 압밀과정에서의 체적압축성은 비배수 재하과정에서 가해지는 응력경로에 따라 크게 변화하는 것으로 나타났다. 이때 체적압축성은 대체로  $K^*$  값이 감소함에 따라 감소하고  $K^*=1$ 인 경우 가장 큰 것으로 나타났으며, 이러한 시험결과는 압밀과정에 선행하는 비배수 재하과정에서 발생하는 흡요소의 즉시 변형과 유효응력상태(특히 횡방향 응력상태)의 변화가 압밀과정에서의 체적압축성을 감소시키는 요인이 될

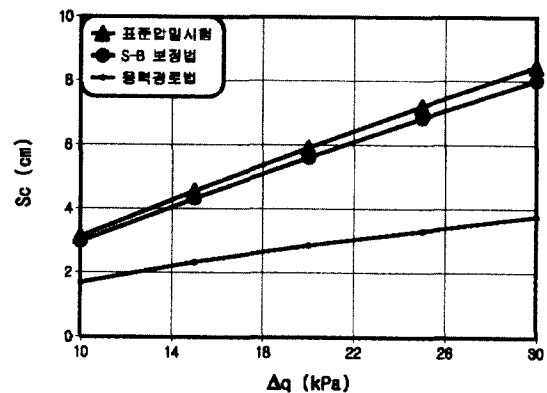


그림 5. 원형기초 중심에서의 압밀침하량

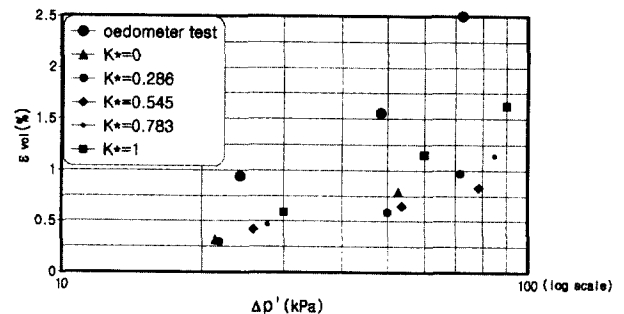


그림 6. 평균유효응력증가량과 체적변형률의 관계 ( $\Delta p' - \epsilon_{vol}$ ) (김창엽 등, 1999)

수 있음을 보여주고 있다. 따라서 실제 현장조건과 달리 비배수 재하에 의한 체적압축성의 변화를 전혀 반영하지 못하는 표준압밀시험이나 Skempton-Bjerrum 보정법을 적용하는 것은 1차원 변형조건이 아닌 경우 압밀침하량을 과대평가할 수 있다.

이러한 체적압축성의 응력경로 의존성과 비배수 재하에 의한 체적압축성의 변화와 함께, 표준압밀시험에서의 압밀변형은 횡방향 변형이 구속되어 있는 1차원 조건하에서 이루어 진다는 사실 역시 기존 침하량 평가 기법들을 적용하는 경우 압밀침하량을 과대평가하게 되는 하나의 주요한 요인으로 생각할 수 있다. 즉, 실제의 축대칭 조건하에서는 대부분의 경우 압밀과정에서 연직방향 뿐만 아니라 횡방향으로도 압축이 발생하게 되지만, 표준압밀시험에서는 1차원적인 변형조건 때문에 발생하는 체적변형은 모두 연직방향의 변형으로만 발생하게 된다. 따라서 동일한 체적변형이 발생하는 경우에도 기존 평가기법들은 실제의 축대칭 조건에 비해 더 큰 연직방향의 압밀변형률 즉 압밀침하량을 예측할 가능성이 있다.

### 3.2 응력증분 평가방법이 침하량 평가에 미치는 영향

보다 정확한 침하량의 평가를 위해서는 적절한 침하량 평가기법의 선택과 함께 무엇보다도 우선 흡수소가 경험하게 될 응력경로 즉 응력증분의 평가가 정확하고 합리적으로 이루어져야만 한다. 그러나 불행하게도 일반적으로 정해로 인정되는 응력증분 평가방법은 아직 까지 제시되어 있지 않으며, 침하량 평가에 이용되는 응력증분은 거의 모든 경우 탄성이론에 근거하여 평가되고 있다. 그러나 기존의 여러 연구결과(Perloff, 1975;

표 4. MCC 모델의 입력치

Log bulk modulus $x$	0.0256
Log bulk modulus $\lambda$	0.1155
Critical stress ratio $M$	1.3701
Poisson ratio $\nu'$	0.30~0.45

Harr, 1977)에 따르면 탄성이론에 근거하여 평가된 응력증분 특히 횡방향 응력증분은 현장의 실측치와 상당한 차이를 보이는 것으로 알려져 있으며, 응력증분 평가과정에서의 이러한 오차는 필연적으로 침하량 측면에서도 상당한 오차를 유발하게 된다.

따라서 본 연구에서는 탄성이론에 비하여 실제의 지반거동을 보다 잘 모사하는 것으로 알려져 있는 소성모델(MCC 모델)을 적용하는 유한요소해석을 실시하고, 이러한 해석 과정에서 평가된 응력증분을 탄성이론에 근거하여 평가된 응력증분과 함께 침하량 산정과정에서 적용하여 그 결과를 서로 비교해 보았다. 수행된 유한요소해석의 입력치는 다음의 표 4에 제시한 바와 같으며, 제시된 입력치들은 기존의 연구(김창엽 등, 1999)에서 실시되었던 표준압밀시험과  $K_0$  압밀 비배수 삼축압축 시험( $CK_0U$  TXC 시험)의 결과로부터 평가되었다. 단, 포아송비( $\nu'$ )의 경우 정규압밀점성토에서의 일반적인 범위로 알려진 0.30~0.45의 값을 다양하게 변화시키면서 적용하였으며, 실제 수치해석과정에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS가 활용되었다.

탄성이론(Elastic)과 소성모델(MCC)에 근거하여 평가된 재하 직후의 깊이에 따른 응력증분을 두가지 응력증분의 차(MCC-Elastic)와 함께 다음의 그림 7과 그림 8에 제시하였다. (단, 본문에서는 전형적인 경향을 보여주는  $\Delta q = 25\text{kPa}$ ,  $\nu' = 0.35$ 인 경우에 대해서만 대표적

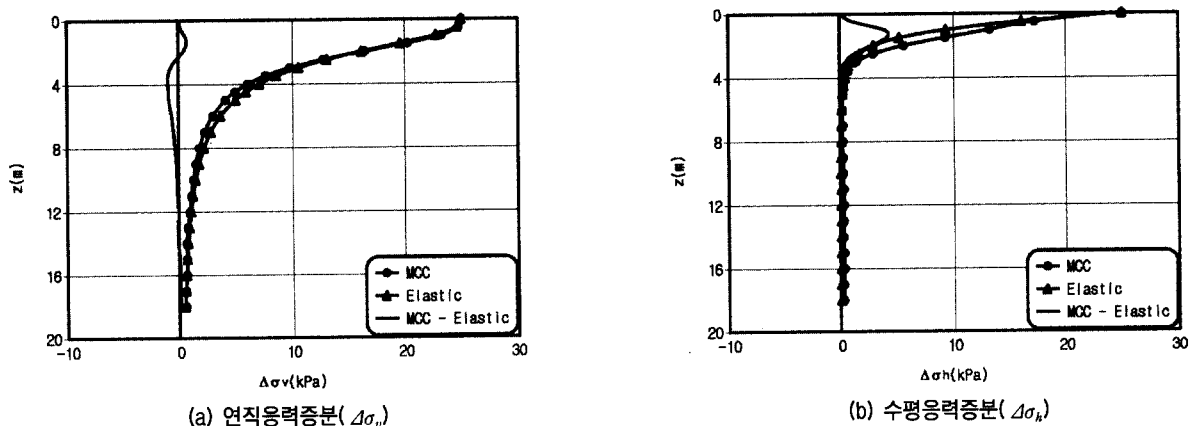


그림 7. 재하 직후의 연직응력증분( $\Delta\sigma_v$ )과 수평응력증분( $\Delta\sigma_h$ ) ( $\Delta q = 25\text{kPa}$ ,  $\nu' = 0.35$ )

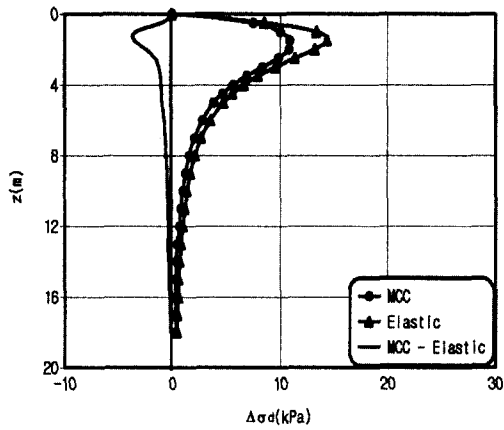


그림 8. 재하 직후의 축차응력증분(  $\Delta\sigma_d$  ) (  $\Delta q = 25\text{kPa}$ ,  $\nu = 0.35$  )

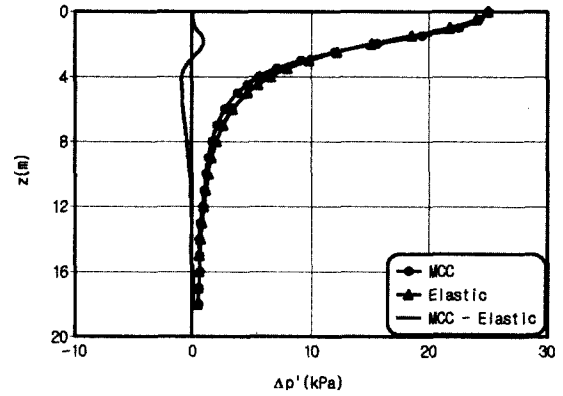
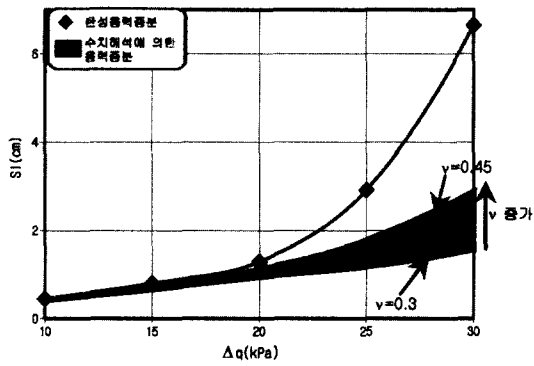
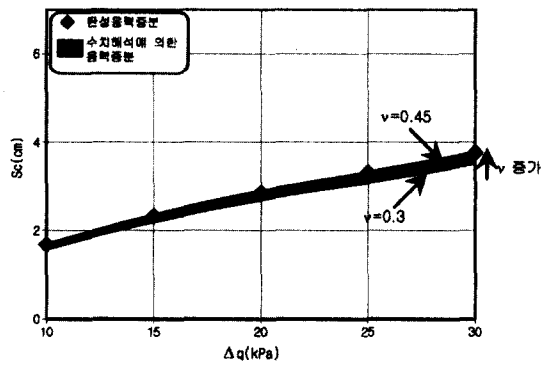


그림 10. 압밀과정에서의 평균유효응력 증가량(  $\Delta p'$  ) (  $\Delta q = 25\text{kPa}$ ,  $\nu = 0.35$  )



(a) 즉시침하량



(b) 압밀침하량

그림 9. 탄성응력증분과 소성모델에 의한 응력증분을 적용하여 평가된 침하량의 비교

으로 결과를 제시하였다.) 제시된 결과에 따르면 재하 직후에 발생하는 연직응력증분은 거의 모든 깊이에서 소성모델을 적용한 경우에 비하여 탄성이론을 적용한 경우에 더 크게 나타났으며, 수평응력증분은 그 반대의 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 그림 8에 제시된 바와 같이 재하 직후에 발생하는 축차응력증분은 모든 깊이에서 탄성이론을 적용한 경우에 항상 더 크게 나타났다.

이러한 두 가지 응력증분을 적용하여 평가된 대상지반의 즉시침하량과 압밀침하량은 다음의 그림 9에 제시하였으며, 이때 침하량 평가에는 본 연구에서 제안된 침하량 평가기법이 적용되었다.

그림 9에 따르면 즉시침하량은 소성모델에 의한 응력증분을 적용한 경우에 비하여 탄성이론에 의한 응력증분을 적용한 경우에 항상 더 크게 평가되었으며, 이는 앞에서 살펴본 바와 같이 탄성이론의 경우가 재하 직후의 축차응력증분을 상대적으로 더 크게 평가하기 때문이다. 또한 평가된 즉시침하량 간의 차이는 재하 하중이 증가함에 따라 더욱 커지는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 재하 하중이 증가함에 따라 실제 지반의 거동이 탄성적인 거동에서 점점 멀어진다는 사실을 고려한다면 충분히 예상할 수 있다.

압밀침하량 역시 탄성이론에 의한 응력증분을 적용한 경우에 항상 더 크게 나타났으나, 그 차이는 즉시침하량에 비해서는 매우 작고 재하 하중의 크기에도 그다지 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 즉시침하량에 직접 관련되는 축차응력증분은 응력증분 산정방법에 따라 크게 차이가 나는 반면에, 압밀침하량에 직접 관련되는 압밀과정에서의 평균유효응력 증가량(  $\Delta p'$  ) 즉 발생간극수압의 크기는 응력증분 산정방법에 따라 그다지 큰 차이를 보이지 않기 때문이다.(그림 10)

#### 4. 요약 및 결론

(1) 본 연구에서는 다양한 응력경로시험을 통해 정규압밀점성토의 변형특성을 고찰한 기존의 실험적인 연구결과(김창엽 등, 1999)를 바탕으로, 정규압밀점성토 지반 위에 놓인 원형기초 중심에서 (즉, 축대칭

조건하에서) 즉시 및 압밀침하량을 응력경로법에 근거하여 평가하는 기법을 새롭게 제시하였다.

(2) 본 연구에서 제시된 침하량 평가기법과 기존의 1차원적인 평가기법들을 적용하여 실제 현장과 유사한 조건에 대해 즉시 및 압밀침하량을 실제로 평가하였으며, 동일한 조건에 대해 소성모델(MCC 모델)과 혼합압밀이론을 적용한 유한요소해석을 실시하였다. 그 결과들을 비교·분석함으로써 얻어진 침하량 평가와 관련된 결론적인 내용은 다음과 같다.

① 기존의 1차원 압밀조건과 Skempton-Bjerrum 보정법에 의한 압밀침하량 산정 방법은 제시된 평가기법에 비해 정규압밀점성토 지반 위 원형기초 중심에서 압밀침하량을 매우 과대 평가하는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 흙 고유의 이방성 등에 따른 체적압축성의 응력경로 의존성, 비배수 순간 재하에 의한 체적압축성의 변화, 기존 평가기법들의 1차원 변형에 대한 구속조건 등의 요인에 기인하는 것으로 판단된다.

② 제시된 침하량 평가기법의 적용 결과에 따르면, 탄성이론에 의한 응력증분을 적용한 경우의 즉시침하량과 압밀침하량은 소성모델에 의한 응력증분을 적용한 경우에 비해 항상 더 크게 나타났으며, 이러한 침하량 간의 차이는 압밀침하량의 경우 재하 하중에 상관없이 무시할 수 있을 정도로 작으나 즉시침하량의 경우에는 재하 하중이 커지면 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 응력증분 평가를 위해 채택된 소성모델(MCC 모델)이 탄성이론에 비해 실제 흙의 거동을 보다 잘 모사한다는 일반적인 사실을 고려한다면, 위의 결과는 응력증분의 평가를 위해 탄성이론을 적용하는 경우 실제 침하량이 과대 평가될 가능성이 있음을 말해준다.

※ 기 호

- $\epsilon_{vu}$  : 연직방향의 즉시변형률
- $\epsilon_{vc}$  : 연직방향의 압밀변형률
- $\epsilon_{vol}$  : 체적압밀변형률
- $\Delta p'$  : 평균유효응력 증가량
- $\Delta q$  : 단위 면적당 구조물 하중 ( $= Q_{net}/A$ )
- $\Delta \sigma_v$  : 연직응력증분
- $\Delta \sigma_h$  : 수평응력증분
- $\Delta \sigma_d$  : 축차응력증분
- $\Delta u_e$  : 전체 발생(과잉)간극수압

- $\Delta u_{ei}$  : 등방응력증분에 의한 발생간극수압
- $\Delta u_{ed}$  : 축차응력증분에 의한 발생간극수압
- $\kappa, \lambda$  : Log bulk modulus
- $\sigma_{vi}'$  : 초기 연직유효응력
- $\nu'$  : 포아송비
- $A$  : 기초 면적
- $K_o$  : 정지토압계수
- $K^*$  : 응력증분비 ( $= \frac{\Delta \sigma_h}{\Delta \sigma_v}$ )
- $M$  : 한계응력비
- $Q_{net}$  : 구조물 하중
- $S_c$  : 압밀침하량
- $S_i$  : 즉시침하량
- $z$  : 깊이

감사의 글

본 연구는 1997년 학술진흥재단 공모과제(1997-001-E00709)와 BK21(사회기반 인력 양성사업단)의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 대하여 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 권오엽(1988), "정규압밀점성토의 응력경로에 따른 응력-변형 거동," 서울대, 박사학위논문.
2. 김창엽, 정충기(1999), "응력경로법에 의한 정규압밀점성토의 변형특성 고찰", 한국지반공학회지, 제15권, 1호, pp.161-173.
3. Gangopadhyay, C.R., Das, S.C., and Som, N.N., (1980), "Stress Path Influence on Drained Deformations of Clay," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.106, No.GT11, pp.1243-1260.
4. Harr, M.E.(1977), "Mechanics of Particulate Media : A Probabilistic Approach", McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, N.Y.
5. Lambe, T.W.(1979), "The Stress-Path Method," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.105, No. SM6, pp.727-738.
6. Perloff, W.H.(1975), "Pressure Distribution and settlement", Foundation Engineering Handbook, H.F. Winterkorn & H.Y. Fang, eds., Chapter 4, Van Nostrand Reinhold, New York, N.Y., pp.148-196.
7. Simons, N.E., and Som, N.(1969), "The Influence of Lateral Stresses on the Stress-Deformation Characteristics of London Clay," Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.369-377.
8. Skempton, A.W., and Bjerrum, L.(1957), "A Contribution to the Settlement Analysis of Foundation on Clay," Geotechnique, Vol. 7, No.4, pp.166-178.

(접수일자 2000. 9. 1)