

## 액상화에 의한 실트질 모래지반의 침하 산정

### Simplified Estimation of Settlement in Silty Sand Grounds Induced Liquefaction

이민호<sup>1)</sup>, Min-Ho Rhee, 김태훈<sup>2)</sup>, Tae-Hoon Kim, 이 송<sup>3)</sup>, Song Lee

<sup>1)</sup> 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

<sup>2)</sup> 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

<sup>3)</sup> 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

**SYNOPSIS** : When subjected to earthquake shaking, saturated sandy soil may generate excess pore pressure. And a time may come when initial confining pressure will equal to excess pore pressure. Depending on the characteristics of the soil and the length of the drainage path, excess pore pressure was dissipated after earthquake. For this reason, it was induced settlement in grounds and fatal damage of various structures. In this study, settlement in silty sand grounds induced earthquake was evaluated using post-liquefaction constitutive equation between volumetric strain and shear strain from previous study. Using that, it was proposed that simplified estimation of settlement in silty sand grounds induced liquefaction.

**Key words** : silty sand, post-liquefaction, settlement, volumetric strain, shear strain

## 1. 서 론

최근 국내에서는 좁은 국토의 효율적 활용 방안으로 공항, 공업단지 등을 연약지반이나 매립지반에 건설하고 있다. 이런 지반에서 지진이 발생할 경우 지반은 액상화로 인해 평평한 지반은 큰 수평 변위를 일으키고, 사면은 붕괴하게 된다. 이와 같은 액상화는 느슨한 모래지반 뿐만 아니라 실트질 모래지반에서도 발생 가능하다. 모래가 포화되어 있다면, 지진에 의해 과잉간극수압이 발생하게 된다. 그리고, 흙의 특성과 배수길이에 따라 과잉간극수압이 소산되는 시간은 모래의 경우 불과 몇 분에서 하루정도면 모두 소산되고, 배수되면서 지반의 침하가 발생하게 된다. 과잉간극수압의 배수로 인한 지반의 침하는 균등 침하보다는 지반의 부등침하 또는 수평 변위를 유발하는데, 이런 침하와 변위는 구조물의 부등침하, 옹벽, 교대의 수평이동 등 구조물에 큰 피해를 끼치게 된다. 부등침하의 정확한 측정은 현재의 기술 수준으로는 어렵지만, 제한된 지역에서 발생하는 전체 또는 평균침하량 예측은 가능하다. 국외에서는 최근의 연구에서 그러한 변위의 산정에 대한 필요성이 강조되고 있으나, 아직 국내에서는 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 실트질 모래지반의 후기액상화 침하량을 기존의 제안된 후기액상화 체적변형률-전단변형률의 구성식을 이용하여 실트질 모래지반의 체적변형률-최대전단변형률의 관계를 산정하였으며, 이를 이용하여 실트질 모래지반의 침하 산정에 대해 연구하였다.

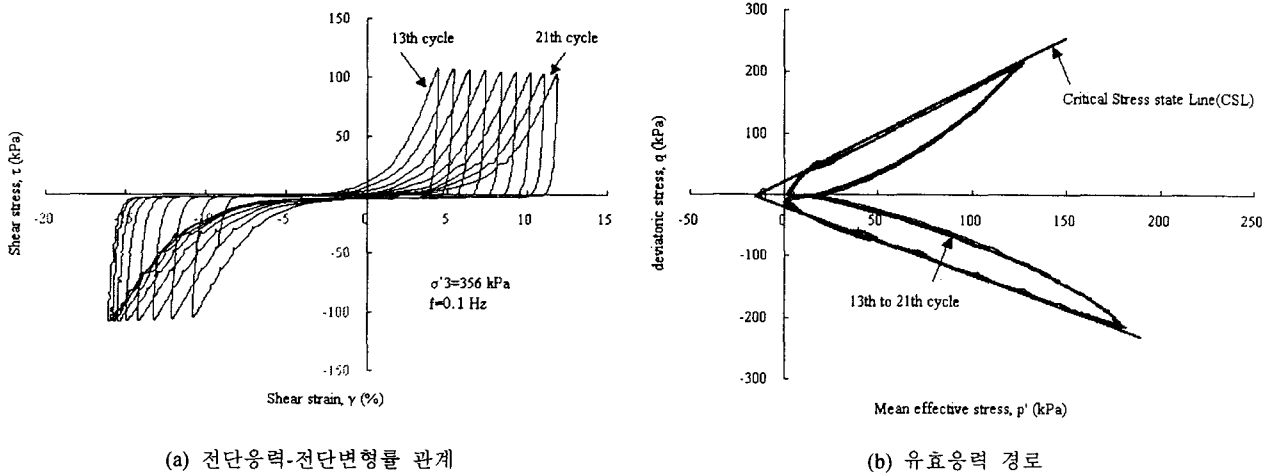
## 2. 후기액상화 변형 메카니즘

1997년 Shamato 등은 후기액상화 변형 메카니즘 이론을 발표하였다. 이 이론은 전단변형률과 체적변

형률의 구성식을 제안하여 큰 변형을 발생시키는 액상화후의 변형 메커니즘을 설명하였다. 본 연구에서 후기액상화(post-liquefaction)는 비배수조건에서 초기액상화가 발생한 후의 반복하중에 대한 모래의 거동을 가리킨다.

## 2.1 전단변형률 요소

그림 1은 비배수 반복삼축시험의 결과로 유효응력이 반복적으로 0인 점을 지나며, 또한 전단변형률 양진폭은 계속 증가됨을 보이며, 초기액상화 발생 반복횟수는 13회이다.



(a) 전단응력-전단변형률 관계

(b) 유효응력 경로

그림 1. 반복삼축시험에 의해 관찰된 전단변형률의 두 가지 요소

그림 1의 (a)와 (b)를 비교해보면, 같은 유효응력 경로를 지나지만 전단변형률 양진폭은 반복횟수에 따라 증가됨을 알 수 있다. 이는 후기액상화 응력-변형 거동은 두 가지 전단변형률요소가 존재하는 것을 알 수 있다. 하나는 유효응력의 변화에 의존하는 요소이며, 다른 하나는 유효응력의 변화에 무관한 요소로 나뉘며, 이를 식으로 쓰면 다음과 같다.

$$\gamma = \gamma_d + \gamma_0 \quad (1)$$

$$\gamma_d = \frac{\alpha K}{M_{CS} - M_0} \left( \frac{p'_i}{p_a} \right) \left( \frac{q}{M_{CS} \cdot p'_i} \right)^B \quad (2)$$

$$\gamma_0 = \frac{R'_0}{M_{CS,0}} \frac{e_0 - e_{\min}}{1 + e_0} \cdot (\gamma_{\max} - \gamma_{\text{entry}})^m \quad (3)$$

여기서,  $\gamma_d$ 는 0이 아닌 유효구속압 동안 발생하는 전단변형률 요소이며,  $\gamma_0$ 는 0인 유효구속압동안 발생하는 전단변형률 요소이며,  $M_{CS}$ ,  $M_{CS,0}$ ,  $M_0$ 는 각각 critical state line의 경사, 유효응력이 0인 상태의 critical state line 경사, phase transformation line의 경사이며,  $\gamma_{\text{entry}}$ 는 entrance shear strain으로 초기액상화를 유발하는 최소전단변형률을 말하며,  $\alpha$ ,  $R'_0$ ,  $m$ 은 실험에 의해 결정되는 상수이다.

## 2.2 체적변형률 요소

그림 2는 반복 배수 비틀 시험에서 측정된 반복횟수의 증가에 따른 전단변형률과 체적변형률의 변화를 보여준다. 시험중 구속압을 일정하게 유지했기 때문에, 체적변형의 결과는  $\tau/\sigma'_c$  또는 전단변형률의

결과에 기인한다. 이와 같이 전단이 가해지는 것에 기인한 체적변형률을 응력팽창에 기인한 체적변형률,  $\epsilon_{vd}$ 라 한다.  $\epsilon_{vd}$ 는 계속적인 반복전단이 적용되는 동안 점차적으로 축적될 뿐만 아니라,  $\gamma$ 의 반복적인 증가와 감소에 따라서 진동한다. 그림 2의 (a)에서  $\epsilon_{vd}$ 는 전단변형률이 0일 때의 값을 파선으로 도시하였다. 이는 과거 전단이력에 의해 주로 결정되고, 그러나, 현재의  $\gamma$ 값에는 영향을 받지 않는 체적변형률 요소의 점차적이고 회복할 수 없음을 보여준다. 그림 2의 (b)는  $\epsilon_{vd}$ 에서 회복할 수 없는 체적변형률 요소를 뺀 그림이다. 이러한 새로운 체적변형률 요소는 전체 전단 과정에 대해 항상 회복가능하다. 이런 회복가능한 체적변형률 요소는 현재의 전단변형률에 의존한다.

이러한 실험적 관찰을 근거로 전단동안 응력팽창에 의해 발생하는 두가지 체적변형률 요소가 존재한다. 하나는 회복성을 가지며 현재의 전단변형률의 크기와 방향에 의존하며, 회복가능한 요소,  $\epsilon_{vd, re}$ 라 한다. 다른 하나는 회복불능의 특성을 가지며 과거 전단 이력에 의존하며, 회복불가능한 요소,  $\epsilon_{vd, ir}$ 라 한다. 이렇듯 응력팽창에 기인한 체적변형률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{vd} = \epsilon_{vd, re} + \epsilon_{vd, ir} \quad (4)$$

또한, 일반적인 하중을 받는 흙에 있어서, 흙의 체적변형률은 평균유효구속응력의 변화에 의해 유발된다. 이런 체적변형률 요소를  $\epsilon_{vc}$ 라 한다. 그러면, 전체 체적변형률  $\epsilon_v$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_v = \epsilon_{vd} + \epsilon_{vc} = \epsilon_{vd, re} + \epsilon_{vd, ir} + \epsilon_{vc} \quad (5)$$

$$\epsilon_{vd, ir} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{e_0 - e_{\min}}{1 + e_0} R_c = \frac{e_0 - e_{\min}}{1 + e_0} R_0 \cdot \gamma_{\max}^m \quad (6)$$

$$\epsilon_{vd, re} = -M_{CS,0} \gamma_0 - \frac{M_{CS} - M_0}{\alpha} \gamma_d \quad (7)$$

$$\epsilon_{vc} = K \left( \frac{p'_i}{p_a} \right)^A \left( \frac{p'_i}{p'_i} \right)^B \quad (8)$$

여기서,  $R_c = \frac{\Delta e}{e_0 - e_{\min}} = R_0 \cdot (\gamma_{\max})^m$ 로 정의되는 상대압축이며,  $K$ ,  $A$ ,  $B$ 는 배수시험에 의해 결정되는 상수이다. 또한 본 논문에서는 체적변형률의 부호의 정의는 체적이 수축, 팽창을 하면 각각 +, -로 정의한다.

### 2.3 후기액상화 변형 메카니즘

포화된 모래의 비배수전단시 체적변형은 발생하지 않으며, 식 (5)는 다음과 같다.

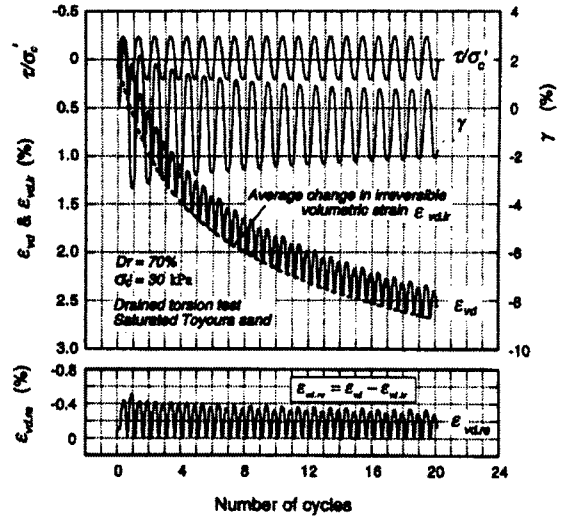


그림 2. 반복 배수전단동안의 회복가능한 요소와 회복불가능한 요소의 변화 (Shamoto et al., 1997)

$$\epsilon_{vd, re} + \epsilon_{vd, ir} + \epsilon_{vc} = 0 \quad (9)$$

결과적으로 과잉간극수압,  $\Delta u$ 는 상승하고, 전체 하중 과정에서  $\epsilon_{vc}$ 는  $\Delta u$ 가 증가하면 유효응력 감소로 인해 감소한다. 그러나 유효구속압이 0일 때의 체적변형률(또는 팽창시 최대 체적변형률)보다 작을 수 없으며, 이때의 체적변형률을  $\epsilon_{vc,0}$ 라고 표기한다. 한편,  $\epsilon_{vd, ir}$ 은 초기액상화 전이든 후든 지속적인 비배수 반복전단과정에 걸쳐서 항상 증가하게 된다. 일반적으로 유효구속압이 0인 때의  $\epsilon_{vd, ir}$ 값은  $-\epsilon_{vc,0}$ 보다 훨씬 크다. 따라서 다음의 조건이 성립하게 된다.

$$\epsilon_{vc} \geq \epsilon_{vc,0} \quad (10)$$

$$\epsilon_{vd, ir} + \epsilon_{vc,0} > 0 \quad (11)$$

따라서, 체적변형률이 0인 식 (11)을 만족시키기 위해서,  $\epsilon_{vd, re}$ 는 충분한 감소를 가져와야 한다. 그러므로 이런  $\epsilon_{vd, re}$ 의 큰 감소를 위해서는 큰 전단변형률을 요하게 된다. 그것은  $\epsilon_{vd, re}$ 는 전단변형률  $\gamma$ 의 증가에 의해 획득될 수 있기 때문이다.

그림 1에서 보듯이 후기액상화에서 전단변형률의 변화는 주로 유효구속압이 0일 때 발생된다. 이 때(유효구속압이 0인 상태)에 유효응력의 변화에 의존하는 전단변형률 요소  $\gamma_d$ 는 어떠한 변화도 없다. 또한 유효응력의 변화가 없기 때문에  $\epsilon_{vc,0}$ 도 변화가 없다.  $\epsilon_{vd, ir}$ 은 계속 증가하고, 평형을 위해 유효구속압이 0인 상태에서 발생하는 전단변형률 요소  $\gamma_0$ 에 의해 유발되는  $\epsilon_{vd, re}$ 가 감소하게 된다. 초기액상화 이후 계속해서  $\epsilon_{vd, ir}$ 는 증가하고  $\epsilon_{vd, re}$ 는 감소해야 하는데,  $\epsilon_{vd, re}$ 가 감소하기 위해서  $\gamma_0$ 가 증가해야 한다. 이런 해석은  $\gamma_0$ 가 발생하는 이유와 초기액상화에 이후 전단변형률 양진폭이 급격한 증가하는 이유를 설명한다.

위와 같은 분석결과를 기초로, 포화된 모래의 흐름 변형을 유발하는 조건은 식 (12)와 같다.

$$-\epsilon_{vd, re} < (\epsilon_{vd, ir} + \epsilon_{vc,0}) \quad (12)$$

모래의 초기 밀도가 작을수록  $-\epsilon_{vd, re}$ 는 작아지고,  $\epsilon_{vd, ir}$ 는 커진다. 따라서, 유발된  $\epsilon_{vd, ir}$ 값이  $-\epsilon_{vd, re}$ 보다 훨씬 더 크기 때문에 느슨한 모래는, 반복 또는 단순 전단력에 흐름파괴가 발생하는 것이다.

### 3. 체적변형률 산정

#### 3.1 실내시험 방법

본 연구에는 수평하게 퇴적된 서해안 실트질 모래지반의 시료를 이용하였다. B-3, 6은 반복삼축시험을 실시하였으며, B-1, 2, 4, 5는 지반의 N치, 실내 토성시험, 현장시험을 실시하였다. 시료의 간극비는 0.63~0.83, 상대밀도는 45~66%, 세립분 함량은 35~70%범위를 가진다. 실내시험에서는 CKC Chan사의 자동화 삼축시험장치를 이용하였으며, 불교란 시료를 채취하기 곤란하여 교란시료를 재성형하여 시행하였다. 교란시료의 재성형방법에는 수중침강법, 습윤모래뿌리기, 건조모래침전법, 습윤다짐법 등의 방법이 있으며, 본 연구에서는 습윤다짐법을 사용하여 현장의 단위중량으로 직경 50mm, 높이 100mm로 성형제작하였다. 그리고, 시료속의 공기를 제거하기 위해 진공압을 1~2시간정

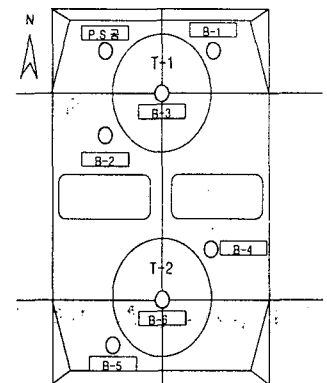


그림 3. 시초조사 위치도

도 가하여 시료속에서 공기를 제거한 후, 포화단계에서는 배압을 가하여 B값이 0.97이상된 후 압밀단계를 실시하였다. 압밀 단계에서는 현장의 구속압에 해당하는 압력을 주어 현장조건을 재현하였으며, 그 범위는 42~360kPa이다. 비배수 반복전단과정에서는 0.1Hz의 sine파를 가하여, 간극수압, 반복횟수, 축차응력, 축변형률을 측정하였다. 또한 본 연구에서는 비배수 반복전단시 전단변형률은 축변형률의 1.5배를 취했다.(Ishihara et al., 1992)

### 3.2 $M_{cs,0}$ , $M_0$ 의 산정

그림 4에서와 같이 후기액상화 비배수 반복전단 동안 응력경로는 CSL 선상에 놓이고 이는 주어진 밀도에 대해 유일한 값을 가지며, CSL의 기울기  $M_{cs}$ 는 주로 초기 상대밀도에 의해 결정된다.(Zhang et al., 1997) 또한, 체적팽창이 0인 phase-transformation 상태의  $q/p'$ 값,  $M_0$ 는 주어진 모래에 대해 거의 일정하다. 그림 4의 경우는  $M_{cs}=1.34$ ,  $M_0=0.62$  이다. 본 연구에서는  $M_{cs,0}=M_{cs}$ 로 가정하였다.

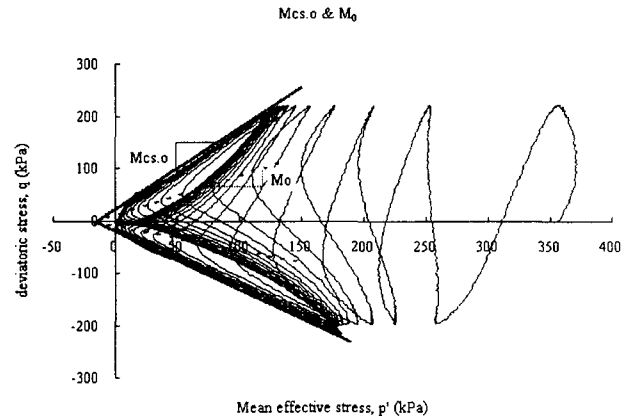


그림 4.  $M_{cs,0}$ 와  $M_0$ 의 산정

### 3.3 $\gamma_0 - \gamma_{max}$ 의 산정

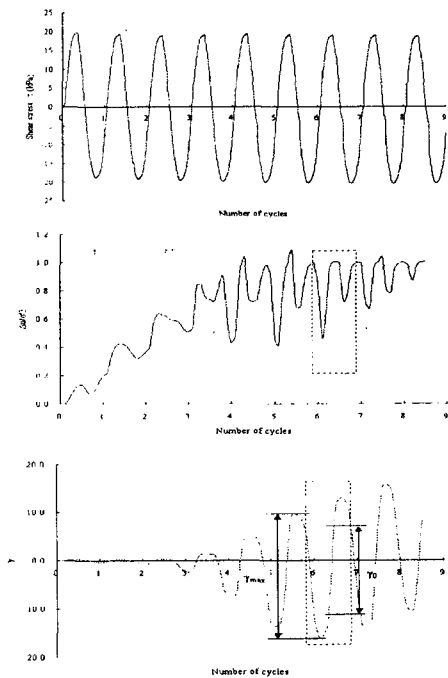


그림 5. 비배수 반복전단시의 거동

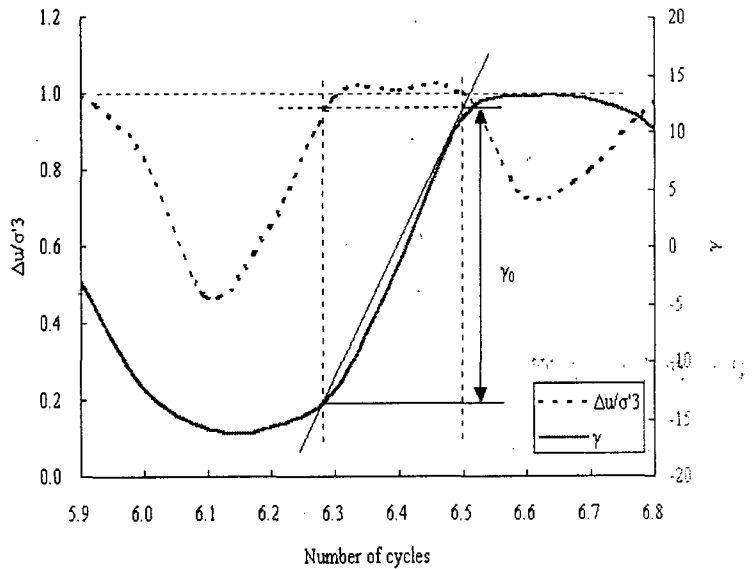


그림 6. 0인 유효응력구간에서 발생하는  $\gamma_0$ 의 결정

그림 5는 반복횟수에 따른 유발된  $\gamma_0$ 와 선행  $\gamma_{max}$ 를 도시하였다. 식 (3)의  $\gamma_0$ 와 선행  $\gamma_{max}$ 와의 관계를 산정하기 위해 그림 6은 좋은 관계를 보여주고 있다. 여기서, 0인 유효응력구간,  $\Delta\sigma'_{3,0}$ 를 Shamoto 등은 0.5kPa로 산정하였으며, Vaid 등은 5kPa로 산정하였다. 이러한 학자들의  $\Delta\sigma'_{3,0}$  선정은 차이가 있

다. 따라서 본 연구에서는 0.5kPa, 1kPa, 5kPa, 그리고 구속압에 따른 영향을 고려하기 위해 간극수압비 1.0에서 0.99구간을  $\Delta\sigma'_{3,0}$ 로 규정하고 유발된  $\gamma_0$ 와 선행  $\gamma_{max}$ 의 관계를 구해 보았다. 그림 7은  $\Delta\sigma'_{3,0}$ 를 각각 0.5kPa, 1kPa, 5kPa, 그리고 간극수압비 99%에 대해 유발된  $\gamma_0$ 와 선행  $\gamma_{max}$ 의 관계를 구한 것이다. 유효구속압을 고려한 간극수압비 99%에 대한 관계는 경향성을 가지지 못하며, 5kPa가 가장 좋은 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 실트질 모래지반은 유효구속압이 0으로 수렴하지 않기 때문으로  $\Delta\sigma'_{3,0}$ 를 순수 모래지반보다 크게 산정해야 유발된  $\gamma_0$ 와 선행  $\gamma_{max}$ 의 관계에서 경향성을 찾을 수 있었다.

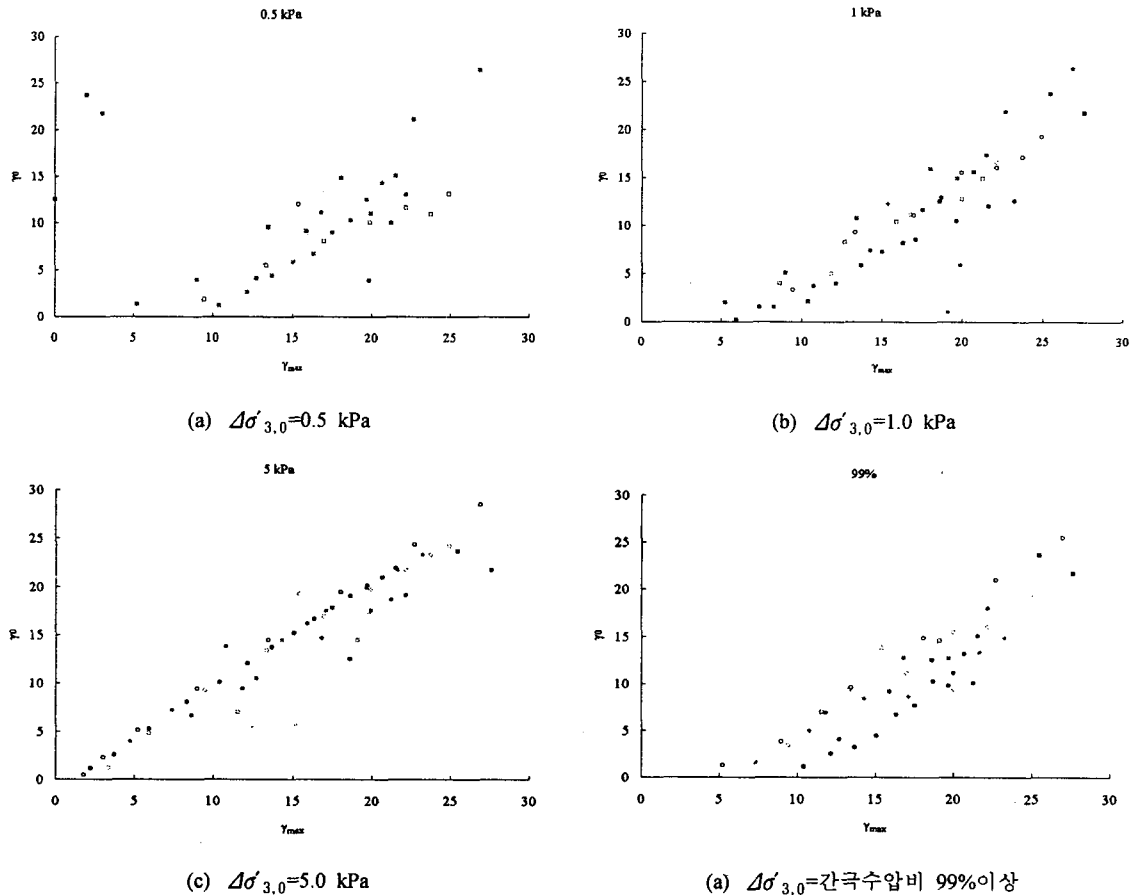


그림 7. 0인 유효응력구간에 대한 유발된  $\gamma_0$ 와 선행  $\gamma_{max}$ 의 관계

### 3.4 상수의 결정

그림 8에서 기울기와 절편이 각각  $R_0$ 와  $m$ 으로, 그 값은 8.8, 1.10이다.  $\gamma_{entry}$ 는 초기액상화를 유발하는 최소전단변형률로서, 실험데이터의 분석에 의해 최초로  $\gamma_0$ 가 나타나는  $\gamma_{max}$ 는 1.79%이다. 또한, 그림 9은 유효성을 검증하기 위해  $R_0$ 와  $m$  값을 식 (3)에 대입한 직선과 실험데이터를 비교 도시하였다.

그림 10은 사용된 시료, 즉, 상대밀도, 세립분 함량, 초기간극비, 최소간극비 등이 다른 흙에 대해 결정된 상수값을 사용하여 식 (6)에 대입하여 체적변형률을 산정한 그림으로, 상대밀도에 따라 체적변형률이 반비례하여 증가하는 경향을 보인다. 이는 초기간극비가 작을수록 액상화 저항력이 크며, 또한 액상화로 인한 침하에서도 큰 저항력을 가짐을 알 수 있다.

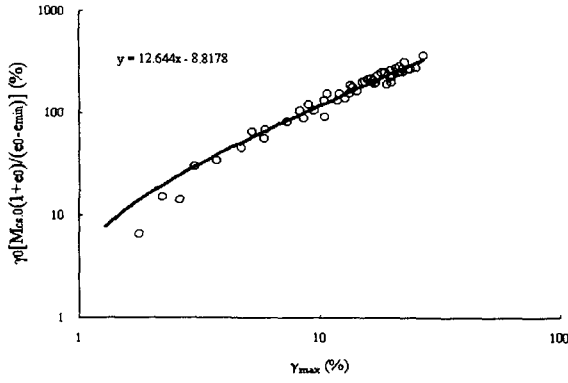


그림 8. 상수  $R_0$ 와  $m$ 의 결정

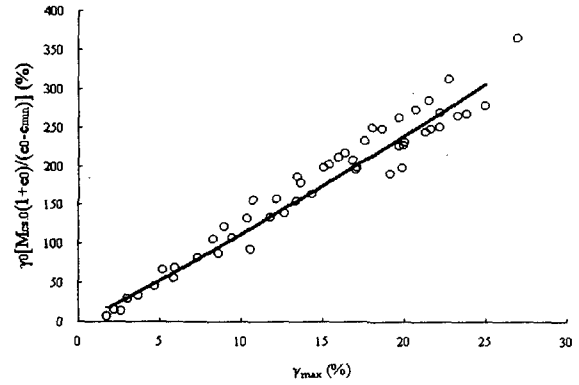


그림 9. 식 (3)에 의한 식과 상수의 유효성 검증

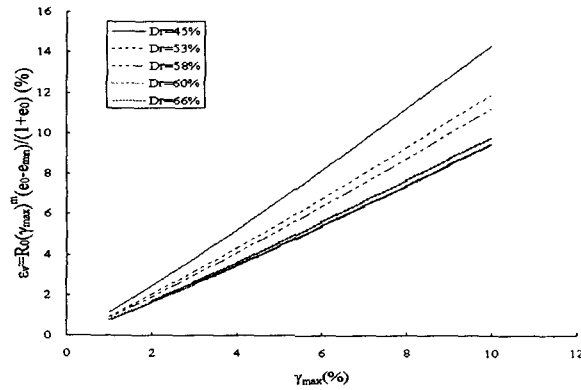


그림 10. 체적변형률 산정

#### 4. 침하량 산정 절차

위에서 언급된 실험적 사실에 근거하여, 지진에 의한 포화된 실트질 모래 퇴적지반의 침하량을 산정하는 절차는 다음과 같다.

먼저, 각 지층의 초기 간극비  $e_0$ 와 최소간극비  $e_{min}$ 을 산정한다. 그리고, 동적응답의 유효응력 해석을 이용하여 모래지반에 유발된 최대전단변형률  $\gamma_{max}$ 을 결정한다. 유발된 최대전단변형률을 결정하면 식 (6)을 이용하여 체적변형률을 구한다. 본 연구의 실내시험을 통해 결정된 상수를 이용한 실트질 모래지반의 체적변형률 산정식은 식 (13)과 같다.

$$\Delta e / (e_0 - e_{min}) = R_0 \gamma_{max}^m = 8.8 \times (\gamma_{max})^{1.10} \quad (13)$$

체적변형률을 산정한 후, 다음 식 (14)로부터 전체침하량  $D_s$ 를 계산한다.

$$D_s = \sum_{j=1}^n \left( \frac{\Delta e}{e_{0,j} - e_{min,j}} \right) (e_{0,j} - e_{min,j}) \left( \frac{\Delta z_j}{1 + e_{0,j}} \right) = 8.8 \cdot (\gamma_{max})^{1.10} \frac{\Delta z_j}{1 + e_{0,j}} \quad (14)$$

여기서,  $n$ 은 나눈 토층의 전체수이고,  $\Delta z_j$ 는  $j$ 번째토층의 두께이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실트질 모래지반의 침하 특성을 파악하기 위해, 세립분 함량 35~70%과 상대밀도 45~66%로 달리하여 현장의 유효구속압 42~360kPa으로 압밀후 반복삼축시험을 실시하였다. 제안된 후기 액상화 변형 메카니즘을 이용하여 실트질 모래지반의 체적변형률 특성을 연구하였으며, 실내시험 결과를 이용하여 실트질 모래지반의 액상화에 의한 침하량을 산정하는 방법을 제시하였다. 그 내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (i) 실트질 모래지반에서는 유발된  $\gamma_0$ 와 선행  $\gamma_{max}$ 와의 관계를 산정함에 있어 유효구속압이 0인 상태는 5kPa 정도의 구간으로 산정하는 것이 합리적이다.
- (ii) 실트질 모래지반에서 비배수 반복전단후 재압밀에 의한 체적변형률은 상대밀도와 반비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.
- (iii) 실트질 모래지반에서 상대밀도 45~66%, 세립분 함량 35~70%, 유효구속압 42~360kPa인 조건에서의 비배수 반복전단후 재압밀에 의한 체적변형률은 발생된 최대전단변형의 함수로써  $8.8 \times (\gamma_{max})^{1.10}$ 의 식으로 산정할 수 있다.
- (iv) 실트질 모래지반에서의 액상화에 의한 침하량 산정은 본 연구의 실내시험에 의해 결정된 상수를 사용하여 간편하게 예측하는 방법을 제안한다.

## 참고문헌

1. 이송, 김태훈, 이민호(2000), "실트질 모래지반의 응력경로를 이용한 액상화 분석", *한국지반공학회 봄 학술발표회*, pp.239-246
2. 이송, 전제성, 김태훈(1999), "반복삼축시험에 의한 실트 모래 지반의 액상화 특성 연구", *한국지반공학회논문집*, 제15권, 제4호, pp.133-152
3. 한국가스공사(1998), "인천 인수기지 2단계 2차공사 상세설계 지반조사 보고서", 삼성물산주식회사
4. Ishihara, K., and Yoshimine, M.(1992), "Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes" *Soils and Foundation*, Japanese Geotechnical Society, Vol.32, No.1, pp.173-188
5. Shamoto, Y., Sato, M. and Zhang, J.-M. (1996), "Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits", *Soils and Foundation*, Japanese Geotechnical Society, Vol.36, No.1, pp.39-50
6. Shamoto, Y., Zhang, J.-M., and Goto, S.(1997), "Mechanism of Large Post-Liquefaction Deformation in Saturated Sand", *Soils and Foundation*, Japanese Geotechnical Society, Vol.37, No.2, pp.71-80
7. Vaid, Y. P. and Thomas, J.(1995), "Liquefaction and post Liquefaction", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.121, No.2, pp.163-173
8. Zhang, J.-M., Shamoto, Y., and Tokimatsu, K.(1997), "Moving Critical and Phase-Transformation Stress State Lines of Saturated Sand during Undrained Cyclic Shear", *Soils and Foundation*, Japanese Geotechnical Society, Vol.37, No.2, pp.51-59