



측하는, 모형시험을 통하여 수행되었다. 그러나, 이렇게 실험실에서 수행된 연구결과들로부터 실제 지반 거동을 정량적으로 예측하기 위해서는 과잉간극수압 소산속도에 있어서 모형과 원형사이의 상사관계를 알아야 한다.

본 연구에서는, 이를 위하여 모형지반의 크기와 입력 가속도를 변화시켜 가면서 충격하중시험을 수행하였다. 그리고, 시험결과를 이용하여 각각의 경우에 대하여 소산속도를 결정하였으며 이로부터 액상화 후 과잉간극수압 소산속도의 상사관계를 도출하였다.

## 2. 침강이론에 기초한 과잉간극수압 소산속도

본 연구에서는 과잉간극수압의 소산속도를 분석하기 위해서 침강이론을 이용하였다. 침강이론에서는 액상화후 과잉간극수압의 소산과정을 모래입자의 침강에 따른 견고화 과정으로 보고 과잉간극수압이 시간에 대해 선형적으로 감소한다고 가정한다.

침강이론에 의한 과잉간극수압의 소산속도는 아래 식(Scott, 1986)과 같이 표현된다.

$$a = \gamma' m = \frac{\gamma' H}{t_f} = \frac{(\gamma')^2}{\gamma_w} \frac{H}{\Delta H} k \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 견고층 전면의 이동속도,  $t_f$ 는 과잉간극수압 소산 종료시간이며,  $a$ 는 과잉간극수압의 소산속도이다.

이러한 침강이론은 Florin과 Ivanov(1961)에 의해 처음으로 도입 되었고, Scott(1986)은 실제 견고화된 층도 압축성을 가짐을 감안하여, 소산초기에는 침강이론으로, 소산후기에는 압밀이론으로 과잉간극수압 소산과정을 분석하고자 하였다. 또한 Kokusho(1999)는 이 이론을 바탕으로 충격하중시험을 수행하여 액상화로 인한 측방유동의 메커니즘을 설명하였다.

과잉간극수압 소산에 대한 국내 연구로는 Ha 등(2003)이 수행한 연구가 있다. 이 연구에서 Ha 등은 5 가지 모래에 대한 진동대 시험을 수행하여 과잉간극수압의 소산속도를 흙의 유효입자크기와 균등계수의 함수로 나타낸 경험식을 제안하였다.

## 3. 모형시험에서의 상사비

### 3.1 동적 관계

동적 모형시험에서의 상사관계는 많은 학자들에 의해 연구되어 왔다. 최근에 Kagawa(1997)는 동적 시스템의 일반 지배방정식인  $F=ma$ 로부터 기본적인 상사관계를 도출하였는데 본 연구의 시험조건과 같은 1-g 중력장인 경우, 시간에 대한 상사관계를 지반강성과 지중 구속압의 관계에 따라서 두가지로 나누어 제시하였다.

지반강성이 지중 구속압에 민감하지 않은 경우, 시간과 길이의 상사비 관계를 아래 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\lambda_t = \lambda_l^{1/2} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda_t$  는 시간에 대한 상사비(원형시간/모형시간),  $\lambda_l$  은 길이에 대한 상사비(원형길이/모형길이)를 각각 의미한다.

지반강성이 지중 구속압에 크게 영향을 받는 경우의 시간과 길이의 상사비 관계는 아래 식 (3)과 같다.

$$\lambda_t = \lambda_l^{3/4} \quad (3)$$

### 3.2 정적 관계

외력이 지속적으로 작용하지 않거나 외력의 작용시간이 상대적으로 긴 정적하중 상태의 경우, 지반내 물의 흐름과정은 지반내에 축적되어 있는 수압의 상대적인 차이로 인해 물이 이동하는 확산과정(diffusion)으로 설명될 수 있다.

Gibson(1997)은 확산과정에서의 시간에 대한 상사비를 압밀이론으로부터 유도하여 다음과 같이 길이 상사비의 함수로 나타내었다.

$$\lambda_t = \lambda_l \sim \lambda_l^{1.5} \quad (4)$$

그러나, 액상화 후 과잉간극수압의 소산은 동적하중이 지속적으로 작용하고 있는 상태에서 발생하는 것도 아니고 그렇다고 동적하중에 의해 발생한 관성력이 전혀 없는 상태에서 일어나는 것도 아니므로 과잉간극수압 소산과정에서의 상사관계는 위에 제시한 어느 범주에도 들지 않는다고 생각된다.

## 4. 충격하중시험

### 4.1 시료 및 시험장치

시험에 이용된 모래는 주문진 표준사이다. 이 모래의 입도분포 곡선은 그림 1과 같으며, 입도분석과 기본실험에 의한 시료의 물리적인 성질은 표 1에 나타내었다. 연구에 사용된 시험장치는 일찌기 Kokusho(1996)가 사용한 시험장치를 개선한 것이다(그림 2). 이 시험장치에서 원통형 토조는 아크릴 수지로 만들어져 내부 관측이 가능하고, 내경이 19cm, 38cm인 두 종류를 사용하였다. 그림 2에서 시험장치의 우측에 있는 추는 자유 낙하하여 토조 하부에 충격을 가하기 위한 것으로, 그 무게는 5kg부터 65kg까지 다양하다. 원통형 토조에 조성된 지반에는 입력 가속도를 측정하기 위한 가속도계 1개, 과잉간극수압을 측정하기 위한 간극수압계 5개, 그리고 지표면의 침하량을 계측하기 위한 LVDT 1개가 각각 설치되었다(그림 3).

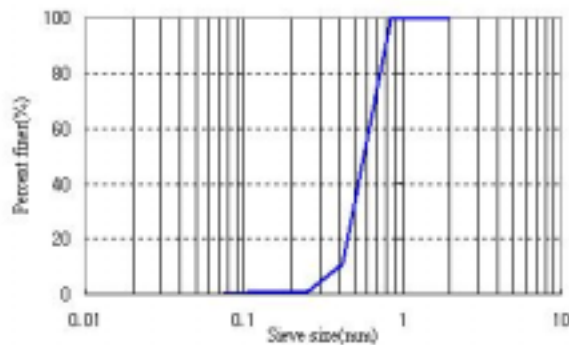


그림 1. 주문진 모래의 입도 분포 곡선

표 1. 시험 시료의 기본 물성치

시험모래	초기상대밀도 (%)	유효입경 $D_{10}$ (mm)	평균입경 $D_{50}$ (mm)	균등계수 $C_u$	비중	최대건조 단위중량 ( $\text{kN/m}^3$ )	최소건조 단위중량 ( $\text{kN/m}^3$ )
주문진모래	약 28%	0.40	0.57	1.53	2.64	15.68	13.72

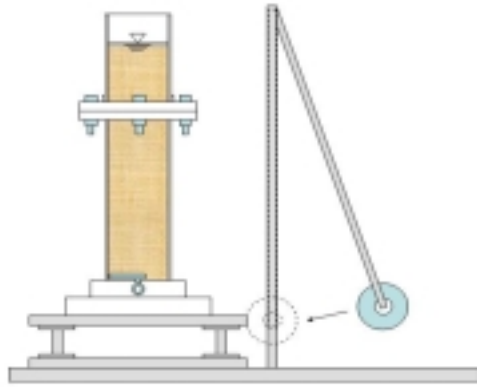


그림 2. 충격하중시험장치

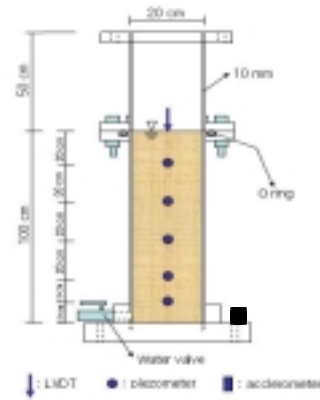


그림 3. 모형지반 및 계측기 설치 위치

## 4.2 시험 방법

원통형 토조에 물을 채운 다음, 젖은 모래를 10번 체를 통과시켜 자중에 의해 침강하게 하여, 모형지반의 하부와 상부가 같은 상대밀도를 갖도록 지반을 조성하였다. 모형지반의 높이는 각 직경에 대해 25cm, 50cm, 100cm가 되도록 조성하였으며, 상대밀도는 약 28%이었다. 원형토조 바닥에 가해지는 입력 가속도의 크기를 변화시키기 위해 충격하중의 크기를 추의 무게와 낙하높이로 조절하였으며, 충격하중으로 시료바닥면에 가해진 가속도의 범위는 35.1g~193.6g였다. 간극수압계는 바닥면으로부터 모형지반 전체높이의 1/10, 2/10, 4/10, 6/10, 8/10 지점에 각각 설치하였다.

## 5. 시험 결과 및 분석

시험을 통해 얻어진 가속도와 간극수압분포 및 지표면 침하량 데이터의 예는 그림 4와 같고, 침강이론에 근거하여 과잉간극수압 소산속도,  $a$  를 결정하는 방법을 간략히 설명하면 다음과 같다.

먼저 견고층 전면의 이동속도,  $m$ 을 결정해야 한다. 그림 5 (a)와 같이 각 곡선에서 곡률이 최대가 되는 점을 찍어 그에 해당하는 시간을 소산 시작시간으로 결정하고, 얻어진 소산 시작시간을 x축, 간극수압계 설치 높이를 y축으로 하여 그림 5 (b)와 같이 나타낸 후, 그 값들을 선형 회귀한 직선의 기울기로  $m$ 을 결정한다. 모형지반 높이,  $H$  를 이렇게 산정된  $m$ 으로 나누어 소산 종료시간,  $t_f$  을 결정하고,  $t_f$  로, 다시 모형지반 바닥에서의 유효응력  $\gamma' H$ 을 나누면 과잉간극수압의 소산곡선의 기울기,  $a$  가 결정된다.

그림 6은 위에서 설명한 방법으로 작성한 액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 계측된 소산곡선 위에 함께 나타낸 그림이다. 그림 6의 (a)~(f)에서 보는 것처럼 예측 소산곡선은 계측 소산곡선을 잘 모사하는 것으로 나타났다. 이에 근거하여, 본 연구에서는 예측 소산곡선의 기울기,  $a$  를 액상화후 과잉간극수압의 소산속도로 결정하였다.

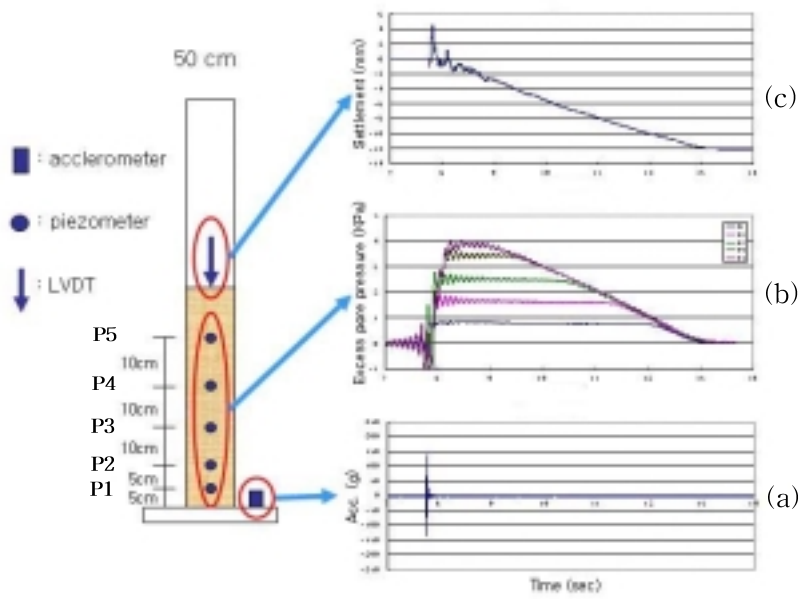
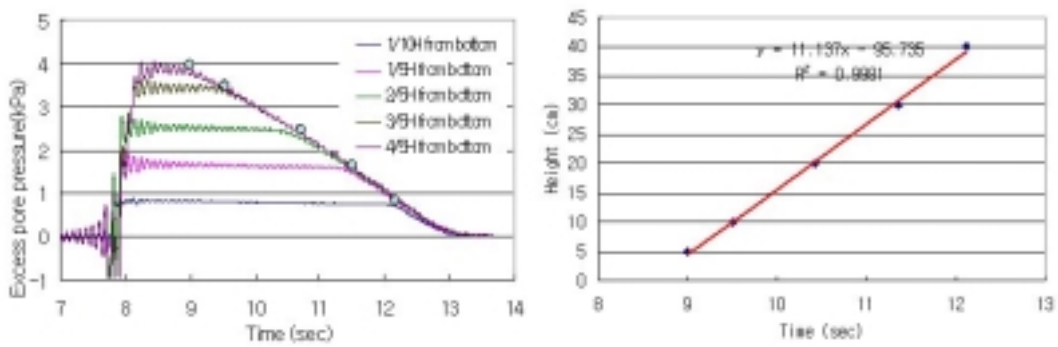


그림 4. 계측 입력가속도(a)와 과잉간극수압(b), 그리고 침하량(c) 시간이력



(a) 소산시작시점의 결정

(b) 견고층전면의 이동속도 결정

그림 5. 견고층 전면의 이동속도, m의 결정 방법

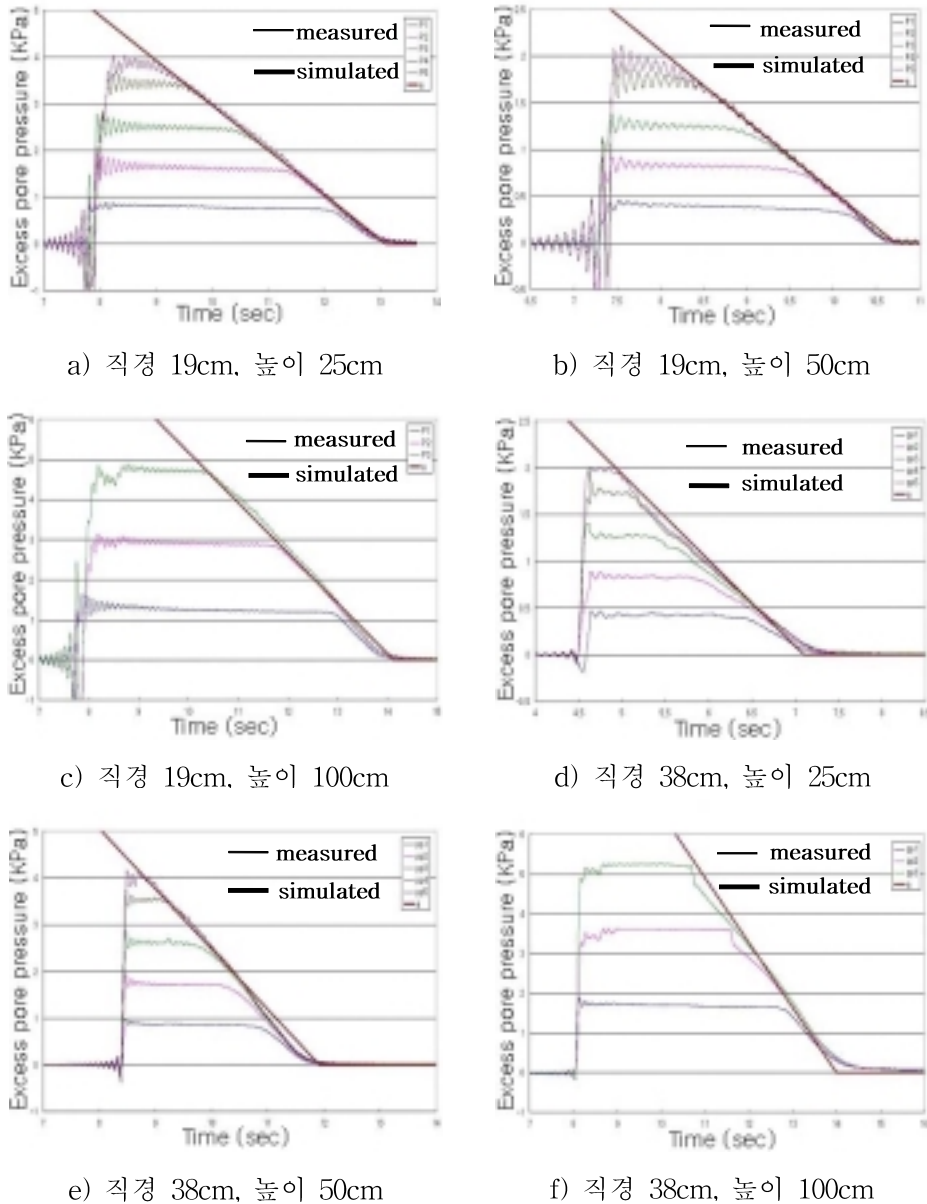


그림 6. 각 모형지반별 계측 과잉간극수압 소산곡선과 모사 소산곡선 비교

### 5.1 입력가속도 크기에 따른 과잉간극수압 소산속도

그림 7은 여러 기하학적 구성의 모형지반들에 대해 수행한 충격하중시험 결과를 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 동일한 모형지반에서의 과잉간극수압 소산속도는 입력가속도의 크기에 영향을 받지 않고 거의 일정하다는 것이다. 이 결과는 입력 가속도 크기는 지반이 액상화될 수 있는 깊이를 증가시키는 역할은 하지만(Florin and Ivanov, 1961), 일단 모형지반 전체가 액상화될 경우 입력가속도 크기는 계측된 깊이별 과잉간극수압 결과로부터 모형지반 전체가 액상화되었음을 확인했듯이 본 시험의 경우, 가해진 가속도 크기가 모형지반 전체를 액상화시킬 수 있을 만큼 충분히 컸기 때문에 모형지반의 액상화 후 소산양상에는 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 이와 같이 입력가속도 크기가 간극수압의 소산속도에 영향을 주지 않는다는 시험결과는 과잉간극수압 소산현상을 동역학적만으로 해석할 수 없음을 시사한다.

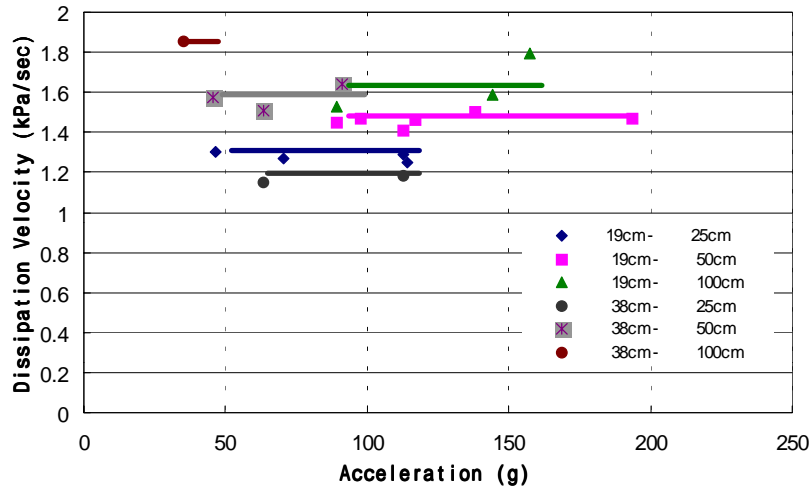


그림 7. 입력가속도의 크기에 따른 과잉간극수압 소산속도

## 5.2 모형지반 높이에 따른 과잉간극수압의 소산속도

그림 8은 모형지반 높이에 따른 과잉간극수압의 소산속도를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 모형지반의 높이가 증가할수록 발생된 과잉간극수압의 소산속도는 증가하였다. 이 현상을 침강이론으로 설명하면 다음과 같다. 우선, 침강이론에 근거한 과잉간극수압 소산속도식(식 (1)참조)에서 소산속도,  $a$ 는 소산동안의 투수계수가 일정하다고 가정하면 지반 부피변형율,  $\Delta H/H$ 에 반비례함을 알 수 있다. 모형지반은 진동하중 종료시점까지는 동역학적 현상에 종속되어, 동역학적 상사비 적용이 가능하므로, 그에 따라, 모형 높이가 클수록 모형의 부피변형율은 크게 된다(Kagawa, 1997). 이로 인해 높이가 큰 모형지반의 소산직전 상대밀도는 작은 모형지반보다 더 크게 되어 결과적으로 모형높이가 클수록 소산동안의 부피변형은 작게 된다. 따라서, 모형 높이가 커질수록 소산속도는 증가하게 된다. 이 시험에서 얻은 시험결과로부터 과잉간극수압 소산속도의 상사비,  $\lambda_a$ 와 길이에 대한 상사비,  $\lambda_l$ 의 관계를 다음과 같이 도출하였다.

$$\lambda_a \approx \lambda_l^{0.2} \quad (5)$$

그리고, 간극수압 소산속도 상사비  $\lambda_a = \lambda_p / \lambda_t$  (여기서,  $\lambda_p$ 는 압력에 대한 상사비이며  $\lambda_p = \lambda_t$ )이므로 위 식 (5)로부터 시간과 길이에 대한 상사비 관계를 유도하면 아래 식 (6)과 같다. 이는 시간에 대한 상사비가 동역학적 현상에서는 길이에 대한 상사비의 0.5~0.75 승(식 (2)와 식 (3)), 그리고 확산현상에서는 길이에 대한 상사비의 1~1.5 승(식 (4))으로 나타난 기존 연구결과와 비교하여 그 사이값을 가진다.

$$\lambda_t = \lambda_l^{0.8} \quad (6)$$

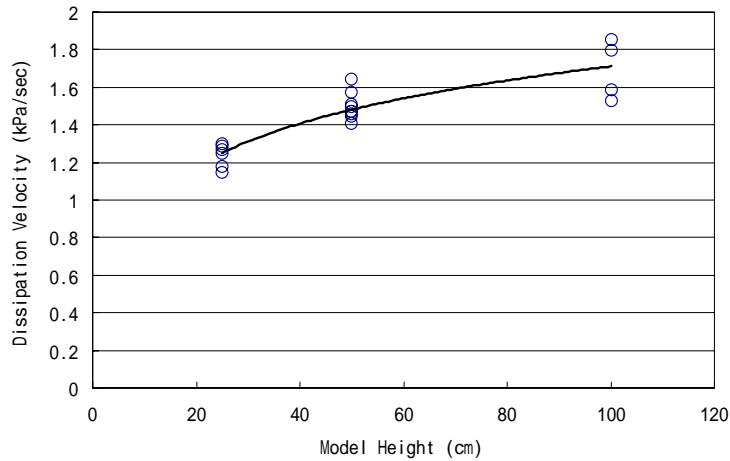


그림 8. 모형지반 높이에 따른 과잉간극수압 소산속도

## 6. 결 론

사질토 지반에서의 액상화 후 과잉간극수압 소산속도의 상사비를 결정하기 위해 수행한, 충격하중시험 결과들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액상화후 과잉간극수압의 소산속도는 입력가속도의 크기에 영향을 받지 않고 거의 일정한 것으로 나타나서, 입력 가속도의 크기는 지반의 액상화 발생 깊이를 증가시키는 역할은 하지만, 액상화후 과잉간극수압의 소산에는 영향을 주지 않음을 확인하였다. 또한, 이 결과는 액상화후 과잉간극수압 소산 현상을 동력학적 현상으로 해석할 수 없음을 의미한다.
2. 모형지반의 높이가 증가할수록 액상화후 과잉간극수압 소산속도는 증가하는 양상을 보였으며, 이 결과를 회귀분석하여 액상화후 과잉간극수압 소산속도의 상사비와 길이에 대한 상사비의 관계 ( $\lambda_a = \lambda_l^{0.2}$ )를 도출하였다. 이 관계로부터 유도한 시간과 길이의 상사비 관계 ( $\lambda_t = \lambda_l^{0.8}$ )는 기존의 동역학적 상사비 관계 ( $\lambda_t = \lambda_l^{0.5 \sim 0.75}$ )와 확산에서의 정적 상사비 관계 ( $\lambda_t = \lambda_l^{1 \sim 1.5}$ )의 사이에 드는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. Florin, V.A., Ivanov, P.L.(1961), "Liquefaction of Saturated Sandy Soils", Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, pp. 107-111.
2. Gibson, R.E.(1997), "Physical Scale Modeling of Geotechnical Structures at One-G", Report No. SML 97-01, California Institute of Technology, Pasadena, California.
3. Ha, I.S., Park, Y.H, Kim, M.M.(2003), "Dissipation Pattern of Excess Pore Pressure after Liquefaction in Saturated Sand Deposits", Transportation Research Record 1821, TRB, pp. 59-67
4. Kokusho, T.(1999), "Water Film in Liquefied Sand and Effect on Lateral Spread", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 817-826.
5. Kagawa, T.(1997), "Dynamic model testing in geotechnical engineering", Proceedings of IS-TOKYO'95, 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Eng., pp. 1435-1446.
6. Scott, R.F.(1986), "Solidification and Consolidation of a Liquefied Sand Column", Soils and Foundation, Vol. 26, No. 4, pp. 23-31.