

액상화 발생후 과잉간극수압 소산 모델링

Modelling of Excess Pore Pressure Dissipation After Liquefaction

김 명 모*¹ Kim, Myoung-Mo

박 영 호*² Park, Young-Ho

Abstract

1-g shaking table tests for level ground of saturated sand are performed to investigate the dissipation behavior of the excess pore pressure after liquefaction. Jumunjin sand and Youngjongdo sand are prepared so that they may have a relative density of about 20~30%. Pore water pressure transducers, accelerometers, and LVDTs are installed to measure the ground behavior during the tests. The shaking table is excited 5 times for 5 seconds at each shaking with a sinusoidal wave of 0.15g.

The test results show that the dissipation of excess pore pressure are controlled by not only permeability but also the magnitude of settlement which is directly related to the settling length of soil particles during the dissipation of excess pore pressure. When the theory of sinking sand grains is applied to model this process, the relationship between the settling velocity of sand grains and permeability is not fixed and varies according to the type of sand which is opposed to the basic assumption of the theory of sinking sand grains. Terzaghi's consolidation theory may not model the dissipation process of excess pore pressure after liquefaction properly.

요 지

액상화 발생후 과잉간극수압 소산 특성을 파악하기 위하여 포화된 수평 모래지반에 대하여 1-g 진동대시험을 수행하였다. 진동대시험에는 주문진 표준사와 영종도 세사를 사용하였으며 상대밀도를 약 20~30% 사이가 되도록 조성하였다. 간극수압계, 가속도계 그리고 LVDT 등으로 시험중의 지반거동을 계측하였으며, 4Hz의 sine 파를 0.15g에서 5초간 5회 반복하여 작용시켰다.

진동대시험을 분석한 결과 액상화 발생후 과잉간극수압의 소산속도는 그 지반의 투수성뿐 아니라 과잉간극수압 소산시 입자의 침강거리와 직접 관련이 있는 지반의 침하량에도 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이 과정을 침강모래 이론으로 모델링하였을 때 입자의 침강속도와 투수계수 사이의 비례 관계는 침강모래 이론에서의 가정한 것과는 달리 모래의 종류에 따라 차이를 나타내었다. 또한 Terzaghi의 압밀이론으로는 액상화 후 과잉간극수압의 소산과정을 적절히 모사할 수 없었다.

Keywords : 1-g Shaking table test, Dissipation of excess pore pressure, Liquefaction, Sinking sand grains

1. 서 론

지진시에 발생하는 다양하고 흥미있는 현상들(이들

테면, 액상화)의 특성 혹은 기본 메커니즘이 확실히 규명되지 않을 때, 1-g 진동대시험을 실시하고 그 결과를 분석함으로써 이러한 현상들에 대한 통찰력을 갖고 이

*1 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학과, 교수

*2 정희원, 현대건설 기술연구소, 수석연구원

것을 지배하는 기본 메커니즘을 이해할 수 있게 된다. 또한 어떤 현상을 충분히 이해하고 있는 경우라도 정량적인 해답을 얻고자 할 때 1-g 진동대시험을 수행하기도 한다. 그러나 진동대시험의 모델을 실제 크기와 똑같이 만드는 것은 경제적인 문제등으로 거의 불가능하기 때문에 통상적으로는 일정한 축척으로 줄여서 시험을 실시한다. 따라서 진동대시험을 성공적으로 수행하고 그 결과를 합리적으로 분석하기 위해서는 진동대 모델과 실제 구조물과의 규모의 차이에 따른 축척효과(scale effect)와 축척의 비적합성(scaling incompatibility)등을 충분히 잘 이해하여야 한다.

1-g 진동대시험의 가장 큰 단점은 축소된 모델에서의 지반내 응력이 본래 지반에서 받는 응력보다 매우 작다는 것이다. 이러한 조건에서 흙의 거동은 본래 지반과는 필연적으로 큰 차이를 보이는데, 특히 모래지반에서는 구속응력이 작을 때 쉽게 다이러턴시 현상이 나타난다. 1-g 진동대시험과 원형 사이의 상이한 거동을 설명하기 위해 흙의 구성거동(constitutive behavior)을 축척화하려는 방안(Rocha, 1953,1957 ; Kagawa, 1978, 1995; Iai, 1989, 1992)등 여러 가지 방법이 제시되었지만 이러한 것들은 흙의 구성거동을 단순화하는 작업에서부터 출발하기 때문에 응력차이로 인한 문제점을 충분히 해결해 주지는 못한다. Gibson(1997)은 포화된 모래지반의 진동대시험에서 진동과 소산의 시간축척이 현장거동과 다르기 때문에 과잉간극수압 소산이 실제보다 빨리 일어난다고 하였다. 또한, Poorooshasb(1995)는 포화된 흙의 지배운동방정식에 대한 차원해석(dimensional analysis)을 하여 진동대에서 동역학적 실험을 하는 경우에 상사법칙이 유효하지 않음을 증명하였다.

이러한 사실들로부터, 1-g 진동대시험에 있어서 적절한 상사비 관계가 아직 확립되지 못하였고 이러한 기술을 증진시킬 필요가 있음을 알 수 있다. 그러나 이것이 진동대시험에서 얻어진 자료가 실효성이 없음을 의미하는 것은 아니고, 위에서 언급한 문제들을 단계적으로 해결해 나가고 시험결과와 분석과정에서 다른 시험 또는 이론적 방법등과 상호 보완적 노력을 기울인다면 시험결과를 더욱 신뢰성이 있게 사용할 수 있을 것이다.

본 논문은 진동대시험에서 모래지반의 액상화를 발생시킨 후 진동을 멈춘 후에 지반내의 잔류수두 차로 인하여 일어나는 과잉간극수압 소산과정의 시간축척 비적합성 문제에 대한 기본적인 연구결과로서, 액상화 후 과잉간극수압의 소산과정을 진동대시험과 이론적

분석을 통하여 검증해 보고자 하였다. 최근 액상화 후 과잉간극수압의 소산 메커니즘을 이용하여 수평퍼짐(lateral spreading) 현상을 설명하는 연구결과(Kokusho, 1999; Tsurumi, 2000)가 발표되었는데, 이와 같이 최근의 액상화에 관한 연구가 액상화 판정기준에서 액상화 후(post-liquefaction) 거동으로 옮겨가고 있음을 고려할 때, 본 논문에서 추구하는 연구과제는 새로운 액상화 연구방향과 일치하는 것이라고 할 수 있을 것이다.

2. 진동후 포화된 모래에서 과잉간극수압의 소산

진동하중이 작용할 때 포화된 모래지반에서는 과잉간극수압의 발생과 소산이 병행하여 진행되며 이것이 지진하중하에서 모래지반의 동적거동을 지배하는 주요 소이다. 과잉간극수압의 발생에 영향을 주는 인자는 모래의 밀도, 진동의 강도, 유효상재응력등이며 과잉간극수압 소산에 대해서는 아래에 요약한 대로 여러 가지 이론이 제시되어 있다.

Seed(1976)는 지진동시 액상화로 인한 침하과정을 압밀현상과 동일하게 보고 아래와 같은 식으로 표현하였다.

$$\delta u / \delta t = c_v \delta u^2 / \delta z^2 + \delta u_g / \delta t \quad (1)$$

- 여기서, u : 소산되는 과잉간극수압
- u_g : 과잉간극수압 발생량
- c_v : 압밀계수

Gibson(1997) 역시 액상화후 과잉간극수압의 소산을 압밀로 가정하였으며, 압밀계수 선정시, 진동중에는 제하시의 압축지수를, 진동이 끝난 후에는 처녀압축곡선을 따라 재하할 때의 압축지수를 사용하는 것이 적당하다고 하였다. 또한, 일본에서는 액상화 방지대책으로 쓰이는 자갈배수재의 설계식이 압밀이론에 바탕을 두고 유도되었으며, 이에 대한 설계방법 및 설계에 사용되는 토질상수 값등이 제안되어 있다(Port and Harbour Research Institute, 1997).

과잉간극수압의 소산을 설명하는 또 다른 논리는, 액상화 후 부유한 모래입자가 침강하기 시작하면 바닥으로부터 쌓이게 되며 이에 따라 과잉간극수압이 아래로부터 점차적으로 소산된다는 것이다(Florin과 Ivanov, 1961; Tsurumi, 2000). Scott(1986)는 액상화 후의 거동을 초기 단계의 부유한 입자가 가라앉는 교체화 과정과

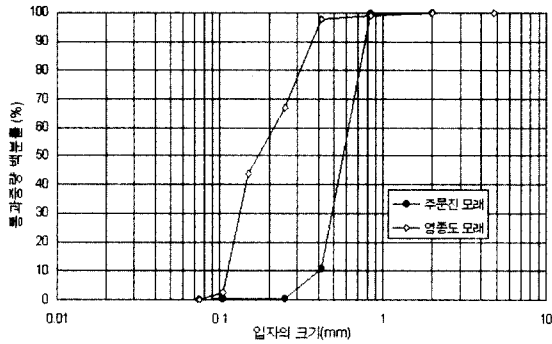


그림 1. 주문진 모래와 영종도 모래의 입도분포

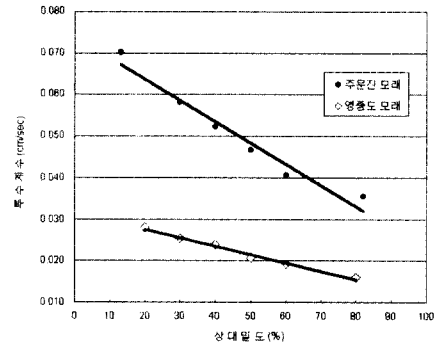


그림 2. 주문진 모래와 영종도 모래의 상대밀도에 따른 투수계수

그 이후의 압밀과정으로 나누어 설명하였다.

또한 Arulanandan(1994)은 과잉간극수압의 소산을 침투의 개념으로 해석하였으며, 원심력 진동대 시험결과 진동중의 투수계수가 정수두 시험으로 구한 투수계수보다 4배까지 증가하였음을 보고하였다. Jafarzadeh와 Yanagisawa(1995)는 1-g 진동대 시험시 액상화가 발생하였을 때의 투수계수가 정수두 시험으로 구한 투수계수의 약 5~6배 사이라고 하였다.

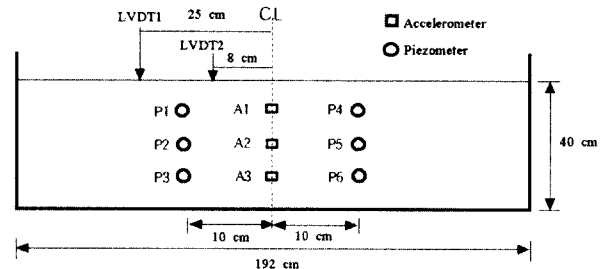


그림 3. 계측기 배치도

3. 진동대 시험

3.1 시험개요

시험에 사용한 모형토조의 크기는 길이 192cm, 폭 44cm 그리고 깊이 60cm이며, 모래지반은 40cm 깊이로 조성하였다. 시험사로는 영종도 모래와 주문진 표준사를 사용하였으며 각 모래의 입도분포가 그림 1에 나타나 있다. 주문진 표준사의 D_{50} 은 0.55mm, 균등계수는 1.6, 최대건조밀도 $1.60t/m^3$, 최소건조밀도는 $1.40t/m^3$ 이며, 영종도 모래의 D_{50} 은 0.18mm, 균등계수는 1.9, 최대건조밀도 $1.62t/m^3$, 최소건조밀도는 $1.35t/m^3$ 이다. 그림 2는 정수두 시험을 수행하여 투수계수를 구한 것이다. 수중침강법을 이용하여 모래를 포설하였으며, 이렇게 형성된 모래의 상대밀도는 주문진 모래가 약 30%, 영종도 모래가 약 20%이었다. 수위는 모래지반 표면과 일치하도록 하였으며 특별한 배수장치를 설치하지 않았으므로 물의 배수는 상방향으로 이루어 진다.

간극수압계는 10cm, 20cm, 30cm 깊이에 각각 2개씩 총 6개를 설치하였으며, 가속도계는 모형토조 정중앙의 10cm, 20cm, 30cm 깊이에 각각 1개씩 총 3개를 설치하였다(그림 3). LVDT의 위치는 그림 3에서 보인 것과 같으며, 액상화 발생시에 침하측정편이 액상화된 모래지반 속으로 급격히 빠져들지 않도록 한 번의 길이가 10cm이고 두께가 5mm인 정사각형 스티로폼 판 위에 LVDT를 설치하였다.

입력진파는 진동수 4Hz의 sine파를 사용하였으며, 초기 조성된 지반에 액상화를 발생시킬 수 있도록 입력가속도의 크기는 0.15g를 사용하였다. 0.15g의 진동을 5초를 주고 약 1분 이상 기다린 다음 과잉간극수압이 완전히 소산된 후 0.15g의 진동하중을 다시 작용시키는 방법으로 연속 5번의 진동을 주어 각 단계에서의 간극수압, 가속도 및 침하크기를 측정하였다. 이와 같이 시험을 수행함으로써 흙의 밀도가 조밀해짐에 따라 과잉간극수압의 발생 및 소산이 어떻게 변하는가 관찰할 수 있도록 하였다.

표 1. 진동대시험 순서별 명칭

시험사	첫 번째 진동	두 번째 진동	세 번째 진동	네 번째 진동	다섯 번째 진동
주문진 모래	J1	J2	J3	J4	J5
영종도 모래	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5

모래 종류별로 각 5회 실시한 진동대시험을 구분하기 위한 시험별 명칭을 표 1에 수록하였다.

3.2 시험결과

3.2.1 첫 번째 진동 시험결과(J1, Y1)

그림 4는 최대가속도 0.15g, 4Hz로 진동하중을 주었을 때 10cm, 20cm 및 30cm 깊이에 설치한 간극수압계로 과잉간극수압을 측정된 결과이다. 그림 4(a)에 의하면 주문진 모래의 경우는 진동시작과 함께 과잉간극수압이 증가하여 10cm 깊이에서는 진동시작 약 0.2 ~ 0.3 초 후, 20cm 깊이에서는 진동시작 약 0.5초 후, 30cm 깊이에서는 진동시작 약 0.7 ~ 0.8초 후에 과잉간극수압 발생량이 유효응력과 같아졌다. 이 결과로부터, 초기 액상화가 지표면에서부터 시작되었음을 알 수 있으며, 이는 다른 학자들의 결과와도 일치한다(Ghalandarzadeh, 1997). 또한, 초기 액상화 이후 진동중에는 과잉간극수압비가 1 그대로 유지되다가 진동시작 5초 후에 진동이 멈추면 하부에서부터 과잉간극수압이 소산되는 것을

은 그림에서 알 수 있다. 과잉간극수압이 소산되기 시작하는 시점은 30cm 깊이에 설치한 간극수압계에서는 진동이 멈춘 후 약 0.2초 후며, 20cm, 10cm 깊이에 설치한 간극수압계에서는 각각 1.1초, 1.9초 이후부터 과잉간극수압의 소산이 시작되었다. 과잉간극수압은 진동이 멈춘 후 약 3초 후에 거의 모두 소산되었다. 그림 4(b)의 영종도 모래에서도 전반적인 경향은 주문진 모래와 비슷하나 과잉간극수압 소산이 느리며 진동이 멈춘 후 약 30초가 지나서야 과잉간극수압이 모두 소산되었다.

그림 5(a)와 (b)에 나타난 LVDT1과 LVDT2의 침하량을 비교해 보면 LVDT1의 침하량이 다소 작은 것을 알 수 있다. 이것은 LVDT1이 토조 벽면에 가까이 위치해 있어서 얼마간 단부영향(boundary effect)을 받은 것으로 추정된다. 침하량 분석시에는 LVDT2가 간극수압계 설치 위치에 가깝고 단부영향도 작게 받은 것으로 판단되어 LVDT2의 결과를 이용하였다. 주문진 모래의 LVDT2 최종침하량은 20.4mm이며 영종도 모래의 LVDT2 최종 침하량은 13.6mm이다. 이중 진동중에 일어난 침하량은 주문진 모래와 영종도 모래의 경우 각각 16.8mm와

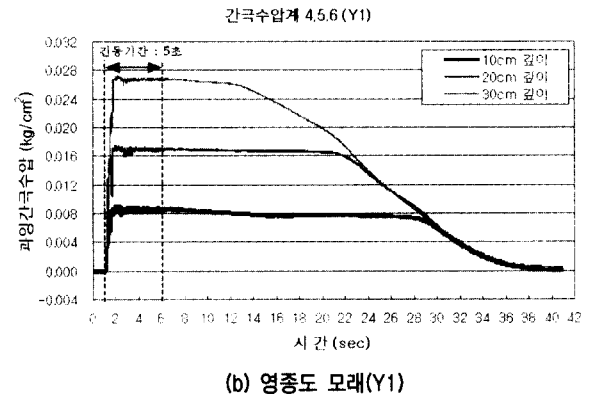
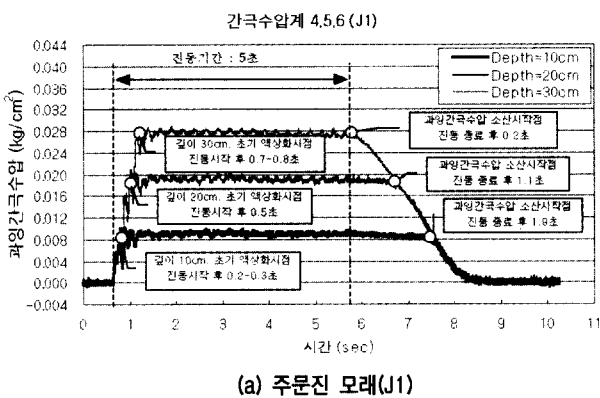


그림 4. 간극수압계 측정결과(가속도 0.15g, 4Hz)

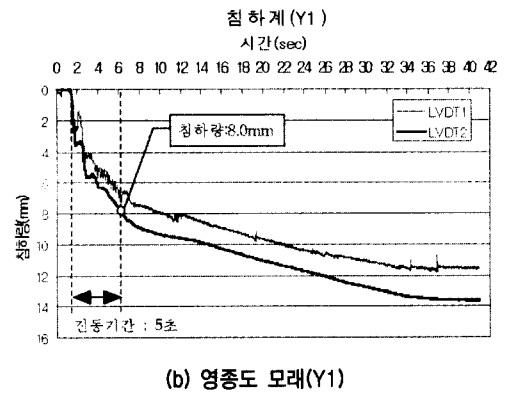
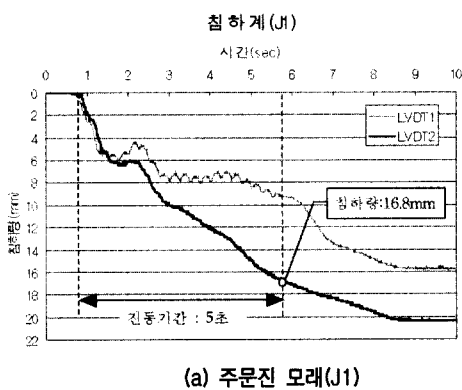
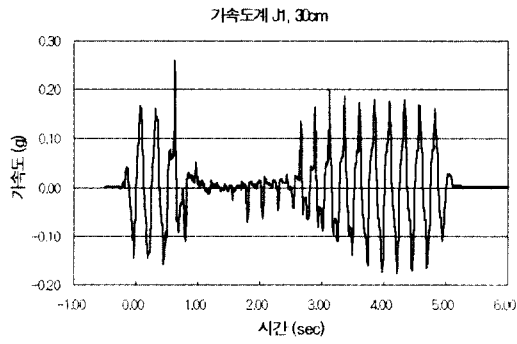
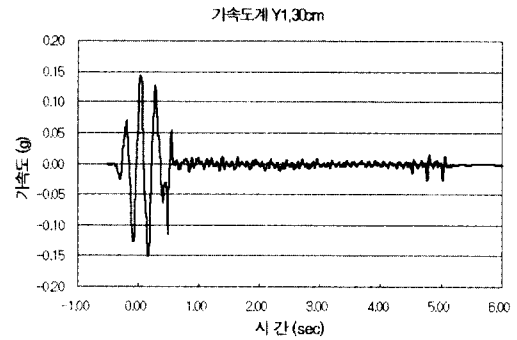


그림 5. 침하량 측정결과(가속도 0.15g, 4Hz)

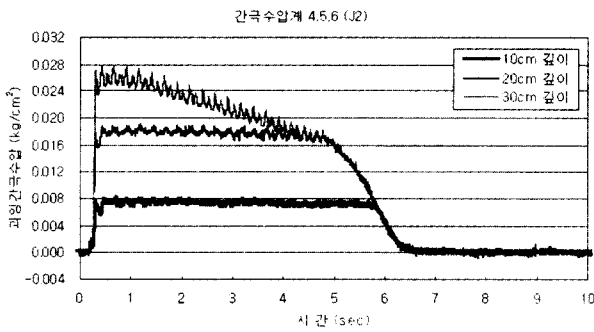


(a) 주문진 모래(J1)

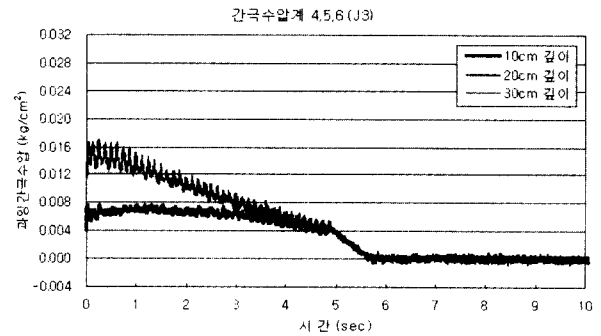


(b) 영종도 모래(Y1)

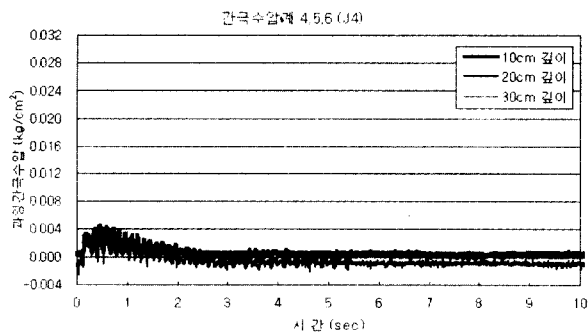
그림 6. 가속도계 측정결과(가속도 0.15g, 4Hz, 깊이 30cm)



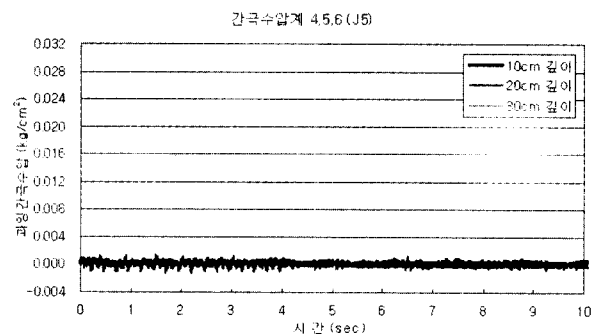
(a) J2



(b) J3



(c) J4



(d) J5

그림 7. 간극수압계 측정결과(주문진 모래) (가속도 0.15g, 4Hz, J2~J5)

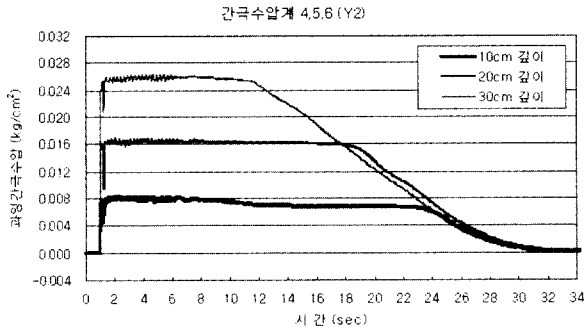
8.0mm이며 진동이 멈추고 과잉간극수압이 소산되는 과정에서 침하량은 각각 3.6mm와 5.6mm이다. 따라서 진동이 멈춘 후의 침하량과 총 침하량의 비를 계산하면 주문진 모래의 경우는 18%, 영종도 모래는 42%로서 입도가 큰 주문진 모래의 경우에는 진동이 멈추기 전 액상화 과정에서 대부분의 침하가 일어남을 알 수 있다.

그림 6(a)와 (b)에 나타난 가속도계 반응을 살펴보면, 액상화가 일어나면 가속도 값이 일단 영에 수렴하는 것을 알 수 있다. 그리고, 그림 6(a)의 주문진 모래에서는 진동이 끝나기 전에 가속도가 회복되는 현상을 보이는

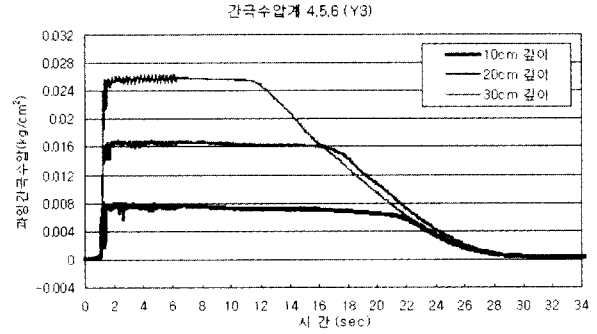
데 이것은 초기 액상화 후 주문진 모래 지반이 진동중에 전단강도를 회복한다는 것을 의미하며, 이 결과는 주문진 모래의 경우 진동중에 상당한 침하가 발생한 것과 관련이 있다.

3.2.2 두 번째~다섯 번째 진동 시험결과(J2~J5, Y2~Y5)

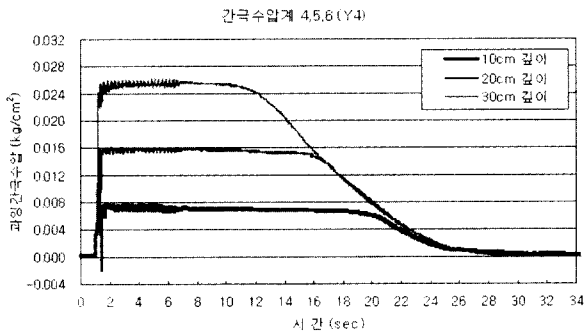
그림 7(a), (b), (c), (d)에 나타난 것과 같이 주문진 모래에 대한 간극수압계 측정결과에 의하면, 2번째 진동 시에는 깊이 30cm 지점에서 과잉간극수압이 진동중에



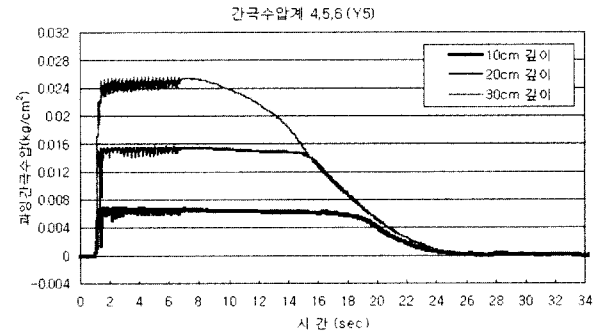
(a) Y2



(b) Y3



(c) Y4



(d) Y5

그림 8. 간극수압계 측정결과(영종도 모래) (가속도 0.15g, 4Hz, Y2~Y5)

도 감소함을 볼 수 있고(그림 7(a)), 3번째 진동에서는 깊이 20cm 지점에서도 진동중에 과잉간극수압이 감소하며(그림 7(b)), 4번째와 5번째 시험(그림 7(c), 그림 7(d))에서는 층 전체에서 액상화가 일어나지 않았다. 즉, 진동에 의해 흙의 밀도가 증가함에 따라 액상화에 대한 저항성이 급격히 증가하였다.

반면에, 그림 8(a), (b), (c), (d)에 나타난 영종도 모래의 간극수압 측정결과(Y2~Y5)를 보면, Y2에서 Y5로 진행함에 따라 각 깊이에서의 최대 과잉간극수압 발생량이 다소 감소하기는 하나 이것은 칩하로 인하여 그 지점에서의 초기 유효응력이 작아진 때문이며 Y2~Y5에서 모두 초기 액상화가 발생하였다. 이와 같이 영종도 모래가 주문진 모래와 다르게 거동하는 이유는 액상화 과정에서 발생하는 밀도 증가에 차이가 있기 때문으로 생각되는데 이에 대한 분석을 위해, 그림 9에는 주문진 모래와 영종도 모래에 대해 각 진동단계에서의 누적칩하량과 상대밀도를 나타내었다. 이 그림에서 보면 초기 상대밀도가 30%인 주문진 모래의 경우 첫 번째 진동이 끝난 후 상대밀도가 65%로 증가한 반면, 초기 상대밀도 20%인 영종도 모래는 다섯 번째 진동이 끝난 후에야 상대밀도가 65%가 되었다. 이와 같은 결과는 Lee와

Albaisa (1974)가 수행한 진동삼축 시험에서 모래의 입도가 굵을수록 과잉간극수압 소산시 단위체적당 재압 밀률이 크게 나타난 것과 일치하는 결과이다.

또한, 그림 4(b)와 그림 8(a), (b), (c), (d)에서 보면, Y1 시험에서는 진동이 멈춘 후 간극수압이 완전히 소산되는데 걸리는 시간이 약 30초이고, Y5 시험에서는 약 18초로서 진동이 거듭될수록 진동후 과잉간극수압 소산이 빨리 일어남을 알 수 있다. 이것은 Y5로 갈수록 밀도가 증가하여 투수계수는 감소하나 과잉간극수압 소산시의 칩하량이 작기 때문에, 즉 입자의 칩강거리가

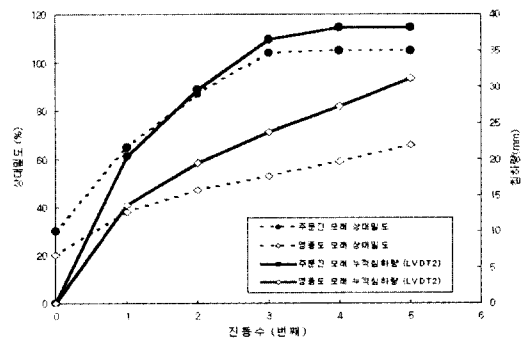


그림 9. 주문진 모래와 영종도 모래의 칩하량 및 각 단계별 상대밀도 (J1~J5, Y1~Y5)

짧아졌기 때문이라고 생각된다. 따라서 과잉간극수압의 소산속도를 결정하는 것은 지반의 투수계수뿐만 아니라 입자의 침강거리와 같은 의미를 갖는, 소산과정에서의 지반 침하량의 영향도 크다는 것을 알 수 있다.

4. 시험결과 분석

4.1 침강모래(sinking sand grains) 이론

Florin과 Ivanov(1961)에 의해 처음으로 포화된 모래의 액상화 후 침하 거동이 침강모래 이론으로 설명되었다. Scott(1986)는 고체화(solidification)라는 표현을 사용하였으나 그 기본 개념은 똑 같다. Kokusho(1999)는 투수성이 큰 높이 1m의 상, 하 모래층 사이에 얇은 실트층이 있을 때 진동하중이 작용하면 실트층 밑에 물막(water film)이 생겨 이것이 수평퍼짐의 원인이 되는 것을 실험을 통해 입증하였는데, Tsurumi(2000)는 침강모래 이론을 적용하여 물막이 생기는 것을 수치적으로 증명하였으며 침강속도를 구할 때 원 모래지반의 투수계수 값을 사용하였다.

침강모래 이론에 의하면, 액상화가 발생하면 모든 모래입자들은 액체에 부유한 상태가 되고 진동이 멈추거나 약해지면 이 입자들이 가라앉기 시작한다. 이러한 입자들이 고체층(액상화가 일어나지 않은 하부지반이나 진동대 시험시는 토조바닥)에 다다르면 모래입자들이 쌓이기 시작하여 견고한 층이 형성된다. 이 층은 시간이 지남에 따라 두께가 증가하며, 이러한 견고층 전면(solidification front)이 그림 10과 같이 상부로 이동하여 지표면에 도달하면 침강이 완료된다. 침강과정에서

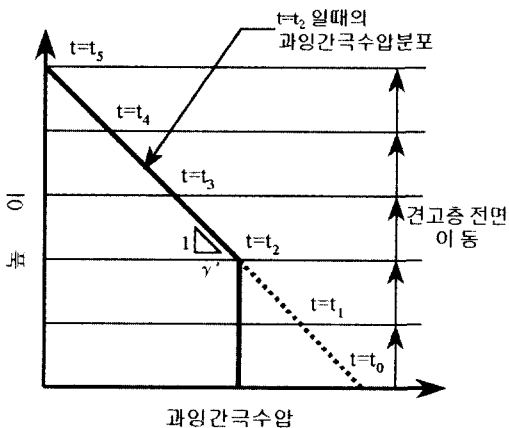


그림 10. 액상화 후 견고층 전면의 이동 및 과잉간극수압 분포

의 과잉간극수압 분포를 살펴보면, 견고층 전면의 상부에는 과잉간극수압 소산이 아직 시작되지 않아 기울기가 γ' 인 과잉간극수압 분포선이 그대로 존재하며 견고층 전면의 하부는 과잉간극수압 소산이 완료되었기 때문에 과잉간극수압이 더 이상 증가하지 않고 수직으로 분포한다(그림 10). 그림 11에 나타난 것과 같이 지반내의 한 지점을 기준으로 시간경과에 따른 과잉간극수압의 변화를 살펴보면, 견고층 전면이 그 위치를 지나기 전인 A - B에서는 초기의 과잉간극수압이 그대로 유지되나 견고층 전면이 통과하는 시점(B)부터는 과잉간극수압이 기울기 a 의 속도로 소산된다.

Florin과 Ivanov(1961), Scott(1986)의 침강모래이론에 의하면, 모래 입자의 침강속도(v_s), 견고층 전면의 상승속도(v_f) 및 그림 11의 과잉간극수압 소산속도(a)는 각각 식 (2), (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s = \frac{\gamma'}{\gamma_f} k \quad (2)$$

$$v_f = \frac{\gamma'(1+e_1)k}{\gamma_f(e_1-e_2)} \quad (3)$$

$$a = \frac{(\gamma')^2 k(1+e_1)}{\gamma_f(e_1-e_2)} \quad (4)$$

- 여기서, γ' : 사질토의 수중단위중량
- k : 투수계수
- e_1 : 초기 간극비
- γ_f : 유체(일반적으로는 물)의 단위중량
- e_2 : 견고층의 간극비

앞의 식을 적용하여 주문진 모래 J1 시험에서 측정한 과잉간극수압 발생 및 소산곡선을 모사하여 그림 12(a),

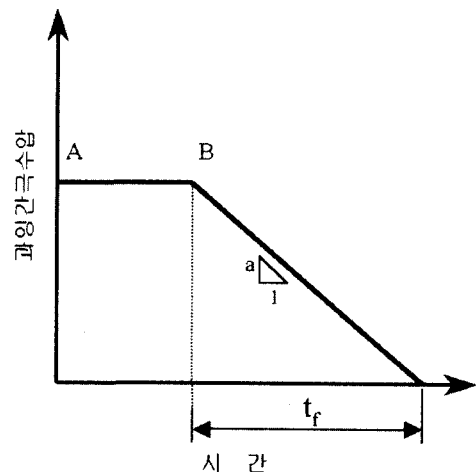
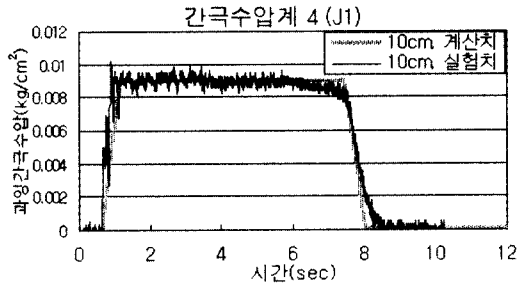
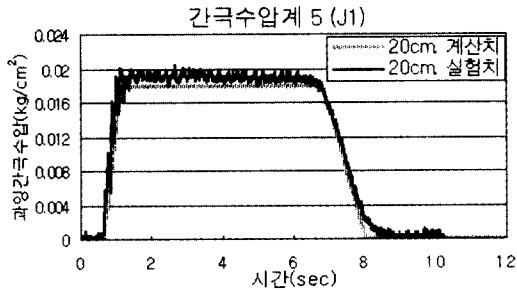


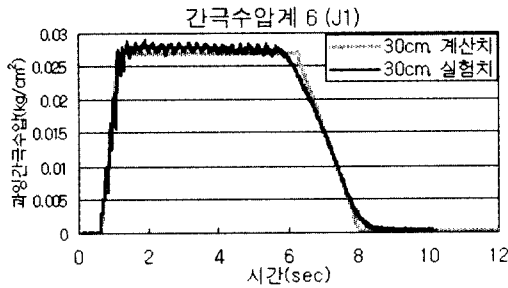
그림 11. 한 지점에서의 과잉간극수압 시간이력



(a) 간극수압계 P4(깊이 10cm)



(b) 간극수압계 P5(깊이 20cm)

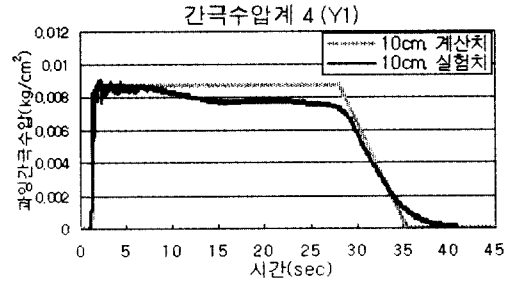


(c) 간극수압계 P6(깊이 30cm)

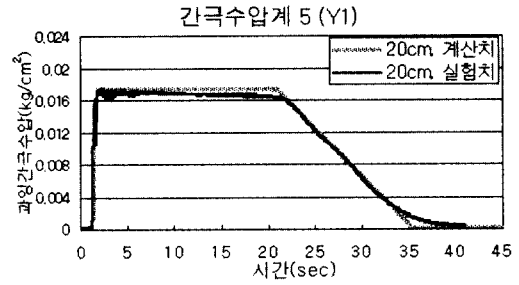
그림 12. 침강모래 이론을 이용한 계산치와 실험치 비교(J1)

(b),(c)에 나타냈다. 이 그림들에서 보면 예측곡선과 계측곡선이 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있는데, 이때 사용한 지반의 투수계수 값은 0.17cm/sec 이었다. 반면에, 액상화 발생후 진동이 멈추기 전까지의 침하량 1.68cm 를 고려하여 상대밀도를 보정한 다음 그림 2에서 구한 투수계수는 0.042cm/sec 이다. 즉, 액상화 발생후 과잉간극수압 소산시의 투수계수는 실내에서 정수두 시험으로 구한 투수계수 값의 약 4배이다. 이 결과는 액상화 과정에서의 투수도가 정수두 시험결과의 4배 (Arulanandan, 1994) 또는 5~6배(Jafarzadeh 등, 1995)가 된다는 기존의 연구결과 범주 내에 드는 것이다.

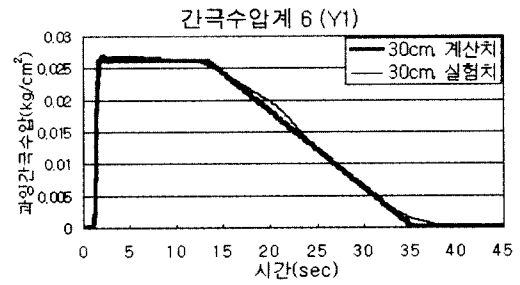
같은 방법으로 영종도 모래의 Y1 시험중 10cm, 20cm, 30cm 지점에서 측정한 과잉간극수압과 이론식으로 구한 과잉간극수압을 그림 13에서 비교하였다. 이 때 사용한 투수계수는 0.023cm/sec 이었고 정수두 시험 투수계



(a) 간극수압계 P4(깊이 10cm)



(b) 간극수압계 P5(깊이 20cm)



(c) 간극수압계 P6(깊이 30cm)

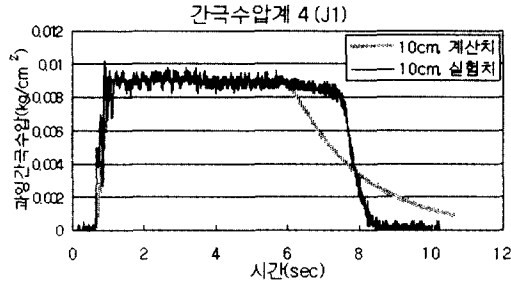
그림 13. 침강모래 이론을 이용한 계산치와 실험치 비교(Y1)

수 곡선에서 구한 투수계수 값은 0.025cm/sec 로서 서로 비슷한 값이다. 이 결과와 주문진 모래 시험 분석결과를 종합하여 보면 진동중 또는 진동직후의 투수계수와 정수두 시험에 의한 투수계수 사이의 관계는 모래의 종류(아마도, 입자 크기)에 따라 다른 것으로 생각된다.

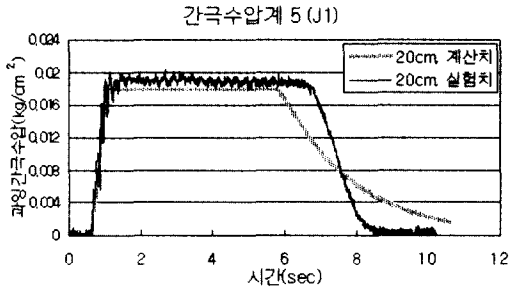
따라서, 액상화후 과잉간극수압의 소산과정을 침강모래 이론으로 분석하기 위해서는 모래입자의 침강속도를 투수계수와 연관지어 나타내는 식(2)에 대한 보완이 필요하다고 생각된다.

4.2 압밀이론

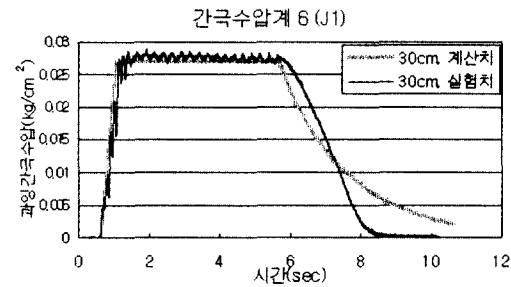
그림 14에는 주문진 모래에 대한 진동대시험(J1)에서 계측한 과잉간극수압 곡선을 Terzaghi 이론으로 모사하



(a) 간극수압계 P4(깊이 10cm)



(b) 간극수압계 P5(깊이 20cm)

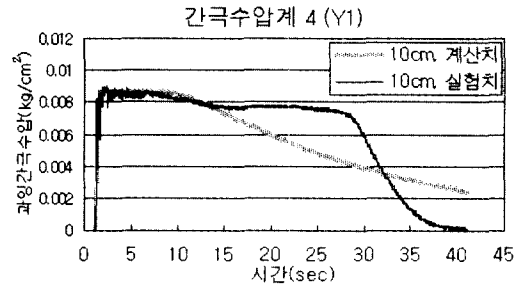


(c) 간극수압계 P6(깊이 30cm)

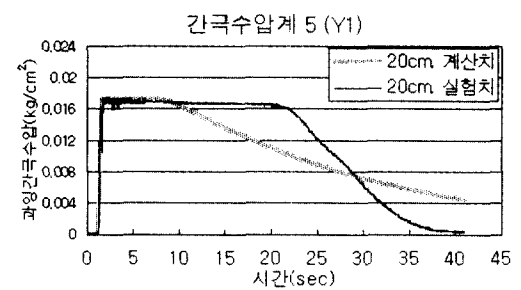
그림 14. 압밀이론을 이용한 계산치와 실험치 비교(J1)

여 예측곡선과 같이 나타내었다. 이를 위하여 지반을 8개의 층으로 나누어 유한차분법으로 해석하였으며 각 깊이에서 시간에 따른 간극수압을 계산하였다. 압밀계수(c_v) 값을 조정하여 해석결과가 실험치와 가장 근접하도록 하였는데 이 때 사용한 압밀계수 값은 $330\text{cm}/\text{sec}^2$ 이었다.

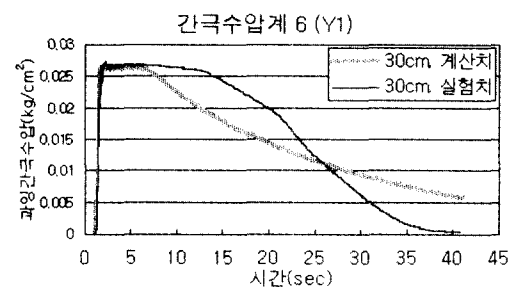
한편, 압밀계수(c_v)는 투수계수(k)와 체적압축계수(m_v)를 알면 구할 수 있으므로 그림 2에서 투수계수($0.042\text{cm}/\text{sec}$)를 구하고 과잉간극수압 소산시의 침하량(0.36cm)을 고려하여 체적압축계수($0.53\text{cm}^2/\text{kg}$)를 구하여 계산한 압밀계수는 $80\text{cm}/\text{sec}^2$ 이었다. 즉, 과잉간극수압 실험곡선으로부터 구한 압밀계수($330\text{cm}/\text{sec}^2$)는 투수계수와 체적압축계수로부터 역산한 값보다 약 4배 가량 큰 값이다. 이와 같은 차이는 침강모래 이론 적용



(a) 간극수압계 P4(깊이 10cm)



(b) 간극수압계 P5(깊이 20cm)



(c) 간극수압계 P6(깊이 30cm)

그림 15. 압밀이론을 이용한 계산치와 실험치 비교(Y1)

과정에서 나타난 차이와 동일하다.

그리고, 그림 14에서 압밀이론에 의한 예측곡선과 실험곡선을 비교해 보면, 압밀이론 방법의 경우, 예측곡선이 초기에는 과잉간극수압 소산을 과대평가하고 후반에는 과소평가하는 등 실험곡선과 다른 형태로 나타나서 과잉간극수압의 소산과정을 잘 모사할 수 없음을 알 수 있다.

영종도 모래의 Y1 시험결과에 대하여 주문진 모래와 같은 방법으로 해석을 수행한 결과 실험곡선 모사에 필요한 압밀계수(c_v) 값은 $28\text{cm}/\text{sec}^2$ 이며, 정수두 시험으로 구한 투수계수($0.025\text{cm}/\text{sec}$)와 과잉간극수압 소산시의 침하량(5.6mm)을 이용하여 구한 압밀계수(c_v) 값은 $32\text{cm}/\text{sec}^2$ 로서 둘 사이에 큰 차이가 없으며, 이 경우도 침강모래 이론 적용과정에서 나타난 경향과 동일하다.

또한, 그림 15에 나타난 압밀이론에 의한 예측곡선과 실측곡선을 비교해 보면 영종도 모래의 경우도 Terzaghi 압밀이론으로 과잉간극수압 소산 과정을 잘 모사할 수 없음을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구방향

수평지반에 대한 진동대시험을 분석한 결론 및 향후 연구방향은 다음과 같다.

- (1) 과잉간극수압의 소산속도는 투수계수뿐만 아니라 과잉간극수압 소산시 입자의 침강거리를 결정짓는, 과잉간극수압 소산과정에서의 지반 침하량에도 크게 영향을 받는다.
- (2) 침강모래 이론으로 진동중 또는 진동직후 모래의 과잉간극수압의 소산거동을 모사할 수 있음을 확인하였다. 그러나 침강모래 이론으로 소산거동을 모사하기 위한 동적 상태에서의 투수계수는 실험실에서 정수두 시험으로 구한 투수계수와 차이가 나며 그 차이는 모래의 종류에 따라 다르게 나타났다. 주문진 모래와 영종도 모래의 경우 동적 투수계수는 정적 투수계수의 각각 4.0배 및 0.9배 정도이었다.
- (3) Terzaghi의 압밀이론을 사용하였을 때 과잉간극수압 실측곡선 모사를 위한 압밀계수(c_v)와 정수두 시험의 투수계수(k)를 이용하여 구한 압밀계수(c_v)의 차이는, 침강모래 이론 적용과정에서 나타난 투수계수 값의 차이와 유사하였다. 그리고 압밀이론 방법으로 구한 최적의 모사곡선은 초기에는 과잉간극수압 소산을 과대평가하고 후반부에서는 과소평가하는 등 실측곡선과 다른 형태로 나타나서, 압밀이론으로는 과잉간극수압 소산과정을 적절히 모사할 수 없다고 판단된다.
- (4) 향후에는, 흙의 종류에 따른 진동중 혹은 진동직후의 투수계수와 정수두 시험으로 구한 투수계수와의 상관관계를 심도있게 파악하기 위해서 다양한 종류의 모래에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이와 같은 연구 결과로 액상화 발생후 모래의 침강속도를 정확히 구할 수 있으면, 침강기간 동안의 수평퍼짐으로 인한 실제 현장에서의 변위량을 예측하는데 크게 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Arulanandan, K.(1994), "Why VELACS?(Verification of Liquefaction Analysis using Centrifuge Studies) in Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems", Vol.2, Balkema, Rotterdam, pp.1239-1266.
2. Florin, V. A. and Ivanov, P. L.(1961), "Liquefaction of Saturated Sandy Soils", *Proc. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 1, pp.107-111.
3. Ghalandarzadeh, A.(1997), *Shaking Table Tests on Seismic Displacements of Water-Front Structures*, Ph.D. Thesis, University of Tokyo.
4. Gibson, A. D.(1997), *Physical Scale Modeling of Geotechnical Structures at One-G*, Ph.D. Thesis, CALTEX.
5. Iai, S.(1989), "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field", *Soils and Foundations*, Vol.129, No.1, March, pp.105-119.
6. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.(1992), "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility", *Soils and Foundations*, Vol. 32, No.2, pp.1-15.
7. Jafarzadeh, F. and Yanagisawa, E.(1995), "Settlement of Sand Models under Unidirectional Shaking", *Proceedings, IS-TOKYO'95, 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol.2, pp.693-698.
8. Kagawa, T.(1978), "On the Similitude in Model Vibration Tests of Earth Structures", *Soil Mech. and Found. Eng.*, Proc. of Jap. Soc. of Civil Eng., July, pp.69-77.
9. Kagawa, T.(1995), "Dynamic Model Testing in Geotechnical Engineering", *Proceedings, IS-TOKYO'95, 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.1435-1447.
10. Lee, K. L. and Albaisa, A.(1973), "Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.100, No.GT4, pp.387-406.
11. Kokusho, T.(1999), "Water Film Effect on Lateral Spreading of Liquefied Sand", *Soils and Foundations*, April, in Japanese, pp. 11-13.
12. Martin, G. R., Finn, W. D. and Seed, H. B.(1975), "Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.101, No.GT5, pp.423-438.
13. Port and Harbour Research Institute(PHRI)(1997), *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, Balkema.
14. Poorooshasb, H. B.(1995), "One Gravity Model Testing", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.3, pp.55-59.
15. Puebla, Humberto, Byrne, P. M. and Phillips, R.(1997), "Analysis of CANLEX Liquefaction Embankments : Prototype and Centrifuge Models", *Can. Geotech. J.*, Vol.34, pp.641-657.
16. Scott, R. F.(1986), "Solidification and Consolidation of a Liquefied Sand Column", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.23-31.
17. Scott, R. F.(1989), "Centrifuge and Modeling Technology: A Survey", *Rev. Franc. Geotech.*, No.48, July, pp.15-34.
18. Seed, H. B., Martin, P. P., and Lysmer, J.(1976), "Pore-Water Pressure Changes During Soil Liquefaction", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.102, No.GT4, pp.323-346.
19. Towhata, I. and Ishihara, K.(1985), "Modelling Soil Behavior Under Principal Stress Axes Rotation", *Proceedings of Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Vol.1, pp.523-530.
20. Tsurumi, T., Mizumoto, K. and Okada, S.(2000), "Experimental Consideration on the Mechanism of Liquefaction", *12th World Conference Earthquake Engineering*, Auckland, Paper No.2405.

(접수일자 2000. 11. 2)