

1-g 진동대시험을 이용한 포화된 모래지반의 재액상화 강도 특성 평가

Evaluation of Characteristics of Re-liquefaction Resistance in Saturated Sand Deposits Using 1-g Shaking Table Test

하 익 수¹ Ha, Ik-Soo

김 명 모² Kim, Myoung-Mo

Abstract

Many case histories of re-liquefaction phenomena seem to support the idea that sand deposits, if they once have been liquefied, could be reliquefied again by a subsequent earthquake even though the earthquake is smaller than the previous one. The magnitude of the strains induced in the initial liquefaction has a significant influence on the resistance of the sample to re-liquefaction. The deposits undergoing liquefaction experience large shear strain during liquefaction. And this previous strain changes the microstructure into highly anisotropic structure such as columnlike structure and connected voids. This type of anisotropy is so unstable that it can reduce re-liquefaction resistance. It is known that the extent of anisotropic structural change depends on the gradation characteristics of ground. The purpose of this study is to estimate the correlation between the gradation characteristics of the sand and the ratio of re-liquefaction resistance to liquefaction resistance. In this study, 1-g shaking table tests were carried out on five different kinds of sands. During the tests the values of excess pore pressure at various depths and surface settlements were measured. Re-liquefaction resistances were not affected by the initial void ratio and the effective confining pressures, and the deposits of all test sands which had once been liquefied were reliquefied in the cyclic loading number below 1 to 1.5. The ratio of re-liquefaction resistance to liquefaction resistance linearly decreased as D_{10}/C_u increased, and was constant as about 0.2 above the value of D_{10}/C_u , 0.15 mm.

요 지

여러 재액상화 발생 사례들에 의하면 한번 액상화를 겪은 지반은 이전에 받은 지진규모와 같거나 오히려 더 작은 규모의 지진에도 재액상화가 발생한 것으로 나타났다. 이러한 원인으로는 액상화 동안에 겪은 큰 전단변형율을 들 수 있으며 이전에 받은 전단변형률은 지반의 입자구조를 액상화에 취약한 기동구조와 연결간극구조와 같은 이방성이 큰 구조로 변화시키기 때문이다. 액상화로 인한 지반내부의 이방적 구조로의 변화정도는 모래의 입도특성에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 목적은 모래지반의 입도특성과 재액상화로 인한 액상화강도 감소율간의 상관관계를 추정하는데 있다. 이를 위하여 액상화 가능성이 큰, 상이한 입도특성을 갖는 5종류의 시험모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하여 깊이별 시간에 따른 과잉간극수압과 지표면침하량을 계측하고 그 결과를 분석하였다. 한번 액상화를 겪은 지반은 조성지반의 초기간극비와 유효구속압에 거의 영향을 받지 않으며 하중반복횟수 1~1.5회에 모두 재액상화되었다. 즉, 한번 액상화를 겪은 지반은 간극비의 유출로 인해 간극비는 감소하게 되나 입자구조가 액상화에 취약한 구조로 변화함으로써 액상화 강도는 현저히 감소하였다. 재액상화 강도감소율(재액상화 발생 소요 하중반복횟수/초기액상화 발생 소요 하중반복횟수)은 조성지반의 입도특성인 D_{10}/C_u 값이 증가함에 따라 선형적으로 감소하며 D_{10}/C_u 값이 0.15mm이상에서는 약 0.2(초기 액상화강도의 20% 강도)로 일정해지는 경향을 보였다.

Keywords : Liquefaction, Reliquefaction, Shaking table tests, Microstructure, Gradation characteristics

1 정희원, 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, KOWACO, geodoc@kowaco.or.kr)

2 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ.)

1. 서론

여러 재액상화 발생 사례들에 의하면 한번 액상화를 겪은 지반은 이전에 받은 지진규모와 같거나 오히려 더 작은 규모의 지진에도 재액상화가 발생한 것으로 나타났다(Kuribayashi & Tatsuoka, 1975). 이러한 사례들은 최초의 지진하중으로 과잉간극수압이 소산되고 이로 인해 지반이 보다 조밀해짐에도 불구하고 액상화에 대한 저항력은 결코 증가하지만은 않는다는 사실을 입증한다.

액상화를 겪은 지반은 액상화동안에 큰 전단변형률(2~3% 이상)을 경험하고 이러한 이전에 받은 전단변형률은 지반의 입자구조를 이방성이 큰 기동구조나 연결간극구조(columnlike structure and connected voids)로 변화시키며 이방적 투수계수 증가를 초래한다(그림 1). 이러한 이방적 구조는 매우 불안정한 구조로써 주응력 방향에 수직인 방향의 응력을 받게 되는 경우 연결간극의 급작스런 폐색으로 인해 과잉간극수압이 급격히 상승하고 이로 인해 액상화가 더 쉽게 발생하게 된다(Oda 등, 2001). 액상화로 인한 지반내부의 이방적 구조로의 변화정도나 이로 인해 발생하는 지진하중동안의 투수계수 변화 정도는 모래의 입도특성에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다(Ha 등, 2003).

일반적인 액상화 평가기법들은 평가대상 지반의 간극비(또는 상대밀도), 유효구속압, 입도특성 등의 자료들을 참고하여 평가에 이용한다. 그러나 지진빈도가 높은 지역에서 이전에 액상화를 겪은 지반의 재액상화 발생여부를 판단하고자 할 때는 앞서 제시한 이유로 인해

위에 나열된 자료들만으로는 액상화 발생여부 판단은 불가능하다 할 수 있다. 재액상화 발생 여부는 이전 지진하중으로 겪게 된 전단변형율을 파악할 수 있다면 가장 바람직한 참고 자료가 될 수 있으나, 지진하중 전후로 지반조건들은 큰 변화를 겪게 되므로 사실상 이전에 받은 전단변형율을 예측하는 것은 재액상화 발생 여부 판단 만큼이나 어려운 일이다. 따라서, 본 연구에서는 지진전후에도 그 변화가 가장 작을 것으로 예상되는 조성지반의 입도특성값과 재액상화시 강도변화 특성을 고찰하고 그 상관관계를 추정해 봄으로써 역사지진 기록(대상지반의 이전 액상화 발생이력 등)과 함께 지진빈도가 높은 지역에서의 가장 합리적인 액상화 평가기법 개발을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

본 연구에서는 액상화 가능성이 큰, 상이한 입도특성(유효입경=0.11~0.40mm, 균등계수=1.53~2.57)을 갖는 5종류의 시험모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하여 깊이별 시간에 따른 과잉간극수압과 지표면침하량을 측정하여 그 결과를 분석하였다. 진동하중동안에 측정된 과잉간극수압 기록으로부터 액상화 시점을 결정하고 액상화 시점에 이르는 동안에 가해진 하중반복 횟수로부터 액상화 강도와 재액상화 강도를 산정하였다. 본 연구의 목적은 시험모래의 입도특성과 산정된 액상화 강도 결과를 분석하여 액상화와 재액상화시 액상화 강도 특성들을 고찰하고, 아울러 모래지반의 입도특성과 재액상화 강도변화 정도와의 상관관계를 추정하는데 있다.

2. 시험개요

시험에 사용한 모형토조의 크기는 길이 192cm, 폭 44cm, 높이 60cm이며, 모래지반은 40cm 높이로 조성하였다. 시험모래로는 주문진모래, 영종도모래, 인천모래 1, 인천모래2, 한강모래를 사용하였다. 시험에 사용된 모래들의 입도분포곡선은 그림 2와 같다. 그림 2에서 굵은 실선사이에는 ATC(Applied Technology Council, 1996)에서 제안한 가장 액상화하기 쉬운 영역을 나타내며 시험에 사용된 모래들은 모두 이 영역에 포함됨을 확인할 수 있다. 지반조성은 수중침강법을 사용하였다. 시험모래의 기본물성치는 표 1에 정리하였다. 간극수압계는 지표면으로부터 10, 20, 30, 35cm 깊이에 각각 2개씩 총 8개를 설치하였으며, 가속도계는 모형토조 중앙의 0, 10, 20, 30, 40cm 깊이에 각각 1개씩 총 5개를 설치하였

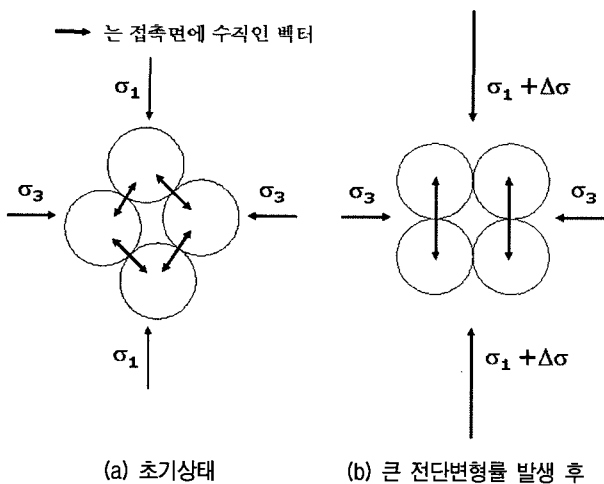


그림 1. 전단시 모래시료의 입자구조 변화(Oda, 1972)

표 1. 시험모래의 기본물성치

시험모래	초기상대밀도 (%)		유효입경 (D_{10} , mm)	평균입경 (D_{50} , mm)	균등계수	비중	최대건조 단위중량 (kN/m^3)	최소건조 단위중량 (kN/m^3)
	1차진동	2차진동						
주문진모래	30	50	0.40	0.57	1.53	2.64	15.68	13.72
영종도모래	20	40	0.11	0.16	1.95	2.64	15.88	13.23
인천모래1	21	43	0.24	0.34	1.67	2.57	16.27	14.11
인천모래2	23	45	0.23	0.50	2.47	2.67	17.35	14.90
한강모래	20	41	0.21	0.50	2.57	2.61	17.05	14.11

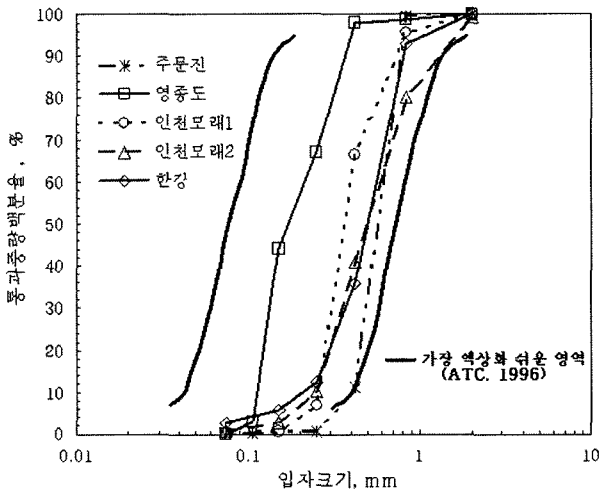


그림 2. 시험모래의 입도분포곡선

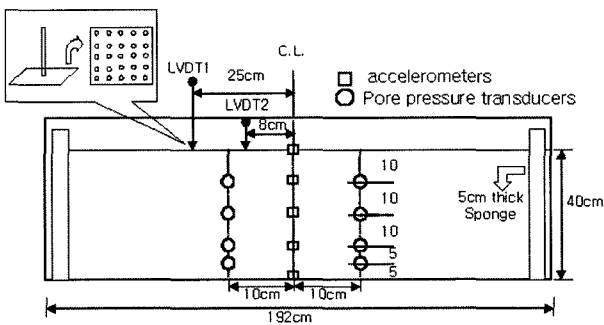


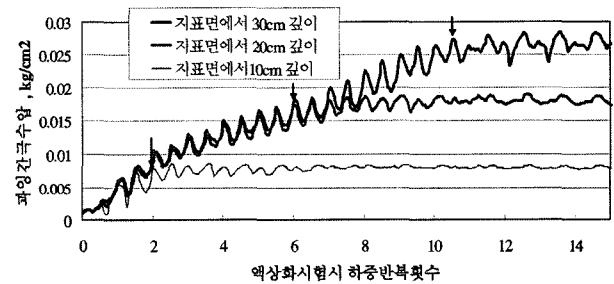
그림 3. 모형지반과 계측기 배치도

다(그림 3). LVDT의 위치는 그림 3에 나타나 있으며, LVDT는 진동시험 동안 지표면의 침하량을 계측하여 조성지반의 밀도와 간극비의 변화를 산정하는데 이용되었다. 입력지진파는 4Hz의 싸인 정현파를 사용하였으며, 입력가속도와 진동지속시간은 각각 0.15g, 5초로 하였다. 각각의 시험은 1차 시험시 액상화 강도를 산정하고, 1차 시험 종료후 충분한 시간을 기다려 발생된 과잉간극수압이 완전히 소산된 것을 확인하고 2차 진동하중을 가하는 시험으로부터 재액상화 강도를 산정하였다.

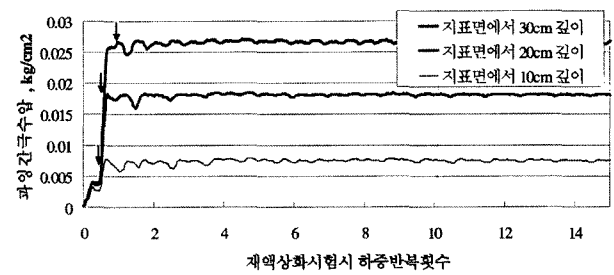
3. 시험결과 및 분석

3.1 액상화/재액상화 강도 특성

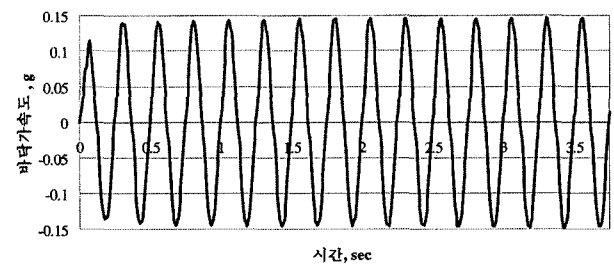
5가지 시험모래에 대한 시험결과 중 그림 4의 (a), (b), (c)는 각각 인천모래1의 액상화 시험시 하중반복횟수에 따른 과잉간극수압 변화, 재액상화 시험시 하중반복횟수에 따른 과잉간극수압 변화, 전단상자 바닥면에 가해진



(a) 액상화시 반복하중 횟수



(b) 재액상화시 반복하중 횟수



(c) 입력지진파

그림 4. 인천모래1

입력가속도 시간이력을 대표적으로 나타낸 그림이다. 그림 4에서 액상화를 발생시키는데 필요한 하중반복횟수가 재액상화를 발생시키는데 필요한 하중반복횟수보다 훨씬 크고 재액상화 시험시 최초의 하중반복횟수(1회)에서 과잉간극수압이 급격히 상승함을 확인할 수 있다. 본 연구에서 액상화의 시점은 과잉간극수압이 유효상재하중과 같아지는 부분 즉, 그림 4의 (a), (b)와 같은 과잉간극수압 변화곡선이 편평해지는 점(그림에서 화살표로 표시)이 액상화의 시점이며 이때의 하중반복횟수를 읽어 이 값을 액상화 강도를 나타내는 지표로 삼았다. 표 2는 이상의 방법으로 5가지 시험모래에 대해 산정한 액상화와 재액상화에 필요한 하중반복횟수를 보여준다. 그림 4와 표 2의 결과로부터 이전에 액상화를 겪었던 모래지반은 같은 진동하중에 대해 더 쉽게 액상화가 발생됨을 확인할 수 있다.

그림 5는 1차 진동시험(액상화시험)시 모래지반의 간극비와 액상화를 발생시키는데 필요한 하중반복횟수와 의 관계를 보여준다. 그림에서 초기간극비가 증가하고 유효구속압이 작아질수록(지표면에 가까울수록) 액상화 강도가 감소하는 일반적인 경향을 볼 수 있다.

표 2. 액상화/재액상화를 발생시키는데 필요한 하중 반복횟수

시험모래		J	Y	I1	I2	H
액상화 발생 하중반복횟수, n_L	지표면으로부터 30cm	3.00	2.75	10.5	5.88	4.50
	지표면으로부터 20cm	2.00	2.25	6.00	3.00	3.50
	지표면으로부터 10cm	1.00	1.25	2.00	1.50	1.00
재액상화 발생 하중반복횟수, n_R	지표면으로부터 30cm	0.38	1.50	1.00	1.50	1.50
	지표면으로부터 20cm	0.38	1.50	0.75	1.00	1.25
	지표면으로부터 10cm	0.38	1.13	0.63	0.63	0.75
재액상화 유발 하중반복횟수 감소율, n_R / n_L	지표면으로부터 30cm	0.13	0.55	0.10	0.26	0.33
	지표면으로부터 20cm	0.19	0.67	0.13	0.33	0.36
	지표면으로부터 10cm	0.38	0.90	0.31	0.42	0.75

J, Y, I1, I2, H는 각각 주문진, 영종도, 인천모래1, 인천모래2, 한강모래를 의미한다.

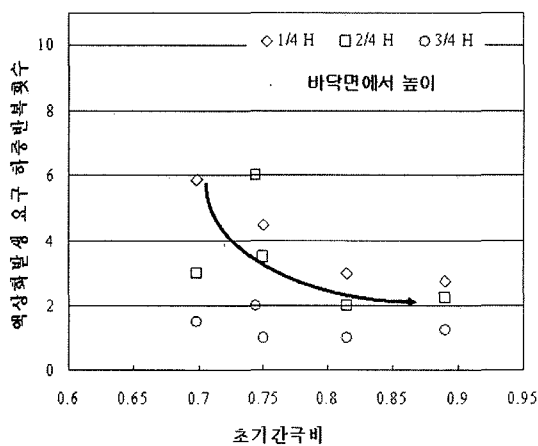


그림 5. 간극비와 초기액상화에 필요한 하중반복횟수와의 관계

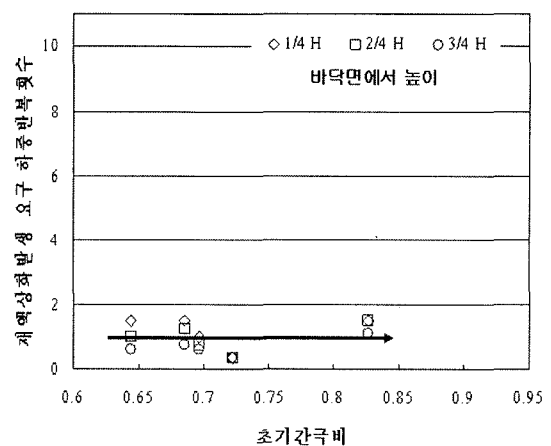


그림 6. 간극비와 재액상화에 필요한 하중반복횟수와의 관계

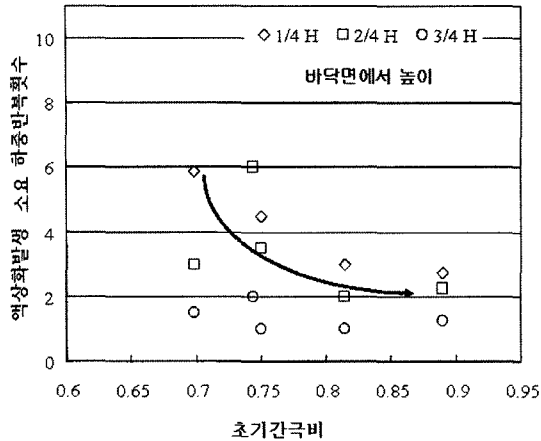


그림 7. 영종도모래 연이은 진동하중에 따른 액상화강도 변화

차 진동시험(재액상화시험)시 액상화 강도는 급격히 감소하나 이후 3~5차 진동시험시에는 액상화강도는 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이상의 결과는 초기 액상화가 조성지반의 입자구조를 변화시켜 이로 인해 앞서 설명한 이유로 액상화 강도를 현저히 감소시킴을 확인시켜준다.

3.2 모래의 입도특성이 재액상화 강도변화에 미치는 영향

액상화로 인한 지반내부의 이방적 구조로의 변화정도나 이로 인해 발생하는 지진하중이 작용하는 동안의 투수계수 변화 정도는 모래의 입도특성에 크게 영향을 받는다(Ha 등, 2003). 따라서, 재액상화시 강도감소의 이유가 입자구조 변화에 의해 초래된 것이라면 결국, 재액상화시 강도 변화는 조성지반의 입도특성과도 관련성을 갖을 것으로 예상된다.

D_{10} 의 경우는 조성지반의 투수성, C_u 의 경우는 조성지반의 압축성과 관련된 입도특성치라 할 수 있다. 따라서 D_{10}/C_u 는 조성지반의 투수성과 압축성을 동시에 반영할 수 있는 입도특성치라고 할 수 있다. 본 연구에서는 재액상화시 강도변화를 조성지반의 입도특성치라 할 수 있는 D_{10}/C_u 값과의 상관관계를 살펴보았다. 그림 8은 유효입경(D_{10})을 균등계수(C_u)로 나눈 값(D_{10}/C_u)과 재액상화시 강도 감소율(재액상화 발생 소요 하중반복횟수/초기액상화 발생 소요 하중반복횟수)과의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 재액상화 강도감소율은 D_{10}/C_u 값이 증가함에 따라 감소하는(강도감소가 더 큰) 경향을 보이며 D_{10}/C_u 값이 0.15mm일 때까지는 거의 선형으로 감소하다가 0.15mm 이후에는 일정해지는 경향을 보이며 대략 0.2(초기액상화 강도의 20% 강도) 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다.

그림 9는 각각의 연이은 진동시험시 초기 간극비를 나타낸다. 그림에서 속이 찬 표시와 비어있는 표시는 각각 액상화된 경우와 액상화되지 않은 경우를 나타내는 표시이다. 그림에서 영종도모래를 제외한 4종류 시험모래의 초기간극비는 3번째 진동시험 이후에는 거의 변화하지 않고, 조성지반도 액상화되지 않는 것으로 나타났다. 반면에, 영종도모래의 간극비는 5번째 진동시험때 까지도 계속 감소하고 액상화가 계속 발생하는 것으로 나타났다. 그림 9의 결과로부터 재액상화된 지반의 액상화 강도는 이전 액상화로 겪은 전단변형률에 의한 영향이라기 보다는 지반의 초기 간극비의 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 연이은 진동하중에 처한 재액상화된 지반의 액상화 재발생과 관련된 액상화 강도특성을 지배하는 특정 간극비가 존재하는 것으로 나타났고 본 시험결과만을 가지고 판단했을 때 약 0.68 정도로 추정된다. 1회 이상 액상화를 경험한 지반의 액상화 강도는 이러한 특정 간극비 이상에서는 재액상화 강도(2번째 액상화시 강도)와 같은 일정 강도를 가지며 특정 간극비 이하의 간극비에서는 액상화 강도는 무한히 증가하는(액상화는 발생하지 않는) 것으로 나타났다. 그리고 이러한 특정 간극비는 조성지반의 유효구속압 등의 다른 조건들에 의해 변화할 수 있을 것으로 여겨지는데, 이에 대해 추후 보다 심도 깊은 연구가 요구되어진다.

그림 10은 3번째 진동시험시 모래종류별 초기간극비를 나타낸다. 본 시험결과에 국한하여 영종도모래를 제외한 4종류의 시험모래의 경우, 3번째 진동시험에서는 지반의 액상화가 발생되지 않았고 그 때의 간극비들은 모두 0.68 이하였다. 반면에 영종도모래의 경우에는 지반의 간극비는 0.76으로 특정간극비 0.68보다 큰 값으로서 지반은 여전히 액상화가 발생되는 것으로 나타났다.

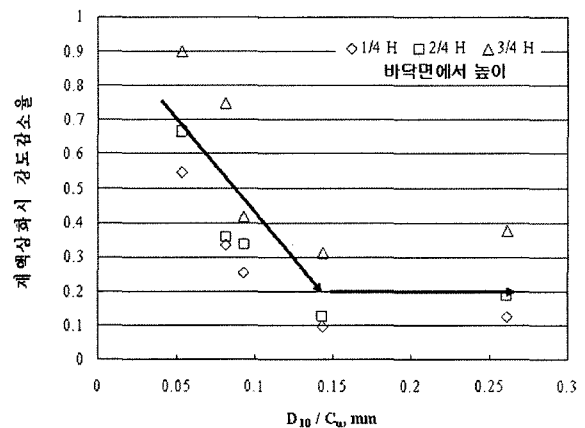


그림 8. 재액상화 강도감소 정도와 입도특성과의 관계

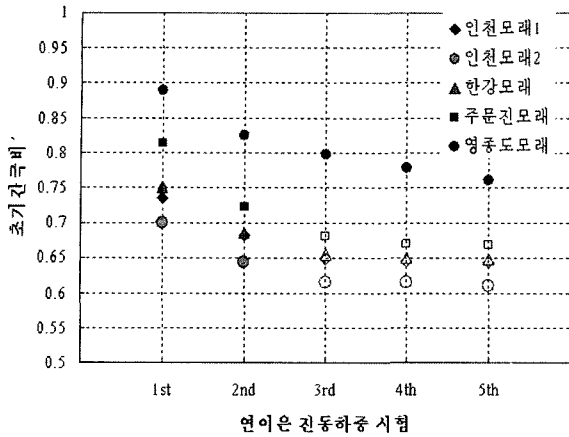


그림 9. 연이은 진동하중 시험시 초기간극비

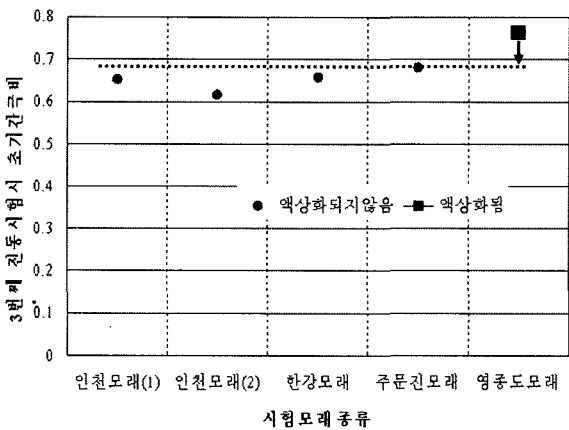


그림 10. 3번째 진동시험시 초기 간극비

따라서, 이상의 결과로부터 1회 이상 액상화를 경험한 지반이라도 조성지반의 초기간극비가 어느 특정 간극비 이하이면 그 지반은 더 이상 액상화가 발생하지 않을 것이라는 결론을 얻을 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 액상화와 재액상화시 액상화 강도특성을 고찰하고 모래 지반의 입도특성과 재액상화 강도 변화 정도와의 상관관계를 추정하기 위해서 액상화 가능성이 큰, 상이한 입도특성(유효입경=0.11~0.40mm, 균등계수=1.53~2.57)을 갖는 5종류의 시험모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이전에 액상화를 경험한 지반의 액상화강도는 조성지반의 초기간극비와 유효구속압에 거의 영향을 받지 않으며 하중반복횟수 1~1.5회 이하에서 모두 재액상화가 발생되었다. 즉, 액상화를 겪은 지반의 액상화강도(재액상화강도)는 이전 액상화과정을 통해

간극비가 감소했음에도 불구하고 입자구조가 액상화에 취약한 구조로 변화함으로써 액상화강도는 현저히 감소하는 것으로 나타났다.

- (2) 액상화로 인한 지반구조의 변화는 초기액상화 발생시 발생하며 이후 연이은 액상화 동안에는 간극비만 감소하고 큰 입자구조의 변화는 없는 것으로 판단되었다.
- (3) 본 연구에서 정의된 재액상화 강도감소율(재액상화 발생 소요 하중반복횟수/초기액상화 발생 소요 하중반복횟수)은 조성지반의 입도특성인 D_{10}/C_u 값에 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 강도감소율은 D_{10}/C_u 값이 증가함에 따라 선형적으로 감소하며 D_{10}/C_u 값이 0.15mm 이상에서는 대략 0.2(초기 액상화 강도의 20% 강도) 정도로 일정해지는 경향을 보였다.
- (4) 액상화를 겪은 지반의 차후 지진하중에 대한 액상화강도는 이전 액상화로 겪은 전단변형율에 의한 영향보다는 지반의 초기간극비의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.
- (5) 1회 이상 액상화를 경험한 지반의 액상화 강도는 일정 간극비 이상에서는 재액상화강도(2번째 액상화시 강도)와 같은 강도를 가지며 그 이하의 간극비에서는 액상화가 결코 발생하지 않는 특정한 간극비가 존재하는 것이 확인되었으며 이러한 특정 간극비는 조성지반의 유효구속압 등의 다른 조건들에 의해 변화할 수 있을 것으로 여겨지며 이에 대해 추후 보다 심도 깊은 연구가 요구된다.

참고 문헌

1. Applied Technology Council (1996), *Improved Seismic Design Criteria for California Bridges : Provisional Recommendations*, ATC-32, California Department of Transportation, pp.92.
2. Ha, I.S., Park, Y.H., and Kim, M.M. (2003), "Dissipation Pattern of Excess Pore Pressure After Liquefaction in Saturated Sand Deposits", *Transportation Research Record 1821*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.59-67.
3. Kuribayashi, Eiichi, and Tatsuoka, Fumio (1975), "Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan", *Soils and Foundation*, 15(4), pp.81-91.
4. Oda, M. (1972), "The Mechanism of Fabric Changes During compressional Deformation of Sand", *Soils and Foundation*, Tokyo, 12(2), pp.416-423.
5. Oda, M., Kawamoto, K., Fujimori, H., and Sato, M. (2001), "Microstructural Interpretation on Reliquefaction of Saturated Granular Soils under Cyclic Loading", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.5, May, pp.416-423.

(접수일자 2005. 1. 19, 심사완료일 2005. 6. 21)