

재액상화에 관한 원심모형실험과 수치해석

Centrifuge Test and Its Numerical Modeling for Reliquefaction

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

Abstract

In this paper the behavior of saturated sand deposits where liquefaction occurred before is studied for successive earthquakes. The relationship between past pore pressure generation and reliquefaction resistance is examined by using cyclic direct simple shear tests. If the soil sample in direct simple shear produced nearly 90% of excess pore pressure during first time loading, its liquefaction resistance increased during following cyclic loading after consolidation. However, a fully liquefied soil during first time loading has a densely packed condition but shows less liquefaction resistance for the following cyclic loading. UBCSAND model that can account for pore pressure change and stiffness loss of soil during shaking is used to analyze the centrifuge test simulating reliquefaction. The pore pressure rise during first time cyclic loading controls liquefaction resistance. The measurements from reliquefaction centrifuge test are compared with numerical predictions. By considering frequent earthquakes having occurred at the Southern Korea near Japan, such effective stress approach is necessary for reliquefaction study.

요 지

본 논문에서는 지진이 발생한 지역에서 다시 지진이 발생할 경우에 포화된 사질토 지반의 동적거동에 관한 연구를 수행하였다. 반복 직접단순전단시험을 실시하여 느슨한 모래지반에서 간극수압발생량과 재액상화발생여부의 상관관계를 분석하였다. 최초의 전단하중으로 인하여 지반이 원래 가지고 있던 유효수직응력의 약 90%까지 간극수압이 발생하였을 경우 시간 경과에 따라 과잉간극수압이 전부 소산된 이후 다시 전단하중을 가하였을 때 지반의 액상화에 대한 저항력은 증가하였다. 하지만 최초 진동으로 지반이 완전히 액상화되었을 경우에는 다음에 전달되는 전단하중에는 이전보다도 지반이 더욱 조밀해짐에도 불구하고 액상화 저항력은 증가하지 않았다. 이와 같은 실내시험결과를 진동 중에 발생하는 간극수압 변화와 흙의 강성저하를 고려할 수 있는 유효응력모델인 UBCSAND모델에 적용하였으며, 최초 전단하중에서 발생하는 간극수압비에 따라 구성모델의 액상화 저항력을 결정하였다. 이 구성모델을 이용하여 재액상화현상을 연구한 원심모형실험의 결과를 예측하였으며, 예측치와 서로 비교하였다. 국내에서도 일본과 가까운 남부지역에서는 약한 지진이지만 자주 발생하고 있는 시점에서 이와 같은 유효응력모델을 이용한 재액상화 현상에 관한 연구가 절실히 요구되어진다.

Keywords : Centrifuge test, Rliquefaction, Simple shear, UBCSAND

1. 서 론

최근 국내에서 건설되고 있는 대부분의 장대교량 및

초고층 구조물은 강진에도 잘 견딜수 있도록 설계되고 있다. 교각을 비롯한 철근 콘크리트 구조물의 강도를 향상시키거나 댐퍼를 설치하여 지진으로 인한 충격을

¹ 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사후 연구원(Member, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., park1059@hanmail.net)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

감소하도록 설계하였다. 하지만 교각을 지탱하고 있는 기초 부분은 대부분 암반 근처까지 기늘고 긴 말뚝으로 구성되었으며, 축 방향으로 하중을 받고 있는 이 말뚝은 주위의 흙으로부터 수평방향의 지지력을 얻고 있다. 따라서 교각 주위의 흙이 지진으로 액상화될 경우에는 말뚝이 수평 지지력을 상실하여 휨으로 인한 많은 파괴가 발생하였다(Bhattacharya et al., 2004). 한편 교각과 상판이 강한 지진에 견딜 수 있게 설계되어 있다하더라도 이것을 지지하고 있는 지반이 액상화되면 교각은 더 이상 지탱하지 못하고 기울어지며, 그 결과로 상판이 붕괴된 사례(1995년 일본 고베지진)도 있다. 1989년 미국 캘리포니아 Loma Prieta 지진시에는 62명의 사망자가 발생하였으며, 무엇보다도 큰 피해는 느슨하고 포화된 사질 토 위에 위치한 건물과 가옥들이 지진파의 증폭으로 인한 구조물 피해 및 액상화로 인한 건물 기초의 지지력 상실로 대부분 파괴되었다.

국내의 협소한 토지사정으로 최근 매립지가 지속적으로 늘어나고 있으며, 국제 물류량의 증가로 인한 항만 증설공사(예: 부산 신항만)와 기술발달로 인한 대형 해상교량건설(예: 서해대교, 광안대교, 인천대교, 거가대교 등)도 점점 늘어나고 있다. 이와 같은 해상에 위치한 항만 및 교량구조물은 지진 뿐만 아니라 유사한 반복하중에 항상 노출되어 있다. 따라서 해안 근처나 일본과 인접한 지역에서 건설되고 있는 국내 지반구조물도 앞서 언급한 해외 사례와 같은 유사한 피해가 우려된다. 국내에서도 작은 지진이지만 자주 발생하는 상황을 고려해 볼 때 지진이 발생한 해안 및 강과 인접한 지역에서 다시 지진이 발생할 경우에 포화된 사면이 어떻게 거동하는지를 연구할 필요성이 있다. 따라서 본 논문에서는 연이은 지진으로 인한 지반의 변위와 간극수압상승을 예측하기 위하여, 두 차례의 연이은 지진 입력파를 가한 사면을 가진 원심모형실험을 실시하였으며 이 결과를 유효응력모델을 이용하여 해석하였다.

2. 재액상화현상에 관한 연구

액상화는 지진시에 발생하는 반복되는 전단하중으로 포화된 지반의 강성과 강도저하에 따른 유효응력의 상실을 의미한다. 이와 같은 현상은 반복하중에 따른 흙입자의 체적감소에 따른 비배수시의 입자사이에 존재하는 물의 구속압 증가로 발생한다. 1964년 일본 니이가타현과 미국 알래스카 지진에서 액상화와 관련된 많은

피해가 발생한 이후 일본과 북미지역에서는 액상화에 대한 광범위한 연구가 수행되었다. 그 결과 액상화는 지반의 상대밀도, 유효구속압, 지진강도와 직접적인 관계가 있는 것으로 나타났으며, 일부는 지반이 과거에 겪은 전단변형률과도 관계가 있는 것으로 보고되었다(Finn et al., 1970). Yasuda와 Tohno(1988)는 일본 아키타와 아오모리지역에서 한달 간격으로 지진이 발생한 지역을 답사하여 이전보다 작은 지진에도 다시 액상화가 발생하였음을 보여 주었다. 이와 같은 재액상화현상은 최초 지진에서 겪은 전단변형률의 크기, 잔류변형률, 초기 액상화에 따른 상대밀도 증가, 배수조건 등과 관계가 된다. 과거에 재액상화가 발생한 일본과 미국 네 개 지역을 조사한 Ohara 등(1992)에 의하면 강한 지진으로 액상화된 지반이 다음에 발생하는 약한 지진에도 액상화가 발생한 것으로 알려졌다. Oda 등(2001)은 이와 같은 현상을 액상화로 인하여 흙의 입자구조가 매우 불안정한 형태로 변하기 때문이라고 설명하였다.

1970년대 캐나다에 있는 University of British Columbia (UBC)의 Finn교수는 직접단순전단시험기를 이용하여 사전에 대변형을 겪은 시료는 액상화시의 상당한 강도 저하를 보였으나, 사전에 발생한 미소변형은 오히려 액상화 강도를 증가시키는 결과를 보였다(Finn et al., 1970). 일본의 Ishihara교수(Ishihara and Okada, 1982)는 삼축실험장비를 이용하여 이전에 겪은 지반의 변위이력을 고려한 재액상화 저항강도에 관한 연구를 수행하여, 사전전단변형률 정도와 전단방향이 중요한 변수임을 밝혔다.

Ohara 등(1992)은 1g 진동대시험을 수행하여 재액상화현상에 미치는 가속도크기, 진동시간, 사전전단변형률 크기의 영향을 연구하였다. 국내에서도 하익수와 김명모(2005)는 1g 진동대시험을 이용하여 재액상화 연구를 수행하였으며, 재액상화에 따른 하중 반복횟수의 감소를 모형지반의 입도특성인 유효입경과 균등계수 비(D_{10}/C_u)의 상관관계로 나타내었다. 한편 원심모형실험은 50배 또는 100배의 높은 중력 가속도장을 이용하여 실제 지반구조물과 유사한 거동을 재현할 수 있으나, 이를 이용한 재액상화 연구사례는 잘 보고되지 않았다. 이와 같은 원심모형실험은 실제 기록된 지진파나 가상의 지진가속도를 축소 제작된 원심모형에 입력하여 얻어진 결과를 이용하여 액상화 구성모델의 성능검증에 유용하게 사용될 수 있다(Arulanandan and Scott, 1993).

3. 액상화해석에 사용한 구성모델 및 검증과정

3.1 UBCSAND모델

액상화에 따른 지반의 변위해석에서 진동 중에 발생하는 지반강성의 감소는 지반구조물의 동적거동에 직접적인 영향을 미치나, 현재 실무에서 사용되는 전응력 해석 방법에는 이것이 잘 고려되고 있지 않다. 흙의 동적 구성 모델을 이용한 유효응력 해석방법은 진동 중에 발생하는 간극수압이나 변위계산에 더욱 적합하다. 따라서 본 논문에서는 완전탄소성 Mohr-Coulomb 모델을 지진과 같은 반복 재하조건에 적용하기 위하여 개발된 구성모델인 UBCSAND 모델(박성식 등, 2005)을 이용하였다. 이 모델은 지반공학용 상용프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)(Itasca, 2000)을 이용하여 사용자 정의모델로 구현되었으며, 두 개의 탄성변수와 네 개의 소성변수를 요구한다. 이들 변수는 해석지반 또는 실험 시료의 상대밀도를 이용하여 간편하게 구할 수 있다. 본 구성모델의 검증 및 해석과정은 그림 1에 나타나 있으며, 입력변수에 대한 자세한 사항은 부록을 참조하기 바란다. 박성식과 김영수(2006)는 UBCSAND 모델을 이용하여 지진 시의 포화된 수평 지반의 동적거동을 예측하였으며, 본 논문에서는 이 모델을 이용하여 원심모형실험에서 사면을 가진 사질토 지반의 재액상화현상을 해석하였다.

3.2 직접단순전단시험

UBCSAND 모델을 Fraser River 모래로 성형한 원심 모형실험을 예측하기 위하여, 동일한 모래를 사용한 실험

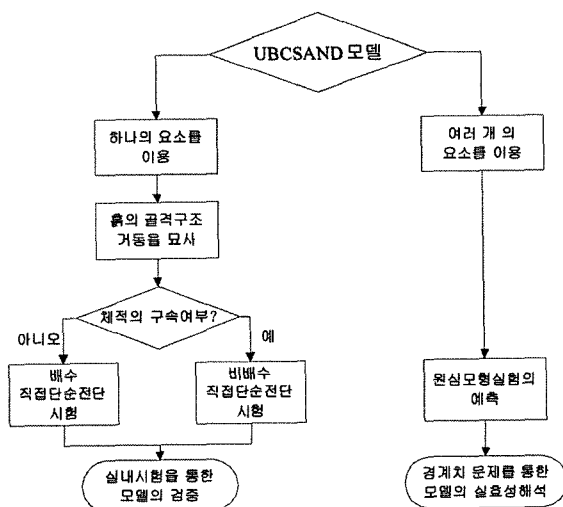


그림 1. UBCSAND 모델의 검증 및 해석과정

내시험결과를 이용하여 모델을 먼저 검증하였다. Peacock 과 Seed(1968) 그리고 Silver와 Seed(1971)에 의하면 직접단순전단시험 장비는 해안구조물에 있어서 파도에 의해 발생하는 하중과 지진시에 발생하는 하부 암반에서 지표면 위로 수직으로 전파(이동)되는 전단파에 의해 발생하는 하중을 잘 묘사할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 평면 변형률 조건하에서 지진으로 발생하는 전단하중을 잘 묘사할 수 있는 직접단순전단시험 결과를 이용하여 구성모델을 검증하였다. 그림 2는 본 실험에서 사용한 직접단순전단시험 장비와 하중변위 조건을 나타내고 있다.

시료는 Fraser River 모래를 이용하여 공기중 낙하법으로 준비하였으며, 압밀 후의 상대밀도는 약 40% 그리고 초기 수직방향 유효응력(σ'_{v0})은 100kPa를 가하였다. 실험은 1단계와 2단계로 두 차례의 동일한 0.1의 반복 전단응력비(CSR, Cyclic Stress Ratio)를 가하였다. 1단계에서는 각각의 시료에 사전에 정해진 네 가지(45%, 55%, 85%, 100%) 간극수압비(PPR, Pore Pressure Ratio = $(u - u_0) / \sigma'_{v0}$ 여기서 u 와 u_0 는 현재 및 초기 간극수압)까지 반복 전단하중을 가하였으며, 그 이후에 압밀을 시킨 후 다시 2단계 하중을 가하였다. 2단계 실험에서는 모든 시료에 액상화를 의미하는 간극수압비가 100%될 때까지 반복 전단하중을 가하였다. 표 1은 반복 직접단

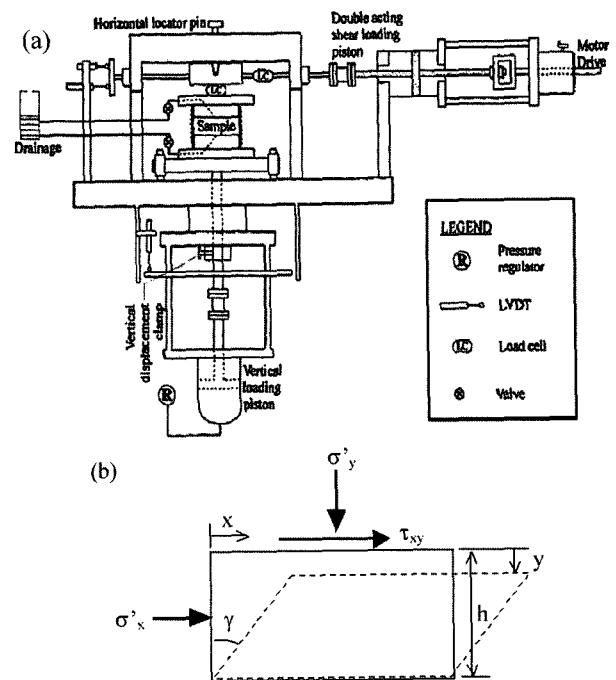


그림 2. (a) University of British Columbia 직접단순전단시험 장비와 (b) 전단변형 조건

표 1. 직접단순전단시험조건 및 결과

σ'_{vo}	CSR	1단계 실험			2단계 실험		
		D _{rc} (%)	PPR (%)	No. of Cycles	D _{rc} (%)	PPR (%)	No. of Cycles
100	0.1	41	45	5	42	100	27
100	0.1	40	55	5	41	100	25
100	0.1	41	85	8	46	100	27
100	0.1	40	100	6	52	100	6

순전단시험의 조건과 결과를 나타내고 있다.

3.3 UBCSAND모델의 검증

UBCSAND모델의 계산치를 반복 직접단순전단시험 결과와 서로 비교하였다. 표 1에 나타난 1단계 실험에서는 모두 유사한 상대밀도를 가진 경우이기 때문에 간극수압비가 100% 발생한 경우만을 검증하였다. 그림 3(a)는 반복 전단응력비가 0.1일 경우의 유효응력도, 3(b)는 응력

과 변형률관계, 3(c)는 간극수압비와 재하횟수의 계산치와 실험치를 각각 비교하였다. 굵은 실선은 실험치이며 가는 실선은 계산치이다. 수치해석에 사용한 입력변수는 표 2에 나타나 있다. 네번째 이후 재하시부터 점차적으로 미소변형에서 대변형으로 이동하는 현상을 보이며, 이와 같은 현상은 전단에 따른 소성변형률을 계산하는 소성전단계수의 크기에 따라 수치해석적으로 고려하였다. 여섯 번째 반복 재하시에 액상화가 발생함을 알 수 있으며, 실험치와 해석치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 4는 Fraser River 모래의 액상화 저항강도를 각각의 반복 전단응력비와 그에 대한 액상화 발생 재하횟수로 나타내었으며, 실험치와 계산치가 서로 잘 일치하였다.

1단계 실험에서 완전한 액상화가 발생하지 않은 경우(즉, PPR=45%, 55%, 85%)는 흙골격 구조가 조밀한 구조로 재배치됨으로, 2단계 실험에서 액상화에 도달하기까지의 재하횟수는 3배 이상 증가하였다. 하지만 1단계 실험에서 액상화가 발생했을 경우(즉, PPR=100%)에는 2단계에서도 비슷한 재하횟수에서 액상화가 발생함을 알 수 있었다. Finn 등(1970)도 이와 유사한 결과를 도출하였다.

표 2. 1단계 직접단순전단시험 해석에 사용된 UBCSAND모델의 입력 변수

k_G^e	α	k_G^p	ϕ_{cv}	ϕ_r	R_t
771	0.75	179	33	34	0.92

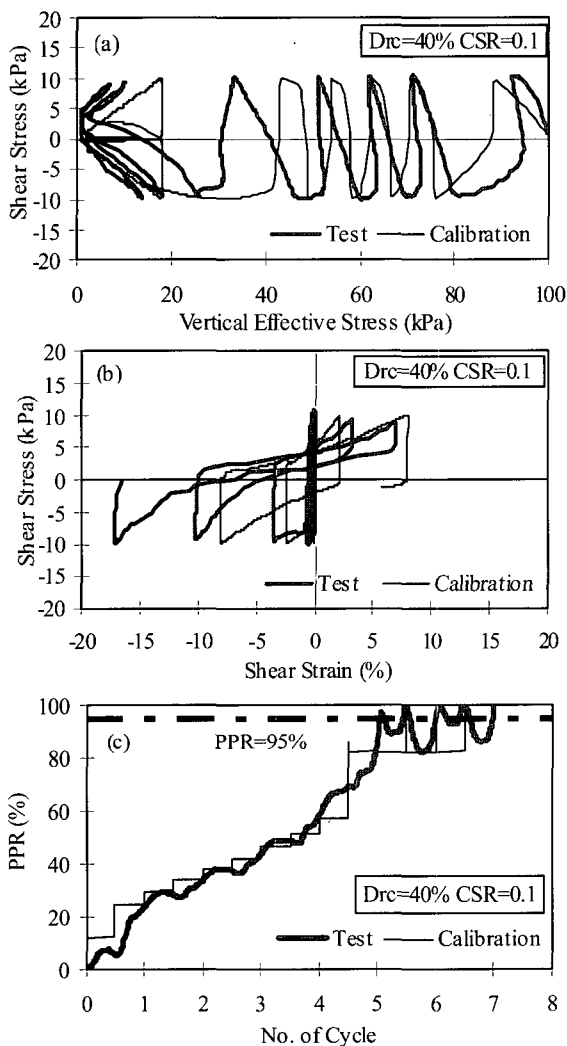


그림 3. Fraser River 모래의 (a)유효응력도, (b)응력과 변형률, (c)간극수압비와 재하횟수

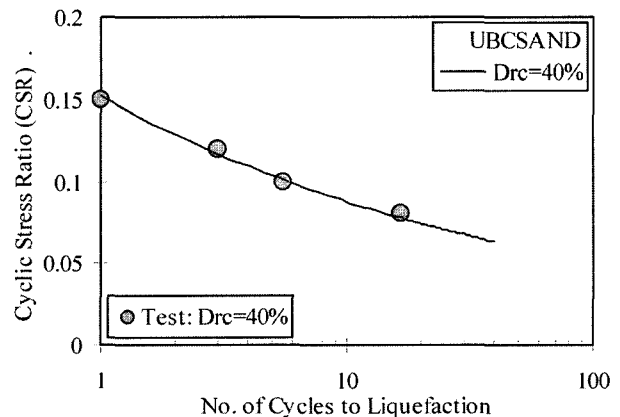


그림 4. Fraser River 모래의 액상화저항강도

그림 5의 원형 표시는 1, 2단계 실험을 통해서 증가된 재하횟수를 나타냈으며, 1단계 실험에서 사용한 간극수압비에 해당하는 2단계 실험의 액상화가 발생하기까지 증가된 재하횟수를 의미한다. 즉 과거에 반복 전단변형을 받은 시료가 다시 전단변형을 받아 액상화가 발생하기까지 반복해야 되는 전단하중횟수를 세로축에 나타내었다.

PPR가 100% 보다 작을 경우(즉, PPR=45%, 55%, 85%)에 1단계 실험 후에 실험전과 유사한 상대밀도를 나타내므로 2단계 실험에 해당하는 UBCSAND모델에서 1단계와 동일한 입력변수를 사용해야 한다. 하지만 연이은 반복재하에 따라 입자 배열상태가 액상화에 저항력이 큰 입자 구조로 조정된 것을 고려하여 1단계와 다른 입력변수를 사용하였다. 따라서 입력변수를 조절하여 UBCSAND 모델을 2단계 실험에서 얻어진 액상화발생 재하횟수와 일치시켰다. 이 입력변수는 PPR가 45%에서 85%사이에서는 같은 값을 가지며, 입력변수는 표 3과 같다. 그 이외의 범위에서는 입력변수가 PPR에 따라서 변하는 관계를 가진다. 1단계에서 액상화가 발생한 경우(즉, PPR=100%)에는 액상화 이후 압밀로 인한 상대밀도가 증가하나, 2단계 실험에서 액상화 저항력은 크게 변화가 없으므로 동일한 입력변수를 사용하였다. 결과적으로 재액상화현상을 재현한 2단계 실험에서 UBCSAND모델은 그림 5의 실선과 같이 이전에 발생한 PPR에 따라 증가된 액상화 재하횟수를 고려하였다.

표 3. 2단계 직접단순전단시험 해석에 사용된 UBCSAND모델의 입력 변수(45% < PPR < 85%일때)

k_G^e	α	k_G^d	ϕ_{cv}	ϕ_f	R_f
1010	0.75	624	33	38	0.92

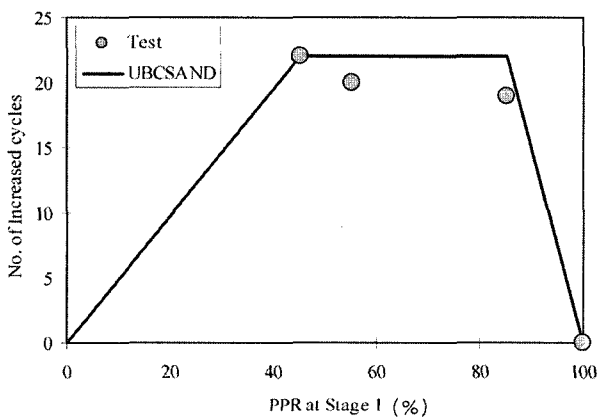


그림 5. 재액상화시에 증가되는 Fraser River 모래의 액상화저항강도

4. 원심모형실험 및 수치해석

4.1 원심모형실험개요

원심모형실험은 저자를 비롯한 UBC액상화 연구팀이 설계하였으며, 실험은 캐나다 동부에 위치한 Centre for Cold Ocean Research(C-CORE)라는 연구기관에서 실시하였다. 그림 6은 사면(기울기 2:1)을 가진 두 층으로 구성된 모형지반의 단면을 나타내며, 아래층은 상대밀도 80%의 조밀한 Fraser River 모래이며 위층은 상대밀도 40%의 느슨한 Fraser River 모래로 구성되었다. 그리고 가장 아랫부분은 모형지반의 포화를 용이하게 하기 위하여 입경이 굵은 모래를 사용하였다. 원심가속도는 70g를 가했으며 Rigid steel 박스안에 그림 6과 같은 사면을 가진 원심모형지반을 형성하였다. 박스의 내부 크기는 원심가속도를 가한 실물크기로 길이 52m, 폭 20m, 높이 40m이며, 모형사면의 정상부는 24m 높이로 조성하였으며 상재하중은 가하지 않았다. 간극수로 물을 사용했을 경우에 나타나는 과잉간극수압발생 및 소산의 문제점을 고려하여 물보다 35배 점성이 있는 유체를 사용하였다. 원심모형실험에서 사용된 모델과 실물크기 사이의 상사율을 표 4에 정리하였으며, 동적 원심모형 실험에서 발생하는 과잉간극수압의 소산과 관련된 시간의 상사율은 $1/N^2$ (N은 원심가속도)이다. 지진시의 사면의 거동을 조사하기 위하여 설치된 가속도계(그림에서 A로 표시)와 간극수압계(그림에서 P로 표시)의 위치가 그림 6에 나타나 있다. 각각 9개씩 설치하였으며, 1번, 2번, 3번은 사면에서 가장 먼 위치에 깊이에 따라 설치되었으며 각각의 측정계기는 같은 깊이에 서로 근

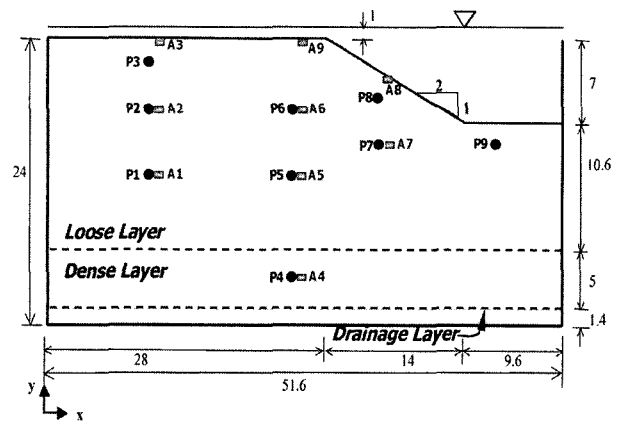


그림 6. 실물크기의 모형지반과 계측기기 배치도(단위는 m이며, 영문자 A는 가속도계를 의미하고 영문자 P는 간극수압계를 의미한다)

표 4. 실물크기와 원심력장하의 모델사이의 상사율

요소	실물크기	N배 원심력장하의 모델
가속도	1	N
길이	1	1/N
면적	1	1/N ²
체적	1	1/N ³
밀도	1	1
질량	1	1/N ³
힘	1	1/N ²
응력	1	1
변형률	1	1
변위	1	1/N
시간	1	1/N
시간(diffusion 현상)	1	1/N ²
주파수	1	N

접하도록 설치하였다. 4번 계기만 아래의 조밀한 모래 지반에 설치되었다. 7번, 8번, 9번은 사면주위의 변화를 계측하기 위하여 설치되었다.

4.2 지반의 물성치와 지진입력과

Fraser River 모래와 굵은 모래의 입도분포곡선은 그림 7과 같다. 위층의 느슨한 Fraser River 모래와 아래층의 조밀한 모래 지반의 투수계수는 각각 $4 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ 와 $3 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$ 이며, 이 값을 수치해석에 사용하였다. 그림 8은 모형지반의 하부에 입력할 1차 지진(A475 Event)과 2차 지진(A2475 Event)의 입력가속도 시간이력을 나타내고 있으며, 진동지속시간은 약 40초이다. 본 실험에서는 평지반이 아닌 사면의 재액상화실험을 위하여 초기의 큰 지진으로부터 사면의 파괴를 방지할 필요가 있으므로, 최대가속도 0.1g정도의 1차 지진을 가한 후에 최

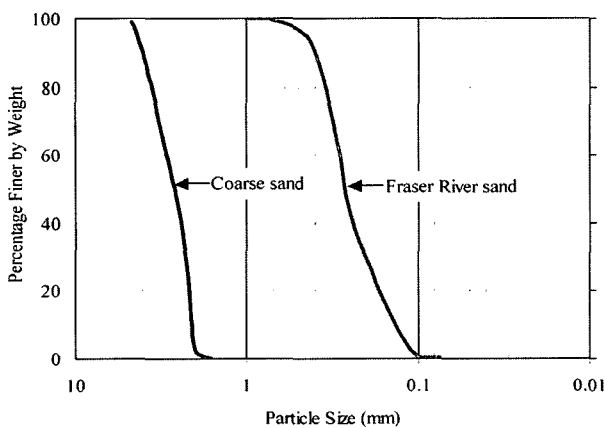


그림 7. Fraser River 모래와 배수층에 사용된 굵은 모래의 입도분포곡선

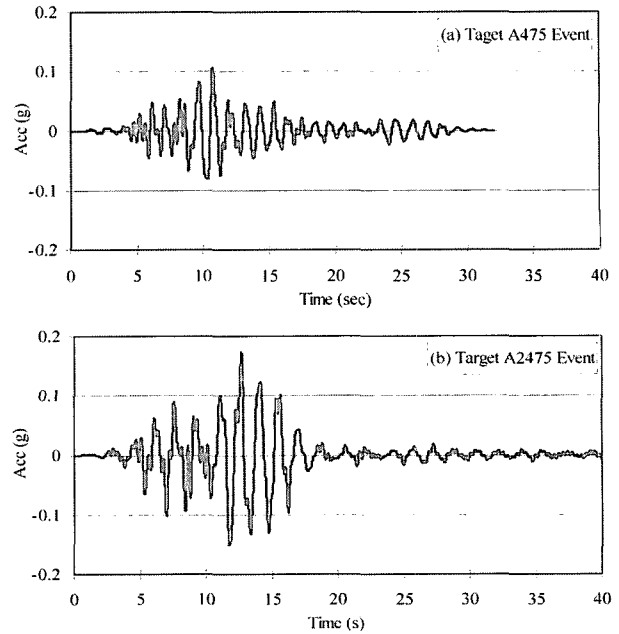


그림 8. (a) 1차 지진입력가속도와 (b) 2차 지진입력가속도

대가속도 0.2g인 2차 지진을 가하였다. 1차 지진입력 후에 발생한 과잉간극수압의 소산을 허용하고 모형지반을 압밀시킨 후에 다시 2차 지진을 가하였다.

4.3 원심모형실험과 수치해석결과 비교

수치해석에 사용한 FLAC모델은 그림 9에 나타나 있다. 실험토조의 거친 바닥면 및 양쪽 측면의 특성을 모델링하기 위하여, 경계조건으로 토조의 좌우 및 하단의 x축, y축방향을 고정시켰다. 수치해석은 먼저 1차 지진입력파를 이용하여 해석하였으며, 실험결과처럼 파괴는 발생하지 않았다. 그러나 간극수압계를 통해서 계측된 값에 의하면 P2 및 P3 깊이까지 액상화가 발생하였음을 알 수 있었다. UBCSAND모델은 1차 지진입력시에 발생하는 최대 간극수압비를 계속 계산하였으며, 이와 동시에 각각의 요소에서 액상화 이후에 발생하는 체적변

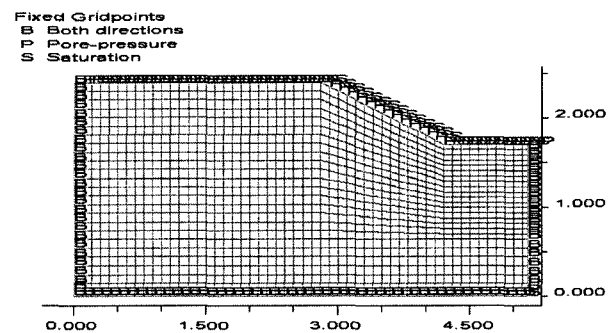


그림 9. FLAC모델과 경계조건(가로 세로축 스케일 x10m)

화를 계속 점검하였다. UBCSAND모형을 이용한 모형 실험해석에서 발생한 최대 간극수압비는 그림 10에 나

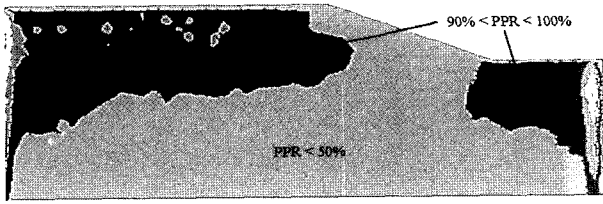


그림 10. 1차 지진중에 발생한 최대 간극수압비(PPR)

타나 있으며, 사면근처를 제외한 지표면과 가까운 부분에서 계산된 상당히 높은 간극수압비를 통해서 액상화가 발생하였음을 알 수 있다. 모형실험과 같이 구성모델은 과잉간극수압이 소산되도록 하였으며 이로 인한 압밀현상으로 모든 요소의 액상화에 대한 저항력을 그림 5와 같이 증가시켰다. 그 이후에 2차 지진가속도를 가하였다. 본 논문에서는 2차 지진입력으로 인한 실험결과에 중점을 두고 수치해석결과와 서로 비교하였으며, 가속도와 간극수압비를 그림 11과 12에 각각 비교하였다.

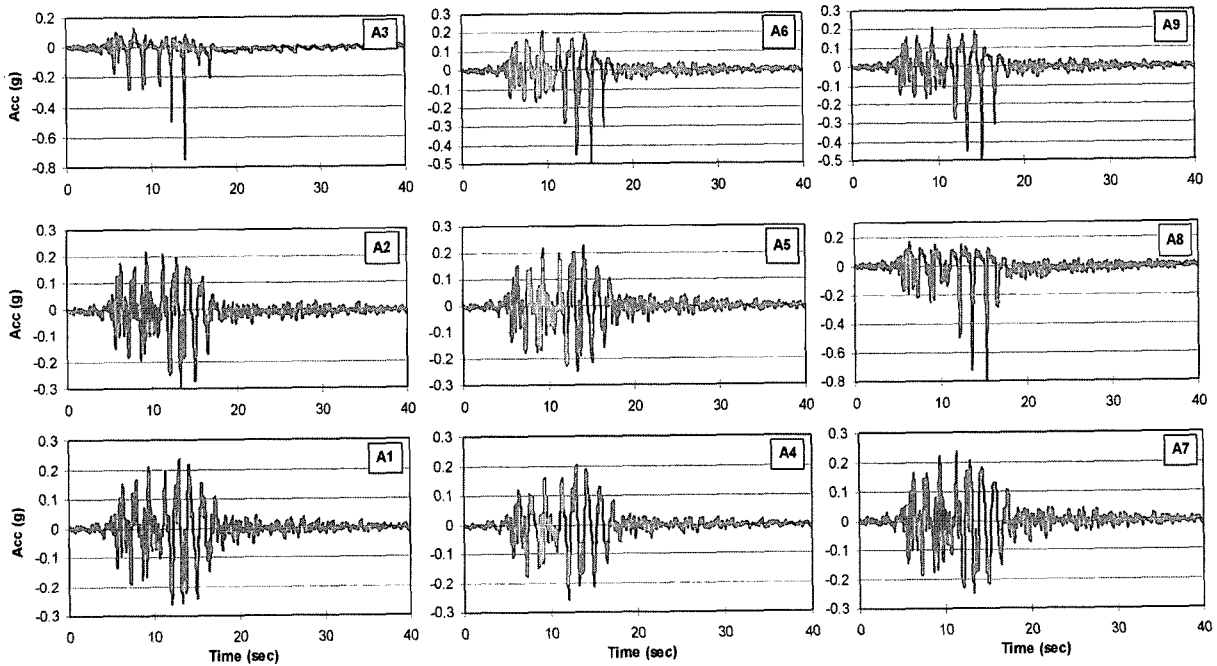


그림 11. (a) 계측된 가속도이력

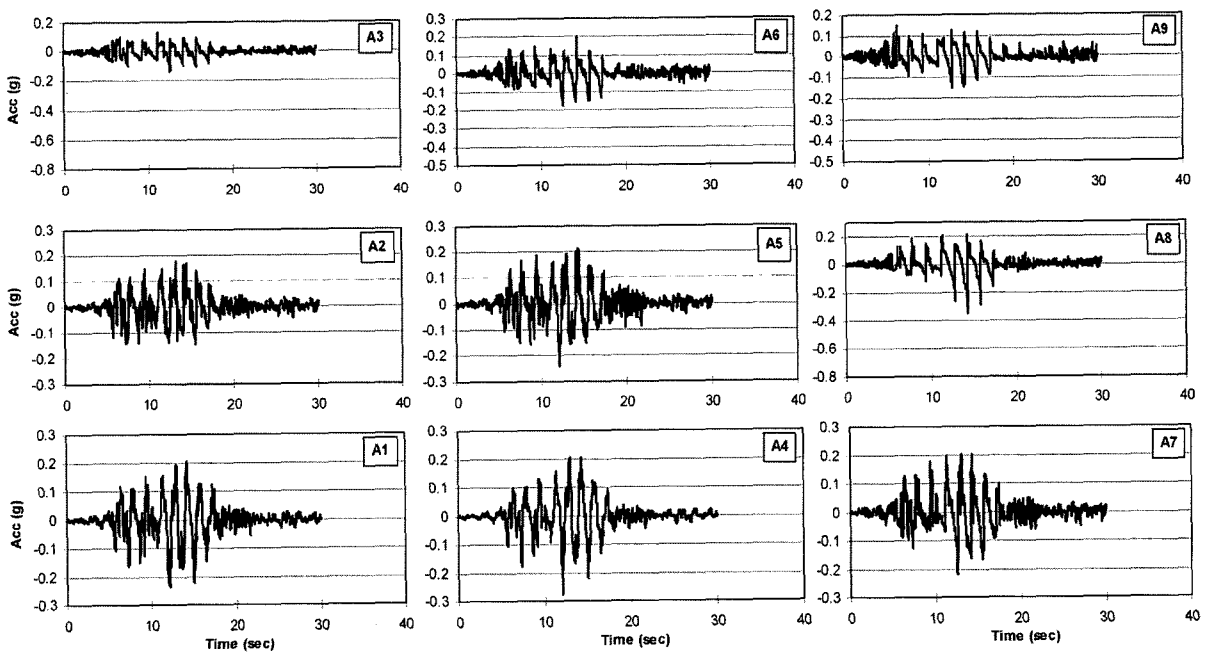


그림 11. (b) 예측된 가속도이력

2차 지진실험에 대한 수치해석에서 사용한 입력변수를 위층과 아래층으로 나누어 표 5에 정리하였다. 그림 11(a)와 11(b)에 나타난 것처럼 전반적으로 UBCSAND 모델은 계측된 가속도를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 사면에서 먼 지표면 근처에 위치한 A3에서 계측된 가속도는 액상화 현상으로 인하여 아래쪽에 설치된 A1 보다도 시간이력에 따라 가속도가 훨씬 빨리 감소됨을 알 수 있다. 계산된 가속도도 이와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 1차 지진에서 액상화된 지역에 다시 액상화가 발생하였으며, 재액상화현상을 확인할 수 있었다. 진동이 진행됨에 따라 모형지반에서 과잉간극수압이 점점 증가하고 유효응력과 지반의 강성이 감소하여 마침내 지반이 액상화됨으로 아래쪽에서 입력되어 위쪽으로 전달되는 가속도가 감소되는 현상이 나타난다. 그림 12는 계측 및 예측된 과잉간극수압을 나타내고 있다. P3, P6, P9은 간극수압계의 고장으로 계측이 불가능하였으며, 예측된 결과만을 보이고 있다. 그림에서 수평 점선은 설계된 간극수압계의 위치를 기준으로 했을 때 초기 유효응력상태를 나타낸다. 하지만 실제 실험

에서 매설된 높이와 설계된 위치와는 약간의 차이가 있었다. 한편 과잉간극수압이 이 점선에 도달하면 액상화를 의미한다. 굵은 실선은 계측치이며 가는 실선은 예측치이다. 두 값이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 12에서 P2와 P3은 초기 유효응력에 해당하는 수평점선에 닿아 있으므로 액상화가 발생하였으나 P1은 아직 액상화가 발생하지 않았다. 1차 지진입력결과와 유사하게 지반의 윗부분에서 액상화가 먼저 발생한 후에 점차적으로 아래쪽으로 이동하는 경향(Florin and Ivanov, 1961)을 보이며, 충분한 진동이 가해지지 않았으므로 가장 깊은 P1에서는 액상화가 관찰되지 않았다.

그림 13(a)는 건조상태에서 원심모형을 성형한 모습과 포화를 시킨 후의 지표면상태(사각형 표시)를 나타냈으며, 서로 차이가 있음을 알 수 있다. 모형지반을 성형한 후 포화시키는 과정에서 다소 어려움이 있었으며 이로 인하여 설계한 지표면과 다소 차이가 발생하였다. 2차 지진 후에는 1~2m정도의 변위가 발생하였으며 그림 13(a)에서 x로 표시하였다. 그림 13(b)는 UBCSAND 모델이 계산한 변위를 나타내고 있으며, 최대변위는 약 3.2m이다. 계산된 변위가 계측치보다 약간 큰 경향을 보이며 변형형태 또한 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 위에서 설명한 것처럼 모형지반의 포화과정에서 발생한 지반의 변형때문으로 판단된다. 이와 같이 유효응력모델은 진동 중에 발생하는 간극수압을 계산하

표 5. 2차 지진입력 원심모형실험에 사용된 UBCSAND모델의 입력변수

단면	k_G^e	α	k_G^o	ϕ_{cv}	ϕ_f	R_f
위층	1010	0.75	624	33	38	0.92
아래층	1223	0.75	2104	33	40	0.92

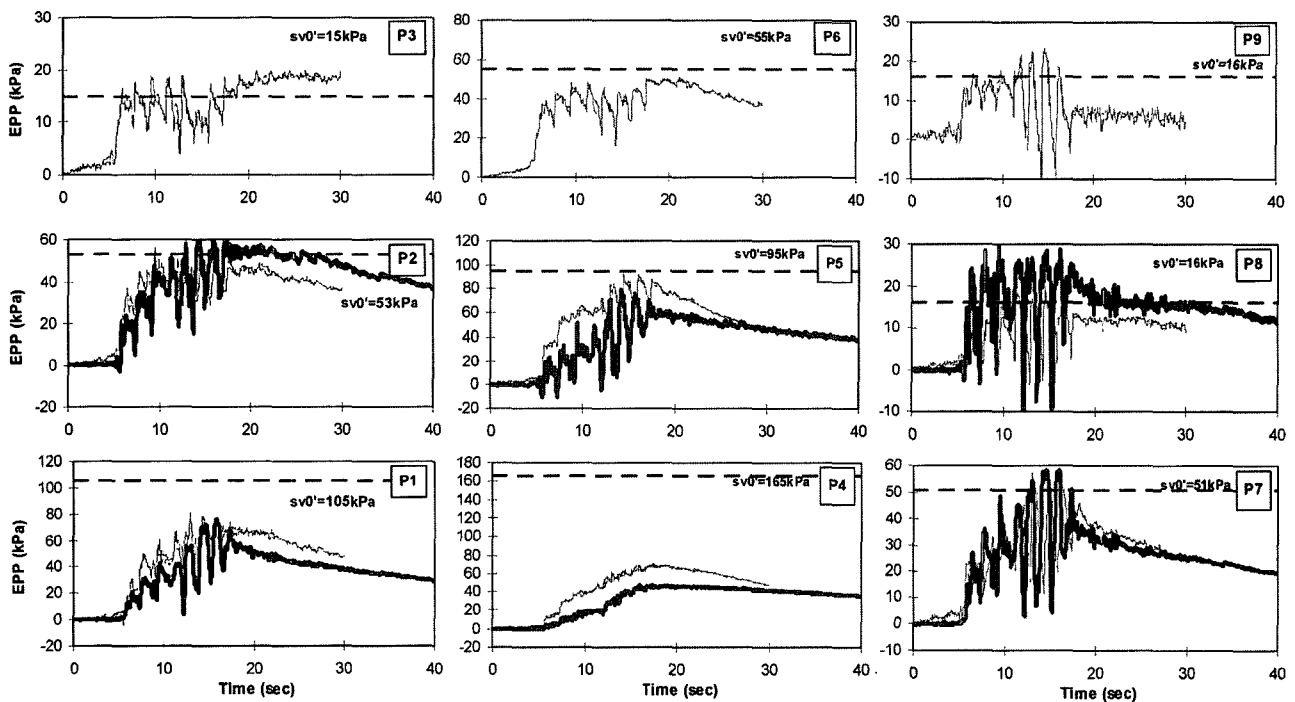


그림 12. 계측 및 예측된 과잉간극수압(굵은 선은 계측치, 가는 선은 예측치)

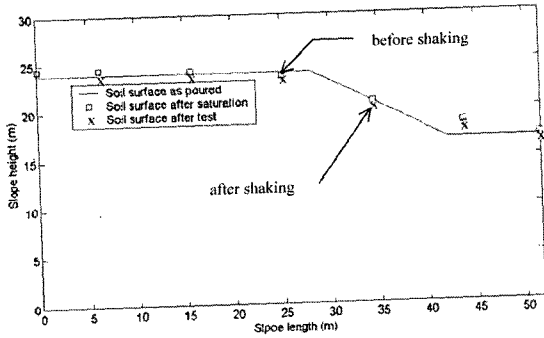


그림 13. (a) 원심모형실험에서 예측된 변위(사각형 표시는 실험 전, x 표시는 실험 후를 나타냄)

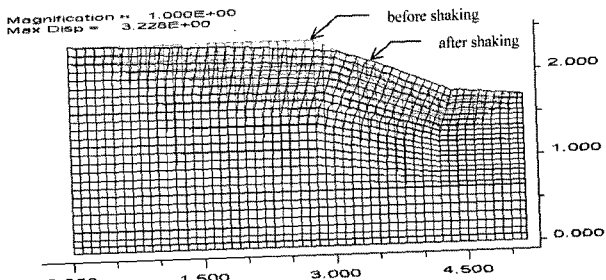


그림 13. (b) UBCSAND모형을 이용하여 계산된 변위(가로 세로축 스케일 x10m)

고 그에 따른 지반 강성의 감소를 고려할 수 있다. 따라서 UBCSAND모델과 같은 유효응력모델을 이용하여 액상화에 따른 지반의 변위를 예측함으로써 과도한 변위로 인한 지반구조물의 피해를 미연에 방지할 수 있다.

본 논문에서 실시한 실내시험과 원심모형실험에 사용한 모래는 액상화가 발생가능한 현장지역에서 직접 채취하여 건조시킨후 채분석하여 사용하였다. Trifunac와 Todorovska(2004)는 미국에서 발생한 동일한 진도 6.4를 가진 1971년 San Fernando지진과 1994년 Northridge지진으로 동일한 피해가 발생한 로스앤젤레스지역 현지조사에서 그 원인을 그 지역의 특수한 지질학적 특성과 흙때문이라 결론지었다. 따라서 실제 지반구조물의 내진설계에 과거 지진이력을 모두 고려하기 어려운 상황에서 본 논문처럼 현장시료를 이용한 실내시험과 원심모형실험이 현장지반의 거동 예측에 큰 도움이 될 수 있으며, 혹은 현장의 교란되지 않은 시료를 이용한 실내시험도 대형 프로젝트에서는 적절한 방법이 될 수 있다.

5. 결론

액상화 현상은 지진뿐만 아니라 유사반복하중으로 발생할 수 있으며, 일반적으로 포화된 사질토지반과 주

로 관계되며 강이나 해안지역에 위치한 대형 토목구조물에게 특히 중요한 문제이다. 과거에는 주로 액상화 발생 메카니즘과 발생 유무와 관련된 많은 연구가 진행되었으나, 최근에 액상화로 인한 지반의 변위 예측과 관련된 연구가 많이 수행되었다. 만약 액상화가 발생한 지역에서 또다시 액상화가 발생한다면 그에 따른 지반의 변위 계산은 기존 구조물이나 새로운 지반구조물의 안전 평가에 아주 중요한 문제가 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 변위를 예측할 수 있는 수치해석기법을 이용하여 재액상화에 따른 사면을 포함한 지반의 간극수압발생과 변위계산에 관한 연구를 수행하였다. 저자가 개발한 UBCSAND모델은 재액상화해석에 적용가능하였으며, 실내시험과 원심모형실험결과를 결합한 재액상화연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반복 직접단순전단시험을 통해서 과거 전단변형이력이 다음에 발생하는 전단하중에 따른 지반의 액상화 현상에 크게 영향을 미치는 것으로 재확인되었다.
- (2) 반복적으로 지진이 발생하는 경우 지반의 재액상화에 대한 저항력은 이전의 반복 전단하중으로 발생한 간극수압비에 따라 액상화발생재하횟수가 유사하거나 일반적으로 증가됨을 알 수 있었다.
- (3) 연속적으로 가해지는 지진 입력파를 이용한 원심모형실험에서 사면근처를 제외한 평지반에서 재액상화현상을 확인할 수 있었다. 한편 액상화현상은 지표면에서 먼저 발생하여 점차적으로 아래쪽으로 이동하였으며, 가장 아래부분이 액상화되기 위해서는 상당한 크기의 입력가속도가 요구됨을 알 수 있었다.
- (4) 과거 지진이나 반복하중에 의한 지반의 전단변형이력은 대부분 알 수 없거나 예측할 수 없는 경우가 많다. 따라서 현장 흙을 사용한 실내시험과 원심모형실험으로 검증된 수치해석방법은 지진시의 실제 현장지반의 액상화거동예측에 유용한 도구가 될 수 있다.

감사의 글

저자는 실내시험과 원심모형실험 자료의 사용을 허락해 주신 박사과정 지도교수이자 University of British Columbia의 명예교수인 Peter M. Byrne교수님께 감사드립니다. 이 논문은 부분적으로 2006년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었습니다.

UBCSAND모델의 탄성변수

탄성변형 계산에는 탄성전단계수 G와 탄성체적계수 B가 필요하다. 탄성전단계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = k_G^e \cdot P_a \cdot (\sigma'_m / P_a)^{0.5} \quad (1)$$

여기서, P_a 는 대기압 (=100 kPa); σ'_m 은 평균응력; k_G^e 는 탄성전단정수로 수정 표준관입시험치 $(N_1)_{60}$ 와 상대 밀도 D_r 관계식을 이용하여, $21.7 \cdot (20) \cdot (F \cdot D_r^2)^{1/3}$ 과 같이 표현할 수 있다. 여기서, F는 모래의 aging에 따라 35에서 55사이의 값을 가지는 상수이며, 본 연구에서는 실내시험에서 재성형된 모래일 경우에 35를 사용하였다. 탄성체적계수 B는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B = \alpha \cdot G \quad (2)$$

여기서, $\alpha=(2(1+\nu)/(1-2\nu)/3)$ 는 포아송비(ν)와 관계되며, 본 논문에서는 상대밀도에 관계없이 α 를 0.75로 가정하였다.

UBCSAND모델의 소성변수

네 가지 소성변수는 파괴마찰각 ϕ_f , Constant volume 마찰각 ϕ_{cv} , 소성전단계수 G^p , 그리고 파괴비 R_f 이다. 첫째, 파괴마찰각은 구성모델에서 모래의 파괴상태를 설정하는데 사용되며, 일반적으로 모래의 상대밀도에 따라 증가한다. 둘째, Constant volume마찰각은 모래의 전단변형으로 인한 체적변형의 경계(즉, 체적감소 또는 증가)를 나타내며, 모래종류, 상대밀도, 유효응력 크기에 관계없이 일반적으로 32-33도의 값을 가진다. 셋째, 소성전단계수 G^p 는 아래의 식 (3)과 같으며 초기 소성전단계수 G_i^p 는 식 (1)와 같은 형태로서 탄성전단정수대신 소성전단정수 k_G^p 를 사용하였다. k_G^p 는 k_G^e 와 D_r 을 이용하여 $k_G^p \approx 4 \cdot (D_r^4) \cdot k_G^e + 100$ 과 같이 나타낼 수 있다. 넷째, 식 (3)의 R_f 는 파괴비를 나타내며, 상대밀도에 따라 0.8에서 0.95사이의 값을 가진다.

$$G^p = G_i^p \cdot \left(1 - \frac{\eta}{\eta_f} R_f\right)^2 \quad (3)$$

1. 박성식, 김영수 (2006), “유효응력모델을 이용한 동적 원심모형실험의 수치해석”, 한국 지반공학회 논문집, 제22권, 제1호, pp.25-34.
2. 박성식, 김영수, Byrne, P.M., 김대만 (2005), “액상화 해석을 위한 간단한 구성모델”, 한국 지반공학회 논문집, 제21권, 제8호, pp.27-35.
3. 하익수, 김명모 (2005), “1-g 진동대시험을 이용한 포화된 모래지반의 재액상화 강도 특성 평가”, 한국 지반공학회 논문집, 제21권, 제4호, pp.65-70.
4. Arulanandan, K. and Scott, R.F. (1993), “Verification of numerical procedures for the analysis of soil liquefaction problems”, *Proceedings of the International Conference on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems*, Vols. 1 and 2, Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
5. Bhattacharya, S., Madabhushi, S.P.G. and Bolton, M.D. (2004), “An alternative mechanism of pile failure in liquefiable deposits during earthquakes”, *Geotechnique*, Vol.54, No.3, pp.203-213.
6. Finn, W. D. L., Bransby, P.L., and Pickering, D.J. (1970), “Effect of strain history on liquefaction of sand”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 96, SM6, pp.1917-1934.
7. Florin, V. A. and Ivanov, P. L. (1961), “Liquefaction of saturated sandy soils”, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.107-111.
8. Ishihara, K. and Okada, S. (1982), “Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand”, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 3, pp.109-125.
9. Itasca (2000), Fast lagrangian analysis of continua (FLAC), Version 4, User's Guide. Itasca Consulting Group, Inc., Thrasher Square East, 708 South Third Street, Suite 310, Minneapolis, Minnesota.
10. Oda, M., Kawamoto, K., Suzuki, K., Fujimori, H. and Sato, M. (2001), “Microstructural interpretation on reliquefaction of saturated granular soils under cyclic loading”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.5, pp.416-423.
11. Ohara, S., Yamamoto, T. and Yurino, H. (1992), “Experimental study on reliquefaction potential of saturated sand deposit”, *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.1425-1430.
12. Peacock, W.H. and Seed, H.B. (1968), “Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.94, No.SM3, pp.689-708.
13. Silver, M.L. and Seed, H.B. (1971), “Volume changes in sands during cyclic loading”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.97, No.SM9, pp.1171-1182.
14. Trifunac, M.D. and Todorovska, M.I. (2004), “1971 Sand Fernando and 1994 Northridge, California, earthquakes: did the zones with severely damaged buildings reoccur?”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.24, pp.225-239.
15. Yasuda, S. and Tohno, I. (1988), “Sites of reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake”, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.2, pp.61-72.

(접수일자 2006. 10. 30, 심사완료일 2006. 12. 15)