

반복재하에 의한 미액상화 재성형 풍화토의 변형 특성

Deformation Characteristics of Non-liquefied, Reconstituted, Weathered Residual Soils due to the Cyclic Loading

최 연 수¹ Choi, Yeon-Su

윤 찬 영² Yune, Chan-Young

장 의 룡³ Jang, Eui-Ryong

정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

This paper deals with development and dissipation of excess pore pressure induced by the cyclic load. Cyclic triaxial tests on reconstituted samples of weathered residual soils, which were widely used as construction materials in Korea, were performed. Test results showed that excess pore pressures developed under undrained condition increased with the increase of cyclic loads and confining pressures. And a new concept based on modified excess pore pressure ratio (*MEPPR*) was proposed for simply estimating excess pore pressures in terms of the number of cyclic load, irrespective of cyclic loads and confining pressures. Also, it was proposed that excess pore pressure ratio (*EPPR*) could be effectively utilized to estimate volumetric strains during dissipation which decreased as confining pressures increased. Consequently, concept and method to effectively estimate settlements under non-liquefied condition, induced by dynamic loads such as earthquake loads were evaluated based on laboratory test results for reconstituted weathered residual soils.

요 지

이 논문에서는 반복적인 하중에 의해 발생한 동적 과잉간극수압의 발생과 소산을 실내시험을 통하여 연구하였다. 이를 위해 국내 건설 현장에서 건설재료로 널리 사용되고 있는 풍화토를 재성형하여 실내에서 반복삼축시험을 수행하였다. 그 결과 비배수 반복 재하 과정에서 발생하는 과잉간극수압은 반복재하하중과 구속압이 증가할수록 크게 나타남을 확인하였다. 여기서 이 두 가지 영향요소가 반영된 수정과잉간극수압비(*MEPPR*)를 제안하여, 과잉간극수압 거동을 반복재하횟수만으로 나타낼 수 있었다. 또한 과잉간극수압을 구속압으로 정규화한 과잉간극수압비(*EPPR*)를 이용하여, 구속압의 증가에 따라 감소하는 과잉간극수압 소산 시 부피변형률을 간편히 나타낼 수 있었다. 결론적으로 재성형 풍화토에 대하여 얻어진 실내 시험 결과를 토대로 지진 하중과 같은 동적 반복 재하 시 미액상화 조건에서 발생하는 침하량을 적은 수의 실험 결과로 간편하게 예측할 수 있는 방법 및 개념을 도출하였다.

Keywords : Cyclic triaxial test, Deformation characteristics, Excess pore pressure dissipation tests, Modified excess pore pressure ratio, Weathered soil

1 정희원, 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 박사 과정 (Member, Ph. D. Candidate, School of Civil, Urban and Geoenvironmental System, Seoul National Univ.)

2 정희원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 박사 후 연구원 (Member, Post Doc., Korea Institute of Construction Technology)

3 정희원, 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 석사 과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban and Geoenvironmental System, Seoul National Univ.)

4 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban and Geoenvironmental System, Seoul National Univ., geolabs@snu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 12월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

느슨하고 포화된 상태의 사질토 지반에 지진 등의 다양한 원인에 의해 동하중이 작용하면, 지반 내에 과잉간극수압이 발생하여 전단 저항력은 감소한다. 전단 저항력이 0이 되어 지반에 액상화가 발생하면 전단 파괴와 더불어 과도한 침하가 발생하며, 비록 전단 저항력이 남아있는 미액상화 지반에서도 발생 과잉간극수압의 소산에 의한 침하 문제가 발생한다.

지진을 비롯한 동하중에 의해 나타나는 액상화 현상에 대해서는 1964년 일본의 Niigata 지진 및 미국의 Alaska 지진 이후 관심이 급증하여 미국, 일본, 유럽 등을 중심으로 현재까지도 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 액상화 판정법(Seed et al., 1971, 1975, 1979), 액상화 강도에 영향을 미치는 인자(Mulilis et al., 1977; Seed and Peacock, 1971), 액상화 방지법 등에 대한 연구에 있어서 많은 발전을 이루었다.

이에 반하여, 미액상화의 경우 지반이 파괴 상태에 도달하지도 않고, 발생되는 침하량도 액상화가 발생한 경우에 비하여 상대적으로 훨씬 작으므로 연구에 대한 관심이 낮은 상태이다. 그러나 미액상화 상태라도, 느슨한 사질토 지층이 두껍게 존재하게 되면 과도한 침하가 발생할 수 있다. 지진 시 발생한 침하에 관련한 기존의 연구 사례(Lee and Albaisa, 1974; Nagase and Ishihara, 1988; Toyota et al., 1995)에 따르면 미액상화 시에는 최대 1%의 변형률에 해당하는 침하가 발생하며, 그 크기는 주로 발생 최대과잉간극수압의 크기에 따라 결정된다고 한다. 또한 과잉간극수압의 소산에 따라 침하가 발생하므로, 유효응력 증가에 따른 흙의 압축성 역시 중요한 요소로 간주할 수 있으며, 특히 동재하 시 발생한 과잉간극수압 소산은 일정한 전응력 상태에서 발생하므로 외부 전응력 변화로 수반되는 일반 정적 변형 거동과 동일한 한지에 대해서 검토가 필요하다. Lee and Albaisa(1974)는 동재하 시 미액상화 지반의 침하는 구속압의 증가, 상대밀도의 감소, 평균 입경의 증가에 따라 증가한다고 하였다. 그러나 아직은 미액상화 지반의 침하거동에 대한 정성적이고 개괄적 연구에 그치고 있으며, 각 영향요

소와 발생 메커니즘에 대한 정량적, 체계적 연구는 아직 미진한 상태이다. 특히 미액상화 지반의 침하를 예측할 수 있는 기법은 전혀 마련되지 못한 실정이다.

해외에서 발생한 여러 지진의 피해 자료를 살펴보면, 인공적으로 조성된 매립지반 경우, 두터운 토사 지반을 통한 지진파의 증폭 현상 때문에 지진에 매우 취약한 것으로 알려져 있다. 최근 들어 국내에서도 연안 지역을 매립하여 항만, 공항 등의 대규모 중요 시설물을 시공하는 사례가 증가하고 있으며, 이에 따라 대형공사의 경우 내진설계가 거의 필수요건으로 되어 있다. 그러나 해안 매립지의 경우 토사층이 대부분 매우 두껍기 때문에 미액상화의 경우에도 상부 구조물에 피해를 줄 수 있는 과도한 침하가 발생할 가능성이 매우 높은데도 불구하고, 지반공학적 관점에서 액상화 발생 여부만이 검토되고 있으며, 미액상화 지반 침하는 고려되지 않고 있다. 한편, 우리나라의 경우 매립을 위해서 사용되는 토사는 가장 손쉽게 얻을 수 있고, 지반공학적으로 비교적 양호한 특성을 갖고 있기 때문에 풍화토가 많이 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 미액상화 지반의 침하 거동을 파악하고자 다짐 재성형 풍화토를 대상으로 실내 반복삼축시험 및 과잉간극수압소산시험을 수행하여 구속압, 상대밀도 등의 영향요소에 따른 반복하중에 대한 부피변형특성을 분석하고, 아울러 침하량을 예측할 수 있는 방안을 고찰하였다.

2. 실내시험

2.1 사용시료

본 연구에서는 서울에서 채취한 화강암을 모암으로 하는 교란 상태의 풍화토를 재성형하여 반복삼축시험과 과잉간극수압소산시험을 수행하였다. 먼저, 채취된 풍화토의 기본적인 물성을 파악하기 위해서 입도분포 시험, 비중시험, 액·소성한계시험, 최소 및 최대건조밀도시험 등을 실시하여 그 결과를 표 1에 요약하였다. 시험 대상 시료의 입도분포는 그림 1과 같으며, #200체를 통과한 세립분이 약 12.1%이고, 통일 분류법에 따르면

표 1. 사용 시료의 기본 물성

비중 (G_s)	통일분류 (USCS)	액성한계 (LL)	소성한계 (PL)	최대간극비 (e_{max})	최소간극비 (e_{min})
2.61	SM	NP	NP	1.08	0.24

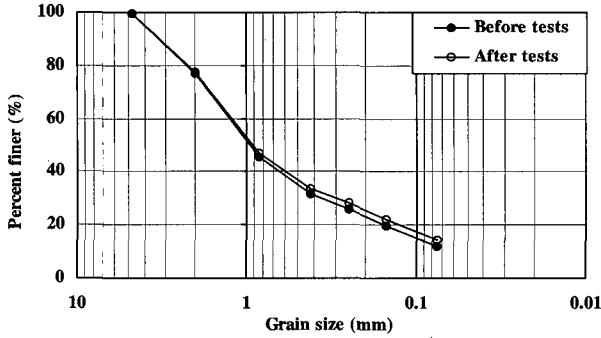


그림 1. 교란 풍화토의 입도분포곡선

실트질의 모래(SM)에 해당한다.

2.2 시료의 성형, 포화, 압밀

교란 상태로 채취한 풍화토 시료를 직경 71mm, 높이 142mm의 원통형이 되도록 몰드 내부에서 습윤 상태로 다져서 상대밀도(D_r) 35%, 60%, 85%가 되도록 성형하였으며, 이때 다짐 효율을 높이기 위하여 대략 12%의 함수비를 갖는 습윤상태를 유지하였다. 다짐에 의한 입자의 파쇄 정도를 살펴보기 위하여 성형 전후의 입도분포를 조사하였으며, 그림 1에 나타난 바와 같이 그 영향은 미미한 것으로 드러났다. 성형이 끝난 후 시료를 삼축실 내부에 설치하고, 삼축실을 조립한 다음, 진공압법과 배압법을 이용하여 포화시켰다. 시료의 포화는 0.98 이상의 간극수압계수 B 값으로 확인하였다. 포화된 시료는 일정한 응력 증분 속도(stress-control)에 따라, 50, 100, 200kPa의 3가지 구속압(σ_c)까지 증가시키면서 등방상태에서 압밀하였다. 이 때 응력 증분 속도는 시료 내의 과잉간극수압이 발생하지 않도록 예비 시험을 통해서 결정한 1kPa/min를 적용하였다.

2.3 반복삼축시험

압밀이 완료된 후 시료에 연결된 배수 밸브를 막아 완전한 비배수 상태를 유지하면서 반복적인 축하중을 가하여 시험을 수행하였다. 가해진 반복축하중은 싸인 파형을 가지며 주파수(frequency)는 0.5Hz이다(그림 2). 본 연구에서 수행된 시험의 종류 및 조건을 표 2에 요약하여 나타내었다. 표에서와 같이 구속압, 상대밀도(D_r), 반복전단응력비($CSR = \sigma_d/2\sigma_c'$), 재하횟수(N_c) 등의 조건을 달리하면서 총 41회의 시험을 수행하였다. 시험 중에는 축차응력(σ_d), 축변형률(ϵ_a), 간극수압(u_m) 등을 측

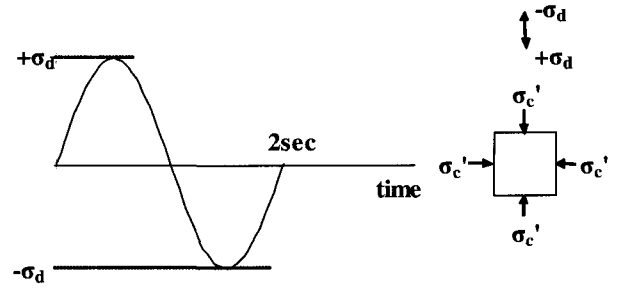


그림 2. 반복하중의 재하

정하였다. 기준이 되는 시험 조건은 구속압 50kPa, 상대밀도 60%이며, 상대밀도와 구속압을 변화시키면서 시험을 수행하였다. 각 시험 조건에서 반복하중은 반복전단응력비(cyclic stress ratio, CSR)를 0.35미만으로 한정하고, 재하횟수(N_c)는 100회까지로 한정하여 가하였다.

이와 함께 사용 시료의 액상화 강도를 평가하기 위한 반복삼축시험을 기준 시험 조건인 유효 구속압 50kPa, 상대밀도 60%에 대하여 수행하였다.

2.4 과잉간극수압소산시험

반복하중 재하 과정에서 발생한 과잉간극수압이 배수와 동시에 소산되면서 나타나는 풍화토의 변형 특성을 파악하기 위해서 비배수 상태의 반복삼축시험을 실시한 후에 바로 이어서 과잉간극수압소산시험을 실시하였다. 비배수 상태에서 수행된 반복삼축시험에 의해서 시료 내부에 발생된 과잉간극수압을 시료 하부에서 배수를 허용하여 소산시키고 이 때 배수되는 물의 체적을 측정하였으며 이러한 물의 체적을 통하여 시료 전체에서 발생하는 평균 체적 변형률(ϵ_v)을 계산하였다. 이때 발생한 체적변형은 1차원 변형 조건을 가정하면 지반의 침하에 해당한다. 부피 변형 특성의 재하 방법에 따른 영향을 비교, 분석하기 위하여 정재하에 의한 간극수압소산 시험을 추가로 실시하였다. 구속압을 일정하게 유지시킨 상태에서 배압을 이용하여 시료 내 간극수압을 증가시킨 후 배수밸브를 닫고 다시 배압을 감소시켰다. 그리고 배수밸브를 열어 증가된 간극수압의 소산을 유도하였다. 이러한 과정을 통하여 전응력은 일정하게 유지시킨 상태에서 시료 내부의 간극수압이 변화하는 반복재하시험과 동일한 조건을 구현할 수가 있다.

표 2. 반복 삼축 시험 및 간극수압 소산 시험

Effective confining pressure, σ_c' (kPa)	Relative density, D_r (%)	Cyclic stress ratio (CSR), $\sigma_d/2\sigma_c'$	Maximum Excess pore pressure $u_{e(max)}$ (kPa)	Maximum Excess pore pressure ratio, $EPPR_{max} (u_{e(max)}/\sigma_c')$	Volumetric strain, ϵ_v (%)
50	35	0.08	12.0	0.24	0.24
		0.11	16.0	0.32	0.28
		0.13	19.5	0.39	0.33
		0.16	22.5	0.45	0.35
		0.19	26.5	0.53	0.41
		0.23	32.5	0.65	0.45
		0.25	36.0	0.72	0.51
		0.26	40.5	0.81	0.61
		0.28	47.5	0.95	0.87
	60	0.05	12.0	0.24	0.10
		0.08	23.5	0.27	0.12
		0.12	15.5	0.31	0.14
		0.13	16.5	0.33	0.16
		0.16	20.0	0.40	0.19
		0.19	24.0	0.48	0.23
		0.23	29.0	0.58	0.27
		0.26	32.5	0.65	0.31
		0.28	37.0	0.74	0.35
	85	0.09	12.5	0.25	0.06
		0.13	14.5	0.29	0.09
		0.17	17.0	0.34	0.11
		0.19	20.0	0.40	0.14
		0.22	22.5	0.45	0.15
		0.24	27.0	0.54	0.18
		0.29	32.5	0.65	0.20
		0.33	40.5	0.81	0.27
		0.35	48.0	0.96	0.36
100	60	0.11	30.0	0.30	0.13
		0.13	32.0	0.32	0.14
		0.16	38.0	0.38	0.17
		0.19	46.0	0.46	0.20
		0.22	55.0	0.55	0.25
		0.25	62.0	0.62	0.29
200	60	0.11	64.0	0.32	0.14
		0.14	66.0	0.33	0.15
		0.17	78.0	0.39	0.18
		0.20	94.0	0.47	0.21
		0.23	114.0	0.57	0.26
		0.27	134.0	0.67	0.33

3. 시험결과 및 분석

3.1 액상화 강도

사용 시료의 액상화 강도 특성을 파악하기 위하여 기준 시험 조건인 상대밀도 60%, 유효구속압 50kPa에 대

하여 시험한 결과를 그림 3에 나타내었다.

일반 모래에 대한 시험 결과와 비교하여 볼 때 액상화 강도가 크게 나타나며, CSR이 0.3이하일 경우 액상화 발생 가능성이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이는 풍화토에 함유된 세립토(#200체 통과량이 전체의 15% 내외)의 영향으로 파악된다.

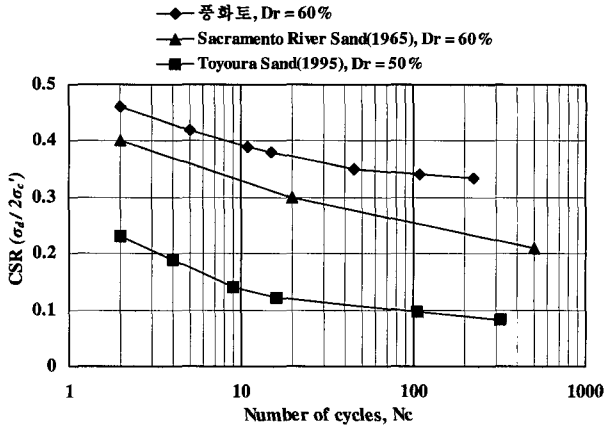


그림 3. 시험 풍화토의 액상화 강도

3.2 미액상화 변형 특성

그림 4와 5는 기준 시험 조건인 상대밀도 60%, 유효 구속압 50kPa에 대한 반복삼축시험과 과잉간극수압소산시험의 대표적인 결과이다(CSR=0.16). 그림 4(a)는 반복재하 과정에서 가해지는 반복축차응력을 나타내고, 그림 4(b)와 4(c)는 반복삼축시험 과정에서 측정된 과잉간극수압과 축변형률을 각각 나타낸다.

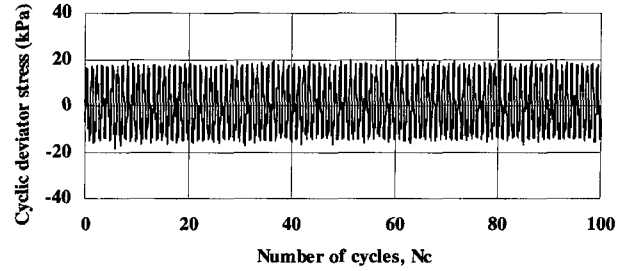
과잉간극수압은 재하횟수의 증가에 따라 일정한 진폭을 가지면서 서서히 증가하지만, 액상화가 발생하는 경우와 같이 유효 구속압에 이르지 않는다. 이 실험의 경우 재하횟수 50회를 지나면서 일정한 값에 수렴하고 있다.

지진 하중 작용 시 실제 지반의 응력 조건은 실내 반복삼축시험 응력 조건과 다르기 때문에 식 (1)과 같이 실험 중 측정된 과잉간극수압(u_m)으로부터 보정하여 평가해야 한다.

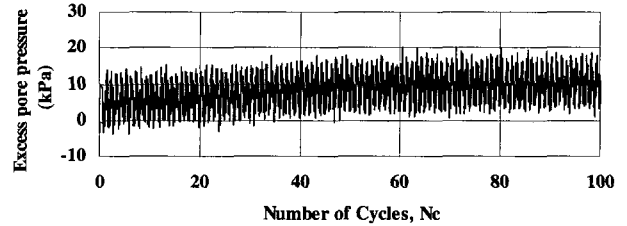
$$u_e = u_m - \sigma_d/2 \quad (2)$$

축변형률의 경우 일정한 진폭 하에서 반복횟수와 무관하게 영구변형이 거의 발생하지 않은 상태를 유지한다. 대부분의 실험에서 축변형률 진폭은 0.1% 미만의 값을 계속 유지하며, CSR 증가에 따라 증가하는 경향을 나타낸다.

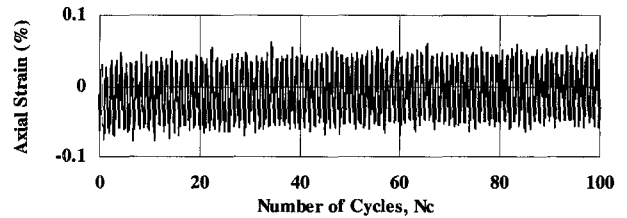
비배수 반복삼축시험 후 배수조건으로 전환하여 수행되는 과잉간극수압소산시험으로부터 얻어진 시료의 $D_r = 60\%$, $\sigma'_c = 50\text{kPa}$ 일 때의 변형 거동을 그림 5에 나타내었다. 배수와 동시에 급격한 변형이 발생하며, 1000초 이내에 최종 변형량의 90% 이상이 발생한다. 한편 앞서 설명한 바와 같이 모든 실험결과에 대하여



(a) 재하횟수 - 반복하중



(b) 재하횟수 - 과잉간극수압



(c) 재하횟수 - 축변형률

그림 4. 반복삼축시험에 의한 풍화토의 간극수압과 변형 거동 ($D_r = 60\%$, $\sigma'_c = 50\text{ kPa}$, $CSR = 0.16$)

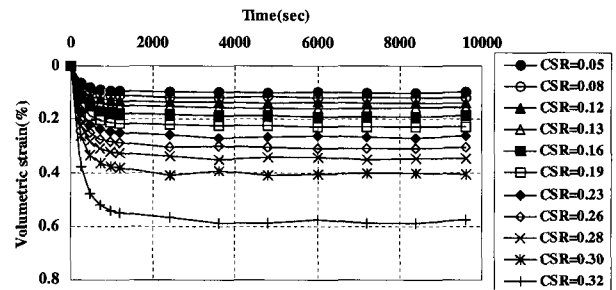


그림 5. 간극수압소산시험에 의한 변형 거동($D_r = 60\%$, $\sigma'_c = 50\text{kPa}$)

반복재하 시 영구변형이 거의 발생하지 않기 때문에, 미액상화 지반의 반복재하에 따른 변형과 침하는 과잉간극수압소산에 따른 부피변형에 따라 결정된다.

3.2.1 과잉간극수압의 발생 양상

반복재하에 따라 과잉간극수압은 그림 6(상대밀도 60%, 구속압 50kPa 조건)과 같은 양상으로 발생한다. 반복재하 초기 단계에 재하횟수의 증가에 따라 과잉간극수압은 급격히 증가하며, 재하횟수 10회를 전후로 그 증가율이 완전히 감소한다. 또한 반복재하 하중의 크기,

즉 반복전단응력비 CSR이 클수록 과잉간극수압이 크게 발생함을 확인할 수 있다.

또한 구속압과 상대밀도에 변화에 따른 반복전단응력비와 발생 최대 과잉간극수압($u_{e(max)}$)의 관계를 보여주는 그림 7과 8에서 알 수 있듯이 구속압($CP(=\sigma_c)$: confining pressure)이 커질수록 그리고 상대밀도가 작을

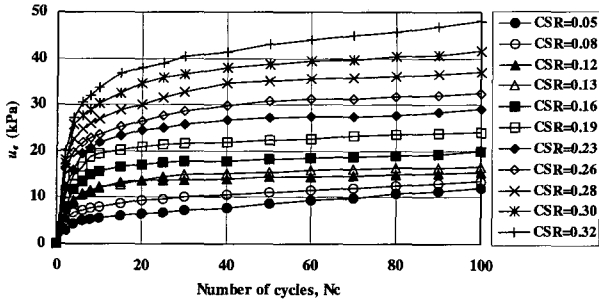


그림 6. 반복재하에 따른 과잉간극수압의 발생 양상($D_r = 60\%$, $\sigma_c' = 50\text{kPa}$)

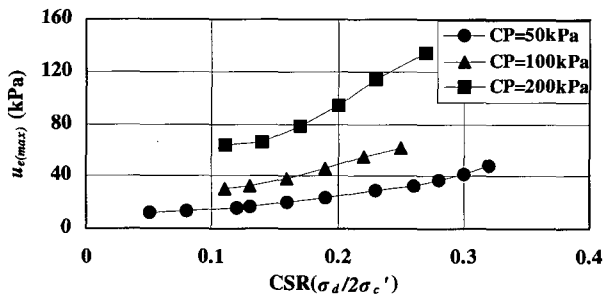


그림 7. 구속압에 따른 CSR과 최대 과잉간극수압($u_{e(max)}$)의 관계($D_r = 60\%$)

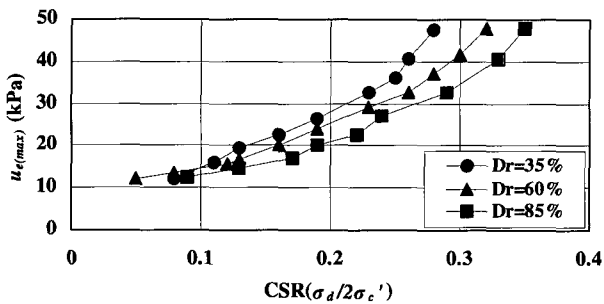


그림 8. 상대밀도에 따른 CSR과 최대 과잉간극수압($u_{e(max)}$)의 관계

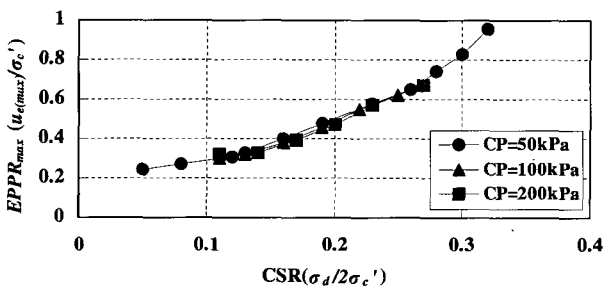


그림 9. CSR에 따른 $EPPR_{max}$ ($D_r = 60\%$)

수록 과잉간극수압은 크게 발생한다.

즉 정적 재하와 마찬가지로 높은 구속압의 느슨한 모래에서 과잉간극수압이 크게 발생한다. 그러나 아래 식과 같이 발생 최대 과잉간극수압을 구속압으로 정규화한 과잉간극수압비($EPPR(=u_e/\sigma_c')$)의 최대값($EPPR_{max}$)으로 도시할 경우 그림 9에 나타난 바와 같이 구속압의 크기에 상관없이 유사한 거동을 보여준다

이는 반복전단응력비 별로 구분하여 재하횟수에 대한 $EPPR$ 의 변화를 나타낸 그림 10으로부터도 확인할 수 있다. 반복재하 초기부터 100회에 이르기 까지 전체 과잉간극수압 발생 양상이 구속압에 상관없이 거의 일정하게 나타난다. 즉, 반복하중에 의해 발생하는 과잉간극수압은 유효구속압에 대하여 정규화 거동을 보이며, 다만 재하하중에 따른 CSR의 크기에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

발생 과잉간극수압에 대한 CSR의 효과는 $D_r = 60\%$, 유효구속압 50kPa에 대한 반복재하 시 간극수압거동을 $EPPR$ 을 이용하여 도시한 그림 11로부터도 분명하게 확인할 수 있다.

CSR에 따른 영향을 자세히 파악하기 위하여 $EPPR$ 과 CSR의 관계를 재하횟수에 따라 그림 12에 도시하였다. 재하횟수의 변화에 상관없이 대체로 선형적 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 이러한 선형적 관계는 $EPPR(=u_e/\sigma_c')$ 을 $CSR(\sigma_d/2\sigma_c')$ 로 정규화할 경우(즉, 발생 과잉간극

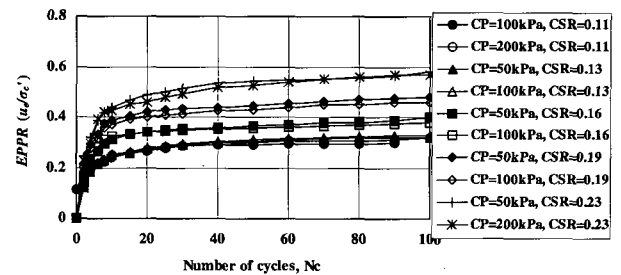


그림 10. 반복재하횟수에 대한 $EPPR$ 의 변화($D_r = 60\%$)

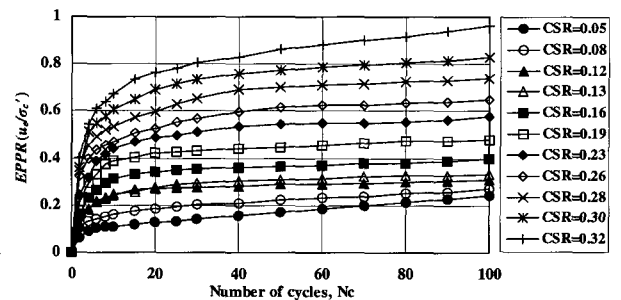


그림 11. $EPPR$ 과 반복재하횟수와의 관계($D_r = 60\%$, $\sigma_c' = 50\text{kPa}$)

수압을 수정과잉간극수압비($MEPPR(= 2u_e/\sigma'_d)$)로 표현하게 되면) 일정한 값으로 수렴함을 의미한다. 즉, 그림 11의 과잉간극수압 거동을 $MEPPR$ 을 이용하여 나타내면 그림 13에 나타난 바와 같이 CSR 이 다양한 분포(0.05 - 0.32)를 갖는다 할지라도, 재하횟수에 대하여 좁은 영역으로 한정할 수 있다. 이때 과잉간극수압 거동은 CSR 에 따른 어떠한 경향성도 보이지 않는다. 다만 CSR 이 0.10 미만이거나, 0.30 이상인 경우 $MEPPR$ 이 다소 크게 나타나는데, 이는 0.10 미만의 경우 장비의 한계 즉 load cell과 간극수압계(pressure transducer)의 민감도 한계 때문에 그리고 0.30 이상의 경우 액상화 저항 강도에 근접하여 상대적으로 큰 과잉간극수압이 발생하기 때문이다.

따라서 $MEPPR$ 을 이용하여 나타내면 주어진 시료에 대한 반복재하 시 발생 과잉간극수압의 양상을 적용된 모든 구속압과 CSR 에 대하여 재하횟수에 따른 하나의 상관관계로 표현할 수 있다. 그림 14에 나타난 바와 같이 D_r 이 60%일 때 0.05< CSR <0.30 범위의 실험 결과로 나타난 수정과잉간극수압비 최대값($MEPPR_{max}$)이 구속압의 크기에 상관없이 $MEPPR$ 이 좁은 영역으로 한정되는 사실로부터 이를 확인할 수 있다. 그림 15는 본 연구에서 수행한 3가지 상대밀도에 대한 평균 $MEPPR$ 을 보여 준다. $MEPPR$ 은 10 미만의 적은 재하횟수에서는 구

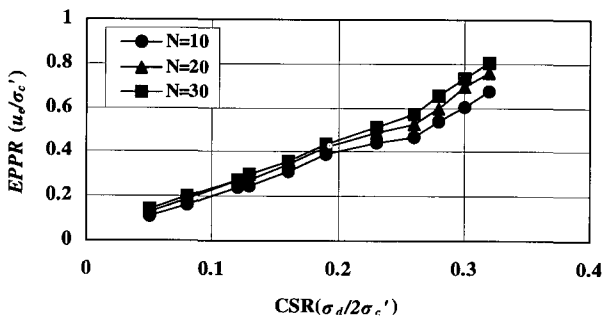


그림 12. CSR 과 $EPPR$ 의 상관관계($D_r = 60\%$, $\sigma'_c = 50kPa$)

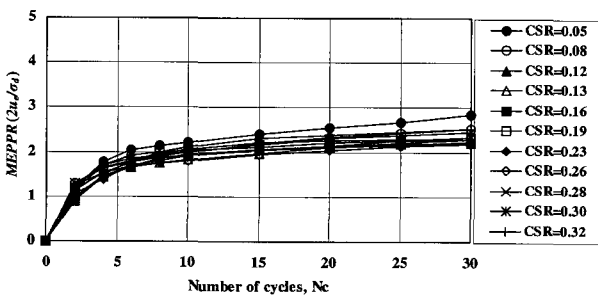


그림 13. $MEPPR$ 로 나타난 반복재하 시 과잉간극수압 발생 양상($D_r = 60\%$)

속압, 상대밀도에 관계없이 거의 일정하고, 그 이후 상대밀도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다.

결론적으로 제안된 수정과잉간극수압비 $MEPPR$ 을 사용할 경우 동적하중에 대한 발생 과잉간극수압 변화를 반복하중의 크기와 구속압의 변화에 상관없이 반복재하횟수에 대한 하나의 대표곡선으로 나타낼 수 있다. 따라서, 주어진 지반조건(즉 흙의 종류 및 밀도가 주어진 경우)의 반복재하 시 과잉간극수압의 거동은 대표 조건에 대한 한 번의 반복재하시험으로 얻는 것이 이론적으로 가능하다. 하지만 시험결과의 신뢰성을 위해 구속압과 CSR 의 값을 변화시켜 2-3회 정도의 시험을 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.2.2 과잉간극수압 소산에 의한 부피변형

비배수 반복재하과정에서 발생한 과잉간극수압은 반복재하과정이 종료되면 배수와 동시에 급격히 소산된다. 이때 나타난 부피변형특성을 수행된 모든 실험에 대하여 발생 최대과잉간극수압비($EPPR_{max}$)에 대하여 그림 16에 도시하였다. 부피변형률은 $EPPR_{max}$ 의 증가에 따라 증가하며, 상대밀도가 작을수록 압축성이 커지기 때문에 더 큰 부피변형률이 발생하는 현상 역시 확인할 수 있다. 특히 $EPPR_{max}$ 이 0.8 미만의 영역에서 부피변형률과 $EPPR_{max}$ 의 관계가 선형적으로 나타나며, 그 보다

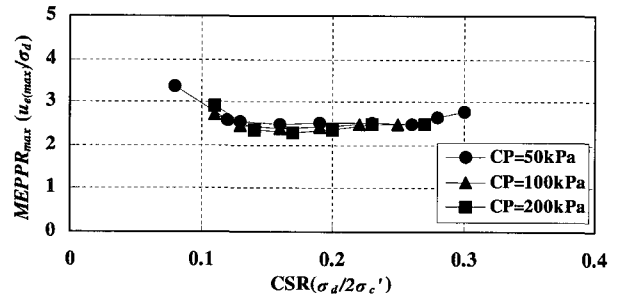


그림 14. CSR 과 구속압이 $MEPPR_{max}$ 에 미치는 영향($D_r = 60\%$)

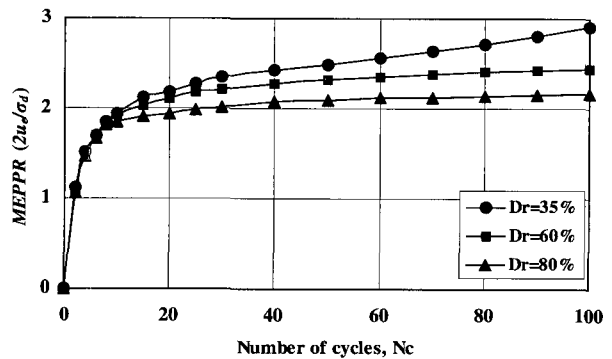


그림 15. 모든 실험에 대한 $MEPPR$ 의 발생 양상

큰 경우 부피변형률이 선형 관계 보다 크게 나타난다. 이는 액상화에 근접하게 되면서 시료의 변형이 민감해지기 때문으로 판단된다. 구속압의 효과는 부피변형률을 과잉간극수압의 관계로 도시한 그림 17에서 알 수 있듯이 구속압이 작을수록 압축성이 더 크게 나타난다. 즉, 같은 발생 과잉간극수압에 대하여 구속압이 작을수록 부피변형률이 크다. 그러나 그림 16에서 알 수 있듯이 구속압으로 정규화한 최대 과잉간극수압비($EPPR_{max}$)와의 관계로 부피변형률을 도시하면 구속압의 차이를 구분할 수 없다. 즉 과잉간극수압 소산 시 부피변형률에 대한 구속압의 영향은 $EPPR$ 로 과잉간극수압을 나타냄으로써 감안할 수 있다.

따라서 미액상화 사질토 지반의 반복재하 시 부피변형을 고찰할 때, 구속압은 중요한 영향 요소로 작용하여 그 값이 증가함에 따라 반복재하 시 과잉간극수압이 증가하고 소산 시 부피 압축성이 감소하지만, 과잉간극수압을 구속압으로 정규화한 $EPPR$ 로 거동을 평가함으로써 그 효과를 배제하고 효율적으로 나타낼 수 있다.

한편 배압을 이용한 인위적 과잉간극수압 발생 후 소산시켜 부피변형률을 평가한 정재하 소산시험의 결과와 반복재하 소산시험의 결과가 그림 17에 비교하여 제시되어 있다. 두 방법에 따른 차이가 거의 구분되지 않는 유사한 결과를 제시한다는 사실로부터 과잉간극수압의

소산은 재하방법에 상관없이 발생 과잉간극수압의 크기에 따라 결정된다는 기존의 이론(Lee and Abbaisa, 1974)을 확인할 수 있다.

3.3 결과 활용

동하중 특히 지진이 발생한 경우에 발생하는 미액상화 시 침하량은 아직은 구체적 해석 절차가 정립되어 있지는 않지만, 위에서 제시된 변형 특성으로부터 매우 효율적으로 평가될 수 있다. 반복 재하에 따른 과잉간극수압 발생 양상과 부피변형 특성을 실험으로부터 설정하고, 지진과 대상 지반에 대한 정보 그리고 지반응답해석을 통하여 반복 재하 횟수, 반복전단응력의 크기, 그리고 구속압 등을 평가하여, 대상 지반의 변형 및 침하량을 산정할 수 있다.

이 때 과잉간극수압의 발생 양상은 여기서 제안한 수정과잉간극수압비($MEPPR$)를 토대로 2-4회 정도의 적은 수의 실험을 통하여 다양한 반복전단하중과 구속압의 효과를 감안하여 평가할 수 있다. 또한 과잉간극수압 소산에 따른 부피 변형 특성도 다양한 구속압 조건을 고려할 수 있는 최대간극수압비($EPPR_{max}$)을 이용하여 적은 수의 실험으로 평가하는 것이 가능하며, 정재하 시험에 의해 평가할 수도 있다.

여기서 얻어진 실험 결과는 서울 지역에서 채취된 풍화토를 재성형한 시료에서 얻어진 것으로서, 일반 사질토에서도 동일한 거동을 보일 것으로 예상된다. 하지만, 향후 다른 사질토를 이용한 유사 실험을 통해서 제시된 반복재하에 의한 사질토의 미액상화 변형 거동을 검증할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 반복적인 하중에 의해 발생한 동적인 과잉간극수압이 소산되는 과정에서 나타나는 미액상화 재성형 풍화토의 변형 특성을 파악하기 위해 반복삼축 시험과 과잉간극수압소산시험을 통한 실험적 연구를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반복하중에 의해 발생하는 과잉간극수압은 동일한 전단응력비(cyclic stress ratio, CSR)가 작용할 경우에 구속압이 증가할수록 그 값이 커진다. 그리고 과잉간극수압을 구속압으로 정규화한 과잉간극수압

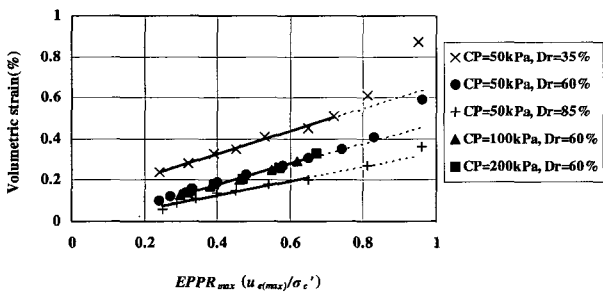


그림 16. $EPPR_{max}$ 와 부피변형률의 관계

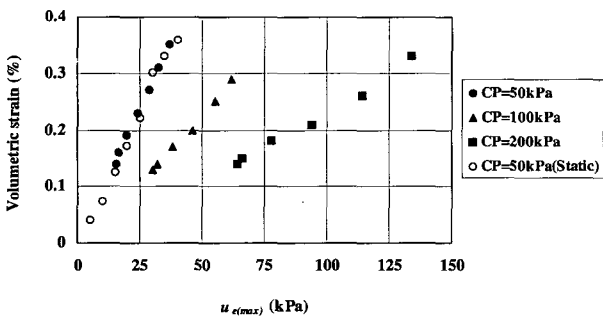


그림 17. 발생 최대과잉간극수압($U_e(max)$)과 부피변형률의 관계($D_r = 60\%$)

비(excess pore pressure ratio, *EPPR*)로 나타내면 구속압의 크기에 상관없이 유사한 거동을 나타낸다. *CSR*은 발생 과잉간극수압의 크기에 큰 영향을 미치는 요인으로서, *CSR*이 증가할수록 발생 과잉간극수압의 크기도 증가하며, *EPPR*과 *CSR*은 선형 증가 관계를 가진다. 본 연구에서 제안한 바와 같이, *EPPR*을 *CSR*로 정규화한 수정과잉간극수압비(Modified Excess Pore Pressure Ratio, *MEPPR*)로 표현하면 구속압 및 *CSR*의 크기에 상관없이 반복재하횟수에 따른 고유한 값을 가진다. 제안된 *MEPPR*을 이용하면, 임의의 지반조건하에서 반복하중의 작용에 의해 발생 가능한 과잉간극수압의 크기를 최소의 실험을 통하여 간편하게 예측할 수 있다.

- (2) 미액상화 사질토 지반의 반복재하 시 부피변형을 고찰할 때, 구속압은 중요한 영향 요소로 작용하여 그 값이 증가함에 따라 반복재하 시 과잉간극수압이 증가하고 소산 시 부피 압축성이 감소한다. 그러나 과잉간극수압을 구속압으로 정규화한 *EPPR*로 부피변형률을 평가할 경우 구속압의 효과를 배제하고 표현할 수 있다. 따라서 하나의 구속압에 대한 실험 결과로 다양한 구속압에 대한 부피변형 특성을 예측하는 것이 가능하다.
- (3) 본 연구의 결과로 다양한 구속압과 반복재하 하중 크기에 따른 과잉간극수압 거동 그리고 이의 소산에 따른 부피변형 특성을 소수의 실험으로 예측하는 것이 가능하다. 이러한 결과는 지진에 따라 발생할 수 있는 대부분의 미액상화 사질토 지반의 침하 거동을 평가하는데 유용하게 활용될 수 있다. 다만, 이를 위해서는 미액상화 지반의 침하량을 예측할 수 있는 구체적인 방법이 우선 설정되어야 하고, 제안된 지반의 동적 거동 특성을 이용한 침하량 예측 및 검증 절차가 필요할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 자연재해방재기술개발사업(N2-01-01-A-02)과 서울대학교 공학연구소의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Lee, K.L. and Albaisa, A. (1974), "Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.100, No.GT4, pp.387-406.
2. Mulilis, P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchell, J.K. and Arulanandan, K. (1977), "Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.103, No.GT2, pp.91-108.
3. Nagase, H. and Ishihara, K. (1988), "Liquefaction-Induced Compaction and Settlement of Sand During Earthquakes", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.28, No.1, March, pp.65-76.
4. Seed, H.B. and Lee, K.L. (1966), "Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.92, No.SM6, pp.105-134.
5. Seed, H.B. and Peacock, W.H. (1971), "Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.97, No.SM8, pp.1099-1119.
6. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.107, No.SM9, pp.1249-1273.
7. Seed, H.B., Arango, I. and Chan, C.K. (1975), *Evaluation of Soil Liquefaction Potential During Earthquakes*, Report No. EERC 75-28, Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, Calif.
8. Seed, H.B. (1979), "Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground during Earthquakes", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.105, No.GT2, pp.201-255.
9. Toyota, N. et al. (1995), "Post-Cyclic Triaxial Behavior of Toyoura Sand", *Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol.1, pp.189-195.

(접수일자 2006. 1. 23, 심사완료일 2006. 6. 13)