

반복재하후 미액상화 풍화토 지반의 변형 거동

Post-Cyclic Deformation Behavior of Non-Liquefied Weathered Soils

최연수¹⁾, Yeon-Su Choi, 정충기²⁾, Choong-Ki Chung

¹⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Weathered soil is one of the most representative soils in Korea. In this study, a series of cyclic triaxial tests was carried out to predict the post-cyclic deformation behavior of weathered soils in case of non-liquefaction. Excess pore pressure response during cyclic loading and volumetric strain during the dissipation of excess pore pressure were measured varying the confining pressure, relative density and cyclic stress ratio. Based on the test results, it is found that the modified excess pore pressure ratio, excess pore pressure ratio normalized by cyclic stress ratio, is uniquely correlated with the number of cycles irrespective of confining pressure and cyclic stress ratio. Using the newly proposed MEPPR(modified excess pore pressure ratio) concept, it is possible to easily evaluate the excess pore pressure and the settlement of weathered soils due to cyclic loading by greatly reduced number of tests. It is also verified that the reconsolidation volumetric strain is independent of the way how the excess pore pressure was generated.

Key words : weathered soils, non-liquefaction, deformation behavior, cyclic triaxial test, modified excess pore pressure ratio

1. 서 론

포화된 비점착성 지반에 지진과 같은 동하중이 작용하면 과잉간극수압이 발생하여 강도를 완전히 상실하는 액상화가 발생하거나 또는 액상화에 이르지 않는다 하더라도 발생 과잉간극수압의 소산에 따른 변형이 발생하게 된다. 액상화는 지반의 파괴를 가져오는 매우 중요한 과제로서 그 동안 많은 관련 전문가들에 의해서 액상화 판정법, 액상화 강도의 영향 요인 및 액상화 방지법 등을 위주로 활발하게 연구가 진행되어 왔다. 반면에 강도가 완전히 상실되지 않은 미액상화 상태에서 발생하는 변형 거동은 상대적으로 실제 문제에 미치는 영향이 작기 때문에 아직은 체계적 연구가 미비한 실정이다.

지진에 대한 피해기록이 적은 우리나라는 발생 가능 지진 최대 규모를 6.5로 하는, 중약진 지역으로 분류되기 때문에 액상화 발생 가능성은 비교적 작다고 할 수 있다. 다만 미액상화 상태에서 지진 동하중에 의하여 과잉간극수압이 발생하고, 지진이 종료된 후에 지반내 발생 과잉간극수압이 소산되면서 부피 변형이 발생하여 지반의 침하가 유발될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내의 대표적 토사이고 대부분의 건설현장에서 매립재로서 널리 활용되고 있는 풍화토를 대상으로 하여 반복삼축시험을 실시하여, 반복 하중에 의한 풍화토의 과잉간극수압 발생 양상과 이의 소산에 의한 부피 변형 특성을 파악하여 반복재하후 미액상화 풍화토 지반의 변형 거동을 연구하고자 한다.

2. 실내시험

2.1 사용 시료

본 연구에서는 서울시에서 채취한 화강암을 모암으로 하는 교란 상태의 풍화토를 실내에서 재성형하여 반복삼축시험을 수행하고, 이에 연이어 과잉간극수압소산시험을 수행하였다. 먼저, 시험 대상 풍화토의 기본적인 공학적 특성을 파악하기 위하여 입도분포시험, 비중시험, 아터버그 한계시험, 상대밀도시험 등을 실시하였으며 그 결과는 표 1에 요약하였다. 상대밀도시험에서는 KS F 2345-76의 방법에 따라 최소 및 최대건조밀도를 측정하였다. 그림 1은 시험 대상 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것으로, 통일 분류법에 따르면 대상 지반은 입도분포가 좋은 모래 혹은 실트질의 모래(SW-SM)에 해당하는 것으로 나타났다.

표 1. 대상 시료의 기본 물성치

G_s	$D_{50}(\text{mm})$	C_u	USCS	액성한계(%)	소성한계(%)	e_{\max}	e_{\min}
2.61	0.95	24	SW-SM	NP	NP	1.08	0.24

2.2 시료의 성형, 포화, 압밀

교란 상태로 채취한 풍화토 시료를 직경 71mm, 높이 142mm의 원통형이 되도록 몰드 내부에서 습윤 상태로 다져서 성형하였다. 성형 과정의 다짐에 의한 입자의 파쇄 정도를 살펴보기 위하여 시험 전후의 입도분포를 비교한 결과 그 영향이 미미한 것으로 드러났다. 다짐에 의해서 시료를 성형한 후에 셀을 조립하고 진공압법과 배압법을 이용하여 시료를 포화시켰으며, 각 시험마다 간극수압계수 B가 0.98 이상이 되도록 하여 시료의 포화를 확인하였다. 포화된 시료는 등방의 구속압을 가하여 압밀을 하였다. 압밀은 응력 제어 방식으로 진행하였으며, 압밀 후 시료 내에 과도한 과잉간극수압이 발생하지 않도록 예비시험을 통해서 결정된 1kPa/min의 응력 증분 속도로 압밀을 실시하였다.

2.3 반복삼축시험

압밀이 완료된 후 시료 하부에 연결된 배수 밸브를 막아 시료 전체가 완전한 비배수 상태를 유지하도록 하면서 반복적이고 일정한 축하중을 가하여 시험을 수행하였다. 가해진 반복축하중은 싸인파형을 가지고, 그 주파수(frequency)는 ASTM(D5311)에 규정된 0.1Hz에서 2Hz 사이의 값 중에서 0.5Hz를 선택하였다. 본 연구에서 수행된 시험의 조건과 이에 따른 측정 결과를 표 2에 요약하여 정리하였다. 표에서 나타낸 바와 같이 유효구속압, 상대밀도, 반복전단응력비, 재하횟수 등의 조건을 달리하면서 총 41회의 시험을 수행하면서 축차응력(σ_d), 축변형률(ϵ_a), 과잉간극수압(u_e) 등을 측정하였다. 유효구속압, 상대밀도, 반복전단응력비의 변화에 따른 결과 비교를 위해 기준이 되는 시험 조건을 구속압 50kPa, 상대밀도 60%로 하고, 상대밀도와 유효구속압을 달리 하면서 시험을 수행하였으며 각 시험 조건에서 반복전단응력비를 최대 0.35까지, 재하횟수는 100회까지 가하였다.

표 2. 시험조건

Effective confining pressure, σ_c' (kPa)	Relative density, D_r (%)	Cyclic stress ratio(CSR), $\sigma_d / 2\sigma_c'$	Number of cycles, N_c	Excess pore pressure ratio, u_e / σ_c'	Volumetric strain, ϵ_v (%)	Test Type	
50	35	0.08	100	0.24	0.24	Cyclic triaxial tests & excess pore pressure dissipation tests	
		0.11		0.32	0.28		
		0.13		0.39	0.33		
		0.16		0.45	0.35		
		0.19		0.53	0.41		
		0.23		0.65	0.45		
		0.25		0.72	0.51		
		0.26		0.81	0.61		
	60	0.28		0.95	0.87		
		0.05		0.24	0.10		
		0.08		0.27	0.12		
		0.12		0.31	0.14		
		0.13		0.33	0.16		
		0.16		0.40	0.19		
		0.19		0.48	0.23		
		0.23		0.58	0.27		
	85	0.26		0.65	0.31		
		0.28		0.74	0.35		
		0.30		0.83	0.41		
		0.32		0.96	0.59		
		0.09		0.25	0.06		
		0.13		0.29	0.09		
		0.17		0.34	0.11		
		0.19		0.40	0.14		
	100	60		0.22	0.45		0.15
				0.24	0.54		0.18
				0.29	0.65		0.20
				0.33	0.81		0.27
0.35			0.96	0.36			
0.11			0.30	0.13			
200	60	0.13	0.32	0.14			
		0.16	0.38	0.17			
		0.19	0.46	0.20			
		0.22	0.55	0.25			
		0.25	0.62	0.29			
		0.11	0.32	0.14			
50	60	0.14	0.33	0.15			
		0.17	0.39	0.18			
		0.20	0.47	0.21			
		0.23	0.57	0.26			
		0.27	0.67	0.33			
		0.33	225	1.0	-		
50	60	0.34	109	1.0	-		
		0.35	45	1.0	-		
		0.38	15	1.0	-		
		0.39	11	1.0	-		
		0.42	5	1.0	-		
		0.46	2	1.0	-		

각 시험에서의 반복전단응력비(cyclic stress ratio, CSR)는 다음과 같이 정의된다.

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2\sigma_c'} \quad (1)$$

여기서, σ_d 는 반복축차응력이며, σ_c' 는 압밀 완료 후의 유효구속압이다. 한편, 사용시료의 액상화저항 특성을 평가하기 위하여 기본시험조건인 유효구속압 50kPa, 상대밀도 60%의 경우에 대하여 액상화강도 시험을 실시하였다.

Lee와 Albaisa(1974), Toyota 등(1995)에 의하면, 지진시 미액상화 지반에서 발생하는 침하량은 과잉 간극수압비에 의해서 결정된다. 따라서, 반복삼축시험과정에서 측정된 과잉간극수압은 응력조건에 대한 보정을 거쳐서, 과잉간극수압비(excess pore pressure ratio, EPPR)의 형태로 사용되며 다음과 같이 정의한다.

$$EPPR = \frac{u_{corr}}{\sigma_c'} \quad (2)$$

여기서, u_{corr} 는 응력 상태에 대해 보정된 과잉간극수압(압축시에는 $u_{corr} = u_m - \sigma_d/2$, 인장시에는 $u_{corr} = u_m + \sigma_d/2$)이고, u_m 은 반복삼축시험시에 측정된 과잉간극수압이다.

2.4 과잉간극수압소산시험

반복하중의 재하에 의해서 발생한 과잉간극수압이 배수와 동시에 소산되면서 나타나는 풍화토의 변형 특성을 파악하기 위해서 반복삼축시험을 실시한 후에 연속적으로 과잉간극수압소산시험을 수행하였다. 이 시험에서는 비배수 상태에서 수행된 반복삼축시험에 의해서 시료 내부에 발생된 과잉간극수압을 시료 하부에서 배수를 허용하여 소산시키고 이 때 배수되는 물의 체적을 측정하여 시료 전체에서 발생하는 평균 체적변형률(ϵ_v)을 계산한다. 이러한 체적변형은 1차원 변형 조건을 가정하면 대상 지반의 평균 침하에 해당한다. 과잉간극수압의 발생 원인에 의한 영향을 살펴보기 위해서 비배수 상태에서 정적인 방법으로 과잉간극수압을 발생시킨 후에 같은 방법으로 소산시키면서 체적 변형률을 측정하였다.

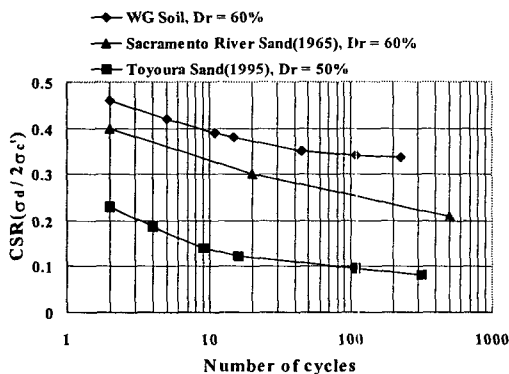


그림 1. 대상 풍화토의 액상화 강도

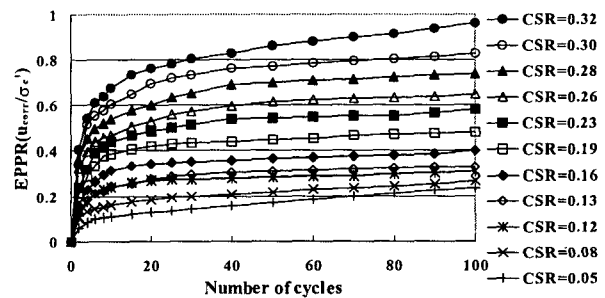


그림 2. 반복하중의 재하횟수와 EPPR의 관계

3. 시험결과 및 분석

3.1 액상화 강도

그림 1은 상대밀도가 60%이고, 유효구속압이 50kPa인 경우 대상 풍화토 시료의 액상화 강도 곡선을 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 CSR이 증가할수록 액상화에 도달하는 재하횟수는 감소한다. 한편 CSR이 약 0.3 이하인 경우, 재하횟수가 500회를 초과해도 액상화에 도달하기 어렵다는 것을 알 수 있으며, 다른 지역의 일반 모래에 비하여 액상화 강도가 크게 나타났다. 특히 매립지 조성시 일반적으로 목표 상대밀도가 60%를 상회하고, 이 경우 풍화토의 액상화 강도는 더욱 증가하며, 이와 함께 우리나라 발생 가능 지진 규모가 중약진으로 판단되는 것을 감안할 때, 우리나라 풍화 매립토 지반에서 액상화 발생 가능성은 매우 작다. 풍화토에 함유된 세립토가 이러한 결과의 주된 영향 요인으로 생각할 수 있다. 따라서, 지진시 과잉간극수압의 소산에 의해 발생하는 지반의 침하량 평가에 관한 연구는 액상화가 발생하지 않은 미액상화 지반에 한정하기로 한다.

3.2 과잉간극수압 발생 특성

미액상화 지반의 경우, 지진 등과 같은 동하중에 의해서 발생하는 지반의 침하는 반복재하 과정에서 발생되었던 과잉간극수압이 배수와 동시에 소산되면서 나타나는 현상이므로 반복하중에 의한 과잉간극수압의 발생 특성에 관한 연구가 선행되어야 한다.

2.3절에서 기술한 바와 같이 미액상화 지반에서 발생하는 침하는 EPPR에 의해서 결정되는데, 그림 2는 반복하중의 재하횟수에 따른 EPPR의 변화를 나타낸 곡선이다. 이 그림은 시료의 상대밀도가 60%이고, 압밀 완료 후 유효구속압이 50kPa인 경우의 곡선을 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이, 모든 CSR의 경우에, 재하횟수 10회 정도까지는 재하횟수의 증가에 따라 EPPR이 급격히 증가하지만, 이후 그 증가율이 차츰 감소하여 곡선이 상당히 완만한 형태를 가진다. 또한 동일한 재하횟수에서는 CSR이 클수록 발생하는 EPPR도 증가하며, 이러한 경향은 그림 3에서 좀 더 명확하게 드러난다. 그림 3은 유효 구속압이 50kPa이고 상대밀도가 60%이고, 재하횟수가 각각 10회, 20회, 30회일 경우, CSR의 증가에 따른 EPPR의 증가 양상을 나타낸다. 모든 재하횟수에 대해서 CSR과 EPPR은 원점을 지나는 선형관계로 근사하여 나타낼 수 있다. 따라서, 그림 2에서 EPPR을 CSR로 정규화하여 MEPPR의 형태로 나타내면 그림 4와 같이 나타낼 수 있고, 여기서 MEPPR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$MEPPR = \frac{EPPR}{CSR} = \frac{u_{corr}/\sigma_c'}{\sigma_d/2\sigma_c'} = \frac{2u_{corr}}{\sigma_d} \quad (3)$$

그림 4의 곡선들은 실무적인 효용성을 고려할 때 하나의 대표 곡선으로 나타내어 사용할 수 있다. 즉, 임의의 상대밀도와 유효구속압에서, 반복하중에 의해서 발생하는 MEPPR은 지진규모에 의해 결정되는 등가의 재하횟수에 의해서 간단하게 예측할 수 있다.

그림 5는 상대밀도가 60%이고, 재하횟수가 30회일 경우, CSR의 크기에 따른 EPPR을 각각의 유효구속압(ECP)에 대하여 나타낸 것으로, 임의의 CSR에 의해서 발생하는 EPPR은 유효 구속압의 크기와 무관함을 알 수 있다. 즉, 동일한 CSR로 나타낼 수 있는 반복하중이 동일한 횟수만큼 반복재하되면 이에 의해서 유발되는 EPPR은 구속압의 크기에 거의 영향을 받지 않는다.

따라서, 새로이 제안된 MEPPR은 그림 6에서와 같이 유효구속압과 CSR의 크기에 관계없이 각각의 상대밀도에 대해서 반복재하횟수와 고유한 관계를 가지게 되므로, 실험량을 최소화하여 결정할 수 있는 이점을 가진다. 이렇게 결정된 MEPPR은 지진응답해석의 결과인 CSR을 이용하여 다음과 같이 쉽게 EPPR로 변환하여 사용할 수 있다.

$$EPPR = MEPPR \times CSR = 2u_{corr}/\sigma_d \times \sigma_d/2\sigma_c' = \frac{u_{corr}}{\sigma_c'} \quad (4)$$

이러한 MEPPR 개념은 풍화토에 대한 실내시험의 결과로부터 도출된 것이지만 확인 및 검증 절차를 거쳐서 사질토에 대해서도 확장할 수 있을 것으로 생각된다.

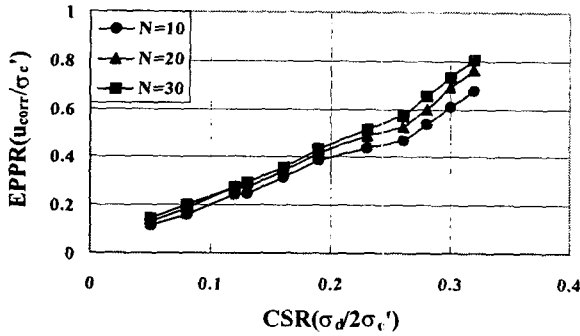


그림 3. CSR이 EPPR에 미치는 영향

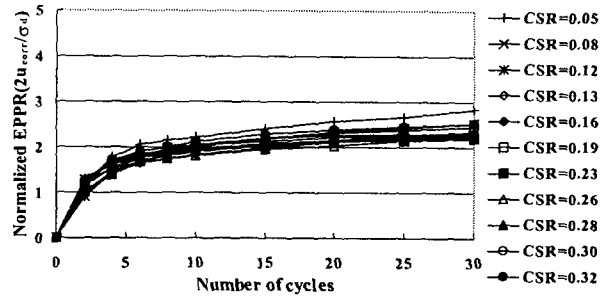


그림 4. 반복하중의 재하횟수와 MEPPR의 관계

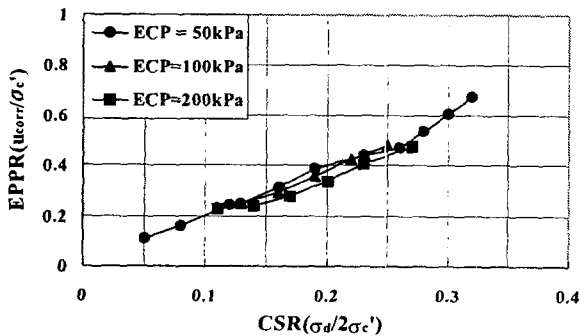


그림 5. 유효구속압이 EPPR에 미치는 영향

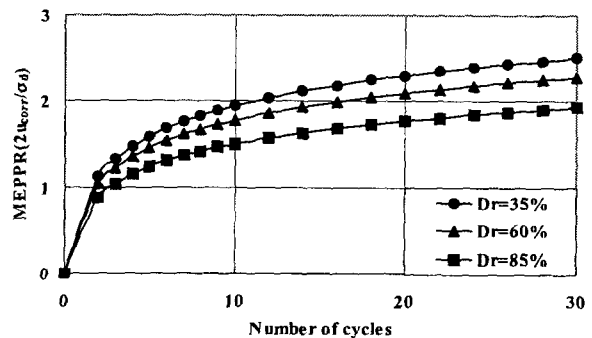


그림 6. 상대밀도에 따른 각각의 MEPPR 곡선

3.3 과잉간극수압의 소산에 의한 체적변형특성

비배수 반복재하과정에서 발생한 과잉간극수압은 반복재하과정이 종료되면 배수와 동시에 급격히 소산된다. 이 과정에서 배수된 물의 체적을 측정하여 과잉간극수압의 소산에 의한 체적변형특성을 연구하였다.

그림 8은 상대밀도가 60%이고 반복재하횟수가 100회인 경우, 반복재하과정에서 발생한 EPPR과 과잉간극수압이 소산되면서 발생하는 체적변형률의 관계를 각각의 구속압에 대하여 함께 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 구속압의 변화가 체적 변형 특성에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 즉, 반복하중에 의한 지반의 체적변형은 과잉간극수압의 소산에 의해서 나타나는 특성이지만, 과잉간극수압의 절대적인 크기가 아닌 유효구속압에 대한 과잉간극수압의 크기 비, 즉 EPPR에 의해 결정된다고 할 수 있다.

그림 8은 다양한 유효구속압 조건에서 비배수 반복재하과정에서 발생한 과잉간극수압이 배수와 동시

에 소산되면서 발생하는 체적변형률을 각 상대밀도에 대해서 나타낸 것으로, 사질토에 대한 기존의 연구 결과와 같이 미액상화 지반에서 과잉간극수압의 소산시에 발생하는 체적변형률은 EPPR에 의해서 결정된다(Lee와 Albaisa, 1974; Toyota 등, 1995). 그림에서 나타난 바와 같이 반복재하과정에서 발생한 EPPR의 증가에 따라 과잉간극수압의 소산에 의한 체적 변형률도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 상대밀도의 증가에 따라 발생하는 체적변형률은 감소한다.

Lee와 Albaisa(1974)가 사질토에 대해 수행한 시험의 결과에 의하면 과잉간극수압의 소산에 의한 체적변형 특성은 단지 과잉간극수압의 크기에만 의존하며 그 발생 방법과는 무관하다. 본 연구에서는 이러한 특성의 풍화도에 대한 적용 가능성을 타진하기 위하여 정적인 방법으로 과잉간극수압을 발생시킨 후에 소산시키면서 체적변형률을 측정하는 시험을 수행하였다. 그림 9는 상대밀도가 60%이고 구속압이 50kPa인 경우의 결과를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 풍화도에서도 사질토 시험의 결과와 마찬가지로 과잉간극수압은 그 발생 원인과는 무관하게 그 크기만이 체적변형률에 영향을 미친다. 따라서, 반복삼축시험의 번거로움과 장비의 제약 등을 피하여 정적인 시험만으로도 과잉간극수압의 소산에 의한 체적변형특성을 파악할 수 있다.

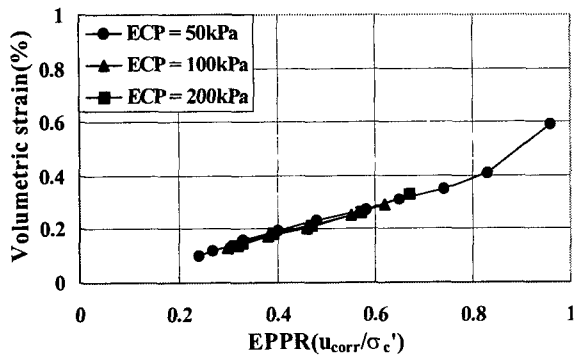


그림 7. 유효 구속압이 체적변형률에 미치는 영향

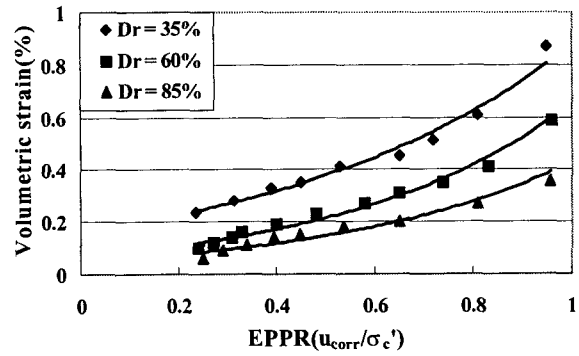


그림 8. 상대밀도에 따른 각각의 체적변형률

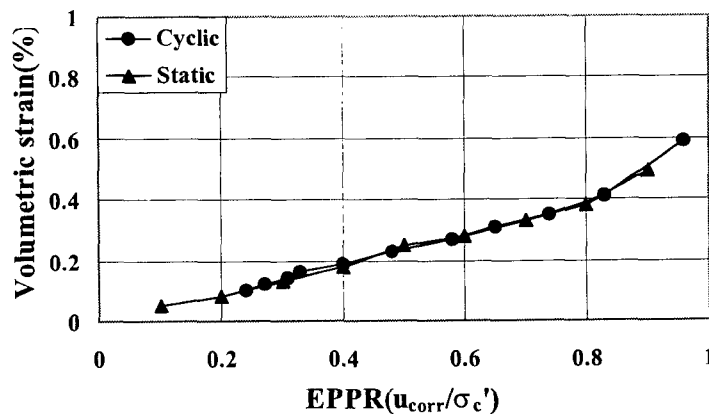


그림 9. 과잉간극수압의 발생 원인이 체적변형 특성에 미치는 영향

4. 결론

본 논문에서는 반복재하후 미액상화 풍화토 지반의 변형 거동을 연구하기 위하여, 반복삼축시험을 실시하여 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 반복하중에 의해서 발생하는 EPPR(과잉간극수압비)는 CSR(반복전단응력비)와 선형적인 관계를 가지며, ECP(유효구속압)의 영향은 미소하다.

(2) 반복하중에 의해서 발생하는 과잉간극수압을 새로이 제안된 MEPPR(수정 과잉간극수압비)의 형태로 나타내면, 유효구속압 및 CSR(반복전단응력비)와 상관없이 반복재하횟수의 함수로 나타낼 수 있다. 새로이 제안된 MEPPR 개념을 사용하면, 시험 횟수를 최소화하여 과잉간극수압비(EPPR)와 체적변형률을 쉽게 예측할 수 있는 이점을 가진다.

(3) 미액상화 지반에서 발생하는 체적변형률은 EPPR(과잉간극수압비)에 의해서 결정되며, 이러한 체적변형률은 과잉간극수압의 발생 방법과는 무관하다. 이는 기존의 사질토에 대한 연구 결과와 잘 일치한다.

5. 감사의 글

본 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 지원에 의해 수행된 지진재해 대응기술 개발사업(97-N2-01-01-A-02) 중 “라이프라인의 내진설계와 내진성능향상”의 일환이며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

6. 참고문헌

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. 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
3. 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
4. Seed, H. B. and Silver, M. L.(1972), "Settlement of Dry Sands During Earthquakes", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.98, No. SM4, pp. 381~397
5. 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