

액상화 후 잔류전단변형률이 체적변형률과 유효응력 관계에 미치는 영향

Effect of Residual Shear Strain on the Relationship between Volumetric Strain and Effective Stress after Liquefaction

권영철[†]

Kwon, Youngcheul

ABSTRACT : The settlements by liquefaction seldom occur uniformly because of soil homogeneity, however differential settlements are major cause of the damages to structures. From the past researches, author paid attention to the fact that stress history during undrained cyclic shear process affects greatly on the volumetric strains of the post-liquefaction. Therefore, the effect of the residual shear strain in cyclic shear process was examined in this study. The experiment apparatus based on strain control with volumetric strain control device was used for the study to investigate the effect of the residual strain on the relationship between volumetric strain and effective stress of clean and granite sandy soil. It could be seen an insignificant difference in the volumetric strain after liquefaction under various residual shear strain conditions in the case of clean sand. On the other hand, in granite sandy soil, the volumetric strain after liquefaction was small when the lower level of the residual shear strain was applied. And, the residual shear strain during cyclic shear affected the shape of the relation curve between effective stress and volumetric strain as well.

Keywords : Post-liquefaction, Volumetric strain, Residual shear strain, Strain controlled triaxial test apparatus, Sand

요 지 : 액상화에 의해 발생하는 피해의 상당 부분은 반복전단과정에서 발생한 과잉간극수압이 소산되면서 지표에 나타나는 침하에서 유발된다. 그러나 지반은 매우 복잡한 구조로 되어 있기 때문에 침하는 균등하게 발생하지 않으며 대부분 부등 침하의 형태로 발생되게 된다. 일반적으로는 이러한 잔류전단변형률이 없는 상태에서 재압밀을 수행하지만 현실적으로는 잔류전단변형이 남아있는 것이 자연스러운 현상이라는 인식과 함께 다양한 다이레이턴시 특성하에서 발생하는 액상화 후 재압밀에 대한 고찰이 거의 이루어지지 않았다는 점에 주목하여 본 연구에서는 잔류전단변형률이 액상화 후 재압밀과정에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위하여 변형률 제어에 기반을 둔 시험장치와 간극수의 배수를 정밀 제어할 수 있는 체적변형률 제어장치를 이용하여 세립분을 포함하고 있지 않은 표준사와 세립분을 포함한 풍화토에 대한 일련의 삼축압축시험을 실시하였고 그 결과를 고찰하였다. 결과 표준사의 경우에는 상대적으로 잔류전단변형률이 액상화 후 체적압축특성에 미치는 영향이 작았으나 풍화토의 경우에는 유효응력-체적변형률 관계곡선이 잔류전단변형률이 클수록 하방에 위치하였으며 곡선의 형상에도 영향을 미치고 있었고 대체적으로 응력 수준이 낮은 배수 초기에 체적변형률이 급증하며 유효응력 증가에도 거의 체적변형은 일어나지 않고 있다. 액상화에 의한 침투유동과정이 낮은 응력 수준에서 발생된다는 점을 고려하면 이러한 관계 곡선의 형상은 매우 중요한 의미를 갖는다.

주요어 : 액상화 후 배수과정, 체적변형률, 잔류전단변형률, 변형률 제어 삼축압축시험, 모래

1. 연구 필요성

지반 진동에 의한 액상화는 액상화 발생 그 자체보다는 액상화 발생 이후에 분사현상이나 침하 혹은 초기 전단을 받고 있는 지반에서는 전단 방향으로 유동하며 심각한 피해를 유발하게 된다. 1964년 니이가타 지진 이후 액상화 현상에 대한 발생 메카니즘과 가능성 평가법(Seed 등, 1971; Seed 등, 1983), 잔류 침하량의 예측 및 저감 대책(Shamoto 등, 1998) 혹은 측방유동에 의한 구조물 기초 손상, 해안구조물의 변형 및 기능상실 등 지반 유동에 의한 시설물 성능 저하 등(Ishihara 등, 1990; Finn, 1998)에 대한 연구가 활발하게

진행되어 왔다.

실제로 액상화에 의해 발생하는 피해의 상당 부분은 반복전단과정에서 발생한 과잉간극수압이 소산되면서 지표에 나타나는 침하에서 유발된다. 그러나 지반은 매우 복잡한 구조로 되어 있기 때문에 침하는 균등하게 발생하지 않으며, 대부분 부등 침하의 형태로 발생되게 된다. 이러한 부등 침하는 라이프라인이나 사회 기반시설의 성능저하에 크게 영향을 미치기 때문에 이를 다양한 접근을 통해 상세하게 검토할 수 있는 방안이 개발되어 왔다(Collins 등, 2003). 또한 다양한 실내시험 결과를 통해 비배수 반복전단을 받은 액상화된 지반이 배수 과정을 통해 어떠한 체적 변화를 겪

[†] 정회원, 한국사이버대학교 소방방재학과 교수(E-mail: kyc@mail.kcu.ac)

게 되는지를 규명한 일련의 연구가 수행된 바 있다(Lee 등, 1974; Tatsuoka 등, 1984; Nagase 등, 1988). 이들은 실험적 접근을 통해 액상화 후에 발생하는 체적변형이 비단 흙의 밀도에만 영향을 받는 것이 아니라 반복전단과정 중에 겪게 되는 최대 전단 변형률이 밀접한 영향을 미치고 있다는 점에 주목하였다. 추후 이들의 연구를 바탕으로 구체적으로 침하를 예측할 수 있는 방법에 대한 논의도 계속되었다(Tokimatsu 등, 1987; Tsukamoto 등, 2004).

결국 비배수 전단과정에서의 응력이력이 액상화 후 체적 변형에 큰 영향을 미친다는 것은 일반적으로 받아들여지는 사실이며, 三上 등(2002)은 반복전단과정에서의 재하 회수나 세립분의 함유량 등이 액상화 후 체적변화에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

본 연구에서는 이러한 문헌 고찰 등을 통해 반복전단 이력이 가해진 이후 일정 범위의 변형률이 남아있는 상태에서 재압밀이 되는 경우를 상정하여 연구를 수행하였다. 일반적으로 이러한 잔류전단변형률이 없는 상태에서 재압밀을 수행하지만 현실적으로는 잔류전단변형이 남아있는 것이 자연스러운 현상이라는 인식과 함께 다양한 다이레이팅 시 특성하에서 발생하는 액상화 후 재압밀에 대한 고찰이 거의 이루어지지 않았다는 점에 주목하여 본 연구를 수행하였다. 이를 위하여 변형률 제어에 기반을 둔 시험장치와 간극수의 배수를 정밀 제어할 수 있는 체적변형률 제어장치를 이용하여 세립분을 포함하고 있지 않은 표준사(Toyoura sand)와 세립분을 포함한 풍화토에 대한 일련의 삼축압축시험을 실시하였고 그 결과를 고찰하였다. 또한 지금까지 체적 변형의

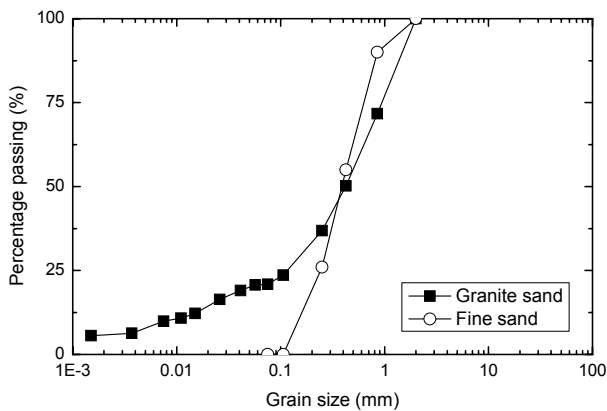


그림 1. 대상 시료의 입도분포곡선

총량에만 관심을 갖고 있는 것이 일반적이었다면 본 연구에서는 배수 과정에서 보이는 유효응력과 체적변형률의 관계에도 주목하여 연구를 수행하였다.

2. 실험개요

2.1 사용된 시료의 조성

본 연구에서는 입도분포가 불량한 표준사와 세립분을 포함하고 있는 풍화토를 실험 대상 시료로 사용하였다. 그림 1은 표준사와 풍화토의 입도분포곡선을 보이고 있으며, 두 흙은 통일분류법상 각각 SP와 SW로 분류된다. 표준사는 건조시료를 낙하고 45cm를 유지하였고 공중 낙하법을 이용하여 상대밀도 65%를 목표로 시료를 조성하였으며 등방압밀 종료 후에는 평균 68.13%의 상대밀도를 유지하고 있었다. 풍화토 공시체는 목표 중량을 300g으로 설정하고 나무 망치로 진동을 가하면서 낙하고 10cm에서 낙하시켜 최종적으로 노출부를 제거하는 방법으로 제작하였다. 풍화토 공시체의 초기 상대밀도는 80% 전후로 평가되었으며, 등방 압밀이 종료된 시점에서는 90% 전후를 유지하고 있었다. 표 1에서는 공시체 작성 및 이와 관련된 기초적인 특성을 요약하였다.

2.2 응력이력 재하 및 실험 조건

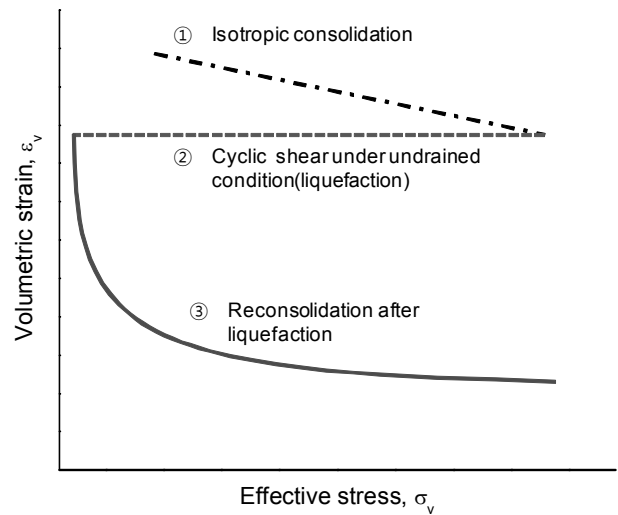


그림 2. 응력 이력 재하 개요도

표 1. 시료 작성 및 기본적인 특성

시료 종류	시료직경 (mm)	초기시료높이 (mm)	초기체적 (mm ³)	공시체중량 (g)	평균상대밀도 (%)	압밀 후 상대밀도 (%)
표준사	49.8	99.9	194,190	295.67	65.59	68.13
풍화토	49.0	100.0	188,120	303.95	80.12	91.19

표 2. 실험 조건 요약

시료종류	목표상대밀도(%)	반복전단 이력(%DA) ¹⁾	반복재하회수	잔류전단변형률(SA)
표준사	65	1.5~15	5	±0.75
				±1.50
				±3.75
				±5.25
				±7.50
풍화토	90	1.5~15	5	±7.50, +12%

¹⁾ 전단변형률=1.5X축변형률 DA: double amplitude SA: single amplitude

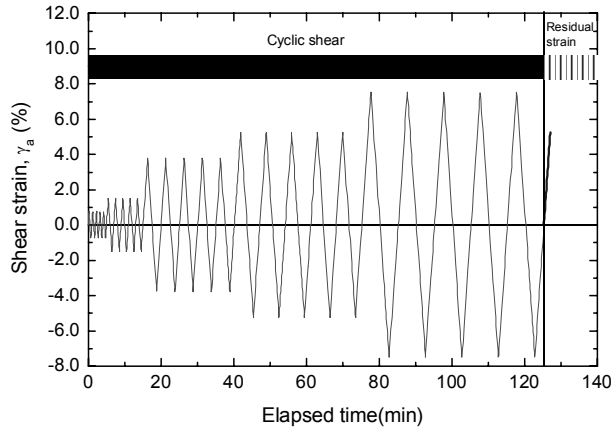


그림 3. 반복전단 이력 및 잔류전단변형률의 재하(잔류전단변형률 +3.5%)

그림 2는 본 연구에서 실시한 재하 단계를 모식적으로 묘사한 그림이다. 먼저 공시체는 등방 압밀 과정을 거쳐 소정의 유효응력을 유지하게 된다(① Isotropic consolidation). 압밀이 종료된 이후에는 반복전단 이력을 재하한다(② Cyclic shear under undrained condition). 비배수 반복전단 이력은 그림 3에 나타난 바와 같이 양진폭(Double Amplitude, DA) 기준 1.5%, 3%, 7.5%, 10.5%, 15%의 점증형 삼각파가 각 5회씩 재하되는 형태로 공시체에 가해졌다. 비배수 반복전단 이력이 가해진 이후에는 액상화 후 재압밀과정(③ reconsolidation after liquefaction)에 미치는 잔류전단변형률의 영향을 알아보기 위해 표 2에 나타난 바와 같은 실험조건에 따라 잔류전단변형률을 재하하게 된다. 반복전단과 잔류전단변형률의 재하 속도는 축 변형률을 기준으로 2.0%/min로 설정하였다. 또한 액상화 후 재압밀과정에서는 후술하게 될 체적 변형률 제어장치(Volumetric Strain Control Device, VSCD)를 이용하여 일정한 변형률 속도로 배수를 실시하게 되며, 변형률 속도는 표준사의 경우는 0.524%/min, 풍화토의 경우에는 0.324%/min로 설정하였다. 각각의 시료에 대한 변형률 속도는 투수계수와 축응력을 유지할 수 있는 조건을 감안하여 결정되었다.

2.3 변형률 제어에 의한 비배수 반복전단 삼축압축시험

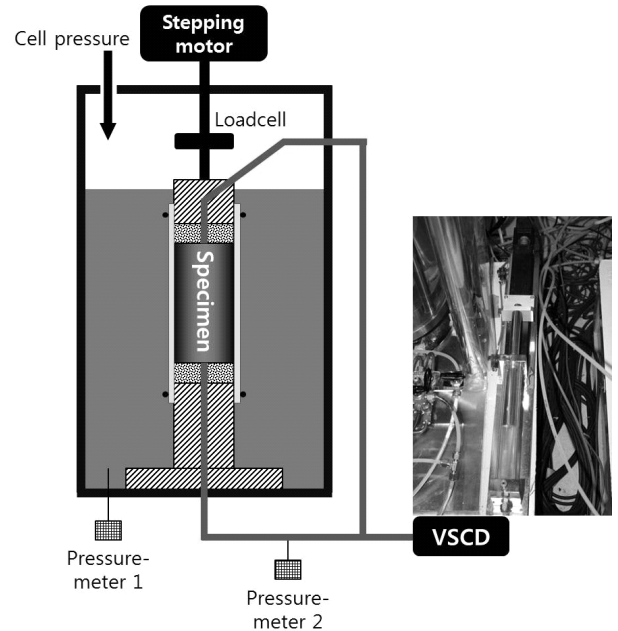


그림 4. 실험장치 개요

그림 4는 본 연구에서 사용한 변형률 제어에 기반한 반복전단 삼축압축시험 장치의 개략도를 보이고 있다. 이 장치는 통상의 반복전단 삼축압축시험기와 구성과 제어에서 크게 다르지 않다. 다만 변형률 제어 성능을 향상시키고 배수량을 정확하게 제어하기 위한 특수한 장치가 추가되었다. 먼저 변형률 제어에 기반한 비배수 반복전단을 실현하기 위해서는 축 변형률을 정도 높게 제어할 수 있어야 한다. 이를 위하여 그림 4에 나타난 바와 같이 시료 축 방향 제어는 스텝핑모터를 적용하였다. 이 장치는 정확한 위치결정이 가능한 모터를 이용하여 회전력을 발생시키고 이 회전력을 직선 운동으로 변환시켜 시료에 정해진 변형률을 제어하는 개념으로 구성된다. 통상 10,000 pulse를 모터에 전송하면 모터가 360° 회전하게 되며 1회 회전에 의해 2mm를 이동하게 된다. 따라서 본 실험 장치에서 스텝핑모터의 축 변위 제어 분해능은 10⁻⁴mm/pulse이며, 변형률 기준으로는 10⁻³%/pulse에 해당되는 높은 제어 정도를 갖고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 액상화 후 과잉간극수압 소산 과정 중에 발생하는 체적변형률과 유효응력의 관계가 중요한 만큼 체적변

형률의 정밀한 측정이 필요하다. 그러나 체적 측정에 주로 사용되어 온 이중관 형식의 측정장비는 배수량 측정의 정도가 높지 않은 만큼 별도의 장비를 적용하였다. 그림 4에 나타난 체적변형률 제어장치(VSCD)는 주사기와 같은 원리로 피스톤이 전진 혹은 후진하며 공시체 내에 간극수를 주입하거나 혹은 배수시키게 된다. 체적변형률 제어장치는 축 변형률 제어장치와 동일한 스테핑모터를 사용하고 있으며, 장치의 모든 성능을 고려하여 계산된 분해능은 $6.3 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{pulse}$ 로 계산되었다. 이러한 분해능은 체적변형률 기준으로 $3.21 \times 10^{-5} \%/ \text{pulse}$ 로 계산되며, 본 연구의 목적을 달성하기 위해 충분한 분해능을 갖고 있다고 판단된다.

2.4 실험 과정

본 연구에서 2.2절에서 기술된 바와 같이 세 가지의 재하 단계를 거치며 실험이 진행되었다. 통상 실시되는 반복전단 삼축압축 시험과 크게 다르지 않지만 몇 가지 특이사항에 대해 기술한다. 전술한 바와 같이 표준사와 풍화토를 이용하여 시료를 조성하였으며, 부압(-30~-20kPa 정도)으로 자립시켰다. 셀 실을 재하대 위에 설치한 후 셀에 물을 채우고 부압을 해제하여 실험 준비를 마친 후 각종 계측기에 대한 초기 세팅을 실시하였다.

포화단계에서는 먼저 공시체 체적의 2배 정도의 이산화탄소를 하부로 주입하여 공시체 내부의 공기를 이산화탄소로 치환하였다. 이산화탄소의 주입이 완료되면 완전히 탈기된 증류수를 시료 하부로 주입하며 이때도 공시체 체적의 2배 정도를 주입하였다. 그 후 98kPa의 배압을 이용하여 2시간 정도 시료를 포화시키며, B치를 측정하여 포화도 98%에 도달하면 등방압밀을 실시하였다.

등방압밀 단계에서는 소정의 유효응력 조건에 도달할 수 있도록 셀에 압력을 가하고 상하부 배수 관로를 통해 배수를 실시하였다. 등방압밀 종료 후에는 2.2절에 기술한 바와 같이 반복전단하중을 재하하여 실험 조건에 따라 잔류전단 변형률을 가하였다. 반복전단 이력을 재하한 후 체적변형률 제어장치를 작동시켜 간극수를 일정한 속도로 배수시켰으며 유효응력과 체적변형률과의 관계를 얻게 된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 반복전단 이력을 받은 시료의 거동 특성

모든 실험은 재현성 확인 차원에서 2회 이상 실시되었으

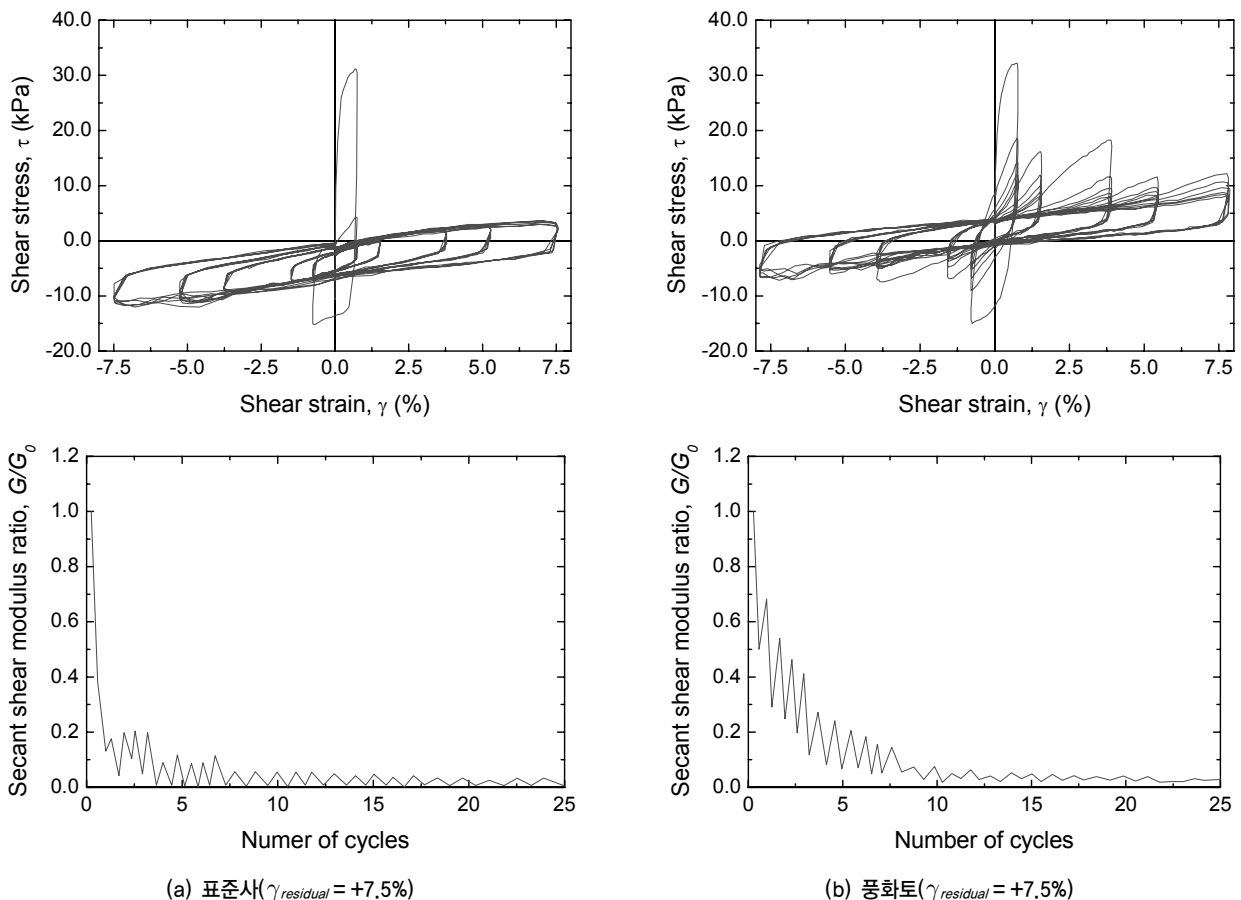


그림 5. 전단 응력-전단 변형률 관계 및 강성 저하율

며, 각 실험 조건에서 약간의 차이를 보이고 있으나 전체적인 경향에 있어 근본적인 오류를 발생할 만큼의 큰 차이가 없는 경우를 분석 대상으로 하였다. 이렇게 차이가 발생하는 것은 B치의 차이나 공시체 제작과정에서의 실험오차의 영향인 것으로 판단하고 있다. 이러한 영향을 고려할 때 각 실험조건 하에서의 재현성은 확보된 것으로 판단하고 분석을 실시하였다.

그림 5는 전단 응력과 전단 변형률 및 강성 저하율 등 대표적인 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 5(a)는 잔류전단변형률($\gamma_{residual}$) +7.5%의 표준사에 대한 실험 결과이며, 그림 5(b)는 잔류전단변형률 +7.5%의 풍화토의 실험 결과이다. 그림에서 표준사의 경우에는 구속압을 90kPa, 풍화토에서는 100kPa를 적용시켰으며 초기 상대밀도는 65%와 90% 정도를 유지하고 있는 상태로 실험을 실시하였다. 먼저 그림 5 상단은 전단 응력과 전단 변형률의 관계를 나타내고 있다. 반복전단 이력이 증가할수록 전단 강성이 서서히 저하되고 있는 점을 확인할 수 있다. 특히 표준사와 같이 세립분을 포함하고 있지 않은 모래의 경우에는 재하 초기 단계에서 급격하게 전단 강성이 저하되어 액상화에 대한 저항력을 잃어가는 것으로 나타났다. 반면 세립분을 포함하고 있는 풍화토의 경우에는 표준사에 비해 전단 강성의 저하경향이 단계적으로 발생하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 그림 5 하단의 강성 저하 경향을 통해 명확하게 구별되고 있으며, 재하 회수가 증가되면서 완전 액상화에 도달한 것으로 나타났다.

그림 6은 대표적인 경우인 잔류전단변형률($\gamma_{residual}$) +7.5%의 표준사와 풍화토의 실험 결과 중 유효응력 경로를 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 응력 경로상의 차이가 명확하게 나타났으며 표준사가 재하 초기에 급격하게 유효응력이 감소되면서 액상화에 도달하고 있으며 낮은 응력 수준에서

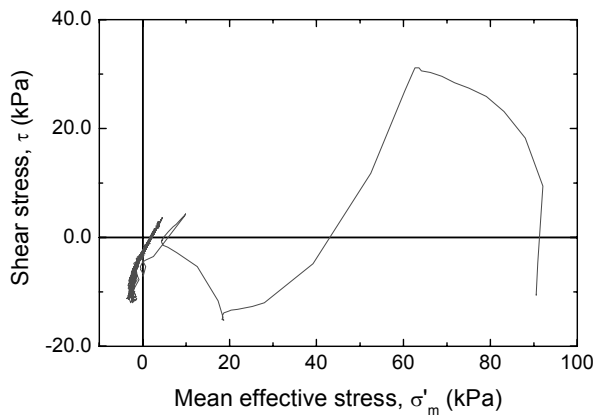
일부 유효응력이 회복되는 현상(cyclic mobility)이 발생하고 있다. 한편, 세립분을 포함하고 있는 풍화토에서는 액상화에 이르는 과정도 표준사와 다르며, 유효응력 회복 현상도 더욱 명확하게 발생하고 있다는 점에서 차이를 보이고 있다.

3.2 잔류전단변형률의 차이에 의한 체적압축특성

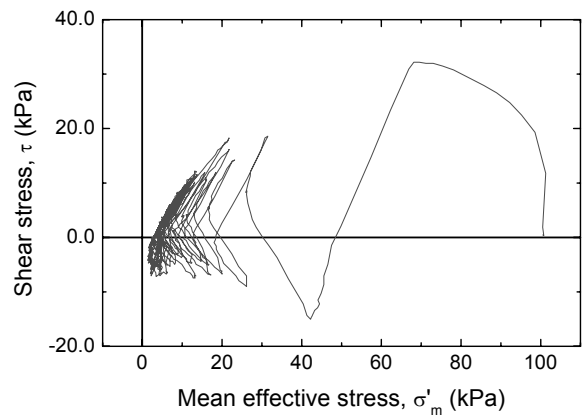
전술한 바와 같이 표준사에는 전단 변형률을 점증형 삼각파의 형태로 7.5%까지 가한 후 실험 조건에 따라 잔류전단변형률을 가했다. 이 결과 얻어진 액상화 후 재압밀과정에서의 $\varepsilon_v - \sigma'_m$ 관계와 체적압축계수로 정리한 결과를 그림 7에 나타내었다.

그림 7(a)와 (b)에서는 각각 정 방향과 부 방향의 잔류전단변형률을 나누어 도시하였으며, 비교를 위하여 잔류전단변형률을 가하지 않은 경우를 함께 도시하였다. 유효응력과 체적변형률의 관계는 낮은 유효응력 영역에서 급격하게 발생하는 경우, 유효응력의 회복과 함께 점차적으로 체적변형률이 발생하는 경우, 마지막으로 유효응력이 완전히 회복되는 단계에서 급격하게 체적변형률이 발생하는 경우 등 세 가지의 패턴을 예상해 볼 수 있다. 본 실험을 통해 얻은 유효응력과 체적변형률의 관계 곡선 형상에 대해 살펴보면, 모든 경우에서 낮은 응력 수준에서 급격하게 체적변형률이 발생하여 이후 변곡점을 지나면서 유효응력 회복에 비해 체적변형률의 발생이 매우 작거나 어느 특정 값에 접근해 가는 형상을 보이고 있다. 특히 액상화에 의한 침투유동과피가 낮은 응력 수준에서 발생된다는 점을 고려하면 이러한 관계 곡선의 형상은 매우 중요한 의미를 갖고 있으며, 실험 결과에 의해서도 대부분의 체적 변화가 유효응력 10kPa 미만의 낮은 응력조건에서 발생하고 있다.

또한 그림 7을 통해 알 수 있듯이 유효응력이 낮은 지점

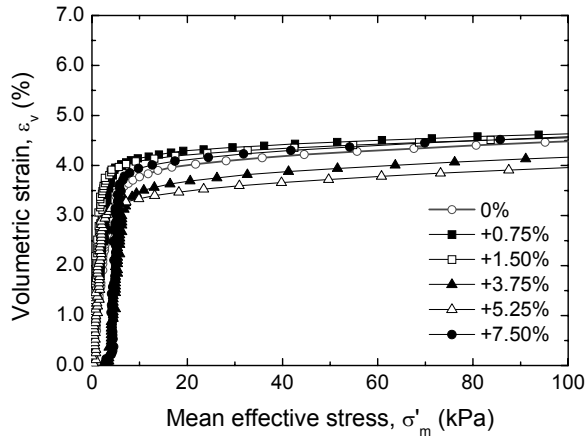


(a) 표준사($\gamma_{residual} = +7.5%$)

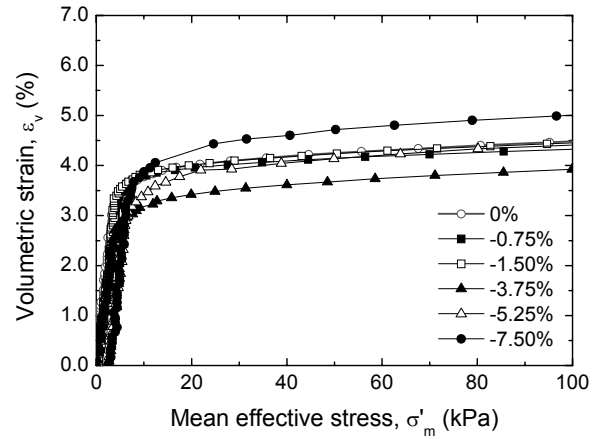


(b) 풍화토($\gamma_{residual} = +7.5%$)

그림 6. 유효응력경로



(a) 정의 잔류전단변형률



(b) 부의 잔류전단변형률

그림 7. 체적변형률과 평균 유효응력과의 관계(표준사)

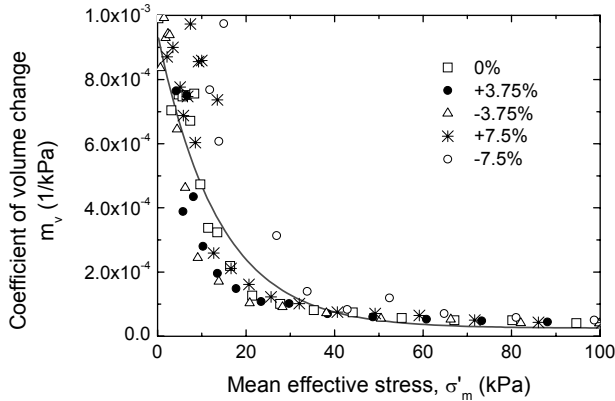


그림 8. 체적압축계수와 평균 유효응력과의 관계(표준사)

과 최대 체적변형률에서 다소 차이가 있는 값을 보이고는 있으나 이러한 변화 특성이 매우 불규칙할 뿐만 아니라 체적변형률의 차이 역시 그다지 크지 않다고 판단된다. 그러나 곡선의 형상은 전체적인 실험 결과에서 매우 유사한 것으로 나타나고 있다. 곡선의 형상적인 측면에서 고찰해 본 결과가 그림 8에 정리되어 있다. 그림 8에서는 유효응력 회복 과정 중에 계산된 체적압축계수의 변화를 나타내고 있으며, 그림에는 ± 3.75 , ± 7.5 그리고 비교를 위해 0%의 잔류전단변형률의 경우가 도시되었다. 유효응력의 변화량과 체적변형률의 변화량의 비로 표현되는 체적압축계수는 전체 응력구간 대부분에서 매우 유사한 경향을 보이고 있으며 다소의 편차를 인정하는 범위에서는 하나의 추세선으로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

그림 9와 10에서는 표준사에 대한 실험 결과를 최대 체적변형률과 정규화 누적 손실 에너지로 도시한 그림이다. 잔류전단변형률에 따른 최대 체적변형률은 다소의 편차를 보이고는 있지만 큰 변화를 보이지 않고 잔류전단변형률을 가하지 않은 경우(0%)와 거의 유사한 값을 보이고 있다. 이러한 경

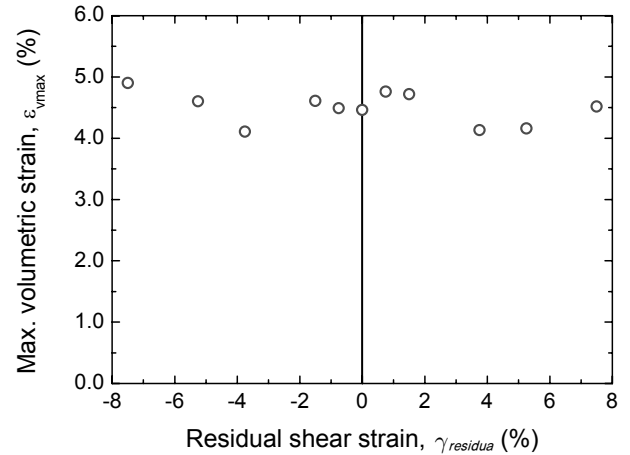


그림 9. 잔류전단변형률에 따른 최대 체적변형률(표준사)

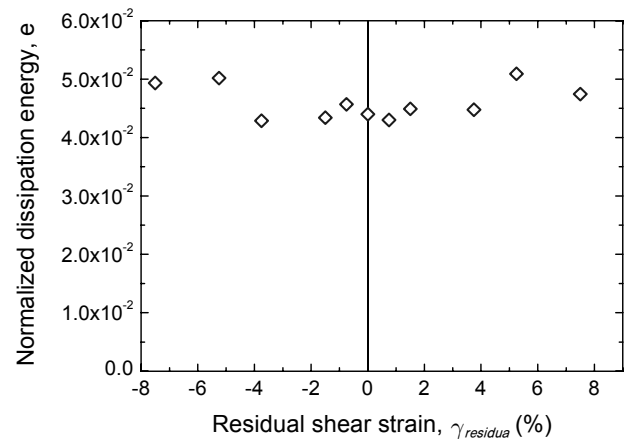


그림 10. 잔류전단변형률에 따른 정규화 누적 손실 에너지(표준사)

향은 잔류전단변형률을 정과 부의 방향으로 가한 경우에 모두 동일하게 나타나는 특성이다. 그림 10은 정규화 누적 손실 에너지로 정리한 결과이며, 누적 손실 에너지(dissipation energy)란 외력으로서 입력되는 에너지와 이 외력이 제거 될 때 흙이 외부로 발산하는 에너지의 차, 즉 흙이 소성 변

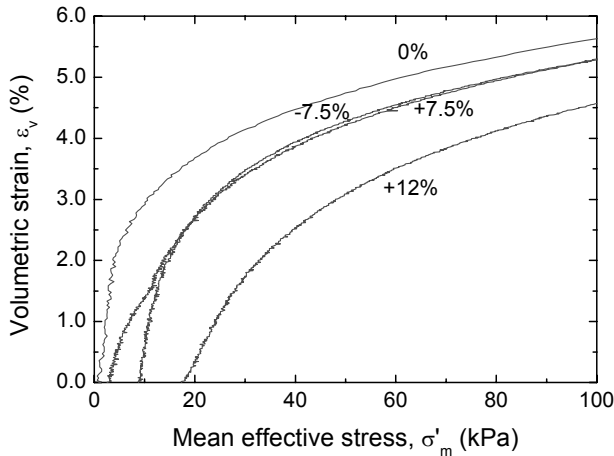


그림 11. 체적변형률과 평균 유효응력과의 관계(풍화토)

형률 에너지로서 소비할 수 있는 에너지의 양이라는 물리적 의미를 갖는다(Kazama 등, 2000). 결국 액상화에 저항하는 저항력을 정량적으로 표현한 지수로 이해할 수 있다. 그림 10에서 알 수 있듯이 정규화 누적 손실 에너지 역시 잔류전단변형률에 따라 값의 변화는 거의 없으며, 따라서 액상화 후 재압밀 상태에서의 상태변화에는 잔류전단변형률의 영향이 미미할 수 있다는 점을 알 수 있다.

그림 7~10을 통해 세립분을 포함하지 않은 입도가 불량한 표준사의 경우에는 본 연구에서 상정한 잔류전단변형률 범위 내에서는 다소의 실험적 오차와 결과에서의 편차를 포함하고 있기는 하지만 액상화 후 재압밀과정의 체적 압축 특성에 미치는 영향이 크지 않다는 결론을 얻을 수 있었다.

다음으로 세립분을 포함한 풍화토를 대상으로 잔류전단변형률을 0%, ±7.5%, 12% 가한 경우에 대한 실험 결과를 도시한 것이 그림 11이다. 먼저 표준사와 비교한 풍화토의 유효응력-체적변형률 곡선의 패턴은 유효응력이 낮은 초기 배수 과정에서의 체적변형률의 발생이 상대적으로 억제되고 있다. 이는 세립분의 포함에 따라 흐름에 저항이 발생한 결과인 것으로 추정된다. 또한 동일한 조건하에서 잔류전단변형률 조건을 바꾼 경우 최대 체적변형률은 잔류전단변형률을 가한 쪽이 더 작아지고 있으며 그래프의 기본적인 형상도 잔류전단변형률이 커짐에 따라 달라지는 경향을 보이고 있다. 잔류전단변형률 ±7.5%에서는 정과 부의 잔류전단변형률 조건에서 차이는 거의 발생하고 있지 않으며 매우 유사한 값을 보이고 있는 반면 그래프의 형상은 초기 낮은 유효응력 수준에서 급격한 배수가 발생되고 있다는 점에서 잔류전단변형률을 가하지 않은 경우와 유사한 점을 확인할 수 있었다. 반면 잔류전단변형률이 +12%인 경우에는 ±7.5%인 경우에 비해서도 아래쪽에 곡선이 분포하고 있었으며 초기의 급격한 배수 없이 다른 두 경우에 비해 완만하게 체적

변형이 발생하고 있다. 이러한 점을 표준사와 비교해봤을 때 풍화토는 다이레이턴시 특성이 체적변형률과 평균 유효응력과의 관계, $\epsilon_v - \sigma'_m$ 및 최대 체적변형률과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

4. 결론 및 요약

- (1) 표준사와 비교해봤을 때 풍화토는 다이레이턴시 특성이 체적변형률과 유효응력과의 관계에 미치는 영향이 상대적으로 크게 나타났으며 잔류전단변형률이 클수록 체적변형률과 평균 유효응력과의 관계 곡선이 하방으로 이동하고 있었다. 또한 초기에 급격하게 발생하는 체적변형률의 발생 패턴도 많이 억제되고 있었다. 이러한 점을 표준사와 비교해봤을 때 풍화토는 다이레이턴시 특성이 체적변형률과 평균 유효응력과의 관계, $\epsilon_v - \sigma'_m$ 및 최대 체적변형률과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 표준사와 같은 지반조건이 자연 상태에서 존재하기 어려운 측면을 고려하면 이러한 결과는 풍화토 지반의 배수 특성 연구 측면에서 유용하리라 판단된다.
- (2) 세립분을 포함하지 않은 입도가 불량한 표준사를 이용하여 잔류전단변형률이 액상화 발생 후 체적변형률의 발생 양상과 최대 체적변형률 그리고 정규화 누적 손실 에너지에 미치는 영향을 검토하였으며, 다이레이턴시 특성이 체적변형률과 유효응력의 관계인 $\epsilon_v - \sigma'_m$ 에 미치는 영향이 상대적으로 낮음을 확인할 수 있었다.
- (3) 유효응력과 체적변형률의 관계, $\epsilon_v - \sigma'_m$ 곡선 형상에 대해 살펴보면, 본 연구에서 실시한 실험 결과에서 대체적으로 응력 수준이 낮은 배수 초기에 체적변형률이 급증하며 변곡점이 지난 이후에는 유효응력 증가에도 거의 체적변형은 일어나지 않고 있다. 액상화에 의한 침투유동파괴가 낮은 응력 수준에서 발생된다는 점을 고려하면 이러한 관계 곡선의 형상은 매우 중요한 의미를 갖는다.

참고 문헌

1. 三上武子, 澤田俊一, 竹島康人, 中山榮樹, 池田大祐(2002), 液状化後の体積ひずみに及ぼす要因, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部, 土木学会, Vol. 57, pp. 1161~1162.
2. Collins, I. F. and Muhunthan, B.(2003), On the Relationship between Stress-Dilatancy, Anisotropy, and Plastic Dissipation for Granular Materials, *Geotechnique*, Vol. 53, No. 7, pp. 611~618.
3. Finn, W. D. L.(1998), Post Liquefaction Deformation of Em-

- bankments and Effects on Restraining Piles, *Transportation Research Record*, No. 1633, pp. 19~25.
4. Ishihara, K., Yasuda, S. and Yoshida, Y.(1990), Liquefaction-Induced Flow Failure of Embankments and Residual Strength of Silty Sands, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 3, pp. 69~80.
 5. Kazama, M., Yamaguchi, A. and Yanagisawa, E.(2000), Liquefaction Resistance from a Ductility Viewpoint, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 6, pp. 47~60.
 6. Lee, K. L. and Albaisa, A.(1974), Earthquake Induced Settlement in Saturated Sands, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 100, No. GT4, pp. 387~405.
 7. Nagase, H., and Ishihara, K.(1988), Liquefaction-Induced Compaction and Settlement of Sand During Earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 1, pp. 65~76.
 8. Seed, H. B., Idriss, I. M.(1971), Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249~1273.
 9. Seed, H. B., Idriss, I. M., Arango, I.(1983), Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458~482.
 10. Shamoto, Y., Zhanga, J. and Tokimatsu, K.(1998), New Charts for Predicting Large Residual Post-Liquefaction Ground Deformation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 17, pp. 427~438.
 11. Tatsuoka, F., Sasaki, T. and Yamada, S.(1984), Settlement in Saturated Sand Induced by Cyclic Undrained Simple Shear, *Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp. 95~102.
 12. Tokimatsu, K. and Seed, H. B.(1987), Evaluation of Settlements in Sand Due to Earthquake Shaking, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 113, No. 8, pp. 861~878.
 13. Tsukamoto, Y., Ishihara, K. and Sawada, S.(2004), Settlement of Silty Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol. 44, No. 5, pp. 135~148.

(접수일: 2010. 8. 31 심사일: 2010. 9. 15 심사완료일: 2010. 10. 14)