

반복단순전단 시험에 의한 패각질 모래의 동적 거동

Dynamic Behaviors of Shelly Sand in Cyclic Simple Shear Test

윤여원¹⁾, Yeo-Won Yoon, 윤길립²⁾, Kil-Lim Yoon, 최재권³⁾, Jae-Kwon Choi,
김재권⁴⁾, Jae-Kwon Kim, 김승현⁵⁾, Seung-Hyun Kim

¹⁾ 인하대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University, yoonyw@inha.ac.kr

²⁾ 한국해양연구소 책임연구원, Senior Research Scientist of Korea Ocean Research & Development Institute

³⁾ 인하대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Inha University

⁴⁾ 삼성물산(주) 건설부문 상무, Executive director of Samsung Corporation

⁵⁾ 삼성물산(주) 건설부문 과장, Manager of Samsung Corporation

SYNOPSIS : In order to study the effects of shell contents on the liquefaction resistance of the shelly sand, NGI cyclic simple shear tests were performed for the shelly sands with shell contents of 0%, 5%, 10%, 20% and 30% under the effective vertical stress of 50kPa, 100kPa and 150kPa for 40% and 55% of relative density, respectively.

Cyclic simple shear test results showed that for the low effective vertical stress, liquefaction resistance increased rapidly with the increase of shell contents in both 40% and 55% relative density. On the other hand, for the high effective vertical stress, the liquefaction resistance increased slightly in 40% relative density whereas the resistance was almost same in 55% relative density. Liquefaction resistance decreased with increasing effective vertical stress for both 40% and 55% relative density. In the same effective vertical stress and shell contents, liquefaction resistance increased with the increase of relative density of sands.

Key words : Cyclic simpler shear test, Effective vertical stress, Shell contents, Relative density, Liquefaction resistance

1. 서 론

우리나라에서 연약지반을 개량하기 위해서는 아직도 주된 재료로 모래를 사용하고 있으며 모래는 가격이 비싸고 수급 또한 용이하지 않기 때문에 이를 대체할 수 있는 연구가 이루어져 오고 있다. 또한 해안모래에는 다량 또는 소량의 패각이 함유되어 있으며 주요 해안구조물의 설계에는 필수적으로 모래에 대한 액상화 시험을 수행하고 있는 실정이다. 그럼에도 패각이 함유된 해안모래를 사용할 경우 패각이 동적거동에 어떤 영향을 미치는가에 대한 연구 자료가 없는 것이 현실이다.

이러한 여건을 고려하여 볼 때 패각이 함유되어 있는 해안모래가 건설용 재료인 모래의 대체제로서 활용하기 위한 연구가 성공적으로 수행된다면 저렴한 운반비용으로 건설공사의 비용을 절감시킬 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 패각함유율에 따른 모래의 동적 거동을 NGI단순전단시험기를 이용하여 고찰하였다.

2. 이론적 배경

Seed와 Lee(1969)가 처음으로 반복삼축시험기를 이용하여 액상화 현상을 이해하기 위한 실내시험을 시작한 후 느슨한 포화 사질토 지반에서 많이 발생하는 액상화에 대한 수많은 연구를 하였으며 이들의 연구결과에 의하면 액상화의 발생은 상대밀도, 압밀유효구속응력, 반복축차응력, 반복축차응력이 가해진 횟수, 과압밀비 등에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 Lee와 Seed(1967)는 상대밀도가 흙의 액상화에 미치는 영향을 고려하여 반복삼축시험을 수행하였으며 모든 시험에서 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지는 상태, 즉 유효응력이 '0'이 되기 시작할 때를 초기액상화(initial liquefaction)라 하고, 양진폭변형률(double amplitude axial strain)이 20%이상이며 외력에 대한 저항을 거의 잃었을 때를 파괴(failure)로 구분해서 정의하였다.

또한 Ishihara(1993)는 느슨한 모래 공시체의 경우 과잉간극수압이 발생하는 동안 또는 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지게 되면 갑작스러운 강도의 손실과 함께 무리한 큰 변형이 발생하기 때문에 초기액상화는 연화상태(state of softening)로서 발생한다고 하였다. 따라서 다양한 범위의 밀도를 갖는 모래에서 반복하중으로 인하여 발생되는 불안정 상태를 판단하기 위한 기준으로서 약 5% 정도의 양진폭 축변형율의 발생 또는 발생된 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지는 시점을 고려하는 것이 일반적인 관례이다. 단순반복전단시험의 경우 약 7.5%의 전단변형률의 발생을 기준으로 하고 있다(Pillai 와 Stewart, 1994).

3. 실내시험

3.1 시료

본 연구에서 사용한 모래는 모두 인천 송도에서 채취하였고 #4(4.75mm)체를 100% 통과하는 시료를 사용하였으며 폐각은 인천 영종도 지역의 해안에서 채취된 바지락(약90%)과 동죽(10%)을 파쇄하여 3/8"(9.52mm) 체를 100% 통과하는 시료를 사용하였다. 폐각은 보통의 흙 입자의 형상과는 달리 길이가 2.5~6.0cm, 너비는 2~5cm이며 두께는 0.5~1.0mm 정도의 달걀모양의 타원형의 판상구조를 가지고 있다. 폐각 혼합모래는 Table 1과 같이 중량비를 기준으로 폐각 혼합비율을 각각 0%, 5%, 10%, 20%, 30%로 달리하여 총 5개의 시료를 제작하였으며 본 연구에서 폐각 혼합모래의 공학적 특성을 파악하기 위하여 폐각 혼합비율이 다른 5개의 시료에 대해 시험을 행하였다.

Table 1. mixture ratio of shell-sand soils

시료		폐각 30%	폐각 20%	폐각 10%	폐각 5%	폐각 0%
혼합비 (%)	폐각	30	20	10	5	0
	모래	70	80	90	95	100

3.2 최대·최소건조단위중량

일반적으로 최대·최소단위중량은 시료의 다짐정도에 따라 달라지게 된다. 시험시료의 경우 폐각과 모래의 혼합모래이므로 최대·최소건조단위중량은 순수모래와 다르며, 폐각 혼합모래의 최대·최소건조단위중량과 최대건조단위중량을 최소건조단위중량에 대한 비로 나타낸 건조단위중량비를 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 폐각 혼합모래의 최대·최소건조단위중량의 범위는 Table 2에 나타난 것과 같이 최대건조단위중량의 경우 1.651~1.834를 보이고 있고 최소건조단위중량의 경우 1.349~1.530를 보이고 있다.

Table 2. maximum and minimum dry unit weight of shelly sand

대상시료	최대 건조단위중량(g/cm ³)	최소 건조단위중량(g/cm ³)	건조단위 중량비
폐각 30%	1.834	1.530	1.199
폐각 20%	1.778	1.496	1.188
폐각 10%	1.730	1.432	1.208
폐각 5%	1.686	1.396	1.208
폐각 0%	1.651	1.349	1.224

3.3 비중 시험

폐각 혼합모래의 비중시험 결과는 아래의 Table 3와 같다. 폐각의 비중은 혼합비에 따라서 2.67~2.72까지의 범위를 보이고 있으며 이는 대표적인 모래의 비중인 약 2.65보다 약간 큰 값을 나타내고 있다.

Table 3. specific gravity of shelly sand

대상시료	비중 (Gs)
폐각 100%	2.88
폐각 30%	2.72
폐각 20%	2.70
폐각 10%	2.68
폐각 5%	2.67
폐각 0%	2.65

3.4 입도분포 시험

본 연구에서는 폐각 혼합모래의 입도특성을 살피기 위해 입도분석시험을 실시하였고 각 시험시료의 입도분포곡선을 Fig. 1에 나타내었다.

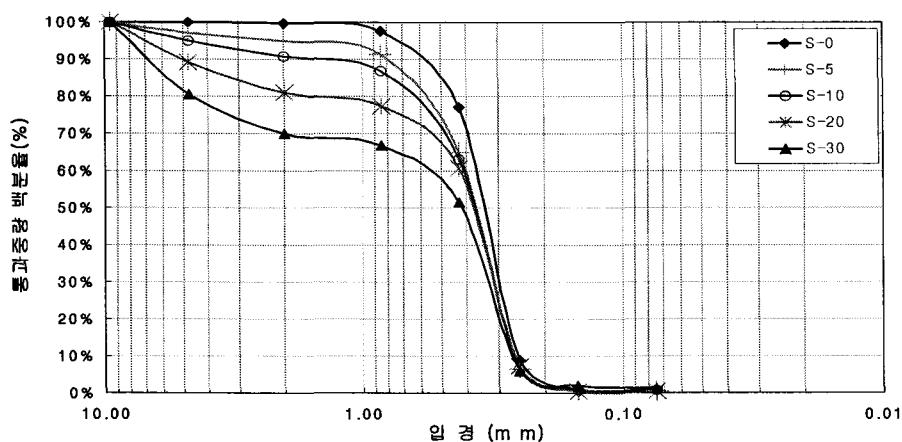


Fig. 1. Grain size distribution of shelly sand

본 연구에 사용된 시험시료의 경우 균등계수의 범위는 1.48~2.31로 폐각의 혼합비가 증가할수록 균등계수도 증가하는 양상을 보이고 있고 곡률계수의 경우는 그 범위가 0.73~1.52의 범위를 나타내고 있으며 폐각의 혼합비가 감소할수록 곡률계수는 증가함을 보이고 있다. 또한 각 시험시료를 통일분류법으로 분류한 결과 시험시료 전체가 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 분류가 되었다.

4. 시험기기

본 연구에 사용된 시험장치는 흙의 단순전단 시험 및 액상화 관련 시험을 시행할 목적으로 1966년 Bjerrum과 Landva에 의해 만들어진 NGI (Norweigian Geotechnical Institute) 타입의 DSSA(Direct Simple Shear Apparatus)를 1997년 개조한 장치이다.

이 시험장치는 실험 중에 변화하는 연직하중, 축변형, 전단하중, 전단변형을 각각의 트랜스듀서에 의해 자동으로 측정된 analog signal을 excitation box에서 digital signal로 바꾸어 주고 PCI290000 카드를 통해 컴퓨터에 저장하면서 실험을 진행한다. 연직하중과 수평하중은 속도 조절이 가능한 연직, 수평모터에 의해 가해지며 motor control box에 의해 조절된다. Fig. 2는 DSSA의 계통도를 모식화한 그림이며 Fig. 3은 DSSA의 공기와 전기의 흐름과 데이터를 얻는 과정을 단순화한 그림이다. 시험기작동 및 시료성형에 대한 보다 상세한 내용은 성낙중(2004)과 김한범(2003)에 기술되어 있다.

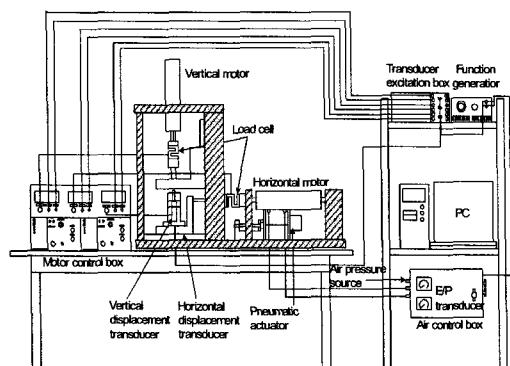


Fig. 2. Cyclic simple shear test

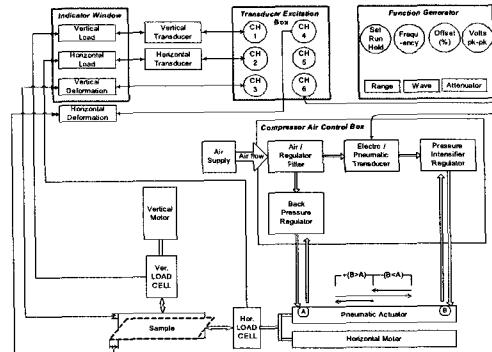


Fig. 3. ELECTRO & AIR flow diagram in direct simple shear apparatus

4.1 시험종류

본 연구에서는 모래와 폐각을 중량비에 의해 폐각 함유량이 0%, 5%, 10%, 20%, 30%인 시료를 인위적으로 조성하여 초기 상대밀도가 40%와 55%가 되도록 공시체를 성형하였다. 느슨한 공시체와 조밀한 공시체에 대해 유효연직응력을 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa로 각각 압밀을 하고 이렇게 압밀이 된 시료에 대해 반복단순전단시험을 시행하였다.

4.2 반복단순전단시험

지진발생시 지반에서 발생되는 대부분의 변형은 아래층에서 위로 전달되는 전단파에 의해 발생된다. 이러한 경우 지반에 발생되는 변형 및 응력조건은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 전단면에 작용하는 연직응력은 일정하게 유지되는 반면에 전단응력은 전단면에 반복적으로 작용한다고 볼 수 있다.

이러한 응력조건은 실험실에서 단순전단시험을 통해 가장 잘 반영될 수 있다.

단순전단 조건시 초기액상화의 발생은 반복삼축조건과 마찬가지로 과잉간극수압이 시료내 유효응력과 같아지는 시점, 즉 유효응력이 0이 될 때 액상화가 발생하는 것으로 간주한다.

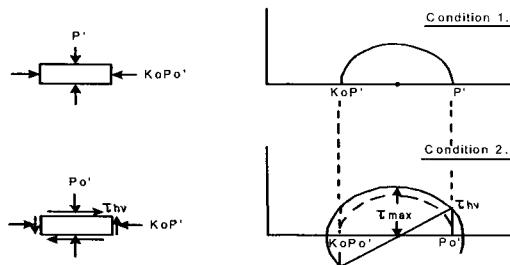


Fig. 4. Idealized stress condition for element of soil below ground surface during earthquake (Seed and Lee, 1966)

단순전단시험의 경우 양진폭 전단변형율이 7.5%일 때 초기 액상화가 발생한다고 간주할수 있으며 이것은 반복삼축시험에서 양진폭 축변형율 5%에 해당되는 값이다(Vaid 와 Sivathayalan, 1996).

NGI 형태의 단순전단시험기는 위의 비배수 반복전단시험을 수행하기 위해 일정체적조건으로 실험을 수행하게 된다. 일정체적조건은 전단하중이 작용되는 동안에 시료내 체적의 변화가 발생되지 않게 하는 실험이다. 즉 시료는 보강 고무 맴브레인으로 싸여 있으므로 공시체의 면적은 항상 일정하며 전단하중 작용시 축변형을 항상 일정하게 유지, 시료의 체적을 항상 일정하게 유지시키며 이것은 연직응력을 자동 제어함으로써 위의 조건을 만족시킬 수 있다. 시험 중에 일정체적을 유지하기 위해 발생되는 연직응력의 변화량은 시료내 간극수압의 변화량과 동일하다(Bjerrum 와 Landva, 1966).

5. 실험결과

반복단순전단시험기에 의한 액상화 시험은 폐각함유량이 0%, 5%, 10%, 20%, 30%인 시료에 대해서 유효연직응력 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa로 각각 압밀을 하고 초기 상대밀도가 40%와 55%를 성형하여 실시하였다. 대표적으로 50 kPa의 압밀유효연직응력으로 압밀을 한 후에 상대밀도가 40%와 55%인 순수 모래 및 폐각질 모래에 대한 일정체적 조건에서의 반복단순전단시험의 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

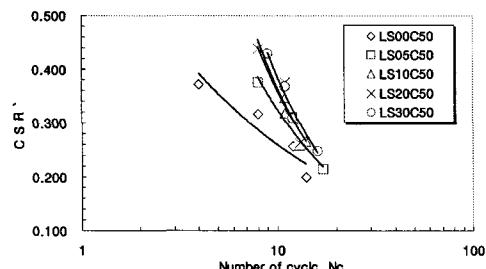


Fig. 5. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents (Dr=40%, $\sigma_{vc}' = 50$ kPa)

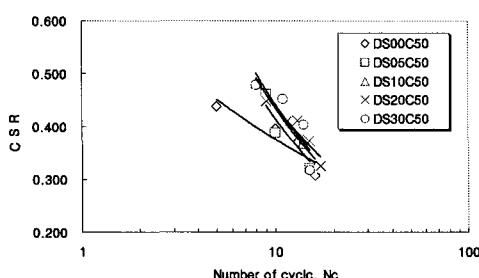


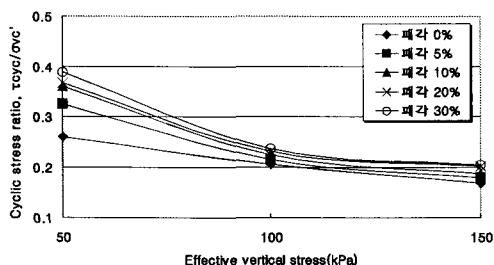
Fig. 6. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents (Dr=55%, $\sigma_{vc}' = 50$ kPa)

그림에서 L은 상대밀도 40%, D는 상대밀도 55%를 의미하며 S00, S05, S10, S20, S30은 페각의 함유량, 그리고 C50은 압밀유효연직응력을 각각 나타낸 것이다. 반복응력은 모든 공시체에 10초당 1회씩 작용되도록 조절하였고 액상화는 양진폭 전단변형률이 7.5%일 때를 기준으로 하였다.

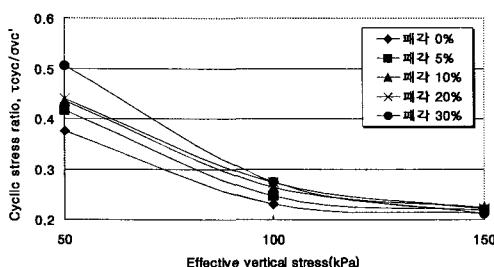
Fig. 5과 Fig. 6에서 페각 함유량이 증가할 경우, 압밀유효연직응력 50 kPa하에서 반복횟수 10회에 대한 느슨한 상태와 조밀한 상태의 시료에 대한 반복응력비를 알아보면 느슨한 경우에는 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.260이며 페각 함유량이 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할수록 0.326, 0.361, 0.367, 0.388로 반복응력비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 조밀한 경우에도 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.376이며 페각 함유량이 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할수록 0.417, 0.436, 0.440, 0.506으로 반복응력비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반복응력비의 증가는 느슨한 경우 순수한 모래에 대해서 최대 49.2%이며 조밀한 경우 순수한 모래에 대해서 최대 34.6% 증가하는 결과를 얻었다.

5.1 압밀유효연직응력에 따른 액상화강도

Fig. 7에는 느슨한 시료와 조밀한 시료에 대해 압밀유효연직응력과 반복응력비와의 관계를 나타내었다. 이 그림에서 페각 함유량 0%의 경우에는 느슨한 시료의 경우 유효연직응력이 50 kPa에서 100 kPa, 150 kPa로 증가하면서 액상화 강도가 0.260에서 0.206, 0.168 가량으로 감소하고 있다. 보다 조밀한 시료의 경우 페각 함유량이 0%의 경우에는 유효연직응력이 50 kPa에서 100 kPa, 150 kPa로 증가하면서 액상화강도가 0.376에서 0.231, 0.214로 현저히 감소하는 것을 볼 수 있고 느슨한 시료의 경우보다 기울기가 훨씬 급한 것을 알 수 있다.



(a) Loose shelly sand (Dr=40%)



(b) Dense shelly sand (Dr=55%)

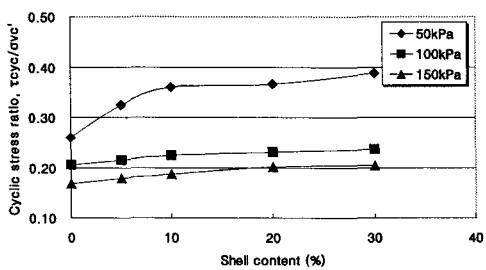
Fig. 7. Liquefaction resistance of shelly sand in cyclic simple shear test

이는 반복전단시험을 시행한 성낙중(2004)의 연구 결과처럼 상대밀도에 대해서는 유효연직응력이 느슨한 경우에 비해 조밀한 경우일 때 액상화강도에 미치는 영향이 더 크다는 경향과 동일한 결과를 얻었다. 또한 유효연직응력이 증가할수록 액상화 강도가 감소하는 것은 순수한 모래에 대해서 실험을 했던 Vaid, Y.P.와 Sivathayalan, S.(1996)의 결과와 동일하게 나타났으며 유효연직응력이 증가할수록 조밀한 경우와 느슨한 경우 모두 액상화강도가 감소하는 것은 모래의 다일라턴시(dilatancy)의 특성과 관계가 있고 조밀한 경우에는 시료가 팽창하려는 경향이 유효연직응력에 의해 느슨한 모래보다 억제가 더 되기 때문에 과잉간극수압이

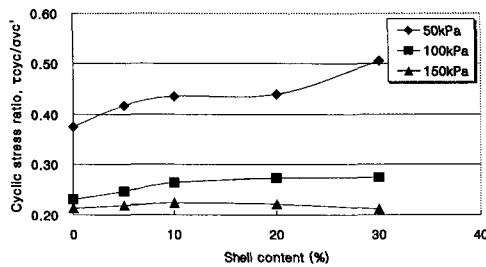
더 빨리 발생하여 낮은 액상화강도를 나타내는 것으로 보인다.

5.2 패각함유량에 따른 액상화강도

패각 함유량이 모래 지반의 액상화강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 중량비에 의해 인위적으로 패각 함유량을 달리한 시료의 결과를 패각 함유량에 대한 반복응력비의 관계로 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 (a)와 같이 느슨한 경우에는 압밀유효연직응력이 낮을 경우(50 kPa) 패각 함유량이 증가할수록 액상화강도가 큰 차이를 보이며 증가하지만 압밀유효연직응력이 증가할수록 패각 함유량이 증가함에 따라 액상화강도 증가량이 많이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 하지만 큰 압밀유효연직응력에서도 패각 함유량에 따라 액상화강도가 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면에 (b)처럼 조밀한 경우에는 압밀유효연직응력이 낮을 경우(50 kPa) 느슨한 경우와 비슷한 경향을 보이나 압밀유효연직응력이 증가할수록 패각 함유량이 증가함에 따라 액상화강도 증가량이 많이 둔화되는 것을 볼 수 있고 압밀유효연직응력 150 kPa에서는 패각 함유량이 증가할수록 액상화강도가 약간 증가하거나 거의 비슷한 값을 갖게 된다.



(a) Loose shelly sand



(b) Dense shelly sand

Fig. 8. Liquefaction resistance of shelly sand in cyclic simple shear test

5.3 상대밀도에 따른 액상화강도

각각의 유효연직응력과 패각 함유량에 대한 액상화 강도를 상대밀도와 관련하여 Fig. 9에 나타내었다. 각각의 유효연직응력에서 패각 함유량 다섯 가지가 갖는 액상화강도의 범위를 다음 그림과 같이 블록으로 지정하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 느슨한 경우에는 낮은 압밀유효연직응력(50 kPa)에서는 반복응력비가 0.128정도의 범위에서 값을 나타내지만 압밀유효연직응력이 커질수록 반복응력비의 범위가 0.031, 0.037로서 작은 값을 나타낸다.

또한 조밀한 시료의 경우에는 압밀유효연직응력 50 kPa에서는 반복응력비가 0.130 정도의 범위에서 값을 나타내며 압밀유효연직응력 100 kPa에서는 0.028, 압밀유효연직응력 150 kPa에서는 0.010 정도의 범위에서 값을 나타내게 되며 이는 느슨한 경우와 상당히 유사하다.

이와 같은 결과로부터 느슨한 경우와 조밀한 경우 모두 낮은 구속압 하에서는 패각비에 따라 반복응력비에 큰 차이를 보이나 구속압이 증가할수록 반복응력비의 변화량이 감소하는 것을 알 수 있다.

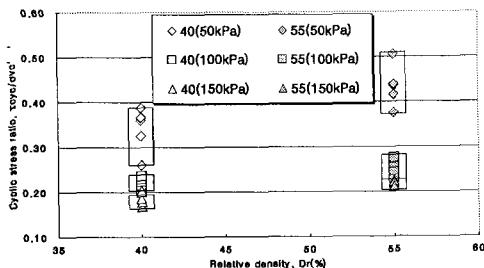


Fig. 9. Liquefaction resistance of shelly sand in cyclic simple shear tesst for relative density

6. 결 론

본 연구에서는 패각질 모래에 대해서 패각 함유량 및 압밀유효연직응력, 상대밀도가 액상화 강도에 미치는 영향을 연구하기 위하여 NGI형 단순전단시험기를 이용하여 압밀 후 상대밀도가 40%와 55%인 공시체에 대해서 반복단순전단시험을 시행하였다. 압밀유효연직응력에 따른 액상화강도 차이를 살펴보기 위해 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa 등으로 압밀유효연직응력의 변화를 주었고, 패각 함유량에 의한 액상화 강도 차이를 검토하기 위해 0%, 5%, 10%, 20%, 30% 등으로 패각 함유량을 변화시켜 시험을 시행하여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

- (1) 상대밀도 40%와 55%의 패각질 모래에 대해서 비중, 최대최소건조단위중량이 모두 증가한다.
- (2) 상대밀도 40%와 55%의 패각혼입모래에 대해서 구속압이 증가할수록 두 경우 모두 액상화 강도가 감소하며 상대밀도 40%의 느슨한 경우보다는 상대밀도 55%의 조밀한 경우에 구속압이 증가할수록 액상화 강도가 더 크게 감소하는 경향을 보인다.
- (3) 상대밀도 40%의 느슨한 시료에 대해서는 액상화강도가 패각함유량이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 하지만 상대밀도 55%의 조밀한 경우에는 구속압이 낮을 경우에는 느슨한 경우와 비슷한 경향을 보이지만 구속압이 커질수록 일정한 액상화강도값을 갖는 경향을 보인다.

감사의 글

본 연구는 2005년 삼성물산(주)의 연구비 지원으로 한국해양연구원과 공동으로 수행된 연구의 일부로서 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 성낙중 (2004), "반복단순전단 시험에 의한 실트질 모래의 액상화 강도", 인하대학교 석사논문, pp.54~60
2. 김한범 (2003), "사질지반에서 액상화 저항에 대한 선형전단응력의 영향", pp.26~34
3. Bjerrum, L. and Landva, A.(1966), "Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay", *Geotechnique*, Vol.16, No.1, pp.1~20
4. Ishihara, K.(1993), "Liquefaction and flow failure during earthquakes," *Geotechnique*, Vol.43, No.3, pp.351~415

5. Lee, K. L. and Seed, H. B.(1967), "Drained strength characteristics of sands", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.93, No.6, pp.117~141
6. Pillai, V.S. and Stewart, R. A.(1994), "Evaluation of liquefaction potential of foundation soils at Duncan dam", *Canadian Geotechnique*, Vol.31, pp.951~966
7. Vaid, Y.P., and Sivathayalan, S.(1996), "Static and Cyclic Liquefaction Potential of Fraser Delta Sand in Simple Shear and Triaxial Tests", *Journal of Can. Geotechnical*, pp.281~289