

반복단순전단 시험에 의한 패각질 모래의 액상화 강도

Liquefaction Strength of Shelly Sand in Cyclic Simple Shear Test

윤 여 원[†] · 윤 길 림¹⁾ · 최 재 권²⁾

Yoon, Yeowon · Yoon, Gillim · Choi, Jaekwon

ABSTRACT : The sands which use for soil improvement of soft ground at coastal area contain more or less amount of shells. In this research the effects of shell contents on the liquefaction resistance of the shelly sand were studied. NGI cyclic simple shear tests were performed for the shell-sands with shell contents of 0%, 5%, 10%, 20%, 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, the liquefaction resistance increased rapidly with 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 and 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.

Keywords : Sand, Cyclic simpler shear test, Shell contents, Liquefaction resistance

요 지 : 해안 연약지반 개량공사에 사용되는 모래는 대부분 다소간의 패각을 함유하게 된다. 본 연구에서는 패각 함유량이 패각질 모래의 액상화 저항에 미치는 영향을 연구하기 위하여 중량비에 의해 0%, 5%, 10%, 20%, 30%의 패각을 함유한 모래의 입도를 조성하고 건조퇴적 방법으로 상대밀도가 40%와 55%인 공시체를 성형하여 50kPa, 100kPa, 150kPa의 압밀유효연직응력으로 NGI형 직접단순전단시험기를 이용해서 반복단순전단시험을 수행하였다. 연구 결과, 압밀유효연직응력이 낮을 경우에는 상대밀도가 40%, 55% 모두 패각 함유량이 많아질수록 액상화강도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 그러나 압밀유효연직응력이 높을 경우에는 상대 밀도가 40%일 경우 약간 증가하는 경향을 얻었으나 상대밀도가 55%일 경우에는 거의 일정한 값으로 수렴하는 결과를 얻었다. 그리고 상대밀도에 관계없이 압밀유효연직응력이 증가하면 액상화 저항이 감소하는 경향을 보였다. 또한 같은 압밀유효연직응력과 패각 함유량에서 상대밀도가 높아질수록 액상화강도가 증가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 모래, 반복단순전단시험, 패각함유율, 액상화강도

1. 서 론

연약지반의 개량을 위한 공법 중의 하나로 모래다짐말뚝은 지난 수 십년간 주로 사용되어 왔으나 점차 양질의 모래가 고갈되어 감에 따라 모래와 파쇄골패각을 혼합하여 사용하거나(윤길림 등, 2004; 윤여원 등, 2006) 모래와 혼합하여 다짐말뚝으로 시공한 사례(Okamura 등, 1996), 모래의 대체 재료로 쇄석을 사용한 쇄석다짐말뚝(김백영, 2004) 등이 시도되고 있다. 또한 연약지반 개량을 위해서는 대부분 바다에서 채취된 모래가 주로 사용되고 있으며, 해안모래에는 다량 또는 소량의 패각이 함유되어 있다. 그럼에도 패각의 함유에 따른 해안모래의 공학적 거동에 대하여는 연구 자료는 찾아보기 어려운 것이 현실이다. 더욱이 양질의 해안모래가 점차 고갈되어 감에 따라 패각질 모래의 사용도

점차 증가하게 되어 패각이 함유되어 있는 모래가 건설용 재료인 순수 모래와 어떠한 공학적 거동을 보이는지에 대한 의문을 가지게 된다. 아울러 순수모래의 대체 재료로서 패각질 모래를 활용하기 위해서는 이에 대한 연구가 필수적이라 할 수 있으며 경우에 따라서는 건설공사의 비용을 일부 절감시킬 수 있는 경우도 있다. 따라서 본 연구에서는 패각질 모래를 대상으로 액상화 발생이 가능한 낮은 밀도와 중간정도 밀도의 모래에 대하여 유효응력, 패각함유율을 변화시켜 이에 따른 액상화강도의 변화 특성을 고찰하였다.

2. 선행 연구 및 이론적 고찰

지금까지 패각(조개껍질) 함유량의 변화에 따른 모래의 공학적 특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이며, Okamura

† 정희원, 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수(E-mail : yoonyw@inha.ac.kr)

1) 정희원, 한국해양연구원 연안항만연구본부 책임연구원

2) 정희원, 인하대학교 대학원, 삼성엔지니어링

등(1996)에 의한 굴폐각혼합 모래다짐말뚝의 시공사례, 윤길림 등(2004)과 안영천(2004)에 의한 굴폐각-모래 혼합모래의 공학적 특성 연구가 있다. 윤길림 등은 자연건조상태의 모래와 굴폐각을 혼합한 모래를 중량비 2:1로 혼합한 재료를 초기밀도, 수직하중을 변화시켜 표준관입시험, 대형전단시험, 입도분포시험 및 압밀시험을 수행하였으며 강도, 침하특성, 파쇄특성을 고찰하였다. 연구결과 낮은 응력에서는 순수모래보다 내부마찰각이 큰 것으로 나타났으며 수직응력이 클수록 강도차이는 점차 작아지는 것으로 나타났다. 그리고 초기밀도에서 수직응력이 증가할수록 굴폐각의 파쇄가 발생하나 초기밀도가 크면 수직응력으로 인한 파쇄는 크지 않은 것으로 나타났다.

Lee 등(1967)이 반복삼축시험기를 이용하여 액상화 현상을 이해하기 위한 실내시험을 시작한 후 느슨한 포화 사질토 지반에서 많이 발생하는 액상화에 대한 수 많은 연구를 하였으며 이들의 연구결과에 의하면 액상화의 발생은 상대밀도, 압밀유효구속응력, 반복축하응력, 반복축하응력이 가해진 횟수, 과압밀비 등에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 Seed 등(1969)은 상대밀도가 흙의 액상화에 미치는 영향을 고려하여 반복삼축시험을 수행하였으며 모든 시험에서 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지는 상태, 즉 유효응력이 '0'이 되기 시작할 때를 초기액상화라 하고, 양진폭변형률(double amplitude axial strain)이 20%이상이며 외력에 대한 저항을 거의 잃었을 때를 파괴로 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 연화상태로서 발생한다고 하였다. 따라서 다양한 범위의 밀도를 갖는 모래에서 반복하중으로 인하여 발생하는 불안정 상태를 판단하기 위한 기준으로 약 5% 정도의 양진폭 축변형율의 발생 또는 발생된 과잉간극수압이 압밀유효구속응력과 같아지는 시점을 고려하는 것이 일반적인 관례이다.

지진발생시 지반에 발생하는 변형 및 응력조건은 Fig. 1

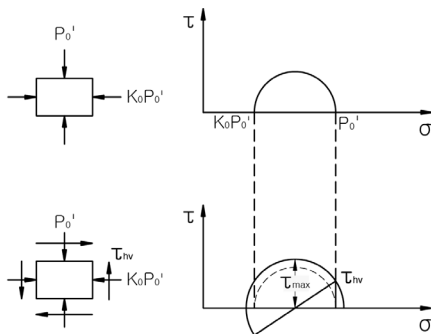


Fig. 1. Cyclic loading simple shear test (Seed and Peacock, 1971)

에 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.

단순전단조건시 초기액상화의 발생은 반복삼축조건과 마찬가지로 과잉간극수압이 시료내 유효응력과 같아지는 시점, 즉 유효응력이 0이 될 때 액상화가 발생하는 것으로 간주한다. 단순전단시험의 경우 양진폭 전단변형율이 7.5% 일 때 초기 액상화가 발생한다고 간주할 수 있으며 이것은 반복삼축시험에서 양진폭 축변형율 5%에 해당되는 값이다 (Pillai 등, 1994; Vaid 등, 1996).

3. 시료의 물리적 특성

3.1 시료

본 연구에서 사용한 모래는 #4(4.75mm)체를 100% 통과하는 시료를 사용하였으며 폐각은 인천 지역의 해안에서 채취된 바지락(약90%)과 동죽(10%)을 파쇄하여 3/8"(9.52mm)체를 100% 통과하는 시료를 사용하였다. 폐각은 보통의 흙입자의 형상과는 달리 길이가 2.5~6.0cm, 너비는 2~5cm이며 두께는 0.5~1.0mm 정도의 달걀모양의 타원형의 판상구조를 가지고 있다.

폐각질 모래는 Table 1과 같이 중량비를 기준으로 폐각 혼합비율을 각각 0%, 5%, 10%, 20%, 30%로 달리하여 총 5개의 시료를 준비하였으며 폐각질 모래의 공학적 특성을 파악하기 위하여 폐각 혼합비율이 다른 5개의 시료에 대해 시험을 행하였다.

3.2 자연함수비 시험

자연함수비 시험은 KS F 2306에 규정된 방법을 사용하였으며 보다 정확한 측정을 위하여 폐각과 모래를 혼합한 후 시료가 자연상태의 공기 중의 수분을 함유할 수 있도록 응달에서 충분한 시간을 두어 방치한 후 함수비 측정시 시료의 표면부근은 마르기 쉬우므로 시료내부의 건조되지 않은 부분에서 대표적인 시료를 취하였다.

본 연구에서 폐각질 모래의 혼합비율에 대한 자연상태의 함수비를 측정된 결과 폐각 혼합비에 따라서 약간의 차이가 있으나 함수비는 0.18%~0.41%로 나타났다.

Table 1. Mixture ratio of shell-sand soils

Specimen		Shell content				
		30%	20%	10%	5%	0%
Ratio (%)	Shell	30	20	10	5	0
	Sand	70	80	90	95	100

3.3 최대·최소건조단위중량 시험

일반적으로 최대·최소단위중량은 시료의 다짐정도에 따라 달라지게 된다. 시험시료의 경우 패각과 모래의 혼합시료이므로 최대·최소건조단위중량을 구하기 위해 일반적인 흙에 적용되는 다짐래머에 의한 다짐을 할 경우 패각의 파쇄가 일어날 우려가 있으므로 다짐방법을 모래에 사용되는 진동다짐을 행하였다.

시료의 최대·최소건조단위중량을 구하기 위해 시험시료는 24시간 이상 건조로에서 건조시켜 노건조시료 상태로 만들고 최소건조단위중량의 경우 몰드내에 노건조 시료를 가장 느슨한 상태로 시료를 부은 후 그 무게를 측정하여 구했으며 최대건조단위중량은 노건조 시료를 몰드 내에 부은 후 가장 조밀한 상태가 되도록 진동을 준 후 그 무게를 측정하여 구하였다.

패각질 모래의 최대·최소건조단위중량과 최대건조단위중량을 최소건조단위중량에 대한 비로 나타낸 건조단위중량비를 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 패각질 모래의 최대·최소건조단위중량의 범위는 Table 2에 나타낸 바와 같이 최대건조단위중량의 경우 16.19~17.99kN/m³를 보이고 있고 최소건조단위중량의 경우 13.23~15.00kN/m³를 보이고 있다.

3.4 비중 시험

패각질 모래의 비중시험 결과는 아래의 Table 3과 같다. 패각질 모래의 비중은 패각 함유율에 따라서 2.67~2.72까지의 범위를 보이고 있으며 이는 패각이 혼합되지 않은 순수 모래의 비중인 약 2.65보다 약간 큰 값을 나타내고 있다.

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

Specimen		Max. dry unit wt. (kN/m ³)	Max. dry unit wt. (kN/m ³)	Ratio of weight (Max./Min.)
Shell content (%)	30%	17.99	15.00	1.20
	20%	17.44	14.67	1.19
	10%	16.97	14.04	1.21
	5%	16.53	13.69	1.21
	0%	16.19	13.23	1.22

Table 3. specific gravity of shelly sand

Specimen		Specific gravity (Gs)
Shell content (%)	100%	2.88
	30%	2.72
	20%	2.70
	10%	2.68
	5%	2.67
	0%	2.65

3.5 입도분포 시험

본 연구에서는 패각질 모래의 입도특성을 살피기 위해 입도분석시험을 실시하였고 각 시험시료의 입도분포곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에 사용된 시험시료의 경우 균등계수의 범위는 1.48~2.31로 패각의 혼합비가 증가할수록 균등계수도 증가하는 양상을 보이고 있고 곡률계수의 경우는 그 범위가 0.73~1.52의 범위를 나타내고 있으며 패각의 혼합비가 감소할수록 곡률계수는 증가함을 보이고 있다.

균등계수가 작을수록 시료는 균등한 입도분포를 의미하므로 패각질 모래의 경우 패각 혼합비가 증가할수록 시료의 입도분포는 양호해지는 것을 알 수 있다. 또한 각 시험시료를 통일분류법으로 분류한 결과 시험시료 전체가 입도분포가 좋지 않은 모래(SP)로 분류가 되었다.

4. 시험기기 및 시험방법

4.1 반복단순전단 시험기

본 연구에 사용된 시험장치는 흙의 단순전단 시험 및 액상화 관련 시험을 시행할 목적으로 1966년 Bjerrum과 Landva에 의해 만들어진 NGI(Norwegian 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(윤여원 등, 2002).

정적전단시험(static shear test)은 일정연직응력시험과 일정체적시험이 있으며 이는 각각 배수와 비배수로 표현될 수 있다.

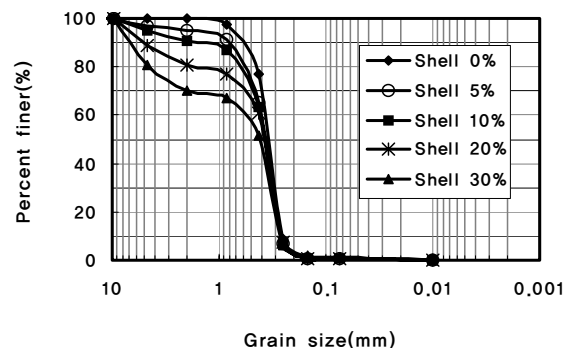


Fig. 2. Grain size distribution of shelly sand

반복전단시험(cyclic shear test)은 function generator의 진압 변화를 E/P(Electro/ Pneumatic) 트랜스듀서를 통해 콤프레서로 공급된 압축공기의 압력을 조절하여 원하는 크기의 반복하중을 작용시킬 수 있게 한다. Function generator의 pk-pk(peak-peak) 밸브에 의해 전달되는 최대전압과 최소전압으로 측정된 반복회수는 analog signal을 발생시키고 이는 excitation box와 PCI290000을 통해 PC에서 기록된다. Fig. 3은 DSS의 계통도를 모식화한 그림이다.

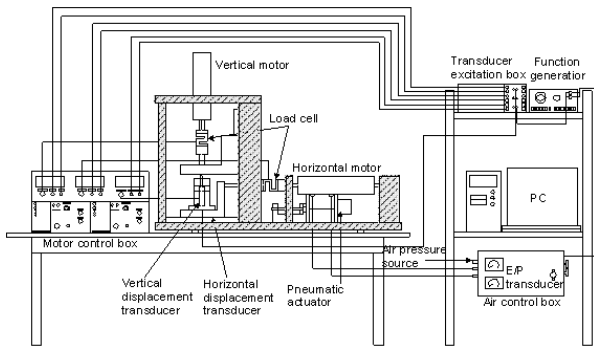


Fig. 3. Cyclic simple shear testing system

4.2 시료성형

본 연구에서는 모래와 패각을 중량비에 의해 패각 함유량이 0%, 5%, 10%, 20%, 30%인 시료를 인위적으로 조성하여 초기 상대밀도가 40%와 55%가 되도록 공시체를 성형하였다. 느슨한 공시체와 중간정도 조밀한 공시체에 대해 유효연직응력을 50kPa, 100kPa, 150kPa로 각각 압밀시킨 후 반복단순전단시험을 시행하였다.

노건조 시킨 시료는 인위적으로 입도를 조성하여 계획한 시험 목록에 맞춰서 시료를 성형하였다. 직경 6.675cm, 높이 1.70cm의 공시체를 준비하기 위해 보강 고무멤브레인(reinforced rubber membrane)안에 깔때기를 이용하여 시료를 서서히 뿌려 넣은 후에 시료의 상단을 평평하게 고른다. 그 후에 다짐봉으로 요구하는 높이가 잘 맞도록 다지고 나서 top cap을 얹고 공시체가 미세한 충격이나 흔들림이 없도록 주의하면서 시료성형 주변장치들을 제거한다. 이렇게 시료성형이 끝나면 연직하중 트랜스듀서(vertical transducer)를 주춧돌(pedestal)에 연결하고 시험 기기에 안치를 시키게 된다. Fig. 4에는 공시체를 성형하는데 필요한 장치들을 보여주고 있다.

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 멤브레인으로 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 발생하는 연직응력의 변화량은 시료내 간극수압의 변화량과 동일하다(Bjerrum과 Landva, 1966).

공시체에 가해지는 반복하중은 공기압을 전기적 시스템으로 제어한다. 반복하중이 가해지면서 해당 반복회수 내에서의 연직하중, 수평하중, 연직변위, 수평변위와 반복하중회수가 PCI20000 시스템으로 컴퓨터에 데이터가 자동으로 기록된다.

단순전단시험기에서 과잉간극수압의 측정은 일정체적시험을 통해서 이루어진다. 즉, 일정체적을 유지시키기 위해 수직방향의 응력이 조절되며 아래 식과 같이 수직응력의 변화량이 과잉간극수압 발생량과 동일하다.

$$U_n = -[(\sigma'_a)_n - (\sigma'_a)_0] \quad (kPa)$$

여기서 U_n = 임의 단계에서의 과잉간극수압의 발생량

$(\sigma'_a)_n$ = 전단하중 작용시 임의 단계에서의 수직응력

$(\sigma'_a)_0$ = 압밀 완료 후의 수직응력

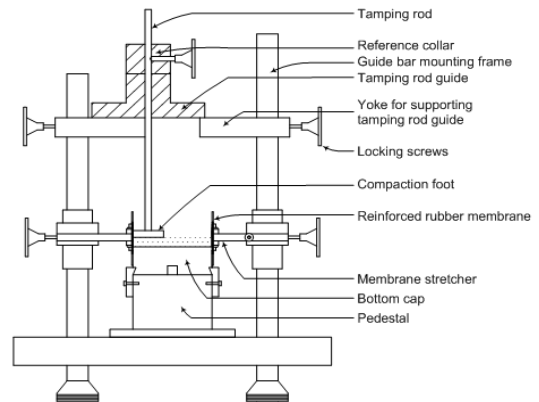


Fig. 4. Device for reconstituting and mounting of specimens of sand

5. 시험결과 및 토의

5.1 연직응력변화에 따른 동적강도

5.1.1 압밀유효연직응력 50kPa

50kPa의 압밀유효연직응력으로 압밀을 한 후에 상대밀도가 40%와 55%인 순수 모래 및 패각질 모래에 대한 일정체적 조건에서의 반복단순전단시험의 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 L은 상대밀도 40%, D는 상대밀도 55%를 의미하며 S00, S05, S10, S20, S30은 패각의 함유량, 그리고 C50, C100, C150은 압밀유효연직응력

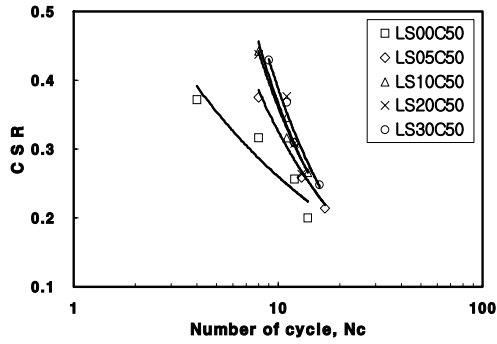


Fig. 5. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents ($Dr=40\%$, $\sigma'_{vc}=50\text{kPa}$)

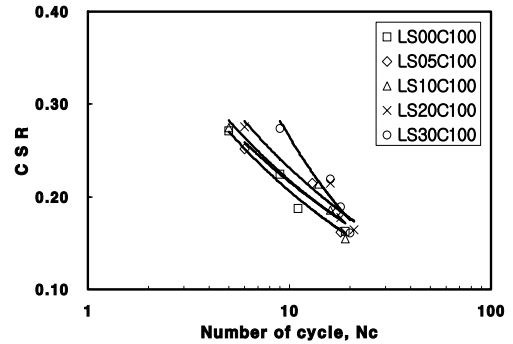


Fig. 7. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents ($Dr=40\%$, $\sigma'_{vc}=100\text{kPa}$)

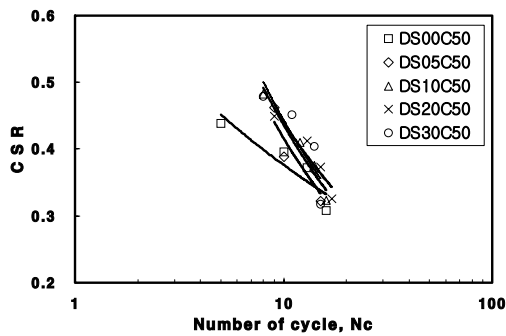


Fig. 6. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents ($Dr=55\%$, $\sigma'_{vc}=50\text{kPa}$)

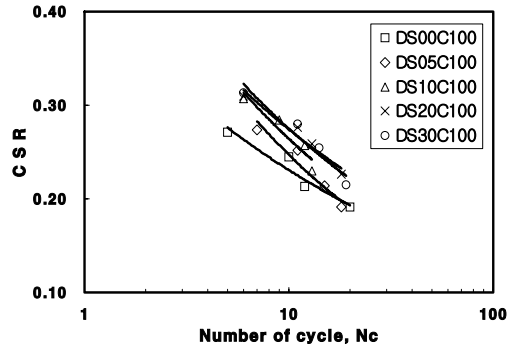


Fig. 8. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents ($Dr=55\%$, $\sigma'_{vc}=100\text{kPa}$)

을 각각 나타낸 것이다. CSR(Cyclic Stress Ratio)은 유효 수직응력에 대한 반복전단응력비($=\tau_{cyc}/\sigma'_{vc}$)로서 반복응력은 모든 공시체에 10초당 1회씩 작용되도록 조절하였고 액상화는 양진폭 전단변형률이 7.5%일 때를 기준으로 하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 패각 함유량이 증가할 경우, 압밀유효연직응력 50kPa하에서 반복횟수(number of cycle, Nc) 10회에 대한 느슨한 상태와 중간정도 조밀한 상태의 시료에 대한 반복응력비(CSR)를 알아보면 느슨한 경우에는 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.260이며 패각 함유량이 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할수록 0.326, 0.361, 0.367, 0.388로 반복응력비가 증가한다. 또한 중간정도 조밀한 경우에도 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.376이며 패각 함유량이 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할수록 0.417, 0.436, 0.440, 0.506으로 반복응력비가 증가한다. 반복응력비의 증가는 느슨한 경우 순수한 모래에 대해서 최대 49.2%이며 중간정도 조밀한 경우 순수한 모래에 대해서 최대 34.6% 증가하는 결과를 나타내었다.

5.1.2 압밀유효연직응력 100kPa

100kPa의 압밀유효연직응력으로 압밀을 한 후에 상대밀도가 40%와 55%인 모래 및 패각질 모래에 대한 반복단순 전단시험의 결과를 Fig. 7과 Fig 8에 나타내었다. 느슨한

경우나 중간정도 조밀한 경우 모두 반복응력비에 따라 양진폭 변형률을 일으키는데 필요한 횟수만 다를 뿐 두 경우 모두 같은 거동을 보인다.

느슨한 경우에는 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.206이며 패각 함유량이 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할수록 0.216, 0.225, 0.231, 0.237로 순수한 모래에 비해서 최대 15% 정도 반복응력비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 중간정도 조밀한 경우에도 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.231이며 패각 함유량이 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할수록 0.247, 0.264, 0.274, 0.275로 순수한 모래에 비해서 최대 19% 정도 반복응력비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 느슨한 시료와 중간정도 조밀한 시료 모두 순수한 모래에서 패각 함유량이 증가할수록 압밀유효연직응력 50kPa보다 압밀유효연직응력 100kPa에서 반복응력비의 변화가 훨씬 작아진다. 이와 같이 압밀유효연직응력 100kPa에서는 느슨한 시료와 중간정도 조밀한 시료 모두 패각 함유량에 따라서 액상화강도에 미치는 영향이 압밀유효연직응력 50kPa에 비해 작아진다는 것을 알 수 있다.

5.1.3 압밀유효연직응력 150kPa

150kPa의 압밀유효연직응력으로 압밀을 한 후에 상대밀도가 40%와 55%인 모래 및 패각질 모래에 대한 반복단순

전단시험의 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

느슨한 경우에는 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.168이며 패각 함유량이 각각 증가할수록 0.179, 0.187, 0.202, 0.205로 순수한 모래에 비해서 최대 22% 정도 반복응력비가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면에 중간정도 조밀한 경우에는 순수한 모래에 대한 반복응력비가 0.214이며 패각 함유량이 5%, 10%, 20%, 30%로 증가할수록 0.219, 0.224, 0.222, 0.212로 순수모래에 비해서 최대 4.7% 증가하고 거의 반복응력비가 비슷한 값을 보이고 있다. 이와 같이 압밀유효연직응력 150kPa에서는 느슨한 시료일 경우에는 압밀유효연직응력이 50, 100kPa일 경우와 유사하게 액상화강도값이 약간 증가했으나 중간정도 조밀한 시료에서는 패각 함유량이 증가하더라도 반복응력비의 변화가 훨씬 작아지거나 거의 일정한 것으로 나타났다.

5.2 압밀유효연직응력에 따른 액상화강도

Fig. 11에는 느슨한 시료와 중간정도 조밀한 시료에 대해 압밀유효연직응력과 반복응력비와의 관계를 나타내었다. 이 그림에서 패각 함유량 0%의 경우에는 느슨한 시료의 경우 유효연직응력이 50kPa에서 100kPa, 150kPa로 증가하면서 액상화강도가 0.260에서 0.206, 0.168 가량으로 감소하고 있다. 보다 조밀한 시료의 경우 패각 함유량이 0%

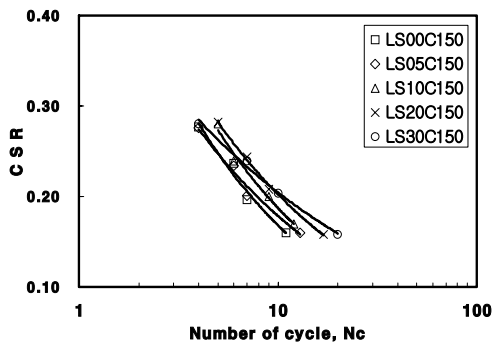


Fig. 9. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents ($Dr=40\%$, $\sigma'_{vc}=150kPa$)

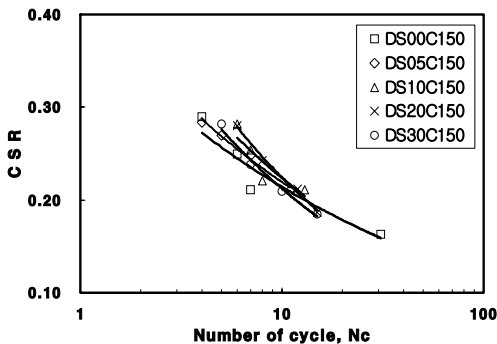
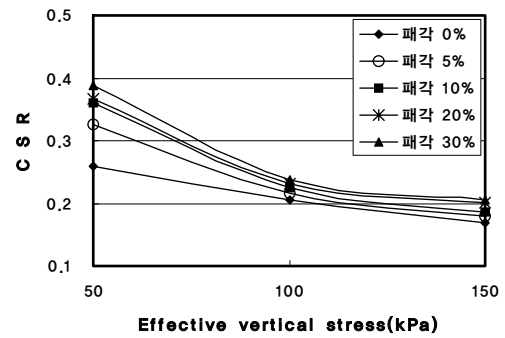


Fig. 10. Relationships between cyclic stress ratio and number of cycles with shell contents ($Dr=55\%$, $\sigma'_{vc}=150kPa$)

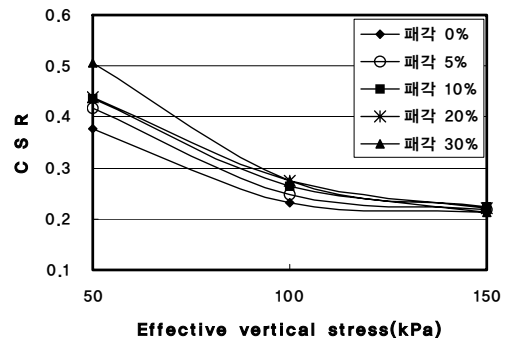
의 경우에는 유효연직응력이 50kPa에서 100kPa, 150kPa로 증가하면서 액상화강도가 0.376에서 0.231, 0.214로 현저히 감소하므로 느슨한 시료의 경우보다 기울기가 훨씬 급한 것을 알 수 있다. 이는 반복전단시험을 시행한 성낙중(2004)의 연구 결과처럼 유효연직응력이 액상화강도에 미치는 영향은 느슨한 경우에 비해 중간정도 조밀한 경우일 때 더 크다는 경향과 동일한 결과를 얻었다. 또한 유효연직응력이 증가할수록 액상화강도가 감소하는 것은 순수한 모래에 대해서 실험을 했던 Void 등(1996)의 결과와 동일하게 나타났으며 유효연직응력이 증가할수록 느슨한 경우와 중간정도 조밀한 경우 모두 액상화강도가 감소하는 것은 모래의 다일러턴시(dilatancy)의 특성과 관계가 있고 중간정도 조밀한 경우에는 유효연직응력에 의해 느슨한 모래보다 시료가 팽창하려는 경향이 더 억제되기 때문에 과잉간극수압이 더 빨리 발생하여 낮은 액상화강도를 나타내는 것으로 보인다.

5.3 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. 12에 나타내었다. Fig. 12의 (a)와 같이

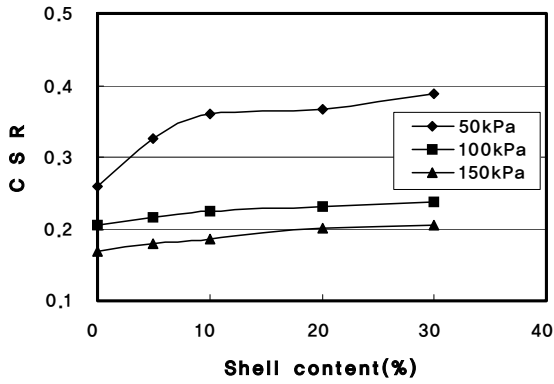


(a) Loose shelly sand ($Dr=40\%$)

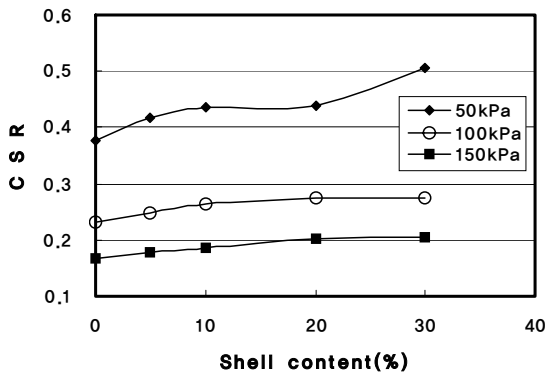


(b) Dense shelly sand ($Dr=55\%$)

Fig. 11. Liquefaction resistance of shelly sand in cyclic simple shear test



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



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

Fig. 12. Liquefaction resistance of shelly sand in cyclic simple shear test

느슨한 경우에는 압밀유효연직응력이 낮을 경우(50kPa) 패각 함유량이 증가할수록 액상화강도가 약 49% 정도 증가하여 큰 차이를 보이며 압밀유효연직응력이 증가할수록 패각 함유량이 증가함에 따라 액상화강도 증가량이 둔화되어 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 (b)처럼 더 조밀한 경우에는 압밀유효연직응력이 낮을 경우(50kPa) 느슨한 경우와 비슷한 경향을 보이나 압밀유효연직응력이 증가할수록 패각 함유량이 증가함에 따라 액상화강도 증가량이 많이 둔화되는 것을 볼 수 있으며, 압밀유효연직응력 150kPa에서는 패각 함유량이 증가할수록 액상화강도가 낮은 응력인 경우에 비하여 약간 증가하는 값을 가진다. 그럼에도 불구하고 패각함유량 30%에서는 모든 응력에서 20% 이상의 액상화 강도 증가를 나타내고 있음을 알 수 있다.

5.4 상대밀도에 따른 액상화강도

각각의 유효연직응력과 패각 함유량에 대한 액상화강도를 상대밀도와 관련하여 Fig. 13에 나타내었다. 각각의 유효연직응력에서 패각 함유량 다섯 가지가 갖는 액상화강도의 범위를 다음 그림과 같이 블록으로 지정하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 느슨한 경우에는 낮은 압밀유효연직

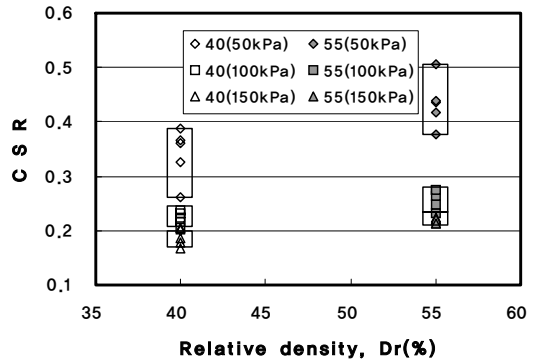


Fig. 13. Liquefaction resistance of shelly sand in cyclic simple shear test for relative density

응력(50kPa)에서는 반복응력비의 범위가 0.128을 나타내지만 압밀유효연직응력이 커질수록 0.031, 0.037로서 작은 값을 나타낸다. 또한 중간정도 조밀한 시료의 경우에는 압밀유효연직응력 50kPa에서는 반복응력비의 범위가 0.130을 나타내며 압밀유효연직응력 100kPa에서는 0.028, 압밀유효연직응력 150kPa에서는 0.010을 나타낸다.

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

6. 결 론

본 연구에서는 패각질 모래에 대해서 압밀유효연직응력 및 패각 함유량, 상대밀도가 액상화강도에 미치는 영향을 연구하기 위하여 NGI형 단순전단시험기를 이용하여 압밀 후 상대밀도가 40%와 55%인 공시체에 대해서 반복단순전단시험을 시행하였다. 압밀유효연직응력에 따른 액상화강도 차이를 살펴보기 위해 50kPa, 100kPa, 150kPa 등으로 압밀 유효연직응력의 변화를 주었고, 패각 함유량에 의한 액상화강도 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, 최대·최소건조단위중량이 모두 증가한다.
- (2) 상대밀도 40%와 55%의 패각질 모래에 대해서 구속압이 증가할수록 두 경우 모두 액상화강도가 감소하며 상대밀도 40%의 느슨한 경우보다는 상대밀도 55%의 중간정도 조밀한 경우에 구속압이 증가할수록 액상화강도가 더 크게 감소하는 경향을 보인다.
- (3) 상대밀도 40%의 느슨한 시료에 대해서는 패각함유량이 증가할수록 액상화강도가 증가하는 경향을 보이며

패각함유율 30%의 모래에서 구속압이 50kPa인 경우 49%정도의 강도증가를 나타내었다. 그러나 상대밀도 55%의 중간정도 조밀한 경우에는 구속압이 낮을 경우에는 느슨한 경우와 같이 함유량 증가에 따라 액상화 강도가 증가하는 경향을 보이며 구속압이 커질수록 액상화강도 증가율은 점차 감소함을 나타내었다. 따라서 모든 경우에 패각질 함유로 인한 모래의 액상화강도는 감소하지 않고 오히려 액상화강도가 더 커짐을 알 수 있고 그 양은 함유량 30%일 경우 모두 20% 이상의 증가율을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교 연구비로 수행된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김백영(2004), *현장재하시험을 통한 단일쇄석말뚝의 지지력 산정에 관한 연구*, 박사학위논문, 한양대학교, pp. 129.
2. 성낙중(2002), *반복단순전단 시험에 의한 실트질 모래의 액상화 강도*, 인하대학교 석사학위논문, 인하대학교, pp. 54~60.
3. 안영천(2004), *모형시험에 의한 굴패각 혼합토의 거동특성 연구*, 인하대학교 석사학위논문, 인하대학교, pp. 62.

4. 윤길림, 채광석, 윤여원, 안영천(2004), 모래다짐말뚝(SCP) 지반개량을 위한 굴패각-모래 혼합토 실험연구, *한국지반공학회 2004년 봄 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp. 162~169.
5. 윤여원, 강대성, 심현중(2002), 단순전단조건과 삼축압축조건 하에서 모래의 비배수 거동 비교, *한국지반환경공학회 2002년 가을 학술발표회 논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 153~164.
6. 윤여원, 윤길림, 김근수, 김재권, 김승현(2006), 현장재하시험에 의한 굴패각-모래 다짐말뚝의 거동특성, *한국지반공학회 2006년 봄 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp. 1210~1217.
7. Bjerrum, L. and Landva, A.(1966), Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp. 1~20.
8. Ishihara, K.(1993), Liquefaction and flow failure during earthquakes, *Geotechnique*, Vol. 43, No. 3, pp. 351~415.
9. 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.
10. Okamura, T. and Kobayashi, M.(1996), Oyster shell-sand mixture as material of sand compaction pile, *Proc. of Environmental Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, pp. 863~868.
11. Pillai, V.S. and Stewart, R. A.(1994), Evaluation of liquefaction potential of foundation soils at Duncan dam, *Canadian Geotechnique*, Vol. 31, No. 6, pp. 951~966.
12. Seed, H. B., Lee, K. L. and Idriss, I. M.(1969), Analysis of Sheffield Dam Failure, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 95, No. SM6, pp. 1453~1490.
13. Vaid, Y.P. and Sivathayalan, S.(1996), Static and Cyclic Liquefaction Potential of Fraser Delta Sand in Simple Shear and Triaxial Tests, *Can. Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 2, pp. 281~289.

(접수일: 2007. 9. 27 심사일: 2007. 10. 8 심사완료일: 2007. 11. 12)