

반복하중을 받는 해양실트질 모래의 상대밀도에 따른 응력기반 파괴기준

Relative Density and Stress-Dependent Failure Criteria of Marine Silty Sand Subjected to Cyclic Loading

고 민 재¹ Ko, Min Jae

손 수 월² Son, Su Won

김 진 만³ Kim, Jin Man

Abstract

An experimental study has been conducted by using the Cyclic Direct Simple Shear apparatus to evaluate the influence of average and cyclic shear stresses on the undrained shear failure behavior of marine silty sand considering various relative densities. The obtained results show that despite using different relative densities, similar trends were gained in the cyclic shear deformation. Moreover, the cyclic shear deformation is affected mainly by the average and cyclic shear stresses. The number of cyclic loads for failure is significantly affected by the cyclic shear stress ratio and relative density, and is less affected by the average shear stress ratio. The proposed three-dimensional stress-dependent failure contour can be used effectively to assess the soil shear strength considering various relative densities in the design of foundation used for offshore structures.

요 지

반복단순전단시험기를 이용하여 해양실트질 모래의 상대밀도 변화에 따른 비배수전단파괴 거동에 대해 평균전단응력과 반복전단응력이 미치는 영향을 평가하였다. 시험결과 반복전단 변형모드는 상대밀도가 달라지더라도 유사한 양상을 보였으며, 평균전단응력과 반복전단응력으로부터 큰 영향을 받았다. 파괴에 필요한 반복하중 횟수는 반복전단 응력비, 상대밀도, 그리고 평균전단응력비의 순서로 좌우되는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 조밀한 지반과 느슨한 지반에서 상대밀도 변화에 따른 응력기반 파괴경로의 변화를 2차원과 3차원으로 제시하였으며, 3차원 파괴선도는 조밀한 지반 조건에 대해서만 한정된 한계점을 보완하여 지반의 상대밀도에 따라 반복전단응력비, 평균전단응력비, 반복하중 횟수 등의 설계 조건을 결정 할 수 있는 아주 유용한 설계도구로 활용 가능하다.

Keywords : Cyclic loading, Relative density, Cyclic Stress Ratio (CSR), Average Stress Ratio (ASR), Three-dimensional failure contour

1 비회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ.)

2 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ.)

3 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 토목공학전공 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Pusan National Univ., Tel: +82-51-510-2349, Fax: +82-51-513-9596, jmkim@pusan.ac.kr, Corresponding Author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지구온난화의 주요 원인으로 지목되는 이산화탄소를 대량 발생시키는 화석연료를 대체할 수 있는 친환경에너지 개발과 사용이 급격히 늘고 있다. 유지가능한 친환경에너지원의 하나로 풍력발전을 들 수 있으며, 기존에는 육상에 발전기가 설치된 육상풍력이 주였으나, 가능한 육상부지의 부족, 소음 등 환경문제로 인해 점차적으로 해상에 발전기를 설치하는 해상풍력 발전 방식으로 변화하고 있는 추세이다. 우리나라의 경우 제주도 바닷가와 서남해안을 중심으로 해상풍력발전단지 건설이 이루어지고 있다. 해상풍력발전기와 같은 해양구조물에서는 폭풍우, 파도, 조류 등의 외부 동적 하중과 기계진동과 같은 내부 동적 하중이 복합적으로 작용하기 때문에 이러한 하중들이 기초를 통해 해저 지반에 전달되기까지 상당히 복잡한 진동 전달 메커니즘이 발생한다. 그러므로 해상풍력발전기 기초 지반의 장단기 동적 거동 특성과 저항력 평가는 풍력발전기 기초 설계, 시공, 그리고 유지관리를 위한 중요한 연구대상이다.

Andersen et al.(1999)은 실내동적실험을 수행하여 반복하중을 받는 구조물 기초 지반의 거동을 평가하였으며, 평균 및 반복전단응력, 배수조건, 응력경로 등이 파괴에 도달하는 반복하중횟수와 파괴거동에 큰 영향을 준다고 하였다. Andersen(2009)은 점토, 실트, 그리고 모래 등의 동적전단강도와, 반복하중을 받는 지반의 거동을 설계용 그래프로 나타내었으며, Ryu et al.(2015)은 반복하중을 받는 해양 실트질 모래의 비배수 파괴거동에 대한 평균전단응력(average shear stress, τ_a)과 반복전단응력(cyclic shear stress, τ_{cy})의 영향을 평가하고 응력기반 파괴기준을 선으로 이어 파괴선도 그래프로 나타내었다. 구조물 기초 지반의 동적 전단 거동은 지반에 가해지는 하중 방향과 평균응력에 따라 거동이 달라지며, 사질토 지반의 경우 특히 동적 전단 거동에 대한 상대밀도(relative density)의 영향을 파악하는 것이 필요하다.

본 연구는 동적 전단 거동에 대한 상대밀도의 영향을 파악하기 위한 것으로, 해상풍력단지가 조성될 예정인 서해안 인근 지역에서 채취한 시료를 사용하여 느슨한 밀도의 시편을 성형하여 반복단순전단시험을 수행하였다. 상대밀도를 변화시켜가며 10,000회 이상의 장기 반복하중시험을 수행하였으며, 동일한 채취 시료에 대해 Ryu et al.(2015)이 조밀한 시편을 성형하여 얻은 시험결과와 비교 분석하였다. 이를 바탕으로 설계에 활용할

수 있는 응력조건에 따른 파괴선도(동일한 반복하중 횟수에 해당하는 응력비 조합을 이은 응력비 등고선)를 3차원 그래프로 제시하였다.

2. 흙의 반복전단과정과 파괴거동

2.1 비배수상태 흙의 반복전단

일반적으로 모래의 비배수 거동은 상대밀도에 좌우된다. 느슨한 모래의 경우 반복하중이 작용함에 따라 모래가 압축(contraction)하게 되고 이로 인해 양의 간극수압이 발생하게 되면서 유효응력은 감소하게 된다. 반대로 조밀한 모래의 경우는 반복하중이 작용함에 따라 모래가 팽창(dilation)하게 되고, 부의 간극수압이 발생하여 유효응력이 증가하게 된다. 그러므로 느슨한 모래의 경우 조밀한 모래보다 양의 간극수압으로 전단강도가 낮게 나타난다. Fig. 1은 반복하중을 지속함에 따라 유효응력이 감소하여 응력경로가 파괴포락선(failure envelope)에 도달하는 것을 보여주며, 평균전단응력(average shear stress, τ_a)은 현지반상태의 응력(삼축시험시의 K_0 상태), 반복전단응력(cyclic shear stress, τ_{cy})은 파랑이나 바람 지진하중 등 추가적으로 재하 될 반복하중을 뜻한다. 이때 느슨한 모래는 조밀한 모래보다 간극수압이 빠르게 증가하여 파괴포락선에 도달하게 된다.

2.2 흙의 파괴거동

Andersen et al.(1988)은 파괴기준에 도달했을 때의 전단변형률과 그때의 반복하중횟수를 반복전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR) 및 평균전단응력비(Average

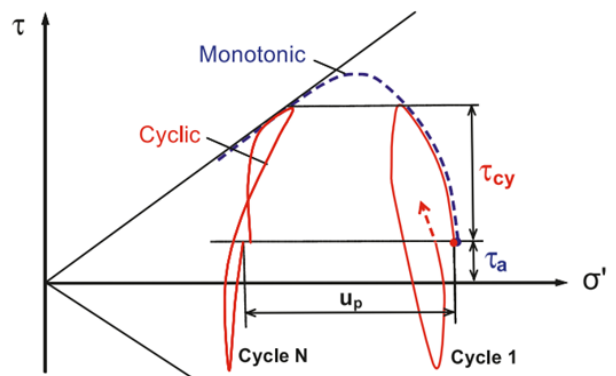


Fig. 1. Effective stress paths for undrained tests with monotonic and cyclic loading (Andersen, 2009)

Stress Ratio, ASR)에 대한 그래프로 나타낸 것을 설계 그래프(Design graph)라고 표현했다. 여기서 반복전단응력비와 평균전단응력비는 식 (1)로 정의한다.

$$CSR = \frac{\tau_{cy}}{\sigma_{vc}'}, ASR = \frac{\tau_a}{\sigma_{vc}'} \quad (1)$$

Fig. 2(a)는 반복하중에 의한 반복 및 평균전단응력, 간극수압, 그리고 전단변형률의 변화를 보여준다. 비배수 상태에서 시료에 반복하중이 가해지면 간극수압이 발생하는데 간극수압의 증가는 영구전단변형률(γ_p)과 반복전단변형률(γ_{cy})을 발생시킨다(Andersen, 2009). Fig. 2(b)는 반복하중에 의한 응력-변형률의 거동을 나타내며, 반복전단응력(τ_{cy})은 반복전단변형률(γ_{cy})을 발생시키고 평균전단응력(τ_a)은 영구전단변형률(γ_p)을 발생시켜, 이에 따라 응력-변형률의 거동도 달라진다. 여기서 평균전단응력은 두 가지 유형으로 구성되며, 초기전단응력(τ_0)은 원위치 지반의 상태로부터 구해지고, 평균전단응력의 변화 $\Delta\tau_a(\tau_a - \tau_0)$ 는 구조물의 자중과 같은 추가적인 재하 하중이다. 또한, 반복전단변형률은 1회의 진동 중에 발생한 변형률 진폭이며, 영구전단변형률은 N회의 진동이 반복되는 동안 최초 시점에서부터 증가한 변형률이다.

Ishihara(1985)는 액상화 초기 발생이 2.5~3.5%의 변형률 범위에 있음을 발견하고, 초기 액상화 발생을 단일 진폭변형률 3%로 제안하였다. De Alba et al.(1976)은

양진폭변형률이 7.5%일 때를 파괴기준으로 정의하였고, Nielsen et al.(2012)은 해양구조물의 설계를 위해 수행한 실험으로부터 양진폭변형률 15%를 파괴기준으로 정의하였다. Randolph et al.(2011)은 반복단순전단시험을 이용한 변형률 등고선도를 제안하고, 정규압밀된 Drammen 점토에 대한 비대칭 반복하중이 적용된 반복단순전단 시험 결과로 얻어지는 영구전단변형률(γ_p) 또는 양진폭 전단변형률($2\gamma_{cy}$)이 15%가 될 때의 하중횟수를 파괴횟수로 정의하였다. 이에 본 시험에서는 해양구조물의 조건을 고려하여 영구전단변형률 또는 양진폭전단변형률 15%를 파괴기준으로 정의하였다.

Nielsen et al.(2012)은 설계그래프에 사용되는 반복 및 평균전단응력에 대한 정규화 파라미터(Normalizing parameter)와 정규화 방법 등을 비교하였다. Andersen et al.(1999)이 제안한 일반적인 설계그래프는 수직유효응력으로 정규화 되었지만, 수정한 설계그래프는 초기간극수압을 고려한 비배수 전단강도로 정규화 하여 둘의 장단점을 비교하였다. 그 결과, 배수 상태 설계조건에서는 수직응력을 정규화 파라미터로 사용한 경우가 효율적이지만 비배수 상태 설계조건에서는 초기간극수압이 중요한 고려사항이기 때문에 비배수 전단강도를 정규화한 수정된 설계그래프가 효율적이라고 분석하였다. 본 연구에서는 비배수 조건이기는 하나 모래를 대상으로 한 점을 고려하여 수직유효응력(σ_{vc}')을 반복 및 평균응력에 대한 정규화 파라미터로 사용하였으며 수직유

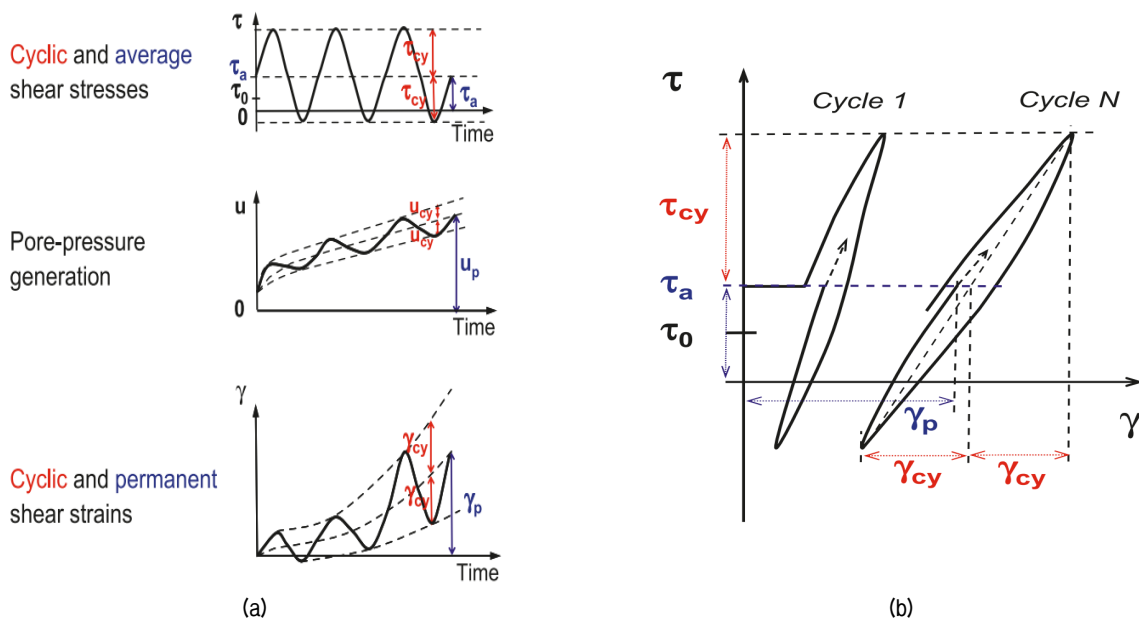


Fig. 2. Pore-pressure and shear strain as function of time under undrained cyclic loading (Andersen, 2009)

효율적으로 정규화된 값을 반복전단응력비 및 평균전단응력비로 정의하였다.

2.3 한계상태선

기존의 토질역학 이론 중 Mohr-Coulomb 파괴기준은 파괴상태만을 설명하기 때문에 파괴에 이르는 과정은 설명하지 못한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 1960년대 Cambridge 대학의 Roscoe교수와 그의 학생들은 한계상태이론을 제안하였다. 한계상태이론은 흙의 전단과 압밀을 통합한 이론으로, 하중을 받고 있는 흙이 전단파괴에 이르게 되면 유효응력변화나 체적변화 없이 무한히 전단변형만 일어나는 상태가 된다. 이를 바탕으로 한 파괴기준이 Cam-clay Model이며, p' , q , v 공간의 상태경계면에는 정규압밀선(Normal consolidation line), Roscoe면, Hvorslev면, 한계상태선(Critical state line)

이 나타난다. 한계상태선은 배수 및 비배수 시험에서 파괴점이 이루는 선을 말하며, 시료의 파괴는 응력상태가 한계상태선에 도달할 때 발생하게 된다. Critical state line(또는 한계간극비선, Critical void ratio line)을 경계로 윗부분은 전단시 수축(contraction) 경향을 보이며, 아랫부분은 전단시 팽창(dilation) 경향을 보이므로 느슨한 상태와 조밀한 상태의 기준으로 활용할 수 있다(Fig. 3). 한계상태선과 한계간극비선은 간극비를 표현하는 방식($1+e$ 와 e)만 다를 뿐 사실상 동일한 선이다.

3. 반복단순전단시험

3.1 반복단순전단시험의 원리

본 연구에서는 Fig. 4(a)와 같은 반복단순전단시험기를 사용하여 시험을 수행하였다. 반복단순전단시험기는

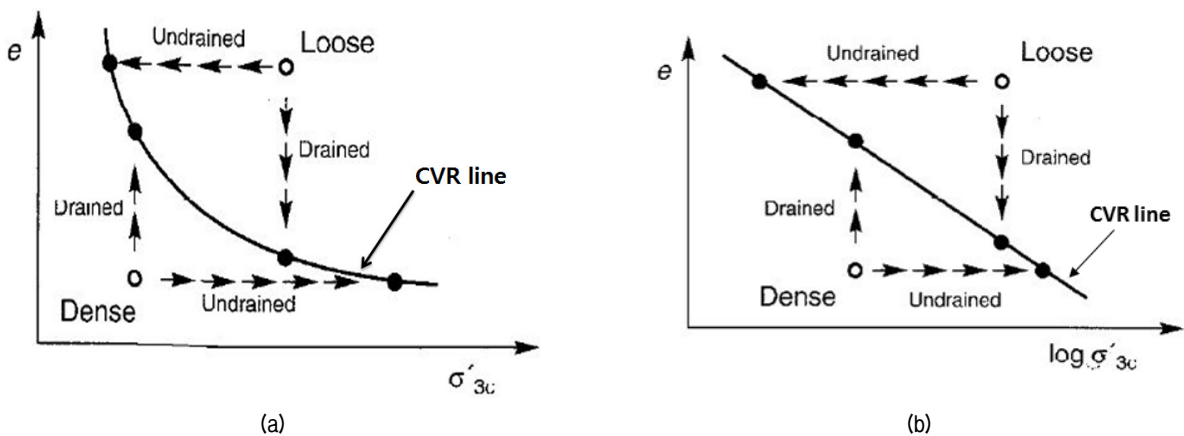


Fig. 3. Behavior of initially loose and dense specimens under drained and undrained conditions for (a) arithmetic and (b) logarithmic effective confining pressure scales (Kramer, 1996)

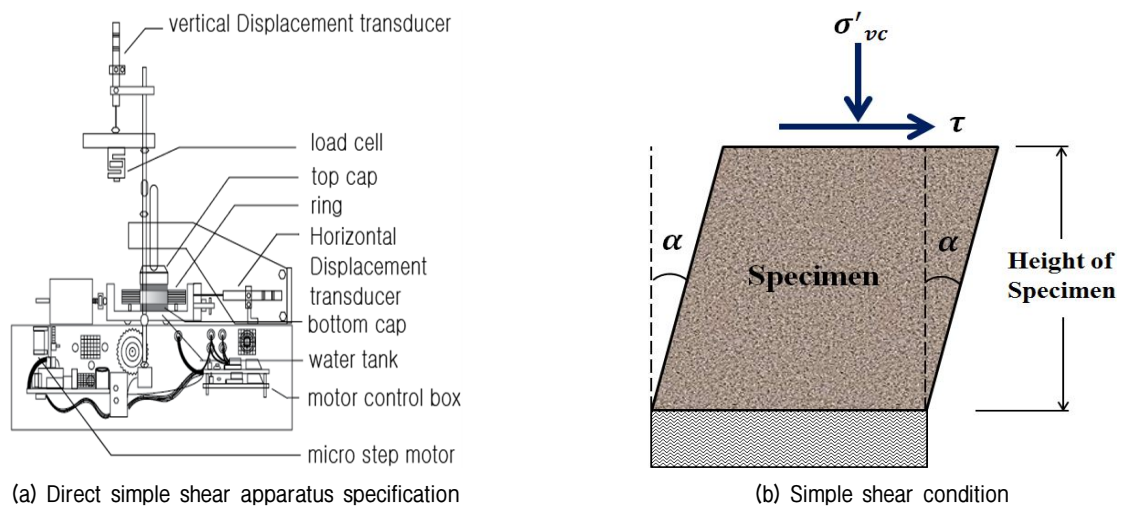


Fig. 4. Simple shear condition (Ryu et al., 2015)

시료의 거동을 직접전단시험보다 정확하게 재현하고 지진 시의 반복하중에 의한 동적특성을 대변형률과 중변형률에서 보다 정확하게 측정하기 위해 개발되었다. 지반 내의 흙의 변형은 하부 지층에서부터 전달되는 수평방향 지진 전단파의 영향을 주로 받는다. 지표면이 수평인 경우, 지진이 일어나기 전에는 지표내 수평면상에 전단응력이 작용하지 않지만 지진 시에는 수평면에 작용하는 수직응력이 일정하게 유지되는 상태에서 진동하는 동안 반복전단응력이 발생한다. 반복단순전단 시험은 이와 같은 응력조건에서 ASTM 기준 D6528-07에 맞게 제작된 강선보강 멤브레인(Wire reinforced membrane)으로 시료에 정지토압(K_0) 상태를 구현하고 시료를 구속하여 수행된다. 전단응력이 적용되는 동안 시료의 높이는 일정한 체적이 유지되도록 제어되며, 수직응력의 변화는 비배수 상태에서의 간극수압의 변화와 같다고 가정한다. Fig. 4(b)는 단순전단시험의 원리를 형상화한 것이다. 시료 상부에 수직응력이 재하되고, 측면 방향으로 전단응력이 발생할 때의 전단변형률을 측정한다.

3.2 시험조건 및 시료조성

반복단순전단시험에 사용된 시료의 직경은 63.5mm, 높이는 23.4mm이다. 압밀단계 이전의 초기 상대밀도는 50%이며, 압밀 후 시료의 높이 변화는 상대밀도에 큰 변화를 주지 않을 정도로 아주 작은 값이기 때문에 고려하지 않았다. 반복하중은 구조물에 일정한 진폭과 주기로 연속적 혹은 단속적으로 반복해서 작용하는 하중을 의미한다. 해상풍력 구조물을 설계하는 경우 파도와 바람에 대한 반복하중을 고려해야하며, 파도하중은 10~20sec

의 주기를 가진다(Andersen, 2009). 이에 본 연구에서는 해양구조물 조건상 과도하중 주기를 고려하여 0.1Hz의 주파수를 적용하였다. 바람에 대한 주파수는 표준화되어 있는 주파수가 없으나 보통 실험에 0.1Hz를 사용한다. 양진폭전단변형률과 영구전단변형률 15%를 파괴기준으로 적용하였다. 유효응력이 0이 되는 시점을 액상화가 발생하였다고 판단하고 이 또한 파괴기준으로 적용하였다. 기준 멤브레인 안에 얇은 철사링을 끼워 넣은 강선보강 멤브레인으로 횡방향 변위를 구속하여 K_0 상태를 재현하고 전단응력을 가하기 전에 수직압밀응력을 적용하여 실제 지반상태를 구현하였다. 수직압밀응력은 해상풍력발전기 기초 하부에 예상되는 응력 범위 내인 200kPa로 설정하였으며 전단과정에서 시료의 높이가 변하지 않도록 충분히 시편을 압밀한 후 반복단순전단 시험을 수행하였다. Fig. 5는 강선보강 멤브레인내 조성된 시료의 모습과 수직압밀응력을 적용하는 과정이다.

본 연구는 해상풍력발전단지가 조성될 예정인 서해안 인근의 새만금지역에서 채취한 비교적 균등한 세립질(실트질) 모래 시료를 사용하였다. 시험에 사용된 새만금지역 모래의 기본 물성치를 파악하기 위해 비중 및 입도분포 시험을 수행하였다. 비중(G_s)은 2.62, 최대간극비(e_{max})는 0.74, 최소간극비(e_{min})는 1.18로 조사되었으며, 각각의 최대간극비(e_{max}), 최소간극비(e_{min})는 BS-1377, JSF T161-1990규정에 의거해 산정하였다. 시험에 사용된 시료의 물성치 결과는 Table 1에 나타내었으며, 시료의 입도분포는 Fig. 6과 같다.

Mulilis et al.(1977)과 Miura et al.(1982)은 시편 조성 방법이 사질토 거동에 큰 영향을 준다고 하였다. 건조 낙사법, 수중 침강법, 슬러리 침전법, 건조침전법, 그리고

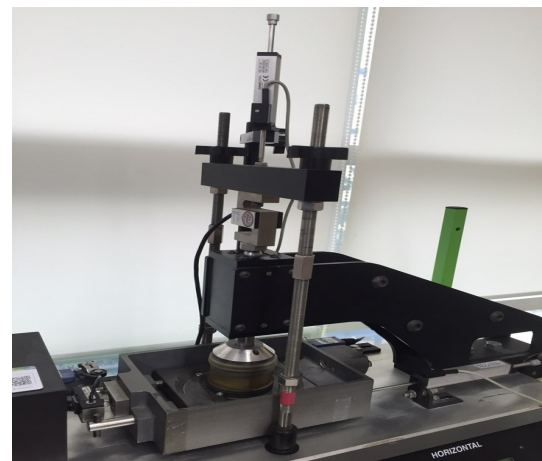
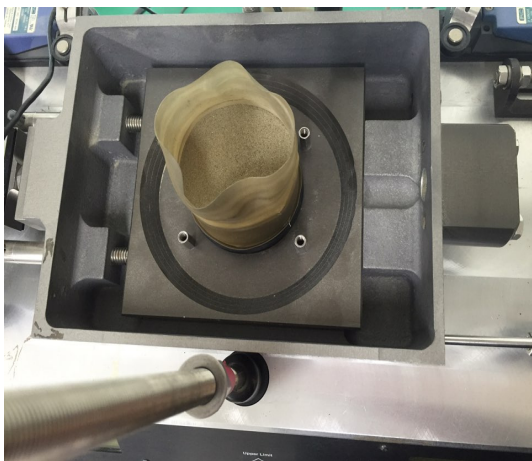


Fig. 5. Sample within wire-reinforced membrane

Table 1. Properties of west coast marine silty sand

Max. voids ratio	Min. voids ratio	Uniformity coefficient	Coefficient of curvature	USCS	Specific gravity
0.74	1.18	1.80	0.15	SP-SM	2.62

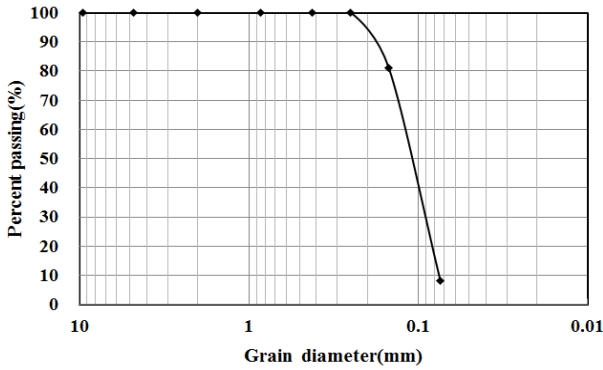


Fig. 6. Grain size distribution curve

습식 다짐 등 다양한 시편조성방법들이 있으며, 본 연구에서는 건조 낙사법(Air pluviation method)에 건조 진동 다짐 방법(Dry tamping method)을 이용하여 시료를 조성하였다. 건조 낙사법으로 조성한 모래의 상대밀도에 영향을 미치는 주요 요인으로는 입자의 낙하높이(Vaid et al., 1988)와 침전속도(Miura et al., 1982) 등이 있다. 본 연구에서 활용한 건조낙사법은 깔때기를 통하여 몰드 안쪽으로 시료를 낙하시켜 멤브레인까지 낙사할 수 있도록 하였다. 낙사된 시료를 5층으로 나누어 조성하여 동일한 밀도를 확보하였다. 상대밀도 50%에 해당하는 시료의 간극비를 계산하고 시편의 높이를 역으로 추정하여 시편을 조성하였다.

본 시험에 사용된 반복전단시험기는 시험과정에서 체적을 일정하게 유지하도록(비배수 조건) 실시간으로 수직응력과 하중을 조절하는 시스템이다. 일정한 체적을 유지하도록 하는 수직응력의 변화가 역으로 비배수상

태에서 간극수압 변화와 동일한 점을 바탕으로, 건조상태의 시료로 포화 비배수 시험을 수행할 수 있다(Budhu et al., 1987). 단순전단시험에서의 전단제어는 변형제어와 응력제어로 나누어진다. 변형제어는 일정한 변위 속도로 전단 하지만 실제의 지진 거동과는 차이가나고, 응력제어는 일정한 속도로(즉, 응력이 일정한 속도로 증가 또는 감소하도록) 전단하므로 실제 상황과 비슷하게 제어할 수 있다는 장점이 있으며, 본 연구에서는 응력제어 방법으로 시험을 수행하였다.

4. 시험 결과 및 분석

동적 전단 거동에 대한 상대밀도의 영향을 파악하기 위하여 느슨한 지반($D_r=50\%$)에 해당하는 조건에서 다양한 응력 조건을 적용하여 정적 및 동적실험을 수행하였으며, 조밀한 지반에서의 느슨한 지반에서의 응력 거동, 전단응력, 전단변형률, 그리고 간극수압 변화의 차이를 분석하였다. 또한, 최종적으로 다양한 응력 조건에서 파괴 시 반복하중횟수를 분석하여 곡선으로 연결한 응력기반파괴선도를 Ryu et al.(2015)이 작성한 조밀한 지반($D_r=85\%$)에서의 파괴선도와 비교 분석하여 상대밀도 변화에 따른 3차원 응력기반파괴선도로 나타내었다.

4.1 정적(Monotonic)시험

4.1.1 내부마찰각

서해안 실트질 모래로 느슨한 지반에 해당되는 상대밀

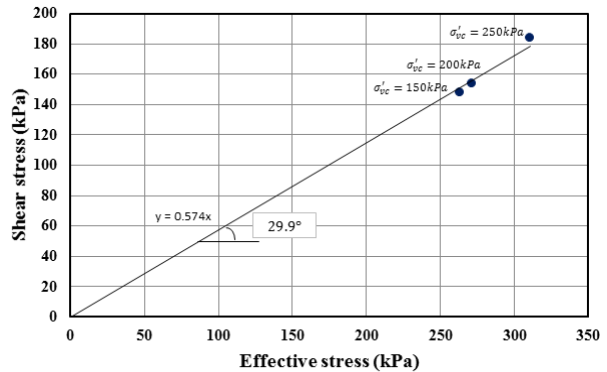
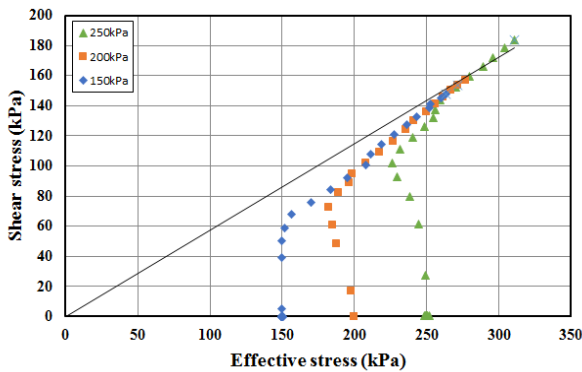


Fig. 7. Effective internal friction angle

Table 2. Relationship between SPT 'N' value, ϕ' , and Dr after peak (Peck et al., 1974)

N Value	Friction angle, ϕ' (Deg)	Relative density, Dr (%)	Description
Less than 4	25 - 28	Less than 15	Very loose
4 - 10	29 - 32	15 - 60	Loose
10 - 30	33 - 35	60 - 75	Medium
30 - 50	36 - 40	75 - 90	Dence
Over 50	41 - 45	Over 90	Very dense

도 50% 내외의 시편을 조성하고 구속압을 150kpa, 200kpa, 250kpa로 변화시키며 정적시험을 수행하여, 각각의 정적 전단파괴응력을 구하였다. 전단속도는 단순전단시험과 동일한 0.3mm/min으로 적용하였으며, 파괴기준은 3번의 정적시험 모두 동적시험과 동일한 전단변형률이 15% 일 때를 파괴기준으로 적용하였다. 각각의 파괴점을 하나의 선으로 이어 시료의 유효 내부마찰각을 추정한 결과 29.9°로 나타났다(Fig. 7). Peck et al.(1974)가 제안한 방법을 통해 지반의 상태를 파악하였으며(Table 2), 내부마찰각 29.9°에 해당하는 지반은 상대밀도(Dr)가 15~60%의 느슨(loose)한 상태인 것을 알 수 있었다. 또한, 시험 결과에 따른 정적응력비($\frac{\tau}{\sigma} = 0.574$)는 반복전단응력비가 0인 경우로 상대밀도 50%일 때 응력기반파괴선도 등고선의 시작점으로 적용된다.

4.1.2 한계상태선

Ryu(2016)는 단순전단시험기를 이용한 정적시험의 결과로부터 서해안 모래의 유효응력경로를 유효응력-전단응력면에 나타내고, 파괴에 이르는 점들을 연결한 한계상태선(Critical state line, CSL)을 나타내었다(Fig. 8). 총 4번의 정적시험에 대한 내용은 Table 3에 정리하였으며, 각 정적시험의 구속압 및 상대밀도는 압밀시험을 통해 구해진 정규압밀선으로부터 구하였다. 비배수 조건에서의 한계상태선은 정규압밀선을 기준으로 간극비는 변하지 않고 유효응력은 감소하게 되며, P'-e 공간에서 한계상태선은 정규압밀선과 유사한 형태를 보이게 된다.

지반의 특성을 파악할 때 일반적으로 4.1.1절의 내용과 같이 내부마찰각을 통해서 지반의 조밀함 정도를 쉽게 파악 할 수 있지만, 한계상태선을 이용하면 더욱 정확하게 분석 할 수 있다. Fig. 3과 같이 한계상태선을 경계로 윗부분은 느슨(loose)한 상태, 아랫부분을 조밀(dense)한 상태의 지반으로 분류할 수 있다. Ryu(2016)는 상대밀도 85%에 해당하는 조밀한 지반조건에 대해 가정하고 시료를 조성하여 시험하였으며, 간극비($e=0.81$), 유효수직

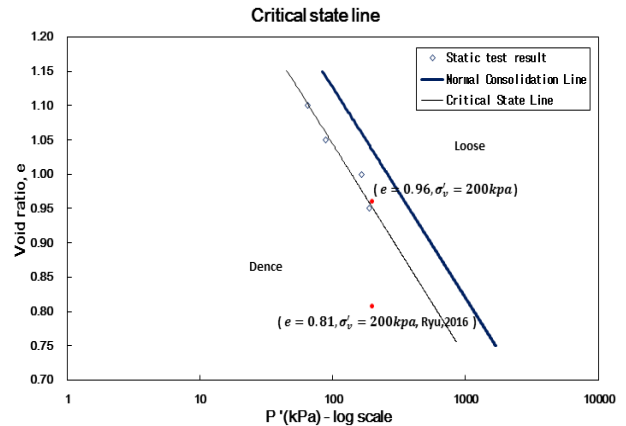


Fig. 8. Critical state line

Table 3. Summary of the CDSS tests (Ryu, 2016)

Test ID	Relative density, Dr (%)	Confining pressure (kPa)	Rate (/min)
CDSS_1	18.01	121.71	0.3
CDSS_2	28.78	177.21	0.3
CDSS_3	40	258	0.3
CDSS_4	52	375.64	0.3

응력($\sigma'_{vc}=200kpa$)의 동적시험에 해당하는 지점을 Fig. 8에 도시한 결과 조밀한 영역에 포함되어 이는 조밀한 상태의 지반임을 확인 하였다. 본 연구는 이를 바탕으로 동일한 시료를 이용하여 상대밀도 50%에 해당하는 느슨한 지반조건에 대해 시편을 성형하여 시험을 수행하였으며, 간극비($e=0.96$), 유효수직응력($\sigma'_{vc}=200kpa$)의 동적시험에 해당하는 지점을 Fig. 8에 나타내었다. 이 지점은 한계상태선을 기준으로 윗부분에 위치하고 있으므로 느슨한 상태라고 판단할 수 있었으며, 4.1.1절의 내용에서 내부마찰각으로 확인한 지반의 상태와 동일한 느슨한 지반임을 한계상태선을 통해서 더욱 정밀하게 분석하였다.

4.2 동적(Cyclic)시험

여러 가지의 조건에 대한 거동을 비교하기 위해 평균

전단응력비(0.0~0.4)와 반복전단응력비(0.1~0.5)의 범위에서 총 15회 이상의 반복단순전단시험을 수행하였으며, 해당 범위는 반복전단횟수가 1회부터 10,000회 이상의 범위에서 파괴기준에 도달하는 기준 내에서 설정

하였다(Table 5).

Fig. 9와 Fig. 10은 상대밀도가 각각 85%, 50%의 조건에서 평균전단응력비가 0, 반복전단응력비가 0.2일 때 전단응력, 전단변형률, 간극수압의 변화를 보여준다. 평

Table 4. Summary of the CDSS tests with corresponding CSR and ASR values (Dense)

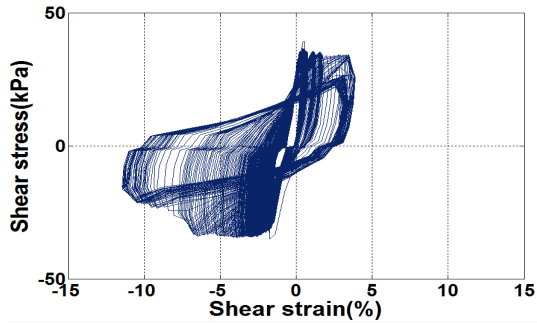
Test ID	Cyclic stress ratio (τ_{cy}/σ_{vc}')	Average stress ratio (τ_a/σ_{vc}')	Number of cycle at failure (N_f)	Permanent shear strains at failure ($\gamma_p, \%$)	Cyclic shear strains at failure ($\gamma_{cy}, \%$)
CDSS_1	0.2	0	6,800	0	15
CDSS_2	0.2	0.2	>10,000	3	0.3
CDSS_3	0.2	0.3	5,229	5.84	0.33
CDSS_4	0.2	0.5	>10,000	9.72	0.29
CDSS_5	0.3	0	386	0	15
CDSS_6	0.3	0.2	301	15	0.47
CDSS_7	0.3	0.3	6,420	15	4.75
CDSS_8	0.3	0.5	24	15	0.94
CDSS_9	0.4	0	35	0	15
CDSS_10	0.4	0.2	68	15	1.07
CDSS_11	0.4	0.3	38	15	1.15
CDSS_12	0.4	0.5	8	15	1.76
CDSS_13	0.5	0	5	0	15
CDSS_14	0.5	0.2	11	15	3.35
CDSS_15	0.5	0.3	12	15	1.78
CDSS_16	0.5	0.5	1	15	7.87
CDSS_17	0.6	0	4	0	15
CDSS_18	0.6	0.2	4	15	5
CDSS_19	0.6	0.3	2	15	4.82
CDSS_20	0.7	0	2	0	15
CDSS_21	0.7	0.2	1	15	8.95

Table 5. Summary of the CDSS tests with corresponding CSR and ASR values (Loose)

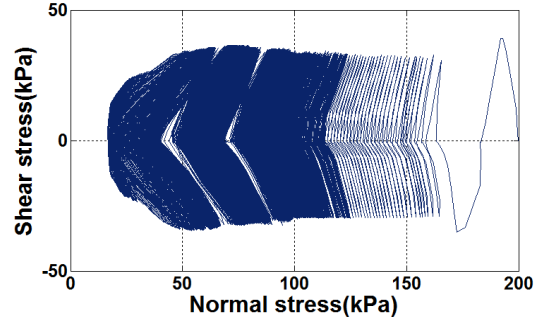
Test ID	Cyclic stress ratio (τ_{cy}/σ_{vc}')	Average stress ratio (τ_a/σ_{vc}')	Number of cycle at failure (N_f)	Permanent shear strains at failure ($\gamma_p, \%$)	Cyclic shear strains at failure ($\gamma_{cy}, \%$)
CDSS_1	0.1	0	>10,000	0	0.65
CDSS_2	0.1	0.2	>10,000	9.51	0.17
CDSS_3	0.1	0.3	>10,000	10.85	0.14
CDSS_4	0.1	0.4	2,862	15	0.19
CDSS_5	0.2	0	54	0	1.53
CDSS_6	0.2	0.2	59	15	0.69
CDSS_7	0.2	0.3	140	15	0.45
CDSS_8	0.2	0.4	52	15	0.43
CDSS_9	0.3	0	12	0	1.88
CDSS_10	0.3	0.2	23	15	1.37
CDSS_11	0.3	0.3	10	15	1.17
CDSS_12	0.3	0.4	7	15	1.10
CDSS_13	0.4	0	3	0	3.92
CDSS_14	0.4	0.2	9	15	2.60
CDSS_15	0.4	0.3	5	15	2.21
CDSS_16	0.5	0	1	0	5.13
CDSS_17	0.5	0.2	2	6.23	4.90

균전단응력비가 0인 경우는 구조물의 자중과 원위치에서부터 받는 전단응력이 없다는 가정 하에 평균전단응력을 제외하고 수행한 시험이다. Fig. 9와 Fig. 10에서 평균전단응력비가 0일 때 반복전단변형과 영구전단변

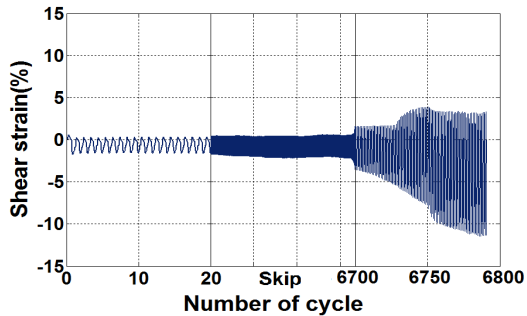
형을 살펴본 결과 상대밀도가 달라지더라도 주된 변형모드는 좌우대칭형태를 가지고 영구전단변형은 미소하게 발생하였다. 이 결과는, 반복횟수가 증가하더라도 반복전단변형률만 증가하는 것을 보여주는데, 이는 평균



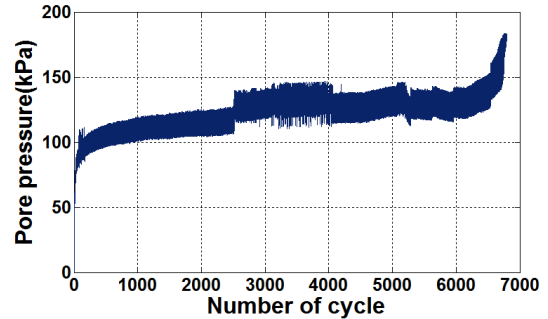
(a) Shear stress - Shear strain curve



(b) Shear stress - Normal stress curve

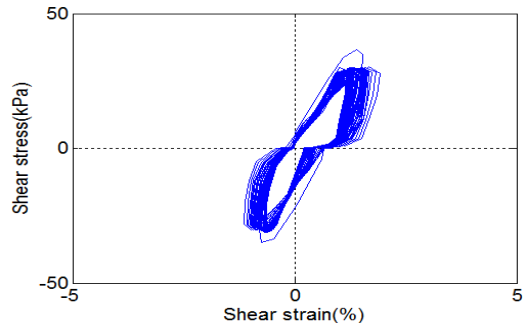


(c) Shear strain as function of time under cyclic loading

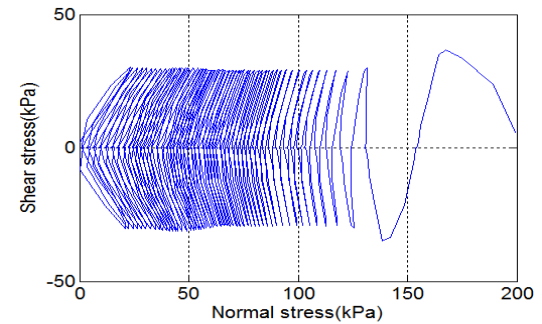


(d) Pore pressure as function of time under cyclic loading

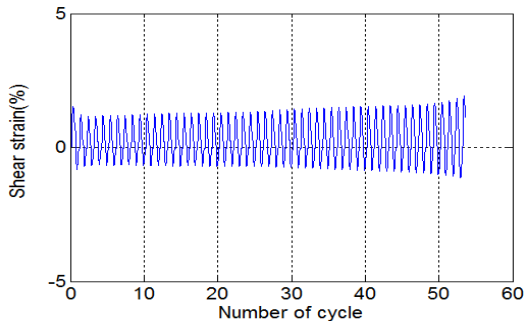
Fig. 9. Stress behavior ($D_r=85\%$, $ASR=0$, $CSR=0.2$, cycle=6,800) (Ryu et al., 2015)



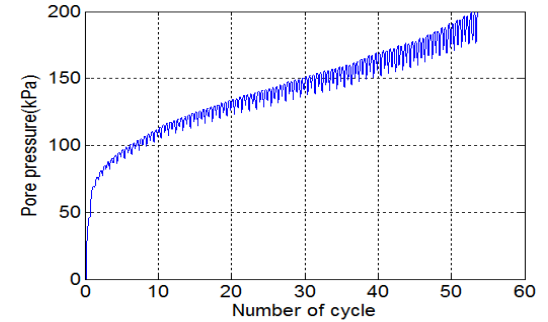
(a) Shear stress - Shear strain curve



(b) Shear stress - Normal stress curve



(c) Shear strain as function of time under cyclic loading

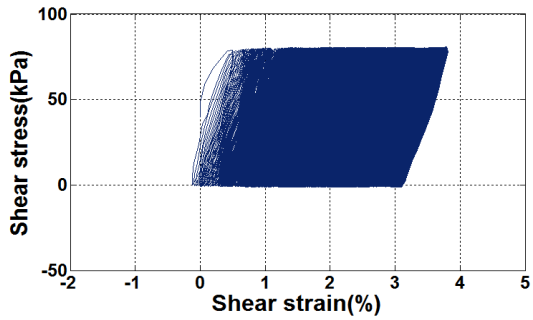


(d) Pore pressure as function of time under cyclic loading

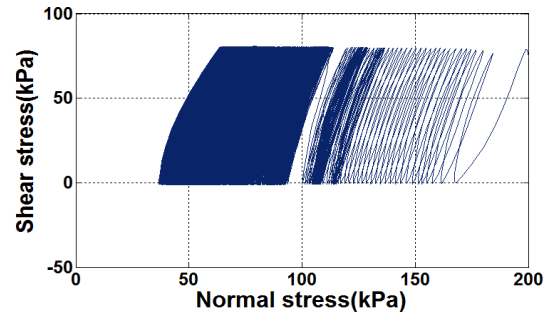
Fig. 10. Stress behavior ($D_r=50\%$, $ASR=0$, $CSR=0.2$, cycle=54)

전단응력이 작용하지 않아 영구전단변형률은 발생하지 않고 반복전단응력에 의해 반복전단변형률만 발생하기 때문이다. 상대밀도가 85%에 해당하는 Fig. 9 시험결과에서는 반복전단 횟수 6,800회에서 전단변형률(영구 또는 평균)이 15%인 파괴기준에 도달한다. 반면, 상대밀

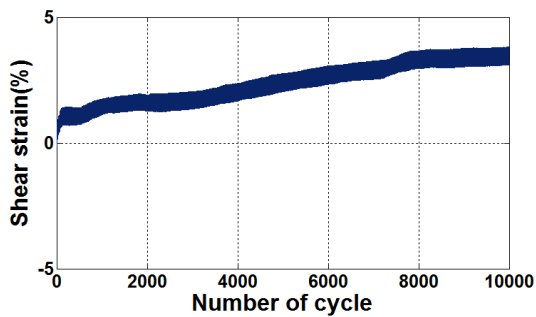
도가 50%에 해당하는 Fig. 10 시험결과에서는 전단변형률(영구 또는 평균)이 15%인 파괴기준에 도달하기 전에 간극수압이 증가하여 반복전단 횟수 54회에서 유효응력이 0이 되는 지점에 도달하여 파괴가 일어난다. 이 결과에 따르면, 동일한 반복전단응력비(0.2) 조건이지



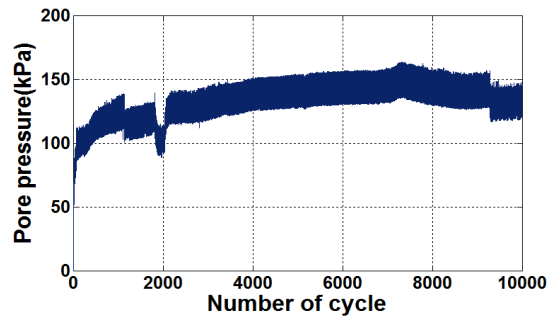
(a) Shear stress - Shear strain curve



(b) Shear stress - Normal stress curve

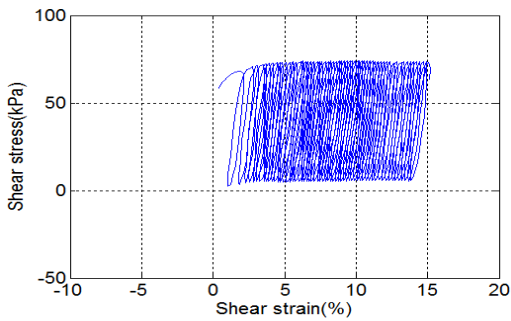


(c) Shear strain as function of time under cyclic loading

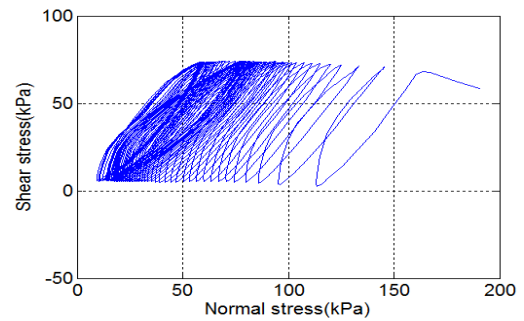


(d) Pore pressure as function of time under cyclic loading

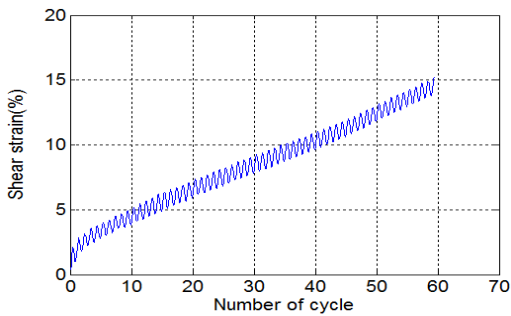
Fig. 11. Stress behavior ($Dr=85\%$, $ASR=0.2$, $CSR=0.2$, cycle=10,000) (Ryu et al., 2015)



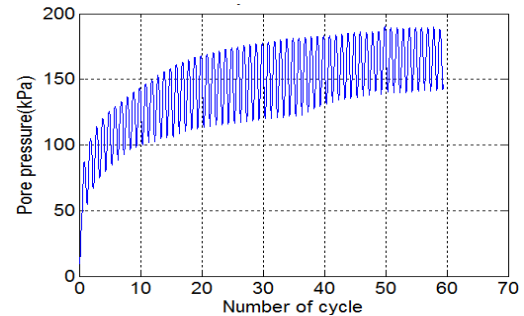
(a) Shear stress - Shear strain curve



(b) Shear stress - Normal stress curve



(c) Shear strain as function of time under cyclic loading



(d) Pore pressure as function of time under cyclic loading

Fig. 12. Stress behavior ($Dr=50\%$, $ASR=0.2$, $CSR=0.2$, cycle=59)

만 반복하중을 지속함에 따라 느슨한 모래는 조밀한 모래보다 간극수압이 빠르게 증가하고, 이에 유효응력이 급격히 감소하여 파괴에 도달하는 횟수가 감소하게 된다(Fig. 9(b), (d), Fig. 10(b), (d)).

Fig. 11과 Fig. 12는 상대밀도가 각각 85%, 50%의 조건에서 평균전단응력비가 0.2, 반복전단응력비가 0.2일 때 전단응력, 전단변형률, 간극수압의 변화를 보여준다. Fig. 11(c)와 Fig. 12(c)에 따르면, 평균전단응력비가 0보다 큰 경우는 반복횟수가 증가함에 따라 영구전단변형률은 증가하지만, 반복전단변형률은 가해지는 하중에 따른 전단변형률의 증분없이 일정한 상태를 유지한다. 이에 Fig. 11(a)와 Fig. 12(a) 같이 단일방향으로 증가하는 영구전단변형률을 발생하는 것을 보여주며, 상대밀도가 변화하더라도 주된 변형모드는 같은 형태를 가진다. 평균전단응력비(0.2), 반복전단응력비(0.2)가 동일한 조건에서 상대밀도가 85%에 해당하는 Fig. 11 시험결과에서는 반복전단 횟수가 10,000회 이상에서 전단변형률(영구 또는 평균)이 15%인 파괴기준에 도달한다. 반면, 상대밀도가 50%에 해당하는 Fig. 12에서는 반복전단 횟수가 급격히 감소한 59회에서 파괴기준에 도달하고 있다. 이는 평균전단응력비가 0보다 큰 경우에도 평균전단응력비가 0인 경우와 같이 느슨한 지반에서는 조밀한 지반보다 파괴기준에 도달하는데 필요한 반복하중횟수가 급격히 감소한다는 것을 보여준다. 또한, 조밀한 지반에서의 간극수압은 반복하중이 가해진 초기에는 급격히 증가하고, 그 후에는 완만히 증가하는 반면, 느슨한 지반은 파괴기준에 도달하는 과정까지 간극수압이 급격한 변화 없이 꾸준히 증가함을 보인다(Fig. 11(d), Fig. 12(d)).

4.3 응력기반파괴선도

느슨한 지반($D_r=50\%$) 조건에서 수행한 정적시험과 15회 이상의 반복단순전단시험 분석 결과로부터 응력기반파괴선도(Fig. 14)를 제시하고, Ryu et al.(2015)이 제시한 조밀한 지반($D_r=85\%$)에서의 파괴선도(Fig. 13)와 비교 분석하여 상대밀도 변화에 따른 3차원 응력기반파괴선도로 제시하였다(Fig. 15). Fig. 14(a)에서 각 데이터 위치에 표시된 숫자들은 Fig. 13(a)와 동일하게 파괴시의 반복하중횟수(N_f), 영구전단변형률(γ_p), 반복전단변형률(γ_{cy})을 의미한다. 또한, Fig. 14(b)에서 보여지는 파괴선도는 파괴시의 반복하중 횟수가 조밀한 지반의 조건과 동일한 1~10,000회 이상에서 파괴에 도달하는 반복전단응력비와 평균전단응력비의 조합으로 총 5개의 파괴곡선을 제시하고 있다. 본 시험에서 제시된 파괴선(반복횟수에 대한 응력비 조합)들의 시작점은 Ryu et al.(2015)과 동일하게 정적시험을 통해 얻은 결과 값(Fig. 6)을 적용하였으며, 반복전단응력비(CSR)가 0, 평균전단응력비(ASR)가 0.574인 점에서 시작된다. 제시된 Fig. 13과 Fig. 14를 보면, 반복전단응력비 또는 평균전단응력비 중 하나가 일정한 상태에서 반복전단응력비 또는 평균전단응력비가 증가하게 되면 파괴기준에 도달하기 위한 반복하중 횟수가 감소한다. 이때 파괴곡선은 조밀한 모래보다 느슨한 모래에서 반복전단응력비와 평균전단응력비의 조합이 0.1~0.2 정도 감소하여 아래로 이동하는 경향을 보인다. 또한 조밀한 지반에서 파괴는 Fig. 13과 같이 평균전단응력비가 0에 가까운 경우 주로 반복전단변형(양진폭전단변형률 15% 기준)에 의해 파괴에 도달하나, 평균전단응력비가 증가하여 0에

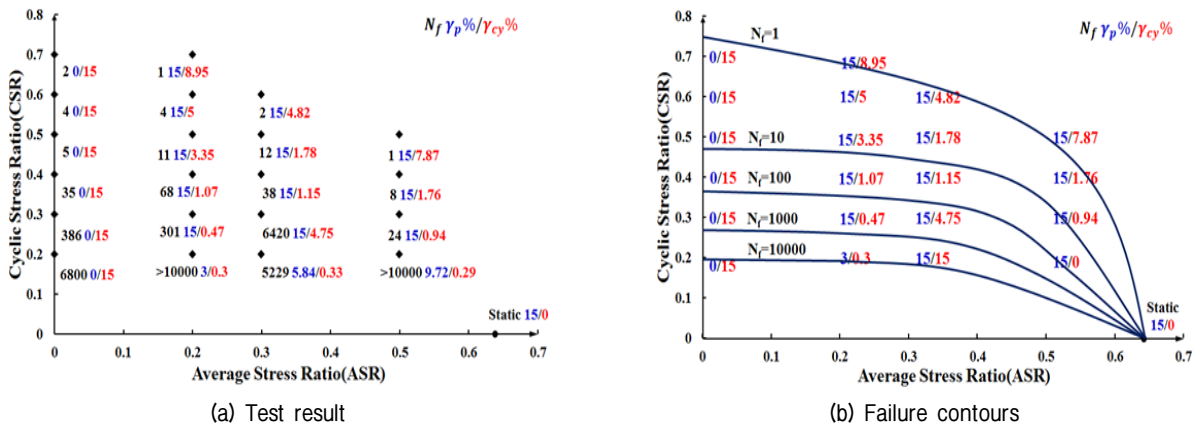


Fig. 13. Contour lines for marine silty sand showing CSR and ASR and the corresponding cyclic and permanent shear strains at failure ($D_r=85\%$, $\sigma'_{vc}=200$ kPa) (Ryu et al., 2015)

서 멀어질 경우 반복전단변형보다는 영구전단변형에 의하여 파괴가 결정된다고 발표된바있다(Ryu et al., 2015). 그러나 느슨한 모래 지반에서의 시험결과 Fig. 14는 평균전단응력비가 0에 가까운 경우에는 주로 반복전단변형률이 15%에 도달하기 이전에 간극수압의 증가로 인해 파괴반복횟수에 도달하는 것을 보여주고 있다. 본 논문에서는 Ryu et al.(2015)이 제시한 결과를 바탕으로, 조밀한 지반과 느슨한 지반에서의 상대밀도 변화에 따른 응력기반 파괴경로 변화를 3차원으로 나타내고 파괴선을 이은 파괴면을 제시하였다(Fig. 15). 3차원 파괴선도는 조밀한 지반 조건에 대해서만 한정된 한계점을 보완하여 지반의 상대밀도에 따라 반복전단응력비, 평균전단응력비, 반복하중 횟수 등의 설계 조건을 결정할 수 있는 아주 유용한 설계도구로 활용 가능하다. 제시된 파괴선도에 따르면 파괴에 이르는 반복하중 횟수는 반복전단응력비, 상대밀도, 그리고 평균전단응력비의 순서로 좌우되는 것으로 나타났다. 설계 적용의 예를 들

면, 구조물 기초 하부 지반에 작용하는 반복하중의 예상 횟수가 1,000회, 평균전단응력비가 0.2 일 때 반복전단응력비는 느슨한 지반이라면 0.15, 조밀한 지반에서는 0.25를 초과하지 않도록 조절해야한다.

5. 요약 및 결론

해양 실트질 모래의 상대밀도 변화에 따른 비배수전단파괴 거동에 대해 평균전단응력과 반복전단응력이 미치는 영향을 평가하기 위하여 서해안 실트질 모래를 대상으로 수 차례의 반복단순전단시험을 수행하였으며, 그 주요 내용과 결론은 다음과 같다.

- (1) 한계상태선을 기준으로 윗부분은 느슨(loose)한 상태, 아랫부분을 조밀(dense)한 상태의 지반으로 분류하였다.
- (2) 해양구조물의 조건을 고려하여 영구전단변형률 또는

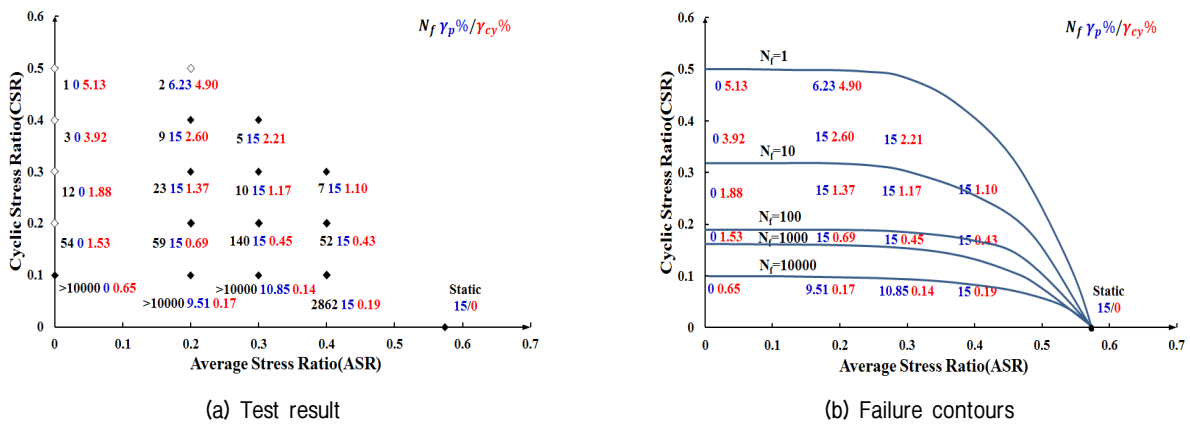


Fig. 14. Contour lines for marine silty sand showing CSR and ASR and the corresponding cyclic and permanent shear strains at failure ($Dr=50\%$, $\sigma'_{vc}=200$ kPa)

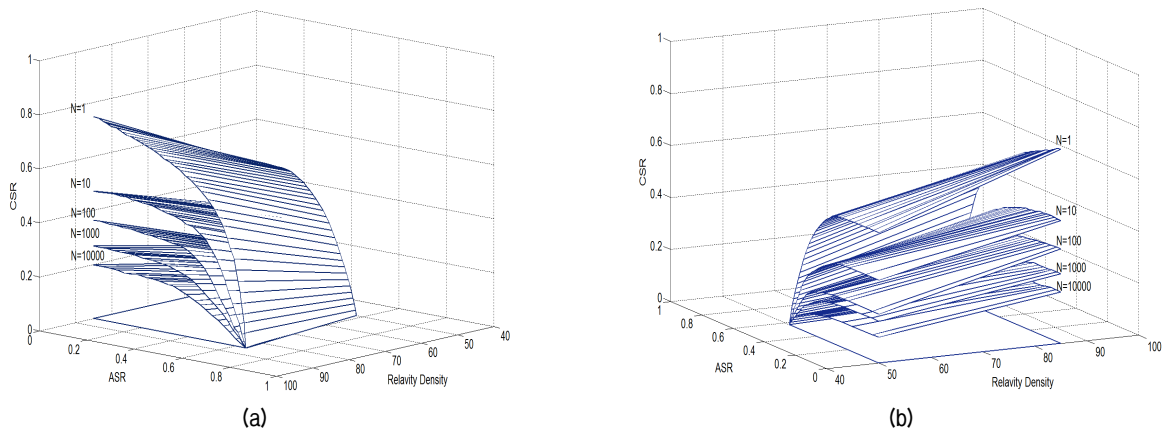


Fig. 15. Three-dimensional contour lines for marine silty sand showing CSR and ASR and Dr and the corresponding cyclic and permanent shear strains at failure

양진폭전단변형률 15%를 파괴기준으로 정의하였다.

- (3) 평균전단응력비가 0인 경우는 반복전단변형과 영구전단변형은 조밀한 모래와 느슨한 모래 모두 주된 변형모드는 좌우대칭형태를 가지고 영구전단변형은 미소하게 발생하며, 반복횟수가 증가하더라도 반복전단변형률만 증가하였다. 이때, 반복하중을 지속함에 따라 느슨한 모래는 조밀한 모래보다 간극수압이 빠르게 증가하고 이에 유효응력이 급격히 감소하여 파괴에 도달하였다.
- (4) 평균전단응력비가 0보다 큰 경우는 반복횟수가 증가함에 따라 반복전단변형률은 거의 변화 없이 영구전단변형률이 증가하며, 전단변형률이 단일방향으로 증가하여 영구전단변형률을 발생하고 있다. 이와 같은 경우에도 평균전단응력비가 0인 경우와 같이 느슨한 지반에서는 조밀한지반보다 파괴기준에 도달하는데 필요한 반복하중횟수가 급격히 감소하며, 조밀한 지반에서는 간극수압이 반복하중이 가해진 초기에는 급격히 증가하고, 그 후에는 완만히 증가하는 반면 느슨한 지반은 파괴기준에 도달하는 과정까지 간극수압이 급격한 변화 없이 꾸준하게 증가하고 있다.
- (5) 조밀한 지반과 느슨한 지반에서 상대밀도 변화에 따른 응력기반 파괴경로의 변화를 2차원과 3차원으로 제시하였으며, 3차원 파괴선도는 조밀한 지반 조건에 대해서만 한정된 한계점을 보완하여 지반의 상대밀도에 따라 반복전단응력비, 평균전단응력비, 반복하중 횟수 등의 설계 조건을 결정 할 수 있는 아주 유용한 설계도구로 활용 가능하다.
- (6) 제시된 파괴선도에 따르면 파괴에 이르는 반복하중 횟수는 반복전단응력비, 상대밀도, 그리고 평균전단응력비의 순서로 좌우되는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

1. Andersen, K.H., Kleven, A., and Heien, D. (1988), "Cyclic Soil Data for Design of Gravity Structures", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.114, No.5, pp.517-539.
2. Andersen, K.H. and Berre, T. (1999), "Behaviour of a Dense Sand under Monotonic and Cyclic Loading", In Proceedings of the 12th ECSMGE, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Amsterdam, the Netherlands, 7-10 June 1999, Vol.2, pp.667-676.
3. Andersen, K.H. (2009), "Bearing Capacity under Cyclic Loading, Offshore, Along the Coast and on Land. The 21st Bjerrum Lecture presented in Oslo, 23 November 2007", NRC Research Press Web site <www.cgj.nrc.ca>.
4. Budhu, M. and Britto, A. (1987), "Numerical Analysis of Soils in Simple Shear Devices", *Soils and Foundation*, Vol.27, No.2, pp.31-41
5. De Alba, P., Seed, H.B., and Chan, C.K. (1976), "Sand Liquefaction in Large-scale Simple Shear Tests", *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.102, pp.909-927.
6. Ishihara, K. (1985), "Stability of Natural Deposits during Earthquakes", 11th Intl. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1: 321-376.
7. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall Inc.
8. Miura, S. and Toki, S. (1982), "A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-strength Properties of Sand", *Soils and Foundation*, Vol.22, pp.61-77.
9. Mulilis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K., Mitchell, J.K., and Arulanandan, K. (1977), "Effects of Sample Preparation on Sample Preparation", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE 103 (GT2), pp.91-108.
10. Nielsen, S.D., Shajarati, A., Sorenson, K.W., and Ibsen, L.B. (2012), "Behaviour of Dense Frederikshavn Sand during Cyclic Loading", DCE Technical Memorandum, No.15.
11. Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H. (1974), *Foundation Engineering* 2nd Ed., New York: John Wiley and Sons.
12. Randolph, M. and Gourvenec, S. (2011), "Offshore Geotechnical Engineering", Taylor and Francis, London.
13. Ryu, T. G. (2016), Long-term dynamic behavior study of marine silty sand for offshore structure foundation design, Master's Thesis, Pusan National University.
14. Ryu, T. G. and Kim, J. M. (2015), "Stress-Dependent Failure Criteria for Marine Silty Sand Subject to Cyclic Loading", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.11, pp.15-23.
15. Vaid, Y. P. and Negussey, D. (1988), "Preparation of Reconstituted Sand Specimens", ASTM STP pp.977.

Received : December 30th, 2016

Revised : January 16th, 2017

Accepted : January 19th, 2017