

비틀림전단시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동

The Stress-Strain Behavior of Sand in Torsion Shear Tests

南 正 萬*¹

Nam, Jung - Man

洪 元 杓*²

Hong, Won - Pyo

Abstract

A series of torsion shear tests were performed to study the drained stress-strain behavior of medium dense Santa Monica Beach sand under various stress paths. The torque was applied to both clockwise and counterclockwise directions at the end of hollow cylinder specimen. Two clip gages had been previously used to measure the changes in wall thickness and diameter of the specimen. In this study, however, the lateral strain was determined by measuring volume changes in specimen. Specimens were prepared by the air pluviation method and gaseous carbon dioxide(CO₂) was used to measure precisely volumetric strain in specimen.

The drained stress-strain behavior of cohesionless soils during rotation of principal stress directions was analyzed based on the results of torsion shear tests. The coupling effects between stresses and strains were observed when both torsion shear and vertical normal stress were applied. It was also found from the test results that the axial strain at failure decreased with increasing value.

요 지

주응력회전시 모래의 응력-변형률 거동을 조사하기 위하여 Santa Monica 해변의 모래에 대한 비틀림전단시험이 여러가지 응력경로에 대해 실시되었다. 모래에 대한 비틀림전단시험에서는 점토에서와 달리 Torque의 작용방향을 시계방향과 반시계방향 모두에 대해 작용하였으며, 공시체의 측방변형률 측정도 내부압축실의 체적변형률로부터 평균 변형률을 측정함으로써 점토시 사용하였던 Clip gage를 제거하여 시험을 보다 편리하게 할 수 있었으며 어느 일부분에서 측정했던 측방변형을 대표값으로 사용하였던 단점을 보완하였다. 그리고 공시체의 제작은 모래를 공중낙하법에 의해 실시하여 밀도를 균등하게 만들었으며 공시체의 체적변형률은 CO₂ 가스를 이용하여 체적변형률 측정을 보다 정확하게 할 수 있었다.

*¹ 중앙대학교 대학원, 토목공학과 박사과정

*² 정회원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

시험결과로부터 비틀림전단시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동이 조사되었으며 또한 주응력축 회전효과가 검토되었다. 그리고 연직응력이나 전단응력중 하나가 고정인 상태에서 다른 하중을 작용하였을시 선행하중에 의한 결합효과(coupling effect)에 의해 선행하중에 대한 전단변형률과 연직변형률이 계속 관찰되었다. 한편 축변형률에 대한 주응력비 σ_1/σ_3 의 관계에서 파괴가 발생하는 축변형률의 위치는 축차주응력비 $b=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$ 가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

1. 서 론

흙의 거동을 분석하기 위한 실내시험으로 현재 원통형 공시체를 사용하는 삼축시험이 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 원통형공시체로는 주응력방향의 회전효과나 중간주응력의 영향등을 고려할 수 없는 단점이 있다. 근래 이러한 점을 보완한 시험기인 비틀림전단시험기^(1~11)나 입방체형삼축시험기^(12~14) 등을 개발하여 흙의 거동을 보다 정확하게 해석하기 위한 많은 노력이 진행중에 있다.

여기에 사용된 비틀림전단시험장치는 중공원통형공시체(hollow cylindrical specimen)를 사용하여 공시체의 내측면과 외측면에 구속측압을 가하고 공시체의 상하단에 연직하중 및 Torque를 가하여 각각 상이한 세주응력을 발생시킬 수 있는 장치로서 이미 국내외에 소개된 적이 있다.^(10, 12)

비틀림전단시험기의 장점은 전단시 흙요소 에 주응력축의 회전현상을 부여할 수 있다는 것을 들 수 있다. 즉, 구조물을 축조할 경우 지중의 응력은 공사진행에 따라 변하게 되어 연직응력과 수평응력의 변화는 물론이고 전단응력까지 발생하게 되므로 주응력방향은 지중응력의 변화에 따라 변하게 된다. 따라서 지반속의 거동은 주응력축의 회전에 도 크게 영향을 받을 것이다.

본 연구는 이러한 흙의 거동을 분석하기 위해 점토에 관한 연구^(10~11)의 연장으로 모래에 대한 비틀림전단시험을 배수상태로 실시하였다. 따라서 모래에 대한 비틀림전단시험시 점

토의 연구에서와 차이가 있는 공시체의 제작 방법과 축방변형률 측정시 점토에서 사용하였던 Clip gage 대신 내부압측실의 체적변형률 측정으로 부터 축방변형률의 산정을 가능하게 한 방법⁽¹⁵⁾에 대해 간략히 설명하고자 한다. 그리고 본시험에서는 Torque의 작용방향도 시계방향과 반시계방향으로 작용시켜 반복하중의 효과를 고려하였으며, 또한 주응력축회전시 모래의 응력-변형률 사이의 거동과 연직하중과 전단력을 동시에 작용시켰을 경우 이들 하중의 결합효과를 검토하여 보고자 한다.

2. 비틀림전단시험

주응력방향 회전에 대한 흙의 거동을 조사하기 위한 시험에서는 연직하중 뿐만아니라 전단응력을 공시체의 표면에 동시에 적용 시킬 수 있는 시험장치가 필요하다. 이러한 시험을 위해 공시체의 주위가 Cap ring과 Base ring 및 Membrane으로 둘러 싸여져 있는 중공원통형 공시체를 이용한 비틀림 전단시험기가 많이 사용되고 있다. 중공원통형공시체는 공시체의 내측면과 외측면에 구속측압을 가하고 공시체의 상하단에 연직하중을 가하여 각각 상이한 세 주응력을 측정할 수 있는 장치로서 본 연구에서 사용한 시험장치는 이미 국내외에서 여러번 소개된 적이 있으며^(1, 10, 12) 본 논문에서는 이를 간략히 요약하여 정리하고자 한다.

2.1 응력전달장치

중공원통형공시체를 이용한 비틀림전단시험

기는 공시체의 내측면과 외측면에 동일한 구속 압을 작용시킬 수 있으며 전단응력과 연직응력이 공시체의 상단부와 하단부를 통해 전달될 수 있다. 그림 1은 비틀림전단시험기의 전체적인 개략도 및 하중전달장치를 소개하고 있다. 하중을 작용시킬 수 있는 재하장치는 그림에서 보는 바와 같이 바닥판 아래에 설치되어 있으며 연직하중 및 Torque는 바닥판의 구멍을 통해 중공원통형공시체의 내측 Chamber의 중앙을 지나 Cap plate로 연결된 중앙축(center shaft)를 통하여 Cap plate에 전달되고 이 힘은 Cap plate하부에 부착된 Cap ring을 통하여 공시체에 전달된다. 이러한 하중을 중앙축에 전달시키기 위한 연직하중장치는 압축과 인장을 가할 수 있는 두개의 유압실린더로 되어 있으며 Torque 전달장치는 그림에서와 같이 중앙축을 시계방향과 반시계방향으로 회전시킬 수 있는 4개의 유압실린더로 형성되어 있다. 그리고 이들 연직하중과 Torque는 각각 독립적으로 작용시킬 수 있게 하였으며 응력제어와 변형제어 모두가 가능하게 설계되어 있다.

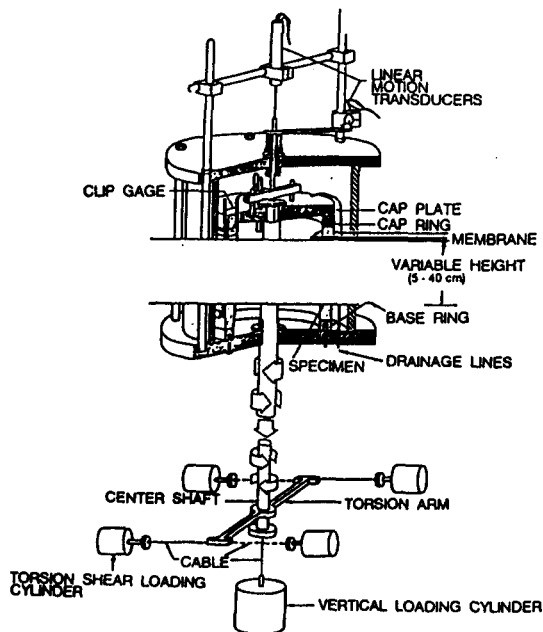


그림 1 Torsion shear apparatus

2.2 공시체 제작

그림 2는 비틀림전단시험기와 공시체의 입면도를 나타낸 것으로 중공원통형 공시체의 상부와 하부는 Cap ring과 Base ring이 위치하고 있으며 양측면은 Membrane에 둘러싸여져 있다. 본 연구에서 사용된 공시체는 내경이 18cm이며 외경은 22cm로서 공시체의 두께가 2cm이고 공시체의 높이는 40cm이다. 공시체를 둘러 싸고 있는 Membrane은 U자 모양의 하나로 이루어진 고무주머니로서 그 두께는 약 0.028cm에서 0.03cm이며, 본 시험의 공시체를 만들기 위해서는 Base ring을 Membrane의 내부 밑바닥에 둔다. 이때 Base ring은 Torque 작용시 공시체에 마찰력을 전달하기 위해 에폭시를 이용한 모래가 부착되어 있으며 이것은 3개의 나사에 의해 바닥판에 고정시켜지고 배수

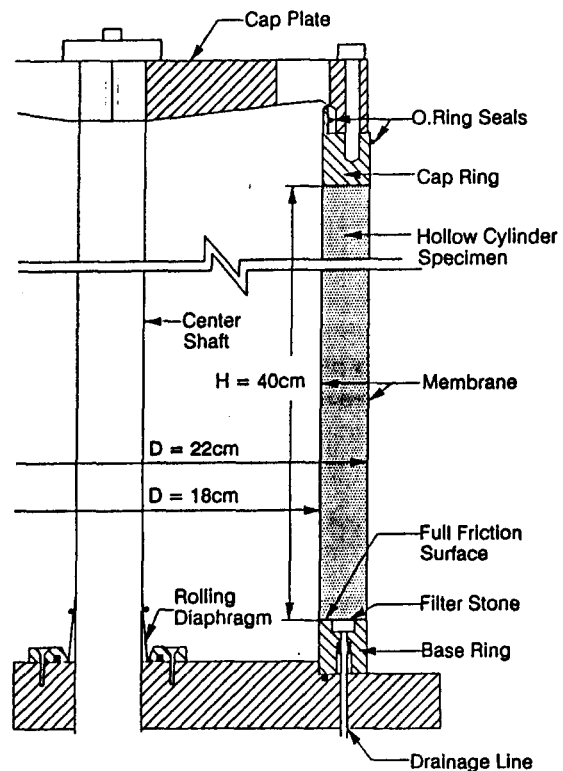


그림 2 Cross section of hollow cylinder specimen and apparatus

선이 연결된다. Membrane과 Base ring이 바닥판에 고정되면 Membrane 내측과 외측에 Forming jacket을 설치한다. Forming jacket은 두께 2cm의 중공원통형 공시체를 만들기 위한 형틀로서 내부와 외부의 두개로 구분할 수 있다. 내부 Forming jacket은 두께가 얇은 알루미늄 관으로 되어 있으며, 외부 Forming jacket은 일반적인 진공 Jacket으로 두조각으로 이루어져 있다. 내부와 외부 Forming jacket을 바닥판 위에 설치하고 진공을 가하여 Membrane을 고정시킨 후, 소정의 상대밀도를 가지는 공시체를 만들기 위해 모래를 길이 1m, 직경 1cm의 튜브관을 통해 자유낙하시켜 공시체를 제작한다. 이때 튜브관의 아래쪽 끝은 간격 2.5mm의 그물을 설치하여 낙하속도를 조절하였고 상단부는 깔대기를 부착하였으며, 튜브 아래쪽 끝으로 부터 낙하지점까지의 거리를 15cm로 일정하게 유지하여 건조한 모래를 Membrane 내부에 주입시킨다. 필요한 양의 모래를 튜브관을 통해 주입시키면 모래는 공시체가 필요로 하는 높이보다 약간 높게 퇴적되고 여기에 공시체의 상단부에 마찰력을 작용시키기 위한 에폭시가 부착된 Cap ring을 설치한다. 그리고 우레탄 망치를 이용하여 외부 Forming jacket과 Cap ring을 가볍게 두드려 필요한 만큼의 높이를 만들어 소정의 상대밀도를 가지는 공시체를 제작한다. 공시체가 제작되면 Cap ring을 배수선에 연결시키고 진공을 0.5kg/cm² 가하여 공시체를 고정시키고 동시에 공기누출탐색을 위한 Bubble chamber를 통해 Membrane의 공기누출여부를 확인한다. 만일 공기누출이 탐지된다면 포밍자켓을 제거한후, 공시체에서의 공기누출이 보수될 때까지 Latex를 Membrane에 칠한다. 공기누출이 완전히 방지된 것으로 확인되면 Cap ring 상부에 Cap plate를 중앙축과 연결하여 설치한 후 직경 27.9cm, 높이 53.3cm의 삼축셀을 바닥판 위에 놓고 Cap을 그위에 설치한 후 직경 1.27cm, 길이 57cm인 여섯개의 긴나사를 이용하여 이들을 고정시킨다. 이러한 모든 작업이 끝나면 Chamber는 물로 채워지고 Cell pressure를 0.

5kg/cm² 작용시킨후 진공을 제거시킨다.

공시체를 완전히 물로 포화시키기 위해서 우선 CO₂가스를 배수선 저부로 부터 주입한다. 이산화탄소 가스는 공기보다 무거워 이를 공시체에 주입시 공시체 내부의 공기를 위로 밀어 내어 상부배수선을 통해 공기를 밖으로 추출할 수 있으며 공시체를 물로 포화시킬시 공시체가 완전히 포화가 안되었을 경우에도 CO₂ 가스의 압축성이 물과 비슷해 하중작용시 흠의 거동을 정확하게 하고 배수시험시에는 체적변형량 측정에 유리한 이점이 있다. CO₂가스를 약15분 정도 주입한 후 공기가 제거된 물을 공시체에 주입하여 공시체를 포화시키고 시험을 실시한다.

2.3 내부 압축실의 체적변형량 측정

공시체의 측방변형과 두께의 변형을 측정하기 위하여 이전의 연구^(12~14)에서는 Clip gage를 사용하여 왔다. 그러나 Clip gage는 설치하기가 불편하고, 비록 설치하여도 측정위치가 제한되어 이 값을 측방변형과 두께의 변형량을 대표하는 대표값으로 사용하기에는 어려움이 많았다. 따라서 본 실험에서는 내부압축실의 체적변형량을 측정하고 공시체의 체적변형량과 연직변형량을 이용하여 그림 3에서 보는 바와같이 측방변형량과 두께 변형량의 평균값을 유도하여 그 대표값으로 사용하였다.⁽¹⁵⁾

우선 내부 압축실의 체적변형량을 ΔC라 하면

$$\Delta C = \left(\frac{\pi}{4} D_i^2 - \frac{\pi}{4} d^2 \right) H_0 - \left(\frac{\pi}{4} (D_i + \Delta D_i)^2 - \frac{\pi}{4} d^2 \right) (H_0 - \Delta H) \quad (1)$$

ΔC : 내부압축실의 체적변형량, 체적감소를 양으로 한다.

D_i : 공시체의 내경

H₀ : 공시체의 높이

d : 중심축의 직경

ΔD_i : 공시체의 내경의 변형량

ΔH : 공시체 높이의 변형량

식(1)로부터 ΔD_i 를 구하면

$$\Delta D_i = \sqrt{D_i^2 + \frac{(D_i^2 - d^2)\Delta H - \frac{4}{\pi}\Delta C}{H_0 - \Delta H}} - D_i \quad (2)$$

또한, 식(1)과 (2)에서와 같이 공시체의 외경의 변형량을 구하면

$$\Delta D_0 = \sqrt{D_0^2 + \frac{(D_0^2 - d^2)\Delta H - \frac{4}{\pi}(\Delta C + \Delta V)}{H_0 - \Delta H}} - D_0 \quad (3)$$

D_0 : 공시체의 외경

ΔD_0 : 공시체외경의 변형량

ΔV : 공시체의 체적 변형량

상기식들로 부터 공시체 두께의 변형량 Δt 를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta t = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{D_0^2 + \frac{(D_0^2 - d^2)\Delta H - \frac{4}{\pi}(\Delta C + \Delta V)}{H_0 - \Delta H}} - \sqrt{D_i^2 + \frac{(D_i^2 - d^2)\Delta H - \frac{4}{\pi}\Delta C}{H_0 - \Delta H}} - 2t \right\} \quad (4)$$

따라서 각 방향에 대한 변형률은 다음과 같이 구하여 진다.

$$\varepsilon_r = -\frac{\Delta t}{t} \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\Delta D_a}{D_{a(i)}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0 - \Delta H} \quad (7)$$

여기서, $\Delta D_a = \frac{1}{2}(\Delta D_o + \Delta D_i)$ 그리고 $D_{a(i)} = 20\text{cm}$ 이다. 상기 식들로 부터 공시체의 측방변형과 두께의 변화를 구할 수 있다.

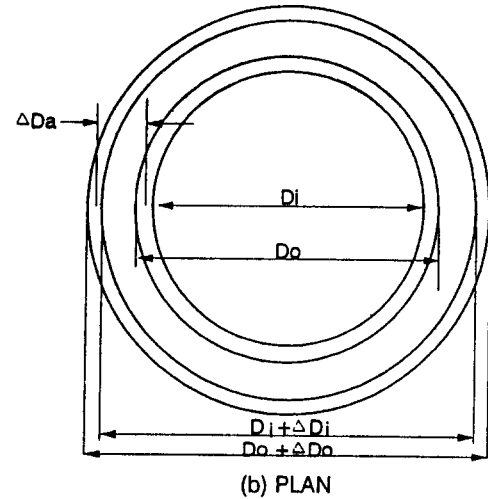
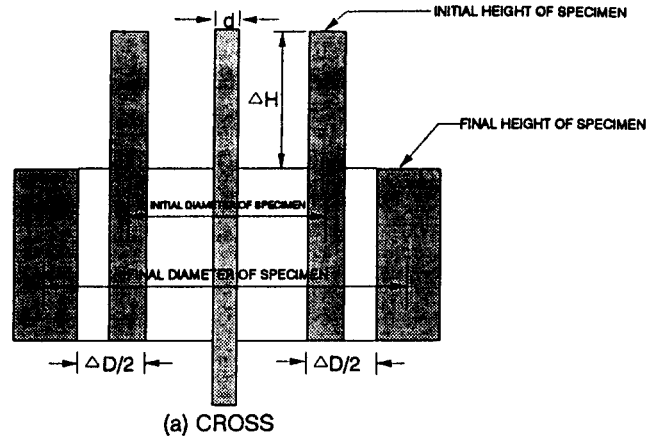


그림 3 View of specimen before and after shearing

3. 사용시료 및 시험계획

3.1 시료의 물리적 특성

본 연구에 사용된 시료는 미국 California에 위치하는 Santa Monica 해변의 모래를 사용하였으며, 사용하기전 물로 씻어 모래 중에 포함되어 있는 염분과 불순물을 제거하고 입자의 분포를 균등하게 하기 위해 40번 체를 통과하는 것을 대상 모래시료로 결정하였다. 한편 이 모래의 광물구성을 살펴보면 표. 1에서 보는 바와 같이 석영과 장석이 각각 약 45%씩 차지

하여 흙구성의 주류를 이루고 있으며 자철광이 약 8%, 그리고 잔여광물 2% 정도로 구성되어 있다. 또한 표. 1에서와 같이 균등계수는 1.58, D_{30} 은 0.265mm이고 비중은 2.659이며 최대간극비는 0.91, 최소간극비는 0.58이다. 그리고 본 실험은 Medium dense sand에 관해 실시하였으며 이를 위해 간극비가 0.68인 상대밀도 70%의 공시체를 2.2절에서 설명한 방법에 의거하여 제작하였다.

표 1 사용된 모래의 물리적 특성

광물구성	석영	45.0 %
	장석	45.0 %
	자철광	8.0 %
	잔여광물	2.0 %
체분석	D_{10}	0.18
	D_{60}	0.28
	$Cu = D_{60} / D_{10}$	1.58
	D_{30}	0.265
비중 (Gs)		2.659
최대전조밀도 (g/cm^3)		1.653
최소전조밀도 (g/cm^3)		1.392
최대간극비 (e_{max})		0.91
최소간극비 (e_{min})		0.58

3.2 시험 계획

모래의 주응력방향 회전시 응력-변형률 거동을 고찰하기 위하여, 10회의 비틀림전단시험을 배수상태로 실시하였다. 그리고 각시험은 Cell pressure를 $4kg/cm^2$ 로 하고 Back pressure를 $2kg/cm^2$ 로 하여 구속압 σ_r 를 $2kg/cm^2$ 로 하였다. 한편 여기서 사용된 좌표계는 그림 4(a)에서와 같이 연직응력을 σ_z 로 하고 공시체의 연직면에 수직으로 작용하는 수평응력을 σ_r 로 하며 공시체의 원주방향으로 작용하는 힘을 σ_θ 로 하는 원통형 좌표계를 사용하였다.

우선 일반삼축시험에서와 똑같이 중공원통형공시체에 전단력은 작용시키지 않고 그림 5(a)에서와 같이 단지 연직압축하중만을 작용

시킨 삼축압축시험을 실시하고 이를 No.1로 하였다. 그리고 No.2는 그림 6(a)에서와 같이 공시체에 전단력은 작용시키지 않고 단지 연직신장하중만을 작용시켜 삼축신장시험을 실시하였다. 한편 No.1의 시험결과로부터 K_0 상태를 고려하여 그림 7(a)에서와 같이 연직하중을 K_0 위치까지 작용시킨 후 전단력을 시계방향으로 작용시켜 이를 No.3이라 하였다. No.4는 그림 11(a)에서와 같이 연직하중은 작용시키지 않고 단지 전단력만 작용시킨 경우이며, No.5는 최초 수직하중에 신장력을 작용시킨 후 전단력을 시계방향으로 작용시킨 경우로 그림 8(a)에 그 응력경로를 나타내었다.

No.6과 No.7은 전단력을 먼저 작용시킨 후 연직하중을 작용시킨 경우로서 No.6은 연직하중을 압축축으로 먼저 작용시킨 후 다시 이를 인장축으로 작용시킨 경우이고 No.7은 단지

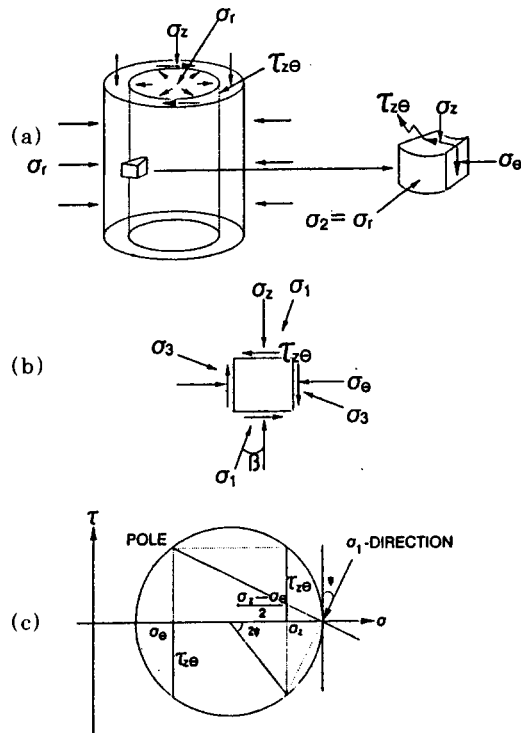


그림 4 Stress components in cartesian coordinate system for hollow cylinder specimen

표 2 시험계획

Test No.	Torque의 작용방향		파괴시 b $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$	비고
	시계방향	반시계방향		
No. 1			0.00	
No. 2			1.00	
No. 3	X		0.15	
No. 4	X		0.49	
No. 5	X		0.77	
No. 6	X		0.65	
No. 7	X		0.88	
No. 8	X		0.26	
No. 9	X	X	0.28	
No.10	X	X	0.11	

인장축으로만 작용시킨 경우로 응력경로는 그림 12(a)에 있다. 그리고 No.8은 연직하중을 먼저 2kg/cm^2 까지 작용시킨후 전단력을 시계방향으로 작용시킨 경우이다.

No.9은 연직하중과 전단력을 동시에 작용시켰으며 전단력의 작용방향도 시계방향과 반시계방향 모두 작용시킨 경우이고, No.10은 연직하중과 전단력을 각기 분리하여 작용시켰으며 연직하중을 조금씩 증가시키며 전단력을 시계방향과 반시계방향으로 반복하여 작용시킨 시험이다. 이상의 10회에 대한 비틀림전단시험을 표. 2에 나타내었다.

4. 응력-변형률 거동

4.1 삼축압축거동

본 절은 표. 2에 있는 10회의 시험들 중 삼축압축시험에 해당하는 No.1의 응력경로와 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 비틀림평면에 응력경로를 나타낸 그림 5(a)에서 타원형의 실선은 Lade의 파괴규준을 이용하여 I_1/I_3 이 62.5 일때의 파괴면을 도시한 것이다. 여기서 I_1 과 I_3 는 각각 응력의 제1불변량과 제3불변량이다. 그리고 흰원은 No.1시험의 응력경로를 나타낸 것으로 앞에서 설명한바와 같이 세로축을 설명하

는 전단응력은 변화가 발생하지 않고 단지 연직축차응력을 나타낸 가로축을 따라 하중이 증가하는 삼축압축시험에 대한 비틀림평면에서의 응력경로를 나타내고 있다. 한편 검은 원은 시험시 발생한 파괴가 발생한 위치를 나타낸 것으로 파괴는 실선으로 나타낸 파괴면 바깥에서 발생하고 있다.

그림 (b)는 연직축차응력과 체적변형률을 축변형률에 관해 도시한 것으로 가로축은 축변형률을 나타낸 것이고 원편의 세로축은 연직축차응력을 나타내었으며 오른쪽의 세로축은 체적변형률을 나타낸 것이다. 그림에서 파괴는 축변형률 약 2.2%에서 발생하고 있으며 체적변형은 최초 체적압축현상을 보이다 축변형률 약 0.7%부터 체적팽창현상을 보이고 있다.

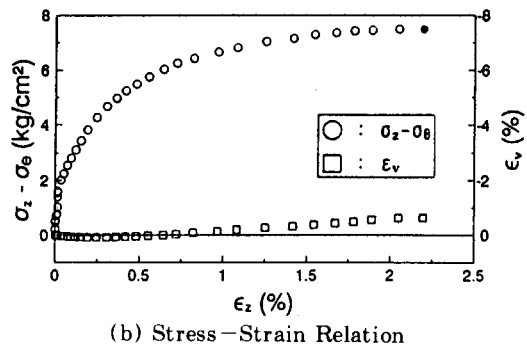
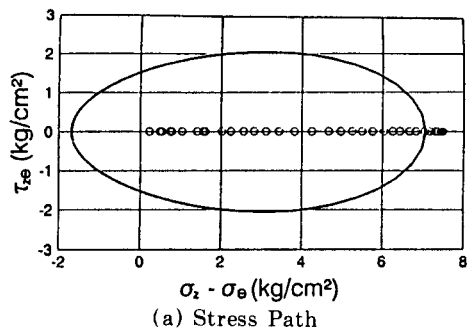


그림 5 The results of torsion shear test for No.1

4.2 삼축인장거동

그림 6은 삼축인장시험에 해당하는 No.2의

시험결과를 도시한 것이다. 응력경로를 나타낸 그림(a)에서 흰원은 가로축을 따라 음의 방향으로 진행하고 있으며 파괴는 실선으로 나타낸 파괴면 조금 못미처서 발생하고 있다. 그림(b)의 응력변형률 관계에서 연직신장하중을 나타내는 축차응력은 약 -1.53kg/cm^2 에서 파괴가 발생하였으며 이때의 축변형률은 약 -3.8% 이었다. 체적변형률은 하중작용의 초기에는 압축의 경향을 보이다 축변형률 -2.8% 에서 부터 체적팽창현상을 보이고 있다.

4.3 Ko 압축후 전단거동

그림 7은 No.3의 응력경로와 응력변형률관계 등 각각의 시험을 4개의 그림으로 분류하여 나타낸 것이다. 그림 (a)는 가로축이 축차응력 ($\sigma_z - \sigma_\theta$)이고 세로축이 전단응력 $\tau_{z\theta}$ 인 Torsion 평면에 응력경로를 나타낸 것으로 여기서는 연직하중을 Ko상태 까지 가한 상태에서 Torque를 시계방향으로 가하여 실험을 실시하였다. 그림(a)에서 흰원은 No.3시험의 응력경로를 나타낸 것이며 검은 원은 시험시 파괴가 발생한 위치를 나타낸것으로 파괴는 이론식에 의해 제안된 파괴면과 거의 일치하고 있다. 그림(b)는 연직축차응력과 체적변형률을 축변형률에 관해 도시한 것으로 가로축은 축변형률을 나타낸 것이고 왼편의 세로축은 연직축차응력을 나타내었으며 오른편의 세로축은 체적변형률을 나타낸 것이다. 그림에서 축차응력은 축변형률이 약 0.3%인 지점까지는 계속 증가하여 축차응력이 약 3.9kg/cm^2 지점에 도달하고 그 이후는 축차응력이 감소의 경향을 미세하게 보이며 일정하게 유지되고 있다. 그러나 축변형률은 축차응력이 일정하게 유지되고 있어도 계속 발생하여 공시체의 파괴는 그림에서 검은 원으로 표시한 축변형률이 약 1.25%인 지점에서 발생하고 있다. 그리고 체적변형량은 축변형률 0.75%까지는 압축변형을 나타내다 그 이후로 체적팽창현상을 보이고 있다.

한편 그림 (c)는 전단응력을 공학적 전단변

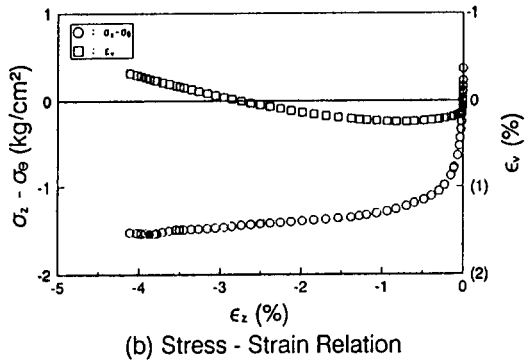
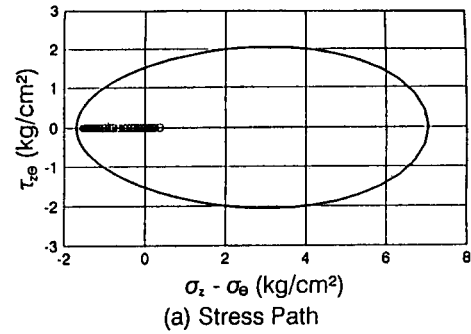


그림 6 The results of torsion shear test for No.2

형률 $\gamma_{z\theta}$ 에 관해 도시한 것으로 전단응력은 전단변형률이 증가함에 따라 증가하다 파괴를 나타낸 검은 원 이후 조금씩 감소하고 있음을 볼 수 있다.

그림 (d)는 공학적 전단변형률 $\gamma_{z\theta}$ 에 대한 축변형률, 수평변형률 및 체적변형률의 관계를 도시한 것으로 그림에서 흰삼각형은 축변형률 ϵ_z 을 나타낸 것이며 흰 삼각형은 원주방향변형률 ϵ_θ 를, 흰원은 반경방향 변형률 ϵ_r 을 나타낸 것이다. 그리고 검은 삼각형은 체적변형률을 나타낸다. 여기서 축변형률은 전단변형과 더불어 압축변형이 증가되고 있으며 체적변형량은 처음에는 압축변형을 조금 보이다 곧 체적팽창을 보이고 있고 ϵ_r 과 ϵ_θ 도 인장변형이 발생하고 있음을 볼 수 있다.

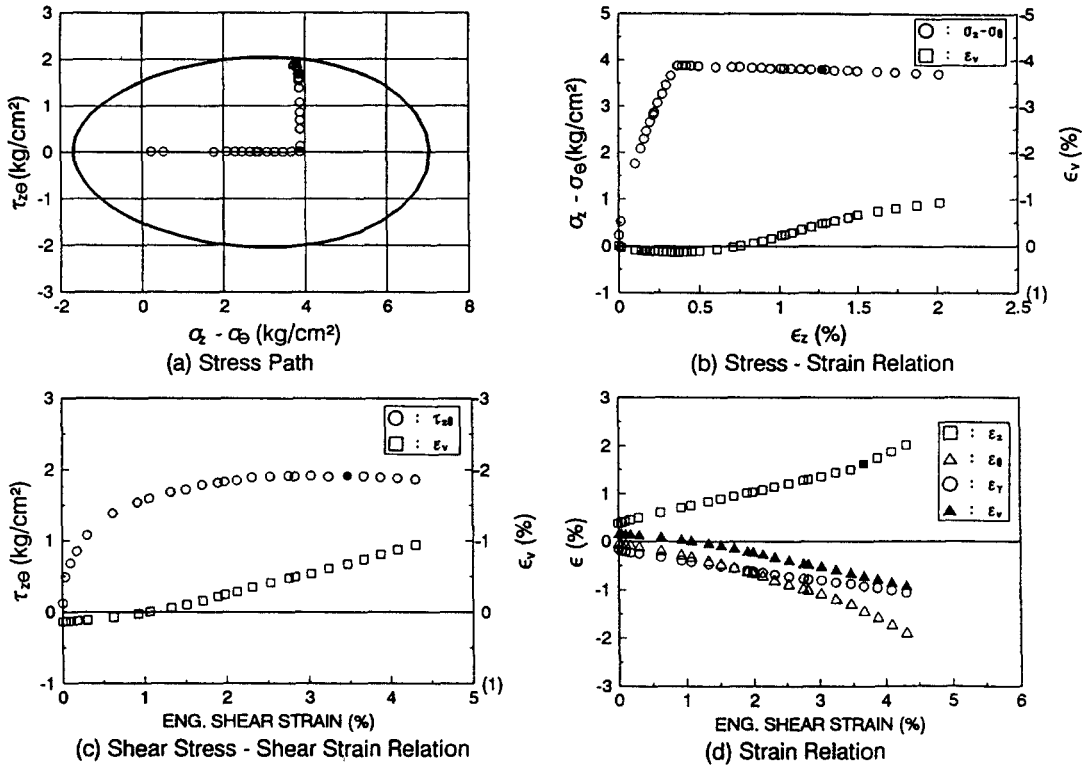


그림 7 The results of torsion shear test for No.3

4.4 삼축신장후 전단 거동

그림 8은 No.5의 시험결과를 도시한 것으로 응력경로는 최초 연직하중을 축차응력이 약 -1kg/cm^2 정도 까지 삼축신장에 해당하는 하중을 작용시킨 후 Torque를 시계방향으로 작용시킨 시험이다. 여기서도 파괴를 나타낸 검은 원은 Lade의 파괴면과 일치하는 경향을 보이고 있다.

그림 (b)의 축변형률에 대한 축차응력은 축변형률이 약 0.3%까지 축차응력이 인장축으로 증가하다 축차응력이 약 -1kg/cm^2 지점 부터는 약간 감소하는듯 하면서 일정하게 유지되고 있다. 그러나 축차응력이 일정하게 유지되어도 축변형률은 인장축으로 계속 발생하고 있으며 파괴를 나타낸 검은 원은 축변형률이 약 -2.25% 인 지점에서 나타나고 있다. 이것은 No.3의 시험

결과를 도시한 그림 7(b)에서와 같은 현상이라 할 수 있다. No.3에서는 전단응력이 작용되는 동안 선행하중인 연직압축응력에 의해 축변형률이 계속 압축축으로 발생하였으며 그림 8(b)에서는 전단응력이 작용되는 동안 선행하중인 인장응력에 의해 축변형률이 인장축으로 많이 발생하고 있다. 즉 이것은 하중결합효과(Coupling effect)에 의한 영향으로서 점토에 관한 연구에서도 찾아 볼 수 있었다. 체적변형률은 연직하중이 가해짐과 동시에 약간의 팽창 경향을 보이다 체적압축경향으로 바뀌고 이것은 다시 체적팽창으로 변하여 연직하중이 작용하지 않아도 전단력의 영향에 의해 다ierer탄시현상을 보이고 있다. 그림(c)의 공학적 전단변형률에 대한 전단응력의 관계에서는 최초 전단변형은 전단응력이 작용하여도 변형이 늦게 발생하고 있으며 전단변형이 발생한 이후 발생속도는

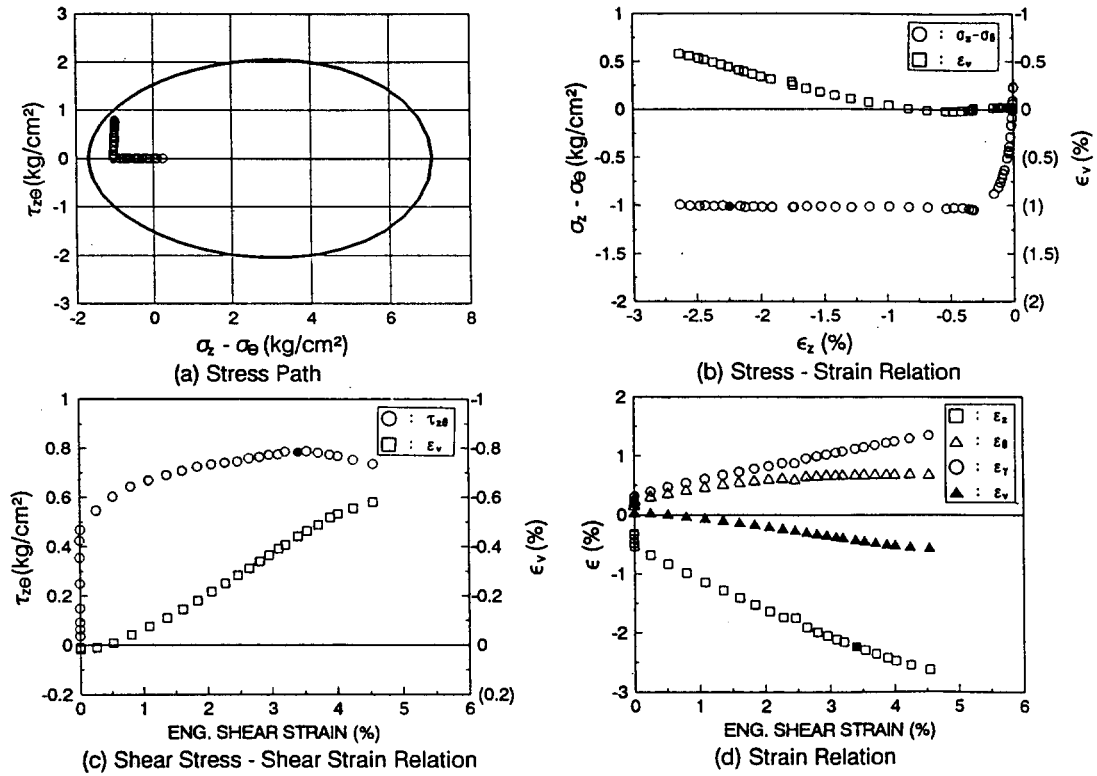


그림 8 The results of torsion shear test for No.5

급속히 이루어지고 있어 이는 완전 소성체의 거동에서와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그림 (d)의 변형률 관계도에서는 축변형률과 체적 변형률은 인장거동을 보이고 있으나 공시체의 원주방향과 반경방향의 변형은 압축거동을 보이고 있다.

4.5 복합하중시 거동

그림 9는 No.9의 시험결과로 그림(a)의 응력 경로는 우선 전단력을 작용시킨 후 연직하중을 증가시키며 동시에 전단력에 대해선 Unloading을 실시하였으며 연직응력이 약 5.5kg/cm^2 인 지점에서 부터 연직하중을 고정시키고 전단력에 대해 Reloading을 실시하였다. 그리고 다시 연직하중에 대한 Unloading을 실시하며 Torque를 반시계방향으로 작용시켰다. 여기서도 파괴

를 나타낸 검은 원은 파괴면을 나타낸 실선과 일치하는 경향을 보이고 있다.

축변형률에 대한 축차응력의 관계를 나타낸 그림(b)에서는 하중이 작용된 초기, 축차응력이 약 2.5kg/cm^2 까지는 축변형률의 변화가 거의 발생하지 않는 것으로 나타나고 있다. 이 결과는 응력경로 초기에 작용된 선행전단응력이 연직응력의 증가에 의한 축변형률 거동에 많은 영향을 미치는 것으로 추측할 수 있다. 한편 연직하중의 증가에 따라 축변형률은 계속 증가하고 있으며 축변형률 0.5%인 지점에서 부터는 연직하중은 더 이상 증가하지 않고 있으나 전단응력에 의해 축변형률은 계속 증가하는 추세를 보이고 있다. 그리고 연직축차응력이 감소하여도 축변형률은 감소하지 않고 일정한 상태로 유지되고 있으며 축변형률 약 1.7%에서 파괴가 발생하는 것으로 나타나고 있다.

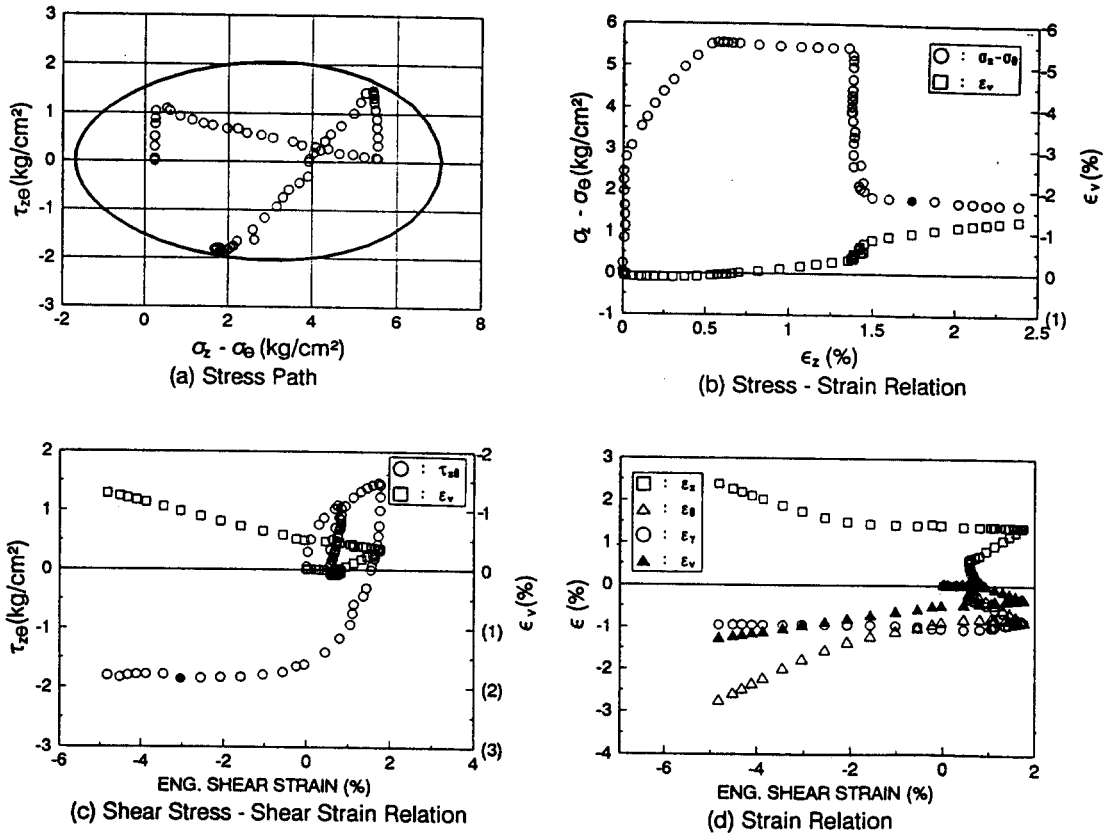


그림 9 The results of torsion shear test for No.9

이러한 현상도 하중결합효과의 영향이라고 볼 수 있다. 축변형률에 대한 체적변형률은 축변형률이 0.6%인 지점 이후에서 체적팽창경향을 보이며 축변형률이 약 1.3%인 지점에서는 축차응력은 감소하고 있으나 전단응력에 의해 계속 체적팽창현상이 발생하고 있다.

그림(c)의 공학적 전단변형률에 대한 전단응력의 거동에서 전단응력이 Loading과 Unloading에 의해 반복경로를 보이다 반시계방향의 전단력에 의해 음의 전단변형률을 보이며 전단변형률 -3% 지점에서 파괴가 발생하고 있음을 볼 수 있다.

그림(d)에서는 공학적 전단변형률의 변화에 따라 축변형률은 압축변형을 보이고 있으나 나머지 체적변형률과 수평변형률들은 인장변형을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

5. 주응력축회전

중공원통형공시체에 작용하는 응력을 원통 좌표로 표시한 것이 그림4(a)이다. 이 그림중의 한 요소에 작용하는 응력성분을 검토하여 보면, 수직응력으로는 σ_z , σ_r 및 σ_θ 가 작용하고 전단응력으로는 τ_{zr} (= τ_{rz})가 작용한다. 만약 전단응력이 작용하지 않으면 수직응력 σ_z , σ_r 및 σ_θ 는 그대로 주응력이 된다. 그러나, 전단응력이 작용할 경우는 주응력의 방향과 크기가 변하게 된다. 이 수직응력과 전단응력으로 Mohr의 응력도를 그려보면 그림4(c)와 같이 된다. 따라서 최대주응력 σ_1 및 최소주응력 σ_3 는 식(8)에 의하여 산출될 수 있다.

$$\sigma_1, \sigma_3 = \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_\theta) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad (8)$$

중간주응력 σ_2 는 그림 4(b)의 요소도에서 보는 바와 같이 σ_1 이 작용하는 면에서 전단응력이 작용하지 않고 구속압만 작용하므로 구속압 σ_1 이 곧 σ_2 가 된다.

최대주응력 σ_1 의 작용방향 Ψ 는 Mohr 응력도의 기하학적 특성으로부터 식(9)와 같이 구하여지며 그림 4(c)와 같이 표시된다. 따라서 주응력 σ_1 의 방향은 전단응력의 작용에 의하여 연직축으로부터 Ψ 만큼 회전하게 된다.

$$\tan 2\Psi = \frac{2 \cdot \tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (9)$$

Test No. 3, No.4, No.5, No.9, No.10의 시험 결과에 대하여 변형률과 주응력축회전각의 관계를 도시하면 그림 10(a)(b)(c)와 같다. 그림 10(a)는 No.3, No.4 및 No.5의 결과를 도시한 것으로 환원으로 나타낸 No.3은 그림 11(a)의 응력경로에서 보는 바와 같이 연직하중을 압축축으로 가한 후 전단력을 시계방향으로 작용시킨 경우로 주응력축이 연직축과 이루는 각도는 전단변형률이 증가함에 따라 서서히 증가하다 약 22°에서 일정하게 유지되고 있다. 등방압축 후 연직하중은 가하지 않고 단지 전단력만 작용시킨 No.4의 주응력축방향은 약 45°지점에서 일정하게 유지되고 있다. 한편 연직하중에 신장력을 가한 후 전단력을 시계방향으로 가한 No.5는 최초 전단력이 가해지기전 연직신장력에 의해서는 주응력의 방향이 수평방향이어서 연직축과 90°를 이루고 있으며 전단력이 가해짐에 따라 그 방향이 조금씩 감소하여 연직축 σ_2 과 약 65°정도를 유지하는 것으로 나타나고 있다.

No.9의 결과를 도시한 그림(b)에서는 주응력축방향이 전단력의 Loading과 Unloading에 따라 변화함을 보이고 있으며 연직하중의 크기가 증가함에 따라 주응력의 방향은 연직축으로 접근하고 전단력이 증가하면 연직축에서 멀어져감을 알 수 있다. 그리고 Torque의 방향을 반시계방향으로 작용하였을 때는 주응력의 방향

을 나타내는 Ψ 가 음의 값을 가지는 것으로 나

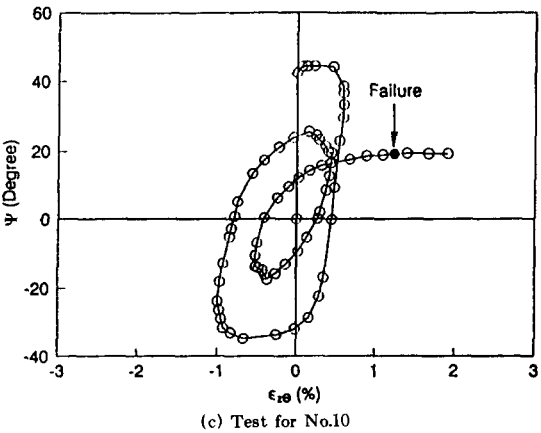
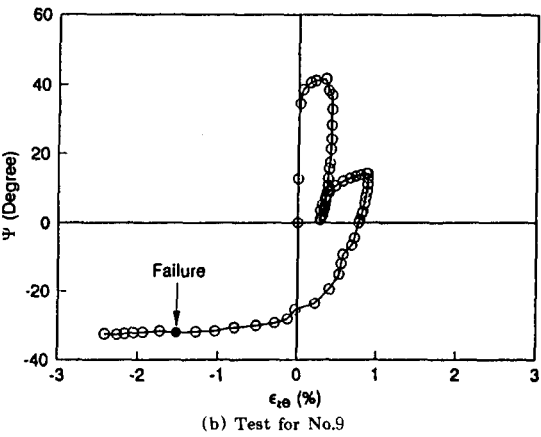
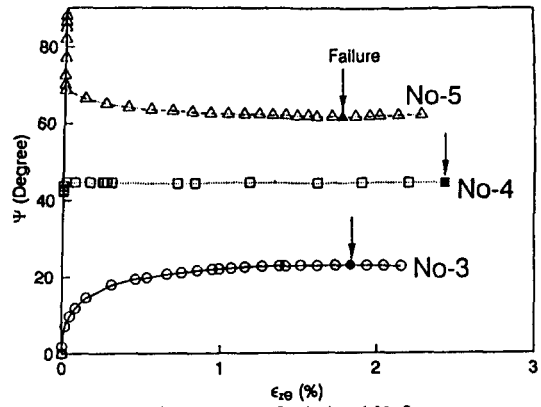


그림 10 Relation between shear strain ($\epsilon_{z\theta}$) and direction of principal stress axis

타나고 있다. 이상의 그림(a)와 (b)의 검토로부터 주응력축의 방향은 연직압축하중만을 작용시켰을 경우는 연직축과 일치하게 되고 전단력이 증가하고 연직압축하중이 감소하여 감에 따라 주응력축의 방향이 연직축에서 멀어지게 된다. 그리고 연직하중이 작용되지 않고 단지 전단력만 작용하였을 때는 연직축과 45°의 기울기를 이루며 주응력이 작용하고 연직하중에 신장력이 작용하였을 경우 회전각은 계속 증가하여 삼축신장시험에서는 연직축과 90°를 이루게 된다. 그리고 전단력이 반시계방향으로 작용하였을 때는 주응력축의 방향이 연직축을 기준으로 왼쪽으로 회전하여 Ψ 가 음의 값을 갖는 것으로 나타나고 있다.

그림 (c)는 No.10의 결과를 도시한 것으로 그림 13(a)의 응력경로에서 보는 바와 같이 최초 전단력만 작용하였을 때는 주응력방향이 연직축과 약 45°를 이루는 것으로 나타나고 있으나 연직하중의 작용에 의해 Ψ 가 조금 감소하고 전단력의 방향이 반시계방향으로 변화함에 따라 Ψ 가 감소하여 약 -34°까지 감소함을 볼 수 있다. 그리고 연직하중의 증가에 의해 Ψ 가 양의 방향으로 조금 변한 후 전단력을 시계방향으로 작용함에 따라 Ψ 도 양의 방향으로 변하고 있으며 전단력의 작용방향이 반복됨에 따라 Ψ 도 양의 방향과 음의 방향으로 반복하여 나타나고 있다. 그리고 전단력의 작용방향에 따라 연직축을 기준으로 주응력축의 좌우 회전을 나타내는 Ψ 는 그 절대치가 전단력의 방향에 관계없이 연직하중이 증가함에 따라 조금씩 감소하고 있음을 볼 수 있다.

6. 하중결합효과

그림 11은 연직하중과 전단력의 하중결합효과를 고려하기 위해 이들 하중을 각각 구분하여 작용시킨 No.3, No.4 및 No.5의 시험결과를 연직축차변형률과 전단변형률의 관계로 도시한 것이다. 여기서 그림(a)는 이들 시험의 응력경로를 Torsion 평면에 나타낸 것으로 No.3

은 연직축차응력을 압축축으로 작용한 후 Torque를 시계방향으로 작용시킨 것으로 그림에서 사각형으로 도시하였다. 그리고 No.4는 연직하중을 작용시키지 않고 단지 Torque만 시계방향으로 작용시켜 원으로 도시하였으며, No.5는 연직축차응력을 인장축으로 작용시킨 후 Torque를 시계방향으로 작용시켰으며 삼각형으로 나타내었다. 한편 각 응력경로에서 파괴를 나타낸 검은색 사각형 및 삼각형과 원은 모두 실선으로 나타낸 파괴면과 좋은 일치를 보이고 있다.

그림(b)는 수직변형률 ϵ_z 와 원주방향변형률 ϵ_{θ} 의 축차변형률을 가로축에 두고 전단변형률 ϵ_{21} 를 세로축에 두어 변형률 상호간의 관계를 정리한 그림이다. 여기서 No.3의 결과는 그림(a)에서와 같이 사각형으로 나타내었으며 연직하중에 의한 축차변형률이 약 0.25%까지 발생하고 있다. 그리고 연직하중이 고정인 상태에서 전단력에 의해 전단변형이 발생하고 있으며 동시에 축차변형률도 계속 압축축으로 발생하고 있다. 이는 그림 7, 8 및 9에서도 설명했던 바와 같이 하중결합효과(Coupling effect)에 의한 것으로 생각된다. 연직하중에 인장력을 작용시킨 No.5에서는 축차변형률이 인장축으로 약 0.4% 발생한 후 전단력에 의한 전단변형률이 발생하고 있으며 전단변형률 발생시 축차변형률도 인장축으로 동시에 발생하고 있다. 이도 역시 하중결합효과에 의한 것이라 생각된다. 이러한 하중결합효과는 연직하중은 가하지 않은 상태에서 전단력만 작용시켜 파괴를 유도한 No.4에서는 거의 발생하지 않고 있다.

한편 그림 11의 시험과는 반대로 전단력을 먼저 작용시킨 후 연직하중을 작용시킨 No.6과 No.7의 시험결과와 연직하중을 가하지 않고 전단력만 가한 No.4의 시험 결과를 그림 12에 도시하였다. 이들 시험의 응력경로를 나타낸 그림(a)에서 No.6의 경로는 전단력을 약 1kg/cm^2 작용시킨 후 연직하중을 압축축으로 작용시키고 이를 다시 역으로 거슬러 인장축으로 응력경로를 작용시켜 파괴를 발생시킨 것으

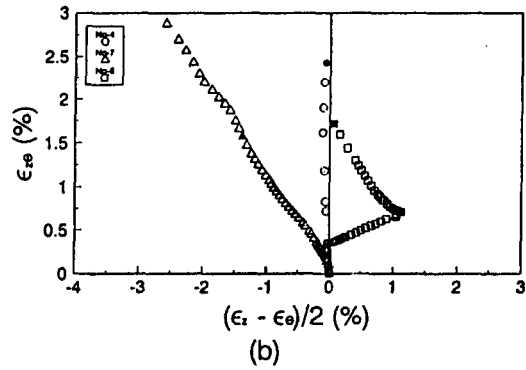
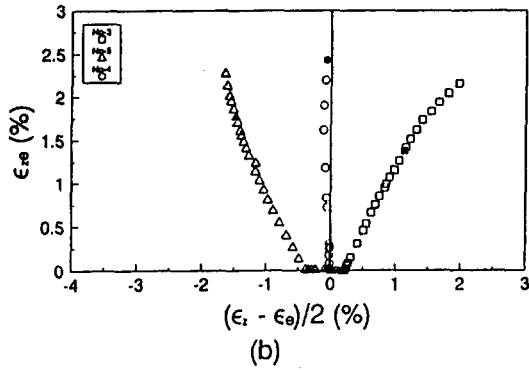
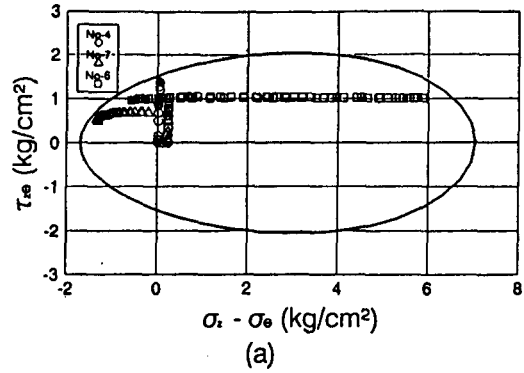
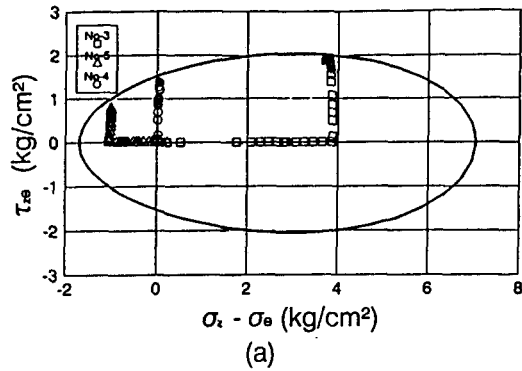


그림 11 Relations between normal strain differences and shear strains

그림 12 Relations between normal strain differences and shear strains

로 그림에서 이들 경로를 사각형으로 나타내었으며, No.7은 전단력을 약 0.8kg/cm^2 작용시킨 후 전단력을 인장축으로 작용시킨 것으로 삼각형으로 도시하였다. 그리고 No.4의 경로는 그림 11에서와 같이 원으로 나타내었다. 그림 (b)에서 사각형으로 표시한 No.6의 결과는 전단력에 의한 전단변형률이 약 0.5% 발생한 후 연직하중에 의한 축차변형률이 발생하고 있다. 여기서도 전단력이 일정하게 한 상태에서 연직하중만 증가시켰지만 축차변형률의 증가와 함께 전단변형률이 계속 발생하였으며 다시 연직하중의 Unloading에 의한 응력반전시에서도 축차변형률이 감소하고 있으나 전단변형률은 계속 증가하고 있음을 볼 수 있다. 한편 전단력을 가한 후 인장력을 가한 No.7에서는 최초의 전단력에 의해 전단변형률이 발생한 이래 연직인장하중에 의한 축차변형률과 전단변형률이

하중결합효과에 의해 동시에 발생하고 있음을 볼 수 있으며 전단변형률이 발생하는 비율도 압축을 작용시킨 No.6에 비해 훨씬 급하게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

그림 13은 Torque의 작용방향이 시계방향과 반시계방향 모두에 작용한 No.10과 단지 전단력만 작용시킨 No.4의 축차변형률과 전단변형률의 관계를 도시한 것이다. 여기서 그림 (a)에는 이들의 응력경로를 나타내었으며 변형률 사이의 관계를 도시한 그림 (b)에서는 앞의 그림 11과 12에서와 마찬가지로 하중결합효과를 쉽게 발견할 수 있다. 그러나 여기서는 전단변형률의 변화가 전단력의 작용방향이 시계방향으로 향하고 있을 때는 연직하중에 의한 하중조합효과도 시계방향으로 나고 전단력의 방향이 시계 방향일때는 연직하중에 의한 하중조합효과도 반시계방향으로 작용하고 있음을 볼 수

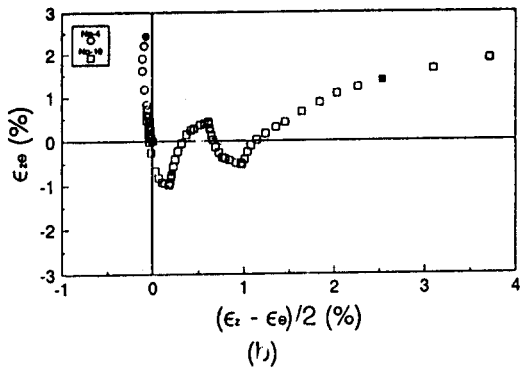
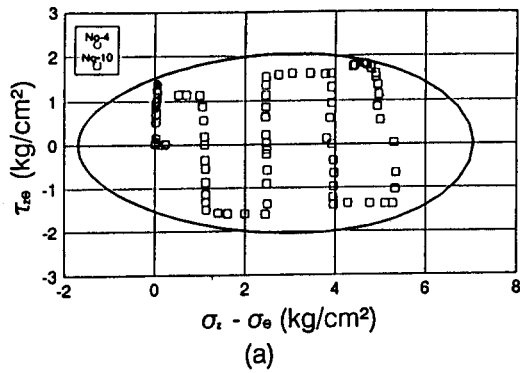


그림 13 Relations between normal strain differences and shear strains

있다.

이상으로 부터 연직하중이나 혹은 전단력이 고정인 상태에서 지금과는 다른 전단력이나 연직하중이 작용될시 하중결합효과에 의해 선행하중에 의한 변형이 계속 발생함을 알 수 있었다. 그리고 이 선행하중에 의한 변형도 연직하중고정시 전단력에 의한 연직변형은 선행하중이 압축일 시는 압축변형이 발생하고 선행하중이 인장일 시는 인장변형이 발생하며, 전단력이 고정인 상태에서 연직하중에 의한 전단변형의 하중결합효과는 선행하중인 전단력이 시계방향일시는 전단변형도 시계방향으로 발생하고 선행하중이 반시계방향일때는 전단변형도 반시계방향으로 발생하고 있다.

7. 축차주응력비

그림 14는 단지 연직하중만을 작용시킨 삼축

압축시험 No.1과 연직하중을 먼저 작용시킨 후 전단력을 시계방향으로 작용시켜 세주응력의 크기가 각기 다른 No.3과 No.8의 시험결과를 축변형률 ϵ_2 에 대한 주응력비 σ_1/σ_3 의 관계로 도시한 것이다. 그림에서 축차주응력비 $b (= (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3))$ 가 0인 삼축압축시험의 결과를 나타낸 흰원은 축변형률이 발생하기 시작한 초기에는 주응력비 σ_1/σ_3 의 증가가 급격히 이루어지다 축변형률이 증가함에 따라 주응력비의 증가율이 완만하게 변하고 있다. 그리고 파괴를 나타낸 검은 원은 축변형률 2.2%에서 파괴가 발생하고 있다.

사각형으로 표시한 No.3의 결과는 축변형률이 발생한 초기에는 주응력비 σ_1/σ_3 의 증가율이 삼축압축시험인 No.1에서 보다 완만한 것으로 나타나지만 축변형률 약 0.5%에서 부터 경사가 보다 급하게 변하고 파괴는 No.1에서 보다 감소한 약 1.5%에서 발생하고 있으며 이때의 b 는 0.13을 나타내고 있다. 한편 삼각형으로 나타낸 No.8은 주응력비 σ_1/σ_3 의 증가율이 아주 급하게 발생하고 있으며 파괴도 축변형률 약 0.25%에서 발생하고 있으며 이때의 b 는 0.26을 나타내고 있다. 따라서 비틀림전단시험에서는 파괴가 발생하는 축변형률의 위치가 축차주응력비 b 가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타나고 있다.

8. 결 론

중공원통형공시체를 가지는 비틀림전단시험기를 이용하여 Santa Monica 해변 모래에 대한 10회의 시험이 배수상태로 실시하여 응력-변형률관계를 검토하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 모래에 대한 중공원통형공시체의 제작방법이 설명되었으며 내부 압축실의 체적변화량을 측정함에 의해 Clip gage를 사용하지 않고 공시체의 축방변형과 두께의 변화를 측정할 수 있었다. 이는 삼축시험이나 입방체형삼축시험에서도 적용 가능한 실험결과의 정도를 보다 높일 수 있다.
- 2) 각 응력경로에 따른 비틀림전단시험에서

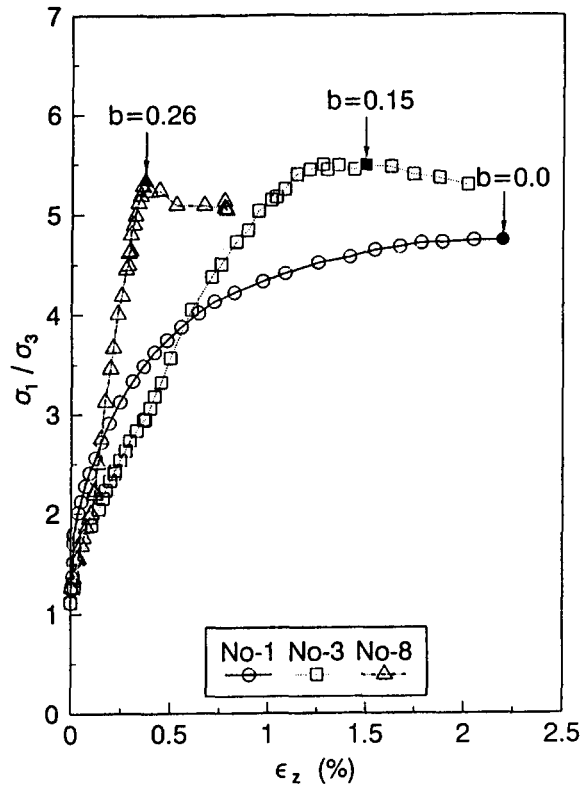


그림 14 Relations between stress ratio (σ_1/σ_3) and axial strain (ϵ_z)

- 의 주응력축 회전효과가 검토되었다. 여기서 주응력축은 연직하중이 증가하면 연직축으로 접근하고 전단력이 증가하면 연직축에서 멀어져 감을 볼 수 있었다.
- 3) 전단응력과 축차응력중 하나가 불변인 상태에서 실시된 시험에서 전단응력과 축변형률 사이, 혹은 축차응력과 전단응력사이에서 하중결합효과가 발생하고 있음을 알 수 있었으며 이는 선행하중에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.
 - 4) 축변형률에 대한 주응력비 σ_1/σ_3 의 관계에서 파괴가 발생하는 축변형률의 위치는 축차주응력비 $b(=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3))$ 가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

감사의 말씀

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 1993년도 한미국제공동연구의 일환으로 실험은 미국의 UCLA에서 수행된 결과이며 상기재단에 사의를 표하는 바이다. 아울러 여러가지 편의를 제공하여 준 UCLA 토목과 Poul V. Lade 교수에게도 감사를 드리는 바이다.

참고 문헌

1. Hight, D.W., Gens, A., and Symes, M. J. (1983), "The Development of a New Hollow Cylinder Apparatus for Investigating the Effects of Principal Stress Rotation in soils." *Geotechnique*, 33(4), 355-383.
2. Lade, P.V. (1975), "Torsion Shear Tests on Cohesionless Soil," *Proc. 5th Pan-American Conf. on Soil Mech. and found. Engng.*, Buenos Aires, Argentina, Vol. 1, pp.117-127.
3. Lade, P.V. (1976), "Interpretation of Torsion Shear Tests on Cohesionless Soil," *Proc., 2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Blacksburg, Virginia Vol 1, pp. 381-389.
4. Lade, P.V. (1981), "Torsion Shear Apparatus for Soil Testing," *Laboratory Shear Strength of Soil*, ASTM STP 740, R. N. Young and F.C. Townsend, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 145-163.
5. Ko, H.Y., and Soctt, R.F. (1976). "A New Soil Testing Apparatus," *Geotechnique*, Vol.17, No.1, pp. 40-57.
6. Lam, W.K. and Tatsuoka, F. (1988). "Effects of Initial Anisotropic Fabric and σ_2 on Strength and Deformation Characteristics of Sand," *Soils and Foundations*, Vol. 28, No.1, pp. 89-106.
7. Reades, D.W. and Green, G.E.(1976). "Independent Stress Control and Triaxial Extension Tests on Sand," *Geotechnique*, Vol.26, No.4, pp. 551-576.
8. Sutherland, H.B. and Mesdary, M.S. (1969). "The Influence of the Intermediate Principal Stress on the Strength of Sand," *Proc. of the*

- 7th International Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg. Vol.1, Mexico, pp. 391-399.
9. Lade, P.V. and Duncan, J.M.(1973). "Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, No. SM 10, pp. 793-812.
 10. Hong, W.P. and Lade, P.V. (1989). "Elasto-Plastic Behavior of Ko-consolidated Clay in Torsion Shear Tests," Soils and Found., Tokyo, Japan, 29(2), 127-140.
 11. Hong, W.P. and Lade, P.V.(1989). "Strain Incremental and Stress Directions in Torsion Shear Tests," Journal of Geotechnical Engrg. ASCE, Vol 115, No.10, pp. 1338-1401.
 12. 洪元杓(1988). "흙의 비틀림 剪斷試驗에 관한 基礎的 研究", 大韓土質工學會誌, 第3卷 第1號, pp. 17-27.
 13. 洪元杓(1988). "비틀림 剪斷試驗에 의한 Ko-壓密粘土의 舉動", 大韓土木學會論文誌, 第8卷 第1號, pp. 151-157.
 14. 洪元杓(1988). "Ko-壓密粘土의 主應力回轉效果", 大韓土木學會論文誌, 第8卷 第1號, pp. 159-164.
 15. Nam, J.M. and Lade, P.V. (1993). "Results of Torsion Shear Tests on Medium Dense Santa Monica Beach Sand." Report to the National Science Found. Grant No. MSS 9119272, UCLA-ENG-93-24,

(접수일자 1993. 10. 20)