

비틀림전단시험에 의한 대응력반전시 모래의 거동

Behavior of Sand during Large Stress Reversal in Torsion Shear Test

홍 원 표*¹

Hong, Won - Pyo

남 정 만*²

Nam, Jung - Man

Abstract

Torsion shear tests under various stress paths were performed to study the behavior of sand during large stress reversal. The stress paths can be classified into the clockwise and the counterclockwise according to torque applied to specimen, and the directions of plastic strain incremental on the stress paths including large stress reversal are compared with the direction of stress state and stress incremental. From test results, the isotropic hardening theory using the principle of St. Venant desirably showed that direction of plastic strain incremental coincided with stress state on primary loading part and nearby failure point, but it might result in a rough approximation on part of unloading and reloading by stress reversal.

요 지

대응력반전시 모래의 거동을 연구하기 위하여 여러 가지 응력경로에 따른 비틀림전단시험이 수행되었다. 응력경로는 토크의 작용방향에 따라 시계방향과 반시계방향으로 구분할 수 있으며 대응력반전을 포함하는 응력경로에 대한 소성변형률증분의 방향이 응력상태 및 응력증분의 방향과 비교된다. 이들 시험 결과로부터, St. Venant의 원리를 이용한 등방경화이론은 최초재하와 파괴점 부근에서 소성변형률증분의 방향이 응력의 방향과 일치하는 좋은 결과를 나타내었으나 응력반전에 의한 감하과 재재하 부분에서는 차이가 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Torsion shear test, Stress path, Large stress reversal, Plastic strain incremental, Isotropic hardening.

*¹ 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

*² 정회원, 제주대학교 해양과학대학 해양토목공학과 조교수

1. 서론

정지상태의 지반은 응력이력상태에 따라 각각의 항복면을 형성하고 있다. 여기에 어떤 외부환경의 변화가 발생하게 되면 정지상태의 지반은 외부의 하중조건에 따라 최초재하(primary loading)나 감하(unloading) 혹은 재재하(reloading)의 형태로 작용하게 되며 지반변형이 발생하게 된다. 이러한 하중들 중에서 탄성영역에서 감하가 일어나면 이를 소응력반전(small stress reversal)이라 하며, 탄성영역을 지나 소성영역에서 감하가 일어나고 재재하가 계속 작용하게 되면 이를 대응력반전(large stress reversal)이라 한다 (Geiger 등, 1979). 이러한 대응력반전 문제는 흙 구조물이나 구조물의 하부 설계시 종종 발생된다. 일례로 정지상태의 지반을 굴착할 경우, 최초의 지반굴착은 감하로 볼 수 있으며 점차 굴착이 진행되어 감에 따라 주응력방향에 변화가 발생하여 하중조건은 감하에서 재재하 상태로 변화하게 된다. 또한 이러한 응력경로는 굴착이 계속 진행되면 최초의 항복면을 지나 결국 파괴로 접근하게 된다.

이와 비슷한 예를 일반적인 실내시험에서도 볼 수 있다. Ladd 등(1963)은 불교란시료 채취시 흙의 응력상태를 가상의 응력경로를 통해 설명하였다. 원래 지반의 응력상태는 정지상태에 위치하고 있으나 이것이 여러 과정을 거쳐 채취된 시료의 다듬기(trimming)를 마쳤을 때는 유효연직응력과 수평응력에 대해 감하를 받았다고 할 수 있다. 이와 같이 채취된 시료는 전단을 실시함에 따라 재재하와 최초재하가 작용하여 다시 새로운 항복면을 만들어 나가는 것으로 이 또한 대응력반전의 한 예라 할 수 있다. 이와 같이 대응력반전의 예는 지반에서 흔히 나타날 수 있으며 흙의 거동에측을 위해서는 이러한 부분에 대한 연구가 수반되어야만 한다.

본 연구의 목적은 대응력반전시 모래의 거동을 조사 분석함에 있다. 탄성이론에 의하면 등방재료에 있어서 변형률중분축은 응력중분축과 일치한다고 한다. 그러나 St. Venant(1855)에 의한 소성이론에 따르면 주응력축 회전시 소성변형률중분의 방향은 응력의 주축과 일치한다. 이것은 비관련흐름법칙에서 소성포텐셜함수와 관련된 것으로 흙의 구성식에서 아주 중요한 부분을 차지한다. 따라서 본 연구에서는 대응력반전시 지반의 거동과 주응력의 회전효과를 고찰하기 위하여 모래에 대한 비틀림전단시험을 배수상태로 실시하였다. 그리고 비틀림전단시험의 응력경로는 대응력반전을 위하여 응력상태를 파괴점 가까이 유도하여 응력경로를 반전시켰으며 전단응력을 위한 토크(torque)도 시계방향과 반시계방향으로 작용시켜 소성변형특성에 관해 분석하고자 한다. 또한 Lade(1990)에 의해 제안된 단일경화구성모델을 이용하여 실험결과를 해석치와 비교하여 이 모델에 대한 정확도 및 개선방안에 대하여 검토하여 보고자 한다.

2. 기존연구

주응력축의 회전은 단순전단시험기(simple shear device)와 비틀림전단시험(torsion shear apparatus)을 사용하여 조사되어 오고 있다. 그 중 단순전단시험기는 Roscoe의 연구팀(1953, 1967)과 Bjerrum 등(1966)에 의하여 주로 사용되었다. 그러나 Wright 등(1978)은 단순전단시 공시체의 중앙면에서 전단응력은 균일하지 않음을 보여 주었으며, Saada 등(1981)은 단순전단시험의 결점으로 연직면에 전단응력이 유지되기 어렵고 공시체 내에 응력과 변형률이 균일하게 분포되지 않으며, 전단시 수평응력과 수직응력의 발생을 파악하기 어렵다는 점 등을 열거하였다.

한편 Broms 등(1965)이 반죽성형한 Kaolinite

점토의 증공원통형공시체로 압밀비배수삼축시험을 실시하여 강도특성에 미치는 주응력회전과 중간주응력의 영향을 조사한 이후 Saada 등(1967), Lade(1975), Symes 등(1984), Hong 등(1989)등에 의해 비틀림전단시험이 사용되었다. 이 비틀림전단시험의 장점은 주응력축을 원하는 방향으로 회전시킬 수 있다는 것이다. 연직축에 대한 주응력축의 회전각 ψ 는 $b=(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 와 $b = \sin^2 \psi$ 의 관계로 연결되어 있어 중간주응력 σ_2 의 영향도 역시 검토될 수 있다. 비틀림전단시험에서 증공원통형공시체는 내측면과 외측면에 동일한 압력을 받고 있으면 평면응력상태(plane stress state)에 놓여 있게 된다. 이러한 응력상태를 마련하기 위하여는 응력과 변형이 공시체내에 균일하게 분포되어 있어야 한다(Saada 등, 1981). 이 균일성은 공시체의 치수를 적절히 선정하므로써 최대화시킬 수 있었다(Lade, 1981 ; Wright 등, 1978).

Geiger 등(1979)은 비틀림전단시험으로 주응력회전과 응력의 반전시의 사질토거동을 연구하였다. 또한 Symes 등(1984)은 모래에 대한 비틀림전단시험으로 응력반전을 포함한 응력경로에 의하여 초기 이방성이 크게 변함을 밝혔다. Saada (1973;1975)의 연구팀도 비틀림전단시험으로 점토의 응력-변형거동에 미치는 점토 이방성의 영향을 연구하여 오고 있다. 그 밖에도 비틀림전단시험으로 점토의 반복주기 거동의 영향이 연구되기도 하였다(Hicher 등, 1986).

3. 응력경로

대응력반전시 모래의 주응력회전효과와 소성 변형률중분벡터를 조사하기 위하여 7회의 비틀림전단시험을 배수상태로 실시하였다. 그리고 각 시험은 구속압을 4 kg/cm^2 으로 하고 배압(back pressure)을 2 kg/cm^2 로 하여 유효 구속압을 2 kg/cm^2 으로 하였으며, 여기서 사용된 좌표계는 연직 응력을 σ_z 로 하고 공시체의 연직면에 수직으로 작용하는 수평응력을 σ_r 로 하며 공시체의 원주방향으로 작용하는 힘을 σ_θ 로 하는 원통형 좌표계를 사용하였다. 또한 공시체는 높이가 40cm이고 두께가 2cm인 증공원통형공시체를 사용하였다. 사용된 시료는 중간 조밀도를 가지는 Santa Monica 해변모래로서 이에 대한 자세한 사항은 이미 발표한 바 있어 생략하도록 한다(남정만 등, 1993).

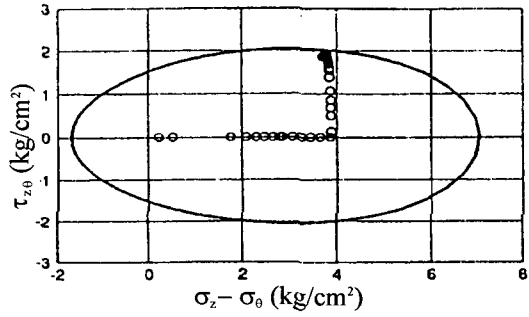
한편 본 연구에 사용된 비틀림전단시험의 응력경로는 표 1과 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 토르크를 시계방향으로만 작용시킨 3회의 시험과 시계방향과 반시계방향 모두를 작용시킨 4회의 시험으로 분류할 수 있다.

여기서 Fig. 1(a)는 가장 기본적인 응력경로로서 현재의 지반상태로 생각할 수 있는 K₀상태에서 단지 전단력만을 작용시킨 No.1의 시험으로 여기서는 응력반전을 실시하지 않고 단지 최초 재하만을 작용시킨 경우로서 이미 남정만 등(1997)에 의해 발표된 바 있다.

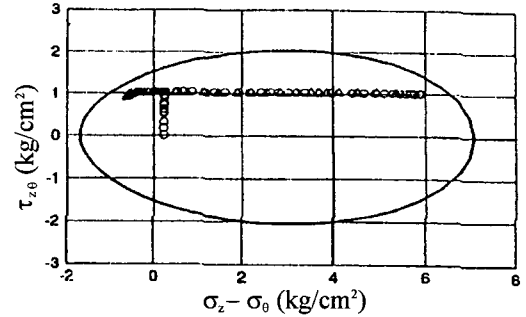
Fig. 1(b)는 우선 전단력을 1 kg/cm^2 작용시킨 후 연직하중을 축차응력이 6 kg/cm^2 지점까지 순방향으로 작용시켰으며, 여기서 응력경로를 다시 연직하중이 지나왔던 경로를 똑같이 반복하여 되돌아가 축차응력이 0인 지점까지 역방향으로 반전시키고 삼축신장응력을 계속 작용시켜 파괴점까지 도달한 No. 2의 시험이다. 그림에서 원은 순방향응력경로를 나타낸 것이며 삼각형은 축차응력에 대한 응력반전을 시킨 역방향응력경로를 나타낸 것이다.

Fig. 1(c)는 우선 전단력을 1 kg/cm^2 작용시킨 후 전단력은 감소시키고 연직하중을 증가시킨 후 전단력을 다시 가하여 파괴를 유발시킨 No. 3의 시험이다.

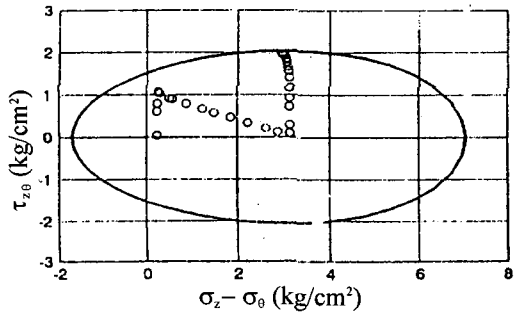
Fig. 1(d)에서 Fig. 1(g)까지는 전단력을 시계



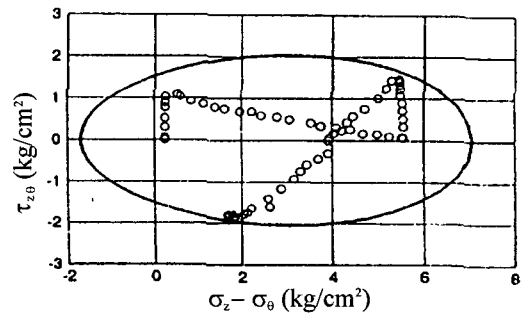
(a) Test No. 1



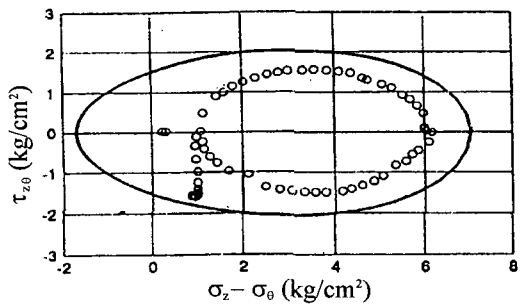
(b) Test No. 2



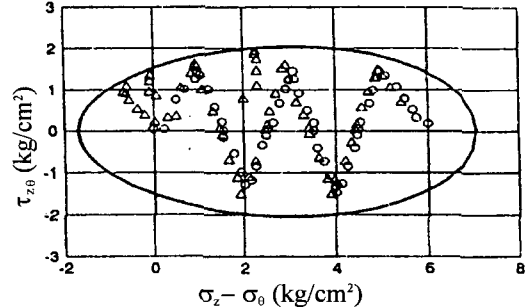
(c) Test No. 3



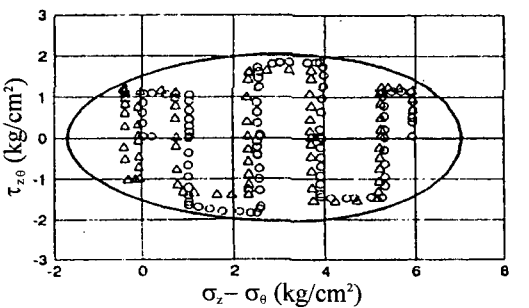
(d) Test No. 4



(e) Test No. 5



(f) Test No. 6



(g) Test No. 7

Fig. 1. Stress path

표 1. 비틀림전단시험

Test No.	Direction of Torque		파괴시 b $b=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1+\sigma_3)$
	시계방향	반시계방향	
No.1	○		0.15
No.2	○		0.74
No.3	○		0.09
No.4	○	○	0.28
No.5	○	○	0.36
No.6	○	○	0.25
No.7	○	○	0.59

방향과 반시계방향 모두 작용시킨 경우로서 Fig. 1(d)는 우선 전단력을 1 kg/cm^2 작용시킨 후, 전단력을 감소시키면서 연직하중을 작용시켜 연직응력이 5.5 kg/cm^2 이고 전단응력이 0인 지점에 이를 유도하였으며 전단력을 시계방향으로 작용시켜 응력경로를 파괴점 가까이 유도한 후 응력을 반전시켜 연직하중을 감소시키며 전단력을 감소시키고 전단력을 다시 반시계방향으로 작용시킨 No. 4의 경우이다.

Fig. 1(e)는 No. 5의 응력경로로서 연직하중을 증가할 때는 전단력을 시계방향에서 증가와 감소를 시켰으며 연직하중을 감소할 때는 전단응력을 반시계방향으로 작용시켜 응력경로가 타원형을 이루게 하였다.

Fig. 1(f)는 연직응력을 증가시키고 동시에 전단응력을 시계방향과 반시계방향으로 반복 작용시켜 응력경로를 유도한 순방향응력경로를 원형으로 나타내었으며 흰삼각형은 응력경로를 역으로 반복하여 원점으로 거슬러 간 경우이다.

Fig. 1(g)는 연직하중과 전단력을 각각 달리 작용한 것으로 최초 전단력을 가한 후 연직하중을 작용시키고 다시 전단력을 반시계 방향으로 작용시켜 전단력을 음의 방향으로 유도하였으며 이러한 과정을 반복하여 하중을 작용시켜 경로를 그림에서 원형으로 도시하고 이를 순방향응력경로로 하였다. 그리고 다시 연직응력이 6 kg/cm^2 지점에서 응력반전을 하여 지금까지의 응력경로와는 반대로 경로를 역으로 거슬러 흰삼각

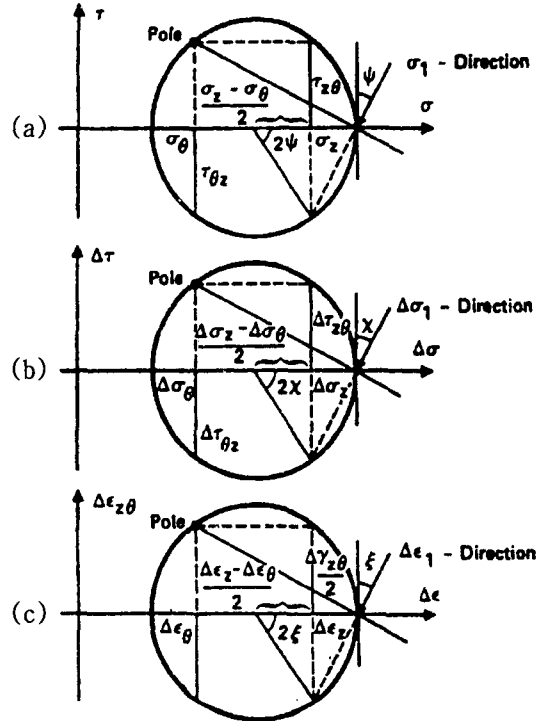


Fig. 2. Mohr circle

형으로 나타내었다. 이상의 7회에 대한 시험은 대응력반전을 설명하기 위한 응력경로라 할 수 있다.

4. 등방단일경화구성모델

4.1 Mohr원

전단시험시의 응력, 응력증분 및 변형률증분의 방향이 Mohr원으로 Fig. 2와 같이 구하여진다. 여기서 ψ 는 최대주응력 σ_1 과 연직축 사이의 각이며 χ 는 최대주응력증분 $\dot{\sigma}_1$ 과 연직축 사이의 각이고, ξ 는 최대주변형률증분 $\dot{\epsilon}_1$ 과 연직축 사이의 각을 나타낸 것으로 식 (1)~(3)으로 표시된다.

$$\tan 2\psi = \frac{2 \tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad (1)$$

표 2 등방단일경화구성모델의 계수

탄성 거동			파괴 기준		소성포텐셜		항복 기준		경화 함수	
M	λ	ν	m	n_1	ψ_2	μ	h	a	C	p
628	0.278	0.2	0.1	44.53	-3.714	2.334	0.806	0.324	0.000202	1.533

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

$$\tan 2\xi = \frac{2 \epsilon_{z\theta}}{\epsilon_z - \epsilon_\theta} \quad (3)$$

탄성이론에 의하면 탄성변형률증분의 방향은 응력증분의 방향과 일치하지만 소성이론에서는 소성변형률증분의 방향이 응력의 방향과 일치한다. 따라서 탄성거동에서는 $\xi = \chi$ 이며 소성거동에서는 $\xi = \psi$ 가 될 것이다. 그러므로 소성거동의 경우는 식 (1)과 식 (3)으로 부터 식 (4)가 성립한다.

$$\frac{2\tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} = \frac{2 \epsilon_{z\theta}^p}{\epsilon_z^p - \epsilon_\theta^p} \quad (4)$$

여기서 $2\tau_{z\theta}/(\sigma_z - \sigma_\theta)$ 는 응력변형벡터의 방향을 나타내며 $2(\epsilon_{z\theta}^p)/(\epsilon_z^p - \epsilon_\theta^p)$ 는 소성변형증분벡터의 방향을 나타낸다. 또한 소성변형률증분벡터의 방향은 임의의 응력단계점에서의 변형률접선 기울기로 구하여지며 응력벡터는 그 응력점과 원점사이의 직선기울기로 구하여진다.

4.2 등방단일경화구성모델계수

본 연구를 위하여 사용된 응력경로에 대한 항복면과 소성변형률증분벡터의 해석치는 Lade(1990)에 의해 제안된 등방단일경화구성모델을 사용하여 구하였다. 이 구성모델은 모래, 점토, 콘크리트, 암 등과 같은 마찰물질에 적용 가능하도록 만들어졌다. 또한, 일경화시 하나의 항복면을 가진다는 것과 삼축평면상에서 각각 눈물방울 및

탄알형태를 나타내는 항복면과 소성포텐셜면을 구분하는 소위 비관련흐름법칙을 사용하는 것이 특징이라 할 수 있다.

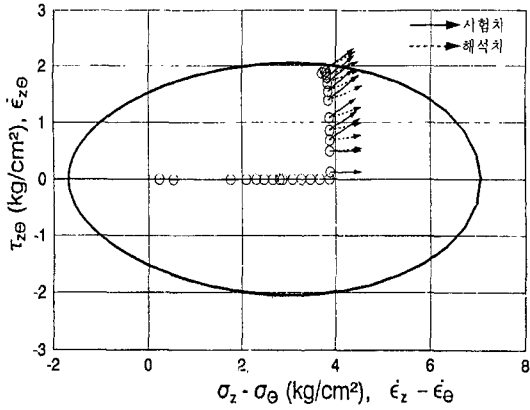
본 시험에 사용된 시료의 등방단일경화구성모델의 계수는 이미 발표한 바 있으며(홍원표 등, 1994), 이들 계수를 정리하면 표 2와 같다.

5. 대응력반전시 거동

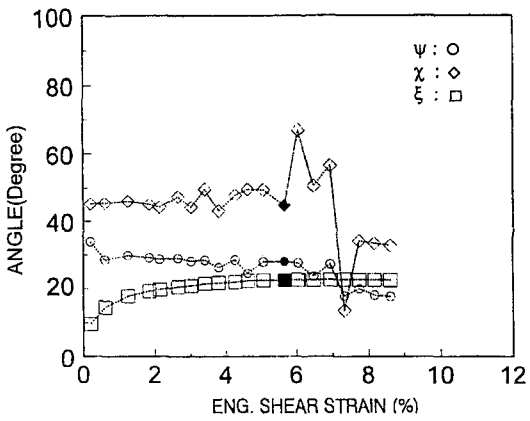
본 장에서는 표 1의 비틀림전단시험의 결과를 이용하여 소성변형률증분의 방향을 조사하기 위해 응력경로상에서의 소성변형률증분의 방향과 Mohr의 응력원을 이용하여 소성변형률증분의 방향 ξ 를 응력의 방향 ψ 및 응력증분의 방향 x 와 비교하였다. 그리고 응력경로에 따른 소성변형률증분의 방향의 시험치는 그림에서 실선의 화살표로 도시하였으며, 등방단일경화구성모델에 의한 해석치는 점선의 화살표로 도시하여 나타내었다. 그리고 ξ 에 대한 ψ 및 x 의 비교에서는 ξ 를 시험치 ξ_m 과 해석치 ξ_p 로 분류하여 해석하였다.

5.1 응력반전이 없는 경우

Fig. 3은 응력반전을 실시하지 않고 연직축차 응력이 K_0 인 상태에서 단지 전단력만을 작용시킨 No. 1의 시험 결과를 나타낸 것으로 Fig. 3(a)는 횡축에 축차응력 및 축차변형률을 두고 종축에 전단응력 및 전단변형률을 둔 비틀림전단평면으로서 소성변형률증분벡터의 방향표시는 전단력이 가해진 이후부터 도시하였다. 응력반전이



(a) Stress path superimposed plastic strain incremental direction



(b) Variation of angles ψ , χ and ξ versus engineering shear strain

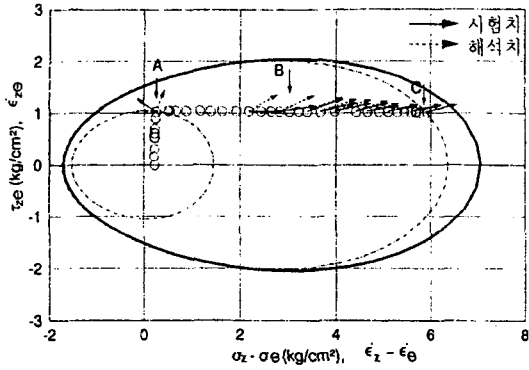
Fig. 3. Test No. 1

없는 No. 1 시험에서 소성변형률증분의 방향은 시험치와 해석치가 어느 정도 일치할 보이고 있으며 특히 파괴점으로 접근할수록 좋은 결과를 보이는 것으로 나타나고 있다. 한편 Fig. 3(b)는 전단변형률 γ 에 대한 회전각 ψ , χ 및 ξ 의 변화를 나타낸 것으로 여기서 ψ , χ 및 ξ 는 각각 식 (1), (2) 및 (3)으로 구하여 지고 파괴점은 그림에서 검은 표시로 나타내었다. 응력반전을 실시하지 않은 No. 1에서는 주응력회전에 의한 최대주응력의 방향 ψ , 최대주응력증분방향 χ 및 최대주변형률증분의 방향 ξ 의 관계로부터 전단력이

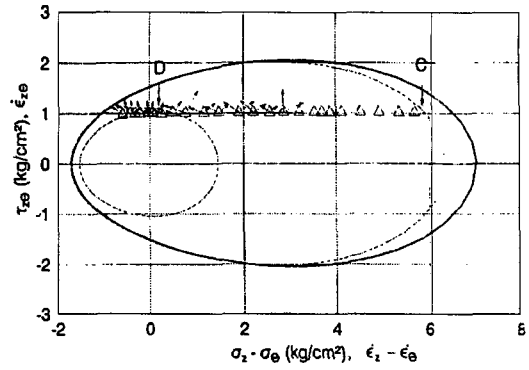
가하여진 초기에는 x 와 ξ 가 접근되어진 것을 볼 수 있으나 전단변형이 발생함에 따라 서서히 ψ 와 ξ 가 접근하고 있으며, 파괴점 부근에서는 두 값이 상당히 접근함을 볼 수 있다. 즉, 이것은 응력반전이 없는 모래의 거동은 초기응력에서 파괴응력 까지 증가함에 따라 탄성에서 소성거동으로 점진적으로 변천하여 감을 알 수 있다(남정만 등, 1997).

5.2 시계방향응력반전의 경우

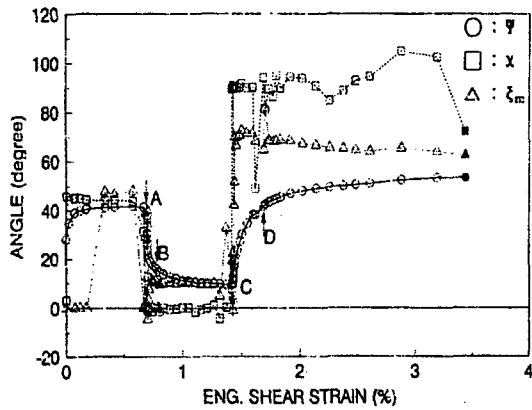
Fig. 4(a) 및 (b)는 Test No. 2의 응력경로 및 각 응력상태에서의 소성변형률증분의 방향을 각 응력경로상에 도시하여 나타내었다. 이 시험의 응력경로는 우선 전단력을 약 1 kg/cm^2 작용시킨 후 연직축차응력을 약 5.8 kg/cm^2 까지 가하고 이 경로를 환원으로 하여 Fig. 4(a)에 나타내었다. 그리고 다시 하중을 지금까지의 경로와는 반대로 연직축차응력에 대한 응력반전을 시켜 연직응력을 감소시키고 축차응력을 인장하중의 상태로 유도하여 파괴를 유발시켰으며 이때의 응력경로는 Fig. 4(b)에서 삼각형으로 나타내었다. 그리고 이점쇄선으로 나타낸 두개의 타원은 응력경로중 연직하중이 작용되기전 전단응력 1 kg/cm^2 만이 작용된 A 위치에서의 항복면과 순방향 연직축차응력만을 작용시키고 응력반전 직전의 응력점 C에 대한 항복면을 등방일경화 모델을 이용하여 도시한 것이다. Fig. 4(a)에서 최초 전단력이 작용된 후 연직하중이 작용된 초기에는 소성변형률증분의 양이 아주 소량이어서 방향을 나타내기 어려웠다. 즉, 이 부분까지는 탄성영역이라고 할 수 있다. 그리고 연직응력이 약 2.1 kg/cm^2 에서 부터 소성변형률증분방향을 도시하였으며 이 때의 하중상태는 최초재하에 해당한다. 여기서 소성변형률 증분의 방향은 실측치와 해석치가 좋은 일치를 보이는 것으로 나타나고 있다.



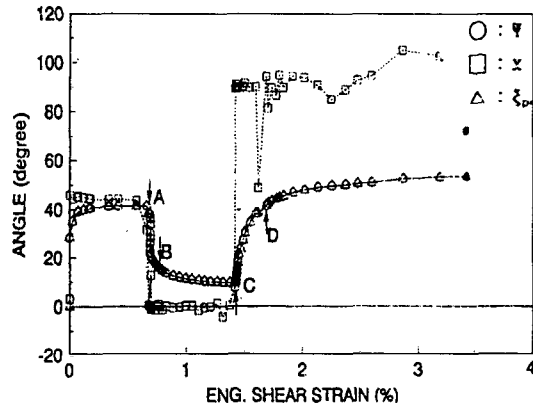
(a) Stress path superimposed plastic strain incremental direction



(b) Stress path superimposed plastic strain incremental direction



(c) Variation of angles ψ , χ and ξ_m versus engineering shear strain



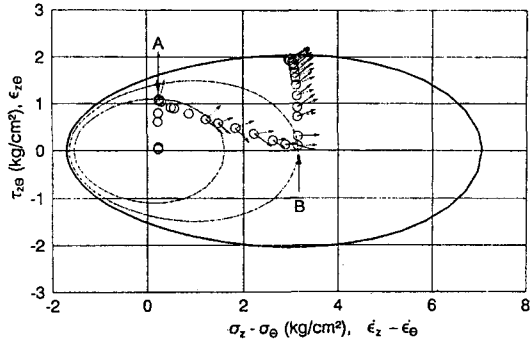
(d) Variation of angles ψ , χ and ξ_p versus engineering shear strain

Fig. 4. Test No. 2

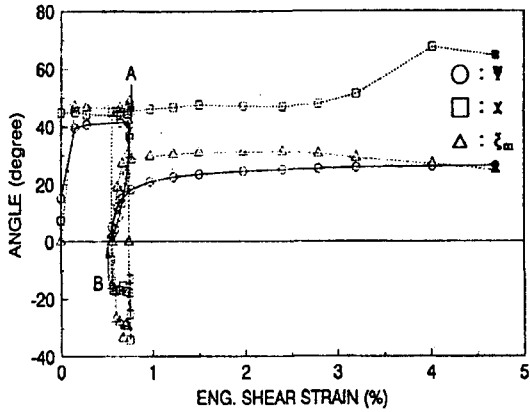
그러나 응력반전이 실시된 Fig. 4(b)의 역방향응력경로중 C에서 D 사이의 응력경로에서는 소성변형을 중분의 방향이 시험치와 해석치 사이에 많은 차이를 보이는 것으로 나타나고 있으며, 응력경로가 D 위치를 지나 파괴점으로 접근하여 감에 따라 두 소성변형률중분의 방향은 서서히 서로 접근하여 가고 있음을 보이고 있다.

한편 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 전단변형률 γ 에 대한 ψ 와 χ 및 ξ 의 관계를 도시한 것으로 그림에서 ξ 는 소성변형률중분벡터의 방향을 나타내기 위하여 식 (4)를 이용하였다. Fig. 4(c)는 변형

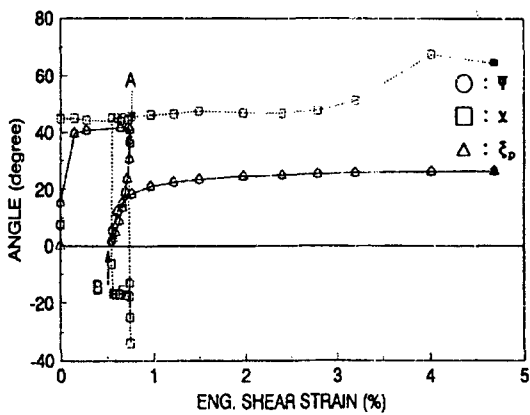
률중분의 방향을 비틀림전단시험 결과로부터 구한 ξ_m 을 사용하였으며 Fig. 4(d)는 등방단일경화 구성모델로부터 구한 ξ_p 를 사용하여 도시한 것이다. Fig. 4(c)로부터 최초재하에 해당하는 A에서 C까지 구간은 소성변형률중분 ξ_m 이 응력의 방향 ψ 와 일치하는 것으로 나타나고 있으나 응력반전이 실시된 C에서 D의 역방향응력경로에 대해서는 소성변형률중분 ξ_m 이 응력의 방향 ψ 와 많은 차이를 보이고 있다. 오히려 응력중분의 방향 χ 와 더 가까운 것으로 나타나고 있으나 두 값 사이에는 약간의 차이를 보이는 것으로 나타나고



(a) Stress path superimposed plastic strain incremental direction



(b) Variation of angles ψ , χ and ξ_m versus engineering shear strain

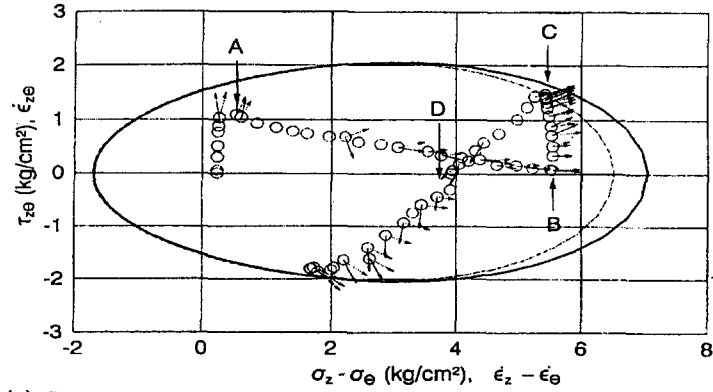


(c) Variation of angles ψ , χ and ξ_p versus engineering shear strain

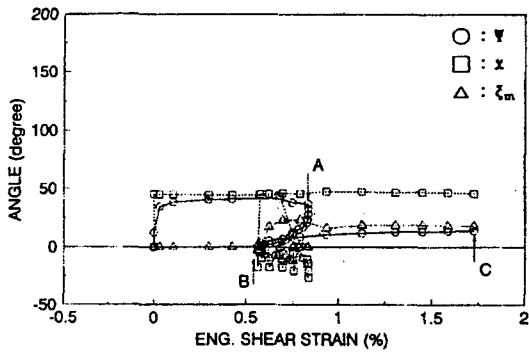
Fig. 5. Test No. 3

있다. 그러나 D 위치를 지나서는 ξ_m 이 ψ 와 조금씩 접근하는 경향을 볼 수 있다. 한편 소성변형률중분벡터의 해석치를 사용한 Fig. 4(d)에서는 전응력경로에 대한 소성변형률중분 ξ_p 가 응력의 방향 ψ 와 좋은 일치를 하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 이 부분에서 해석치는 시험치를 잘 표현하지 못하고 있다.

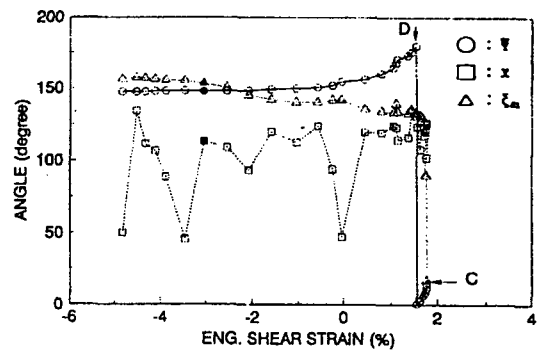
Fig. 5는 응력경로가 전단력을 우선 작용시킨 후 다시 전단력을 감소시키며 연직하중을 약 3.2 kg/cm² 지점까지 작용시켰으며 여기서 다시 전단력을 증가시킨 No. 3의 결과를 도시한 것이다. Fig. 5(a)에서 이점쇄선으로 나타낸 두개의 타원은 응력경로 변화중 A와 B위치에 발생한 각 지점의 항복곡면을 나타내고 있다. A에서 B까지의 응력경로 변화시의 항복면에 해당하는 작은 타원의 내부를 경유하는 응력점에 대한 변형률중분은 거의 탄성변형이 발생하고 소성변형은 아주 미세하여 도시하지 않았다. 작은 항복면을 지나 B위치까지의 소성변형률중분의 방향은 시험치와 해석치 사이에 많은 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다. 해석치는 소성변형률중분의 방향이 응력의 방향쪽으로 나타나는데 반해 실험치는 응력중분의 방향과 일치하는 것으로 나타나고 있다. 응력경로의 변화가 두번째 발생한 B위치 이후의 응력상태에서는 소성변형률중분의 방향은 시험치와 해석치가 좋은 일치를 보이며 파괴점으로 접근할수록 응력의 방향과 일치하고 있다. Fig. 5(b)에서는 응력반전이 일어난 AB구간에서 ξ_m 이 χ 의 방향과 가까운 것으로 나타나고 있으며 B를 지나 파괴점에 접근하여 감에 따라 ξ_m 이 ψ 와 접근하는 경향을 보이고 있다. Fig. 5(c)의 해석치와의 비교에서는 소성변형률중분의 방향이 응력의 방향과 전응력경로에 대해 일치하는 것으로 나타나고 있으며 응력반전시 시험치와는 많은 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다.



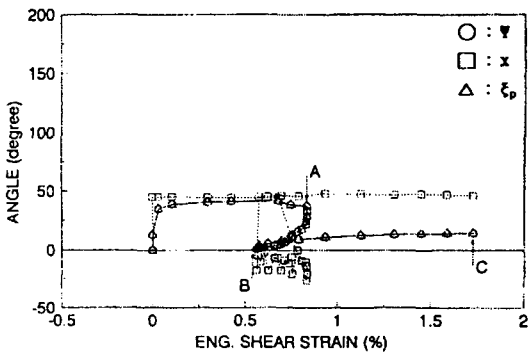
(a) Stress path superimposed plastic strain incremental direction



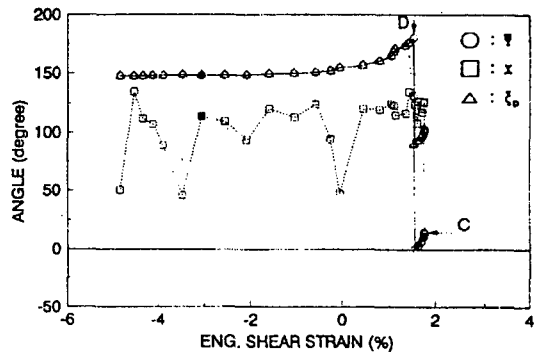
(b) Variation of angles ψ , χ and ξ_m versus engineering shear strain



(c) Variation of angles ψ , χ and ξ_m versus engineering shear strain



(d) Variation of angles ψ , χ and ξ_p versus engineering shear strain



(e) Variation of angles ψ , χ and ξ_p versus engineering shear strain

Fig. 6. Test No. 4

5.3 반시계방향 응력반전 포함시

Fig. 6은 No. 4의 결과를 도시한 것으로 응력 경로는 우선 전단응력을 약 1 kg/cm^2 작용시킨

후 응력반전을 위해 전단력을 조금씩 감소시키며 연직하중을 증가시켰으며 연직축차응력이 약 5.5 kg/cm^2 지점에서 전단력을 다시 증가시키고 C위치에서 응력반전을 다시 시킨 것이다. Fig.

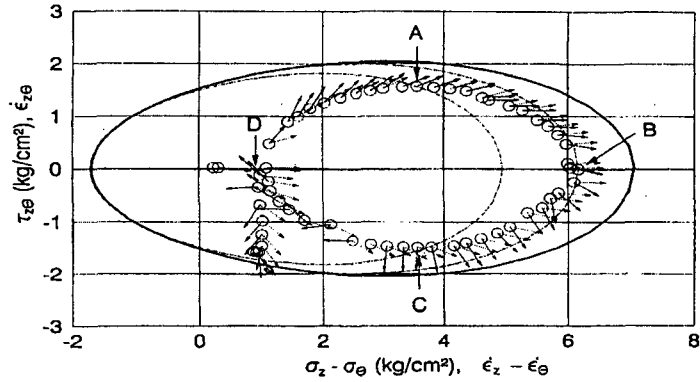
6(a)에서 응력경로에 따른 소성변형률중분의 방향이 응력반전이 발생한 A에서 B구간과 C에서 D를 지나 연직축응력이 2.5 kg/cm^2 인 부분까지는 시험치와 해석치 사이에 많은 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다. 그러나 BC구간과 파괴점 부근에서는 시험치와 해석치가 어느 정도 일치하는 것으로 나타나고 있다. Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 No. 4시험의 전단변형률에 대한 ψ 와 x 및 ξ_m 의 관계를 2개의 그림으로 나누어 도시한 것이다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 응력경로중 C위치까지를 나타낸 것으로 응력반전이 발생한 AB구간의 초기 부분은 ξ_m 이 x 와 가깝게 접근하고 있고 B위치 부근에서 C로 접근하여 감에 따라 ξ_m 이 ψ 와 접근하고 있음을 알 수 있다. 한편 응력반전을 두 번째로 실시한 C위치에서 파괴점까지의 변화를 나타낸 Fig. 6(c)에서는 소성변형률중분벡터가 D위치를 지나 전단변형률이 약 0.5%인 지점까지는 x 와 가깝게 접근하고 있으나 파괴점에 접근할 수록 ψ 와 가까이 접근함을 알 수 있다. 등방단일구성모델에 의한 소성변형률중분벡터의 해석치를 나타낸 Fig. 6(d)와 Fig. 6(e)에서는 앞에서와 같이 응력반전에 관계없이 ξ_p 가 ψ 와 일치하는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 7은 응력경로가 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 원점을 지나 D-A-B-C-D점을 거쳐 타원형의 응력경로를 만들었으며 D위치에서 전단력을 반시계방향으로 작용시켜 파괴를 유도한 시험이다. 그림에서 이점쇄선으로 나타낸 2개의 타원형은 A와 B위치에서의 항복면을 나타내고 있다. 소성변형률중분의 방향은 전단응력이 시계방향으로 작용한 세로축이 양인 부분(D-A-B구간)에서는 실선화살표로 나타낸 시험치가 해석치와 비슷한 경향을 보이고 있으나 전단응력이 음(-)인 부분(B-C-D구간)에서는 시험치와 해석치사이 많은 차이를 보이며 소성변형률중분의 방향이 응력의 방향에서 응력경로의 방향으로 서서

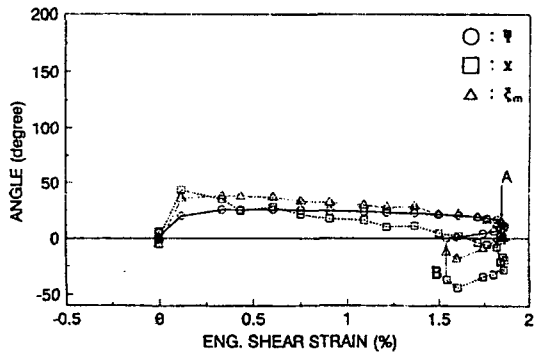
히 변하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 BC구간에서 연직축응력방향의 소성변형률중분의 방향이 반시계방향 전단력의 하중결합효과에 의해 양의 방향으로 나타나고 있으나 C위치를 지나서는 음의 방향으로 나타나고 있다. D를 지나 파괴점으로 접근함에 따라 소성변형률중분벡터의 방향은 서서히 일치하는 경향을 보이고 있다. 한편 해석치 ξ_p 와의 관계를 나타낸 Fig. 7(d)와 Fig. 7(e)에서는 응력반전 이후에도 등방단일경화구성모델에 의한 ξ_p 가 ψ 와 일치하는 것으로 나타나 St. Venant의 원리를 등방경화이론에 적용한 등방단일경화구성모델의 결과는 응력반전시 소성변형률중분의 해석에 차이가 많이 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 No. 7의 소성변형률중분벡터를 도시하기 위하여 순방향응력경로와 역방향응력경로로 구분하여 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에 각각 나타내었다. 여기서의 응력경로는 대응력반전을 위하여 응력경로를 가능한 파괴점 가까이 유도한 후 응력반전을 실시하였으며 전단변형률에 대한 ψ , x 및 ξ 의 관계는 응력반전을 수회 실시함에 의한 그림의 복잡성 때문에 생략하였다. 우선 순방향 응력경로에서 소성변형률중분의 방향은 응력의 초기단계와 하중단계가 파괴점에 가까워 소성변형이 많이 발생하는 C, E, G, I 위치 부근을 제외한 응력반전이 실시된 부분에서는 대체적으로 시험치와 해석치에서 많은 차이를 보이고 있다. 시험치에서는 소성변형률중분의 방향이 응력중분의 방향과 일치하는 것으로 나타나고 있는 반면 해석치는 응력의 방향과 일치하는 것으로 나타나고 있다. 역방향 응력경로에 대한 Fig. 8(b)에서도 Fig. 8(a)에서와 같이 비틀림전단시험에 의한 실측치와 등방단일경화구성모델에 의한 해석치가 많은 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다.

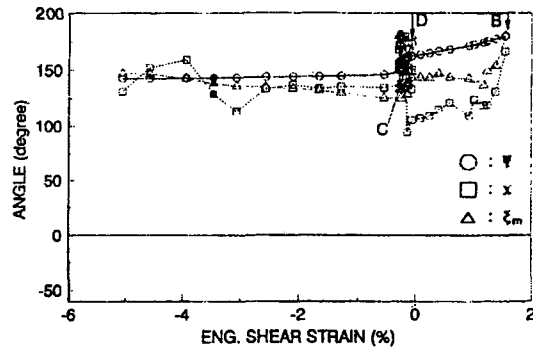
이상의 검토에 의하면 소성변형률중분의 방향은 하중의 상태 즉 최초재하, 감하 및 재재하에



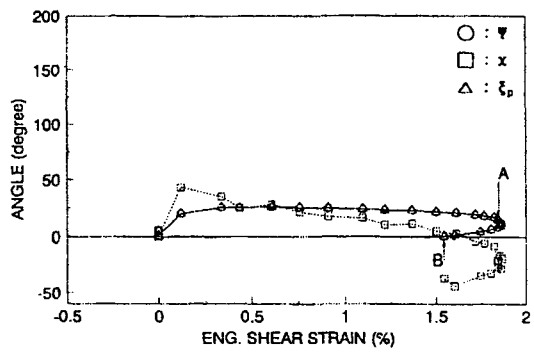
(a) Stress path superimposed plastic strain incremental direction



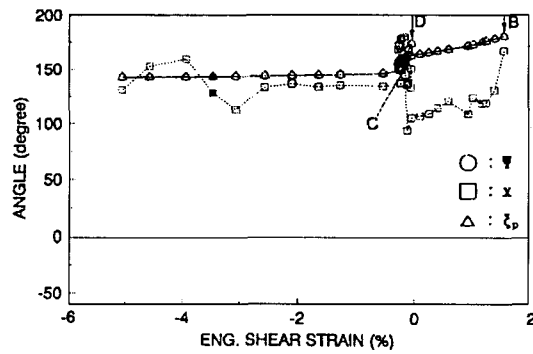
(b) Variation of angles ψ , χ and ξ_m versus engineering shear strain



(c) Variation of angles ψ , χ and ξ_m versus engineering shear strain



(d) Variation of angles ψ , χ and ξ_p versus engineering shear strain

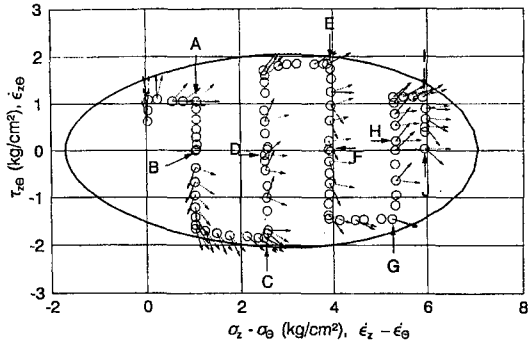


(e) Variation of angles ψ , χ and ξ_p versus engineering shear strain

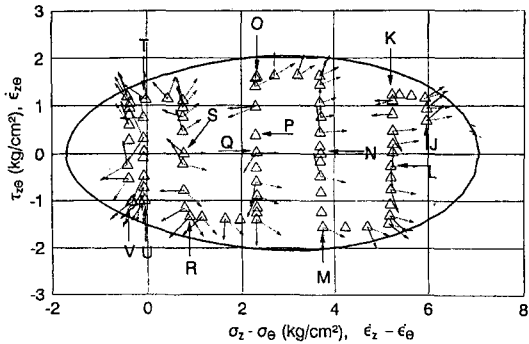
Fig. 7. Test No. 6

의해 많은 영향을 받는 것으로 보인다. 우선 최초재하에서는 소성변형률중분의 방향이 대체적으로 응력의 방향과 일치한다. 그러나 최초재하에서도 하중이 전단력과 축치응력이 동시에 작

용하여 응력경로의 방향이 선행하중에 역행하는 방향으로 진행될 시에는 간혹 소성변형률중분의 방향이 응력중분의 방향으로 발생하는 경우도 발생하였다. 감하시에는 응력반전이 일어나기 직



(a) Stress path superimposed plastic strain incremental direction



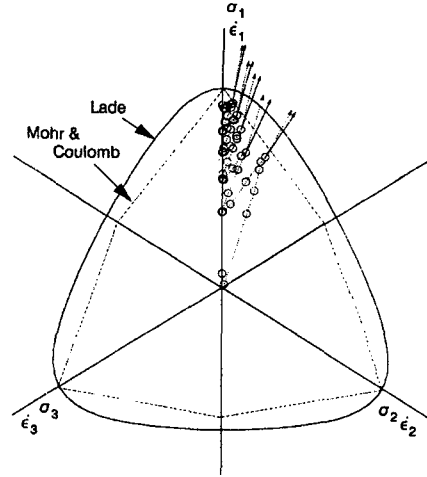
(b) Stress path superimposed plastic strain incremental direction

Fig. 8. Test No. 7

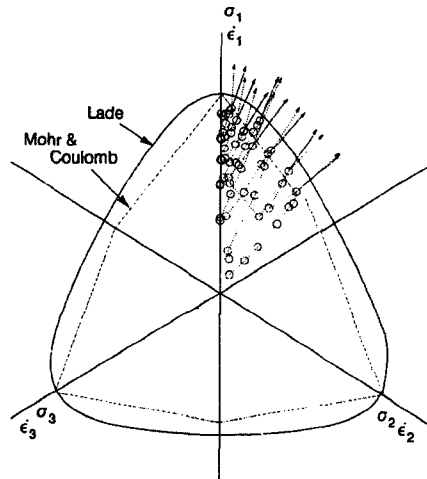
전의 소성변형률증분의 방향으로부터 소성변형률증분의 방향이 응력증분의 방향으로 조금씩 변하는 것으로 나타났으며, 재재하 상태에서는 응력의 상태와 응력증분의 영향을 모두 받으며 파괴에 근접한 지역에서는 응력상태에 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

6. 정팔면체 거동

Fig. 9는 No. 6의 응력경로를 제1응력불변량 $I_1(=\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\theta)$ 이 6 kg/cm^2 인 정팔면체평면에 도시하였다. 이 응력경로는 Fig. 1(f)에서와 같이 전단력과 축차응력을 반복하여 순방향으로 작용시킨 후 하중을 다시 역으로 거슬러 지금까지의 방향



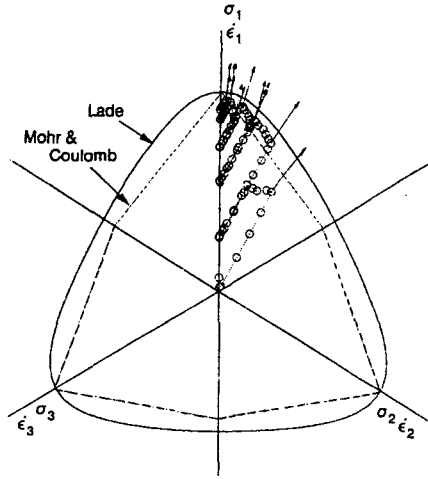
(a) 순방향 응력경로 ($I_1 = 6 \text{ kg/cm}^2$ Plane)



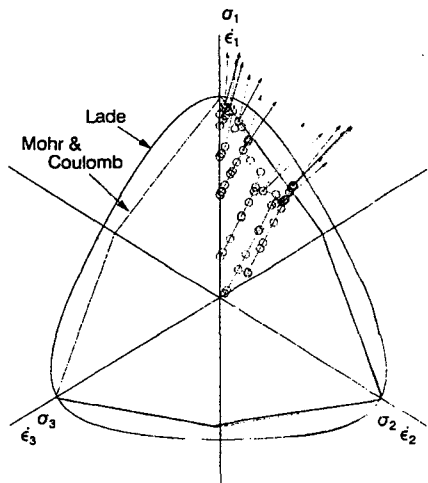
(b) 역방향 응력경로 ($I_1 = 6 \text{ kg/cm}^2$ Plane)

Fig. 9. Stress path superimposed plastic strain incremental direction octahedral plane (Test No. 6)

과는 반대인 역방향으로 작용시킨 것으로 이들 응력경로를 하나의 도면에 도시하기가 복잡하여 순방향응력경로와 역방향응력경로로 분리하여 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 각각 도시하였다. 그리고 소성변형률증분의 방향은 단지 응력경로의 방향에 변화가 발생하는 응력반전을 실시하기 전의 응력점에서만 도시하였다. Fig. 9(a)에서 소성변형률증분의 방향은 점선의 화살표로 표시한 등



(a) 순방향 응력경로 ($I_1 = 6 \text{ kg/cm}^2$ Plane)



(b) 역방향 응력경로 ($I_1 = 6 \text{ kg/cm}^2$ Plane)

Fig. 10. Stress path superimposed plastic incremental direction octahedral plane (Test No. 7)

방단일경화구성모델과 실선의 화살표로 표시한 시험치가 좋은 일치를 보이고 있다. 그리고 응력경로가 비틀림 평면(torsion plane)의 원점방향으로 거슬러간 Fig. 9(b)의 응력경로에서는 소성변형률중분의 방향이 해석치와 약간의 차이를 보이고 있다. 즉 이것은 소성변형률중분의 방향이 응력이 반전되어 진행될 시에는 응력경로에 조금씩 영향을 받고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 10은 No. 7의 결과를 앞에서와 같이 I_1 이 6 kg/cm^2 인 정팔면체 평면에 도시하였다. 여기서도 응력경로는 앞에서와 같이 응력반전이 시작된 점을 기준으로 Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)로 분류하여 도시하였다. 그리고 소성변형률중분의 방향은 단지 응력경로의 방향에 변화가 발생하는 지점에서만 도시하였다. Fig. 10(a)에서는 소성변형률중분의 방향이 점선의 화살표로 표시한 등방단일경화구성모델과 실선의 화살표로 표시한 시험치가 좋은 일치를 보이고 있으나 응력경로가 비틀림 평면의 원점방향으로 거슬러간 Fig. 10(b)에서는 앞에서와 같이 소성변형률중분의 방향이 해석치와 약간의 차이를 보이고 있다.

7. 결 론

대응력반전시 모래의 거동을 검토하기 위하여 주응력회전이 가능한 비틀림전단시험기를 이용하여 여러가지 응력경로에 따라 배수상태로 비틀림전단시험이 수행되었으며 각 응력경로에 따른 소성변형률중분의 방향이 조사되었다. 이들 시험결과를 토대로 St. Venant가 제시한 응력의 주축은 소성변형률중분의 주축과 일치한다는 가설을 등방경화개념에 적용시켰을시 최초재하에서는 좋은 일치를 보이는 것으로 나타났으나 응력반전시에는 시험결과와 차이가 있었다. 즉, St. Venant의 원리를 등방경화개념에 적용하면 소성변형률중분의 방향은 응력의 방향과 일치하여야 한다. 그러나 시험결과에 따르면 대응력반전시 소성변형률중분의 방향은 응력의 상태 뿐 아니라 응력경로에도 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

최초재하와 파괴면에서는 소성변형률중분의 방향이 응력의 작용방향과 일치하고 있으나 하중에 감하가 발생하였을 시는 하중의 변화가 발생하기 직전의 방향으로부터 응력경로의 방향쪽

으로 서서히 바뀌어져 간다. 그리고 하중의 상태가 재재하로 변화하게 되면 소성변형을 증분의 방향은 응력의 방향과 응력경로의 방향 모두에 영향을 받게되며 이것이 파괴면에 접근할 수록 응력의 방향에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 이러한 결과는 대응력반전시 St. Venant의 원리를 등방경화에 적용하였을 때에는 시험결과와 차이가 발생하게 되고 이동경화법칙을 이 원리에 적용함이 타당하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 실시된 연구임을 밝히며 상기재단에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

참고 문헌

1. 남정만, 홍원표 (1993), "비틀림전단시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동", 한국지반공학회지, 제9권 제4호, PP. 65-81.
2. 남정만, 홍원표, 윤중만 (1997), "비틀림전단시험시 모래의 주응력회전효과", 대한토목학회논문집, 제17권 제III-5호, PP. 557-564.
3. 홍원표, 남정만 (1994), "등방단일경화구성모델에 의한 모래의 3차원거동 예측", 한국지반공학회지, 제10권 제1호, PP. 103-116.
4. Bjerrum, L. and Landva, A. (1966), "Direct Simple-Shear Tests on Norwegian Quick Clay", *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, PP. 1-20.
5. Broms, B. B. and Casbarian, A. O. (1965), "Effects of Rotation of the Principal Stress on Shear Strength", *Proc. 6th ICSMFE*, Montreal Vol. I, PP. 179-183.
6. Geiger, E., and Lade, P. V. (1979), "Experimental Study of the Behavior of Cohesionless Soil during Large stress Reversals and Reorientation of Principal Stresses", *Report No. UCLA-ENG-7917*, University of California, L.A.
7. Hicher, P. Y. and Lade, P. V. (1986), "Rotation of Principal Directions in Ko-consolidated Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 7, PP. 774-788.

8. Hong, W. P. and Lade, P. V. (1989a), "Strain Incremental and Stress Directions in Torsion Shear Tests", *Journal of Geotechnical Engrg.* ASCE, Vol. 115, No. 10, PP. 1388-1401.
9. Ladd, C. C and Lambe, T. W. (1963), "Shear Strength of Saturated Clays", *Laboratory testing of Soils*, ASTM STP 361, Ottawa, PP. 342-371.
10. Lade, P. V. (1975), "Torsion Shear Tests on Cohesionless Soil", *Proc. 5th Panamerican Conference on SMFE*, Buenos Aires, Vol. I, PP. 117-127.
11. Lade, P. V. (1981), "Torsion Shear Apparatus for Soil Testing : Laboratory Shear Strength of Soil", *ASTM STP 740*, Philadelphia, PP. 145-163.
12. Lade, P. V. (1990), "Single-Hardening Model with Application to NC Clay", *Journal of Geotechnical Engrg.*, ASCE, Vol. 116, No. 3, March, PP. 394-414.
13. Roscoe, K. H. (1953), "An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples", *Proc. 3rd ICSMFE*, Zurich, Vol. I, PP. 186-191.
14. Roscoe, K. H, Bassett, R. H. and Cole, E. R. L. (1967), "principal Axes Observed during Simple Shear of Sand", *Proc. The Geotechnical Conference*, Oslo, Vol. I, PP. 231-237.
15. Saada, A. S. and Baah, A. K. (1967), "Deformation and Failure of a Cross Anisotropic Clay under Combined Stress", *Proc. 3rd Panamerican Conference on SMFE*, Venezuela, Vol. I, PP. 67-88.
16. Saada, A. S. and Bianchini, C. F. (1975), "Strength of One Dimensionally Consolidated Clays", *Jour. GED*, ASCE, Vol. 99. No. GT11, PP. 1151-1164.
17. Saada, A. S. and Ou, C. D. (1973), "Stress-Strain Relations and Failure of Anisotropic Clays", *Jour. SMFE*, ASCE, Vol. 99. No. SM12, PP. 1019-1111.
18. Saada, A. S. and Townsend, F. C. (1981), "State of the Art : Laboratory Strength Testing of Soils", *ASTM STP 740*, PP. 7-77.
19. Saint Venant, B. (1855), "Mèmoires des Savants Etrangers", Vol. 14.
20. Symes, M. J. P. R., Gens, A. and Hight, D. W. (1984), "Undrained Anisotropy and Principal Stress Rotation in Saturated Sand", *Geotechnique*, Vol. 34, No. 1, PP. 11-27.
21. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N. (1970), "Theory of Elasticity", McGraw-Hill, 3rd Edition, PP. 39-40.
22. Wright, D. K., Gilbert, P. A. and Saada, A. S. (1978), "Shear Devices for Determining and Soil Properties", *Proc. ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena California, Vol. 2, PP. 1056-1075.

(접수일자 1998. 7. 27)