

입방체형삼축시험에 의한 모래의 3차원거동 및 예측

Three Dimensional Behavior of Sand in Cubical Triaxial Tests and Its Prediction

남 정 민*1

Nam, Jung - Man

홍 원 표*2

Hong, Won - Pyo

Abstract

A series of drained cubical triaxial tests was performed to investigate the influence of the intermediate principal stress on the deformation and strength characteristics of sand. Test results showed that the strength of sand as represented by the friction angle increased from triaxial compression condition ($b=0$) with increasing magnitude of the intermediate principal stress until the value of b reached 0.75, and it decreased slightly with closing to $b=1$. Also it was found that the projection of the plastic strain increment vector on the octahedral plane was perpendicular to the trace of the failure surface on that plane. The prediction by the isotropic single hardening model showed good coincidence with experimental results.

요 지

모래의 응력-변형률과 강도특성에 대한 중간주응력의 영향을 조사하기 위해 일련의 입방체형삼축시험이 배수상태로 실시되었다. 시험결과로부터 내부마찰각으로 표현된 모래의 강도는 b 가 0인 삼축압축상태에서부터 중간주응력의 양이 증가함에 따라 b 가 0.75인 지점까지 증가하다 $b=1$ 가까운 지점에서 조금 감소하는 현상을 볼 수 있었다. 또한 소성변형률증분의 방향을 정팔면체평면에 투사하였을 경우 그것은 파괴면에 수직인 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 등방단일경화구성모델에 의한 예측치는 실험결과와 좋은 일치율을 보였다.

1. 서 론

흙의 역학적 거동을 파악하기 위한 실내시험 장치로서 원통형공시체를 사용하는 축대칭삼축시험기가 많이 사용되고 있다. 그러나 이 시

험기구는 원통형공시체를 사용하는 관계로 흙의 3차원 거동을 설명하는 주응력공간에서 수평 방향으로 작용하는 두개의 주응력이 항상 같아야 한다. 그리고 이러한 시험결과는 흙의 강도를 나타내기 위하여 중간주응력의 효과를 고려하지 않는 Mohr - Coulomb의 파괴규준을 이

*1 정희원, 제주대학교 해양과학대학 해양토목공학과 전임강사

*2 심희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

용하고 있다. 그러나 최근의 여러 연구결과에 의하면 흙의 응력변형률거동 및 강도특성은 중간주응력에 많은 영향을 받는 것으로 조사되고 있다.^{8), 11)} 따라서 본 연구에서는 모래의 3차원 거동특성을 조사하기 위하여 중간주응력을 고려할 수 있는 입방체형삼축시험기를 이용하여 Santa Monica Beach 모래에 대한 일련의 배수시험을 실시하였다. 이 시험장치는 변형이 균등하게 발생하도록 강제구속 시킨 것이 그 특성이라고 할 수 있다. 이들 결과로부터 중간주응력의 변화가 미치게 되는 모래의 변형률거동 및 강도특성에 대한 영향과 응력경로에 따른 소성변형률중분벡터의 방향을 조사하여 보고자 한다. 그리고 Lade에 의해서 제안된 단일경화구성모델을 이용하여 시험결과와 비교하고 각 응력경로에 따른 항복면과 소성포텐셜을 조사하여 보고자 한다.

2. 입방체형삼축시험

본 연구에서 사용된 입방체형삼축시험기와 시료는 이미 국내에 여러번 소개된 적이 있다.^{2), 5), 6)} 따라서 본장에서는 입방체형삼축시험기에 대한 설명은 생략하고 시험에 사용된 시료^{1), 10)}와 12회의 입방체형삼축시험에 대한 응력경로에 대해서 간단히 설명하고자 한다.

우선 사용된 시료는 미국 California주에 위치한 Santa Monica 해변의 모래로써, 사용하기전 물로 씻어 모래 중에 포함되어 있는 염분과 불순물을 제거하고 입자분포를 균등하게 하기 위하여 40번 체를 통과하는 입자를 대상 시료로 결정하였다. 모래의 광물구성을 살펴보면 석영과 장석이 각각 약 45%씩 차지하여 흙구성의 주류를 이루고 있으며 자철광이 약 8%, 그리고 잔여광물 2% 정도로 구성되어 있다. 그리고 본 시험은 중간정도의 밀도상태를 유지하기 위하여 상대밀도 70%의 공시체를 제작하였으며 이것을 입방체형삼축시험기에서 배수상태로 여러가지 응력경로에 따라 실시하였다. 각 응력경로에 따른 파괴시 b와 초기간극비는 표.1과 같으며 보다 자세한 사항은 참고문헌(2)를 참조하기로 한다.

표1. 입방체형삼축시험

Test No.	구속압 (kg/cm ²)	응력비 b	초 기간극비 e ₀	θ
C-1	0.5	0.00	0.697	0.000
C-2	1.0	0.00	0.691	0.000
C-3	2.0	0.00	0.682	0.000
C-4	1.0	0.13	0.727	6.866
C-5	1.0	0.30	0.671	16.996
C-6	1.0	0.61	0.675	37.239
C-7	1.0	0.83	0.676	50.859
C-8	1.0	0.89	0.682	54.243
C-9	0.6	0.97	0.660	58.489
C-10	0.5	0.71	0.704	76.370
C-11	0.5	0.70	0.684	76.996
C-12	0.5	0.77	0.684	72.684

3. 등방단일경화구성모델

본 연구에 적용하는 등방단일경화구성모델은 모래, 점토, 콘크리트, 암등과 같은 마찰물질에 적용 가능하도록 Lade에 의하여 제안된 흙의 구성모델이다. 이 모델은 일경화시 하나의 항복면을 가진다는 것과 항복면과 소성포텐셜면을 구분하는 소위 비관련흐름법칙을 사용하는 것이 특징이라 할 수 있다.¹²⁾⁻¹⁷⁾

이 모델은 11개의 계수를 가지고 있으며 이들 계수는 통상 축대칭공시체를 사용한 삼축압축시험 및 등방압축시험결과를 활용하여 구한다. 따라서 본 연구에서는 이들 계수를 결정하기 위하여 본 시험과 동일한 시료 및 상대밀도를 가지는 원통형공시체를 대상으로 등방압축시험과 삼축압축시험을 실시한 Prabucki and Lade(1990)¹⁸⁾의 시험결과를 이용하였다. 이들 결과로부터 결정한 등방단일경화구성모델에 대한 11개의 계수결정에 대한 과정은 이미 발표한 바 있으며 그 결과를 정리하면 표.2와 같다.⁶⁾

표2. 등방단일경화구성모델의 계수

M	탄성거동			파괴기준			소성포텐셜			항복기준		경화함수	
	i	v	m	n ₁	ψ ₂	μ	h	x	C	p			
628	0.278	0.2	0.1	44.53	-3.74	2.334	0.806	0.324	0.000202	1.533			

4. 변형특성

그림.1은 최대주변형률 ϵ_1 에 대한 중간주변형률 ϵ_2 의 관계를 도시한 것으로 여기서 원원과 검은원은 시험결과를 도시한 것이고 점선은 단일경화구성모델을 이용한 예측결과를 도시한 것이다. 우선 그림에 도시한 시험결과를 설명하면 이들은 구속압이 1kg/cm^2 인 상태에서 연직응력 σ_v 가 수평재하장치에 의한 수평응력 σ_h 보다 큰 C-4, 5, 6 및 7과 중간주응력과 최소주응력을 동일하게 하여 삼축압축시험을 실시한 C-2의 결과를 도시한 것이다. 그림에서 검은원과 숫자는 파괴가 발생한 위치와 파괴시 b 값을 나타내고 있다. $b=0$ 의 삼축압축시험에 해당하는 C-2와 b 가 0.13인 C-4에서는 축변형률이 증가할수록 중간주응력방향으로 인장변형이 발생하고 있으나 b 가 이 보다 큰 나머지 실험에서는 모두 중간주응력방향으로 압축변형이 일어나고 있다. b 가 0.3인 C-5에서는 중간주응력방향의 변형이 0에 가까워 거의 평면변형률 상태를 나타내고 있다. 그리고 각 시험에서 파괴점의 위치는 응력비 b 가 적을수록 축변형률이 큰값에서 발생하고 있음을 볼 수 있으며 초기간극비가 다른 시험들에 비해 큰 C-4는 파괴시의 축변형률값이 특히 크게 나타나고 있다. 또한 이들 파괴점 위치를 서로 연결하여 보면 초기간극비가 조금 큰 C-4를 제외하고는 그림에서 이점쇄선으로 나타낸 바와 같이 대체적으로 일직선으로 나타는 경향을 보이고 있다.

시험결과를 단일경화구성모델에 의한 예측치와 비교하여 보면 파괴이전까지는 대체적으로 좋은 일치를 보이는 것으로 나타나고 있다. 그러나 b 가 0.3인 C-5 시험에서 실험결과에 의한 중간주변형률은 평면변형조건에서 약간의 압축변형률을 보인 반면 예측치에서는 약간 인장되는 경향을 보이는 것으로 나타나고 있으며, C-4 시험에서는 예측에 의한 중간주변형률의 압축경향이 조금 적게 발생하고 있다. 한편 파괴가 발생한 이후에는 시험치와 예측치가

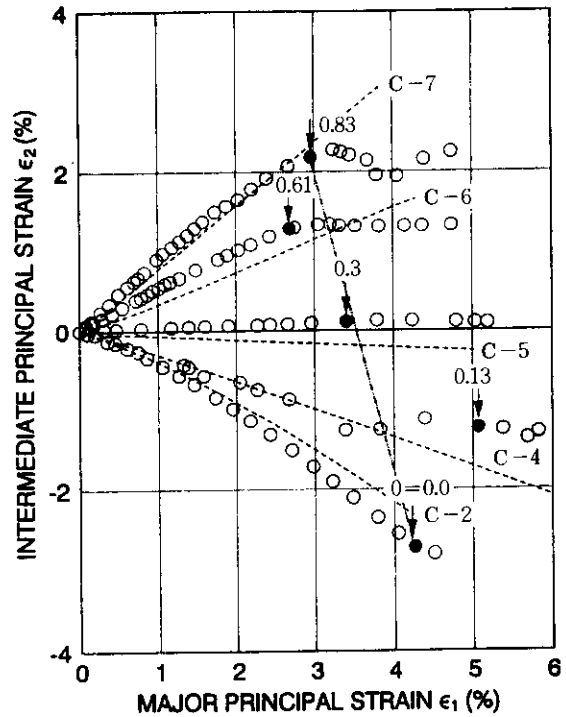


그림 1. Relation between ϵ_1 and ϵ_2

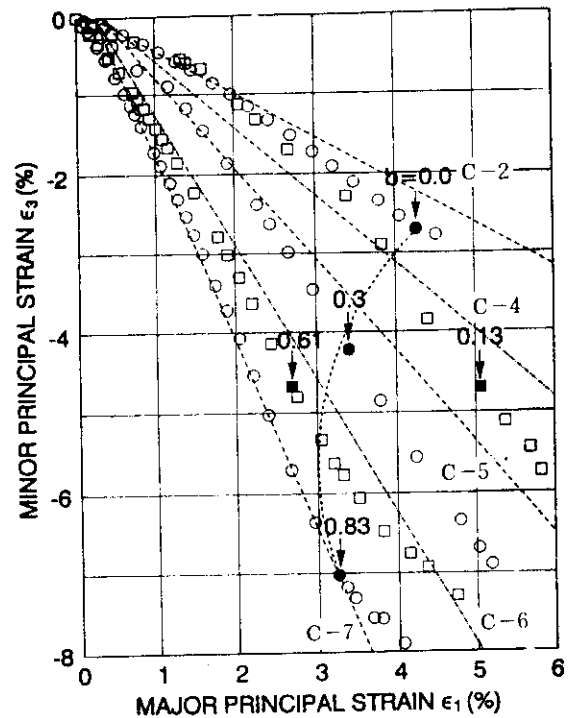


그림 2. Relation between ϵ_1 and ϵ_3

많은 차이가 나는 것으로 나타나고 있는데 이는 입방체형삼축기구의 중간주응력 작용장치가 응력제어에 의해서 이루어진 때문이다.

그림2는 C-4, 5, 6 및 7에 대한 최대주변형률 ϵ_1 과 최소주변형률 ϵ_3 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 원과 사각형으로 도시한 것은 그림1에서와 같이 시험결과를 도시한 것이고 검은원과 검은사각형은 파괴점을 도시한 것이다. 여기서는 응력비 b 가 증가할 수록 최소주응력 방향의 압축변형이 많이 발생하고 있음을 볼 수 있으며 파괴가 일어나는 ϵ_1 에 대한 ϵ_3 의 위치도 밀도가 약간 느슨한 C-2를 제외하고는 약간의 포물선 형태를 이루며 ϵ_3 의 압축량이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 예측결과와의 비교에서 점선의 포물선으로 연결한 파괴가 발생하는 지점 이전에는 좋은 일치성을 보이고 있으나 파괴이후에는 그림1에서와 같이 약간의 차이를 보이고 있다. 또한 C-5와 6에 대한 시험에서는 예측에 의한 최소주변형률의 인장경향이 조금씩 발생하고 있음을 볼 수 있다.

5. 강도특성

5.1 내부 마찰각

그림3은 b 값의 변화에 따른 내부마찰각 ϕ 의 변화를 도시한 것이다. 흙의 내부마찰각은 Mohr-Coulomb의 기준에 의하여 식(1)과 같이 계산된다.

$$\phi = \sin^{-1} \frac{(\sigma_1/\sigma_3) - 1}{(\sigma_1/\sigma_3) + 1} \quad (1)$$

중간주응력의 상대적인 크기를 설명하기 위해 응력비 b 에 따라 모래의 내부마찰각의 시험결과를 그림에서 사각형으로 도시하였다. 그리고 그림에서 실선은 등방단일경화 모델에 의해 η_1 이 44.53이고 m 이 0.1인 파괴선을 나타낸 것이며 이점쇄선은 Matsuoka & Nakai 기준에 의해 k 가 0.76일때의 파괴선을 도시한 것이다. 그림에서 시험결과는 삼축압축시험인 $b=0$ 에서 가장 적은 값을 보이고 있으며 b 가 증가함에

따라 내부마찰각도 증가하고 있다. 그러나 b 가 0.7을 지나 1에 접근할 수록 모래의 내부마찰각이 약간감소하는듯한 느낌을 준다. 이들을 예측결과와 비교하여 보면 우선 Mohr-Coulomb의 파괴기준은 그림에서 도시되지는 않았지만 식(1)에서 보는 바와 같이 흙의 내부마찰각 ϕ 가 중간주응력의 영향은 받지 않고 단지 최대주응력과 최소주응력의 함수인 것으로 주응력비 b 에 무관하게 항상 일정한 값을 갖게되나 시험결과와는 많은 차이가 있다. 그리고 Matsuoka & Nakai 기준에서는 모래의 내부마찰각이 주응력비에 차이를 보이고는 있으나 이 결과는 또한 b 가 0인 삼축압축시험과 b 가 1인 삼축신장시험에서 같은 값을 갖는 것으로 도시되고 있다. 그러나 시험결과에 의하면 이들 이들 내부마찰각 사이에는 약 5° 의 차이가 있는 것으로 나타나고 있다. 그에 반해 단일경화구성모델에서는 시험결과와 예측치가 잘 일치하고 있다. 그리고 이러한 결과는 이미 많은 연구결과에서 발표되었으며 점토에 대한 이전 연구에서도 보고된 바 있다.³⁾⁻⁵⁾

한편 그림1의 결과로부터 평면변형률조건에 해당하는 $b=0.3$ 의 내부마찰각 ϕ_{ps} 를 $b=0$ 의 삼축압축시험에 해당하는 모래의 내부마찰각 ϕ_r 과 비교하여 보면 Lee(1970)에 의해 제안된 $\phi_{ps} \approx 1.1\phi_r$ 의 관계⁷⁾ 보다는 조금 크게 나타났다. 즉 ϕ_{ps} 가 ϕ_r 보다 약 1.14배 큰 값을 갖는 것으로 나타나고 있다.

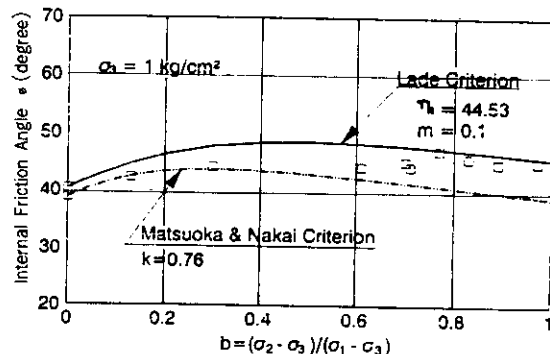


그림3. $b-\phi$ Diagram by cubical triaxial tests internal

5. 2 파괴기준과의 비교

그림 4는 제1응력불변량 I_1 이 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우의 정팔면체평면에 입방체형삼축시험으로부터 구한 모래의 파괴강도를 등방단일경화구성 모델에 의한 파괴기준, Mohr-Coulomb의 파괴기준 및 Matsuoka & Nakai 기준을 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 일점쇄선은 Mohr-Coulomb의 기준을 나타낸 것이며 이점쇄선은 Matsuoka & Nakai 기준을 그리고 실선은 Lade의 파괴기준을 도시한 것이다. 여기서도 파괴정수 m 과 η_1 은 그림3에서와 같이 각각 0.1과 44.53이다. 이 그림에 의하면 삼축압축시험에서는 시험결과치와 파괴기준에 의한 예측치가 잘 일치하고 있으나 b 가 0.13~0.61의 경우는 시험치가 Mohr-Coulomb의 기준과 등방단일경화구성모델의 중간정도의 지점에 위치하고 있고 삼축신장시험에 해당하는 b 가 1에 접근할 수록 등방단일경화구성모델에 접근하고 있음을 볼 수 있다. 즉 Mohr-Coulomb

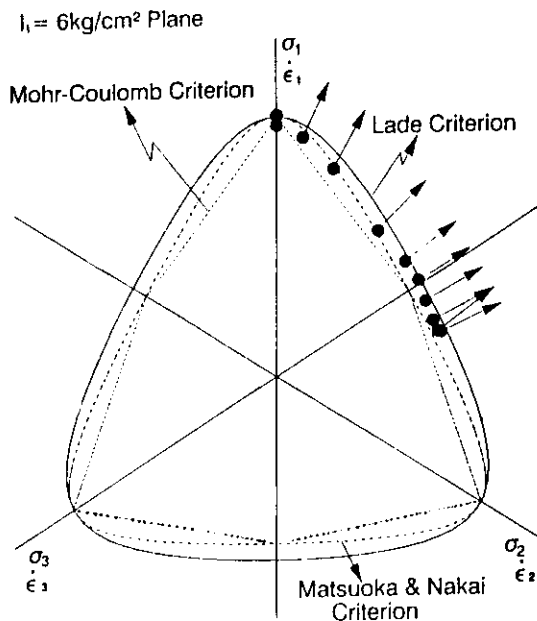


그림 4. Plastic strain incremental vectors at failure on octahedral plane

기준은 b 가 0보다 큰 시험의 경우 전단강도를 과소평가할 우려가 있다고 할 수 있다.

한편 정팔면체평면에 투영한 파괴점에서의 소성변형률증분의 방향을 살펴보면 소성변형률증분의 방향은 원점에서부터의 응력의 방향과 일치하지 않고 있으며 등방단일경화구성모델에 의한 파괴면과 직교하는 경향을 보이는 것으로 나타나고 있다.

6. 응력경로에 따른 소성변형률 증분벡터

그림 5(a)-(b)는 각 시험의 응력경로와 각 응력상태에서의 소성변형률증분벡터의 방향을 정팔면체평면에 도시한 결과이다. 그림(a)에서는 응력상태에 따른 소성포텐셜함수를 점선으로 도시하여 나타내었으며 그림(b)에서는 응력상태에 대한 항복면을 등방단일경화모델을 이용하여 도시하였다. 그리고 여기서 실선은 η_1 이 44.53일때의 파괴면을 나타낸 것이다. 그림(a)에서 응력상태에 따른 소성포텐셜함수의 모양은 초기 원형에 가까운 모양을 보이다 응력상태가 파괴시에 접근할 수록 둥근 삼각형모양으로 변화하고 파괴면에 근접하여서는 각주응력의 양의 방향에서는 그면이 파괴면내부에 위치하고 있으나 각주응력의 음의 방향에서는 파괴면 바깥에 위치함을 볼 수 있다.

그러나 응력상태에 따른 항복면은 낮은 응력상태에서는 소성포텐셜면과 유사한 원형에 가까운 형태를 보이다 응력상태가 파괴에 접근할 수록 파괴면과 비슷한 형태로 변하여 감을 볼 수 있다. 그러나 소성포텐셜면은 파괴에 근접하여 일부가 파괴면 바깥에서 형성된 반면 항복면은 파괴면 내부에만 형성되고 있다. 소성포텐셜면상에 각 응력경로별로 도시한 소성변형률증분벡터의 시험치와 예측치를 비교하여 보면 등방단일경화구성모델에 의한 예측결과가 시험결과와 좋은 일치를 보이는 것으로 나타나고 있다. 따라서, 소성변형률증분벡터는 각 응력 단계의 소성포텐셜면에 수직방향으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

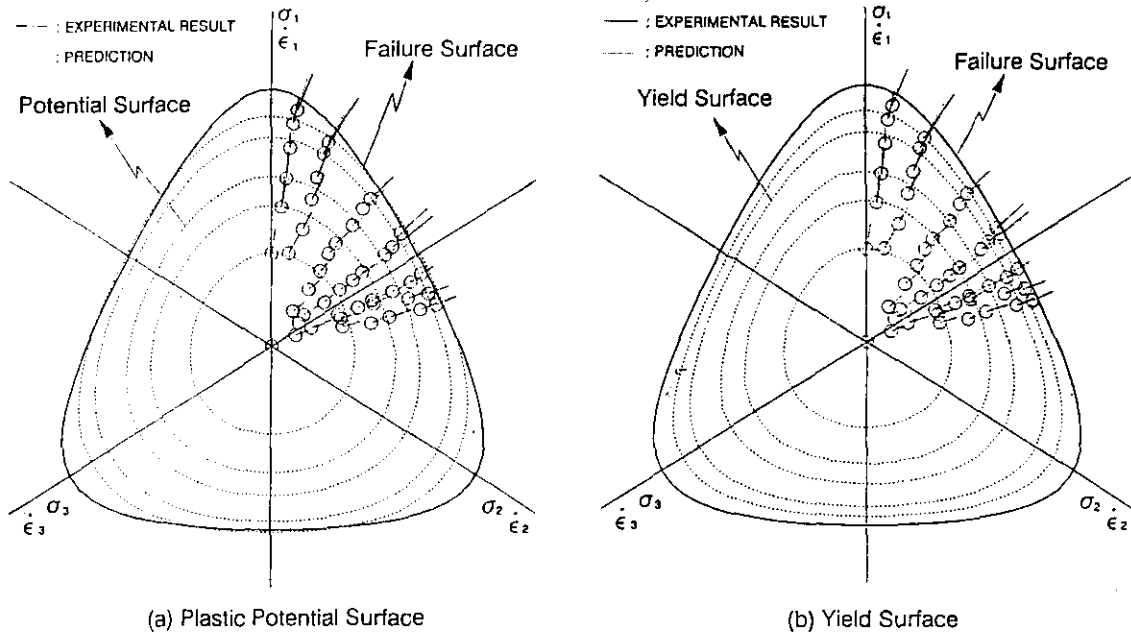


그림 5. Stress path superimposed plastic strain incremental vector on octahedral plane

7. 결 론

중간주응력의 효과를 고려할 수 있는 입방체형삼축시험이 12회 실시되었다. 그리고 이들 시험결과로부터 다음의 결과를 얻었다.

1. 모래의 내부마찰각은 중간주응력에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며 그 변화를 주응력비 b 의 관계로 나타내었을 시 주응력비 b 가 증가함에 따라 내부마찰각도 증가하다 b 가 1부근에 접근하면 조금 감소되는 경향을 보이고 있다.
2. 각 시험의 파괴강도는 Lade의 파괴면과 좋은 일치를 보이고 있으며 Mohr-Coulomb 및 Matsuoka & Nakai규준과는 $b=1$ (삼축신랑) 부근에서는 약간의 차이가 있는 것으로 나타나고 있다.
3. b 가 0.3인 지점에서 평면변형률조건에 해당하는 현상을 관찰할 수 있었으며 이때의 내부마찰각은 삼축압축일때의 내부마찰각 보다 약 1.14배 정도 크게 나타나고 있다.

4. 소성 포텐셜면과 항복면을 정팔면체평면에서 비교한 결과, 이들은 모두 응력의 초기단계에서는 원형에 가까운 형태를 보이고 있으며 응력경로가 파괴면에 접근함에 따라 둥근삼각형의 모양으로 변화하는 경향을 보이고 있다. 그리고 파괴면 가까운 지점에서는 소성 포텐셜면이 주응력축의 음의방향에서 파괴면 바깥으로 형성되고 있으며, 항복면은 파괴면에 가까이 접근할수록 파괴면 내부에서 파괴면과 비슷한 형태로 변하여 감을 알 수 있었다.
5. 소성변형률 증분벡터는 각 응력단계의 소성포텐셜면에 수직방향으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

감사의 말

본 논문은 한국과학재단의 지원에 의하여 실시된 1992년도 한·미 국제공동연구 결과의 일부분을 밝히며 동재단과 미국과학재단인 NSF에 감사드리는 바이다. 또한 본 연구의 미국측 연구자인 The Johns Hopkins대학의 Poul Lade교수에게도 연구상 여러 가지 도움에 대하여 감사 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 남정만(1994). "대응력반전시 모래의 거동에 관한 연구", 제54회 중앙대학교 박사학위논문.
2. 남정만, 홍원표(1993) "입방체형삼축시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동", 한국지반공학회지, 제9권, 제4호, pp.83-92.
3. 洪元杓(1988), "비틀림 剪斷試驗에 의한 Ko-壓密粘土의 舉動", 大韓土木學會論文集, 第8卷 第1號, pp.151-157.
4. 洪元杓(1988), "Ko-壓密粘土의 主應力回轉效果", 大韓土木學會論文集, 第8卷 第1號, pp.159-164.
5. 洪元杓(1988), "中間主應力이 過壓密粘土의 舉動에 미치는 영향", 大韓土木學會論文集, 第8卷 第2號, pp.99-107.
6. 홍원표, 남정만(1994), "등방단일경화구성모델에 의한 모래의 3차원거동 예측", 한국지반공학회, 제10권, 제1호, pp.103-116.
7. Bowles, J.E.(1982), "Foundation Analysis and Design", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, pp.134-135.
8. Desai, C.S. and Faruque, M.O.(1984), "Constitutive Model for Geological Materials." *Journal of Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 110, Sept.
9. Dimaggio, F.L. and Sandler, I.S. (1971), "Mathematical Model for Granular Soil", *Journal of the Engg Mechanics Division*. ASCE, Vol. 97, No. EM3, pp.935-950.
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), pp.127-140.
11. 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.
12. Kim, M.K., and Lade, P.V.(1988), "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials I. : Plastic Potential Function." *Computers and Geotechnics* 5., pp.307-324.
13. Lade, P.V.(1977), "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces", *International Journal of Solids and Structures*, Pergamon Press, Inc., New York, N.Y., Vol.13, pp.1019-1035.
14. Lade, P.V.(1988), "Model and Parameter for the Elastic Behavior of Soils," *Proc. 6th. Int. Conf. Numerical Methods Geomechanics*, Innsbuk, Austria, pp.359-364.
15. 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
16. Lade, P.V. and Kim, M.K.(1988a), "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, II, Yield Criterion and Plastic Work Contours," *Computers and Geotechnics*, Vol.6, p13-29.
17. Lade, P.V. and Kim, M.K.(1988b). "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials III. : Comparisons with Experimental Data." *Computers and Geotechnics*, pp.31-47.
18. Matsuoka, H. and Nakai, T.(1974), "Stress-Deformation and Strength Characteristics of Soil under Three Different Principal Stresses", *Proc. JSCE*, No. 232, pp59-70.
19. 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. MSS9119272*, UCLA-ENG-93-24, April.
20. Prabucki, M.J. and Lade, P.V.(1990), "Triaxial Compression Tests on Santa Monica Beach Sand. 1" *Report PL-CDT-SMB-1*, UCLA-ENG-91-03, Aug.

(접수일자 1994. 8. 4)