

비틀림전단시험에 의한 모래의 강도특성

Strength Characteristics of Sand in Torsion Shear Tests

남 정 만*¹

Nam, Jung-Man

홍 원 표*²

Hong, Won-Pyo

한 중 근*³

Han, Jung-Geun

Abstract

A series of torsion shear tests were performed to study the strength characteristics of sand under various stress paths during rotation of principal stress. These results can be classified into two groups of 25cm and 40cm according to the height of specimen, and torque was applied only in the clockwise direction. In this study, strength characteristics of sand for the principal stress ratio in torsion shear tests were investigated and their results were compared with Lade's failure criterion. And the effect for specimen height was considered. From the results of tests, friction angle of sand was affected by the deviatoric principal stress ratio $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. Failure strength of sand was determined not by the stress paths but by the current stress state. From comparison of specimens on 25cm and 40cm height, effect of end restraint could not be found. In the test where b is over 0.5 due to extension force, necking phenomenon by the strain localization was found.

요 지

주응력회전시 모래의 강도특성을 연구하기 위하여 일련의 응력경로에 대해 시험을 실시하였다. 이들 결과는 공시체의 높이에 따라 25cm와 40cm로 분류할 수 있으며 공시체에 작용된 토크(Torque)는 시계방향으로만 작용시켰다. 본 연구에서는 비틀림전단시험시 주응력비에 대한 모래의 강도특성이 조사되었고 그 결과를 Lade의 파괴기준과 비교하여 보았다. 그리고 공시체높이에 대한 영향을 고려하였다. 이들 시험결과로부터 모래의 내부마찰각은 축차주응력비 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 모래의 파괴강도는 응력경로에 영향을 받지 않고 현재의 응력상태에 의해 결정되어지며 25cm와 40cm 높이의 공시체에 대한 비교로부터

*¹ 정희원, 제주대학교 해양과학대학 해양토목공학과 조교수

*² 정희원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수

*³ 정희원, 중앙대학교 기술과학연구소 선임연구원

단부구속의 영향은 발견할 수 없었다. 그리고 신장력이 작용된 $b=0.5$ 이상인 시험에서는 변형률 국부현상에 의한 Necking 현상이 발견되었다.

Keywords : Torsion shear test, Principal stress rotation, Plastic strain incremental vector, Stress path, Stress level

1. 서론

정지상태의 지반을 굴착할 경우 굴착이 진행되어 감에 따라 주응력방향에 변화가 발생하고 하중조건이 제하(unloading)에서 재하(load-ing)상태로 변화하여 최초의 항복면을 지나 결국 파괴로 접근하게 된다. 이와같은 지반상태의 흙의 거동을 분석하기 위한 실내시험 중 주

응력방향의 회전효과나 중간주응력의 영향을 고려할 수 있는 시험기인 비틀림전단시험기나 입방체형삼축시험기등에 의한 일련의 연구가 진행되어 오고 있다(남정만 등, 1993a,b; 홍원표, 1988a,b; 홍원표, 1994). 비틀림전단시험기에 대해서는 이미 국내외에 소개된 바 있으며(홍원표, 1988; Hight 등, 1983; Lade, 1981) 또한 비틀림전단시험기를 이용하여 모래에 대

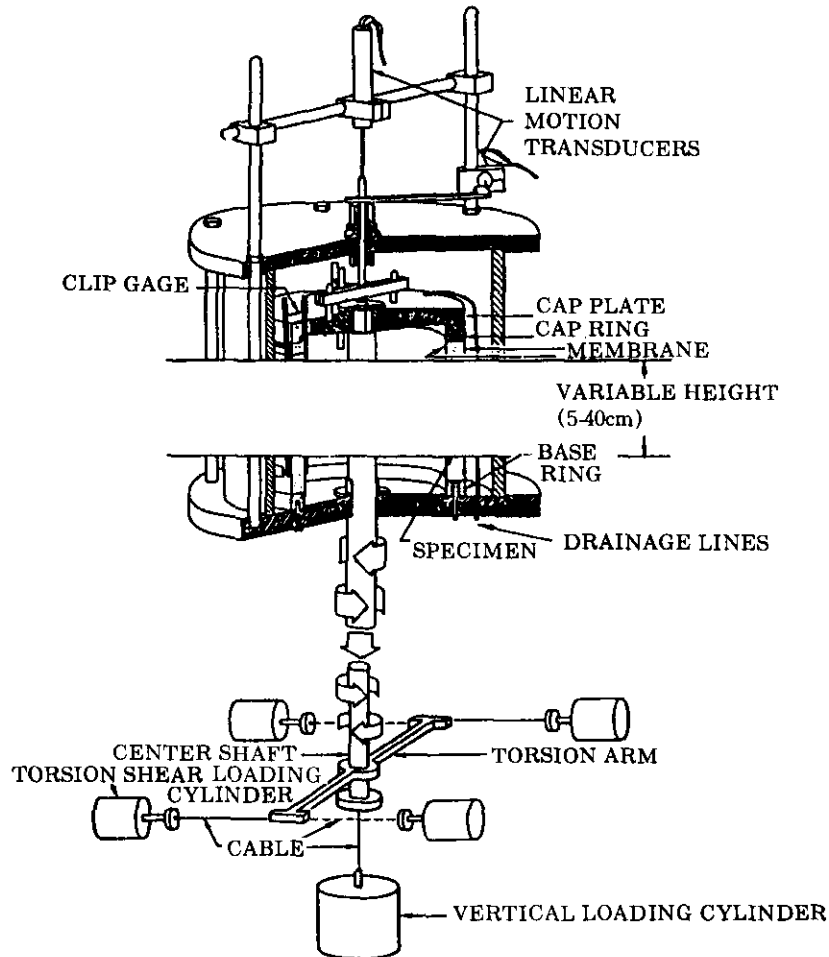


그림 1. Torsion shear apparatus

한 응력-변형률사이의 거동과 연직하중 및 전단력을 동시에 작용시켰을 경우 응력-변형률 거동에 관한 연구도 소개된 바 있다(남정만 등, 1993b).

따라서, 본 논문에서는 비틀림전단시험에 의한 모래의 강도특성에 대해 알아 보고자 한다. 모래의 거동을 강도특성면에서 고찰하기 위하여 점토에 대한 연구(홍원표, 1988a,b; Hong 등, 1989a,b)의 연장으로 모래에 대해 20회의 비틀림전단시험을 배수상태로 실시하였으며 이들 시험결과를 이용하여 응력비에 따른 응력-변형률거동과 모래의 강도특성을 등방단일경화모델에 적용시켜보고자 한다. 또한 공시체의 높이가 강도특성에 미치는 영향과 단부구속의 영향에 의한 변형률국부현상에 관하여서도 검토하고자 한다.

2. 비틀림전단시험

본 연구에 사용된 비틀림전단시험기는 그림 1과 같다. 시험에 사용된 중공원통형 공시체는 공시체의 내측면과 외측면에 구속측압을 가하고 공시체의 상하단에 연직하중을 가하여 각각 상이한 세 주응력을 측정할 수 있는 장치로서 본 연구에서 사용한 시험장치는 이미 국내외에서 많이 소개된 바 있다(남정만 등, 1993a; Hong 등, 1989ab; Lade 1981). 따라서, 본 논문에서는 비틀림전단시험기의 시험장치 및 시험방법은 생략하기로 하고 본 장에서는 응력경로에 대해서만 살펴보기로 한다.

본 연구에 사용된 모래에 대한 비틀림전단시험의 공시체는 내경이 18cm이며 외경은 22cm로서 공시체의 두께가 2cm이고 공시체의 높이는 일차적으로 40cm에 대한 시험을 12회 실시하였다. 또한 공시체의 높이에 대한 영향을 고려하기 위한 보충시험으로 높이가 25cm인 공시체에 대하여 비틀림전단시험을 8회 실시하였다.

2.1 사용된 시료

본 연구에 사용된 모래는 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 시료로 결정하였다. 한편 이 모래의 광물구성을 살펴 보면 석영과 장석이 각각 약 45%씩 차지하여 흙구성의 주류를 이루고 있으며 자철광이 약 8%, 그리고 잔여광물 2% 정도로 구성되어 있다. 또한 균등계수는 1.58, D_{50} 은 0.265mm이고 비중은 2.659이며 최대 간극비는 0.91, 최소간극비는 0.58이다. 그리고 본 실험은 Medium Dense Sand에 관해 실시하였으며 이를 위해 간극비가 0.68인 상대밀도 70%의 공시체를 제작하였다.

2.2 응력경로

모래에 대한 주응력방향의 회전효과를 고찰하기 위하여, 토크(Torque)를 시계방향으로 작용시킨 20회의 비틀림 전단시험을 배수상태로 실시하였다. 여기서 사용된 좌표계는 그림 2에서와 같이 연직응력을 σ_v 로 하고 공시체의 연직면에 수직으로 작용하는 수평응력을 σ_h 로 하여 공시체의 원주방향으로 작용하는 힘을 σ_θ 로 하는 원통형좌표계를 사용하였다. 시험에 사용된 응력경로는 우선 가장 기본적인 경로로 그림 3(a)에 나타나 있는 Test No.3을 생각할 수 있다. 이는 현재의 지반상태로 생각할 수 있는 Ko상태에서 연직응력을 일정하게 유지하고 단지 전단력만을 작용시킨 것이다. 이 시험을 기준으로 Ko상태인 점을 경유하는 6회의 시험을 Test No.1에서 No.6까지로 하였으며 Ko상태를 경유하지 않는 2회의 시험을 No.7과 8로 하여 압축인 부분에서 8회의 비틀림 전단시험을 실시하였다. 그리고 연직하중을 가하지 않고 단지 전단력만을 가한 Test No.9와 연직하중이 인장인 부분에서 토크를 시계방향으로 작용시킨 Test No.10에서 No.12를 포함하였고

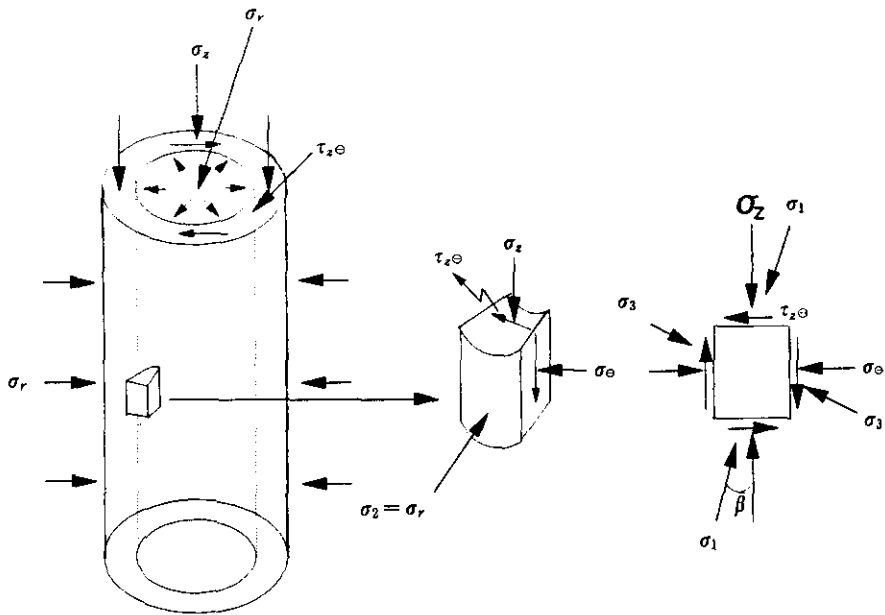


그림 2. Stress components cartesian coordinate system for hollow cylinder specimen

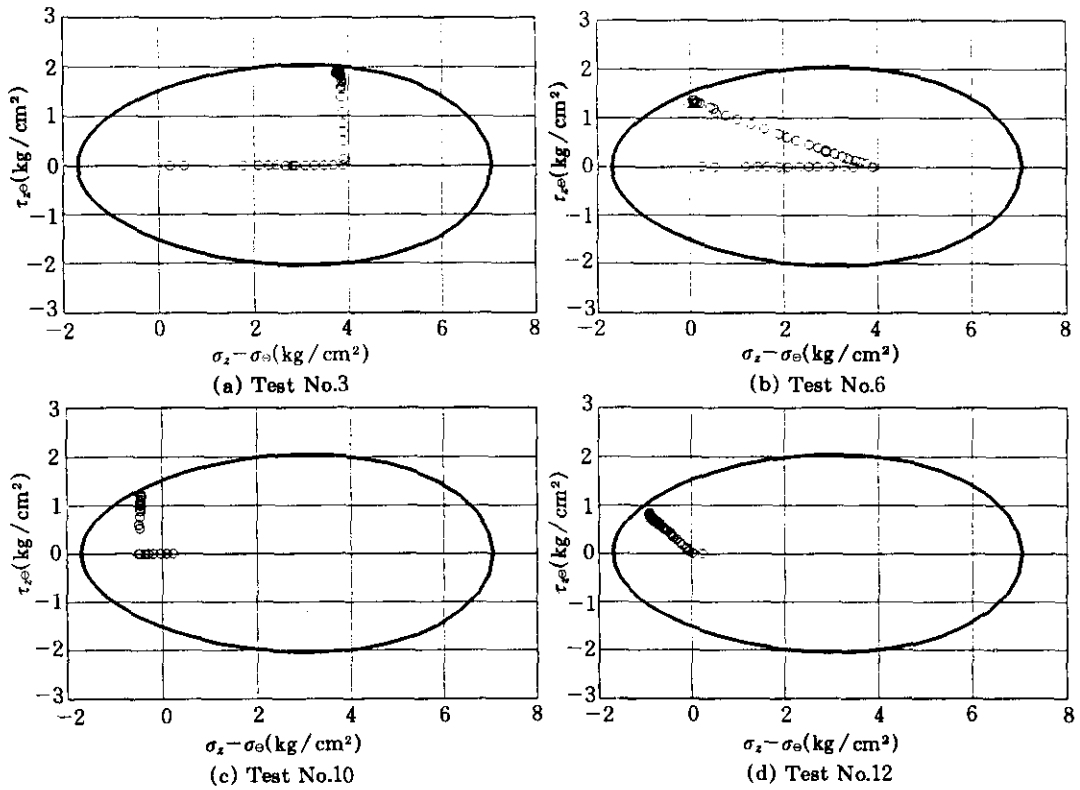


그림 3. Stress path

공시체의 높이가 40cm인 경우에 대해서는 총 12회의 비틀림 전단시험이 실시되었다. 여기서 그림 3(b), 그림 3(c) 그리고 그림3(d)는 Test No.6, Test No.10 그리고 No.12의 각각의 응력경로를 나타낸 것이다.

한편 Test No.13에서 No.20까지는 공시체의 높이를 25cm로 감소시켜 두 공시체의 강도비교와 비틀림전단시험에서 단부구속의 영향을 고려하기 위하여 실시한 시험이다. 여기서 응력경로는 연직응력이 압축인 부분에서 3회 실시하였으며 Test No.9에서와 같이 연직응력을 가하지 않고 토르크만을 작용시킨 No.16과 연직응력이 인장인 상태에서 4회의 시험을 포함하여 공시체의 높이가 25cm인 시험을 8회 실시하였다. 이상의 각 응력경로에 대한 모래의

내부마찰각과 파괴시 축차응력비 b 및 공시체의 높이 등을 나타내는 시험계획을 나타내어 보면 표 1과 같다.

3. 파괴규준

일반적으로 시간에 의한 영향을 고려하지 않은 많은 구성모델은 그 거동을 해석하기 위하여 실험에 의한 결과와 탄소성이론을 기본으로 하고 있다. 본 연구에는 모래, 점토, 콘크리트, 암등과 같은 마찰물질에 대해 사용 가능한 흙의 구성식인 Lade(1990)에 의한 등방단일경화 구성모델(isotropic single hardening constitutive model)을 이용하였다. 이 모델은 일경(non-associated flow rule)을 사용하는 것이 특징이다(Kim 등, 1988; Lade 등 1988a,b).

(non-associated flow rule)을 사용하는 것이 특징이다(Kim 등, 1988; Lade 등 1988a,b).

어떤 물체에 하중이 작용하여 변형이 발생하면 시간에 의한 영향을 고려하지 않는 경우 변형을 탄성변형과 소성변형으로 분류하여 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (1)$$

이 모델은 식(1)에서 탄성거동은 Hooke의 법칙을 따르고, 소성거동은 파괴규준과 비관련 흐름법칙 및 일경화에 따른 항복규준등으로 이를 분류하여 응력불변량의 향으로 나타낸다. 여기서 응력불변량이란 제1응력불변량, 제2응력불변량 및 제3응력불변량으로 구분할 수 있다. 한편, Lade는 마찰물질에 대한 재료의 3차원 파괴규준은 곡선형태의 파괴포락선을 가진다고 하였다. 이 규준은 제1 및 제3응력불변량의 향으로 나타내어 다음과 같이 제안되었다.

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27\right) \left(\frac{I_1}{P_s}\right)^m = \eta \quad (2)$$

여기서, P_s 는 응력의 단위로 표시된 대기압이며, η 과 m 은 재료에 따라 결정되는 토질매개변수이다. 위 식으로 부터 얻어지는 파괴면은 주응력공간상에서 응력축의 원점에서 정점

Table 1. Test program

Test No.	Specimen Height (cm)	Friction Angle(ϕ)	b value in failure point
1	40	43.507	0.064
2	40	41.933	0.053
3	40	43.793	0.150
4	40	44.565	0.217
5	40	45.390	0.300
6	40	41.887	0.489
7	40	42.363	0.264
8	40	45.067	0.271
9	40	43.271	0.492
10	40	44.747	0.592
11	40	38.714	0.771
12	40	38.582	0.740
13	25	44.004	0.091
14	25	46.643	0.191
15	25	45.906	0.277
16	25	45.205	0.499
17	25	42.173	0.587
18	25	41.403	0.656
19	25	39.528	0.839
20	25	41.200	0.879

을 가지는 비대칭 탄알모양이며, 정점에서의 각도는 삼축압축시험과 같은 간단한 시험으로 결정되고, η 의 값에 따라 증가한다. 이 파괴면은 정수압축에 대하여 볼록한 형태를 가지고 곡면의 곡률은 m 값에 따라 증가한다.

식(2)에 의해 제시된 파괴규준은 그림 4에 나타난 바와 같이 양면대수지에 파괴시의 $(I_1^3/I_3 - 27)$ 과 (P_s/I_1) 의 관계를 각각 y 축과 x 축의 값으로 도시함으로써 구할 수 있다. 여기서 사용된 실험치는 삼축압축시험과 입방체형 삼축시험 및 비틀림전단시험기로부터 실시한 삼축압축시험의 결과치를 포함한 것으로 η 과 m 은 이 값들을 회기분석하여 구한 직선의 절편과 기울기로서 각각 44.53과 0.1로 결정하였다.

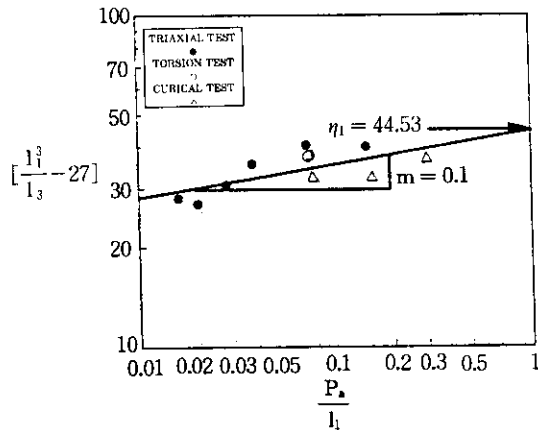


그림 4. Determination η_1 and m for failure criterion

4. 강도특성

4.1 파괴규준과의 비교

높이가 40cm인 긴 공시체에 대한 파괴점을 구속압 σ_r 이 2kg/cm^2 인 Torsion평면에 도시하면 그림 5와 같다. 여기서 실선은 η_1 이 44.53이고 m 이 0.1일때의 등방일정화 모델의 파괴면을 나타낸 것이고 환원은 실험결과로부터 구한 파괴점을 도시한 것이다. 그림에서 이론치에 의한 파괴면과 시험치는 대체적으로 잘

일치하는 경향을 보이고 있다. 이들 결과를 세부적으로 살펴보면 삼축압축시험에 해당하는 $b=0$ 의 시험에서는 실험결과치가 예측파괴면 보다 조금 커 약간의 차이를 보이고 있고 그의 다른 3개의 시험에서도 시험치가 예측파괴면 보다 조금 큰 값을 보이나 삼축압축에 해당하는 시험 보다는 훨씬 근소한 차이를 보이고 있다. 그리고 나머지 다른 시험에서는 시험치가 예측파괴면 보다 적게 산정되고 있으나 이는 미세한 차이로 볼 수 있으며 이를 축차응력이 압축인 경우와 인장인 경우의 두 가지로 분류하여 파괴면과 비교하면 압축에서는 파괴강도가 예측치와 차이가 미세하여 좋은 일치를 보이고 있으나 인장부분에서는 그 차이가 압축에서 보다 조금 더 많이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 한편 응력경로의 종착점이 비슷한 No.1과 No.2 및 No.5,7,8, No.6과 9 그리고 No.11과 12의 결과를 비교하여 보면 각 응력경로에 따른 파괴강도는 거의 같은 값을 보이고 있다. 즉 모래의 파괴강도는 응력경로에 영향을 받지 않고, 현재의 응력상태에 의해 파괴강도가 결정되어짐을 알 수 있다.

비틀림전단시험에서 내부마찰각 ϕ 와 주응력 비 b 는 식(3) 및 (4)과 같다.

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \quad (3)$$

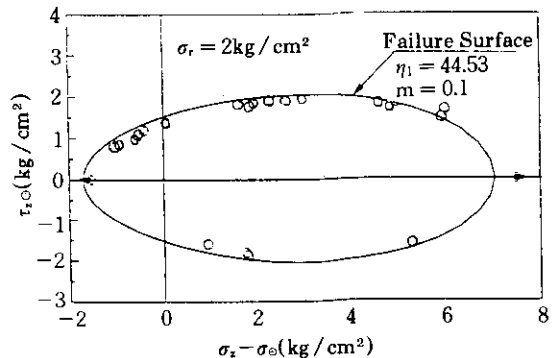


그림 5. Stress points at failure and failure surface (Fall Specimen)

$$= \sin^{-1} \left(\frac{2\sqrt{(\sigma_x - \sigma_\theta)^2 / 4 + \tau_{x\theta}^2}}{(\sigma_x + \sigma_\theta)} \right) \quad (3)$$

$$b = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (4)$$

$$= \sin^2 \beta$$

여기서 β 는 그림 9에서와 같이 최대주응력 방향이 연직축과 이루는 각을 말한다.

4.2 유효내부마찰각

과괴시의 b 값에 대한 내부마찰각 ϕ 의 변화를 도식한 그림 6은 b 의 값이 증가함에 따라 내부마찰각도 증가하다 축차응력에 인장력이 작용하는 b 가 0.5 이상에서 부터는 내부마찰각이 감소하는 경향을 보여 b 가 1인 삼축신장시험에서는 b 가 0인 삼축압축시험결과 보다 적은 결과를 보이고 있다. 그러나 보편적인 경향을 따르면 삼축시험에서 인장에서의 강도가 압축에서의 강도보다 조금 큰 값을 보이는 것으로 나타나고 있다(Lade, 1982). 그림 7은 Lade 등

Table 2. Undrained strength anisotropy of loose Ham River Sand(Hight 등, 1988)

b	α : deg	c_u : kN/m ²	
0	0	78	Triaxial Compression
0.5	0	76	Plane Strain Compression
0.5	45	41	Plane Strain at $\alpha=45^\circ$
1	90	22	Triaxial Extension

* $e_0=0.79$; Shibuya(1985).

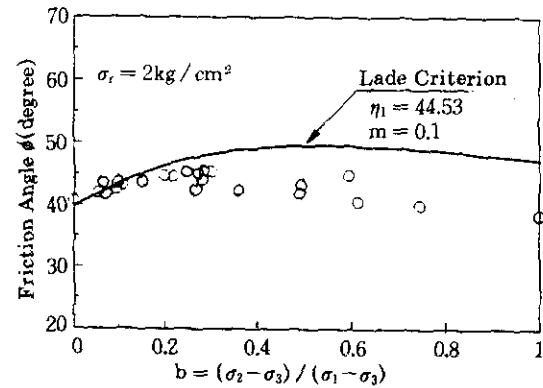
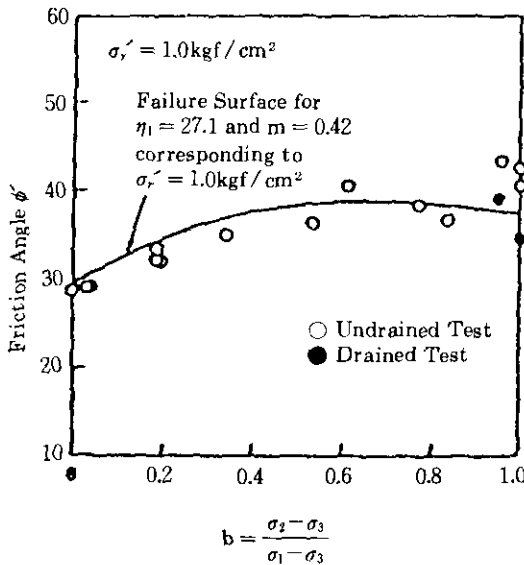
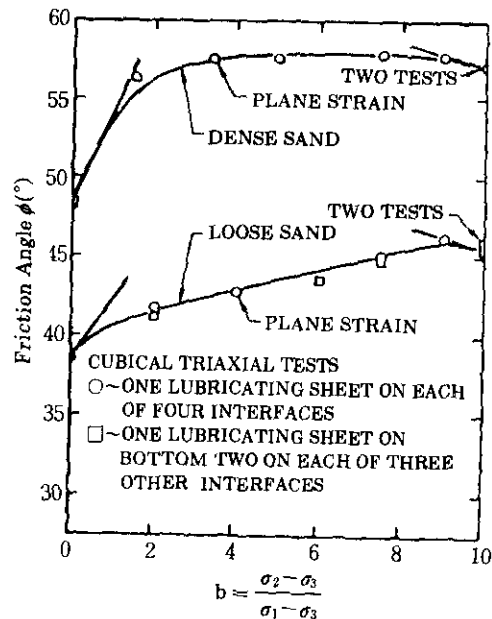


그림 6. $b-\phi$ Diagram for test on tall specimen



(a) Torsion Shear Test on EPK Clay



(b) Cubical Triaxial Test on Dense and Loose Monterey No. 0 Sand

그림 7. Effective friction angle and failure surface shown in $b-\phi$ diagram

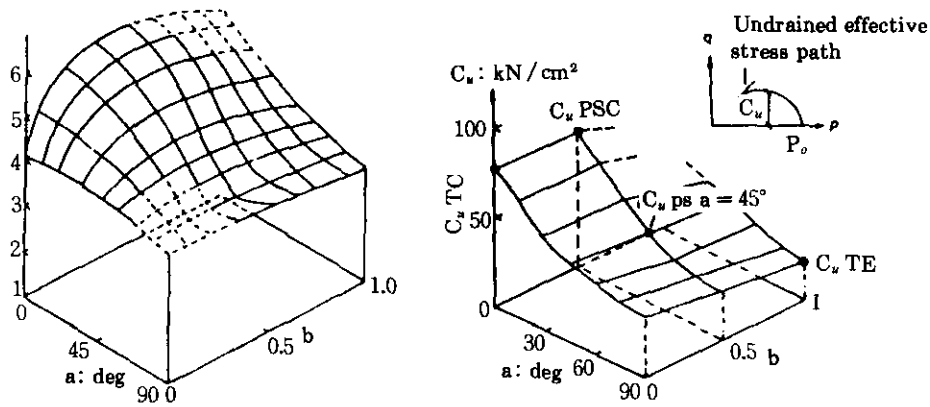


그림 8. Surface showing the variation in (a) $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$
(b) c_u with b and a ($P_0=200\text{kN}/\text{M}^2$) diagram

(1973)과 Hong 등(1989)이 실시한 모래와 점토에 대한 내부마찰각을 응력비에 따라 도시한 것으로 흙의 내부 마찰각은 응력비 b 의 증가에 따라 조금씩 증가하다 b 가 1에 가까운 지점에서 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 삼축압축에서의 시험결과보다 삼축신장에서 더 높은 값을 보이므로 그림 6과는 다른 경향을 보이고 있다. 그러나 Hight 등 (1988)의 보고에 의하면 그림 8과 표 2에서 보는 바와 같이 삼축압축에서의 내부마찰각이 삼축신장에서 보다 크게 나오는 경우도 간혹 보고되고 있다.

4.3 고찰

본 연구에서는 이러한 모래에서 응력비에 따른 내부마찰각의 영향을 검토를 하기 위해 공시체의 높이가 모래의 내부마찰각에 미치는 영향을 고려하여 Hong 등(1989)에 의해 실시된 점토에 대한 비틀림전단시험시 실시하였던 공시체의 높이 25cm와 같은 높이로 공시체의 높이를 조절하여 비틀림전단시험을 다시 실시하였다. 이러한 짧은 공시체에 대한 고찰은 다음장에서 실시하고자 한다.

본 시험에서는 시험도중 전단파괴면(shear

plane)이 관측되기 시작하는 시점과 시험이 끝난 후 전단파괴면과 이루는 각을 측정하였다. 공시체의 파괴면이 수평면과 이루는 각을 ω 라 하였으며 전단파괴면이 연직축과 이루는 각을 α 로 하고 주응력방향이 연직축과 이루는 각을 β 라 하여 그림 9와 같이 나타내었다. 그림 10은 횡축에 응력비 b 를 두고 종축에 각(deg)을 두어 실험으로 부터 구한 전단파괴면의 각 α 와 식(4)의 β 를 도시하였다. 여기서 주응력축이 연직축과 이루는 각 β 를 실선으로 나타내었으며 α 값을 환원으로 나타내었다. 그림에서 환원은 실선과 일정한 관계를 유지하고 있음을 볼 수 있다. 그림 11은 그림 10의 관계를 고려하여 응력비에 따라 주응력축에 대한 요인 β 와 전단파괴면 ω 를 합하여 그 관계를 도시한 것이다. 여기서 $\beta+\omega$ 는 응력비에 따라 일정한 값을 형성하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이들 결과는 b 가 0에서 0.5 사이에서는 평균값인 66.5 보다 약간 높은 값을 보이고 0.5에서 1 사이에서는 평균 보다 조금 작게 나타나고 있다. 이것은 그림 9의 연직축차응력이 0보다 작은 값 즉 b 가 0에서 1사이의 값에서 내부마찰각이 다른 시험결과 보다 과소산정되는 것과도 관련이 있을 것으로 추측된다.

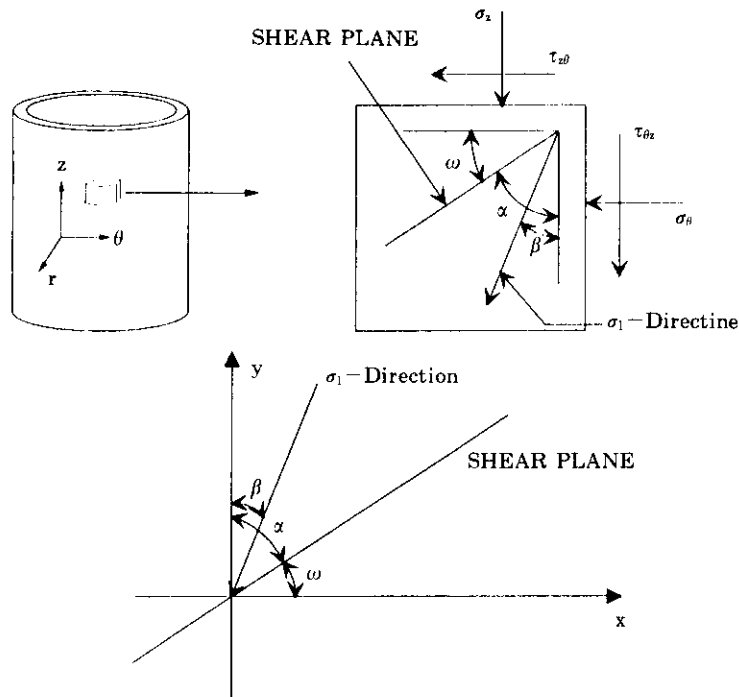


그림 9. Relation between σ_1 direction and shear plane

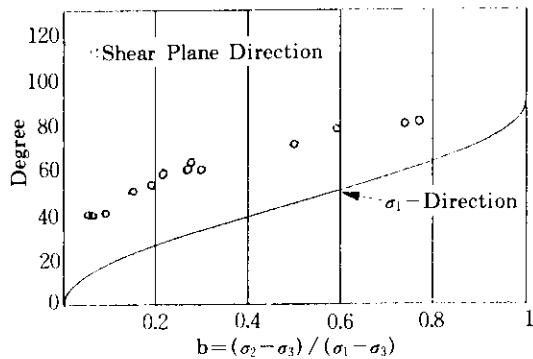


그림 10. Comparison between shear plane and β direction

5. 공시체높이의 영향

앞장의 강도특성에서 이미 고려한 바와 같이 그림 6은 b 의 값이 증가함에 따라 내부마찰각도 증가하다 축차응력에 인장력이 작용하는 b 가 0.5 이상에서 부터는 내부마찰각이 감소하

는 경향을 보여 점토에 대한 그림 7(a)의 Hong 등(1989)의 결과와 다른 경향을 보이고 있다. 그런데 점토의 연구에서는 공시체의 높이를 본시험에서 실시한 40cm 보다 낮은 25cm로 하였다. 따라서 본 장에서는 공시체의 높이가 모래의 강도에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

5.1 원주방향수평응력

비틀림전단시험기의 결과를 분석하기 위해서는 그림 2에서 설명한 바와 같은 6개의 응력 성분이 필요하다. 그러나 실제로 공시체의 원주방향 수평응력 σ_n 는 시험중 측정하여 확인할 수 없는 성분이다. 원주방향 수평응력 σ_n 는 최초전단력이 작용되기 전에는 구속압과 같은 값을 가질 것으로 추정된다. 그러나 공시체의 상하단부에 전단력이 작용되면 원주방향 수평응력 σ_n 는 전단력에 의해 응력상태에 변화가 발생할 것이다.

Geiger & Lade(1979)와 Lade(1981)는 원주방향 수평응력 σ_θ 는 공시체의 높이에 많은 영향을 받는 것으로 보고하였다. 공시체의 직경과 두께는 본 연구에서 사용한 것과 똑같은 각각 20cm와 2cm이고 공시체의 높이는 5cm로 한 비틀림전단시험을 실시하여본 결과 원주방향 수평응력 σ_θ 는 공시체의 높이에 따라 응력 분포가 아주 불균일하게 분포하고 파괴점에서의 구속압에 대한 원주방향 수평응력 σ_θ 의 평균값에 대한 비($\sigma_{\theta,average} / \sigma_{cell}$)는 밀도가 높은 것과 느슨한 Monterey No.0 모래에 대해 각각

약 2.7, 1.8배 발생하는 것으로 보고하였다. 또한 밀도가 느슨한 Santa Monica 해변모래에 대한 비틀림전단시험을 공시체의 직경과 높이는 앞에서와 동일하게 사용하고 높이가 10cm, 40cm인 시험으로 부터 그림 12와 같은 결과를 얻었다. 이 결과에 의하면 그림에서 보는 바와 같이 공시체의 높이가 40cm일 때는 원주방향 수평응력 σ_θ 는 상하단부에서 작용되는 전단응력에 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 공시체의 높이가 직경 보다 큰 1D 이상에서는 영향이 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

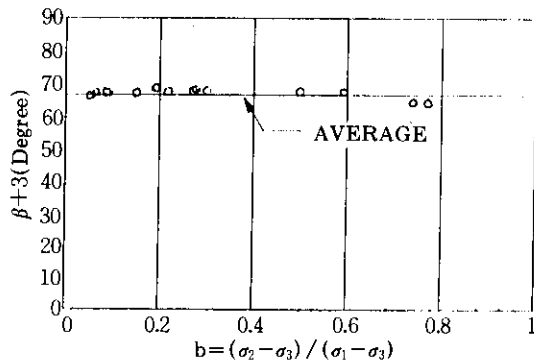


그림 11. b- α Relation

5.2 강도에 미치는 영향

점토에 대한 이전의 연구에서 응력비 b에 관한 내부마찰각 θ 의 결과는 이미 언급한 바와 같이 본 연구결과와 차이가 있음이 보고된 바 있다(홍원표, 1988a). 따라서 본 연구에서는 공시체의 높이가 모래의 강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 공시체의 높이를 점토에서와 같은 25cm로 줄여서 표 1의 No.13에서 No.20과 같이 8회의 비틀림 전단시험을 실시하여 보았다.

그림 13은 공시체의 높이가 40cm와 25cm인 경우 실험결과를 모두 도시한 것이다. 여기서 원형은 공시체의 높이가 40cm에 대한 결과를 나타내고 있으며 삼각형은 25cm에 대한 결과

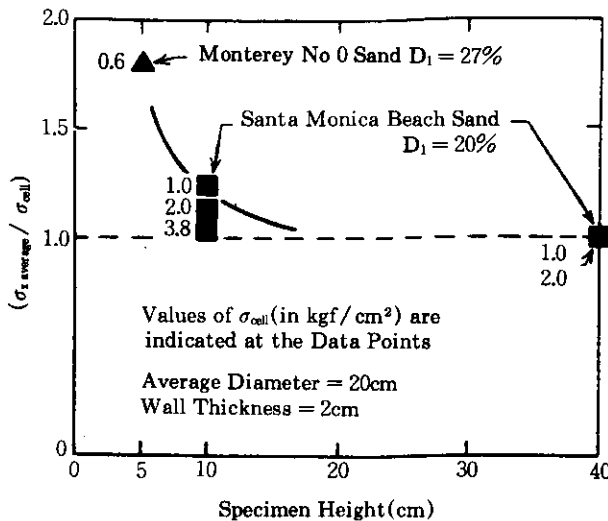


그림 12. Effect of and restraint in torsion shear tests (hollow cylinder specimen)

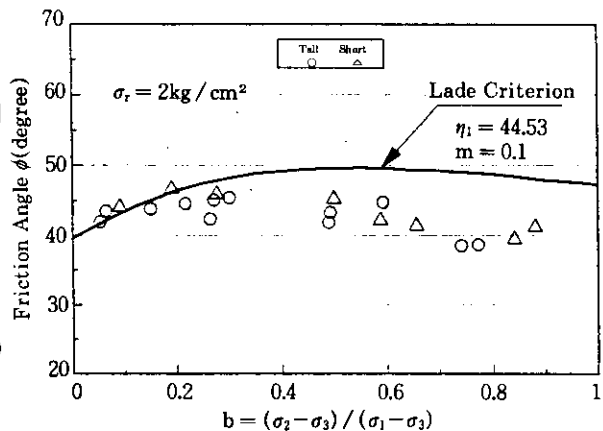


그림 13. b- ϕ diagram for Torsion shear tests

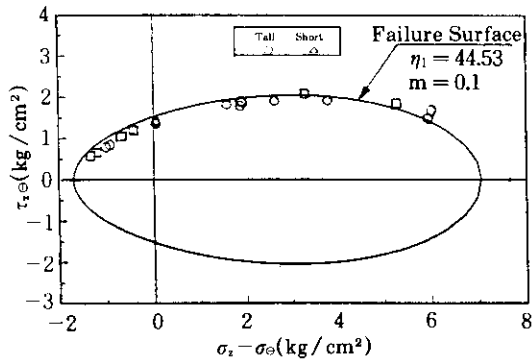


그림 14. Stress points at failure and failure surface(tall and short specimen)

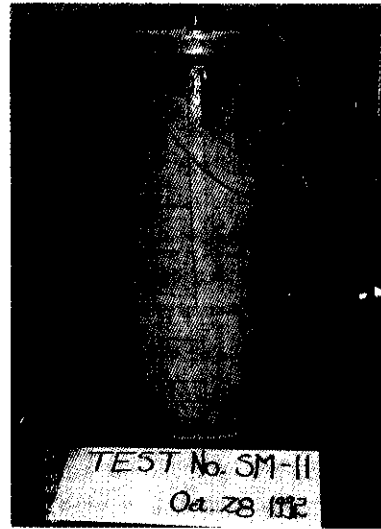
를 도기한 것이다. 이들 결과를 비교하여 보면 짧은 공시체의 결과는 긴 공시체에서의 결과와 비슷하게 응력비 b 가 0.5 이상인 부분에서 모래의 내부마찰각 ϕ 가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림 14는 Torsion 평면상에 대한 파괴점을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 파괴강도는 상기 두 종류의 공시체 사이에서 차이를 찾아보기 어렵다. 결국 공시체의 높이가 1D 이상인 공시체에서는 공시체 높이의 영향이 동일한 것으로 판단된다.

5.3 Necking현상

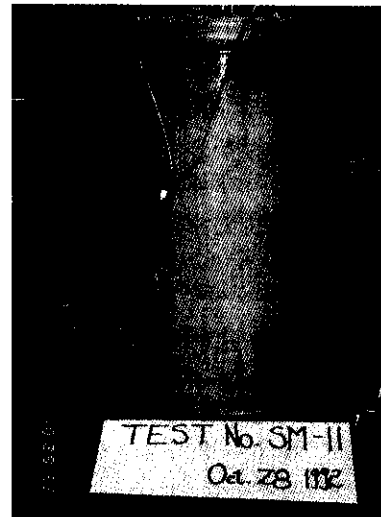
앞에서와 같이 모래의 비틀림전단시험을 수행하는 도중 고려해야 할 중요한 사항으로 Necking현상을 들 수 있다. 모래에 대한 비틀림전단시험중 공시체에 파괴가 발생하기 직전에 주로 파괴면이 관찰되었다. 그리고 축차응력이 삼축신장시험에 해당하는 b 가 0.5 이상인 시험의 경우 파괴시 변형의 형태는 공시체의 내부로 오목하게 발생하는 것이 관측되었으며 마치 금속봉의 인장시험시 변형이 금속봉의 일 부분에서 주로 발생하여 단면적이 축소되는 Necking현상과 비슷한 파괴형태이다. 사진 1은 파괴시 이러한 Necking현상이 발생한 예로서 Test No.12의 결과를 나타낸 것이다. 즉 파괴가 발생한 부분에서 변형이 집중되어 공시체의 단면적이 상당히 감소한 것으로 모래의 강

도 산정을 위한 단면적 산정시 많은 오차를 유발시켰을 것으로 생각된다.

Lade(1982)는 이러한 원통형공시체를 사용하는 삼축시험에서의 파괴형태를 Line failure라 규정하고 이를 피하기 위한 시험으로 입방체형삼축시험기를 제안하였으며 이 기기는 정육면체의 공시체를 사용하여 변형을 균등하게 발생시켜 Zone failure를 유발하는 시험기이다.



(a) 앞면



(b) 뒷면

사진 1. Test No.12

즉 비틀림전단시험기에서도 Zone Failure를 유발시키기 위해 입방체형공시체에서와 같이 공시체의 높이를 1D로 축소함이 바람직하나 그럴 경우 단부구속의 영향이 발생하여 원주방향의 수평응력 σ_0 에 변화가 발생하게 되므로 주의하여야 한다.

6. 결론

주응력회전효과를 고려한 20회의 비틀림 전단시험을 실시하여 모래의 강도특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 비틀림전단시험기를 이용하여 모래의 내부마찰각을 주응력비 b 에 따라 조사하여 본 결과 내부마찰각은 주응력회전효과를 포함하고 있는 주응력비 b 에 많은 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 그 경향은 b 가 0에서 0.5사이에서는 증가하는 경향을 보이다 0.5를 지나서는 서서히 감소하여 삼축신장시험에 해당하는 b 가 1인 경우에는 삼축압축에 해당하는 b 가 0인 경우 보다 적은 값을 나타내고 있어 이는 점토에 대한 시험결과와는 다른 결과를 보이고 있다.
2. 주응력축이 연직축과 이루는 각 β 와 공시체가 파괴시 나타나는 파괴면이 수평축과 이루는 각 ω 의 합은 주응력비 b 에 따라 일정한 값을 갖는 것으로 나타나고 있다.
3. 공시체의 높이가 40cm인 경우와 25cm인 경우를 비교하여 본 결과 어떠한 강도변화를 찾아 볼 수 없었으며 높이가 직경 보다 큰 경우는 원주방향응력이 공시체의 상하단부에서 작용되는 전단응력에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
4. 모래의 파괴강도는 응력경로에 영향을 받지 않고 현재의 응력상태에 의해 파괴강도가 결정되어짐을 알 수 있었다.
5. 모래의 비틀림전단시험중 파괴면은 공시체 파괴직전에 관찰되었으며 축차응력이

삼축신장 시험에 해당하는 $b=0.5$ 인 경우 변형률국부현상인 Necking현상이 관찰되었다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 남정만, 홍원표(1993a). "비틀림전단시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동", 한국지반공학회지, 제9권 제4호, pp.65-81.
2. 남정만, 홍원표(1993b). "입방체형삼축시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동", 한국지반공학회지, 제9권 제4호, pp.83-92.
3. 洪元杓(1988a). "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(1988b). "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. 홍원표, 남정만(1994). "등방단일경화구성모델에 의한 모래의 3차원거동 예측". 한국지반공학회지, 제10권 제1호. pp.103-116.
6. Das, B.M.(1983). Advanced Soil Mechanics, McGraw Hill, pp.408-412.
7. 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.
8. 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), pp.355-383.
9. Hight, D.W. and Shibuya, S. and Symes, M.J. (1988), "The Engineering Application of Direct and Simple Shear Setting (Discussion)."

- Geotechnique, 37(1), pp.139-140.
10. Hong, W.P. and Lade, P.V. (1989a). "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. (1989b). "Strain Incremental and Stress Directions in Torsion Shear Tests." Journal of Geotechnical Engng. 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 Vol.5, No.4, pp. 307-324.
 13. Lade, P.V. (1981). "Torsion Shear Apparatus for Soil Testing". Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM STP 740, R. N. Yong and F. C. Townsend, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., pp. 145-163.
 14. Lade, P.V. (1982a). "Three-Parameter Failure Criterion for Concrete." J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol.108, No.5, pp.850-863.
 15. Lade, P.V., (1982b). "Localization Effects in Triaxial Tests on Sands," IUTAM, Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials, Aug., pp.461-471.
 16. Lade, P.V. (1990). "Single-Hardening Model with Application to NC Clay", Journal of Geotechnical Engng., ASCE, Vol.116, No.3, March, pp.394-414.
 17. 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.
 18. 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, No.1, pp.13-29.
 19. Lade, P.V. and Kim, M.K. (1988b). "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials III.: Comparisons with Experimental Data." Computers and Geotechnics, Vol. 6, No.1, pp.31-47
 20. Shibuya, S. (1985): "Undrained behavior of granular materials under principal stress rotation.", Ph.D thesis, University of London.
(접수일자 1997. 4. 23)