

토질역학에 있어서의 3차원 파괴규준

Three - Dimensional Failure Criteria in Soil Mechanics

1. 서론

지반의 거동 해석시에는 그 지반의 응력 - 변형특성과 파괴시의 응력 상태를 정확히 파악할 필요가 있다. 특히 흙은 흙의 설계사나 구조물의 하부구조시에는 파괴강도에 대한 지식이 절대적으로 필요하게 된다. 왜냐하면 파괴강도는 구조물의 안정성을 지배하는 가장 큰 요소가 된다. 일반적으로 지반속의 한 요소는 3차원 응력상태에 놓여 있게 되므로 파괴 역시 3차원 응력하에서 취급되어야 할 것이다. 이러한 파괴강도를 정확히 산정하기 위하여는 지반속의 요소에 작용하는 3차원의 응력이 어떤상태에 도달하여야 파괴가 발생하는가에 대한 정확한 판정의 기준이 필요하게 된다. 이러한 판정의 기준을 파괴규준 (Failure criterion) 이라 한다. 토질역학 분야에 Coulomb의 마찰이론이 도입된 이래 많은 파괴규준이 사용되어 오고 있다.

본 논문에서는 이들 파괴규준 중에서 현재 토질역학에서 주로 채택되고 있는 파괴규준을 몇개 설명하고 이들의 장단점을 고찰하여 본다. 또한 흙의 3차원 거동을 조사할 수 있는 임방체형삼축시험 및 비틀림전단시험과 같은 다축삼축시험을 실시하여 파괴강도의 시험치와 파괴규준을 비교 검토하여 보고자 한다. 원래 이들 파괴규준을 토질역학에 대하여 제안되었으므로 먼저 응력 - 변형특성 가지는 모래와 점토 시험에 대하여 임방체형삼축시험을 실시하여 파괴강도에 미치는 중간주응력의 영향을 검토한다. 그다음 이방성 임자주응력 가지는 시험에 대하여 임방체형삼축시험을 실시하여 파괴강도에 미치는 이방성의 영향을 조사한다. 마지막으로 K_0 - 임방전단시험에 대하여 비틀림시험을 실시하여 파괴강도에 미치는 응력경로 및 주응력회전의 영향을 조사하여 본다. 이와같은 시험결과를 통하여 지반에 가장 잘 적용될 수 있는 파괴규준을 조사하고자 한다.

2. 파괴의 정의

소성항복 (Yield), 강도파괴 (Strength failure), 파단 (Rupture) 등 재료의 거동이 어떤상태로 부터 다른 상태로 변화하는 과정을 정의로 파괴 (Failure) 라고 할 수 있다. 이중, 항복은 탄성거동으로부터 소성거동이 탈월한 상태로 변화하는 과정을 가리키며 파괴는 외력에 대한 저항이 증가상태로 부터 감소상태로 변화하는 과정을 가리킨다. 그림 1은 흙의 평균응력 σ_m 이 일정한 심대에서의 전단응력 - 전단변형률 관계의 일례를 보이고 있다. 응력은 Y점의 초기 항복응력에 도달한 후, 전단저항은 더욱 증가하여 점 P의 최대치에 도달한다. 그 이후는 전단저항이 감소하여 일정치 R로 정돈한다. 여기서 P점의 응력치를 최대전단강도, R점의 응력치를 잔류강도라 한다. 이와같이 최대전단강도상태는 정의대로 파괴에 상당한다. 응력이 일정한 전단변형률이 계속되는 잔류강도상태를 잔류상태 (Critical state) 라 부른다. 한편, 파단(Rupture)은 재료가 두께이상의 부분으로 분단되는 과정을 말한다. 그러나, 토질역학에서는 그다지 쓰이지 않는 용어이다.

이와같이 항복, 파괴는 재료의 응력 - 변형률 관계에 있어서의 특성점이므로 이들의 응력상태를 응력공간내에서 구하면 그림 2 에 표시된 항복곡면이라 파괴곡면이라 부른다. 이들 곡면의 함수표현을 각각 항복규준 (항복함수), 파괴규준이라 부른다.

3. 파괴규준

토질역학에 있어서 Coulomb, Mohr, Mohr - Coulomb, Tresca, von Mises 등의 항복, 파괴규준이 예로부터 사용되어 오고 있으며¹⁾ 흙의 구성식의 발전에 따라 새로운 항복, 파괴규준도 제안되어 오고 있다.^{2,3)} 이들 규준은 꼭 항복규준 및 파괴규준만을 한정하여 이용되고 있지는 않고 어떤 경우에는 항복규준으로, 다른 경우에는 파괴규준으로 이용되는 경우가 많으므로 항복이나 파괴로 한정함이 없이 단순히 규준으로 취급되기도 한다.

흙의 파괴규준은 흙의 상태를 나타내는 양을 가지고 표시하면 좋기 때문에 일반적으로는 응력과 변형률로 나타내게 된다. 그러나, 재료의 소성론에서는 파괴규준을 응력으로 표시하는 것이 보통이다. 이 경우 일반적으로 파괴규준을 등방성의 가정하에 응력불변량의 함수로 식(1)과 같이 생각하는 것이 타당하다고 여겨진다.

$$f(I_1, I_2, I_3) = 0 \text{ -----(1)}$$

여기서, I_1, I_2, I_3 는 각각 응력의 제1, 제2, 제3불변량이며 식(2)로 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ I_2 &= \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \\ I_3 &= \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \end{aligned} \right\} \text{ -----(2)}$$

응력불변량은 주응력으로 나타내어지므로 식(1)은 다음과 같이 표현될 수도 있다.

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \text{ -----(3)}$$

식(3)은 세계의 주응력을 좌표축으로 하는 주응력공간 (Principal stress space) 에 있어서의 한 곡면을 나타내는 식으로 생각할 수 있다. 이러한 파괴규준 식(3)으로 정하여 지는 공간곡면을 파괴곡면이라 한다.

파괴규준은 식(4)와 같이 주응력차의 함수로 나타내기도 한다.

$$F[(\sigma_1 - \sigma_2), (\sigma_2 - \sigma_3), (\sigma_3 - \sigma_1)] = 0 \text{ -----(4)}$$

3.1 고전적 파괴규준

3.1.1 Coulomb 규준

흙의 파괴규준으로서 가장 오래전 부터 널리 사용되어 온 것은 식(5)의 Coulomb 규준이다.

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \text{ -----(5)}$$

그림3에서 보는 바와 같이 τ_f 는 전단강도, σ_n 은 파괴면의 수직응력, c 는 점착강도, ϕ 는 내부마찰각이다.

Coulomb 규준은 "두 물체간의 마찰력은 마찰면에 작용하는 수직력에 비례하고 걸보기 점착력의 대소에 관계하지 않는다" 는 Coulomb 의 실험법칙과 "마찰력은 수직력에 비례하는 마찰력성분과 수직력에 무관한 점착력 성분으로 성립된다" 는 Vince의 연구결과에 근거하고 있다. 이 규준을 흙에 적용하는 경우, 강도정수 c, ϕ 의 물리적 의미는 명백하지 못하기 때문에 ϕ 를 단순히 전단저항각, c 를 걸보기점착력이라 부른다.

3.1.2 Mohr 규준

재료의 항복 혹은 파괴가 발생할 때, 삼축파괴면상의 전단저항 τ 는 그 면의 수직응력 σ 만의 함수라고 생각하여 식(6)과 같이 표시한다.

$$\tau = f(\sigma) \quad \text{----- (6)}$$

삼축파괴면상의 응력 σ, τ 는 파괴시의 최대, 최소주응력 σ_1, σ_3 과 파괴면의 각도 θ 를 알면 그림4의 Mohr응력원 상의 점 P의 응력치로 결정된다. 즉, Mohr규준은 점 P의 궤적이며 $\tau = f(\sigma)$ 는 파괴시의 Mohr 응력원의 포락선으로 구하여지게 된다.

3.1.3 Mohr - Coulomb 규준

Mohr 규준 $\tau = f(\sigma)$ 가 그림5와 같이 직선관계로 표시된 경우 이를 Mohr - Coulomb 규준이라 부른다. 절벽기점착력 c 와 전단저항각 ϕ 를 사용하면 식(6)은 다음과 같이 된다.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \text{----- (7)}$$

이 포락선에 내접하는 Mohr 응력원을 이용하면, 식(7)은 파괴시의 최대, 최소 주응력 σ_1, σ_3 에 의하여 다음과 같이 된다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad \text{----- (8)}$$

삼축파괴면의 각도 θ 와 전단저항각 ϕ 의 관계는 기하학적 관계에서 다음과 같이 된다.

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}, \quad \theta = \frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \quad \text{----- (9)}$$

3.1.4 Tresca 규준

Tresca 규준을 최대전단응력 τ_{max} 가 재료의 전단강도 k 에 도달하면 파괴 (혹은 항복)가 발생한다고 생각하는데 근거한다.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = k \quad \text{----- (10)}$$

3차원 주응력공간에서의 파괴곡면은 그림6에 도시된 바와 같이 일립체선으로 표시된 평균주응력 σ_m 축에 평행한 6각주이며, $\sigma_m =$ 일정면과의 교선은 정6각형이 된다. 따라서, Tresca 규준은 중간주응력 σ_2 와 평균주응력 σ_m 의 영향을 받지 않는다.

이 규준을 강도가 평균응력 σ_m 에 의하여 변화하는 재료의 파괴규준에 적용할 수 있도록 확장한 것이 식(11)과 같은 확장Tresca 규준이다.

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m} = a \quad \left(\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \right) \quad \text{----- (11)}$$

여기서 a 는 재료정수이다. 이 파괴곡면의 형상은 그림7에 도시된 바와 같이 6각주이고 $\sigma_m =$ 일정면과의 교선은 Tresca 규준과 같은 모양의 정6각형이다.

3.1.5 von Mises 규준

von Mises 규준은 전단탄성 에너지가 어떤 일정치에 달하면 재료가 파괴 (혹은 항복)한다고 생각하여 다음과 같이 표시한다.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 9\tau_{oct}^2 = 2k^2 \quad \text{----- (12)}$$

여기서, τ_{oct} 는 정8면제전단응력이다. 이 규준은 중간주응력의 영향을 고려하고 있지만 그림8에 도시된 바와 같이 파괴곡면은 σ_m 축에 평행한 원주이므로

장도는 평균응력 σ_m 의 변화에 영향을 받지 않는다. 이 규준을 평균응력 σ_m 에 따라 장도가 변화하는 재료에 적용할 수 있도록 확장한 것을 확장 von Mises 규준이라 부르며 다음과 같이 표시된다.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 9 \tau_{oct}^2 = a^2 \sigma_m^2 \quad \text{----- (13)}$$

여기서, a 는 재료정수이다. 식(13)에 의한 주응력공간내의 파괴면 형상이 그림9에 표시된 바와 같이 원주이고 σ_m = 인장면과의 교선은 von Mises 규준과 같은 모양의 원이 된다.

3.2 최극의 파괴규준²⁾

3.2.1 Lade 규준

Lade 는 유효점착력이 없는 재료의 3차원 파괴규준을 곡선의 파괴포락선을 가진다고 하였다. 이 규준은 제1, 및 제3 응력불변량 향으로 다음과 같이 제안되었다.

$$(I_1^3/I_3 - 27)(I_1/\rho_3)^m = \eta_1 \quad \text{----- (14)}$$

여기서, ρ_3 는 응력의 단위로 표시된 대기압이고 η_1 과 m 은 재료에 따라 결정되는 재료정수이다. 식(14)로 얻어지는 파괴면은 주응력공간상에서 그림10(a)에서 보는 바와 같이 응력축의 원점에서 정점을 가지는 비대칭 종알 모양이다. 정점에서의 각도는 η_1 의 값에 따라 증가한다. 또한 이 파괴면은 잠수압축에 대하여 불투한 형태를 가지며 곡률은 m 값에 따라 증가한다. $m=0$ 의 경우 파괴면은 직선이 된다. 그림10(b)는 $m=0$ 이고 η_1 이 1, 10, 10² 및 10³인 경우 3면체면 ($I_1 =$ 인장) 상의 파괴면의 단면도이다. η_1 이 증가할 수록 파괴면 단면형상은 원형에서 불투하고 패그리움 부저리를 가지는 삼각형으로 변하고 있다. $m=0$ 일때는 이들 단면은 I_1 값에 따라 변화하지 않는다. 그러나, $m>0$ 인 경우는 파괴면의 단면형상은 I_1 의 값이 증가함에 따라 삼각형에서 보다 원형적으로 변한다.

3.2.2 Matsuoka - Nakai 규준³⁾

3차원 응력장에 있어서 흙의 역좌거동을 설명하기 위하여 도입된 공간활동면 (Spatical mobilized plane) 의 개념에 의거하여 Matsuoka 와 Nakai 는 파괴규준을 응력불변량의 향으로 다음과 같이 제안하였다.

$$I_1 I_2 / I_3 = k \quad \text{----- (15)}$$

여기서, k 는 재료정수이다. 이 규준은 그림11에서 보는 바와 같이 삼축압축 및 전장 상태에서는 Mohr - Coulomb 의 규준에 일치하나, 중간주응력의 영향을 고려하므로 인하여 3면체면상의 파괴면은 Mohr - Coulomb 파괴면을 외측으로 둘러싸고 있다. 즉, 삼축압축과 전장사이의 파괴면은 직선이 아니다.

3.3 각 파괴규준의 평가

자갈, 모래, 실트, 점토 등과 같은 마찰재료(Frictional material) 에는 유효점착력이 없거나 거의 무시할 수 있을 정도이다. Mitchell⁴⁾은 광범위한 유효응력에 걸친 시험으로 실질적인 유효응력파괴포락선은 곡선이고 고도의 과압밀점토의 경우에도 유효점착력은 없거나 매우 작음을 보였다. (난, chemical bonding (cementation) 현상이 없는 경우)

몇몇 구성 모델은 마찰재료의 파괴상태로 확장 Tresca 규준 혹은 확장 von Mises (혹은 Drucker - Prager) 규준을 채택하고 있다. 이들 두 규준에 의하면 평균수직응력이 일정한 상태에서 압축강도와 전장강도는 동일하다.

Bishop⁵⁾은 이들 두 파괴규준은 원칙적으로 사질재료의 거동을 나타낼 수 없다

하였다. 그림12(a)는 모든 응력이 압축(+)인 주응력공간의 외측 부분까지 이들 규준의 파괴면이 연장되어야 함을 지적하고 있다. 즉, 삼축압축상태에서 얻은 마찰각이 큰 경우, 삼축전장부근의 응력상태는 세 주응력중 하나는 부(-)값을 가지는 응력공간에 존재하게 된다. 그러나, 이것은 유효접착력이 없는 재료에 대하여는 분명히 보충되고 있다. 삼축압축상태의 마찰각이 작은 경우일지라도 이들 두 규준은 마찰재료의 삼차원 유효장도면화에 대한 실험결과를 올바르게 나타내고 있지 못하다.

한편, Mohr - Coulomb 규준은 그림12 (b) 와 같이 일그러진 6각형의 파괴면을 보이며 마찰각이 90 에 가까울수록 삼각형의 파괴면에 근접하여 간다. Mohr - Coulomb 규준에는 중간주응력이 고려되어 있지 않으며 정수압축을 포함하는 Rendulic 면(이불 삼축면(Triaxial plane)이라고도 함)과의 교선인 파괴 곡적을 직선이 된다. 그러나, 마찰재료의 강도에는 중간주응력의 영향이 큼을 그림13과 같은 실험결과로 부터 밝혀졌다.⁶⁾ 더우기, 정8면체면상의 실험적 파괴선은 직선이 아니었고 각 주응력축의 투명축에 수직으로 교차하고 있었다. 또한 실험결과에 의하면 삼축면상의 파괴선은 곡선을 보이고 있다. 그러나, 마찰재료의 이와 같은 중요한 사항을 Mohr - Coulomb 규준에서 다룰 수 없게 되어 있다.

그림14는 각 규준에 대하여 평균응력 σ_m 및 중간주응력 σ_2 의 의존도를 알기 위하여 파괴곡면과 삼축면 및 J_m - 일성면과의 교선형상을 표시한 그림이다. 그림중 θ 및 b 는 중간주응력의 크기를 나타내는 변수로 다음과 같이 구한다

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_3)} \right] \quad \text{----- (16)}$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{----- (17)}$$

그림으로 부터 알 수 있는 바와 같이 확장 von Mises 규준, Matsuoka - Nakai 규준 및 Lade 규준은 모두 중간주응력의 영향을 고려하고 있다. 그러나, Matsuoka - Nakai 규준은 삼축압축 및 전장응력상태에서 Mohr - Coulomb 의 규준에 일치하는 특징을 가지고 있다. 따라서, 삼축면에서는 그림14(a) 에서 보는 바와 같이 Mohr - Coulomb 의 파괴선과 동일하게 나타나고 있다. 그러나, 앞에서도 인용한 바와 같이 Mitchell 의 실험결과에 의하면 실질적인 유효응력파괴포락선은 곡선으로 밝혀지고 있다. 한편, Lade 규준은 평균응력 σ_m 의 영향도 고려하고 있으며 삼축전장응력상태에서는 그림14 (b) 에서 보는 바와 같이 Mohr - Coulomb 규준과 일치하지 않고 있다. 또한 삼축면에서 파괴선은 그림14(a) 에 표시된 바와 같이 곡선으로 되는 점이 특징으로 되어 있다.

4. 시험결과

삼축시험은 흙의 강도특성을 파악하기 위한 요소시험으로 예로부터 많이 사용되어오고 있다. 삼축시험이라고 하면 통상 원통형공시체에 대한 축대칭 삼축시험을 가리킨다.⁷⁾ 그러나, 이 시험방법을 원통형공시체를 사용하는 관계로 요소내의 응력상태가 항상 축대칭상태에 있게된다. 그러나, 실제지반내의 응력상태는 축대칭상태와 달리 세개의 주응력의 크기가 다른 경우도 많이 있으므로 정확한 파괴규준을 확립하려면 현장에 보다 근접한 상태의 요소시험을 실시할 필요가 있다. 즉, 흙 요소에 서로 다른 세 주응력을 재하시킬 수 있는 다축시험장치가 필요하게 된다.⁸⁾

다축시험으로 최근에 고안되어 주로 사용되고 있는 시험은 크게 둘로 구분될 수 있다. 하나는 입방체형삼축시험 (Cubical triaxial test)⁹⁾이며 다른 하나는 비틀림전단시험 (Torsion shear test)¹⁰⁾이다. 이중 입방체형삼축시험은 입방형공시체에 서로 다른 세 주응력을 각각 독립적으로 재하시킬 수 있게한 시험이다. 한편, 비틀림전단시험은 중공원통형공시체 (Hollow cylindrical specimen) 을 사용하여 공시체의 내측면과 외측면에는 구속응압을 가하고 공시체 상하단에 연직하중 및 Torque 를 가하여 각각 다른 세 주응력이 공시체내에 발생될 수 있도록 하는 시험이다. 입방체형삼축시험은 세 주응력축의 방향이 항상 고정되어 있는데 반하여 비틀림전단시험에서는 주응력축의 방향이 전단진행과 함께 회전하게되어 주응력회전의 효과도 고려할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에 사용된 입방체형삼축시험과 비틀림전단시험의 장치는 각각 그림15 및 그림16 과 같다.

4.1 재료정수

식(14)의 Lade 규준에서 재료에 따라서 정하여지는 재료정수 n_1 과 m 은 요소 시험으로 얻어진다. 파괴시의 $(I_3^* / I_3 - 2.7)$ 과 (Pa / I_1) 의 관계를 그림17과 같은 양면대수지에 정리하여 n_1 과 m 을 결정한다. 즉, n_1 은 (Pa / I_1) 이 1인 위치에서 화기분석 직선의 종축 좌표치로 정하여지며 m 은 그 직선의 기울기로 정하여진다. 이들 재료정수를 얻기 위하여는 응력을 측정할 수 있는 시험이면 모두 사용될 수 있다. 그러나, $b=0$ 인 축대칭삼축시험과 같이 되도록 간편한 시험을 사용하여 유리하다.

4.2 등방성 흙

그림18은 초기등방성을 가지도록 마련된 조밀한 상태의 Monterey No. 0 Sand⁶⁾ 에 대한 입방체형삼축시험 결과를 $I_1^* = 5\text{kg/cm}$ 인 정8면체면상에 유효응력항으로 부여 정리한 결과이다. 이 모래는 석영과 광석의 성분으로 구성되어 있으며 평균 직경은 0.43 mm 이고 균등계수는 1.53, 비중은 2.645, 간극비 $e=0.57$, 상대 밀도 $Dr=98\%$ 였다. 삼축압축시의 내부마찰각은 48.5° 였고 n_1 과 m 은 104 와 0.16 였다. 그림중 굵은직선은 식(14)의 Lade 규준에 의한 파괴면이고 점선은 Mohr - Coulomb 규준에 의한 파괴면이다. 이 결과에 의하면 이 모래시료의 파괴강도는 Lade 의 파괴규준과 아주 잘 일치하고 있으나 Mohr - Coulomb 의 파괴규준은 중간주응력이 최소주응력과 같지 않은 즉 $b > 0$ 인 경우의 시험치를 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Lade의 파괴규준은 초기등방성을 가지는 모래저반의 파괴규준으로 적합함을 알 수 있다.

정규압밀점토시료에 대한 입방체형삼축시험 결과는 그림19(a) 과 같다.²⁾ 사용된 점토시료는 EPK (Edgar Plastic Kaolinite) 점토로 Ko - 압밀에 의한 고유어방성을 제거시키기 위하여 실내에서 반축성형하여 등방성을 가지도록 하였다. 이 경우도 그림18의 모래시료의 경우와 동일하게 Lade 의 파괴규준이 점토시료의 파괴강도와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Lade와 Musant¹⁶⁾ 및 Illite계 점토인 Grundite 점토에 대하여 EPK 점토와 동일한 방법으로 실내에서 반축성형한 등방성점토시료를 준비하여 입방체형삼축시험을 시험한 결과 그림19 (b)와 같이 양호한 결과를 얻었다. Tsai와 Lad¹⁷⁾ 은 Lade규준을 등방성 과압밀점토에 까지 확대 적용시킬 수 있는가 여부를 확인하기 위하여, 반축성형한 과압밀 EPK 점토에 대하여도 그림20과 같은 좋은 결과를 얻었다.

결국, Mohr - Coulomb 규준은 $b > 0$ 인 등방성 흙의 파괴강도를 과소산정하고 있는 반면에 Lade 규준은 등방성 흙의 파괴강도 산정에 적용될 수 있다고 할 수 있다. Matsuoka - Nakai 규준도 중간주응력을 고려하고 있기는 하지만 삼축 긴장응력상태 ($b=1.0$) 에서는 Mohr - Coulomb 규준과 동일하므로 결국 실제 파괴강도를 과소산정하고 있다 할 수 있겠다. 즉 그림13에서도 설명된 바와 같이 $b=1$ 인 삼축긴장상태의 경우 Mohr - Coulomb 규준과 Matsuoka - Nakai 규준은 삼축압축과 동일한 내부마찰각을 가지게되지만 실제 시험결과는 삼축긴장이 삼축압축 보다 큰 내부마찰각을 보이고 있다.

4.3 이방성 흙

이방성을 가지는 흙에 적용하기 적합한 파괴규준을 확립하기 위하여 모래와 점토 시료에 대하여 입방체형삼축압축시험을 각각 그림21 및 그림22 와 같이 실시하였다. 모래시료에 대한 삼축시험은 직교 이방성 구조를 가지도록 실내에서 준비한 Cambria 모래에 대하여 실시하였으며¹⁸⁾ 점토시료에 대한 삼축시험은 압밀퇴적된 지반에서 직접 채취한 San Francisco Bay Mud 를 실내에서 일차원 압밀을 추가로 가한후 과압밀비가 5 가 되도록하여 실시하였다.^{14, 15)} 이들 이방체의 방향성을 나타내기 위하여 그림23 (a) 와 같이 입방형공시체의 방향을 Cartesian 좌표계로 결정 사용하였다. 즉 X 축은 직교 이방성 공시체의 회전대칭축에 일치시켰다. 따라서 그림23 (b) 및 (c) 의 정8면체면상에 표시된 각도 θ 는 σ_x 축에서 응력점 $P(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 까지의 시계방향각이며 식(16)대신에 식(18)과 같이 계산된다.

$$\tan \theta = \sqrt{3} \cdot \frac{\sigma_y - \sigma_z}{(\sigma_x - \sigma_y) + (\sigma_x - \sigma_z)} \quad \text{----- (18)}$$

삼축시험은 θ 가 0° 에서 180° 까지의 범위에 대하여 실시되었다. 이들 시험결과 흙의 초기직교이방성구조는 파괴이전의 흙의 응력 - 변형률거동에는 크게 영향을 미쳤으나 파괴강도는 등방체의 파괴규준으로 제안된 Lade 규준과 매우 양호하게

일변형은 흙의 내부구조에 대한 흙의 파괴는 큰 전단변형에 의해 발생되므로 이 전단변형은 흙의 내부구조에 대한 흙의 구조를 상당히 변화시켜 파괴시의 구조는 등방체의 구조에 근접하여 갈에 기인한 것으로 판단된다. 결국 Lade의 파괴규준은 이방성 구조를 가지는 흙의 삼차원 파괴강도 산정에도 실용적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4.4 주응력 회전

자연퇴적점토면에서는 K_0 - 응력상태로 압밀이 되며 이러한 점토시반에 구조물이 축조되면 응력의 크기가 변화됨과 동시에 주응력축 방향도 회전하게 된다. 이러한 주응력의 크기와 방향의 변화는 응력 - 변형거동에 크게 영향을 미치게 될 것이다. 따라서 흙의 거동에 대하여 충분히 이해하기 위하여는 주응력축회전의 영향을 파악하는 것이 대단히 중요하다. 그러나, 물상의 축대성삼축시험이나 일방체형삼축시험으로는 전단시험중 주응력을 회전시킬 수가 없다. 여기에서 전단시험중 주응력회전을 가능하게 하기 위하여 비틀림전단시험이 개발 사용되고 있다.¹⁰⁻¹³ 비틀림전단시험에 사용된 중공원통형공시체에 작용하는 응력을 원통좌표로 표시한 것이 그림24(a)이다. 공시체중의 미소요소에 작용하는 수직응력과 전단응력으로 Mohr의 응력원을 그려보면 그림24(c)와 같이 되며 최대주응력 σ_1 및 최소주응력 σ_3 는 식(19)에 의하여 산출될 수 있다.

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} (\sigma_z + \sigma_\theta) \pm \sqrt{\frac{1}{4} (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + \tau_{z\theta}^2} \quad \text{----- (19)}$$

한편 주응력 σ_1 의 방향은 식(20)에 의하여 구하여 진다.

$$\tan 2\psi = \frac{2 \cdot \tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta} \quad \text{----- (20)}$$

실내에서 반축성형하여 K_0 - 압밀을 한 BPK (Edgar Plastic Kaolinite) 점토 공시체에 대하여 응력경로를 여러 가지로 변경하면서 실시된 비틀림전단시험결과를 그림25와 같다. 이 그림은 실험결과를 연속축차응력 ($\sigma_z - \sigma_\theta$)와 전단응력 $\tau_{z\theta}$ 의 관계로 정리한 것이다. 그림중 곡선은 식(14)의 Lade 규준에 의하여 구하여진 파괴면이다. 이 그림에서 식(14)에 의한 파괴면은 시료의 파괴강도와 실용적으로 잘 일치함을 알 수 있다. $b=0$ 인 삼축압축의 경우는 Lade 파괴규준이 시험치를 약간 크게 산정하고 있음이 보이고 있다. 그러나, 그 오차는 적은 것으로 판단된다. 이 결과에 의하면 K_0 - 압밀점토의 파괴강도는 응력경로나 주응력회전에 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 비틀림전단시험 결과로부터 경험적으로 얻은 파괴면은 실용상 식(14)의 Lade 규준으로 모형화시킬 수 있다고 하겠다. 결국 K_0 - 압밀점토에 대한 응력경로나 주응력회전은 수주로 파괴 이전의 응력 - 변형거동에 영향을 주나 파괴강도에는 영향을 주지 않고 있다 하겠다. 이는 점토 시료의 파괴상태는 전단변형이 상당히 크게 발생한 후에 발생되므로 이때는 점토공시체내의 초기 구조가 상당히 변화된 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

이상에서 토질역학에 활용되고 있는 각종 파괴규준을 열거 고찰하고 시험 결과와 비교 검토하여 보았다. 확장 Tresca 규준과 확장 von Mises 규준은 유효점착력이 없는 마찰재료의 파괴규준으로는 부적합하다. 왜냐하면 이들 규준은 $b=1$ 인 삼축전장부근 응력상태에서는 세 주응력 중 하나의 주응력은 부(-)가 되는 응력공간에 존재하게 되며 압축강도와 전장강도가 동일하게 되는 모순이 있다. Mohr - Coulomb 규준은 이러한 모순을 해결하여 토질역학에서 많이 사용되어 왔다. 그러나, Mohr - Coulomb 규준에는 중간주응력의 영향을 고려하지 못하며 삼축면에서의 파괴포락선도 직선으로 표현된다. 그러나 최근의 시험결과에 의하면 파괴강도는 중간주응력의 영향을 많이 받고 있으며 삼축면에서의 파괴포락선도 곡선으로 밝혀졌다. Matsuoka - Nakai는 중간주응력의 영향을 고려함으로써 Mohr - Coulomb의 결점을 보완하였으나, 삼축압축과 삼축전장시의 내부마찰각이 동일하다고 한정은 Mohr - Coulomb의 결점을 개선시키지 못하고 있다. 따라서 삼축면에서의 파괴포락선은 여전히 직선으로 남아 있게 되었다. 실제 시험결과에 의하면 이들 규준은 $b=1$ 인 삼축전장시의 내부마찰각을 과소평가하고 있었다. Lade 규준은 파괴포락선을 곡선으로 표현하고 중간주응력의 영향도 고려하므로 Mohr - Coulomb 규준의 결점을 개선하였다.

입방형공시체를 사용하는 삼축시험기로 등방성 흙에 취해진 3차원 삼축시험 결과 Lade 규준은 모래와 점토의 실험적 3차원 파괴강도를 잘 평가하여 주고 있었다. 이 규준은 이방성 입자구조를 가지는 흙의 3차원 파괴규준으로서도 충분한 실용성을 가지고 있었다. 또한 중공원통형공시체를 사용하는 비틀림 전단시험에 의한 K_0 - 압밀점토의 파괴강도도 Lade 규준에 의하여 잘 평가되어 질 수 있음을 알았다.

참고문헌

- 1) Valliappam, S. : Continuum Mechanics Fundamentals, A.A. Balkema, Rotterdam, 1981, pp.116 - 120
- 2) Lade, P.V. : " Failure criterion for frictional materials," Mechanics of Engineering Materials, Chapter 20, Edited by c.c. Desai and R.H. Gallagher, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1984, pp.385 -402
- 3) Matsuoka, H. and Nakai, T. : "Stress -deformation and strength characteristics of soil under three different principal stress ", 토목학회논문보고집(일본), No.232, 1974, pp 59 -70
- 4) Mitchell, J.K. : Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1976
- 5) Bishop, A.W. : " The strength of soils as engineering materials", 6th Rankine Lecture, Geotechnique, Vol.16, No.2, 1966, pp 91 -130
- 6) Lade, P.V. and Duncan, J.M. : " Cubical triaxial tests on cohesionless soil", Jour. SMFD, ASCE, Vol. 99, No. SM10, 1973, pp 793 -812
- 7) Bishop, A.W. and Henkel, D.J. : The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 2nd ed., Arnold, London, 1962
- 8) Saada, A.S. and Townsend, F.C. : " State of the Art Laboratory Strength Testing of Soils ", ASTM STP 740, R.N. Yong and F.C. Townsend Eds. American Society for Testing and Materials, 1981, pp 7 -77
- 9) Lade, P.V. : " Cubical triaxial apparatus for soil testing ", Geotechnical Testing Journal, Vol.1, No.2, 1978, pp 93 - 101
- 10) Lade, P.V. : " 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, 1981, pp 145 -163
- 11) 홍 원표 : " 흙의 비틀림전단시험에 관한 기초적연구 ", 대한토질공학회지, 제4권, 제1호, 1988, pp 17 -27
- 12) 홍 원표 : " 비틀림전단시험에 의한 K_0 - 압밀점토의 거동 ", 대한토목학회 논문집, 제8권, 제1호, 1988, pp 159 - 164
- 13) 홍 원표 : " K_0 - 압밀점토의 주응력회전효력 ", 대한토목학회논문집, 제8권, 제1호, 1988, pp 159 -164
- 14) 홍 원표 : " 중간주응력이 과압밀점토의 거동에 미치는 영향", 대한토목학회 논문집, 제8권, 제2호, 1988, pp 99 -107
- 15) 홍 원표 : " 이방성과압밀점토의 강도특성 ", 대한토질공학회지, 제4권, 제3호, 1988, pp 35 -42
- 16) Lade, P.V. and Musante, H.M. : " Three - dimensional behavior of remolded clay ", Jour. GED, ASCE, Vol.104, No.GT2, 1978, pp 193 -209
- 17) Tsai, J. and Lade, P.V. : " Three - dimensional behavior of remolded over-consolidated clay ", Reports No. UCLA - ENG 85 - 09, 1985
- 18) Ochiai, H. and Lade, P.V. : " Three - dimensional behavior of sand with anisotropic fabric ", Jour. GE, ASCE, Vol.109, No. GT10, 1983, pp 1313 -1328

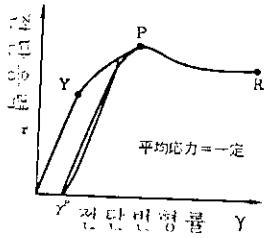


그림1. 전단응력-전단변형률 관계

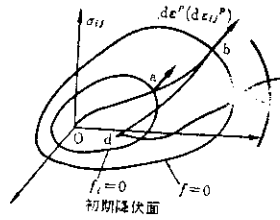


그림2. 항복곡면과 변형률경화

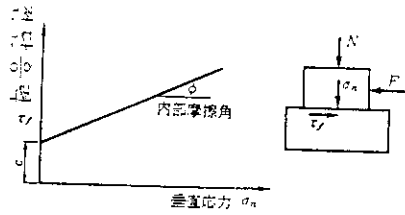


그림3. Coulomb 규준

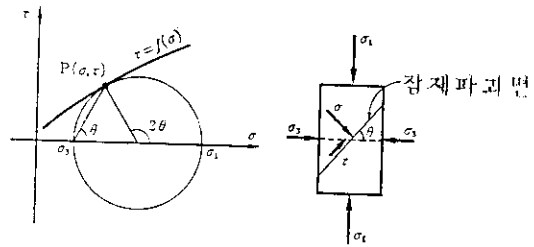


그림4. Mohr 규준

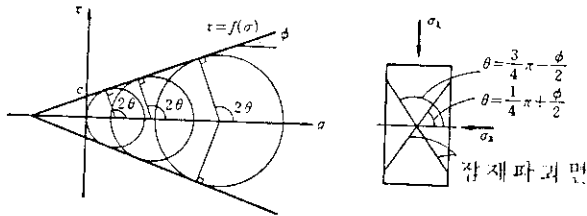


그림5. Mohr-Coulomb 규준

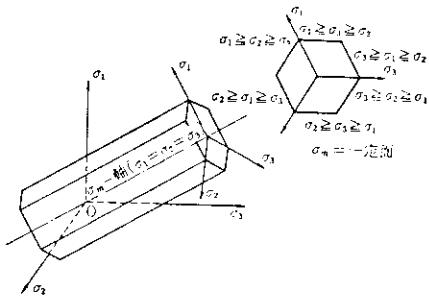


그림6. Tresca 규준

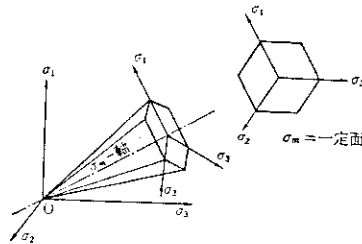


그림7. 확장 Tresca 규준

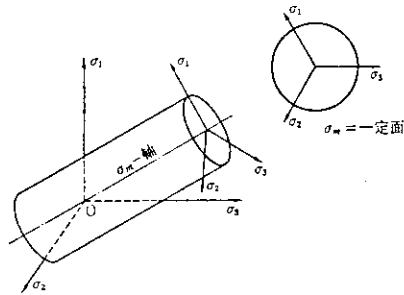


그림 8. von Mises 규준

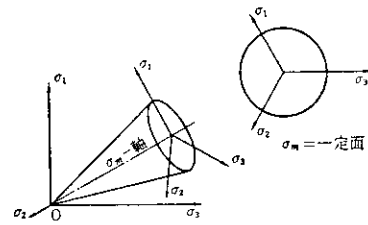


그림 9. 확장 von Mises 규준

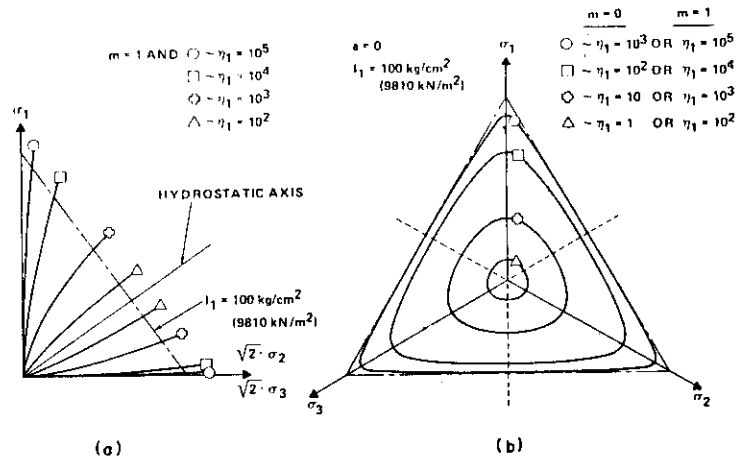


그림 10. Lade 규준 a) 삼축면 b) 정팔면체면

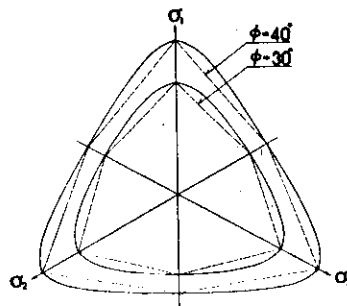


그림 11. Matsuoka & Nakai 규준

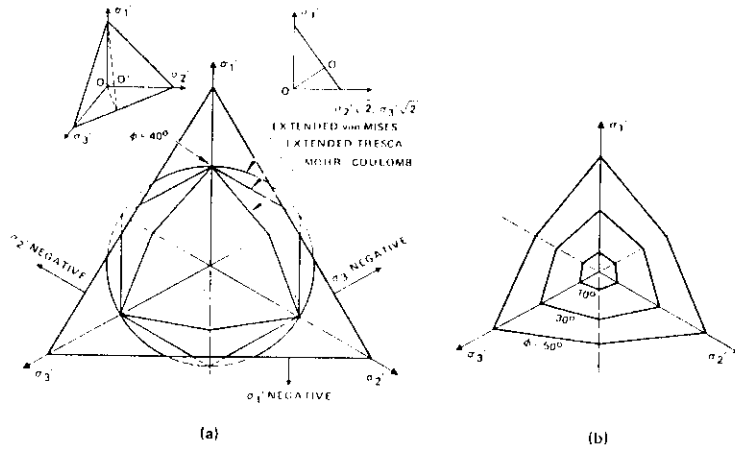


그림 12. 파괴규준의 비교
 a) 주응력면
 b) Mohr-Coulomb 규준 단면

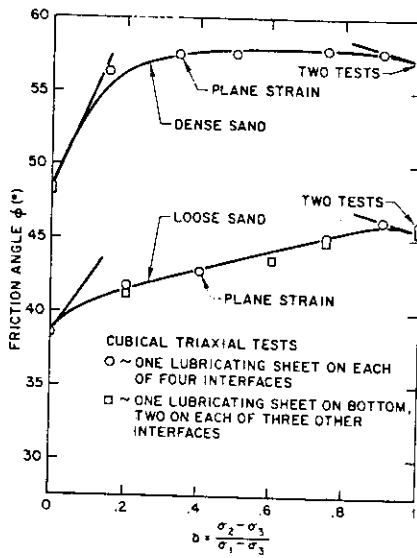


그림 13. 중간주응력 변화에 따른 내부마찰각

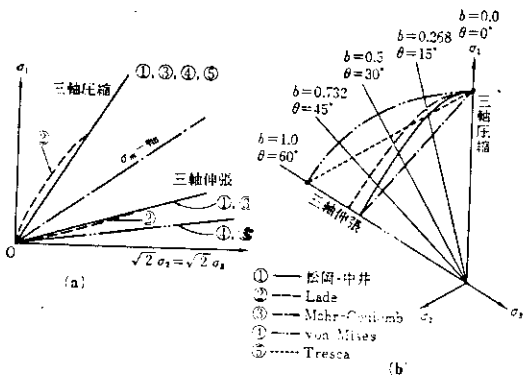


그림 14. 파괴규준의 비교
 a) Triaxial plane
 b) Octahedral plane
 (σ_m = 일정면)

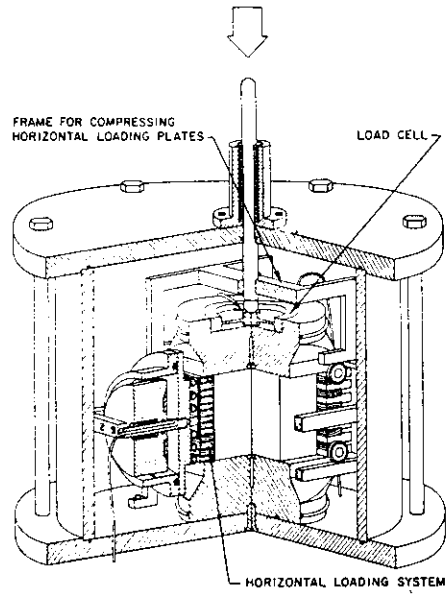


그림 15. 입방체형삼축시험기

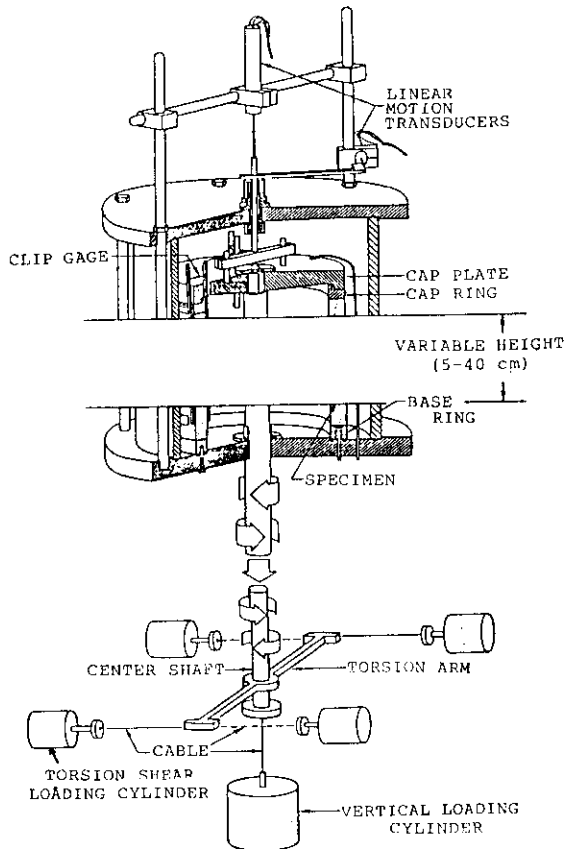


그림 16. 비틀림전단시험기

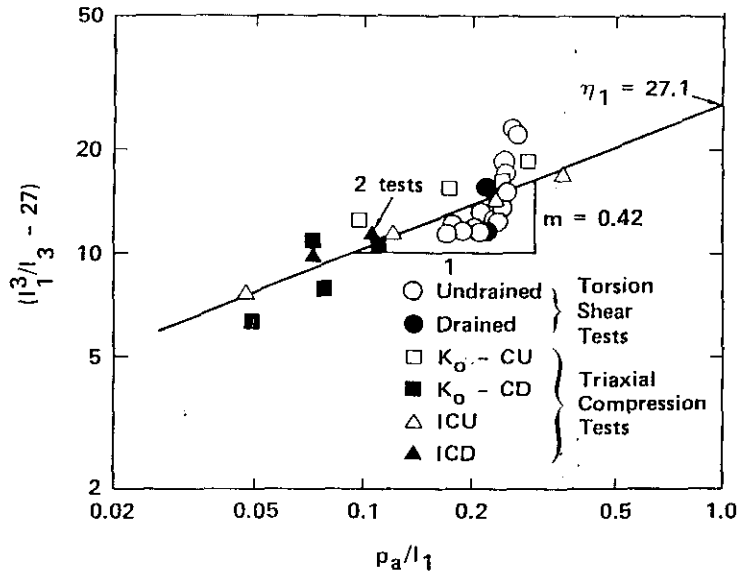


그림 17. 재료정수 m 및 η_1 의 결정도

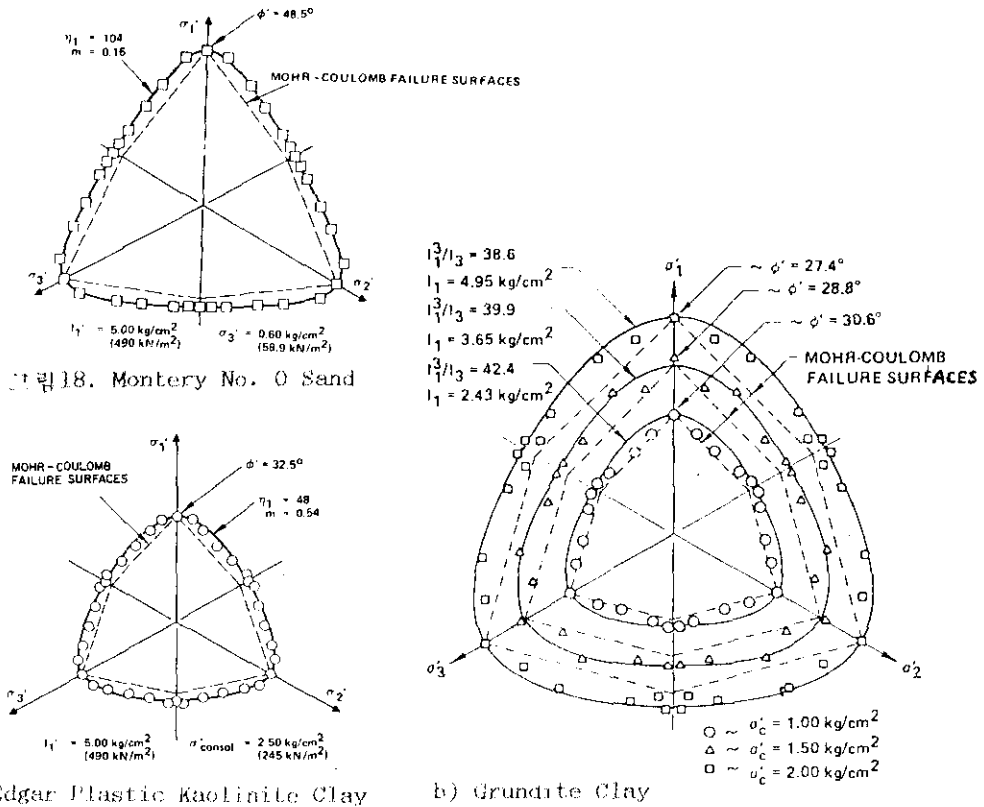


그림 18. Monterey No. 0 Sand

a) Edgar Plastic Kaolinite Clay

b) Grundite Clay

그림 19. 점토의 삼축시험결과

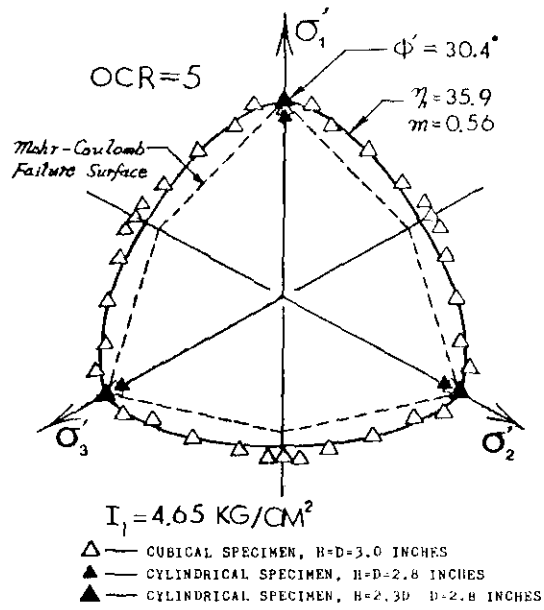


그림 20. 과압밀 Edgar Plastic Kaolinite Clay

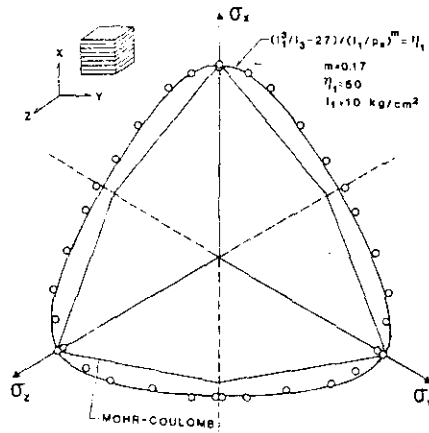


그림 21. Cambria Sand

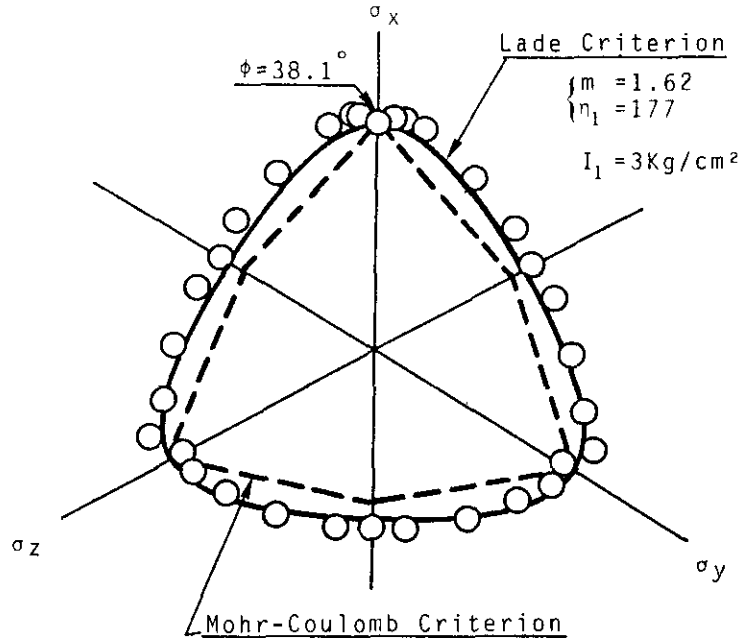


그림 22. San Francisco Bay Mud

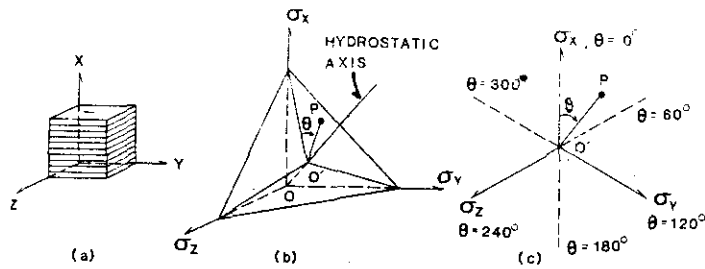


그림 23. 이방성 공시체의 좌표
 a) Cartesian 좌표
 b) 주응력공간 c) 정팔면체면

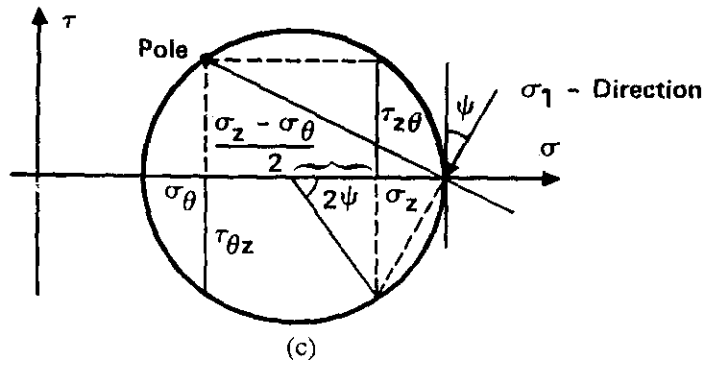
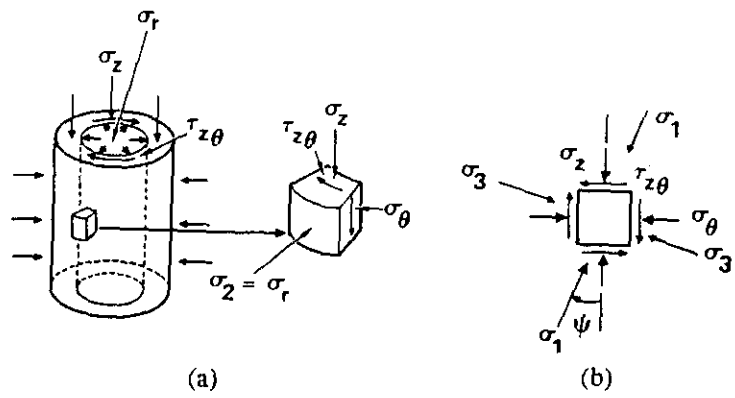


그림 24. 비불림전단시험에 의한 주응력 회전

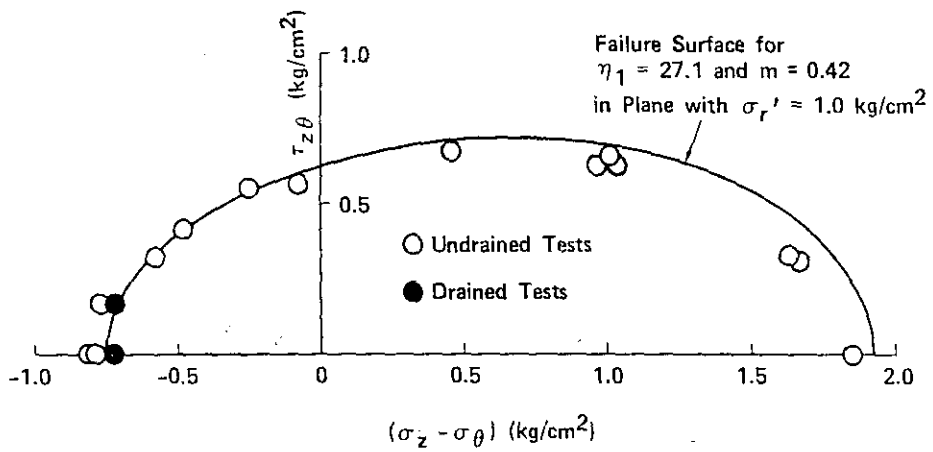


그림 25. 비불림전단시험결과