

立方體硬化材料의 三次元舉動 및 強度特性

Three-dimensional Behavior and Strength Characteristics
of Cubical Hardening Materials.

姜 秉 宣*
Kang, Byung-Sun

Abstract

This study has been carried out as a fundamental course for the analysis of the constitutive equation for the materials like sands being hardened during shear. For this aim, experimental tests with variable stress paths for the concrete material are performed using the cubical multi-axial test in which the three principle stresses are arbitrarily controlled. Stress-strain behaviors and strength characteristics are suggested in octahedral planes. Various tests such as HC, CTC, TC, SS are performed. The main results summarized are as follows;

1. The order of strength from the largest to the smallest is CTC, TC, SS, and TE test.
2. The octahedral shear strength of concrete specimens is dependent upon the stress path(θ).
3. There is a direct relation between strength and confining pressure.
4. The ultimate envelopes in the octahedral planes are non-circular-cone shaped.
5. Any ultimate criteria used to predict the strength behavior of concrete must include the effect of the tensile stresses.

요 지

본문은 전단과정에서 경화되는 모래와 같은 재료의 구성식을 연구하기 위하여 그 기초실험으로서 이미 경화된 콘크리트를 대상으로 3 주응력을 독립적으로 제어할 수 있는 立方體三軸壓縮實驗機를 통해 여러가지 응력경로 실험을 실시한 것이다. 실험으로서는 HC, CTC, TC, TE, SS 등 5종이고 그들의 응력-변형률관계와 강도특성을 8면체면에서 고찰한 것이다. 이들을 통한 주요 결론은 다음과 같다.

1. 경화재료에 대한 전단강도의 크기는 CTC, TC, SS, TE의 순서이다.
2. 8면체전단강도는 응력경로(θ)에 의존하고
3. 또한 등방응력 ($\sigma_0 = \frac{1}{3}J_1$)이 클수록 크다.
4. 8면체면에서 극한포락선은 원추형상이다.
5. 마찰성재료인 경화재료에 대해서는 인장강도의 영향을 고려해야 한다.

* 정회원, 송원실업전문대학 토목과 조교수

1. 序 論

地盤材料에 대한 舉動 즉 變形이나 強度特性을 糾明하기 위하여 많은 實驗研究가 進行되고 있으며 또한 새로운 理論의 開發과 더불어 그에 따른 實驗機器의 개선도 폭넓게 시도되고 있다. 특히 종래까지는 複雜한 境界值問題와 數學的 制限 때문에 實驗이나 理論의 단순화가 요구되었으나 有限要素와 같은 數值解析이 폭넓게 이용됨에 따라 現場再現에 보다 가까운 室內實驗으로서 最近 立方體三軸試料를 이용, 여러가지 형태의 應力經路實驗을 통해 다차원적인 研究가 시도되고 있다. ^{2), 4), 6), 10), 13)}

本文은 土質의 應力-變形率에 관한 構成式의 基礎研究로서 먼저 硬化材料를 이용하여 3主應力을 독립적으로 제어할 수 있는 立方體三軸實驗을 통해 應力-變形率關係를 상세히 검토해 본 것이다. 硬化材料로서는 여러가지 요인을 除去하기 위해 콘크리트재료를 택하였다. 實驗내용으로서 是 다양한 응력경로실험을 통해 三次元 應力空間과 八面體平面 그리고 三軸平面內에서 的 應力-變形率과 強度特性을 考察한 것이다. 本研究를 위한 三軸實驗에서는 初期等方應力 (confine pressure)을 다르게 하여 다음과 같이 實驗種類를 定하였다. 즉 HC(hydraulic compressure) 1개, CTC(conventional triaxial compression) 3개, TC(triaxial compression) 2개, TE(triaxial extension) 2개, SS(simple shear) 1개 등 모두 5種을 시행하였다. 이와같은 硬化材料에 대한 三次元舉動實驗을 遂行하게된 이유는 土質에 대한 構成式을 決定하는데 있어서 위에서 언급한 여러가지 三軸實驗의 상호관계와 入力 parameter 간에 매우 편의적인 해석이나 이용이 이루어지고 있다는 점에 있으며 따라서 硬化材料나 또는 硬質材料를 가지고 이들의 關係를 應力經路上에서 추적하여 기본적인 見解를 얻고자 한 것이다

2. 三次元 應力空間

等方性材料의 力學의 特性은 材料粒子的 材質

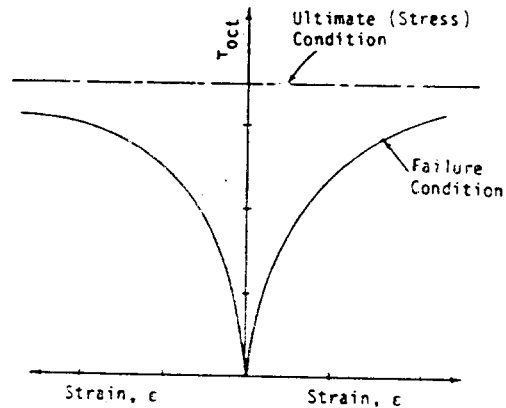


Fig. 2.1 Ultimate stress condition for typical stress-strain Response

的 종류나 재료를 構成하는 粒子的 構成狀態에 따라 支配되고 이것이 外的 作用에 應答하는 應力-變形率關係로부터 構成式으로 表現하고 있다. 地盤材料를 等方性材料로 假定하여 一般的 으로 不變量의 함수로 보면 다음과 같이 應力 tensor 의 不變量의 함수로 나타낼 수 있다.

$$F(J_1, J_2, J_3) = 0 \quad (2-1)$$

여기서 J_1, J_2, J_3 는 제 1, 제 2, 제 3 不變量이며 다음과 같이 나타낸다.

$$J_1 = \sigma_{ij}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ji} \quad (2-2)$$

$$J_3 = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki}$$

σ_{ij} 는 應力 tensor 이고 $F(J_1, J_2, J_3)$ 는 항복함수이다. 따라서 式(2-1)은 3개의 主應力方向을 좌표축으로 하는 主應力空間에 있어서 曲面을 나타내는 式으로 이 曲面을 破壞曲面이라고 가정하면 어떤 흡요소에 作用하는 主應力狀態가 존재하면 그 요소는 極限狀態(限界狀態)에 있다고 본다.

Desai(1980)¹⁾는 $F(J_1, J_2, J_3)$ 형태의 함수를 써서 極限狀態에서의 降伏曲面式을 제안하고 Fig. 2.1 에 보여준 바와 같이 應力-變形率曲線에서 應력에 接近하는 漸近값으로 極限조건을 정의하고 式(2-3)과 같이 나타냈다.

$$\frac{J_1 J_3^{1/3}}{J_2} = C \quad (2-3)$$

또한 모든 재료는 하중이나 응력경로에 관계

없이 極限狀態에서 不變값 C 로 정의하고 peak 값을 나타내는 파괴상태 혹은 體積變形이 무시되는 限界狀態(예컨대 Cam-Clay 모델등)^{11),12)}는 極限狀態보다 아래있거나 일치한다고 보았다.

3. 三軸實驗

3.1 試料製作

콘크리트시료는 10.3cm×10.3cm×10.3cm의 立方體로 제작한 후 시료표면을 그라인더와 sand paper 를 이용하여 10.16cm×10.16cm×10.16cm (4'×4'×4')의 正立方體로 매끄럽게 다듬는다. 본 실험에 이용한 시료의 평균밀도는 2.55gf/cm³, $\sigma_{28} \approx 200$ kgf/cm²이다.

3.2 實驗裝置 및 方法

Fig. 3.1 에 보인바와 같이 3축(立方體)의 各面의 內徑크기는 시료의 크기보다 약간 큰 10.33cm 이고 실험중 시료모서리 부분의 局部과괴를 막기 위해 leather pad 를 시료에 부착한다. 시료에 하중을 가하기 위해 비닐 membrane 을 내벽에 부착하여 시료와 접촉하도록 하고 이때 membrane 을 높은 압력으로부터 보호하기 위해 polyurethane pad 로 보강한다. 압력은 비압축성이며 장시간동안 온도변화에 무관한 silicon 기름을 이용한 油壓장치이고 6면에 독립적으로 하중을 가할 수 있도록 各面に 작용하는 壓力라인에 발브가 부착되어 應力制御가 가능하도록 되어 있다. 또한 各面의 變形을 측정하기 위해 시

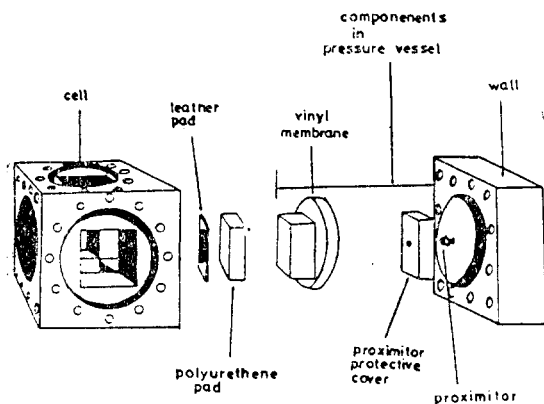


Fig. 3.1 Schematic of expanded view of cell and some components

료의 全面을 電氣抵抗으로서 感應되는 알미늄호일로 둘러싸고 삼축 cell의 내벽에 부착된 proximity probe 를 이용하여 측정한다. 즉 하중을 증가하거나 감소함에 따라 시료가 변형을 일으키면 시료와 proximity probe 의 간격의 차이가 D.C. Signal 로 변환되어 측정된다(본 실험에 대한 상세한 내용과 실험장치는 참고문헌(2) 참조)

4. 實驗結果 및 考察

4.1 應力徑路

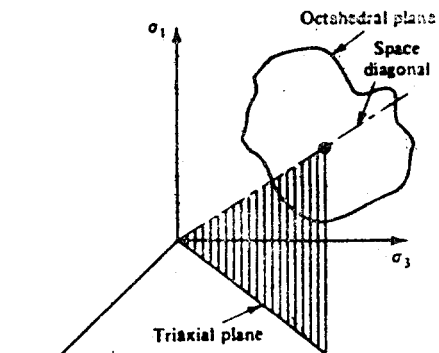
地盤材料의 變形舉動에 대한 實驗室研究로서는 원형 3축압축실험기를 이용하여 왔으며 이들은 두개의 主應力이 항상 같은 $\sigma_2 = \sigma_3$ 의 조건으로서 遂行된다.

그러나 立方體 3축실험은 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 를 각각 독립적으로 제어하여 다양한 應力徑路和 變形을 측정할 수 있으며 따라서 現狀상태에 보다 접근할 수 있다. 이와같은 3축방향應力 제어실험에 따르는 모든 應力徑路는 應力空間에서 어떤 平面위에 투영할 수 있으며 이 面을 三軸面이라 부른다면 周知하다시피 Fig. 4.1 은 主應力空間에서 고려할 수 있는 여러가지 應力徑路를 나타낸 것이다.

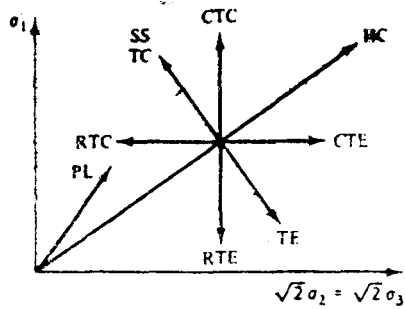
4.2 三軸面에서의 應力徑路

4.2.1 Hydrostatic Compression(HC)

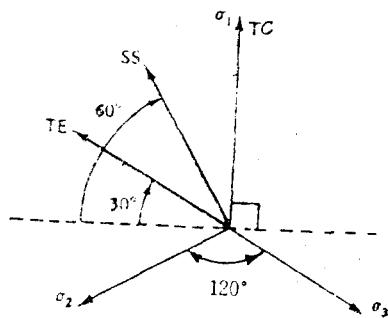
시료의 6면에 같은 크기의 하중을 2, 4, 6, 8^{ksi} (1ksi=70.3kg/cm²)까지 4회 반복하여 unloading-reloading 한 실험이다. Fig. 4.2에 8면체수직應力 σ_{oct} 와 변형률 $\epsilon_i (i=1, 2, 3)$ 의 관계를 나



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.1 Representation of stress paths: (a) principal stress space; (b) projection of stress paths on triaxial plane; (c) stress paths on octahedral plane

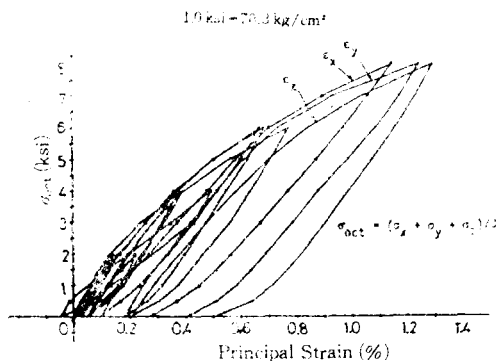


Fig. 4.2 Average stress-princ. strain response curves for HC-test. (CP(Confining Pressure)=8ksi)

타낸 것으로 i 는 x, y, z 방향을 나타낸다. 수직 변형률(ϵ_z)이 축방변형률(ϵ_y, ϵ_x)보다 작는데 이는 시료제작시 다짐의 영향으로 생각된다.

Fig. 4.3 에는 σ_{oct} 와 체적변형률 ϵ_v 의 관계를 나타냈다. 반복제하곡선의 평균기울기는 전변형

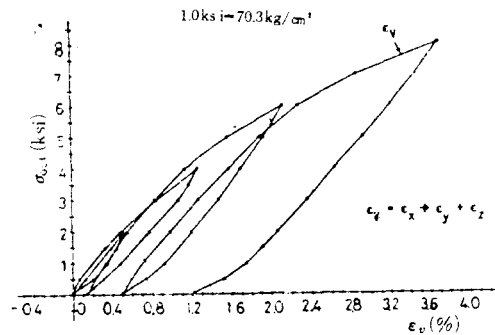


Fig. 4.3 Average stress-vol. strain response curves for HC-test. (CP=8ksi)

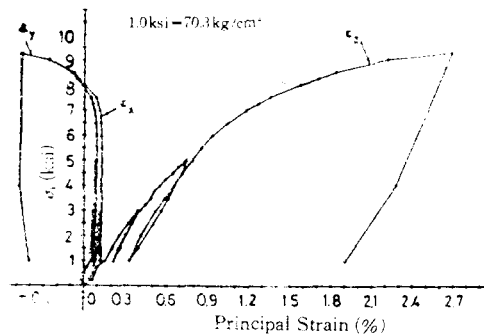


Fig. 4.4 Major princ. stress-princ. strain response curves for CTC-test. (CP=1ksi)

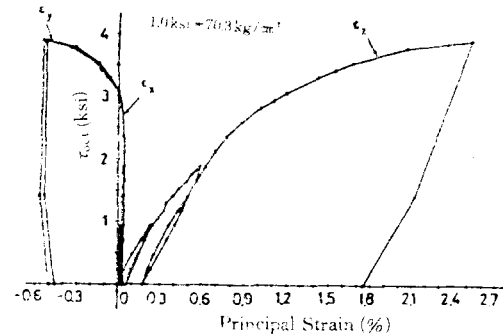


Fig. 4.5 Oct. shear stress-princ. strain response curves for CTC-test. (CP=1ksi)

률중 소성부분에 대한 것으로 곡선기울기를 이용하여 체적탄성계수 E 를 얻을 수 있다.

3.2 Conventional Triaxial Compression(CTC)

본 실험은 통상적인 원형삼축압축실험과 같이 두개의 주응력 $\sigma_2 = \sigma_3$ 로써 일정하게 유지시키고.

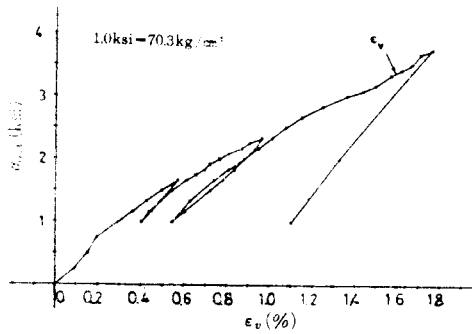


Fig. 4.6 Average stress-vol. strain response curve for CTC-test. (CP=1ksi)

σ_1 을 증가시키는 실험으로 8면체공간에서 표현하기 위해 8면체수직응력과 전단응력의 증분항으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \Delta\sigma_1 \quad (4-1)$$

$$\Delta\sigma_{oct} = p = \frac{1}{3} \Delta J_1 \quad (4-2)$$

실험은 等方應力 $\sigma_0=0, 1, 2^{ksi}$ 의 세경우에 대해 각각 시행하고 $\sigma_0=1^{ksi}$ 에 대한 결과만 나타났다. 즉 등방응력 $\sigma_0=\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=1^{ksi}$ 로 유지시킨 상태에서 σ_1 (z 방향)을 $2^{ksi}, 5^{ksi}$ 까지 2회의 unloading-reloading을 반복한후 파괴에 도달할 때까지 제하한 실험이다. Fig. 4.4에는 최대주응력 σ_1 -변형률 ϵ_i ($i=1, 2, 3$)의 관계를 Fig. 4.5에는 8면체전단응력 τ_{oct} - ϵ_i 의 관계를 나타내고 있는데 $\sigma_x=\sigma_y$ 로써 일정하므로 이에 대응하는 ϵ_x, ϵ_y 가 거의 일치하는 양상을 보여주고 있으며 여기서 i 에 대해 1은 z 방향, 2는 x 방향, 3은 y 방향으로 표현하였다. 또한 Fig. 4.6에는 8면체수직응력 σ_{oct} -체적변형률 ϵ_v 의 관계를 나타내고 있다.

4.3 8面體面에서의 應力經路

8면체면에서의 응력경로는 TC, TE, SS 등을 들 수 있으며 Fig. 4.1(a)에서처럼 항상 8면체 위에 놓인다. 따라서 8면체수직응력은 항상 일정하다.

4.3.1 Triaxial Compression (TC)

본 실험은 최대주응력 σ_1 이 증가할 때 다른 주응력 σ_2 와 σ_3 가 감소하여 8면체수직응력 σ_{oct} 가 항상 일정하게 유지되는 실험이다. 즉 σ_1 에서 $\Delta\sigma_1$ 이 증가할 때 σ_2 와 σ_3 가 각각 $\Delta\sigma_1/2$ 만

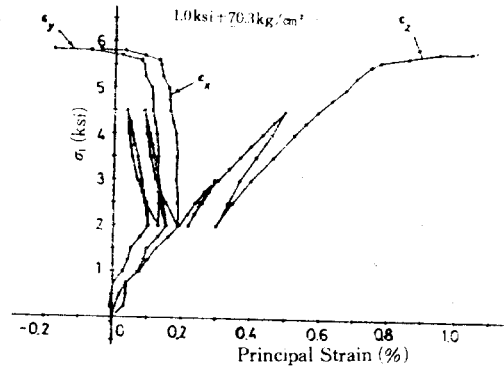


Fig. 4.7 Major princ. stress-princ. strain response curves for TC-test. (CP=2ksi)

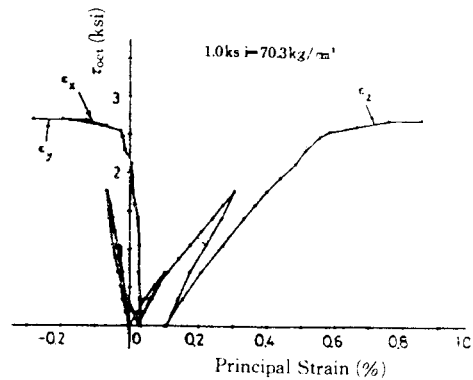


Fig. 4.8 Oct. shear stress-princ. strain response curves for TC-test. (CP=2ksi)

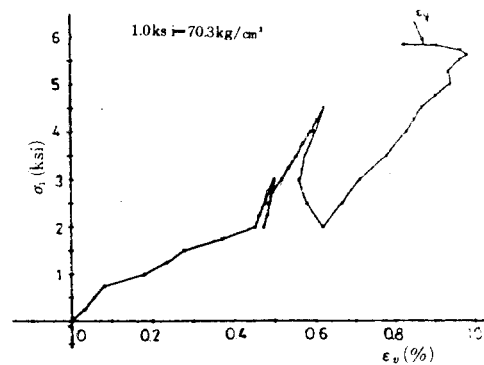


Fig. 4.9 Major princ. stress-princ. strain response curves for TC-test. (CP=2ksi)

큼 감소하여 초기값을 항상 일정하게 유지한다. 따라서 8면체전단응력의 증분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\tau_{oct} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta\sigma_2 \quad (4-3)$$

Fig. 4.7은 등방응력 $\sigma_0=2^{ksi}$ 에 대해 TC 실험을 한 결과를 최대주응력 σ_1 -변형률 ϵ_1 의 관계로 나타낸 것으로 σ_1 을 $3^{ksi}, 5^{ksi}$ 까지 unloading-reloading을 반복한 후 파괴에 도달할 때까지 제하한 것으로 $\epsilon_x(\epsilon_1)$ 이 압축변형을 계속할 때 $\epsilon_x(\epsilon_2), \epsilon_y(\epsilon_3)$ 가 인장변형을 일으키며 파괴에 도달한 것이다. 또한 Fig. 4.8에서는 8면체전단응력 τ_{oct} 와 ϵ_i 의 실험결과로 σ_2 와 σ_3 가 같은 값을 유지하므로 ϵ_2 와 ϵ_3 역시 같은 거동을 하고 있으며 Fig. 4.9의 $\sigma_1-\epsilon_v$ 의 관계에서는 체적거동이 압축을 받는 상태에서 거의 선형적인 dilation이 일어난 후 인장을 일으키며 파괴에 도달한다 이런 현상은 대체로 콘크리트와 같은 재료에서 일정한 등방응력에서 전단을 받을 때 일어나며 이에 대해 Gestle⁷⁾등도 유사한 거동을 지적하였다.

4.3.2 Triaxial Extension(TE)

TE 실험의 응력경로는 TC 실험과 반대로 8면

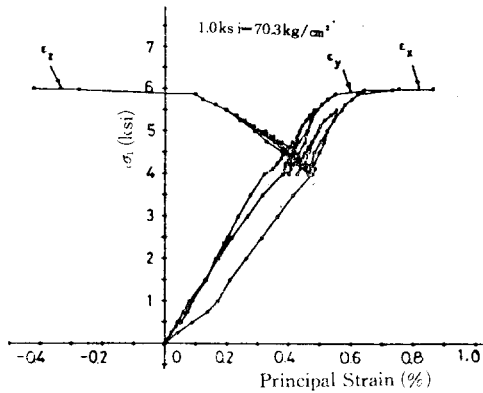


Fig. 4.10 Major princ. stress-princ. strain response curves for TE-test. (CP=4ksi)

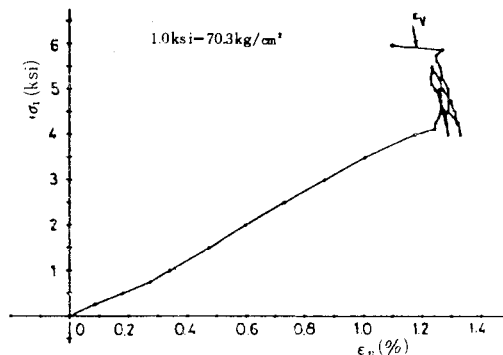


Fig. 4.11 Major princ. stress-vol. strain response curve for TE-test. (CP=4ksi)

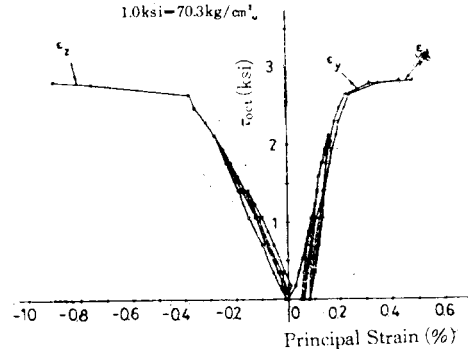


Fig. 4.12 Oct. shear stress-princ. strain response curves for TE-test. (CP=4ksi)

체수직응력 σ_{oct} 가 일정하도록 유지하기 위해 σ_3 (σ_x)를 감소시키면서 σ_1 (σ_x)과 σ_2 (σ_y)를 증가시킨 실험이다. 실험은 등방응력 σ_0 를 $4^{ksi}, 5^{ksi}$ 에 대해 시행하고 $\sigma_0=4^{ksi}$ 에 대한 결과만 나타냈다.

Fig. 4.10은 최대주응력 σ_1 과 변형률 ϵ_1 의 관계를 나타낸 것이고 Fig. 4.11은 σ_1 과 체적변형률 ϵ_v 의 관계를 나타낸 것으로 등방응력 $\sigma_0=5^{ksi}$ 까지는 압축을 받으며 거의 선형적으로 변형이 증가하고 TE 실험을 시작함과 동시에 dilation을 일으키며 마치 시료가 파괴되듯이 급속도로 체적이 팽창한다. 또한 Fig. 4.12는 8면체전단응력 τ_{oct} 와 변형률 ϵ_i 의 관계를 나타낸 것으로 σ_1 (σ_x)와 σ_2 (σ_y)가 같은 값이므로 이에 대응하는 ϵ_1 (ϵ_x)과 ϵ_2 (ϵ_y)가 거의 같은 변형을 일으키고 있다.

4.3.3 Simple Shear(SS)

단순전단을 받는 시료에 대한 응력상태는 等方應力水準 즉 $\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 에서 공간에 수직인 8면체평면과 관련된다. 중간주응력 σ_2 를 일정하게 유지시키고, 최대주응력 σ_1 을 증가할 때 최소주응력 σ_3 를 감소시켜 그 값을 일정하게 하여 σ_{oct} 가 일정하게 유지되도록 한다.

등방응력 $\sigma_0=4, 5^{ksi}$ 에서 전단실험을 한 것으로 Fig. 4.13에는 σ_1 과 ϵ_1 의 관계를, Fig. 4.14에는 τ_{oct} 와 ϵ_i 의 관계를 그리고 Fig. 4.15에는 σ_1 과 ϵ_v 의 관계를 나타내고 있다. Fig. 4.13과 Fig. 4.14에서 주목할 것은 중간변형률(ϵ_y)이 약간 압축성을 띠고 있다는 점이다.

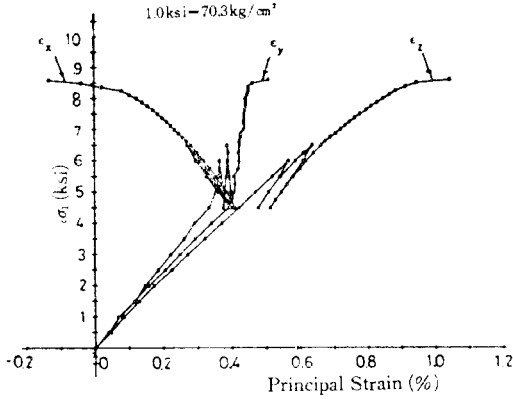


Fig. 4.13 Major princ. stress-princ. strain response curves for SS-test. (CP=4.5ksi)

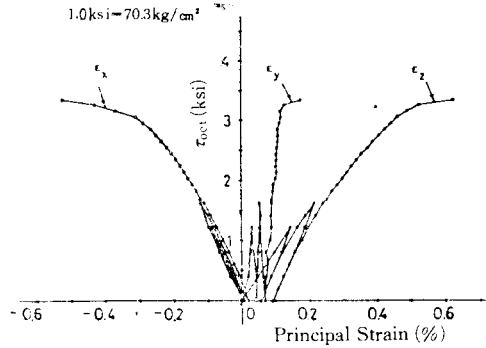


Fig. 4.14 Oct. shear stress-princ. strain response curves for SS-test. (CP=4.5ksi)

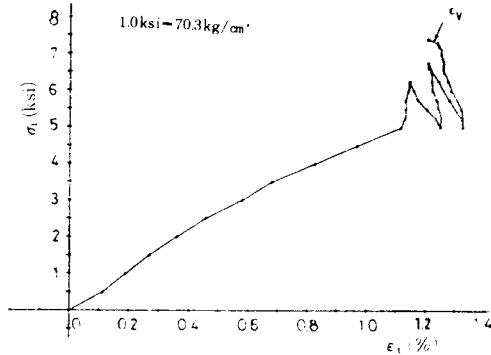


Fig. 4.15 Major princ. stress-vol. strain response curve for SS-test. (CP=4.5ksi)

4.4 8面體 應力—變形率 관계

8면체평면에서 應力—變形率關係를 설명하기 위해 8면체수직응력(σ_{oct})와 전단응력(τ_{oct}), 8면체수직변형률(ϵ_{oct})와 전단변형률(γ_{oct})을 주응력과 주변형률의 향으로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4-4)$$

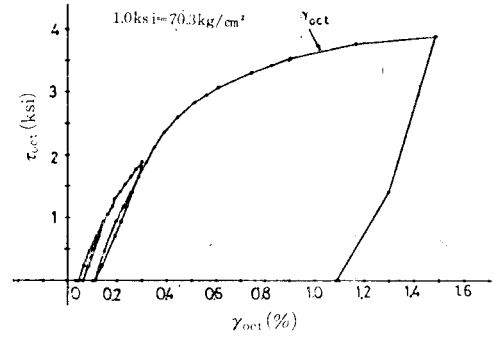


Fig. 4.16 Octahedral stress-strain response curve for CTC-test. (CP=1ksi)

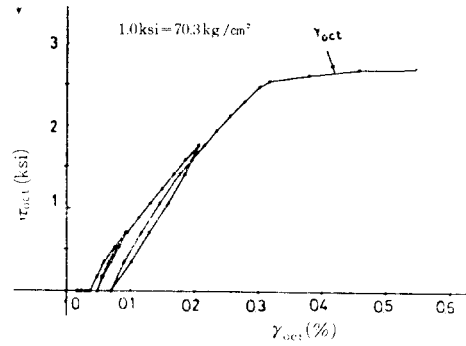


Fig. 4.17 Octahedral stress-strain response curve for TC-test. (CP=2ksi)

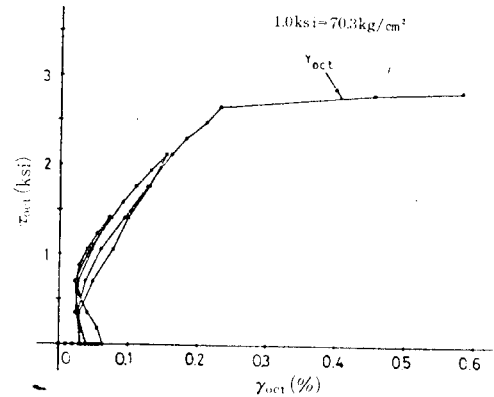


Fig. 4.18 Octahedral stress-strain response curve for TE-test. (CP=4ksi)

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4-5)$$

$$\epsilon_{oct} = \frac{1}{3}(\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \quad (4-6)$$

$$\gamma_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (4-7)$$

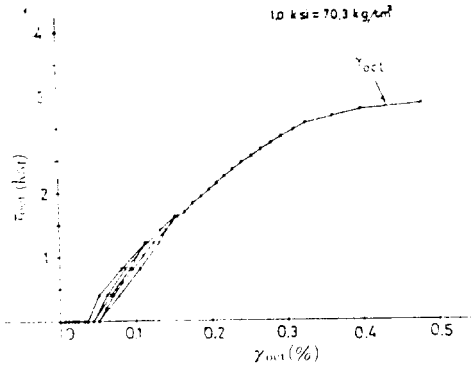


Fig. 4.19 Octahedral stress-strain response curve for SS-test. (CP=4.5^{ksi})

상기에서 시행한 각종 응력경로실험을 통하여 式(4-5)의 전단응력(τ_{oct})과 式(4-7)의 전단변형을 관계로 나타내면 Fig. 4.16은 초기등방응력 $\sigma_0=1^{\text{ksi}}$ 에서 CTC 실험의 결과를 나타내고 있으며 Fig. 4.17은 $\sigma_0=2^{\text{ksi}}$ 에서의 TC 실험결과이고 Fig. 4.18은 $\sigma_0=4^{\text{ksi}}$ 에서의 TE 실험 그림이고 Fig. 4.19는 $\sigma_0=4.5^{\text{ksi}}$ 에서의 SS 실험결과를 나타내고 있다. 이들(τ_{oct} 와 γ_{oct} 의 관계) 그림의 unloading-reloading의 반복제하곡선기울기로부터 전단탄성계수 G 값을 얻을 수 있다.

4.5 極限強度

4.5.1 $\sqrt{J_{2D}}-J_1$ 面

초기등방응력을 각각 달리한 상기의 각종 응력경로실험에 대하여 極限強度를 $\sqrt{J_{2D}}-J_1$ 면에 나타내면 Fig. 4.20과 같다.

그림에서 처럼 8면체전단강도는 응력경로에 크게 의존하고 있으며 등방응력 ($\sigma_0=\frac{1}{3}J_1$)이 클수록 극한강도가 크고 강도의 크기는 CTC, TC, SS, TE의 순서이다. 만약 극한강도가 이와 같은 응력경로에 무관하다면 Fig. 4.20에서 3개의 선은 하나의 선으로 나타나게 되며 그 결과는 Drucker-Prager 포락선과 극히 유사하거나 일치할 것이다.

4.5.2 8면체면

Fig. 4.21에는 Fig. 4.1(c)의 8면체면에 極限狀態에서의 8면체전단강도(τ_{oct})를 실험종목별로 나타낸 것이다. 동시에 이에 대응하는 8면체수직응력(σ_{oct})을 연결하면 이는 極限包絡線이 된

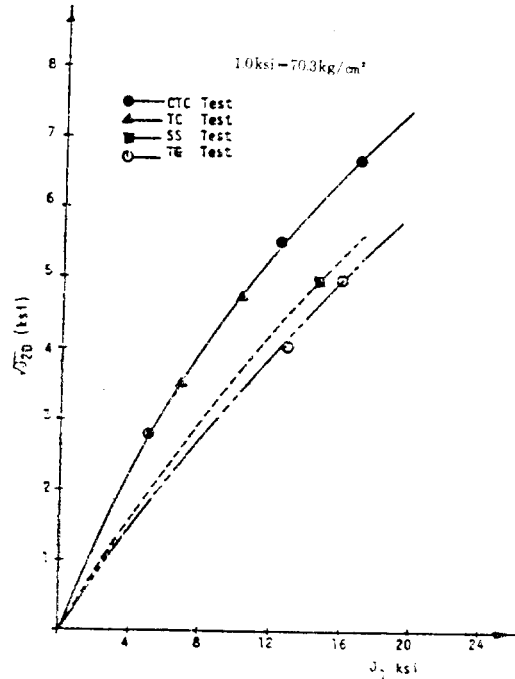


Fig. 4.20 Ultimate surface in $\sqrt{J_{2D}}-J_1$ plane

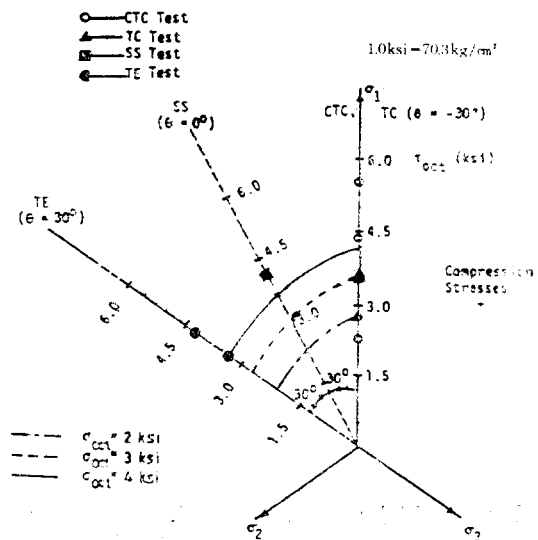


Fig. 4.21 Ultimate states in octahedral plane

다. 즉 그림에서와 같이 τ_{oct} 를 σ_1 축에 표시하면 이 τ_{oct} 는 각각 응력경로(θ)에 의해 정해지고 같은 응력경로에서도 등방응력(σ_0)이 클수록 크다. 또한 τ_{oct} 에 대응하는 σ_{oct} 를 연결하면 극한 포락선으로 나타나는 많은 항복면이 그려진다. 또한 이들 항복면은 응력경로에 따라 원추형상

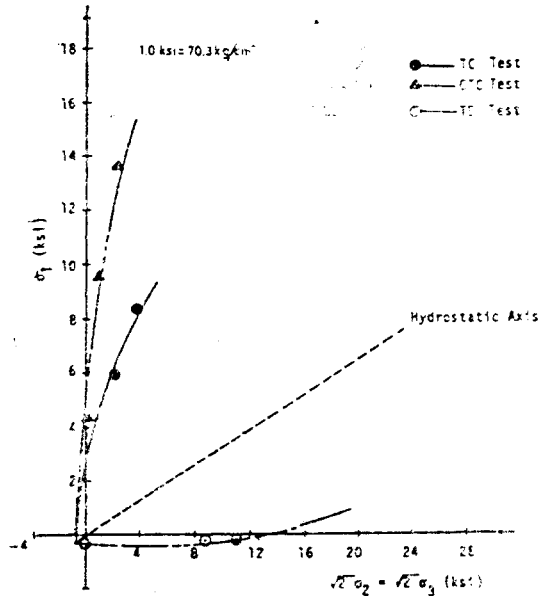


Fig. 4.22 Ultimate surface in triaxial plane

을 보이고 있으며 만약 응력경로에 무관하다면 원형으로 나타날 것이다. 이와같은 견해에 대해서는 Gestle et al¹⁷⁾ 등 연구가들도 유사한 결론을 내리고 있다.

4.5.3 三軸面

Fig. 4.22는 3축면에서 極限強度包絡線을 나타내고 있으며 SS-test의 응력경로는 3축면위에 놓이지 않으므로 나타낼 수 없다. 또한 콘크리트와 같은 경화재료에 대해 강도거동을 예측하는데 있어서는 그림과 같이 인장응력의 영향을 고려해야 한다.

5. 結 論

3개의 主應力을 독립적으로 제어할 수 있는 입방체 3축실험을 통하여 여러가지 응력경로를 3차원응력공간과 8면체평면 그리고 3축평면내에서 응력-변형률과 강도특성을 고찰하였다. 이는 추후 硬化性土質材料의 구성식의 연구에 적용하기 위한 기초연구로 시행한 것이며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 6면을 독립적으로 제어할 수 있는 立方體 三軸實驗을 시행함으로써 보다 더 정확하고 다양하게 응력경로를 설명할 수 있다.
2. 경화재료에 대한 전단강도의 크기는 CTC,

TC, SS, TE의 순서이다. 따라서 통상의 토질재료에서 CTC를 간편히 사용하고 있으나 경화재료는 과대평가의 되는 점에서 신중을 기해야 한다.

3. 8면체전단강도는 등방응력 ($\sigma_0 = \frac{1}{3}J_1$)이 클수록 크며

4. 또한 응력경로에 (θ) 의존한다.

5. 8면체면에서 극한포락선은 전단강도가 응력경로에 의존하므로 원추형상이 된다. 현재 토질재료에 대해서 파괴면이 여러형태로 논의되고 있음에 비추어 경화재료에서는 기본적으로 원추형이 된다는 점에 주목할 필요가 있다.

6. 콘크리트와 같은 경화재료의 강도특성을 예측하는데 있어서는 인장강도의 영향을 고려해야 한다. 이점은 粒狀體와 같은 경화재료에도 검토해야 할 문제로서 Lade⁹⁾ 등도 지적하고 있다.

본문은 경화재료를 대상으로 그 기본적인 특성을 연구하였는 바 앞으로 이를 토대로 입상체에 대한 확장연구가 과제로 남아 있다.

※ 본 연구는 '87년도 한국과학재단의 해외연구계획에 의해 수행된 연구의 일부로 동제단에 사의를 포함과 동시에 본 연구를 지도해 준 Arizona대학의 C.S. Desai 교수에게 감사를 드리며 또한 본문을 작성하는데 지도를 베풀어 주신 전남대학교 박병기교수님께도 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. Desai, C.S., "A General Basis for Yield, Failure and Potential Functions in Plasticity," *Int. J. Num. Analyt. Methods in Geomech.*, Vol.4, 1980, pp.361~375.
2. Desai, C.S., and Janardhanam, R. and Sture, S., "A High Capacity Truly Triaxial Device and Application," *J. Geotech Testing*, ASTM, 1980.
3. Desai, C.S., Phan, H.V., and Sture, S., "Procedure, Selection and Application of Plasticity Models for Soil," *Int. J. Num. Analyt. Methods in Geomech.*, Vol. 5, No. 3, 1981, pp.295~311.
4. Desai, C.S. and Siriwardane, H.J., "Constitu-

- itive Laws for Engineering Materials," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1983.
5. DiMaggio, F.L., and Sandler, I.S., "Material Model for Granular Soil," *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 97, EM3, 1971, pp. 935~950.
 6. Faruque, M.O., "Development of a Generalized Constitutive Model and its Implementation in Soil-Structure Interaction," *Ph.D. Dissertation*, University of Arizona, Tucson, AZ, 1983.
 7. Gerstle, K.H., Aschl, H., Bellotti, R., Bertacchi, P., Kotsovos, M.D., Ko, H.Y., Linse, D.H., Newman, J.B., Rossi, P., Schickert, G., Taylor, M.A., Traina, L.A., Winkler, H. and Zimmerman, R.M., "Behavior of Concrete Under Multiaxial Stress States," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 106, No. EM6, Proc. Paper 15945, Dec. 1980, pp. 1383~1403.
 8. Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford Univ. Press, Oxford, U.K., 1980.
 9. Lade, P.V., "Failure Criterion for Frictional Materials," *Proc., Int. Conf. on Constitutive Laws for Engineering Materials*, Univ. of Arizona, Tucson, AZ, Jan. 1983.
 10. Lade, P.V., "Three-Parameter Failure Criterion for Concrete," *Journal of the Engineering Mechanics Div.* ASCE, Vol. 108, No. EM5, Proc. Paper 17383, Oct. 1982.
 11. Roscoe, K.H. and Burland, J.B., "On the Generalized Stress-Strain Behavior of 'Wet' Clays," *Engineering Plasticity*, Heyman, J., and Leckie, F.A., eds., Cambridge University Press, 1968.
 12. Schofield, A.N. and Worth, C.P., "Critical State Soil Mechanics," McGraw-Hill, London, 1968.
 13. Strue, S., "An Improved Multiaxial Cubical Cell and its Application to the Testing of Anisotropic Materials," *M.S. Thesis*, University of Colorado, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Eng., 1983.
 14. Willam, K.J. and Warnke, E.P., "Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete," *Int. Assoc. of Bridge and Structural Engineers*, Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, Paper III-1, Bergamo, Italy, May 17~19, 1974.
 15. Wu, H.C., "Dual Failure Criterion for Plain Concrete," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 100, No. EM6, Dec. 1974, pp. 1167~1181.

(접수일자 1989. 7. 29)