

흙의 비틀림剪斷試驗에 관한 基礎的 研究

A Basic Study on Torsion Shear Tests in Soils

洪 元 杓*

Hong, Won-Pyo

Abstract

Among several types of element tests to predict soil behavior in a laboratory, the torsion shear apparatus, in which the directions of principal stresses could be rotated during shearing, was explained. In this study, this torsion shear apparatus was improved so as to be used in tests on clay specimens. And some undrained torsion shear tests were performed on remolded specimens of K_0 -consolidated clay to investigate the influence of reorientation of the principal stress directions on the stress-strain behavior.

The soil behavior by the torsion shear apparatus without torque was compared with that by the conventional triaxial compression tests. The stress path, provided by both vertical loads and torque during torsion shear tests, has much effect on the stress-strain behavior, the pore pressure and the effective principal stress ratio. The rotation angle of the principal stress and the b -value were gradually increased with increasing shear strain, but converged to the values at failure.

要 旨

흙의 力學的舉動을 파악하기 위한 要素試驗중 供試體의 主應力方向을 回轉시킬 수 있는 비틀림 剪斷試驗機의 기능에 대하여 검토하였다. 本 研究에서는 이 비틀림 剪斷試驗機가 粘土試料에 사용될 수 있게 改良製作되었다. 이 시험기를 사용하여 반죽성형된 K_0 -壓密粘土試料에 대한 약간의 非排水 비틀림 剪斷試驗을 실시하여 흙의 舉動에 미치는 主應力軸의 回轉영향이 조사되었다.

우선, torque 없이 비틀림 剪斷試驗機를 사용하여 얻은 흙의 力學的 舉動이 통상의 軸對稱三軸壓縮試驗에 의한 결과와 비교검토됐다. 흙의 應力-變形舉動, 間隙水壓 및 主應力比는 鉛直荷重과 torque에 의한 應力徑路에 크게 영향을 받았으며 剪斷變形率의 증가에 따라 主應力回轉角과 主應力의 상대적 크기, $b(=(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3))$ 값도 점진적으로 커져 파괴시의 값에 수렴하였다.

* 正會員, 中央大學校 副教授

1. 序 論

三軸試驗은 흙의 力學的 舉動을 파악하기 위한 要素試驗으로 많이 사용되어 오고 있다. 三軸試驗이라고 하면 통상 圓筒型供試體에 대한 軸對稱三軸試驗을 가르킨다.¹⁾ 그러나 이 시험 방법은 圓筒型供試體를 사용하는 관계로 요소내의 응력상태가 항상 軸對稱상태에 있게된다. 그러나 실제지반내의 응력상태는 軸對稱상태와 달리 세개의 主應力의 크기가 다른 경우도 많이 있으므로 정확한 흙의 構成左을 확립하려면 현장에 보다 근접한 상태의 要素試驗을 실시하여 흙의 力學的 舉動을 올바르게 조사할 필요가 있다. 즉 요소에 서로 다른 세 主應力을 載荷시킬 수 있는 多軸試驗裝置가 필요하게 된다.²⁾

多軸試驗으로 최근에 고안되어 주로 사용되고 있는 시험은 크게 둘로 구분될 수 있다. 하나는 立方體型三軸試驗(cubical triaxial test)^{3,4)}이며 다른 하나는 비틀림剪斷試驗(torsion shear test)^{5~7)}이다. 이중 비틀림剪斷試驗은 中空圓筒型供試體(hollow cylindrical specimen)를 사용하여 供試體의 內側面과 外側面에는 拘束側壓을 가하고 供試體 上下端에 鉛直荷重 및 torque를 가하여 각각 相異한 세 主應力을 발생작용시킬 수 있는 시험이다.

비틀림剪斷試驗은 전단시 主應力軸의 回轉현상도 표현할 수 있는 장점을 지니고 있다. 즉, 構造物을 築造할 경우 地中の 應力은 공사진행에 따라 변하게 되어 鉛直應力과 水平應力의 변화는 물론이고 전단응력까지 발생하게 되므로 主應力방향은 地中應力의 변화에 따라 변하게 된다. 따라서 지반속의 흙의 舉動은 主應力回轉에도 크게 영향을 받을 것이다.

여기에 本 研究에서는 비틀림剪斷試驗機를 粘土試料에도 사용할 수 있게 改良製作한 후 약간의 비틀림剪斷試驗을 실시하여 主應力軸回轉시의 흙의 舉動을 조사하여 보고자 한다. 비틀림剪斷試驗은 室內에서 반죽성형하여 얻은 粘土供試體에 대하여 K_0 -壓密을 실시한 후 非

排水 상태에서 실시된다. 또한 本 研究에서는 비틀림剪斷試驗機를 사용하여 主應力軸을 回轉시키지 않으면서 시험한 결과와 통상의 圓筒型供試體를 사용한 軸對稱三軸壓縮試驗결과를 비교 검토하여 보기도 한다.

2. 既存研究

主應力軸의 回轉은 單純剪斷試驗機(simple shear device)와 비틀림剪斷試驗機(torsion shear apparatus)를 사용하여 조사되어 오고 있다. 그 중 單純剪斷試驗機는 Roscoe의 연구팀^{8,9)}과 Bjerrum과 Landva¹⁰⁾에 의하여 주로 사용되었다. 그러나, Wright et al.¹¹⁾은 單純剪斷時 供試體의 중앙면에서 剪斷應力은 균일하지 않음을 보여 주었다. 일반적으로 單純剪斷試驗에는 다음과 같은 결점이 있다 ; (1)鉛直面に 剪斷應力이 유지되기 어렵다. (2)供試體內에 應力과 變形率이 균일하게 분포되지 않는다. (3)剪斷시 水平應力과 重直應力의 발생을 일반적으로 알 수 없다.²⁾

한편, Broms와 Casbarian¹²⁾이 반죽성형한 Kaolinite 粘土의 中空圓筒型供試體로 壓密非排水三軸試驗을 실시하여 強度特性에 미치는 應力回轉과 中間主應力의 영향을 조사한 이후 비틀림剪斷試驗이 사용되기 시작하였다.^{13~21)}이 비틀림剪斷試驗의 장점은 主應力을 원하는 방향으로 회전시킬 수 있다는 것이다. 鉛直軸에 대한 主應力의 회전각 ψ 는 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 와 $b = \sin^2 \psi$ 의 관계로 연결되어 있어 中間主應力 σ_2 의 영향도 역시 검토될 수 있다.

비틀림剪斷試驗에서 中空圓筒型供試體는 內側面과 外側面에 동일한 압력을 받고 있으면 平面應力狀態(plane stress state)에 놓여 있게 된다. 이러한 응력상태를 마련하기 위하여는 응력과 변형이 공시체내에 균일하게 분포되어 있어야 한다.²⁾ 이 균일성은 供試體의 치수를 적절히 선정하므로써 最大化시킬 수 있었다.^{6,11)}

Geiger와 Lade²⁰⁾는 비틀림剪斷試驗으로 主應力回轉과 應力의 反轉시의 砂質土舉動을 연구하였다. 또한 Symes et al.¹⁹⁾은 모래에 대한 비틀림剪斷試驗으로 應力反轉을 포함한 應力徑

路에 의하여 초기異方性이 크게 변함을 밝혔다. Saada의 연구팀¹⁵⁻¹⁸⁾도 비틀림剪斷試驗으로 粘土의 應力—變形舉動에 미치는 粘土異方性的 영향을 연구하여 오고 있다. 그 밖에도 비틀림 전단 시험으로 점토의 반복주기 거동의 영향이 연구되기도 하였다.²¹⁾

3. 비틀림剪斷試驗

3.1 비틀림剪斷試驗機

主應力回轉에 따른 흙의 舉動을 비틀림剪斷試驗으로 조사하려면 垂直應力과 剪斷應力이 中空圓筒型供試體內에 균일하게 발생되도록 하중을 작용시킬 수 있어야 한다. Lade는 이와 같은 조건을 만족시키는 시험기를 제작하여 砂質土의 비틀림剪斷試驗을 실시한 바 있다.^{6,13)} 本 研究에서는 이 시험기를 粘性土에도 사용할 수 있도록 改良하였다.

그림 1은 비틀림剪斷試驗장치의 3차원 概略圖이며 그림 2는 이 시험장치의 사진이다. 또한 供試體와 試驗機의 鉛直斷面은 그림 3에서 보는 바와 같다. 供試體로는 그림 1~3에서 보는 바와 같이 內徑이 18cm이고 外徑이 22cm (따라서 두께는 2cm)이며 높이가 25cm인 中空圓筒型供試體를 사용하였다. 이 供試體는 그림 3에서 보는 바와 같이 스텐레스로 만든 上部링과 下部링 및 內外側面을 싸고 있는 고무 membrane으로 둘러 싸여 있다.

비틀림시험의 문제점으로 지적되고 있는 供試體內的 應力不均—分布^{6,11)}를 개선시키기 위하여 본 시험기에는 두가지 사항을 채택하였다. 하나는 供試體의 높이를 25cm로 하여 供試體의 兩端에 작용시키는 剪斷應力에 의한 응력의 불균일 영향을 최소화시킨 점이다. 이 높이는 Lade⁶⁾ 및 Wrght et al.¹¹⁾의 연구로부터 응력의 불균일 영향을 무시할 수 있는 供試體의 최소높이 조건을 만족시키는 높이이다. 또 하나는 공시체의 內外側面에 동일한 拘束壓 (confining pressure)이 작용될 수 있게 설계한 점이다. 이는 內外側面의 側壓不一致로 인한 供試體內的 두께방향 응력의 불균일분포를 방지시킬 수 있다.

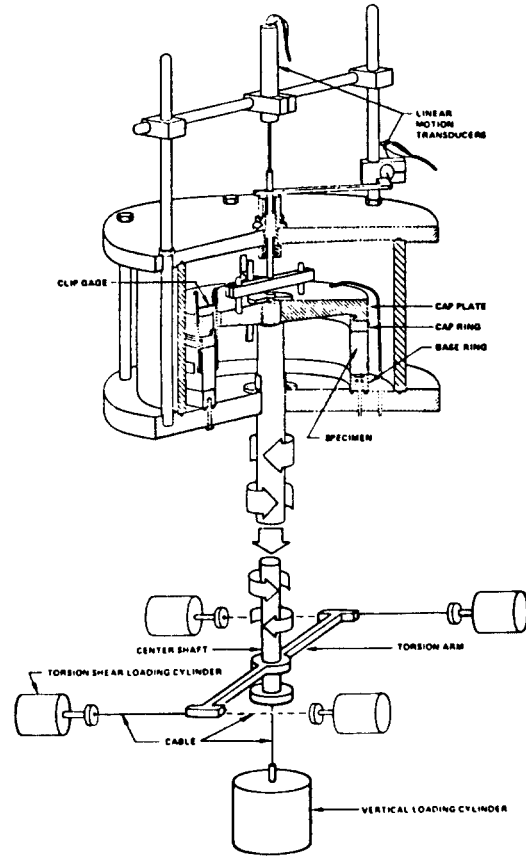


그림 1. 비틀림 剪斷試驗機

供試體에 작용시키는 拘束側壓은 供試體 주위의 cell water를 통하여 작용시키며 剪斷應力과 鉛直軸差應力(vertical deviator stress)은 供試體의 兩端에 鉛直荷重과 torque로 작용시킨다. 이들 하중은 각각 독립적으로 작용시킬 수 있게 하였으며 응력제어 및 변형제어 모두가 가능하게 설계되어 있다. 鉛直荷重은 그림 1과 그림 3에서 보는 바와 같이 上部板 (cap plate)에 의하여 供試體에 전달되며, 이 上部板은 cell의 바닥을 관통하여 설치된 中央軸(center shaft)에 연결되어 있다. 이 中央軸은 그림 1의 鉛直荷重실린더(vertical loading cylinder)에 의하여 상하로 움직일 수 있게 되어 供試體를 壓縮시킬 수도 있고 引張시킬 수도 있다.

한편, torque는 그림 1에서 보는 바와 같이 한 쌍의 비틀림剪斷載荷실린더(torsion shear loading cylinder)에 의하여 中央軸과 上部板을 통하여 供試體에 전달된다. 剪斷應力은 이 to-

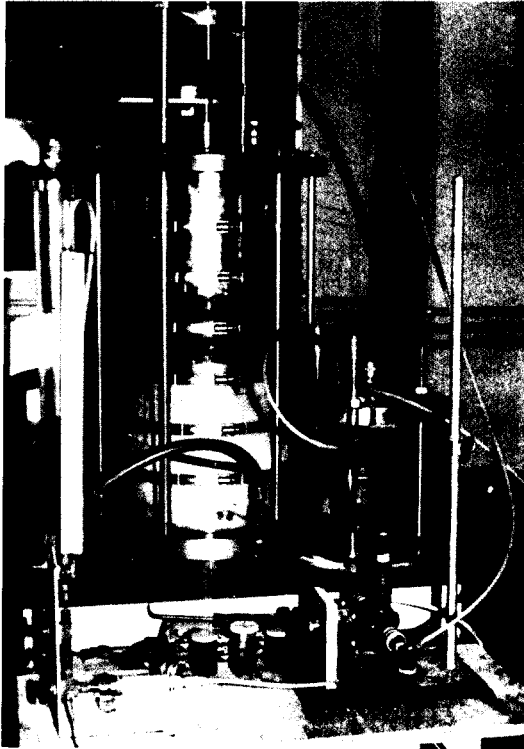


그림 2. 비틀림 剪斷試驗裝置

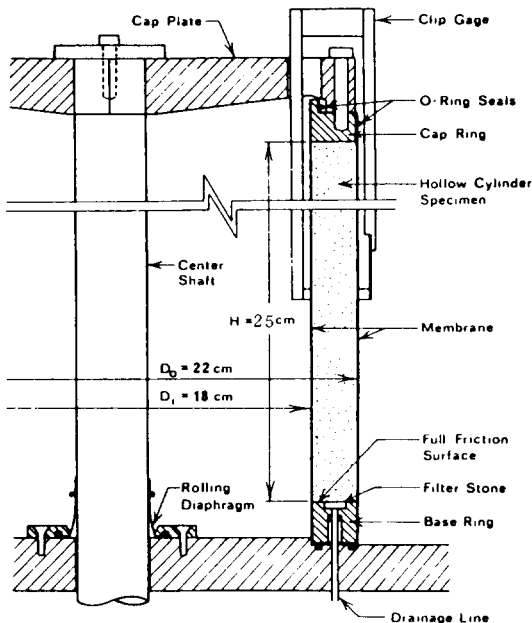


그림 3. 中空圓筒型供試體의 斷面圖

shear stress에 의하여 供試體內部에 발생된다. 剪斷應力을 供試體에 충분히 전달시키기 위하여 上部링(cap ring)과 下部링(base ring)의 표면에 epoxy를 바른 후 모래를 압착시켜 마찰면을 만들어 供試體와 링 사이의 미끄러짐을 방지시켰다. 이 剪斷應力의 발생으로 인하여 主應力의 크기와 방향이 변하게 된다. 즉, 主應力방향이 回轉되며 서로 다른 主應力의 응력상태가 供試體內에 발생하게 된다. 이 剪斷應力이 작용하지 않으면 拘束壓은, 鉛直荷重이 壓縮의 경우 最小主應力 σ_3 가 되고 伸張의 경우 最大主應力 σ_1 이 된다. 그러나 비틀림 剪斷應力이 작용하면 拘束壓은 中間主應力 σ_2 가 된다.

3.2 使用試料

本 研究에 사용된 粘土試料는 Feldspar Corporation에서 분말상태로 시판하고 있는 Edgar Plastic Kaolinite(EPK)점토이며 40%의 실트분과 60%의 점토분으로 구성되어 있다. 이 粘土의 液性限界는 60%이고 塑性限界는 30%이며 비중은 2.65이다. 또한 活性度(activity)는 0.50 이므로 非活性粘土에 해당한다.

3.3 供試體製作

공기 건조상태의 EPK 粘土분말을 液性限界의 두배가 되는 含水比가 되도록 脫氣水(de-aired water)와 섞어 粘土현탁액(slurry)을 만들었다. 이때 粘土는 # 20(0.83mm) US 표준 체로 쳐서 물속에 침전되도록하며 손으로 천천히 저어서 덩어리나 공기가 남아 있지 않도록 한 후 전동믹서로 15~20분간 반죽하였다. 그런 후 이 粘土현탁액을 中空型의 特殊壓密裝置에 천천히 흘러 넣어 2kg/cm^2 의 鉛直壓으로 一次元壓密을 실시하였다.

이 특수압밀장치는 內徑이 16.5cm 外徑이 26cm인 中空圓筒型이며 초기높이는 66cm 정도 이었다. 試料의 上面과 下面에는 두개씩의 배수용 porous plastic板을 대어 兩面排水狀態로 압밀하였다. 또한 동일 재료로된 폭 3cm 정도의 긴 띠를 나선형으로 두줄 壓密裝置의 內側壁에 부착시켜 배수를 촉진시켰다.



그림 4. 中空圓筒型供試體 Trimming 작업상태

壓密이 완료된 후 試料를 壓密試驗裝置에서 꺼내어 비틀림剪斷試驗용 供試體 크기로 다듬었다. 이 작업에서는 회전판에 다듬용 칼을 부착시켜 제작한 장치를 사용하였으며 모터에 의하여 회전판이 회전하고 칼은 상하로 이동할 수 있게 하였다. 이 장치를 사용하여 필요한 상태로 성형된 供試體는 그림 4의 사진에서 보는 바와 같다. 이 供試體의 양단에 스텐레스로 만든 上部링과 下部링을 부착시켰다.

3.4 試驗方法

中空型 供試體를 비틀림剪斷試驗機에 놓고 上部와 下部의 排水線을 연결시켰다. 그런 후 供試體의 外側面을 일정 간격의 홈을 뚫은 filter paper로 둘러 싸고 供試體의 外側과 內側을 고무 membrane으로 둘러쌌다. 이 고무 membrane의 두께는 0.04~0.05cm가 되도록 하였다. 外側 membrane은 미리 제작된 제품을 사용하였으며 그림 2에서 보는 바와 같이 前面에 2.5cm간격의 線을 가로 세로 그려 넣기도 하

였다. 이 線은 剪斷試驗시 사진촬영으로 剪斷變形상태를 관찰할 경우 사용하였다. 한편, 內側 membrane은 rubber cement를 먼저 供試體 內側面에 직접 바르고 말린 후 液體 latex를 6~7회 발리 마련하였다.

고무 membrane의 설치가 끝나면 그림 1 및 3에 보이는 中央軸과 上部板을 설치하고 變形測定用 clip gage를 부착시켰다.

그 다음, chamber를 덮고 물을 채운 다음 소정의 cell pressure와 back pressure를 가하여 K_0 -壓密을 실시하였다. K_0 -壓密시에는 排水量으로 산정된 體積變化가 鉛直變位에 의하여 산정된 體積變化와 같아지도록 鉛直荷重을 응력제어방식으로 증가시켰다. 壓密시 排出되는 排水量을 측정하여 壓密-時間 관계로부터 一次壓密의 종료 여부를 확인하였다. 壓密이 완료된 후 배수선을 잠그고 포화정도를 검사하기 위하여 間隙壓係數, $B(=\Delta u/\Delta \sigma_3)$ 값을 측정하였다.

그 다음에 鉛直荷重 및 torque를 응력제어 방식 혹은 변형제어방식으로 載荷하여 剪斷試驗을 실시하였다. 剪斷試驗시 鉛直荷重, torque, 拘束壓, 鉛直變形量, 剪斷變形量 및 供試體 斷面變形量を 측정하였다. 또한 非排水시험의 경우에는 間隙水壓을 측정하며 排水試驗의 경우는 體積變形량을 측정하였다. 剪斷試驗완료 후 供試體의 치수, 무게 및 함수비를 측정하였다. 시험기간 중의 실내 온도는 $20^{\circ}\sim 21^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 항상 유지시켜 주었다.

3.5 試驗計劃

비틀림剪斷試驗機內에서 K_0 -壓密이 완료된 후에 아래와 같은 剪斷試驗을 非排水상태에서 실시하였다.

No. 1 시험에서는 torque를 載荷하지 않고 鉛直荷重만 변형제어방식으로 載荷하였다.

No. 2 시험에서는 먼저 鉛直軸差應力(vertical deviator stress)이 K_0 -상태로부터 $0.66\text{kg}/\text{cm}^2$ 가 되도록 鉛直荷重을 除荷시킨 상태에서 torque만을 변형제어방식으로 載荷하였다.

No. 3 시험에서는 반대로 먼저 剪斷應력이 $0.30\text{kg}/\text{cm}^2$ 가 되도록 torque를 載荷시킨 상태

에서 鉛直荷重만을 변형제어방식으로 除荷시켰다.

No. 4 시험에서는 K_0 壓密이 완료된 후 torque만을 변형제어방식으로 載荷하였다.

K_0 -壓密 과정에서는 4kg/cm^2 의 cell pressure와 2kg/cm^2 의 back pressure 상태에서 有效拘束壓 σ'_3 가 2kg/cm^2 상태에서 실시하였으며, 拘束壓을 변화시키지 않는 상태에서 剪斷試驗을 실시하였다. 본 연구에서의 K_0 값은 0.55 정도였다. 또한 B 값 측정으로 서로가 충분히 포화되었음을 확인하였다. 비배수 상태에서의 變形速度는 $5 \times 10^{-3}\%/min$ 정도로 하였다. 이는 본 시험에 사용된 시료의 剪斷시 供試體內의 間隙水壓이 균일하게 분포될 수 있는 적절한 속도였다.²²⁾

한편, 동일한 有效 拘束壓 $\sigma'_3 = 2\text{kg/cm}^2$ 상태에서 K_0 -壓密 후 통상의 軸對稱三軸壓縮試驗(ACU-2)도 실시하였다.^{23, 24)}

4. 試驗結果

4.1 三軸壓縮試驗結果

No. 1 시험의 경우는 torque를 공시체에 載荷시키지 않고 鉛直荷重만 載荷시켰으므로 三軸壓縮試驗과 동일하다고 생각할 수 있다. 다만, 供試體로 中空圓筒型을 사용하고 공시체의 크기가 통상의 軸對稱三軸試驗에 사용되는 供試體와 크게 다를 뿐이다. 이들 두 試驗機에 의한 K_0 -壓密試料에 대하여 동일한 有效拘束壓 상태에서 실시된 三軸壓縮試驗결과를 서로 비교하여 보면 그림 5와 같다.

우선 그림 5(a)로 부터 主應力差($\sigma_1 - \sigma_3$)의 舉動을 살펴보면 두 경우 모두 初期變形段階에서 最大值($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max}가 발생된 후 급격히 감소하고 있다. 이는 K_0 -壓密試料의 특성으로 이미 조사보고 된 바 있다.²⁴⁾ 따라서 시험기에 관계없이 K_0 -壓密試料의 主應力差 舉動은 유사함을 알 수 있다. 단, ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max} 값은 비틀림剪斷試驗機에 의한 결과가 통상의 三軸試驗機에 의한 결과보다 크게 나타 나고 있다.

그러나 最大主應力比(σ'_1/σ'_3)_{max}는 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 비틀림시험기에 의한

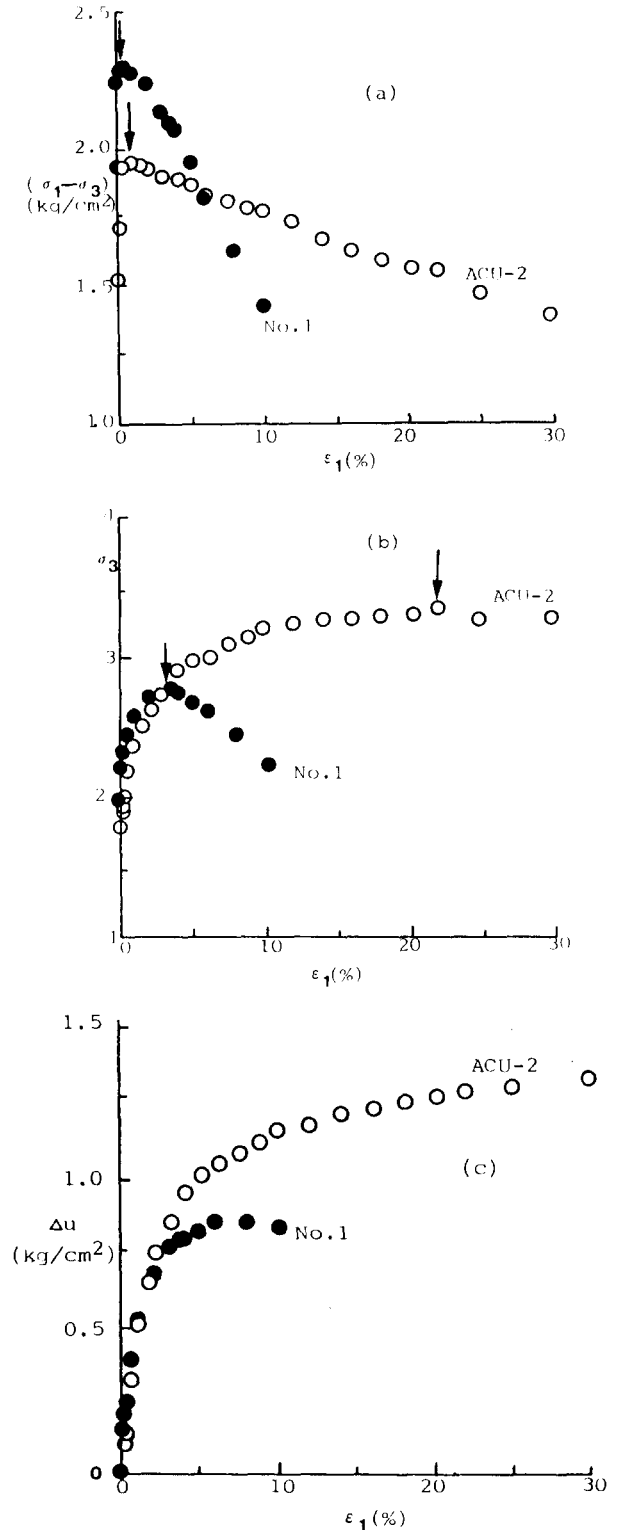


그림 5. 三軸壓縮試驗結果

결과가 통상의 삼축시험기에 의한 결과보다 작게 나타나고 있다. 따라서 有効内部摩擦角 ϕ' 는 비틀림시험기에 의한 경우가 4° 정도 작다. $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 에 도달하는 변형률 ϵ_f 는 비틀림시험기에 의한 경우가 통상의 삼축시험기에 의한 경우보다 훨씬 작다. 통상의 삼축시험의 경우 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 이후 상당한 變形率軟化現象이 발생한 후 $(\sigma_1'/\sigma_3')_{\max}$ 에 도달하나 비틀림시험기

의 경우는 비교적 초기변형단계에서 파괴에 도달함을 의미한다.

한편 間隙水壓의 變動은 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 초기단계에 두 시험 모두 비슷한 變動을 보이고 있으나 1.5%의 變形率이후에서 차이가 발생한다. 최종적으로 삼축시험의 경우가 비틀림시험에 의한 경우보다 間隙水壓이 크게 발생되고 있다.

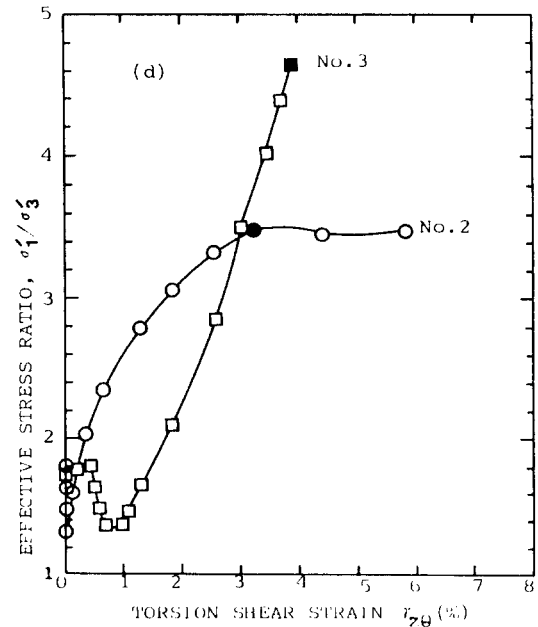
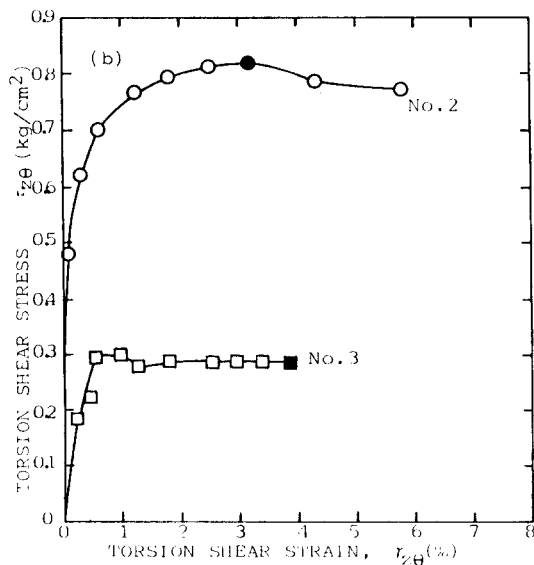
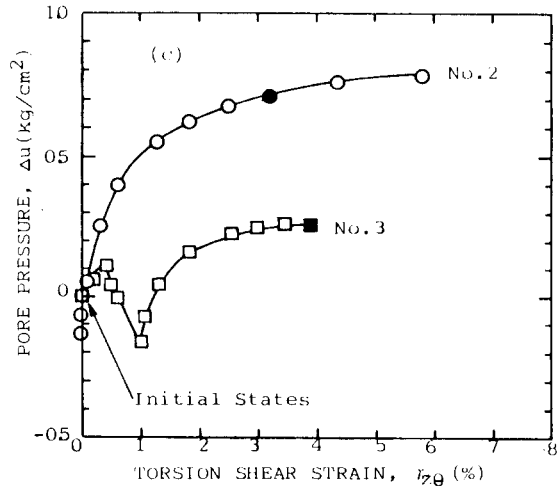
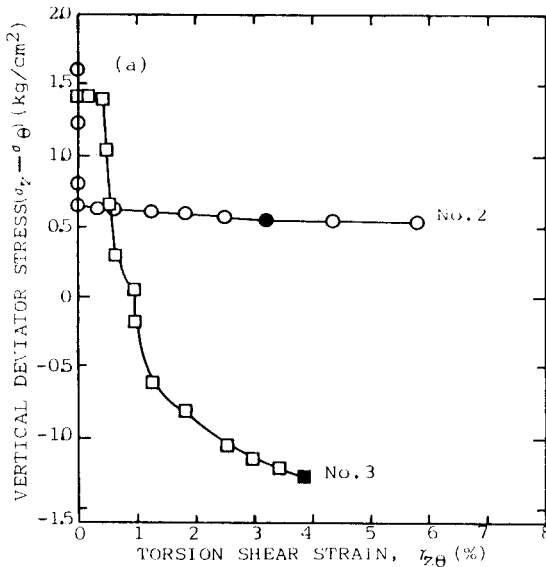


그림 6. 비틀림 剪斷試驗結果

4.2 비틀림剪斷試驗結果

그림 6은 No. 2와 No. 3시험으로 부터 얻어진 결과이다. 여기서 좌표는 그림 7(a) 및 (b)와 같다.

No. 2시험의 剪斷應力은 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 剪斷變形率의 증가와 함께 점진적으로 증가하여 파괴에 이른 후에는 變形率軟化(strain softening) 현상이 발생하였다. 그러나 No. 3시험의 경우는 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 鉛直軸差應力이 파괴시 까지 剪斷變形率의 증가와 함께 감소함을 보여 주고 있다. 이는 3.5절에서 설명한 應力徑路의 相異性を 잘 표현하여 주고 있다. 그림중 검은 원은 最大主應力比(σ_1'/σ_3')_{max}에 해당하는 파괴점을 표시한다. No. 2시험의 공시체는 伸張狀態에 있는 No. 3시험의 공시체보다 훨씬 큰 剪斷應力과 鉛直軸差應力 상태에서 파괴가 발생되었다. 그러나 이들 두 경우의 파괴시 剪斷變形率은 큰 차이가 없었다. 결국 이들 그림 6(a) 및 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 흙의 應力-變形率 舉動은 應力徑路에 따라 영향을 받고 있었다.

한편, 間隙水壓 Δu 는 그림 6(c)와 같이 정리되었다. 즉 No. 2시험의 경우 초기에 鉛直荷重 除荷段階에서는 감소하여 負의 間隙水壓이 약간 발생하였으나 torque 載荷와 더불어 점차 증가하였다. No. 3시험의 경우는 초기 torque 載荷段階에서 間隙水壓이 증가하다가 鉛直荷重의 除荷段階에서는 감소하여 負의 間隙水壓이 발생되었다. 그러나 鉛直軸差應力이 負의 값에 이르러서는 間隙水壓이 다시 증가되었다.

有效主應力比 σ_1'/σ_3' 에 대하여는 그림 6(d)에 圖示한 바와 같이, No. 2시험의 경우, 有效主應力比는 초기의 鉛直荷重 除荷段階에서는 약간 감소하였으나 torque를 載荷함에 따라 증가되어 파괴에 이르렀다. 한편, No. 3시험의 경우는 초기에 torque를 載荷함에 따라 有效主應力比는 약간 증가하였고 鉛直荷重이 除荷됨에 따라 감소되었다. 그러나 鉛直軸差應力이 負의 값이 됨에 따라 다시 증가되었다.

5. 主應力回轉

中空圓筒型供試體에 작용하는 應力을 圓筒座標로 표시한 것이 그림 7(a)이다. 이 그림중의 한 要素에 작용하는 應力成分을 검토하여 보면, 垂直應力으로는 σ_z , σ_r 및 σ_θ 가 작용하고 剪斷應力으로는 $\tau_{z\theta}$ ($=\tau_{\theta z}$)가 작용한다. 만약 剪斷應力이 작용하지 않으면 垂直應力 σ_z , σ_r 및 σ_θ 는 그대로 主應力이 된다. 그러나, 剪斷應力이 작용할 경우는 主應力의 방향과 크기가 변하게

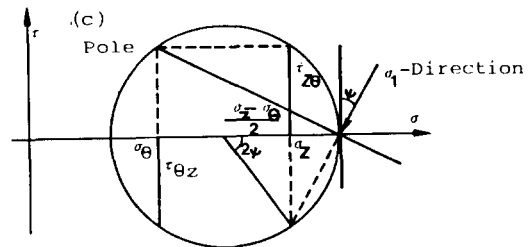
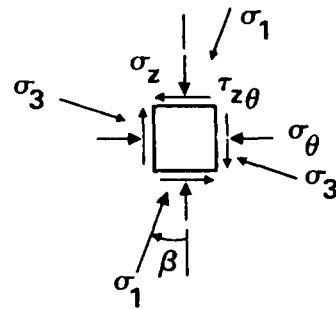
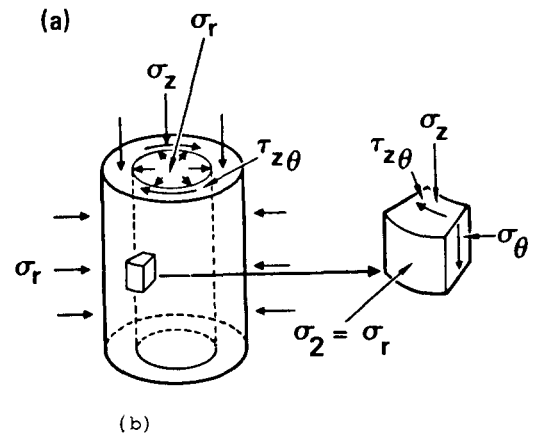


그림 7. 비틀림剪斷試驗에 의한 主應力 回轉

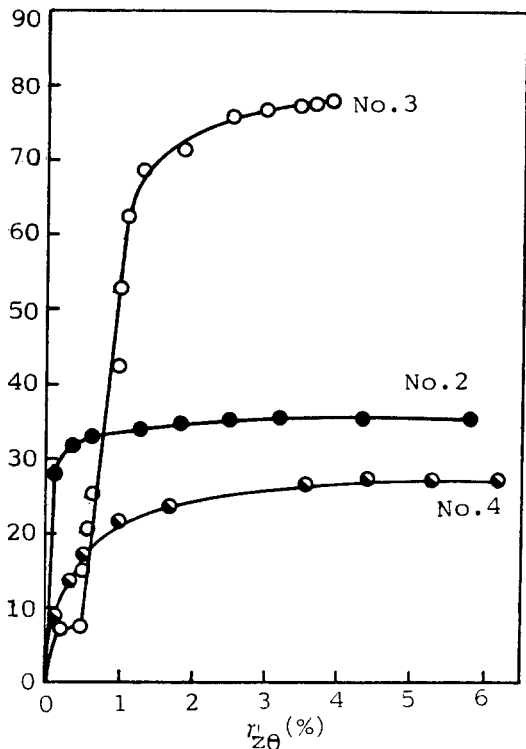


그림 8. 剪斷變形率과 主應力回轉角의 관계

된다. 이 垂直應力과 剪斷應力으로 Mohr의 應力圓을 그려보면 그림 7(b)와 같이 된다. 따라서, 最大主應力 σ_1 및 最小主應力 σ_3 는 식(1)에 의하여 산출될 수 있다.

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

..... (1)

中間主應力 σ_2 는 그림 7(a)의 要素圖에서 보는 바와 같이 σ_r 이 작용하는 면에는 剪斷應力이 작용하지 않고 拘束壓만 작용하므로 拘束壓 σ_r 이 곧 σ_2 가 된다.

最大主應力 σ_1 의 작용방향 Ψ 는 Mohr 應力圓의 기하학적 특성으로 부터 식(2)와 같이 구하여 지며 그림 7(c)와 같이 표시된다. 따라서 主應力 σ_1 의 방향은 剪斷應力 $\tau_{z\theta}$ 의 작용에 의하여 鉛直軸으로부터 Ψ 만큼 회전하게 된다.

$$\tan 2\Psi = \frac{2 \cdot \tau_{z\theta}}{\sigma_z - \sigma_\theta}$$

..... (2)

No. 2, No. 3 및 No. 4의 시험결과에 대하여 剪斷變形率과 主應力回轉角의 관계를 圖示하면 그림 8과 같다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 剪斷變形率의 증가에 따라 主應力回轉角 Ψ 가 증가함을, 즉 主應力回轉의 정도가 커짐을 알 수 있다. 그러나 回轉角의 增加率은 剪斷變形率의 증가와 더불어 감소하며 剪斷變形率이 큰 경우 파괴시의 회전각에 수렴하여 감을 알 수 있다.

한편, 主應力の 상대적 크기 b 의 변화를 조사하여 보면 그림 9와 같다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 剪斷變形率의 증가와 함께 b 값은 처음 0에서 점차적으로 증가하여 파괴시의 主應力 크기에 의하여 결정되는 b 값에 수렴한다. 따라서 통상의 三軸試驗에서와 같이 $b=0$ 인 시험은 實際 地盤 상태가 $b \neq 0$ 인 경우의 시험을 대표할 수는 없다고 생각된다.

6. 結 論

비틀림剪斷試驗機를 改良製作하여 K_0 -壓密粘土試料에 대한 試驗을 실시한 結果 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

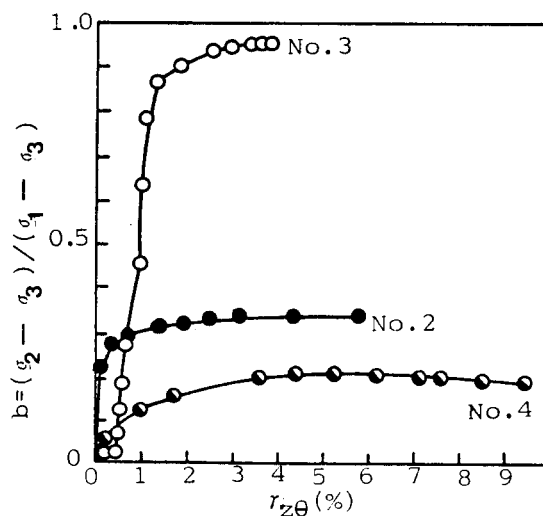


그림 9. 剪斷變形率과 b값의 관계

(1) 비틀림剪斷試驗機를 사용하여 실시된 三軸壓縮試驗은 통상의 軸對稱三軸試驗機에 의한 三軸壓縮試驗에 비하여 最大主應力差는 크게 나타 나며, 最大主應力比와 間隙水壓은 작게 나타 났다.

(2) 最大主應力比는 三軸壓縮試驗機에 의한 경우가 비틀림剪斷試驗機에 의한 경우보다 훨씬 큰 변형률에서 발생되지만 最大主應力差는 두 시험기 모두 초기변형 단계에서 발생된다.

(3) 흙의 應力-變形率, 間隙水壓, 主應力比는 鉛直荷重 및 torque에 의한 應力徑路에 크게 영향을 받는다.

(4) 剪斷變形率의 증가에 따라 主應力回轉角과 主應力의 상대적 크기를 나타내는 b값은 커지며 그 증가속도는 점차 감소하여 파괴시의 回轉角과 b값에 수렴하여 간다.

이상에 열거한 結論은 제한된 약간의 試驗을 통하여 얻어진 관계로 보다 많은 試驗을 통하여 확인될 必要가 있다. 이에 대한 계속적 研究는 일련의 研究^{25, 26)}에서 다루기로 하겠다.

感謝의 말

本 研究는 韓國科學財團의 1985年度 前半기 해외연수지원에 의하여 UCLA에서 수행되었으며 연수기간 중 많은 지원을 하여준 Paul V. Lade 教授에게 감사드리는 바이다.

參 考 文 獻

1. Bishop, A.W. and Henkel, D.J. : *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test*, 2nd ed. Arnold, London, 1962.
2. 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.
3. Lade, P.V. : "Cubical Triaxial Apparatus for Soil Testing," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No.2, 1978, pp.93-101.
4. Matsuoka, H. : "Stress-Strain Relationships of Sands Based on the Mobilized Plane," *Soils*

- and Foundations*, Vol. 14, No.2, 1974, pp.47-61.
5. Hight, D.W. Gens, A. and Symes, M.J. : "The Development of a New Hollow Cylinder Apparatus for Investigating the Effects of Principal Stress Rotation in Soils," *Geotechnique*, Vol.33. No.4, 1983, pp.355-383.
6. 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.
7. Macky, T.A. ad Saada, A.S. : "Dynamics of Anisotropic Clays under Large Strains," *Jour., GED, ASCE*, Vol. 110 No.4, 1984, pp.487-504.
8. Roscoe, K.H. : "An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples," *Proc. 3rd ICSMFE, Zurich*, Vol.I, 1953, pp.186-191.
9. Roscoe, K.H, Bassett, R.H. and Cole, E.R. L. : "Principal Axes Observed during Simple Shear of a Sand," *Proc., the Geotechnical Conference, Oslo*, Vol.I, 1967, pp.231-237.
10. Bjerrum, L. and Landva, A : "Direct Simple-Shear Tests on a Norwegian Quick clay", *Geotechnique* Vol. 16, No.1, 1966, pp.1-20.
11. Wright, D.K., Gilbert, P.A. and Saada, A. S. : "Shear Devices for Determining Dynamic Soil Properties," *Proc., ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena Californice*, Vol. 2, 1978, pp.1056-1075.
12. Broms, B.B. and Casbarian, A.O. : "Effects of Rotation of the Principal Stress Axes and of the Intermediate Principal Stress on Shear Strength," *Proc., 6th ICSMFE, Montreal* Vol, I, 1965, pp.179-183.
13. Lade, P.V. : "Torsion Shear Tests on Cohesionless Soil", *Proc. 5th Panamerican Conference on SMFE, Buenos Aires*, Vol.I, 1975, pp.117-127.
14. Lade, P.V. : "Interpretation of Torsion Shear Tests on Sand", *Proc., 2nd Inter-*

- national Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia* Vol. I, 1976. pp.381-389.
15. Saada, A.S. and Baah, A.K. : "Deformation and Failure of a Cross Anisotropic Clay under Combined Stresses", *Proc. 3rd Panamerican Conference on SMFE, Venezuela*, 1967, Vol. I, pp.67-88.
 16. Saada, A.S. and Bianchini, G.F. : "Strength of One Dimensionally Consolidated Clays," *Jour., GED, ASCE*, Vol. 101, No. GT 11, 1975, pp.1151-1164.
 17. Saada, A.S. and Ou, C.-D. : "Stress-Strain Relations and Failure of Anisotropic Clays", *Jour. SMFE, ASCE*, Vol.99. No. SM 12, 1973, pp.1019-1111.
 18. Saada, A.S. and Zamani, K.K. : "The Mechanical Behavior of Cross-Anisotropic Clays", *Proc., 7th ICSMFE, Moscow*, Vol. 1, 1973, pp.351-359.
 19. Symes, M.J.P.R., Gens, A. and Hight, D. W. : "Undrained Anisotropy and Principal Stress Rotation in Saturated Sand", *Geotechnique*, Vol.34, No.1, 1984, pp.11-27.
 20. Geiger, E. and Lade, P.V. : "Experimental Study of the Behavior of Cohesionless Soil during Large Stress Reversals and Reorientation of Principal Stresses, *Report to the National Science Foundation. Under Grant No. ENG 75-05325, UCLA-ENG 7917*, 1979, pp.46-49.
 21. Hicher, P.-Y. and Lade, P.V. "Rotation of Principal Directions in Ko-Consolidated Clay", *Submitted to Jour., GED, ASCE*, 1986
 22. Kirkgard M.M. : "Consolidation Characteristics Determined during the Constant Rate of Strain Consolidation Test", *MS Thesis, UCLA*, 1981
 23. 洪元杓 : "正規圧密粘土의 非排水剪斷強度에 미치는 圧密方法의 影響", *大韓土質工學會誌*, 第3卷, 第2號, 1987, pp.41-53.
 24. 洪元杓 : "正規圧密粘土의 舉動에 미치는 Ko-圧密效果", *大韓土木學會論文集*, 第7卷, 第3號, 1987, pp.183-193.
 25. 洪元杓 : "비틀림 剪斷試驗에 의한 Ko-圧密粘土의 舉動", *大韓土木學會論文集*, 第8卷, 第1號, 1988, pp. 151 - 157.
 26. 洪元杓 : "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, 1988, pp. 159 - 164.

(접수일자 1988.1.16)