

K_0 -壓密粘土의 主應力回轉 效果

The Effects of Principal Stress Rotation in K_0 -Consolidated Clay

洪 元 杓*
Hong, Won Pyo

Abstract

The directions of the principal strain increment, stress, and stress increment during rotation of the principal stress axes at any stress level was studied for K_0 -consolidated clay using torsion shear apparatus with individual control of the vertical stress, the confining pressure, and the shear stress on hollow cylinder specimens under undrained and drained condition. The torsion shear tests were performed according to predetermined stress-paths, which were chosen to cover over the full range of rotation of principal stress axes.

The test results indicated that the strain increment vectors at failure coincided with the stress vectors. That is, the direction of strain increment coincided with the direction of stress increment at small stress levels and with the direction of stress at higher stress levels, which indicated that the behavior of clay was transferred from elastic to plastic as the stress level was increased. The applicability of the elasto-plastic theory for modeling of the behavior of clay during rotation of the principal stress axes was given.

要 旨

鉛直荷重, 拘束壓 및 torque 를 각각 독립적으로 작용시킬 수 있는 비틀림剪斷試驗을 실시하여 主應力軸을 回轉시켰을 경우, 變形率增分方向과 應力方向 혹은 應力增分方向 사이의 관계가 조사되었다. 이 비틀림剪斷試驗은 K_0 -壓密粘土試料에 대하여 非排水 및 排水 상태하에서 主應力軸回轉이 가능한 전 應力徑路로 실시되었다.

本 研究결과 파괴시의 變形率增分벡터의 방향은 應力벡터방향과 일치함을 알 수 있었다. 즉 變形率增分벡터방향은 초기의 낮은 應力段階에서는 應力增分벡터 방향과 일치하지만 높은 應力段階에서는 應力벡터방향과 일치하게 된다. 이는 粘土의 舉動이 응력의 증가에 따라 彈性에서 塑性으로 변천되어 감을 의미한다. 따라서 主應力軸回轉시의 粘土舉動의 構成式化에는 彈塑性理論의 적용이 가능함이 입증되었다.

1. 序 論

* 正會員 · 中央大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

올바른 흙의 構成式을 확립시키려면 主應力回

轉을 정확히 이해하여야만 할 것이다⁽¹⁻³⁾. 室內試驗에서 主應力軸을 回轉시키려면 供試體에 垂直應力과 剪斷應力을 모두 적용시킬 수 있어야 한다⁽⁴⁾. 이러한 필요 조건을 충족시킬 목적으로 中空圓筒型供試體에 鉛直應力, 拘束壓 및 剪斷應力을 각각 독립적으로 작용시키도록 되어 있는 비틀림剪斷試驗機가 개발사용되고 있다⁽⁴⁻⁸⁾. 이 비틀림試驗裝置內에서 鉛直荷重과 torque를 적절하게 조절하여 여러가지 應力徑路를 마련하므로써 構造物築造로 인하여 現場地盤에 발생되는 主應力軸의 回轉을 室內에서 再現시킬 수가 있다.

흙의 構成式을 확립시키는 작업에서 가장 중요한 사항중에 하나는 어떤 임의의 응력수준에서 主應力軸을 회전시켰을 경우 變形率增分벡터방향과 應力벡터방향 혹은 應力增分벡터방향 사이의 관계파라이다^(9,10). 이와 같은 관계를 규명하기 위하여 本研究에서는 應力徑路를 여러 가지로 변경시키면서 非排水 및 排水상태에서 실시된 일련의 비틀림剪斷試驗결과를 이용한다⁽¹¹⁾. 여기서 應力徑路는 主應力軸回轉이 가능한 전영역이 모두 포함되도록 선정되었다. 시험에는 반죽 성형한 Edgar Plastic Kaolinite 粘土의 中空圓筒型供試體를 K_0 -應力상태에서 압밀하여 自然堆積粘土와 같은 直交異方性을 마련시킨 후 剪斷試驗이 실시되었다.

2. 비틀림剪斷試驗

비틀림剪斷試驗결과로는 일련의 본 연구의 일부로 이미 발표된 결과⁽¹¹⁾를 사용한다. 따라서 비틀림剪斷試驗의 試驗裝置, 使用試料 및 試驗方法 등에 관한 자세한 사항은 이전의 論文^(8,11)를 참조하기로 하며 개략적인 사항만 설명하면 다음과 같다.

本研究에는 40%의 실트분과 60%의 粘土분으로 구성된 분말상태의 EPK 粘土(Edgar Plastic Kaolinite Clay)가 120%의 함수비상태로 반죽 성형된 후 2 kg/cm^2 의 有效拘束壓으로 K_0 -壓密된 시료를 사용하였다. 이 粘土의 液性限界와 塑性限界는 각각 60 및 30이며 비중은 2.62이고 活性度는 0.50 인 非活性粘土이다.

中空圓筒型供試體를 사용하여 15회의 非排水

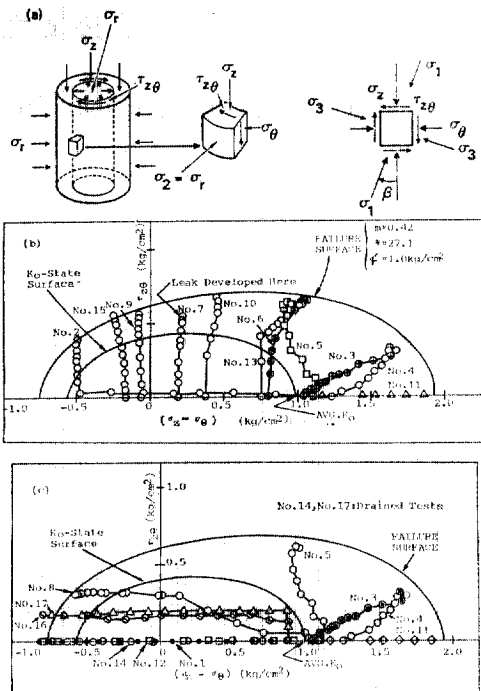


그림 1. 비틀림 剪斷試驗用 應力徑路

비틀림剪斷試驗과 2회의 排水시험을 실시하였다. 각시험은 2 kg/cm^2 의 拘束壓 상태에서 그림 1에 표시된 應力徑路에 따라 실시되었다. 비틀림剪斷試驗은 K_0 -壓密이 완료되었는가를 확인한 후 鉛直荷重과 torque를 각각 독립적으로 응력제어방식 및 변형제어방식으로 조절하여 그림 1에 표시된 應力徑路를 조성시켜 실시하였다.

3. 變形率 사이의 관계

그림 2는 그림 1에 표시된 Nos. 2, 3, 10 및 16 시험에 대한 剪斷變形率 $\epsilon_{z\theta} (= \tau_{z\theta}/2)$ 와 鉛直軸差變形率(vertical strain difference) $(\epsilon_z - \epsilon_\theta)/2$ 사이의 관계를 정리한 결과이다. 그림중 검은 원으로 표시된 위치는 最大主應力비에 해당하는 파괴에 대응하는 變形率을 나타낸다. 剪斷變形率과 鉛直軸差變形率 사이에는 初期變形段階를 제외하고는 線形的 關係를 보이고 있다. 이러한 線形關係는 粘土試料가 塑性舉動을 보이게 될 파괴부근에서 더욱 명백히 나타 나고 있

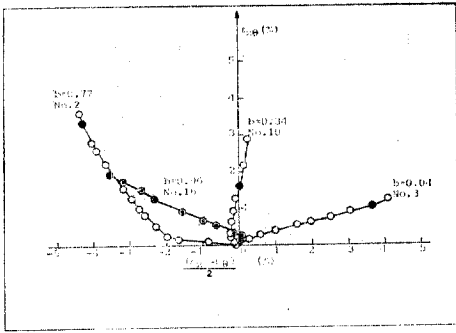


그림 2. 剪斷變形率 $\dot{\epsilon}_{x\theta}$ 와 $(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_\theta)/2$ 의 관계

다.

그림 1의 應力徑路에서 보는 바와 같이 No. 2와 No. 10의 경우 鉛直荷重을 일정하게 작용시키고 있어도 torque가 작용하게 되면 鉛直軸差變形率은 剪斷變形率의 발생과 더불어 추가적으로 증가 발생되고 있다. 이러한 變形率의 結合效果(coupling effect)는 No. 2의 경우가 No. 10의 경우보다 크게 나타 나고 있다. 이와 유사한 結合效果가 No. 16과 같이 剪斷應力이 일정하고 鉛直荷重을 계속 감소시킨 경우에도 발생하고 있다.

그 밖에도 그림 2로부터 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 가 0.34보다 큰 경우 鉛直軸差變形率은 負의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 b 의 값이 큰 경우가 작은 경우 보다 變形率 사이의 관계에 크게 영향을 미치고 있음도 알 수 있다.

4. 變形率增分方向과 應力方向

4-1. Mohr 圓

剪斷試驗시의 應力, 應力增分 및 變形率增分의 方向이 Mohr 圓으로 그림 3과 같이 구하여진다. 여기서 ψ 는 最大主應力 σ_1 과 鉛直軸 사이角이며 χ 는 最大主應力增分 $\dot{\sigma}_1$ 과 鉛直軸 사이角이고 ξ 는 最大主變形率增分 $\dot{\epsilon}_1$ 와 鉛直軸 사이角을 나타내며 각각 식(1)~(3)으로 표시된다.

$$\tan 2\psi = \frac{2 \cdot \tau_{x\theta}}{\sigma_x - \sigma_\theta} \quad (1)$$

$$\tan 2\chi = \frac{2 \cdot \dot{\tau}_{x\theta}}{\dot{\sigma}_x - \dot{\sigma}_\theta} \quad (2)$$

$$\tan 2\xi = \frac{2 \cdot \dot{\epsilon}_{x\theta}}{\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_\theta} \quad (3)$$

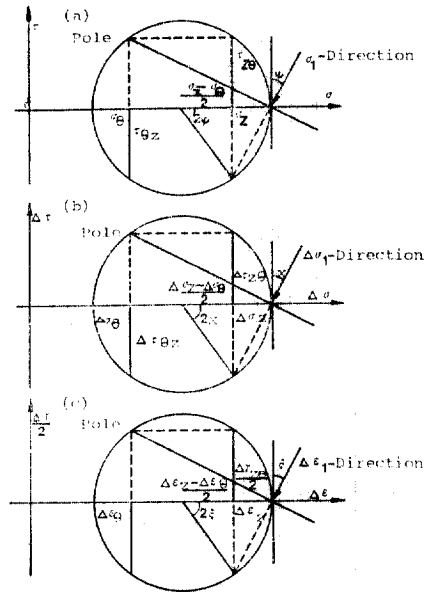


그림 3. 비틀림剪斷에 의한 應力, 應力增分 및 變形率增分方向

彈性理論에 의하면 彈性變形率增分の 方向은 應力增分の 方向과 일치하지만 塑性理論에서는 塑性變形率增分の 方向이 應力の 方向과 일치한다. 따라서 彈性舉動에서는 $\xi = \chi$ 이며 塑性舉動에서는 $\xi = \psi$ 이 될 것이다.

그러므로 塑性舉動의 경우는 식(1)과 식(3)으로부터 식(4)가 얻어질 수 있다.

$$\frac{2 \cdot \tau_{x\theta}}{\sigma_x - \sigma_\theta} = \frac{2 \cdot \dot{\epsilon}_{x\theta}}{\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_\theta} \quad (4)$$

여기서 $2 \cdot \tau_{x\theta} / (\sigma_x - \sigma_\theta)$ 는 應力벡터의 方向을 나타내며 $2 \cdot \dot{\epsilon}_{x\theta} / (\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_\theta)$ 는 變形率增分벡터의 方向을 나타낸다. 또한 變形率增分벡터의 方向은 임의의 應力段階점에서의 變形率 接선기울기로 구하여지며 應力벡터는 그 應力點과 원점 사이의 직선기울기로 구하여진다.

4-2. 變形率增分벡터

直交異方性粘土에 대하여 構成式을 확립시키고 塑性理論의 적용가능성을 확인하기 위하여서는 破壞面에서의 塑性變形率增分벡터方向을 조사할 필요가 있다. 따라서 本研究에서는 그림 4와 같은 物理的 應力空間(physical stress space)에서 破壞面上에 塑性變形率增分方向을 조사하여 보

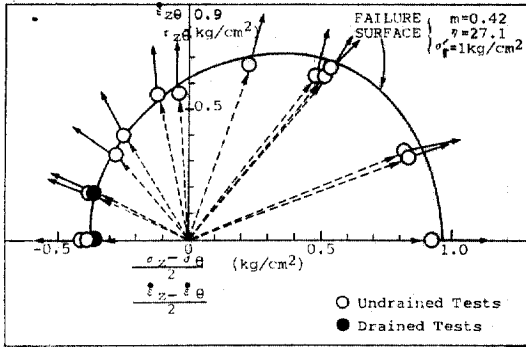


그림 4. 破壞時의 應力과 變形率增分 벡터의 方向

기 위하여 變形率增分軸 $\dot{\epsilon}_{xy}$ 와 $(\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)/2$ 를 物理的 應力空間의 應力軸 τ_{xy} 와 $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ 에 중첩시켜 보았다. 파괴시에는 응력의 변화가 거의 없어 彈性變形率增分이 거의 무시되므로 變形增成分은 거의 전부 塑性에 의한 것이다.

파괴시의 有效拘束壓 σ'_v 는 剪斷試驗중 間隙水壓의 발생으로 일정하지 않으나 각 시험결과를 σ'_v 가 동일한 상태에서 비교함이 합리적일 것이다. 따라서 실험에서 구하여진 응력을 破壞包絡線을 따라 σ'_v 가 일정한 면에 투영시키는 방법을 사용하였다. 이러한 방법에 의하여 그림 4 와 같이 실험결과를 $\sigma'_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 인 면상에 파괴시의 應力과 變形率增分の 벡터를 破壞面과 함께 圖示하였다. 이 그림중의 破壞面은 等方性 흙의 破壞規準으로 Lade 에 의하여 제안된 식(5)에 의하여 구하여졌다⁽¹²⁾.

$$\eta_1 = \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{P_a} \right)^m \quad (5)$$

여기서 I_1 과 I_3 는 應力の 第1不變量 및 第3不變量이며 각각 식(6)과 (7)로 구하여진다. P_a 는 應力の 단위로 표시된 공기압이고 η_1 과 m 은 상수로 본 연구에 사용된 EPK 粘土는 각각 27.1 과 0.42로 구하여졌다⁽¹¹⁾.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (6)$$

$$I_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 \quad (7)$$

그림 4의 破壞面은 수평축을 기준으로 대칭이므로 上半部만 圖示하였다. 이 破壞面은 원이 아니며 독특한 형태를 이루고 있다. 그림 4로부터 이 破壞面은 비틀림剪斷試驗으로 얻어진

破壞應力點과 실용적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 4중 파괴시의 응력점에서 표시된 實線은 파괴시의 變形率增分벡터의 방향을 나타내고 있다. 이 방향은 그림 2의 ϵ_{xy} 와 $(\epsilon_x - \epsilon_y)/2$ 사이 曲線의 기울기로 얻어진다. 한편, 응력벡터의 방향은 파괴시의 應力點과 원점을 연결한 직선의 기울기로 얻어지며 그림 4에 點線으로 표시되어 있다. 이 그림에 의하면 K_0 -壓密粘土가 直交異方性(cross anisotropy)을 가지고 있음에도 불구하고 파괴시의 變形率增分벡터방향은 응력벡터방향에 일치하고 있다. 이는 K_0 -壓密粘土供試體의 初期直交異方性は 파괴시 상당히 소멸되어 버리는 것으로 생각된다. 즉, 비틀림剪斷試驗에서 파괴는 변형이 비교적 많이 발생한 후에야 발생되며 이 큰 변형과정에서 直交異方性이력은 대부분 상실되어 버린 것이다. 결국 비틀림剪斷試驗에 의한 粘土의 파괴시 거동은 초기의 直交異方性에 큰 영향을 받지 않음을 보여 주고 있다. 따라서, 等方體에 대한 破壞規準이 K_0 -壓密粘土에도 실용적으로 적용될 수 있다고 생각된다.

4-3. 主應力軸의 回轉效果

Nos. 2, 3, 10 및 16의 시험결과를 이용하여 剪斷變形率 γ_{xy} 에 대한 回轉角 ψ , χ 및 ξ 의 변화를 조사하여 보면 그림 5와 같다. 여기서 ψ , χ 및 ξ 는 각각 식(1), (2) 및 (3)으로 구하여진다. 그림 5중 화살표위치는 K_0 -壓密시의 載荷履歷범위를 표시하며 그림 1(b) 및 (c)에 K_0 -상태面(K_0 -state surface)에서 구하여진다. 따라서 剪斷變形率이 이위치의 변형을 보다 작으면 응력은 初期의 K_0 -應力 상태內的 除荷 혹은 再荷의 상태에 있음을 의미한다. 또한 파괴점은 각 曲線에 검은 표시를 하였다.

그림 5로부터 알 수 있는 바와 같이, No. 10 시험을 제외하고 剪斷變形量이 작은 단계에서는 變形率增分방향 ξ 가 應力增分방향 χ 와 거의 일치하고 있다. 이와 같은 일치는 粘土가 작은 변형단계에서는 彈性舉動을 하고 있음을 의미한다. No. 10의 경우는 초기변형단계가 K_0 -壓密의 載荷履歷범위내에서의 除荷段階인 관계로 變形率增分방향과 應力增分방향이 서로 일치하지 않게

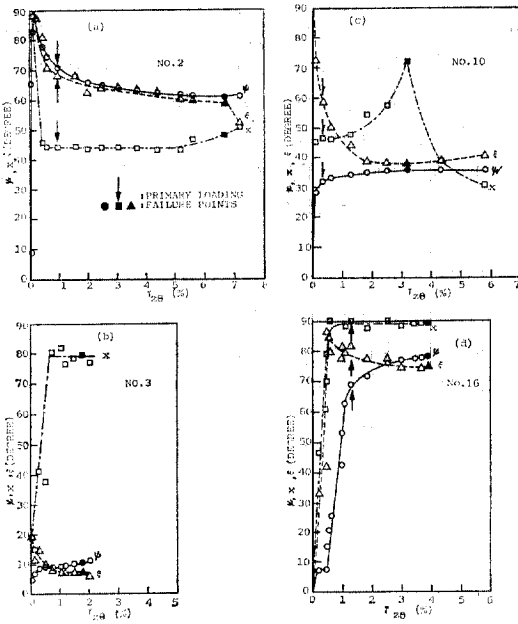


그림 5. 剪斷變形率에 대한 主應力の 回轉角(ψ), 主應力增분의 回轉角(χ) 및 變形率增분의 回轉角(ξ)의 관계

된다.

한편, 응력이 증가함에 따라 變形率增分方向 ξ 는 應力方向 ψ 에 근접하여 가며 파괴부근에 이르러서는 應力方向에 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 큰 剪斷變形段階에서는 粘土가 塑性舉動을 한다고 생각할 수 있다.

결국 그림 5로부터 응력이 初期應力에서 破壞應力까지 증가함에 따라 粘土의 舉動은 彈性에서 塑性으로 점진적으로 변천하여 감을 알 수 있다. 이는 EPK 粘土에 대한 비틀림剪斷試驗結果가 粘土의 彈塑性舉動을 잘 보여주고 있다. 따라서, 비틀림剪斷試驗으로 主應力回轉을 시킨 粘土의 舉動을 構成式化함에 彈塑性理論의 적용이 가능함을 입증하여 주었다.

5. 結 論

EPK 粘土의 中空圓筒型供試體에 대한 非排水 및 排水 비틀림剪斷試驗을 여러가지 應力徑路에 따라 실시하여 應力, 應力增분 및 變形率增분의 방향을 조사하여 보았다.

파괴시의 變形率增분배터방향은 應力배터방향에 일치하며, K_0 -壓密粘土에 비틀림剪斷試驗을 실시할 경우 粘土의 初期 直交異方性は 파괴시 상당히 소멸된다. 따라서 直交異方性 粘土의 파괴는 等方體에 대한 破壞規準을 실용적으로 적용할 수 있다.

작은 變形段階의 變形率增분방향은 應力增분 방향에 일치하여 彈性舉動을 보이며, 큰 變形段階에서의 變形增분방향은 應力방향에 접근하여 塑性舉動을 보인다. 결국, 應力の 증가에 따라 粘土의 舉動은 彈性에서 塑性으로 변천하여 간다. 따라서, K_0 -壓密粘土의 비틀림剪斷試驗에 의한 主應力回轉시의 粘土舉動의 構成式정립에 彈塑性理論의 적용이 가능함이 입증됐다.

感謝의 말

本論文에 사용된 도면작성에 도움을 준 本校 大學院 성안제군에게 감사의 뜻을 표한다.

參 考 文 獻

1. 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.
2. 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, California*, Vol. 2, 1978, pp. 1056~1075.
3. 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.
4. 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.
5. Macky, T.A. and Saada, A.S.: "Dynamics of Anisotropic Clays Under Large Strains," *Jour.*,

- GED, ASCE, Vol. 110, No. 4, 1984, pp.487~504.
6. 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.
7. Tatsuoka, F., Sonoda, S., Hara, K., Fukushima, S. and Pradhan, J.B.S.: "Failure and Deformation of Sand in Torsion Shear," *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 4, 1986, pp.79~97.
8. 洪元杓: "흙의 비틀림剪斷試驗에 관한 基礎的 研究", *大韓土質工學會誌*, 第4卷, 第1號, 1988, 투고중.
9. Roscoe, K.H.: "An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples," *Proc., 3rd ICSMFE, Zurich*, Vol. I, 1953, pp.186~191.
10. Lade, P.V.: "Torsion Shear Tests on Cohesionless Soil," *Proc., 5th Panamerican Conference on SMFE, Buenos Aires, Argentina*, Vol. I, 1975, pp.117~127.
11. 洪元杓: "비틀림剪斷試驗에 의한 K_0 -壓密粘土의 舉動", *大韓土木學會論文集*, 第8卷, 第1號, 1988, pp.151~157.
12. Lade, P.V.: "Failure Criterion for Frictional Materials," *Chapter 20 in Mechanics of Engineering Materials*, C.S. Desai and R.H. Gallagher, Eds., John Wiley and Sons Ltd., 1984, pp.385~402.

(接受: 1988. 1. 16)