

粒狀土의 3次元 舉動

Three-Dimensional Behavior of Granular Soil

鄭 鎮 燮* · 金 燦 起** · 朴 勝 海* · 李 鍾 天*
Jeong, Jin Seob · Kim, Chan Kee · Park, Seung Hae · Lee, Jong Cheon

Summary

A series of cubical triaxial tests with three independent principal stresses was performed on Baekma river sand (#40~100). It was found that the major principal strain at failure remained approximately constant for b values larger than about 0.3 for both the drained and undrained condition, and thereafter increased as b value decreased. The test results showed that the direction of the strain increment at failure form acute angles with the failure surfaces for both the drained and undrained condition. The results were thus not in agreement with the normality condition from classic plasticity theory. However, it was found that the projections of the plastic strain increment vectors on the octahedral plane were perpendicular to the failure surface in that plane. Failure strength in terms of effective stress analysis was greatly influenced by the variation of intermediate principal stress and so was failure criterion. The effective stress failure surfaces for both the drained and undrained condition were estimated quite well by use of Lade's failure criterion.

I. 緒 論

일반적으로 地盤의 力學的 舉動을 把握하기 위하여 여러 가지 室內試驗이 實施되고 있으나 이중 가장 많은 試驗은 一般三軸壓縮試驗

이다. 이러한 三軸壓縮試驗은 圓筒形 共試體에 대한 軸對稱 試驗을 의미한다. 그러나 이 試驗은 圓筒形 供試體를 사용하는 관계로 要素內의 應力 狀態가 軸對稱 狀態에 있게 되어 水平 方向의 主應力은 항상 서로 같게 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)

* 圓光大學校 工科大學

** 大眞大學校 工科大學

키워드 : 立方體三軸試驗機, 中間主應力, 應力履歷
塑性變形率增分벡터, 直交條件, 三軸面, 破壞變形率線, 平面變形率條件

된다. 그러므로 이와 같은 試驗은 中間主應力이 強度 및 變形特性에 주는 影響을 檢討할 수 없으며 이러한 試驗으로 얻어진 粒狀土의 試驗結果를 Mohr-Coulomb의 破壞規準으로 구하는 것은 中間主應力이 強度特性에 影響을 미치지 않음을 의미하게 된다. 그러나 最近의 여러 研究에 의하면 應力-變形率 및 強度特性에 中間主應力이 많은 影響을 끼치고 있음을 볼 수 있다. 따라서 흙의 精確한 舉動을 調査하기 위해서는 서로 다른 세 主應力을 각각 獨立의로 調節할 수 있는 多軸試驗裝置가 必要하다. 最近 Lade^{1,2)}등에 의해 開發된 立方體 三軸試驗裝置 (Cubical Triaxial Test Apparatus)는 立方體試料에 대해 서로 다른 主應力을 作用시킴으로서 흙의 3次元의인 舉動을 研究하였으며³⁻⁷⁾, Desai⁸⁻¹¹⁾등은 眞삼축시험기(Truely Triaxial Test Apparatus)를 製作하여 研究을 수행하였다. 國內에서도 홍¹²⁾과 박동^{13,14)}은 Lade의 立方體三軸試驗機를 利用하여 粘土의 3次元의 舉動 特性을 밝힌바 있으며, 특히 강¹⁵⁾등은 Lade의 立方體三軸試驗機를 改良한 시험기를 開發하여 試驗에 利用하고 있다.

本 研究는 粒狀土의 3次元의 舉動을 糾明하기 위해 백마강 모래를 이용, 모든 應力狀態의 試驗이 가능한 立方體型三軸裝置를 製作하고 이 試驗機를 통해 세 主應力을 各各 獨立의로 調節하여 中間主應力과 拘束壓力을 각기 달리한 立方體 排水 및 非排水三軸壓縮試驗을 實施 하고, 아울러 拘束壓力을 5kgf/cm²로 가한 후 1kgf/cm²로 낮춘상태(이하 이 試驗을 過壓密比 5인 試驗이라 한다)에서 中間主應力을 달리 하면서 非排水三軸試驗을 實施하였다. 그리하여 排水條件 및 應力履歷에 따라 中間主應力이 모래의 強度特性 및 變形特性에 어떠한 影響을 주는가를 試驗을 통하여 밝힘으로서 粒狀土의 3次元의 舉動特性을 糾明 하고자 한다.

II. 試 驗

本 研究에 사용된 立方體三軸試驗機의 機械的 裝置와 試驗方法은 國內에서도 이미 소개된 바^{15,16)}있으므로 본문에서는 시료의 物理的 特性과 試驗條件등에 관해 論하기로 한다. 試驗에 사용된 시료는 백마강유역에서 採取한 모래로서 40번 체를 통과하고 60번 체에 잔류율이 35%, 60번 체를 통과하고 80번 체에 잔류율이 60%, 80번 체를 통과하고 100번 체에 잔류율이 5%인 시료를 균일하게 混合하여 試驗에 利用할 수 있는 試料을 준비하였다. 그리고 이 시료의 最大間隙比(e_{max})와 最小間隙比(e_{min})를 測定하고, 시료의 初期間隙比(e_{spec})를 측정하여 相對密度(D_r) 80%가 되도록 하였으며 시료의 物理的 特性은 Table-1.에 나타내었다.

또한 本 研究에서 백마강모래의 舉動特性을 檢討하기 위하여 立方體三軸試驗機를 利用하여 排水三軸試驗, 非排水三軸試驗 및 過壓密非排水三軸試驗을 實施하였다. 이 때 中間主應力의 相對的 크기를 나타내는 b 값을 三軸壓軸狀態인 $b=0.00$ 에서부터 0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90으로 증가하여 三軸伸張狀態인 $b=1.00$ 의 8단계가 되도록 일련의 排水三軸試驗과 過壓密非排水三軸試驗을 실시하였는데 이 때 b 값은 水平荷重을 鉛直荷重의 변화에 따라 적절하게 조정함으로써 일정하게 유지할 수 있도록 되어 있으나 조정과정에서 약간의 差異를 가져와 排水三軸試驗의 경우 b 값은 0.00, 0.25, 0.31, 0.41, 0.51, 0.71, 0.90, 0.97을 얻었고 非排水三軸試驗의 경우는 b 값이

Table-1. Physical Properties of Baekma River Sand (# 40~100)

Gs	e_{max}	e_{min}	e_{spec}	D_r
2.706	1.255	0.973	1.0858	0.80

0.00, 0.21, 0.30, 0.50, 0.70, 0.85, 0.99를 얻었으며, 過壓密非排水三軸試驗의 경우는 b값이 0.00, 0.11, 0.31, 0.41, 0.50, 0.69, 0.90, 0.97을 얻었다. 剪斷時 剪斷速度는 0.01cm/min가 되도록 하였다. 그리고 시료의 크기는 각 변의 길이가 76mm인 정육면체이다. 이상의試驗條件들을 요약하여 Table-2.에 나타내었다.

Table-2. Cubical Triaxial Tests for Baekma River Sand (#40~100)

Test-No	중간주 응력비(b)	σ_c (kgf/ cm ²)	시험방법	과압밀비
T-1	0.00	1	CD	1
T-2	0.00	2	CD	1
T-3	0.00	4	CD	1
T-4	0.25	1	CD	1
T-5	0.31	1	CD	1
T-6	0.41	1	CD	1
T-7	0.51	1	CD	1
T-8	0.71	1	CD	1
T-9	0.90	1	CD	1
T-10	0.97	1	CD	1
T-11	0.00	1	CU	5
T-12	0.11	1	CU	5
T-13	0.31	1	CU	5
T-14	0.41	1	CU	5
T-15	0.50	1	CU	5
T-16	0.69	1	CU	5
T-17	0.90	1	CU	5
T-18	0.97	1	CU	5
T-19	0.00	1	CU	1
T-20	0.21	1	CU	1
T-21	0.30	1	CU	1
T-22	0.50	1	CU	1
T-23	0.70	1	CU	1
T-24	0.85	1	CU	1
T-25	0.99	1	CU	1

III. 3次元 剪斷強度特性

1. 土質媒介變數(Parameter)의 決定

Fig. 1. 排水 및 過壓密 非排水三軸壓縮試驗結果에서 얻은 과괴 때의 응력을 사용하여 계산한 (Pa/I_1) 에 대한 (I_1^3/I_3-27) 의 값을 양대

수지상에 그린 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 양대수지상에서 (I_1^3/I_3-27) 대 (Pa/I_1) 의 관계는 직선, 즉 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\log \eta_1 = \log(I_1^3/I_3-27) + m \log(I_1/Pa) \dots (1)$$

(1)의 양변의 대수를 제거하면 다음 식이 된다.

$$\eta_1 = (I_1^3/I_3-27) (I_1/Pa)^m \dots (2)$$

여기서 η_1 은 $Pa/I_1=1$ 일 때 절편 (I_1^3/I_3-27) 값이며, m은 이 직선의 기울기이다.

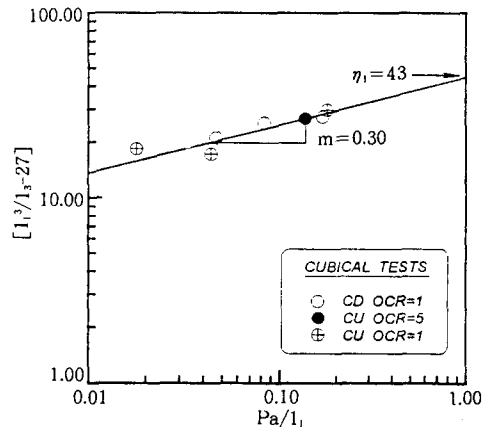


Fig. 1. Determination of η_1 and m Involved in Lade's Failure Criterion for Baekma River Sand

2. 三軸面上(Triaxial Plane)의 破壞面

Fig. 2. 最大主應力 (σ_1)과 最少主應力 ($\sqrt{2}\sigma_3$)으로 나타내는 三軸面上에 排水, 非排水, 過壓密非排水條件에서 拘束應力을 달리하여 立方體三軸試驗을 수행한 結果를 Lade의 이론 破壞面과 함께 나타낸 것이다. 그림에서 排水三軸壓軸狀態(b=0.0)인 경우는 拘束應力을 1kgf/cm², 2kgf/cm², 4kgf/cm²으로 排水

三軸伸張狀態($b=1.0$)인 경우는 단지 拘束應力 1kgf/cm^2 인 경우를 나타내었다. 그리고 伸張狀態는 b 값이 1.0 이 되도록 應力을 調節하기가 매우 어려우므로 $b=1.0$ 의 近似值인 0.97 인 경우를 伸張狀態로 보았으며 Lade 破壞規準의 土質媒介變數 m 과 η_1 은 앞에서 구한 0.3 과 43 을 각각 사용하였다. 그림에서 \otimes 는 正規壓密非排水, \circ 는 排水, \bullet 는 過壓密非排水인 試驗結果이고 實驗은 Lade理論 破壞面을 나타낸 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 Lade의 理論 破壞面은 排水條件(排水, 非排水) 및 應力履歷(正規壓密, $\text{OCR}=5$)에 무관하게 동일 破壞面에 나타나고 있다. 따라서 三軸面상에서 Lade의 方程式은 배수조건 및 응력이력에 관계없이 하나의 식으로 粒狀土의 破壞面을 매우 잘 표현하고 있다고 할 수 있다.

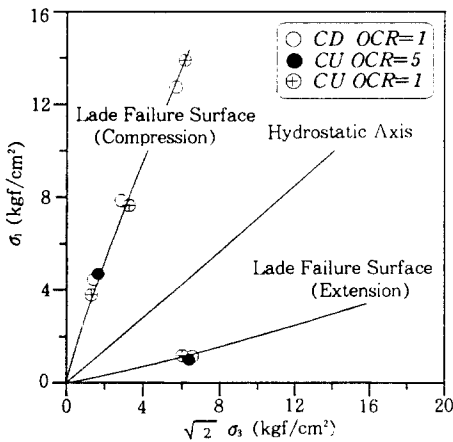


Fig. 2. Failure Surface in Triaxial Plane for Baekma River Sand

4. 正八面體面上(Octahedral plane)의 有效應力 破壞面

Fig. 3. Mohr-Coulomb의 破壞規準과 Lade의 破壞規準을 正八面體上에서 排水, 非排水 및 過壓密 非排水 三軸試驗 結果를 함께 비교

한 그림으로서 試驗結果를 同一條件에서 비교하고자 試驗值를 $I_1=4\text{kgf/cm}^2$ 인 正八面體上에 투영시켰다. 그림에서 實線은 Lade의 破壞規準이며 點線은 Mohr-Coulomb의 破壞規準으로 나타내었다. 그리고 Lade의 破壞規準의 豫測값을 決定하기 위하여 백마강 모래의 破壞定數 m 과 η_1 은 앞에서 얻은 $0.3, 43$ 을 사용하였다.

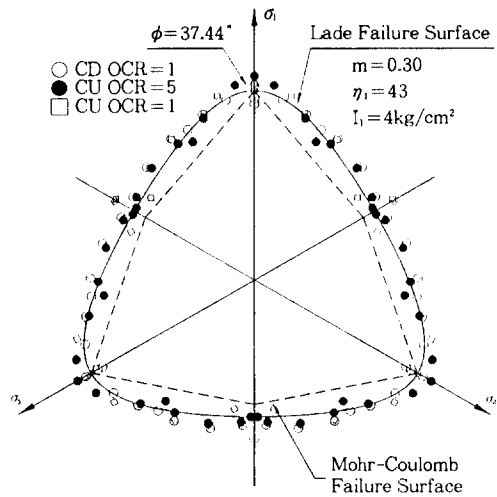


Fig. 3. Yield Surface in Octahedral Plane for Baekma River Sand

그림에서 보는 바와 같이 두 規準과 함께 試驗值를 투영시킨 結果 Lade의 破壞面 에는 잘 일치하고 있는 반면 Mohr-Coulomb의 破壞規準에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, Mohr-Coulomb의 破壞規準은 $b>0$ 試驗의 경우 試驗值 보다 破壞強度를 다소 과소평가할 우려가 있는 반면 Lade規準은 中間主應力의 影響을 받는 경우에도 試驗치와 근접한 破壞強度를 나타내고 있다. 따라서 Lade의 破壞面의 方程式은 排水條件 및 應力履歷에 관계없이 하나의 方程式으로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 3次元 變形特性

1. 主變形率間의 關係

Fig. 4.의 (a) (b) (c)는 排水, 比排水 및 過壓密比排水三軸試驗 結果를 b 값의 變化에 따라 最大主變形率과 中間主變形率과의 關係를 나타낸 것이다. 그림에서 검은 원과 화살표는 실제 破壞點의 위치이며 이 點들을 대략적으로 연결한 선이 破壞變形率線이다. 이 그림에서 排水試驗의 경우 $b=0.31$, 非排水試驗의 경우 $b=0.30$ 에서 過壓密比排水試驗의 경우 $b=0.30$ 에서 中間主應力방향의 變形率이 0에 가까운 平面變形率狀態를 나타내고 있으며, 中間主變形率은 平面變形率條件보다 적은 b 값에 대해서는 伸張變形이 발생하고 있으며 이보다 큰 나머지 경우에서는 中間主應力 方向으로 壓縮變形이 發生하고 있다.

또한 세 條件 모두 각 應力比에 대한 破壞點의 位置는 b 값이 클수록 軸變形率이 작은 곳에서 발생하고 있다. 특히 b 값이 0에서 0.3까지는 軸變形率이 큰 비율로 줄고 있으며 平面變形率條件 이후부터는 거의 동일한 값에서 낮은 비율로 줄어 破壞되고 있다. 그리고 非排水인 경우에는 排水나 過壓密比排水에 비하여 아주 적은 主變形率에서 破壞가 되고 있으며 이것은 初期 過剩間隙水壓의 크기에 원인이 있는 것으로 보여진다.

Fig. 5. (a), (b), (c)는 세 條件의 試驗結果를 最大主變形率과 最少主變形率의 關係를 나타낸 것이다. 그림에서 검은 원으로 표시된 것이 破壞가 일어난 지점이고 이 破壞點들을 대략적으로 연결한 선이 破壞變形率線이다.

Fig. 5. (a)는 排水條件인 경우로서 그림에 나타난 바와 같이 中間主應力比가 增加할 수록 破壞軸變形率이 減少하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 平面變形率條件 이하에서는 破壞에 도달하는 軸變形率의 減少 기율이 급한 傾向을 보이고 平面變形率條件 이후 부터는

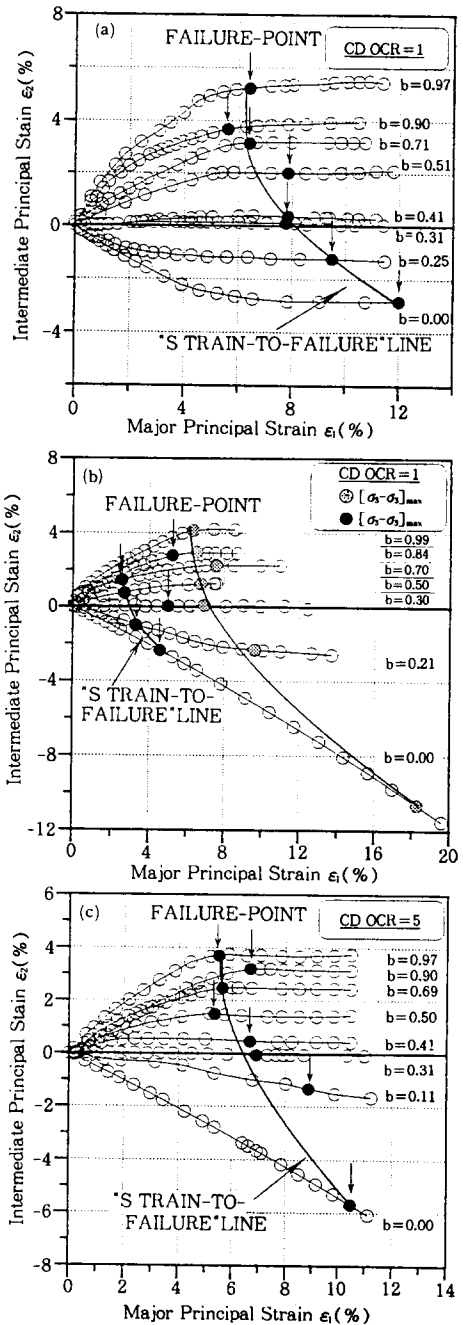


Fig. 4. (a) Relation Between ϵ_1 and ϵ_2 for Drained Cubical Triaxial Tests. (b) Relation Between ϵ_1 and ϵ_2 for Undrained Cubical Triaxial Tests. (c) Relation Between ϵ_1 and ϵ_2 for Overconsolidated Undrained Cubical Triaxial Tests

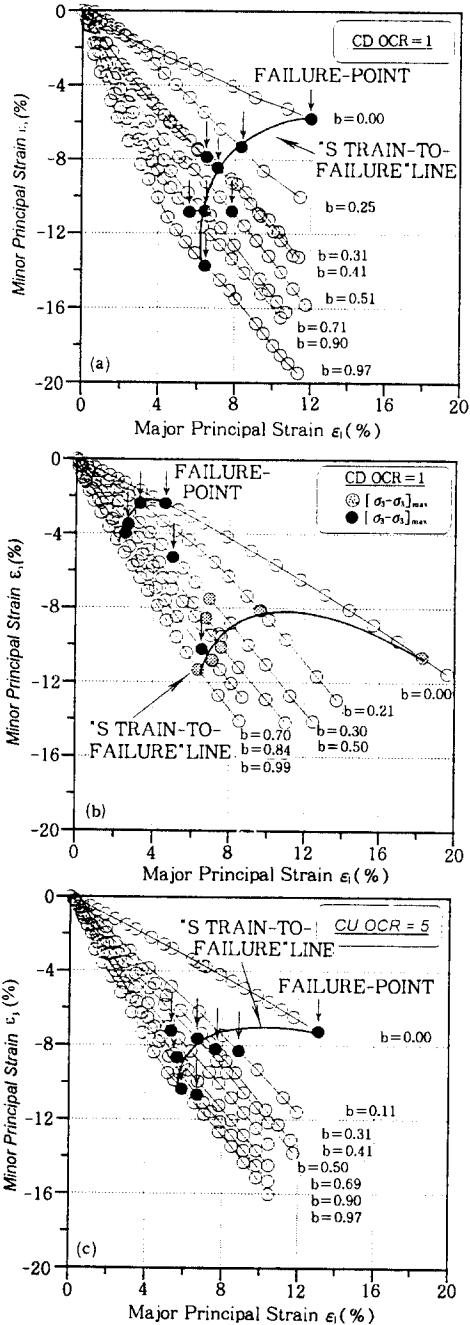


Fig. 5. (a) Relation Between ϵ_1 and ϵ_3 for Drained Cubical Triaxial Tests. (b) Relation Between ϵ_1 and ϵ_3 for Undrained Cubical Triaxial Tests. (c) Relation Between ϵ_1 and ϵ_3 for Overconsolidated Undrained Cubical Triaxial Tests

破壞軸變形率의 減少기울기가 완만하게 나타나고 있다.

Fig. 5. (b)는 非排水條件인 경우, Fig. 5.(c)는 過壓密非排水條件인 경우로서 Fig. 5.(a)에 나타난 破壞變形率線의 형상과 거의 같은 傾向을 보이고 있다. 그러나 非排水의 경우는 初期 過剩間隙水壓의 影響으로 낮은 主變形率에서 破壞가 일어나고 있다.

2. 變形率 増分 벡터의 方向

塑性理論에 의하면 塑性變形率 増分벡터의 方向은 塑性 포텐셜면에 직교하고 만일 재료의 降伏面과 塑性포텐셜면이 같으면 關聯則 (Associate flow rule)이 성립되고 같지 않으면 非關聯則 (Non-associate flow rule)이라 한다. 따라서 試驗結果가 이와 같은 直交條件을 만족시키는지의 여부를 조사하는 것은 매우 중요하고도 흥미 있는 문제이다. 재료가 破壞點에 달하면 應力의 増分 없이 變形(破壞)만이 增加된다. 그러므로 이 때의 變形率増分은 거의 塑性變形率増分만이 發生한다고 할 수 있으며, 파괴시 變形率増分의 벡터방향은

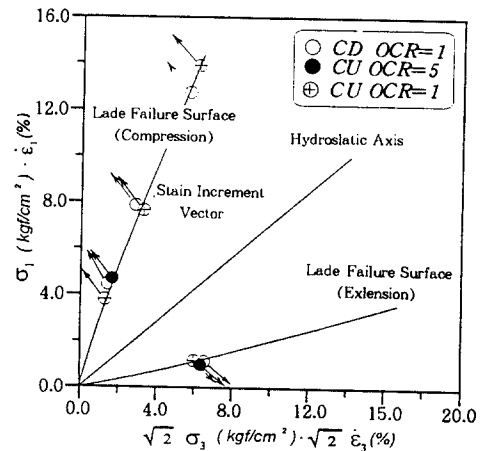


Fig. 6. Direction of Strain Increment Vectors in Triaxial Plane for Baekma River Sand

塑性變形率의 増分벡터방향과 같다고 할 수 있다. 따라서 파괴시의 變形率増分벡터를 구하여 直交條件을 알아본다.

Fig. 6. 는 排水, 非排水 및 過壓密 非排水 試驗 結果를 정수압축을 포함한 三軸面상에 試驗에서 얻은 強度定數 η_1 과 m 을 Lade의 破壞面方程式에 대입하여 얻은 Lade의 이론 破壞面과 함께 나타낸 것이다. 그리고 파괴시 變形率増分벡터는 각 破壞強度의 試驗值로 부터 투영되었다. 그림에 나타난 바와 같이 세 경우 모두 破壞面에 變形率増分벡터의 방향이 예각으로 나타나고 있다. 이와 같은 사실은 降伏面이 塑性포텐셜면과 일치하지 않음을 알 수 있다. 위의 세條件이 같은 傾向을 나타낸 것으로 보아 排水條件이나 應力履歷이 變形率 増分벡터의 방향에 影響을 미치지 못함을 알았다.

Fig. 7. (a), (b), (c)는 排水, 非排水 및 過壓密非排水試驗 結果를 正八面體上的 破壞點으로 부터 破壞時的 塑性變形率増分벡터를 主應力의 대칭성을 이용하여 1/2면 만을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 파괴시의 塑性變形率増分벡터는 正八面體 破壞面에 수직방향임을 알 수 있다. 고로 八面體面에서는 直交條件이 滿足됨을 알 수 있다.

위의 결과 백마강 모래는 三軸面에서는 破壞面과 소성포텐셜면이 일치하지 않으나 八面體面에서는 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 排水, 非排水, 및 過壓密非排水試驗結果가 거의 비슷한 형상을 나타내고 있는 것으로 미루어 正八面體面에서도 排水條件 및 應力履歷은 破壞時 塑性變形率増分벡터의 方向에 影響이 없음을 알 수 있다.

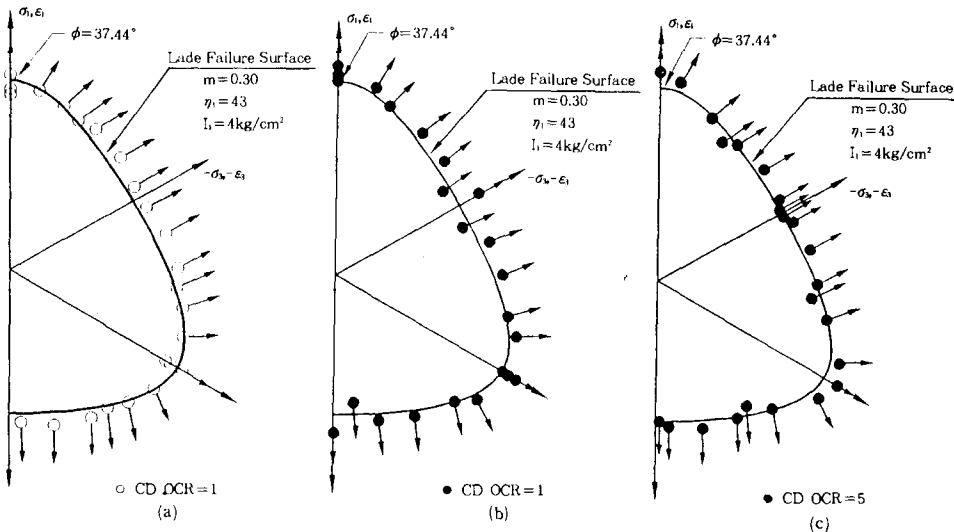


Fig. 7. (a) Direction of Strain Increment Vectors in Octahedral Plane for Drained on Beakma River Sand. (b) Direction of Strain Increment Vectors in Octahedral Plane for Undrained Beakma River Sand. (c) Direction of Strain Increment Vectors in Octahedral Plane for Overconsolidated Undrained Beakma River Sand

V. 結 論

粒狀土의 3次元 舉動 特性에 中間主應力, 排水條件 및 應力履歷등의 影響을 調査하기

위하여 백마강 모래를 이용 中間主應力比를 變化하며 立方體 排水三軸試驗을 10회, 非排水 三軸試驗 7회 및 過壓密比를 5로한 過壓密 非排水試驗 8회를 각각 實施하였다. 이들 試

驗結果로 부터 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 三軸面에서 排水, 非排水 및 過壓密非排水條件으로 試驗한 結果와 Lade의 理論破壞面을 비교한 結果 서로 잘 一致하고 있으므로 Lade의 破壞規準은 排水條件 및 應力履歷에 無關함을 알 수 있었다.

2. Mohr-Coulomb의 破壞規準을 正八面體面상에서 排水, 非排水 및 過壓密 非排水試驗 結果를 비교한 바 Mohr-Coulomb의 破壞規準은 $b > 0$ 인 경우 試驗值 보다 破壞強度를 과소 평가할 우려가 있다.

3. 排水, 非排水 및 過壓密非排水條件 모두 中間主應力比(b)에 대한 破壞點의 위치는 b 값이 클수록 軸變形率이 작은 곳에 있다. 또 排水條件 및 過壓密의 有無가 破壞變形率線의 形狀에는 影響을 미치지 않으나 非排水 試驗의 경우는 軸變形率이 아주 작은 곳에서 破壞線이 나타난다.

4. b 값이 0에서 부터 平面變形率條件까지는 b 값이 클수록 軸變形率이 급격하게 줄어든 곳에서 破壞點이 위치하고 있으며 平面變形率條件 이후는 b 값이 커질수록 破壞變形率線은 거의 같은 軸變形率 값에서 破壞되고 있다.

5. 破壞時 塑性變形率 増分벡터의 方向은 排水條件 및 應力履歷에 無關하며, 直交條件이 八面體面에서는 滿足되나 三軸面에서 滿足되지 못함을 알았다.

이 論文은 1993년도 韓國學術振興財團의 公募課題 연구비에 의하여 研究되었음.

參 考 文 獻

1. Lade, P. V., 1978 "Cubical Triaxial Apparatus for Soil Testing." Geotechnical Testing Journal, GTJO-DJ, vol.1, No.2, pp.93-101.
2. 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. SM10, pp.793-812.
3. Lade, P. V., 1977, "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces", Int. J. Solids and Structs, Pergamon press Inc. New York, Vol.13, pp.1019-1035.
4. Lade, P. V., and Musante, H. M., "Three Dimensional Behaviour of Remolded Clay" Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.105, GT2, proc.paper 13551, Feb., 1978. pp.193-209
5. Kim, M. K., and Lade, P. V., 1988a, "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials I. Plastic potential function", Computers and Geotechnics, 5 (4), pp.307-324.
6. Lade, P. V., and Kim, M. K., 1988b, "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials II. Yield Criterion and Plastic Work Contours", Computers and Geotechnics, 6(1), pp.13-29.
7. Lade, P. V., and Kim, M. K., 1988c, "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials III. Comparisons with Experimental Data", Computers and Geotechnics, 6(1), pp. 30-47.
8. Desai, C. S., "General Basis for Yield, Failure and Potential Functions in Plasticity." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 4, 1980, pp.361-375
9. Desai, C. S., and Faruque, M. o., "A Constitutive Model for (Geologic) Materials." Journal of Engineering Mechanics Divi-

- sion, ASCE, Vol. 110, No. 9, Sep. 1984, pp. 139-1408.
10. Desai, C. S., and Siriwardane, H. J., Constitutive Law for Engineering Materials, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1984
 11. Desai, C. S., Somasundaram, S., and Frantziskonis, G., "A Hierarchical Approach for Constitutive Geomechanics, Vol, 10, No. 3, 1986
 12. 洪元杓, 1988, "中間主應力이 過壓密 粘土의 舉動에 미치는 影響", 大韓土木學會 論文集, 제8권 제2호, pp.99-107.
 13. 朴柄基, 鄭鎮燮, 林成喆, 1990, "壓縮性 모래의 3次元 剪斷強度 特性", 大韓土質工學會誌, 제6권 제3호, pp.65-74.
 14. 朴柄基, 鄭鎮燮, 林成喆, 1990, "壓縮性 모래의 3次元 變形 舉動", 大韓土木學會 論文集, 제10권 제3호, pp.107-113.
 15. 康權修, 李汶樹, 鄭鎮燮, 朴柄基, "立方體 三軸試驗機의 試作", 大韓土木學會 學術發表會 論文集 1991, pp.442-445.
 16. 金燦起, "彈塑性 構成모델에 의한 粒狀土의 舉動解析" 1994, 圓光大學校 博士學位 論文.
- (접수일자 : 1995년 3월 28일)