

압축성 모래의 3차원 거동

Three Dimensional Behavior of Compressible Sand

1. 서론

일반 3축압축시험에서 얻은 응력-변형률, 간극수압 및 강도거동은 응력조건이 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 인 경우에만 적합하다. 그리고 3축압축 시험에서 얻은 강도와 관련지어 Mohr-Coulomb 파괴규준의 사용은 중간주응력이 강도에 영향을 미치지 않는다.

그러나 많은 시험결과 중간주응력이 흙의 거동에 영향을 미치고 있음이 입증되고 있다. 그러므로 본 연구는 압축성 모래를 6면체 시료로 성형하여 세 주응력을 각기 독립적으로 조절하여 압밀비배수 및 압밀배수 시험을 실시하여 압축성모래의 응력-변형률, 간극수압과 강도특성에 중간주응력이 어떤 영향을 미치고 있는가를 실험결과를 중심으로 검토하고자 한다.

2. 시험

2 - 1. 시험장치

본 연구에 사용된 입방체형 3축 시험장치는 Lade에 의해 제작되어 흙의 3차원 거동 연구에 사용된 것이다. 입방체형 공시체를 사용한 3축압축시험 장치는 Fig.1과 같다. 공시체의 크기는 76*76*76(mm)이며 상판(Cap)과 저판(Base) 및 고무막(Membrane)으로 둘러 싸여있다. 최소 주응력 σ_3 는 수평방향으로 작용하여 Cell Pressure로 가한다. 연직하중은 변형률제어방식으로 재하하며 최대주응력 σ_1 은 연직방향 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)를 측정하여 구한다. 중간주응력 σ_2 는 σ_3 와 직교하는 또하나의 수평방향으로 작용하도록 Fig.2와 같이 특수하게 고안된 수평재하 장치를 사용하며 응력제어 방식으로 재하하여 수평방향 축차응력($\sigma_2 - \sigma_3$)를 측정

하여 구한다. 연직방향 변형량은 3축 Chamber 밖의 재하피스톤에 부착시킨 dial-gage로 측정 한다. 중간주응력 및 최소주응력 방향의 변형량은 이 방향 양측의 공시체면에 직접 부착시킨 Clip gage로 측정한다.

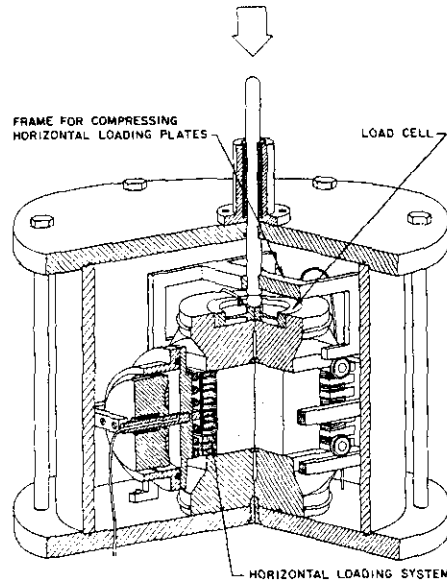


Fig.1 육면체 삼축압축시험기

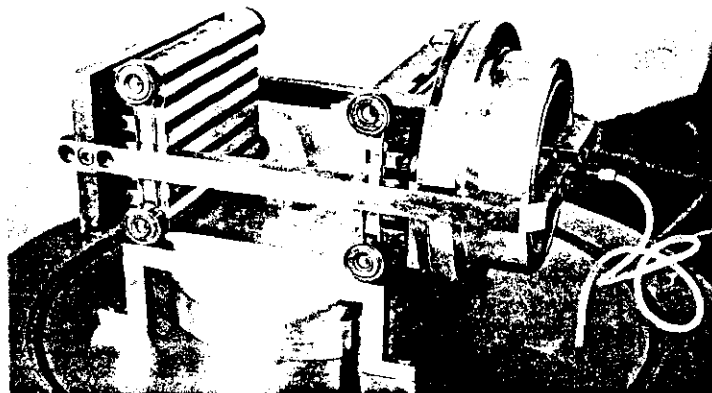


Fig.2 수평하중재하기

2 - 2. 시료준비

본 시험에 사용된 시료는 미국 서부의 Los Angeles 부근의 Antelope Valley에서 채취한 모래를 실내 건조시켜 세가름하여 #60체를 전부 통과하고 #80체에 20%, #100체에 42.5%, #200체에 100%남도록 배합한 fine sand이다.

본 시료의 비중(G_s)은 2.85, 최소간극비(e_{min})1.14, 최대간극비(e_{max})는 1.31이다. 또한 이 공시체의 Cell Pressure는 $0.25(kg/Cm^2)$ 이며, 이때의 상대밀도(Dr)은 76.5%이다. 전단시 초기간극비(e_{spc})는 1.18이며 전단속도는 배수, 비배수 모두 $0.004 in./min$ 가 되도록 strain control하여 전단 하였다.

2 - 3. 실험방법

공기건조한 모래를 3축압축 시험기에 놓기전에 공시체의 상판 및 하판 사이에 마찰 구속력을 없애기 위해 상 하판에 silicon grease를 바르고 0.3mm두께의 고무막을 부착 한다. 이는 재하판과 공시체 사이의 변형이 불균일 하게 분포됨을 억제시켜준다. 공시체를 성형하여 제하장치 및 변형 측정장치를 설치한후 삼축 Chamber를 씌우고 물체운 다음 압밀 비배수 시험인 경우에는 $3kg/Cm^2$ 의 Cell Pressure와 $2kg/Cm^2$ 의 Back Pressure를 가하여 유효응압이 $1kg/Cm^2$ 인 상태에서 전단시험을 수행하고 압밀비배수 실험은 Back Pressure를 가하지 않고 시험을 수행했다.

시험은 구속압을 일정하게 한 상태에서 $b((\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3))$ 값을 일정하게 유지 시키면서 수행한다. 이 b의 값을 0에서 1까지 변형시켜 0.00, 0.10, 0.20, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90, 1.00의 8종의 경우에 대하여 일련의 삼축압축시험을 실시했다. 여기서 이 b값은 수평하중을 연직하중의 변화에 따라 적절하게 조정 함으로서 일정계 유지할 수 있으며 시험이 진행되는동안 실내온도는 항상 $20^\circ C - 21^\circ C$ 가 되도록 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 압밀 비배수 시험

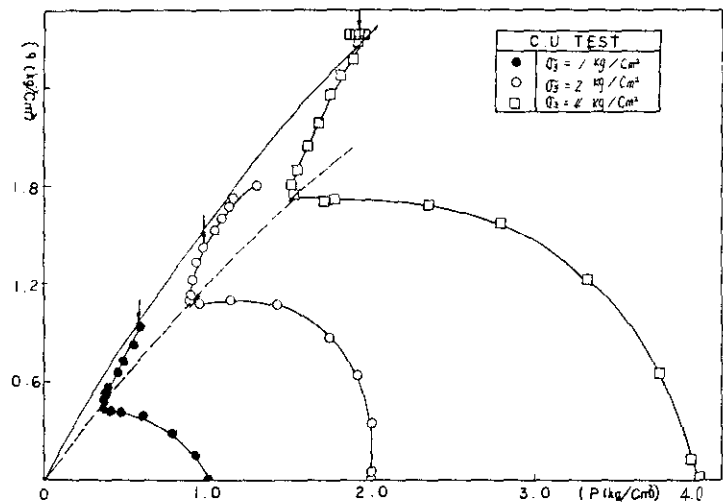


Fig.3 비 배수 유효응력 경로

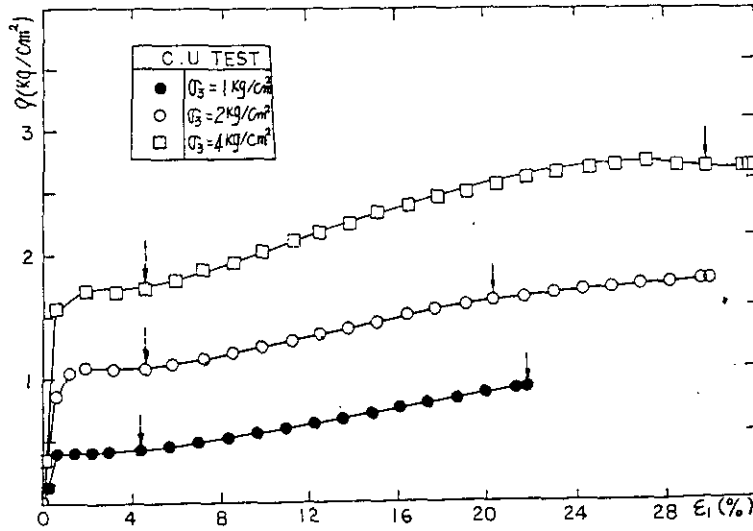


Fig. 4 축차응력과 축변형율 관계

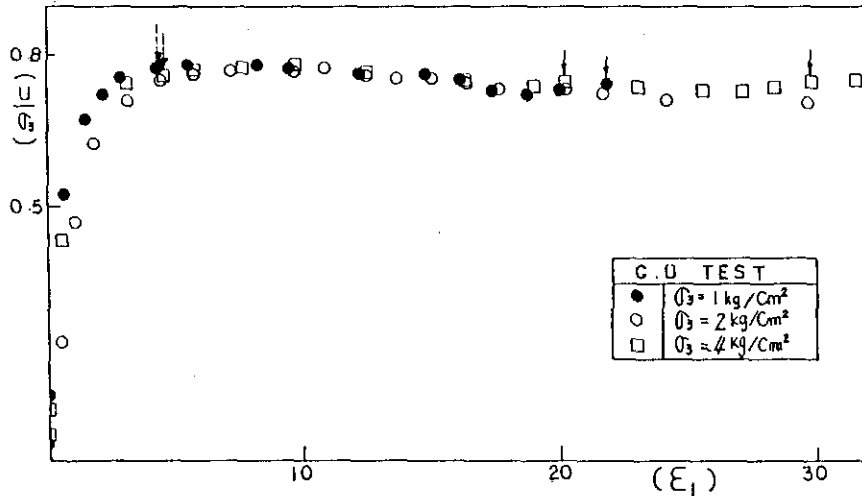


Fig. 5 정규화된 간극수압과 축변형율 관계

구속 축압을 달리한 경우 유효응력 경로를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 실선은 파괴점을 연결한 Lade의 conical 파괴면과 같은 형상으로 되어 있으며 Fig. 4에서 축압을 달리한 경우의 ϵ_1 의 변화에 따른 축차응력의 증가를 보이고 있다. Fig. 3과 관련하여 볼 때 점선의 화살표와 실선의 화살표는 좋은 대응관계를 이룬다. 또 등방압력으로 규준화된 간극수압과 축변형율 관계를 나타낸 것이 Fig. 5이다. Fig. 3, 4, 5의 점선 화살표는 좋은 대응관계를 보이고 있는데 다시 Fig. 3의 점선 부분은 Loose한 상태의 모래가 어느정도 변형을 일으키면서 한계 간극비에 가까와지면 이제 더 이상의 체적변형은 억제되어 간극수압의 증가는 끝나며 오히

려 감소되기 시작하면서 Interlocking 현상에 의하여 Work Hardening이 일어난다고 판단된다. 이것이 보통의 점토와는 크게 다른 점이다.

Fig.6과 Fig.7에는 비배수 전단시의 동일한 최소 주응력 σ_3 에 대하여 b값의 변화에 따른 유효응력 경로와 간극수압(U)과 축변형을 관계를 각각 나타낸 것이다.

Fig.6에 나타낸바와 같이 b의 증가에 따라 p값이 증가하지만 Fig.7에서와 같이 간극수압은 다소 증가하지만 큰 변화가 없으므로 응력 경로곡선은 우측으로 이동된다.

이는 일반적으로 한계상태 이론에서는 모든 응력경로 곡선이 일직선상에 위치하여 일정 M값을 보이고 있어 8면체면에 파괴시의 응력상태를 투영하면 원형으로 나타나지만 본 시료의 경우는 b값에 따라서 M값이 상이하므로 원형이 아니라는것이 입증된다.

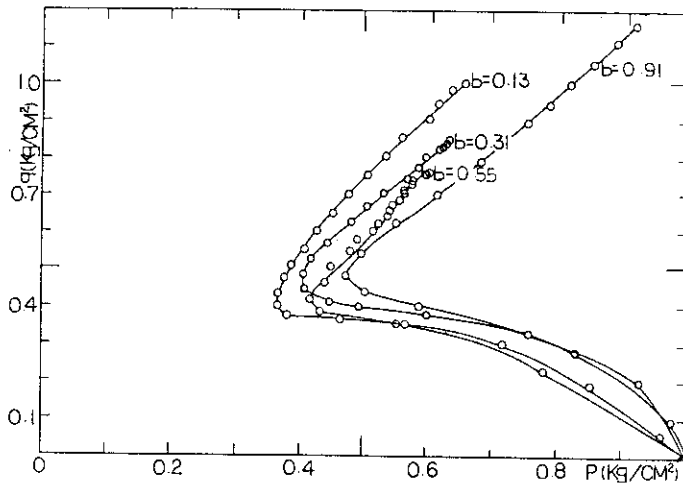


Fig.6 b값 변화에 따른 유효응력 경로

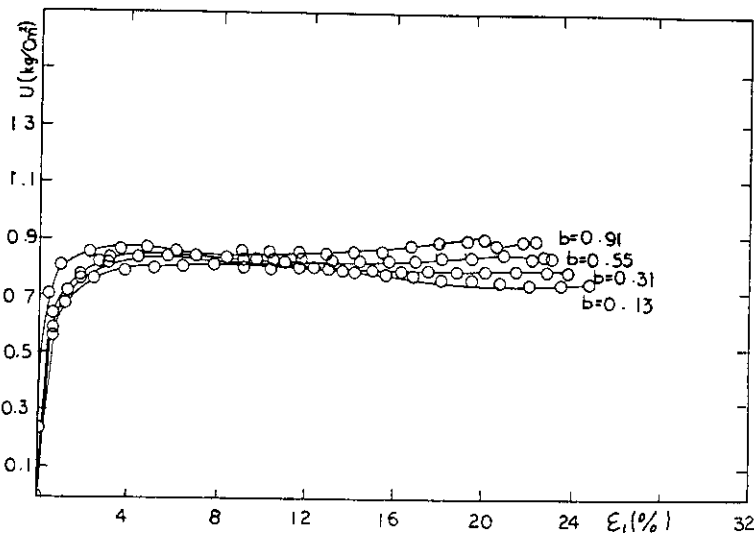


Fig.7 간극수압과 축변형을 관계

3-2. 압밀배수 시험

Fig.8은 축압을 달리하여 압밀배수시험한 결과를 축차응력과 축변형률 및 체적변형률과의 관계를 나타낸것이다. 축압이 큰 경우는 작은 경우에 비하여 축 변형율의 증가에 따라 체적 변형율이 크게 변화 하며(본 시료의 경우 20%까지) 등압이 작은 경우에는 체적 변형율이 증가하지만 1/2정도인 10%정도에서 체적의 감소가 끝난다. 축압이 크면 정규압밀 점토와 비슷한 거동을 보이고 축압이 작을 경우 과압밀점토

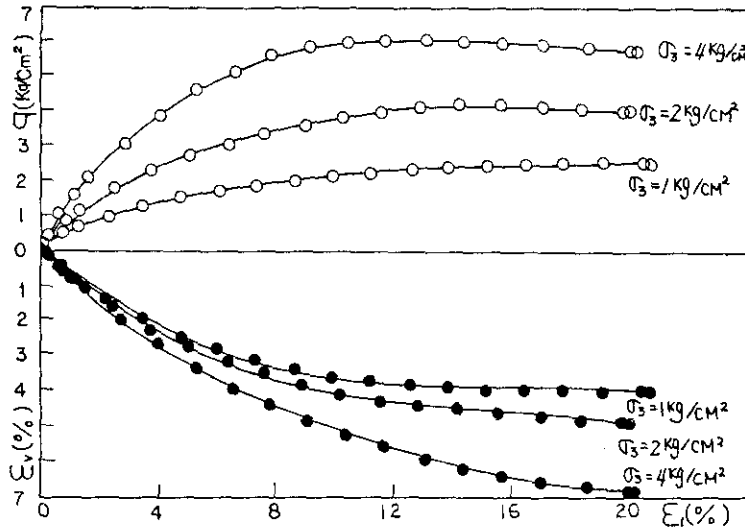


Fig.8 축차응력, 체적변형율과 축변형율과의 관계

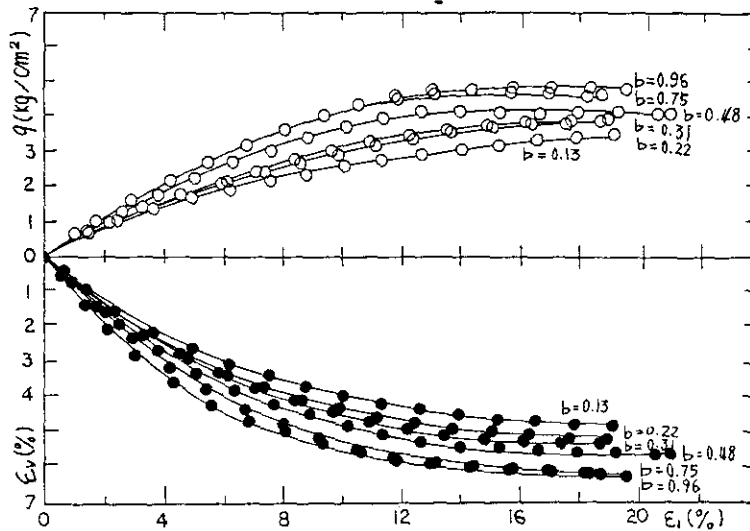


Fig.9 축차응력, 체적변형율과 축변형율과의 관계

의 거동과 비슷한 양상을 나타냈다.

3-3. 주변형률 사이의 관계

Fig.10의 a와 b는 압밀비배수상태의 ϵ_2 와 ϵ_1 의 관계와 ϵ_3 와 ϵ_1 관계를 b 값의 변화에 따라 각각 나타낸것이다. Fig.10에서와 같이 b 값이 초기에서 증가함에

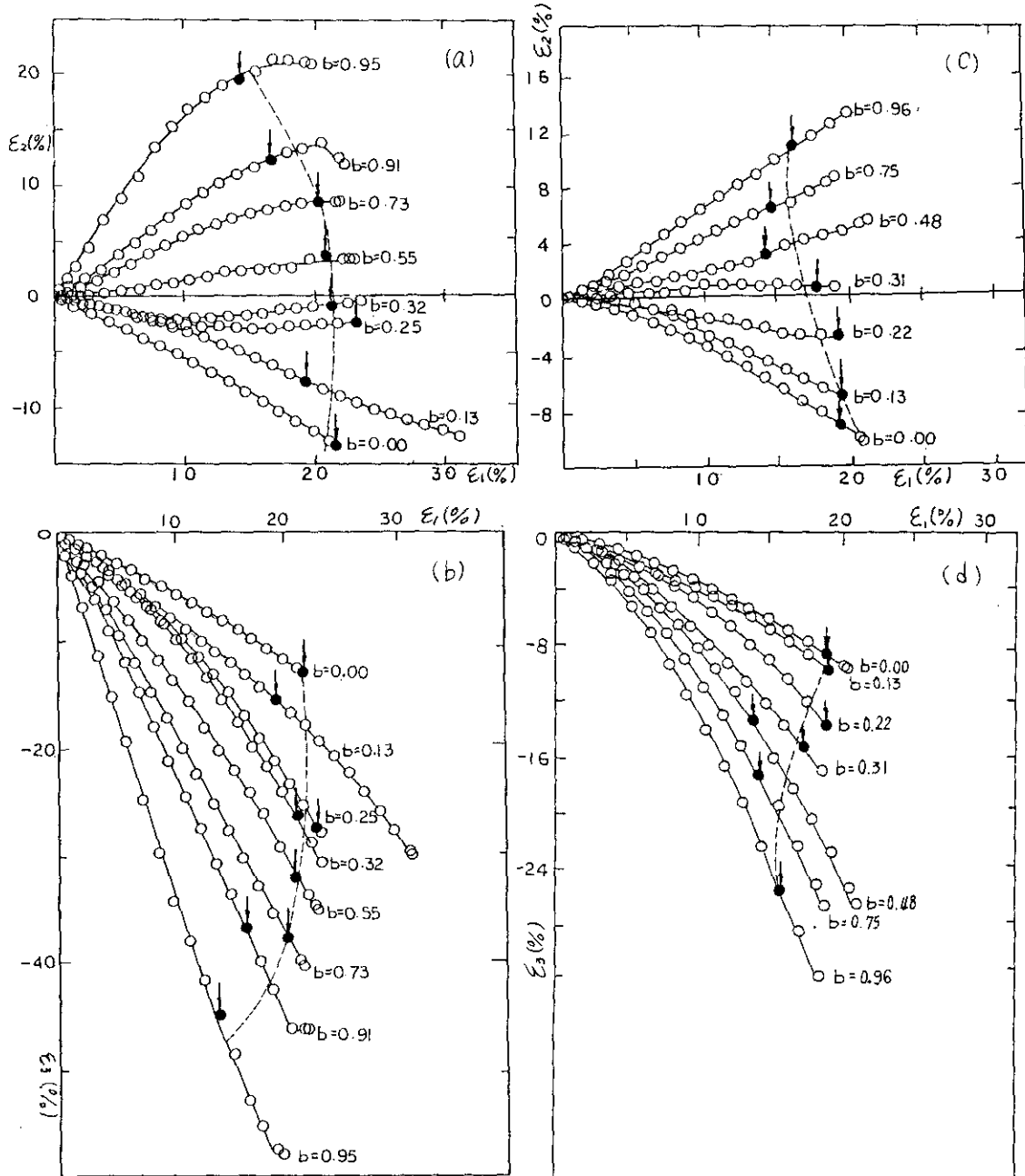


Fig.10 (a)(b) 압밀 비 배수시험 (c)(d) 압밀 배수시험
주 변형률 사이의 관계 (Antelope Valley Sand)

따라 파괴변형률선이 직선을 보이다가 일정치를 넘게 되면 왼쪽으로 오목한 양상을 보인다. 또 압밀 비배수 시험 결과의 주변형률 관계를 나타낸 것이 Fig.10 c,d이다. 초기에 파괴변형률선이 감소를 보이다가 b값이 일정치를 초과하면 파괴변형률선도 일정 값에 수렴함을 알 수 있으며 이는 Lade et.al(1973)의 결과와도 일치한다.

4. 강도특성

4-1. 유효내부 마찰각

Fig.11은 유효내부마찰각과 유효측압과의 관계를 나타낸 것으로 σ_3' 가 크면 ϕ' 적은 값이 된다. 이는 삼축면에서 파괴면이 곡면으로 나타나는 것을 의미하며 Lade는 파괴면의 방정식을 다음과 같이 표현 하였다.

$$(\sigma_1' / \sigma_3' - 27)(\sigma_1' / Pa)^m = \eta_1 \quad \text{----- (1)}$$

여기서 m는 곡면의 곡률의 정도를 나타내는 값이며 η_1 는 원추면의 정점각의 크기를 나타 낸다.

Fig.12는 중간주응력의 상대적 크기를 나타내는 b와 유효내부마찰각의 관계를 나타 내고 있으며 b>0인 실험에서 ϕ' 는 b의 증가와 함께 증가한다. Mohr-Coulomb규준 에 의하면 내부 마찰각은 b에 관계없이 일정하지만 실제 실험결과 Mohr-Coulomb 규 준과는 다르게 중간주응력의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

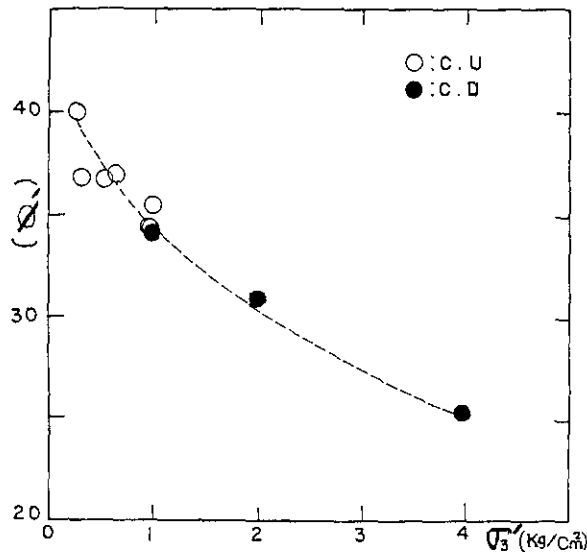


Fig.11 유효구속 압력에 따른 유효 내부마찰각

그리고 비배수시험인경우가 배수시험인경우보다 큰 값을 보이고 있으며 이것은 Fig.11 과같이 같은 구속압력을 사용할 경우 비배수의 유효 구속압력이 적은 값이 되어 나타나는 현상으로 판단 된다.

이들 시험결과를 동일한 유효평균응력의 조건하에서 비교하기 위하여 같은 정8면체면상에 부영하여 비교 해야 할것이다. 그리하여 Lade의 파괴면을 따라 정8면체 상에 부영시킨것이 그림 12(b) 이고, 이 결과에 의하면 두 실험은 거의 같게 나타나고 있다. 또한 그림에서 실선은 $m=0.3$ 및 $\eta=39$ 로 하여 식(1)로 부터 그 결과를

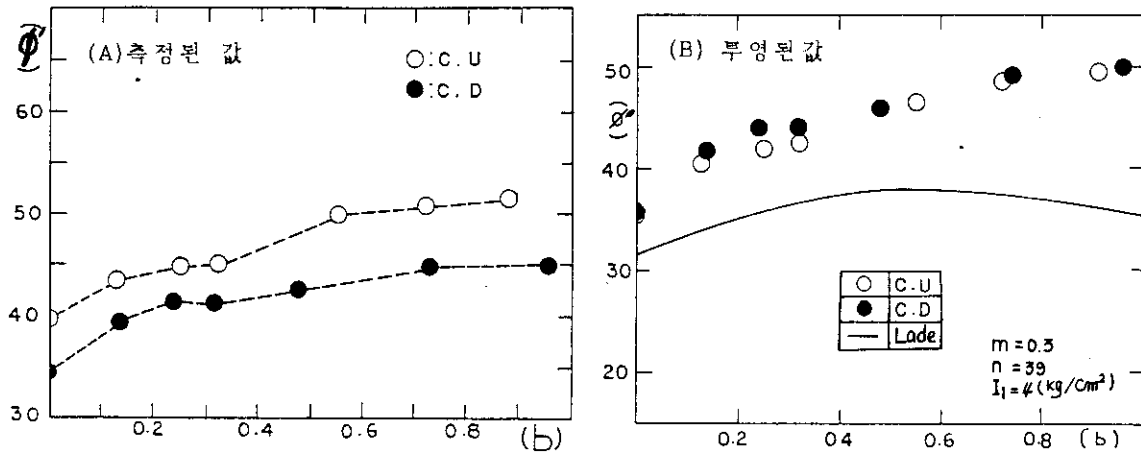


Fig.12 중간주응력 변화에 따른 유효 내부마찰각

표시한 것으로서 실험결과와는 상당한 오차를 보이고 있다. 이점은 본 시험의 경우 Lade의 항복곡선식은 적용성의 의문점이 있다고 생각되며 장차 더 많은 시험과 검토를 요하는 사항이다.

4-2. 파괴규준

Fig.13은 입방체 3축압축시험으로 구한 비배수 전단강도를 전응력으로 계산하여 Tresca파괴규준과 함께 정팔면체상에 비교 검토한 것이다. 이 규준에 의하면 삼축압축시험과 삼축인장 시험의 강도가 동일하게 된다. 따라서 정팔면체면상의 Tresca 규준의 단면은 정수압축을 중심축으로 하는 정육각형 모양을 이루고 있다. 비배수 전단강도의 전응력해석 결과는 Tresca규준과 형상을 같이 나타내고 있으며 $b=1$ 일때

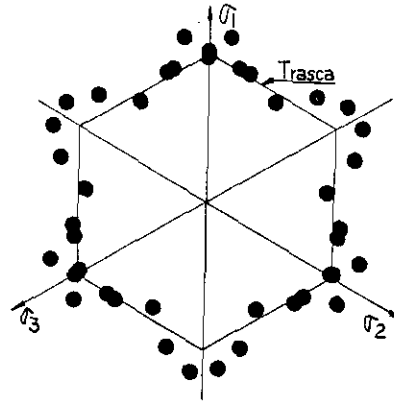


Fig.13 전 응력 해석 결과와 Tresca규준의 비교

삼축인장의 실험치는 Tresca규준보다 약간 크게 나타난다. 원래 Tresca규준은 전응력 규준 이지만 전응력 해석 결과를 그렇게 정확하게 표현하지 못하고 있음을 알 수 있다. 주응력 공간에서 Lade 파괴면의 방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I}{Pa} \right)^m = \eta_1 \text{-----} (1) \text{ bis}$$

η_1 와 m 은 시료에 따라 결정되는 정수이다. 이때 식(1)로 나타난 곡면 꼭지점 각을 η_1 의 크기로 표시되고 m 은 이 곡면의 곡률과 관계되는 값이며 삼축시험결과 얻어진

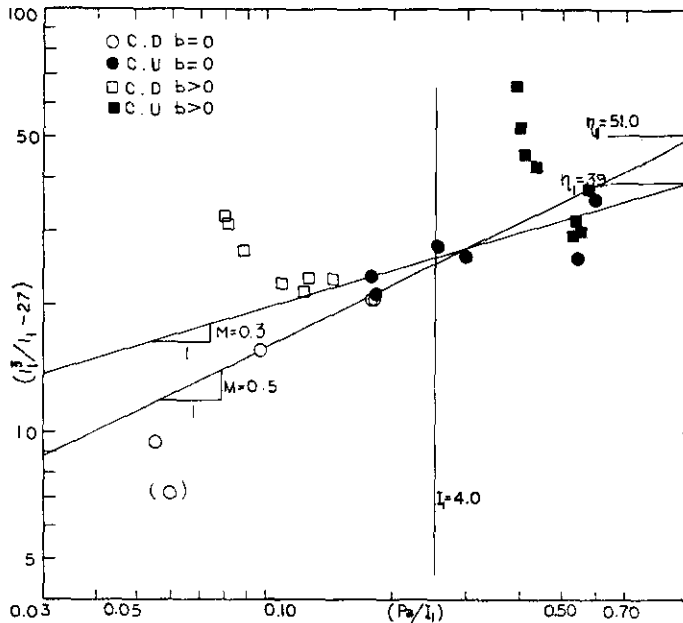


Fig.14 Antelope Valley Sand의 η_1 와 m 값

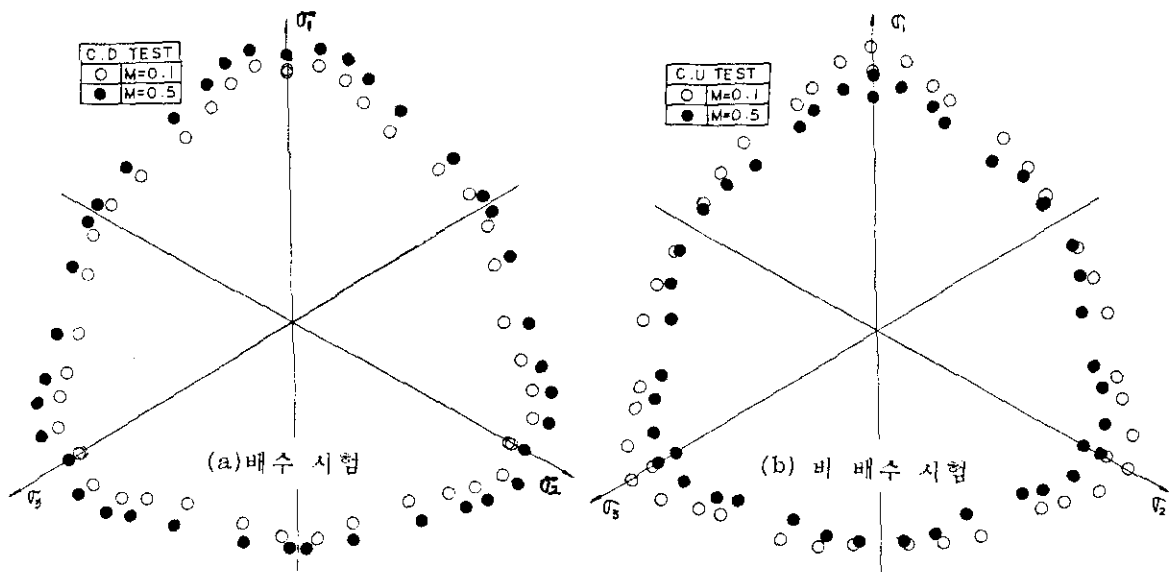


Fig.15 m 값 변화에 따른 파괴면의 크기

파괴시의 $(I_1^3 / I_3) - 27$ 과 (Pa/I_1) 의 값을 양변 대수지에 Plot하여 얻어진 직선의 기울기를 m 이라하고 (Pa/I_1) 값이 1 일때의 $(I_1^3 / I_3) - 27$ 의 값을 \mathcal{Z}_l 라 한다. 본 시험에서 얻은 결과를 Fig.14에 나타 내었다. 그림에서와 같이 m 과 \mathcal{Z}_l 를 정하는데 임의성이 있을 것이므로 Fig.15와 같이 m 값을 각각 0.1과 0.5로 하여 $I = 4(\text{Kg}/\text{Cm}^2)$ 인 팔면체 면에 투영 시킨것을 비교한 것이다. 자세히 검토하면, Fig.15(b)에는 비 배

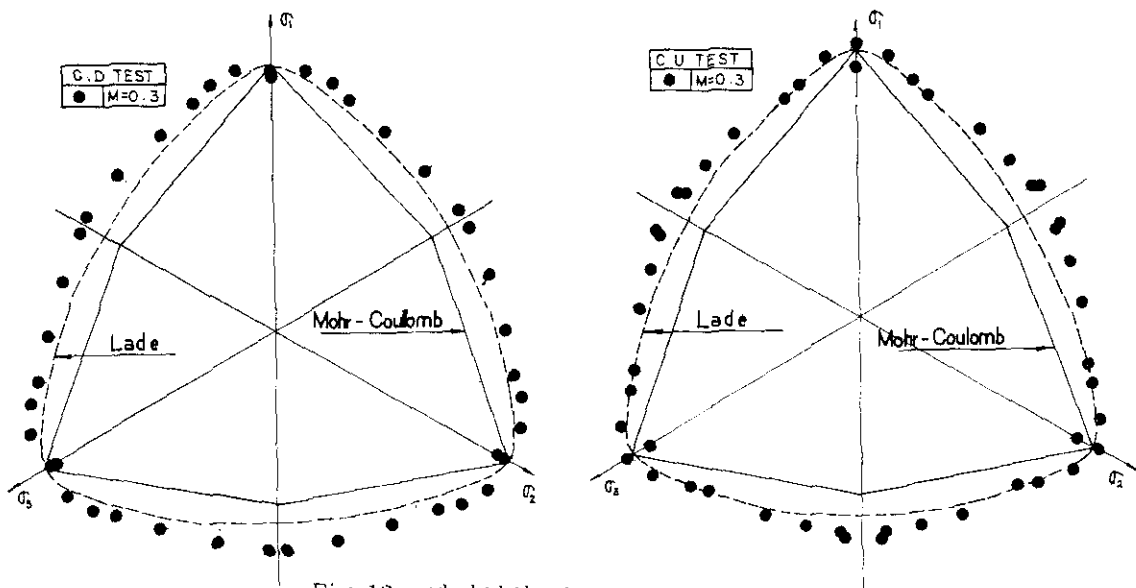


Fig.16 파괴면의 비교

수 상태에서 $m=0.1$ 와 $m=0.5$ 인 경우가 나타나고 있는데 전자가 후자보다 약간 크게 나타난다. 또 배수상태에서 $m = 0.1$ 과 $m = 0.5$ 인 경우 Fig.15(a)에 나타났다. 이 경우도 비 배수와 같이 $m = 0.1$ 이 더 크게 나타난다. 그러나 같은 $m = 0.1$ 에 대하여는 비 배수가 배수에 비하여 약간 크며 $m = 0.5$ 에서는 배수가 비 배수에 비하여 꽤 크다. 이와같이 양자가 m 값에 따라서 일치 하지 않으므로 같은 크기의 파괴면이 나타나도록 $m = 0.3$ 을 선택하여 아를 비 배수와 배수상태에서 자료를 구하여 Lade의 파괴규준과 Mohr - Coulomb의 규준을 Plot한 것이 Fig.16(a)(b)이다. 비 배수, 배수 어느경우나 Mohr - Coulomb 보다 Lade의 규준에 더 근접하고 있음이 명백 하다.

5. 결 론

세 주응력을 각각 독립적으로 제어할수있는 입방체형 삼축시험기를 사용하여 압축성 모래의 3차원거동을 조사한결과 다음과같은 결론을 얻었다.

1 . 중간주응력은 압축성 모래의 3차원 파괴강도에 큰 영향을 미치고 있으며, 파괴규준은 중간주응력의 영향을 나타낼수있는 Lade규준이 Mohr-Coulomb규준보다 더 근접하고 있다.

2 . 측정된 유효내부마찰각(ϕ')은 $b=0$ 인 삼축압축상태에서 최소치가 되고 점진적으로 증가하며 같은 b 값에서는 동일한 팔면체면에 투영할때에는 편차가 거의 없으나 Lade의 규준과는 편차가 있다.

3 . 압축성 모래는 전단변형을 일으키면서 한계간극비에 가까워 지면 체적변형은 억제 되면서 간극수압의 증가는 끝나나 Interlocking현상에 의한 Work Hardening이 일어난다.

4 . 주변형틀의 관계에서 파괴시 ϕ' 은 배수, 비배수 시험사이에 차이점이 발견된다.

** 감사의글 **

본 연구는 한국과학재단 지원하에 연구 수행중 해외연구 (University of California Los Angeles)에서 이루어진 것으로서 동 재단에 진심으로 감사 드립니다.

Reference

1. Lade, P.V. 1977. Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface. *Int.J.Solids and struct.*13:1019-1035.
2. Lade, P.V. 1978. Prediction of undrained behavior of sand. *J. Geotech.Div. (ASCE)*104(GT6):721-735.
3. Lade, P.V. J.M.Duncan 1973. Cubical triaxial tests on cohesionless soil. *J. Soil.Mech.Fdns.Div(ASCE)*99(SM10):793-812.
4. Lade, P.V. J.M.Duncan 1975. Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil. *J.Geotech,Eng.Div.(ASCE)*101(GT10):1037-1053.
5. Roscoe, K.H. J.B.Burland 1968. On the generalized stress-strain behaviour of 'Wet' clay. In Heyman Leckie(eds), *engineering plastic*:535-609. Cambridge University Press.