

입방체형삼축시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동

The Stress - Strain Behavior of Sand in Cubical Triaxial Tests

南 正 萬*¹

Nam, Jung - Man

洪 元 杓*²

Hong, Won - Pyo

Abstract

A series of drained triaxial tests on sand was performed using the cubical triaxial apparatus, in which three principal stress could be loaded independently. The test results indicated that the intermediate principal stress influenced on both stress-strain behavior and strength of sand. The axial strain at failure decreased and volumetric strain increased with an increase of the intermediate stress under constant minor principal stress. The internal friction angle of sand increased in general with increase of the deviator stress ratio $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ except slight decrease of the internal friction angle as b value approached to 1. Finally Lade's failure criterion presented good coincidence with the experimental strength, while Mohr-Coulomb failure criterion underestimated the experimental strength.

요 지

세 주응력을 서로 독립적으로 조절할 수 있는 입방체형삼축시험기를 이용하여 모래에 대한 일련의 배수삼축시험이 실시되었다. 실험결과 모래의 응력-변형률거동과 강도는 중간주응력의 크기에 따라 각기 다른 특성을 보이는 것으로 나타났다. 우선 최소주응력이 일정한 상태에서 중간주응력이 증가함에 따라 파괴시의 축변형률 ϵ_1 은 감소하는 경향이 있으며 체적팽창현상은 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그리고 내부마찰각은 축차응력비 b 가 증가함에 따라 증가하다 b 가 1 부근에 접근하면서 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편 Mohr-Coulomb규준은 모래의 파괴강도를 과소산정하는 경향을 보이고 있으나 Lade의 파괴규준은 시험치와 좋은 일치를 보이고 있다.

*¹ 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*² 정회원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

흙의 역학적 거동을 파악하기 위하여 여러 가지 요소시험이 실시되어 오고 있으며 삼축 시험은 이중 가장 많이 실시되는 시험방법이다. 통상적으로 삼축시험이라고 하면, 원통형 공시체에 대한 축대칭삼축시험을 의미한다. 그러나, 이 시험은 원통형공시체를 사용하는 관계로 요소내의 응력상태가 축대칭상태에 있게 되어 수평방향의 주응력은 항상 서로 같아야 한다. 따라서 이러한 상태하에서는 중간주응력이 항상 최소주응력이나 최대주응력(삼축신장 시험시)과 같게되어 중간주응력의 영향을 고려할 수 없게된다. 그러나 최근의 여러 연구에 의하면 중간주응력은 점성토나 사질토의 응력-변형률 및 강도거동에 많은 영향을 미치고 있음을 볼 수 있다.^{1)~4)} 따라서 올바른 모래의 거동을 조사하기 위하여서는 요소에 서로 다른 세주응력을 재하시킬 수 있는 다축시험장치가 필요하다.

현재 중간주응력의 효과를 고려할 수 있는 시험기로 입방체형삼축시험기가 많이 사용되고 있으며 이 시험기는 크게 두가지로 분류할 수 있다. 그 중 하나는 공시체의 주변구속조건을 강제로 주어 공시체에서 변형이 균등하게 발생하도록 한 시험기로서 Lade & Duncan⁵⁾, Reades and Green⁶⁾, Nakai & Matsuoka⁶⁾ 및 Lam & Tatsuoka⁷⁾ 등에 의해 개발 사용되고 있다. 이 시험장치는 국내에서 이미 여러번 소개된적이 있으며^{1,2)} 이 장치와 유사한 입방체형 삼축시험기가 현재 국내에서도 제작되어 사용되고 있다.⁸⁾

한편 다른 종류의 입방체형삼축시험기는 Ko & Scott⁹⁾, Sutherland & Mesdary¹⁰⁾ 및 Yamada & Ishihara¹¹⁾ 등에 의해 개발된 것으로 이것은 공시체의 표면에 하중이 작용하는 재하판을 고무로 된 물주머니를 이용하여 공시체에 변형을 유발시킨 것으로 이 시험기는 변형이 균등하게 발생하지 않으며 전단파괴면

이 형성되지 않는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 시험기들중 앞에서 설명한 변형이 균등하게 발생하도록 강제 구속시킨 입방체형삼축시험기를 이용하여 일련의 배수삼축시험을 실시함으로써 모래의 응력-변형률거동과 강도특성에 미치는 중간주응력의 영향을 검토하고자 한다.

2. 입방체형삼축시험

2.1 시험장치

그림 1은 본연구에 사용된 입방체형삼축시험기의 단면을 도시한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 크기가 76mm×76mm×76mm인 정육면체 모양의 공시체는 상판(cap)과 저판(base) 및 고무 Membrane에 의해 둘러 싸여져 있다. 상판과 저판은 그림 2에서 보는 바와 같이 100mm×100mm의 면적을 가지며 이 크기는 공시체에 하중을 가할시 측방 변형에 의한 신장변형률을 30%까지 허용할 수 있다. 상판과 저판을 둘러싸고 있는 고무 Membrane은 물과 공기의 차단을 위하여 각각 2개의 O-Ring에 의하여 밀봉되어 있다. 여기서 사용된 고무 Membrane은 그 탄성이 공시체에 미치는 영향과 구속압에 의한 Membrane 침투 영향을 고려하여 두께를 0.03cm로 하였다.¹²⁾ 그리고 상판과 저판은 자체의 무게가 공시체에 미치는 영향을 최대한 줄이기 위하여 알루미늄으로 제작되었으며 상판의 상부 오목한 부분에는 그림 2에서 보는 바와 같이 연직하중을 측정하기 위한 하중계(load cell)이 내장되어 있다. 공시체가 놓이는 저판(base)은 삼축셀의 바닥판에 고정되어져 있다. 상판과 저판에는 그림 2에서와 같이 Filter stone과 배수선을 마련하여 공시체의 체적변형량 측정과 간극수압측정을 가능케 하였다. 또한 시험시 공시체와 상판 및 저판 사이의 단부구속력 발생원인이 되는 마찰력을 피하기 위한 Lubricate를 형성하기 위하여 실리콘그리스를 가볍게 바른 두께 0.3mm의

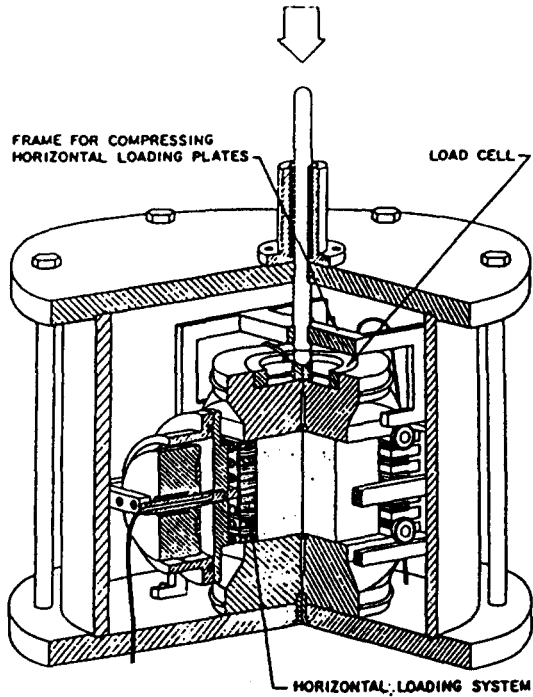


Fig.1 Cubical triaxial apparatus (Lade, 1978)

Rubber sheet를 상판에는 2장, 저판에는 1장을 부착시켰다. 한편 실험에 사용된 시험기의 상부덮개(top plate)와 하부바닥판(bottom plate)은 두께가 약 1.9cm인 스테인레스판으로 제작되었으며 Chamber는 내경이 28cm, 높이가 24cm, 두께가 1.27cm인 Lucite plastic tube로 되어 있다.

Chamber내부에 위치하는 수평방향하중장치는 중간주응력이 작용하는 방향으로 2개의 연직판이 마주보고 있고 하중이 작용되는 유압장치는 한쪽에만 설치되어 있으며 하중을 동시에 양쪽에서 작용시키기 위해 2개의 연직판은 철재지지봉에 의해 연결되어 있다. 그리고 이 연직판의 좌우 상하단에는 바퀴가 부착되어 있어 측압작용시 수평방향으로의 이동을 자유롭게 하였다. 또한 연직방향의 하중과 수평방향의 하중이 서로 방해하지 않게 하기 위하여 이 장치에서 공시체의 연직면과 접촉하는 부분을 그림 3과 같이 여러개의 얇은 판으로 분리할 수

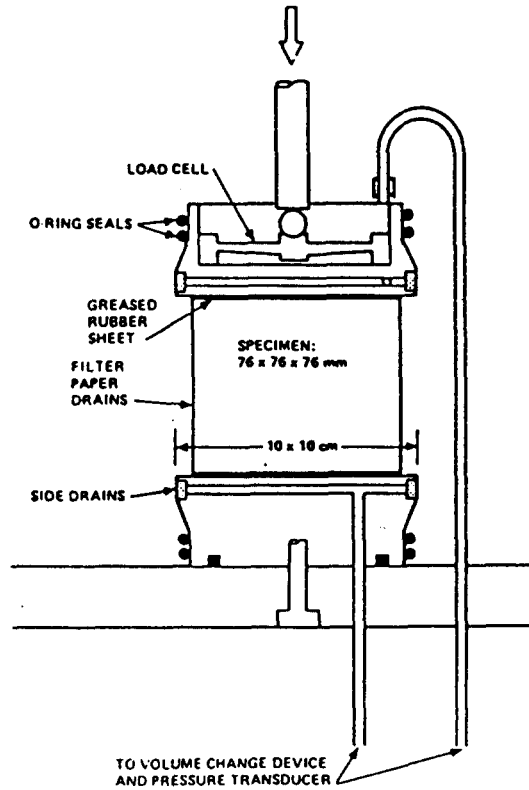


Fig.2 Triaxial setup for clay specimen (Lade, 1978)

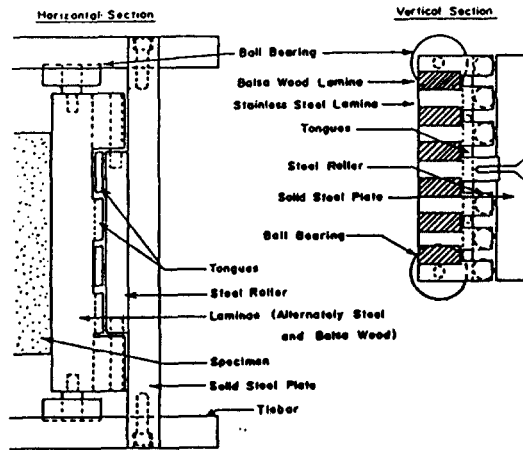


Fig.3 Horizontal and vertical sections of horizontal loading plate (Lade, 1978)

있게 하였고 이들 판 사이에는 Balsa wood가 위치하게 된다. Balsa wood는 섬유질의 특성

이 연직방향에 대해서는 강도와 변형계수가 아주 낮고 중간주응력이 작용하는 수평방향에 대해서는 강도와 변형계수가 높아 Poisson비가 0에 가까워 연직방향 하중작용시 수평하중장치가 방해가 되는 것을 사전에 방지하는 아주 중요한 역할을 한다. 이 수평하중장치에서도 공시체와 만나는 접촉면에서는 마찰력에 의한 강도변화를 막기 위해 상판과 저판에서와 같이 연직하중작용판에 실리콘 그리스를 가볍게 바른 후 두께 0.3mm의 Rubber sheet를 부착시켜 사용한다.

하중의 작용방향에 따른 주응력과 변형측정 방법에 대해 살펴보면 최소주응력 σ_3 는 수평방향으로 작용하도록 Cell pressure로 가한다. 그리고 연직하중은 변형제어방식으로 재하하며 최대주응력 σ_1 은 연직방향축차응력(vertical deviator stress), $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 를 측정하여 구한다. 중간주응력 σ_2 는 σ_3 와 직교하는 또 하나의 수평방향으로 작용하도록 앞에서 설명한 수평재하장치를 사용하여 응력제어방식으로 재하하며, 수평방향축차응력(horizontal deviator stress), $(\sigma_2 - \sigma_3)$ 를 측정하여 구한다. 그리고 연직방향 변형률은 삼축 Chamber밖의 재하 피스톤에 부착시킨 다이알게이지로 측정하였으며 중간주응력 방향의 변형량은 Clip gage를 수평재하장치 사이에 끼워 넣어 측정하고 최소주응력 방향의 변형량은 Clip gage를 사용하지 않고 체적변형량과 연직변형량 및 중간주응력방향의 변형량으로부터 산술적으로 산정한다.

2.2 공시체 제작

입방체형삼축시험 공시체는 실리콘 그리스를 바른 Rubber sheet를 저판에 한장을 부착시킨 후 저판위에서 직접 제작한다. 고무 Membrane을 저판 둘레에 두개의 0링으로 밀봉시키고 입방체형공시체를 만들기 위한 진공 Forming Jacket을 저판위 중심에 설치한다. 이때 고무 Membrane은 포밍자켓내부를 통해 위로 당겨지고 Forming Jacket 뚜껑으로 이를 고정

시킨 후 진공을 가하여 고무 Membrane을 공시체 형태로 만든다. 소정의 상대밀도를 가지는 모래 공시체 제작을 위해 깔대기의 끝이 모래가 낙하하여야 하는 지점으로부터 약 10cm의 거리를 유지시키며 깔대기를 통하여 자유낙하시켰다. 자유낙하직후의 공시체는 높이 7.6cm 보다 조금 높게된다. 이것을 우레탄 망치를 이용하여 Forming Jacket을 가볍게 2-3회 두드림으로서 높이를 조절한다. 이렇게 고무 Membrane 내부에 모래의 주입이 끝나면 Forming Jacket의 뚜껑을 제거하고 상판을 공시체위 중심에 설치한 후 Forming Jacket 주위로 당겨 내려 놓았던 고무 Membrane을 상판주위로 올려 2개의 0링으로 상판에 밀봉시킨다.

상부배수선을 상판에 연결시키고 진공을 0.5 kg/cm² 가하여 공시체를 고정시킨 후 Bubble chamber를 통해 고무 Membrane의 공기누출 여부를 확인한다. 만일 공기누출이 탐지된다면 포밍자켓을 제거한 후, 공시체에서의 공기누출이 보수될 때까지 Latex를 고무 Membrane에 칠한다. 공기누출이 완전히 방지된 것으로 확인되면 수평재하장치와 Clip gage를 설치하고 삼축셀과 상판을 조립한 후 Chamber를 물로 채우고 Cell pressure를 0.5kg/cm² 작용시킨 후 진공을 제거시킨다.

공시체를 완전히 물로 포화시키기 위해서 CO₂가스를 배수선 저부로 부터 주입한다. 이산화탄소 가스는 공기보다 무거워 이를 공시체에 주입시 공시체 내부의 공기를 위로 밀어내어 상부배수선을 통해 공기를 밖으로 추출할 수 있다. 공시체를 물로 포화시킬시 완전히 포화가 안되었을 경우에도 CO₂가스의 압축성이 불과 비슷해 체적변형량 측정에 유리한 이점이 있다. CO₂가스를 약 15분 정도 주입한 후 공기를 제거시킨 물을 공시체에 주입하여 공시체를 포화시키고 시험을 실시한다.

2.3 사용시료

본 연구에서는 미국 California주에 위치하

는 Santa Monica 해변의 모래를 사용하였으며, 사용하기전 물로 씻어 모래 중에 포함되어 있는 염분과 불순물을 제거하고 입자의 분포를 균등하게 하기 위해 40번 체를 통과하는 것을 대상 모래시료로 결정하였다. 한편 이 모래의 광물구성을 살펴보면 석영과 장석이 각각 약 45%씩 차지하여 흙구성의 주류를 이루고 있으며 자철광이 약 8%, 그리고 잔여광물 2% 정도로 구성되어 있다. 또한 균등계수는 1.58, D_{30} 은 0.265mm이고 비중은 2.659이며 최대 간극비는 0.91, 최소 간극비는 0.58이다. 그리고 본시험은 Medium Dense 상태로 실시하였으며 이를 위해 간극비가 0.68인 상대밀도 70%의 공시체를 제작하였다.

2.4 응력경로

앞절에서 설명한 입방체형삼축시험기를 이용하여 상대밀도가 70%인 Santa Monica 해변 모래에 대한 배수시험을 여러가지 응력상태 하에서 실시하였다. 응력상태는 식(1)에 제시된 연직방향축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)과 수평방향축차응력($\sigma_2 - \sigma_3$)의 비인 축차응력비 b 로 나타낼 수 있다.

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

여기서 b 는 $\sigma_2 = \sigma_3$ 인 삼축압축시험에서는 0이고, $\sigma_1 = \sigma_2$ 인 삼축신장시험에서는 1인 것으로 b 는 0에서 1사이의 값을 갖는다. 그리고 본 실험에서는 각 실험마다 파괴시 까지의 b 값을 초기에 정한 값으로 유지되도록 주응력을 조절하였다. 각 실험에 대한 b 와 초기간극비는 표.1과 같다.

각 시험의 응력경로는 표. 1에서 보는 바와 같이 우선 삼축압축시험에 해당하는 b 가 0인 시험을 구속압이 0.5, 1.0, 2.0kg/cm²인 세가지 경우에 대해 실시하고 이를 각각 C-1에서 C-3으로 하였다. 그리고 C-4는 구속압이 1kg/cm²인 상태에서 중간주응력의 효과를 고려한 b 가 0.13인 시험이다. C-5, 6, 7 및 8은 C-4에서와

표 1 입방체형삼축시험

Test No.	구속압 (kg/cm ²)	응력비 b	초기간극비 e_{i1}	비고
C-1	0.5	0.00	0.697	
C-2	1.0	0.00	0.691	
C-3	2.0	0.00	0.682	
C-4	1.0	0.13	0.727	
C-5	1.0	0.30	0.671	
C-6	1.0	0.61	0.675	
C-7	1.0	0.83	0.676	
C-8	1.0	0.89	0.682	
C-9	0.6	0.97	0.660	
C-10	0.5	0.71	0.704	$\sigma_h > \sigma_v$
C-11	0.5	0.70	0.684	$\sigma_h > \sigma_v$
C-12	0.5	0.77	0.684	$\sigma_h > \sigma_v$

같이 구속압이 1kg/cm²인 상태에서 수평재하장치에 의한 중간주응력의 크기를 조금씩 증가시켜 축차응력비 b 를 각각 0.3, 0.61, 0.83 및 0.89로 한 경우이다. 그리고 수평재하장치에 의한 하중부담이 높은 b 가 1인 삼축신장시험과 수평재하장치에 의한 하중이 연직하중 보다 더 높게 작용되는 C-9에서 C-12에서는 연직재하장치의 하중부담을 감소시키기 위해 구속압을 감소시켜 하중을 작용시켰다. 즉 C-9에서는 삼축신장시험을 실시하기 위하여 구속압을 0.6 kg/cm²로 감소시켜 하중을 작용시켰으며 이때의 b 는 0.97이다. 그리고 C-10에서 C-12까지는 구속압이 0.5kg/cm²이고 수평재하장치에 의한 수평응력 σ_h 가 연직응력 σ_v 보다 큰 경우로써 축차응력비 b 가 각각 0.71, 0.70 및 0.77에 해당하는 시험이다.

3. 응력-변형률 관계

그림 4는 표. 1에 있는 12회의 입방체형삼축 시험중 b 가 0인 삼축압축시험을 구속압을 달리 하여 실시한 C-1에서 C-3의 응력-변형률 관계를 도시한 것이다.

그림 4(a)는 축변형률 ϵ_1 에 대한 축차응력의

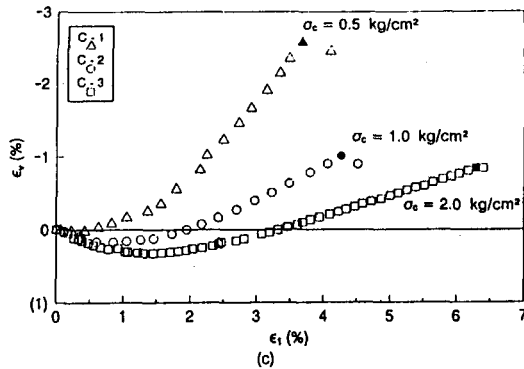
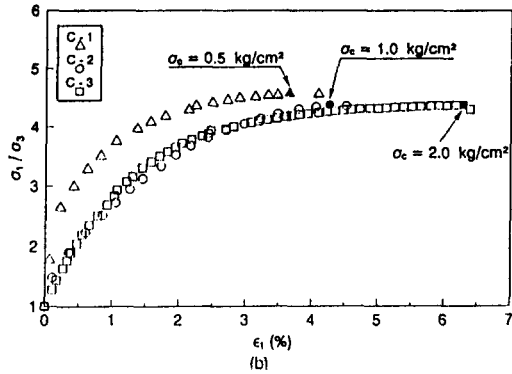
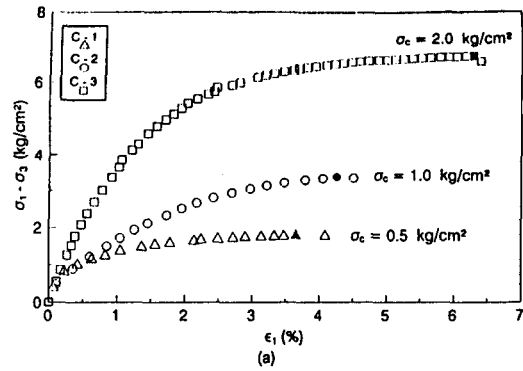


Fig.4 The results of cubical triaxial tests for C-1, C-2, C-3

관계를 도사한 것으로 흰삼각형으로 나타낸 C-1은 축변형률 약 3.7%에서 최대축차응력이 발생하고 있다. 구속압이 1.0kg/cm²인 C-2는 C-1보다 축차응력이 크게 발생하고 있으며 검은색으로 나타낸 최대축차응력이 발생하는 위치도 C-1에서 보다 증가한 축변형률 약 4.3%

에서 발생하고 있다. 한편 구속압이 2.0kg/cm²인 C-3의 결과는 축차응력이 가장 크게 발생하고 있으며 최대축차응력이 발생하는 위치도 축변형률 약 6.3%에서 발생하고 있어 다른 시험에 비해 파괴시의 축변형률이 가장 많이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 즉, 밀도가 같은 공시체의 축변형률에 대한 축차응력의 관계에서 파괴시의 축차응력은 구속압이 증가함에 따라 더 크게 발생하고 있으며 파괴가 발생하는 축변형률의 크기도 구속압이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 4(b)는 축변형률 ϵ_1 에 대한 주응력비 σ_1/σ_3 의 관계를 도사한 것으로 모래의 강도를 내부마찰각으로 표현할시 내부마찰각의 크기는 식(3)에서 보는 바와 같이 주응력비에 의해 결정된다. 이 그림에서 보는 바와 같이 파괴시의 주응력비의 크기는 구속압의 크기에 관계없이 거의 동일하나 파괴시의 축변형률은 구속압의 크기가 클수록 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 4(c)는 축변형률 ϵ_1 에 대한 체적변형률 ϵ_v 의 관계를 도사한 것으로 그림에서 구속압이 0.5kg/cm²인 C-1의 결과는 체적압축변형률이 축변형률 초기에만 조금 발생하고 있으며 축변형률 0.5%에서부터 다이러턴시현상에 의한 체적팽창이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 흰원은 구속압이 1.0kg/cm²인 C-2의 결과를 도사한 것으로 C-1에 비해 체적압축이 많이 발생하고 있다. 그리고 체적팽창이 발생하는 축변형률 ϵ_1 의 위치도 C-1에서 보다 증가한 약 2%에서부터 발생하고 있으며 체적팽창의 양은 훨씬 적게 발생하고 있다. 한편 구속압이 2.0kg/cm²인 C-3에서는 체적압축이 앞에서 보다 훨씬 많이 발생하는 것으로 나타나고 있으며 축변형률 약 3.3%에서부터 체적팽창이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 이 결과로부터 구속압이 증가할수록 다이러턴시에 의한 체적팽창을 구속하는 효과가 큼을 알 수 있다.

그림 5는 구속압이 1.0kg/cm²인 상태에서 중간주응력의 영향을 조사하기 위하여 C-4, 5

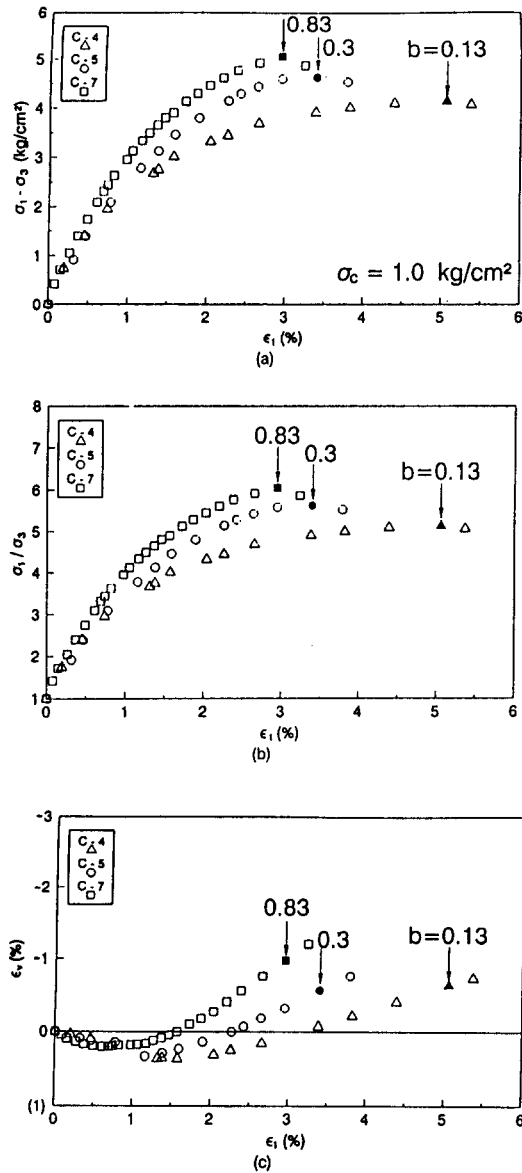


Fig.5 The results of cubical triaxial tests for C-4, C-5, C-7

및 7의 시험결과를 함께 도기한 것이다. 그림 (a)는 축변형률 ϵ_1 에 대한 축차응력 $\sigma_1 - \sigma_3$ 의 관계를 도기한 것으로 축차응력비 b 가 0.13인 C-4는 축변형률이 증가함에 따라 축차응력이 증가하다 축변형률 약 5%, 축차응력 약 4.2

kg/cm^2 에서 파괴가 발생하고 있으며 화살표는 그 위치를 나타낸 것이다. b 가 0.3인 C-5는 파괴가 C-4에서 보다 감소된 축변형률 약 3.3%에서 발생하고 있고 축차응력은 C-4에서 보다 증가한 약 4.6kg/cm^2 를 나타내고 있다. 그리고 b 가 0.83인 C-7은 파괴시 축차응력이 계속 증가하여 약 5.1kg/cm^2 를 나타내고 있으나 파괴시 축변형률 ϵ_1 은 약 2.9%에서 발생하고 있다.

그림 (b)는 축변형률 ϵ_1 에 대한 주응력비 σ_1 / σ_3 의 관계를 도기한 것으로 축차응력 $\sigma_1 - \sigma_3$ 과 축변형률의 관계를 나타낸 그림 (a)와 유사한 경향을 나타내고 있다. 파괴시 최대주응력비는 b 가 0.13인 C-4에서 가장 적게 발생하고 있으며 b 가 증가함에 따라 모래의 최대주응력비도 증가하여 b 가 0.83인 C-7에서 가장 크게 발생하고 있다. 또한 파괴시의 축변형률은 b 값이 커질수록 즉 중간주응력이 클수록 작아진다.

그림 5(c)는 축변형률 ϵ_1 에 대한 체적변형률 ϵ_v 의 관계를 나타낸 것으로 b 가 증가함에 따라 최대체적압축변형률과 체적팽창이 발생하는 위치가 감소하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 축차응력비 b 가 증가함에 따라 다이러턴시에 의한 체적팽창이 크게 발생함을 알 수 있다.

4. 파괴기준(Failure Criterion)

Lade는 마찰물질에 대한 재료의 3차원 파괴 기준은 곡선형태의 파괴포락선을 가진다고 하였다. 이 기준은 응력의 제 1 및 제 3 불변량의 향으로 다음과 같이 제안되었다.¹¹⁾

$$\left(\frac{I_1}{I_3} - 27\right) \left(\frac{I_1}{P_3}\right)^m = \eta_1 \quad (2)$$

여기서, P_3 는 응력의 단위로 표시된 대기압이며, η_1 과 m 은 재료에 따라 결정되는 토질매개변수이다. η_1 과 m 은 그림 6에 나타난 바와 같이 삼축압축시험결과로부터 얻은 $(I_1^3 / I_3 - 27)$ 과 (P_3 / I_1) 의 관계를 각각 y 축과 x 축의 값

으로 양면대수용지에 도시함으로써 구할 수 있다.

본 연구에서는 파괴정수 η_1 과 m 을 결정하기 위하여 입방체형삼축시험기에 의한 삼축압축 시험 외에도 원통형삼축압축시험기에서 실시한 시험결과¹⁵⁾와 비틀림전단시험기를 사용하여 실시한 삼축압축시험의 결과¹⁶⁾를 포함하여 파괴정수를 결정하였다.

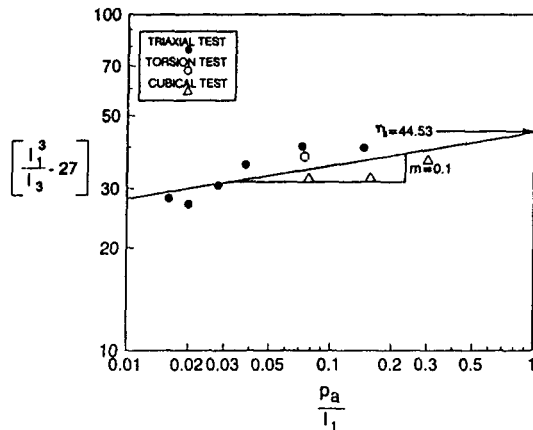


Fig. 6 Determination η_1 and m for failure criterion

그림에서 실선은 이들 시험결과에 대한 파괴정수 η_1 과 m 을 결정하기 위해 회기분석을 실시한 결과이다. 여기서 η_1 과 m 은 직선의 절편과 기울기에 대한 값으로 각각 44.53과 0.1로 결정되었다. 이 직선을 기준으로 각 시험기에 의한 시험치를 비교하여 보면 가로축의 값이 0.03이상에서는 원통형삼축시험기와 비틀림전단시험기에 의한 값이 직선의 상부에 위치하고 있으며 입방체형삼축시험기에 의한 결과는 그 아래에 위치하는 것으로 나타나고 있어 입방체형삼축시험의 결과가 다른 시험에 비해 b 가 0인 삼축압축시험에서는 조금 작게 산정되는 경향을 보이고 있다.

5. 강도특성

5.1 내부마찰각

그림 7은 b 값의 변화에 따른 내부마찰각 ϕ 의

변화를 최소주응력 σ_3 가 1 kg/cm^2 인 평면에 도시한 것이다. 여기서 흙의 내부마찰각은 Mohr-Coulomb의 기준에 의하여 식(3)과 같이 계산된다.

$$\phi = \sin^{-1} \frac{(\sigma_1/\sigma_3) - 1}{(\sigma_1/\sigma_3) + 1} \quad (3)$$

중간주응력의 상대적인 크기를 나타내는 축차응력비 b 에 따른 내부마찰각의 변화를 그림에서 관찰하여 보면 삼축압축시험인 $b=0$ 에서 가장 작은 내부마찰각을 보이고 있으며 b 가 증가함에 따라 내부마찰각도 증가하다가 b 가 0.7에서 1사이에서는 약간 감소하는 듯한 느낌을 준다.

Mohr-Coulomb의 기준에 의하면 흙의 내부마찰각 ϕ 는 중간주응력의 영향은 받지 않고 단지 최대주응력과 최소주응력의 함수로만 되어 있다. 그러나 실제의 시험결과는 Mohr-Coulomb의 기준과는 달리 중간주응력의 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 이미 많은 연구결과에서 발표되었으며 점토에 대한 이전 연구에서도 보고된 바 있다.¹⁷⁾

본 모래시료에 대한 삼축시험에서 중간주응력축의 변형률이 0이 되는 평면변형률조건은 $b=0.3$ 부근에 해당하였다. 이 평면변형률조건에 해당하는 $b=0.3$ 일 때의 내부 마찰각 $\phi_{0.3}$ 와 $b=0$ 의 삼축압축시험에 해당하는 모래의 내부마찰각 $\phi_{0.0}$ 을 비교하여 보면 $\phi_{0.3}$ 가 $\phi_{0.0}$ 보다 약 1.14로 나타나서 Lee¹¹⁾의 $\phi_{0.3} \approx 1.1\phi_{0.0}$ 의 관계와

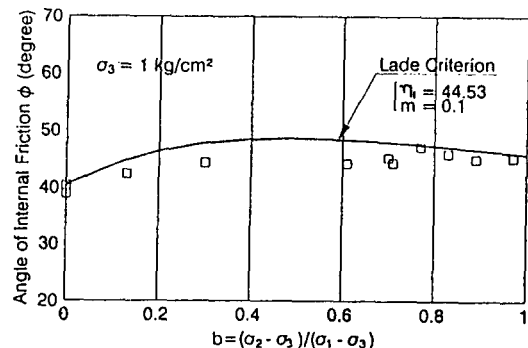


Fig. 7 b - ϕ diagram for tests in cubical triaxial apparatus diagram

대략 일치하고 있다.

한편 앞장의 파괴규준에서 결정한 η_1 과 m 이 각각 44.53이고 0.1일때의 모래의 내부마찰각은 그림7 중에 실선으로 나타나고 있다. 즉 Lade의 파괴규준에 의한 $b-\phi$ 의 관계는 시험치와 대략적으로 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

5.2 정팔면체평면

그림 8은 제 1 응력불변량 I_1 이 6kg/cm^2 인 정팔면체평면상에 입방체형삼축시험으로 부터 구한 모래의 파괴강도를 앞에서 구한 Lade의 파괴규준에 의한 파괴면과 Mohr-Coulomb의 파괴규준으로 부터 구한 파괴면을 비교 도시한 결과이다. 그림에서 일점쇄선은 Mohr-Coulomb의 규준을 나타낸 것이고 실선은 Lade의 파괴규준을 도시한 것으로 여기서 파괴정수 m 과 η_1 은 각각 0.1과 44.53에 대한 것이다. 이 그림에 의하면 삼축압축시험에서는 시험결과치와 두 파괴규준에 의한 예측치가 잘 일치하고 있으나 b 가 0.13, 0.3 및 0.61에서는 Mohr-Cou-

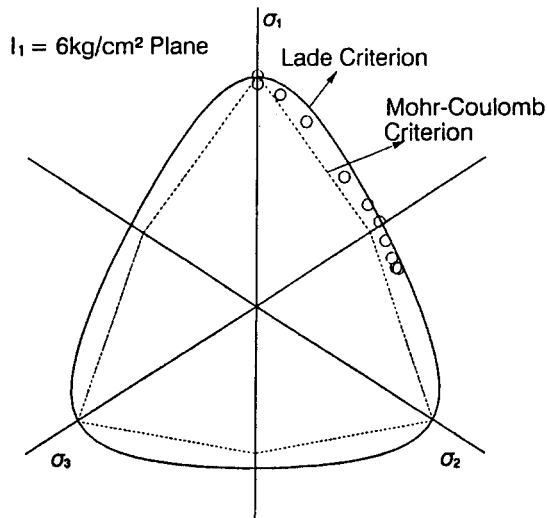


Fig.8 Failure point in octahedral plane for tests in cubical triaxial apparatus

lomb의 규준과 Lade 규준의 중간정도의 지점에 위치하고 있고 다른 나머지 시험에서는 Lade가 제안한 것과 양호하게 일치하고 있음을 볼 수 있다. 즉 Mohr-Coulomb규준은 b 가 0보다 큰 시험의 경우 강도를 과소 평가할 우려가 있는 반면 Lade의 파괴규준은 중간주응력의 영향을 받는 경우의 파괴강도를 잘 산정하고 있다고 볼 수 있다.

6. 결 론

중간주응력효과를 고려한 모래에 대한 12회의 입방체형삼축시험이 실시되었으며 각 시험의 응력경로는 축차응력비 $b(=(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3))$ 를 항상 일정하게 유지하여 실시하였다. 이 결과에 의하면 우선 b 가 0인 삼축압축시험에서는 구속압이 증가함에 따라 파괴시의 축변형률과 축차응력이 증가하는 경향을 보이고 있으나 주응력비는 변화가 없다. 또한 구속압이 클수록 다이러턴시현상에 의한 체적팽창을 구속하는 효과가 크게 나타났다. 그리고 구속압이 같은 상태에서 b 를 증가할수록 파괴강도가 발생하는 축변형률 ϵ_1 의 위치는 감소하는 경향을 보이고 있다. 원통형삼축시험기, 비틀림전단시험기 및 입방체형삼축시험을 이용하여 b 가 0인 삼축압축에 해당하는 시험을 하였을시 입방체형삼축시험기에 의한 파괴강도가 다른 시험장치에 비해 조금 적게 산정되는 것으로 나타났다. 모래의 내부마찰각은 중간주응력에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며 그 변화를 축차응력비 b 와의 관계로 나타내었을시 b 가 증가함에 따라 내부마찰각도 증가하다가 b 가 1 부근에 접근할때 조금 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편 Mohr-Coulomb규준은 모래의 파괴강도를 과소산정하고 있는 반면 Lade의 파괴규준은 시험치와 일치하는 것으로 나타나고 있다.

감사의 말씀

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 1993년도 한미국제공동연구의 일환으로 실험은 미국의 UCLA에서 수행된 결과이며 상기재단에 사의를 표하는 바이다. 아울러 여러가지 편의를 제공하여 준 UCLA 토목과 Poul V. Lade 교수에게도 감사를 드리는 바이다.

참고 문헌

1. 洪元杓 (1988). "中間主應力이 過壓密粘土의 舉動에 미치는 영향", 大韓土木學會論文誌, 第8卷 第2號, pp. 99-107.
2. 洪元杓 (1988). "異方性 過壓密粘土의 強度特性", 大韓土質工學會誌, 第4卷, 第3號, pp. 35-41
3. Hong, W. P. and Lade, P. V. (1989). "Elasto-Plastic Behavior of Ko-consolidated Clay in Torsion Shear Tests", Soils and Found., Tokyo, Japan, 29(2), pp.127-140.
4. Lade, P.V. and Duncan, J.M. (1973). "Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil" Canadian Geotechnical Journal, Vol. 4, No. 1, Feb, pp. 87-99.
5. Reades, D.W. and Green, G.E. (1976). "Independent Stress Control and Triaxial Extension Tests on Sand" Geotechnique, Vol. 26, No. 4, pp.551-576.
6. Nakai, T. and Matsuoka, H. (1983). "Shear Behaviors of Sand Clay Under Three-Dimensional Stress Condition" Soils and Foundations, Vol. 23, No. 2, June, pp. 26-47.
7. Lam, W.K. and Tatsuoka, F. (1988). "Effects of Initial Anisotropic Fabric and σ_2 on Strength and Deformation Characteristics of Sand" Soils and Foundations, Vol. 28, No. 1, pp. 89-106.
8. 강권수, 이문수, 정진섭, 박병기 (1993) "입방체 삼축시험기척 시작", 대한토목학회학술발표논문집, pp. 442-445.
9. Ko, H.Y., and Scott, R.F. (1967). "A New Soil Testing Apparatus," Geotechnique, Vol. 17, No. 1, pp. 40-57.
10. Sutherland, H.B. and Mesdary, M.S. (1969). "The Influence of the Intermediate Principal Stress on the Strength of Sand", Proc. of the 7th International Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg. Vol. 1, Mexico, pp. 391-399.
11. Yamada, Y. and Ishihara, K. (1979). "Anisotropic Deformation Characteristics of Sand under Three Dimensional Stress Conditions", Soils and Foundations, Vol. 19, No. 2, pp. 79-94.
12. DeGroot, W., Donaghe, R. Lade. P.V. and Rochelle, P.L. (1988), "Correction of Strength for Membrane Effects in the Triaxial Test." Geotechnical Testing Journal, Vol. 11, No. 1, pp. 78-82.
13. Bowles, J.E.(1982), "Foundation Analysis and Design", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 135.
14. Lade. P.V.(1990). "Single-Hardening Model with Application to NC Clay", Journal of Geotechnical Engrg., ASCE, Vol. 116, No. 3, March, pp. 394-414.
15. Prabuoki, M.J. and Lade, P.V. (1990). "Triaxial Compression Tests on Santa Monica Beach Sand. 1" Report UCLA-ENG-91-03.
16. 남정만, 홍원표 (1993) "비틀림전단시험에 의한 모래의 응력-변형률 거동". 한국 지반공학회지 제 9권 제14호 pp. 65~81

(접수일자 1993. 10. 20)