

평면변형을 압축시험에 의한 각종 모래의 강도 · 변형특성의 이방성(I) — 강도 이방성 —

Anisotropy in Strength and Deformation Properties of a Variety of Sands by
Plane Strain Compression Tests(I)
— Strength Anisotropy —

박 춘 식*
Park, Choon-Sik

Abstract

Anisotropy in strength and deformation characteristics of isotropically consolidated sands prepared by pluviating through air was studied by plane strain compression tests. Seven types of sand of the world-wide origins were tested, which have been extensively used for research purposes. The strains for direction of maximum principal stress and direction of minimum principal stress were measured continuously from 10^{-6} to 10^{-2} .

The following results were obtained for all sands. The behaviour at strains less than about 0.001% was elastic and isotropic regardless of the angle δ of the σ_1 direction relative to the bedding plane. However, the sands became gradually more anisotropic as the strain increased to the extent exceeding the elastic limit. The peak strength was noticeably anisotropic with a similar trend. Thus, the angle of internal friction ϕ decreased as δ decreased from 90° , and the ratio of the smallest to largest values of ϕ was between 0.82 and 0.90. The ϕ has a minimum at $\delta=0^\circ\sim 30^\circ$ depending on the types of sand. The residual strength became isotropic again.

요 지

공중투하법으로 만든 등방압밀 모래공시체를 평면변형을 압축시험을 실시하여 강도 · 변형특성의 이방성을 연구하였다. 세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종류의 연구용 표준사 공시체를 최대주응력방향(σ_1)의 변형률과 최소주응력방향(σ_3)의 변형률을 각각 10^{-6} 에서 10^{-2} 까지 상세히 측정하였다.

그 결과, 실험한 모든 모래에 대하여 변형률 0.001% 이하까지의 변형률에 있어서는 최대주응력이 퇴적면과 이루는 각도 δ 에 관계없이 탄성적 · 등방적인 거동을 나타내었다. 그러나, 변형률이 증가하여 탄성한계를 넘어면 점차적으로 이방적인 성질을 띄게 되고 마침내 피크에 도달하면

* 정희원, 창원대학교 공과대학 토목공학과 조교수

최대내부마찰각 ϕ_{max} 은 δ 가 90°에서 0°로 감소함에 따라 감소하고 그 최소치와 최대치의 비는 0.82~0.90 사이에 있었다. 또, ϕ_{max} 값의 최소치는 모래의 종류에 따라 $\delta=0^\circ\sim 30^\circ$ 사이에 있었다. 그러나, 잔류상태에 도달하면 모래는 다시 등방적인 거동을 하여 ϕ 는 δ 에 크게 의존하지 않고 거의 일정한 값을 나타내었다.

Keywords : Anisotropy, Angle of internal friction, Plane strain compression, Sands

1. 서론

연구면에서의 엄밀한 수치해석에서는 퇴적면에 대한 최대주응력방향의 각도 δ 의 영향 고려, 즉 내부구조의 이방성을 정확히 고려할 필요가 있다. 다시 말해 극한평형법, 응력특성곡선법 등에 의한 지지력이론이나 유한요소법 등에 의한 수치해석법을 이용한 모형실험결과의 검토에서는 변형·강도특성의 이방성을 무시하면 불합리한 결과가 얻어진다. 또, 실제사면이나 성토의 안정해석, 변형해석을 위해서는 평면변형률 조건하에서의 해석이 필요하다. 이 경우에 있어서는 평면변형률 조건하에서의 이방성의 영향을 고려해야 한다. 이와 같은 모래의 이방성은 Oda(1972, 1978, 1981) Arthur(1972, 1977, 1988) 등의 선구적인 연구로 이미 알려져 있다.

한편, Tatsuoka 등(1986)은 정규압밀 Toyoura sand를 사용한 평면변형률 압축시험에 의해 최대내부마찰각(ϕ_{max})은 최대주응력(σ_1)과 퇴적면이 이루는 각도 δ 가 90°일 때 최대이고 δ 의 감소에 따라 ϕ_{max} 은 감소하여 $\delta=23^\circ\sim 35^\circ$ 부근에서 극소점이 생기고 다시 $\delta=0^\circ$ 까지는 ϕ_{max} 이 조금 증가한다는 것을 나타내었다. 여기에 대해 Arthur 등(1977, 1988)은 과압밀 Silver Leighton Buzzard sand(이하 SLB sand)의 Directional Shear Cell(이하 DSC)을 사용한 시험에서는 최대내부마찰각(ϕ_{max})은 $\delta=90^\circ$ 일 때 최대이고 δ 의 감소에 따라 극소점 없이 $\delta=0^\circ$ 까지 ϕ_{max} 이 연속하여 감소한다는 것을 나타내었다. 그러나, Arthur 등의 실험은 과압밀 시험(OCR≒6.5)이었다는 점, 두께 1.0mm의

두꺼운 membrane을 사용하였음에도 불구하고 membrane의 응력보정을 하지 않았다는 점, 또 주변을 모두 membrane으로 둘러 싸서 실험을 행하는 DSC로 실험을 실시하였다는 점 등 상기 Tatsuoka 등의 평면변형률 압축시험의 경우와 비교하여 시험조건이 일치하지 않다. 한편, 박 등은 정규압밀, 과압밀 SLB sand를 사용한 평면변형률 압축시험에 의해 최대내부마찰각(ϕ_{max})의 절대치는 Arthur 등의 결과와 다르지만 δ 의 ϕ_{max} 에 대한 변화의 경향은 Arthur 등의 결과와 동일하다는 것을 나타내었다(1990, 1991, 1992). 그러나 정규압밀 SLB sand의 경우는 데이터의 수가 적기 때문에($\delta=90^\circ, 25^\circ, 0^\circ$) 실제로 극소점이 없는가는 불명확하다고 할 수 있다. 만약 정규압밀 SLB sand의 평면변형률 압축시험에서 극소점이 있고 과압밀 Toyoura sand의 평면변형률 압축시험에서는 극소점이 없다면 극소점의 유무는 정규압밀모래의 특징이라고 할 수 있을 것이다. 그러나 정규압밀 SLB sand의 평면변형률 압축시험에서 극소점이 없고 과압밀 Toyoura sand의 평면변형률 압축시험에서는 극소점이 있다면 극소점의 유무는 「입경/공시체치수」 등의 영향이라고 할 수 있을 것이다.

상술한 바와 같이 극소점 유무의 문제는 별도로 하더라도 모래는 강한 강도이방성을 갖고 있다는 것은 연구자와 기술자들에게 필수불가결한 지식의 하나이다. 그러나 유감스럽게도 모래의 변형·강도특성에 관한 요소시험, 정계치문제의 주요한 논문의 대부분은 밀도, 압력 수준, 중간주응력의 상대적 크기 b 치= $(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$ 등은 고려하고 있지만 이방성의 문

제에 대해서는 거의 언급이 없는 것이 현실이다. 따라서 본 연구는 세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종류의 연구용 표준사 및 2종류의 유리구슬(glass beads)을 공중낙하법에 의해 등방압밀 공시체를 만들어 평면변형을 압축시험을 실시하여 강도·변형특성의 이방성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

이 연구에 사용한 모래의 입경가적곡선을 그림 1에, 실험장치의 전체도를 그림 2에 나타내었다. 변형률수준 10^{-6} 에서 10^{-2} 까지의 변형률을 상세히 측정하기 위하여 그림 3에 나타낸 바와 같이 공시체 측변위는 양측면에서 국소측변위 측정장치(Local Deformation Transducer: LDT)를 사용하고, 공시체 측면의 수평변위는 측방변위 측정장치(Lateral Deformation Measuring System: LDMS)를 사용하였다. 각각 중형 평면변형률 압축시험용으로 치수만을 바꾸어 새로 설계 제작하였다(상세는 문헌 (1), (3), (9)를 참조). 공시체는 높이 $H=20\text{cm}$, 폭(σ_3 방향의 길이) $W=8\text{cm}$, 길이(σ_2 방향의 길이) $L=16\text{cm}$ 로 하였고, 상하 단면과 구속판에 접하는 측면은 모래와 단면마찰 경감층의 직접전단시험결과(문헌 (4), (10) 참조)를 토대로 한 단면마찰 경감층(lubrication layer)을 사용하였다. 즉, 두께 $50\mu\text{m}$ 의 그리스 위에 두께 0.3mm 의 멤브레인을 설치하였다.

최대주응력(σ_1)과 퇴적면이 이루는 각도 δ 는 다음과 같은 방법으로 바꾸었다. 공시체의 주축방향이 수평으로부터 δ 가 되도록 그림 4에 나타낸 몰드를 장치시켜 이 몰드내에 공기 건조 상태의 시료를 일정한 높이에서 공중투하시킨다. 그 다음 시료 내부를 시료가 교란되지 않도록 동수경사를 유지하면서 물로 포화시킨 후 자연배수시킨다. 시료가 불포화상태가 되었을 때 동결시켜 평면변형률 압축시험장치에 장치한 후 부압 0.05kgf/cm^2 하에서 해동시켰다. 이때의 간극비를 $e_{0.05}$ 로 나타내었다. 공시체 상하

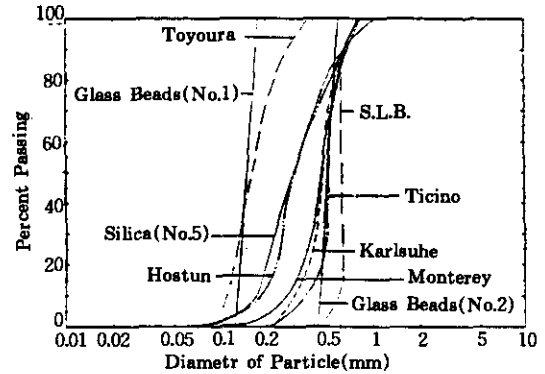


그림 1. 각 시료의 입경가적곡선

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Counter balance | 9. Pedestal |
| 2. External load cell for vertical load | 10. L.D.T. |
| 3. Dial gauge | 11. Targets for proximeters |
| 4. Bearing house for guide | 12. Confining platen |
| 5. Reaction frame | 13. Load cell for lateral force |
| 6. Inner load cell | 14. Load cell for friction |
| 7. Proximeter for axial strain | 15. Pressure cell |
| 8. Cap | 16. Loading system |

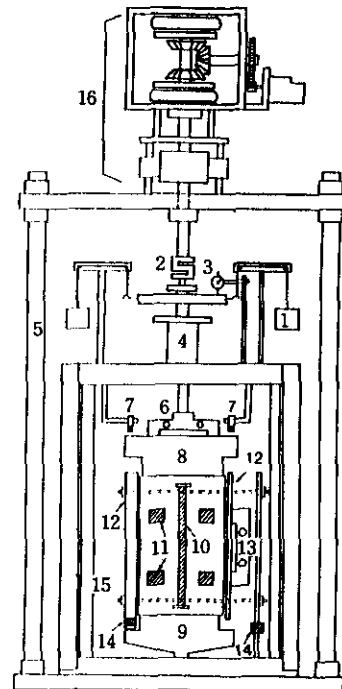


그림 2. 실험장치의 개략도

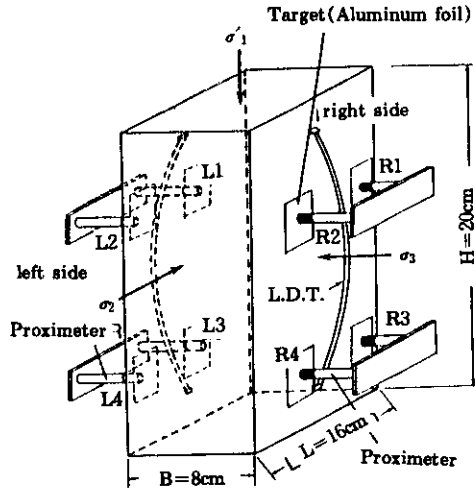


그림 3. 미소 변형 측정장치

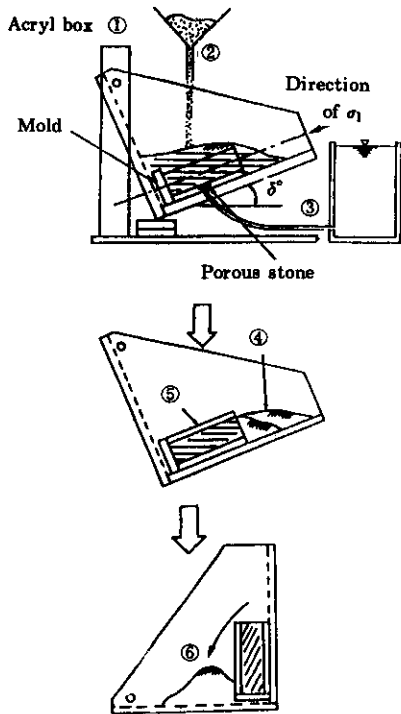


그림 4. δ 공시체의 제작과정

단에 부압차를 가하여 공시체 내부의 물을 배수시켰다. 부압을 가한 후 정규압밀시켜 LDT, 구속판, LDMS를 장치하였다. 그 후 배수상태

에서 변형률제어법(속변위 0.25mm/min)으로 공시체를 전단하였다.

공시체내에 전단층이 발생하면 LDMS로는 공시체의 평균 측방변형률을 정확히 구할 수가 없기 때문에 파괴후의 어떤 변형률수준 이상이 되면 체적변형률 ϵ_v 치는 일정하다고 가정하여 최소주응력방향의 변형률 ϵ_3 를 역산하였다.

3. 강도특성 및 ϕ 의 이방성

구속압 (σ_3)=0.80kgf/cm² 하에서의 정규압밀 Toyoura sand와 SLB sand 공시체를 최대 주응력 (σ_1)과 퇴적면이 이루는 각도 (δ)를 바꾸어 제작한 시료에 대하여 평면변형률 압축시험을 실시하여 응력 변형률 관계로 나타낸 것이 그림 5, 그림 6이다. 또 구속압(σ_3)=0.15kgf/cm² 하에서 시행한 과압밀 공시체의 응력 변형률 관계를 그림 7, 그림 8에 나타내었다. 이것으로부터 거의 같은 밀도조건임에도 불구하고 δ 의 차이에 따라 최대주응력비 (σ_1/σ_3)_{max}가 크게 다름을 알 수 있다. 즉, $\delta=90^\circ$ 일 때가 (σ_1/σ_3)_{max}이 최대이고 (σ_1/σ_3)_{max}도 명확하게 나타났으며 파괴 후의 주응력비의 저하도 현저하였다. 그리고 δ 가 작아짐에 따라 $\delta=90^\circ$ 일 때와 비교하여 (σ_1/σ_3)_{max}이 그다지 명확하지 않음을 알 수 있다. 이상과 같은 경향은 과압밀공시체에서도 정규압밀공시체와 거의 동일하게 나타났다.

그러나 (σ_1/σ_3)_{max}의 δ 에 대한 변화의 경향은 SLB sand의 경우 δ 가 작아짐에 따라 (σ_1/σ_3)_{max}은 작아지는데 반하여 Toyoura sand의 경우는 $\delta=20^\circ\sim 30^\circ$ 까지는 δ 의 감소에 따라 (σ_1/σ_3)_{max}이 작아지지만 $\delta=0^\circ$ 인 경우에는 (σ_1/σ_3)_{max}이 조금 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 ϕ 의 δ 에 대한 변화의 경향을 상세히 조사하기 위하여 Toyoura sand와 SLB sand의 최대내부마찰각 $\phi_{max} = \arcsin\{(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)\}_{max}$ 과 δ 와의 관계를 나타낸 것이 그림 9이다. 이것으로부터

Toyoura sand의 경우는 과압밀과 정규압밀에 관계없이 최대내부마찰각(ϕ_{max})은 $\delta=90^\circ$ 일 때가 최대이고 δ 의 감소에 따라 ϕ_{max} 은 감소하여 $\delta=20^\circ\sim 30^\circ$ 부근에서 극소점이 생기고 $\delta=0^\circ$ 까지는 ϕ_{max} 이 약간 증가한다. 여기에 대해 SLB sand는 과압밀과 정규압밀에 관계없이 이러한 극소점이 없다. 한편, $\phi(\delta)$ 를 $\delta=90^\circ$ 일 때의 ϕ_{max} 에 대해 정규화하여 δ 와의 관계로 나타낸 것이 그림 10이다.

또 그림 11은 Toyoura sand의 소형평면변형률 압축시험의 결과(Tatsuoka et al. 1986)를 포함하여 Toyoura sand의 정규화한 ϕ 와 δ 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 11을 보면 본 연구의 중형평면변형률 압축시험($H \times L \times B = 20 \times 16 \times 8 \text{cm}$)의 경우가 소형평면변형률 압축시험($H \times L \times B = 10.5 \times 8 \times 4 \text{cm}$)의 경우보다 강도이방성의 정도가 약간 작지만 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 실험방법의 차이에 의한 영향이 거의 없다고 할 수 있다. 한편, 그림 10을 보면 SLB sand의 경우 과압밀비에 의한 강도이방성의 정도는 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 여기에 반해 Toyoura sand의 경우는 과압밀공시체가 정규압밀공시체보다 강도이방성의 정도가 약간 크다. 이것으로부터 과압밀의 경우가 정규압밀의 경우보다 강도이방성의 정도가 작다고는 할 수 없다. 즉 그림 10에 나타난 데이터로부터 판단하면 매우 큰 등방압력으로 과압밀이력을 가하지 않는 한 모래의 ϕ_{max} 에 관한 이방성의 영향을 소거할 수는 없을 것이라고 사료된다. 따라서 Arthur 등의 DSC에 의한 실험과 Tatsuoka 등의 평면변형률 압축시험에 의한 극소점의 유무에 관한 차이의 원인은 압밀이력의 상이함에 의한 것이 아니라 모래의 입경, 형상 등 물리적성질이 다르기 때문이라고 결론지을 수 있을 것이다.

이러한 모래의 입경, 형상 등 물리적성질이 극소점의 유무에 어떻게 영향을 미치는지에 대해 조사하기 위하여 다양한 모래(일본의 5호규사, 독일의 Karlsruhe sand, 미국의 Monterey sand, 이탈리아의 Ticino sand, 프랑스의 Hos-

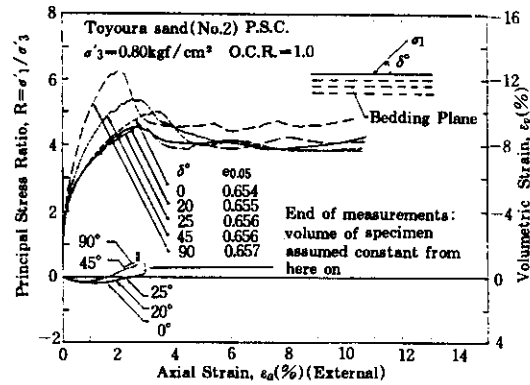


그림 5. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Toyoura sand)

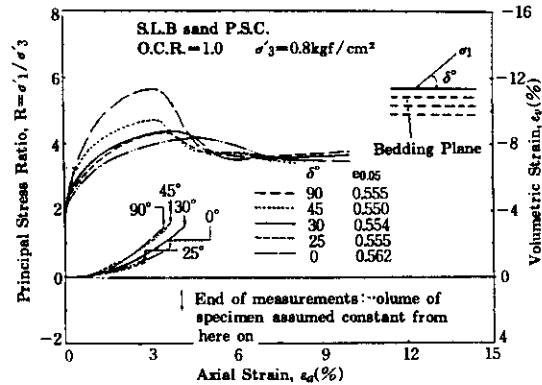


그림 6. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 SLB sand)

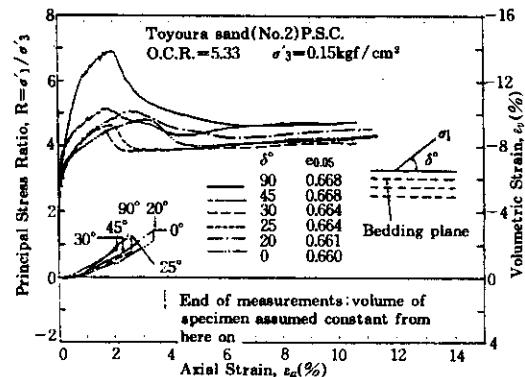


그림 7. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (과압밀 Toyoursand)

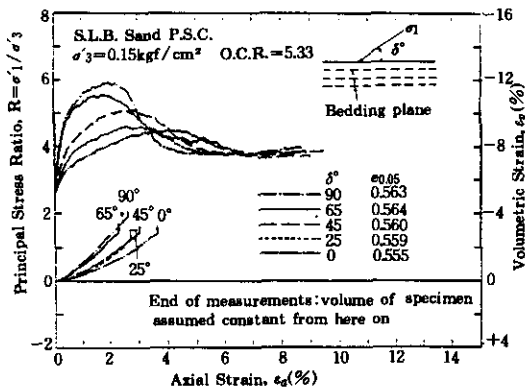


그림 8. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (과압밀 SLB sand)

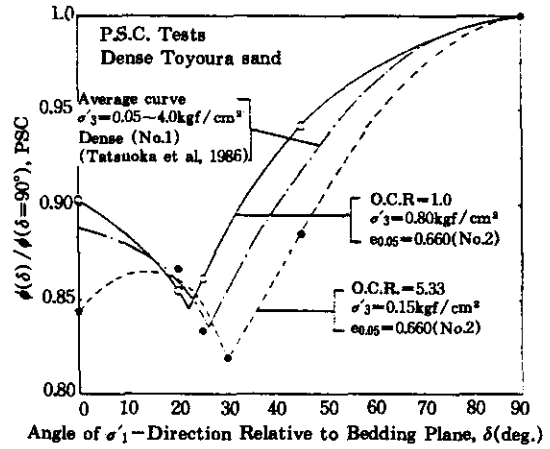


그림 11. 정규화한 δ 와 ϕ 의 관계 (Toyoura sand)

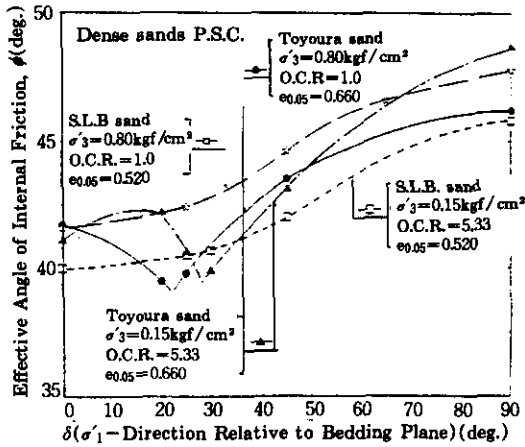


그림 9. δ 에 대한 ϕ 의 관계 (Toyoura sand, SLB sand)

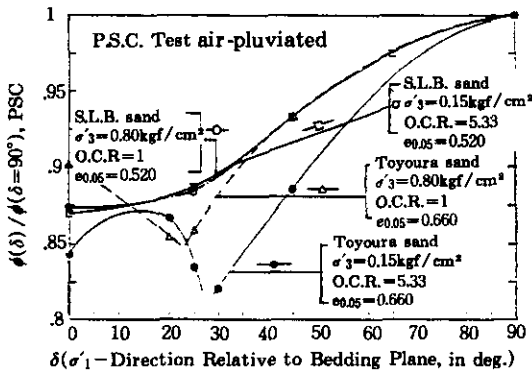


그림 10. 정규화한 δ 와 ϕ 의 관계 (Toyoura sand, SLB sand)

tun sand)와 입자가 완전히 구형인 Glass beads(No.1), Glass beads(No.2)의 정규압밀 공시체를 사용하여 구속압=0.80kgf/cm² 하에서 δ 를 바꾸어 평면변형률 압축시험을 실시하여 응력 변형률 관계로 나타낸 것이 그림 12~그림 18이다. 이 그림들을 보면 Toyoura sand와 SLB sand의 결과와 마찬가지로 거의 같은 밀도조건임에도 불구하고 δ 의 차이에 따라 최대주응력비 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 가 크게 차이를 알 수 있다. 또 이렇게 입경, 입자형상 등이 다른 입상체들임에도 불구하고 공통적으로 강한 강도이방성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이 ϕ 의 δ 에 대한 변화의 경향을 상세히 조사하기 위하여 각 공시체의 최대내부마찰각 ϕ_{max} 과 δ 와의 관계를 정리한 것이 그림 19, 그림 20이고 다시 $\phi(\delta)/\phi(\delta=90^\circ)$ 로 정규화하여 δ 에 대해 정리한 것이 그림 21이다. 또 그림 22는 불포화상태의 시료를 다짐하여 제작한 느슨한 Onahama sand (Dong et al.)와 수중에서 2차 퇴적된 불포화 Shirasu(Tatsuoka et al.)의 데이터가, 그림 23은 Tochigi sand와 Glass beads의 데이터(Oda)가 나타나 있다. 그림 21~23에 나타난 데이터를 종합하여 보면 강도이방성의 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 특히 입자의 형상이 완전히 구형인 Glass beads라도 다른

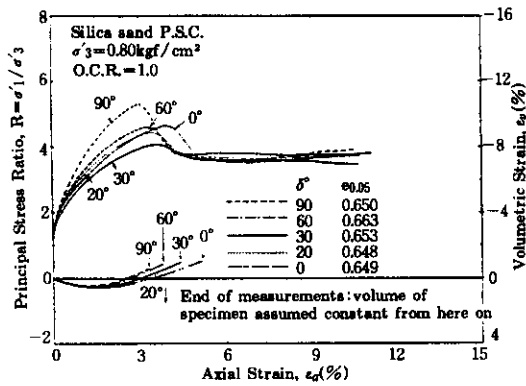


그림 12. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Silica sand)

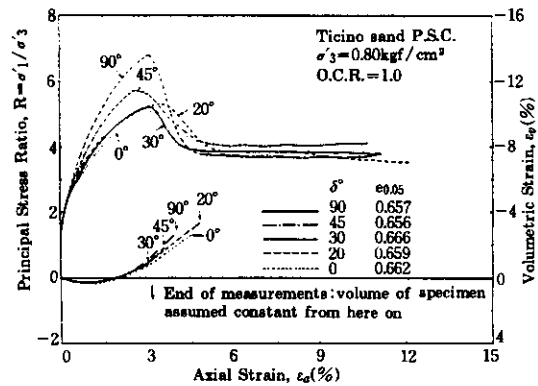


그림 15. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Ticino sand)

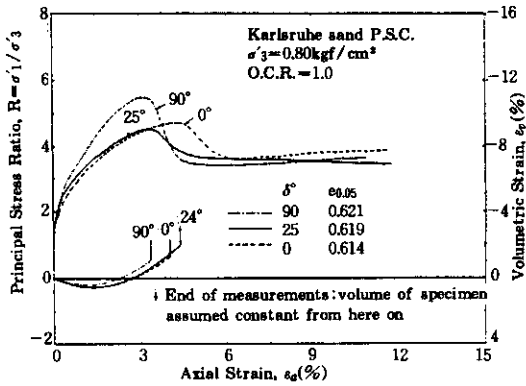


그림 13. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Karlsruhe sand)

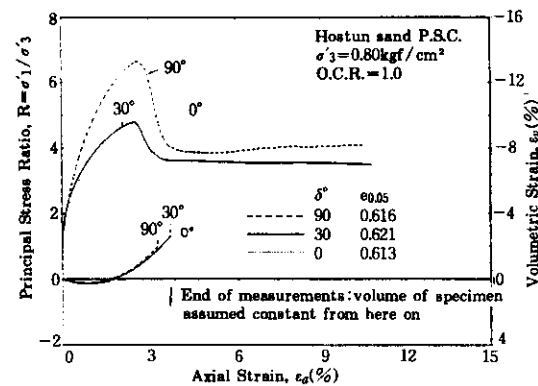


그림 16. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Hostun sand)

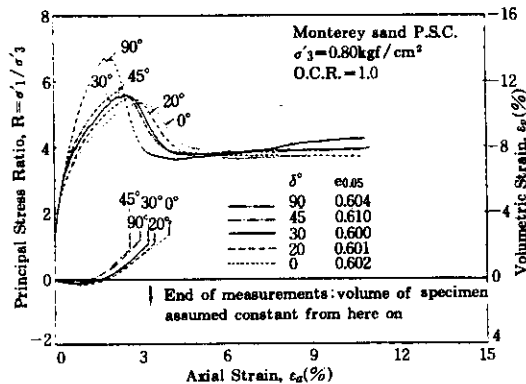


그림 14. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Monterey sand)

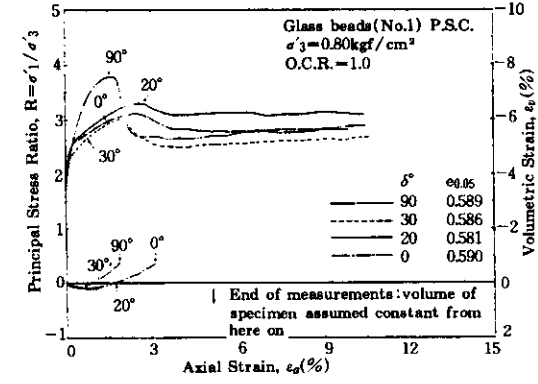


그림 17. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Glass beads No.1)

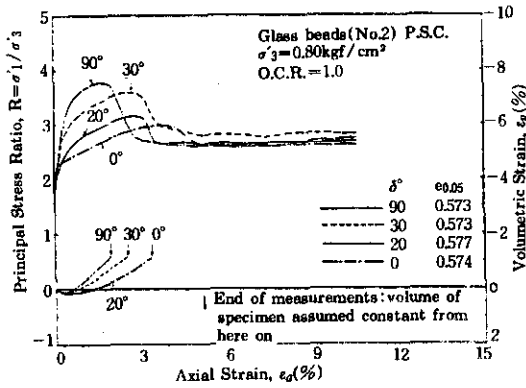


그림 18. δ 에 대한 응력-변형률 관계 (정규압밀 Glass beads No.2)

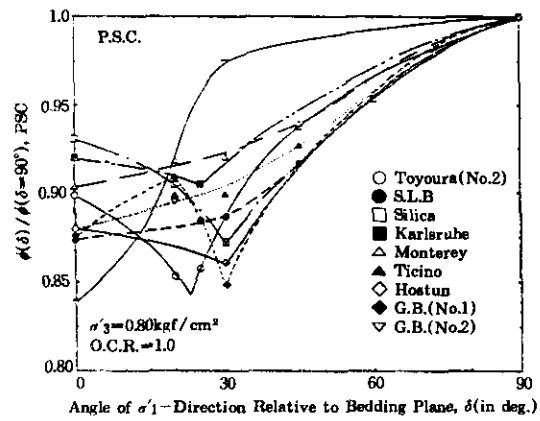


그림 21. 정규화한 δ 와 ϕ 와의 관계

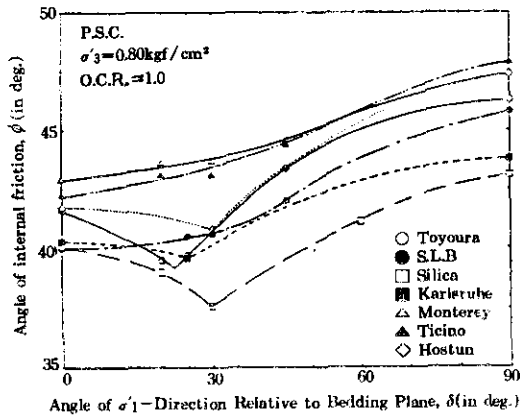


그림 19. δ 에 대한 ϕ 의 관계 (각종 모래의 정규압밀공시체)

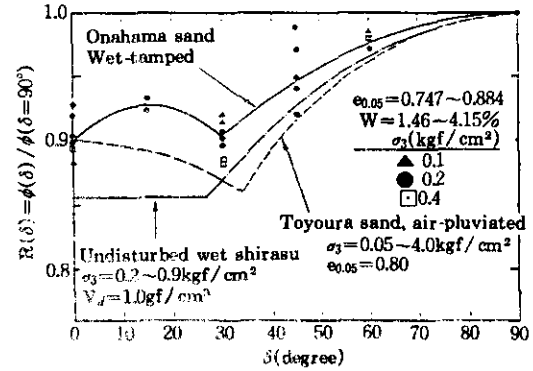


그림 22. 정규화한 δ 와 ϕ 와의 관계 (Onahama, Shirasu sand)

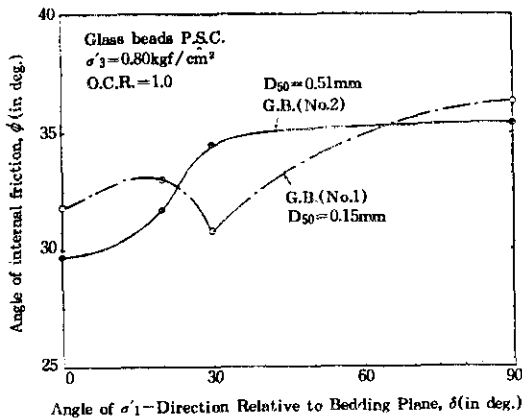


그림 20. δ 에 대한 ϕ 의 관계 (Glass beads)

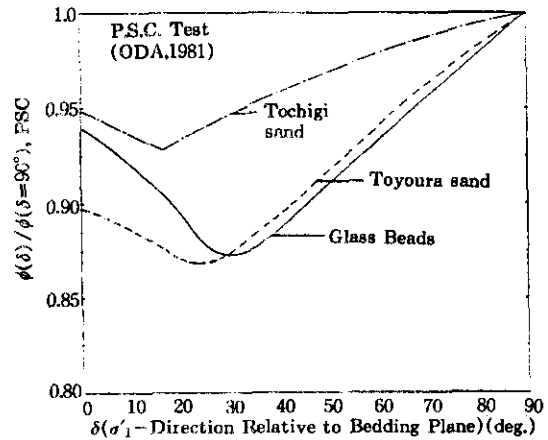


그림 23. 정규화한 δ 와 ϕ 와의 관계 (Tochigi sand, Glass beads)

모래와 거의 동일하게 강한 강도이방성을 갖고 있다는 사실이 놀랍다. 이러한 사실은 강도이방성의 제일의 원인은 입자의 형상이 아니라 중력하에서 퇴적될 때 형성된 입자의 접점방향이 이방적 분포라는 것을 나타내고 있다. 즉, 중력하에서 퇴적된 모든 입상체는 이방적 초기 구조를 갖고 있다는 것을 시사하고 있다.

다음으로 강도이방성의 경향을 상세하게 살펴 보면, δ 가 90°에서 감소함에 따라 ϕ_{max} 은 감소하고 $\delta=30^\circ$ 부근까지 저하율이 크다. 그때의 $\phi(\delta)$ 는 $\phi(\delta=90^\circ)$ 의 90~85% 정도이다. 이 δ 의 각도는 퇴적면이 응력의 최대경각면과 일치한 경우(퇴적면이 최대주응력방향으로 부터 $45^\circ - \frac{\phi}{2}$ 의 각도를 이루는 경우)에 대응한다. δ 가 30°부근에서 감소하면 ϕ 가 증가하는 경우(Toyoura sand, Onahama sand, Silica sand, Tochigi sand, Karlsruhe sand, Hostun sand, Glass beads(No.1))와 감소하는 경우(SLB sand, Monterey sand, Ticino sand, Glass beads(No. 2))가 있음을 알 수 있다. 또 Shirasu의 경우는 데이터의 흠여짐이 비교적 크기 때문에 단정지어 말할 수 없지만 극소점 같은 점이 있다고 할 수 있다. 이 ϕ_{max} 의 극소점 유무는

- ① Shirasu는 Toyoura sand 등에 비해 입자가 훨씬 편평한 모래임에도 불구하고 극소점이 $\delta=30^\circ$ 부근에서 나타났지만 다른 모래와 비교하여 확실하게 나타나지 않았다는 점.
- ② 모래의 입자형상이 극소점의 유무에 그다지 영향을 미치지 못한다는 점.
- ③ Glass beads(No. 1)의 경우는 $\delta=30^\circ$ 부근에서 극소점이 나타났는데 반하여 입자의 형상이 동일한 Glass beads(No. 2)의 경우는 ϕ_{max} 이 극소점 없이 $\delta=90^\circ$ 에서 $\delta=0^\circ$ 까 지 감소한다는 점.

등으로부터 입자의 형상에는 명확한 영향을 받지 않는다고 사료된다.

한편, SLB sand 등과 같이 극소점이 없는

입상체군은 Toyoura sand 등과 같이 $\delta=30^\circ$ 부근에서 극소점이 나타나는 입상체군과 비교하여 평균입경 D_{50} 이 크다(Karlsruhe sand는 제외하고)는 점. 입자의 형상이 동일한 Glass

표 1. 파괴시의 축변형률(ϵ_1)_r값

SAND	$\delta(^{\circ})$	(ϵ_1) _r 값 %
TOYOURA	90	2.1
	45	2.6
	25	2.7
	20	2.5
	0	3.4
SLB	90	3.0
	45	3.2
	30	3.9
	25	3.1
	0	4.7
SILICA	90	3.0
	60	3.3
	30	3.7
	20	3.4
	0	4.0
KARLSRUHE	90	3.1
	25	3.3
	0	4.2
MONTEREY	90	1.8
	45	2.2
	30	2.5
	20	2.7
	0	3.0
TICINO	90	3.1
	45	2.7
	30	3.1
	20	3.5
	0	3.3
HOSTUN	90	2.6
	30	2.5
	0	3.5

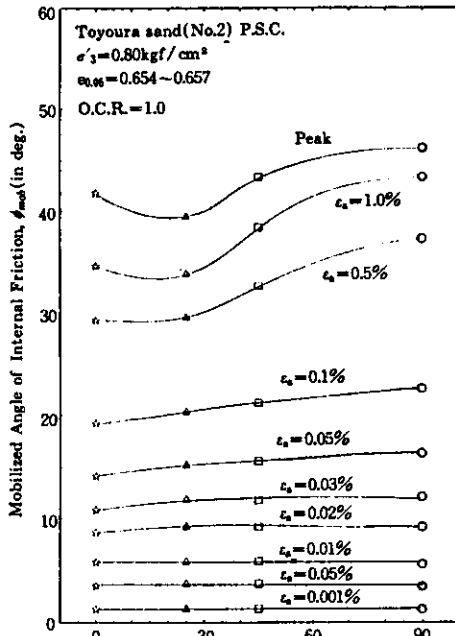


그림 24. δ 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 의 관계 (Toyoura sand)

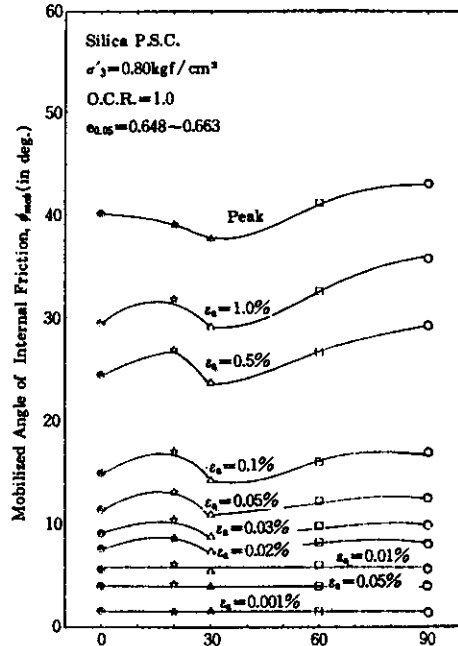


그림 26. δ 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 의 관계 (Silica sand)

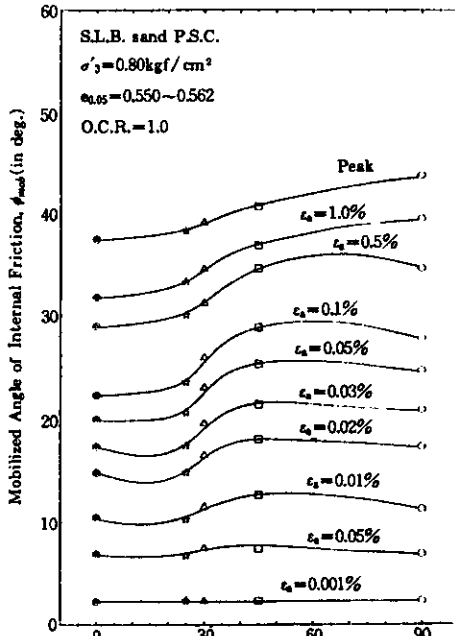


그림 25. δ 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 의 관계 (S.L.B sand)

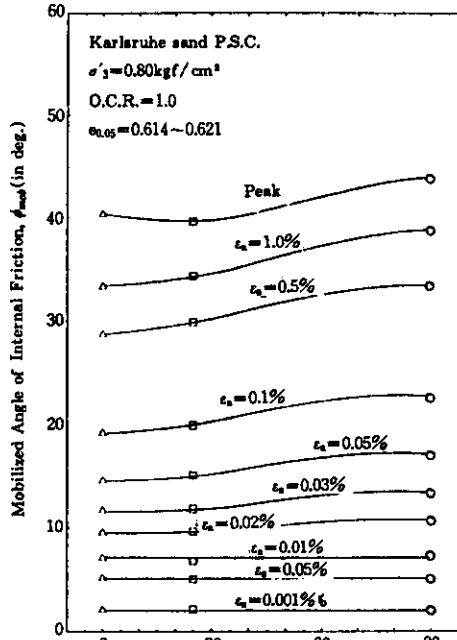
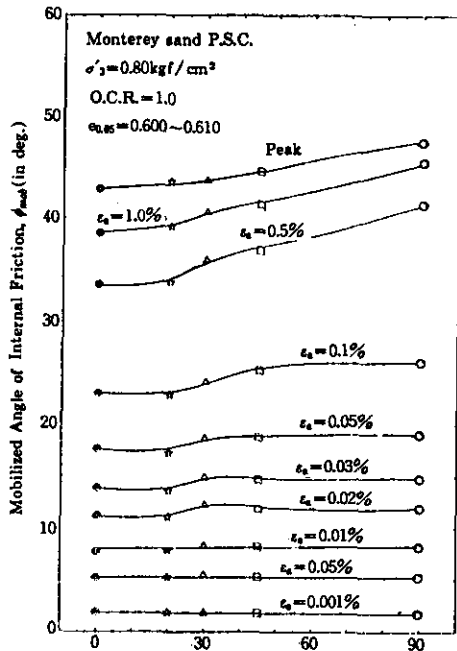
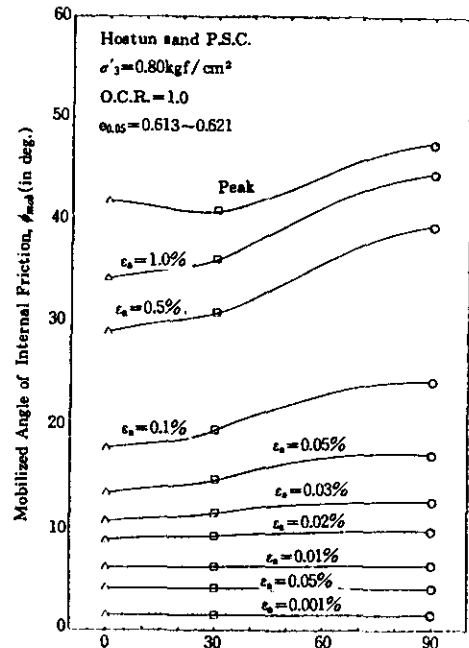


그림 27. δ 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 의 관계 (Karlsruhe sand)



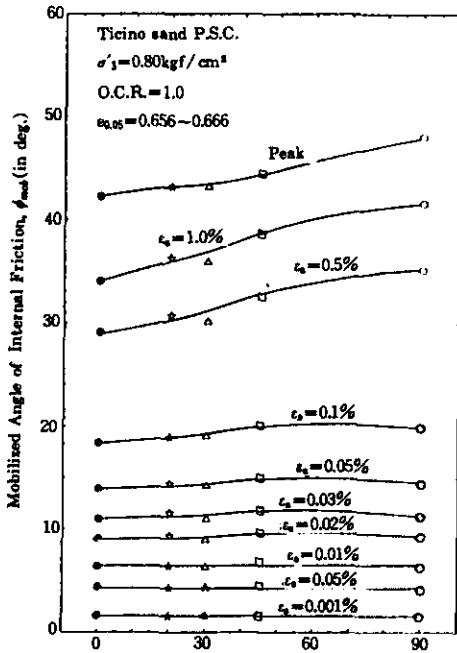
Angle of σ'_1 -Direction Relative to Bedding Plane, δ (in deg.)

그림 28. δ 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 의 관계 (Monterey sand)



Angle of σ'_1 -Direction Relative to Bedding Plane, δ (in deg.)

그림 30. δ 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 의 관계 (Hostun sand)



Angle of σ'_1 -Direction Relative to Bedding Plane, δ (in deg.)

그림 29. δ 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 의 관계 (Ticino sand)

beads 라도 입자의 크기에 따라 극소점의 유무가 생긴다는 점 등으로부터 이 극소점의 유무는 입자의 크기에 영향을 받을 가능성이 있다고 생각된다.

그림 24~30은 각 시료에 대한 축변형률 ϵ_s 에 대한 동원된 내부마찰각 ϕ_{mob} 를 δ 에 대하여 표시한 것이다. 파괴시의 축변형률(ϵ_s), 값은 표 1에 나타내었다. 이 그림들을 보면 이방성이 나타나는 경계점은 $\epsilon_s=0.01\%$ 이하인 것을 알 수 있다. 이러한 점들로부터 파괴시까지는 이방성이 명확하게 나타난다. 그러나 이방성이 나타나기 시작하는 시점에서 파괴까지의 이방성의 경향은 반드시 파괴시의 그것과 일치하고 있다고 말할 수 없다. 예를 들면 Toyoura sand(그림 24)의 경우 파괴강도(ϕ)는 $\delta=25^\circ$ 에서 극소점이 있는데 반하여 $\epsilon_s=0.5\%$ 까지의 ϕ_{mob} 에는 이러한 극소점이 확실히 보이지 않는다. 즉, 모래의 종류에 따라 파괴 이전에 극소점이 나타

나기도 하고 나타나지 않기도 하면서 최종적으로는 모래 고유의 강도이방성을 나타낸다. 그러나 그림 5~8, 그림 12~18을 보면 알 수 있듯이 이러한 이방성은 파괴시에 이르러 극한치에 달하다가 잔류상태에 도달하면 다시 등방적인 거동을 하여 ϕ 는 δ 에 크게 의존하지 않고 거의 일정한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

4. 변형특성

그림 5~8, 그림 12~18을 보면 각각의 경우에서 거의 같은 밀도, 같은 구속압 조건임에도 불구하고 δ 에 의해 파괴시의 축변형률(ϵ_1)이 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실을 보다 더 명확하게 나타내기 위하여 그림 31에 Toyoura sand 와 SLB sand의 정규압밀 공시체와 과압밀 공시체에 있어서 δ 와 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 일 때의 $(\epsilon_1)_r$ 와의 관계를 나타내었다. 또 그림 32에 각 시료의 정규압밀 공시체에 있어서 δ 와 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 일 때의 $(\epsilon_1)_r$ 와의 관계를 나타내었다. 이러한 그림들을 살펴보면 $\delta=90^\circ$ 에서 $\delta=30^\circ$ 까지는 δ 의 저하에 따라 $(\epsilon_1)_r$ 가 완만하게 증가하든지 약간 저하한다(과압밀 Toyoura sand, Ticino sand, Hostun sand). 그러나, $\delta=30^\circ \sim 20^\circ$ 에서 δ 가 0° 에 가까울수록 Ticino sand와 Glass beads(No.1)를 제외하고 $(\epsilon_1)_r$ 가 급격하게 증대하고 있다. $\delta=0^\circ$ 와 $\delta=30^\circ \sim 20^\circ$ 의 경우 최대주응력비 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 값은 거의 동일하든지 (SLB sand 등) $\delta=0^\circ$ 의 경우가 $\delta=30^\circ \sim 20^\circ$ 의 경우보다 크다(Toyoura sand 등). 그럼에도 불구하고 $(\epsilon_1)_r$ 가 $\delta=0^\circ$ 일 때의 경우보다 큰 것은 모순된다고 생각할 수 있으나 이것은 약 $\delta=30^\circ \sim 20^\circ$ 부근에서 파괴면과 퇴적면이 이루는 방향이 거의 일치하기 때문에 변형이 전단면(shear band)에 집중하는 경향이 강하기 때문이라고 생각된다. 즉, $\delta=30^\circ \sim 20^\circ$ 경우 축변형률 ϵ_1 이 보다 작은 단계에서 전단면내에서의 전단변형은 발전하여 보다 작은 평균변형률 ϵ_1 에서 파괴에 이르기 때문이라고 사료된다. 한편,

$\delta=0^\circ$ 의 경우는 퇴적면이 수평방향에 대하여 90° 이기 때문에 σ_1 축에 대하여 좌우대칭한 변형이 생기기 쉽고 이 때문에 $\delta=30^\circ \sim 20^\circ$ 의 경우보다도 공시체는 변형이 보다 더 일률적으로 되고 공시체 파괴시의 평균축변형률 ϵ_1 도 크게 된다고 생각된다.

체적변화특성에는 이상과 같이 기술한 이방성이 반영되어 있다. 즉, stress-dilatancy 관계

$$\sigma_1/\sigma_3 = K(1 - \frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_1})$$

의 계수 K는 δ 가 클수록 약

간 크다(Lam and Tatsuoka⁽¹¹⁾). 그럼에도 불구하고 동일한 ϵ_1 에 대해 응력비 σ_1/σ_3 는 δ 가

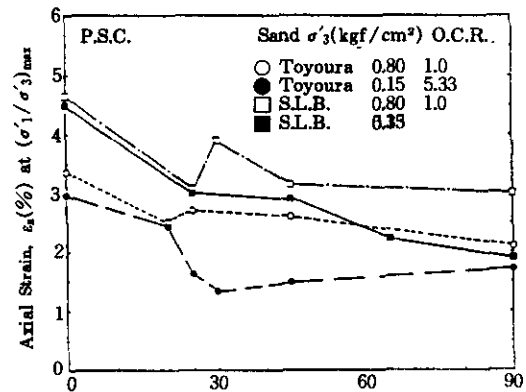


그림 31. δ 와 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 일 때의 $(\epsilon_1)_r$ 와의 관계 (Toyouura sand, SLB sand)

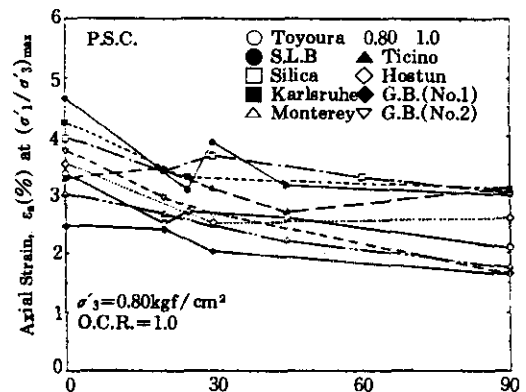


그림 32. δ 와 $(\sigma_1/\sigma_3)_{max}$ 일 때의 $(\epsilon_1)_r$ 와의 관계(각시료)

클수록 크다는 것으로부터 $\sigma_1/\sigma_3 < K$ 일 때의 수축을 $d\varepsilon_v = \{1 - (\sigma_1/\sigma_3)/K\} \cdot d\varepsilon_1 > 0$ 는 δ 가 클수록 작고, $\sigma_1/\sigma_3 > K$ 일 때의 체적팽창을 $-d\varepsilon_v = \{(\sigma_1/\sigma_3)/K - 1\} \cdot d\varepsilon_1 > 0$ 는 δ 가 클수록 크다.

5. 결론

1. 중력하에서 퇴적된 모든 입상체는 이방적 초기구조를 갖는다.
2. δ 에 대한 ϕ_{max} 의 극소점 유무는 과압밀이력, 입자의 형상에 관계없이 입자 특성에 의해 나타나는 현상이라고 생각되어지며, 일반적으로 입자가 작을수록 극소점이 나타나기 쉽다.
3. 실험한 모든 입상체에 대하여 0.001% 이하까지의 변형률에 있어서는 최대주응력 σ_1 이 퇴적면과 이루는 각도 δ 에 관계없이 탄성적·등방적인 거동을 나타내었다. 그러나, 변형률이 증가하여 탄성한계를 넘어면 점차적으로 이방적인 성질을 띄게 되고, 이러한 이방성은 파괴시에 이르러 극한치에 달하다가 잔류상태에 도달하면 다시 등방적인 거동을 하여 ϕ 는 δ 에 크게 의존하지 않고 거의 일정한 값을 나타내었다.
4. 파괴시의 내부마찰각 ϕ_{max} 은 δ 가 90° 에서 0° 로 감소함에 따라 감소하고 그 최소치와 최대치의 비는 0.82~0.90 사이에 있다. 또, ϕ_{max} 값의 최소치는 모래의 종류에 따라 $\delta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 사이에 있다.

참고 문헌

1. 박 춘식, 龍岡文夫, 장정옥, 정진교(1994), "평면 변형률 압축상태에서의 모래의 미소 변형률 측정", 「한국지반공학회지」, 제10권 제1호, pp. 27~45.
2. 朴 春植(1990), "平面ひずみ壓縮状態での砂の變形強度特性の異方性", 日本 東京大學 大學院

修士論文.

3. 朴 春植, 澁谷 啓, 董 軍, 龍岡文夫, 安部文洋(1990), "平面ひずみ壓縮試験での微小ひずみ測定," 新しい調査・計測技術に関するシンポジウム, 日本土質工學會.
4. 朴 春植, 後藤 聰, 龍岡文夫(1992), "砂と礫の室内せん断試験における断面摩擦軽減," 生産研究, Vol.44, No.5, pp. 14~18.
5. Arthur, J.R.F. and Menzies, B.K.(1972), "Inherent Anisotropy in a Sand", Geotechnique, Vol.22, No.1, pp.115~128.
6. Arthur, J.R.F., Chua, K.S. and Dunstan, T. (1977), "Induced Anisotropy in a Sand", Geotechnique, Vol.27, No.1, pp.13~30.
7. Arthur, J.R.F. and Dunstan, T.(1988), "The Engineering Application of Direct and Simple Shear Testing", Geotechnique, Vol.38, No.4, pp.651~662.
8. Dong, J., Tatsuoka, F., Tamura, C. and Sato, T.(1990), "Anisotropic Deformation and Strength Properties of Wet-tamped sand in Plane Strain Compression at low pressures-Strength Anisotropy-", 「SEISAN-KENKYU」, Vol.42, No.11, pp. 33~36.
9. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y. S. and Sato, T. (1991), "A Simple Gauge for Local Small Strain Measurements in the Laboratory," Soils and Foundations, Vol.31, No.1, pp. 169-180.
10. Goto, S., Park, C.S., Tatsuoka, F. and Molenkamp, F.(1993), "Quality of Lubrication Layer Used in Element Tests on Granular Materials," Soils and Foundations, Vol.33, No.2, pp. 47~59.
11. 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, 1, pp. 89~106.
12. Oda, M.(1972), "Initial Fabrics and their Relations to Mechanical Properties of Granular Material", Soils and Foundations, Vol. 12, No.1, pp.17~36.
13. Oda, M., Koishikawa, I. and Higuchi, T.

- (1978), "Experimental Study on Anisotropic Shear Strength of Sand by Plane Strain Test", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.1, pp.25~38.
14. Oda, M.(1981), "Anisotropic Strength of Cohesionless Sands", *Journal of GE Div., Proc. of ASCE*, 107~GT9, pp.1219~1231.
 15. Ogunbekun, O.O.O.(1988), "The Influence of Boundary Constraints on the Shearing Characteristics of Particulate Solids at Extremely Low Stress Levels," Doctoral Thesis, University College London.
 16. Park, C.S., Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1990), "Strength and Deformation Anisotropy of Dense Silver Leighton Buzzard Sand in Plane Strain Compression", 「SEIS-AN-KENKYU」, Vol.42, No.10, pp. 586~589.
 17. Park, C.S., Shinmei, S., Tatsuoka, F. and Shibuya, S.(1990), "Anisotropy in Deformation and Strength of Silver Leighton Buzzard Sand by Plane Strain Compression Tests", 「Proceedings of 25th Annual Meeting of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering」, Okayama, Japan
 18. Park, C.S., Takeda, E., and Tatsuoka, F. (1991), "Anisotropy in Strength and Deformation of Sand by Plane Strain Compression Tests", 「Proceedings of 26th Annual Meeting of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering」, Nagano, Japan
 19. Park, C.S., Sakata, J. and Tatsuoka, F. (1992), "Anisotropy in Strength and Deformation Characteristics of Dense Sands in Plane Strain Compression", 「Proceedings of 27th Annual Meeting of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering」, Kouchi, Japan
 20. Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S.(1986), "Strength and Deformation Characteristics of Sand in Plane Strain Compression at Extremely Low Pressures," *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp. 65~84.

(접수일자 1997. 1. 31)