

평면변형률압축시험에 의한 각종 모래의
강도 · 변형특성의 이방성(Ⅲ)
—전단변형 특성—

Anisotropy in Strength and Deformation Properties of
a Variety of Sands by Plane Strain Compression Tests(Part Ⅲ)
—Shear Deformation Characteristics—

박 춘 식*¹ Park, Choon-Sik
황 성 춘*² Hwang, Seong-Choon
장 정 욱*³ Jang, Jeong-Wook

Abstract

Anisotropy of stiffness, from extremely small strains to post-failure strains, of isotropically consolidated air-pluviated sands in plane strain compression was studied by using the newly developed instrumentation for small strain measurements. Seven types of sand of the world-wide origins were tested, which have been extensively used for research purposes. Stress-strain relationships for a wide range of strain from about 0.0001% to 10% were obtained with measuring axial and lateral strains locally free from the effects of bedding and membrane penetration errors at the specimen boundaries.

It was found that the maximum shear modulus G_{max} was irrespective of the angle δ of the σ_1 direction relative to the bedding plane. However, the normalized G_{max} was varied with the types of sand. Furthermore, the dependency of the strain and stress level on the stiffness increased as δ decreased.

요 지

공중낙하법에 의해 만든 등방압밀 모래공시체를 미소변형률 측정장치를 사용한 평면변형률압축시험을 실시하여 미소 변형률에서 파괴후까지의 전단강성계수에 대한 이방성을 연구하였다. 세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종 류의 연구용 표준사 공시체를 멤브레인의 관입에 의한 오차와 변위를 외부에서 측정함으로써 생기는 오차(bedding error) 등의 영향을 제거하여 측정된 최대주응력방향의 변형률과 최소주응력방향의 변형률을 각각 0.0001%에서 10%까지 넓은 범위에 걸친 응력-변형률 관계를 얻었다. 그 결과 최대전단강성계수 G_{max} 는 퇴적면과 최대주응력 σ_1 이 이루는 각도 δ 에 관계없이 일정하였다. 그러나 정규화한 G_{max} 는 모래의 종류에 따라 달랐다. 또 전단강성계수의 변형률 수준과 응력 수준에 대한 의존성은 δ 가 감소함에 따라 증가하였다.

keywords : Small strain, Stress-strain relationship, Shear modulus, Anisotropy, Sands, Plane strain compression

*1 정회원, 창원대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*2 정회원, 경주대학교 공과대학 건설환경시스템공학부 전임강사

*3 정회원, 청주대학교 공과대학 자원공학과 조교수

1. 서론

토질역학 및 암반역학은 지금까지 재료가 역학적으로 등방이라는 전제하에서 발전하여 왔다. 그러나 최근 20여 년간의 흙과 암반에 관한 연구에 의하면 이러한 등방의 전제가 흙과 암반의 실체를 이상화하는데 적합하다기 보다는 오히려 역학적인 해석을 용이하게 하기 위하여 편의적으로 가정하였다는 것에 불과하다는 것을 알았다. 특히 최근의 수치해석법의 비약적인 발전을 고려하면 퇴적면에 대한 최대주응력방향의 각도 δ 의 영향 고려, 즉 내부구조의 이방성 등 재료 본래의 성질에 관심이 높아 보다 더 높은 정도의 역학적 파라메타가 연구면에서는 물론 실무면에서도 요구된다고 할 수 있다. 다시 말해 극한평형법, 응력특성곡선법 등에 의한 지지력 이론이나 유한요소법 등에 의한 수치해석법을 이용한 모형실험 결과의 검토에서는 변형·강도특성의 이방성을 무시하면 불합리한 결과가 얻어진다. 또, 실체사면이나 성토의 안정해석, 변형해석을 위해서는 평면변형률 조건하에서의 해석이 필요하다. 이 경우에 있어서는 평면변형률 조건하에서의 이방성의 영향을 고려해야 한다.

중력하에서 자연적으로 퇴적된 거의 모든 입상체와 다짐한 입상체의 강도는 보편적으로 강한 강도이방성을 갖고 있고, 그 경향은 매우 광범위한 조건하에서는 매우 공통적이라고 하는 지식은 Oda(1972, 1978, 1981), Arthur(1972, 1977, 1988) 등의 선구적인 연구와 Lam(1988), Tatsuoka(1986), 박(1990a, 1990b, 1991, 1992) 등의 연구로 이미 널리 알려져 있다. 한편, 모래의 전단강성계수에 미치는 요인으로서의 밀도, 구속압, 변형률의 크기 등을 들 수 있다. 그러나 여기에 이방성의 영향도 고려하지 않으면 안된다. 하지만 이러한 입상체의 변형특성의 이방성이 전단 직후부터 나타나는지 아니면 어느 변형률수준에서 나타나는지에 관한 연구는 지금까지의 토질공학 분야의 연구 역사중에서 Silver Leighton Buzzard 모래(이하 SLB 모래)의 결과(박, 1991, 1992) 이외는 거의 없는 실정이다. 또 이방성이 활선강성계수 E_{sec} 및 전단강성계수 G_{sec} 에 미치는 영향에 관한 연구도 지금까지 거의 없는 상태이다. 이러한 이유는 미소변형률 수준에서부터 파괴강도까지의 일관된 응력·변형률관계가 연속적으로 구해져야 하고, 또 단조재하와 반복재하의 실험이 동시에 가능한 변형률 측정장치가 개발되지 않았기 때문이라고 생각한다.

박(1991, 1992)은 과압밀, 정규압밀 SLB 모래를 사용한

단조재하 평면변형률압축시험을 실시하여 미소변형률 수준에서의 최대전단강성계수 G_{max} 에 대한 이방성의 영향을 연구한 결과, σ_2 방향이 퇴적면에 평행할 때 δ 에 관계없이 G_{max} 은 거의 동일하다는 것을 나타내었다. 그러나 이러한 결과는 SLB 모래 한가지 종류에 국한된 결과로 다른 모래에도 적용가능한가는 아직 의문이 남아 있다. 따라서 본 연구는 세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종류의 연구용 표준사 및 2종류의 유리구슬(Glass beads)을 공중낙하법에 의해 등방압밀 공시체를 만들어 평면변형률압축시험을 실시하여 미소변형률 수준에서의 응력·변형률관계의 이방성에 대하여 조사하고, 이러한 이방성이 활선전단강성계수 G_{sec} 에 미치는 영향에 관하여 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 모든 시료의 입경가적곡선을 그림 1에, 그 물리적 성질을 표 1에 나타내었다. 또, 실험 장치의 전체도를 그림 2에 표시하였다. 변형률수준 10^{-6} 에서 10^{-2} 까지의 변형률을 상세히 측정하기 위하여 공시체 측면위는 양측면에서 국소 측변위 측정장치(Local Deformation Transducer: LDT, 그림 2의 ⑩)를 사용하고, 공시체 측면의 수평변위는 측방변위 측정장치(Lateral Deformation Measuring System: LDMS, 그림 2의 ⑪)를 사용하였다(상세한 사항은 문헌 (1), (3), (7)을 참조). 공시체는 높이 $H=20$ cm, 폭(σ_3 방향의 길이) $W=8$ cm, 길이(σ_2 방향의 길이) $L=16$ cm로 하였고, 상하 단면과 구속판에 접히는 측면은 모래와 단면마찰경감층의 직접전단시험결과(문헌 (2) 참조)를 토대로 한 단면마찰 경감층(lubrication layer)을 사용하였다.

최대주응력 σ_1 과 퇴적면이 이루는 각도 δ 는 다음과 같

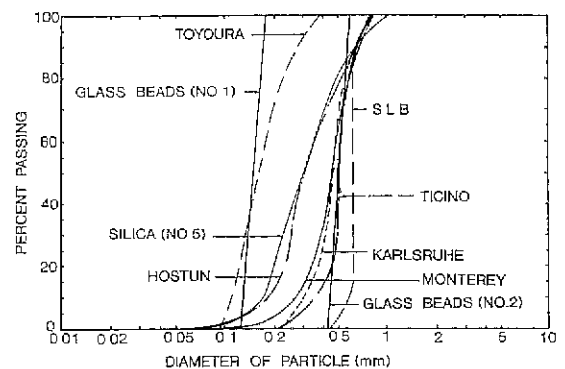


그림 1. 각 시료의 입경가적곡선

표 1. 각 시료의 물리적 성질

Sand Name (Origin)	D ₅₀ (mm)	U _c	Grain Shape ¹	ϕ(°) at δ=90°	σ ₃	OCR	e _{max} / e _{min}	e _{0.05} ²	G _s
Hostun (France)	0.31	1.94	Sub-angular	47.4	0.80	1.0	0.95 / 0.55	0.620	2.65
Toyoura No 2 ³ (Japan)	0.162	1.46	Sub-angular	46.3 / 48.7	0.80 / 0.15	1.0 / 5.3	0.977 / 0.605	0.660	2.64
Silica No.5 (Japan)	0.30	2.11	Sub-angular	43.1	0.80	1.0	0.849 / 0.520	0.650	2.69
Ticino (Italy)	0.502	1.33	Sub-round	47.9	0.80	1.0	0.96 / 0.59	0.660	2.68
Monterey #0 (USA)	0.44	1.74	Sub-round	47.5	0.80	1.0	0.86 / 0.55	0.610	2.64
Silver Leighton Buzzard (UK)	0.62	1.11	Sub-round	45.8 / 47.7	0.80 / 0.15	1.0 / 5.3	0.79 / 0.49	0.520	2.66
Karlsruhe (Germany)	0.45	1.65	Sub-round	43.8	0.80	1.0	0.87 / 0.54	0.620	2.65

- (1) Listed from the top in the order of grain shape angularity.
- (2) Void ratio at σ₃ = 0.05 kgf/cm².
- (3) Toyoura Sand No.2 is from a batch different from that used by Tatsuoka et al(1986)

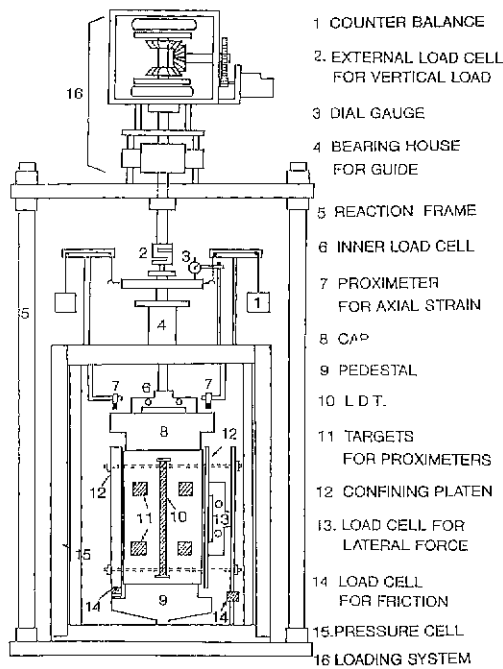


그림 2. 실험장치의 개략도

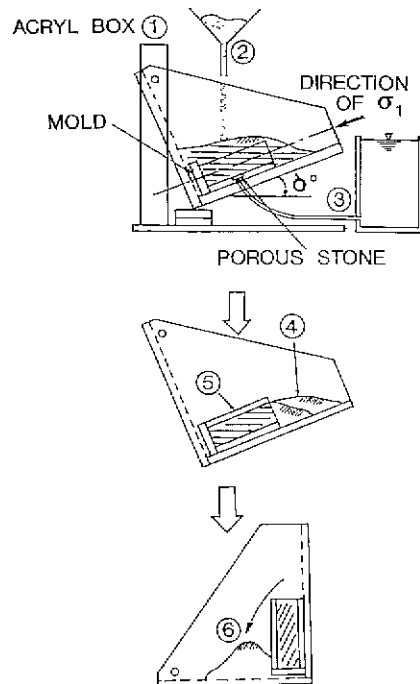


그림 3. δ 공시체의 제작과정

은 방법으로 바꾸었다. 공시체의 주축방향이 수평으로부터 δ 가 되도록 그림 3에 나타낸 몰드에 장치시켜 이 몰드 내에 공기 건조상태의 시료를 일정한 높이에서 자유낙하시킨다. 그다음 시료내부를 시료가 교란되지 않도록 동수 경사를 유지하면서 물로 포화시킨 후 자연배수시킨다. 시료가 불포화상태가 되었을 때 동결시켜 평면변형률압축 시험장치에 장치한 후 배압 0.05kgf/cm² 하에서 약 하루 동안 방치하여 녹였다. 이때의 간극비를 e_{0.05}로 나타내었다.

공시체 상하단에 배압차(하단:0.05kgf/cm², 상단: 0.80kgf/cm²)를 가하여 시료가 공기 건조상태가 될 때까지 공시체 내부의 물을 배수시켰다(약 1일 소요, 이때의 포화도 및 함수비는 거의 '0'). 배압을 가한 후 정규압밀시켜 LDT, 구속판, LDMS를 장치하였다. 그 후 배수상태에서 변형률 제어법(측면위 0.25 mm/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. 미소변형률수준에서의 응력·변형률 관계의 이방성

그림 4~8은 구속압 $\sigma_3 = 0.80 \text{ kgf/cm}^2$ 하에서의 정규압밀 공시체를 최대주응력 σ_1 과 퇴적면이 이루는 각도 δ 를 바꾸어 평면변형률압축시험을 실시하여 설치오차 (bedding error)를 포함하지 않은 전단변형률 $\gamma = 0.5\%$ 까지의 응력·변형률 관계를 각 공시체별로 나타낸 것이다. 이것들을 보면 전단변형률 $\gamma = 0.5\%$ 까지는 어떤 입상체에서도 변형특성의 이방성이 확실히 보인다. 다음에 그림 9~13과 같이 전단변형률 $\gamma = 0.05\%$ 까지의 응력·변형률 관계를 나타내 보았다. 이것들을 보면 $\gamma = 0.01\%$ 정도 이하에서는 변형특성의 이방성이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 그림들로는 $\epsilon_1 = 0.01\%$ 정도 이하에서의

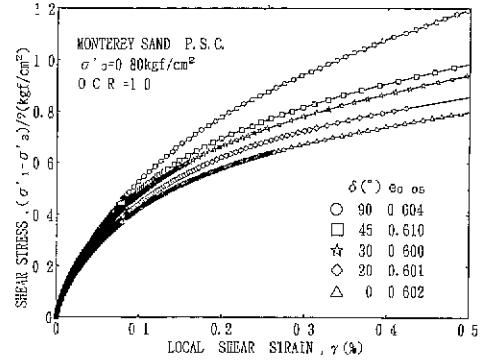


그림 7. $\gamma = 0.5\%$ 까지의 응력-변형률 관계 (정규압밀 Monterey 모래)

변형특성의 이방성에 관하여 상세히 알 수 없기 때문에 그림 14~18과 같이 전단변형률 $\gamma = 0.005\%$ 까지의 응력·변형률 관계를 나타내 보았다. 역시 변형특성의 이방성이 거의 보이지 않고 δ 에 관계없이 응력·변형률 관계는 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 이것은 미소변형률 수준(10^{-5})

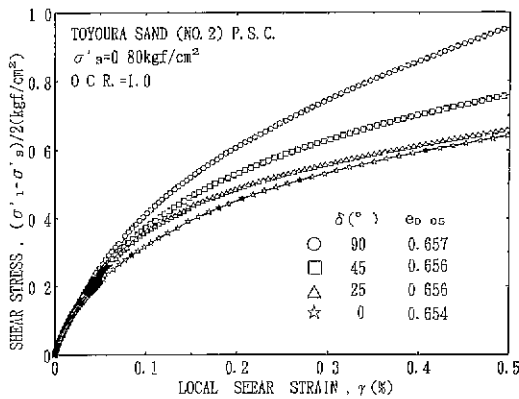


그림 4. $\gamma = 0.5\%$ 까지의 응력-변형률 관계 (정규압밀 Toyoura 모래)

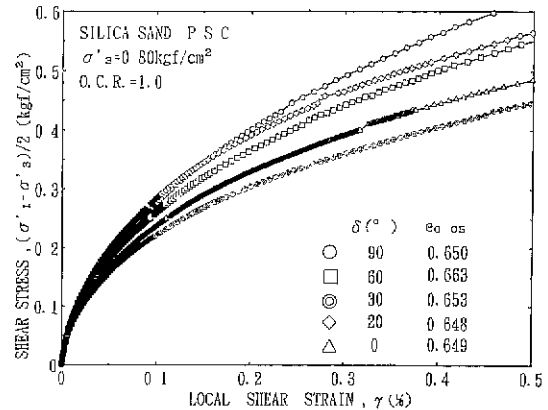


그림 6. $\gamma = 0.5\%$ 까지의 응력-변형률 관계 (정규압밀 Silica 모래)

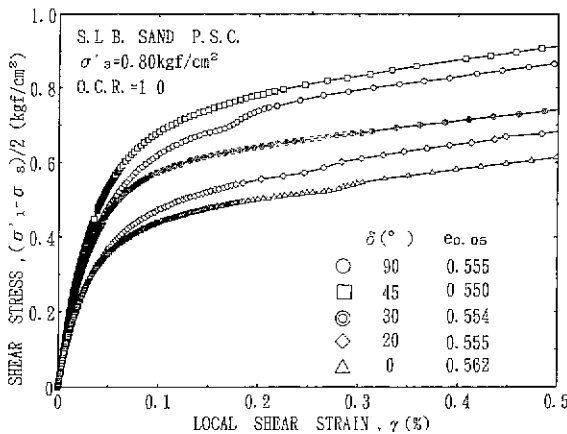


그림 5. $\gamma = 0.5\%$ 까지의 응력-변형률 관계 (정규압밀 SLB 모래)

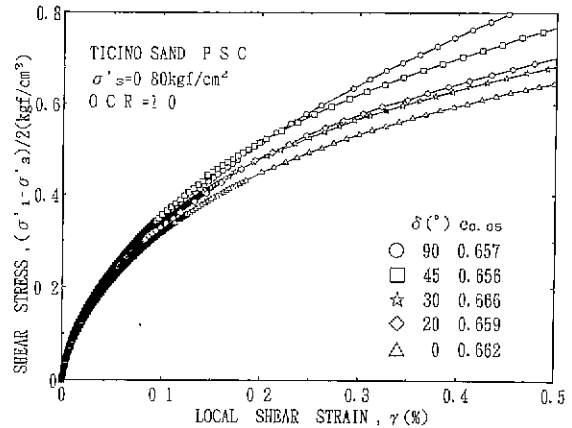


그림 8. $\gamma = 0.5\%$ 까지의 응력-변형률 관계 (정규압밀 Ticino 모래)

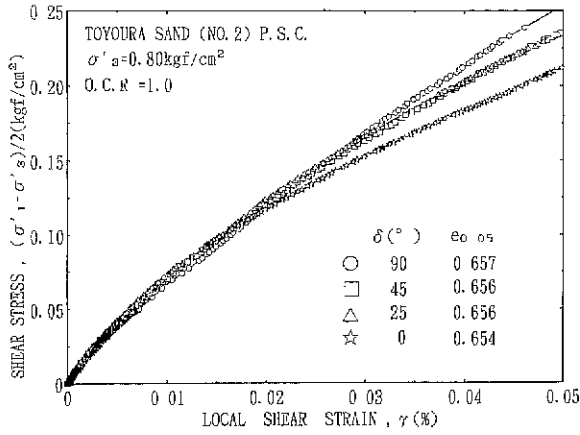


그림 9. $\gamma=0.05\%$ 까지의 응력-변형률 관계
(정규압밀 Toyoura 모래)

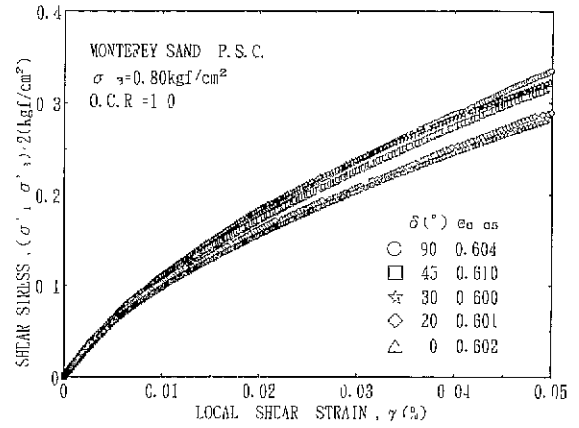


그림 12. $\gamma=0.05\%$ 까지의 응력-변형률 관계
(정규압밀 Monterey 모래)

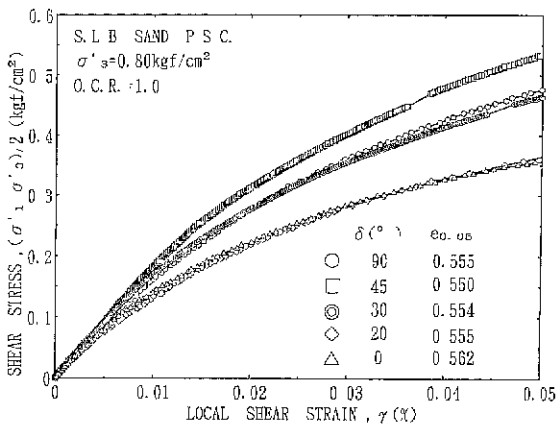


그림 10. $\gamma=0.05\%$ 까지의 응력-변형률 관계
(정규압밀 SLB 모래)

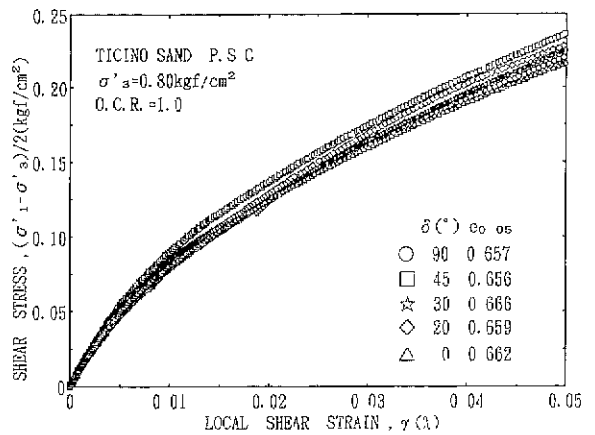


그림 13. $\gamma=0.05\%$ 까지의 응력-변형률 관계
(정규압밀 Ticino 모래)

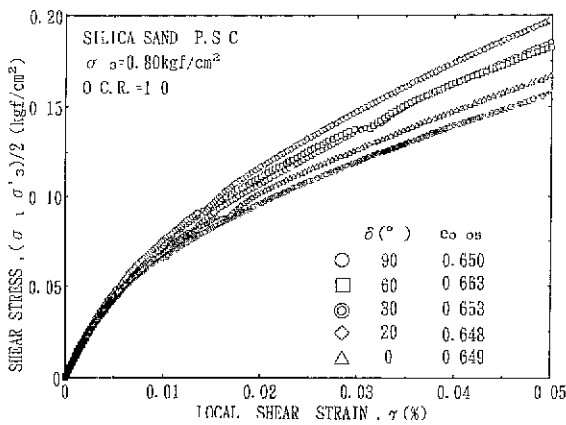


그림 11. $\gamma=0.05\%$ 까지의 응력-변형률 관계
(정규압밀 Silica 모래)

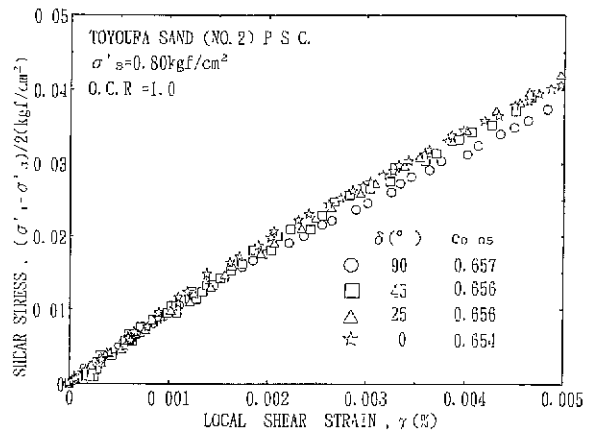


그림 14. $\gamma=0.005\%$ 까지의 응력-변형률 관계
(정규압밀 Toyoura 모래)

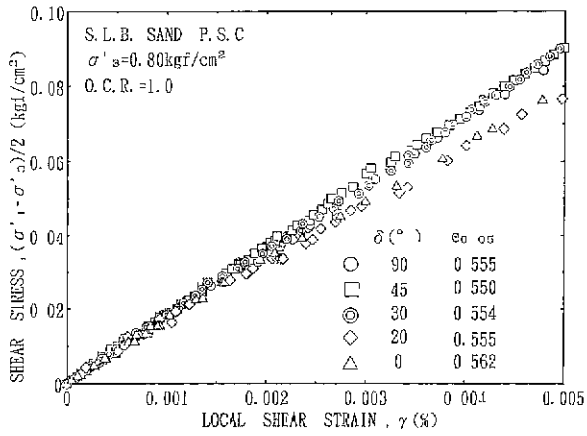


그림 15. $\gamma=0.005\%$ 까지의 응력-변형을 관계 (정규압밀 SLB 모래)

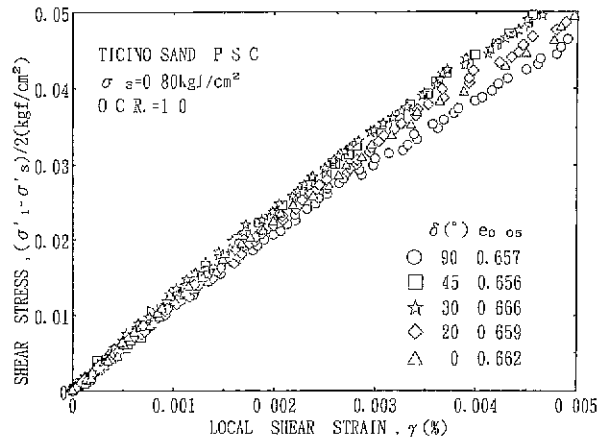


그림 18. $\gamma=0.005\%$ 까지의 응력-변형을 관계 (정규압밀 Ticino 모래)

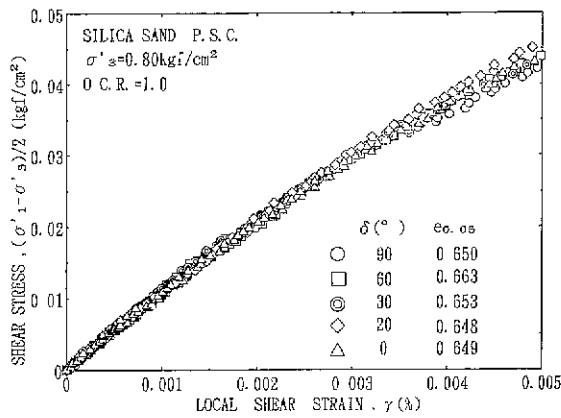


그림 16. $\gamma=0.005\%$ 까지의 응력-변형을 관계 (정규압밀 Silica 모래)

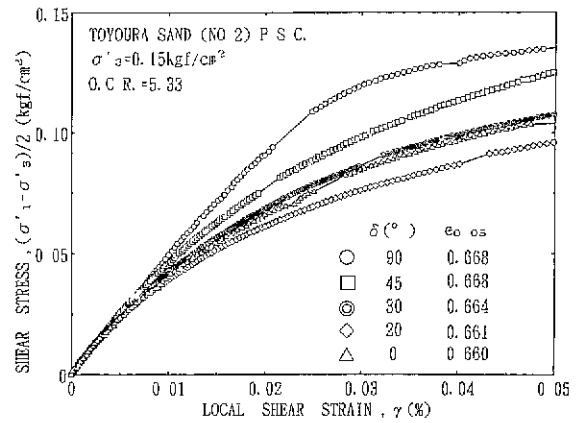


그림 19. $\gamma=0.05\%$ 까지의 응력-변형을 관계 (과압밀 Toyoura 모래)

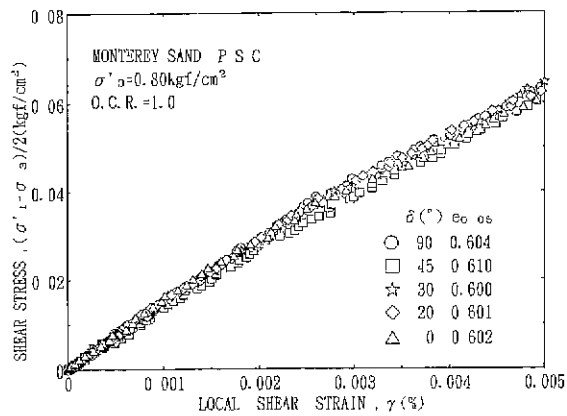


그림 17. $\gamma=0.005\%$ 까지의 응력-변형을 관계 (정규압밀 Monterey 모래)

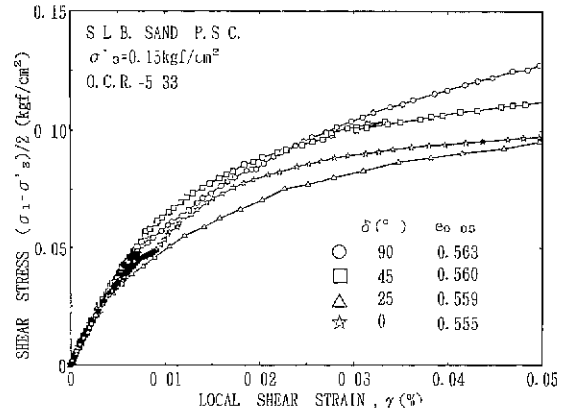


그림 20. $\gamma=0.05\%$ 까지의 응력-변형을 관계 (과압밀 SLB 모래)

이하)에서는 입자간의 다일러턴시 현상이 일어나지 않고 탄성변형을 하고 있기 때문이라고 사료된다.

한편, 그림 9~10, 그림 19~20은 Toyoura 모래와 SLB 모래의 정규압밀공시체, 과압밀공시체의 변형특성의 이방성이 나타나는 경계점을 조사하기 위하여 전단변형률 $\gamma = 0.05\%$ 까지의 응력·변형률 관계를 나타낸 것이다. 그 결과 정규압밀공시체, 과압밀공시체에 관계없이 bedding error를 포함하지 않는 축변형률 약 0.01% 부근에서부터 변형특성의 이방성이 나타나기 시작하는 것을 알 수 있다. 이것은 정규압밀공시체의 경우가 과압밀공시체의 경우보다 강도이방성이 결코 더 빨리 나타난다고 할 수 없음을 나타낸다. 즉, 이 정도의 과압밀비(OCR=5.33)에 의해 모래의 내부구조가 등방적으로 변화한다고 할 수 없다는 것을 시사한다.

4. 할선전단강성계수(G_{sec})의 변형률수준, 응력수준 의존성

그림 14~18은 bedding error를 포함하지 않는 전단변형률 0.005%까지의 전단변형률 γ 와 전단응력 $\tau(=(\sigma_1 - \sigma_3)/2)$ 와의 관계를 각 공시체별로 나타낸 것이다. 이것들

로부터 초기의 직선부분의 기울기를 구해 그 기울기를 최대전단강성계수(G_{max})_{psc}로 정의하였다(이하 G_{max}).

또 할선전단강성계수

$$(G_{sec})_{psc} = \frac{\tau - \tau_0}{\gamma} = \frac{\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_0}{2}}{\gamma}$$

로 정의하였다(이하 G_{sec}).

$\tau_0 = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_0}{2}$ 는 전단이 시작될 때의 값이다.

Toyoura 모래와 SLB 모래의 정규압밀, 과압밀공시체의 최대전단강성계수 G_{max} 의 이방성을 조사하기 위해 퇴적면에 대한 최대주응력방향의 각도 δ 에 대해 나타낸 것이 그림 21이다. 이 그림을 보면 Toyoura 모래와 SLB 모래 모든 경우에 있어서 데이터가 약간 분산되어 있지만 구속압과 간극비가 같은 조건하에서는 δ 에 의한 G_{max} 의 변화가 매우 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 G_{max} 은 δ 의 변화에 의해 거의 변화하지 않는다고 할 수 있다. 또 구속압 $\sigma_3 = 0.15 \text{ kgf/cm}^2$ 의 경우 과압밀비에 의한 G_{max} 은 정규압밀의 경우와 거의 같다고 할 수 있다. 그리고 과압밀의

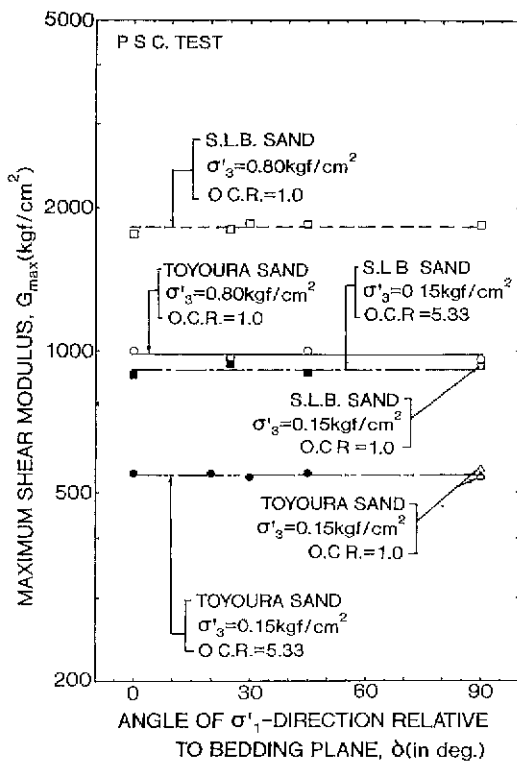


그림 21. δ 에 대한 G_{max}
(Toyoura 모래와 SLB 모래의 정규압밀·과압밀공시체)

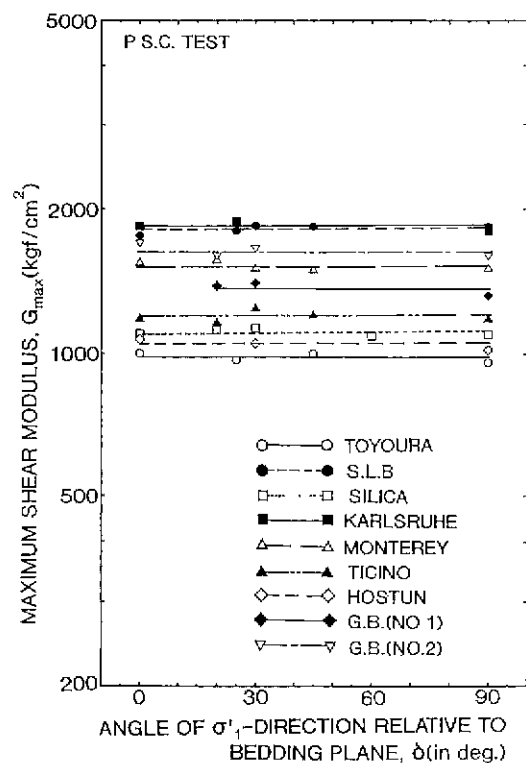


그림 22. δ 에 대한 G_{max} (각 정규압밀공시체)

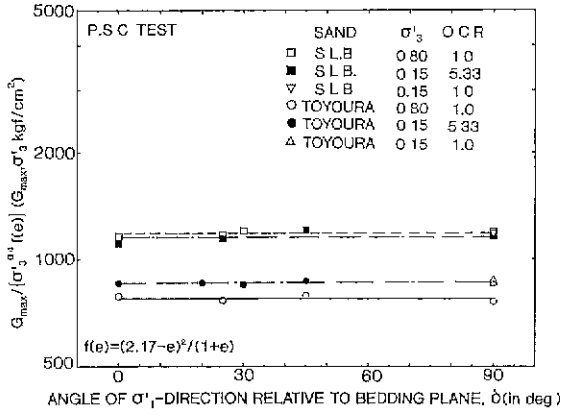


그림 23. 정규화한 G_{max} 과 δ 와의 관계
(Toyoura 모래와 SLB 모래의 정규압밀·과압밀공시체)

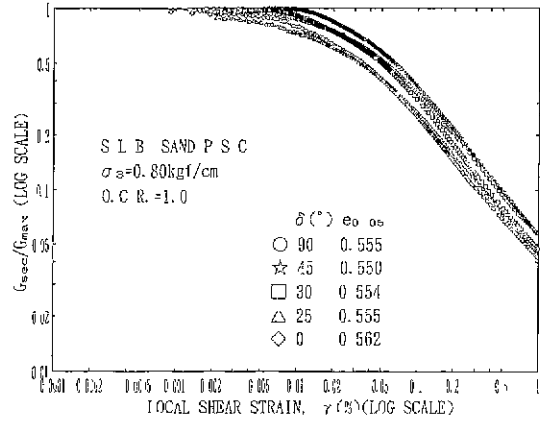


그림 26. δ 에 대한 G_{sec}/G_{max} 과 γ 와의 관계
(정규압밀 SLB 모래)

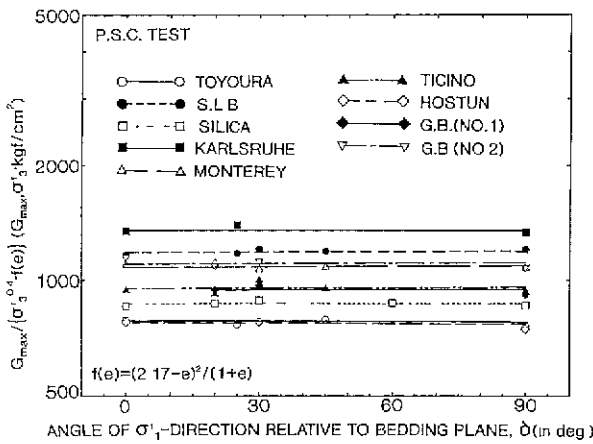


그림 24. 정규화한 G_{max} 과 δ 와의 관계
(각 정규압밀공시체)

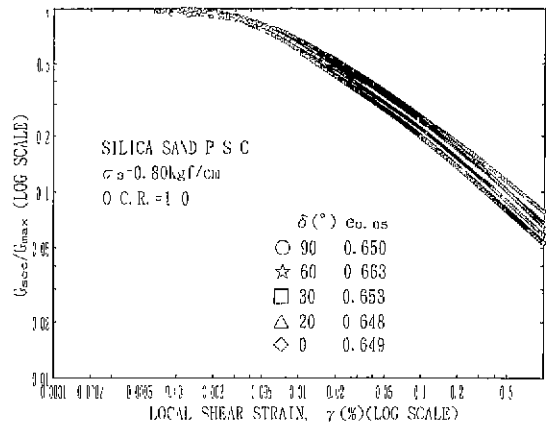


그림 27. δ 에 대한 G_{sec}/G_{max} 과 γ 와의 관계
(정규압밀 Silica 모래)

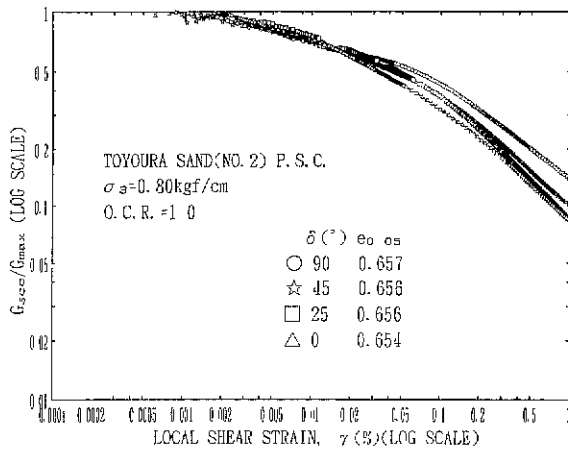


그림 25. δ 에 대한 G_{sec}/G_{max} 과 γ 와의 관계
(정규압밀 Toyoura 모래)

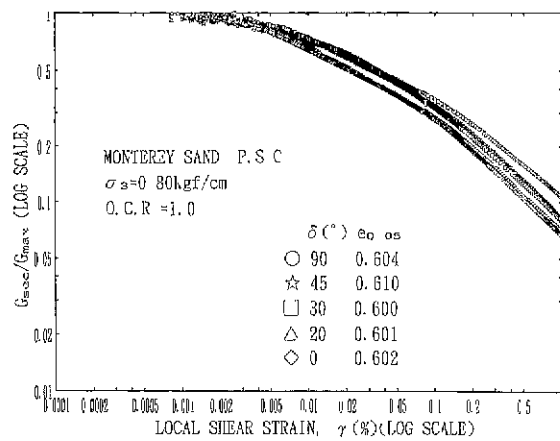


그림 28. δ 에 대한 G_{sec}/G_{max} 과 γ 와의 관계
(정규압밀 Monterey 모래)

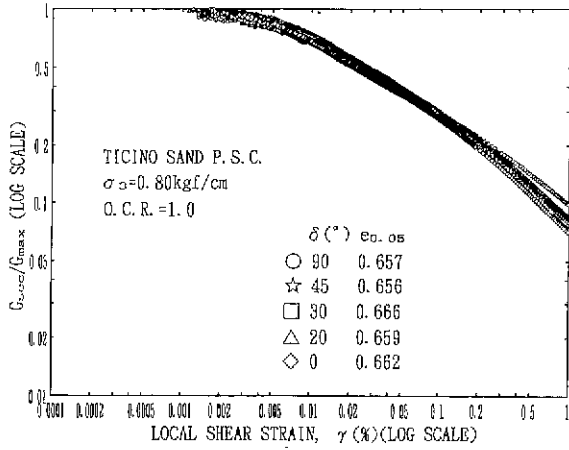


그림 29. δ 에 대한 G_{sec}/G_{max} 과 γ 와의 관계
(정규압밀 Ticino 모래)

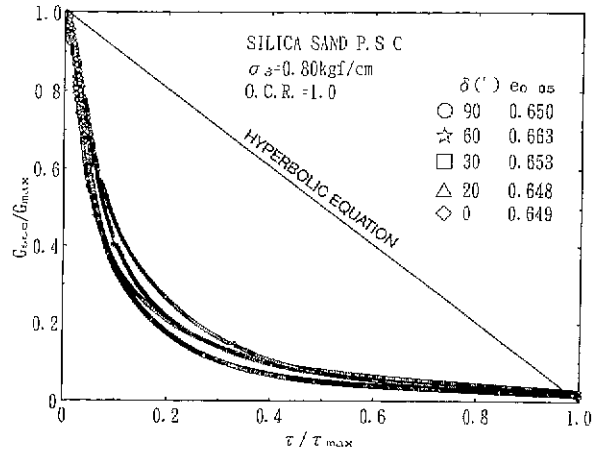


그림 32. $G_{sec}/G_{max} \sim \tau/\tau_{max}$ 의 관계
(정규압밀 Silica 모래)

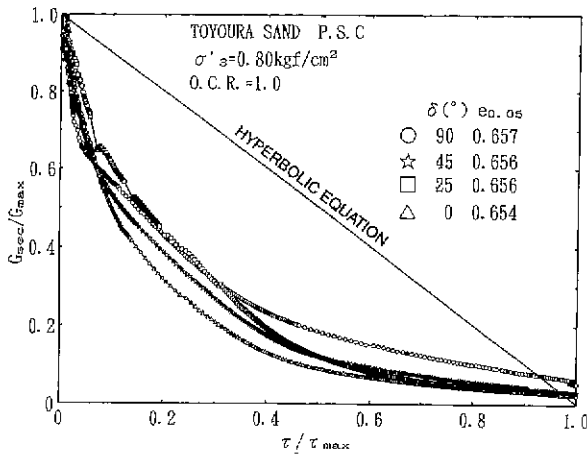


그림 30. $G_{sec}/G_{max} \sim \tau/\tau_{max}$ 의 관계
(정규압밀 Toyoura 모래)

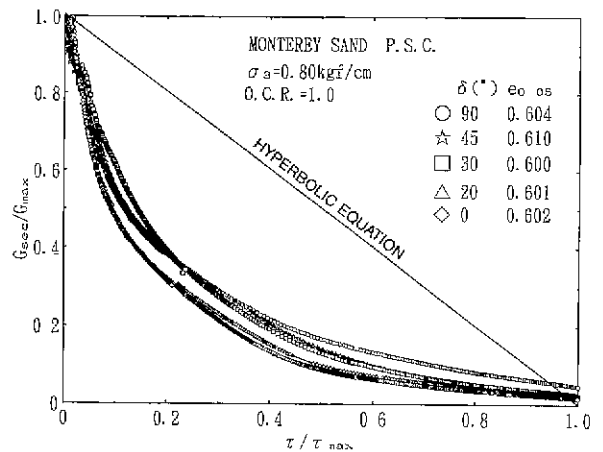


그림 33. $G_{sec}/G_{max} \sim \tau/\tau_{max}$ 의 관계
(정규압밀 Monterey 모래)

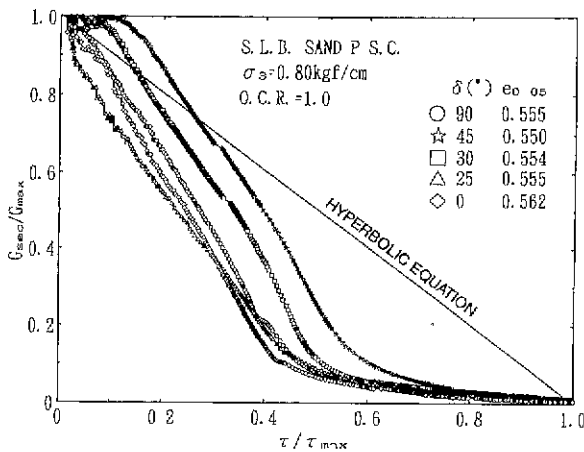


그림 31. $G_{sec}/G_{max} \sim \tau/\tau_{max}$ 의 관계
(정규압밀 SLB 모래)

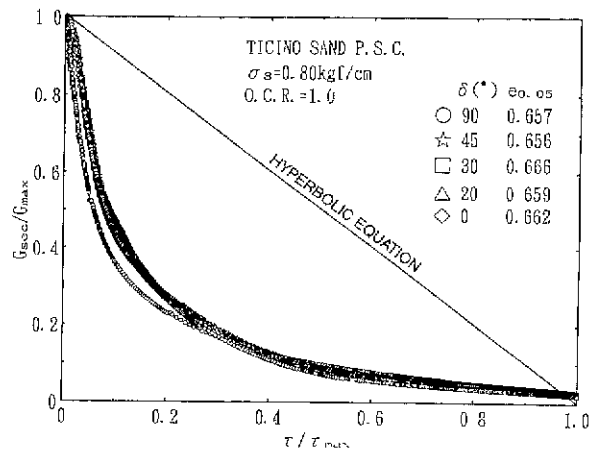


그림 34. $G_{sec}/G_{max} \sim \tau/\tau_{max}$ 의 관계
(정규압밀 Ticino 모래)

경우에서도, 정규압밀의 경우에서도 최대전단강성계수 G_{max} 의 이방성은 거의 없다고 사료된다.

한편, 그림 22는 다양한 입상체의 δ 에 대한 최대전단강성계수 G_{max} 의 관계를 정리한 것이다. 이 그림을 보면 각 입상체마다 G_{max} 의 절대값은 다르지만 동일한 시료라면 G_{max} 은 δ 에 관계없이 거의 같다는 것을 알 수 있다. 즉, 어느 입상체라도 자유낙하법으로 제작한 공시체의 경우 이방성이 최대전단강성계수 G_{max} 에 영향을 거의 미치지 않는다고 사료된다.

이상과 같이 최대전단강성계수 G_{max} 의 이방성은 거의 없다는 것을 알았다. 다음으로 다른 조건이 모두 일치하고 입상체 자체의 물리적인 성질이 다르면 G_{max} 에 어떻게 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 Toyoura 모래와 SLB 모래의 정규압밀, 과압밀공시체의 G_{max} 을 구속압 σ_3 와 간극비 e 에 대해 정규화하여 $(\sigma_3)^{0.4} \cdot f(e)$, $f(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)}$, 참고문헌 (8)참조 δ 와의 관계로 나타낸 것이 그림 23이다. 이 그림을 보면 정규화한 G_{max} 은 SLB 모래의 경우 구속압 $\sigma_3 = 0.80 \text{ kgf/cm}^2$ 의 경우가 $\sigma_3 = 0.15 \text{ kgf/cm}^2$ 의 경우보다 약간 크지만 그 차이가 미소하여 거의 같다고 해도 과언이 아니다. 한편 Toyoura 모래의 경우는 거꾸로 구속압 $\sigma_3 = 0.15 \text{ kgf/cm}^2$ 의 경우가 $\sigma_3 = 0.80 \text{ kgf/cm}^2$ 의 경우보다 약간 크지만 그 차이가 역시 미소하여 거의 같다고 사료된다. 또 Toyoura 모래와 SLB 모래 모두 과압밀에 의해 정규화한 G_{max} 이 전혀 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 SLB 모래의 경우가 Toyoura 모래의 경우보다 정규화한 G_{max} 의 절대값이 약 1.8배 정도 크다. 이것을 상세히 조사하기 위하여 그림 24와 같이 각 공시체의 최대전단강성계수 G_{max} 을 구속압 σ_3 와 간극비 e 에 대해 정규화하여 δ 와의 관계로 나타내었다. 이 그림을 보면 정규화한 G_{max} 이 가장 작은 것은 Hostun 모래로 약 800 kgf/cm^2 , 가장 큰 것은 Karlsruhe 모래로 약 1200 kgf/cm^2 이었고, 다른 입상체는 그 사이에 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 다음과 같은 이유로 정규화한 G_{max} 값이 입경이 클수록 반드시 크다고 할 수 없다.

- (1) 표 1에 나타낸 바와 같이 Ticino 모래의 평균입경($D_{50} = 0.502 \text{ mm}$)이 유리구슬 No. 1 ($D_{50} = 0.15 \text{ mm}$), Karlsruhe 모래($D_{50} = 0.45 \text{ mm}$) 등과 비교하여 크게 비하여 정규화한 G_{max} 값은 작다.
- (2) Silica 모래의 평균입경($D_{50} = 0.30 \text{ mm}$)이 Ticino 모래($D_{50} = 0.502 \text{ mm}$)보다 작음에도 불구하고 정규화한 G_{max} 은 거의 같다.

(3) Toyoura 모래의 평균입경($D_{50} = 0.162 \text{ mm}$)이 Hostun 모래($D_{50} = 0.31 \text{ mm}$)보다 작음에도 불구하고 정규화한 G_{max} 은 거의 같다.

(4) 유리구슬 No. 1의 $D_{50} (= 0.15 \text{ mm})$ 이 유리구슬 No. 2의 $D_{50} (= 0.505 \text{ mm})$ 보다 훨씬 작음에도 비하여 정규화한 G_{max} 은 그다지 차이가 나지 않는다.

여기에 비해 입자의 형상을 상세히 조사한 결과 입자의 형상이 둥글수록, 즉 입자가 구형에 가까울수록 정규화한 최대할선응력 G_{max} 값은 크게 된다고 생각된다. 또 유리구슬 No. 2가 유리구슬 No. 1보다 정규화한 G_{max} 값이 약간 크다는 것으로부터 동일한 물성, 입자형상, 입도분포라면 입상체의 크기가 정규화한 G_{max} 값에 약간의 영향을 미친다고 사료된다.

한편 각 δ 에 있어서의 전단변형률 γ 에 대한 할선전단강성계수 G_{sec} 의 변화를 다시 할선전단강성계수와 최대할선전단강성계수와의 비 G_{sec}/G_{max} 과 전단변형률 γ 과의 관계로 구하여 각 공시체별로 정리한 것이 그림 25~29이다. 이 그림들을 보면 전단초기의 $\gamma = 0.01\%$ 이하의 미소변형률 수준에서는 δ 가 다름에도 불구하고 동일한 γ 에 대한 G_{sec}/G_{max} 값이 거의 같다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 어느 입상체에서도 공통적인 경향을 나타내고 있다고 할 수 있다. 그러나 전단변형률 γ 가 점차 커짐에 따라 G_{sec}/G_{max} 의 감소모양이 바뀌어간다. 즉, $\delta = 90^\circ$ 의 경우와 비교하면 $\delta < 90^\circ$ 의 경우가 보다 더 취성적으로 된다. 즉, 이 점을 넘으면 전단변형률의 증대와 함께 δ 가 작아질수록 할선전단강성계수 G_{sec} 의 변형률수준 의존성이 크게 된다는 것을 알 수 있다.

한편 그림 30~34는 각 δ 에 있어서의 할선전단강성계수와 최대할선전단강성계수와의 비 G_{sec}/G_{max} 과 전단응력과 최대전단응력과의 비 τ/τ_{max} 과의 관계를 각 공시체별로 나타낸 것이다. 이 그림들을 보면 이방성에 대한 응력수준 의존성이 나타나는 τ/τ_{max} 값이 각 공시체별로 다르지만 δ 가 작아질수록 G_{sec}/G_{max} 의 응력수준 의존성이 크게 된다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

- (1) 미소전단변형률 수준(전단변형률 약 10^{-5} 이하)에서는 변형특성의 이방성이 보이지 않는다. 이것은 이러한 미소전단변형률 수준에서는 입자간의 다일러턴시 현

상이 일어나지 않고 탄성변형을 하고 있기 때문이다.

- (2) 모래의 종류에 따라 약간의 차이가 있지만 어느 전단변형률 수준에서 이방성이 나타나기 시작하여 전단변형률이 커짐에 따라 이방성이 명확하게 나타난다.
- (3) 정규화된 최대활선전단강성계수 G_{max} 은 입자의 형상이 구형에 가까울수록 크게 되는 경향이 있다.
- (4) 입상체의 크기가 클수록 정규화된 G_{max} 은 크게 되는 경향이 있다.
- (5) 활선전단강성계수와 최대활선전단강성계수과의 비 G_{sec}/G_{max} 의 변형률수준, 응력수준 의존성은 δ 가 작을수록 크다.

참고 문헌

1. 박춘식, 龍岡文夫, 장정욱, 정진교(1994), “평면 변형률 압축상태에서의 모래의 미소 변형률 측정”, 「한국지반공학회지」, 제10권 제1호, pp 27~45
2. 박춘植, 後藤聰, 龍岡文夫(1992), “砂と礫の質内せん断試験における断面摩擦軽減”, 生産研, Vol.44, No.5, pp. 14~18.
3. 박춘植(1993), “平面ひずみ壓縮試験による各種の砂の變形-強度特性”, 日本東京大學大学院博士論文.
4. Arthur, J.R.F. and Menzies, B.K.(1972), "Inherent Anisotropy in a Sand", Geotechnique, Vol.22, No.1, pp.115~128.
5. Arthur, J.R.F. Chua, K.S. and Dunstan, T.(1977), "Induced Anisotropy in a Sand", Geotechnique, Vol.27, No.1, pp.13~30.
6. 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.
7. 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.
8. Iwasaki, T. and Tatsuoka, F.(1977), "Effects of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sands," Soils and Foundations, Vol.17, No.3, pp.19~35.
9. 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.
10. Oda, M.(1972), "Initial Fabrics and their Relations to Mechanical Properties of Granular Material", Soils and Foundations, Vol.12, No.1, pp.17~36.
11. 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.
12. Oda, M.(1981), "Anisotropic Strength of Cohesionless Sands", Journal of GE Div., Proc. of ASCE, 107~GT9, pp.1219~1231.
13. Park, C.S., Tatsuoka, F. and Shibuya, S.(1990a), "Strength and Deformation Anisotropy of Dense Silver Leighton Buzzard Sand in Plane Strain Compression" . 「SEISAN-KENKYU」, Vol.42, No.10, pp. 586~589.
14. Park, C.S, Shinmei, S., Tatsuoka, F. and Shibuya, S.(1990b), "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
15. 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
16. 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
17. 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 2000. 2. 14)