

## 각 종 모래의 Stress-dilatancy 관계에 관한 연구

### A Study of a Variety of Sands in Stress-dilatancy Relationships

박 춘 식<sup>\*1</sup> Park, Choon-Sik

장 정 욱<sup>\*2</sup> 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 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 the peak were obtained by measuring axial and lateral strains locally free from the effects of bedding and membrane penetration errors at the specimen boundaries. The result showed that the relationship between the principal stress ratio and the principal strain increment ratio was constant, being rarely affected by the over-consolidation ratio and the confining pressure. Although in the small strain the anisotropy hardly affected the relationship between the principal stress ratio and the principal strain increment ratio, the K value around the peak varied according to the  $\delta$  value. In general, Rowe's stress-dilatancy equation works fairly well from the small strain to the peak.

#### 요 지

공중낙하법에 의해 만든 등방압밀 모래공시체를 미소변형률 측정장치를 사용한 평면변형률압축시험을 실시하여 미소변형률에서 파괴후까지의 응력-다이레이턴시(stress-dilatancy) 관계를 연구하였다. 세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종류의 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 파괴 시까지의 응력-변형률 관계를 얻었다. 그 결과 미소변형률 수준에서 파괴 시까지의 주응력비-주변형률증분비 관계는 과압밀비 및 구속압에 거의 영향을 받지 않고 동일하였다. 또한 미소변형률에서는 이방성이 주응력비-주변형률증분비 관계에 미치는 영향은 거의 없지만, 파괴 부근에서의 K값의 크기는  $\delta$ 에 따라 다른 값을 나타내었다. 한편, K값은 모래의 종류에 따라 다른 값을 나타내었다. 전체적으로 Rowe의 응력-다이레이턴시 식은 미소변형률에서 파괴까지 근사적으로 성립한다는 것을 알았다.

**Keywords :** Anisotropy, Over-consolidation ratio, Plane strain compression, Small strain, Stress-dilatancy relationship

\*1 정회원, 창원대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Changwon National Univ., pcs@sarim.changwon.ac.kr)

\*2 정회원, 청주대학교 지구환경시스템공학부 부교수 (Member, Associate Professor, Geoenvironmental System Engrg., Chongju Univ.)

## 1. 서론

Rowe의 응력-다이레이턴시 식, 즉 주응력비-주변형률증분비 관계는 평면변형률조건에 대해  $R=KD$  (여기서  $R = \sigma_1 / \sigma_3$ ,  $D = -d\varepsilon_3 / d\varepsilon_1$ )로 주어진다. 지금까지의 연구에 의하면 R과 D와의 사이에는 직선 관계가 있다. Tatsuoka 등(1986)은 포화 Toyoura 모래를 사용하여 구속압  $\sigma_3 = 0.05 \sim 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ 의 범위에서 평면변형률압축시험을 실시하여 멤브레인 힘을 보정하면 파괴 응력에서는 직선적으로  $K = 3.5$ 선 위에 있다고 하였다. 즉, 이 식은 평면변형률압축시험에서는 구속압  $\sigma_3$ 의 크기나 모래의 밀도에 의존하지 않고 성립한다는 것을 나타내었다. 또, 최대주응력  $\sigma_1$  과 퇴적면이 이루는 각도  $\delta$  가 주응력비-주변형률증분비 관계에 미치는 영향에 관해서는  $\delta$  가 다르면  $(\sigma_1 / \sigma_3) / (-d\varepsilon_3 / d\varepsilon_1) = K$ 에 차이가 나타나는 것을 보였다. 즉,  $\delta = 90^\circ$ 에서는 K의 값은 3.4~3.7 정도였지만  $\delta$  가 작게 됨에 따라 K도 작게 되어  $\delta = 20^\circ \sim 30^\circ$ 에서는  $K=3.0 \sim 3.2$  정도이고,  $\delta = 0^\circ$ 에서는  $K=3.1 \sim 3.3$  정도로 약간 크게 된다는 것을 나타내었다. 그러나, 이 결과는 Toyoura 모래만에 대한 한정된 결과이므로 그 일반성에 관해 결론을 내는 것은 데이터의 수가 부족하다고 판단된다.

한편, Rowe의 응력-다이레이턴시 식이 미소변형률 수준에서도 성립하는가를 조사한 연구는 Abe(1989) 이

외에는 거의 예가 없다. Abe(1989)는 Toyoura 모래를 사용한 평면변형률압축시험에서  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  정도의 변형률 수준에 있어서 구속압  $\sigma_3$ 의 크기나 모래의 밀도, 압밀응력비에 의존하지 않고 거의  $K=3.5$  선상에 있어 Rowe의 응력-다이레이턴시 식이 미소변형률 수준에서도 성립한다는 것을 나타내었다.

따라서 본 논문은 다양한 모래를 사용하여 평면변형률압축시험을 실시하고, 미소변형률 수준( $10^{-5}$ 수준 이하)에서부터 파괴까지의 과압밀비, 구속압 및 이방성이 주응력비-주변형률증분비 관계에 미치는 영향을 연구하였다.

## 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 측면위 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), (10)을 참조). 공시체는 높이  $H=20 \text{ cm}$ , 폭( $\sigma_3$  방향의 길이)  $W=8 \text{ cm}$ , 길이( $\sigma_2$  방향의 길이)  $L=16 \text{ cm}$ 로 하였고, 상하 단면과

표 1. 각 시료의 물리적 성질

Sand Name (Origin)	$D_{50}$ (mm)	$U_c$	Grain Shape <sup>1</sup>	$\phi(^{\circ})$ at $\delta=90^{\circ}$	$\sigma_3$	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
Toyouura No.2 <sup>3</sup> (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
Glass No.1	0.15	1.29	Round	35.7	0.80	1.0	-	0.589	2.49
Glass No.2	0.505	1.21	Round	35.4	0.80	1.0	-	0.573	2.49

1. Listed from the top in the order of grain shape angularity.

2. Void ratio at  $\sigma_3 = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ .

3. Toyoura Sand No.2 is from a batch different from that used by Tatsuoka et al(1986).

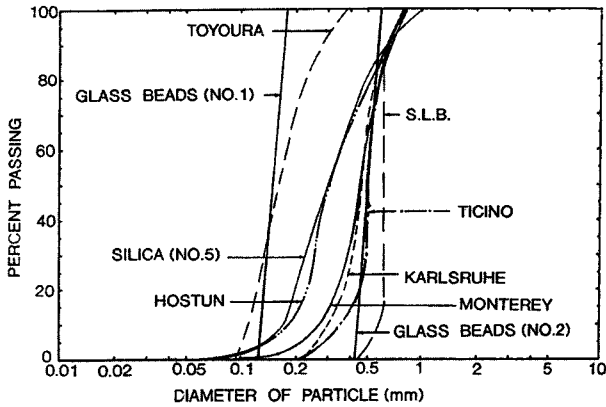


그림 1. 각 시료의 입경가적곡선

구속판에 접하는 측면은 모래와 단면마찰경감층의 직접전단시험결과(문헌 (2) 참조)를 토대로 한 단면마찰경감층(lubrication layer)을 사용하였다.

최대주응력  $\sigma_1$ 과 퇴적면이 이루는 각도  $\delta$ 는 다음과 같은 방법으로 바꾸었다. 공시체의 주축방향이 수평으로부터  $\delta$ 가 되도록 그림 3에 나타낸 몰드에 장치시켜 이 몰드 내에 공기건조상태의 시료를 일정한 높이에서 자유낙하시킨다. 그 다음 시료내부를 시료가 교란되지 않도록 동수경사를 유지하면서 물로 포화시킨 후 자연

배수시킨다. 시료가 불포화상태가 되었을 때 동결시켜 평면변형률압축시험장치에 장치한 후 부압  $0.05\text{kgf/cm}^2$  하에서 약 하루 동안 방치하여 녹였다. 이때의 간극비를  $e_{0.05}$ 로 나타내었다. 공시체 상하단에 부압차(하단:  $0.05\text{kgf/cm}^2$ , 상단:  $0.80\text{kgf/cm}^2$ )를 가하여 시료가 공기건조상태가 될 때까지 공시체 내부의 물을 배수시켰다(약 1일 소요, 이 때의 포화도 및 함수비는 거의 '0'). 부압을 가한 후 정규압밀시켜 LDT, 구속판, LDMS를 장치하였다. 그 후 배수상태에서 변형률제어법(축변위  $0.25\text{mm/min}$ )으로 공시체를 전단하였다. 공시체내에 전단층이 발생하면 LDMS로는 공시체의 평균 축방변형률을 정확히 구할 수가 없기 때문에 파괴후의 어떤 변형률수준 이상이 되면 체적변형률  $\epsilon_v$ 치는 일정하다고 가정하여 최소주응력방향의 변형률  $\epsilon_3$ 를 역산하였다.

### 3. 소성변형률증분의 계산

그림 4, 그림 5는 Toyoura 모래와 S.L.B.모래의 과압 밀비의 차이에 의한 미소변형률에서 피크 시까지의 주응력비-주변형률증분비 관계를 나타낸 것이다. 여기서 나타내고 있는  $D = -d\epsilon_3^p / d\epsilon_1^p$ 는 탄성변형률을 고려

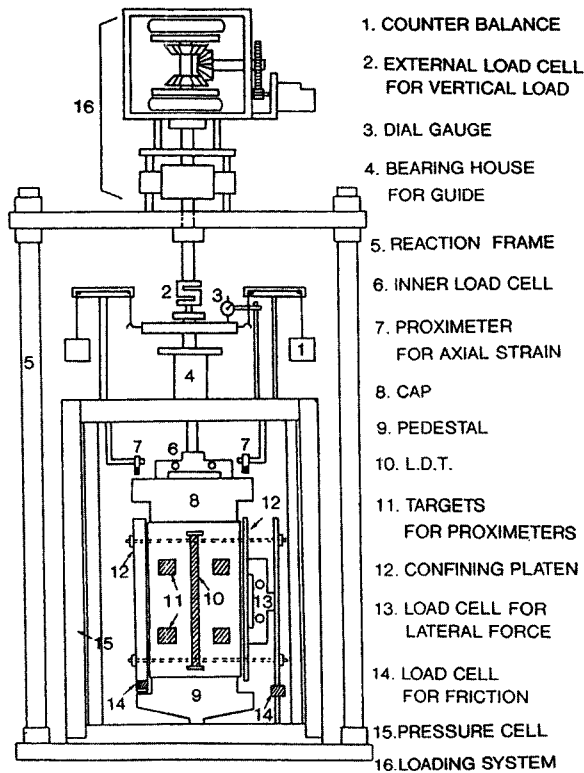


그림 2. 실험장치의 개략도

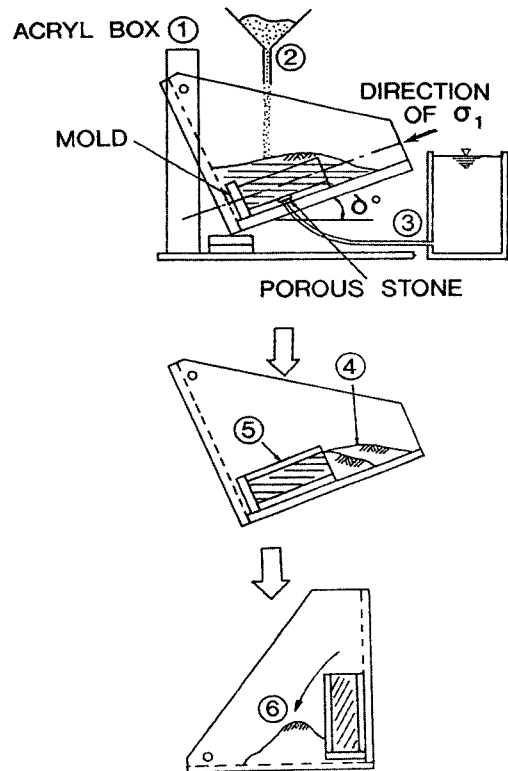


그림 3.  $\delta$  공시체의 제작과정

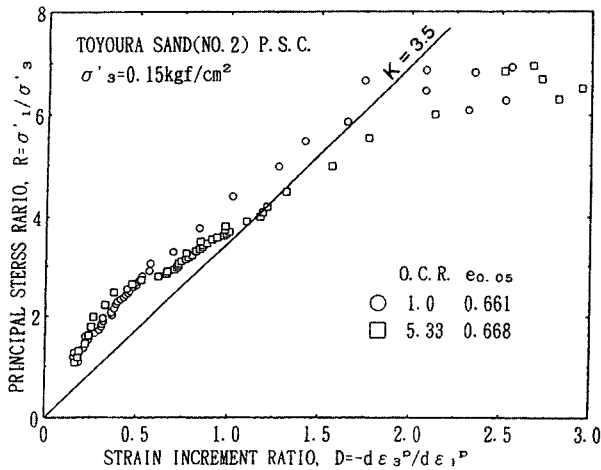


그림 4. 주응력비-주변형률증분비의 관계(과압밀비의 비교, Toyoura 모래)

한 참값의 소성변형률증분비만을 나타내고 있다. 즉,  $d\varepsilon_1 = d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_1^e$ ,  $d\varepsilon_3 = d\varepsilon_3^p + d\varepsilon_3^e$  이다. 여기서  $d\varepsilon_1^e = dq / (E_{max})_{psc}$ ,  $d\varepsilon_3^e = -\nu_{psc} \cdot d\varepsilon_1^e$  을 각각 계산하여  $d\varepsilon_1^p$ 와  $d\varepsilon_3^p$ 를 구하였다.  $\nu_{psc}$ 는 축변형률  $\varepsilon_1 = 0.005\%$ 까지의  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$  관계에서  $\varepsilon_1 = 0.001\%$ 의 변형률 수준에서 탄성적 상태에서의 변형률비  $-d\varepsilon_3^e / d\varepsilon_1^e$ 이다. 원래는  $(E_{max})_{psc}$ 와  $\nu_{psc}$ 도 응력비  $(\sigma_1 / \sigma_3)$ 의 함수이나  $\sigma_1 / \sigma_3$ 가 크게 되면 변형률증분( $d\varepsilon_1, d\varepsilon_3$ )이 크게 되어  $(-d\varepsilon_3 / d\varepsilon_1)$ 와  $(-d\varepsilon_3^p / d\varepsilon_1^p)$ 의 차이가 거의 없게 된다. 따라서, 이 양자의 차로써  $\sigma_1 / \sigma_3 = 1.0$  부근의 값을 사용하였다.

#### 4. 과압밀비의 영향

그림 6은 과압밀 Toyoura 모래를 사용한 평면변형률 압축시험의  $R \sim (-d\varepsilon_3 / d\varepsilon_1)$ 와  $R \sim (-d\varepsilon_3^p / d\varepsilon_1^p)$ 의 비교를 나타낸 그림이다. 이 그림을 보면 소성변형률증분/탄성변형률증분의 비가 작게 되어 있다. 과압밀 모래라도 양자의 차이가 거의 보이지 않는다. 그림 4의 Toyoura 모래의 경우는 과압밀비의 영향이 보이지 않는다. 한편, 미소변형률 수준에서는  $K=3.5$  선의 약간 위에 있다. 그 후 변형률이 증가함에 따라 거의  $K=3.5$  선 상에 있지만 변형률이 더욱 더 증가하여 파괴에 가까이 가면  $K=3.5$  선 보다 하부로 떨어져 가는 경향이 보인다. 이것은 파괴응력의 변형률 수준에서는 공시체의 변형률비 일률성이 크게 되어  $d\varepsilon_3$ 의 측정오차가 커서 측정된 측방향의 변위는 참값보다도 크게 되기 때문이라고 사료된다. 따라서  $D = -d\varepsilon_3^p / d\varepsilon_1^p$ 도 참값보다도 크게

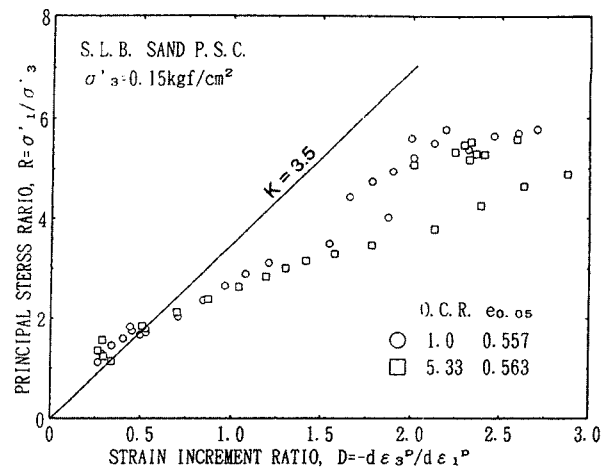


그림 5. 주응력비-주변형률증분비의 관계(과압밀비의 비교, S.L.B. 모래)

되어  $K=3.5$  선 보다 하방으로 위치하게 되어버렸기 때문이다. 그러나, 전체적으로 보면 과압밀비의 차이에 상관없이 미소변형률에서부터 파괴까지 Rowe의 응력-다이레이턴시 식이 근사적으로 성립하는 것을 알 수 있다.

한편, 그림 5의 S.L.B. 모래의 경우는 미소변형률 수준에서는  $K=3.5$  선의 위에 있다. 그러나, 변형률이 증가함에 따라 Toyoura 모래보다 더욱 더  $K=3.5$  선 보다 하부로 떨어져 간다. 이것은 S.L.B. 모래는 응력-다이레이턴시 식  $R = K \cdot D$ 의  $K$ 값이 Toyoura 모래의  $K$ 값보다 작은  $K \approx 3.0$  정도인 것을 의미하고 있다고 생각한다. 또, S.L.B. 모래의 경우에서도 미소변형률에서부터 피크 시까지 과압밀비가 주응력비-주변형률증분비 관계에 미치는 영향은 거의 없다.

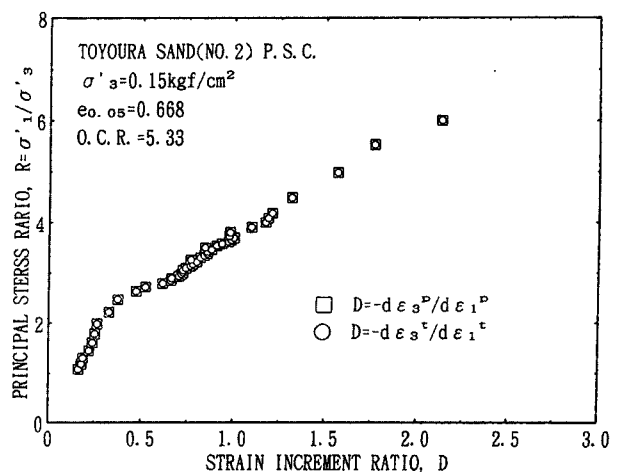


그림 6.  $R \sim (-d\varepsilon_3 / d\varepsilon_1)$ 와  $R \sim (-d\varepsilon_3^p / d\varepsilon_1^p)$ 의 비교(과압밀 Toyoura 모래)

## 5. 구속압의 영향

그림 7은 Toyoura 모래의 구속압  $\sigma_3 = 0.15 \text{ kgf/cm}^2 \sim 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ 의, 그림 8은 S.L.B. 모래의 구속압  $\sigma_3 = 0.05 \text{ kgf/cm}^2 \sim 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ 의 미소변형률 수준에서 피크까지의 주응력비-주변형률증분비 관계를 나타낸 것이다. 그림 7 Toyoura 모래의 경우는 구속압에 관계없이 미소변형률 수준에서부터 평균적으로  $K = 3.5$  선의 약간 위에 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 피크 부근에 가까이 가면  $K = 3.5$  선보다 약간 하향으로 떨어져간다. 여기서 주의해야할 점은 본래는 응력-다이레이턴시 식은 전단변형에 의한 소성변형률증분  $(d\epsilon_3^p)_s, (d\epsilon_1^p)_s$ 에 대한 것이다. 그러나,  $\sigma_3$  일정의 평면변형률압축시험에서는  $\sigma_1$ 의 증가와 함께 평균주응력  $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ 도 증가하여 그것에 의해 소성변형률증분  $(d\epsilon_3^p)_c, (d\epsilon_1^p)_c$ 가 발생한다. 실측으로 측정된 소성변형률증분은  $d\epsilon_1^p = (d\epsilon_1^p)_s + (d\epsilon_1^p)_c$  이고,  $d\epsilon_3^p = (d\epsilon_3^p)_s + (d\epsilon_3^p)_c$  이다. 따라서, 만약 평균주응력  $p$  일정의 시험을 실시하여  $(d\epsilon_3^p)_s, (d\epsilon_1^p)_s$ 를 직접 측정한다고 하면 데이터 점은 현재의 위치에서 우측으로 약간 이동할 것이다. 이것은 평균주응력 일정의 시험에서는  $\sigma_3$ 를 감소시키므로  $-(d\epsilon_3^p)$ 가  $\sigma_3$  일정시험보다도 증가하기 때문이다.

한편, 그림 8의 S.L.B. 모래의 경우는 미소변형률 수준에서는  $K=3.5$  선 위에 있지만 변형률이 증가함에 따라  $K=3.5$  선의 하방으로 떨어져감을 알 수 있다. 이 결과에서도 S.L.B. 모래가 Toyoura 모래보다  $K$ 값이 작고, 대략  $K=3.0$  정도임을 알 수 있다. 이 경우도  $R =$

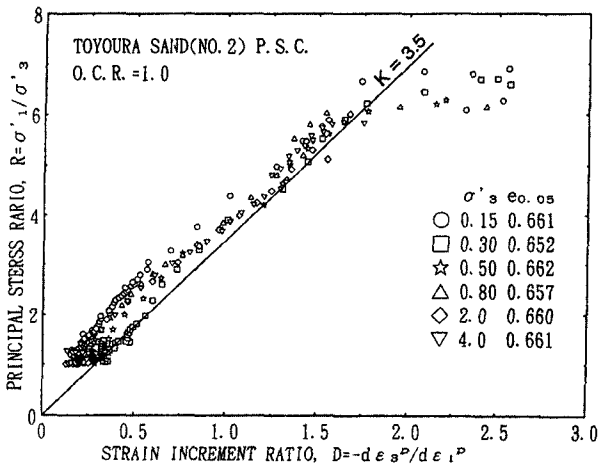


그림 7. 주응력비-주변형률증분비 관계(구속압의 비교, Toyoura 모래)

$K \cdot D$ ( $K$ 일정)에서 실측데이터의 어긋남도  $\sigma_3$  일정의 평면변형률압축시험 데이터인 것이 그 요인의 일부라고 사료된다. 그러나, Toyoura 모래는 구속압  $\sigma_3 = 0.15 \text{ kgf/cm}^2 \sim 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ 까지, S.L.B. 모래는  $\sigma_3 = 0.05 \text{ kgf/cm}^2 \sim 4.0 \text{ kgf/cm}^2$ 까지의 비교적 넓은 구속압 범위에도 불구하고 미소변형률 수준에서부터 피크까지의 주응력비-주변형률증분비 관계는 구속압  $\sigma_3$ 의 크기에 관계없이 거의 동일하다고 할 수 있다.

## 6. 이방성의 영향

그림 9 ~ 그림 19는 다양한 입상체에 대해  $\delta$ 를 바꾸어 평면변형률압축시험을 실시하여 미소변형률 수준에서 파괴까지의 주응력비-주변형률증분비 관계를 나타낸 것이다. 그림 9의 정규압밀 Toyoura 모래의 경우는 미소변형률 수준에서는  $\delta = 90^\circ$ 의 경우가  $\delta = 90^\circ$  이하의 경우보다  $K$ 값이 약간 크지만 그다지 큰 차이는 아니라고 생각된다. 그러나, 파괴부근에서는  $\delta = 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 25^\circ$ 로 됨에 따라  $K$ 값이 작다. 이것은 내부마찰각  $\phi_{max}$ 의 이방성 결과와 일치한다(문헌 (3)참조). 즉,  $\phi_{max}$ 이 클수록  $K$ 값도 약간 크다. 또, 그림 10의 과압밀 Toyoura 모래의 경우는 미소변형률 수준에서부터 파괴까지  $\delta = 90^\circ$ 의 경우가  $\delta = 90^\circ$  이외의 경우보다 약간 크다. 그러나,  $\delta = 90^\circ$  이외는 서로 그 차이가 거의 보이지 않는다.

한편, 그림 11, 12의 정규압밀 · 과압밀 S.L.B. 모래의 경우는 데이터의 분산이 약간 있기는 하지만 미소변형률 수준에서는  $\delta$ 에 의한 차이는 거의 없다. 그러나, 파괴 부근에서는  $K$ 값의 크기 순서는 내부마찰각  $\phi_{max}$ 의

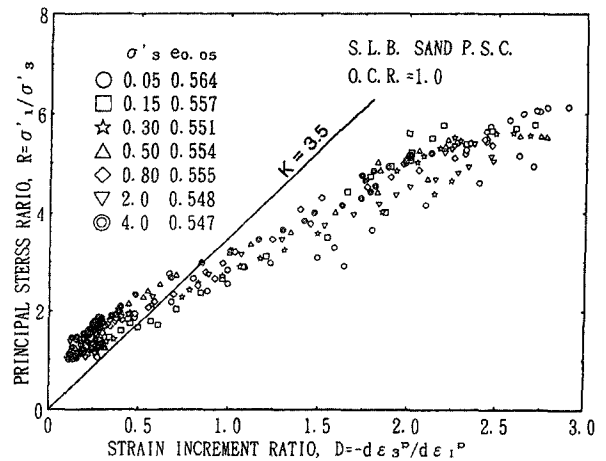


그림 8. 주응력비-주변형률증분비 관계(구속압의 비교, S.L.B. 모래)

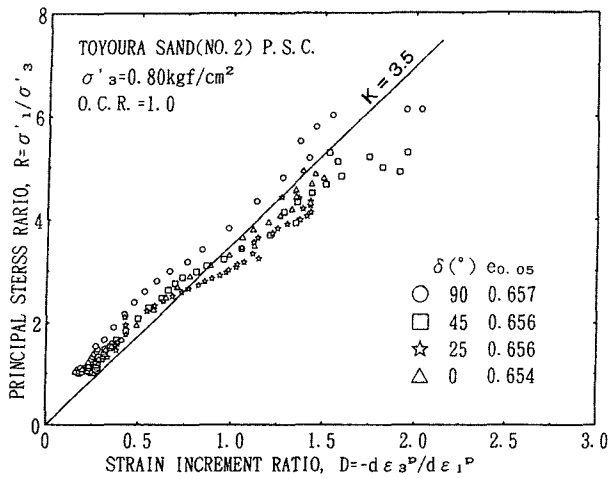


그림 9. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀Toyoura 모래)

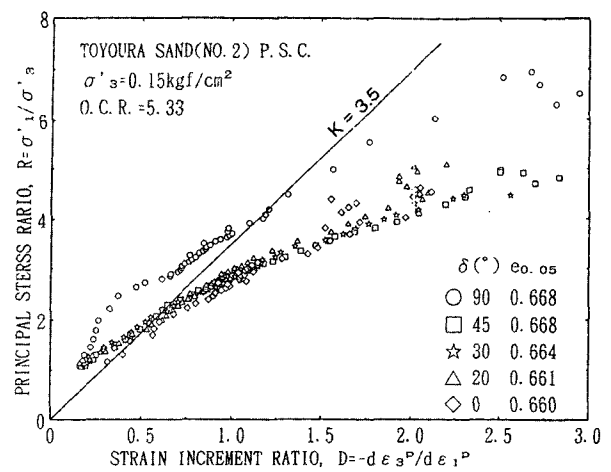


그림 10. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 과압밀Toyoura 모래)

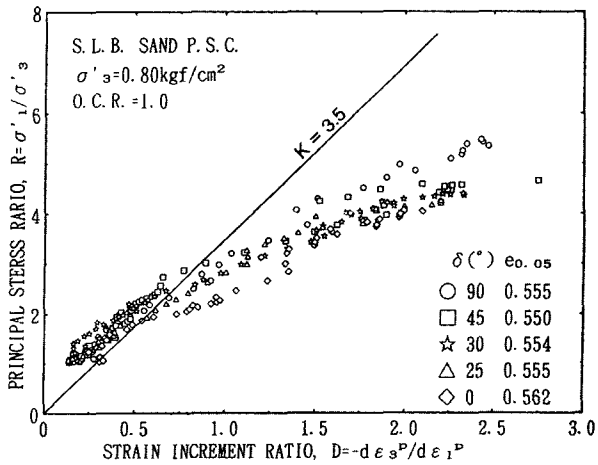


그림 11. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀S.L.B. 모래)

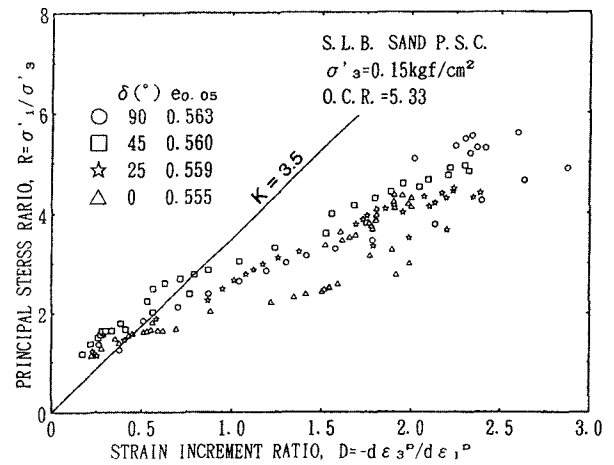


그림 12. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 과압밀S.L.B. 모래)

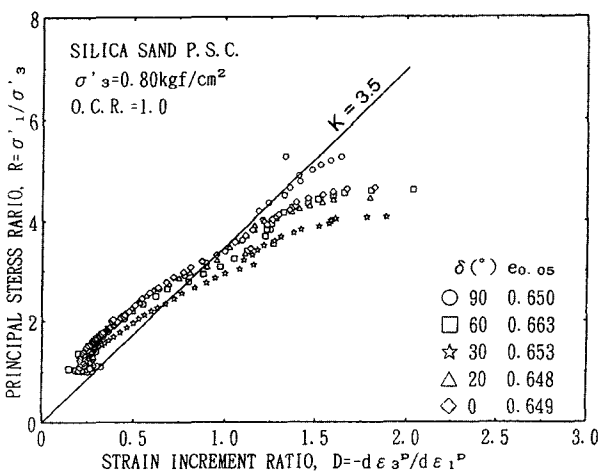


그림 13. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀Silica 모래)

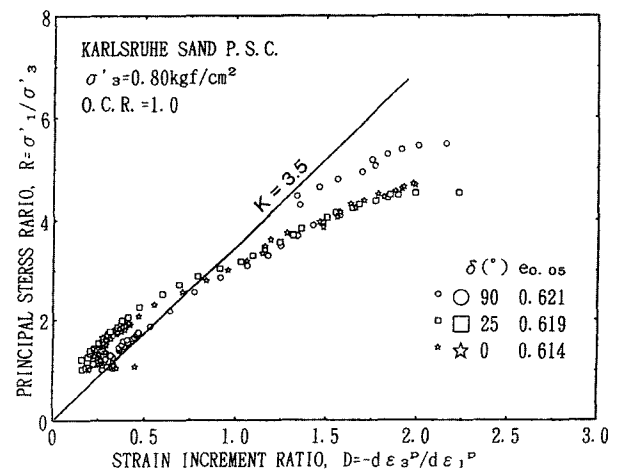


그림 14. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀 Karlsruhe 모래)

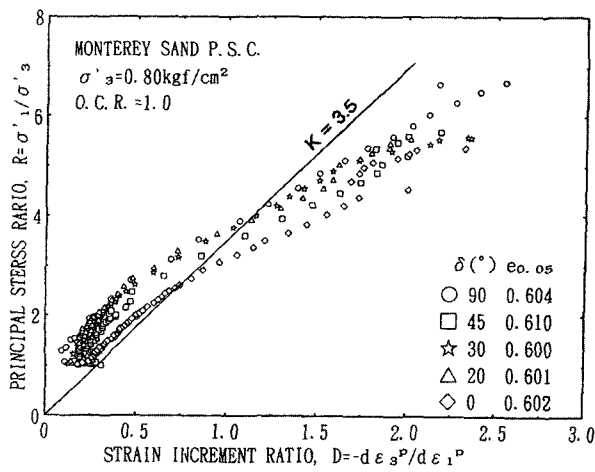


그림 15. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀 Monterey 모래)

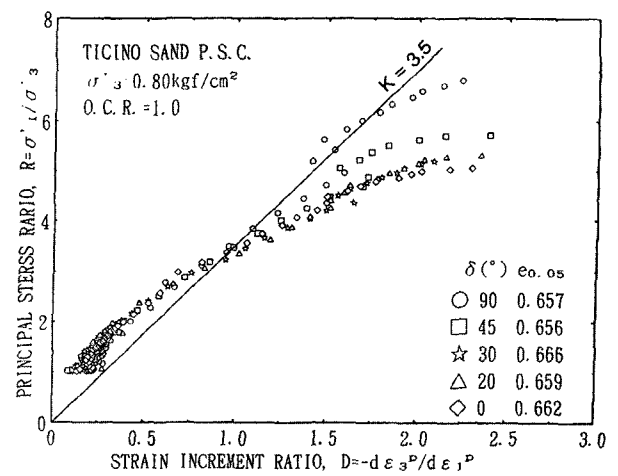


그림 16. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀 Ticino 모래)

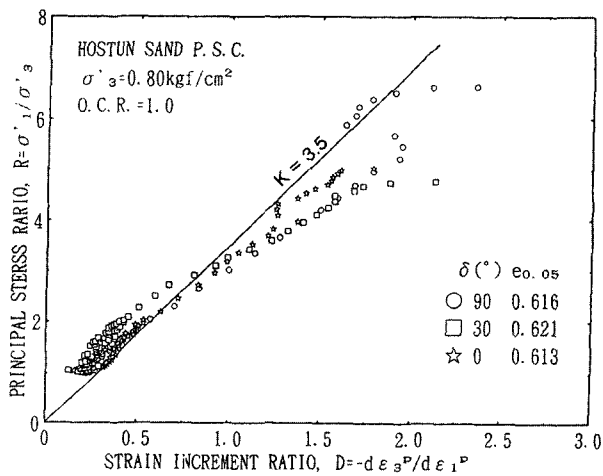


그림 17. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀 Hostun 모래)

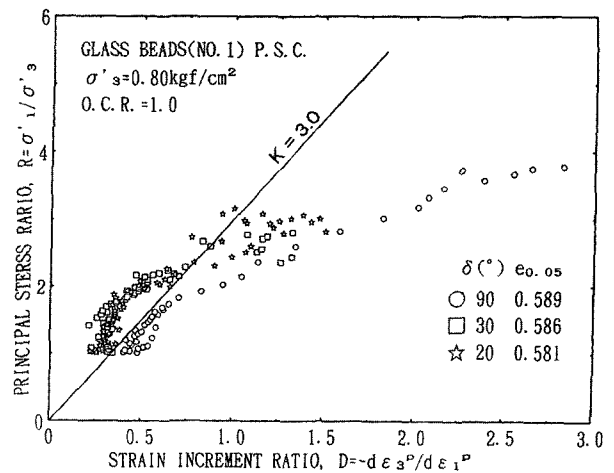


그림 18. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀 G.B. No.1)

크기 순서와 거의 일치하고 있다(문헌 (3)참조). 이 결과에서도 S.L.B. 모래의 경우는 Toyoura 모래의 경우에 비해  $K = 3.5$  선보다 하향으로 치우치는 경향이 보인다.

그림 13~그림 17의 Silica 모래, Karlsruhe 모래, Monterey 모래 Ticino 모래, Hostun 모래의 경우는 공히 미소변형률에서는  $K = 3.5$  선상에 있지만, 파괴 부근에 가면  $K = 3.5$  선보다 약간 하방으로 떨어져 간다. 또,  $\delta$ 의 값에 관계없이  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  변형률 수준에서부터 동일한 응력-다이레이팅시 식이 성립하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 변형률이 크게 되어 파괴 부근에서는 이방성의 영향이 약간 보인다. 즉,  $K$ 값의 크기는 내부마찰각  $\phi_{max}$ 의 이방성의 결과에 대응하고 있다는 것을 알 수 있다.

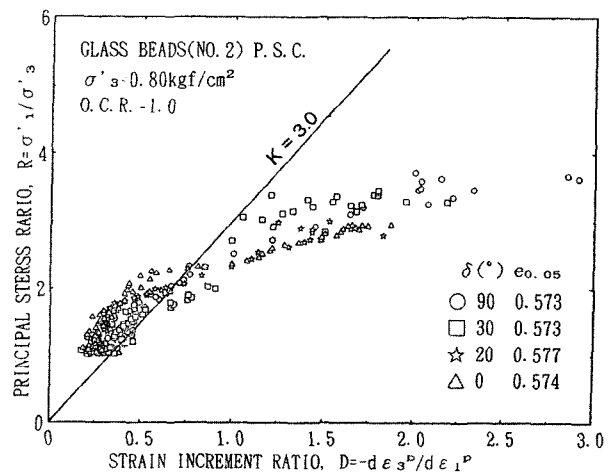


그림 19. 주응력비-주변형률증분비 관계(이방성의 비교, 정규압밀 G.B. No.2)

그림 18~그림 19의 유리구슬(Glass beads)의 결과는 같은 변형률에서의 응력비의 변화가 심하여 데이터의 분산이 크므로 결론을 도출하기가 곤란하지만, 모래의 경우에 비교해 전체적으로 K값의 크기가 작다고 할 수 있다. 미소변형률에서는  $\delta$ 에 의해 데이터의 분산이 있지만 전체를 크게 보면 이방성의 영향은 거의 없다고 보아도 무방하리라 생각된다.

## 7. 결론

- (1) 미소전단변형률 수준에서 파괴까지 과압밀비가 주 응력비-소성주변형률증분비 관계에 미치는 영향은 없다.
- (2) 미소전단변형률 수준에서 파괴까지의 주응력비-소성주변형률증분비 관계는 구속압  $\sigma_3$ 의 크기에 관계 없이 거의 동일하다.
- (3) 미소전단변형률 수준에서는 이방성이 주응력비-소성주변형률증분비 관계에 미치는 영향은 거의 없지만, 파괴 부근에서는 K값의 크기는 내부마찰각  $\phi_{max}$ 의 이방성의 결과에 대응하여  $\delta$ 에 의해 다른 값을 갖는다고 사료된다. 즉,  $\phi_{max}$ 이 작을수록 K값은 작다.
- (4) K값은 모래에 따라 다르다. 또한, 유리구슬의 경우는 모래에 비해 물성이 다르므로 K값이 작다.
- (5)  $\sigma_3$  일정의 평면변형률압축시험에서는 Rowe의 응력-다이레이턴시 식은 근사적으로 성립한다. 실험데이터와 이 식이 완전히 일치하지 않는 이유의 하나로써 평균주응력 일정의 시험을 실시하지 않았기 때문이라고 사료된다.

## 참고 문헌

1. 박춘식, 龍岡文夫, 장정옥, 정진교(1994), "평면 변형률 압축상태에서의 모래의 미소 변형률 측정", 「한국지반공학회지」, 제10권, 제1호, pp.27~45.
2. 박춘식, 장정옥(1998), "입상체의 요소시험에 있어서 단면마찰경감", 「대한토목학회논문집」, 제18권 제3-5호, pp.689~698.
3. 박춘식, (1997), "평면 변형률 압축시험에 의한 각종 모래의 강도·변형특성의 이방성" 「한국지반공학회지」, 제13권, 제5호, pp.5~18.
4. 安部文洋(1989), "微小 ひずみレベルにおける平面ひずみ壓縮での砂の變形特性", 日本東京大學大學院修士論文.

5. 朴 春植, 後藤 聰, 龍岡文夫(1992), "砂と礫の實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.
6. 朴 春植(1993), "平面ひずみ壓縮試験による各種の砂の變形・強度特性", 日本東京大學大學院博士論文.
7. Arthur, J.R.F. and Menzies, B.K.(1972), "Inherent Anisotropy in a Sand", Geotechnique, Vol.22, No.1, pp.115~128.
8. Arthur, J.R.F, Chua, K.S. and Dunstan, T.(1977), "Induced Anisotropy in a Sand", Geotechnique, Vol.27, No.1, pp.13~30.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Lam, W. K. and Tatsuoka, F.(1988), "Effects of Initial Anisotropic Fabric and  $\sigma_2$  on Strength and Deformation Characteristics of Sand", Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp. 89~106.
13. Oda, M.(1972), "Initial Fabrics and their Relations to Mechanical Properties of Granular Material", Soils and Foundations, Vol.12, No.1, pp.17~36.
14. 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.
15. Oda, M.(1981), "Anisotropic Strength of Cohesionless Sands", Journal of GE Div., Proc. of ASCE, 107~GT9, pp.1219~1231.
16. 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.
17. 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.
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 2001. 8. 7, 심사완료일 2002. 1. 15)