

# 평면 변형률 압축상태에서의 모래의 미소 변형률 측정

Small Strain Measurements of Sands in Plane Strain Compression

박 춘 식* <sup>1</sup>	龍岡文夫* <sup>2</sup>
Park, Choon -Sik	Tatsuoka, Fumio
장 정 욱* <sup>3</sup>	정진교* <sup>4</sup>
Jang, Jeong -Wook	Chung, Chin - Kyo

---

## Abstract

It has been demonstrated in plane strain compression tests performed on dense Toyoura sand and Silver Leighton Buzzard sand, that the newly developed instrumentation for small strain measurements was capable of measuring the altering stiffness of sands for a wide range of shear strain from  $10^{-6}$  to  $10^{-2}$ .

It was found that for the range of shear strain( $\gamma$ ) from  $10^{-5}$  to those at peak, the Rowe's stress-dilatancy relation seemed to be a good approximation for Toyoura sand and Silver Leighton Buzzard sand. However, the value of K and Poisson's ratio(at elastic range :  $\nu_{psc}^e$ ) varied with sand types. It was also found that the value of  $\nu_{psc}^e$  and stress-dilatancy relation was irrespective of overconsolidation ratio(OCR).

## 요 지

본 연구는 미소 변형률범위( $10^{-5}$ 이하)에서 파괴상태까지의 변형률을 정밀하게, 그리고 연속적으로 구하기 위해 필요한 미소 변위 측정시스템을 보고하고, 이 측정 시스템을 이용하여 평면 변형률 상태에서의 모래의 미소거동을 자세히 연구하였다.

그 결과, Rowe의 응력-다이어턴시 관계는 전단변형률  $10^{-5}$  이하의 극히 미소한 변형률 수준에서 파괴상태까지 성립하였다. 그러나,  $R=K \cdot D$ 에서 K 값은 모래의 종류에 따라 달랐다. 또, 과압밀비가 탄성영역상태에서의 포아송비( $\nu_{psc}^e$ ) 및 Rowe의 응력-다이어턴시 관계에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 알았다.

---

\*<sup>1</sup> 정희원, 창원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

\*<sup>2</sup> 일본 동경대학 생산기술연구소 교수

\*<sup>3</sup> 정희원, 현대건설 기술연구소 선임연구원

\*<sup>4</sup> 정희원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 강사

## 1. 서 론

확대기초의 침하나 성토 기초의 변형 문제에 있어서 평면 변형을 해석을 행하는 경우가 많다. 또, 이러한 해석에서는 지반이 경질인 경우나 크기가 작은 작용 하중에 대한 해석의 경우는  $10^{-4}$  이하의 전단 변형률에 있어서의 변형계수가 필요하게 된다. 원위치에서의 탄성과 탐사에서 측정되는 탄성변형계수와 관련시키기 위해서는 실내 시험에서도  $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 의 변형률 범위에서의 변형 특성을 측정할 필요가 있다. 그러나, 지금까지 미소 변형률에서부터 파괴상태까지 연속적이고 정밀하게 흙의 전단 변형계수를 측정할 예가 거의 없다. 왜냐하면,  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  정도의 변형률을 측정하는 데는 통상  $0.1\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ (공시체 높이 10cm에서)의 변형량의 측정과, 이 미소 변형률에 대응한 미소 응력을 측정해야 하기 때문이다. 더우기 흙의 전단변형계수는 응력과 변형률의 이력·현재의 상태·재하조건에도 크게 영향을 받는다. 또, 토질재료는 단순한 선형 등방 탄성체나 완전 소성체도 아니고, 그 변형계수는 변형률 크기 및 응력 수준에 의존한다. 그 때문에 단순 재하시와 반복재하시의 변형계수의 관계도 복잡하다.

공시체에 작용하는 응력과 변형률을 직접 측정하지 않고 탄성파의 전달속도를 측정하는 초음파 진동법과 공시체의 공진 진동수로부터 변형계수를 구하는 공진법 토질시험은 토질동역학의 분야에서 널리 사용되어온 실내 동적 시험법이다. 그러나, 이러한 동적 시험법은

① 발생할 수 있는 변형률의 크기에 한도가 있고(초음파 진동법은  $10^{-6}$  정도, 공진법 토질 시험에서는  $5 \times 10^{-4}$  정도), 특별한 공리를 하지 않으면 하나의 시험에서 넓은 변형률 범위의 변형계수와 최대강도를 얻기 힘들다.

② 공진법 토질시험에서는 상대적으로 큰 변형률에서의 변형계수를 측정할 수 있지만, 반복 재하 횟수가 너무 많고, 또 그것을 제어하는

데 곤란하기 때문에 반복재하에 따른 변형률 경화, 혹은 연화가 있는 경우는 그 효과의 제어가 불가능하다.

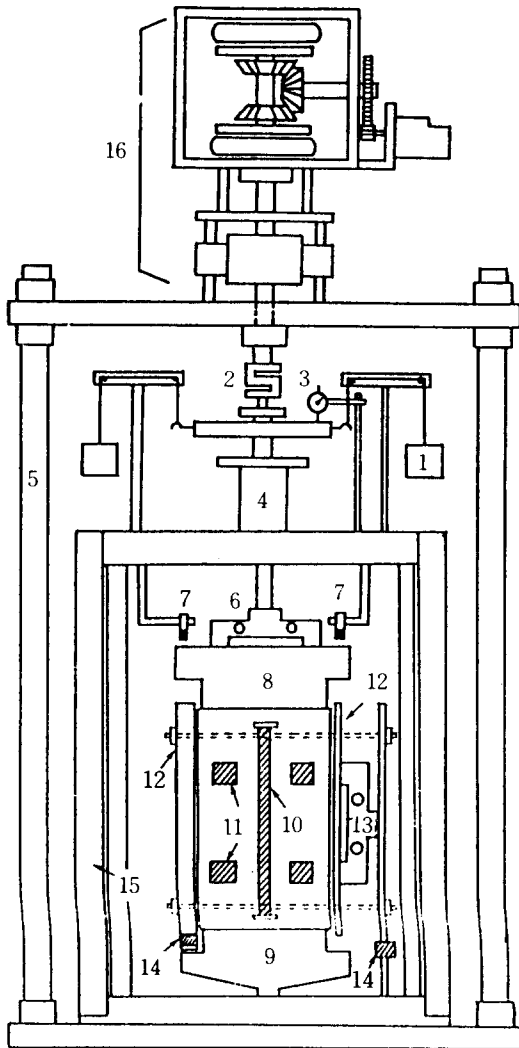
③ 기본 원리가 단순하지 않고, 시험장치도 매우 복잡하다.

라는 문제점이 있다. 그래서, 미소 변형률에서 최대강도까지의 일관한 응력·변형률관계를 구할 수 있고, 또, 단순재하와 반복재하의 시험이 가능한 전단장치를 동경대학 생산기술연구소 지반공학 연구실에서 개발하여 왔다. 본 연구는 이 측정 시스템을 사용하여 일본의 대표적 표준사인 Toyoura sand와 영국의 대표적 표준사인 Silver Leighton Buzzard sand(이하 S.L.B.sand) 공시체의 평면 변형률 압축시험을 실시하여, 미소 변형률 수준에서 파괴 상태까지의 bedding error (3. 참조)의 영향과 포아송비( $\nu$ ) 및 응력-다이러턴시 관계를 조사하였다.

## 2. 평면변형률 압축시험에서의 미소 변위 측정 장치

평면 변형률 압축시험 장치를 그림 1에 나타내고 있다. 측정하는 항목으로서는 축하중, 구속압, 축변위(dial gauge), 중간 주응력( $\sigma_2$ ), 구속판과 공시체 사이의 마찰력(2개소), 국소 축변위(2개소), 비접촉 변위계에 의한 최소 주응력방향의 변위(8개소), 비접촉 변위계에 의한 축변위(2개소), 합계 18항목을 측정한다. 각각의 측정 장치로 부터 측정된 아날로그 출력은 2개의 A/D 변환기에 의해 디지털로 변환되어  $\pm 5V$ 의 범위로 컴퓨터에 기록된다. 공시체의 형상과 치수는 폭( $W_0$ )=8cm, 길이( $L_0$ )=16cm, 높이( $H_0$ )=20cm인 직방체이다(그림 3(a) 참조).

평면 변형률 압축시험에서 직방 공시체의 변형모드는 그림 2와 같다. 중간 주응력방향( $\sigma_2$ )은 변형이 '0'( $\epsilon_2=0$ )이므로 측정해야 할 변형률은 축변형률  $\epsilon_1$ 과 축방향( $\sigma_3$ 방향)변형률  $\epsilon_3$ 이다. 공시체의 변형이 비일률적인 경우는 축방



- |   |                                 |
|---|---------------------------------|
| 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                           | 15. PRESSURE CELL               |
| 8. CAP                                  | 16. LOADING SYSTEM              |

그림 1. 평면변형을 압축시험장치의 전체도

양의 변위  $\Delta W_1$ 과  $\Delta W_2$ 는 같지 않기 때문에 공시체의 양측면에서 변위를 측정할 필요가 있다. 이것은 축변위에 대해서도 마찬가지이다.

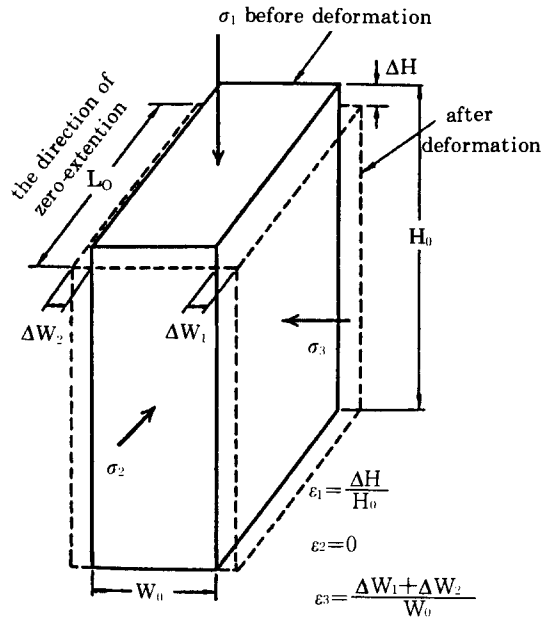
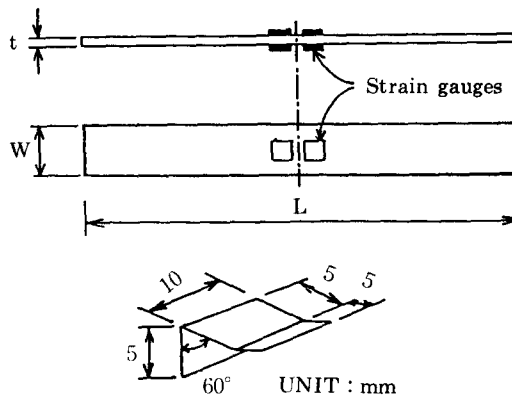
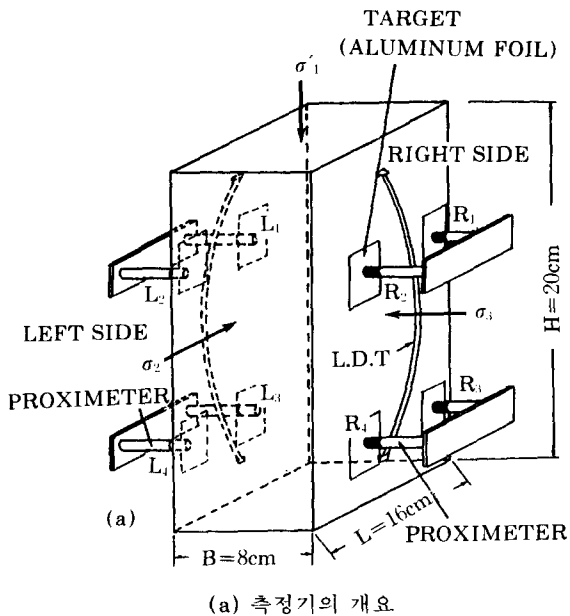


그림 2. 공시체 변형의 모식도

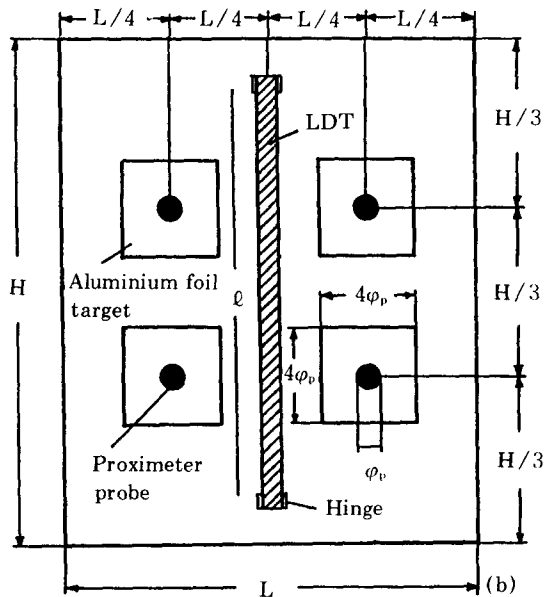
## 2.1 스트레인 게이지형 구속 축변위 측정장치 (Strain Gauge Type Local Deformation Transducer : LDT)

그림 3(a)는 평면 변형을 공시체의 미소 변형을 측정장치를 도식적으로 나타낸 것이다. 축변형을 측정에는 Goto et.al(1991)<sup>(5)</sup>가 등방 압밀 및 삼축 압축시험용으로 개발한 LDT를 본 연구에서는 평면 변형을 압축시험용으로 새로 제작하여 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 2개의 LDT를 공시체의 측면에 하나씩 장치하여 그것들의 측정치의 평균을 축변형률로 하였다. LDT는 강성이 작은 판에 스트레인 게이지(strain gauge)를 붙혀 2점 간의 상대변위가 gauge-strain으로 변환되어 국소 축변형률(local axial strain)을 구하는 것이다. 실험에 사용한 LDT는 녹슬지 않고, 강성이 작고, 선형성, 재현성이 있어야 한다는 조건으로 부터 동판을 사용했다. 본 연구에 사용한 LDT의 치수와 그것을 공시체에 붙이기 위한 hinge를 그림 4에 표시한다. 공시체에 붙이는 hinge와 멤



Test Dimension	P.S.C.(H=20cm)
L(mm)	170
W(mm)	3
t(mm)	0.3

그림 4. 국소 측변위 측정장치(LDT)의 상세



- $\phi_p$  : diameter of proximeter probe
- W : specimen width
- L : specimen length
- H : specimen height
- LDT : local deformation transducer
- $\ell$  : gauge length of LDT

(b) 측정기의 위치  
그림 3. 공시체의 비소변형측정

브레인(membrane)과는 permabond사의 268-ADHESIVE를 사용해서 순간 접착시켰다.

## 2.2 측방 변위 측정시스템(Lateral Deformation Measuring System : LDMS)

평면 변형률 압축시험에서 최소 주변형률  $\epsilon_3$ 를 높은 정도로써 측정할 예는 거의 없다. 그 이유는, 예를들면 포화 공시체에서  $\epsilon_3 = \epsilon_v$ (체적 변형률) -  $\epsilon_1$ (측변형률)과 같이  $\epsilon_3$ 를 측정해서 역산으로  $\epsilon_3$ 를 구하면,  $\sigma_3$ 일정 시험에서도  $\epsilon_3$ 에는  $\sigma_3$ 면과  $\sigma_2$ 면에서의 멤브레인 관입에 의한 오차,  $\epsilon_1$ 에는  $\sigma_1$ 면에서의 bedding error(갭, 혹은 페데스탈과 공시체 사이의 걸보기 변위등)에 의한 오차가 포함되어 도저히 정도 높은  $\epsilon_3$ 를 구할 수가 없기 때문이다.

그림 3(a)는 직방 공시체의 최소 주변형률  $\epsilon_3$ 를 직접 측정하기 위하여 개발한 LDMS를 공시체에 장치한 모습이다. LDMS는 gap sensor 혹은 proximity transducer(비접촉형

변위계)를 공시체의 최소 주변형을 측정면에 각각 4개씩, 합계 8개를 사용한다.

Gap sensor는 probe에 고주파 코일을 사용해서 코일내에 반도체의 타겟(target)가 접근했을 때 발생하는 과전류에 의한 probe 코일의 인덕탄스의 변화를 이용해서 probe가 타겟에 접촉하지 않고도 양자간의 거리의 변화를 측정한다. 한쪽의 4개의 gap sensor는 고정판에 고정되어 있어 셀(cell)의 내부에 넣어도 공시체의 측방변형에 따른 gap sensor와 공시체의 접촉을 외부에서 원격조정으로 정확하게 미조정할 수 있도록 고안되어 있다. 즉 공시체의 변형이 진행하여(공시체 측면이 probe에 접근하여) gap sensor가 측정 한계에 달한 경우 probe 군(群) 전체를 수평방향으로 이동시킴으로 측정 범위의 확대를 꾀하였다.

공시체의 축압축에 의해 타겟도 측방향으로 변위가 발생하기 때문에 본래는 그것에 따라 비접촉 변위계를 아래로 이동해야 정확한 수평 변위량을 측정할 수가 있다. 그러나, 실험중에 그것을 일일이 행하는 것은 불가능하다.

따라서, 미리 측면 형상을 구해 이것에 대한 보정을 하지 않으면 안된다. 측변형에 의해 공시체는 실제의 측방변위  $\Delta W$ 에 대해 오차가 생긴다. 安部(Abe, 1989)<sup>(1)</sup>는 Toyoura sand를 사용하여, 朴(1990)<sup>(2)</sup>은 S.L.B.sand(그림 5의 입경 가적곡선 참조)를 사용하여 이 오차를 측정하였다. 구체적으로는 비접촉형 변위계와 더미(dummy)와의 사이에 수평방향의 변위와 출력 전압의 관계를 8개 각각에 대해 검정하고 수직방향에 대한 기울기를 구하였다. 다음에 전단직전의 검정을 각 공시체에 대하여 우선 수평방향에 관해 기울기를 구하였다. 다음에 전단직전의 검정을 각 공시체에 대하여 우선 수평방향에 관해 비접촉형 변위계와 멤브레인 상의 알루미늄호일과의 출력 전압과 수평 변위와의 관계를 8개 각각에 대해 구하였다. 그 검정치를 사용하여 이번에는 수직방향으로 비접촉형 변위계를 움직여 공시체 측면의 기울기를 구하였다. 그 검정 결과를 사용하여 대표적인 실험예에 관해서 오차를 구한것이 그림 6이다. 이것을 보면 Toyoura sand의 소형 평면 변형

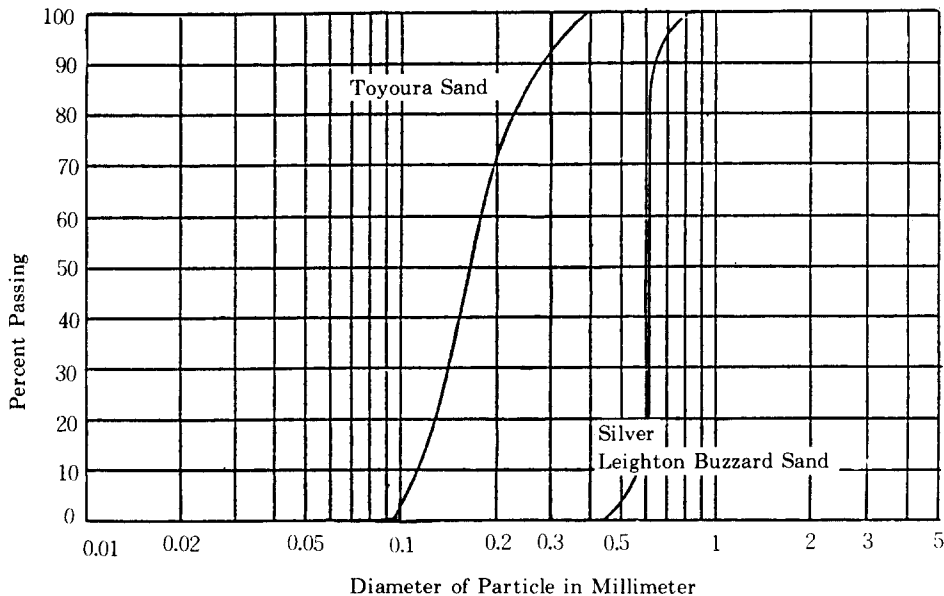


그림 5. Toyoura sand와 S.L.B.sand의 입경가적곡선

를 압축시험( $W_0=4\text{cm}$ ,  $L_0=8\text{cm}$ ,  $H_0=10.5\text{cm}$ )의 경우, 측방방향의 오차는 측변형률 1% 정도에서 약  $0.5\mu\text{m}$ (0.00125%) 정도이고, S.L.B. sand의 중형 평면 변형률 압축시험( $W_0=8\text{cm}$ ,  $L_0=16\text{cm}$ ,  $H_0=20\text{cm}$ )의 경우는  $0.4\mu\text{m}$ (0.0002%) 정도이다. 즉, 모래의 평균입경  $D_{50}$ 이 적어도  $0.62\text{mm}$  이하이면 측방 방향의 오차는 무시할 정도인 것을 알았다. 이것은 비접촉형 변위계의 특징인 「어떤점에서의 변위를 읽는 것이 아니고, 어떤 범위를 읽는다.」는 것에 의해, 거의 미소한 수직방향의 기울기는 측방방향 변위의 측정에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다. 또, S.L.B.sand의 경우도 Toyoura sand보다는 측면이 평면적이지 않지만 인공적으로 몰드내에 공중 낙하시켜 제작한 공시체를 사용하기 때문에 공시체 측면은 거의 평면으로 보아도 무방하다는 것을 알 수 있다.

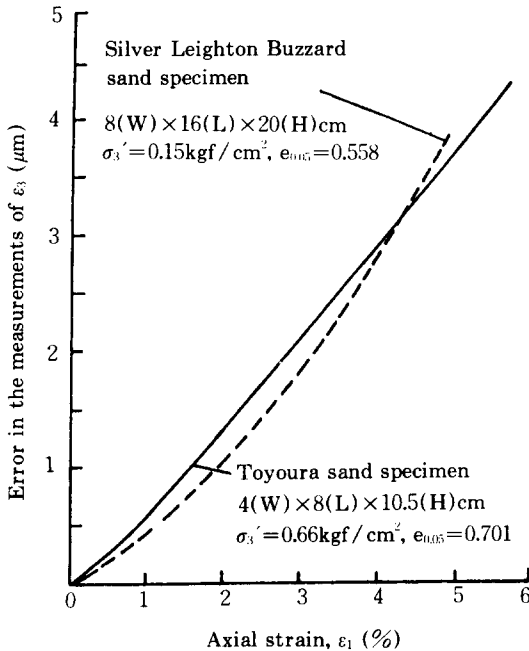


그림 6. 측변형률과 수평방향 측정변위 오차의 관계

한편, 측방변위 측정장치는 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 좌우 4개씩 합계 8개의 비접촉

형 변위계를 사용하여 공시체의 높이를 3등분한 곳에서 각각의 측방변위를 측정하여 그것들의 평균을 구해 최소 주변형률  $\epsilon_3$ 를 계산하도록 되어있다. 그러나, 이 방법으로 구한  $\epsilon_3$ 를 공시체 전체에서의  $\epsilon_3$ 의 평균치로써 대표할 수 있는가를 검토할 필요가 있다.

그림 7~그림 10에 S.L.B.sand의 과압밀 공시체를 사용한 평면변형률 압축시험에 있어서  $\epsilon_3$ 에 대한 각 비접촉형 변위계의 변위를 나타낸다. 그림 7을 보면 전단 초기는 좌측의  $L_1$ ,  $L_2$  2개의 proximeter가 나타내는 변위는 거의 일치함을 알 수 있다.  $L_3$ 와  $L_4$ 등 남은 3조의 proximeter도 같음을 알 수 있다. 즉, 공시체의 길이 방향( $\sigma_2$ 방향)으로는 공시체의 변형이 일률적이고 강체적 회전이 생기지 않는다. 따라서,  $L_1$ 과  $L_2$ 치를 평균하는 것은 문제가 없다. 남은 3조의 경우도 마찬가지이다. 문제는  $L_1$ ,  $L_2$ 의 평균치를  $L_{upper}$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ 의 평균치를  $L_{lower}$ 로 할때,  $L_{upper}$ 와  $L_{lower}$ 의 평균  $L_{mean}$ 을 공시체 좌측의 표면 변위의 평균치로써 적합한가이다(공시체 우측도 동일). 그림 7에 있어서  $L_{upper}$ 와  $R_{upper}$ 를 더한  $M_{upper}$ ,  $L_{lower}$ 와  $R_{lower}$ 를 더한  $M_{lower}$ 를 비교한 것이 그림 11~그림 13이다. 이들 그림에서  $\epsilon_3$ 가 약 0.002%까지는  $M_{upper}$ 와  $M_{lower}$  양자는 극히 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 공시체의 높이 방향의  $\epsilon_3$  분포가 일률적이라는 것을 시사하고 있음을 말해준다. 따라서, 위에서 언급한  $\epsilon_3$ 의 계산방법에는 하등의 모순이 없다고 생각한다.

그림 9에 나타난 바와 같이  $L_{upper}$ 와  $R_{upper}$ 는 거의 동일한 높이에서 측정했음에도 불구하고, 양자의 변위는 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다( $L_{lower}$ 와  $R_{lower}$ 도 동일). 즉, 공시체 좌우의 변위는 같지 않다. 다시말하면, 공시체가  $\sigma_1 \sim \sigma_3$  면내에서 강체적 회전과 평행이동을 하고 있다. 그 이유는 아직 명확하지 않다. 그림 7~그림 10에서 알 수 있듯이 각각의 비접촉형 변위계의 읽음치의 평균을 취해도 합리적으로  $\epsilon_3$ 의 평균치가 구해진다고 말할 수 있다.

한편, 그림 14에서 어느 proximeter도 측변형률  $\epsilon_1$ 의 미소변형률( $10^{-5}$  이하)의 영역에 있

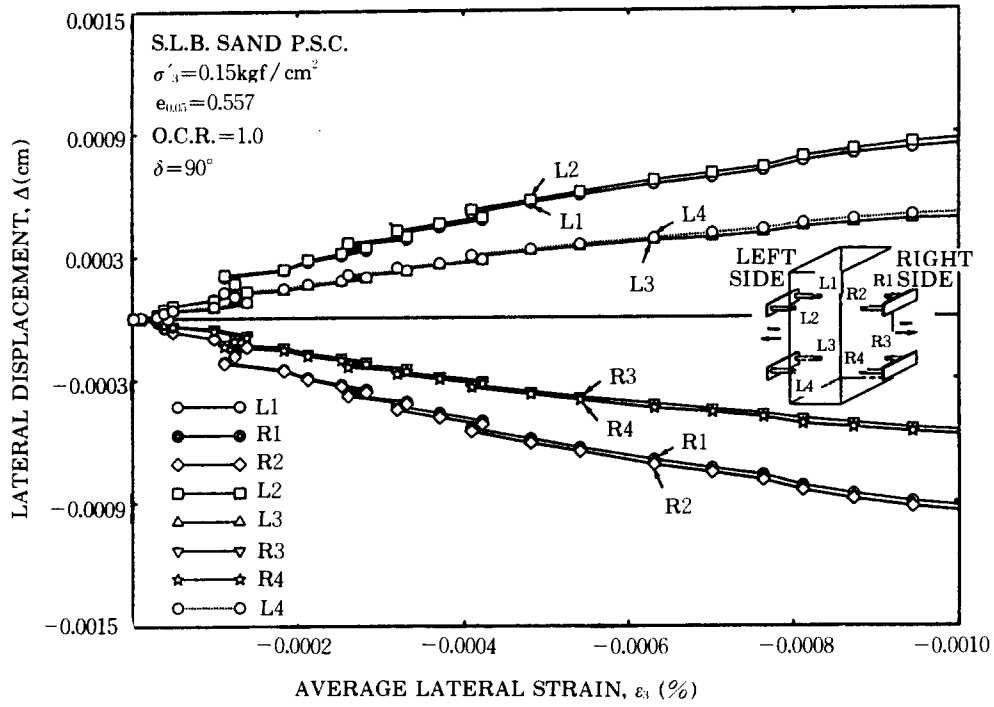


그림 7.  $\epsilon_3$ 에 대한 비점축형 변위계의 변위 ( $\epsilon_3 = -0.001\%$ 까지)

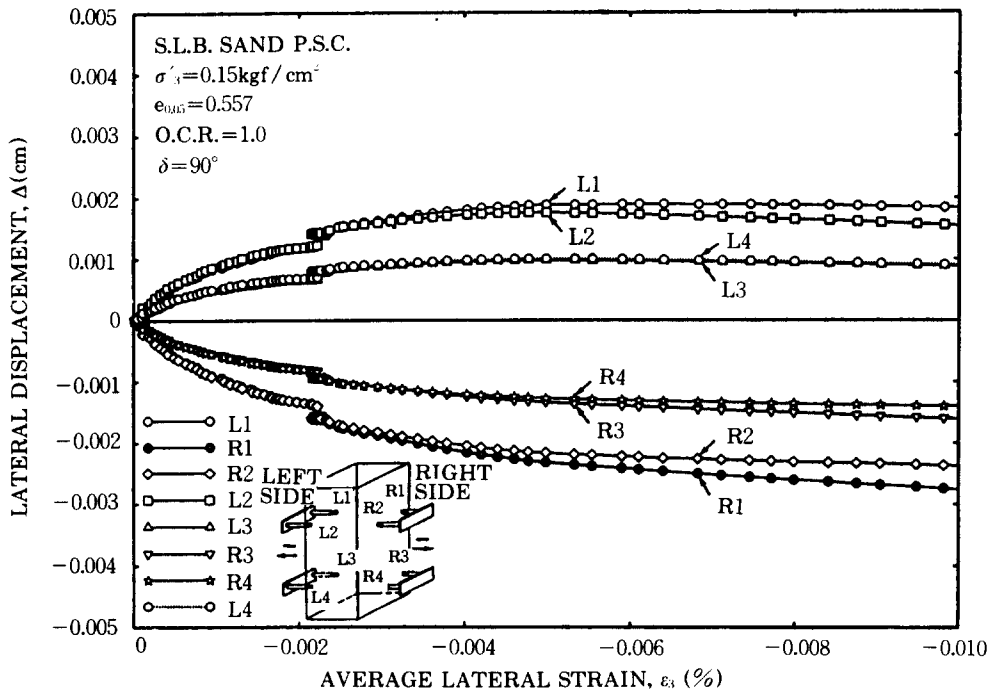


그림 8.  $\epsilon_3$ 에 대한 각 비점축형 변위계의 변위 ( $\epsilon_3 = -0.01\%$ 까지)

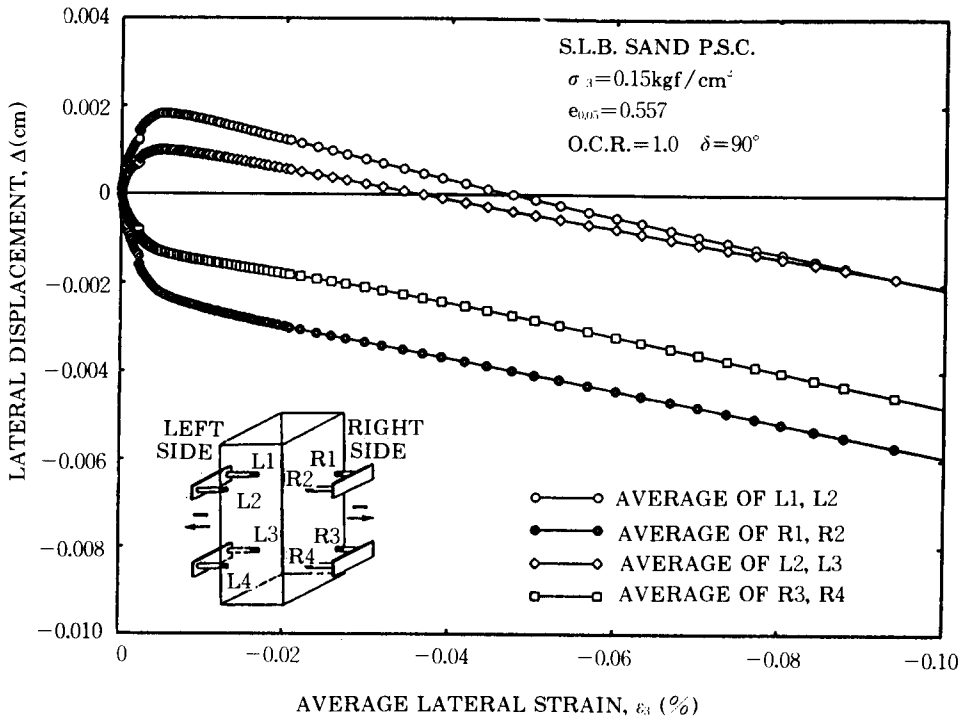


그림 9.  $\epsilon_3$ 에 대한 각 비접촉형 변위계의 변위( $\epsilon_3 = -0.1\%$ 까지)

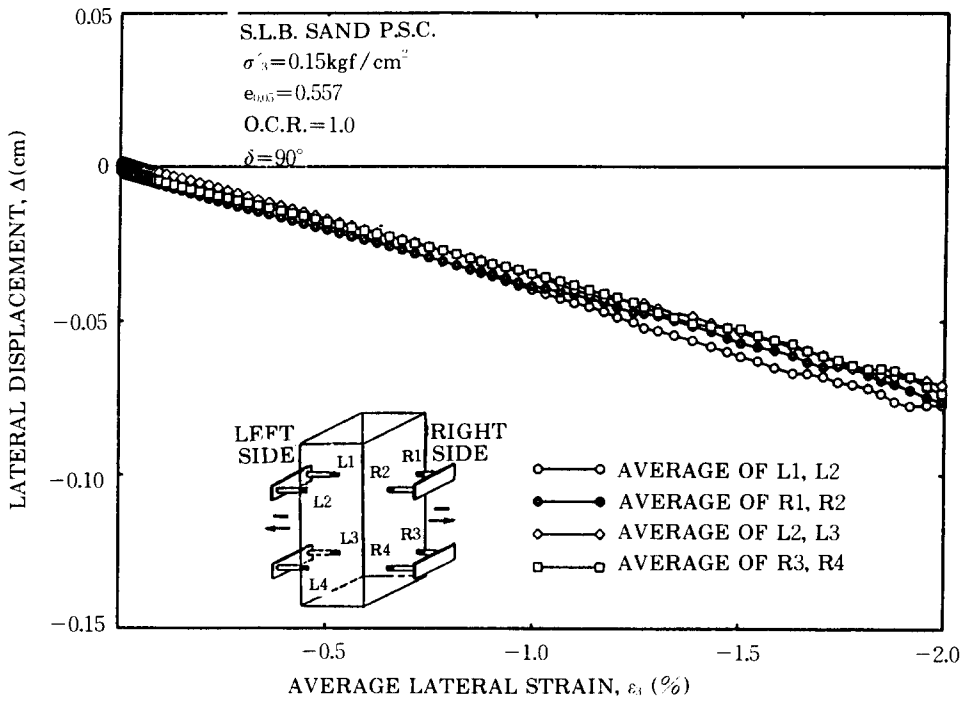


그림 10.  $\epsilon_3$ 에 대한 각 비접촉형 변위계의 변위( $\epsilon_3 = -2.0\%$ 까지)



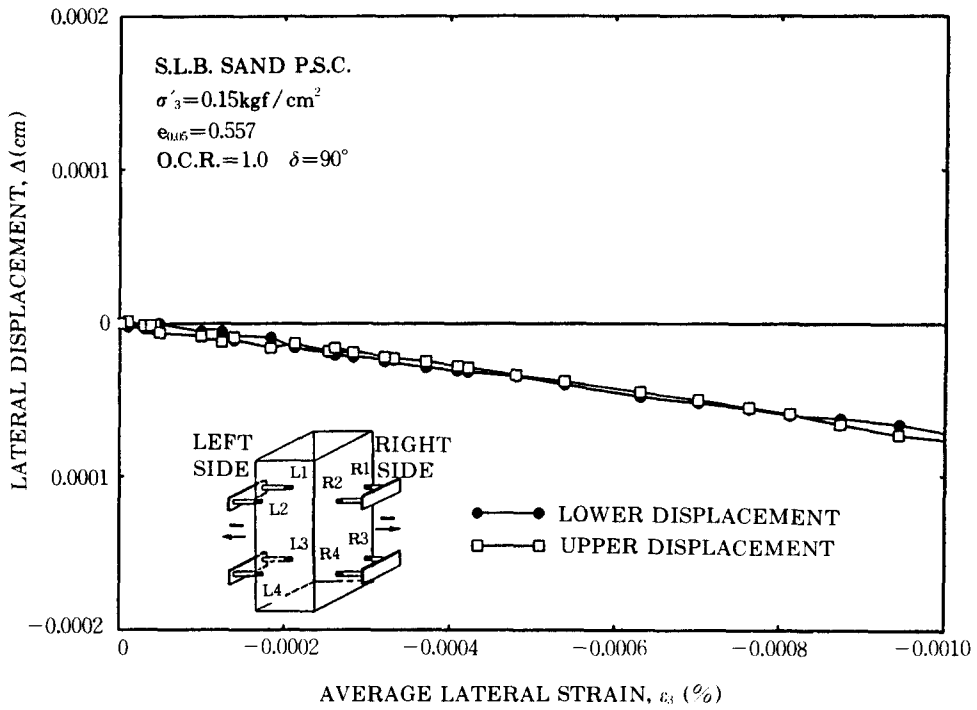


그림 11. 공시체 상하의 변위 비교( $\epsilon_3 = -0.001\%$  까지)

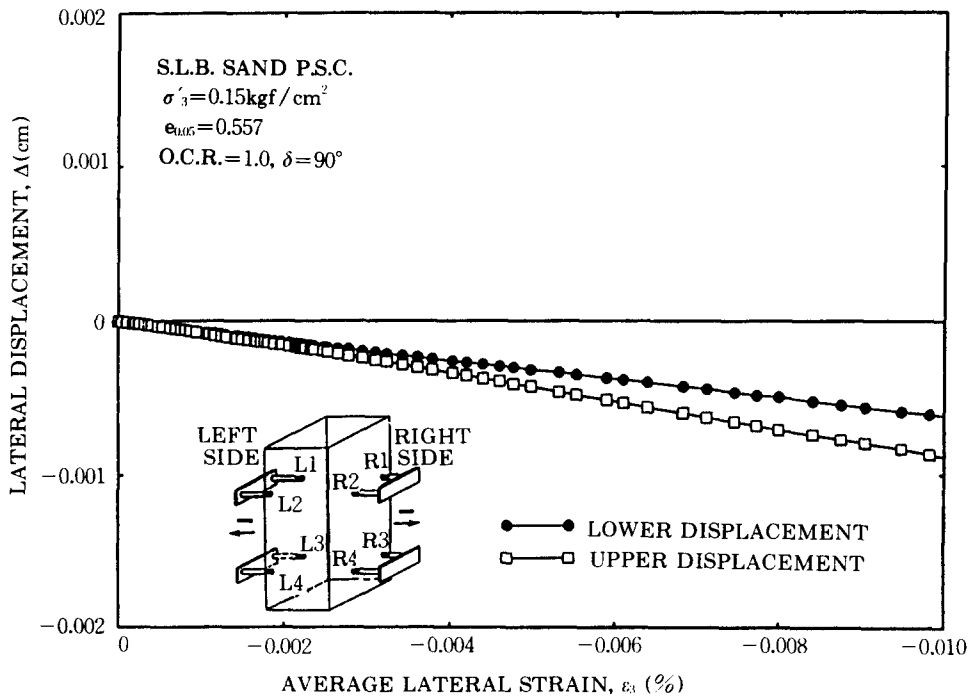


그림 12. 공시체 상하의 변위 비교( $\epsilon_3 = -0.01\%$  까지)

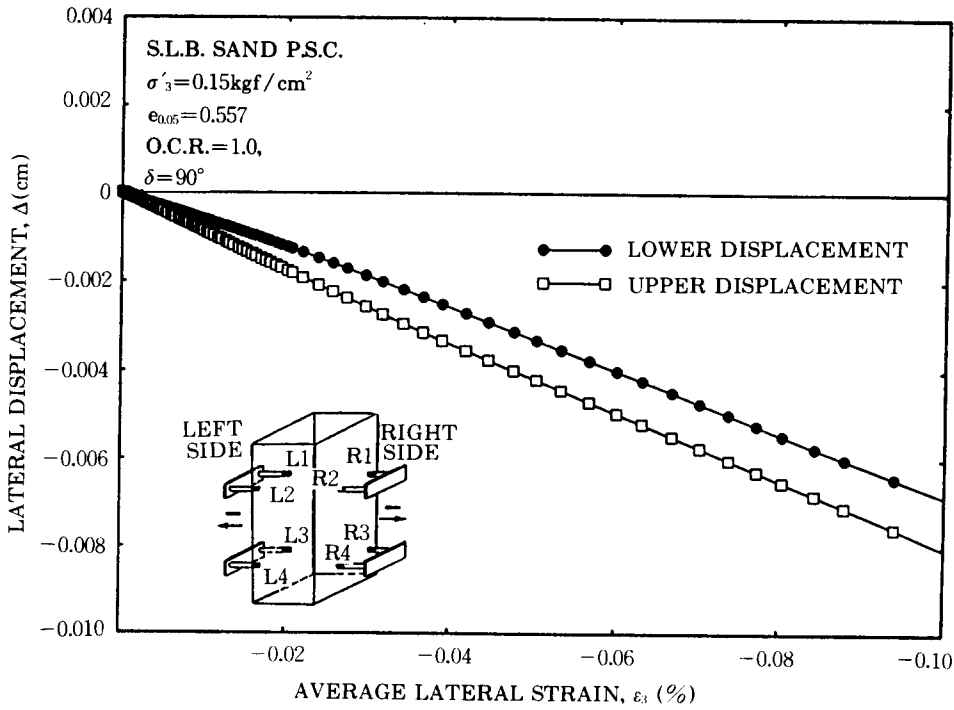


그림 13. 공시체 상하의 변위 비교( $\epsilon_s = -0.1\%$  까지)

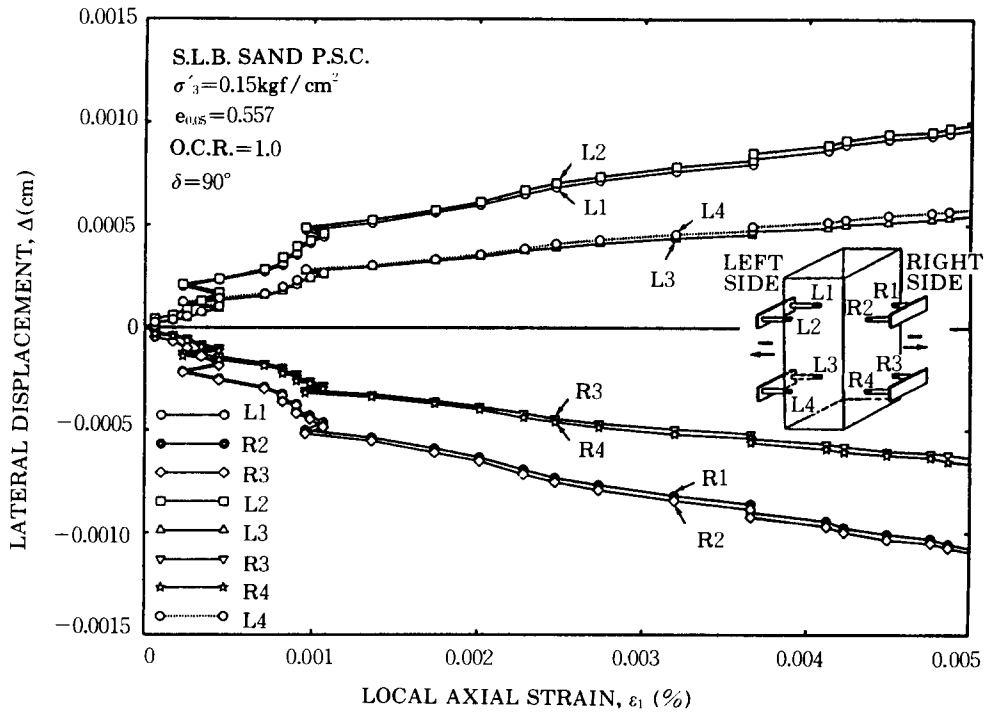


그림 14. 공시체 상하의 변위 비교( $\epsilon_1 = 0.005\%$  까지)

어서의 변화에 대해 반응이 굉장히 좋다는 것을 알 수 있다. 즉, 전단초기에 있어서도 포아송비  $\nu=0$ 가 아님을 시사하고 있는 것이다.

이상을 정리하여 보면 이 시스템의 장점은 다음과 같다.

① 비접촉형이기 때문에 공시체의 변형을 구속하지 않는다.

② 가동 스테이지를 수평 방향으로 이동할 수 있기 때문에 측정 범위의 실질상의 제약이 거의 없다(전단파의 발생전까지)

③ 변위 측정치는 bedding error를 포함하지 않는다. 더우기  $\sigma_3$ 일정 시험에서는 멤브레인의 관입오차도 생기지 않는다.

④ 공시체 전체의 체적 변화 측정이 불가능한 시험(예를 들면, 불포화 공시체를 사용한 시험)에서도 측방변위를 정도 높게 측정할 수 있다.

⑤ 좌우 4개씩 합계 8개의 비접촉형 변위계를 공시체 높이를 3등분한 지점에서 측방변위를 측정하여 그것들의 평균을 공시체 전체의  $\epsilon_3$ 의 평균치로 취하는 것은 공시체가 거의 일률적으로 거동하는 파괴상태전까지는 무방하다고 생각한다.

### 3. Bedding Error

실내 전단시험(평면 변형률 압축시험, 삼축 압축시험등)을 실시할 때 공시체 상하단의 단면 마찰 경감층(lubrication layer), 공시체 단면의 느슨함등의 이유로, 다이알 게이지와 같은 외부 변위계로 측변형률을 측정하면 변형률의 참값을 과대평가하게 된다. 이 외부 변위계로 측정된 측변형률과 공시체의 참값의 변형률과의 차이를 bedding error(이하 B.E.)라고 한다.

이 B.E는 공시체 측면에서 국소적으로  $\epsilon_1$ 을 측정하지 않는 한 존재하기 마련이다. 특히 미소 변형률에서의 변형계수나 파괴상태까지의 연속적 변형계수를 외부 변위계를 사용하여 정확히 구하기는 극히 어렵다.

그림 15, 16에 Toyoura sand와 S.L.B.sand

의 정규압밀 공시체를 사용한 평면 변형률 시험의  $\epsilon_1=0.005\%$ 까지의 응력·변형률관계를 나타내고 있다. 한편, 그림 17, 그림 18은 할선 영계수( $E_{sec}$ )와 측변형률  $\epsilon_1$ 과의 관계에 있어서 B.E의 영향을 나타내고 있다. 즉, 측변위를 공시체 직상의 캡의 움직임을 gap sensor로 측정할 경우 LDT에 의해 B.E를 포함하지 않은 측변위를 측정할 경우보다 강성률이 전체적으로 작다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 동일한 편차 응력에 대해 LDT를 사용해서 측정된 측변형률  $\epsilon_1$ (그림에서 Local로 표시)이 비접촉형 변위계를 사용하여 측정된 측변형률  $\epsilon_1$ (그림에서 External로 표시)보다 크다는 것을 알 수 있다. 이 차는 위에서 말한 공시체 상하단에 단면 마찰 경감층을 설치하였기 때문에 ① 멤브레인의 수축, ② 그리스의 유출, ③ 그리스 및 멤브레인에 모래입자가 관입, ④ 공시체 상하단 근처의 느슨한 층의 과대한 압축에 의해 생긴다. 그러나, 동일한 조건임에도 불구하고 모래의 종류에 의해 B.E의 크기가 다르다. 즉, 평균 입경  $D_{50}$ 이 큰 S.L.B.sand의 경우가  $D_{50}$ 이 작은 Toyoura sand 보다 상기 ③의 요인이 크게 작용하여 B.E가 크게 된다고 생각되어진다.

### 4. 과압밀비(OCR)가 포아송비( $\nu$ )에 미치는 영향

이 절에는 평면 변형률 압축시험에 있어서의 과압밀비가 포아송비  $\nu$ 에 미치는 영향을 알아보기로 한다.

선형 등방체에서  $\sigma_3$ 일정의 조건( $\Delta\sigma_3=0$ )에서 평면 변형률 압축시험을 실시한 경우  $\Delta\epsilon_2 = \{\Delta\sigma_2 - \nu\Delta\sigma_1\} / E = 0$ 으로부터  $\Delta\sigma_2 = \nu\Delta\sigma_1$ 이 된다. 이것을

$$\Delta\epsilon_1 = \{\Delta\sigma_1 - \nu\Delta\sigma_2\} / E$$

$$\Delta\epsilon_3 = \{-\Delta\sigma_2 - \nu\Delta\sigma_1\} / E$$

에 대입하면, 평면 변형률 압축시험에 있어서의 겉보기 포아송비  $\nu_{pac}$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

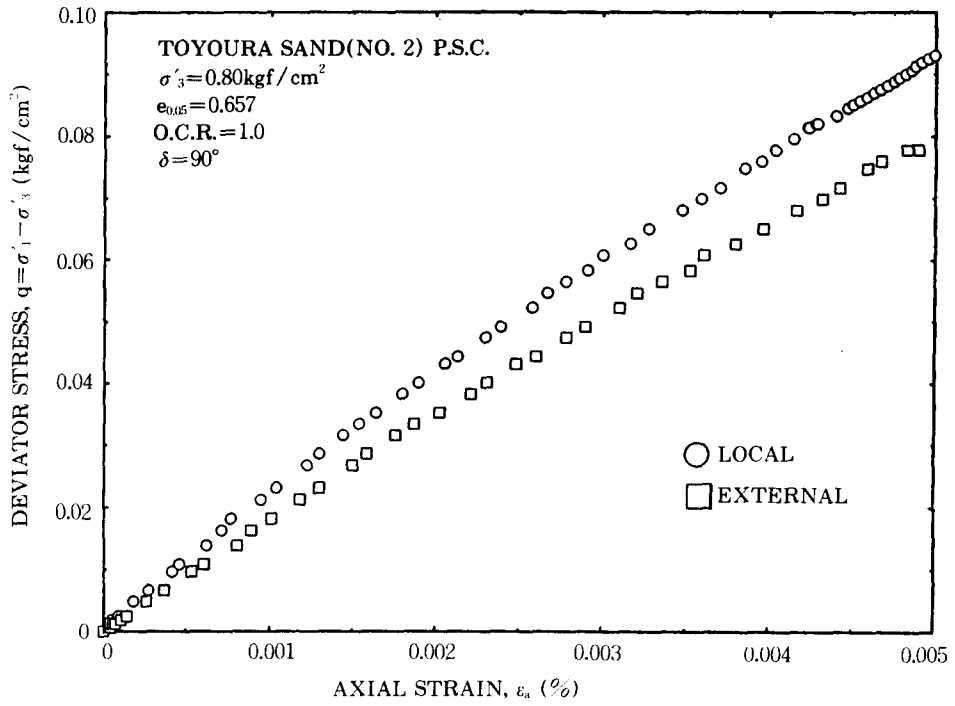


그림 15. Toyoura sand의 응력 · 변형률 관계

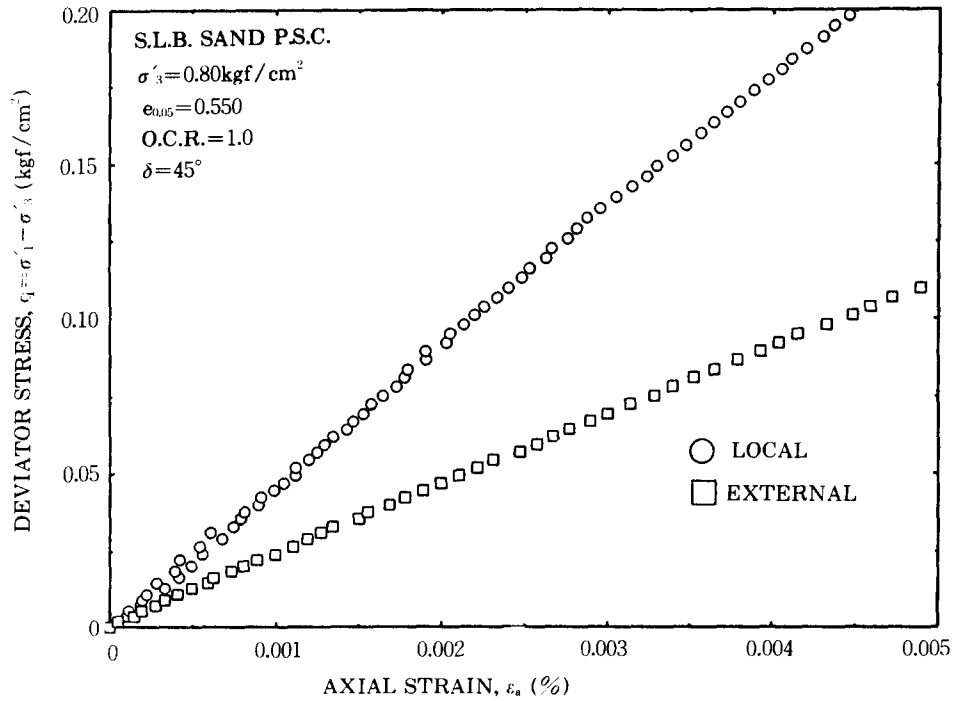


그림 16. S.L.B.sand의 응력 · 변형률 관계

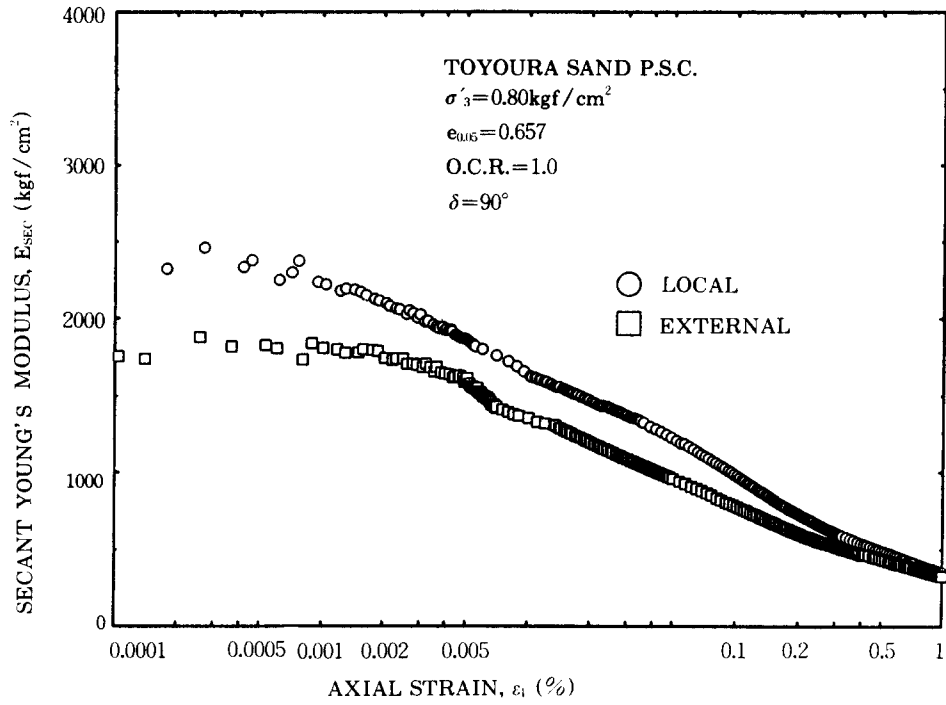


그림 17.  $E_{sec}$ 와  $\epsilon_1$ 과의 관계 (Toyoura sand)

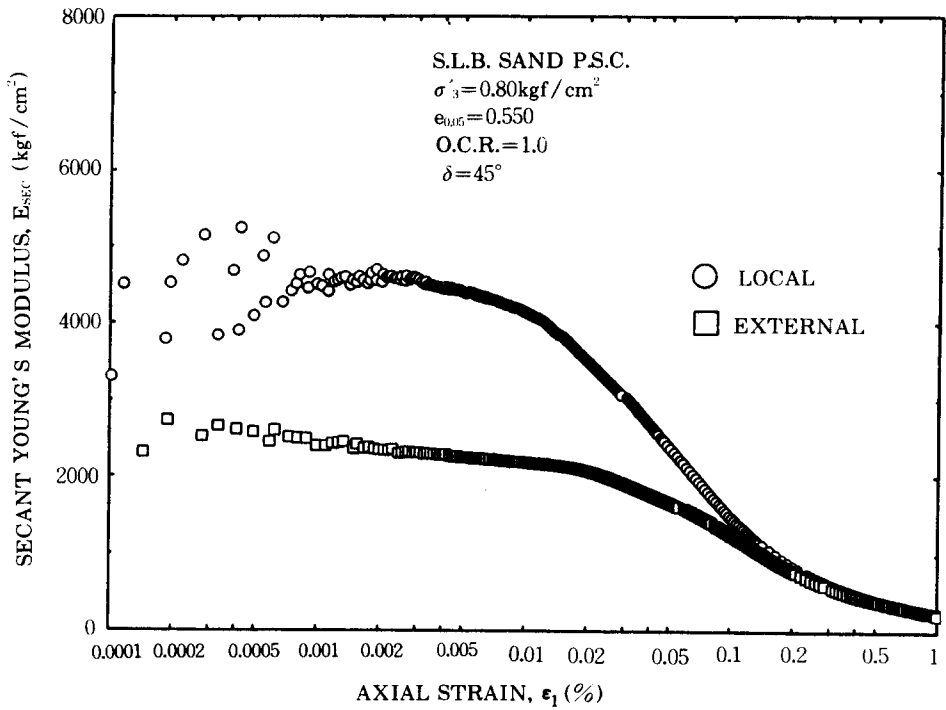


그림 18.  $E_{sec}$ 와  $\epsilon_1$ 과의 관계 (S.L.B.sand)

$$v_{psc} = -\Delta\epsilon_3 / \Delta\epsilon_1 = v / (1 - v)$$

따라서, 포아송비  $v = v_{psc} / (1 + v_{psc})$ 이다.

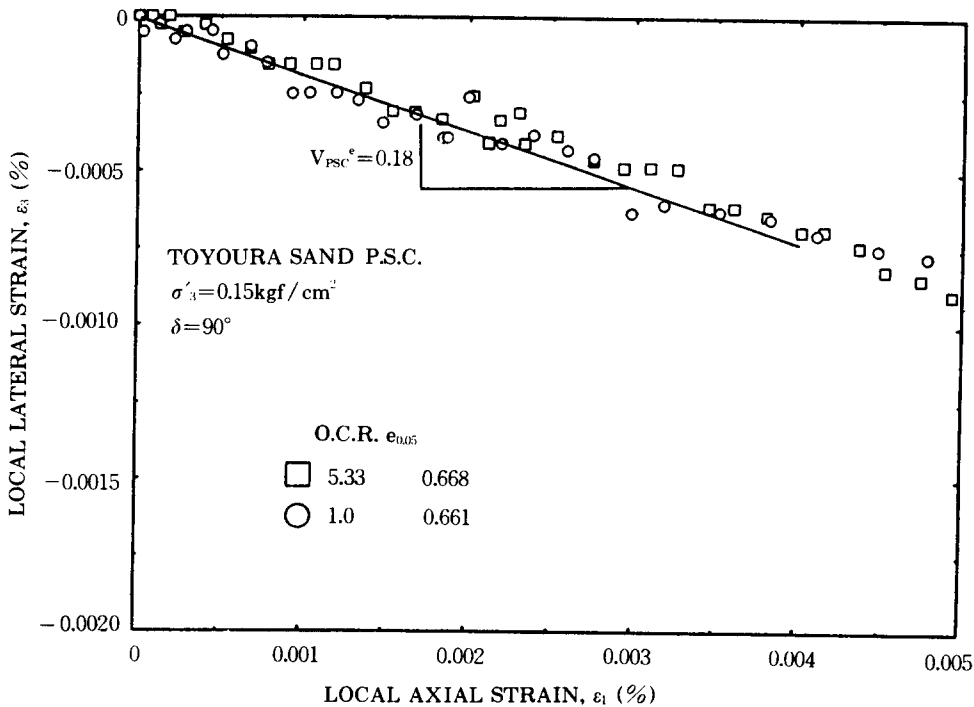
그림 19(a)~(c), 그림 20(a)~(c)는 Toyoura sand와 S.L.B.sand의 과압밀비의 차이에 의한 축변형률  $\epsilon_1 = 0.005\%$ ,  $0.1\%$ ,  $1.0\%$ 까지의  $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$  관계를 도시한 그림이다. 여기서  $v_{psc}$ 는 축변형률  $\epsilon \div 0.001\%$ 까지의 탄성적 상태의 변형률비 ( $-d\epsilon_3^e / d\epsilon_1^e$ )이다. 그림 19(a), 그림 20(a)를 보면 Toyoura sand, S.L.B.sand 공히 전단초기에 있어서는 과압밀비에 관계없이 포아송비  $v_{psc}$ 가 거의 같다는 것을 알 수 있다. 그러나, 그림 19(b)~(c), 그림 20(b)~(c)에서 알 수 있듯이 축변형률이 증가함에 따라 과압밀 공시체 쪽이 정규압밀 공시체 쪽보다 포아송비  $v_{psc}$ 가 크게 됨을 알 수 있다. 이것은, 과압밀에 의해 체적 수축량이 작게 되었기 때문이다. 과압밀에 의한 체적 수축량의 감소의 정도는 Toyoura sand 쪽이 S.L.B.sand보다 크다. 이것에 대응하여 과압밀에 의한  $v_{psc}$ 의 감소는 Toyoura sand

쪽이 더 크다.

한편, 그림 19(a)와 그림 20(a)의 Toyoura sand의  $v_{psc}^e$ 값과 S.L.B.sand의  $v_{psc}^e$ 값을 비교해 보면 Toyoura sand의  $v_{psc}^e$ 값(약 0.18)이 S.L.B.sand의  $v_{psc}^e$ 값(약 0.28)보다 작음을 알 수 있다. 즉,  $v_{psc}^e$ 값은 모래의 종류에 따라 약간 다르다.

## 5. 주응력비-주변형률 증분비(Stress-Dilatancy) 관계

지금까지의 연구에 의하면 평면 변형률 압축 시험에 있어서 주응력비-주변형률 증분비 관계를  $R = K \cdot D$  ( $R = \sigma_1 / \sigma_3$ ,  $D = -d\epsilon_3 / d\epsilon_1$ )로 표현하면,  $\gamma = 0.1\%$  이상에서는 R과 D와의 사이에 직선관계가 있다. 이 관계는 Rowe<sup>(7)</sup>의 응력-다이어턴시 식이라고 불리워진다. 그러나,  $\gamma < 0.1\%$ 에서도 응력-다이어턴시 식이 성립하는지에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 절에



(a)  $\epsilon_3 = 0.005\%$  까지

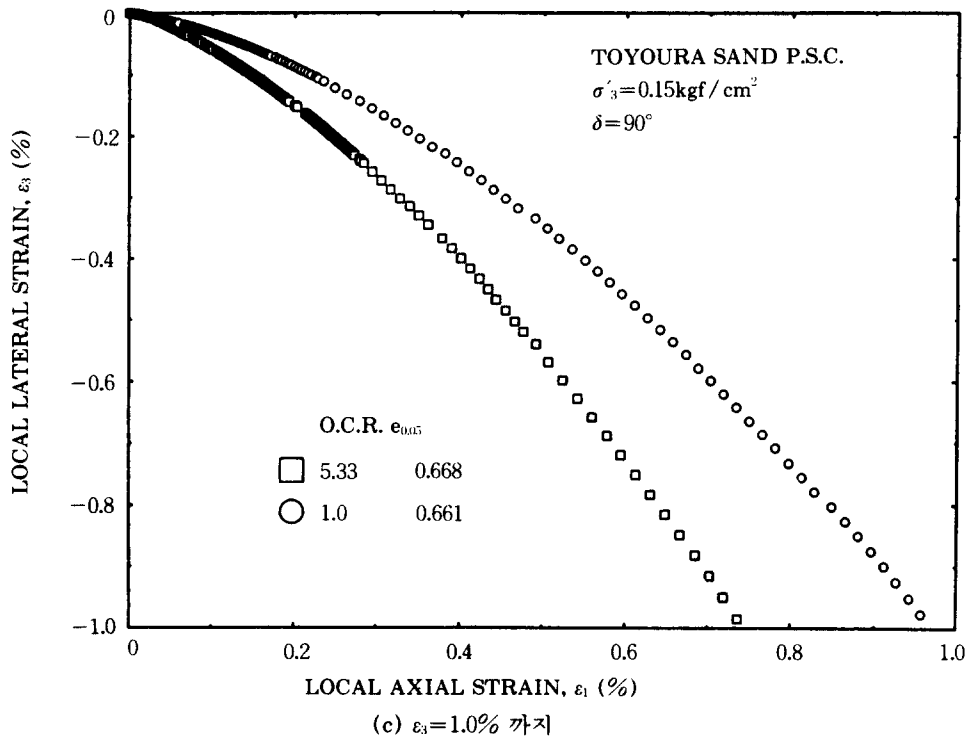
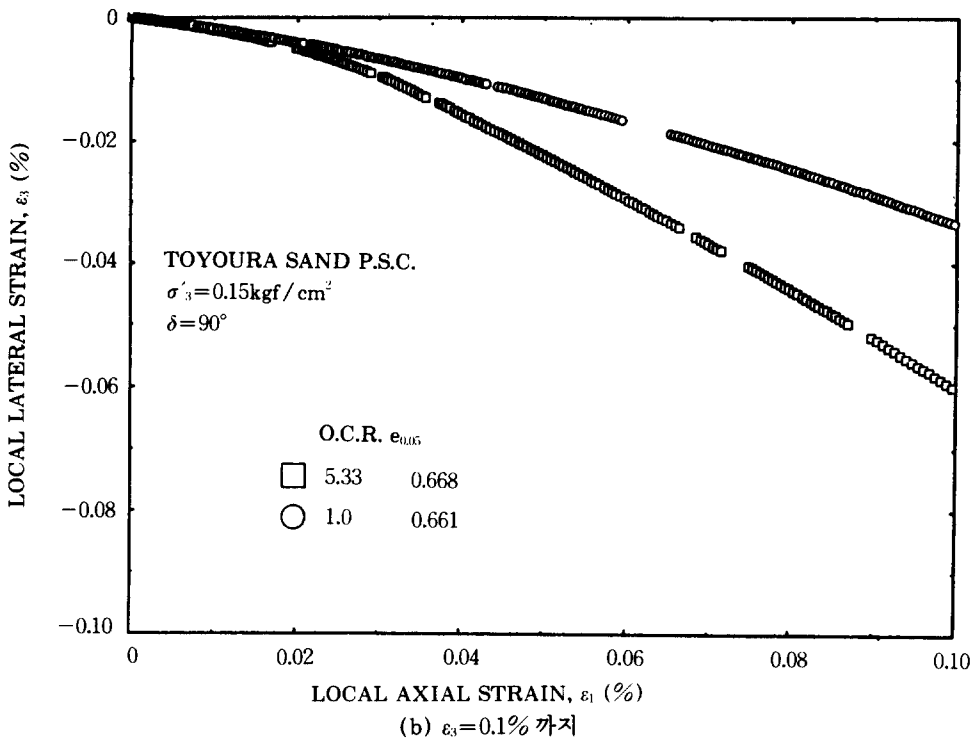
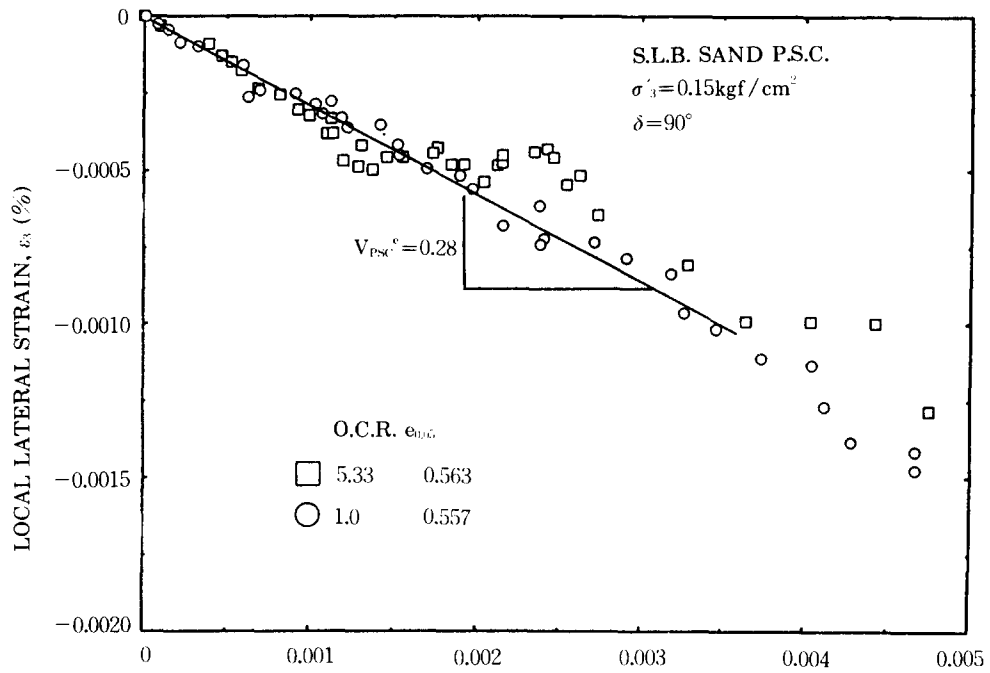
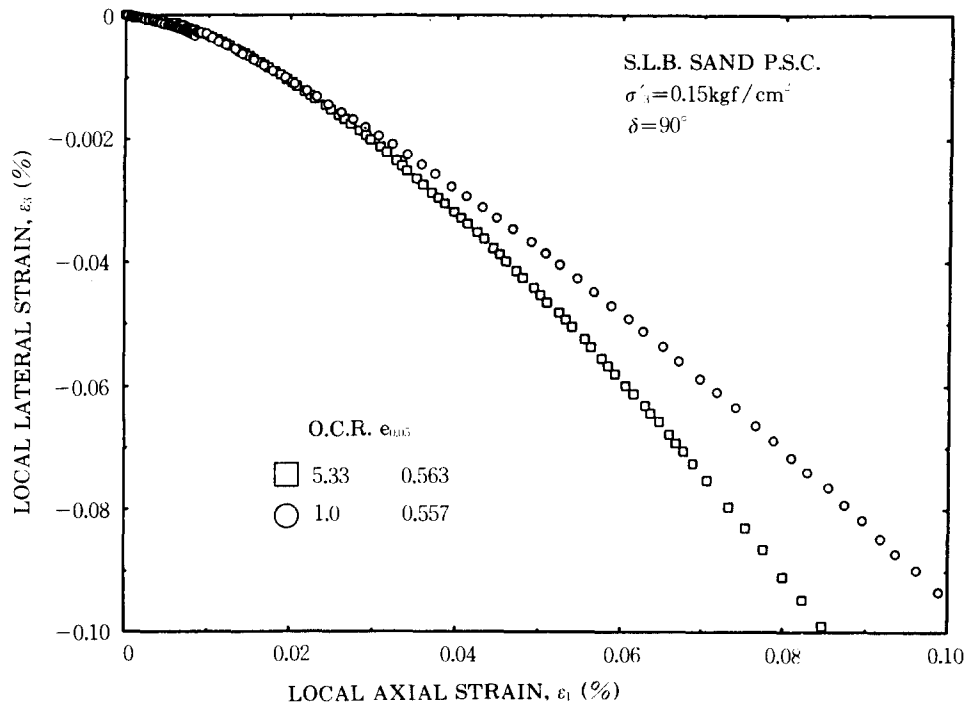


그림 19.  $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$  관계 (Toyoura sand)

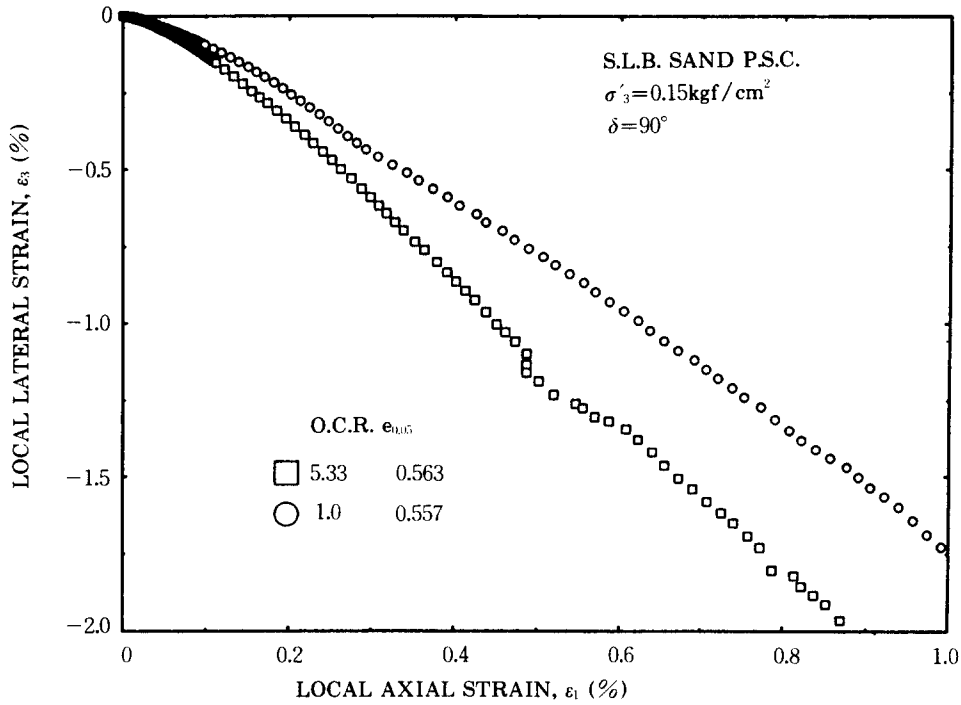


(a)  $\epsilon_1 = 0.005\%$  까지



(b)  $\epsilon_3 = 0.1\%$  까지





(c)  $\epsilon_3 = 1.0\%$  까지

그림 20.  $\epsilon_1 \sim \epsilon_3$  관계 (S.L.B.sand)

서는 미소 변형률에서 피크까지의  $R=K \cdot D$  관계를 Toyoura sand의 정규압밀 공시체와 S.L.B.sand의 과압밀공시체를 사용하여 조사하였다.

그림 21. 그림 22는 Toyoura sand, S.L.B.sand의 응력-다이러턴시 관계를 나타내고 있다. 그림에서 각각의 변형률 증분비 D의 데이터는  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_3$ 의 관계의 직선 근사로 부터 얻어진 것이고, 데이터점에서의 전단변형률의 범위는 각각 다르다. 또, D의 값에 대한 R의 값은 그 변형률 범위에서의 평균치이다. Toyoura sand, S.L.B.sand의 경우, 전단직후부터 피크 부근까지 D값이 연속적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 22를 보면 과압밀비가 응력-다이러턴시 관계에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 또, 그림 21, 그림 22에서 알 수 있듯이 응력-다이러턴시 관계는 전단 직후는  $R=K \cdot D$  직선의 약간 좌측에 위치해 있으나

전체적으로 미소 변형률에서 피크 부근까지 원점을 통하는 직선으로 나타낼 수 있다고 생각한다. 그러나, Toyoura sand의 K값(약 3.5)은 S.L.B.sand의 K값(약 2.5)보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 즉, K값은 모래의 종류에 따라 다르다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

(1) 국소 축변위 측정장치(LDT) 및 축방 변위 측정시스템(LDMS)을 사용하여 공시체의 최대 주변형률  $\epsilon_1$  및 최소 주변형률  $\epsilon_3$ 를 측정된 결과, bedding error의 영향 및 멤브레인의 관입에 의한 오차를 포함하지 않는 공시체의 변위를 미소 변형률수준( $10^{-5}$ )에서 피크까지 정밀하게, 또, 연속적으로 구할 수 있었다.

(2) 최대 주변형률  $\epsilon_1$ 을 외부 변위계를 사용하여 공시체의 변위를 측정하면 bedding error

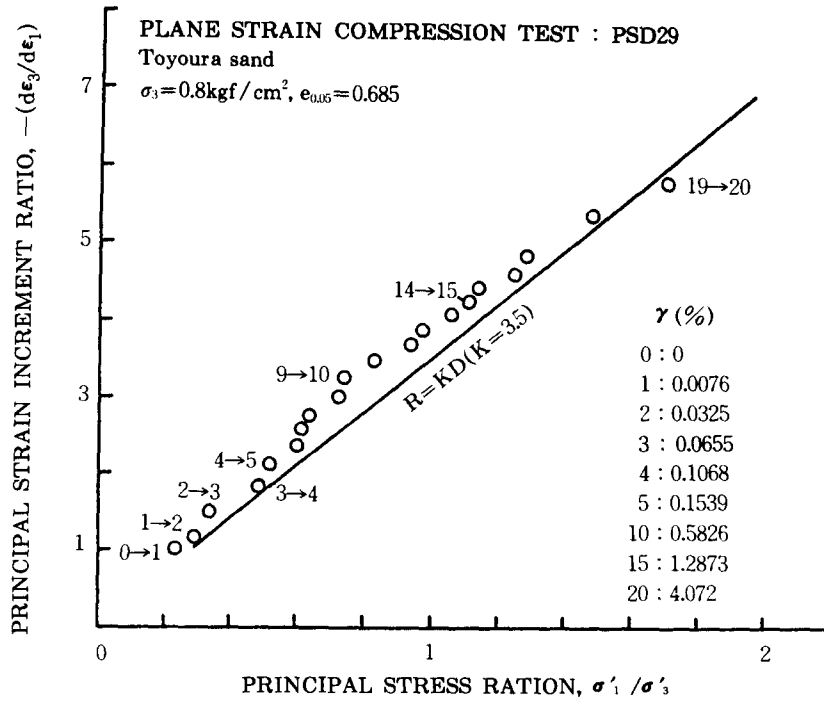


그림 21. Toyoura sand의 응력-다일러턴시 관계

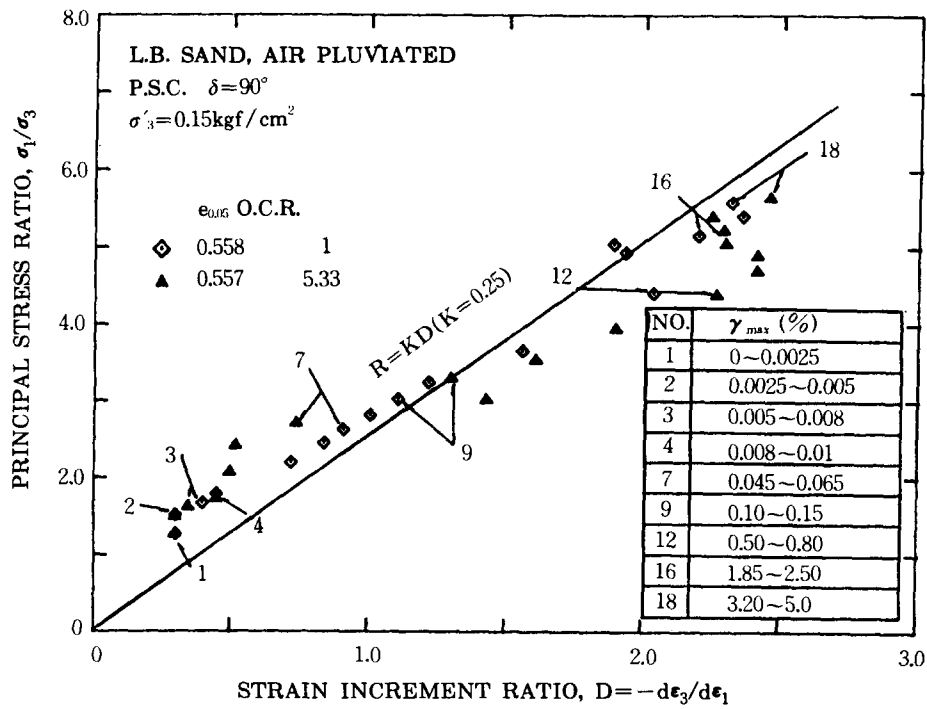


그림 22. S.L.B.sand의 응력-다일러턴시 관계

에 의하여 강성률을 과소 평가하게 된다.

(3) 약 5.0 이하의 과압밀비가 S.L.B.sand, Toyoura sand의 탄성 영역 상태(변형률 수준  $10^{-5}$  이하)에서의 포아송비( $\nu_{pac}$ ) 및 Rowe의 응력-다이어턴시 관계에 미치는 영향은 거의 없다.

(4) Rowe의 응력-다이어턴시 관계는 전단 변형률  $10^{-5}$ 이하의 극히 미소한 변형률에서도 성립함을 알았다.

(5)  $R=K \cdot D$ 에서 K 값은 S.L.B.sand의 경우 약 2.5정도이고, Toyoura sand의 경우는 약 3.5정도로 모래의 종류에 따라 차이가 있음을 확인하였다.

### 감사의 말

이 논문의 정리를 위해 수고해 준 동아대학교 공과대학 토목공학과 지반공학 연구실의 정현철 군과 이 남기 군, 최 윤철 군에게 감사의 말을 전한다.

### 참고 문헌

1. 安部文洋(1989), “微小ひずみレベルにおける平面ひずみ壓縮試験での砂の變形特性,” 日本 東京大學

大學院 修士論文.

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(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.
5. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. & Sato, T.(1991), “A Simple Gauge for Local Small Strain Measurements in the Laboratory,” Soils and foundations Vol.31, NO. 1, PP. 169-180.
6. Park, C.S., Dong, J., Abe, F., Shibuya, S. & Tatsuoka, F.(1990), “Small Strain Behaviours of Sands in Plane Strain Compression—Part II,” SEISAN-KENKYU, Vol.42, No.10, PP. 590-593
7. Rowe, P.W.(1962), “The Stress Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact,” Proc. Royal Society London, Series A, Vol.269, PP. 500-527.
8. Shibuya, S., Park, C.S., Abe, F. & Tatsuoka, F. (1991), “Small Strain Behaviour of Sands in Plane Strain Compression—Part I,” SEISAN-KENKYU, Vol.42, No.9, PP. 561-564.

(접수일자 1993. 12. 2)