大韓土木學會論文集
第14卷 第3號 · 1994年 5月
pp. 543~552

평면 변형률 상태에서의 모래의 변형 강도특성의 구속압 의존성

Confining Pressure-Dependency on Deformation and Strength Properties of Sands in Plane Strain Compression

박춘식* · 龍岡文夫** · 장정욱*** · 정성교****
Park, Choon Sik · Tatsuoka, Fumio · Jang, Jeong Wook · Chung, Sung Gyo

Abstract

A series of drained plane strain compression tests was performed on dried samples of dense Toyoura sand and Silver Leighton Buzzard sand prepared by air-pluviation method to find out the deformation and strength characteristics on the value of confining pressure σ_3'($\sigma_3'=0.05\sim4.0$ kgf/cm^2). The axial and lateral strains measured in this apparatus ranged from 10^{-6} up to the failure of the specimen. So the stress-strain characteristics would be investigated from very small to very large strain levels. It was found that the change of the angle of internal friction $\phi'_{max}=\arcsin\{(\sigma_1'-\sigma_3')/(\sigma_1'+\sigma_3')\}_{max}$ with the change of σ_3' is very small when σ_3' is lower than higher. Furthermore, the effect of confining pressure on stiffness of sands was evaluated. It was also found that for the range of shear strain γ from 10^{-6} to those at peak, the Rowe's stress-dilatancy relation seems to be a good approximation for air-dried Toyoura sand and Silver Leighton Buzzard sand, irrespective of the change of σ_3'.

요 지

본 연구는 공중낙하법으로 만든 공기건조 상태의 일본의 표준사인 豊浦砂(Toyoura sand)와 영국의 표준사인 Silver Leighton Buzzard sand 공시체를 배수상태에서 평면 변형율 압축시험을 실시하여, 구속압이 모래의 변형 강도특성에 미치는 영향을 조사하였다. 축방향 변위와 수평방향의 변위는 변형율수준(strain level) 10^{-6}에서 파괴상태까지를 연속적으로 구할 수 있는 장치를 사용하여 정도 높게 측정함으로써 미소변형에서 파괴상태까지의 응력 변형율 특성을 상세히 연구하였다. 그 결과, 극저구속압에서는 구속압이 작아져도 내부마찰각 $\sigma'_{max}=\arcsin\{(\sigma_1'-\sigma_3')/(\sigma_1'+\sigma_3')\}_{max}$가 급격히 크게 되지는 않아, Bolton의 경험식을 사용할 시는 어느 정도 구속압이 클 때만 적용 가능하다는 것을 알았다. 또, 모래의 강성률은 근사적으로 구속압의 m승에 비례하는데(G or E $\propto \sigma_3'^m$), 이때 m은 변형율수준 10^{-4} 이하에서는 약 0.4 정도이고 변형율$=10^{-1}$에서는 m≒0.9 정도이었다. 이러한 경향은 모래의 종류, 혹은 시험종류에 따라 거의 변화하지 않음을 알았다. 이것은 구속압이 작을수록 강성률의 변형율수준 의존성, 응력수준 의존성이 크게 되는 것과 대응한다. 끝으로, Rowe의 응력-다이러턴시 관계는 미소 변형율수준(10^{-4} 이하)에서 파괴까지 거의 직선적으로 성립하고, 구속압의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알았다.

* 정회원 · 창원대학교 토목공학과, 전임강사
** 일본 동경대학 생산기술 연구소, 교수
*** 정회원 · 현대건설 기술연구소, 선임연구원
**** 정회원 · 동아대학교 토목공학과, 부교수

1. 序 論

구속압이 크게 되면 일반적으로 모래의 내부마찰각 ϕ'_{max}은 감소해간다. 그러나, 포화상태, 혹은 공기건조상태의 입자의 파쇄성이 없는 깨끗한 모래는 겉보기 점착력이 생기지 않으므로, 모래의 전단강도는 내부마찰각 $\phi'_{max}=\arcsin\{(\sigma_1'-\sigma_3')/(\sigma_1'+\sigma_3')\}_{max}$은 구속압이 작아짐에 따라 각각의 구속압에 대하여 직선적으로 증가하지 않고, 어느 정도의 구속압 이하에서는 ϕ'_{max}의 증가율은 매우 작아진다. 이러한 것을 가장 강조한 이가 Hetter(1984)[1]이다. Hetter (1984)는 삼축 압축시험에서 Karlsruhe sand의 ϕ'_{max}은 구속압 $\sigma_3'=4.0$ kgf/cm^{2}까지는 σ_3'에 의존하지 않는 것을 나타내었다. 또, Toyoura sand의 삼축압축시험, 평면 변형율시험, 비틀림 단순 전단시험에서 다른 조건이 동일하다면 대략 $\sigma_3'=0.5$ kgf/cm^2 이하에서는 ϕ'_{max}은 구속압에 영향을 거의 받지 않고 일정한 값을 가진다는 것이 보고되어 있다.[2],[3] 한편, 浜岡砂(Hamaoka sand)의 평면 변형율 압축시험에서도 대략 구속압 $\sigma_3'=0.16$ kgf/cm^2 이하에서는 ϕ'_{max}은 구속압의 영향을 무시할 수 있다는 것이 보고되었다.[4],[5] 여기에 반해 Bolton(1986)은, ϕ'_{max}은 log p(p는 평균 주응력)에 비례한다고 하는 경험식을 제안하였다.[6] 이 경험식은 필시 어느 정도 이상의 구속압에 대해서만 적절할 것이다. 어느 구속압 이하에서 모래의 ϕ'_{max}이 실제로 구속압에 의존하지 않는다면, 포화 혹은 공기건조 상태 모래의 모형실험의 해석 등이 현저하게 간편해질 것이다. 또 Toyoura sand를 사용한 반복 비틀림 전단시험에서는 구속압이 작을수록 할선 전단강성률(G_{sec})의 변형율 수준 의존성의 정도가 조금씩 크게 된다는 것이 보고되어 있다.[7] 따라서, 이 법칙성이 알아지면 임의의 구속압에 있어서의 관계도 유추할 수가 있다. 그러나, 시험종류, 모래의 종류가 달라지면 그 경향이 어떻게 변화하는가에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

한편 Rowe의 응력-다이러턴시 관계는 평면 변형율 조건에서 $R=K\cdot D(R=\sigma_1'/\sigma_3',\ D=-d\varepsilon_3/d\varepsilon_1)$로 주어진다.[8] 지금까지의 연구에 의하면 R과 D는 직선 관계가 있다. Tatsuoka 등(1986)은 Toyoura sand를 사용한 구속압 $\sigma_3'=0.05\sim4.0$ kgf/cm^{2}의 범위의 평면 변형율 압축시험에서 파괴시 구속압의 변화에 관계없이 K=3.5선상에 있다는 것을 보고하였다.[2] 그러나, 이것은 파괴상태만의 결과이고 미소변형율상태에서도 성립하는지에 대한 연구는 거의 전무한 상태이다. 또, Toyoura sand만에 한정된 결과이기도 하다.

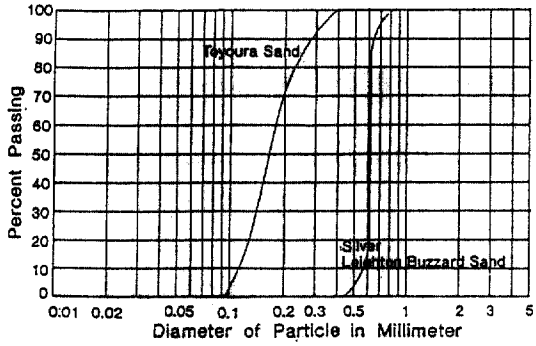

그림 1. Toyoura sand와 S.L.B. sand의 입경 가적 곡선.

이러한 경위로 본 연구에서는 Toyoura sand와 Silver Leighton Buzzard sand(이하 S.L.B. sand)의 정규압밀 공시체를 사용하여 단조재하 평면 변형율 압축시험을 실시하여 구속압이 모래의 변형 강도특성에 미치는 영향을 상세히 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 모래의 입경 가적 곡선을 그림 1에, 실험 장치의 전체도를 그림 2에 각각 표시한다. 변형율수준 10^{-6}에서 10^{-2}까지의 변형율을 상세히 측정하기 위하여 그림 3에 나타난 바와 같이 공시체 축변위는 양측면에서 국소 축변위 측정장치(Local Deformation Transducer : LDT)를 사용하고, 공시체 측면의 수평변위는 측방변위 측정장치(Lateral Deformation Measuring System: LDMS)를 사용하였다. 각각 중형 평면 변형율 압축시험용으로 치수만을 바꾸어 새로 설계 제작하였다(상세는 문헌(9), (10), (11)을 참조). 공시체는 높이 H=20 cm, 폭(σ_3 방향의 길이) W=8 cm, 길이(σ_2 방향의 길이) L=16 cm로 상하 단면과 구속판에 접하는 측면은 문헌 (12), (13)에서 구한 단면마찰 경감층(lubrication layer)을 사용하였다.

공기건조 상태의 모래를 일정한 높이에서 공중낙하시켜 부압 0.05 kgf/cm^{2}로 자립시켰다. 이때의 간

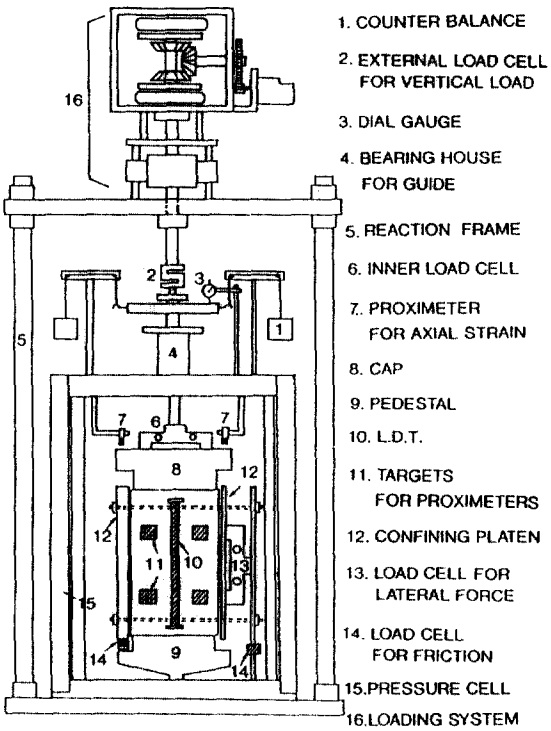

그림 2. 실험장치의 개략도.

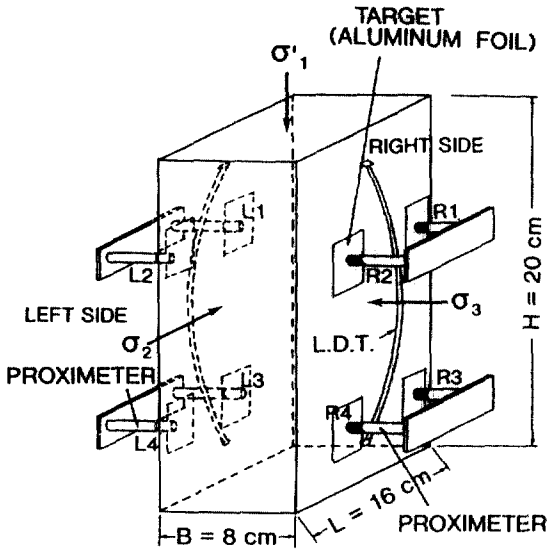

그림 3. 미소 변형 측정장치.

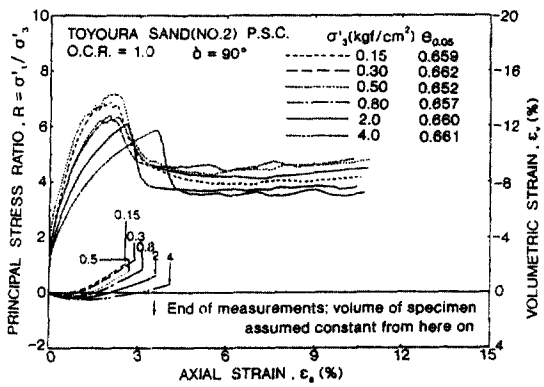

그림 4. Toyoura sand 공시체의 각 구속압에 있어서의 응력-변형률 관계.

극비를 $e_{0.05}$로 나타내었다. 정규압밀 후 LDT, 구속판, LDMS를 각각 장치 하였다.

부압($\sigma_3' \leq 0.8$ kgf/cm^2), 혹은 정압($\sigma_3' > 0.8$ kgf/cm^2)으로 구속압을 가하여 배수상태에서 축변위 0.25 mm/min의 속도로 전단하였다. 공시체내에 전단층이 발생하면 LDMS로는 공시체의 평균 측방변형율을 정확히 구할 수가 없기 때문에 파괴후의 어떤 변형율수준 이상이 되면 체적변형율 ε_v치는 일정하다고 가정해서 최소주응력방향의 변형율 ε_3를 역산하였다.

3. 응력 변형율 관계의 개요

3.1 Toyoura sand의 실험결과와 고찰

3.1.1 강도 특성

그림 4는 Toyoura sand 공시체의 각 구속압에 있어서의 응력 변형율 관계를 나타낸 것이다. 이것으로부터 밀도는 거의 같지만 구속압이 크게 될수록 내부마찰각 ϕ'_{max}은 감소해 가는 것을 알 수 있다. 이 ϕ'_{max}의 구속압 의존성을 보다 상세히 검토하기 위하여 간극비 $e_{0.05}=0.7$로 보정하여 σ_3'에 대해 ϕ'_{max}을 나타낸 것이 그림 5이다. 그림에서의 No. 1과 No. 2의 ϕ'_{max} 차이는 Toyoura sand의 구입시기의 차이(batch의 차이)가 다름으로 인하여 모래의 광물조성이 달라졌기 때문이다(상세는 문헌(11) 참조). 이 그림으로부터 중형 평면 변형율 압축시험에 의한 Toyoura sand No. 1의 경우가 소형 평면 변형율 압축시험에 의한 Toyoura sand No. 1의 경우보다 ϕ'_{max}이 약간 작고 구속압 의존성이 약간 크지만, 눈에 띄는 차이는 아니라고 생각한다. 즉, 공시체의 치수의 차이에 의한 ϕ'_{max}은 거의 변화하지 않는다고

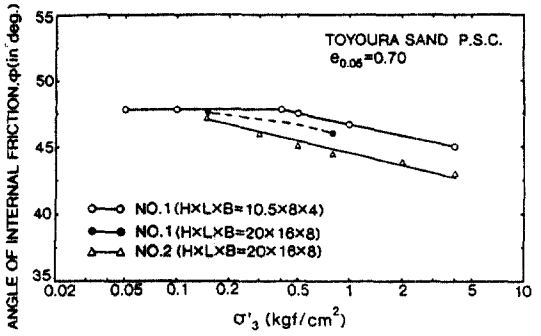

그림 5. 각 구속압에 대한 ϕ'_{max}의 관계(Toyoura sand).

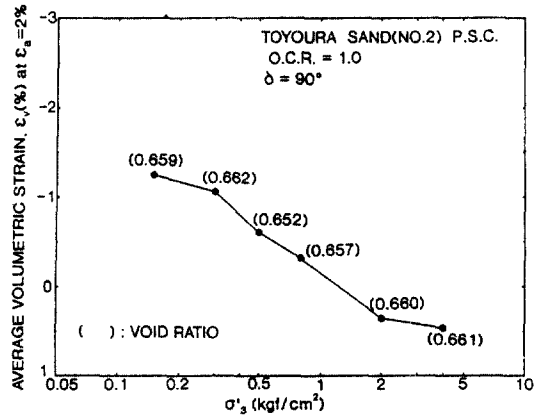

그림 6. ε_1=2.0%때의 체적 변형률 ε_v.

생각한다. 그러나, Toyoura sand No. 1의 경우는 구속압 약 0.40 kgf/cm² 이상에서 구속압 의존성이 보여지는데 반해 Toyoura sand No. 2의 경우는 0.15 kgf/cm² 이상에서 구속압 의존성이 나타난다. 이것은 No. 1, No. 2의 입경가적곡선, 둥근정도(roundness), 모난정도(angularity) 등 다른 조건이 거의 동일하고, 두 모래입자의 광물성분의 주성분인 석영입자의 점유율이 No. 2가 No. 1보다 약간 작아, No. 2의 모래입자의 비중(G_s=2.636)이 No. 1(G_s=2.642)보다 작아졌기 때문에(상세는 문헌 (11) 참조), 동일의 구속압하에서도 No. 2 모래입자의 파쇄성이 No. 1보다 조금 더 커지기 때문일 것이다. 즉, 구속압이 작은 경우 입자간의 접촉력은 작아 파쇄하기 힘들다. 따라서, 강도(ϕ'_{max})와 체적 팽창성은 크게 되지만, 구속압이 커지면 구속압이 작을 때보다 입자간의 접촉력이 크게 되므로 입자의 파쇄성이 크게

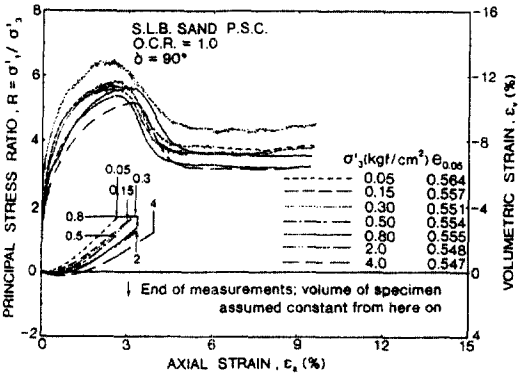

그림 7. S.L.B. sand 공시체의 각 구속압에 있어서의 응력-변형률 관계.

되어 ϕ'_{max}과 체적 팽창성이 작아지게 된다.

3.1.2 변형 특성

그림 4의 축변형율과 체적변형율과의 관계에서 알 수 있듯이 구속압이 작게 될수록 보다 큰 팽창측의 체적변화를 나타내고 있다. 각 구속압에 있어서의 축변형율 ε_1=2.0%일 때의 체적변형율 ε_v를 나타낸 것이 그림 6이다.

이것을 보면 구속압이 작을수록 ε_v의 절대치가 크게 됨을 알 수 있다. 이것은, 체적수축성이 구속압이 작을수록 작다는 것에 기인한다고 생각한다. 즉, 변형의 비일률성과 관련지으면, 구속압이 클수록 명확한 전단띠(shear band)가 형성되고, 그 띠(band)의 폭도 작게 되는 경향이 있으므로 변형의 비일률성도 보다 크다고 말할 수 있다. 변형의 비일률성이 크게 되면 그만큼 변형이 일부분에 집중되어 생기고 전체로서의 체적변형율 ε_v는 작게 된다고 생각한다.

3.2 S.L.B. sand의 실험결과와 고찰

3.2.1 강도 특성

그림 7은 S.L.B. sand의 각 구속압에 있어서의 응력 변형율 관계를 나타낸 것이다. 이 결과도 Toyoura sand와 같이 밀도는 거의 같지만 구속압이 커짐에 따라 ϕ'_{max}이 약간 감소해감을 알 수 있다. $e_{0.05}$=0.52로 간극비 보정을 하여 구속압에 대한 ϕ'_{max} 관계를 정리한 것이 그림 8이다. 이 그림으로부터 $\sigma_3' \leq 4.0$ kgf/cm²의 범위에서 약간의 ϕ'_{max}의 구속압 의존성이 보인다. 본 연구의 결과와 Bolton (1986)의 "The Strength and Dilatancy of Sands"의

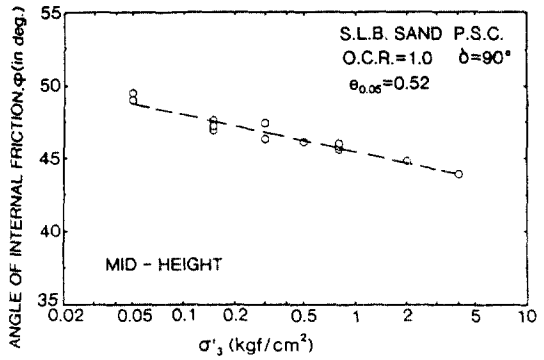

그림 8. 각 구속압에 대한 ϕ'_{max}의 관계(S.L.B. sand).

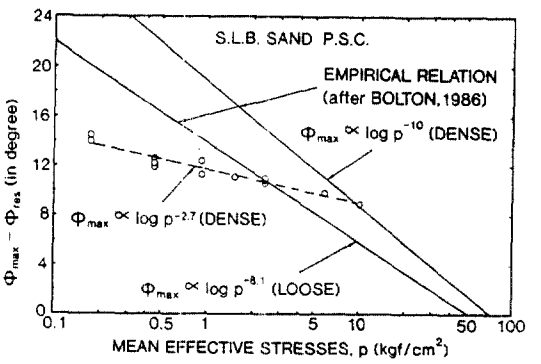

그림 9. Bolton의 경험식과의 비교.

그림 12를 비교한 것이 그림 9이다. Bolton의 경험식에서 ϕ'_{max}은 평균 주응력 p의 m승에 비례한다고 하고, 본 연구결과는 p의 n승에 비례한다고 하여 m과 n을 비교해 보자. Bolton의 경험식으로부터 구한 밀한 S.L.B. sand의 경우 ϕ'_{max}은 p의 −10승에, 본 연구 결과는 p의 −2.7승에 비례하고 있다. Bolton의 경험식으로부터 구한 m의 절대값이 본 연구 결과로 부터 구한 n의 절대값보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, Bolton의 경험식을 $\sigma_3' \leq 4.0$ kgf/cm²에 적용하면 σ_3'가 작을수록 ϕ'_{max}치를 과대 평가하게 된다.

한편, S.L.B. sand의 ϕ'_{max}의 구속압 의존성은 Toyoura sand보다 구속압 의존성이 약간 크다고 말할 수 있다. 이것은 S.L.B. sand는 입자의 평균입경(D_{50})이 Toyoura sand의 그것보다 약 3.8배 크고, 둥근 정도(roundness) 및 모난정도(angularity)가 S.L.B. sand가 Toyoura sand보다 더 둥글고 모가 덜 나 있으므로(상세는 문헌(11) 참조), 동일의 구속압하에서 모래 입자끼리의 접촉면이 Toyoura sand보다 크다. 따라서, 구속압이 큰 경우에 있어서 전단띠가 발생했을 때 입자의 파쇄성이 보다 크다고 생각되어진다(입경이 작을수록, 입경분포가 나쁠수록 시험체 내 모래의 총접촉면적은 커지지만 입자 한알과 한알의 접촉면적은 D_{50}이 클수록, 모가 덜 날수록 커진다). 이러한 이유로 S.L.B. sand가 Toyoura sand보다 구속압 의존성이 크게 되었다고 생각한다.

3.2.2 변형 특성

그림 10은 S.L.B. sand의 각 구속압에 있어서의 축변형율 $\varepsilon_1 = 2.0\%$일 때의 체적변형율 ε_v를 구속압 σ_3'에 대하여 정리한 것이다. 이 결과에서도 Toyoura

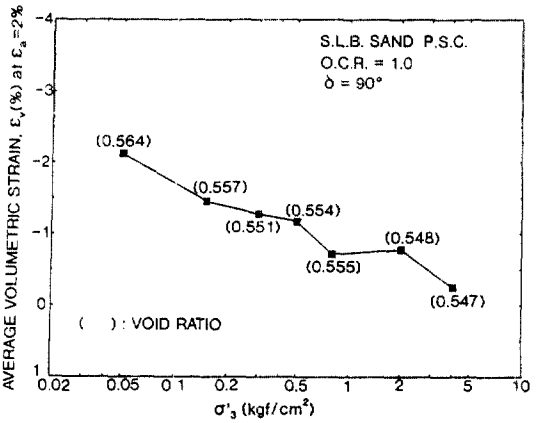

그림 10. $\varepsilon_1 = 2.0\%$ 때의 체적 변형률 ε_v.

sand의 경우와 마찬가지로 구속압이 작을수록 ε_v의 절대치가 크다는 것을 알 수 있다. 공시체의 파괴 후의 모양을 관찰한 결과(문헌(4), (11)을 참조), 구속압이 큰 공시체에서는 전부 명확한 단일의 전단띠가 형성되었고 그 폭도 작았다. 그러나, 구속압이 작은 경우는 X자형의 전단띠가 형성된 것이 몇개 있었고, 그 폭도 구속압이 큰 경우보다 컸다. 이와 같이, 저구속압일수록 전단띠가 X자형으로 생기기 쉽다는 것은 공시체를 구성하고 있는 모래의 입자가 보다 일률적인 변형을 나타내는 경향이 있기 때문이라고 생각한다. 즉, 구속압이 큰 공시체에 있어서는 전단띠가 한 방향으로 생기면 거기에 변형이 한꺼번에 집중해서 전단띠에 의해 분할된 2개의 부분이 마치 강체와 같이 거동하는데 반해 저구속압일 때는 입자끼리의 결합력이 약하기 때문에 전단띠가 한 방향으로 생겨도 거기에 변형이 집중하지

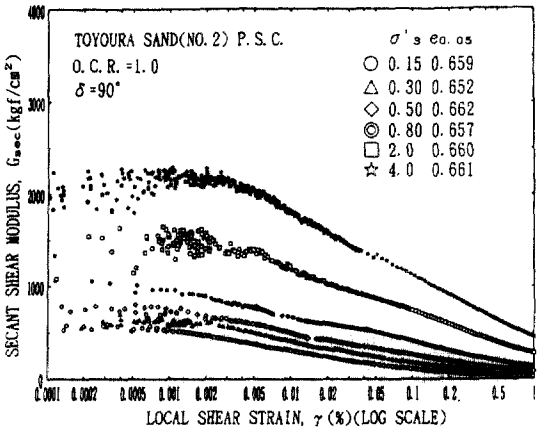

그림 11. 전단변형률 γ에 대한 할선 전단강성률 G_{sec}의 변화(Toyoura sand).

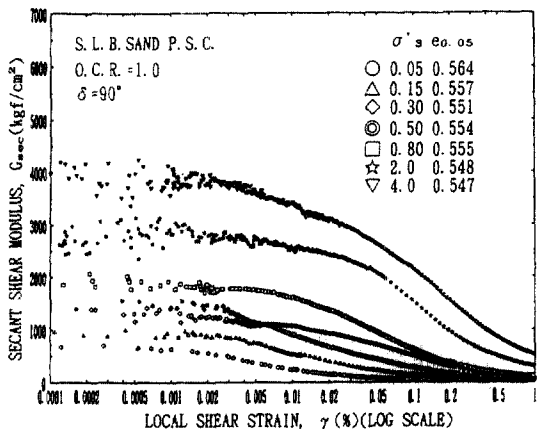

그림 12. 전단변형률 γ에 대한 할선 전단강성률 G_{sec}의 변화(S.L.B. sand).

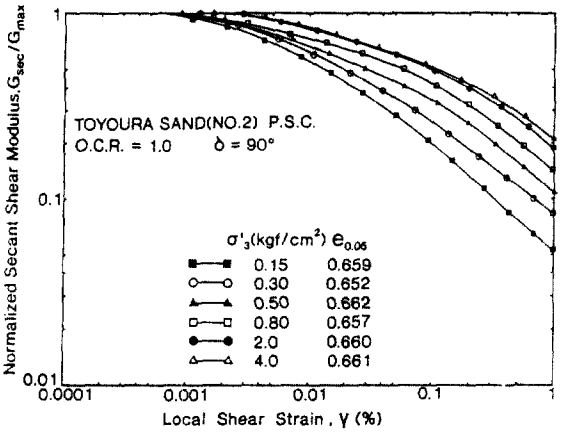

그림 13. G_{sec}/G_{max}~γ 관계(Toyoura sand).

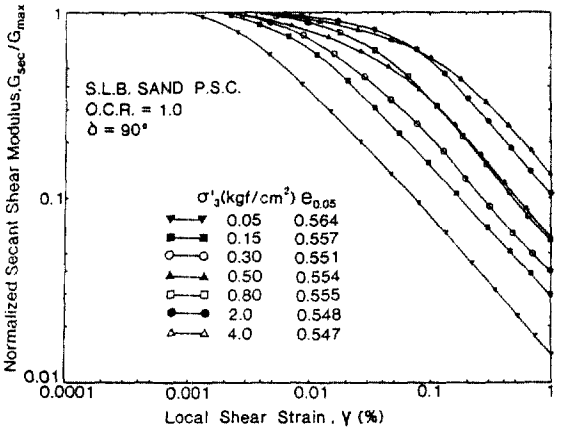

그림 14. G_{sec}/G_{max}~γ 관계(S.L.B. sand).

않고 다른 방향으로도 생겨 그 방향으로 전단띠를 형성하면서 파괴된다.

4. 할선 전단 강성률(G_{sec})의 변형률수준(Strain Level), 응력수준(Stress Level) 의존성

그림 11, 그림 12는 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 전단변형율 γ에 대한 할선 전단강성률 G_{sec}의 변화를 각 구속압에 대하여 나타낸 것이다. 이것들로부터 구속압이 커지면 최대 할선 전단강성률 G_{max}도 커지고, γ의 증대와 함께 G_{sec}는 저하하는 것을 알 수 있다. 이 저하률을 비교하기 위하여 G_{sec}와 G_{max}과의 비(G_{sec}/G_{max})와 전단변형율 γ와의 관계를 그림 13, 그림 14에 나타내고 있다. 이것들의 그림으로부터 G_{sec}/G_{max}~γ 곡선이 구속압이 작을수록 하측에 이동하는 경향이 있음을 명확히 알 수 있다. 전체적으로 Toyoura sand의 경우는 G_{sec}/G_{max}~γ 곡선이 서서히 저하하는데 반하여 S.L.B. sand의 경우는 그 곡선이 급격히 저하하고 있다. 이 G_{sec}/G_{max}의 응력수준 의존성을 알아보기 위하여 전단응력과 최대 전단응력의 비, τ/τ_{max}에 대하여 정리한 것이 그림 15, 그림 16이다. 구속압이 작을수록 G_{sec}/G_{max}~τ/τ_{max} 곡선이 좌측으로 이동하는 현상이 있음을 알 수 있다. 즉, 구속압이 클수록 G_{sec}/G_{max}의 응력수준 의존성이 작다.

한편, 그림 17, 그림 18은 각 구속압의 시험에 관하여 각 변형율에 있어서의 G_{sec}를 구해, 횡축과

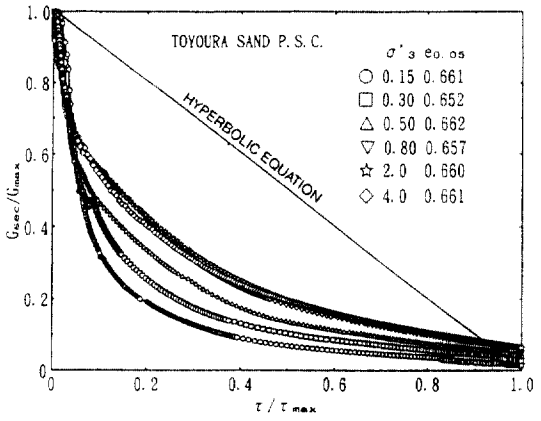

그림 15. $G_{sec}/G_{max} \sim \tau/\tau_{max}$ 관계(Toyoura sand).

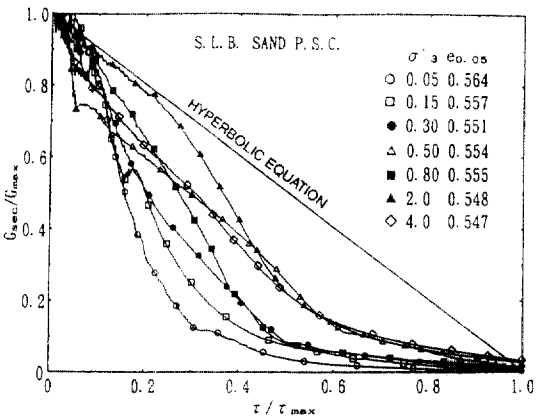

그림 16. $G_{sec}/G_{max} \sim \tau/\tau_{max}$ 관계(S.L.B. sand).

종축 각각에 구속압과 G_{sec}의 대수를 잡아 나타낸 것이다. 동일의 간극비 e에 대한 G_{sec}와 σ_3'의 관계는 양대수 그래프 상에서 넓은 범위의 변형율에 대하여 근사적으로 직선관계가 있음을 알 수 있다. 이 관계를 최소자승법으로 직선 근사해서 각 변형율수준에서의 G_{sec}가 구속압의 몇승의 함수인가를 m으로 표시하였다. 즉,

$\log(G_{sec}) = m\log(\sigma_3') + n$에서 $G_{sec} = \sigma_3'^{m} 10^{n}$

본 연구에서 구한 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 γ와 m과의 관계를 기존의 데이타와 함께 나타낸 것이 그림 19이다. 이 그림에서 S.L.B. sand의 경우 $\gamma > 10^{-5}$에서는 γ의 증대에 의한 m의 변화율이 Toyoura sand의 경우보다 크다. 이것은 S.L.B. sand가 Toyoura sand보다 G_{sec}의 변형율수준 의존성의 구

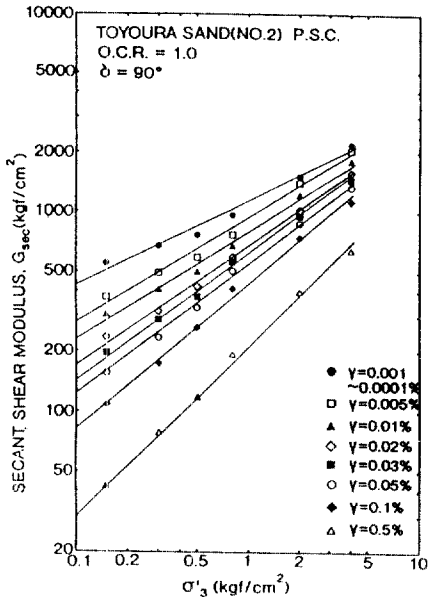

그림 17. 각 구속압에 대한 각 변형률에 있어서의 G_{sec} (Toyoura sand).

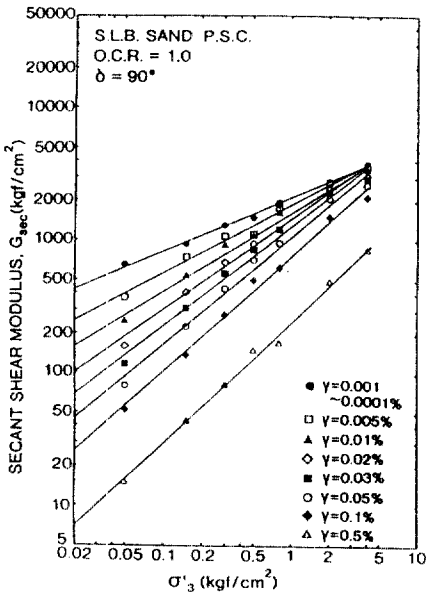

그림 18. 각 구속압에 대한 각 변형률에 있어서의 G_{sec} (S.L.B. sand).

속압에 의한 차이가 보다 더 큰 것에 대응하고 있다. 즉, γ와 σ_3'의 함수로서의 G_{sec}는

$G_{sec}(\gamma, \sigma_3') = G_{sec}(\gamma, \sigma_3' = 1.0\ \mathrm{kgf/cm^2})\sigma_3'^{m(\gamma)}$

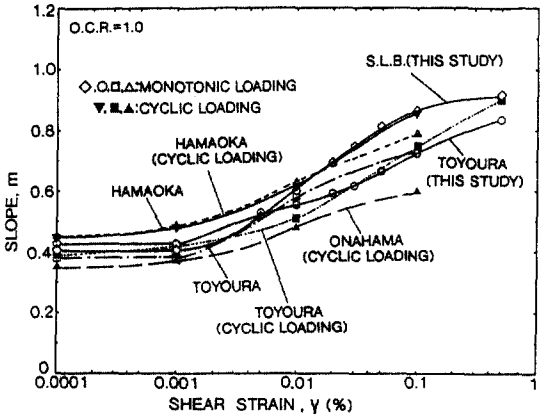

그림 19. 전단변형률 γ와 m과의 관계.

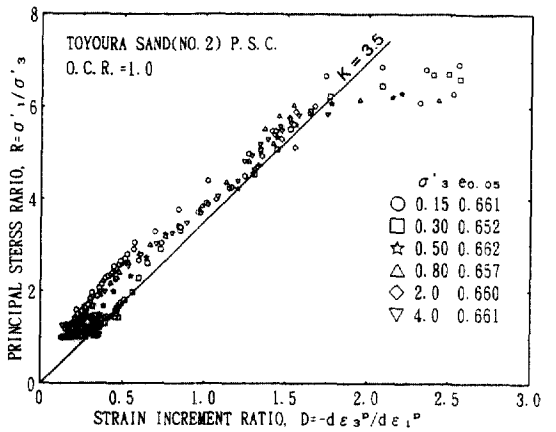

그림 20. 응력-다이러턴시 관계(구속압의 비교, Toyoura sand).

로 쓸 수 있다. 여기서, $G_{sec}(\gamma,\ \sigma_3'=1.0\ kgf/cm^2)$는 $\sigma_3'=1.0\ kgf/cm^2$일 때의 γ함수로써의 G_{sec}이다. m(γ)는 γ의 함수로써의 m이다. 어떤 변형율수준에서의 G_{sec}의 G_{max}으로부터의 저하률은

$$\frac{G_{sec}(\gamma,\ \sigma_3')}{G_{max}(\sigma_3')}=\frac{G_{max}(\delta,\ \sigma_3'=1.0\ kgf/cm^2)\times\sigma_3'^{m(\gamma)}}{G_{max}(\sigma_3'=1.0\ kgf/cm^2)\times\sigma_3'^{m(\gamma=10^{-5})}}$$
$$=\frac{G_{sec}(\gamma,\ \sigma_3'=1.0\ kgf/cm^2)}{G_{max}(\sigma_3'=1.0\ kgf/cm^2)}\times\sigma_3'^{m(\gamma)-m(\gamma=10^{-5})}$$

$\sigma_3'^{m(\gamma)-m(\gamma=10^{-5})}$는 $\sigma_3'<1.0\ kgf/cm^2$일 때는 m(γ)가 클수록 작다. 즉, m(γ)가 클수록 저압에서의 G_{sec}의 변형율수준 의존성이 크게 된다[$G_{sec}(\gamma,\ \sigma_3')/G_{max}(\sigma_3')$가 작게 된다]. 한편, σ_3'가 $1.0\ kgf/cm^2$보다 크면 $\sigma_3'^{m(\gamma)-m(\gamma=10^{-5})}$는 m(γ)가 클수록 커지므로 m(γ)가 클수록 고압에서의 G_{sec}의 변형율수준 의존성은 작게 된다.

그림 19에서 어느 경우에서도 $\gamma\leq10^{-5}$에서는 m은 일정이지만 $\gamma>10^{-5}$에서는 γ의 증대와 함께 m은 증가해 감을 알 수 있다. 또, 실험조건(예를들면, 구속압 일정의 단조재하 평면 변형율 압축시험과 평균 주응력 p 일정의 반복재하 비틀림전단시험), 혹은 모래의 종류가 달라짐에도 불구하고 전체적으로 거의 같은 경향으로 변화하고 있음을 알 수 있다.

5. 응력-다이러턴시 관계

5.1 소성 변형률 증분의 계산

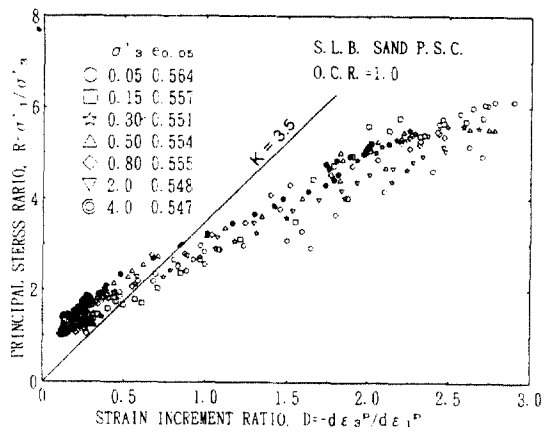

그림 21. 응력-다이러턴시 관계(구속압의 비교, S.L.B. sand).

그림 20, 그림 21은 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압의 차이에 의한 미소 변형율에서부터 파괴까지의 응력-다이러턴시 관계를 나타낸 것이다. 여기에 나타나 있는 $D=-d\varepsilon_3^p/d\varepsilon_1^p$는 탄성변형율을 고려해서 소성변형율 증분비만을 나타낸 것이다. 즉,

$$d\varepsilon_1=d\varepsilon_1^p+d\varepsilon_1^e,\quad d\varepsilon_3=d\varepsilon_3^p+d\varepsilon_3^e$$

여기에서 $d\varepsilon_1^e=dq/(E_{max})_{psc}$, $d\varepsilon_3^e=-\nu_{psc}^e\cdot d\varepsilon_1^e$를 각각 계산하여 $d\varepsilon_1^p$와 $d\varepsilon_3^p$를 구하였다. ν_{psc}^e는 축변형율 $\varepsilon_1=0.005\%$ 까지의 $\varepsilon_1\sim\varepsilon_3$ 관계에서 $\varepsilon_1\fallingdotseq0.001\%$의 변형율수준에서의 탄성적 상태의 변형율 증분비 $-d\varepsilon_3^e/d\varepsilon_1^e$이다.

5.2 구속압이 응력-다이러턴시 관계에 미치는 영향

그림 20의 Toyoura sand의 경우는 구속압에 관계없이 미소 변형율에서 평균적으로 K=3.5선의 약간 위에 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 파괴 부근에 가까워 질수록 K=3.5선 보다 약간 하방으로 이동해간다. 여기서 주의해야 할 점은 본래 응력-다이러턴시 식은 전단변형에 의한 소성변형율 증분 $(d\varepsilon_3^p)_s$, $(d\varepsilon_1^p)_s$에 대한 것이다.

그러나, σ_3' 일정의 평면 변형율 압축시험에서는 σ_1'의 증가와 함께 평균주응력 p도 증가하고 그 증가분에 의해 소성변형율 증분 $(d\varepsilon_3^p)_c$, $(d\varepsilon_1^p)_c$이 발생한다. 실측에 의해 측정된 소성변형율 증분은

$d\varepsilon_1^p=(d\varepsilon_1^p)_s+(d\varepsilon_1^p)_c$, $d\varepsilon_3^p=(d\varepsilon_1^p)_s+(d\varepsilon_3^p)_c$이다.

따라서, 만약에 p 일정의 시험을 실시하여 $(d\varepsilon_3^p)_s$, $(d\varepsilon_1^p)_s$를 직접 측정하면 데이타점은 현재의 값에서 오른쪽으로 약간 변화할 것이다(평균 주응력 일정의 시험에서는 σ_3'를 감소시키기 때문에 $-(d\varepsilon_3^p)$가 σ_3' 일정의 시험보다도 증가한다).

한편, 그림 21의 S.L.B. sand의 경우는 미소 변형율수준에서는 K=3.5선상에 있지만, 변형율이 크게 됨에 따라 K=3.5선의 하방으로 멀어져 간다(이 경우도 σ_3'일정의 평면 변형율 압축시험의 데이타이기 때문이라고 생각되어진다). 이 두 실험결과에서 S.L.B. sand의 경우가 Toyoura sand보다 K치가 작음(K≒3.0 정도)을 알 수 있다. 그러나, Toyoura sand는 구속압 $\sigma_3'=0.15\sim4.0$ kgf/cm^{2}까지, S.L.B. sand는 $\sigma_3'=0.05\sim4.0$ kgf/cm^{2}까지의 비교적 넓은 범위의 실험 결과임에도 불구하고 미소 변형율수준에서 파괴까지의 응력-다이러턴시 관계는 구속압 σ_3'의 크기에 관계없이 거의 동일하다. 또, 미소 변형율수준에서도 Rowe의 응력-다이러턴시 식이 근사적으로 성립함을 알 수 있다.

6. 결 론

구속압이 미소 변형율수준에서 파괴까지의 변형강도 특성에 미치는 영향을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 실시한 구속압 범위에서는 S.L.B. sand의 ϕ'_{max}의 구속압 의존성이 Toyoura sand보다 약간 크다고 할 수 있다.

(2) 공기건조 혹은 포화된 모래는 저구속압하에서는 ϕ'_{max}의 구속압 의존성이 크게 되지는 않는다.

(3) 모래의 할선 전단강성률 G_{sec}는 변형율수준 및 응력수준 의존성이 크고, 정규화한 G_{sec}의 변형율수준 및 응력수준 의존성은 구속압이 작을수록 더 커진다.

(4) S.L.B. sand가 Toyoura sand보다 정규화된 G_{sec}의 변형율수준 의존성이 더 크다.

(5) G_{sec}는 근사적으로 $\sigma_3'^m$에 비례하는데, m은 $\gamma<10^{-4}$에서 약 0.4 이고 γ가 커짐에 따라 m은 크게 되어, $\gamma=10^{-1}$에서 m은 약 0.9 정도가 되었다. 이러한 경향은 모래의 종류 및 시험 종류에 그다지 영향을 받지 않는다.

(6) Rowe의 응력-다이러턴시 관계 R=KD는 미소 변형율수준에서부터 파괴까지 근사적으로 성립하며 구속압의 영향을 거의 받지 않는다. 또, K값은 모래의 종류에 따라 다르다.

감사의 글

이 논문의 정리를 위해 수고해 준 동아대학교 공과대학 토목공학과 지반공학연구실의 정현철군, 이남기군에게 감사의 말을 전한다.

參考文獻

1. Hetter, A. & Vardoulakis, I., "Behaviour of Dry Sand Tested in a Large Triaxial Apparatus", *Geotechnique*, Vol. 34, No. 2, 1984, pp. 183-198.
2. Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. & Fukushima, S., "Strength and Deformation Characteristics of Sand in Plane Strain Compression at Extremely Low Pressures", *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 1, 1986, pp. 65-84.
3. Fukushima, S. & Tatsuoka, F., "Strength and Deformation Characteristics of Saturated Sand at Extremely Low Pressures", *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 4, 1984, pp. 30-48.
4. 朴春植, "平面ひずみ壓縮狀態での砂の變形·强度特性の異方性", 日本 東京大學 大學院修士論文, 1990.

5. Teachavorasinskun, S., Park, C.S., Kato, H., Shibuya, S. & Tatsuoka, F., "Deformation and Strength Characteristics of Sand in Monotonic and Cyclic Torsional Shear", 第25回 日本 土質工學會研究發表論文集, 1990.
6. Bolton, M.D., "The Strength and Dilatancy of Sands", *Geotechnicque* Vol. 36 No. 1, 1986, pp. 65-78.
7. Iwasaki, T., Tatusoka, F. & Takagi, Y., "Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading", *Soils and Foundations*, Vol. 18, No. 1, 1978, pp. 39-56.
8. Rowe, P.W., "The Stress Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact", *Proc. Royal Society London, Series A*, Vol. 269, 1962, pp. 500-527.
9. 박춘식, 龍岡文夫, 장정욱, 정진교, "평면 변형율 상태에서의 모래의 미소 거동", **한국지반공학회지** (투고 중, 1994년 게재예정), 1994.
10. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. & Sato, T., "A simple Gauge for Local Small Strain Measurements in the Laboratory", *Soils and Foundations* Vol. 31, No. 1, 1991, pp. 169-180.
11. 朴春植, "平面ひずみ壓縮試驗による各種の砂の變形·强度特性", 日本 東京大學 大學院博士論文, 1993.
12. 朴春植, 後藤聡, 龍岡文夫, "砂と礫の實內せん斷試驗における斷面摩擦輕減", 生產研究, Vol. 44, No. 5, 1992, pp. 14-18.
13. Goto, S., Park, C.S., Tatsuoka, F. & Molenkamp, F., "Quality of Lubrication Layer Used in Element Tests on Granular Materials", *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 2, 1993, pp. 47-59.
14. 朴春植, 神明進, 龍岡文夫, "平面ひずみ壓縮試驗による Silver Leighton Buzzard 砂の低拘束壓下での變形·强度特性", 日本 土木學會 第45回 年次學術講演會論文集, 1990.
15. Park, C.S., Dong, J., Abe, F., Shibuya, S. & Tatsuoka, F., "Small Strain Behaviours of Sands in Plane Strain Compression －PartII Stress dilatancy relations", *SEISAN-KENKYU*, Vol. 42, No. 10, 1990, pp. 590-593.

(接受 : 1993. 12. 6)