

응력-변형률 관계 정식화의 적용성(II) -파라메타의 경향성-

Application of Modelling Stress-Strain Relations (Part II) -A Trend of Parameters-

박 춘 식¹ Park, Choon-Sik

Abstract

Tatsuoka and Shibuya (1991) suggest a new single formulation applicable not only to a wide range of geo-materials from soft clay to soft rock, but also to a wide range of strain levels from 10^{-6} to 10^{-2} . We have carried out the plain strain compression test employing 7 kinds of research standard sand specimens and 2 kinds of glass beads, which have been used at world-renowned research institutes. With the result applied to Tatsuoka and Shibuya's newly suggested formulation, we studied a trend of parameters. In conclusion, as the value of confining pressure increases, the value of $C_1(X=\infty)$ becomes greater but there are hardly any changes in the value of $C_2(X=\infty)$. The value of $C_1(X=\infty)$ also becomes greater as the δ value increases, regardless of sand types. However, the values of $C_2(X=\infty)$ and $C_2(X=X_e)$ do not show any significant changes when there are changes in the value of δ , while the values of α and β tend to decrease as the δ value decreases.

요 지

Tatsuoka and Shibuya(1991)는 하나의 식으로 연약 점성토에서 연암에 이르는 광범위한 지반재료에 대해 적용 가능하며, 넓은 범위의 변형률 수준($10^{-6} \sim 10^{-2}$)에 대해 적용할 수 있는 새로운 제안식을 발표하였다. 본 연구는 세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종류의 연구용 표준사 공시체 및 2종류의 유리 구슬(Glass beads) 공시체를 이용하여 평면변형률압축시험을 실시하고, 새롭게 제안된 식에 적용하여 각각의 파라메타의 경향성에 대해 연구하였다. 그 결과 구속압이 클수록 $C_1(X=\infty)$ 값이 크게 되지만, $C_2(X=\infty)$ 값은 거의 변화하지 않았다. δ 에 대한 $C_1(X=\infty)$ 값의 변화는 모래의 종류에 관계없이 δ 가 클수록 크게 되는 경향이 있지만, $C_2(X=\infty)$, $C_2(X=X_e)$ 값은 δ 가 변화해도 그다지 변화하지 않았다. 한편, α , β 값은 δ 가 감소함에 따라 약간 감소하는 경향이 있었다.

Keywords : Anisotropy, Confining pressure, Plane strain compression test, Small strain, Stress-strain relationship

1. 서 론

지반을 구성하는 지반재료인 흙이나 암석의 응력-변형률 관계는 구조물의 변위, 지반의 변형, 구조물 내부의 응력 계산 등에 필요하다는 것은 명백하다. 즉, 이러

한 것들의 응력-변형률 관계는 다음과 같은 이유에서 정식화할 필요가 있다. ①유한요소해석 등에 의한 수치해석에서는 정식화한 응력-변형률 관계가 필요하다. ②정식화한 응력-변형률 관계에 사용하는 파라메타 값으로 토질의 분류가 가능하다. ③각각의 토질에 대하여 변형

¹ 정희원, 창원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg. Changwon National Univ., Tel: +82-55-213-3772, Fax: +82-55-264-7592, pcs@changwon.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

계수의 변형률 수준 의존성, 응력 수준 의존성이 정식화 되어 있다면 특정의 변형률 수준이나 응력 수준에서 측정된 원위치 시험에서의 변형계수로부터 소정의 변형률 수준 혹은 응력 수준에서의 변형계수를 추정할 수 있다.

실측한 전단 시의 응력-변형률 관계를 정식화하는 경우 다음의 조건이 필요하다. ①식은 가급적 간편해야 하며, ②파라메타 수는 적어야 하는 동시에 그 값을 원위치 시험 혹은 실내시험에서 결정할 수 있어야 한다. ③하나의 식으로 연약 점성토에서 연암에 이르는 광범위한 지반재료에 대해 적용 가능하여야 한다. ④넓은 범위의 변형률 수준(0.001%~10%)에 대해 적용할 수 있어야 한다. ⑤단조·반복시험 재하의 조건에서도 적용 가능하여야 한다. ⑥응력 경로, 배수조건, 변형률속도, 이방성, 초기 전단(초기응력상태), 과압밀이력, 반복전단이력 등의 영향을 고려할 수 있어야 한다.

그러나 많은 연구자들에 의해 제안된 기존의 정식화는 상기와 같은 조건을 모두 만족하지 못하고 있다. Tatsuoka and Shibuya(1991)는 이러한 조건들을 전부 만족하지는 못하지만 ③, ④의 조건을 만족하는 새로운 식을 제안하였다. 본 논문은 Tatsuoka and Shibuya(1991)에 의해 제안된 새로운 식을 이용하여 미소변형률 수준에서부터 파괴 시까지의 응력-변형률 관계를 정식화하였다. 연구에 사용된 시료는 세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종류의 연구용 표준사 공시체(일본: Toyoura sand, Silica sand, 영국: Silver Leughton Buzzard sand(이하 S.L.B sand), 독일: Karlsruhe sand, 미국: Monterey sand, 이탈리아: Ticino sand, 프랑스: Hostun sand) 및 2종류의 유리 구슬(Glass beads) 공시체를 사용하였다 이러한 시

료들을 공중낙하법에 의해 제작하고, 등방압밀시켜 미소변형률 측정장치를 사용한 평면변형률압축시험을 실시하였다. 시험 시는 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. 이렇게 하여 얻어진 미소변형률에서 파괴 시까지의 응력-변형률 관계를 Tatsuoka and Shibuya(1991)에 의해 제안된 새로운 식에 적용하여 피팅한 결과 실측 데이터와 매우 잘 일치하였다. 본 연구는 이러한 파라메타($C_1(X=\infty)$, $C_2(X=\infty)$, $C_2(X=X_c)$, α , β)의 이방성 및 구속압의존성에 대한 경향성의 경향을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 모든 시료의 입경가적곡선을 Fig.

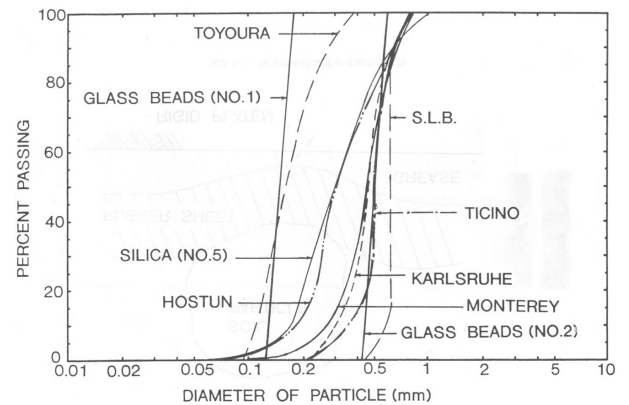


Fig. 1. Particle-size distributions of sands

Table 1. Physical properties of sands

Sand Name (Origin)	D ₅₀ (mm)	U _c	Grain Shape ¹	φ (°)	σ ₃ (kPa)	e _{max} / e _{min}	e _{0.05}	G _s
Hostun (France)	0.31	1.94	Sub-angular	47.4	80	0.95 / 0.55	0.620	2.65
Toyouura (Japan)	0.162	1.46	Sub-angular	46.3 48.7	80	0.977 / 0.605	0.660	2.64
Silica No.5 (Japan)	0.30	2.11	Sub-angular	43.1	80	0.849 / 0.520	0.650	2.69
Ticino (Italy)	0.502	1.33	Sub-round	47.9	80	0.96 / 0.59	0.660	2.68
Monterey (USA)	0.44	1.74	Sub-round	47.5	80	0.86 / 0.55	0.610	2.64
Silver Leighton Buzzard (UK)	0.62	1.11	Sub-round	45.8 47.7	80	0.79 / 0.49	0.520	2.66
Karlsruhe (Germany)	0.45	1.65	Sub-round	43.8	80	0.87 / 0.54	0.620	2.65

1에, 그 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다. 또, 실험 장치의 전체도를 Fig. 2에 표시하였다. 변형률수준 10^{-6} 에서 10^{-2} 까지의 변형률을 상세히 측정하기 위하여 공시체 측면위는 양 측면에서 국소 측면위 측정 장치(Local Deformation Transducer : LDT, Fig. 2의 ⑩)를 사용하고, 공시체 측면의 수평변위는 측방변위 측정 장치(Lateral Deformation Measuring System : LDMS, Fig. 2의 ⑪)를 사용하였다(상세한 사항은 문헌 (1), (3), (6), (7), (8)을 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(박춘식과 장정욱, 1998)를 토대로 한 단면마찰 경감층(lubrication layer)을 사용하였다. 부압 5.0kPa 하에서 공중낙하법으로 시료를 제작하였다. 이때의 간극비를 $e_{0.05}$ 로 나타내었다. 소정의 부압을 가한 후 정규압밀시켜 LDT, 구속판, LDMS를 장치하였다. 그 후 배수상태에서 변형률 제어법(측면위 $0.25\text{mm}/\text{min}$)으로 공시체를 전단하였다. 공시체내에 전단층이 발생하면 LDMS로는 공시체의 평균 측방변형률을 정확히 구할 수가 없기 때문에 파괴후의 어떤 변형률수준 이상이 되면 체적변형률 ε_v 는 일정하다고 가정하여 최소

주응력방향의 변형률 ε_3 를 역산하였다.

3. Tatsuoka and Shibuya(1991)의 제안식

최소주응력(구속압)이 일정한 평면변형률압축시험, 삼축압축시험에서의 응력-변형률 관계를 $a=1/G_{\max}$, $b=1/\tau_{\max}$ 으로 한 쌍곡선관계를 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 = \frac{\gamma}{1/G_{\max} + \gamma/\tau_{\max}} \quad (1)$$

어떤 응력상태에 있는 지반요소에 대해 최대전단응력 τ_{\max} 은 각종의 조건에 대해 비교적 안정하고, 지반조사 혹은 토질조사로 결정할 수가 있다. 또한 기존의 연구에 의하면 초기 할선전단강성률 G_{\max} 은 동적재하와 정적재하 조건에 불구하고 거의 동일하며, 응력 경로, 배수조건, 변형률속도, 이방성, 초기 전단(초기응력상태), 과압밀이력, 반복전단이력 등의 영향은 비교적 작다고 한다(Tatsuoka and Shibuya, 1991). 따라서 다음의 정규화한 원형쌍곡선관계(Original Hyperbolic Equation)는 식 (1)보다 일반적이다. 식 (1)을 정규화하여 표현하면 다음과 같다.

$$Y = \frac{X}{1+X} = 1 - \frac{1}{1+X} \quad (2)$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{G_{\text{sec}}}{G_{\max}} = \frac{1}{1+X} = 1 - Y \quad (3)$$

$$\frac{X}{Y} = 1 + X, \quad \frac{1}{Y} = \frac{1}{X} + 1 \quad (4)$$

여기서, $Y=\tau/\tau_{\max}$: 정규화한 응력,
 $X=\gamma/(\gamma)_r$: 정규화한 변형률,
 $(\gamma)_r=\tau_{\max}/G_{\max}$: 기준변형률이다.

원형쌍곡선관계 식 (2)~식 (4)를 수정하여 측정된 응력-변형률관계와 일치시키기 위하여 변형시키면 식 (5) 및 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$Y = \frac{X}{1/C_1 + X/C_2} \quad (5)$$

$$Y - Y_c = \frac{X - X_c}{1/C_1 + (X - X_c)/C_2} \quad (6)$$

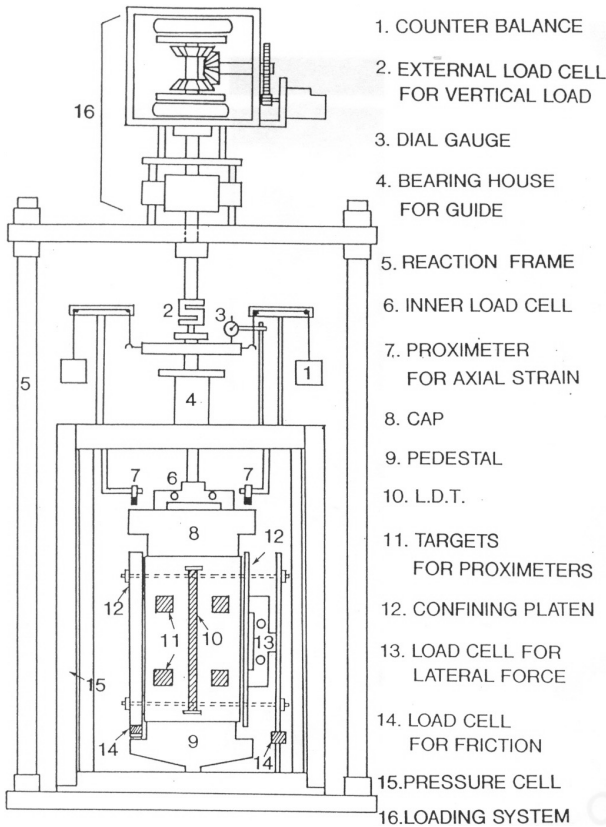


Fig. 2. Schematics of Equipment

상기 식에서 C_1 , C_2 는 정수의 경우도 있고, 변수의 경우도 있다. 또한 식 (6)은 선형탄성범위를 고려한 경우의 식이며, X_e , Y_e 는 각각 탄성한계 응력과 변형률을 나타낸다.

Tatsuoka and Shibuya(1991)는 광범위한 변형률수준, 단조재하와 반복재하, 각종의 토질재료에 대해서 적용할 수 있는 응력-변형률 관계의 정식화를 제안하였다. 이 제안된 정식을 기술하면 다음과 같다.

식 (5), 식 (6)에서 파라미터 $C_1(X)$, $C_2(X)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$C_1(X) = \frac{C_1(X = X_e) + C_1(X = \infty)}{2} + \frac{C_1(X = X_e) - C_1(X = \infty)}{2} \cdot \cos\left[\frac{\pi}{[\alpha / (X - X_e)]^m + 1}\right] \quad (7)$$

$$C_2(X) = \frac{C_2(X = X_e) + C_2(X = \infty)}{2} + \frac{C_2(X = X_e) - C_2(X = \infty)}{2} \cdot \cos\left[\frac{\pi}{[\beta / (X - X_e)]^n + 1}\right] \quad (8)$$

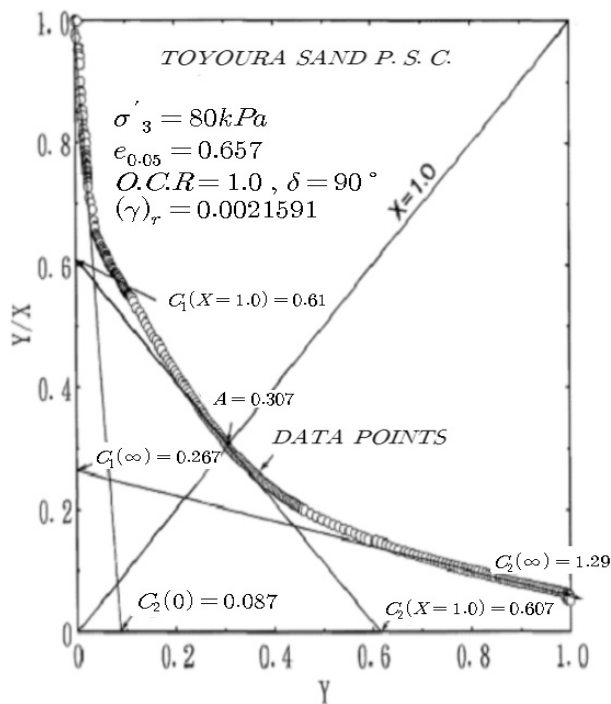


Fig. 3. $Y/X \sim Y$ relation of Hardin and Drnevich (Toyoura sand)

$C_1(X=X_e)$ 은 1.0이며, 파라미터 $C_1(X=\infty)$, $C_2(X=X_e)$, $C_2(X=\infty)$, α , β 는 다음과 같이 결정된다. m , n 은 1.0이다. Fig. 3에 나타난 $Y/X \sim X$ 관계에서 $C_2(X=X_e)$ 는 초기 부분 직선 근사선 Y 축과의 교차점 값이다. $C_1(X=\infty)$, $C_2(X=\infty)$ 는 큰 응력 수준에서의 직선 근사선이 각각 Y/X 축과 X 축과의 교차점 값이다. A점은 실측 데이터와 $X=1.0$ 선과의 교차점이다. α , β 는 이 A점에서 실측 데이터의 접선을 그어 그 선이 Y/X 축과 Y 축에 각각 교차하는 점을 $C_1(X=1.0)$, $C_2(X=1.0)$ 으로 하여 이 값들과 $X=1.0$ 을 식 (7) 및 식 (8)에 대입하여 구한다($C_1(X)$, $C_2(X)$ 의 선정과정과 $m=n=1.0$ 의 물리적, 수학적 의미 설명은 ‘응력-변형률 관계 정식화의 적용성(1) -평균변형률압축시험에 대한 적용성-’에 수록되어 있으므로 참고하기 바람).

4. 파라메타의 경향성

4.1 $C_1(X=\infty)$ 값

$C_1(X=\infty)$ 는 이 값이 작을수록 미소변형률 수준에서 원형쌍곡선 관계식(식 (1))이 실제의 강성을 과소평가하는 정도가 높다는 것을 의미한다. 즉, 미소변형률 수준에서의 응력-변형률 관계의 비선형성이 높다는 것을 의미한다. Fig. 4는 Toyoura sand의, Fig. 5는 Silver Leighton

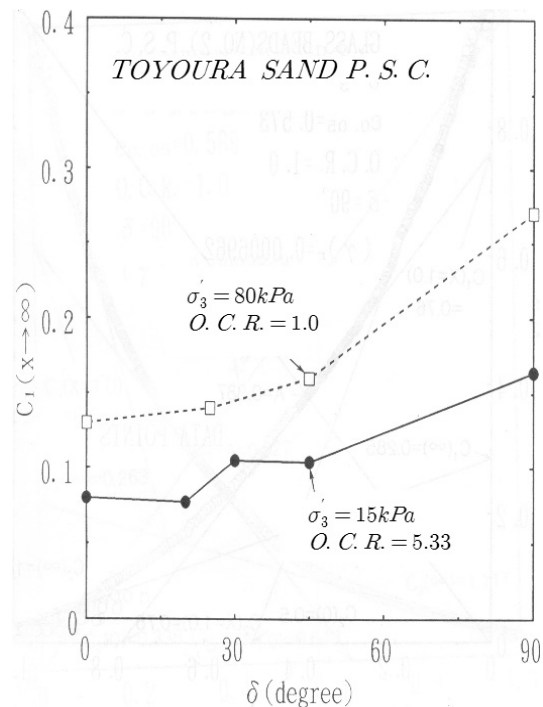


Fig. 4. Change of $C_1(X=\infty)$ according to δ (NC and OC Toyoura sand)

Buzzard sand(이하 S.L.B. sand)의 정규압밀, 과압밀 공시체의 최대주응력과 퇴적면이 이루는 각도 δ 에 대한 $C_1(X=\infty)$ 값을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 구속압이 클수록 $C_1(X=\infty)$ 값이 큰 것을 알 수 있다. 또한 δ 에 대한 $C_1(X=\infty)$ 값의 변화는 모래의 종류에 관계없이 δ 가 클수록 $C_1(X=\infty)$ 값은 크게 되는 경향이 있다. 이러한 경향은 Fig. 6의 각각의 입상체의 δ 에 대한 $C_1(X=\infty)$ 값의 변화에도 동일한 결과를 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 모래의 종류에 관계없이 δ 에 대한 $C_1(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 클수록 $C_1(X=\infty)$ 값이 크게 되는 경향이 있다는 것을 알 수 있다. 또한 $C_1(X=\infty)$ 값은 모두

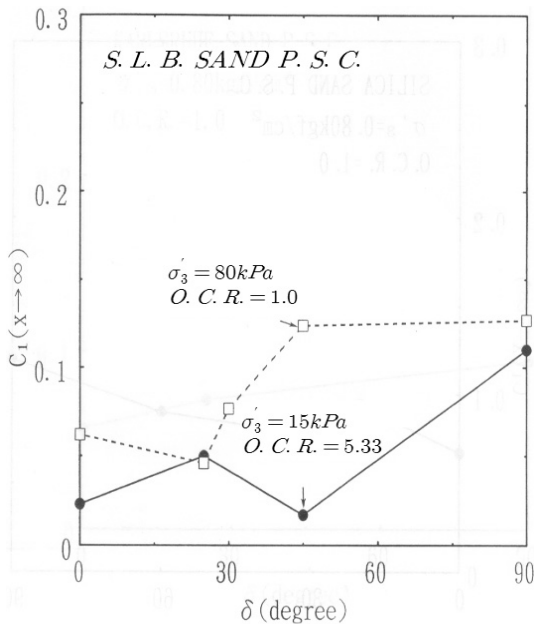


Fig. 5. Change of $C_1(X=\infty)$ according to δ (NC and OC S.L.B. sand)

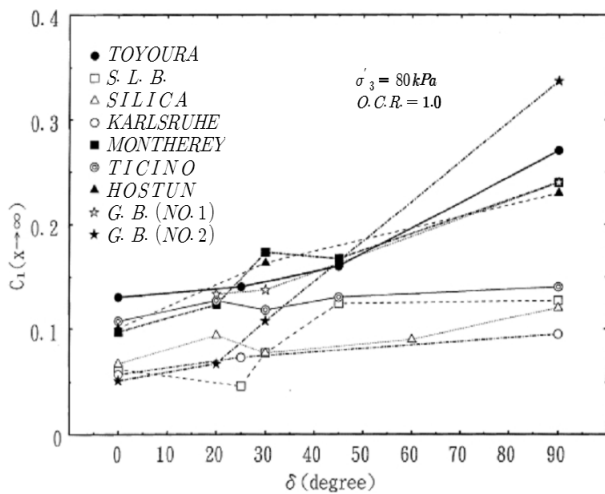


Fig. 6. Change of $C_1(X=\infty)$ according to δ (NC sands)

0.35 이하의 값을 나타내었다. 한편, Fig. 7의 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 $C_1(X=\infty)$ 값의 변화는 구속압이 클수록 $C_1(X=\infty)$ 값도 크게 되는 경향을 나타내었다.

4.2 $C_2(X=\infty)$ 값

$C_2(X=\infty)$ 는 이 값이 클수록 피크 근처에서의 원형쌍곡선이 실제의 피크 강도를 과소평가하는 정도가 크다는 것을 의미한다. Fig. 8은 Toyoura sand의, Fig. 9는

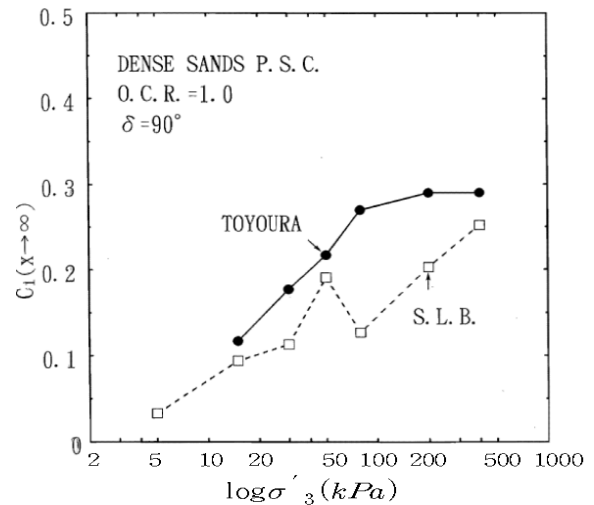


Fig. 7. Change of $C_1(X=\infty)$ according to confining pressure (Toyoura sand, S.L.B. sand)

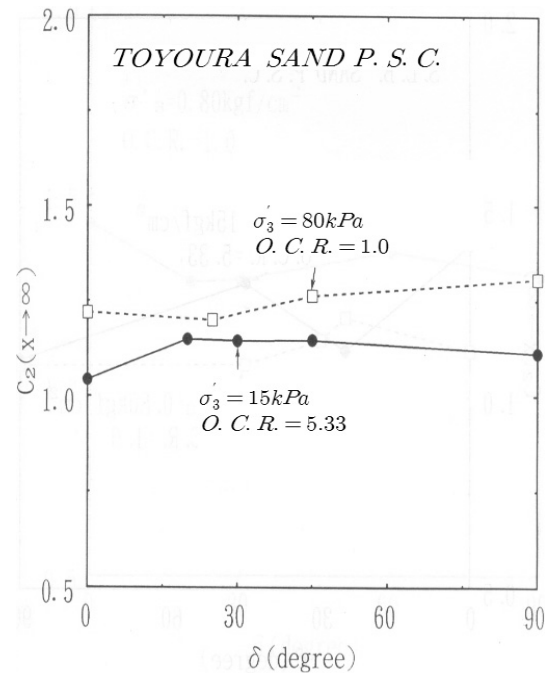


Fig. 8. Change of $C_2(X=\infty)$ according to δ (NC and OC Toyoura sand)

S.L.B. sand의 정규압밀, 과압밀 공시체의 최대주응력과 퇴적면이 이루는 각도 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값을 나타낸 그림이다. Fig. 8의 Toyoura sand의 경우는 과압밀공시체, 정규압밀공시체 모두 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=\infty)$ 값은 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 9의 S.L.B. sand의 정규압밀공시체는 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=\infty)$ 값은 그다지 변화하지 않지만, 과압밀공시체는 데이터의 분산이 약간 보인다. 그러나 전체적으로 판단할 때 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=\infty)$ 값은 그다지 변화하지 않는다고 할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 10의 각각의 입상체의 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화에도 동일한 결과를 나타내었다. 이

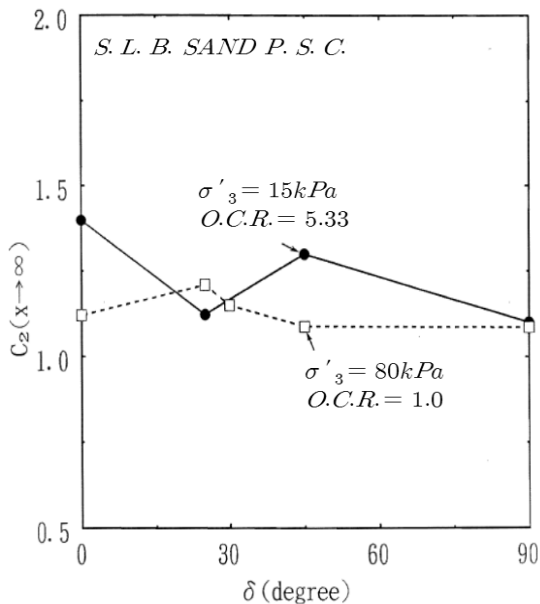


Fig. 9. Change of $C_2(X=\infty)$ according to δ (NC and OC S.L.B. sand)

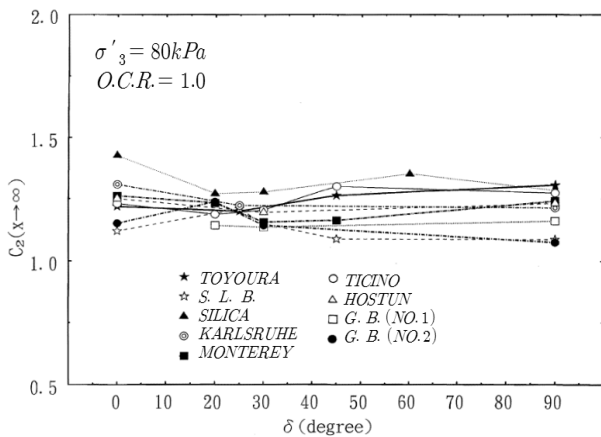


Fig. 10. Change of $C_2(X=\infty)$ according to δ (NC sands)

그림에서 알 수 있듯이 모래의 종류에 관계없이 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=\infty)$ 값은 거의 변화하지 않는 경향이 있다는 것을 알 수 있다. 또한 모래의 종류가 달라도 $C_2(X=\infty)$ 값의 절대치는 1.1 ~ 1.4의 범위에 있다. 한편, Fig. 11의 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 2종류의 모래 모두 구속압의 변화에 따라 $C_2(X=\infty)$ 값은 거의 변화하지 않는다고 할 수 있다.

4.3 $C_2(X=X_c)$ 값

$C_2(X=X_c)$ 는 이 값이 작을수록 $Y \sim X$ 관계의 비선형성

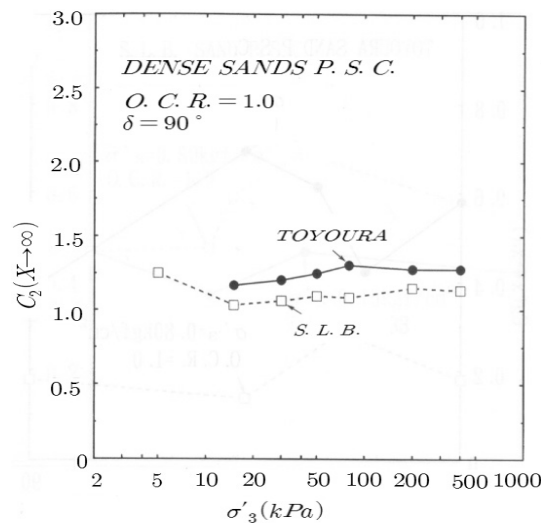


Fig. 11. Change of $C_2(X=\infty)$ according to confining pressure (Toyoura sand, S.L.B. sand)

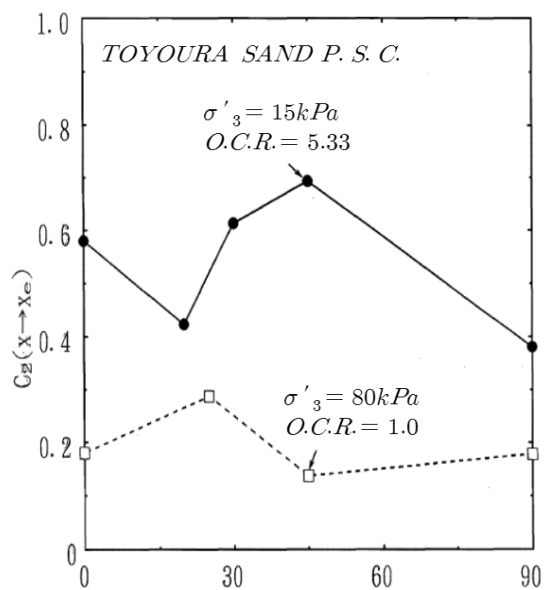


Fig. 12. Change of $C_2(X=X_c)$ according to confining pressure (NC and OC Toyoura sand)

이 크다. Fig. 12는 Toyoura sand의, Fig. 13은 S.L.B. sand의 정규압밀, 과압밀 공시체의 최대주응력과 퇴적면이 이루는 각도 δ 에 대한 $C_2(X=X_e)$ 값을 나타낸 그림이다. Fig. 12의 Toyoura sand의 경우는 과압밀공시체가 정규압밀공시체보다 $C_2(X=X_e)$ 값의 절대치가 크게 나타났다. 그러나 Fig. 13의 S.L.B. sand의 경우는 거꾸로 정규압밀공시체가 과압밀공시체보다 $C_2(X=X_e)$ 값의 절대치가 크게 나타났다. 이것은 모래의 종류에 의한 과압밀이력의 영향이 다르다는 것을 시사하고 있다. 그러나 과압밀비, 구속압이 다른 조건하에서의 비교이기 때문에 아

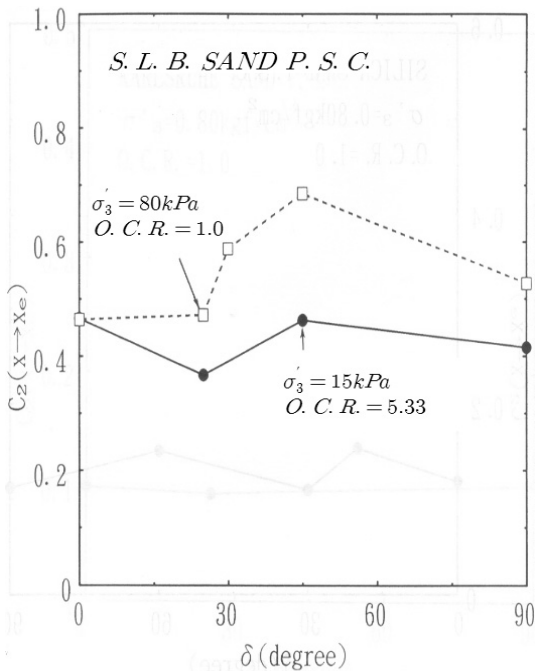


Fig. 13. Change of $C_2(X=X_e)$ according to δ (NC and OC S.L.B. sand)

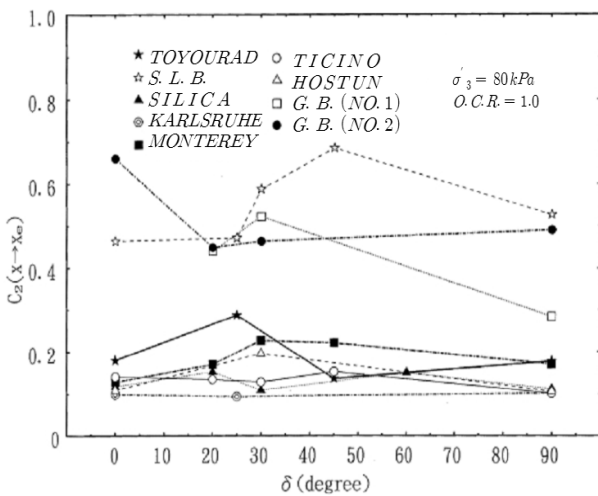


Fig. 14. Change of $C_2(X=X_e)$ according to δ (NC sands)

직 결론을 내기에는 무리가 있다고 판단된다. 한편, δ 에 대한 $C_2(X=X_e)$ 값의 변화에 관해서는 모래의 종류, 과압밀비에 관계없이 δ 가 변화해도 $C_2(X=X_e)$ 값은 거의 변화하지 않는다고 할 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 14의 각각의 입상체의 δ 에 대한 $C_2(X=X_e)$ 값의 변화에도 동일한 결과를 나타내었다. 이 그림에서 glass beads와 S.L.B. sand의 경우는 다른 입상체에 비해 $C_2(X=X_e)$ 의 절대값이 크지만 모래의 종류에 관계없이 δ 에 대한 $C_2(X=X_e)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=X_e)$ 값은 거의 변화하지 않는 경향이 있다는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 15의 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 $C_2(X=X_e)$ 값의 변화는 Toyoura sand의 경우는 구속압이 커져도 그다지 변화하지 않지만, S.L.B. sand의 경우는 구속압이 커질수록 $C_2(X=X_e)$ 값의 변화는 크게 된다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 Toyoura sand의 $C_2(X=X_e)$ 값이 S.L.B. sand의 $C_2(X=X_e)$ 값보다 훨씬 작게 나타났다. 이것은 미소변형률에서의 비선형성이 Toyoura sand가 크게 나타난 것과 대응하고 있다.

4.4 α , β 값

Fig. 16은 정규압밀공시체의 최대주응력과 퇴적면이 이루는 각도 δ 에 대한 α 값을 나타낸 그림이다. 전체적으로 δ 에 대한 α 값의 변화는 S.L.B. sand를 제외하고는 모래의 종류에 거의 관계없이 δ 가 감소함에 따라 α 값은 거의 일정하거나 약간 감소하는 경향이 있다고 할 수 있다. 한편, Fig. 17의 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 α 값의 변화는 Toyoura sand의 경우는

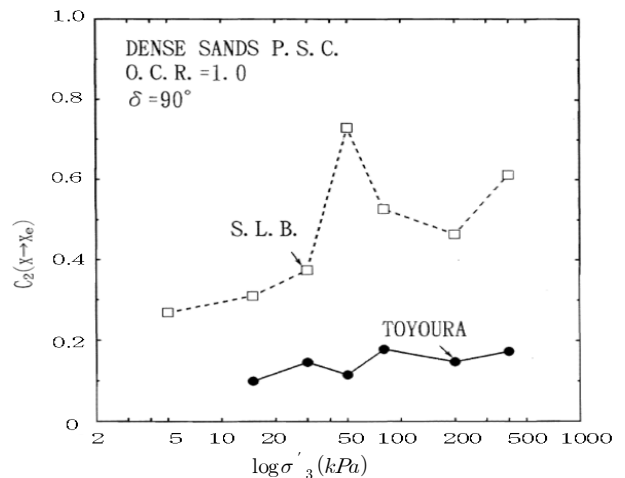


Fig. 15. Change of $C_2(X=X_e)$ according to confining pressure (Toyoura sand, S.L.B. sand)

구속압의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 가지지만 S.L.B. sand의 경우는 구속압이 50kPa, 80kPa의 경우 α 값이 크게 나타났다. α 값의 절대값은 S.L.B. sand의 경우가 Toyoura sand에 비해 크게 나타났다. 이것은 모래의 종류가 다름에 따른(입자의 크기 및 형상 등에 따른) 영향이라고 판단된다. Fig. 18은 정규압밀공시체의 최대 주응력과 퇴적면이 이루는 각도 δ 에 대한 β 값을 나타낸 그림이다. 전체적으로 δ 에 대한 β 값의 변화는 모래의 종류에 거의 관계없이 δ 가 감소함에 따라 β 값은 약간 감소하는 경향이 있다고 할 수 있다. 한편, Fig. 19의 Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 β 값의 변화는 Toyoura sand의 경우는 구속압의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 가지지만 S.L.B. sand의 경우는 구속압의 변화에 따라 데이터의 분산이 커 그 경향성을 판단

하기 어렵다. 구속압에 따른 α , β 값의 경향성은 향후 모래의 종류를 달리하여 명확하게 규명할 필요가 있다고 판단된다.

5. 결론

세계 각국의 주요 연구기관에서 사용되고 있는 7종류의 연구용 표준사 공시체 및 2종류의 유리 구슬(Glass beads) 공시체를 공중낙하법에 의해 제작하고, 등방압 밀시켜 미소변형률 측정장치를 사용한 평면변형률압축 시험을 실시하였다. 이렇게 하여 얻어진 미소변형률에서 파괴 시까지의 응력-변형률 관계를 Tatsuoka and Shibuya(1991)에 의해 제안된 새로운 식에 적용하였다. 그 결과를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구속압이 클수록 $C_1(X=\infty)$ 값이 크며, δ 에 대한 C_1

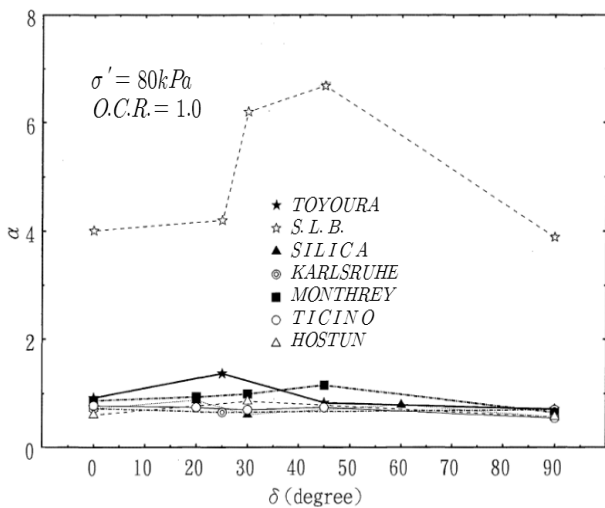


Fig. 16. Change of α according to δ (NC sands)

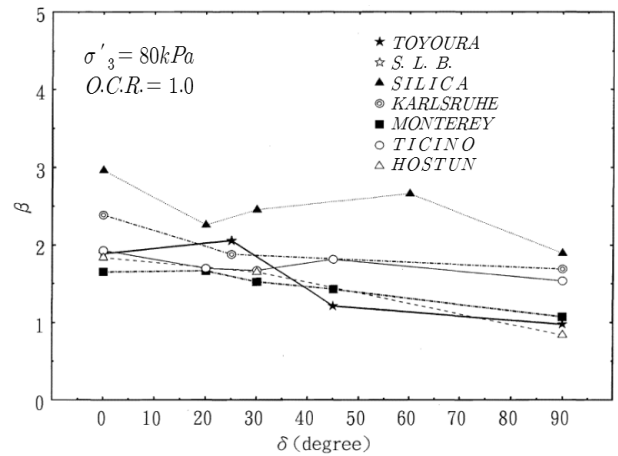


Fig. 18. Change of β according to δ (NC sands)

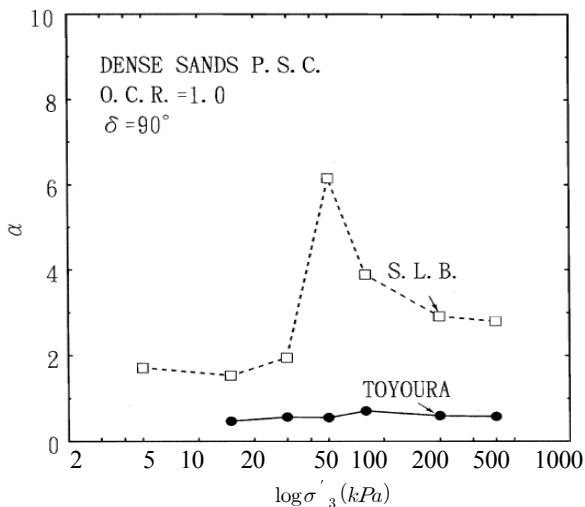


Fig. 17. Change of α according to confining pressure (Toyoura sand, S.L.B. sand)

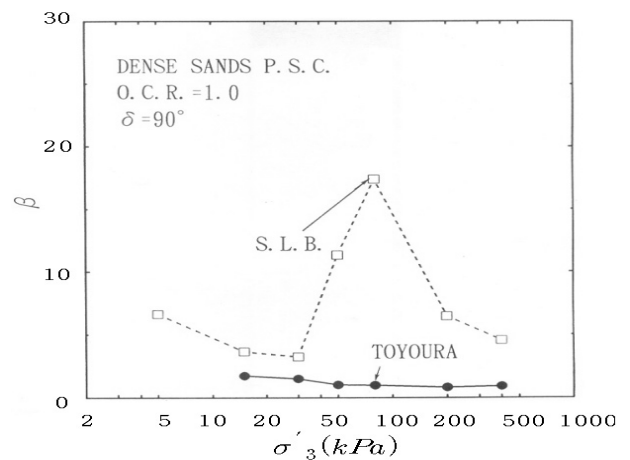


Fig. 19. Change of β according to confining pressure (Toyoura sand, S.L.B. sand)

($X=\infty$) 값의 변화는 모래의 종류에 관계없이 δ 가 클수록 $C_1(X=\infty)$ 값은 크게 되는 경향이 있다. 또한 $C_1(X=\infty)$ 값은 모두 0.35이하의 값을 나타내었다.

- (2) Toyoura sand의 경우는 과압밀공시체, 정규압밀공시체 모두 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=\infty)$ 값은 거의 변화하지 않았다. 한편, S.L.B. sand의 정규압밀공시체는 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=\infty)$ 값은 그다지 변화하지 않지만, 과압밀공시체는 데이터의 분산이 약간 보였다. 그러나 전체적으로 판단할 때 δ 에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 δ 가 변화해도 $C_2(X=\infty)$ 값은 그다지 변화하지 않는다. 또한 모래의 종류가 달라도 $C_2(X=\infty)$ 값의 절대치는 1.1~1.4의 범위에 있다. 한편, Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 $C_2(X=\infty)$ 값의 변화는 2종류의 모래 모두 구속압의 변화에 따라 $C_2(X=\infty)$ 값은 거의 변화하지 않았다.
- (3) δ 에 대한 $C_2(X=X_c)$ 값의 변화는 모래의 종류, 과압밀비에 관계없이 δ 가 변화해도 $C_2(X=X_c)$ 값은 거의 변화하지 않았다. 한편, Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 $C_2(X=X_c)$ 값의 변화는 Toyoura sand의 경우는 구속압이 커져도 그다지 변화하지 않지만, S.L.B. sand의 경우는 구속압이 커질수록 $C_2(X=X_c)$ 값의 변화는 크게 되었다.
- (4) δ 에 대한 α 값의 변화는 모래의 종류에 거의 관계없이 δ 가 감소함에 따라 α 값은 약간 감소하는 경향이 있다고 할 수 있다. 한편, Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 α 값의 변화는 Toyoura sand의 경우는 구속압의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 가지지만 S.L.B. sand의 경우는 구속압이 50kPa, 80kPa의 경우 α 값이 크게 나타났다. 그러나 S.L.B. sand의 경우 전체적으로는 구속압이 커질수록 약간 커지는 경향이 있다고 할 수 있다. 이것은 모래의 종류가 다름에 따른(입자의 크기에 따른) 영향이라고 판단된다.
- (5) δ 에 대한 β 값의 변화는 모래의 종류에 거의 관계없이

δ 가 감소함에 따라 β 값은 약간 감소하는 경향이 있다고 할 수 있다. 한편, Toyoura sand와 S.L.B. sand의 구속압에 대한 β 값의 변화는 Toyoura sand의 경우는 구속압의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 가지지만 S.L.B. sand의 경우는 구속압의 변화에 따라 데이터의 분산이 커 그 경향성을 판단하기 어렵다.

- (6) 구속압에 따른 α , β 값의 경향성은 향후 모래의 종류를 달리하여 명확하게 규명할 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌 (References)

1. Park, C.S., Tatsuoka, F., Jang, J.W., and Chung, C.K. (1994), "Small Strain Measurements of Sands in Plane Strain Compression", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.10 No.1, pp.27-45.
2. Park, C.S. and Jang, J.W. (1998), "Lubrication of Specimen Ends for Granular Materials in Element Tests", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.18, No.3, pp.689-698.
3. 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.
4. Hardin, B.O. and Dmievich, V.P. (1972), "A Study on the Hyperbolic Model for Nonlinear Stress-Strain Relations of Geo-Materials", *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol.98, No.SM7, pp.667-692.
5. Kondner, R. B. (1963), "Hyperbolic Stress-Strain Response : Cohesive Soils", *Journal of SMF Div., ASCE*, Vol.89, No.SM1, pp.115-143.
6. Park, C.S., Dong, J., Abe, F., Shibuya, S., and Tatsuoka, F. (1990), "Small Strain Behaviour of Sands in Plane Strain Compression-Part II", *SEISAN-KENKYU*, Vol.42, No.10, pp.590-593.
7. Sibuya, S., Park, C.S., Abe, F., and Tatsuoka, F. (1991), "Small Strain Behaviour of Sands in Plane Strain Compression-Part I", *SEISAN-KENKYU*, Vol.42, No.9, pp.561-564.
8. Sibuya, S., Tatsuoka, F., Abe, F., Kim, Y.S., and Park, C.S. (1991), "Non-Linearity in Stress-Strain Relations of a Wide Range of Geotechnical Engineering Materials-Part I", *SEISAN-KENKYU*, Vol.43, No.2, pp.129-132.
9. Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991), "Modelling of Non-Linear Stress-Strain Relations of Soils and Rocks-Part 1, Discussion of Hyperbolic Equation", *SEISAN-KENKYU*, Vol.43, No.9, pp.23-26.
10. Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1991), "Modelling of Non-Linear Stress-Strain Relations of Soils and Rocks-Part 2, New Equations", *SEISAN-KENKYU*, Vol.43, No.10, pp.13-15.

(접수일자 2012. 7. 23, 수정일 2012. 12. 11, 심사완료일 2013. 10. 10)