

Silt 질 모래의 고변형률 진동특성(기본성질)

Dynamic Properties of Silty Sands at High Amplitude (Basic Properties)

宋 定 洛*

Song, Chung-Rak

金 秀 一**

Kim, Soo-Il

Abstract

Soils behave non-linearly at high strain. This study investigated the non-linear behavior of silty sands (Mixture of Ottawa Sand and Quartz Powder) by resonant column tests. The results were compared with Ramberg-Osgood's non-linear equation.

From the tests, it was shown that the change of shear modulus and damping ratio was more sharp at low fine content, high void ratio and low confining pressure. It was also found that Ramberg-Osgood parameter, R was approximately 2.0, however the range of C varied from 200 to 3200.

要 旨

고변형률을 받는 모래는 비선형 거동을 나타내게 된다. 본 연구에서는 석영질 모래의 공극비와 미세입자(석영분말)함량을 변화시키면서 모래의 고변형률 진동특성을 공진주 실험을 이용하여 조사하였다. 그 결과 석영분말을 섞음에 따라 전단탄성계수와 감쇠비는 석영분말의 함량을 증가시킬수록 전단변형률에 대한 변화가 점점 더 완만하였고 공극비의 변화에 대해서는 그 변화가 두드러지지 못하였다.

또한 Ramberg-Osgood 방적식을 써서 흙의 진동특성과 전단변형률과의 관계를 고찰하였는 바 전단탄성계수와 감쇠비 모두의 경우 R 은 2.0 정도이나 C 는 시료상태 및 구속압력에 따라 200에서 3200 까지의 큰 변화를 나타내었다.

1. 서 론

우리나라는 비교적 안정된 지각구조로서 지진의 피해는 거의 받지 않은 편이다. 그러나 최근 지하철, 원자력 발전소, 기계기초등은 흙의 진동특성의 중요성을 일깨우고 있다. 흙의 거동은 크게 나누어 선형거동과 비선형거동으로 나눌 수 있다. 공진주 실험의 경우 선형거동에 대해서는

앞서의 연구(송정락 김수일, 1987)에서 이미 토론하였으므로 여기서는 흙의 비선형거동에 대해서만 언급한다.

2. 본 론

2.1 실험재료

본 실험에서 사용된 재료는 ASTM C-109 Ot-

* 正會員 : 전 The University of Texas, Austin, Research Engineer Associate II

** 正會員 : 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

Table 1. Specimens for the Resonant Column Test

No.	Specimen	Fine Content(%)	Void Ratio(e)
1	SONG 25	0	0.479
2	SONG 5	0	0.580
3	SONG 26	0	0.648
4	SONG 24	2	0.499
5	SONG 14	2	0.539
6	SONG 22	2	0.609
7	SONG 20	5	0.462
8	SONG 9	5	0.533
9	SONG 23	5	0.653
10	SONG 19	10	0.445
11	SONG 13	10	0.562
12	SONG 21	10	0.638
13	SONG 27	20	0.460
14	SONG 11	20	0.522
15	SONG 28	20	0.662

*Odd numbers at the end of the specimen name means hollow specimen.

tawa Sand와 석영분말(주로 Silt 크기의 입자)의 혼합체로서 그 혼합물은 모래와 석영분말의 비율이 80 : 20 (20%), 90 : 10 (10%), 95 : 5 (5%), 98 : 2(2%) 및 100 : 0(0%)의 5가지이다. 또한 각각의 석영분말 함량에 대한 공시체의 공극비는 세가지로 조절하여 총 15개의 공시체를 제작하였다. 이때 공극비를 조절하는 방법으로는 과소다짐법(Undercompaction)을 이용하여 공시체 내부가 균등한 다짐정도가 되도록 하였다(Ladd, 1978)⁷⁾. 공시체 개개의 공극비와 석영분말 함량은 Table 1에 나타나 있고 입도곡선은 송정락, 김수일¹²⁾에 나타나 있다.

본 연구에서 제작된 공시체는 속이 찬 공시체(Solid specimen)와 속이 빈 공시체(Hollow specimen)의 두가지로 제작되었다. 공시체의 제작과정은 속이 찬 공시체의 경우 Song(1986)¹¹⁾에, 속이 빈 공시체의 경우 Ni(1987)⁸⁾에 자세히 나타나 있다.

2.2 실험기구

본 연구에서는 Stokoe-공진주 실험기를 사용하였다. 그 기구 및 실험방법은 송정락, 김수일(1987)¹²⁾에서 밝혔으므로 여기서는 체적 측정기

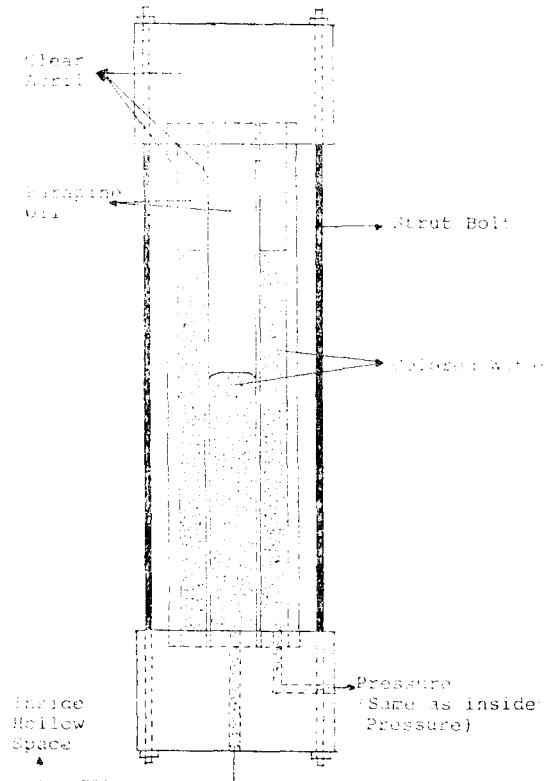


Fig. 1 Self compensating volumeter

의 특징만을 설명한다. 이 체적측정기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 높은 압력에서도 측정대상의 압력에 관계없이 체적을 측정할 수 있다. 이렇게 체적변화 측정 대상 공간의 압력을 효과적으로 보상시켜 준다고 해서 “자가보상 체적측정기(Self compensating volumeter)”라고 이름지었다. 공진주 실험중 공시체의 체적변화는 통상 공시체의 길이 변화를 LVDT에 의해 측정하고 등방변화란 가정하에 공시체의 지름의 변화를 추산한다. 그러나 본 연구에서는 보다 정확도를 높이기 위해 Fig. 2와 같이 장치하였다. 공시체의 윗 부분에 위치한 1개의 LVDT로서는 공시체의 길이 변화를 측정하였고 공시체의 중앙 부분에 위치한 3개의 무접점 간격측정기로서는 공시체의 지름의 변화를 측정하였다. 속이 빈 공시체의 경우 자가보상 체적 측정기를 이용하여 공시체 속공간의 체적변화를 측정하였다. 이렇게 하여 공시체 전체의 체적변화와 전단파의 속도 계산에 필요한 공시체의 직경과 길이를 계산하

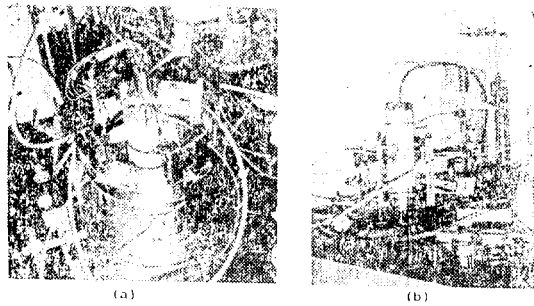


Fig. 2 Volume measuring mechanism(1=Radial proximeter, 2=Vertical LVDT, 3=Self compensating volumeter)

었다. 이 과정에서 가정은 공시체의 지름의 변화가 상·중·하 모든 부위에서 같이 일어난다는 Radial-Uni-Strain으로서 등방변화란 가정을 배제하였다.

2.3 전단변형률과 구속압력의 적용순서

전단변형률을 주는 순서는 Anderson and Stokoe(1978)¹¹⁾와 유사한 방법으로 Fig. 3에 나타난 바와 같이 저-저-저-고-저-고-저-고-저.....변형률을 적용하였다.

이때 고변형률이라 함은 전단탄성계수의 감소가 일어날 수 있는 변형률, 즉 한계변형률(Threshold strain) 이상으로서 본 연구의 경우 전단 변형률 $1 \times 10^{-3}\%$ 이상의 변형률을 말한다. Fig. 3과 같은 순서로 전단변형률을 증가시켜 그 값이 기기의 가능최고 변형률인 $1 \times 10^{-1}\%$ 근방이 되었을 때 구속압력을 변화시킨 후 1일간의 등방

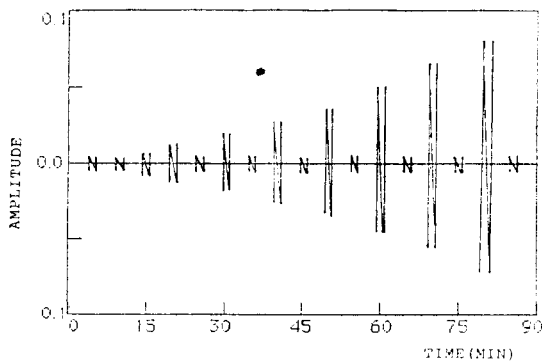


Fig. 3 Strain sequency for high amplitude test

압밀 후 같은 변형률 순서로 실험을 계속하였다.

구속압력은 최초 1.5 psi에서 1일간 압밀시키고 3 psi로 증가시켜 앞서의 변형률 순서대로 고 변형률 실험을 실시하였다. 다음 구속압력을 6 psi, 12 psi, 24 psi, 48 psi로 증가시키고 다시 12 psi, 3 psi로 감소시키면서 과압밀 상태의 공시체에 대하여 같은 실험을 하였다. 이때 압력과 압력과의 시간차는 1일로 하였다.

본 실험에 사용된 시료의 경우 1일간의 압밀은 1차 및 2차 압밀에 요구되는 충분한 시간으로 검증하여 사용하였다(Song, 1986).¹¹⁾

3. 기본이론

3.1 계산식에서의 자연주파수와 공진주파수의 관계

공진주 실험의 결과를 해석하는데 쓰이는 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega n l}{v_s} \tan \frac{\omega n l}{v_s} \dots \dots \dots (1)$$

여기서,

ω_n = 공시체의 자연주파수

l = 공시체의 길이(높이)

v_s = 공시체에서의 전단파 속도

I = 공시체의 극관성모멘트

I_0 = 진동판의 극관성모멘트

그런데 이 방정식은 선형탄성거동을 하는 막대의 1자유도(Single degree of freedom) 진동 해석으로 부터 유도되었다.

그러므로 여기서 ω_n 은 비감쇠(Undamped) 자연주파수이다. 그런데 공진주실험에서 측정되는 주파수는 감쇠 공진주파수(Damped resonant frequency)이다. 공진주실험의 경우 위의 두 주파수의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\omega_m = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \dots \dots \dots (2)$$

여기서,

ω_m = 감쇠 공진주파수(Damped resonant frequency)

D = 감쇠비(Damping ratio)

공진주 실험에서는 D 의 영향을 무시하여 ω_m 과 ω_n 을 통상 동일시하여 $\omega_m = \omega_n$ 인 가정하에 ω_m 을 쓰고 있다. 이 가정은 저변형률에서와 같이

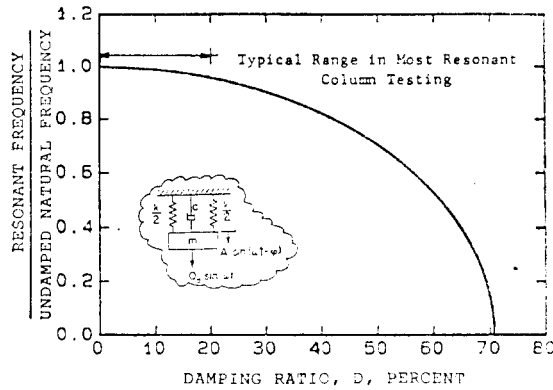


Fig. 4 Variation in ratio of resonant frequency to undamped natural frequency with material damping ratio for a Single-Degree-of-Freedom (SDOF) system

$D \approx 0$ 인 경우는 문제가 없으나 그렇지 않을 경우는 문제가 될 수 있다. Hardin and Scott(1966)⁴⁾는 $D \leq 10\%$ 정도에서는 이 가정을 별 무리없이 적용할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 감쇠비 D 의 최대값이 약 15%였는데, 이때 D 의 영향은 식 (3)과 같이 표시될 수 있으나 본 연구에서는 감쇠비의 영향은 무시하였다.

$$G_m = 0.978 G_n \quad (\text{at } D=15\%) \dots\dots\dots(3)$$

여기서,

$G_m = \omega_m$ 으로 계산된 전단탄성계수

$G_n = \omega_n$ 으로 계산된 전단탄성계수

공진주 실험의 경우 감쇠비의 영향은 Fig. 4에 나타나 있다.

3.2 Ramberg-Osgood 방정식

1943년 Ramberg와 Osgood⁹⁾는 Fig. 5와 같은 비선형 응력-변형률의 관계 곡선식을 수학적으로 유도하였다. 그 곡선식의 모양을 식으로 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\gamma = (\tau/G)_{\max} + C(\tau/G_{\max})^R \dots\dots\dots(4)$$

여기서,

γ = 전단변형률

τ = 전단응력

G_{\max} = 저변형률 전단탄성계수

C, R = 실험으로 결정되는 상수

이때 $\bar{G} = G/G_{\max}$ 로 놓고 식 (4)를 정리하면 다음과 같이 된다.

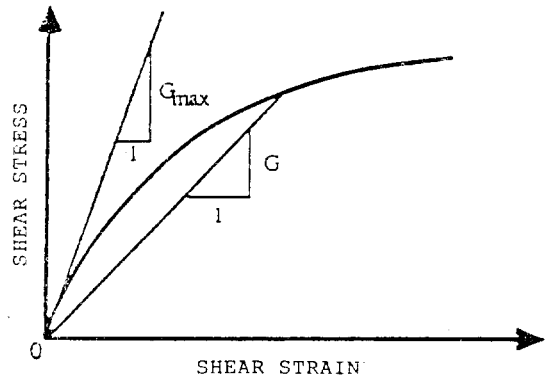


Fig. 5 General shape of ramberg-Osgood stress-strain backbone curve

$$\gamma = \bar{G} \cdot \gamma + C(\bar{G} \cdot \gamma)^R \dots\dots\dots(5)$$

$$\gamma(1 - \bar{G}) = C(\bar{G} \cdot \gamma)^R \dots\dots\dots(6)$$

$$\log[\gamma(1 - \bar{G})] = \log C + R \log(\bar{G} \cdot \gamma) \dots\dots\dots(7)$$

식 (7)을 $Y = K + R \log X$ 의 일반적인 형태로 나타내고 실험자료를 최소자승법에 의해 처리함으로써 C, R 을 구할 수 있다.

같은 방법을 사용하여 감쇠비와 전단변형률과의 관계를 표시하면 식 (8)과 같이 된다.

$$D = D_{\max} C \gamma^{R-1} \bar{G} R \dots\dots\dots(8)$$

여기서,

$$D_{\max} = 2(R-1)/[\pi(R+1)]$$

본 연구에서는 실험 자료를 통계처리함으로써 C, R 을 구하였다.

4. 결 과

4.1. 고변형률 전단탄성계수

전단탄성계수와 전단변형률의 관계가 5번 공시체를 통하여 Fig. 6에 대표적으로 나타나 있다. 이때 구속압력에 따른 전단탄성계수의 절대값의 영향을 없애기 위하여 정규화 전단탄성계수 (G/G_{\max} , G =임의의 변형률에서의 전단탄성계수, G_{\max} =전단변형률 $1 \times 10^{-3}\%$ 이하에서의 전단탄성계수)로 표시하였다.

또한 5번 공시체의 경우 전단탄성계수의 절대값의 변화양상은 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 6에서 보듯이 전단탄성계수는 처음에는 일정한 값을 유지했으나 전단변형률이 어느 정도를 넘어

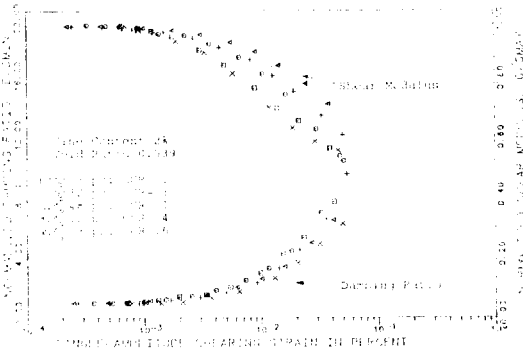


Fig. 6 Normalized shear modulus and normalized damping ratio-different confining pressure

서면서 부터는 점차로 감소하였다. 전단탄성계수가 감소하기 시작하는 점은 구속압력의 크기에 따라 다르지만 대개 전단변형률 $1 \times 10^{-3}\%$ 근방에서 발생하였다. 따라서 본 실험에서의 한계 변형률은 약 $1 \times 10^{-3}\%$ 임을 알 수 있었다. 또한 Fig. 6에서 전단탄성계수의 변화양상은 구속압력이 클수록 완만하게, 낮을수록 급격하게 변화함을 보여 주었다. 이 현상은 다른 연구결과(Seed and Idriss(1970)¹⁰, Stokoe and Lodde(1978)¹³, Isenhower(1979)⁵, Canales(1980)², Kuo(1982)⁶, Hagg(1985)⁴)들과도 잘 일치하였다. Fig. 6의 Data를 이용해 Ramberg-Osgood 방정식의 상수들을 구해 보면, $C=1,000 \sim 3,200$, $R=1.9 \sim 2.0$ 이었다.

Fig. 7에는 각각 다른 석영분말함량의 공시체의 전단변형률에 대한 전단탄성계수의 변화를 나

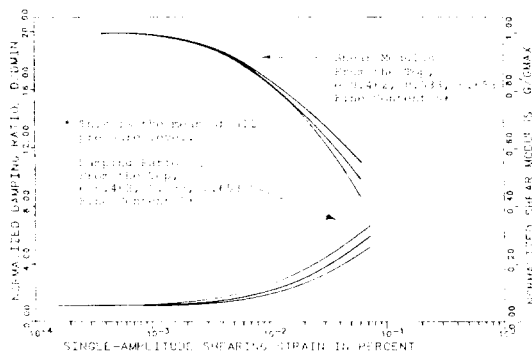


Fig. 7 Normalized shear modulus and normalized damping ratio-different fine content

타내고 있다.

Fig. 7에서 전단탄성계수의 전단변형률에 대한 변화양상은 석영분말함량이 증가 될수록 완만하게, 감소할수록 급격하게 변화하였다.

이 현상은 Seed and Idriss(1970)¹⁰의 결과와 잘 일치한다. Fig. 7의 공시체의 공극비는 모두 유사한 것으로 하여 그 차이는 무시하였다(Table. 1 참조). 이 때 실험결과로부터 Ramberg-Osgood 상수들은 각각 $C=2,000 \sim 3,000$, $R=2.0 \sim 2.1$ 임을 알 수 있었다.

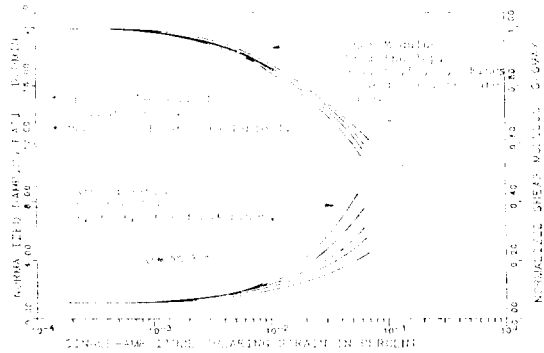


Fig. 8 Normalized shear modulus and normalized damping ratio-different void ratio

Fig. 8에는 각각 다른 공극비의 시료에 대한 전단탄성계수의 전단변형률에 대한 변화를 나타내었다. 이것은 일반적으로 느슨한 모래일수록 완만한 변화를 보이는 현상과 상이한 추세를 보여 주었다. Fig. 8로부터 Ramberg-Osgood 상수를 구해보면 $C=800 \sim 3,200$, $R=1.8 \sim 2.0$ 의 범위를 가짐을 알 수 있었다.

Fig. 9에는 전단탄성계수의 절대치의 변화를 Table 1의 5번 공시체의 결과를 통해서 대표적으로 보여 주고 있다. 이 그림은 고변형률 전단탄성계수의 변화를 나타낸 이외에 고변형률 사이사이에서 행한 저변형률 실험결과도 보여 주고 있다. 그림에서 검은 동그라미로 표시된 점들이 바로 그것으로서 이는 그 점이 위치한 전단변형률에서 고변형률 실험을 행하고 나서 곧바로 측정된 저변형률 전단탄성계수이다. 그 변화양상은 구속압력 3 psi에서는 점차로 증가하고 12 psi에서는 거의 변화가 없고 48 psi에서는 점차 감소하였다. 다른 공시체의 결과는 구속압력

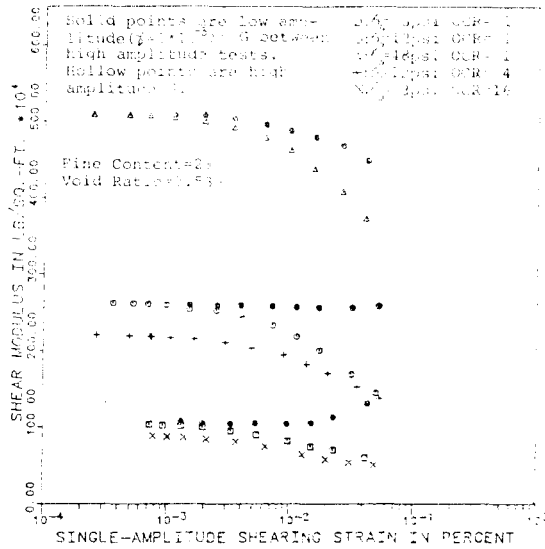


Fig. 9 Low amplitude shear modulus right after the high amplitude test

3 psi 와 48 psi 에 대해서는 5 번 공시체와 동일한 변화양상을 보여 주었고, 12 psi 에서는 거의 변화가 없거나, 매우 소폭의 증가 혹은 감소가 일어나는 현상으로서 5 번 공시체와 유사한 변화를 보여 주었다.

4.2 고변형률의 감쇠비

Fig. 6 에는 감쇠비의 전단변형률에 대한 변화가 각기 다른 구속압력에 대해 나타나 있다. 이 그림에서도 구속압력에 따른 감쇠비의 절대값의 영향을 없애기 위해 정규화 감쇠비(D/D_{min} , D = 임의의 전단변형률에서의 감쇠비, D_{min} = 전단변형률 $1 \times 10^{-3} \%$ 이하에서의 감쇠비)로 표시하였다.

그 변화양상 역시 구속압력이 높을 때는 변화가 완만하고 구속압력이 낮을 때는 변화가 급격하여 전단탄성계수의 변화와 상응하는 양상을 보여 주었다. 이때 역시 전단변형률 $1 \times 10^{-3} \%$ 근방에서부터 에너지 감쇠율의 변화가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이로부터 한계전단변형률이 $1 \times 10^{-3} \%$ 근방임을 다시 확인할 수 있었다. 또 이로부터 Ramberg-Osgood 상수를 계산해 보면, $C=400 \sim 800$, $R=1.9 \sim 2.1$ 임을 알 수 있

었다.

Fig. 7 에는 석영분말함량이 각각 다른 공시체에서 감쇠비와 전단변형률과의 관계를 보여 주고 있다. 전단변형률의 변화양상에서 예측할 수 있듯이 석영분말 함량이 많은 경우에는 완만한 변화를, 석영분말 함량이 적은 경우에는 급격한 변화를 보여 주었다. 이 현상 역시 Seed and Idriss (1970)¹⁰⁾의 결과와 잘 상응하였다. Fig. 7 에서는 $C=200 \sim 400$, $R=2.1 \sim 2.3$ 의 범위를 보여 주었다.

Fig. 8 에는 공극비가 각각 다른 공시체의 경우에는 감쇠비의 변화는 느슨한 모래일수록 완만하게 변화함을 보여 준다. 이 때의 Ramberg-Osgood 상수는 $C=400 \sim 1,600$, $R=2.2 \sim 2.3$ 의 범위를 보여 주었다.

5. 결 론

본 연구에서는 Ottawa Sand 에 셀트크기의 석영분말을 혼합한 시료를 이용하여 석영분말의 혼합비율 및 공극비를 달리하여 15 개의 시료를 준비한 후 구속압력을 3 가지로 변화시키면서 공진주 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 전단탄성계수와 감쇠비는 $1 \times 10^{-3} \%$ 의 전단변형률 이상이 되면 변형률의 영향을 받게 됨을 알 수 있었다.

2. 공진주 실험시 구속압력이 증가할수록, 또한 모래에 함유된 석영분말의 함량이 클수록 전단탄성계수와 감쇠비의 변화율이 감소함이 밝혀졌다.

3. 본 연구에 사용된 시료에 대해 Ramberg-Osgood 상수들을 산정한 결과 상수 R 은 2.0 을 사용할 수 있다고 판단되나 상수 C 는 시료상태 및 구속압력에 따라 200 에서 3,200 까지의 큰 변화를 보여 주고 있다.

4. 고변형률 실험 사이사이에 행한 저변형률 실험에서의 전단탄성계수는 구속압력이 낮을 때는 점차 증가하며 구속압력이 높을 때는 점차 감소함을 알 수 있었다.

References

1. Anderson, D.G. and Stokoe, K.H. II, "Shear Modulus: A Time-Dependent Material Property", *Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654*, ASTM, pp.66~90.
2. Canales, A.R., "Measurement Techniques and Test Related Variables in Resonant Column Testing", *Geotechnical Engineering Thesis, GT 80-4*, Civil Engineering Department, Univ. of Texas at Austin, Tx, August, 1980, 240 p.
3. Hagg, E.D., "*Laboratory Investigation of Static and Dynamic Properties of Sandy Soils Subjected to the 1981 Westmorland Earthquake*", Geotechnical Engineering Thesis, Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, May, 1985, 243 p.
4. Hardin, B.O. and Scott, G.D., "Generalized Kelvin-Voigt Used in Soil Dynamic Study", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 92, No. EM1, Feb., 1966, pp.143~156.
5. Isenhowe, W.M., "Torsional Simple Shear/Resonant Column Properties of San Francisco Bay Mud", *Geotechnical Engineering Thesis, GT80-1*, Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, Dec. 1979, 307 p.
6. Kuo, H.J., "*Static and Dynamic Properties of Sands Subjected to 1979 Imperial Valley Earthquake*", Geotechnical Engineering Thesis, Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin, Austin, Tx, Oct. 1982, 268 p.
7. Ladd, R.S., "Preparing Test Specimens Using Undercompaction", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 1, No. 1, March, 1978, pp.16~23.
8. Ni, S.H., "*Dynamic Properties of Sand under True Triaxial Stress States from Resonant Column/Torsional Shear Tests*", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Aug. 1987, 421 p.
9. Ramberg, W. and Osgood, W.R., "Description of Stress-Strain Curves by the Three Parameters", *Technical Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics*, Washington, D.C. 1953.
10. Seed, H.B. and Idriss, I.M., "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", *Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center*, University of California Berkeley, CA, Dec. 1970, p. 23.
11. Song, C.R., "*Effects of Gradation and Cycles of Loading on Dynamic Properties of Silty Sands*", Master's Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Tx, 1986, 564 p.
12. 宋定洛, 金秀一, "모래의 입도가 동적특성에 미치는 영향", *大韓土質工學會誌* 第3卷 第2號, 1987. 6月, pp.7~16.
13. Stokoe, K.H. II and Lodde, P.E., "Dynamic Response of San Francisco Bay Mud", *Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, ASCE*, Vol. II, 1978, pp.940~959.

(접수일자 1988.8.17)