

점성토의 진동삼축시험시 대변형률영역에서의 주파수 의존성

Frequency Dependence in Large Strain Range During Cyclic Triaxial Tests of Clay

김 용 성

Kim, Yong Seong

Abstract

In the present study, the dynamic deformation characteristics of clay, including the effect of loading rate in large strain ranges, were examined by performing undrained cyclic triaxial test. The test results showed that the loading rate to failure decreased with increasing loading amplitude and decreasing loading frequency. While the stress-strain relationships was not affected by loading frequency, excess pore pressure was affected significantly with the change in loading frequency. The change for 0.1 Hz was larger for than that of 0.01 Hz, resulting in inclined effective stress paths. Furthermore, the lower the frequency was, the higher the excess pore pressure was in the first loading.

Keywords : Frequency, Large strain, Cyclic, Triaxial test, Clay

I. 서 론

지금까지 지진과 파랑에 의한 반복 하중 문제는 주로 사질토 지반에 관하여 많은 논의가 있어 왔으나 최근의 지진 재해에서 점성토 지반에서의 피해도 다수 보고되어 점성토 지반의 내진대책 수립의 중요성이 매우 강조되고 있다. 사질토 지반에서의

반복하중에 의한 피해로서는 액상화가 대표적이나 점성토 지반에서는 반복하중으로 인하여 액상화에 이르지 않는지만 강도 및 강성의 저하, 과잉간극수압의 소산에 의한 경시적 침하 등의 여러 문제가 발생한다. 1985년 Mexico 지진과 1989년 Loma Prieta 지진은 파괴를 포함하는 대변형률 영역에서의 연약 점성토지반의 동적변형특성에 대한 중요성을 새삼 인식하게 해 준 지진으로 우리에게 잘 알려져 있다. 이로 인해 지진시 자연지반에서의 지진파는 사질토층 뿐만 아니라 점성토층의 거동에도 중요한 역할을 담당하고 있음을 알 수 있었으며, 점성토의 동적 응력-변형특성은 지반공학 분야의

* 소방방재청 방재대책팀 토목사무원
* Corresponding author. Tel.: +82-2-2100-5412
Fax: +82-2-2100-5459
E-mail address: nakisuna@nema.go.kr

중요한 일부분으로 자리 잡는 계기가 되었다.

점성토의 비배수 반복전단시험에 있어서, 반복재하 횟수가 증가하면 과잉간극수압이 증대되어 유효구속압(effective confining pressure)이 저하되므로 전단탄성계수(G)는 재하횟수의 증가와 더불어 저하되고 이력감쇠율(h)은 증가하게 되며, 이러한 현상은 변형률 진폭이 클수록 현저하게 나타난다. 이러한 지반의 응력-변형 거동을 비선형 강성을 고려하여 매우 미소한 변형($0.001\% \sim 0.0001\%$ 이하), 미소변형($0.001 \sim 0.0001\% \leq v_s \leq 1.0\%$) 그리고 중간 및 대변형(1.0% 이상)으로 분류하고 있다 (Atkinson and Salfors, 1991).

점성토의 동적 거동의 시간 효과에 있어서 Tatsuoka (1994)는 일차압밀시의 초기 전단탄성계수(G_0)의 증대는 간극비의 감소에 의하여 평가가 가능하나 2차압밀에 의한 초기 전단탄성계수(G_0)는 이 간극비의 감소를 고려한 값 이상으로 증대하여 압밀시간의 대수에 대하여 직선적으로 증가하였으며 이 증가분은 점토 입자 구조의 텍스트로피 효과에 의한 것으로 판단된다고 보고하였다. 또한 Nakajima 등(1994)은 재하 파형의 영향도 이러한 주파수(또는 전단속도)의 영향으로 판단되며 동일한 변형률 레벨에 의한 이력감쇠율(h)은 삼각파의 경우가 정현파 보다 작은 값이 됨을 보고한 바 있다.

국내의 경우 지진 등 반복하중에 의한 점성토의 변형이 크지 않은 특성이 있어 대변형률 영역에서의 변형특성의 연구 보다는 미소변형률 영역에서의 변형특성에 대한 연구가 활발한 실정(Lee et al., 1990; Ko et al., 2002; Lee and kim, 2005; Lee et al., 2005)이나 대변형률 영역에서의 연구는 상대적으로 미미하며, 규모가 큰 지진시 발생할 수 있는 지진재해의 예방 대책 수립을 위해서는 대변형률영역에서의 점성토의 동적 거동 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 프로세스라 할 수 있다.

본 연구에서는 대변형률 영역에서의 비배수 진동삼축시험에 의한 점성토의 재하속도 영향 등 동적 변형 문제의 검토를 위해 서로 다른 주파수로서 진

동삼축시험을 수행하고 전단파괴가 예상되는 대변형률 영역에서의 주파수(재하속도) 의존성을 검토하였으며, 파괴에 이르는 동안의 점성토의 응력-변형특성 등을 분석하여 점성토 지반을 포함하는 복합지반에서의 내진대책 수립에 기초적 자료로서 제공될 수 있도록 하였다.

II. 진동삼축시험

지진시 사질토 및 점성토 지반상의 구조물의 피해사례로는 Photo 1 및 Photo 2에 나타난 바와 같이 Niigata 지진(1964)에 의한 아파트의 붕괴와 Michoacan 지진(1985)에 의한 멕시코시티의 빌딩의 파괴가 양호한 대조를 이루는데, 전자는 사질토 지반의 액상화에 의한 지지력의 손실에 의한 것이

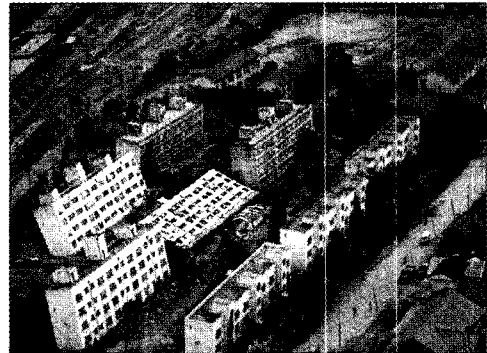


Photo 1 Niigata earthquake in Japan (1964)

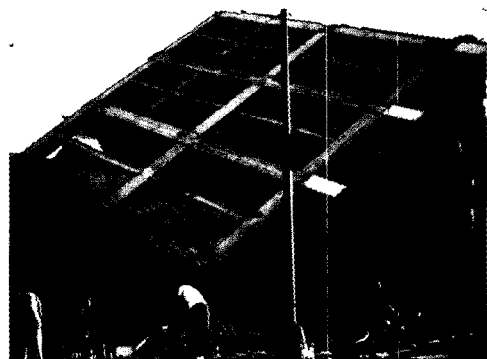


Photo 2 Michoacan earthquake in Mexico (1985)

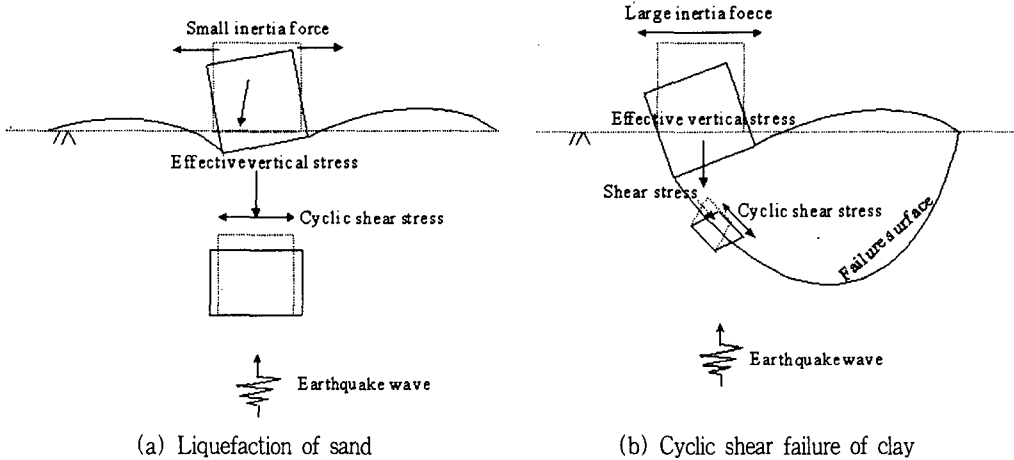


Fig. 1 Distinction between the dynamic failure of sands and clays

며 후자는 점성토의 반복전단파괴에 기인한 원호활동 파괴이다. 두 경우 모두 건축물의 붕괴 형태는 유사하나 지반파괴의 메커니즘은 다음의 Fig. 1과 같이 전혀 다른 양상을 갖는다.

점성토 지반의 동적파괴는 지진, 파랑 등 어느 경우에도 정도의 차는 있지만 구조물이나 성토지반의 주변에 발생하는 특징이 있다. 이것은 구조물의 자중에 의한 지반 내에서의 초기전단응력 위에 지진 등 동적외력에 의한 반복전단응력이 작용한 결과 발생하게 되는 것이다. 이러한 파괴형태는 포화 사질토지반의 액상화와 같은 유효응력이 손실되는 파괴에 이르는 현상과는 달리 유효응력의 일부가 잔류된 상태에서도 전단파괴에 의하여 전단변형률이 축적되어 파괴에 이르는 것으로 반복전단파괴라 한다.

진동삼축시험은 동적 응력진폭비와 과잉 간극수압비의 특정 값 또는 양진폭 축변형률의 특정 값에 도달할 때의 반복횟수와 관계를 결정하는 시험이다. 비배수 진동삼축시험은 고정된 주파수 상태에서 등방압밀된 포화시료에 특정한 진폭을 대칭형의 동적 축하중으로 주어 시험하게 된다. 일반적으로 사질토의 경우 간극수압이 구속압과 같아질 때 즉 유효응력이 0으로 되어 파괴에 이르게 되나, 점성

토의 거동은 사질토와는 많은 차이가 있어 유효응력이 0으로 되는 경우는 거의 희박하므로 축변형률이 10%에 이르면 파괴(전단파괴)에 이른 것으로 판단한다.

본 연구에서는 점성토의 구속압을 196 kPa로 하였으며 재하주파수는 사인파의 0.01 Hz와 0.1 Hz로 하였다. 본 연구에 이용된 시료는 일본의 도쿠시마 현의 코마츠시마 항에서 채취된 것으로 채취심도에 따른 시료의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

본 연구에 사용된 진동삼축시험기는 일본 Seikensha (DTC-367)의 공압서보식 진동삼축시험기를 사용하였으며 반복주파수의 범위는 0.001~1 Hz이고, 삼축압축실의 내구속압은 1 MPa, 내축하중은 5 kN이다.

Fig. 2는 0.01 Hz와 0.1 Hz일 때의 비배수 진동삼축시험의 응력-변형률 관계 및 유효응력 경로를 나타낸 것으로 이 때의 시험 조건 및 시료의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Fig. 2(a)~Fig. 2(f)는 0.01 Hz와 0.1 Hz로 수행된 점성토의 진동삼축시험의 응력-변형률 관계를 나타낸 것으로 압축측 보다 신장측의 변형량이 많은 전형적인 점성토의 진동삼축시험 결과와 동일

Table 1 Physical properties of the specimen

No.	Depth (m)	Soil type	Specific gravity	Water content W (%)	Liquid limit WL (%)	Grain size			Plastic index I _p	Compression index C _c	Consolidation yield stress P _c (kPa)
						sand (%)	silt (%)	clay (%)			
A	22.0~22.8	Clayey Silt	2.774	42.6	44.9	0.8	63.7	35.5	18.7	0.422	510
B	24.0~24.8	Clayey Silt	2.755	42.9	45.6	2.8	66.1	31.1	19.6	0.421	481
C	26.0~26.8	Clayey Silt	2.734	45.6	45.1	2.7	60.3	37.0	18.9	0.517	402
D	29.0~29.8	Clayey Silt	2.733	48.1	44.5	2.2	64.6	33.2	18.2	0.453	456
E	35.0~35.8	Silty Clay	2.725	39.4	39.4	8.3	64.4	27.3	16.7	0.350	392
F	38.0~38.8	Silty Clay	2.729	41.5	41.5	4.2	64.9	30.9	18.7	0.373	539

Table 2 Experimental conditions of the specimen

Contents	0.01 Hz			0.1 Hz		
	A	E	B	F	C	D
Effective confining pressure (kPa)	196	196	196	196	196	196
B value	0.999	0.953	0.98	0.928	0.999	1.0
Deviator stress, σ_d (kPa)	142.5	98.5	84.2	117.7	109.5	77.5
Stress amplitude ratio, $\sigma_d/2\sigma_c$	0.363	0.251	0.215	0.299	0.279	0.198
Cyclic number	1.5	28	65	9	13	127
Water content at initial (%)	40.8	34.7	42.9	35.4	41	49.6
Water content after shear (%)	40.1	34.7	40.6	34.8	40.8	44.2
Void ratio at initial	1.131	0.945	1.182	0.966	1.119	1.376
Void ratio after shear	1.110	0.945	1.118	0.949	1.115	1.225
OCR	2.6	None	2.45	2.75	2.75	2.325

한 결과를 보이고 있으며, 전단파괴 상태에 이르기 까지 히스테리시스 루프가 뾰족한 타원형에서 평행 사변형과 유사한 형태로 바뀌어 가고 있다. Fig. 2(a)~Fig. 2(c)에서 보는바와 같이 0.01 Hz의 축차응력과 재하횟수의 관계는 각각 142.5 kPa일 때 1.5회, 98.5 kPa일 때 28회, 84.2 kPa일 때 65회로서 낮아질수록 재하횟수는 증가하며, 0.1 Hz의 경우에서도 각각 117.7 kPa일 때 9회, 109.5 kPa일 때 13회, 77.5 kPa일 때 127회로서 유사한 경향이 나타났다.

Fig. 3(a)~Fig. 3(f)는 유효응력경로를 나타낸 것으로, 축차응력이 클수록(Fig. 2(a)와 Fig. 2(d))

그리고 재하주파수가 작을수록(0.01Hz) 파괴에 이르는 재하횟수는 적음을 알 수 있다. 또한 응력-변형률 관계에서는 재하주파수에 따른 영향이 큰 차이는 없으나 유효응력 경로에서는 재하과정에서 과잉간극수압의 하강(+축차응력)과 상승(-축차응력)이 0.01 Hz 보다 0.1 Hz에서 더 확연하여 유효응력의 경로가 경사진 형태를 나타내고 있다.

Table 3은 1회 재하시의 인장축의 평균유효응력을 압축축의 유효응력으로 나눈 비, 즉 유효응력비를 나타낸 것으로 0.01 Hz의 경우 평균유효응력비가 0.998 및 1.167, 1.110 등이며 0.1 Hz의 경우 1.30 및 1.39, 1.34 등으로 나타나 주파수가 높을

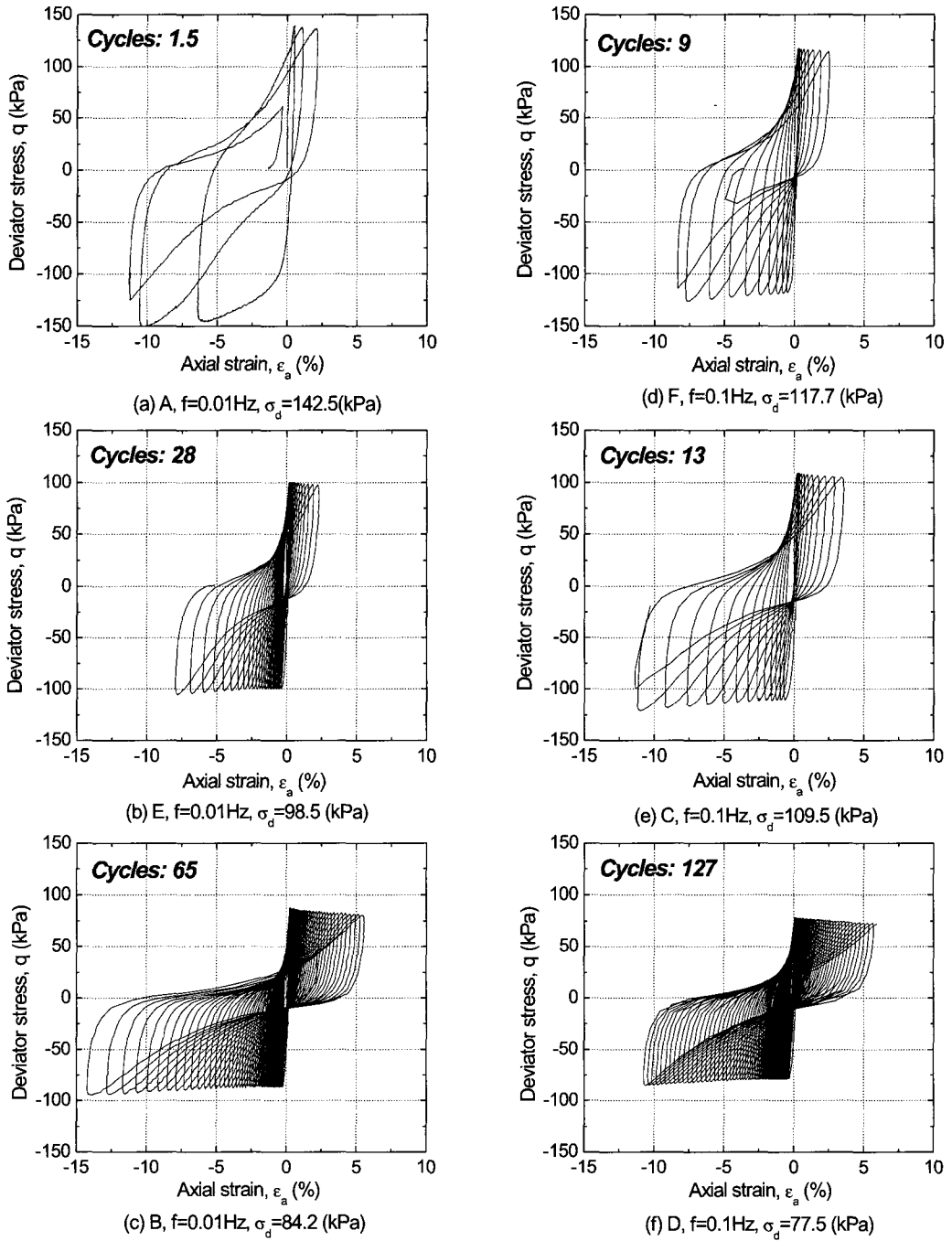


Fig. 2 Stress-strain relations of cyclic undrained triaxial test ($f=0.01$ & 0.1Hz)

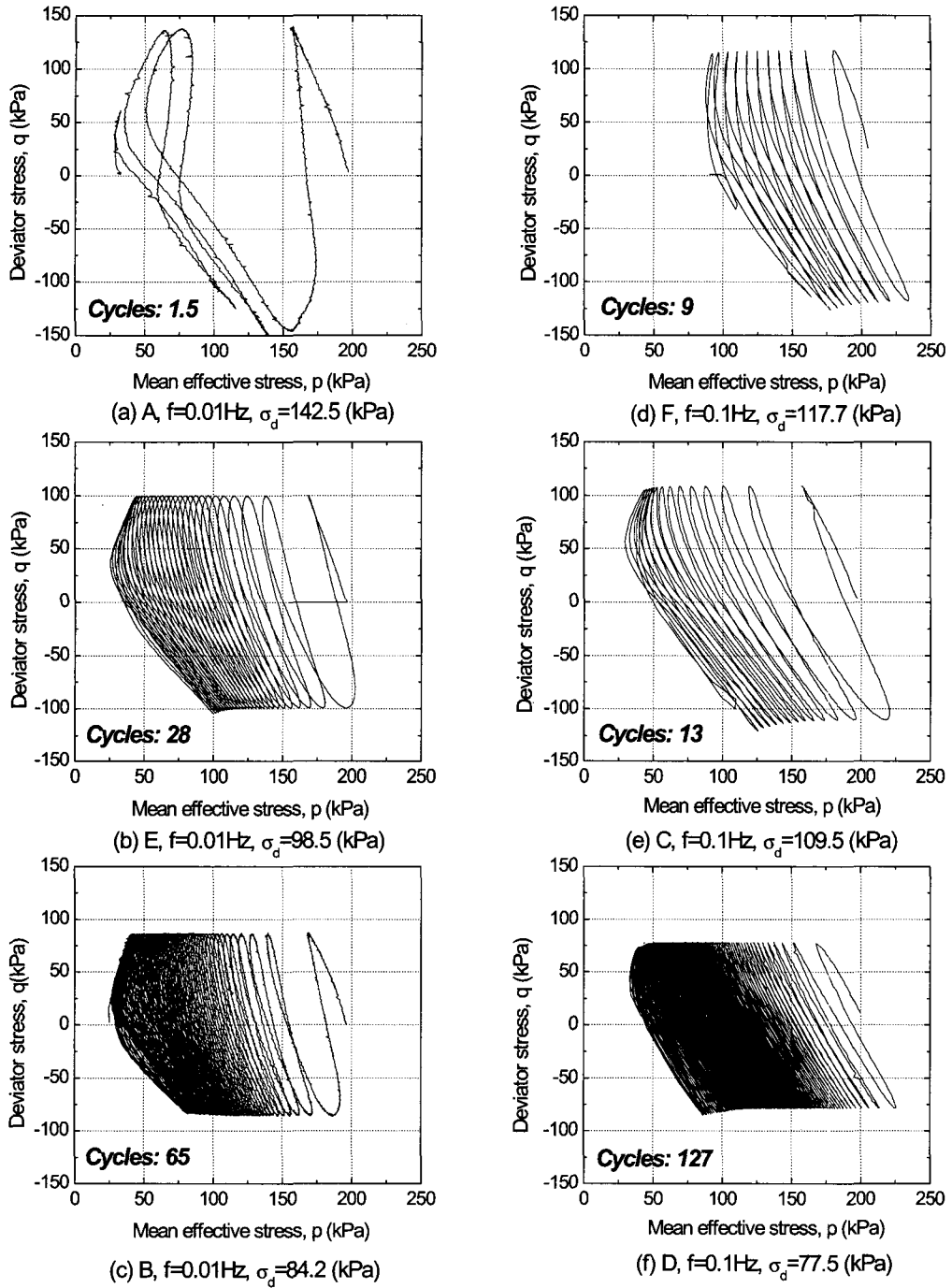


Fig. 3 Effective stress paths of cyclic undrained triaxial test ($f=0.01$ & 0.1Hz)

Table 3 Mean effective stress ratio (extension/compression) at 1st cycle

Contents	0.01 Hz			0.1 Hz		
	A	E	B	F	C	D
Compression (kPa)	156.923	168.462	168.462	180.000	156.923	167.885
Extension (kPa)	156.538	196.538	186.923	234.038	218.077	225.000
Mean effective stress ratio	0.998	1.167	1.110	1.300	1.390	1.340

수록 과잉간극수압이 보다 더 많이 리바운드 (Rebound) 되어 유효응력의 감소가 두드러짐을 알 수 있다.

Ⅲ. 대변형을 영역에서의 재하속도 영향

점성토의 비배수 진동삼축시험에 있어서 과잉간극수압이 초기유효구속압까지 상승하기 이전에 큰 축변형률이 발생하여 파괴에 이르므로 점성토의 파괴는 사질토의 경우처럼 ‘초기액상화’에 의해 정의하는 것은 불가능 하여 ‘일정 변형률 발생시’ 파괴로 정의하는 방안이 요구되므로 대변형 거동에 미치는 영향인자를 명확히 하는 것은 점성토의 파괴 매커니즘을 규명하는데 매우 중요한 일이다(Hyodo and Uchida, 1998).

점성토가 지진과 파랑 등 동적하중을 받은 경우에는 속도 효과와 반복효과가 있어 전자는 급속재하에 의한 강성율의 증대를 후자는 간극수압 상승 등에 의한 강성율의 저하를 초래한다. 이러한 영향이 미치는 것은 다이레턴시 현상이 발생하는 10^{-3} 이상의 변형률 영역으로서 본 연구에서는 진동삼축 시험을 통한 대변형을 영역에서의 재하속도의 영향을 분석하였다.

Fig. 4는 축변형률 양진폭이 10%에 이르기까지의 반복응력증폭비와 재하횟수와와의 관계를 주파수별로 도시한 것으로 자연점토와 재성형점토 (Oka et al., 2001)의 결과를 함께 검토하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 재하주파수가 높은 쪽이 재하횟수가 많게 나타났고 동일한 재하횟수를 기준을 할 경우에는 응력진폭비가 크게 나타나 점성토가 재하속도에 의존하고 있음을 알 수 있다.

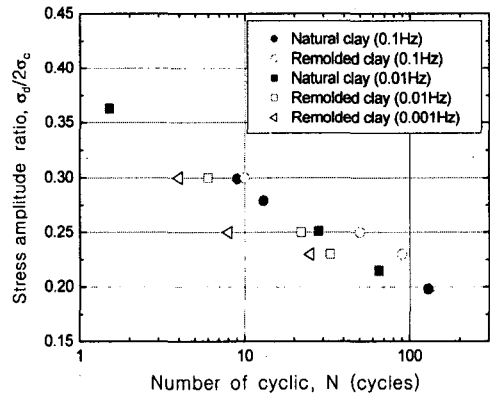


Fig. 4 Relationship between cycle number and stress amplitude ratio

점성토의 동적 전단거동에 대한 주파수 의존성과 관련하여 Proctor and Khaffaf(1984)는 주파수가 증대함에 따라 일정 변형률에 도달하기 위한 동적 재하횟수는 증가하는 것을 확인하였으며, Shibuya 등(1977)은 0.005~0.1 Hz의 주파수에서 전단변형률 $(\nu)=10^{-6}$ 에서의 초기 전단탄성계수(G_0) 및 이력감쇠율(h)에는 영향이 없지만, $\nu > 10^{-4}$ 에서는 전단변형률 속도가 증가함에 따라 이력감쇠율(h)은 연속적으로 감소함을 보고하였다. Degoshi 등(1993)은 교란점토시료를 이용하여 중공비틀전단 시험을 수행한 후 G/G_0 관계에서는 주파수의존성은 확인할 수 없었지만, 이력감쇠율(h)은 명확하게 의존하는 것이 나타나 주파수 증가에 따라 이력감쇠율(h)은 감소하는 것을 확인하였다.

Hyodo (1994)등은 0.01~0.1 Hz의 주파수를 이용하여 동적 삼축시험을 수행하고 시험종료 후의 공시체 내의 함수비 분포를 계측한 결과에서 주파

수 의존성은 공시체 내의 간극수압과 변형률 발생의 불균일성에 일정정도의 원인이 있음을 지적하였다.

본 연구 결과, 자연점토의 경우에는 Khaffaf (1984)의 연구결과와 마찬가지로 주파수가 증대함에 따라 일정 변형률에 도달하기 위한 동적 재하횟수는 증가함을 확인하였다(Fig. 2~3 참조). 또한 Fig. 4에서 보는바와 같이 대변형률 영역에서의 자연점토의 주파수 영향에 대한 검토로서 0.01 Hz와 0.1 Hz의 진동삼축 시험결과 주파수의존성은 미미한 것으로 나타났다. 그러나 채성형점토의 경우에는 0.001 Hz~0.1 Hz의 진동삼축시험 결과 응력 진폭비와 재하횟수의 관계가 주파수의 영향이 확연하게 나타나 주파수 의존성이 있음을 알 수 있었고, 이는 Hyodo (1994) 등의 연구 결과와도 일치한다. 다만 이러한 현상은 초기재하 수 싸이클 이내에서 그 영향이 크게 나타났으며 재하횟수가 많아질수록 점차 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 대변형률 영역에서의 비배수 진동삼축시험에 의한 점성토의 재하속도 영향 등 동적 변형 문제에 관하여 검토하였으며 주요한 결론은 다음과 같다.

1. 0.01 Hz와 0.1 Hz로 수행된 자연점토의 진동삼축시험 결과, 하중진폭이 클수록 또한 재하주파수가 작을수록 파괴에 이르는 재하횟수는 적었다.

2. 0.01 Hz 보다 0.1 Hz에서 과잉간극수압의 리바운딩 현상이 더 확연히 부각되어 유효응력의 경로가 경사진 형태를 나타내었으며, 주파수가 높을수록 초기 1회 재하시 과잉간극수압이 보다 더 많이 발생하여 유효응력의 감소가 두드러졌다.

3. 대변형률 영역에서 자연점토의 경우 주파수의존성은 미미하였으나 채성형점토의 경우 주파수의존성이 확연히 나타났으며 초기재하 수 싸이클 이내에서 그 영향이 크나 재하횟수가 많아질수록 점차 그 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.

References

1. Atkinson, J. H. and Salfors, G., 1991, Experimental determination of soil properties. General Report to Session 1, *Proc. the 10th ECSSMFE*, 3: 915-956.
2. Bolton, M. D. and Wilson, J. M. R. 1989, An Experimental and Theoretical Comparison Between Static and Dynamic Torsional Soil Tests. *Geotechnique* 39(4): 585-599.
3. Degoshi, T., Mino, S., Mitachi, T., Shibuya, S. and Fukuda, F., 1993, Effects of Various Factors on Undrained Deformation Characteristics of Clay by Torsional Cyclic Loading Tests. *Proc. the 28th JSSMFE*, 1: 1047-1050. (in Japanese)
4. Georgiannou, V. N., Rampello, S. and Silvestri, F. 1991, Static and Dynamic Measurement of Undrained Stiffness of Natural Overconsolidated Clays. *Proc. of the 10th ECSSMFE*, pp. 91-96.
5. Hyodo M., Hyde, A. F. L., Yamamoto, Y. and Fujii, T., 1999, Cyclic Shear Strength of Undisturbed and Remoulded Marine Clays. *Soils and Foundations*, 39(2): 45-58.
6. Hyodo M., Sugiyama, M. Yamamoto, Y. and Kawata, Y., 1994, Evaluation of Pore Pressure and Strain of Normally Consolidated and Overconsolidated Clay Subjected to Cyclic Shear Stress. *Journal of the JSCE*, 487(3): 79-88. (in Japanese)
7. Hyodo M. and Uchida, K., 1998, Dynamic Properties of Clay. *Tsuchi-to-Kiso*, No. 6: 53-58. (in Japanese)
8. Ko, D. H., Lee, I. H., Kim, J. S. and Kim, D. S. 2002, Development of the Small-Strain Triaxial Testing Equipment and Application, *Journal of KSCE*, 22(3C): 219-229. (in Korean)
9. Kohata, Y., Tatsuoka, F., Mukabi, J. N. and Suzuki, M. 1995, Effects of Strain Rate and

- Drainage on Deformation Characteristics at Small Strain of Geomaterials, *Earthquake Geotechnical Engineering*, Ishihara(ed.), pp. 151-156.
10. Lee, B. C. and Kim, D. S. 2005, Deformation Analysis of Cylindrical Earth Retaining Structures during Excavation Considering Non-linear Soil Behavior at Small Strain, *Journal of KSCE*, 25(6C): 405-412. (in Korean)
 11. Lee, B. C., Kim, D. S. and Koh, D. D. 2005, Modeling the Stress-Strain Relations of Soil in Unloading/Reloading at Small Strain, *Journal of KSCE*, 25(6C): 413-419. (in Korean)
 12. Lee, M. J., Shin, J. H., Kang, K. Y. and Chon, C. S. 1990, Evaluation of Dynamic Soil Properties Using Dynamic Tests, *Journal of KSCE*, 10(2): 91-102. (in Korean)
 13. Nakajima, M., Hosono, T. and Shibuya, S., 1994, The Effect of Loading Wavy Pattern to Cyclic Deformation of Clay, *Proc. of International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials for Dynamic Problems of Soils and Structures*, pp. 133-136. (in Japanese)
 14. Oka, F., Kodaka, T., Kim, Y. S., Tsuji, C. and Ishigaki, S., 2001, Loading Frequency Dependencies of Cyclic Strength, Deformation Modulus and Hysteric Damping Ratio of Reconstituted Fukakusa Clay. *Proc. the 28th JSSMFE*, 1: 351-352. (in Japanese)
 15. Proctor, D. C. and Khaffaf, J. H., 1984, Cyclic Triaxial Tests on Remolded Clay, *ASCE*, 110(10): 1431-1445.
 16. Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. and Degoshi, T., 1995, Strain Rate Effects on Shear Modulus and Damping of Normally Consolidated Clay, *Geotechnical Testing Journal*, 18(3): 365-375.
 17. Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. and Hosomi, A., 1997, Modeling of Strain-Rate Dependent Deformation of Clay at Small Strains, *Proc. of the 14th ICSMFE*, Balkema, pp. 409-412.
 18. Tatsuoka, F., 1994, Surveyed Report of Related References, *Proc. of the International Symposium on Deformation Characteristics of Geo-materials for Dynamic Problems in Soils and Structures*, pp. 23-72.