공진주/비틂 전단(RC/TS)시험기를 이용한 점성토의 변형특성

Deformational Characteristics of Cohesive Soils Using Resonant Column/Torsional Shear Testing Equipment

김 동 수*
Kim, Dong - Soo

Abstract

Both resonant column (RC) and torsional shear(TS) tests were performed at small to intermediate strain levels to investigate deformational characteristics of cohesive soils. The effects of variables such as strain amplitude, loading frequency, and number of loading cycles were studied. Plasticity index was found to be an important variables in evaluating these effects. Soils tested include undisturbed silts and clays and compacted subgrade soils. At small strains below the elastic threshold, shear modulus is independent of number of loading cycles and strain amplitude. Small-strain material damping exists with ranges between 1.1% and 1.7% for TS tests. The elastic threshold strain increases as confining pressure and plasticity index increases. Above the cyclic threshold strain, the modulus of cohesive soil decreases with increasing number of cycles while damping ratio is almost independent of number of load cycles. Moduli and damping ratios of cohesive soils obtanined by RC test are higher than those from TS test because of the frequency effect. Shear modulus of cohesive soil increases linearly as a function of the logarithm of loading frequency.

요 지

점성토의 변형특성을 연구하기 위하여 공진주(RC)시험과 비틂전단(TS)시험을 저변형률 및 중간 변형률하에서 실시하여 변형률의 크기, 진동주파수, 하중반복회수의 영향을 살펴보았다. 소성지수가 이들의 영향을 평가하는데 중요한 변수임을 알 수 있었다. 실험에 사용된 시료로는 불교란 실트 및 점토와 실험실에서 다져진 노상토를 사용하였다. 선형한계변형률이하에서 전단탄성계수는 하중반복회수와 변형률의 크기에 영향을 받지 않았으며, TS시험에서 얻은 최소감소비가 1.1%에서 1.7%영역에서 존재하였다. 점성토의 선형한계변형률은 구속압과 소성지수에 따라 증가하였으며 사질토와 비교하여 넓은 선형영역을 보였다. 반복한계변형률이상의 변형률하에서

* 정회원 한국과학기술원 토목공학과 조교수

는 전단탄성계수는 하중반복회수에 따라 감소하였지만 감쇠비는 영향을 받지 않았다. 진동주파수의 영향에 의해 RC시험에서 얻은 점성토의 전단탄성계수와 감쇠비는 TS시험결과보다 컸다. 전단탄성계수는 진동주파수의 대수증가에 따라 선형적으로 증가하였고 감쇠비의 경우 2Hz이하의 저 주파수영역에서는 영향을 받지 않았다.

1. 서론

동반논문을 통해 김동수[1]는 공진주/비틂전단시험기를 이용하여 건조사질토의 변형특성을 실험적으로 고찰하였다. 저변형률하에서 응력-변형관계를 구하여 선형거동 및 소성거동을 유발하는 한계변형률의 변화를 설명하였고, 변형률의 크기, 하중반복회수, 진동주파수 등이 사질토의 변형특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

국내에도 점성토 지반이 넓게 분포되어 있으며 자연상태에 존재하는 사질토들은 대부분 세립토성분을 많이 포함하고 있다. 문헌에 의하면 점성토의 변형특성은 사질토와는 상당한 차이가 있다. 예를들면 점성토는 사질토에서 발생하는 반복경화현상과는 상이하게 하중반복회수가 증가함에 따라 전단탄성계수가 감소하는 반복연화(cyclic degradation)현상을 보인다.[2,3,4], 또한 점성토의 변형특성은 진동주파수와 변형속도에 영향을 받는다[5,7,9,11]. 그러므로 점성토의 전단특성을 사질토와 구분하여 정리할 필요가 있다.

본 연구에서는 공진주/비틂전단시험기를 이용하여 점성토의 변형특성을 연구하였다. 시료로는 불교란 실트 및 점토와 실험실에서 다져진 노상토를 사용하였다. 저변형률하에서의 선형거동 및 고변형률하에서의 비선형거동을 사질토의 경우와 비교하였으며 소성지수를 이용하여 선형 및 반복한계변형률과 진동주파수가 변형특성에 미치는 영향을 정량화하였다.

2. 시험시료 및 절차

2.1 시험시료

불교란 실트 및 점토를 보스톤 항구, 샌프란시스코 근처 Gilroy # 2 현장, Treasure Island현장, 텍사스 주 Granger현장 등 네곳의 내진설계현장에서 채취하였다. 불교란 시료를 Shelby tube에 채취하고 수직으로 세워 실험실로 운송한 후 항습실에 보관하였다. 실험 전에 시료를 샘플러에서 뽑아내어 직경 5.1cm, 높이 10.2cm의 공시체로 성형하였다. 표 1은 사용된 불교란시료의 채취위치와 기본물성을 나타내었다.

텍사스 지역의 도로현장에서 교란시료를 채취하여 AASHTO T-148-86에서 규정한 다짐방법[8]을 이용하여 시료를 성형하였다. 직경 10.2cm, 높이 15.2cm의 몰드를 이용하여 시료를 5층으로 다진 후 시료를 몰드에서 뽑아내어 직경 5.1cm, 높이 10.2cm의 공시체로 성형하였다. 공시체를 랩으로 싸서 항습실에 6일간 보관한 후 실험기에 정착하여 실험하였다. 소성지수를 중요한 변수로 사용하였으므로 채취시료의 소성지수가 넓은 범위에 분포되도록 고려하였다. 표 2는 사용된 노상토의 기본물성을 나타내었다.

2.2 시험절차

공진주(RC)시험과 비틂전단(TS)시험을 동일한 시료로 효과적으로 수행하기 위하여 그림 1에 나타난 시험절차를 사용하였다. 주어진 구속압에서 구속시간에 따른 저변형률 전단탄성계수(G_{max})의 변화를 RC시험을 통해 구한 후, 전단변형률을 증가시키며 TS시험을 수행하였

표 1 불교란 점토의 기본물성

Sample ID#	Depth (ft)	Soil Classification	Sampling Procedure	Liqiud Limit (%)	Plasticity Index (%)	Water Content (%)	Degree of Saturation (%)*	Total Unit Wt. (pcf)	Void* Ratio
BBC	16	homogenous blue clay	piston sampler	42	20	34.9	93.8	113.5	1.01
GL−1	10	dark brown clayey silt with sandy material	shelby tube	29	7	26.1	88.6	117.1	0.78
GL−2	20	dark gray silty clay	shelby tube	43	23	30	96.1	118.8	0.84
GL−3	85	light gray stiff clay with horiz. bedding	pitcher barrel	47	17	30.8	100	121	0.82
GL−4	120	silty sand	Pitcher barrel	–	–	19.8	99.9	134.1	0.55
TI−I	60	dark greenish soft clay	shelby tube (osterberg)	51	26	50.2	100	108.1	1.34
TI−2	130	dark greenish medium stiff clay with shell	Shelby tube	37	23	37.0	97.9	114.3	1.02
TI−3	170	dark greenish grey stiff silty clay	Shelby tube	34	19	20.7	95.5	128.3	0.59
TI−4	232	dark greenish grey silty clay with horiz. bedding	Shelby tube	48	30	33.3	95.1	115.4	0.95
GR−I	7	light brown compacted silty clay	shelby tube	69	53	30.1	96.5	121.1	0.81
GR−2	15	dark grey compacted silty clay	shelby tube	60	42	28	93.9	121.8	0.84

BBC−Boston Site(submerged site)
GL−Gilroy #2 Site(depth of water table is 60 ft.)
TI−Treasure Island Site(depth of water table is 4 ft.)
GR−Granger Site

* Based on an assumed value of specific gravity of 2.70.

표 2 다져진 노상토의 기본물성

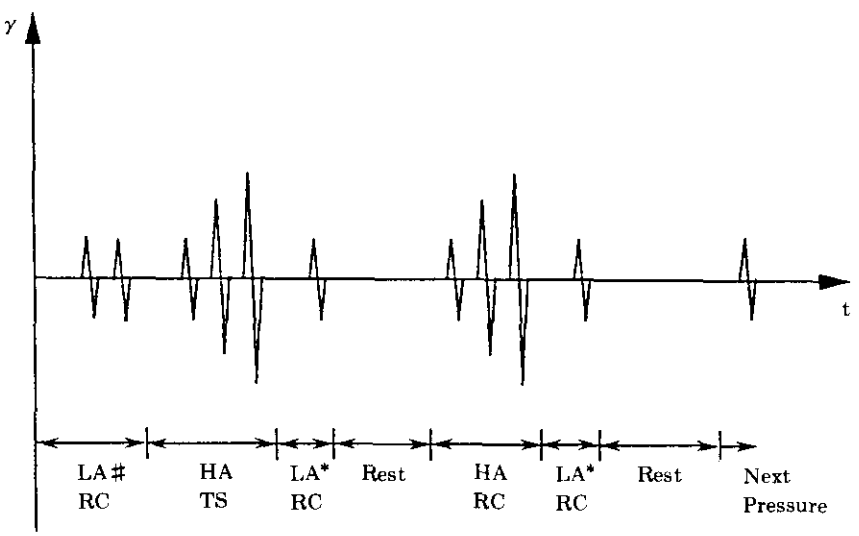
Soil ID	District County Highway	AASHTO Class.	Passing No.200 (%)	Liquid Limit	Plasticity Index	Optium Moisture Content(%)	Sample Moisture Content(%)	Total Unit Wt.(pcf)
1	14 Travis Mopac-183	A-7-6	87.3	56	29	19.3	19.3	112.7
2	21 Starr FM755	A-4	34.9	25	10	10.6	10.5	129.8
3	5 Hockley US62	A-6	100	30	15	12.7	12.8	131.4
4	4 Potter Spur951	A-6	100	37	20	16.5	22.0	123.4
5	4 Gray SH70	A-7-6	100	52	34	19.2	22.2	120.6
6	5 Lubbock FM835	A-4	91	20	4	10.6	13.0	132.2
7	20 Jasper FM252	A-7-6	100	79	52	19.9	20.0	123.1
8	20 Jefferson US69	A-7-6	96	54	36	18.0	10.2	120.6
9	7 Tom Green US67	A-7-6	98	58	40	20.1	20.0	125.4
10	8 Haskell Abilene	A-7-6	97	51	29	16.2	16.4	125.2

다. TS시험시 0.5Hz의 진동 주파수를 사용하였고 초기하중곡선(initial loaing curve)부터 10사이클까지의 이력곡선(hysteresis loops)을 구하였다. 반복한계변형률 이상에서는 하중반복회수의 영향을 자세히 조사하기 위하여 간혹 30 사이클 이상의 반복하중을 작용시켰다. 진동주파수가 변형특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전단변형률 10^{-3}%와 10^{-2}%에서 진동 주파수를 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10Hz로 변화시키며 TS시험을 수행하였다. 고변형률 TS시험이 끝난 후 RC시험을 수행하여 저변형률 전단탄성계수를 구하고 고변형률 TS시험 전의 값과 비교하였다. 일반적으로 저변형률 전단탄성계수는 고변형률시험에서 발생되는 반복연화현상으로 고변형률시험전의 값보다 감소한다. 그러나 일정한 구속압에서 시간에 따라 공시체의 강도가 회복되므로 하루정도의 휴지기간 동안 저변형률 전단탄성계수가 고변형률시험전의 값으로 회복되면, 변형률의 크기를 증가시키며 고변형률 RC시험을 수행하였다. RC시험 후 휴지기간을 다시 가져 시료의 강도가 회복되면 시료가 과거하중에 의한 손상을 치료받았

다고 간주하고 구속압을 다음단계로 올려서 실험을 계속하였다. RC/TS시험에서는 앞에서 설명한 다단계시험법(multi-stage testing method)을 이용하여 하나의 시료로 여러 구속압 상태에서의 변형특성을 효과적으로 연구할 수 있다.

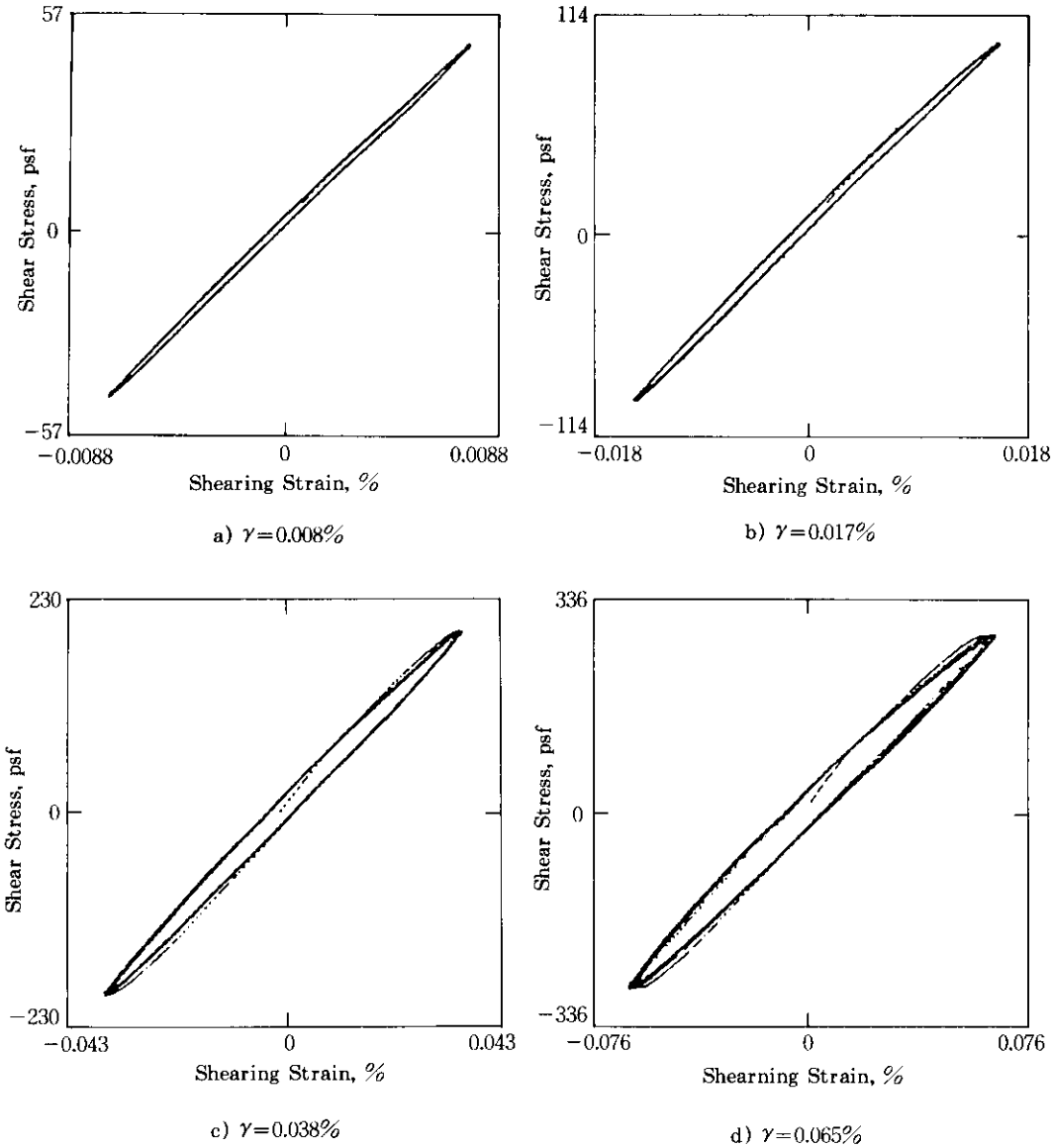
3. 전단변형률에 따른 이력곡선의 변화

초기재하곡선부터 10회 하중재하까지 점성토의 이력곡선을 각기 다른 전단변형률하에서 구하여 그림2에 나타내었다. 최대변형률 8×10^{-3}%와 1.7×10^{-2}%에서 10사이클 이력곡선은 마치 한 사이클 이력곡선 같이 일치한다. 그러므로 변형특성이 하중재하회수에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 최대변형률 3.8×10^{-2}%에서는 이력곡선의 기울기가 하중재하회수의 증가에 따라 완만하여지고 따라서 전단탄성계수가 감소하는 반복연화현상을 보인다. 이 현상은 사질토에서 보이는 반복경화현상과는 현저한 차이가 있다. 최대변형률 6.5×10^{-2}%에서는 반복연화현상을 더 명확히 볼 수 있다. Dobry와 Vucetic[3]은 점성토에서 반복하중에 의한 간극수압의 증가와 입자간 결합의 파괴를 하중회수증가에 따른 전단탄성계수 감소의 원인으로 생각하였다. 반복하중이 작용하는 동안 이력곡선의 면적은 변화가 없으므로 본 연구에서 적용한 전단변형률 범위(10^{-4}%<γ<10^{-1}%)내에서는 점성토의 이력감쇠(hysteretic damping)는 하중재하회수에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.



* check cyclic degradation due to high-amplitude testing
# evaluate the effect of time of confinement
LA=low-amplitude test(γ<0.001%)
HA=high-amplitude test(γ<0.001%)
TS=torsional shear test;10 loading cycles are applied during each test
RC=resonant column test

그림 1 점성토의 변형특성측정을 위한 시험절차



a) $\gamma=0.008\%$

b) $\gamma=0.017\%$

c) $\gamma=0.038\%$

d) $\gamma=0.065\%$

그림 2 변형률에 따른 초기 재하곡선부터 10회하중재하까지 점성토의 이력곡선

4. 하중반복회수가 변형특성에 미치는 영향

4.1 전단탄성계수에의 영향

그림 3은 하중반복회수별 점성토의 대표적인 전단변형률-전단탄성계수의 관계를 나타내었다. 전단변형률 $6\times10^{-3}\%$ 이하에서는 첫번째와 10번째 사이클 TS시험에서 구한 전단탄성계수 값이 동일하며 전단변형률의 영향을 받지 않는 선형거동을 보인다. 전단변형률 $6\times10^{-3}\%$와 $1.5\times10^{-2}\%$ 사이에서는 변형률에 따라 전단탄성계수가 감소하나 하중반복회수에

영향을 받지 않은 천이구간이 존재한다. 전단변형률 $1.5\times10^{-2}\%$ 이상에서는 반복연화현상을 보이며 전단변형률이 증가함에 따라 이 현상이 심화된다.

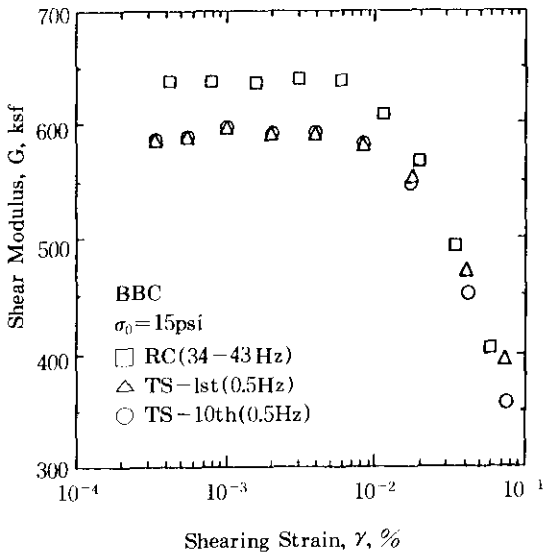


그림 3 하중재하회수에 따른 점성토의 전단변형률-전단탄성계수의 관계

RC시험에서 얻은 전단탄성계수는 TS시험에서의 값과 전체 변형률영역에서 다르게 나타난다. 전단변형률 $6\times10^{-3}\%$ 이하의 선형구간에서는 RC시험에서 구한 전단탄성계수값이 TS시험결과 보다 크며 그 차이는 전단변형률의 크기와 관계없이 일정하다. RC시험의 전단탄성계수는 공진주파수 43Hz에서 구한 반면 TS시험의 값은 진동주파수 0.5Hz에서 얻었다. 일반적으로 점성토의 탄성계수는 진동주파수의 크기에 따라 증가하므로 RC시험과 TS시험에서의 전단탄성계수의 차이는 진동주파수의 차이로 설명할 수 있다(진동주파수가 변형특성에 미치는 영향은 다음 장에서 설명한다). 반복한계변형률 이상에서는 RC시험과 TS시험결과의 차이가 감소하며 고 변형률에서는 RC시험에서 얻은 값이 TS시험에서의 값보다 작은 경우도 있다. 이 경우에는 반복연화현상에 의한 영향이 하중주파수에 의한 영향보다 큼을 나타낸다.

진동주파수의 영향없이 하중반복회수별 전단변형률-전단탄성계수의 관계를 얻기 위하여 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})를 이용하여 그림4에 나타내었다. 하중회수별 실험결과를 Ramberg-Osgood곡선으로 Fitting하였다. 전단변형률의 영향을 받지 않는 선형구간, 선형 및 반복한계변형률 사이의 천이구간, 반복한계변형률 이상의 소성구간이 명확히 구분된다.

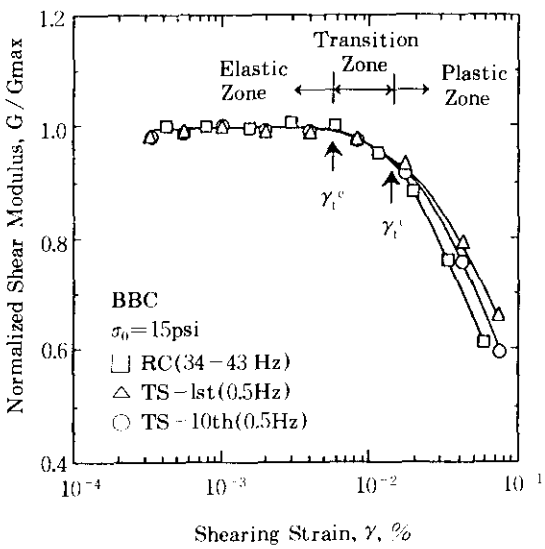
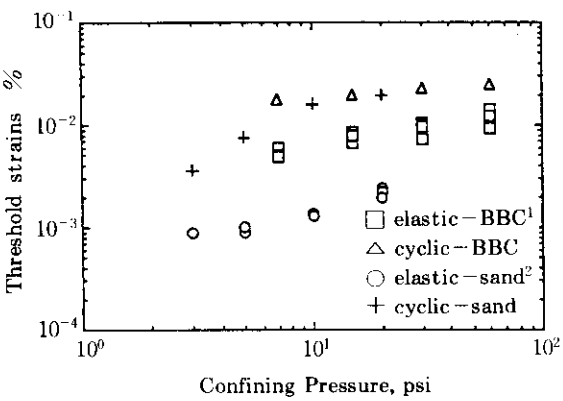


그림 4 점성토의 정규화 전단탄성계수-전단변형률의 관계(Ramberg-Osgood곡선 포함)

Ramberg-Osgood 곡선에서 정규화 탄성계수(G/G_{max})가 0.98인 변형률을 선형한계변형률로 정하고 첫번째와 10번째 사이클 TS시험에서 얻은 전단탄성계수의 비가 0.98인 변형률을 반복한계변형률로 정하여 구속압에 따른 점성토의 선형 및 반복한계변형률의 대표적인 변화를 Boston Blue Clay를 이용하여 그림 5에 나타내었다. 한계변형률은 구속압에 따라 증가하며, 구속압이 48 KPa(7psi)에서 413 Kpa (60psi)으로 증가할 때 선형한계변형률은 $5\times10^{-3}\%$에서 $1.4\times10^{-2}\%$로 반복한계변형률은

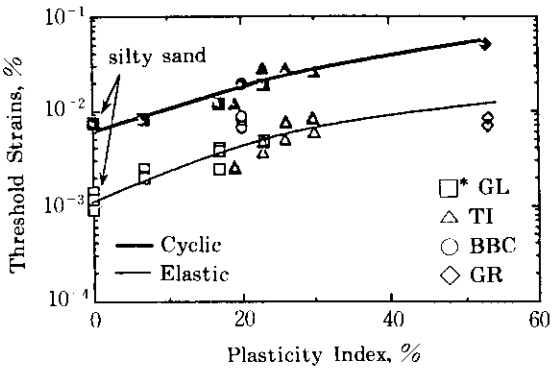
1.8×10^{-2}%에서 2.5×10^{-2}%로 각각 증가하였다. 사질토의 경우와 비교하기 위하여 동반논문(1)에서 구한 사질토의 한계변형률을 그림 5에 함께 나타내었다. Boston Blue Clay의 선형한계변형률은 사질토와 비교하여 상당히 크다. 점성토의 경우 사질토보다 높은 변형률하에서까지 선형거동을 보이는 선형재료임을 알 수 있다. 그러나 점성토와 사질토의 반복한계 변형률은 70KPa(10psi)이상의 구속압 하에서는 거의 같으므로 점성토의 경우 선형 및 반복한계 변형률 사이에 천이구간이 사질토와 비교하여 상대적으로 좁다. 이는 점성토의 경우 비선형거동을 보이자마자 전단탄성계수가 하중반복회수에 영향을 받는 반면에 사질토의 경우는 비선형거동후 많은 변형률이 경과해야 됨을 나타낸다.



1Boston Blue Clay, PI=20%
2Dry Sand, Void Ratio=0.70

그림 5 구속압에 따른 점성토의 선형 및 한계변형률의 변화

다양한 불교란 점성토를 이용하여 선형 및 반복한계변형률과 소성지수와의 관계를 조사하였다. 구속압에 의한 영향을 최소화하기 위하여 실험결과 중 83KPa에서 138KPa 사이의 구속압범위에서 수행한 결과만을 이용하였다. 소성지수에 따른 선형 및 반복한계변형률의 변화를 그림6에 나타내었다. 한계변형률은 소성지수에 따라 증가하며, 소성지수가 0에서 53%로 증가할 때 선형 및 반복한계변형률이 9×10^{-4}%에서 8.4×10^{-3}%로 7×10^{-3}%에서 5×10^{-2}%로 각각 증가하였다.



* solid symbol is for cyclic threshold and open symbol is for elastic threshold

그림 6 소성지수에 따른 선형 및 반복한계변형률의 변화

소성지수가 G/G_{max}−전단변형률 관계에 미치는 영향을 조사하기 위하여 첫번째와 10번째 사이클 TS시험 및 RC시험에 얻은 Ramberg-Osgood 곡선을 이용하여 전단변형률 10^{-2}%와 10^{-1}%에서 G/G_{max}값을 다양한 불교란 점성토에서 구하였다. 이들 G/G_{max}값을 각 시료에 소성지수값에 대하여 그림 7에 나타내었다. 주어진 전단변형률하에서 소성지수에 따라 G/G_{max}가 경향성을 갖고 증가함을 알 수 있다. Vucetic과 Dobry[12]는 점성토와 사질토에 관한 공진주 시험관련 문헌조사를 통하여 G/G_{max}

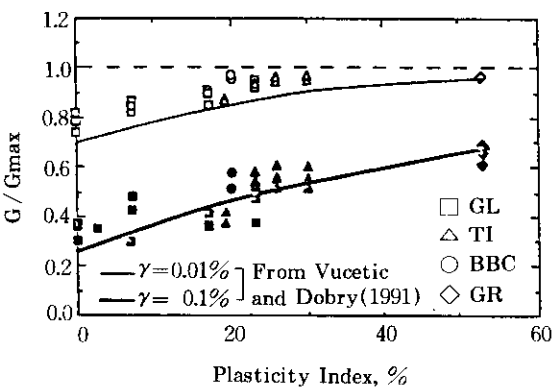


그림 7 전단변형률 0.01%와 0.1%에서 정규화 전단탄성계수(G / Gmax)와 소성지수의 관계

와 소성지수와의 관계를 연구하였다. 이번 실험을 통하여 얻은 값이 그들이 제안한 곡선과 비교적 일치함을 알 수 있다.

4.2 감쇠비에의 영향

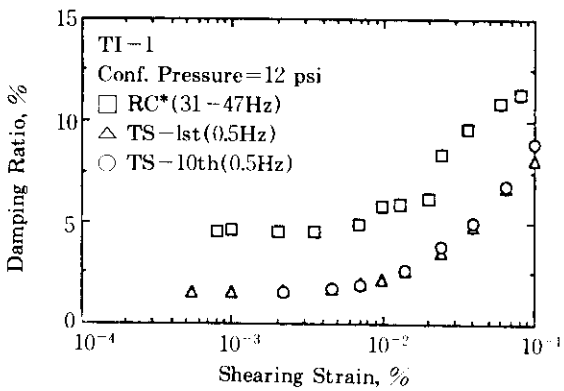
그림 8은 하중반복회수별 점성토의 대표적 전단변형률-감쇠비의 관계를 나타내었다. 첫 번째와 10번째 사이클 TS시험에서 얻은 감쇠비는 시험을 수행한 전체 변형률 영역에서 거의 동일하다. 그러므로 불교란 점성토의 감쇠비는 하중반복회수에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나 RC시험에서 얻은 감쇠비는 TS시험결과보다 크며 그 차이는 전체변형률영역에서 거의 동일하게 나타난다. RC시험에서는 감쇠비를 공진주파수(31~41Hz)에서 자유감쇠곡선을 통하여 얻었고 TS시험에서는 진동주파수 0.5Hz에서 구한 응력-변형 이력곡선을 통하여 얻었으므로, 감쇠비의 차이는 진동주파수의 차이에서 발생한다.

그림 8에 따르면 점성토의 경우 선형한계변형률 이하에서 감쇠비가 존재하며 변형률의 크기에 영향을 받지 않는다. 선형한계변형률과 저변형률감쇠비(D_{min})는 지진발생시 지반증폭(soil-amplification)해석에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 암반위에 놓여 있는 연약한 지반의 경우, 저변형률하에서 응력-변형관계가 선형거동을 보이며 상당한 지반증폭을 보일 가능성이 높고, 지반의 지진응답이 저변형율 감쇠비에 민감한 반응을 보인다[12]. 본 연구에서는 다양한 비교란 점성토로 RC 및 TS시험을 이용하여 선형한계변형률과 저변형률감쇠비를 구하여 표 3에 나타내었다.

TS시험에서 얻은 D_{min}은 1.1%와 1.7%의 좁은 범위에 국한되나 RC시험에서 얻은 값은 1.8%와 5.2%의 넓은 영역에서 분포되었고, 두 시험 결과에서 소성지수에 대한 경향성은 찾기 어려웠다. RC시험 결과가 분산되는 원인은 감쇠비 측정시 진동주파수의 차이에 의한 영향으로 사료된다. Stokoe와 황선근의 연구[10]에 의하면 Stokoe식 공진주시험기에서 발생하는 기기의 감쇠비는 공진주파수가 20Hz에서 200 Hz 범위에서 변화할 때 3.5%에서 0.3%범위에

표 3 불교란 점토의 선형한계 변형률과 저변형률 감쇠비

Sample ID	PI (%)	Pressure (psi)	Test Type	Elastic Threshold (%)	Dmin (%)
GL-1	7	12	RC	0.003	4.0
			TS	0.003	1.4
GL-2	23	12	RC	0.006	4.4
			TS	0.008	1.6
GL-3	17	18	RC	0.003	1.8
			TS	0.004	1.3
GL-4	0	12	RC	0.002	1.8
			TS	0.001	1.1
TI-1	26	18	RC	0.010	2.8
			TS	0.008	1.7
TI-2	23	20	RC	0.006	2.5
			TS	0.005	1.2
TI-3	19	14	RC	0.004	5.2
			TS	0.003	1.5
TI-4	30	19	RC	0.005	2.3
			TS	0.006	1.5
BBC	20	15	RC	0.009	1.8
			TS	0.009	1.6
GR-1	53	20	RC	0.020	3.6
			TS	0.010	1.5



* corrected for equipment damping by subtracting a damping value of 0.4%

그림 8 하중재하회수별 점성토의 전단변형률-감쇠비의 관계

서 변화함을 알 수 있다. 또한 실험기기의 순응도(compliance)문제에 관한 연구가 텍사스 주립대학에서 계속 연구중이다. 그러나 TS시험에서 얻은 감쇠비는 RC시험과는 달리 실험기기의 순응도 문제가 없는 저 진동 주파수(0.5Hz)에서 구하였으므로 현 단계에서 D_{min} 측정에는 TS시험결과가 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

5. 진동주파수가 변형특성에 미치는 영향

5.1 전단탄성계수에의 영향

그림 3에서 설명한 바와 같이 반복한계변형률보다 작은 변형률 상태에서는 RC시험에서 얻은 전단탄성계수가 TS시험의 값보다 크며, 그 차이는 일정하였다. 이 영역에서는 하중반복회수의 영향을 무시할 수 있으므로 RC시험과 TS시험 결과의 차이는 진동주파수의 영향으로 설명할 수 있다. 진동주파수가 전단탄성계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전단변형률 10^{-3}%와 10^{-2}%에서 점성토의 대표적 전단탄성계수-진동주파수 관계를 그림 9에 나타내었다. RC시험에서 얻은 전단탄성계수도 함께 포함시켰다. 흥미롭게도 점성토의 전단탄성계수는 진동주파수의 대수 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

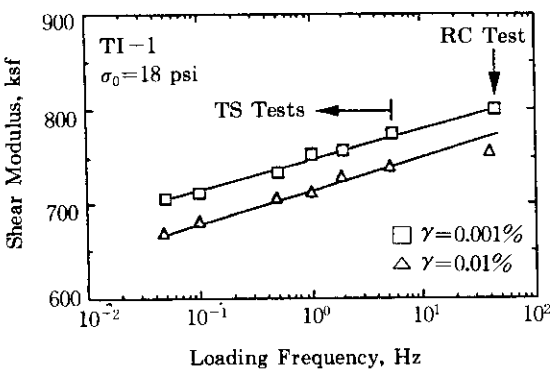


그림 9 진동주파수에 따른 점성토의 전단탄성계수의 변화

진동 주파수의 영향을 정량화하기 위하여 각 주파수에서 얻은 전단탄성계수값들을 진동주파수 0.5Hz에서의 값으로 정규화하였다. 그림 10은 전형적인 정규화된 거동을 나타낸다. 정규화 작업은 전단변형률 10^{-2}%에서 수행하였다. 이들 값에 대한 최소자승법을 사용한 곡선근사화(least-square-curve fitting)를 수행하여 진동주파수의 영향을 정량화하였으며 그림 10의 경우 진동주파수가 10배 증가함에 따라 전단탄성계수는 4.06% 증가함을 알 수 있다.

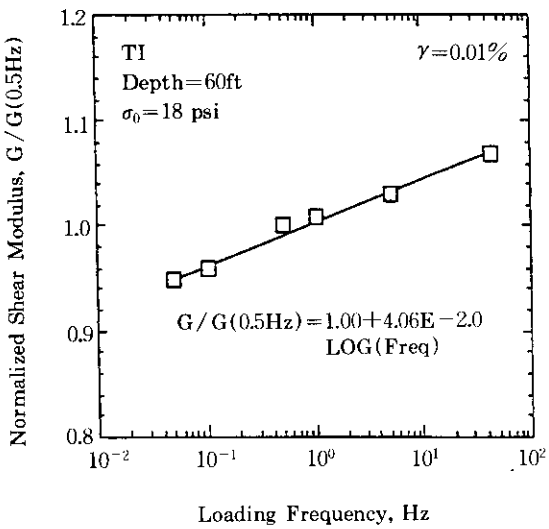


그림 10 0.5Hz의 값으로 정규화된 전단탄성계수와 진동주파수의 관계

전단탄성계수에 대한 진동 주파수의 영향을 다양한 점성토를 이용하여 조사하여 그림11에 나타내었다. 비록 분산의 정도가 심하지만 소성지수가 0에서 53%로 증가함에 따라 진동주파수의 영향이 2.5%에서 7.5%의 범위에서 커짐을 알 수 있다. 이 효과는 다짐 노상토의 경우 불교란 시료에서보다 크다. 실트질 사질토로 분류되는 GL-4시료의 경우 소성이 없는 토질이지만(PI=0) 전단 탄성계수가 진동주파수에 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 사질토 안에 존재하는 실트질 세립토성분이 주된 요인

이며 자연상태에 존재하는 사질토들이 대부분 세립토 성분을 포함하고 있으므로 일반적인 지반의 전단탄성계수가 진동주파수에 영향을 받음을 알 수 있다.

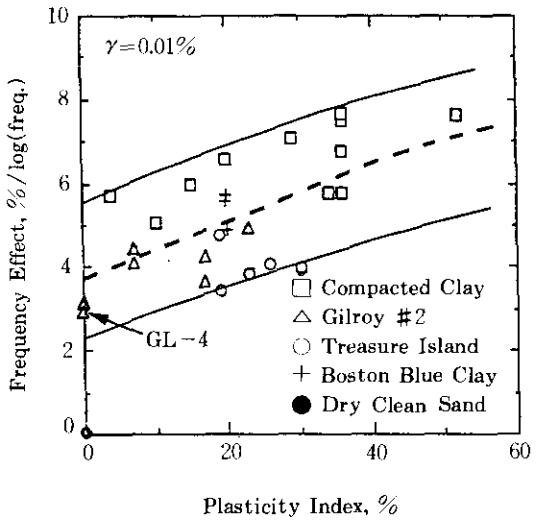
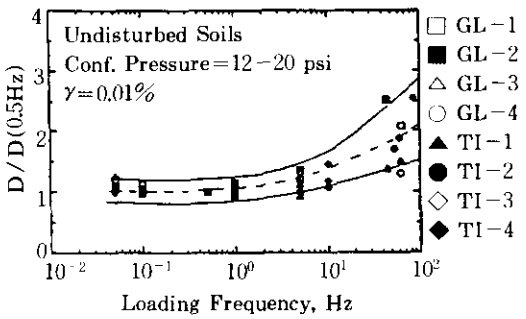


그림 11 소성지수에 따른 전단탄성계수에 대한 진동주파수의 영향

5.2 감쇠비에의 영향

진동주파수에 따른 점성토의 감쇠비 변화를 조사하기 위하여 다양한 점성토를 실험하였다. 그림12는 전단변형률 10^{-2}%에서 얻은 감쇠비 값들을 진동주파수 0.5Hz의 값으로 정규화하여 나타내었다. 1Hz이상의 주파수 범위내에서는 금속검증시편을 이용하여 구한 기기감쇠비 값을 보정하여 나타내었다. 비록 분산의 정도는 심하지만 2Hz미만의 주파수 영역에서는 감쇠비가 주파수에 영향을 받지 않으며 그 이상의 영역에서는 주파수에 따라 증가함을 알 수 있다. 점선으로 표시된 평균곡선에 의하면 100Hz에서의 감쇠비는 2배 정도 증가한다. 소성지수가 20%이상인 시료의 경우 solid symbol을 이용하여 표시하였는데 소성지수에 따른 감쇠비의 영향에 특별한 경향성을 찾지 못하였다. 이번 연구에서 얻은 결과만으로 감쇠비에 미치는 진동주파수의 영향에 대한 결론을 내리기에는 아직 미진하며 RC시험시 고주파수영역에서 발생하는 기기감쇠 및 감쇠비측정에서의 정밀도 증가에 대한 계속적인 연구가 선행되어야 하겠다.



• Solid symbols are for samples with PI>20%.

그림 12 0.5Hz 값으로 정규화된 감쇠비와 진동주파수의 관계

6. 결 론

본 연구에서는 공진주/비틂전단시험기를 이용하여 저변형률 및 중간 변형률하에서 점성토의 변형특성을 실험적으로 연구하였다. 다양한 불교란 시료 및 다짐시료를 사용하였으며 공진주 및 비틂전단시험을 동일한 시료로 시험하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 선형한계변형률(γ_t)이하에서 전단탄성계수는 하중반복회수와 변형률의 크기에 영향을 받지 않았으며, γ_t는 구속압과 소성지수에 따라 증가하였다. 소성지수가 0에서 53%로 증가할 때 γ_t는 9×10^{-4}%에서 8.4×10^{-3}% 영역에 존재하였다. 점성토의 경우 사질토보다 선형영역이 넓음을 알 수 있었다.
2) γ_t이하에서 저변형률감쇠비가 존재하였으며, 비틂전단시험의 경우 1.1%에서 1.7%범위에 공진주시험의 경우 1.8%에서 5.2% 범위에 각각 분포하였다.

3) 반복한계변형률(γ^c_t)이상에서는 점성토의 전단탄성계수는 하중반복회수에 따라 감소하였다. γ^c_t는 7×10^{-3}%에서 5×10^{-2}% 범위에 분포하였으며 구속압과 소성지수에 따라 증가하였다. 그러나 본 연구에서 점성토의 감쇠비는 하중반복회수에 영향을 받지 않았다.

4) TS시험과 RC시험에서 얻은 점성토의 변형특성은 전체 변형률 영역에서 상이한 값을 나타내었다. 이 차이는 진동주파수의 차이로 설명할 수 있다. 전단탄성계수는 진동 주파수의 대수 증가에 따라 선형적으로 증가하였고 진동 주파수의 영향은 소성지수가 0에서 53%로 증가함에 따라 2.5%에서 7.5% 영역에서 증가하였다. 그러나 감쇠비의 경우 2Hz이하의 주파수에서는 영향을 받지 않으며 소성지수에 따른 경향성을 찾지 못하였다.

참 고 문 헌

1. 김동수(1995) "공진주/비틂(RC/TS)시험기를 이용한 건조사질토의 변형특성", 한국지반공학회지 제11권, 제1호, pp101~112
2. Anderson, D.G. and Richart, F.E., Jr.(1976), "Effects of Shearing of Shear Modulus of Clays." Joural of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT9, Sept. pp. 975-987.
3. Dobry, R. and Vucetic, M.(1987). "Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits." Proceedings, International Symposium on Geotech. Eng. of Soft Soils, Vol. 2, Mexico City pp.51-87.
4. Idriss, I.M., Dobry, R. and Singh, R.D.(1978), "Nonlinear Behavior of Soft Clays during Cyclic Loading." Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 104, No. GT12, Dec., pp.1427-1447.
5. Isenhower, W.M.(1979). "Torsional Simple Shear/Resonant Column Properties of San Francisco Bay Mud." Geotechnical Engineering Thesis, GT 80-1, University of Texas, Dec., 307 p.
6. Kim D.S.(1991). "Deformational Characterisstics of Soils at Small to Intermediate Strains From Cyclic Tests." Ph.D Dissertation, University of Texas, August.
7. Kim, D.S., Stokoe, K.H.,II, and Roesset, J.M. (1991). "Characterization of Material Damping of Soils Using Resonant Column and Torsional Shear Tests." Proceedings, 5th International Conf. on SDEE, Univ. of Karlsruhe, Germany, Sep.
8. Manual of Testing Procedures(1983), Texas Highway Department, Vol. 1, Jan.
9. Mitchell, J.K.(1976). "Fundamentals of Soil Behavior," John Wiley & Sons, New York.
10. Stokoe, K. H.,II and Hwang, S.K.(1993). "Technical Procedures for Resonant Column and Torsional Shear(RCTS) Testing of Intact Soil Samples," Project No. AA891070, University of Texas, 88p.
11. Taylor D.W.(1948), "Fundamentals of Soil Mechanics." J. Wiley & Sons, 348p.
12. Vucetic, M.and Dobry, R.,(1991). "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.117, No.1, Jan., pp.89-107.

(접수일자 1994. 12. 30)