

공진주 시험기를 이용한 국내 노상토의 동적 물성치

Dynamic Properties of Korean Subgrade Soils Using Resonant Column Test

김 동 수*¹

Kim, Dong - Su

정 충 기*²

Chung, Choong - Ki

홍 성 영*³

Hong, Sung - Young

Abstract

Resonant column test has been widely used as a primary laboratory testing technique in investigating dynamic soil properties expressed in terms of shear and Young's moduli and material damping. In this paper, dynamic properties of typical Korean subgrade soils are investigated at shearing strains between $10^{-4}\%$ and $10^{-1}\%$ using Stokoe-type resonant column test. The elastic threshold strains(γ_t^e) above which shear modulus and damping ratio are affected by strain amplitude, are defined at strain amplitude of about $10^{-3}\%$. Below γ_t^e , small-strain shear modulus(G_{max}) increases with confining pressure ($\bar{\sigma}_c$) as proportional to $(\bar{\sigma}_c)^{0.61}$, and small-strain damping ratio(D_{min}) ranges between 1% and 5.7%. Above γ_t^e , normalized shear modulus reduction curve(G/G_{max} versus log strain) can be quite well expressed with Ramberg-Osgood stress-strain equation and match well the curve suggested for sand by Seed and Idriss.

요 지

공진주 시험기는 전단탄성계수, 영계수 및 감쇠비로 표현되는 지반의 동적물성치를 연구하기 위한 중요한 실내 실험법으로 널리 사용되어 왔다. 본 연구에서는 Stokoe식 공진주 시험기를 이용하여 전단 변형률 $10^{-4}\%$ - $10^{-1}\%$ 범위에서 대표적인 국내 노상토의 동적 물성치를 연구하였다. 전단탄성계수와 감쇠비는 한계변형률 $1 \times 10^{-3}\%$ 부근에서 부터 변형률의 영향을 받기 시작하였다. 한계 변형률 이하에서 최대 전단탄성계수(G_{max})는 구속압 ($\bar{\sigma}_c$)에 따라 $(\bar{\sigma}_c)^{0.61}$ 에 비례하여 증가하였고 최소감쇠비(D_{min})는 1%~5.7% 범위에 분포하였다. 한계 변형률 이상에서 정규화 탄성계수 감소곡선은 Ramberg-Osgood식으로 잘 나타낼 수 있으며 Seed와 Idriss가 사질토를 이용하여 얻은 감소곡선과 거의 일치하였다.

*¹미국 Polytechnic대학교 조교수

*²정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*³우대기술단

1. 서 론

동적 반복하중을 받는 흙-구조물(soil-structure) 혹은 흙-포장체(soil-pavement)시스템의 설계를 위해 전단탄성계수, 탄성계수 및 감쇠비로 표현되는 지반의 동적물성치의 결정은 매우 중요하다. 과거에는 흙의 동역학에 관한 연구가 지진문제에 국한되었지만, 최근 인간의 산업활동이 발전함에 따라 지하철 등 차량운행 진동, 발파진동, 기계기초 등에서 유발되는 진동 등 다양한 발생유형에 따른 동역학적 문제의 해결과 원자력 발전소, 레이다 기지, 첨단 산업시설 등 진동에 예민한 구조물의 안전한 설계를 위해 지반의 동적 물성치에 관한 연구의 필요성이 증가하고 있다.

실험실에서 지반의 동적 물성치를 구하는 대표적 방법으로 공진주 실험이 널리 사용되어 왔다. 지반의 동적거동은 변형률의 크기에 따라 크게 다르게 나타나는데 공진주 실험에서는 유압식이나 기계식으로 작동하는 대부분의 반복시험기(cyclic testing equipment)와는 달리 전기적 코일-자석(coil-magnet) 상호작용으로 비틀력(torque)을 시료에 가함으로써 순응도 문제(compliance problem)없이 저 변형률(전단변형률($\gamma < 10^{-3}\%$))하에서의 선형거동과 고 변형률($10^{-3}\% < \text{전단변형률}(\gamma) < 10^{-1}\%$)하에서의 비선형 거동 등 지반의 동적 특성을 효과적으로 연구할 수 있다.^(2, 5, 8, 9, 13)

본 연구에서는 Stokoe식의 공진주 실험기를 이용하여 주요 국도에서 채취한 대표적인 국내 노상토의 동적 특성을 실험적으로 고찰하였다. 저 변형률 하에서 입도분포와 구속압력의 변화에 따른 국내 노상토의 최대 전단탄성계수(G_{max})와 최소감쇠비(D_{min})의 영향을 연구하였고 고 변형률 하에서 전단탄성계수와 감쇠비의 변형률 변화에 따른 비선형 거동을 조사하고 문헌에서의 대표적인 흙의 거동과 비교하였다.

2. 연구배경

2.1 저 변형률 하에서의 동적 거동

지반의 전단탄성계수는 한계 변형률(elastic threshold strain) 이하의 저 변형률 하에서, 변형률 크기에 관계없이 일정하며 최대값을 갖는다. 최대 전단탄성계수(G_{max})를 예측하기 위해 Hardin(1978)은 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$G_{max} = A(OCR)^K P_a^{1-n} \bar{\sigma}_0^n / F(e) \dots\dots(1)$$

여기서 A = 무차원 상수

$\bar{\sigma}_0$ = 평균유효 구속압

OCR = 과압밀비

K = 소성지수의 함수

P_a = 대기압

n = $\log(G_{max})$ 과 $\log \bar{\sigma}_0$ 곡선의 기울기

$F(e) = 0.3 + 0.7e^2$

이며 사질토의 경우 OCR의 영향은 적을 것으로 생각된다.

지반의 감쇠비도 저 변형률 하에서 변형률의 크기에 관계없이 일정하게 최소값(D_{min})을 갖는다. Vucetic과 Dobry(1991)는 지진이나 진동발생시의 지반의 거동을 예측하는데 D_{min} 의 영향이 중요함을 지적하였으나 최대 전단탄성계수와 비교하여 지금까지는 상대적으로 적은 연구가 수행되었다.

2.2 고 변형률 하에서의 동적 거동

한계 변형률 이상의 고 변형률에서는 변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고, 감쇠비는 증가하는 거동을 보인다. 흙의 비선형 응력-변형관계를 예측하기 위하여 여러 해석 Model들이 개발되었으며 그중 Ramberg-Osgood Model⁽¹²⁾과 Modified Hyperbolic Model⁽⁷⁾이 지반동역학에서 대표적으로 사용된다. Ramberg-Osgood Model은 다음의 식으로 나타낼 수 있으며

$$\gamma = (\tau / G_{max}) + C(\tau / G_{max})^R \dots\dots\dots(2)$$

여기서 γ = 전단 변형률

τ = 전단 응력

G_{max} = 최대 전단탄성계수

C, R = 무차원 상수

Modified Hyperbolic Model 은 다음의 식으로 표현된다.

$$G/G_{max} = \frac{1}{1+\gamma_h} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 γ_h 는 hyperbolic strain이며 다음의 식으로 정의된다.

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} (1+ae^{b\gamma/\gamma_r}) \dots\dots\dots(4)$$

여기서 γ_r = 기준변형률 = τ_{max} / G_{max}

τ_{max} = 최대전단응력

a, b = 무차원 상수이다.

3. 실험계획

3.1 실험기구 및 측정방법

본 실험에서는 Stokoe식의 고정단-자유단 방식 공진주 실험기를 사용하였다. 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석시스템을 이용한 진동시스템(drive system)을 공시체의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속 감지기(accelerometer)로 가속도를 측정한다. 그림 1-(a)는 Stokoe식 공진주 실험기의 개요도이다.

공진주 시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동수를 바꿔가면서 비틀자극(torsional excitation)을 가하여 그림 1-(b)에 나타난 바와 같이 1차 모드의 공진 진동수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기를 이용하여 전단파 속도(V_s), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률을 구한다⁽¹⁶⁾. 탄성파전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주 시험의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \omega nL / V_s \tan(\omega nL / V_s) \dots\dots\dots(5)$$

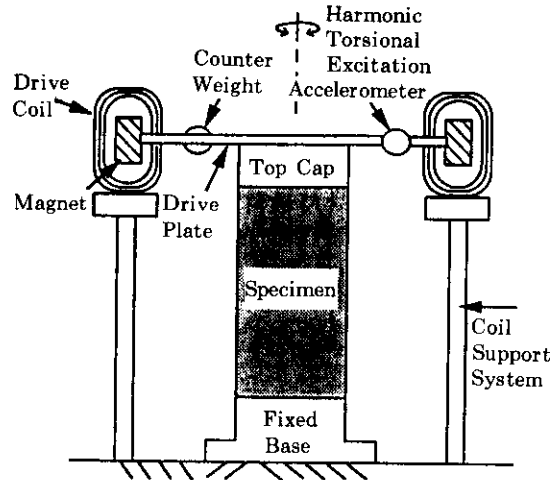
여기서 I = 공시체의 질량 관성 모멘트

I_0 = 진동시스템의 질량 관성 모멘트

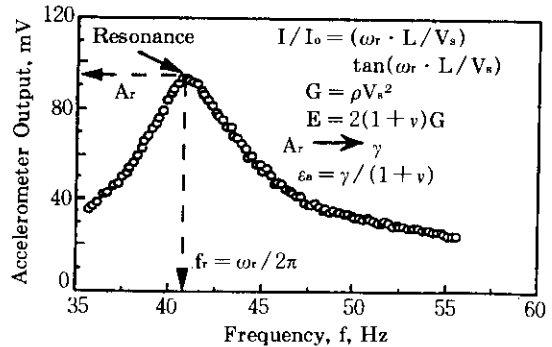
ωn = 공시체-진동시스템의 고유 진동수

L = 공시체의 길이

V_s = 전단파 속도이다.



a) Specimen in the Resonant Column Apparatus



b) Typical Frequency Response Curve

그림 1. 고정단-자유단 방식 공진주 시험기 개요도 및 대표적인 진동반응곡선

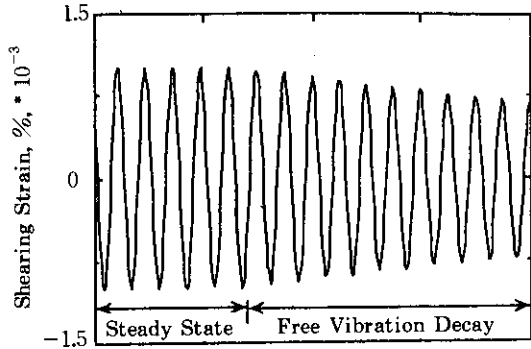
실제 공진주 실험에서는 감쇠고유진동수, ω_r (damped natural frequency)가 얻어지며, 큰 오차없이 ω_n 을 대신하여 사용할 수 있다^(1, 9).

식(5)에 의해 전단파 속도(V_s)가 구해지면 전단탄성계수(G)를 다음식으로 구한다.

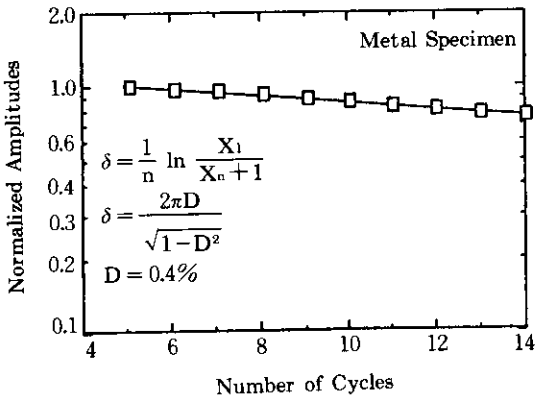
$$G = \rho V_s^2 \dots\dots\dots (6)$$

여기서 ρ = 질량 밀도이다.

전단변형률은 시료전체에 걸쳐 일정하지 않은 점을 고려하여, 공시체의 상부 중앙에서 반지름의 0.8배 되는 지점에서 구하였다⁽³⁾.



a) Free-Vibration Decay Curve



b) Analysis of Free-Vibration Decay Curve

그림 2. 자유진동 감쇠곡선을 이용한 감쇠비 결정방법

공진주 시험에서 감쇠비는 자유진동 감쇠곡선(free vibration decay curve), 또는 진동수 반응곡선(frequency response curve)을 이용하여 구하는데 본 연구에서는 자유진동 감쇠곡선을 이용하여 구하였다. 공시체가 공진진동수

로 정현진동(steady state vibration)하는 동안 가진력을 차단하면 자유진동 감쇠곡선이 오실로스코프에 기록된다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 각 사이클의 진폭을 측정하여 대수적 감소, δ (logarithmic decrement)를 구한 후 감쇠비(D)를 얻는다.

공진주 시험장치는 네개의 부시스템들로 이루어져 있다. : (1) 구속시스템(confinement system), (2) 가진시스템(drive system), (3) 높이변화측정시스템(height change monitoring system)과 (4) 진동계측시스템(motion monitoring system)이다. 각 시스템들의 상호계통도는 그림 3과 같다.

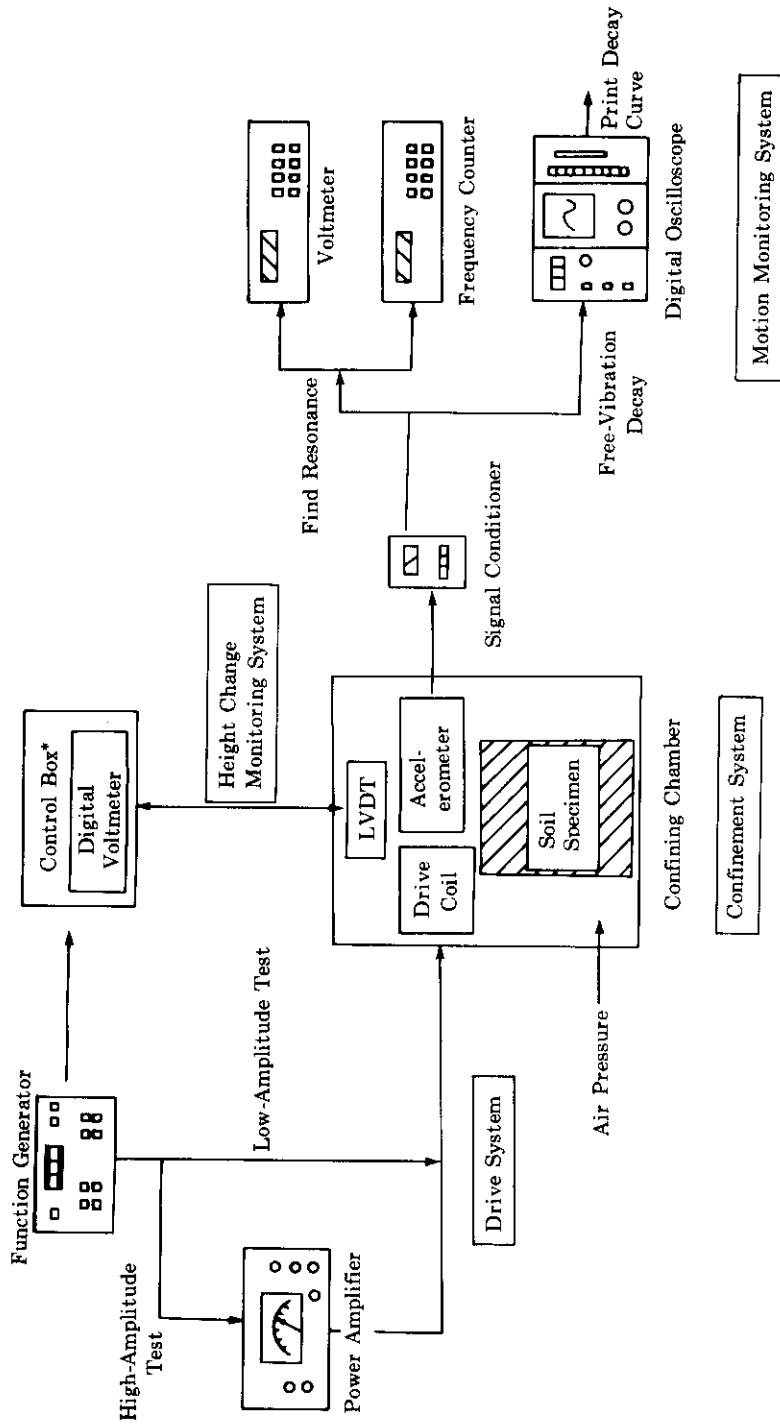
3.2 시험시료

대표적인 국내 노상토의 동적 물성치를 구하기 위해 입도 분포가 다른 시험시료를 (#200 체 통과량이 10% 미만, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%) 다섯 곳의 국토유지관리 현장에서 채취하였다. 표 1에는 시험에 사용된 시료의 채취위치와 기본토성을 나타내었으며, 입도분포곡선은 그림 4에 나와있다.

본 연구에서는 밀도와 함수비의 영향없이 입도분포가 동적특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 지름 7cm, 높이 14cm의 공시체를 현장밀도와 현장함수비의 평균치에 가까운 2.0g/cm³와 15%로 통일하여 성형하였다⁽³⁾.

3.3 시험방법

성형된 시료를 하부판(bottom plate) 위에 놓고 공진주 시험장치를 설치한 후 공기압으로 0.5kg/cm²의 등방구속압을 가하여 압밀시킨다. 흙의 동적특성이 압밀시간에 영향을 받으므로 구속시간을 24시간으로 통일하였다. 압밀 후 전단변형률 10⁻³% 이하의 저 변형률하에서 전단탄성계수와 감쇠비를 구하였다. 전단변형률을 10⁻¹% 근방까지 대략 두배씩 증가시키고 변형률($\gamma > 10^{-3}$ %)에서 전단탄성계수와 감쇠비를 구하였다. 0.5kg/cm²에서 실험이 끝난



*Control box is also used to trigger the free-vibration decay curve.

그림 3. 공진주 시험장비의 상호 계통도

표 1. 시험시료의 기본 물성치

시료 번호	채취위치	현장밀도 (g/cm ³)	현장함수비 (%)	C.B.R (%)	#4. 잔류량 (%)	#200. 통과량 (%)	통일분류 기호	소성지수 (PI)
1	국도17호선 충북 진천	2.02	23.8	23.5	11	4	SW	NP
2	국도23호선 충남 논산	1.98	13.6	23.7	3	11	SW	NP
3	국도1호선 전북 정읍	2.00	12.1	23.7	1	24	SM	15
4	국도19호선 경남 하동	1.87	17.6	15.9	17	35	SC	15
5	국도7호선 경기 여주	2.03	16.1	21.6	1	48	SC	20

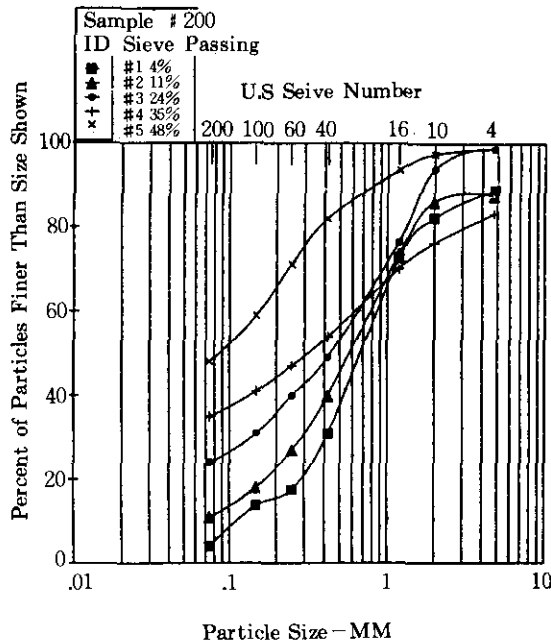


그림 4. 시험시료의 입도분포

후 구속압을 다음단계인 1kg/cm²로 올려서 같은 순서로 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 구속압을 0.5, 1, 2, 3kg/cm²

또는 0.25, 0.5, 1, 2kg/cm² 순서로 증가시켰다.

4. 결과분석

실험결과를 저 변형률($\gamma < 10^{-3}\%$)하의 선형거동과 고 변형률($10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$)하의 비선형 거동으로 나누어 분석하였다.

4.1 저 변형률하의 거동

한계 변형률 이하의 저 변형률하에서 높은 변형률의 변화에 관계없이 최대 전단탄성계수 (G_{max})와 최소감쇠비 (D_{min})를 갖는다. 지반진동해석에서 구속압력 크기와 구속시간의 변화에 따른 G_{max} 과 D_{min} 의 변화는 중요한 설계변수로 사용되어 왔다(4, 14, 18). 본 연구에 사용된 시료의 대부분이 구속시간의 영향을 크게 받지 않는 사질토입으로 구속시간은 24시간으로 통일하여 영향을 최소화하면서 구속압력크기에 따른 G_{max} 과 D_{min} 의 변화를 연구하였다.

그림 5는 한계변형률 이하에서 얻은 국내 노상토의 최대 전단탄성계수(G_{max})와 구속압력 σ_0 의 관계를 나타낸다. Hardin(1978)은 G_{max} 가 $\sigma_0^{0.5}$ 에 비례하여 증가한다는 결과를 발표하였으나 본 연구에서는 $\sigma_0^{0.61}$ 에 비례함을 알 수 있으며 Hardin 방정식(식 1)을 이용하여 G_{max} 를

표현하면 아래의 식과 같이 나타난다.

$$G_{max} = \frac{595}{0.3+0.7e^2} (P_a)^{0.39} (\bar{\sigma}_0)^{0.61} \dots\dots\dots (7)$$

사용한 시료가 사질토임으로 OCR의 영향을 고려하지 않았으며 간극비가 0.53-0.57 범위에서의 결과를 표현하였다. 입도분포가 G_{max} 에 미치는 영향을 조사하기 위해 #200체 통과량이 다른 시료를 사용하였으나 #200체 통과량에 따른 경향성을 찾지 못하였으며 구속압이 중요한 변수임을 알 수 있다.

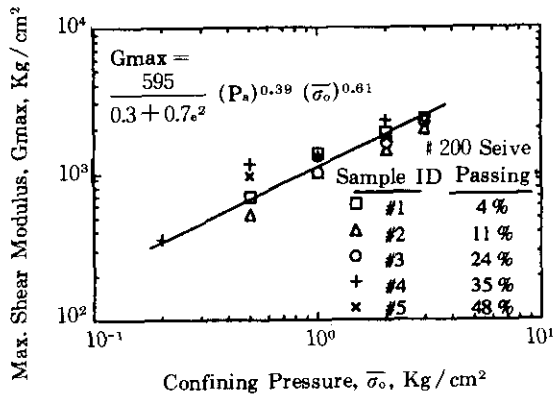


그림 5. 구속압 변화에 따른 국내 노상토의 최대 전단탄성계수

그림 6에서 입도분포가 다른 다섯 시료의 구속압력의 변화에 따른 최소 감쇠비의 변화를 살펴보면 국내노상토의 D_{min} 은 대략 1%에서 5.7% 범위에 분포한다. D_{min} 은 구속압이 증가함에 따라 약간 감소함을 보였고, G_{max} 과는 달리 #200체 통과량이 증가함에 따라 D_{min} 값이 증가하는 경향을 보인다. 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction) 해석이 최소감쇠비의 변화에 상당한 영향을 받으므로 최근 한계변형률 이하에서 최소감쇠비를 실험적으로 정밀히 구하려는 노력이 증가하고 있다^(9, 10, 18). 김동수(1991)의 연구결과에 의하면 공진주 시험기의 순응도 문제(compliance problem)를 고려한 측정 감쇠비값의 보정을 제안하고 있는데 이에 대한 계속적인 연구가 요망된다.

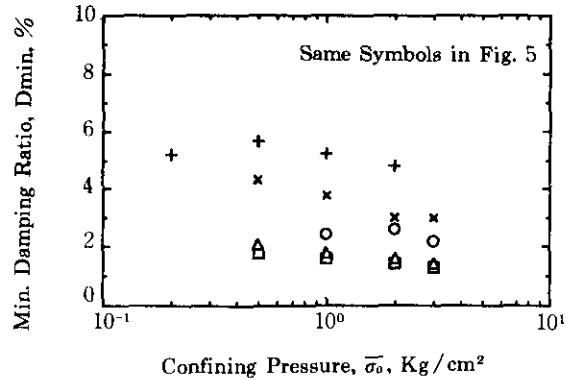


그림 6. 구속압 변화에 따른 국내 노상토의 최소 감쇠비

4.2 고 변형률하에서의 거동

전단 변형률과 구속압이 전단탄성계수에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 대표적인 결과를 보여주는 #200체 통과량이 4%인 1번 시료에 대한 결과가 그림 7에 나타나 있다. 전단 변형률이 저 변형률하에서는 전단탄성계수가 각각의 구속압에서 일정함을 보이나, 한계변형률 이상에서는 전단 변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수가 감소한다. 또한 전단탄성계수는 구속압이 증가함에 따라 증가한다.

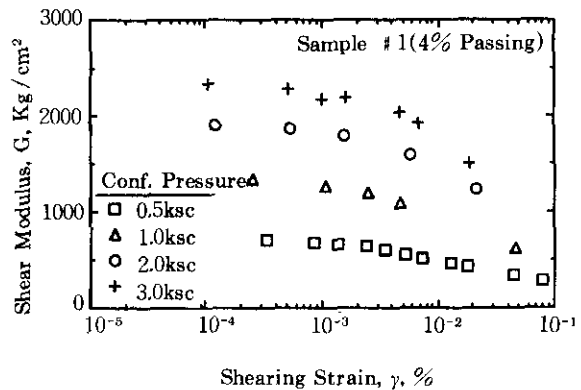


그림 7. 구속압과 전단 변형률 변화에 따른 전단 탄성계수

구속압에 따른 전단탄성계수의 절대값의 영향을 없애기 위하여 지반 동역학에서는 정규화 전단탄성계수(normalized shear modulus, G/G_{max})를 이용하여 전단변형률과의 관계를 나타낸다⁽¹⁵⁾. 그림 8은 G/G_{max} 와 전단변형률의 관계를 그림 7에 나타난 실험결과를 이용하여 나타내었다.

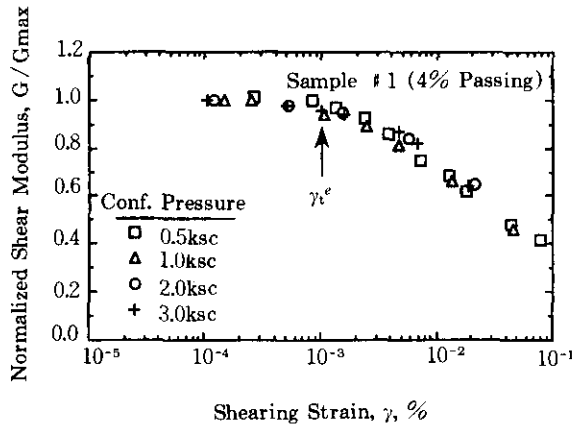
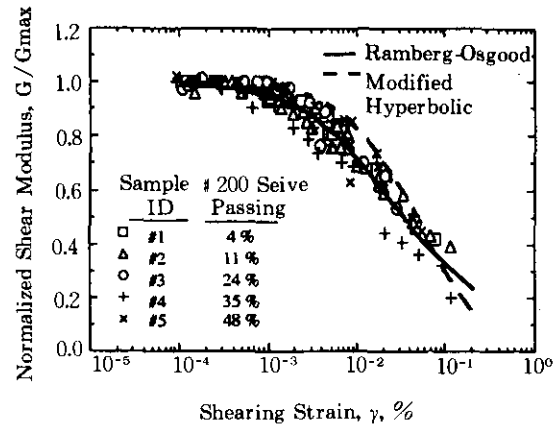


그림 8. 정규화 탄성계수와 전단 변형률과의 관계

그림 8에서 전단탄성계수가 전단변형률이 증가함에 따라 감소하기 시작하는 한계변형률(γ_c)이 대략 $1 \times 10^{-3}\%$ 부근임을 알 수 있다. 일반적으로 구속압이 증가함에 따라 G/G_{max} 곡선이 오른쪽으로 천이되는 현상을 보이나^(2, 9, 17) 본 연구에서는 특별한 경향성이 나타나지 않는다.

본 연구에 사용한 입도분포가 다른 다섯종류의 노상토를 사용하여 얻은 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 전단 변형률과의 관계를 종합하여 그림 9에 나타내었다. 비록 입도분포와 구속압력이 다른 조건이지만 정규화를 수반하면 실험결과가 좁은 범위(narrow band)에 한정됨을 알 수 있다. 일반적으로 세립분의 함유량이나 시료의 소성지수가 커짐에 따라 G/G_{max} 감소곡선이 오른쪽으로 천이하며 탄성영역이 넓어지는 경향성이 보이나^(2, 9, 18) 그

림 9에서는 위와 같은 경향성이 나타나지 않는다.



* Ramberg-Osgood Coefficients ($R = 2.064$, $C = 10261$)
 * Modified Hyperbolic Model for dry sand of $e = 0.55$, $\phi = 35^\circ$, $K_0 = 0.43$, and $\bar{\sigma}_0 = 1 \text{ Kg/cm}^2$

그림 9. 전단 변형률 변화에 따른 국내 노상토의 정규화 전단탄성계수 (Ramberg-Osgood 곡선 및 수정 Hyperbolic 곡선 포함)

실험결과를 이용해 Ramberg-Osgood 방정식(식 2)의 상수를 구하면, $R = 2.064$ 와 $C = 10261$ 이었고, 이들 상수를 이용하여 얻은 Ramberg-Osgood 곡선을 실선으로 그림 9에 나타내었다. 또한 Hardin과 Drnevich(1972)가 제안한 수정 hyperbolic model(식 3)로 얻은 변형률에 따른 G/G_{max} 감소곡선을 점선으로 나타내었다. 식 3으로 감소곡선을 나타내기 위해 건조 사질토의 간극비(e)는 사용된 시료의 평균값인 0.55를 사용하였으며, 마찰각(ϕ)과 정지압계수(K_0)는 G/G_{max} 에 미치는 영향이 매우 작기 때문에, 시험시료들의 대표값으로 가정할 수 있는 35°와 0.43을 각각 적용하였다. Ramberg-Osgood 곡선이 수정 hyperbolic model에 비해 넓은 전단변형률 범위($10^{-4}\% - 10^{-1}\%$)에서 정규화 전단탄성계수의 변화를 잘 나타냄을 알 수 있다.

국내 노상토의 정규화 전단탄성계수 감소곡

선을 기존의 문헌에서 알려진 곡선들과 비교하기 위해 Seed와 Idriss(1970), Kuo와 Stokoe(1982), Isenhower(1979)가 구한 감소곡선들과 함께 그림 10에 같이 나타내었다. 국내 노상토에서 얻은 G/G_{max} 의 Ramberg-Osgood 곡선이 Seed와 Idriss(1970)가 사질토를 이용하여 얻은 감소곡선과 거의 일치하였고, Kuo와 Stokoe(1982)가 남부 캘리포니아의 Heber Road 사질토로 구한 감소곡선보다는 왼쪽에 위치함을 알 수 있다.

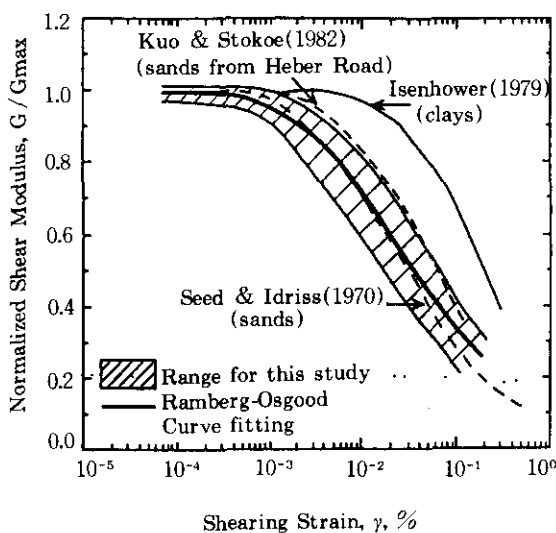


그림 10. 국내 노상토의 전단탄성계수 감소곡선과 다른 문헌과의 비교

그림 11은 입도분포가 다른 국내 노상토 감쇠비의 전단변형률에 대한 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 공진주 시험에서는 진동 삼축압축시험기와 같은 Cyclic 시험기와는 달리 $10^{-4}\%$ - $10^{-1}\%$ 의 넓은 전단변형률하에서 감쇠비의 변화를 구할 수 있다. 주어진 시료에서 감쇠비는 한계변형률 이하의 탄성영역에서는 전단변형률에 크기에 관계없이 일정한 값을 보이나 한계변형률 이상에서는 전단변형률이 증가함에 따라 급격하게 증가한다. 시험에 사용한 시료들의 감쇠비에 대한 한계변형률은 전

단탄성계수에서와 비슷한 $1 \times 10^{-3}\%$ 정도의 값을 보여준다.

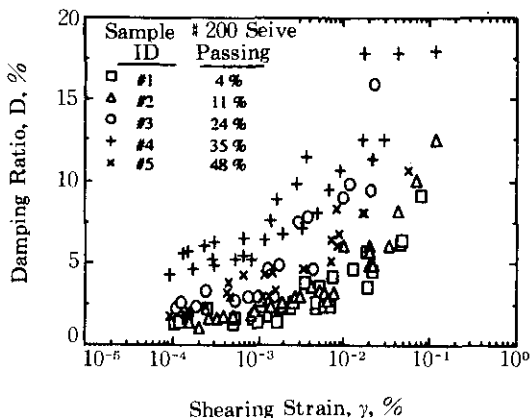


그림 11. 전단 변형률 변화에 따른 국내 노상토의 감쇠비

구속압과 입도분포가 감쇠비에 미치는 영향을 효과적으로 고찰하기 위하여 정규화 감쇠비 (D/D_{min})를 각각의 시료에 대하여 구하여, 사용한 모든 시료의 D/D_{min} 영역을 전단변형률의 변화에 따라 그림 12에 나타내었다.

D/D_{min} 영역이 그림 11의 결과보다는 좁은 범위에 한정되나 정규화 전단탄성계수의 영역에 비하여는 분산정도가 심함을 알 수 있다.

국내 노상토의 정규화 감쇠비 영역을 기존의 문헌에서 알려진 곡선들과 비교하기 위해 Seed와 Idriss(1970), Stokoe와 Lodde(1978), Isenhower(1979), Kuo와 Stokoe(1982)가 구한 D/D_{min} 곡선들을 그림 12에 함께 나타내었다. 국내 노상토의 D/D_{min} 영역을 Seed와 Idriss가 사질토로 구한 D/D_{min} 곡선의 아래쪽에 위치하며 남부 캘리포니아의 Heber Road Sand의 D/D_{min} 곡선과 Stokoe와 Lodde가 샌프란시스코만 점성토(San Francisco Bay Mud)로 구한 D/D_{min} 의 영역사이에 대부분 분포함을 알 수 있다.

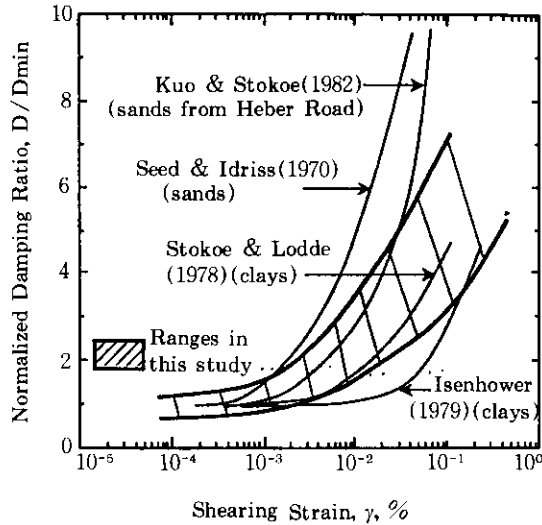


그림 12. 국내 노상토의 정규화 감쇠비 변화와 다른 문헌과의 비교

5. 결 론

본 연구에서는 공진주 시험기를 이용하여 전단변형률 $10^{-4}\%$ – $10^{-1}\%$ 영역에서 국내 노상토의 동적 물성치(전단탄성계수 및 감쇠비)를 실험적으로 고찰하였다. 본 연구로부터 얻은 주요 연구성과 및 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 전단 변형률이 증가함에 따라 비선형 거동을 보이기 시작하는 한계 변형률은 국내 노상토의 경우 전단탄성계수와 감쇠비 모두 $1 \times 10^{-3}\%$ 부근이다.

2) 한계 변형률 이하에서 최대 전단탄성계수 (G_{max})는 $(\bar{\sigma}_0^{0.61})$ 에 비례하여 증가하며, # 200 체 통과량이 증가함에 따라 G_{max} 의 변화는 거의 없으나, 최소감소비(D_{min})값은 증가하며 대략 1%–5.7% 범위에 분포한다.

3) 본 연구에 사용된 시료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 Ramberg–Osgood curve fitting으로 $10^{-4}\%$ – $10^{-1}\%$ 의 전단 변형률에서 잘 나타낼 수 있으며 Remberg–Osgood 상

수 R은 2.064이고 C는 10261이었다. 또한 이 감소곡선은 Seed와 Idriss가 사질토를 이용하여 얻은 감소곡선과 거의 일치하였다.

4) 본 연구에서 얻은 정규화 감쇠비 영역은 남부캘리포니아 Heber Road Sand의 D/D_{min} 곡선과 샌프란시스코만 점성토의 D/D_{min} 영역사이에 대부분 분포하였다.

5) 본 연구는 공진주 시험기로 국내 노상토의 동적특성을 처음 연구한데 의의가 있으며, 국내의 내진문제, 내 진동 구조물 설계 등에 이용하기 위하여 이 분야에 광범위하고 체계적인 연구 및 지원이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 송정락, 김수일(1987), “모래밀도가 동적특성에 미치는 영향.” 대한토질공학회지, 제3권 제2호, pp.7–16
2. 송정락, 김수일(1988), “Silt질 모래의 고 변형률 진동특성(기본성질),” 대한토질공학회지, 제4권, 제3호, pp.27–33
3. 홍성영(1993), “국내 노상토의 동적 변형특성에 관한 실험적 고찰,” 석사논문, 서울대학교, 84p
4. Anderson D. G and Stokoe, K. H., II(1978), “Shear Modulus : A Time-Dependent Material Property,” Dynamic geotechnical Testing, ASTM SPT654, pp.60–90.
5. Drnevich, V. P. (1985), “Recent Development in Resonant Column Testing,” Richart Commemorative Lectures, ASCE annual meeting, Detroit, ASCE, pp.79–107.
6. Hardin, B. O.(1978), “The Nature of Stress-Strain Behavior of Soils,” Proceedings, Geotech. Eng. Div. Specialty Conference on Earthquake Eng. and Soil Dynamics, Vol. 1, ASCE, Pasadena, pp.3–90.
7. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.(1972), “Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves,” Journal of SMFE Div., ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 667–692.

8. Isenhower, W.M.(1979), "Torsional Simple Shear/Resonant Coulmn Properties of San Francisco Bay Mud," Geotechnical Engineering Thesis, GT 80-1, University of Texas, Dec., 307 p.
9. Kim, D.-S.(1991). "Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests." Ph. D Dissertation, The University of Texas at Austin, 341 p.
10. Kim, D. -S, and Stokoe, K. H., II (1994), "Torsional Motion Monitoring System for Samall-Strain(10-5% to 10-3%) Soil Testing," Geotechnical Testing Journal, GTJODT, Vol. 17, No. 1, March, pp.17-26, 1994.
11. Kuo, H. C. and Kenneth H. Stokoe II.(1982). "Larboratory Investigation of Static and Dynamic Soil Properties of Three Heber Road Sands After October 15, 1979 Imperial Valley Earthquake," Geotechnical Engineering Report, GR82-25, University of Texas, 171p.
12. Ramberg, W. and Osgood, W. R.(1943), "Description of Stress-Strain Curves by the Three Parameters," Technical Note 902, National Advisory committee for Aeronautics, Washington, D.C.
13. Ray R. P and Woods, R. D.(1988), "Modulus and Damping Due to Uniform and Variable Cyclic Loading," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 114, No. 8, Aug, pp. 861-876
14. Richart, J. E., Jr., Hall, J. R., Jr. and Woods, R. O.(1970), "Vibrations of Soils and Foundations," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 414p.
15. Seed, H. B., and Idriss, I. M.(1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis," Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Sept., 37p.
16. Standard test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant Column Method. 1987 Annual Book of Standards, vol. 04. 08 Soil and Rock: Building Stones. ASTM D4015-87, pp.507-525
17. Stokoe, K. H., II and Lodde, P. E.(1978), "Dynamic Response of San Francisco Bay Mud," Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamic Conference, ASCE, Vol. II, pp.940-945
18. Vucetic, M. and Dobry, R.,(1991), "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response," Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 1, Jan, pp.89-107

(접수일자 1994. 2. 1)