

토질 최대전단탄성계수(G_{max})에 미치는 시간지속효과 및 그 영향요소에 관한 연구

Effect of Duration of Confinement and Its Affecting Factors on the Low-Amplitude Shear Modulus (G_{max}) of Soils

박덕근 (Dugkeun Park)

국립방재연구소 연구관

요지/ABSTRACT

동적 하중을 받는 지반반응 평가시 필요한 가장 중요한 변수 중에 하나가 지반의 전단탄성계수(G)이다. 지반의 동특성은 시간에 따라 변화하게 되는데, 이 점은 흔히 간과되어져 왔다. 이번 연구를 통하여 일정 구속압에서 시간에 따라 변하는 토질 최대전단탄성계수(G_{max}) 및 그 영향요소에 관해 고찰해보고 몇몇 경험식을 제안하고자 한다. 경험식 작성을 위해 고려된 요소는 선행응력과 선행변형을, 입자크기와 지속응력, 소성지수 등이고, 실제로 가장 큰 영향을 미치는 평균입자직경과 소성지수를 이용한 두개의 경험식을 작성하였다. 끝으로 G_{max} 의 일시적 변화와 그 원인, 그리고 시간에 따라 증가하는 G 가 시사하는 점에 대해 서술한다.

주요어 : 최대전단탄성계수, 구속시간, 선행응력, 변형을, 입자크기, 소성지수, 토질

Dynamic Shear modulus (G) is one of the important dynamic soil properties to estimate the response of soil to dynamic loading. Problems in engineering geology practice that require the knowledge of soil properties subjected to dynamic loadings include soil-structure interaction during earthquakes, bomb blasts, construction operations, and mining. Although the dynamic shear modulus (G) is a time-dependent property, G change with time is often neglected. In this study, the effect of duration of confinement and its affecting factors (previous stress and strain, particle size and sustained pressure, and plasticity index) on the low-amplitude shear modulus (G_{max}) of soils are reviewed, and some empirical correlations based on mean particle diameter and plasticity index are proposed.

Key Words : Low-amplitude shear modulus, duration of confinement, previous stress, strain, particle size, plasticity index, soils

서 론

반복하중이나 동적 하중을 받는 지반반응을 평가하기 위해 제안된 구성방정식 혹은 수치해석에서 가장 중요한 변수 중에 하나가 지반의 전단탄성계수이다. Hardin and black (1968)은 동적문제 해결 시 요구되는 전단탄성계수의 중요성을, 사면안정해석 시 요구되는 전단강도의 중요성에 비금간다고 평가하였다. 특히 한계변형을 이하에서 측정되는 최대전단탄성계수(G_{max})는 지진공학이나 진동기계 지반설계, 동적상태의 지반-구조물 상호작용 등에 광범위하게 사용된다. 예를 들면, 포화사질토의 액상화 평가를 위해 제안된 강도해법(stiffness method)은 한계지반가속도(threshold ground acceleration)와 지반전단탄성계수에 기초하고 있다(Dobry, 1980). 또한, 밀도와 구속압이 일정하다면 현장의 액상화 저항력은 최대전단탄성계수에 선형으로 비례하여 증가한다(Chen and Lee, 1994).

전단탄성계수(G)는 전단변형률에 따라 감소한다.

이러한 현상은 지반의 비선형거동에 따른 것인데, 한계변형률($\gamma \leq 10^{-4}\%$) 이하가 되면 전단탄성계수(G)는 전단변형률에 상관없이 일정하게 된다. 이때의 전단탄성계수를 저진폭 전단탄성계수 혹은 최대 전단탄성계수라 한다. G_{max} 는 특정지반의 고유특성으로 간주되며(Sully와 Campanella, 1995), Table 1은 G_{max} 에 영향을 미치는 요소와 그 경향을 나타낸다.

일반적으로 전단탄성계수를 포함한 지반의 동특성은 실내시험(공진주 시험, 비틀전단시험 등)으로 결정된다. Table 1에서 보인 바와 같이 지반의 동특성은 시간에 따라 변화하게 되는데, 이 점은 흔히 간과되어져 왔다. 이번 연구를 통하여 지반 최대전단탄성계수에 미치는 시간지속효과 및 그 영향 요소에 관해 고찰해보고 몇몇 경험식을 제안하고자 한다. 고려된 요소는 선행응력과 선행변형률, 입자 크기와 지속응력, 소성지수 등이고, 끝으로 최대전단탄성계수의 일시적 변화와 그 원인 그리고 시사점에 대해 서술한다.

Table 1. Effect of increase of various factors on G_{max} of normally and moderately overconsolidated soils (Modified from Dobry and Vucetic (1987) and Kramer (1996)).

Increasing Factor	G_{max}
Confining Pressure, $\bar{\sigma}_0$	increases with $\bar{\sigma}_0$
Void Ratio, e	decreases with e
Geologic Age, t	increases with t
Cementation, c	increases with c
Overconsolidation Ratio, OCR	increases with OCR
Plasticity Index, PI	increases with PI if OCR>1; stays about constant if OCR=1
Strain Rate, $(\partial\gamma/\partial t)$ (Frequency of cyclic loading)	increases with $(\partial\gamma/\partial t)$ for plastic soils up to ~10% increase per log cycle increase in $(\partial\gamma/\partial t)$
Number of Loading Cycles, N	decreases after N cycles of large strain, but may recover with time for clays; Increases with N for sand

최대전단탄성계수 일반 경험식

퇴적물이 퇴적 후 시간이 경과되면 구속압이 일

정하더라도 간극비가 줄어드는데, 간극비 감소에 의한 최대전단탄성계수 증가분 이외에 또 다른 증가분이 별도로 존재한다. 이러한 강도증가는 입자

의 교란에 상당히 민감할 뿐더러 유효응력에 변화가 생기면 일부 혹은 전부가 사라진다. 이러한 사실은 2차 압밀시 전단계수가 크게 증가할 수 있으므로 현장에서 상당히 중요할 수 있다. G_{max} 의 변화에 미치는 시간의 효과는 Afifi and Woods (1971), Marcuson and Wahls (1972), Afifi and Richart (1973), Anderson and Woods (1976), 그리고 Kokusho 외(1982)를 포함한 몇몇 연구에 의해 발표되었다.

실내시험의 경우 지반동특성에 미치는 시간효과는 압밀시험의 경우처럼 1차 거동과 2차 거동으로 분리된다. 2차 거동은 1차 거동 후, 시간증가에 따른 전단탄성계수 혹은 전단파 속도의 증가로 특징지어진다. 일반적으로 점성토인 경우 24시간만 압밀된 시료의 전단파 속도와 현장에서 직접 측정된 전단파 속도사이에는 상당한 차이가 있다. 하지만 시료가 일정 구속압에서 압밀시간이 증가하면 이 차이는 줄어든다. 다시 말해 실내시험을 기초로 현장의 전단파 속도를 예측할 경우 시간효과를 적절히 포함시켜 주어야 한다.

2차 거동은 다시 증가율과, 시간대수(the logarithm of time)에 따른 전단탄성계수의 변화량으로 정의되는 증가규모로 양분하여 고찰할 수 있다. 전단탄성계수 혹은 전단파 속도의 증가율은 시간대수의 함수이며, 증가규모는 지반종류에 따라 달라진다. 비점착성 토질의 경우 그 증가율은 작지만 몇몇 세립토(포화된 벤토나이트 등)의 경우 시간대수당 17%의 증가율이 발생할 수 있다(Afifi and Richart, 1973).

실내제작 시료와 비교한 자연시료에 기초하여 전단탄성계수의 증가율을 예측할 수 있는 경험식들이 개발되어왔다. Humphries and Wahls (1968)는 처음으로 시간효과의 중요성을 밝히고, 2차 압밀이 많이 진행된 토질의 경우 그 효과는 더욱 커진다고 결론지었다. 벤토나이트(bentonite) 시험결과 2차 압밀시 구조적인 재정렬에 의한 전단탄성계수 증가가 발생하였다. Marcuson and Wahls (1972)는 정량적인 시간효과를 분석하기 위해 공진주 시험(resonant column test)을 이용한 카올리나이트(kaolinite)와 벤토나이트 시험을 통해 두개의 식을 제안하였다. 구속압이 70kPa에서 550kPa인 범위에서 최대전단탄성계수인 G_{max} (kPa)를 위한 식은 카

올리나이트의 경우 식(1)과 같다.

$$G_{max} = 4488(1.0 + 0.46 \log T_r) \left[\frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \right] \bar{\sigma}_0^{0.5} OCR^{0.5} \quad (1)$$

그리고 벤토나이트의 G_{max} 는 식(2)와 같이 제안하였다.

$$G_{max} = 449(1.0 + 0.242 \log T_r) \left[\frac{(4.4 - e)^2}{1 + e} \right] \bar{\sigma}_0^{0.5} OCR^{0.5} \quad (2)$$

여기서, T_r 은 1차 압밀시간후 불특정시간(t)을 1차 압밀시간(t_p)로 나눈 값이며, e 는 간극비, $\bar{\sigma}_0$ 은 평균 구속압, 그리고 OCR(overconsolidation ratio)은 과압밀비를 각각 나타낸다. 식(1)과 (2)에 의하면 카올리나이트와 벤토나이트 모두 시간증가에 따라 최대전단탄성계수가 증가하며 대략 시간대수당 카올리나이트의 경우 약 10%, 벤토나이트의 경우 약 40%의 증가율을 보였다.

Afifi and Woods (1971)의 자료로 재구성된 Fig. 1은 시간에 따른 토질의 최대전단탄성계수 변화를 나타낸다. 단순한 간극비 감소에 의한 최대전단탄성계수 변화량은 전체 최대전단탄성계수 변화량과는 차이가 있다. 일반적으로 점토질 흙의 시간에

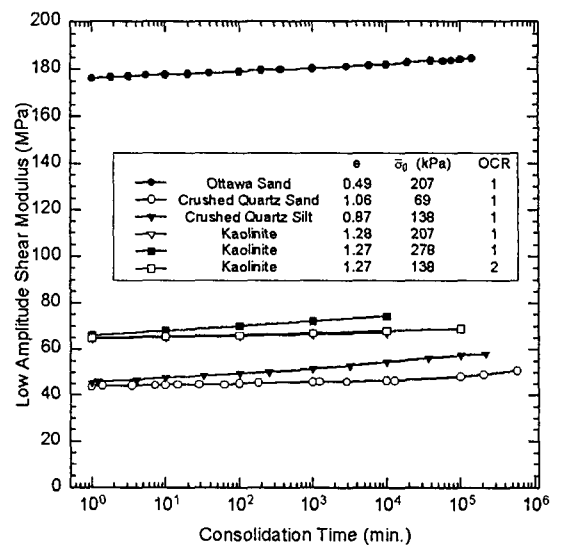


Fig. 1. Time dependent increase of G_{max} for various soils (data from Afifi and Woods, 1971).

따른 최대전단탄성계수 변화는 더욱 두드러진다. Fig. 2는 디트로이트(Detroit) 점토의 시간에 따른 최대전단탄성계수 변화를 여러 구속압에서 나타낸

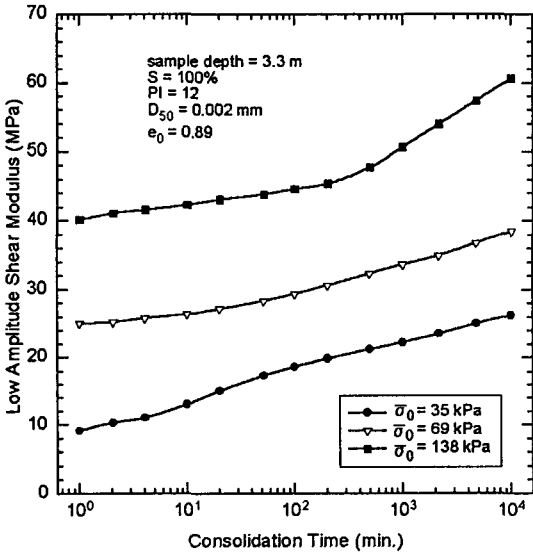


Fig. 2. Time dependent increase of G_{max} for undisturbed Detroit Clay (data from Anderson and Woods, 1976).

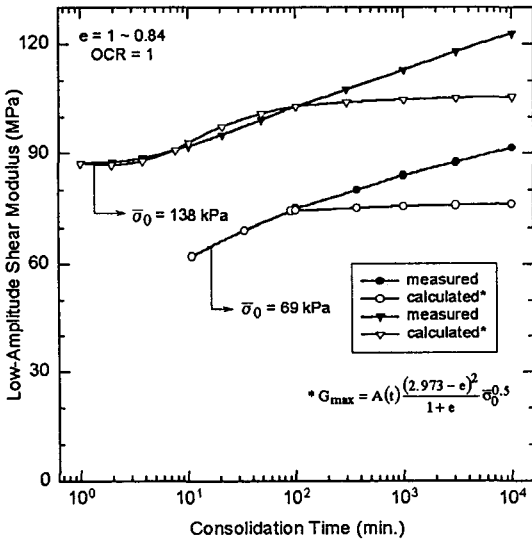


Fig. 3. Comparison of measured and calculated G_{max} with time for saturated Kaolinite (data from Afifi and Richart, 1973).

다. 이러한 그림은 점토질의 전형적인 최대전단탄성계수-시간 관계를 나타낸다(Anderson and Woods, 1976). Fig. 3은 크기가 다른 두 구속압에서의 압밀시간과 최대전단탄성계수 변화량을 나타낸다. 속이 찬 기호는 측정된 최대전단탄성계수 값을, 속이 빈 기호는 Fig. 3에 나타난 방정식으로 계산된 최대전단탄성계수 값을 각각 나타낸다. 이 방정식은 간극비의 함수를 포함하는데 2차 압밀에 의한 간극비 변화는 이미 고려된 것이다. 압밀시간이 100분 정도까지는 측정값과 계산값이 비교적 잘 일치하고 있다. 약 100분이 지나면 측정값과 계산값 사이의 차이가 나타나고, 이 차이는 간극비 감소로 설명되지 않는 시간효과이다. 시간에 따른 최대전단탄성계수 증가는 점토질의 경우 부분적인 물리화학적 점착력 증가에, 그리고 조립질 토질의 경우 입자 접촉면적 증가에 기인한 것으로 사료된다.

선행응력과 선행변형율의 영향

Anderson and Woods (1976)는 시간에 따른 전단탄성계수가 변형율에 어떤 영향을 받는지를 실험하였다. Fig. 4는 그 결과를 나타내는데, 전단변형율이 큰 경우에도 시간에 따른 전단탄성계수(G)의 변화가 관측된다. 4개의 전단변형율에서 나타나는 시간에 따른 G 의 변화는 거의 평행하게 나타난다. 이것은 시간에 따른 G 의 변화율은 모든 전단변형율에서 일정하다는 것을 의미한다. 그러므로, 2차 거동시 나타나는 시간에 따른 고변형율 전단탄성계수의 변화량은, 시간에 따른 최대전단탄성계수 증가량의 기울기를 이용하여 구할 수 있는 것이다. 이 결론은 탄성계수 감소곡선(modulus reduction curve)모양 역시 독특한 것이 아니고 시간효과에 따라 변화함을 의미한다.

시간에 따른 G 의 변화량은 OCR에 영향을 받는데 $\Delta G/G_{1000}$ 의 비로 보통 표시된다. ΔG 는 시간대수에 따른 전단탄성계수의 변화량을 나타내고 G_{1000} 는 1000분의 압밀진행후 측정된 전단탄성계수이다(Afifi and Woods, 1971; Afifi and Richart, 1973; Anderson and Woods, 1976). 포화된 카올리나이트의 $\Delta G/G_{1000}$ 와 OCR사이의 관계가 Fig. 5에 나타난다. 비록 비교점이 2개뿐이지만 OCR이 증가하면 $\Delta G/G_{1000}$ 의 비가 감소하는 경향은 분명히 발견된

토질 최대전단탄성계수(G_{max})에 미치는 시간지속효과 및 그 영향요소에 관한 연구

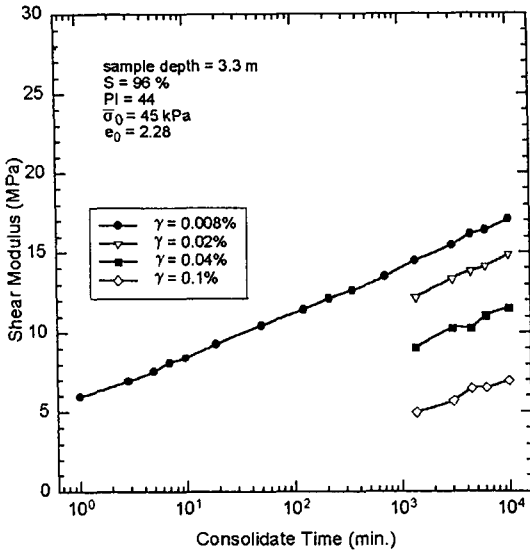


Fig. 4. Variation in high amplitude shear modulus with time for Santa Barbara Clay (data from Anderson and Woods, 1976).

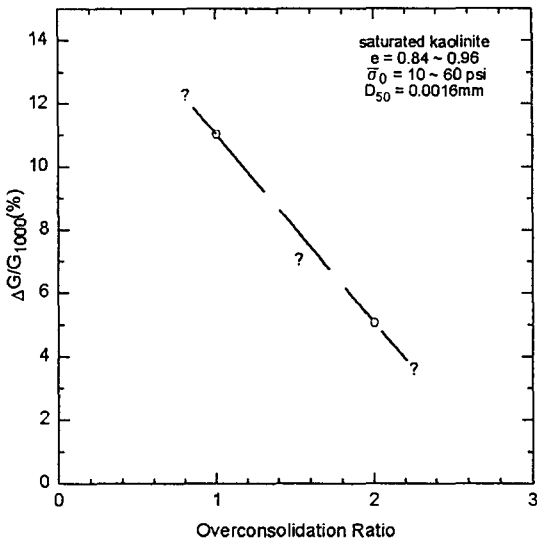


Fig. 5. $\Delta G/G_{1000}$ versus OCR for saturated Kaolinite (data from Afifi and Richart, 1973).

다. 다시 말해, 1000분 이상의 구속압을 받았을 경우 과압밀시료의 G 는 정규압밀시료의 G 보다 작다. 물론 과압밀시료의 G_{1000} 자체는 정규압밀시료의

G_{1000} 보다 크지만 전단탄성계수의 변화량(G)은 오히려 작아진다. 일반적으로 OCR의 $\Delta G/G_{1000}$ 에 대한 영향은 세립토인 경우 더욱 현저하게 나타나고, $D_{50} > 0.04\text{mm}$ 인 모래인 경우 그 효과는 거의 없다. 이런 조립질 토양인 경우 OCR의 영향은 기본적으로 간극비 감소로 나타난다. 입자크기의 영향에 대해서는 다음절에서 논의된다.

입자크기와 지속응력의 영향

입자크기가 작을수록 시간에 따른 전단탄성계수는 증가한다(Afifi and Richart, 1973). 평균입자직경(D_{50})과 시간대수당 증가하는 전단파 속도와와의 관계는 식(3)에서 나타난다(Anderson and Woods, 1976).

$$\frac{\Delta V_s}{V_{s1000}} = \exp(-0.35 \log D_{50} + 1.10) \quad (3)$$

여기서, 시간대수당 증가하는 전단파 속도(V_s)는 1000분의 압밀진행후 측정된 전단파속도(V_{s1000})로 정규화 되었고 D_{50} 은 mm단위를 사용하였다. 물론 점토질의 평균입자직경만을 이용할 경우, 광물화적인 요소나 과거응력, 점토의 구조, 간극수의 영향 등을 전부 고려할 수 있는 것은 아니다. 한편, 전단파속도(V_s)와 전단탄성계수(G)는 탄성이론에 의해 식(4)와 같은 관계에 있으므로 실내시험에서 V_s 를 측정하면 G 는 간단히 계산된다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

식(4)에서 ρ 는 토질의 밀도이다.

Afifi and Richart (1973), Anderson and Woods (1976), 그리고 Kokusho의 (1982)가 획득한 자료에 기초하여, $\Delta G/G_{1000}$ 와 D_{50} 의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 $\Delta G/G_{1000}$ 는 토질의 D_{50} 가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 자료의 산란($r^2=0.45$)은 다른 지배적인 요소가, 예를 들면 소성지수, 있을 수 있음을 나타낸다. $\Delta G/G_{1000}$ 와 D_{50} 의 관계는 식(5)에 나타난다.

$$\frac{\Delta G}{G_{1000}} (\%) = \exp[-0.37 \log(D_{50}) + 2.01] \quad (5)$$

여기서, D_{50} 은 mm단위를 사용하여야 하고 $\Delta G/G_{1000}$ 는 %로 나타난다.

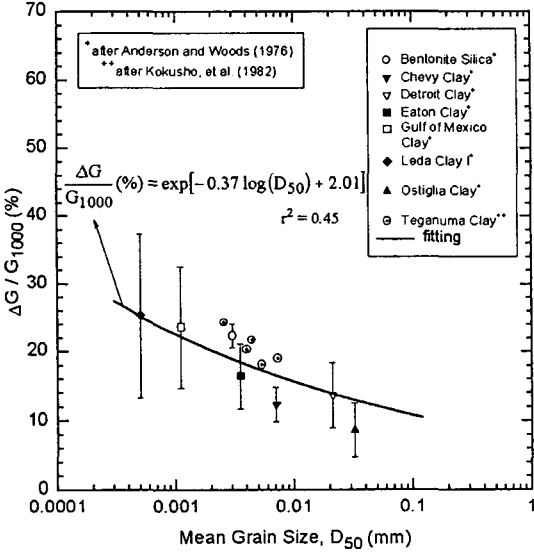


Fig. 6. Relationship between time dependent shear modulus ratio and mean particle size for clayey soils.

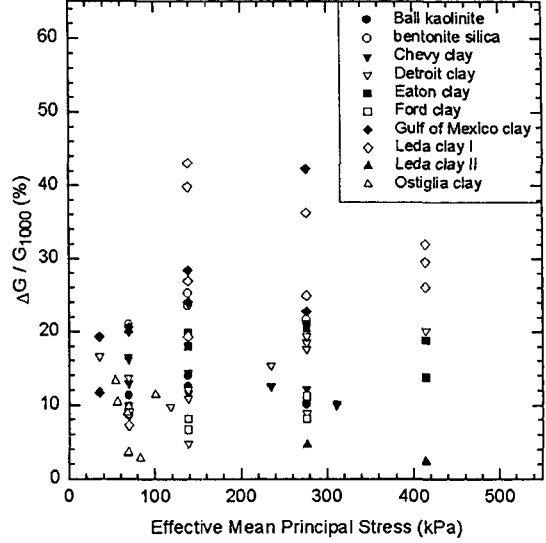


Fig. 7. Relationship between effective mean principal stress and normalized rate of secondary increase in shear modulus for various clays (data from Anderson and Woods, 1976).

Table 2. Soil Properties for Fig. 6 and 7.

Name	Void Ratio	D ₅₀ (mm)	PI	Saturation (%)
Ball kaolinite	1.09-1.11	0.00025	39	97
Bentonite silica	1.87-2.01	0.003	64	100
Chevy clay	0.39-0.70	0.004-0.01	10-20	81-100
Detroit clay	0.82-1.45	0.002-0.04	12-30	92-100
Eaton clay	0.75	0.0035	19	-
Ford clay	0.88	-	-	94
Gulf of Mexico clay	1.98-2.13	0.0011	50-54	97-100
Leda clay I	2.04-2.18	0.0005	37-44	86-97
Leda clay II	1.12-1.13	0.0015	-	93-95
Ostiglia clay	0.69-0.77	0.024-0.04	-	98-99
Teganuma clay	1.90-2.50	0.002-0.007	44-82	-

구속압 ($\bar{\sigma}_0$)과 간극비(e), 그리고 구속압의 증가 ($\Delta \bar{\sigma}_0$)는 체계적인 영향을 나타내지 않는다. Fig. 7은 평균유효응력과 $\Delta G/G_{1000}$ 과의 관계를 보여준다. 명백한 관계는 없는 것으로 나타났다. 그러므로, 시간에 따른 전단탄성계수 증가는 어떠한 구속압에서 측정되더라도 차이가 없다. Table 2는 Fig. 6과 7에서 사용된 토질의 지수적 성질(index property)을 보여준다.

소성지수의 영향

앞절에서 언급되었듯이 토질의 입자크기가 작을수록 전단탄성계수의 2차 증가는 커지는 경향이 있다. 일반적으로 입자크기가 작을수록 비표면적(specific surface area)이 커지고 결과적으로 물체 효과(body effect)보다 표면효과(surface effect)가 증가하게 된다. 이런 효과는 토질의 소성지수(PI)가 커짐으로써 나타나는데 점토질의 화학적 활성도와 밀접한 관계가 있다. Kokusho의 (1982)는 PI가

$\Delta G/G_{1000}$ 에 큰 영향을 준다는 사실을 발견하고 다음식을 제안하였다.

$$\frac{\Delta G}{G_{1000}} (\%) = 2.7PI^{0.5} \quad (6)$$

식(6)의 형태를 기본으로 다양한 자료를 수집하여 PI와 $\Delta G/G_{1000}$ 의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. Table 3은 Fig. 8에서 사용된 토질의 종류와 지수적 성질을 나타낸다. 최소자승법을 이용한 회귀분석결과, 아래의 식(7)이 더 정확한 경험식으로 결정되었다.

$$\frac{\Delta G}{G_{1000}} (\%) = 4.09 + 1.94(PI)^{0.52} \quad (7)$$

Kokusho의 (1982)가 제안한 식(6)은 PI가 0일 경우 $\Delta G/G_{1000}$ 또한 0임을 나타낸다. 하지만, Stokoe의 (1980)의 자료를 분석해보면 비점착성 토질(PI=0)일 경우에도 시간에 따른 G의 증가가 나타난다. 이 사실을 고려한 식(7)을 이용할 경우 PI가 0일 경우 평균 $\Delta G/G_{1000}$ 는 약 4.09%이다. 식(7)은 토질평가시 쉽게 찾을 수 있는 PI만 이용하므로 사

Table 3. Index for Fig. 8 and range for plasticity indices.

ID	Reference	Year	Soil Type	PI Range
A	Marcuson and Wahls	1972	kaolinite and bentonite	35 - 60
B	Anderson and Woods	1976	various clays	15 - 64
C	Stokoe and Lodde*	1978	San Francisco Bay mud	30 - 50**
d	Isenhower*	1979	San Francisco Bay mud	30 - 50
e	Stokoe, et al.	1980	offshore clayey silt	0-18
f	Kokusho, et al.	1982	Teganuma clay, Hommoku clay	44 - 82, 9 - 37
g	Puri	1984	loessial silty clay	10
h	Zen and Higuchi	1984	various clays	9.4 - 46.5
I	Tawfiq	1986	Edger plastic kaolin	42
j	Kim and Novak	1981	various plastic soils	12.0 - 30.3
k	Guha	1995	San Francisco Old Bay clay	17.8 - 26.7

*give ranges for PI and $\Delta G/G_{1000}$, and five random points for each were generated for plotting.

**assumed values based on Isenhower (1979).

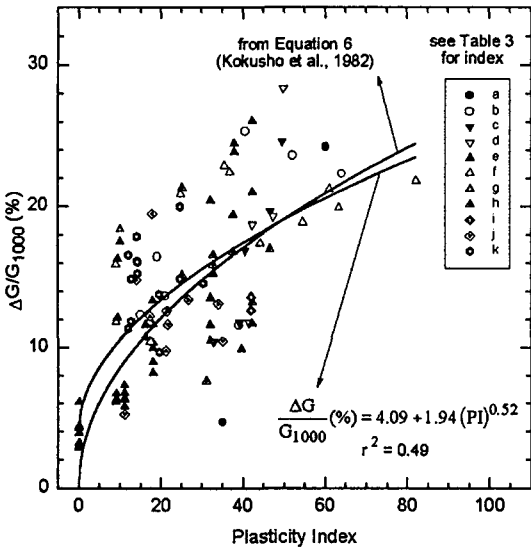


Fig. 8. Relationship between shear modulus increase with time and plasticity index for various soils.

용하기에 간편하다. 하지만 예지력이 낮기 때문에 ($r^2=0.49$) 설계에 사용할 때는 주의하여야 한다. 그리고 PI가 100보다 큰 경우에는 사용할 수 없다.

최대전단탄성계수의 일시적 변화

Athanasopoulos and Richart (1983)는 실내시험과 현장조사 사이의 차이를 규명하기 위해 응력제거에 따른 점토의 전단탄성계수의 변화를 조사하였다. 구속압을 갑자기 제거하면 점토질에 교란이 생겨 최대전단탄성계수값이 감소한다. 다시 구속압을 가할 경우 원상 복구되지만 재획득시간(regain time)이 필요하다. 재획득시간은 점토질이 오래 구속될수록 선형으로 증가한다.

이와는 대비되는 흥미로운 현상이 구속압을 증가시킨 직후에 나타나는데, 구속압이 증가하면 최대전단탄성계수값이 초기에 약간 감소하게 된다. 점토와 모래 모두 이 현상이 나타나는데(Hardin and Black, 1968; Athanasopoulos and Woods, 1985), 응력제거 때와 마찬가지로 일정시간이 지나면 원상 복구된다. 최대전단탄성계수 감소량은 선행응력의 크기가 커질수록 증가한다. 그리고, 최대전단탄성계수의 일시적 감소는 1차 압밀만 진행된

시료에서도 발생한다(Afifi and Woods, 1971; Anderson and Woods, 1976). 이러한 현상은 구속압이 작용한 직후 생기는 속성변형때문이 것으로 추정된다(Athanasopoulos and Richart, 1983).

시간효과의 원인 및 시사점

앞절에서 언급된 바와 같이 간극비 변화 이외의 다른 메커니즘이, 시간증가에 따른 전단탄성계수의 변화를 유발한다. 시간에 따른 2차적인 전단탄성계수의 증가는 토질강도의 시간의존(time-dependent) 현상과 무관하지 않다. 토질의 미세구조에서 에너지 불균형이 발생하면 토질입자는 에너지평형이 이루어질 때까지 재배열하게 된다(Mitchell, 1960). 간극수의 이탈이 완료된 1차 압밀후 토질은 에너지 불균형상태에 있게 된다. 이후 토질입자가 재배열되면서 토질의 강성(rigidity)이 증가되고, 결과적으로 전단탄성계수 또한 증가한다. 1차 압밀후 에너지 불균형이 가장 크므로 2차 압밀 직전에 토질입자 재배열이 가장 활발하게 발생한다. 그러므로, 전단탄성계수 변화가 미세구조의 에너지 불균형 때문이라면 전단탄성계수 변화율은 시간에 따라 줄어든다.

정량적인 평가는 현재로서는 불가능하지만, 토질의 성질이 시간에 따라 변화하는 현상(aging of soils)은 지질공학적 견지에서 50%-100% 정도의 역학적 개량효과를 수반한다고 판단된다(Schmertmann, 1991). 장기간동안의 시간효과는 토질의 지질학적인 나이와 지질역사를 통해서만 가늠해볼 수 있다. Anderson and Stokoe (1978)는, 식(8)과 같이, 실내시험에서 측정된 최대전단탄성계수값을 시간효과로 보정해 현장의 최대전단탄성계수값을 예측하려는 시도를 하였다.

$$G_{\max\text{-field}} = G_{\max\text{-primary}} + F_A \cdot \Delta G \quad (8)$$

여기서,

- ΔG : 시간에 따른 전단탄성계수 증가,
- $G_{\max\text{-field}}$: 현장의 G_{\max} 예측값,
- $G_{\max\text{-primary}}$: 실내시험에서 측정된 1차 압밀후의 G_{\max} 값, 그리고
- F_A : 현장의 시간요소.

그리고, 현장의 시간요소는 아래 식(9)에 의해

결정된다.

$$F_A = \log\left(\frac{t_c}{t_p}\right) \quad (9)$$

여기서, t_c 는 응력이력에 변화가 생긴 이후의 시간을, 그리고 t_p 는 1차 압밀 시간을 각각 나타낸다. 그러나, 시료교란이나, 실내시험과 현장측정시 발생하는 구속압 차이를 위한 보정 등은 이 평가절차에 포함되지 않는다. 비록 실내시험시 압밀시간을 증가시켜 실내시험과 현장측정사이의 차이는 줄일수 있지만, 실내시험에서 평가한 최대전단탄성계수는 항상 현장측정값보다 작게 나타난다(Guha, 1995; Fahey and Soliman, 1994).

결 론

지반 최대전단탄성계수(G_{max})의 시간효과 및 그 영향요소에 대해 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 일반적으로 시간에 따른 토질의 최대전단탄성계수값은 압밀시간이 길어질수록 증가한다. 이러한 증가는 구속압의 크기에 관계없이 발생한다.
2. 시간에 따른 최대전단탄성계수 증가는 점토질의 물리화학적 점착력 증가, 또는 비점착성 토질의 경우 입자 접촉면적 증가에 기인한 것으로 추정되는데, 이 증가는 간극비 감소로 설명되지않는 시간효과(time effect)이다.
3. 전단변형률(strain amplitude)이 큰 경우에도 시간에 따른 전단탄성계수(G)의 변화가 관측되고, 시간에 따른 G 의 변화율은 모든 전단변형률에서 거의 일정하다. 그러므로, 고변형률(high amplitude) 전단탄성계수의 변화량은 최대전단탄성계수 증가량의 기울기를 이용하여 구할 수 있다.
4. OCR이 증가하면 $\Delta G/G_{1000}$ 의 비가 감소하는 경향이 있다. 일반적으로 OCR의 $\Delta G/G_{1000}$ 에 대한 영향은 세립토인 경우 더욱 현저하게 나타난다.
5. $\Delta G/G_{1000}$ 는 토질의 D_{50} 가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이 관계는 다음의 경험식을 이용한다.

$$\frac{\Delta G}{G_{1000}} (\%) = \exp[-0.37 \log(D_{50}) + 2.01]$$

6. 평균유효응력과 $\Delta G/G_{1000}$ 과는 명백한 연관이

없다. 그러므로, 시간에 따른 전단탄성계수 증가는 어떠한 구속압에서 측정되더라도 차이가 없다.

7. $\Delta G/G_{1000}$ 에 가장 큰 영향을 주는 요소는 소성지수(PI)이며, 아래의 경험식으로 계산할 수 있다.

$$\frac{\Delta G}{G_{1000}} (\%) = 4.09 + 1.94(PI)^{0.52}$$

이 식을 설계에 사용할 때는 주의하여야 하며 PI가 100보다 큰 경우에는 사용할 수 없다.

참 고 문 헌

- Affifi, S.S. and Richart, F.E., Jr., 1973, Stress-History Effects on shear modulus of soils, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13, 1, March, 77-95.
- Affifi, S.S. and Woods, R.D., 1971, Long-term pressure effects on shear modulus of soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97, SM10, October, 1445-1460.
- Anderson, D.G. and Stokoe, K.H., II., 1978, Shear modulus : A Time-dependent soil property, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, 66-90.
- Anderson, D.G. and Woods, R.D., 1976, Time-dependent increase in shear modulus of clay, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102, GT5, May, 525-537.
- Athanasopoulos, G.A. and Richart, F.E., Jr., 1983, Effects of stress release on shear modulus of clays, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 109, 10, October, 1233-1245.
- Athanasopoulos, G.A. and Woods, R.D., 1985, Temporary decrease of clay modulus in resonant column test, Proceedings, Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 2, August, 12-16, 979-982.
- Chen, Y.C. and Lee, C.G., 1994, Evaluation of

- liquefaction resistance of sand by maximum shear modulus, *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers*, 17, 5, September, 689-699.
- Dobry, R., Powell D.J., Yokel, F.Y., and Ladd, R.S., 1980, Liquefaction potential of saturated sand-the stiffness method, *Proceedings, Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey*, 3, September 8-13, 25-32.
- Dobry, R. and Vucetic, M., 1987, Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits, *Proceedings, International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Mexico City*, 2, August 13-14, 51-87.
- Fahey, M. and Soliman, A.A., 1994, Measuring the small-strain behavior of sand in situ, *Proceedings, International Symposium on Pre-failure Deformation of Geomaterials*, 1, September 12-14, 217-222.
- Guha, S., 1995, Dynamic characteristics of old bay clay deposits in the east San Francisco Bay area, Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 260p.
- Hardin, B.O. and Black, W.L., 1968, Vibration modulus of normally consolidated clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94, SM2, March, 353-369.
- Humphries, W.K. and Wahls, H.E., 1968, Stress history effects on dynamic modulus of clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94, SM2, March, 371-389.
- Isenhower, W.M., 1979, Torsional simple shear/resonant column properties of San Francisco Bay Mud, M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 307p.
- Kim, T.C. and Novak, M., 1981, Dynamic properties of some cohesive soils of Ontario, *Canadian Geotechnical Journal*, 18, 371-389.
- Kokusho, T., Yoshida, Y., and Esashi, Y., 1982, Dynamic properties of soft clay for wide strain range, *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 22, 4, December, 1-18.
- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 653p.
- Marcuson, W.F., III, and Wahls, H.E., 1972, Time effects on dynamic shear modulus of clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98, SM12, December, 1359-1373.
- Mitchell, J.K., 1960, Fundamental aspects of Thixotropy in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 86, SM3, June, 19-52.
- Puri, V.K., 1984, Liquefaction behavior and dynamic properties of loessial (Silty) soils, Ph.D. Dissertation, The University of Missouri, Rolla, Missouri, 295p.
- Schmertmann, J.H., 1991, The Mechanical aging of soils, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117, 9, September, 1288-1330.
- Stokoe, K.H., II, Isenhower, W.H., and Hsu, J.R., 1980, Dynamic properties of offshore silty samples, *Proceedings, Offshore Technology Conference, Houston, Texas*, May 5-8, 289-295.
- Stokoe, K.H., II, and Lodde, P.F., 1978, Dynamic response of San Francisco bay mud, *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, California, ASCE*, II, June 19-21, 940-959.
- Sully, J.P. and Campanella, R.G., 1995, Evaluation of in situ anisotropy from crosshole and downhole shear wave velocity measurements, *Geotechnique*, 45, 2, 267-282.
- Tawfiq, K.S., 1986, Effect of time and anisotropy on dynamic properties of cohesive soils, Ph.D. Dissertation, The University of Maryland, College Park, Maryland, 277p.

토질 최대전단탄성계수(G_{max})에 미치는 시간지속효과 및 그 영향요소에 관한 연구

Zen, K. and Higuchi, Y., 1984, Prediction of vibratory shear modulus and damping ratio for cohesive soils, Proceedings, Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, III, July 21-28, 23-30.

박덕근

행정자치부, 국립방재연구소

서울특별시 마포구 공덕동 253-42

Tel : 02-3274-2207

Fax : 02-3274-2209

e-mail : dr_park@mogaha.go.kr