

점토의 압축성을 고려한 전단탄성계수의  
정식화 방법에 대하여  
On the compressibility and elastic  
shear modulus of clay

황 성 춘\*            오 병 현\*\*            박 성 진\*\*\*  
Hwang, Seong-Chun    Oh, Byung-Hyun    Park, Sung-Jin

ABSTRACT

Case records comprising the results of down-hole seismic surveys collected at nine sites worldwide, together with comparative results of laboratory bender element tests on reconstituted clay samples, were examined in an attempt to quantify the shear modulus of normally consolidated clays at very small strain of the order of 0.001%. The shear modulus  $G_{max}$  under the current state of stresses is given in a formula which includes a newly proposed void ratio function. An empirical expression incorporating the new void ratio function is also proposed for practical use in estimating  $G_{max}$  profiles with depth in natural soil deposits from routinely available borehole data.

1. 서론

토질재료의 실내전단시험에 있어서 변형율이 0.001%정도 보다 작을 때, 응력-변형을 관계는 선형탄성적 거동을 나타낸다. 이 의사탄성전단계수  $G_{max}$ 는 재하속도, 반복회수 등에 거의 영향을 받지 않는다. 한편 원위치 전단탄성파속도( $V_s$ )측정으로부터 구한 원지반의 탄성전단계수를  $G_f (= \rho_s \cdot V_s^2)$ 로 한다. 여기에서는 원지반 또는 흙요소의  $G_f$  및  $G_{max}$ 와 각각의 압축성과의 연관성에 착안하여, 탄성전단계수를 추정하기 위한 경험식을 제안하고자 한다. 또, 이를 위해 7개의 site에 대하여 원위치 전단탄성파속도 측정으로부터 구한 원위치 전단강성을  $G_f$ 와 비교하여 추정식의 신뢰성을 본 논문에서 평가하였다.

\* 경주대학교 토목공학과 조교수  
\*\* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원  
\*\*\* (주)연 엔지니어링 차장

## 2. $G_f$ 및 $G_{max}$ 의 정식화

정규압밀상태에 있는 원지반의 압축성은, 비체적  $f (= 1 + e) \sim$  유효상재압 ( $\sigma'_v$ ) 관계(양대수표시)를 그림 1에 의해 근사화할 때의 기울기를  $C$ 로 하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left[ \frac{f_0}{f_{0r}} \right] = \left[ \frac{1 + e_0}{1 + e_{0r}} \right]^{a'} = \left[ \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vr}} \right]^{-C} \quad (1)$$

여기서,  $f_{0r} = (1 + e_{0r})_r$ 는 유효상재압의 기준치  $\sigma'_{vr}$ 에 대한 비체적이다. 또, 탄성전단계수  $G_f \sim$  유효상재압 ( $\sigma'_v$ ) 관계(양대수표시)를 그림 2와 같이 근사화할 때의 기울기를  $m$ 으로 하고,  $G_f$ 는 다음 식에 의해 근사할 수 있다.

$$\left[ \frac{G_f}{G_{fr}} \right] = \left[ \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vr}} \right]^m \quad (2)$$

동일하게  $G_{fr}$ 은  $\sigma'_{vr}$ 에 있어서  $G_f$ 의 값이다. 게다가  $G_f$ 를 정식화한 것에서 간극비 함수를  $f_0^{a'}$ 라 하면,

$$\left[ \frac{G_f}{G_{fr}} \right] = \left[ \frac{1 + e_0}{1 + e_{0r}} \right]^{a'} \cdot \left[ \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vr}} \right]^\beta \quad (3)$$

식(3)에 식(1), (2)를 대입하면

$$\left[ \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vr}} \right]^m = \left[ \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vr}} \right]^{-a'C} \cdot \left[ \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vr}} \right]^\beta \quad (4)$$

따라서,  $m = \beta - a' \cdot C$ 로 된다. 실내재구성시료의  $G_{max} \sim \sigma'_v$ (압밀압력)관계에 있어서도 같은 방법으로 검토를 하였다.

Hardin(1978)은 등방압밀상태에서의  $G_{max}$ 를 다음 식과 같이 제안하였다.

$$G_{max} = C \cdot f(e) \cdot \sigma'_v{}^n \cdot \sigma'_r{}^{1-n} \cdot (OCR)^k \quad (5)$$

여기서,  $C$ 는 경험적 상수,  $f(e)$ 는 간극비의 함수,  $\sigma'_v$ 는 현재의 유효구속압이고,  $\sigma'_r$ 은 기준응력이다. 또,  $C$ ,  $n$  및  $k$ 는 이용한 시료에 따라 다른 값을 나타낸다. 따라서,  $C$ 의 값은 기준응력  $\sigma'_r$ 에 의존한다.

(Tatsuoka and Shibuya, 1992, Shibuya et al, 1992, Jamiolkowski et al., 1994) 등이 행한 일련의 실내시험결과에서 간극비의 함수  $f(e)$ 로 하여  $G_{max}$ 를 정리하는 경우는 과압밀비 등에 의한 영향을 무시할 수 있는 것이 보고되고 있다. 즉, 식(5)에서  $k=0$ 의 경우이다. 또, 전단파가 임의의 면을 통과하는 때,  $G_{max}$ 는 그 면에 작용하는 수직응력의 크기와는 관계가 없는 것으로 밝혀졌다 (Roesler, 1979, Yu and Richart, 1982, Stokoe et al., 1994). 따라서, 시료가 이방응력상태에 있다면 식(5)의 현재의 유효구속압  $\sigma'_c$  대신  $s' = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 를 이용한 것을 제안하고 있다.

이것은 임의의 면에 대하여 파가 수직방향으로 전달한다고 말하는 것은 토립자의 운동은 그 면에 대하여 수평방향으로 작용하는 것을 표시한 것으로, Jamiolkowski (1994) 등은  $G_{max}$ 를 식(6)에

의해 표시했다.

$$G_{\max} = S_{vh} f(e) \sigma_r^{(1-nv-nh)} \sigma_r^{nv} \sigma_r^{nh} \quad (6)$$

여기에서,  $S_{vh}$ 는 현재의 흙의 골격을 반영한 재료상수이고,  $\sigma_v$ 는 유효연직응력,  $\sigma_h$ 는 유효수평응력이다. 또, 토질에 따라 식(6)의 지수는  $nv \approx nh$ 로 있는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 식(6)은 식(7)에 의해 고쳐 썼다.

$$G_{\max} = A f(e) \sigma_r^{(1-2nv)} \sigma_v^{2nv} \quad (7)$$

여기서,  $A = S_{vh} K_o^{nv}$ 로 무차원 파라미터이고,  $K_o = \sigma_h / \sigma_v$ 는 정지토압계수이다.

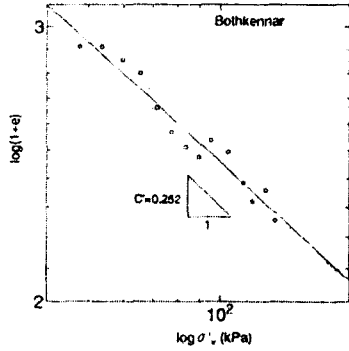


그림 1  $\log f_o (= 1 + e_0) \sim \log \sigma_v'$  관계

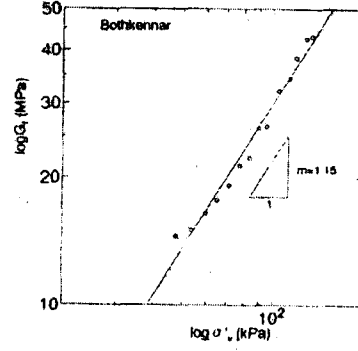


그림 2  $\log G_f \sim \log \sigma_v'$  관계

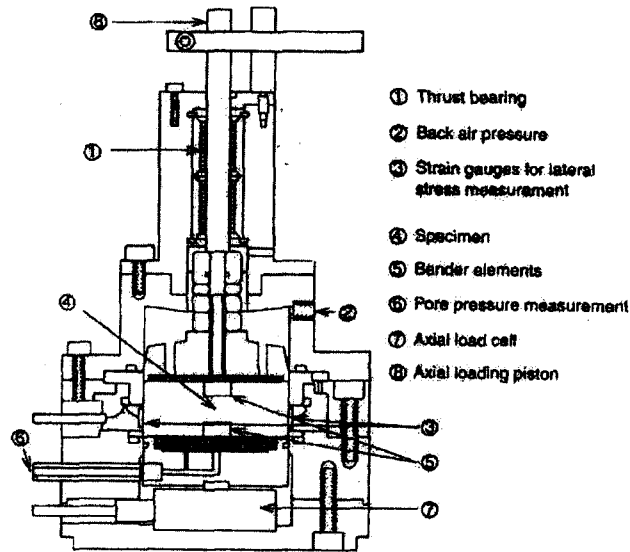


그림 3 밴더 엘리먼트를 장착한 압밀시험 장치

표 1 원위치 seismic cone 시험과 실내 밴더 엘리먼트 시험 결과

		m	C'	K <sub>o</sub> (nc)	A (for $\sigma_r=98.1$ kpa in Eq.9)	In Eq. 3 with $f(e)=(1+e)^{-2.4}$		
						nv (=nh)	Svh (for $\sigma_r=1$ kpa)	
In-situ seismic survery	1	Ariake	1.27	0.33	-	30800	-	-
	2	Bothkennar	1.15	0.25	-	27100	-	-
	3	Drammen	1.25	0.17	-	19900	-	-
	4	Fucino	0.97	0.16	-	27400	-	-
	5	Hachirougata	1.22	0.43	-	27500	-	-
	6	Higashima (upper sand)	0.76	0.003	-	25900	-	-
	7	Izumo	2.76	0.90	-	00700	-	-
	8	Kurihama	0.75	0.12	-	23100	-	-
	9	St. Alban	2.13	0.70	-	28700	-	-
Bender element test on reconstituted clay samples	10	Ariake	0.93	0.10	0.48	29000	0.34	2800
	11	Drammen	0.76	0.05	0.50	10700	0.32	2620
	12	Higashi- ohgishima (lower clay)	0.84	0.09	0.50	18900	0.31	2510
	13	Kiyohoro	0.68	0.06	0.45	15200	0.27	2670
	14	Kurihama	0.84	0.12	0.52	21400	0.27	2960
	15	MC-clay	0.64	0.12	0.75	19900	0.20	3490
	16	NSF-clay	0.75	0.08	0.58	19400	0.30	2500
	17	Hachirougata	0.94	0.11	0.55	24300	0.34	2350

### 3. 시험결과 및 비교

그림 3에서 공시체를 통한 전단파속도를 측정하기 위한 밴더 엘리먼트를 장착한 압밀시험 장치를 보여주고 있다. 이 시험장치를 이용하여 총 8개의 시료에 대하여 시험을 실시하였으며 그 결과는 표 1에서와 같다. 표 1에서 보듯이 원지반의 A가 실내재구성시료의 A보다 약간 크게 나타나며, 이 값들의 평균은 약24000이다. 그림 4에서 Ariake 점토에 대하여 연대효과와 흙 구조의 영향을 고려하여 압축성을 평가하여 정리하였다. 즉, 심도가 다른 두 곳(5.2m, 15.8m)에서 채취한 불교란시료 및 재구성한 공시체를 사용한 압밀시험을 실시한 결과이다.

여기서,  $C_{SCC} > C_{LCL} > C_{ICL}$ 로 되고, 불교란 시료를 사용하여 실험한 경우에 심도에 따라  $C_{LCL}$ 의 경사는 거의 변화가 없다. 여기서,  $C_{SCC}$ 는 원지반의 체적압축지수이고,  $C_{LCL}$ 는  $\sigma_v' > \sigma_{v,ult}'$  일 때 불교란 시료의 체적압축지수이고,  $C_{ICL}$ 는 완전 교란된 시료의 체적압축지수이다.

본 시험에서는  $C_{SCC}$ 는 0.12~0.9정도로  $C_{ICL}$ 의 0.05~0.12보다 경사가 급하게 나타남을 알 수 있다. 이런 현상의 원인으로 생각되어지는 것은 SCC의 경우, 원위치시험을 행한 깊이가 얕아서

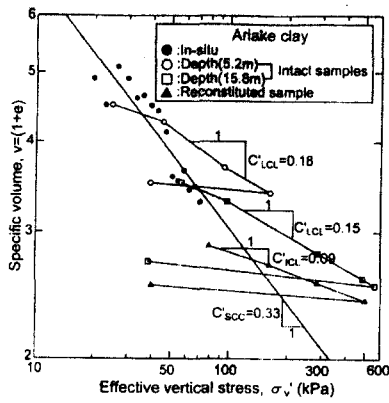


그림 3 Ariake 점토의 비체적과 유효상재압의 관계

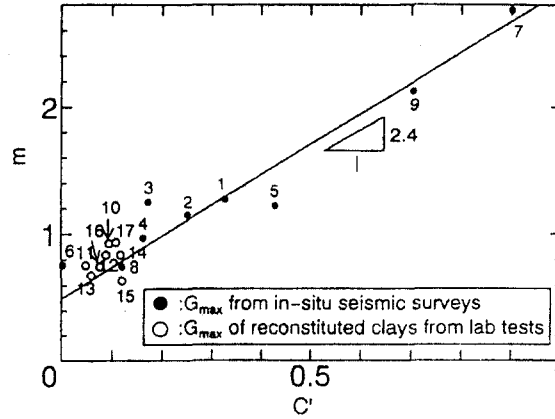


그림 4  $m$ 과  $C'$ 의 관계

유효상재압은 200 kpa이하가 되므로, ICL은 수직유효응력이 SCC보다 크게 되는 것을 들 수 있다. 그림 4는 표 1에서 나타낸  $m$ 과  $C'$ 의 관계를 나타낸 것으로 실선의 경사가 2.4 정도이다. 또, 지수  $m$ 은 횡축  $C'$ 의 0에서 0.5 범위에 집중되어 있고  $C'$ 가 0에 가까워질수록 압축성이 작은 사질토의 성질을 나타내고 있다. 따라서 그림 4의 결과에 기인하여 세멘테이션(cementation)이 없는 지반에 대한  $G_{max}$ 의 실무적인 추정식을 다음과 같이 제안한다.

$$G_{max} = A \cdot (1 + e_0)^{-2.4} \cdot (\sigma'_v)^{0.5} \cdot (\sigma'_h)^{0.5} \quad (8)$$

식(8)에서 필요한 값은  $e$ 와  $\sigma'_v$ 로 일반적인 지반조사결과와 표준압밀시험으로 구할 수 있다. 본 연구에서 기준응력 (98.1 kpa)에 대하여 경험적 파라미터인  $A$ 값은  $\sigma'_v$ 에 대응하는  $G_{max}/(1 + e)^{-2.4}$ 의 값으로 결정하였다.

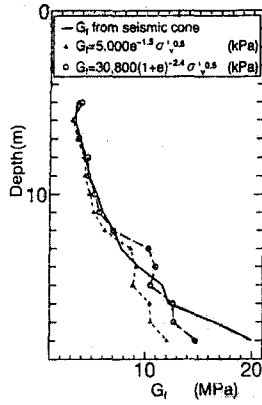
#### 4. $G_f$ 추정치와 실측치의 비교

그림 5에서 나타낸 9개의 Site에서 식(10)에 의한 추정치와 실측치(원위치 seismic Cone시험결과)의 비교를 하였다. 또, Shibuya와 Tanaka에 의한  $G_f$ 의 추정식(식(9))에 의한 것과 유사한 형태의 시험결과로 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

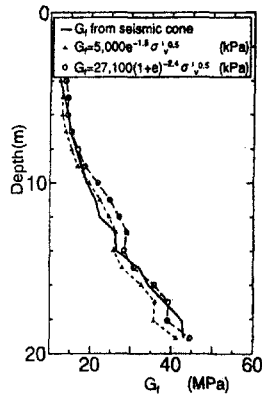
$$G_f = 5000 \cdot e^{-1.5} \cdot (\sigma'_v)^{0.5} \cdot (\sigma'_h)^{0.5} \quad (9)$$

즉, Drammen 지반에서는 임의 점(이 경우 10m)에서의 ( $G_f$ ,  $e_0$ ,  $\sigma'_v$ )의 값을 식(10)에 대입하여  $A$ 의 값을 결정하기 때문에 추정결과도 일치하는 것을 보여주고 있다. 그림 4에 나타낸 결과에 의해 식(9)와 비교하기 위해 아래에 나타낸 것과 같이  $G_f$ 의 추정식을 다음의 식(10)과 같이 나타내었다.

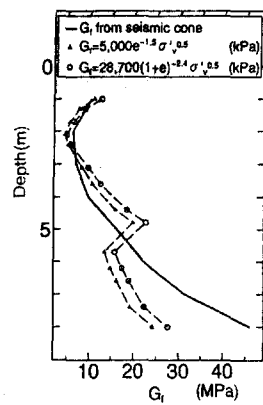
$$G_f = A \cdot (1 + e_0)^{-2.4} \cdot (\sigma'_v)^{0.5} \quad (kpa) \quad (10)$$



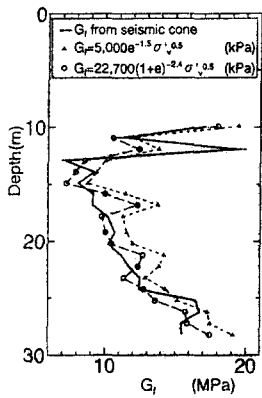
a) Ariake 점토



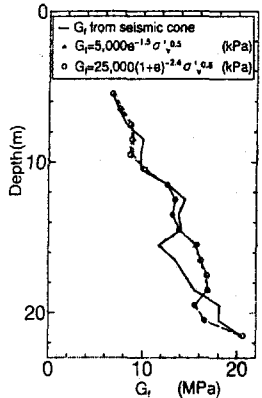
b) Bothkennar 점토



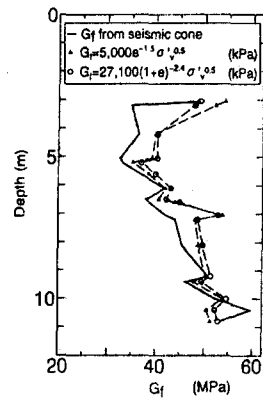
c) St. Alban 점토



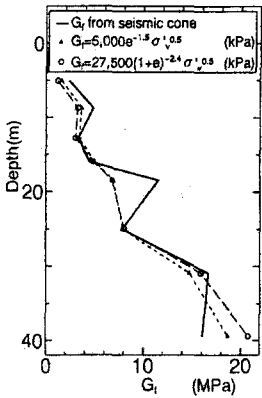
d) Izumo 점토



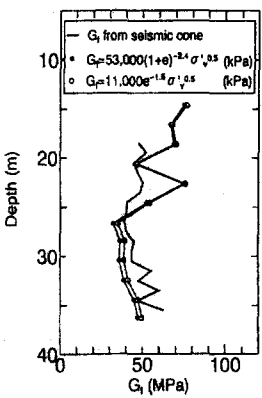
e) Kurihama 점토



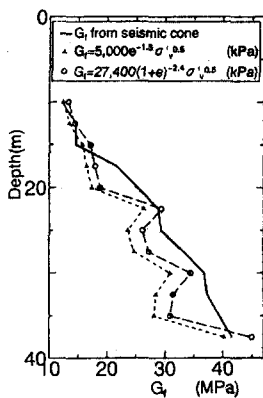
f) Higashi-Ogizima 점토



g) Hacırogata 점토



h) Yamashita공원 점토



I) Fuchino 점토

그림 5 경험식과 원위치 seismic cone 시험결과 비교

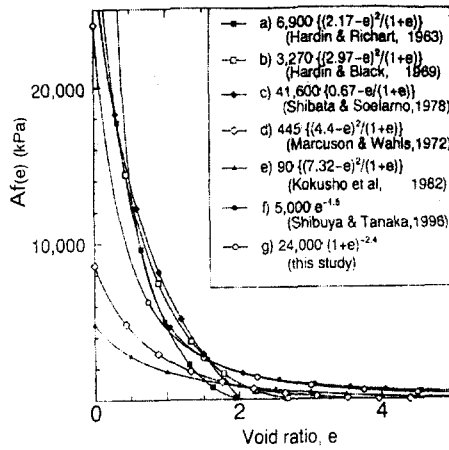


그림 6  $A \cdot f(e)$ 의 비교

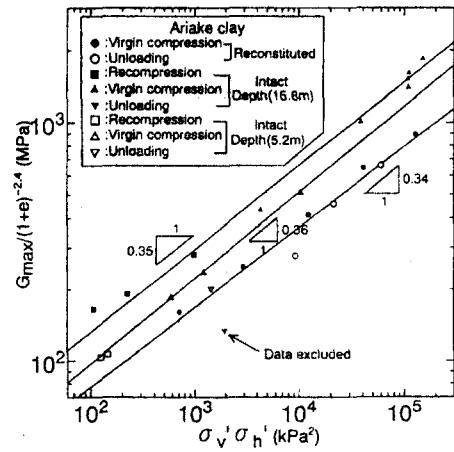


그림 7 유효응력에 대한 탄성전단강성율의 변화

그림 6에서 이미 제안된 식들과 본 연구에서 제안한 식을 비교하여 나타내었다. 이때, 대개의 경험식에서 일반적으로 지수  $2nv$ 의 값은 0.5로 한다. 그림 7은 실내 밴더 엘리먼트시험으로 측정된  $\sigma_v' \cdot \sigma_h'$ 와  $G_{max}$  관계를  $G_{max}/(1+e)^{-2.4}$ 에 기인하여 정리한 것이다.

## 5. 결론

정규압밀상태에 있는 원지반(또는 흙 요소)의 0.001% 이하의 변형율에서의 탄성전단계수의 추정 식으로서  $G_f$  (or  $G_{max}) = A \cdot (1+e_0)^{-2.4} \cdot (\sigma_v')^{0.5}$ 를 제안한다. 본 추정식에 필요한 정보는 borehole data로부터 구한 원지반의 간극비  $e_0$ 와 유효상재압  $\sigma_v'$  정도이다. 지금까지에서 수집한 data base에 있어서 충적지반 및 실내 재구성 시료의 A치는 약 24000 정도로 정하는 것이 타당한 것으로 제안한다.

## 참고문헌

1. Hardin, B. O. & Richart, F. E.(1963), Elastic wave velocities in granular soils. J. Soil Mech. Fdns Div., ASCE 89, NO. SM1, pp33-65
2. Jamiolkowski, H., Lancellotta, R. H. & Lo Presti, D. C. F.(1994), Remark on the stiffness at small strains of six Italian clays. In pre-failure deformation of geo-materials (eds S. Shibuya, T. Mitachi & S. Miura), vol 2, pp817-836
3. Roesler, S. K.(1979), Anisotropic shear modulus due to stress-anisotripy. J. Geotech. engng Div. ASCE 105, No. GT 7, pp871-880
4. Shibuya, S. & Tanaka, H. (1996), Estimate of elastic shear modulus in Holocene soil deposits. Soils Fdns 36, No. 4, pp45-55