

京都大学防災研究所 村山 朗郎

京都大学防災研究所 八木 剛男

1. まえがき

岩石の圧縮強度や弾性係数などの力学常数を求めるには、試料のサンプリングや成形などが困難であるため、非常にめんどむな場合が多い。そこでこれらの値を何か別の方法で推定できれば、有効な手段である。その方法として岩石の試料内を通過する超音波伝播速度を測定し、その値から計算された諸力学常数と静的な圧縮試験より得た強度や力学常数との関連性を見い出そうとした。従来、超音波を用いて岩石の力学常数を計算した例はあるが、1) 2) ここでは特に泥岩(高い圧力で圧密された低含水比の粘土)について、縦波(P波)および横波(S波)の試料内通過速度を測定した。また、このような低含水比の粘土の力学特性について調べ、泥岩の力学特性を研究する手始めにしたと思うている。

2. 試料, 実験装置

実験に用いた試料は現地試料(natural sample)として大阪府布施市の地下0~300mよりまた尼崎市の地下0~700mより採取したもので、これらについて標準圧密試験、1軸圧縮試験、超音波伝播速度の測定を行なつた。また一方、先行圧密荷重が明確な試料を得るために、比較的軟かい粘土を室内で三軸セル内で油圧により人工的に種々の圧力の下で圧密し人工圧密試料(artificial sample)とした。この試料についても現地試料と同じ試験を行なつた。なおこの粘土の物性は比重2.57, 液性限界76.2%, 塑性限界30.7%である。また、人工圧密に使用した試験機は鉄製のセルで、液圧(油圧)が0~1,000kg/cm²の範囲で等方的に加圧でき、さらに軸力として50ton作用させることができる三軸試験機である。ここで用いた試料はすべて間けきが水で飽和したものである。それは間けきに空気などが混入し不飽和になると飽和度により、超音波の播伝速度も強度も異なりその挙動が複雑になるからである。

供試体は現地試料は直径3.6cm, 高さ8.0cm, 人工圧密試料は直径5.0cm, 高さ100.0gmmの円筒形である。

超音波伝播速度測定器の振動子は送・受が1組となつたもので、両者ともチタン酸バリウムが振動子として用いられている。これを供試体の両端に密着させ、送信用は電氣的衝撃を機械的振動に変換し、受信用はその逆を行なう。そして振動波形はブラウン管に映像される。また振動子は縦波を発生するものと、ねじれによる横波すなわちせん断波(水中を通過させようとしたが通らなかつたのでせん断波と判断した)を発生するものを用い、周波数は前者が50kc/sec, 後者が25kc/sec

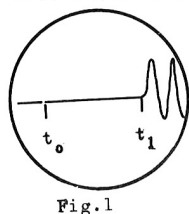
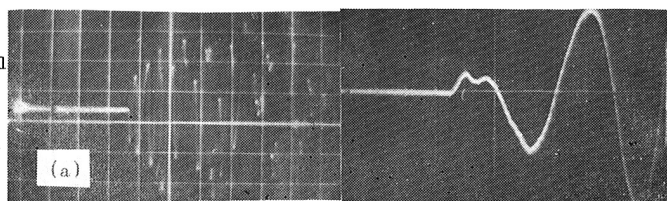


Fig. 2
(a) longitudinal wave
(b) transverse wave



である。測定する試料が軟かい岩石のようにかなり組織が粗いものに対しては、高い周波数のものを用いると減衰が大きく測定が困難であるので低い周波数のものを用いた。

3. 実験結果

試料内を通過する超音波伝播速度 V の測定方法は次のようである。まず送・受両振動子の端面を試料の両端に密接させ発信時信号と受信波信号立上り点までの時間すなわち Fig. 1 の t_0 から t_1 までの時間差を精度 $0.1 \mu s$ の精密ダイヤルで読みとる。さらに、両振動子を互に密接させ、上記と同様な方法で振動子内通過時間 t_c を求め補正值とした。その結果 V は次式で計算される。 L は試料の長さである。

$$V = \frac{L}{(t_1 - t_0) - t_c} \quad (1)$$

実際に得られた波形は Fig. 2(a), (b) に示す。水平線の左端の方の切れ目が発信時信号である。

測定値から式 (1) によつて縦波速度 V_L および横波速度 V_S を計算すると、現地試料では両者ともほぼ深さに対し直線的に増加し、深さゼロでは V_L は水中の音波速度 1.4 km/sec に V_S はゼロに近づく。しかし横波は軟い試料では減衰が大きく、浅い深度の試料の V の測定は困難であつた。

V_L , V_S および試料の密度 ρ の値が測定されると、試料が超音波に対し弾性的挙動をするとして次式により Lamé の常数 λ , μ が決定される。

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

さらに式 (2) より得た μ , λ の値を用いて、次式より動的なセング係数 E_d , ポアソン比 ν , 体積弾性率 K_d , セン断弾性係数 G_d などの各力学常数が決定される。

$$\left. \begin{aligned} E_d &= \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \\ K_d &= \lambda + \frac{2\mu}{3}, \quad G_d = \mu = \frac{E_d}{2(1 + \mu)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式 (2), (3) より測定した現地試料の V_L , V_S を用いて各力学常数を計算し Table 1 に総括した。

一方、人工圧密試料は Table. 1 に示す圧力で圧密したものについて現地試料と同様の試験を行ない、結果を Table. 1 に示した。

つぎに圧縮試験は現地試料に対しては 1 分間に 1 % の速さのヒズミ制御式、人工圧密試料に対しては荷重制御式により行なつた。その結果得られた 1 軸圧縮強度 q_u , 静的弾性係数 E_s を Table. 1 に示す。前者の E_s は応力～変形曲線の初期の勾配より、後者の E_s は載荷後 1 秒間のヒズミで作用応力を除して求めた。

さて Table. 1 の各常数やそれらの間の関係につい

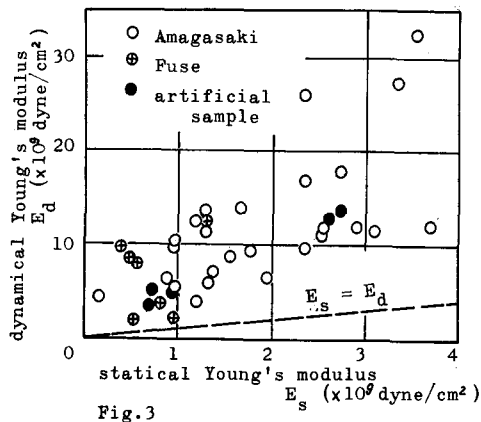


Fig.3

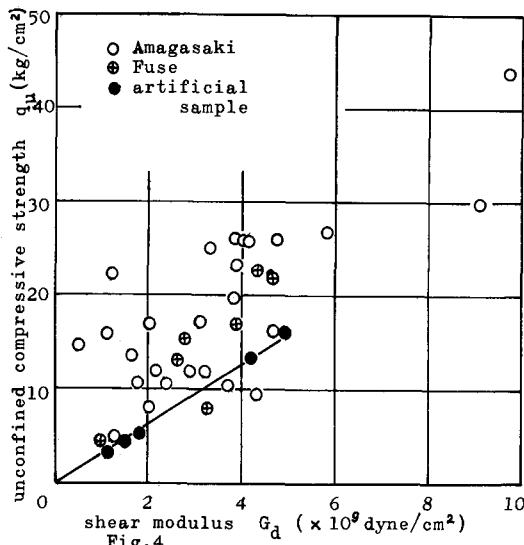


Fig.4

Table.1

		water content %	V_l	V_s	unit weight g/cm^3	q_u	ν	$E_d \times 10^9$ $\frac{dyne}{cm^2}$	$E_s \times 10^9$ $\frac{dyne}{cm^2}$	$K \times 10^{10}$ $\frac{dyne}{cm^2}$	$G \times 10^{10}$ $\frac{dyne}{cm^2}$
			km/sec	km/sec		kg/cm^2					
natural sample	Fuse	61.2	1.64	0.325	1.59	15.53	0.486	3.39	0.833	4.02	1.15
		36.5	1.48	0.388	1.76	13.81	0.459	8.52	0.490	3.49	2.70
		45.6	1.51	0.425	1.70	7.74	0.461	9.68	0.392	4.13	3.33
		33.6	1.16	0.455	1.84	16.97	0.409	11.30	1.30	2.04	3.92
		36.7	1.70	0.506	1.78	22.53	0.444	12.60	1.30	3.75	4.33
		33.2	1.70	0.178	1.82	14.79	0.494	1.86	0.980	5.17	0.577
		39.9	1.72	0.432	1.86	15.14	0.473	8.38	0.565	5.18	2.86
		40.0	1.53	0.515	1.87	21.61	0.436	1.36	0.588	3.54	4.72
	Amagasaki	32.1	1.71	0.256	1.82	4.28	0.489	3.13	0.162	4.70	1.04
		52.4	1.58		1.74	2.50					
		50.7	1.55	0.295	1.74	4.80	0.481	4.48	0.16	3.92	1.51
		30.7	1.94	0.418	1.66	11.90	0.476	8.59	1.55	5.84	2.91
		39.1	1.19	0.392	1.95	10.10	0.439	10.81	0.98	3.00	3.76
		34.8	1.56	0.485	1.86			3.98		4.44	1.34
		67.2	1.56	0.473	1.65	8.00	0.473	5.98	1.33	3.69	2.03
		30.1	1.72	0.313	1.84	10.50	0.483	5.34	0.98	5.24	1.80
		50.2	1.57	0.358	1.72	11.80	0.473	6.48	0.88	4.00	2.20
		30.1	1.65	0.276			0.486				
		61.9	1.65	0.322	1.63	13.50	0.480	5.04	1.67	4.20	1.70
		40.4	1.59	0.431	1.70	17.10	0.460	9.23	1.76	3.85	3.16
			1.39	0.477	1.90	9.20	0.433	12.40	1.18	3.09	4.33
		44.6	1.64	0.337	1.81	16.80	0.478	6.08	1.96	4.61	2.06
		42.7	1.72	0.464	1.80	26.30	0.461	11.32	3.13	4.85	3.87
		70.1	1.56	0.288	1.49	22.70	0.482	3.67	1.18	3.39	1.24
		35.7	1.70	0.459	1.81	19.70	0.461	11.18	2.55	4.78	3.82
		45.1	1.71	0.464	1.79	23.30	0.426	10.97	2.55	2.47	3.85
		38.5	1.74	0.472	1.86	25.80	0.426	11.82	3.72	2.66	4.15
		39.2	1.70	0.509	1.83	15.90	0.451	13.77	1.27	4.68	4.74
		38.8	1.70	0.425	1.83	25.00	0.467	9.70	2.35	4.90	3.31
		47.4	1.72	0.465	1.88	24.50	0.461	11.85	2.90	5.06	4.06
		36.0	1.73	0.420	1.86	11.90	0.469	9.60	0.98	5.16	3.27
		40.4	1.71	0.478	1.98	17.30	0.478	7.12	1.37	5.39	2.41
		33.7	1.58	0.503	1.89	26.10	0.444	13.80	1.67	4.10	4.78
		22.1	1.99	0.695	1.89	29.00	0.430	26.10	2.35	6.21	9.13
		27.9	1.68	0.553	1.91	26.90	0.439	16.80	2.35	4.59	5.84
		37.1	1.68	0.582	1.84	59.40	0.432	17.90	2.74	4.39	6.24
		20.6	1.92	0.743	2.08	36.20	0.412	32.45	3.53	6.15	11.50
		21.4	1.72	0.703	1.98	43.90	0.403	27.42	3.35	4.72	9.78
artificial sample	consolidation pressure	4	43.5	1.68	0.248	1.83	0.488	3.37	0.692	4.94	1.13
		7	38.8	1.77	0.292	1.84	0.486	4.67	0.974	5.56	1.57
		10	35.1	1.71	0.313	1.88	0.483	5.46	0.656	5.25	1.84
		60	26.0	2.44	0.466	1.97	0.481	12.70	2.60	11.20	4.28
		100	23.0	1.35	0.484	2.04	0.426	13.70	2.74	3.04	4.80
		200	21.4	1.99	0.262	2.08	0.491	4.27		8.90	1.43

て調べてみる。ポアソン比はほとんどが0.45~0.5の範囲にある。これは1軸圧縮の際、体積変化がなければポアソン比は0.5であるが、このような試料の場合、構成粒子や間ゲキ水が粒子骨格に比べはるかに圧縮性が小さいので、間ゲキから水が出ないかぎりポアソン比は0.5であり、Table-1の値はほぼ妥当な値を示している。つぎに現地試料および人工圧密試料の E_s と E_d の関係を図示するとFig. 3のようになり、後者の E_d/E_s の値は約5であるのに対し、前者の E_d/E_s の値はほとんどが3~10

の範囲にばらついている。これは現地と人工圧密の試料差であり、また現地試料では各々の供試体について構成粒子の粒径やその分布などの性質に影響されていると思われる。しかしこれらの影響を数的に表わすことは困難である。

セン断弾性係数 q_k は V_k とは無関係に V_g から計算される。 q_k は試料のセン断抵抗と深い関係を持つている。一方、 σ_u 軸圧縮強度 q_u はセン断強度を表わしているので、 q_k と q_u の関係を示すと Fig. 4 のようになる。現地試料、人工圧密試料ともに q_k と q_u の関係は原点を通る直線で表わされ、現地試料は試料採取位置には関係がなく、またばらつきが大きいのは E_s と E_d の関係と同様の理由によるものであろう。一方 q_u と V_k の関係を調べたが一定の関係が得られなかつた。 V_k と単位重量 γ の関係は Fig. 5 に示すように非常なばらつきはあるが、 V_k は γ の増加とともに増加するようである。以上泥岩の力学的性質および物理的性質と超音波伝播速度より得られた常数の値との関係を調べたが、 q_k と強度との関連性があるようである。しかし、強度とか密度の変化の割合には V_k 、 V_g の値の変化が大きいいため、測定技術の向上とよき計器の開発により測定精度をよくしないかぎり V_k 、 V_g から力学的特性を推定するのはむづかしい。

人工圧密試料の含水比 w と圧密圧力 σ_c 、 σ_u 軸強度 q_u の関係を示したのが Fig. 6 である。 w の大きいところでは $w - \log \sigma_c$ 、 $w - \log q_u$ の関係は直線的であるが、 w が小さくなると直線からはずれる。また、先行圧密圧力 p_c に対し q_u の値をプロットすると Fig. 7 (a) に示すようになり、現地試料は原点を通る直線上にあり、人工圧密試料も p_c の小さいところではその直線上にあるが、 p_c の増加とともにその直線からはずれる。

4. あとがき

本研究では超音波伝播速度によつて泥岩の力学性および低含水比の粘土の力学性を調べた。超音波によつて力学性を調べるには縦波よりもむしろ横波による方が好ましいことがわかつた。しかし現在では縦波に比べ横波伝播速度の測定は横波発生用の振動子が十分でなく測定が困難である。したがつて今後良好な横波の振動子の開発が必要である。また今回は各供試体は周囲が自由な状態であつたが、実際に地中にある場合のように圧力を周囲に作用させた場合の波の伝播速度の測定を行なう必要がある。

終りにではあるが、現地試料の試験については大阪土質試験所の友沢好規氏、室内圧密試料の試験については京都大学大学院の栗原則夫氏の御協力をいただいた。ここに深謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) Shosei Serata and others "PRINCIPLES OF STRESS FIELD IN UNDERGROUND FORMATIONS" Progress Report NO.4 Project G-19791 and GP-2646 National Science Foundation 1964.
- (2) A.R.Gregory "Shear Wave Velocity Measurements of Sedimentary Rock Sample under Compression" Rock Mechanics, Proceedings of the Fifth Symposium, Pergamon Press, pp.439-467, 1961

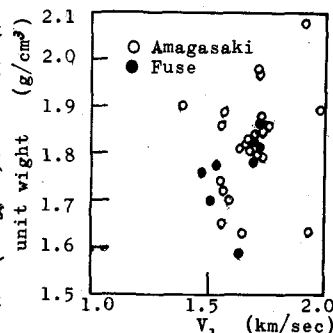


Fig.5

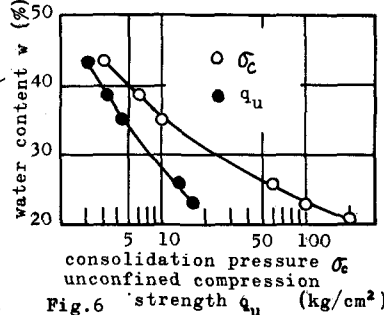


Fig.6 'strength q_u (kg/cm²)

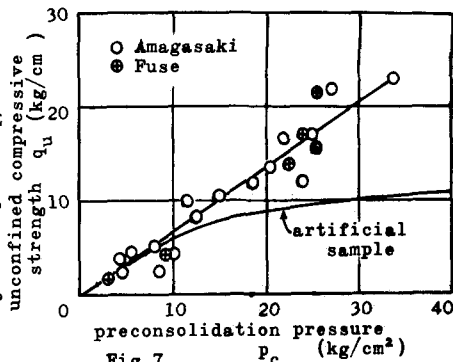


Fig.7

Mechanical Characters of Mudstone - Especially Estimation
of Strength from Ultrasonic Propagation Velocity -

Sakuro Murayama and Norio Yagi
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Abstract

In this paper, mechanical characters of mudstone are investigated in relation with propagation velocity of ultrasonic longitudinal and transverse wave through a sample. The natural samples of mudstone obtained from diluvial layers and artificial clay sample highly consolidated isotropically in the triaxial cell were used. The barium titanate transducers producing ultrasonic longitudinal and transverse wave were used with frequency of 50kc/sec and 25kc/sec respectively.

Dynamical Young's modulus E_d , Poisson's ratio ν , bulk modulus K_d , and shear modulus G_d , calculated from Eqs.(2) and (3), together with unconfined compressive strength q_u and statical Young's modulus E_s obtained by uniaxial compression test, are given in Table.1. In Eq. (2), V_l and V_s represent velocity of longitudinal and transverse wave through the samples respectively. The uniaxial compression test were carried out by means of strain controlled method for natural samples and stress controlled method for artificial clay sample.

The relation between unconfined compressive strength and dynamical shear modulus of any kind of the samples can be expressed by straight line through the origin. Consequently, magnitude of propagation velocity of transverse wave has deep relation with mechanical characters of mudstone.