

泥 岩 の 力 学 的 特 性

村 山 朔 郎・八 木 則 男

MECHANICAL CHARACTERS OF MUDSTONE

By *Sakuro* MURAYAMA and *Norio* YAGI

Synopsis

In this paper, mechanical characters of mudstones are investigated in related with propagation velocity of ultrasonic longitudinal and transverse wave. The natural sample of mudstone obtained from diluvial layer and the artificial clay sample highly consolidated in a laboratory are used. Test results show that magnitude of propagation velocity of transverse wave V_S has deep relation with mechanical characters of mudstone. As an example, the relation between unconfined compressive strength and shear modulus calculated from V_S of any kind of samples can be expressed by straight line through the origin.

1. ま え が き

最近、地盤沈下の調査や地質調査の目的で数100mにおよぶ深いボーリングが行なわれ、そこから採取された試料についての土質試験が行なわれるようになった。しかし、このような試料は非常に硬く、粘土というよりはむしろ泥岩と呼ぶ方が適当であるように思われる。上記の試料の土質試験を行なう場合、試料の成形が困難で、手間がかかり、成形により目に見えない亀裂が生じ、試料の強度低下などが起る。そこで土質試験より求められる先行圧密荷重 p_c 、単軸圧縮強度 q_u 、弾性係数 E などの力学的諸常数を何か他の方法決定できれば有効な手段である。その1手段として、試料内を通過する超音波伝播速度を測定し、その値と土質試験の結果との関連性を見つけようとした。また高压で圧密された低含水比の粘土は従来からよく研究されている比較的高含水比の粘土とはその力学的特性が異なっているように思われるので、低含水比の粘土の力学性について調べ、泥岩の力学的特性を研究する手始めにしようと思っている。

2. 試料, 実験装置

実験に用いた試料は布施市の地下0~300mより採取したもの(現地試料)で、これらについて標準圧密試験、単軸圧縮試験、超音波伝播速度の測定を行なった。しかし上記の試料を用いた場合は、前述したように、成形の際に生ずる亀裂のために測定値の誤差が大きく(後に示す試験結果よりわかる)、その土質試験の結果を用いて超音波伝播速度との相関性を見い出しても無意味である。そこでもっと力学性(先行圧密荷重)が明確で、成形によるひび割れなどがない試料を作り出すために、比較的軟らかくて成形が容易な粘土を室内で人工的に種々の圧力の下で圧密した(室内圧密試料)。この試料を用いて現地試料と同様の試験を行なった。この粘土の物理的性質は比重2.57、液性限界 $L.L.=76.2\%$ 、塑性限界 $P.L.=30.7\%$ である。なお室内圧密に使用した試験機は液圧(油圧)により0~1,000kg/cm²の範囲で等方的に載荷できる三軸試験機である。

供試体は現地試料は直径3.6cm、高さ8.0cm、室内圧密試料は直径5.0cm、高さ10.0cm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組となっ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。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セン断波(セン断波かどうかを確かめるのに水中を通過させたが、通らなかった)を発生するものを用い、周波数は前者が50kc/sec、後者が25kc/secである。測定する試料が比較的粗い組織を有しており、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

現地試料に対して行なった標準圧密試験より得られた先行圧密荷重 p_c および単軸圧縮強度 q_u を深度に対して図示したのが Fig. 1 である。 p_c は現在の上載荷重圧よりすべて大きくなっていることから試料は過圧密状態にあったことが予想される。またほぼ同じ深さにある2, 3の試料で行なった試験結果でも、試験は十分注意して行なったが、得られた p_c の値にかなり大きな差(大きいのは2倍近い)がある。これはおそらく供試体と圧密リングの間の摩擦やセットする際のすき間などによる試験誤差が大部分であるように思われる。また単軸圧縮はヒズミ制御式で行なったものであるが、強度はほぼ同じ深さのものでも供試体によってかなりの差がみとめられる。

Fig. 1 に超音波の縦波速度 V_L および横波速度 V_S をプロットした。 V_L , V_S 両者とも深度に対しほぼ直線的に増加し、直線を延長して、深度がゼロの値を求めると V_L は約 1.4km/sec となり水中での音波の速度に等しくなり、 V_S はほぼ0に近づく。しかし横波は減衰が大きく、浅い深度での試料についての測定は困難であった。

V_L , V_S および試料の密度 ρ の値が測定されると、試料がこのような周波数の大きい波に対して弾性的挙動をすると考えて次式により Lamé の常数 λ , μ が決定される。

$$\begin{aligned} V_L &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \\ V_S &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

さらに(1)式より得られた λ , μ の値を用いて次式より動的なヤング係数 E_d , ポアソン比 ν , 体積弾性率 K , セン断弾性係数 G , といった各力学常数が決定される。

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

(1), (2) 式を用いて現地試料の測定した V_L , V_S より各力学常数を計算して Table. 1 に総括した。

一方、室内圧密試料は試料の先行圧密荷重より大きい圧密圧力 4, 7, 10, 60, 100, 200kg/cm² で圧密したものについて、現地試料と同様の実験を行ない、各力学常数の値を Table. 1 に総括した。

Table. 1 に示された各々の値について検討すると、縦波速度 V_L に比べ横波速度 V_S は室内圧密試料については含水比の低下とともに増加しているようであるが、現地試料については各供試体で全く同じ粘土成分でないこと、ひび割れなどの力学的欠陥があることなどの理由によりかならずしも室内圧密試料と同様でない。また先行圧密荷重 p_c , 単軸圧縮強度 q_u と V_L , V_S との関係は V_L , V_S が深さとともに増加する (Fig. 1) のので無関係ではないであろうが、いまのところ両者を関係づける結果は得られていない。

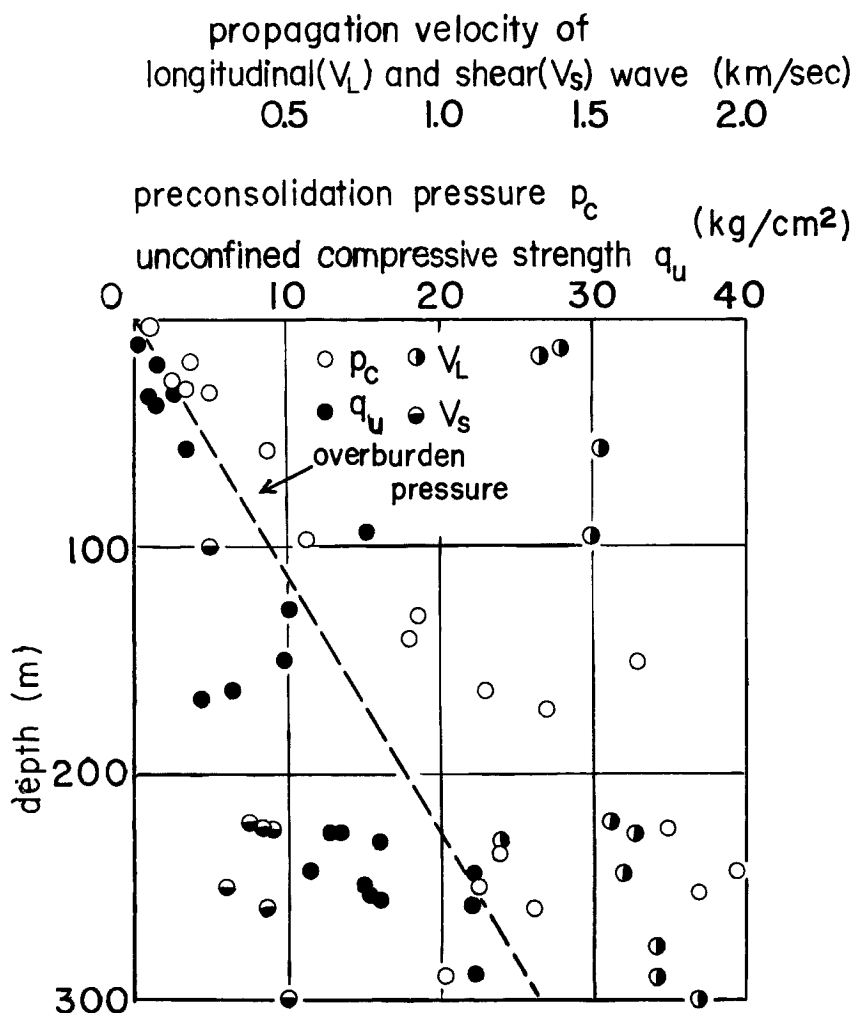


Fig. 1 Variations of preconsolidation pressure p_c , unconfined compressive strength q_u , and propagation velocity of ultrasonic wave V_L , V_S with depth.

粘土が飽和していれば、単軸圧縮試験より得られるポアソン比 ν の値は圧縮速度があまりおそくないかぎり 0.5 に近い値になるであろう。それは土を構成している土粒子および水が土の粒子骨格に比べ圧縮性がかなり小さく、比較的速い圧縮速度では、粘土の透水係数が小さいので、試料内より排水されないと考えられるからである。一方、Table. 1 に示される動的に得られた ν はそのほとんどが 0.5 に近い値を示している、これはかなり妥当な値ではないと思われる。

つぎにヤング係数について、単軸圧縮試験から得られた静的ヤング係数 E_s と超音波伝播速度から得られた動的ヤング係数 E_d を比較してみる。静的ヤング係数は現地試料に対してはヒズミ制御式圧縮試験より求めた応力～ヒズミ曲線の初期の直線部分の勾配であり、室内圧密試料に対しては荷重制御式圧縮試験を行なったので、荷重載荷 1 秒後のヒズミで応力の増加分を除いて求めたものである。その結果、一般によく知られているように E_d の方が E_s よりかなり大きい、現地試料では E_d の大きさは E_s の大きさの数倍から 10

Table. 1

		water content %	V_L km/sec	V_S km/sec	unit weight g/cm ³	q_u kg/cm ²	ν	E_d $\times 10^9$ dyne cm ²	E_s $\times 10^9$ dyne cm ²	K $\times 10^{10}$ dyne cm ²	G $\times 10^9$ dyne cm ²
natural sample	consolidation pressure	61.2	1.64	0.325	1.59	15.53	0.486	3.39	0.823	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	1.78	21.61	0.436	1.36	0.588	3.54	4.72
		32.1	1.71	0.256	1.82	4.28	0.489	3.13	0.162	4.70	1.04
artificially consolidated sample	4	43.5	1.68	0.248	1.83	3.16	0.488	3.37	0.692	4.94	1.13
	7	38.8	1.77	0.292	1.84	4.14	0.486	4.67	0.974	5.56	1.57
	10	35.1	1.71	0.313	1.88	5.20	0.483	5.46	0.656	5.25	1.84
	60	26.0	2.44	0.466	1.97	13.13	0.481	12.70	2.60	11.20	4.28
	100	23.0	1.35	0.484	2.04	16.10	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

数倍であるのに対し、室内圧密試料ではほぼ5倍の値を示している。この室内圧密試料の E_d と E_s の関係を示したのが Fig. 2 である。

つぎにせん断性係数 G は V_L とは無関係に V_S だけから計算される。 G はせん断抵抗と関係の深いものである。またせん断抵抗は単軸圧縮試験でせん断破壊した供試体の圧縮強度 q_u で表わすことができるから、 G と q_u とは関係があることが予想される。そこで V_S より得られた G と q_u の関係を現地試料、室内圧密試料に別けてプロットすると Fig. 3 のようになる。 G と q_u は両試料で直線の勾配は異なるが、原点を通る直線的関係にあることがわかった。したがって泥岩のせん断抵抗を調べるには横波を測定することは有効な手段である。

泥岩の力学的特性を従来から行なわれてきた土の力学を進展させて研究するのに高压で圧密を行ない、低含水比の粘土を作製した。またこの試料で単軸圧縮試験を行なった。その結果含水比 w と圧密圧力 σ_c 、単軸圧縮強度 q_u の関係は σ_c 、 q_u を対数にとると Fig. 4 のようになる。一般に、比較的高含水比の飽和粘土では正規領域で $w - \log \sigma_c$ 関係は直線であるが、 σ_c が大きくなり含水比が低下（塑性限界付近）するとこの直線からはずれて、 σ_c 軸から遠ざかるように曲るようである。同様に、 $w - \log q_u$ も含水比が低下すると q_u 軸から遠ざかるように曲る。また σ_c と q_u の関係を示すと Fig. 5 のようになる。これも両者の関係は直線関係ではなく、 σ_c が大きくなる程、 σ_c の同じ増分に対し q_u の増分は小さくなっている。しかし試験数が少ないためこの曲線の明瞭な形はわからない。

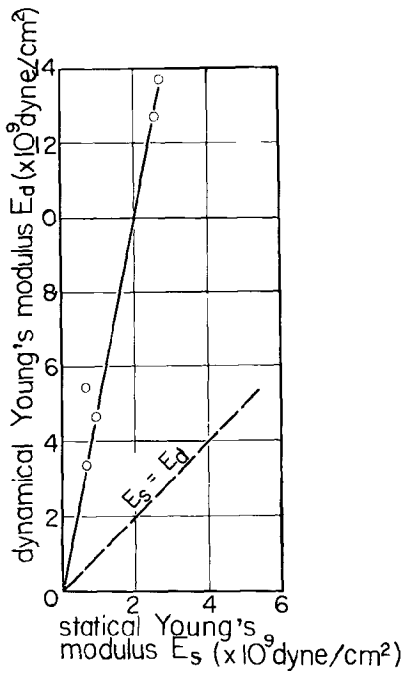


Fig. 2 Relation between statical young's modulus E_s and dynamical one E_d .

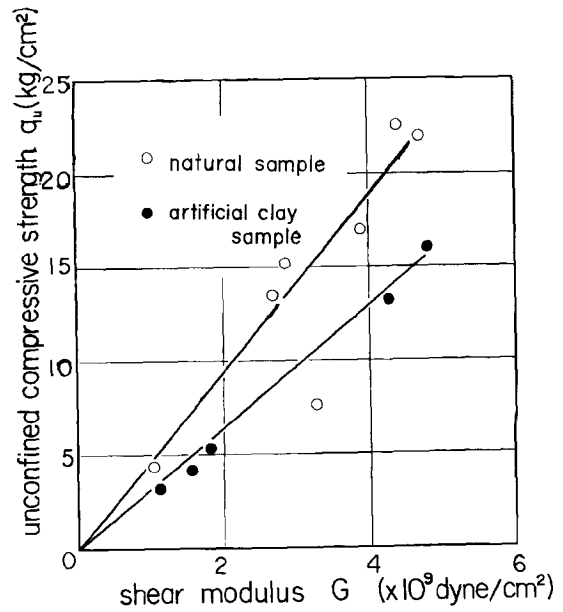


Fig. 3 Relations between shear modulus G and unconfined compressive strength q_u .

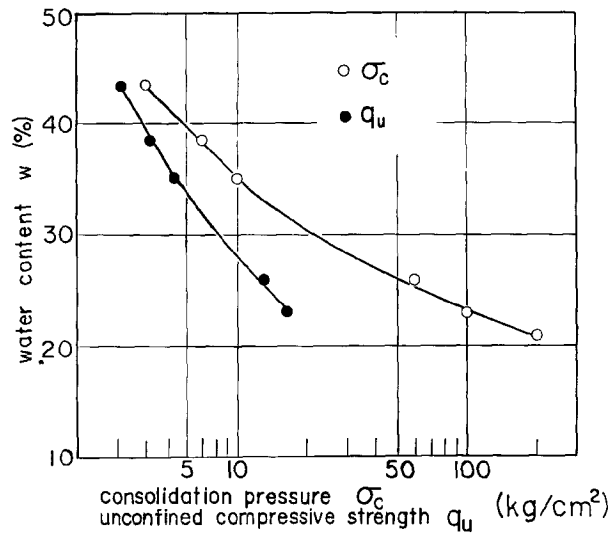


Fig. 4 Relations between consolidation pressure σ_c , unconfined compressive strength q_u and water content w .

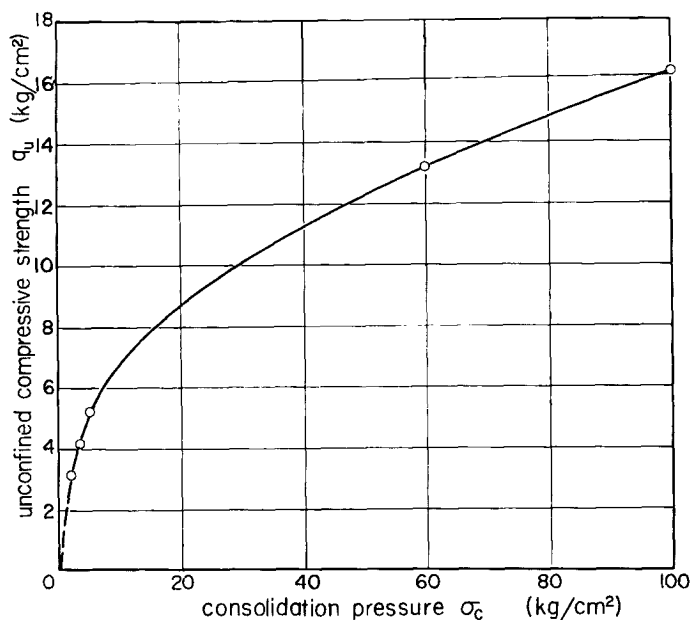


Fig. 5 Relation between consolidation pressure σ_c , and unconfined compressive strength q_u .

4. あとがき

本研究では超音波伝播速度によっ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。超音波によっ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った。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などが十分でなく測定が困難である。したがって今後横波を発生さす良好な振動子の開発を行なう必要がある。また今回は各供試体は周囲が自由な状態であったが、実際地中にある場合のように圧力を周囲に作用させて波の伝播速度の測定を行なう必要がある。

また低含水比の粘土は高含水比のそれに比べ、圧密圧力～含水比関係などの力学的特性が異なることがわかった。

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

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.