

地表試料による泥岩強度と地質構造の相関例 (予報)

井波 和夫* 垣見 俊弘**

**On the Relation between Mudstone Strengths of Outcrop-samples
and Geologic Structure**

By

KAZUO INAMI and TOSHIHIRO KAKIMI

Abstract

A few data on the uniaxial compressive strength are obtained from mudstones of the Miocene Zushi formation, which are distributed at the northern Miura peninsula. Geologic horizons of the sampling-points are illustrated in Fig. 2. As shown in Fig. 3, the strength regularly intensifies corresponding to increasing the stratigraphic "depth" of the Zushi formation. Therefore, rock-strength of the Zushi formation seems to be closely related to compaction of the formation.

From the study of the minor-fault distribution, it has been clarified that the Zushi formation had suffered a tectonic stress which had been diminished steeply from south to north. The rock strength of this area similarly reduces its intensities northwards. It is expected, therefore, that the rock-strength of the area is in relation with the tectonic stress which had generated the minor-fault system.

はじめに

各種の代表的な岩石についての、いろいろな封圧、温度、時間条件のもとでの物性に関する情報は、最近めざましく集積されつつある。そのため、ある埋没深度に相当する封圧、温度のもとでの各種岩石の物性が、実験データにもとづいて推定できるようになってきた。

ところが、一方、岩石強度の空間的分布と、地域にみられる地質構造およびその特性との関係については、まだあまり発表されていないようである(注1)。

岩石の強度というのは、そもそもが統計的・経験的な物理量であって、岩質・内部構造・風化条件などのわずかなちがいで、大きく異なることが考えられる。したがって、採取地点のちがったものについての強度を比較する場合、確実に地質構造の相違にもとづく強度変化のみを抽出して論ずるのが、難かしいためであろう。しかしながら、このような研究は、地質構造の解析、と

くに造構的な応力場のもとでの節理や断層の生成条件を明らかにするためには、是非とも発展させねばならぬ分野と思われる。

筆者らは、現在、三浦半島の地質構造を解析中であるが、その途次に地表から採取した新第三系の泥岩のサンプルの強度をテストしたところ、地質構造となんらかの関係で変化しているらしいことがわかったので、とりあえずその資料を報告する。

測定結果の再現性については、後で述べるように、まだ疑問があるとみなければならぬ。したがって、結果の解釈については、予報的な性格のものであるとみていただきたい。

なお、現在、同じ地域の、より数多くのサンプルによるテストを実施中であることを付言しておく。

試料の採取

三浦半島の北部に分布する、新第三系逗子層(中新世後期)の泥岩について、任意の地点、任意の層準で、7カ所の地表露頭から採取した。ただし、露頭は、1カ所を除き天然露頭ではなく、工事中または工事直後の道路切通し、あるいは採石場であるから、地表試料としては

* 物理探査部

** 地質部

注1) 星野(1967)は、各地の第三系の泥岩強度をコンパイルした結果、時代(おそらく一義的には埋没深度)と統計的な相関が認められると述べている。

充分新鮮なものと考えられる。ただ No. 446 地点のものだけは、海食崖から採ったので、風化の影響が考えられる。なお、No. 263 の A, B, C は、巨視的にはほぼ同じ層準とみなされる、広い採石場から採ったもので、3者は互いに数 10 ~ 100 m ほど離れている。

岩質は No. 446 を除き、みかけはほぼ一様で、塊状、細粒のシルト岩からなり、新鮮な湿った状態では暗灰色を呈する。ラミナその他の堆積構造は、肉眼ではみとめられない。No. 446 は、湿った状態で暗緑灰色を呈する、砂質泥岩である。

採取地点を第1図に示す。また、採取地点の層準とその位置関係を、矢崎・三梨 (1962) の層序断面図に投影させると、第2図のようになる。

強度の測定

断面が30mm角、高さ60mmの角柱に成形した、自然乾燥状態の試料について、通常の一軸圧縮試験を行ない、圧縮最大強度をもとめ、これを圧縮強度とした。

地表から採集した7個の試料は、肉眼的には比較的均質で、異方性はなさそうにみえたが、一応各試料とも互いに直交する3方向(堆積面に平行な2方向と、垂直方向注2)について成形し、合計21個を試験材料とした。

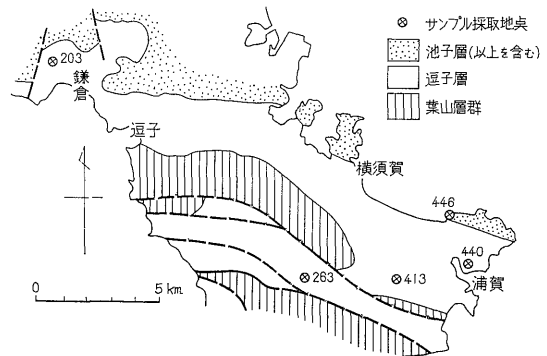
断面積を30mm×30mmにしたのは、試験機の最大荷重

注2) 堆積面に垂直な方向をa方向、堆積面に平行し、かつ、互いに直交する方向をbおよびc方向とする。

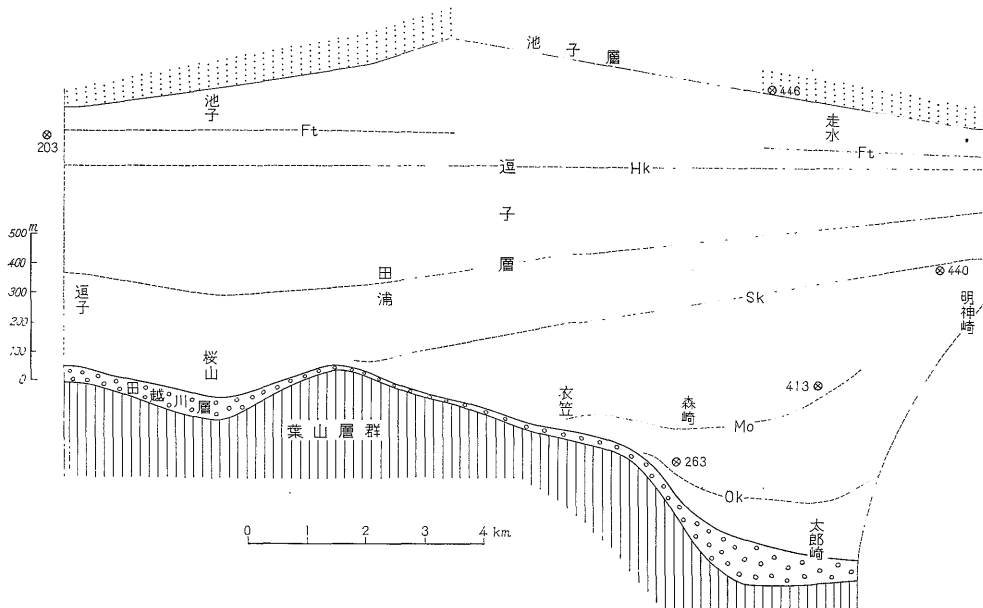
3 t に合わせたものである。また、試料の縦横比は、西松裕一 (1965) によると 1 : 1 が多く用いられているようであるが、必ずしも一定したものではないようである。下村・高田 (1961) によれば、縦横比 2 : 1 の花崗岩と安山岩について、圧縮強度が最小になったと述べている。ここでは試験の都合を考慮して、2 : 1 を用いた。

試料両端面の形状は、強度に大きな影響を及ぼすので、充分留意して成形したが、試料が軟質であったため、平滑度、平行度とも、充分であったとはいえない。1 ~ 2 の試料は、圧縮中にスリップあるいは挫屈したものもあるが、はたして成形の不完全によるものか、試料の保持位置が悪かったためかは、明白でない。

試験機は、東京プラント工業 K.K. 製型式 60 型三軸圧縮



第1図 試料採取点の位置 (平面図)



第2図 試料採取点の層準

層序断面図は矢崎・三梨 (1962) による。No. 203 と No. 263 はこの断面図の範囲外だが、相当する層準のところへプロットした。

第1表 逗子層泥岩の強度

破壊強度は一軸性圧縮強度をさす。a, b, c は圧縮軸の堆積面に対する方向性を示す (本文参照)

サンプル No.	採取地	岩質	走向	傾斜	破壊強度 (kg/cm ²)			方向性 (a方向100%)		
					a	b	c	a	b	c
446	馬堀	火砕質砂質岩 泥	N68°W	26°NE	36.7	27.8	32.2	100%	75.7	87.7
203	大仏切通し	泥岩	“36°”	17°”	85.6	73.3	47.8	”	85.7	55.9
440	浦賀	”	“60°”	19°”	142.2	80.0	134.4	”	56.3	99.6
413	太郎崎	”	“71°”	56°”	135.6	134.4	156.7	”	99.2	115.6
263-A	北武	”	“34°”	55°”	188.9	97.3	81.1	”	51.7	42.9
263-B	”	”	“25°”	63°”	202.2	146.7	158.9	”	72.5	78.6
263-C	”	”	“33°”	71°”	205.6	240.0	122.2	”	116.7	59.5

試験機を用い、側圧関係付属品はとりのぞいて、一軸試験機として使用した。荷重の量は、3 t の Load Cell を用いて、連続的に電磁オシログラフに記録した。加圧方式は、ラック・ピニオンを使用した機械的方式で、Strain rate は、Vベルトの回転比を無段変速機で、ある程度任意に変えることができる。Strain rate は、Stress-strain 曲線、圧縮強度などに影響するものであるが、荷重のかりはじめと、破壊直前とは必ずしも一致しないし、試料によっても異なってくるであろう。その数値は、No. 263 では $0.9 \times 10^{-5}/\text{sec} \sim 1.6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ 程度である。No. 446 のように $0.8 \times 10^{-5}/\text{sec} \sim 3.2 \times 10^{-5}/\text{sec}$ と4倍ぐらい変化するものもある。

測定値は、上記のような成形の不完全さ、試料の不均一性、採取条件(風化)の問題などから、1個の試料だけで、その採取地点を代表する、充分信頼性のある値とはいきれない。ASTM の規格では、少なくとも3個の試料について試験するようになっている。今回の試験においては、試料の採集間隔(層序的な)が広く、ある程度意味のある差のある可能性をテストする目的だったので、試料の数は、各方向について1個づつにとどめた。

得られた測定値を第1表に示す。

破壊後の試料は、大部分が圧縮軸に平行な割れ目によって分割(2~5片ぐらい)されている。一部には、軸方向と10数度の角度をなす斜めの割れ目や、まったく不規則な割れ目もみられた。しかし、割れ目にそうすべりの証拠はまったくなく、破壊様式は張力性割れ目によるぜい性破壊である。

強度測定結果について

測定値は方向によって大きな違いを示す。一般に地層面と垂直な a 方向の強度がもっとも大きく、層面に平行な方向のそれに較べて2倍以上を示すものがある。しかし、なかには b・c 方向の1つが a 方向より大きなものもある。これらが、どの程度岩石の異方性をあらわしているかは、今後の課題である注3)。

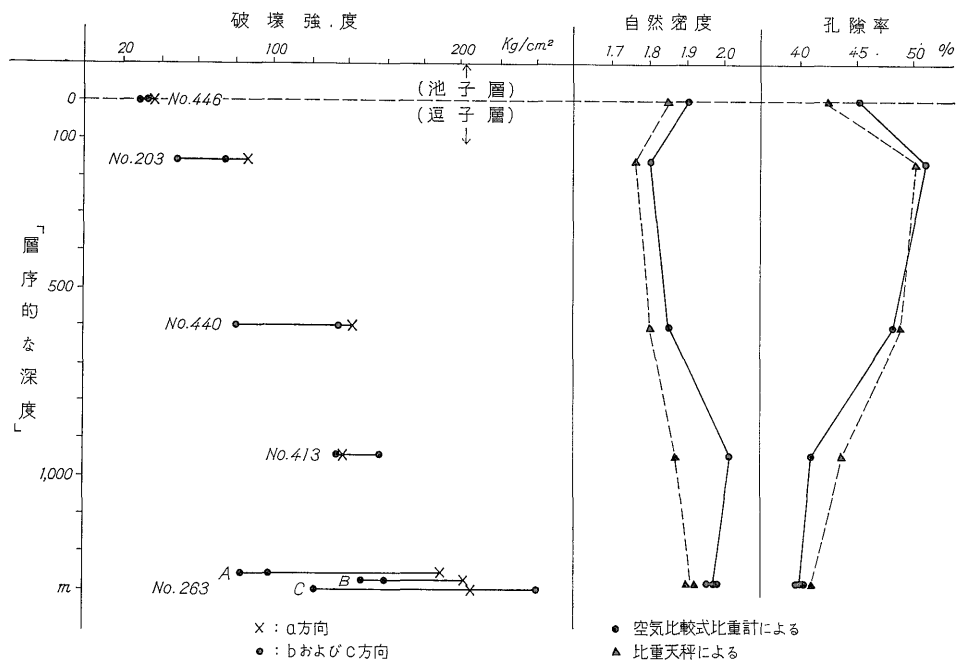
得られた測定値を、サンプリング地点の平面的な位置関係は一応無視し、層序的な位置だけに着目して表わしてみたのが、第3図である。

この図での「層序的な深度」とは、矢崎・三梨(1962)の層序断面図のなかに、採取地点の層準を記入し、池子層の基底を基準面と仮定したときの、採取層準までの層厚にひとしい。矢崎らの層厚は、地表調査から得られた柱状資料を傾斜方向につなぎ合わせて求められたものであって、その場所から鉛直方向に測って得られるであろう層厚とは、必ずしも一致するとはいえない。また、この層序断面図は、東西方向で厚さに変化のあることを示している。これを無理に1つの図で表わすため、第3図では試料の「深度」は、矢崎らの層序断面図において、もっとも厚いところと薄いところの平均をとって示した。

一方、強度にも a 方向と b・c 方向とに差があるので、これを横線であらわし、a 方向の数値のところに×印をつけておいた。

この図によれば、「層序的な深度」が増すほど、岩石強度が増していることは一目瞭然である。したがって、ここに示されたシルト岩の強度は、それらがかつて地下

注3) 今回の試験はみかけの一様さの割には測定値の方向性による差がありすぎるように思われる (DONATH, 1961を参照)。



第3図 強度・密度・孔隙率の「層序的深度」別分布図 (本文参照)

に埋没していた深度と一義的な関係にあるのではないかと予想が、ごく自然に導かれるであろう。

ちなみに、第3図の強度の対「深度」勾配は、岩石の自然密度を1.8としたときの垂直方向の応力(自荷重)の勾配と、ポアソン比を0.3としたときの水平方向の応力の勾配との、ちょうど中間の値を占めているのは興味ぶかい。

一方、この地域は北にゆるく傾く単斜構造を示しているが、この構造は、おもに第四紀以降、基盤(葉山層群)の著しい上昇に伴って形成されたことがわかっている(垣見・平山・影山, 1966)。したがって、基盤の上昇部にちかいほど逗子層の泥岩は強い造構的応力の場におかれたため、強度もそれに伴って増したと考えられぬこともない。第3図をみると、たかだか1,300mの「深さ」の差にしては、強度の差がありすぎるようにも思われる。しかも、三梨ら(1966)によれば、この地域の逗子層は、その最大層厚部が北方へ移動する「将棋倒し構造」を示しているという。とすると、この1,300mの「深さ」はもっと減るものと考えねばならない。したがって、これだけの強度の差を生じさせた原因として、埋没深度のほかに造構的応力の差も関係しているのかもしれない。造構的応力と強度の関係については、あとでもう一度ふれることにする。

密度と孔隙率の測定

強度を測定したものと同一サンプルを用い、2種のちがった方法で、密度と孔隙率を測り比較した。

1) 空気比較式比重計による

ベックマン比重計を用い、まず自然乾燥^{注4)}させた試料の粒子密度と、粒子部分だけの容積を測定する。次に試料を水銀に浸して全容積を測り、孔隙部の容積と孔隙率を計算で求め、最後に、これらの値から、孔隙に水を満たしたものと考えた岩石の自然密度^{注5)}を計算した。結果を第2表に示す。

2) 比重天秤による

強制乾燥^{注6)}させた試料の重さ W_1 、強制湿潤状態^{注7)}の試料の空中での重さ W_2 、同じ試料の水中での重さ W_3 から、孔隙率は、 $W_2 - W_1 / W_2 - W_3$ 、自然密度は^{注8)} $W_2 / W_2 - W_3$ として近似的に求めた。結果を第2表に示す。

粒子密度は、どの試料も一般の泥質岩のそれ (2.6 ~

注4) これらの用語は、物理探鉱技術協会(1962)の基準に従う。

注5) 自然密度は松村(1961)によれば湿潤密度と同義とされている。ここでは、1)と2)の手法では、げんみつには密度の内容がちがうのだが、両者とも自然密度として扱う。

注6), 7) 注4と同じ。

注8) 注5と同じ。

第2表 逗子層泥岩の密度と孔隙率

サンプル No.	空気比較式比重計による			比重天秤による	
	粒子密度	自然密度	孔隙率	自然密度	孔隙率
446	2.65	1.90	45.2	1.85	42.4
203	2.63	1.80	51.0	1.76	50.3
440	2.64	1.85	48.6	1.80	49.1
413	2.71	2.01	40.9	1.87	43.5
263-A	2.64	1.98	40.4	1.91	40.8
263-B	2.64	1.97	40.6	1.91	40.9
263-C	2.58	1.95	39.5	1.90	40.9

2.7) にちかひので、自然密度と孔隙率は、試料の相対的な圧密度をあらわしているとみてよいであろう(松村1961, 62)。両方法で測定した値を比較してみると、比重天秤から得られた値は、空気比較式から得られた値より、自然密度がやや少なくなっている。この原因は、多分、閉塞孔隙があったためと、水を含ませることにより体積がいくらか膨張したためではないかと思われる。

ただし、数値こそちがってはいるが、第3図で見られるように「層序的な深度」の順にならべて比較すれば、両方法とも同じ傾向をもっていることがわかる。

強度と圧密および地質構造との関係

第3図によれば、逗子層のシルト岩の密度および孔隙率は、時代の新旧と相関しているように見える。しかし、そのように見えるのは、松沢(1961, 62)によれば、古い地層の方が過去における埋没深度が大きかった結果にすぎず、本来は密度、孔隙率とも、過去に埋没された深度と一義的な関係にあるものである。第3図において、強度が孔隙率や密度と相関しているのであるから、強度もまた、あきらかに逗子層の埋没深度と相関しているとい得るであろう。ただし、本地域の密度や孔隙率の数値そのものは、松沢(1961)や宮崎(1965)によって作られている、油田地帯の試錐孔から得られた埋没深度—密度曲線上にプロットしてみると、第3図で示した「層序的深度」に較べて密度差が少なすぎるように思われる。

また、南雲(NAGUMO 1965 a, b)の仮定によれば、孔隙率の対数の対深度曲線(圧密曲線)の勾配から圧密係数を求め、それから埋没深度による封圧に付加された造構的応力の量が推定できるとされている。そこで、試みに、南雲によって埋没深度のみの関数と仮定された圧密

曲線(蒲原GS1号#)と、封圧の約50%に相当する造構的応力が加わっていると仮定されたもの(藤岡GS1号#)のなかに、本地域の孔隙率から得られた“曲線”(資料数が少ないのでやや不確実だが)を記入してみたが、予期に反し、造構的応力が加わっている徴候はみられなかった。

密度や孔隙率のような統計的な量を問題にするには、今回の試料数は少なすぎるし、また特定の路線にそって採取したものでもないので、これ以上の推定はさしひかえたい。

一方、垣見・平山・影山(1966)は、三浦半島北部の小断層系のうち、新期(第四紀に発生)・胴切り性の正断層系は、基盤上昇部のちかく(南部)では発達が著しく、それから離れて、層位的な上部(北部)へ行くに従って発達が悪くなり、池子層付近では正断層系がまったく見られなくなることを報告している。彼らは、その原因として、①造構的応力の作用が北方に及ばなかったことと、②池子層付近の岩石の強度が大きかったことの相乗作用ではないかと考えた。しかし、今回の強度試験の結果では、②の要素は否定されねばならない。この地域は、層位的な上位へ行くに従って、岩石の強度は著しく減っているにもかかわらず、却って小断層の発達は悪くなることになる。その理由は、造構的応力が北方へ急速におとろえて、池子層分布地域までは及ばなかったため、と考えねばならない。孔隙率の方からは確かな結論は出せなかったが、強度測定の結果は、この地域における造構的応力の存在と、その強い勾配の存在を示唆している。

あとがき

三浦半島北部の正断層系は、基盤の隆起の後半期に、地表のちかくで、破断にちかひ状態で生じたものである(垣見・他, 1966)。このような地質構造の形成機構を明らかにするためには、一軸強度試験のような簡単な試験でも、造構的応力の及んだ範囲、その勾配、その大きさなどを推定するうえで、果す役割はきわめて大きいと考えられる。封圧・温度・孔隙率などの影響を考慮した三軸試験が、さらに重要なことはいうまでもない。

今回の試験は、わずかに数個のサンプルで予備的に行なわれたものにすぎないが、泥岩の強度が密度や孔隙率とよい相関を示し、したがって地質構造をあらわす指標となる可能性が認められた。今後はとりあえず、

①傾斜方向の路線に沿って、なるべく連続的に採った試料、および

②特定の層準に沿って採った同層準試料によって強度

試験を行ない、埋没深度および地質構造との量的な関連性を追求したい。

この研究にあたって、サンプル採取、物性試験、結果の解析の各段階で、地質調査所の岩石物性グループおよび地殻活構造グループの方々から、種々の御協力と御討論をいただいた。これらの方々、とくに物理探査部佐野浚一氏、地質部平山次郎氏に厚く御礼申上げる。

文 献

- 1) 物理探査技術協会(1962): 岩石試料の速度測定要綱, 物理探査, vol. 15, no. 1, p. 46~53
- 2) DONATH, F. A. (1961): Experimental Study of Shear Failure in Anisotropic Rocks. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 72, no. 6, p. 985~990.
- 3) 星野一男 (1967): 裏日本第三系泥岩の高圧物性について (演旨), 石油技協誌, vol. 32, (印刷中)
- 4) 垣見俊弘・平山次郎・影山邦夫 (1966): 小断層から求めた三浦半島北部の造構的応力場, 地質雑, vol. 72, no. 10, p. 469~489
- 5) 松沢 明 (1961, 62): 堆積岩の密度と地質構造, 物理探査, vol. 14, no. 4, p. 36~45, vol. 15, no. 1, p. 1~13
- 6) 三梨 昂・垣見俊弘 (1964): いわゆる異常堆積について, 地質ニュース, no. 117, p. 8~14
- 7) 宮崎 浩 (1965): 秋田油田地域における泥質岩の圧密について, 地質雑, vol. 71, no. 839, p. 401~413
- 8) NAGUMO, S. (1965a): Compaction of Sedimentary Rock—A Consideration by the Theory of Porous Media. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 43, p. 339~348.
- 9) NAGUMO, S. (1965b): An Estimation of Tectonic Stress from Compaction of Sedimentary Rock Strata. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 43, p. 565~576.
- 10) 西松裕一 (1965): 岩石強度の標準試験法, 日本鉱業会誌, vol. 81, no. 926, p. 563~570
- 11) 下村弥太郎・高多 明(1961): 岩石の力学的挙動と破壊について (第1報) —圧縮における試験片の形状効果と寸法効果—, 日本鉱業会誌, vol. 77, no. 876, p. 377~382
- 12) 矢崎清貫・三梨 昂(1962): 日本油田ガス田図3「横須賀」, 地質調査所