

5. 様々な砂岩における岩石組織・構成物と引張強度との関係

Relationship between tensile strength and rock texture in sandstones

中原 毅 (島根大学大学院)・横田修一郎 (島根大学)

Tsuyoshi Nakahara and Shuichiro Yokota (Shimane Univ.)

1. はじめに

砂岩は均質・等方的で、かつ規則的な節理面の発達していることが多い。このため、砂岩が構成する急斜面では節理面に沿った崩落が発生しやすいし、節理面から進行した風化・劣化が崩落の原因となりやすい。このため、砂岩の強度、とくに引張強度はこうした岩盤斜面の不安定化評価に際し、重要な指標となる。

砂岩の力学的性質は、砂岩粒子等の構成物とその比率、粒子間がつくる岩石組織が大きく影響すると考えられる。そこで、以下では地質時代や堆積環境の異なるいくつかの砂岩試料を用いて、引張強度 St を測定し、構成物や岩石組織、比重や間隙径等とのかかわりを検討した。

2. 対象とした砂岩と測定項目

2.1 採取砂岩とその特徴

試料は西日本各地の白亜紀～新第三紀の代表的な砂岩層から採取した。採取位置を図-1に示す。山陰の中新世大森層 (Os: 3個)、同牛切層 (Us: 31個)、九州の中新世宮崎層群 (Mi: 5個)、熊本古第三紀観音岳層 (Ka: 7個)、同銚ノ甲層 (Ho: 5個)、四万十帯古第三紀日向層群 (Hy: 4個)、白亜紀和泉層群 (Iz: 48個) の計7地点である。大森層に関しては別に採取した計48の砂岩試料も用いた。これらから岩石組織や比重、間隙径

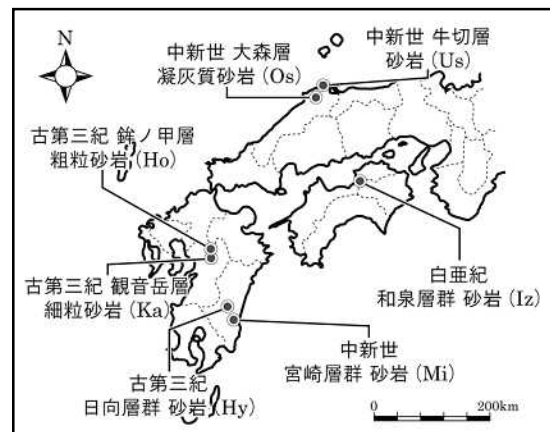


図-1 試料採取位置図

等の測定用供試体とともに、圧裂引張試験用の径5.0cm、高さ5.0cmの円柱状供試体を作成した。各地点の砂岩試料の岩石学的特徴は以下のようである。

Os (中新世大森層) 中粒～粗粒。石英は少なく、岩片が多い (<10%)。

Us (同牛切層) 細粒～粗粒。全体的に均質で石英は約40%。

Mi (中新世宮崎層群) 細粒。全体的に均質で、淘汰が良好、石英は約30%。

Ka (古第三紀観音岳層) 細粒～中粒。細粒の中に極粗粒～礫も含まれる。石英は約45%、強風化している。

Ho (同銚ノ甲層) 粗粒～極粗粒。石英は約45%。

Hy (古第三紀日向層群、四万十帯) 細粒。全体的に均質で非常に密。石英は約60%。

Iz (白亜紀和泉層群、タービダイト) 細粒～中粒。全体的に均質で非常に密。石英は約60%。

2.2 粒子間接触を主とした岩石組織

砂岩の強度には構成粒子・基質の強度と粒子群がつくる岩石組織 (骨格構造) が大きくかかわることが予想され、とくに硬質の石英粒子間の接触関係はそれに大きく影響するであろう。こうした接触の型は一般に sutured contact (Su), concave-convex contact (Cc), long contact (Lo), tangential contact (Ta), および floating (Fl) に区分されている²⁾ (図-2(a)参照)。このうち、concave-convex contact (Cc) は長期間の続成作用下にて凹凸をもって噛み合わさったものであり、中・古生代の砂岩に多い。

測定に際しては、岩石表面を研磨し、スキャナーにて読み込んだ上、Tamrakar *et al.*³⁾の方法にて各接触型の面積比率を算出した。各地点ごとの岩石試料にて求めた平均値を図-2(b)に示す。これによれば、アレナイト質の新第三系 Os, Us, Mi や古第三系の Ka, Ho では Lo や Ta が多い。これに対し、ワッケ質の Hy, Iz では Su や Cc が多い。これは、タービダイトの Iz や付加体の Hy が、いずれも高い上載荷重下で長期間続成作用を経てきたためであろう。

3. 砂岩の物理的・力学的性質の測定

引張強度の測定に先だって、比重（乾燥，湿潤，真），間隙率 n ，平均間隙径 r_{50} を測定し，また力学的指標として圧裂引張強度 St の他に弾性波速度 V_p の測定を行った。これらの結果を表-1 に示す。

3.1 比重 と間隙 n

真比重（間隙を含まない岩石部分のみの比重）は 2.4~2.7 であった。Iz では、いずれの試料も 2.6 前後でほぼ一定であるのに対し、Os では 2.4~2.7 とレンジが広い。後者のばらつきは粒子に岩片が多く、構成物が多様なためである。間隙率 n は全体として 2~30% の範囲であった。付加体の Hy や白亜系タービダイトの Iz では低いが、新第三系の Os では高いものが多い。同一地点試料でのばらつきは、風化程度の違いによると考えられる。

間隙の実態をより詳しく見るため、箇々の試料にて平均間隙径 r_{50} を水銀圧入式ポロシメータにて測定した。ここでは、得られた累積間隙容量曲線における累積量 50% の値を平均間隙径 r_{50} とした。 r_{50} は、全体として 0.005~0.25 μm である。タービダイトでワッケ質に近い Iz や Us はすべて 0.05 μm 以下であったが、アレナイト質の Os ではレンジは広い。

3.2 圧裂引張強度 St と砂岩の弾性波速度 V_p

弾性波速度（超音波速度） V_p は 2~5 km/sec であった。地点ごとに一定値に近いが、Iz のみはバラツキが大きい。圧裂引張強度 St は 2~20MPa とレンジは大きく、とくに Iz の試料では顕著であった。これらの力学的指標間の相互比較を図-3 に示す。砂岩のような塊状岩石の場合は、 V_p は一般に一軸圧縮強度 q_u と正の相関があるが⁴⁾、上記の結果では、圧裂引張強度 St と相関があることが分かる。

表-1 各砂岩の物理的・力学的指標の測定結果

	比重			間隙率 n (%)	平均間隙径 r_{50} (μm)	圧裂引張強度 St (MPa)	弾性波速度 V_p (km/sec)
	乾燥比重 ρ_s	湿潤比重 ρ_w	真比重 ρ				
Os	1.73~2.15	1.93~2.37	2.41~2.74	15.9~35.6	0.015~0.197	1.9~5.2	2.0~2.9
Us	2.27~2.43	2.40~2.52	2.60~2.68	7.6~14.1	0.010~0.023	4.6~9.8	2.7~4.0
Mi	2.28~2.60	2.38~2.62	2.53~2.65	2.0~10.3	0.014~0.246	4.8~14.0	2.8~4.2
Ka	2.35~2.41	2.45~2.49	2.62	8.0~10.2	0.083~0.238	1.9~5.2	2.0~2.6
Ho	2.22~2.51	2.34~2.56	2.53~2.64	4.8~12.4	0.010~0.211	1.2~4.2	1.8~2.8
Hy	2.52~2.60	2.57~2.62	2.65	1.8~4.6	0.005~0.083	12.9~13.4	3.4~4.5
Iz	2.23~2.60	2.37~2.60	2.57~2.62	0.8~13.9	0.007~0.055	1.8~20.6	2.1~5.0

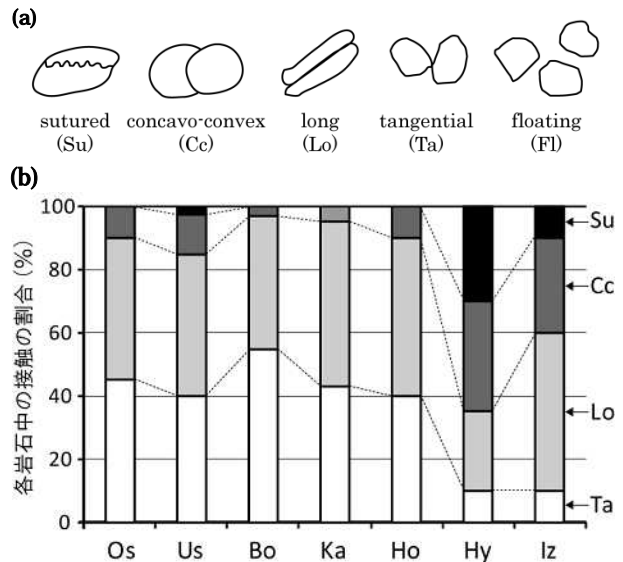


図-2 (a) 砂岩粒子の接触型 (Su, Cc, Lo, Ta, Fl) と (b) 各岩石における各接触型の割合

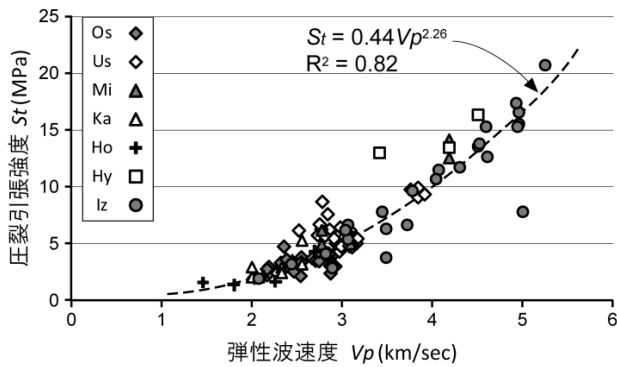


図 - 3 圧裂引張強度 St と弾性波速度 Vp の関係

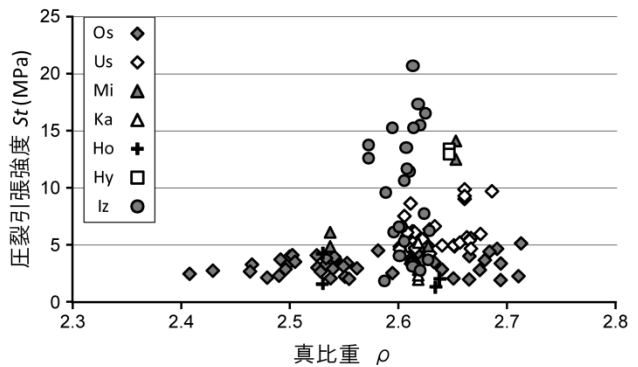


図 - 4 圧裂引張強度 St と真比重 の関係

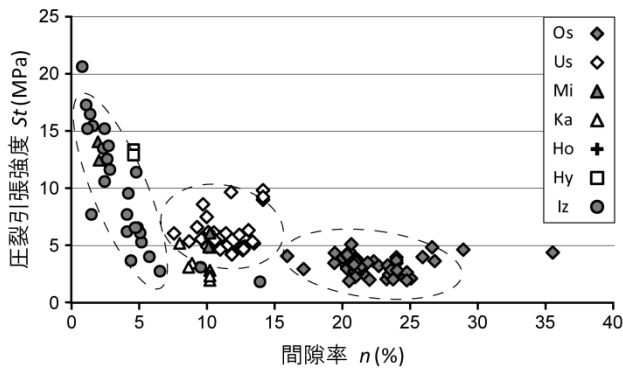


図 - 5 圧裂引張強度 St と間隙率 n の関係

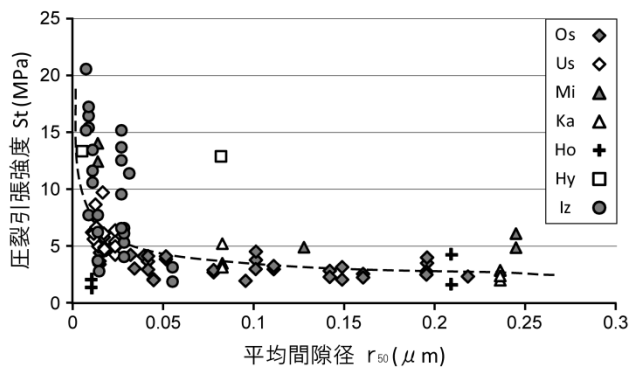


図 - 6 圧裂引張強度 St と平均間隙径 r_{50} の関係

4. 圧裂引張強度と間隙の関係

4.1 圧裂引張強度 St と間隙率 n , 平均間隙径 r_{50} の関係

圧裂引張強度 St と比重 および間隙率 n との関係を図 - 4, 5 に示す。前者では相関性は認められないが、後者では負の相関が認められた。この関係は一部の砂岩では、より顕著であり、とくに Iz ではより明瞭な相関が見られた。同様に、圧裂引張強度 St と平均間隙径 r_{50} との間にも負の相関が認められ、大局的には St は r_{50} とともに指数関数的に低下する (図 - 6)。

一般に、間隙は風化の進行に伴って増大することが知られているため⁵⁾、そこで岩石試料からある程度褐色化したもの (b^* 値 >5) を除いて、 St と r_{50} の関係を求めた⁶⁾。すると、 Iz や Os では、新鮮な試料に限定すれば、上記の関係はより明瞭になる。とくに Os に関しては、顕著な正の相関が認められた (図 - 7a)。この近似線は、

$$St = 4.91 \exp(-4.37 r_{50}) \cdots (1)$$

と表すことができる。

4.2 圧裂引張強度 St と粒子間の接触型との関係

図 - 7(b)は Os (大森層砂岩) の全試料において接触型 Cc および Ta の割合を求め、 r_{50} との関係を示したものである。これを見ると、 r_{50} の増大とともに Cc は減少し、 Ta は増加することがわかる。特に、 Ta は $r_{50} < 0.05 \mu m$ では 10% 以下であるが、 $r_{50} > 0.1 \mu m$ では 20% 以上に達している。したがって、 r_{50} の違いはこうした接触型の比率の違いを現している可能性が高い。

なお、接触型 Cc の割合と St との関係を示すと図 - 8 のようになり、構成物が特異であった 1 試料を除けば、ほぼ正の相関が認められる。凹凸で接触していれば、間隙が全般に小さくなり、逆に点接触が多いと間隙が大きくなり、結果として引張強度 St が小さくなることを意味している。

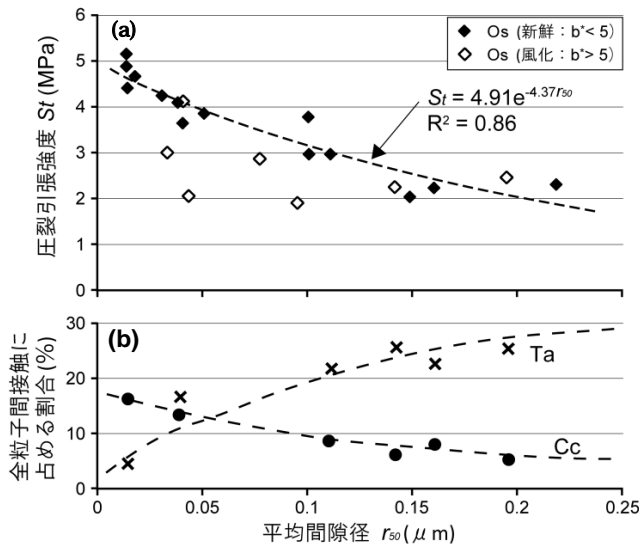


図 - 7 大森層砂岩における

(a) 圧裂引張強度 St と平均間隙径 r_{50} の関係

(b) 全体の接触型に占める concave-convex contact

(Cc) および tangential contact (Ta) の割合

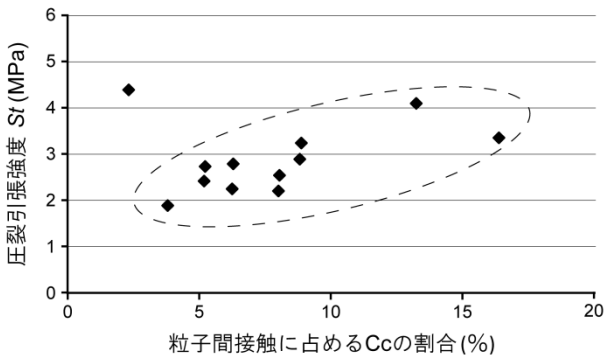


図 - 8 大森層砂岩(Os)における圧裂引張強度 St と粒子間接触型に占める Cc の割合の関係

5. まとめ

- 1) 今回測定した砂岩試料では、圧裂引張強度 St は真比重 にはあまり影響されず、むしろ間隙率 n や間隙径に影響されやすい。
- 2) St は n の増加とともに指数関数的に低下する。この関係は、和泉層群や山陰新第三系といった地点ごとの試料内ではとくに明瞭であり、これは多少構成物の違いを反映したためと考えられる。
- 3) 一方、平均間隙径 r_{50} 値をとって、 St と r_{50} の関係をみると、地点ごとの違いは薄れ、いずれの地点のものでも同一曲線上にのり、 St は r_{50} の増加とともに指数関数的に低下する。
- 4) 砂岩における r_{50} 値の違いは、粒子間接触型の違いが大きく影響している。凹凸接触が多ければ、間隙は全般に小さくなるが、逆に点接触が多いと、間隙は大きくなり、結果として引張強度 St を低下されると考えられる。

文 献

- 1) 中原 毅(2006):“ 来待石 ”の粒径分布、間隙径分布と引張強度の関係、島根県地学会会誌, No.23, pp.21-26.
- 2) Taylor, J.M.(1950): Pore space reduction in sandstone, *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, Vol.34, pp701-716.
- 3) Naresh Kazi Tamrakar, Shuichiro Yokota, Suresh Das Shrestha(2007): Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, *Central Nepal Sub-Himalayas, Engineering Geology*, Vol.90, pp.105-123
- 4) 横田修一郎(1995): 理学部学生と理学部出身者のための土木地質学, 斯文堂株式会社, pp.15.
- 5) Ken-ichi Nishiyama(2002): Rates of rock property changes due to weathering: Sandstone gravel in fluvial terrace deposits in the Miyazaki Plain., *Science Reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba Section A*, Vol.23, 40p.
- 6) 横田修一郎・妹尾大輔・西山賢一(2006): 色彩値変化からみた来待石の風化速度, 応用地質, Vol.47, No.4, pp.188-195.