

6. 岩石・岩盤の工学的性質

工学的には、岩石という場合は不連続面を含まない岩石（インタクト・ロック）のことをいい、岩盤というのは節理や層理などの「不連続面を含めたまとまり」を言います。したがって、一般的には岩盤の方が岩石よりも力学的には弱くなります。

岩石には様々な工学性があります。大きく分けると比重などのような物理的特性、一軸圧縮強度のような力学的特性、透水性のような水理学的特性です。

6.1 岩石の物理的特性

物理的特性としては、比重、空隙率、吸水率があります。これらは一連の試験で値を求め、計算によって算出することができます。ここで得られる比重は見掛けの比重で、真の比重は土粒子の比重と同様の方法で測定します。

それぞれの意味を述べます。試験方法については、地盤工学会の「地盤材料試験の方法と解説」（2009年12月；【ISBNコード】978-4-88644-083-9）にもとづいて述べます。

岩石試験の方法については、旧建設省・土木学会、旧日本鉄道建設公団、ネクスコなどの基準がありました。それぞれ微妙に違っていました。地盤工学会の上記の基準は、これら既存の試験方法を考慮しているほか、JISにも準拠しています。

岩石のかさ密度（ ρ ）

単位体積重量のことで岩石の質量と体積の比です。不整形試料の場合、岩石の体積を求めるのに強制湿潤状態の空中重量（ m_2 : g）と水中重量（ m_1 : g）の差を用います。この方法を浮力法と呼びます。

水の比重を ρ_w とすると試料の体積 V （ cm^3 ）は、 $V = (m_2 - m_1) / \rho_w$ となります。

この時、岩石中の空隙が完全に水で満たされるのは難しいのです。空隙が完全に水で満たされていないと空隙を満たしている空気のために水中重量（ m_1 ）は本来の値より小さくなります。試料の空隙が完全に水で満たされている場合に比べて、体積（ V ）は大きな値として算出されます。したがって、「見かけの比重」あるいは「かさ比重」は小さくなります。

真比重あるいはそれに近い値を求めるには、岩石を粉末にしてピクノメーター（比重びん）を用いて測定する方法を用います。土質試験の土粒子の比重測定と同じ方法です。

ボーリングコアで試験する場合は、試料の長さや直径を測って体積（ V ）を出し密度を求めることができます。この方法をノギス法といいます。

この場合は、試料がどの程度水を含んでいるかによって質量が異なりますので、密度は異なってきます。自然状態の密度を求めるには、試験までの試料の保管方法に注意が必要です。

供試体の空中での質量を m （g）とすると密度（ ρ ）は、 $\rho = m/V(\text{g/cm}^3)$ となります。

空隙率（ n_e ）

空隙率は岩石全体の体積に対する空隙体積の比を言い、有効空隙率とも呼ばれます。

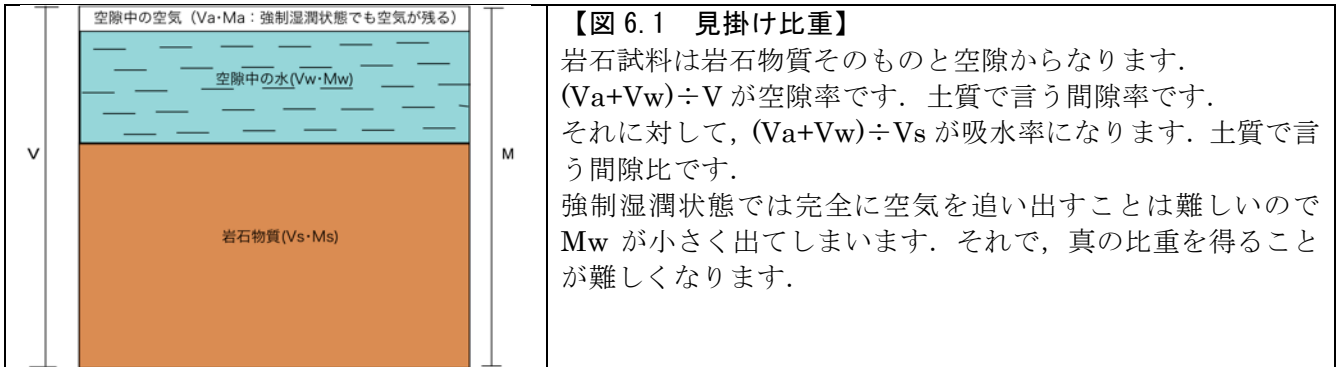
強制的に湿潤状態にした試料の空中重量と強制的に乾燥させた試料の空中重量から空隙の体積を求め、この空隙の体積を試料全体の体積で割って求めます。試料の体積は、試料を整形して求める場合もあります。

吸水率（ w_a ）

吸水率は決められた温度と時間のもとで岩石を水に浸けたとき、その岩石に含まれる水の体積と岩石の体積の比です。

地下水位以下にある岩石でも、そのすべての空隙が水で満たされているわけではありません。空気が入

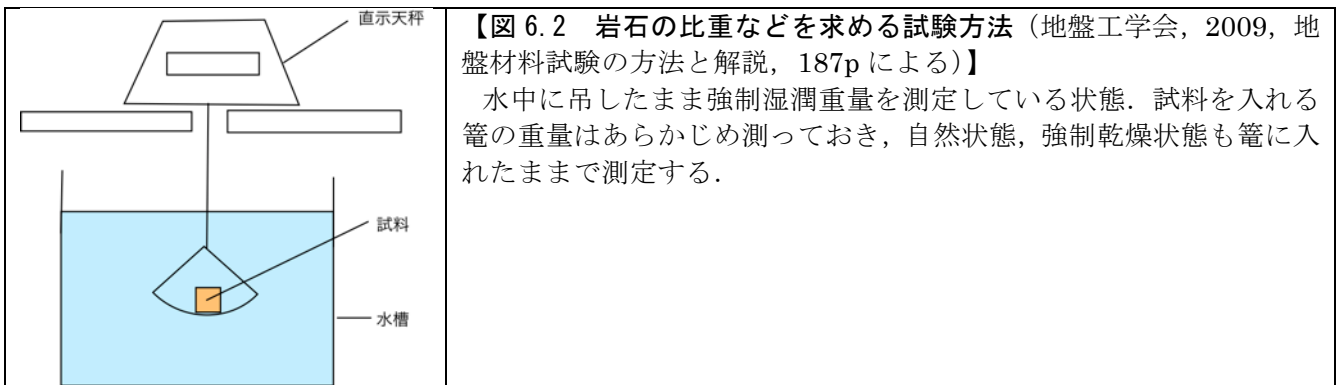
っていたり、粘土によって水の侵入が妨げられたりしています。



測定方法

手順は次のとおりです。

- (1) 試験片の形状は任意でよいですが 50g 程度の大きさとしします。
- (2) 自然状態の試験片を空气中で秤量します。はかりは感度が 0.01g 程度のものを用います。
- (3) 試験片を水中に入れ 24 時間以上、質量変化が認められなくなるまで浸水させ（強制湿潤状態）水中および空中での重量を秤量します。
- (4) さらに、質量変化が認められなくなるまで、 $110^{\circ} \text{C} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$ で 24 時間以上（一定質量になるまで）乾燥させ（強制乾燥状態）、デシケーター内で室温まで冷却して空气中で秤量します。



以上の操作により次の値が得られ、これを用いて物理定数を算出します。

得られる値

- 自然状態の空中重量： m_0 (g)
- 72 時間以上水に浸した強制湿潤状態の水中重量： m_1 (g)
- 72 時間以上水に浸した強制湿潤状態の空中重量： m_2 (g)
- $105 \sim 110^{\circ} \text{C}$ で 24 時間以上乾燥させた強制乾燥状態の空中重量： m_3 (g)

これらの値を用いて密度，含水比，飽和度，有効間隙率，吸水率を算出します。

自然状態密度 : $\rho = m_0/V$ (g/cm³)
 強制乾燥状態密度 : $\rho_d = m_3/V$ (g/cm³)
 強制湿潤状態密度 : $\rho_w = m_2/V$ (g/cm³)
 含水比 : $w = ((m_0 - m_3)/m_3) \times 100$ (%)
 飽和度 : $S_r = ((m_0 - m_3)/(m_2 - m_3)) \times 100$ (%)
 有効間隙率 : $n_e = ((m_2 - m_3)/V) \times 100$ (%) 空隙率ということもある。
 吸水率 : $w_a = ((m_2 - m_3)/m_3) \times 100$ (%)

ただし,

m_0 : 自然状態の空中質量(g)
 m_1 : 強制湿潤状態の水中質量(g)
 m_2 : 強制湿潤状態の空中質量(g)
 m_3 : 強制乾燥状態の空中質量(g)
 V : 試験片の体積(cm³) $V = (m_2 - m_1)/\rho_w$ ρ_w は水の密度 (≈ 1 g/cm³)

ここでは、強制湿潤状態の水中重量・空中重量から試験片の体積を求めています。円筒状の試験片をコアカッターなどで抜き出せる場合は断面積と高さから体積を求めることができます（ノギス法）。

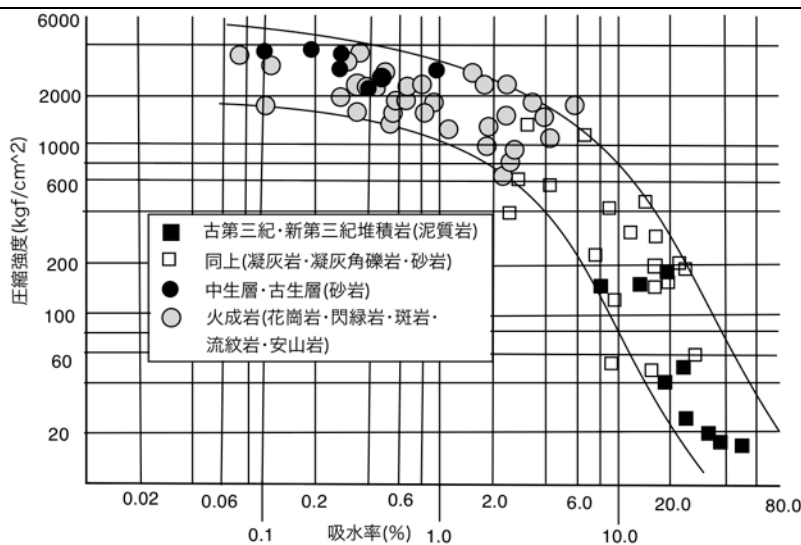
また、強制湿潤状態、強制乾燥状態の試料作製方法については、統一した基準がありません。強制乾燥状態の場合は炉で乾燥させますが、その温度と時間が異なっています。強制湿潤状態の場合は浸水時間、浸水方法が異なっています。浸水させて真空状態を1時間以上保って強制湿潤状態とする方法もあります（ISRM 指針）。

岩石の物理特性の一般値

岩石の比重（単位体積重量）は 2.0～3.0 程度の範囲に収まっています。比重が大きいものは、空隙率（有効間隙率）は小さくなり吸水率も小さくなります。

比重はコンクリート骨材の品質を決める重要な指標となっているほか、トンネルでは静岩圧（地圧）の算出に必要です。また、その岩石が特異な性質を持っているかどうかの判断基準となります。

例えば、コンクリートの粗骨材として使われる砂利は絶乾密度（強制乾燥密度）が 2.5g/cm³ 以上、吸水率が 3% 以下のものが標準となっています。



【図 6.3 吸水率—軸圧縮強度関係図（菊池，1990，30p より）】
 新第三紀層は一軸圧縮強度がほぼ 1,000kgf/cm² 以下で吸水率 5% 以上になると急激に強度が低下します。

【表 6.1 未風化岩の物理特性・力学特性（小島・中尾，1995，39p. 単位を MN/m² に変換）】

岩種	比重	空隙率(%)	吸水率(%)	圧縮強度(MN/m ²)	
				乾燥試料	湿潤試料
火成岩類					
流紋岩	2.5-2.7	1.0-7.0	0.1-5.6	-	-
安山岩	2.2-2.7	2.0-11.0	0.1-4.9	127-141	100-115
玄武岩	2.2-2.8	0.1-9.9	0.1-9.9	-	-
花崗岩	2.5-2.7	0.1-2.8	0.2-1.6	139-244	128-240
閃緑岩	2.7-2.9	0.1-4.0	0.1-0.4	199-290	-
かんらん岩	2.7-3.0	0.0-2.0	0.0-0.3	-	-
堆積岩類					
砂岩	1.9-2.6	0.5-42.0	0.7-13.8	107-255	103-255
シルト岩	2.2-2.5	2.2-24.0	0.4-6.3	-	-
頁岩	2.3-2.7	2.9-55.0	0.2-6.1	66-112	-
砕屑岩(火山性)	2.5-3.0	0.1-7.0	-	110-138	-
砕屑岩(石灰岩性)	2.3-2.5	1.0-35.0	-	-	-
ドロマイト	2.5-2.7	0.3-25.0	0.3-1.2	-	-
サンゴ	2.5-2.7	1.0-19.0	0.2-1.0	-	-
チャート	2.6-2.7	1.0-4.0	0.1-3.0	111-238	87-183
石炭岩(硬質)	2.5-2.7	0.8-27.0	0.1-1.8	133-199	-
石炭岩(軟質)	2.3-2.5	4.0-42.0	0.3-4.1	-	-
変成岩類					
片岩および粘板岩	2.6-2.8	0.4-10.0	0.1-0.8	103-189	-
片麻岩	2.6-3.2	0.3-0.4	0.1-1.0	168-250	158-255
珪岩	2.6-2.7	0.8-7.0	0.1-0.8	-	-
大理石	2.4-2.7	0.1-6.0	0.1-1.0	146-193	-

* 菊地宏吉，1990，地質工学概論．土木工学社．

岩盤の工学的性に関しては最もまとまった教科書です．

* 小島圭二・中尾健児，1995，地質技術の基礎と実務．鹿島出版会．

土質，地質，水に関する基礎的な事項から実務までバランスよくまとめられた本です．

6.2 岩石の力学的特性

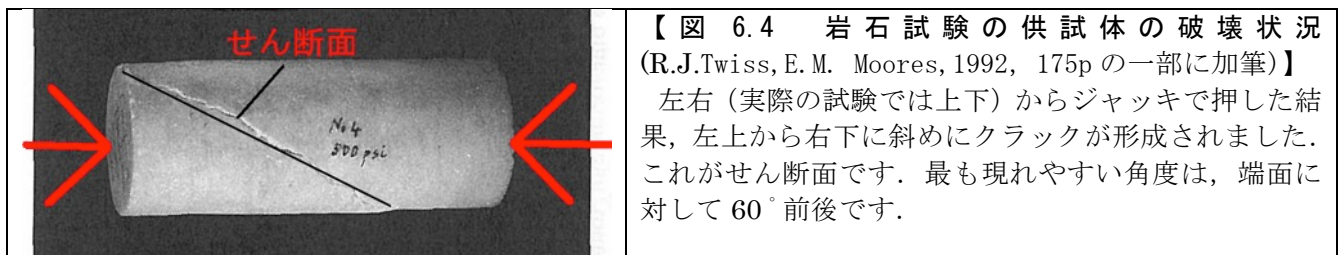
三つの応力

岩石の力学的特性を考える場合，つぎの3つの応力を考えます．

圧縮応力：その岩石の体積を縮ませるように作用する力．

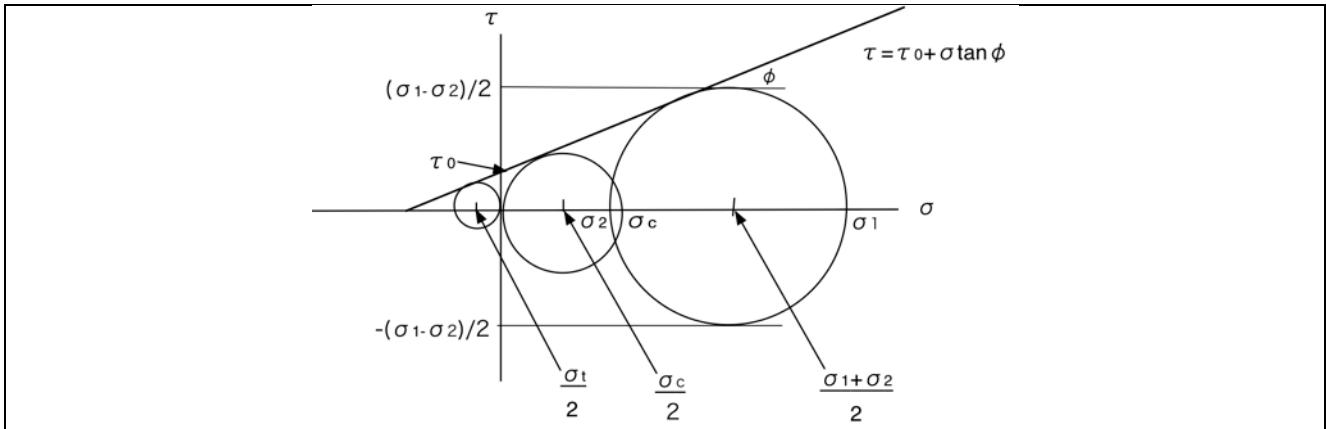
せん断応力：その岩石の一部を他の部分に対して移動させるように作用する力．

引張応力：その岩石に割れ目や裂け目を作るように作用する力．



【図 6.4 岩石試験の供試体の破壊状況 (R.J.Twiss, E.M. Moores, 1992, 175p の一部に加筆)】

左右（実際の試験では上下）からジャッキで押した結果，左上から右下に斜めにクラックが形成されました．これがせん断面です．最も現れやすい角度は，端面に対して 60° 前後です．



【図 6.5 モール円の説明図】

一軸圧縮状態では最大主応力のみ値 (σ_c) を持ち、他は 0 となるのでモール円は $(\sigma_c, 0)$ を中心とする円になり原点に接します。引張強度 (σ_t) は σ がマイナスになった状態ですから負の側に円の中心が来ます。

一軸圧縮強度と引張強度からせん断強度あるいは粘着力 (τ あるいは C) と内部摩擦角 (ϕ) を求めることができます。

なお、 ϕ が 0 となる粘性土の粘着力を一軸圧縮強度の 1/2 としてよい理屈もこれで理解できます。つまり、モールの包絡線が水平となるので、Y 軸との交点は $\sigma_c/2$ となります。

なお、原点に接していないモール円は封圧が作用しています。

このあたりのことを説明した本としては様々なものがありますが、以下のものが参考になります。

* 山口梅太郎, 西松裕一, 1991, 岩石力学入門 (第 3 版). 東京大学出版会.

初版は 1967 年に発行されました。日本語で書かれた岩石力学の教科書の古典に属すると思います。試験方法も含め岩石力学の基本を学ぶのに適した本です。

* 狩野謙一, 村田明広, 1998, 構造地質学. 72 - 78. 朝倉書店.

「I 地質構造の観察」から始まって構造地質学の修得に必要な基礎知識、「断層」、「褶曲」、「岩組織」、「貫入による構造」まで、豊富な写真と図で分かりやすく説明しています。非常に優れた構造地質学の教科書で、手元に置いておきたい本です。

* Robert J. Twiss, Eldridge M. Moores, 1992, Structural Geology. W. H. Freeman and Company.

一般的知識から始まって節理、断層、褶曲、レオロジー、微視的な変形までを説明しています。カラーではありませんが、非常にきれいな図と写真が付いています。

岩石の力学試験

岩石の力学試験としては、一軸圧縮強度試験、圧裂引張強度試験が一般的で、場合によっては軟岩の三軸圧縮強度試験を行います。圧縮強度試験では供試体の変形時の応力と歪を測定して、圧縮強度とともに静弾性係数、ポアソン比を求めます。圧裂引張強度試験で求められるのは引張強度のみです。


ここでは、一軸圧縮強度試験と圧裂引張強度試験について述べます。また、超音波速度測定についても触れておきます。

一軸圧縮強度試験

一軸圧縮強度は、供試体の側面を拘束しないで試験片に荷重をかけ、破壊させるのに要した応力で表されます。

一般的には円柱の試料を用います。試料は円柱の直径と長さの比が 1:2 となるような供試体を作ります。普通のボーリングコア（φ 66mm）の場合、採取されるコアの直径は 5cm です。長さ 10cm の供試体で試験を行います。

供試体の直径と長さの比や供試体の形による強度の違いについては、山口・西松の本に書かれています。



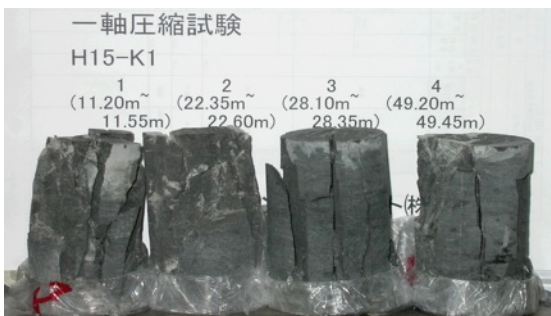
【図 6.6 岩石の一軸圧縮強度試験の装置】

圧縮方向の変位をひずみゲージあるいはダイヤルゲージで測定します。応力-ひずみ曲線から静弾性係数を求めます。

圧縮方向に直交した方向のひずみを測定すると圧縮方向ひずみと円周方向ひずみの比から静ポアソン比を求めることができます。一般的には岩石のポアソン比は、0.25 を用いてよいとされています。

$$\mu = \varepsilon_x / \varepsilon_y$$

μ : ポアソン比
 ε_x : 横ひずみ
 ε_y : 縦ひずみ



一軸圧縮試験
H15-K1

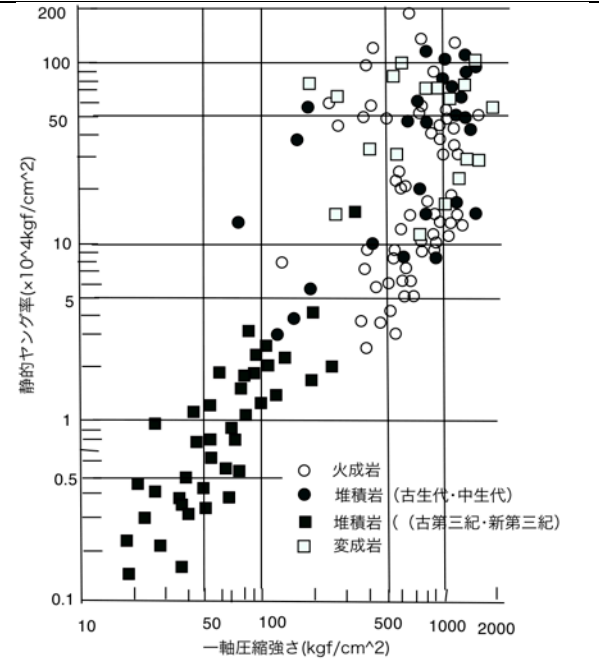
試料番号	採取深度 (m)
1	11.20m ~ 11.55m
2	22.35m ~ 22.60m
3	28.10m ~ 28.35m
4	49.20m ~ 49.45m

【図 6.6 一軸圧縮強度試験後の試料】

試料は砂岩・泥岩互層で、層理面がほぼ直立しているため破断面は層理面沿いの縦割れが目立ちます。

圧縮強度は左から 1=30MN/m², 2=50 MN/m², 3=52 MN/m², 4=52 MN/m² です。

一般的に岩石の破壊状況については、a) 特別な形を持たず不規則な破断面ができる場合、b) くさび形の破断面で破壊する場合、c) 縦方向（圧縮方向）に平行な破断面に沿って破壊する場合があります。



静的ヤング率 (x 10⁴ kgf/cm²)

一軸圧縮強さ (kgf/cm²)

- 火成岩
- 堆積岩 (古生代・中生代)
- 堆積岩 (古第三紀・新第三紀)
- 変成岩

【図 6.7 静弾性係数と一軸圧縮強度 (大久保・寺崎, 1971, 35p による)】

古第三紀・新第三紀堆積岩では、一軸圧縮強度は 20MN/m² 以下で、静弾性係数は 4,000 MN/m² 以下です。

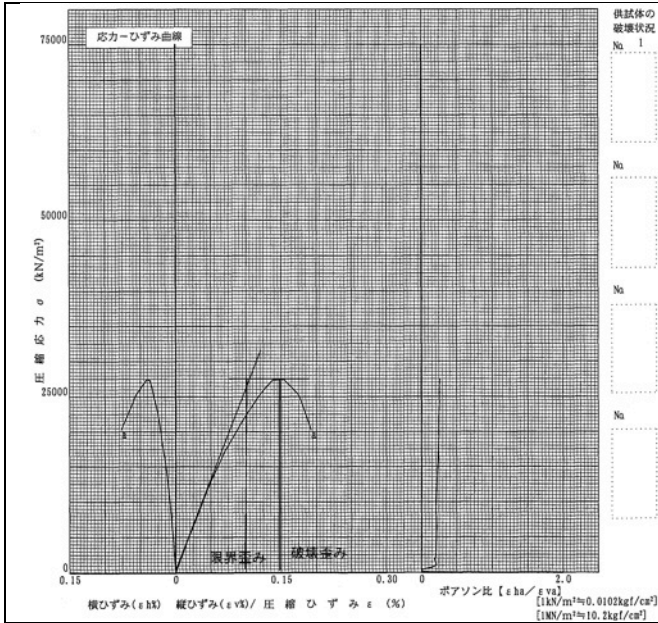
火成岩は一軸圧縮強度 20 MN/m² 以上で、静弾性係数は 2,000 MN/m² 以上となっています。

変成岩の一軸圧縮強度は 20~200 MN/m² とばらつきがありますが、静弾性係数は 10,000 MN/m² 以上となっています。

この図から分かることは、静弾性係数と一軸圧縮強度との間には有意の相関がありますが、強度が大きくなると両者ともバラツキが大きくなるということです。

なお、ここで示されている値は全体に高めにしている印象があります。実際には供試体中の微少な割れ目に左右されて、もっと低い値になることが多いです。

* 両対数表示であることに注意。



【図 6.8 応力-ひずみ曲線の模式図】

立ち上がりの部分は弾性変形を示しています。σ_c/2 を通る直線で静弾性係数を算出します。

この試験では、

一軸圧縮強度=27.5MN/m²

静弾性係数=26,000MN/m²

静ポアソン比=0.22

破壊ひずみ=0.15

でした。

σ_c/2 を通る直線と σ_c の交点のひずみは**限界ひずみ**と呼ばれ、トンネル掘削時に内空変位量がこのひずみより大きくなると要注意となります。この図の場合の限界ひずみは、0.10 です。つまり、トンネルの半径は 5m 程度ですから、壁面の変位が 5mm を越えると要注意と言うことになります。

引張強さ試験

本来の引張強さを求めるには一軸引張り試験を行いますが、手間がかかるため圧裂引張試験を行います。この場合は、試料の長さとの直径の比は 1:2 が一般的ですが、1:1 でも問題ないとされています。

得られた結果は一軸圧縮強度とともに粘着力、内部摩擦角の算定に用いられます。算定式は下のとおりですが、モール円を描いて作図で求めることもできます。

$$C = (\sigma_c \times \sigma_t)^{1/2} \div 2$$

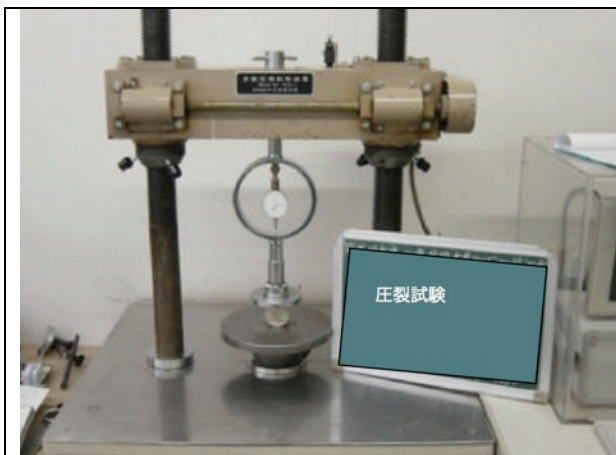
$$\phi = \sin^{-1}((\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t))$$

C : 粘着力(kN/m²)

φ : 内部摩擦角 (°)

σ_c : 一軸圧縮強度 (kN/m²)

σ_t : 圧裂引張強度 (kN/m²)



【図 6.9 引張り強さ試験の様子】

下の広い円盤の上に円筒形の供試体を横に置きます。供試体と荷重版は線で接しているため引張応力が発生するので、引張り強さを簡便に求めることができます。

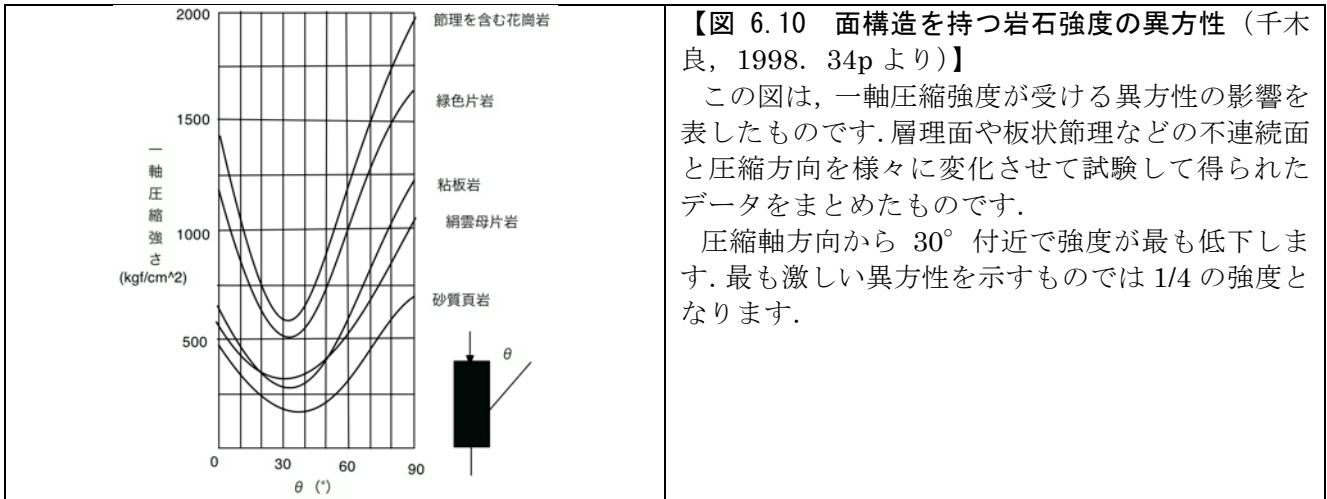
この場合、ひずみの測定はできないので破壊強度のみを求めます。

岩石強度の異方性

塊状で均質な岩石ではどの方向から力がかかっても強度はほぼ一定になりますが、層理面や片理面などによって異方性のある岩石では応力の方向によって強度が異なります。

この岩石試料の異方性による強度は、一軸圧縮強度では、応力の方向と不連続面の角度が 30° の時に最も低下します。

引張り強さも異方性の影響を受けます。例えば、安山岩の流理面が引張り強さ試験で破断する場合は、他の場合に比べて 15%ほど引張強さが低下するという実験結果があります。



6.3 弾性波速度 (超音波伝播速度)

供試体の弾性波速度は超音波伝播速度と呼ばれています。この値は岩石の特性を表す指標として使われます。また、直接的には岩石の動的特性の一つとして硬軟の度合いを示します。

弾性波 (elastic wave) は弾性体内を伝わる波の総称で、(超)音波、地震波などがこれに属します。この弾性波には縦波と横波があります。

縦波とは、弾性体の棒の一端を叩いた場合に生ずる棒の瞬間的な縮みと伸びが棒に沿って伝わるような波で、この縮みと伸び (体積変化) は棒の伸びの方向の変位によって発生します。

これに対して、横波は弾性媒質が波の進行方向に対し直角に振動する波で、体積変化を起こさずに形が変化する振動です。縄の一端を持って振った場合に発生する波が横波です。

伝わる速さは縦波が速く、最初に到着するので P 波 (primary wave) と呼ばれ、横波は S 波 (secondary wave) といいます。

これらの値から動弾性係数、動ポアソン比などを算出できます。

弾性理論では弾性波速度は次の式で与えられます。

$$V = (K / \rho)^{1/2}$$

ただし、

V : 弾性波速度

K : 弾性定数

ρ : 密度

つまり、弾性体は質量を持つバネであるために、ある区間を区切ると弾性波は隣の区間の質量に押されて変位することになります。この場合、慣性が働くので質量の大きいもの (密度の大きいもの) ほど、

変位が遅れることになり弾性波速度は密度が小さい物質ほど速くなります。

ただし、このことは弾性波探査で密度の大きい地質ほど地山弾性波速度が大きくなることと感覚的に一致しません。

それぞれの地質の岩石密度は、

- 未固結の堆積岩 (1.5g/cm³ 以下)
- 固結堆積岩 (1.8~2.7 g/cm³)
- 酸性火成岩 (2.4~2.7 g/cm³)
- 塩基性火成岩 (2.6~3.1 g/cm³)
- 超塩基性火成岩 (2.8~3.3 g/cm³)

となっていて、地山弾性波速度もほぼこの順番に大きくなります。

水に飽和した地層の弾性波速度は次の式で表されます(Wyllie et al., 1956)。

$$V_p = (V_m \times V_f) \div \{n \times V_m + (1-n) \times V_f\}$$

V_p : 地山弾性波速度(km/sec)

V_m : 岩石供試体の超音波伝播速度(km/sec)

V_f : 岩石内に含まれている水の弾性波速度(=1.5km/secとしてよい。)

n : 間隙率 (10%は0.1とする。)

つまり、地山弾性波速度は供試体の超音波伝播速度に比例し、間隙率に反比例します。地盤を構成する地質は岩石そのもの(あるいは土粒子)と空気と水(空隙)からなっています。地山弾性波速度に影響する因子は理論的な弾性体と異なり空隙(間隙率)が大きく影響します。

超音波伝播速度に影響を与える要因としては、試料の含水状態、異方性があります。特に、含水状態の影響は非常に大きいので、試料の保存には注意が必要です。



【図 6.11 超音波伝播速度の測定】

供試体の両側に発振子と受振子を密着させて、発振子で超音波を発生させて受振子で受信してその間の弾性波の透過時間を計ります。供試体の長さは普通 0.05m まで測定し、透過時間は 0.1 μs まで測定します。

一般に、供試体の両面にはグリスを塗って振動が良く伝わるようにします。

水と空気の弾性波速度

水の弾性波速度(音波速度:縦波速度)は水温 20℃の場合 1482.9m/sec, 水温 15℃の場合 1433.0m/sec で、ほぼ 1.5km/sec です。水の 20℃での密度は 0.9980g/cm³, 4℃でもっとも密度が大きくなり 1.000g/cm³ です。ここでは密度が大きくなると弾性波速度は小さくなるという関係が成立しています。

地下水探査では 1.5km/sec の層が、ほぼ地下水面を表すとして扱われてきました。

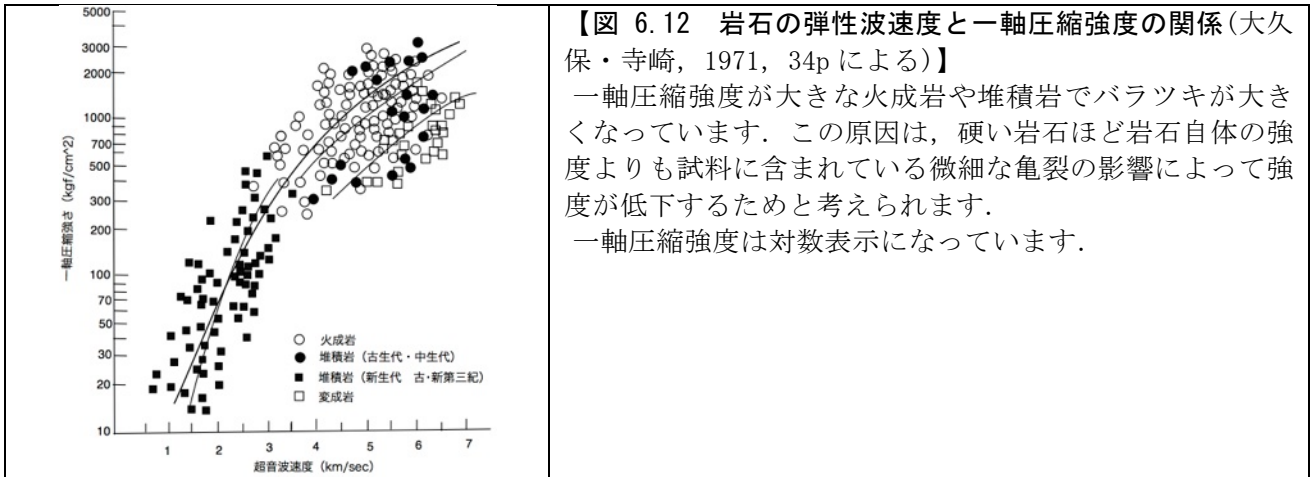
空気中の音波(弾性波)速度は 100℃の水蒸気では 471.5m/sec, 乾燥空気では 20℃の時 343.5m/sec, 0℃の時 331.45m/sec ですので、大体 350m/sec といったところです。

間隙水の中に気泡が入ると当然、地山弾性波速度は著しく低下します。このようなことから土木地質的には、水に飽和していない土砂の弾性波速度境界は、ほぼ 0.4km/sec 程度を示すとされています。

石油探査ではガス層の検出のために弾性波速度が著しく低下している箇所注目します。ガス(気体)の多い地層では弾性波速度が極端に小さくなるためです。

岩石の弾性波速度と一軸圧縮強度との関係

岩石の弾性波速度と一軸圧縮強度との関係は、図 6.12 のようになっています。つまり、岩石の弾性波速度は 7km/sec くらいでほぼ頭打ちになるのに対し、一軸圧縮強度は 500~4000kgf/cm² (約 50~400MN/m²) とかなりの幅を持っています。



近似式は $q_u = 10 \cdot V_p^3$

q_u : 一軸圧縮強度(kgf/cm²)

V_p : 供試体の弾性波速度(km/sec)

動ポアソン比・動せん断弾性係数・動弾性係数

超音波伝播速度測定では P 波速度と S 波速度を測定します。この二つから動的物性値を計算で求めることができます。岩盤としての動的物性値を得る場合は、PS 検層を行って P 波速度、S 波速度を求めます。

$$G_d = \rho \cdot V_s^2 \quad (\text{N/m}^2)$$

$$\nu_d = \frac{\{(V_p/V_s)^2 - 2\}}{\{2[(V_p/V_s)^2 - 1]\}}$$

$$E_d = 2(1 + \nu_d) G \quad (\text{N/m}^2)$$

ここで、 ν_d : 動ポアソン比

G_d : 動せん断弾性係数 (N/m²)

E_d : 動弾性係数 (N/m²)

V_p : P 波速度 (m/sec)

V_s : S 波速度 (m/sec)

ρ : 岩盤の密度 (kg/m³)

岩盤で動的物性値が必要になるのは、原子力発電施設やダム・長大橋などの大規模構造物の耐震性検討の場合です。

6.4 岩盤の変形特性

大規模構造物などを岩盤の上に載せた場合、岩盤がどのような変位をするかという岩盤の挙動特性のことを岩盤の変形特性と言います。求める物性値は変形係数などです。

岩盤では、岩石のように室内試験で物性値を求めることはできませんので、原位置で試験を行います。岩盤の変形特性試験は、1) ボーリング孔内での水平載荷試験、2) 岩盤に径 30cm 以上の鉄板を当てジャッキで荷重を加えて変位を測定する平板載荷試験、3) 斜め上方から力を加えるブロックせん断試験などがあります。

トータルとしての岩盤の変形は次の三つの変形の総和です。

- ① 岩石自体の変形：主に岩石の強度によって決まります。
- ② 岩盤内の不連続面の開口・閉口：走向・傾斜，連続性，稠密性（ちょうみつせい），開口性，連結性。
- ③ 不連続面に沿う すべり変位：不連続面の挟在物や面の粗さにより決まります。

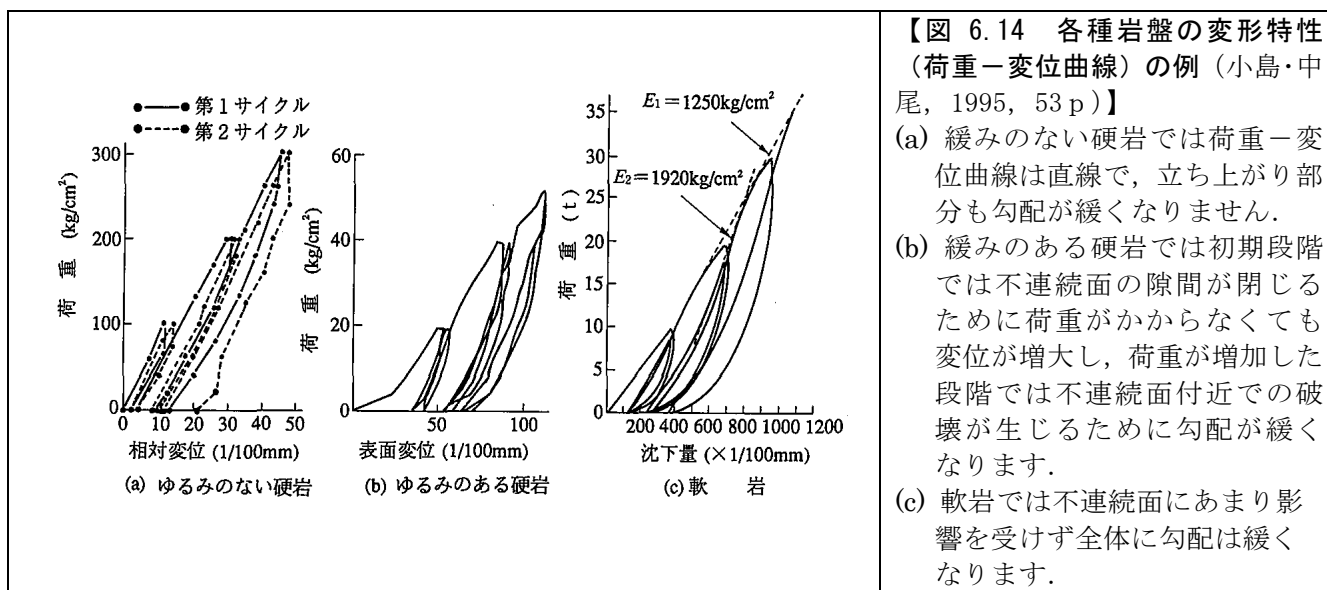
大きく分けると岩石の硬さと岩盤の不連続面の分布密度で岩盤の変形特性は決まると言えます。

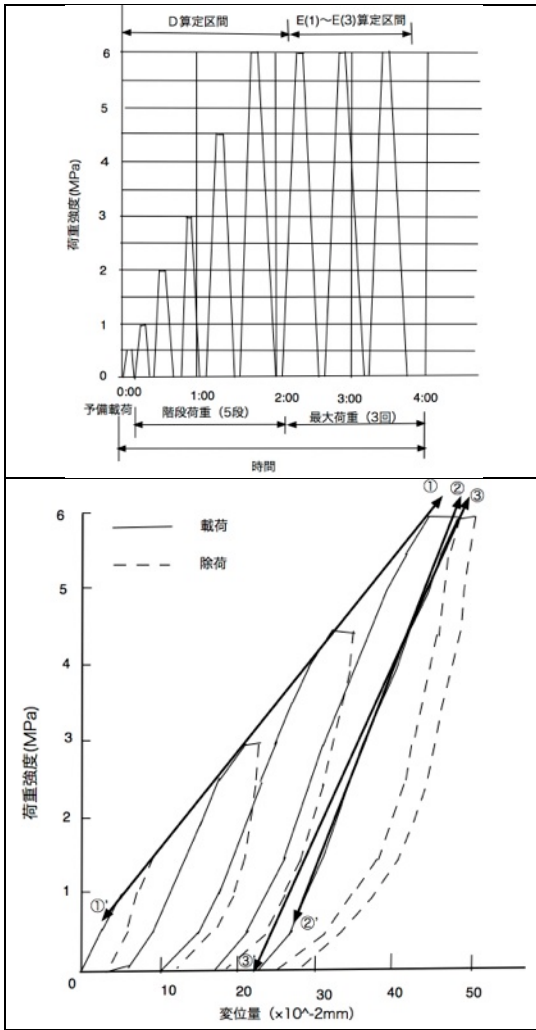
大↑岩石の硬さ↓小	岩石は硬いが不連続面が多く、 緩みがあるため岩石とは挙動が異なる。	岩石は硬く不連続面が少ない。
	岩石の固結度はかなり低く不連続面もあり岩石とは著しく異なった挙動を示す。	岩石の固結度はかなり低い但不連続面は少ない。
大←不連続面の密度→小		

【図 6.13 岩盤の変形特性を左右する因子】

岩盤の平板載荷試験

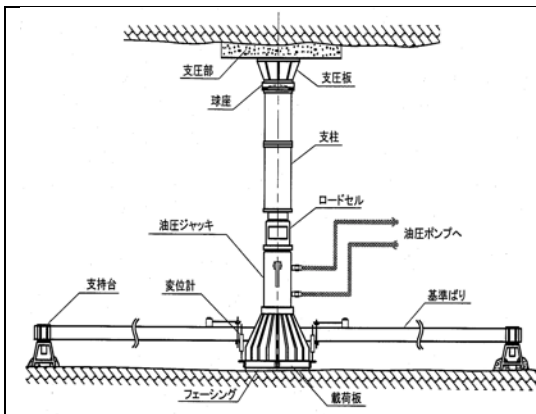
岩盤の平板載荷試験は、一般的には繰り返し載荷を行い、各種変形係数を求めます。





【図 6.15 岩盤の弾性係数 (鹿島建設土木設計本部編, 2003, 159-161. による)】

- ①-①' : 変形係数; 処女曲線の勾配から求められる係数. ゆるみの影響を受けた岩盤の変形特性を示します.
- ②-②' : 接線弾性係数; 荷重-変位曲線の直線部分の勾配から求められる係数. 岩盤が弾性的に挙動する場合の変形特性を表します. ダムや大規模空洞などの設計で, 弾性応力・弾性変形を求める場合, 一般的に用いられます. つまり, 弾性解析の弾性係数, 非線形解析の初期変形係数として用いられます. 応力レベルにより勾配が変化するので実際の施工で発生する応力レベルを再現するように荷重をかける必要があります.
- ③-③' : 割線弾性係数; 載荷時および除荷時の変形曲線のうち始点と終点を結ぶ直線の勾配から得られる係数. ある程度岩盤の非線形的な挙動を反映した変形特性といわれています.



【図 6.16 平板載荷試験装置】

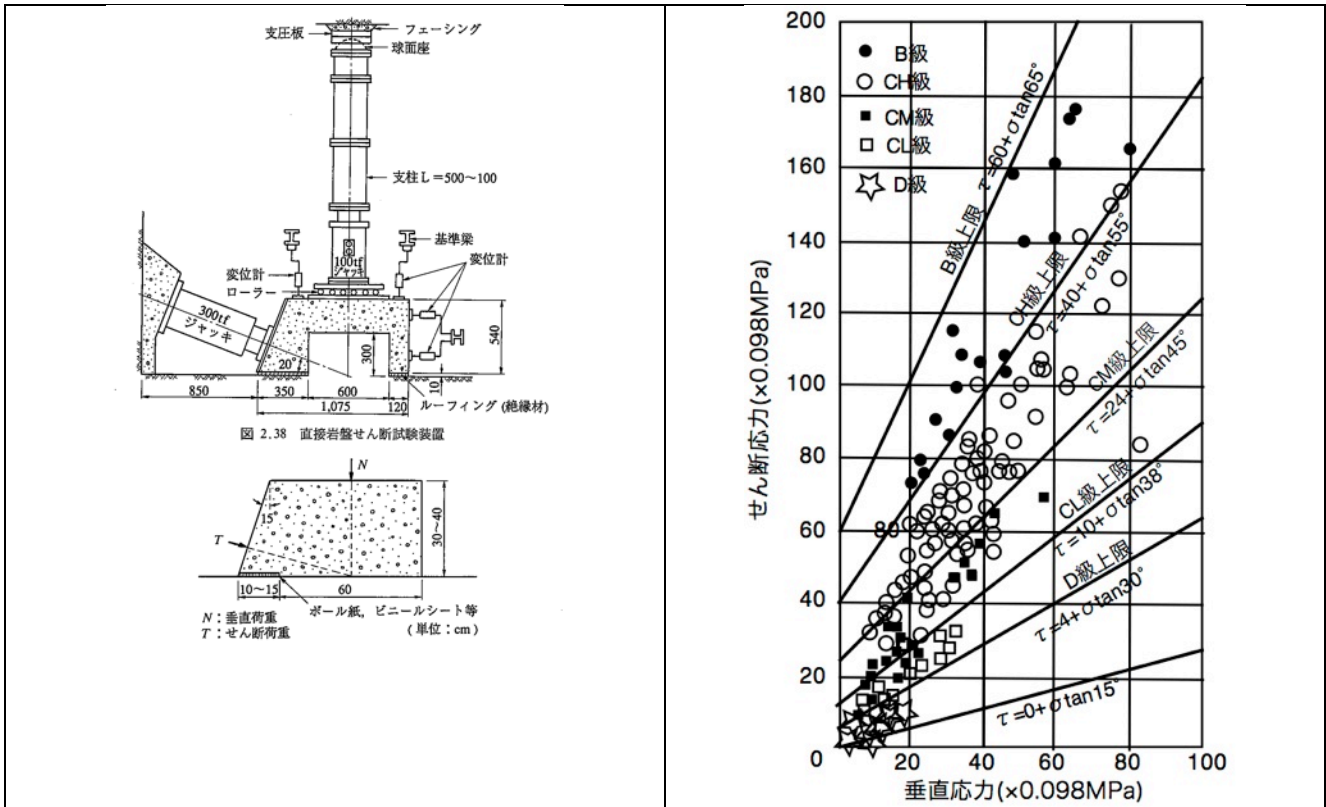
載荷板の径は, 30cm 以上です. 試験では軸を鉛直に保たないと支柱がはずれて事故を起こします. 変位計は加圧によって岩盤が変位する際の影響を受けない位置に支持台を置き基準梁を渡して, それに取り付けます.

この図は調査横坑内での状態を描いているので横坑の天井を反力としています. ピット掘りで行う場合は荷重として重機を載せたり, アンカー付きの支柱を立てたりして反力とします.

詳しくは, 「原位置岩盤試験法」(土木学会, 2000) を参照して下さい.

6.5 岩盤の強度特性

岩盤の圧縮強度自体が問題となることは少なく, 実際には岩級区分を行って各岩級のせん断強度を現場試験で求め, それに見合う形の構造物を検討します. つまり, 岩盤で問題となるのはせん断強度です. これはブロックせん断試験あるいはロックせん断試験を行って求めます.



【図 6.17 岩盤せん断試験の装置と試験結果 (菊地, 1990, 64-123 などによる)】

左上：ロックせん断試験の模式図．岩盤を正方形に切り出しその上をコンクリートで覆って水平面に対して約 20° 傾斜した方向から下向きにジャッキで荷重をかけます．このような試験方法をロックせん断試験と言います．岩盤を切り出さずにコンクリートのブロックを水平な岩盤に打設して試験を行う方法をブロックせん断試験と呼んで区別しています (左下の図)．

右：岩盤せん断試験の結果．岩級区分を行った岩盤で試験を行い，それぞれの岩級のせん断強度 (粘着力) と内部摩擦係数 (内部摩擦角) を設定します．

この図では，標準的な岩盤である CM クラス場合，粘着力 $24\text{tf}/\text{m}^2$ ($245\text{kN}/\text{m}^2$)，内部摩擦角 45° となっています．

ダム，原子力発電所，地下発電所，石油地下備蓄施設などの大規模に岩盤を掘削する構造物では，平板載荷試験や岩盤せん断試験をそれぞれの岩級ごとに実施します．その場合，一組の粘着力と内部摩擦角を求めるには，少なくとも一つの岩級の岩盤について 4 個の試験を行う必要があります．そういう意味で，岩盤での試験というのは，試験場所の選定から始まって，かなりの日数と労力それに費用がかかります．試験は出来たけれどもデータとして使えないという場合もあり，非常に苦勞の多い試験です．

6.6 岩盤の透水性

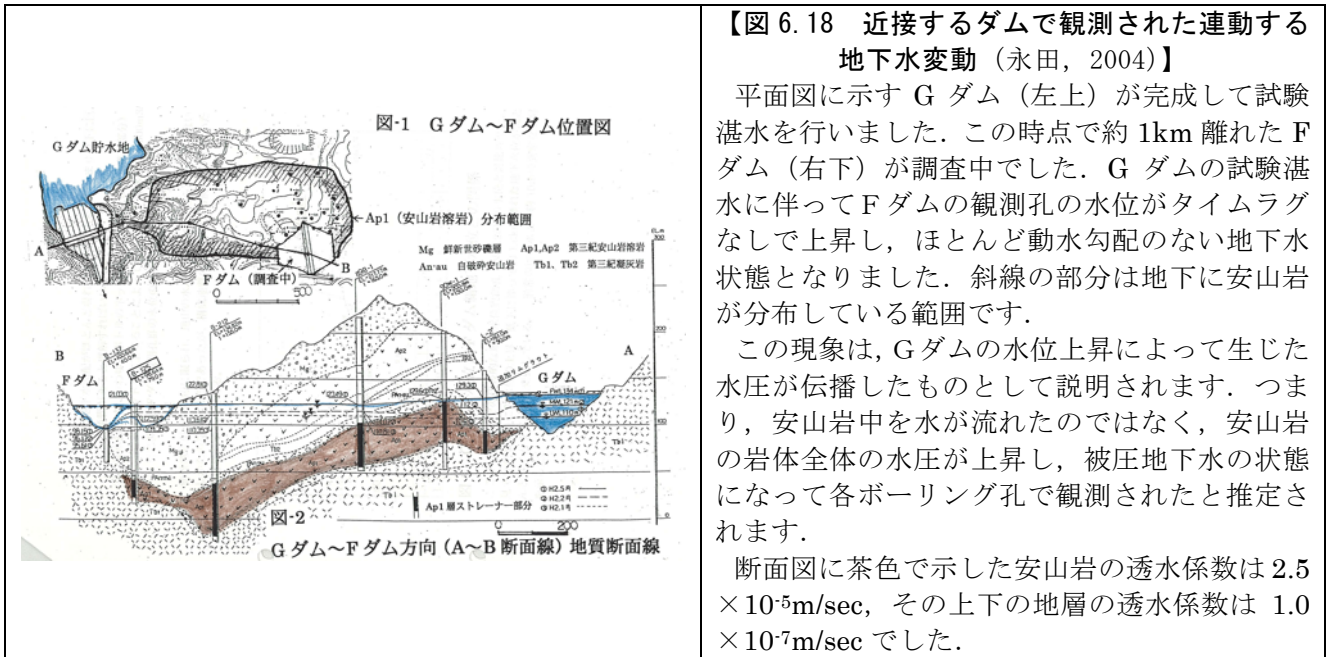
岩盤の透水性は岩石自体の透水性と不連続面の透水性によって左右されます．

第四紀の火砕岩類，例えば支笏溶結凝灰岩のような間隙率の大きい岩盤では，岩石材料内部での透水性が比較的高くなります．しかし，溶結凝灰岩の場合，冷却時の収縮亀裂が形成されるので，このような亀裂の透水性も合わせて検討する必要があります．

これに対して，花こう岩のような硬質岩盤では岩石の構成粒子間の結合が強く，節理に代表される不連続面の透水性に比べると岩石材料内部の透水性は無視できるほど小さくなります．

岩盤内の水の流れは巨視的にはダルシー則に従うとされています．

ここでは、亀裂の多い安山岩の岩体を通じて地下水が瞬時に伝達したという事例を紹介します。



6.7 軟岩の工学的性

軟岩の特徴

軟岩というのは堆積年代が比較的新しい砕屑性堆積岩や火山砕屑岩を言い、一軸圧縮強度の目安としては 25MN/m^2 以下の岩石を指します（地盤工学会，2004，?p）。土木工事ではリッパーでの作業が可能な岩盤のことです。

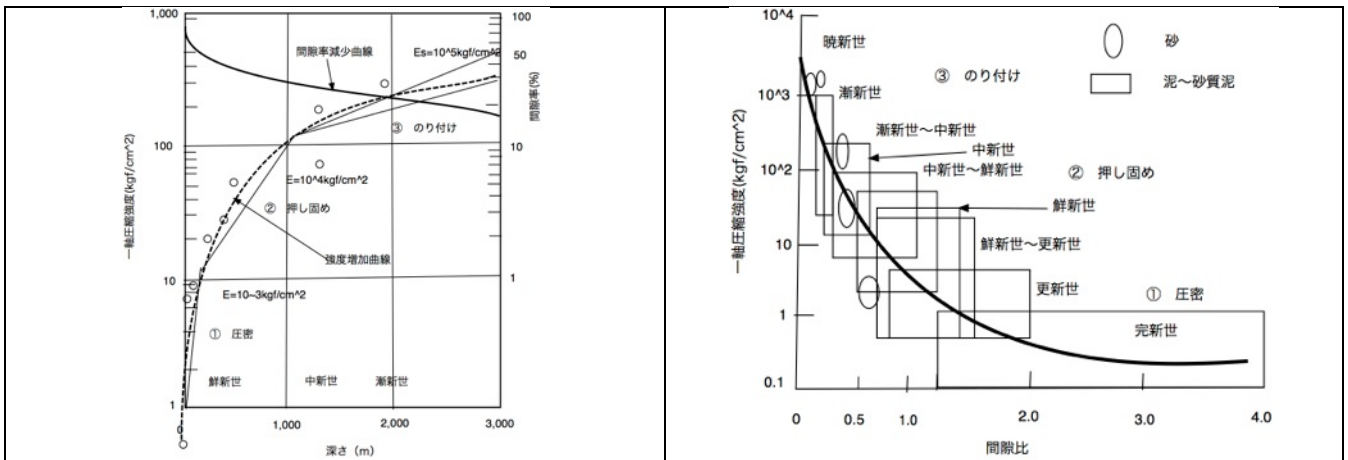
軟岩は土木工事で様々な障害を発生させるため要注意岩盤です。ここでは、軟岩の特徴・工学的性をまとめて述べます。

表 6.1 軟岩の分類と特徴

堆積性軟岩	<ul style="list-style-type: none"> 土砂の圧密領域からセメンテーション領域のもので、層理面による異方性を示しますが、比較的等方均質です。 北海道では中軸帯の西側に分布する中新世の地層が代表的なものです。また、瀬棚地方に広く分布する瀬棚層（砂質の半固結の岩）も軟岩の代表的なものです。
風化性軟岩	<ul style="list-style-type: none"> 硬岩から土に移行する風化過程で形成されます。 代表的なものは花こう岩類の風化によって形成されるマサで、もとの岩の構造を残すものから完全に土砂化したものまであります。 このような風化作用は応力解放による亀裂の発達、浸透水の凍結融解や化学的溶脱などによって進行します。

火山性軟岩

・火山や温泉の活動に伴う熱水変質で形成されるものです。このような熱水変質では膨潤性鉱物であるスメクタイトなどが形成されることがあります。



【図 6.19 堆積性軟岩の形成 (岡本ほか, 1984. この図は菊池, 1990, 38-39. による)】

左: ① の段階はまだ土の性質が強く上載荷重が増加するにつれて間隙が減少し強度が急激に増加します。間隙水も荷重を分担します。
② では土粒子の骨格構造が荷重を受け持っており、一軸圧縮強度の増加と間隙率の減少が比例しています。
③ では土粒子の変形やシリカ・炭酸カルシウムの沈着が起こります。岩石化が進行する過程です。
右: 間隙比 (土粒子の体積に対する空隙の体積) と一軸圧縮強度の関係を示したもので、時代が経過するにつれて強度が増加し間隙比が減少します。

軟岩の工学的性

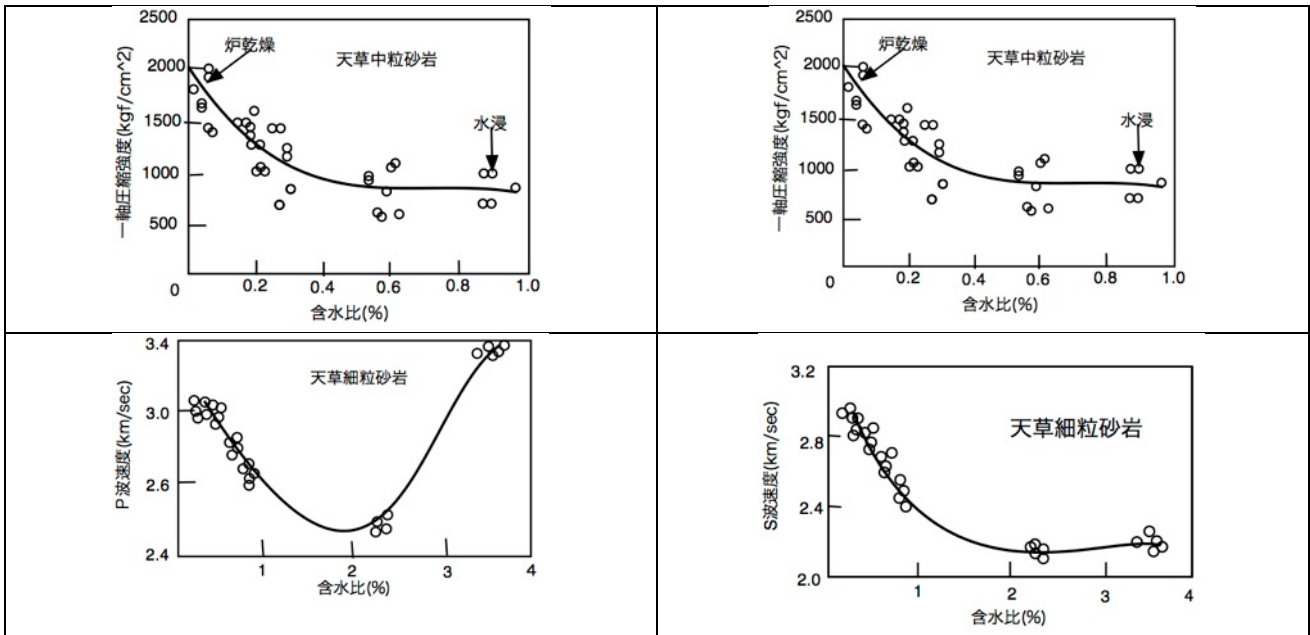
軟岩はほぼ固結しているという点では岩ですが、間隙率が高く建設工事で人工改変すると独特の挙動を示します。軟岩特有の工学的性としては次の4つが挙げられます。

- (1) 含水による強度の低下
- (2) スレーキング (slaking) 特性
- (3) スウェリング (swelling) 特性
- (4) クリープ (creep) 特性

このほかに、トンネルでは周辺地山が塑性流動して押し出してくる現象をスクイーディング (squeezing) と呼んでいます。これも軟岩に特有の現象です。

(1) 含水による強度の低下

軟岩は水を含むと強度が低下します。これは軟岩では間隙率が大きいので吸水により間隙が水で満たされ有効応力が低下するのが一つの原因と考えられます (図 6.20)。また、堆積軟岩や凝灰岩では吸水膨張する粘土鉱物 (スメクタイトなど) を含んでいるために体積が増加して強度が低下します。このようなデータは数多く得られています。



【図 6.20 含水比と一軸圧縮強度・弾性波速度の低下

(岡本ほか, 1984. 原論文は井上・大見・守田, 1972)】

炉乾燥状態の試料に対して岩石の含水比が大きくなると、一軸圧縮強度が砂岩では 1/2, 凝灰岩では 1/3 に低下しています。

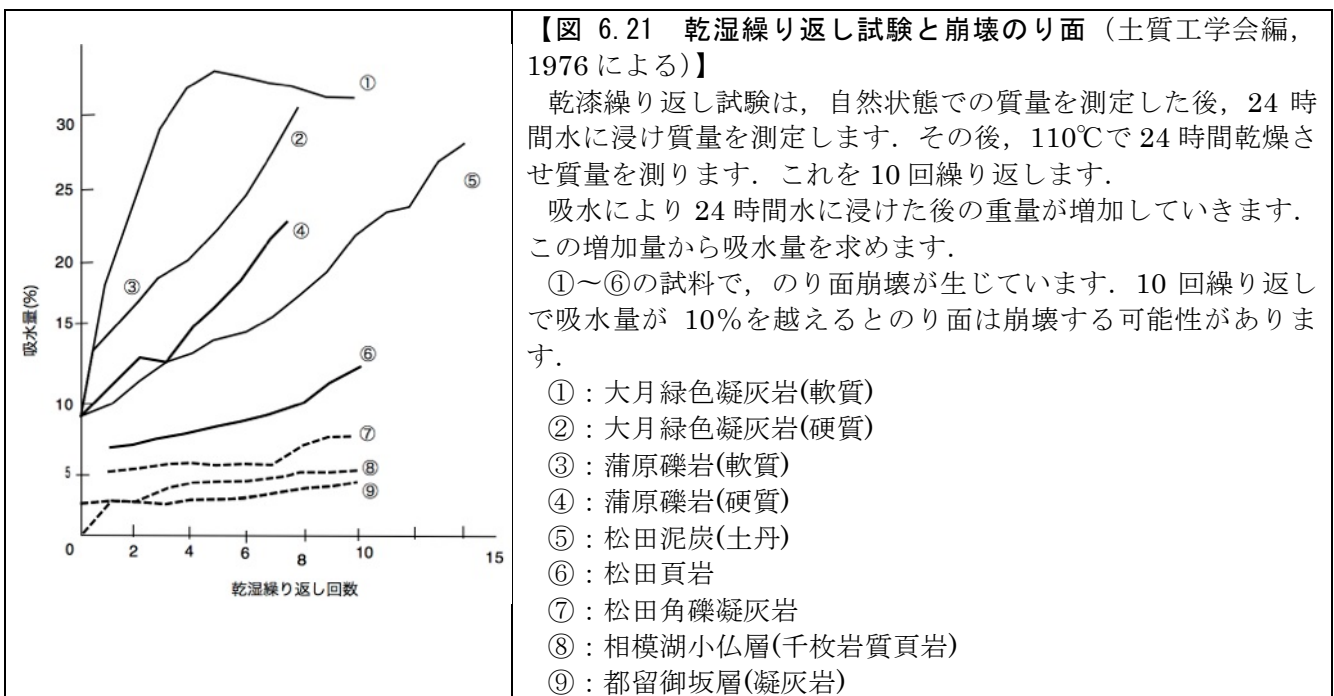
弾性波速度は含水比 2%で最も小さな値をとっています。

この井上ほかの論文は「J-Stage」で検索すると全文見ることができます。日本鉱業会誌です。

(2) スレーキング特性

スレーキングというのは、岩が乾湿繰り返しを受けて鉱物粒子間の結合が破壊され強度が低下し、ついには土砂化する現象です。

工学的目安としては「岩の乾湿繰り返し吸水率試験」を行って見当を付けます。この試験は切土のり面の風化に対する耐久性を求めることを目的としていますが、トンネルでの膨潤性地圧発生を目安としても使うことができます。



【図 6.21 乾湿繰り返し試験と崩壊のり面 (土質工学会編, 1976 による)】

乾湿繰り返し試験は、自然状態での質量を測定した後、24 時間水に浸け質量を測定します。その後、110℃で 24 時間乾燥させ質量を測ります。これを 10 回繰り返します。

吸水により 24 時間水に浸けた後の重量が増加していきます。この増加量から吸水量を求めます。

①～⑥の試料で、のり面崩壊が生じています。10 回繰り返して吸水量が 10%を越えたとのり面は崩壊する可能性があります。

- ①：大月緑色凝灰岩(軟質)
- ②：大月緑色凝灰岩(硬質)
- ③：蒲原礫岩(軟質)
- ④：蒲原礫岩(硬質)
- ⑤：松田泥炭(土丹)
- ⑥：松田頁岩
- ⑦：松田角礫凝灰岩
- ⑧：相模湖小仏層(千枚岩質頁岩)
- ⑨：都留御坂層(凝灰岩)


【表 6.2 吸水増加率と適正のり勾配（土質工学会編，1976 による）】

視察による分類	対象岩種の例	乾漆繰り返し試験による吸水増加率（%/回）	のり勾配	
			地下水なし	地下水あり
①固結度が高いもの	古第三紀以前の頁岩 固結凝灰岩	1.0 以下	1:0.8	1:1.0
②比較的固結度が低いもの	新第三紀層 蛇紋岩	1.0-2.0	1:1.0	1:1.2
③極めて固結度が低いもの	凝灰質泥岩 鮮新世または更新世の粘土	2.0 以上	1:1.2	1:1.5

*上の表は高速道路のり面の施工実績から求めたものです。

(3) スウェリング特性

スウェリングというのは土粒子を構成する粘土鉱物結晶の層格子の間に水が吸着されて結晶の格子の間が拡大して体積増加が起こる現象（内部膨潤）が典型的なものです。そのほかに、土粒子の間に水が浸入して土粒子間の空隙が拡大して体積増加が起こる（外部膨潤）こともあります。

	<p>【図 6.22 ベントナイトの膨潤（須藤談話会編，2000，200p）】</p> <p>ベントナイトはモンモリロナイトを主成分とする粘土で，層構造をしています。この粘土鉱物を水に入れると層と層の間に水分子が浸入し層の間を押し広げます。これが「膨潤」（内部膨潤）です。</p> <p>この写真のように体積が 10 倍程度まで大きくなり，水の中で安定した粘度，懸濁安定性を示すので，ボーリング泥水やグラウト剤として利用されます。</p>
--	---