岩石の異方性及びそれに対する吸水率の影響

大塚 康範*・小野寺 透*

Anisotropy of Rocks and Effect of Water Absorption

by Yasunori OTSUKA and Tōru ONODERA

Abstract

The deformation and movement developed by the geological structure in some regions yield faults, fractures, folds and so on. Therefore approach to the strength properties of rock mass is led by the understanding of the orientations of strength anisotropy of rocks due to these geological structures.

In this paper the authors described the result of an experimental study on the change of strength and deformation characteristics with water absorption, taking their anisotropy into account. On the one hand tensile strength of rocks has been determined by the point load test on untrimmed test specimens to know the influence of water absorption to strength. On the other hand elastic wave velocities of specimens have been measured and the dynamic moduli E_d have been calculated in view of their deformation anisotropy.

The tensile strength is denoted " σ_{ta} " and " σ_{to} " respectively in the direction normal and parallel to the discontinuity planes such as joint surfaces. Similarly the dynamic modulus in the direction normal to the discontinuity planes is called " E_{da} " and that parallel to them " E_{do} ".

The results obtained as to the dynamic modulus and point load test are summarized as follows:—(1) Degree of strength anisotropy shown by point load test, " σ_{ta}/σ_{to} " and that by dynamic modulus, " E_{da}/E_{do} " correlate nearly with a straight line. (2) While degree of anisotropy of dynamic modulus " E_{da}/E_{do} " is decreased, that of strength anisotropy " σ_{ta}/σ_{to} " is increased when water is taken into discontinuity planes.

1. はじめに

ダムや橋脚などの大構造物の安定解析に層理および節理、断層は重要な要素となる。このような巨視的な地質不連続面をもつ岩体を形成する岩石の微視的な性質が巨視的な分離面をもつ岩体の異方性とどのように関連しているかは興味のある点である。そこで本研究では主に粘板岩、輝緑凝灰岩、石灰岩からなる岩盤から岩石試料を採集し、その力学的異方性の程度を含水状態を異にする飽和と乾燥の場合について検討したものである。すなわち、本研究では、岩質が一定と見做せるような岩石について巨視的な分離面との関係を明らかにし、ついで実験室と現場において点載荷引張り試験を行った。次に、その結果を弾性波伝播速度の測定結果と比較し岩石の力学的異方性についての考察を試みた。同時に点載荷試験等の岩石試験による岩体の強度的性質の把握への可能性についても検討した。岩石試料は荒川水系中津川、埼玉県秩父郡大滝村に建設予定の滝沢ダム工事用試掘坑内から

採取した。

2. 試料採取地点と原位置点載荷引張り試験実施地点の概要

試料は埼玉県秩父郡大滝村のジュラ紀大滝層内に建設予定の滝沢ダムにおけるダム工事用調査坑内より採取した。坑内で見られる岩石は砂質まじりの粘板岩、石灰岩、輝緑凝灰岩が主でそのほかに輝緑凝灰岩混りのチャートが少量介在している。試料採取にあたっては上記の4種類の岩石について節理もしくは層理面の発達した明らかに方向性をもつ岩石を採取するよう心掛けた。

岩石試料採取と併行して、坑内で非整形試験片による点載荷試験を実施した。岩石試料採取と点載荷試験実施地点については、その地点の地質的な特徴から左岸の標高 500 m の坑や標高 560 m の坑では湧水は少ないが自然含水状態にあり、右岸側ではかなり湧水が見られる所が多く採取した岩石はかなり吸水しているものが多かった。これらについてはこの地点での大規模な断層 F-0、F-0'、F-0'' の存在が影響しているものと考えられてい

* 埼玉大学理工学部

る。次に試料採取地点と地質構造の特徴について述べる。

試料採取地点（主に左岸上部）では低角度断層 F-0（走向 NW-SE、傾斜 NE に $30^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 程度）を境にして地層の岩質や岩相も変化しているものと考えられ、地層も小断層によって分断され、地質構造上の特徴の把握を困難なものにしている。左岸では褶曲が見られるため、剝離性の著しい粘板岩や輝緑凝灰岩では、褶曲に対する力学的挙動が問題になるものと考えられる。そこで剝離性に富み均質ではあるが明らかに力学的異方性が存在すると考えられる岩石を次点で採取した。

粘板岩	CDL 50 試験坑
石灰岩	BL 54 坑
輝緑凝灰岩	BL 56 上流支坑
チャート	CDR 46 坑

試料を採取した横坑内における地質不連続面の方位・角度測定結果をステレオ投影して節理面および層理面を含む地質的不連続面の統計的検討を行なった。その結果、左岸上部標高では、走向 NE-SW、傾斜 NW のものが多く、また左岸下部標高では走向 NW-SE、傾斜 NE のものが主である。試験用の岩石ブロックもこの卓越方向との関係を明らかにした上で採取した。即ち、左岸上部標高から採取した石灰岩の層理面は $N30^{\circ}E20^{\circ}W$ 、節理面 $N60^{\circ}W60^{\circ}NE$ 、輝緑凝灰岩は層理面 $N25^{\circ}W32^{\circ}W$ 、節理面 $N50^{\circ}E44^{\circ}SE$ 、左岸下部標高から採取した粘板岩

では層理面 $N56^{\circ}W58^{\circ}N$ 、節理面 $N25^{\circ}E70^{\circ}W$ である。層理面と節理面との関係が最も明瞭な粘板岩のステレオ投影図を 図-1 に掲げておく。

3. 実験手順について

(1) 現場における点載荷試験

点載荷試験の装置は、半球突起の加圧棒とそれを支える枠組そして加圧するためのジャッキ、ジャッキの加圧の大きさを知るためのブルドン管およびブルーピングリングから成っている¹⁾。この装置を坑内に持ち込んで坑内の様々な所から方向性のはっきりした岩石をとり出し非整形試験片による点載荷試験を行なった。試験片の数は節理面に平行と垂直な方向にそれぞれ 15~20 ケ程度とした。また、点載荷試験の理論的解析が載荷点と支点を結ぶ直線を直径とする球状の物体の加圧を想定しているので試験片はこれに叶うようなものを使用した。試験機の加圧能力が最大 5 ton であるため供試体は支点間距離で 5~10 cm 程度のものを取り上げた。

(2) 室内岩石実験

調査坑から採取してきた砂質まじりの粘板岩、石灰岩、輝緑凝灰岩およびチャートのブロックから直径 28 mm、長さを直径の 1~2 倍程度の供試体を整形して岩石試験を実施した。供試体の抜き取りに際しては同一岩石について、節理または層理面に平行と垂直な方向をそれぞれ 5~10 ケ程度得られるようにした。次に岩石の真比重 G_s などの物理試験および乾燥状態と湿潤状態の岩石供試体についてパルス法による弾性波速度の測定を行ない岩石の力学的異方性と弾性波速度との相関を考察した。

室内点載荷試験に際しては、室温で一週間程度水に浸潤させたものおよび炉乾燥状態の供試体について節理面に平行と垂直な方向にそれぞれ 15~20 ケ程度の試験を行なった。また、室内試験の加圧装置としては、ジャッキを用いずに平衡式 30 t 万能試験機を用いた。

4. 試験結果とその整理

岩石の物理試験による物性値として乾燥密度 G_{dry} 、湿潤密度 G_{wet} 、実効間隙率 (net porosity) $n_e\%$ 、吸水率 $w_{sat}\%$ 、比重試験による真比重 G_s 、そして水分の多少による V_p と V_s の違いを知るため乾燥状態と湿潤状態の V_p と V_s を取り上げた。弾性波の測定に関しては節理面に垂直な方向 (a 軸方向) と節理面に平行 (c 軸方向) の 2 方向を測定した。 a 方向の P 波、S 波の伝播速度を V_{pa} 、 V_{sa} 、 c 方向のそれを V_{pc} 、 V_{sc} として表記した。(表 1~5 参照)

図-1 試料採取横坑内におけるステレオ投影図 (ウルフ網)

表-1 岩石物性値 (輝緑凝灰岩)

a 軸方向 (節理面に垂直)

供試体 番号 No.	乾燥密度 G_{dry}	湿潤密度 G_{wet}	実効 間隙率 n_e	吸水率 $w_{sat}\%$	備 考
1	2.72	2.72	0.59	0.22	
2	2.73	2.74	0.52	0.19	
3	2.73	2.74	0.50	0.18	
4	2.73	2.73	0.36	0.13	
5	2.71	2.72	0.60	0.21	
6	2.71	2.71	0.54	0.20	
7	2.68	2.69	0.50	0.19	
8	2.73	2.73	0.65	0.24	
9	2.68	2.69	0.97	0.36	
10	2.68	2.68	0.52	0.19	

c 軸方向 (節理面に平行)

1'	2.70	2.70	0.65	0.24	
2'	2.70	2.70	0.55	0.20	
3'	2.77	2.77	0.48	0.17	欠 損
4'	2.71	2.71	0.53	0.19	
5'	2.73	2.73	0.36	0.13	
6'	2.72	2.72	0.74	0.27	

表-2 岩石物性値 (粘板岩)

a 軸方向

No.	G_{dry}	G_{wet}	n_e	$w_{sat}\%$	備 考
1	2.65	2.65	0.45	0.17	
2	2.63	2.64	0.64	0.24	
3	2.65	2.65	0.50	0.19	
4	2.62	2.62	0.43	0.16	
5	2.60	2.60	0.87	0.34	
6	2.58	2.59	1.39	0.54	

c 軸方向

1'	2.57	2.60	2.83	1.10	
2'	2.62	2.64	2.01	0.77	
3'	2.64	2.67	2.86	1.08	欠 損

表-3 岩石物性値 (石灰岩)

a 軸方向

No.	G_{dry}	G_{wet}	n_e	$w_{sat}\%$	備 考
1	2.69	2.69	0.41	0.15	
2	2.72	2.73	0.51	0.19	欠 損
3	2.67	2.67	0.28	0.10	
4	2.63	2.64	1.23	0.47	
5	2.62	2.64	1.72	0.65	
6	2.67	2.67	0.55	0.21	

c 軸方向

1'	2.69	2.69	0.67	0.25	
2'	2.63	2.64	0.43	0.16	
3'	2.65	2.66	0.45	0.17	

表-4 節理面の卓越方向ごとの V_p

吸水状態

岩 石	方 向	試料数	範 囲 (km/s)	平 均 (km/s)
粘 板 岩	V_{pa}	5	5.8~6.9	6.3
	V_{pc}	3	6.3~6.7	6.5
石 灰 岩	V_{pa}	5	6.1~7.6	7.0
	V_{pc}	3	6.6~7.9	7.2
輝緑凝灰岩	V_{pa}	7	5.6~6.8	6.2
	V_{pc}	4	6.8~7.8	7.2
チ ャ ー ト	V_{pa}	2	5.9~6.1	6.0
	V_{pc}	—	—	—

乾燥状態

粘 板 岩	V_{pa}	5	5.0~5.3	5.1
	V_{pc}	3	5.2~5.9	5.6
石 灰 岩	V_{pa}	5	5.7~7.2	6.2
	V_{pc}	3	5.7~7.1	6.3
輝緑凝灰岩	V_{pa}	7	5.3~6.2	5.5
	V_{pc}	4	6.1~7.0	6.5
チ ャ ー ト	V_{pa}	2	5.5~5.6	5.5
	V_{pc}	—	—	—

表-5 点載荷試験による岩石の引張り強さ
試掘坑内（自然含水状態）

岩 石	方向	試料数	範 囲 kg/cm ²	平 均 kg/cm ²	σ_{ta}/σ_{tc}
粘 板 岩	σ_{ta}	12	5.1~20.5	12.5	0.66
	σ_{tc}	13	7.6~35.7	19.0	
石 灰 岩	σ_{ta}	16	12.4~35.6	21.6	0.60
	σ_{tc}	16	20.2~54.0	35.9	
輝 緑 凝 灰 岩	σ_{ta}	11	6.7~29.5	13.6	0.33
	σ_{tc}	11	15.6~77.5	41.5	
チャート	σ_{ta}	—	—	—	—
	σ_{tc}	—	—	—	

炉乾燥（乾燥状態）

岩 石	方向	試料数	範 囲 kg/cm ²	平 均 kg/cm ²	σ_{ta}/σ_{tc}
粘 板 岩	σ_{ta}	20	5.3~ 23.4	24.5	0.68
	σ_{tc}	30	11.6~ 56.7	35.9	
石 灰 岩	σ_{ta}	16	32.7~143.7	82.1	0.88
	σ_{tc}	14	39.9~122.3	93.7	
輝 緑 凝 灰 岩	σ_{ta}	12	16.1~ 97.4	49.8	0.47
	σ_{tc}	17	37.1~182.0	106.0	
チャート	σ_{ta}	15	20.6~138.7	71.4	0.70
	σ_{tc}	15	15.5~147.1	102.2	

点載荷試験の結果の整理には平松らの非整形試験片による引張り強さの弾性論的解釈による解析結果¹⁾を利用した。即ち、

引張り強さ

$$\sigma_t = 1.4 \frac{F_0}{2\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \approx 0.9 \frac{F_0}{D^2}$$

である。

(但し、 F_0 は破壊荷重、 D は加圧棒の突起間距離とする。)そして、 a 軸方向、 c 軸方向の引張り強さをそれぞれ σ_{ta} 、 σ_{tc} と書き表して結果を整理した。点載荷試験による引張り強さの異方性を検討するために、P 波と S 波の伝播速度から動的弾性係数 E_a を a 軸方向と c 軸方向で求め、一覧にして結果を表示した。(表-6)

表-6 節理面の卓越方向ごとの E_a (動的弾性係数)
吸 水 状 態

岩 石	方向	試料数	範 囲 $\times 10^5$ kg/cm ²	平 均 $\times 10^5$ kg/cm ²	E_{aa}/E_{ac}
粘 板 岩	E_{aa}	6	4.3~6.1	5.3	0.98
	E_{ac}	3	3.5~7.2	5.4	
石 灰 岩	E_{aa}	6	5.3~6.1	5.6	0.95
	E_{ac}	3	5.2~7.0	5.9	
輝 緑 凝 灰 岩	E_{aa}	10	5.0~6.2	5.4	0.75
	E_{ac}	6	6.1~8.1	7.2	
チャート	E_{aa}	5	4.3~8.1	6.5	—
	E_{ac}	—	—	—	

乾 燥 状 態

岩 石	方向	試料数	範 囲 $\times 10^5$ kg/cm ²	平 均 $\times 10^5$ kg/cm ²	E_{aa}/E_{ac}
粘 板 岩	E_{aa}	6	4.3~6.9	5.1	0.89
	E_{ac}	3	4.4~7.0	5.7	
石 灰 岩	E_{aa}	6	6.0~7.8	6.9	0.95
	E_{ac}	3	6.2~8.1	7.3	
輝 緑 凝 灰 岩	E_{aa}	10	4.5~6.0	4.9	0.73
	E_{ac}	6	5.3~7.9	6.7	
チャート	E_{aa}	5	4.4~7.1	5.8	—
	E_{ac}	—	—	—	

動的弾性係数

$$E_a = \left\{ \frac{\rho}{g} (1 + \nu_a)(1 - 2\nu_a)/(1 - \nu_a) \right\} V_p^2$$

$$E_a = \frac{2\rho}{g} (1 + \nu_a) V_s^2$$

$$\nu_a = \frac{K^2 - 2}{2(K^2 - 1)} \quad (K = V_p/V_s)$$

(但し、 ρ は岩石密度、 g は重力加速度、 ν_a は動ポアソン比) 上記の式にて E_a を求めた。

5. 考 察

弾性波速度測定の結果(表-4)から節理面に垂直な方向(a 軸方向)の P 波の伝播速度 $V_{pa(\text{dry})}$ は輝緑凝灰岩では 5.3~6.2 km/秒 平均 5.5 km/秒 であるが節理面

に平行な方向 (c 軸方向) では $V_{pc(dry)}$ が $6.1 \sim 7.0$ km/秒, 平均 6.5 km/秒 となり, 弾性波は a 軸方向より c 軸方向に $10 \sim 20\%$ 程度早く伝わる事が分る。同様のことは, 粘板岩にも当てはまる。この事実から, せん断破壊面を含む岩体の共役系の力学的異方性によって生ずる岩石の物理・力学的性質の異方性は弾性波速度の違いにはっきりと現われるといえる。しかし, 石灰岩では, a 軸方向に $V_{pa(dry)}$ が $5.7 \sim 7.2$ km/秒, 平均 6.2 km/秒, c 軸方向に $5.7 \sim 7.1$ km/秒, 平均 6.3 km/秒 であり, それ程, 方向性が明瞭でない。これは, 石灰岩では節理面のクラックが石灰の溶脱再沈澱によって埋められることによるものであろう。

次に含水状態の違いによる弾性波速度の違いをみる (表-4) と a 軸方向の弾性波速度 V_{pa} は湿潤状態で分離面に水が入り込むために, 乾燥状態より速くなる傾向を示す。ところが s 波の弾性波速度 V_{sa} は顕著な違いが見られない。これは, P 波と S 波の波の性質を考えれば容認できる事実である。

一方, 分離面の存在しない様と考えられる c 軸方向における P 波の伝播速度 V_{pc} に関しても同様に湿潤状態の方が乾燥状態より伝播速度が速くなっている。これより, c 軸方向にも a 軸方向と類似の潜在的な不連続性が存在することが理解される^{2), 3)}。

次に, 点載荷試験と上記の弾性波速度との相関について考えてみよう。一般に節理や層理などの面構造をもった岩石の引張り強さは節理面に平行な方向 (c 軸方向) に引張り応力が作用したほうが節理面に垂直な方向 (a 軸方向) より大きな値を示す⁴⁾。今, a 軸方向の引張り強さを σ_{ta} , c 軸方向のそれを σ_{tc} とすると引張り強さの異方性の度合いは σ_{ta}/σ_{tc} (表-5) で表わされる。同様に, 弾性係数 E についても E_a/E_c で異方性の度合いが表現される。図-2 と 図-3 は σ_t と E の異方性の度合いを関係づけるものである。ただし, 今研究では, 弾性係数として, 弾性波速度より計算した E_a を用いた。また, 弾性異方性として動的弾性係数の比 E_{aa}/E_{ac} (表-6) を用いた。

図-2 は, 引張り強さの異方性と弾性波速度 σ_{ta}/σ_{tc} によって求めた動的弾性係数の異方性 E_{aa}/E_{ac} との相関を示す図である。図より σ_t と E はかなり良い正の相関があることが分る。また, 岩石の乾湿の状態の変化に伴う性状の変化については, 図より水が分離面にとり込まれることによって V_{pa} が増加し, E の異方性は弱まるが, σ_t の異方性は吸水によって強められることが分る。

図-3 は σ_t と E との関係を示したものである。一般に岩石の σ_t と E とは直線にあることが知られている。

図-2 引張り強度と動的弾性係数の異方性

図-4 引張り強度と動的弾性係数

しかし, このことは力学的異方性を考慮しなければならない岩石では図に示されるように一つの試験片が強度的に大きい値を示す場合 (σ_{tc} , E_c) と小さい値を示す場合 (σ_{ta} , E_a) が考えられ, ある幅をもって現われる。これは異方性のある岩石でもある幅を考慮に入れば σ_t - E はかなり良い直線にのることを示すものである。(あるいは方向ごとにそれぞれ直線関係にあることも考えられる。) その幅の大きさは岩石の異方性の度合いを表わすものであり岩石の種類や主に岩石の割れ目として現われ

る岩体の不均一性に依存するものと考えられる。それ故に原位置で岩体の力学的な性質を知るための試験ではこの異方性の幅が重要となるから、個々の試験値の精度よりも、数多くの場所の岩石を取り上げるほうが有意になってくる。

ところで、従来 σ_t や E とは無関係とされてきた衝撃強さも同一岩石ではある幅を考慮すればそれらとよい直線関係にあることが知られている⁵⁾。すなわち、すりへりや衝撃強さの劣化した方向では潜在的な分離面がより発達してその方向の力学的性質が弱められている。そのために岩石の力学的な異方性は、すりへりや衝撃強さと相関性を持ち、異方性の度合いもその幅で示されるものと考えられる。

6. 結 び

ある地域の地質構造的な発達に伴う変形や移動は断層や破壊や褶曲を生み出す。それ故に、岩石の力学的異方性の認識は正に岩体の力学的性質によって与えられる方向性を把握する橋渡しに他ならない。

一般に、岩石の力学的異方性に与える条件は種々考えられるが、原位置の岩体を取り上げる場合特に岩体の吸水状態が問題とされる。そこで、本研究では吸水が強度に及ぼす影響を非整形試験片による点載荷試験によってまた、吸水が変形に及ぼす影響については、パルス法による弾性波測定によって算出した動的弾性係数によって、吸水と岩石の力学的異方性の関連について序論的検討を試みた。

超音波パルス法による岩石試料の弾性波 (P 波) 速度の異方性が報告されていたが⁶⁾ 本研究の場合、節理面に平行な方向 (c 軸方向) の V_{pc} の値が節理面に垂直な方向 (a 軸方向) の V_{pa} の値より 10~20% 程度大きい。以上の結果は乾湿両方の状態において得られるが、特に湿潤状態では、水が分離面にとり込まれることで、 V_{pa} が増大する一方、 c 軸方向の V_{pc} の値もかなり増大する。この事実によって、 c 軸方向にも粒子の好位性および地質的な潜在不連続性の存在が予知される。

点載荷試験による強度的異方性を σ_{ta}/σ_{to} 、岩石の動的弾性係数による変形的異方性を、 E_{aa}/E_{ao} とすると異方

性岩石では吸水につれて異方性の度合いが変化することが分る。すなわち、 σ_t と E の異方性は、ほぼ直線関係にあり分離面を媒介とする強度的異方性は E にも同程度に影響を与える。しかし、水分が分離面にとり込まれると、 E の異方性は弱まるが σ_t の異方性はむしろ強められる傾向にあることが示された。

試料採取地点では小断層によって地層が多く切断され、しかも地表面よりかなりの深部の未風化岩にも節理が見られる。開口亀裂の存在するような場合、剝離性に富んだ岩石の分離面に水が取り込まれると、(特に断層付近で) 実験結果に示されるように強度的低下が著しい。したがって、粘板岩、輝緑凝灰岩の分類には強度的に見ても剝離面の考慮が必要であることが理解される。

従来、整形した試験片を用いて行なわれる岩石試験は試験片の整形に多くの時間と労力を必要とし、また岩石によっては整形が不可能な程変質や風化の進んだものもあって研究を進める上での一つの障害となってきた。しかし、本研究によって岩石の力学的異方性と弾性波速度 (主に P 波) による弾性係数の異方性との相関がかなり認識された事は、原位置における岩体の性状を迅速かつ簡便に把握するための試験方法の可能性が示唆されたものであり、より一層の研究が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 平松・岡・木山 (1965); 非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, Vol. 81, No. 992, 2~8
- 2) 日本材料学会編 (1966); 岩石力学とその応用
- 3) 鈴木 光 (1973); 岩盤力学と計測, pp. 17~55
- 4) 埼玉大学岩石工学研究室 (1970); 岩盤の現地調査方法 (特にたい積岩におけるジョイントと岩石強度分布), 第 6 回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要, pp. 58~62
- 5) 小野寺 透 (1974); 岩石物性の相互関係, 岩の工学的性質と設計, 施工への応用, pp. 229~241, 土質工学会
- 6) T. ONODERA (1962); Dynamic Investigation of Foundation Rocks, In Situ, Proc. of the 5th Sympo., pp. 517~533

(昭和 50 年 7 月 22 日受理)