

不連続性岩盤の弾性波伝播特性に関する検討 FUNDAMENTAL STUDY ON SEISMIC WAVE PROPAGATING PROPERTY THROUGH DISCONTINUOUS ROCK MASS

宮田健治朗*・谷本親伯**・川崎 了***・舛屋 直****
Kenjiro MIYATA, Chikaosa TANIMOTO, Satoru KAWASAKI and Tadashi MASUYA

It is known that seismic wave propagating behavior is influenced by roughness and weathering of rock joints. Weathering level of rock joints is advanced by shear behavior and some other causes. From this point of view, this study was carried out to observe the influence of shear behavior on rock joints by measuring wave velocity and wave amplitude.

A series of laboratory tests was carried out by measuring seismic propagating waves through rock joints under the condition of uniaxial compressive stress to investigate some seismic wave propagating properties. We measured seismic propagating waves before and after direct shear tests and obtained the influence of direct shear tests on rock joints.

1. はじめに

近年、岩盤を基礎とする土木構造物のニーズが高まっている。岩盤構造物を設計するには、建設予定地の地質情報を調べるために、一般に弾性波探査が行われている。

岩盤を弾性波が伝播する際には、岩盤の状況（岩盤の飽和度、不連続面のラフネス、不連続面の風化度）により影響を受ける¹⁾。そこで、本研究は岩石供試体を用いて岩盤の状況が弾性波伝播特性に与える影響を調べる目的で実験を行った。

本研究の実験概要を図-1に示す。最初に岩盤の飽和度が弾性波伝播に与える影響を調べるために、不連続面を含まない供試体を用いてP波速度および第一波振幅値を測定し、飽和度との関係を調べた（弾性波測定1、2）。次に、人工不連続面を作成し、不連続面のラフネスの定量化を行った²⁾。そして、不連続面が弾性波伝播に与える影響を調べるために、不連続面を

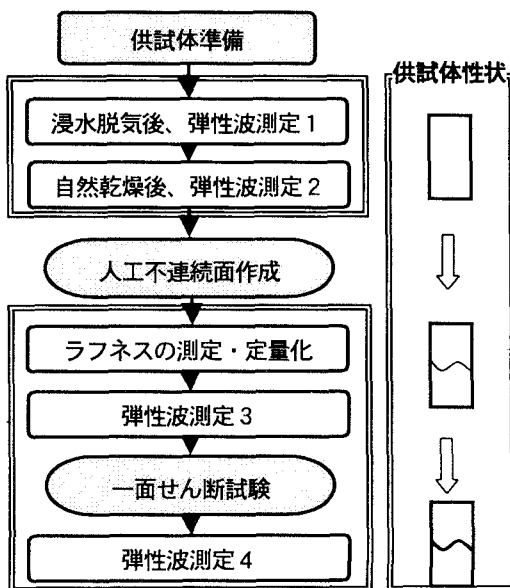


図-1 本研究の試験概要

* 学生会員 大阪大学大学院

** 正会員 工博 大阪大学大学院教授

*** 正会員 博(工) 大阪大学大学院助手

**** ハイテック株式会社

む供試体を用いてP波速度および第一波振幅値を測定し、不連続面のラフネスとの相関関係を調べた（弾性波測定3）。

さらに、自然岩盤の不連続面は風化（劣化）している場合も少なくなく、不連続面の風化（劣化）が弾性波の伝播特性に影響を与えることが知られている。また、岩盤の不連続面の風化（劣化）は、不連続面のせん断などに起因して生じる場合が考えられる。そこで本研究では、一面せん断試験によって不連続面を劣化（粗さを変化）させて、せん断が不連続面に与える影響を弾性波を用いて調べた（弾性波測定4）。

2. 実験概要

2.1 供試体

弾性波伝播測定を行うために、表-1に示すような岩石供試体を用いた。これらの供試体は、直径5cm、長さが12cmの円柱形であり、1/100mmの精度で端面整形を実施した。なお、同表中の S_1 は36時間真空脱気を行った後の飽和度であり、 S_2 は自然空气中乾燥後の飽和度である。また、同表中の飽和度 $S(\%)$ および有効間隙率 $n(\%)$ は次式で求める。

$$S = 100 \times (W_1 - W_2) / (W_3 - W_2)$$

$$n = 100 \times (W_3 - W_2) / (W_3 - W_4)$$

ここで、 W_1 は自然状態の空气中重量、 W_2 は強制乾燥状態の空中重量、 W_3 は強制湿潤状態の空中重量、 W_4 は強制湿潤状態の水中重量である。

表-1 供試体概要

	砂岩 1~7	花崗岩 1~4
$S_1(\%)$	100	100
$S_2(\%)$	35~40	24~26
有効間隙率 $n(\%)$	19~20	0.69~0.7

砂岩：来待砂岩（島根県産）

花崗岩：稲田花崗岩（茨城県産）

2.2 弾性波計測システム

パルスジェネレーター（MODEL145：WAVETEK製）により供試体の一端に取付けられたAEセンサー（AE900S-WB：NF回路設計ブロック製）を振動させ、供試体にパルス波（振幅4.8V、周波数 $f=10\text{kHz}$ ）を入力し、供試体の他端に取付けたAEセンサーで受信する。受信した波は、プリアンプにより増幅された後、オシロスコープ（デジタルストレージオシロスコープ：NF回路設計ブロック製）に表示される。表示された波はコンピューターに取り込まれ、初期走時および第一波振幅値の計測を行う。AEセンサーの供試体への接着には、エレクトロニックワックス（宗電子工業製）を用いて行った。センサーの供試体への接着による弾性波伝播挙動への影響を検討するため、同一供試体において複数回センサーの付け外しを行い、その度に出力波形を観察したが、いずれも同一の波形を得ることが出来た。したがって、センサーの接着による弾性波伝播挙動への影響はないものと判断される。

2.3 不連続面のラフネスの定量化

本研究では、最初に不連続面を含まない供試体を用いて飽和度を変えて弾性波測定を行い（弾性波測定1、2）、その後人工不連続面を作成した。人工不連続面作成後、不連続面のラフネスを C_m 値を用いて定量化²⁾した。この C_m 値は3次元的な不連続面の定量化手法であり、不連続面の表面形状測定はレーザー変位計¹⁾を用いて行った。その測定結果を表-2に示す。

表-2 各供試体の C_m 値測定結果

供試体名	C_m	供試体名	C_m
砂岩1	1.017	花崗岩1	1.316
砂岩2	1.232	花崗岩2	1.382
砂岩3	0.889	花崗岩3	1.264
砂岩4	0.931	花崗岩4	1.316
砂岩5	0.951		
砂岩6	1.018		
砂岩7	0		

2.4 一面せん断試験

垂直拘束圧を0.35MPa、せん断速度を0.1mm/minという試験条件下で、人工不連続面を持つ供試体（砂

岩 1、砂岩 3、砂岩 4、砂岩 5、砂岩 6) を用いて一面せん断試験を行った。一面せん断試験の前後における供試体の不連続面をレーザー変位計で測定することにより、せん断によって不連続面のアスピリティーが削れた量(削れ量)を測定した。その測定結果を表-3に示す。なお、同表中の削れ量は、不連続面の削れ量の総和体積を不連続面の面積で割った平均的な削れ量を意味する。

表-3 砂岩供試体の削れ量

供試体名	削れ量(mm)
砂岩 1	0.138
砂岩 3	0.103
砂岩 4	0.114
砂岩 5	0.167
砂岩 6	0.156

3. 実験結果

3.1 飽和度を変えた弾性波測定(弾性波測定1、2)

岩石供試体の飽和度を変えて行った弾性波測定1(浸水脱気後)、弾性波測定2(自然乾燥後)の第一波振幅値およびP波速度(V_p)の測定は、油圧ジャッキを用いて供試体に載荷圧を連続的に所定の荷重まで負荷しながら行った。なお、本研究では、各供試体において V_p および第一波振幅値がほぼ一定値を示す載荷圧10MPaまで載荷した。図-2に砂岩1の第一波振幅値と載荷圧の関係、図-3に砂岩1の V_p と載荷圧の関係、図-4に花崗岩1の第一波振幅値と載荷圧の関係、図-5に花崗岩1の V_p と載荷圧の関係をそれぞれ示す。

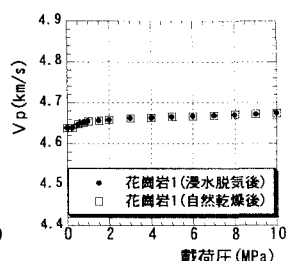
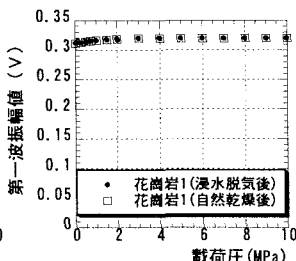
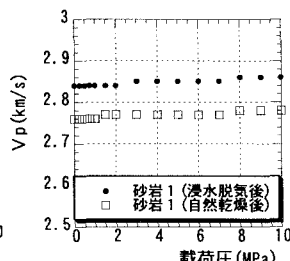
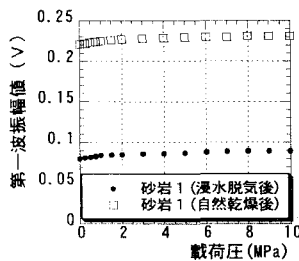


図-2 第一波振幅値～載荷圧関係 (砂岩1)

図-3 V_p ～載荷圧関係 (砂岩1)

図-4 第一波振幅値～載荷圧関係 (花崗岩1)

図-5 V_p ～載荷圧関係 (花崗岩1)

図-2～5から以下のことがいえる。

- ①砂岩を伝播する弾性波は飽和度の影響を大きく受け、飽和度を上げると V_p の値は大きくなるが、逆に第一波振幅値の値は小さくなる。
- ②花崗岩を伝播する弾性波は、飽和度の影響を受けない。

以上の結果より、今回使用した砂岩のように比較的間隙の大きい堆積岩を用いて弾性波測定を行う際には、第一波振幅値および V_p が間隙中の水の影響を受けるので、飽和度に留意して測定を行う必要がある。本報告では便宜上、自然乾燥状態で弾性波測定を行った結果について述べる。

3.2 人工不連続面作成後の弾性波測定(弾性波測定3)

人工不連続面作成後、弾性波測定3を行った。測定したP波速度(V_p)および第一波振幅値(A)を用いて、①速度比(VR)および②第一波振幅比(FAR)を算出³⁾した。このVRおよびFARは、弾性波が不連続面を透過する際に、不連続面のラフネスがP波速度(V_p)および第一波振幅値(A)にどれくらい影響を与えているかを示す指標であり、次式で与えられる。

①VR
$$VR = V_{p1} / V_{p0}$$

ここに、 V_{p1} : 不連続面を含む供試体で測定されたP波速度(弾性波測定3)

V_{p0} : 不連続面を含まない供試体で測定されたP波速度(弾性波測定2)

②FAR
$$FAR = A_1 / A_0$$

ここに、 A_1 : 不連続面を含む供試体で測定された第一波振幅値(弾性波測定3)

A_0 : 不連続面を含まない供試体で測定された第一波振幅値(弾性波測定2)

図-6に載荷圧の変化に伴うVRの測定結果、図-7に載荷圧の変化に伴うFARの測定結果、図-8に載荷圧0.5MPaの状態におけるVRおよびFARとCm値の関係を示す。本研究では、一面せん断試験を岩盤の緩み領域を対象とした低拘束圧下(0.35MPa)で行っているので、図-8に、測定条件のなかで0.35MPaに最も値に近い0.5MPaにおけるFARおよびVRとCm値の測定結果を記述した。また、図-9に深度の大きい岩盤領域を対象とした載荷圧10MPaの状態におけるFARおよびVRとCm値の関係を示す。

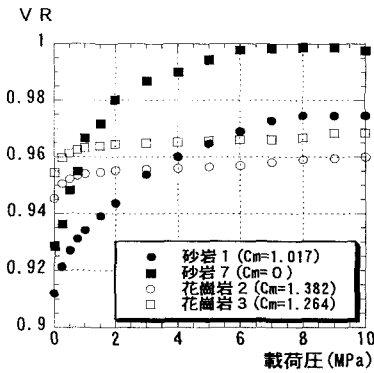


図-6 VRと載荷圧の関係

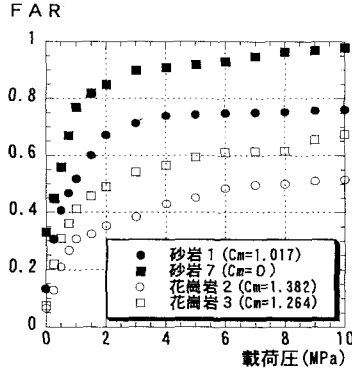


図-7 FARと載荷圧の関係

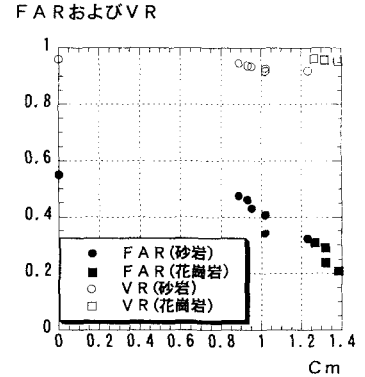


図-8 FARおよびVRとCmとの関係
(載荷圧0.5MPaの時)

図-6、7から以下のことが言える。

- ①砂岩および花崗岩の両岩種において、不連続面のラフネス(Cm値)が小さいほどVRおよびFARは大きくなる。
- ②VRよりもFARの方が載荷圧による影響を強く受け、各供試体において載荷圧の変化に伴う値の変化量が大きい。つまり、VRよりもFARの方が不連続面のラフネスを評価するのに適していると考えられる。

一方、図-8、9からは以下のことが言える。

- ①Cm=0~1.4の砂岩および花崗岩では、VRはCm値に比例して小さくなるが、その割合は非常に小さい。
- ②砂岩のFARはCm=0.9付近から急激に変化し、Cm値に比例して小さくなる。この傾向は、載荷圧10MPaの方で明瞭に見られる。

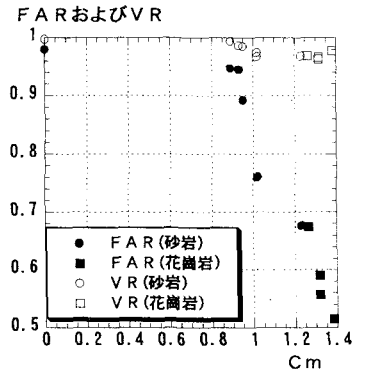


図-9 FARおよびVRとCmとの関係
(載荷圧10MPaの時)

3.3 一面せん断試験後の弾性波測定(弾性波測定4)

一面せん断試験後、弾性波測定4を行った。一面せん断試験が不連続面に与える影響を、Vpおよび第一波振幅値で調べるために、図-10に載荷圧0.5MPaにおけるVRとせん断前後のCm値の関係を、図-11に載荷圧0.5MPaにおけるFARとせん断前後のCm値の関係を、図-12に載荷圧10MPaにおけるVRとせん断前後のCm値の関係を、図-13に載荷圧10MPaにおけるFARとせん断前後のCm値の関係を示す。

図-10~13から以下のことが言える。

- ①VRよりもFARの方がせん断の影響を強く受け、せん断後にその値が大きく低下する。
- ②岩盤の緩み領域をおよび深度の大きい岩盤領域を対象にした載荷圧において、せん断前後のCm値とVRおよびFARとの間に負の相関関係が見られたが、せん断前後ではそれぞれ異なる相関関係を示した。

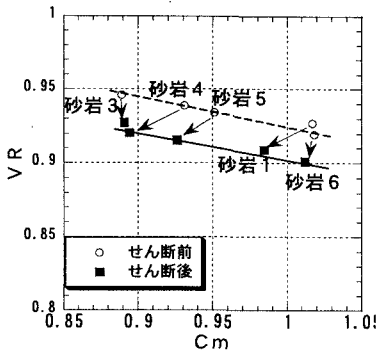


図-10 VR~Cm 関係 (載荷圧 0.5MPa)

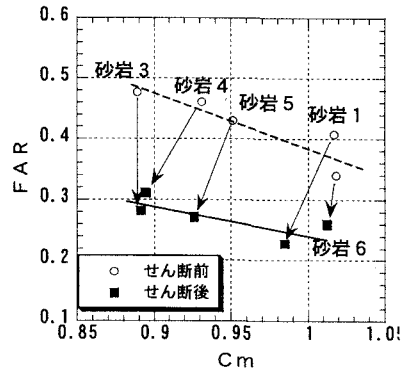


図-11 FAR~Cm 関係 (載荷圧 0.5MPa)

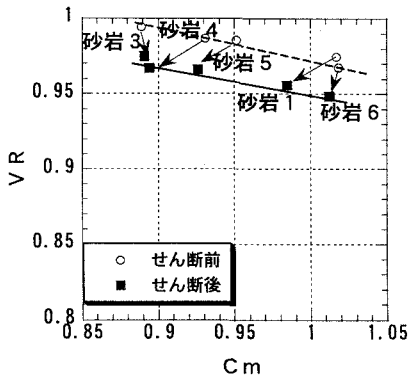


図-12 VR~Cm 関係 (載荷圧 10MPa)

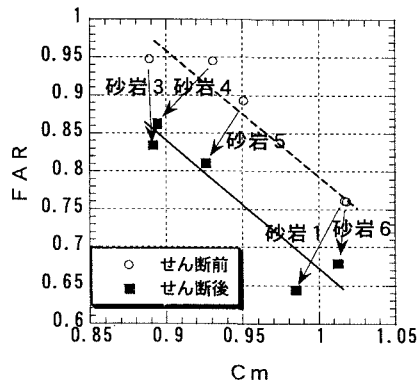


図-13 FAR~Cm 関係 (載荷圧 10MPa)

4. まとめ

- $C_m = 0 \sim 1.4$ の砂岩および花崗岩では、VR は C_m 値に比例して小さくなるが、その割合は非常に小さい。
- 砂岩の FAR は $C_m = 0.9$ 付近から急激に変化し、 C_m 値に比例して小さくなる。この傾向は、深度の大きい岩盤領域を対象にした載荷圧状態で明瞭に見られる。
- VR よりも FAR の方がせん断の影響を強く受け、せん断後にその値が大きく低下する。
- 岩盤の緩み領域および深度の大きい岩盤領域を対象にした載荷圧において、せん断前後の C_m 値と VR および FAR との間に負の相関関係が見られたが、せん断前後ではそれぞれ異なる相関関係を示した。

謝辞

本研究で使用した岩石供試体の整形に際しては、基礎地盤コンサルタンツ株式会社岩盤工学試験センターの松村真一郎博士およびその他関係各位より多大なるご協力を得た。末筆ながら、ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 谷本親伯・岸田潔：3次元非接触式プロファイラーと最大エントロピー法を用いた岩盤不連続面ラフネスの定量化，土木学会論文集，No.511/Ⅲ-30，pp.57-67，1993。
- 2) 北村義宜・谷本親伯・川崎了：岩盤不連続面の表面形状の定量化とせん断特性に関する研究，平成11年度関西支部年次学術講演会，Ⅲ-19，1999。
- 3) 谷本親伯・川崎了・宮田健治朗：不連続性岩盤の弾性波伝播特性に関する基礎的研究，第54回土木学会年次学術講演会，Ⅲ-A381，pp.762-763,1999。