

# 不連続面の密度と垂直拘束圧の影響を考慮した岩盤の弾性波速度モデルの提案

小野田 元<sup>1\*</sup>・菊本 統<sup>2</sup>・岡田 哲実<sup>3</sup>・佐藤 浩章<sup>3</sup>・谷 和夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

<sup>2</sup>横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

<sup>3</sup>電力中央研究所 地球工学研究所 (〒271-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>4</sup>防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

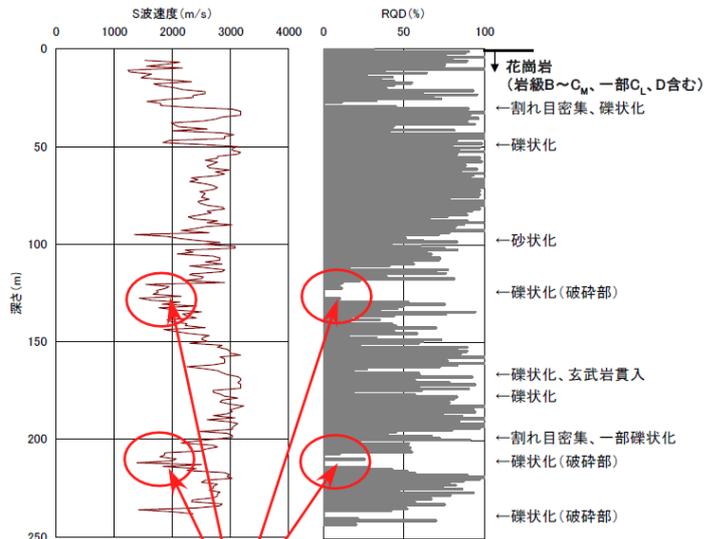
\*E-mail: onoda-hajime-zw@ynu.ac.jp

不連続面の密度を変えた供試体に対して異なる軸応力（および不連続面の垂直拘束応力）下で弾性波速度測定を行い、地震基盤の亀裂等の不連続性が地震波の伝播特性に与える影響について実験的に検討した。その結果、不連続性岩盤の弾性波速度は不連続面の密度（弾性波の進行方向について単位長さ当たりの不連続面の枚数）が高いほど低下するが、不連続面の垂直拘束圧が増加すると速度は上昇することがわかった。ただし、垂直拘束圧を増加しても、弾性波速度は連続な岩盤に比べ遅く、不連続面の影響が完全に消えることはなかった。これに対して、不連続面の密度と不連続面の垂直拘束圧の影響を考慮した弾性波速度のモデルを提案し、実験値の比較によりモデルの妥当性を示した。

**Key Words** : elastic wave velocity, discontinuity, confining pressure, delay time, specimen

## 1. はじめに

構造物の地震応答解析では、しばしば工学的基盤面に地震波が入力される。これは、工学的基盤が表層の地震動による反射等の影響をほとんど受けないことや、以深の地震基盤に比べて地震波の観測データが多いこと、S波速度が3000 m/s程度の硬岩で構成される地震基盤では、地震波が大きく増幅されることがなく、工学的基盤への入射波は震源からの距離で決めることができることが理由である。しかし、実際は工学的基盤、地震基盤ともに亀裂や不均質性を有しており、これらが岩盤内を伝播する地震波の伝播速度や減衰に影響を及ぼすことが佐藤<sup>1)</sup>により指摘されている。図-1に示すようにRQDとS波検層には強い相関関係があると考えられる。谷本・岸田<sup>3)</sup> (1995) やTogashi et al.<sup>4)</sup> (2011) , 長田ら<sup>5)</sup> (2012) は不連続面での伝播時間の遅れを仮定した弾性波速度モデルを提案している。以上のことから、地表付近の構造物の地震応答解析の精度や信頼性を向上するには、地震応答解析自体の検証・改良を行うだけでなく、工学的基盤に及ぼす影響を的確に評価して、地震基盤から工学基盤にかけて伝播する地震波の再評価を行うことが重要である。



RQDの低下とともにせん断波速度も低下

図-1 RQD と S波速度の関係 (関西電力<sup>2)</sup>に加筆)

そこで本研究では、岩盤内の不連続性が地震波の伝播特性に与える影響を実験的に明らかにすることを目的とし、不連続性岩盤を模擬した供試体を用いた弾性波速度

測定を行うことで、弾性波速度に対する不連続面の密度と不連続面に対する垂直拘束圧（以下、垂直拘束圧）の影響を検討した。

## 2. 弾性波速度測定の概要

供試体には不均質性による影響を含まないようにするため、均質な人工材料であるアルミニウムを用いた。アルミニウムは密度 $2.79 \text{ g/cm}^3$ 、 $V_p \approx 6420 \text{ m/s}$ （理科年表<sup>6)</sup>）で $V_p \geq 3000 \text{ m/s}$ の硬岩を想定した材料である。実験には連続な円筒供試体と不連続面を有する円筒供試体を用いた。図-2に示すように、不連続面を有する供試体は载荷軸に垂直で平滑な不連続面を想定し、模擬する不連続面の数に応じて供試体を当分割したピースを作成し、不連続面に異物が付着しないよう留意しながら積み重ねて積層供試体とした。図-2における*i*番目の不連続面であることを表す。積層供試体の直径 $D = 50 \text{ mm}$ で高さ $H = 100 \text{ mm}$ になるように作成した。今回の実験では、高さ100mmの連続な供試体と、各ピースの高さと数が5 mm × 20, 12.5 mm × 8, 25 mm × 4, 50 mm × 2を重ねた積層供試体で、不連続面の枚数 $n=0, 1, 3, 7, 19$ の5つ供試体を用いて実験を行った。

図-3に超音波速度測定に用いた装置の概要を示す。装置はパルス発生器、三軸弾性波速度測定装置、加速度計（2個）、増幅器、オシロスコープ、パソコンから構成される。三軸弾性波測定装置にはキャップ内に圧電素子よりなる振動子（P波周波数 $f_p = 30 \text{ kHz}$ 、S波周波数 $f_s = 15 \text{ kHz}$ ）、ペDESTAL内に圧電素子からなる受振子である加速度計（応答周波数 $f_c \sim 30 \text{ kHz}$ 、P波用1個、S波用2個）が設置されており、軸荷重装置により軸荷重を調整できる。今回は軸応力 $\sigma_a = 0.2 \sim 4.0 \text{ MPa}$ の範囲で測定を行った。オシロスコープでは100MSample/sでサンプリングを行い、128回のスタッキング処理を行うことでS/N比を向上させた。今回の試験では、三軸弾性波測定装置内にある加速度計と同様のものを供試体側面に設置して以下に示す方法で不連続面での遅れ時間 $t_d$ を測定した。図-4に示すように波が不連続面を通過する前後に加速度計を設置し、加速度計間距離 $\Delta L_a$ と加速度計間（加速度計受振部の中心を基準とした）の波の到達時間の差 $\Delta T_a$ 、連続な供試体における各拘束圧下の弾性波速度 $V_\sigma$ から式(1)で算出する。

$$t_d = \Delta T_a - \frac{\Delta L_a}{V_\sigma} \quad (1)$$

式(1)では、図-4に示す通り、加速度計間の到達時間の差は基質部を伝播する時間（ $\Delta L_a/V_\sigma$ ）と不連続面での遅れ時間 $t_d$ の和になると仮定して算出した。なお、遅れ時間の測定は、不連続面の枚数 $n = 1, 3$ の時のみ行った。

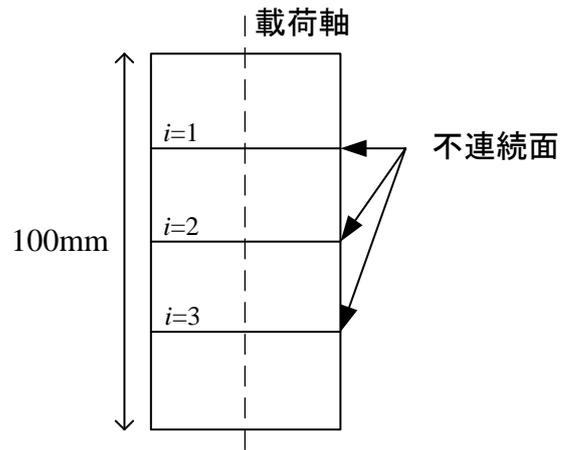


図-2 不連続性岩盤を模擬した供試体

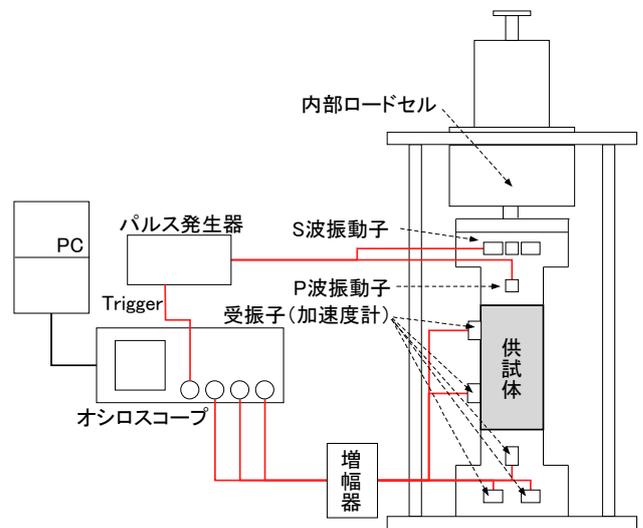


図-3 三軸弾性波測定装置

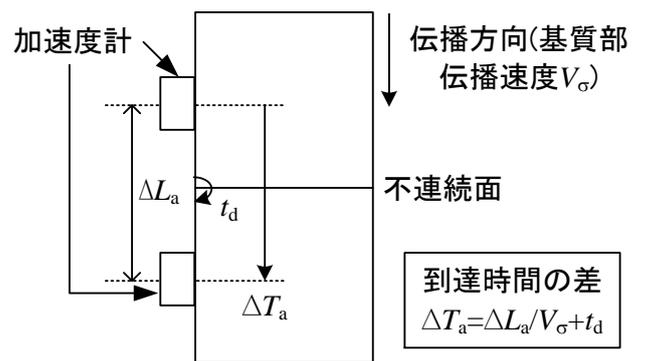


図-4 供試体側面に設置した加速度計による測定方法

$\Delta L_a$ は $n=1$ の時40 mm、 $n=3$ の時20 mmとなるように設置して測定した。

### 3. 試験結果

図-5に各供試体における弾性波速度と垂直拘束圧の関係、図-6に各不連続面1つ当たりでの遅れ時間と垂直拘束圧の関係を示す。今回の場合、不連続面は载荷軸に垂直になっているため、軸応力と垂直拘束圧は等しい。図-5より垂直拘束圧が増加すると超音波速度は増加する傾向を示しており、積層供試体では、軸応力が

0.5~2.0MPa辺りまでに急激に超音波速度が増加する。この理由として、図-6に示すように低応力レベルにおいては垂直拘束圧の増加に伴って不連続面の密着度が増し、不連続面の遅れ時間が急激に低下することで供試体全体の見かけ上の超音波速度が増加することが考えられる。また、不連続面への垂直拘束圧の増加に伴う超音波速度の改善効果はある程度の応力レベルで頭打ちになり、それ以上の応力レベルではなだらかに超音波速度が増加す

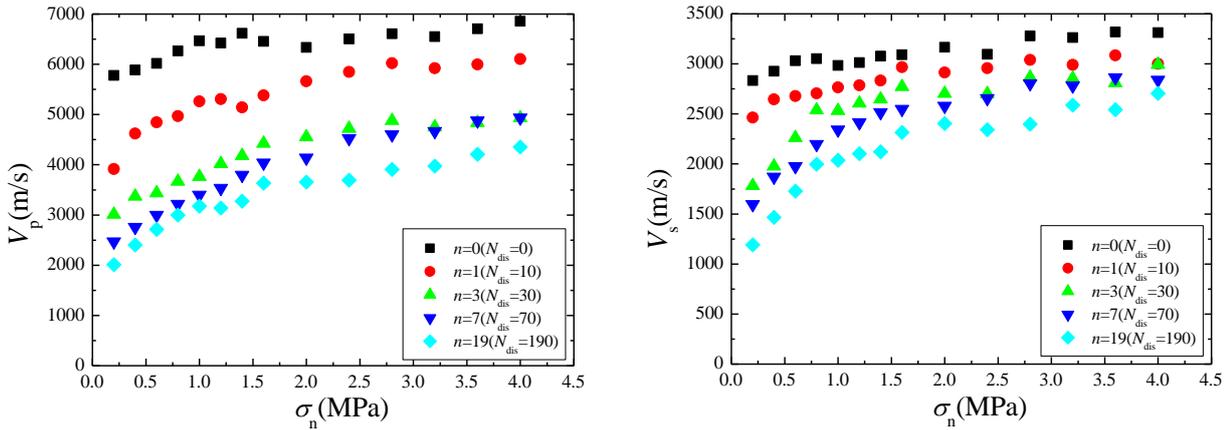


図-5 垂直拘束圧と弾性波速度の関係 (左:P波, 右:S波)

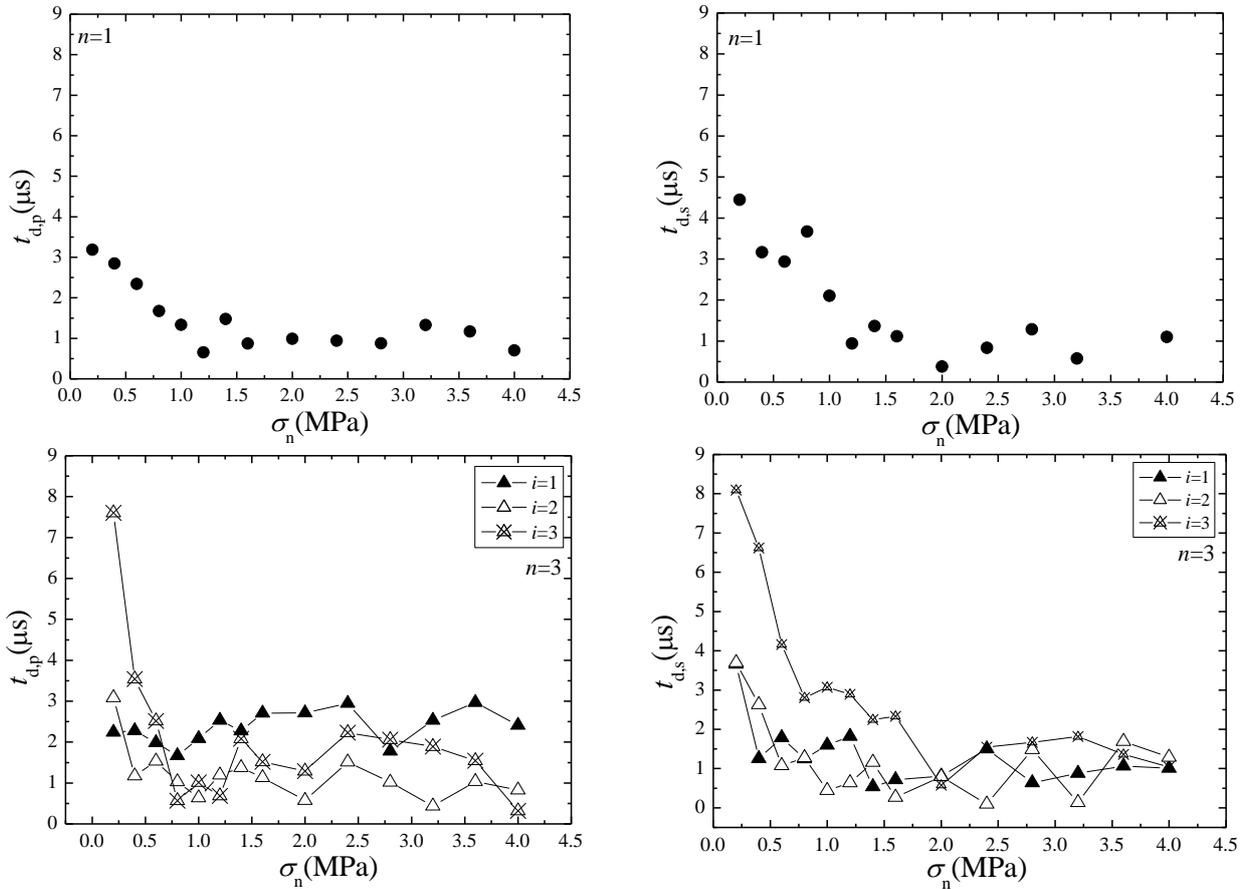


図-6 垂直拘束圧と不連続面での遅れ時間の関係 (左:P波, 右:S波)

る傾向となる。このとき、高応力レベルでの超音波速度の増加程度は不連続面の有無によらず同様であるため、軸応力の増加に伴って供試体基質部に作用する平均有効応力が増加したことによる剛性の増加だと考えられる。これは、PS検層の際に、深度が大きくなるにつれて、弾性波速度が漸増することと同様の現象と言える。傾きの具合は単一供試体も積層供試体もほとんど同じ割合で増加している。しかし、不連続面が完全に密着した後でも、積層供試体の超音波速度は単一供試体の超音波速度には達しておらず、不連続面の数が多いほど低い値であり、 $n = 19$ で最大P波では36.5%、S波では18.3%低下している。遅れ時間（弾性波速度の低下）が残留する原因については、今後検討を行う必要があるが、不連続面での凹凸により、不連続面が完全に密着することがないのではないかと思われる。

つまり、軸応力が増加すると不連続性岩盤の超音波速度は連続体の部分の剛性の増加による一定の増分と、不連続面の密着度が増すことによる増分がある。しかし、軸応力が増加し続けても不連続面による速度低下は残留すると考えられる。以上の結果を考慮して不連続性岩盤における弾性波速度モデルを提案する。

#### 4. 不連続性岩盤の弾性波速度モデルの提案

不連続性岩盤における弾性波速度モデルを示すモデル式を式(2)に示す。

$$V_{(p,\sigma_n,N_{dis})} = (V_0 + \alpha p) \cdot \xi_{(\sigma_n,N_{dis})} \quad (2)$$

ここで、連続な供試体の大気圧下の弾性波速度 $V_0$ 、不連続面に垂直な応力成分 $\sigma_n$ 、平均応力 $p$ （今回の試験では軸応力のみが作用しているため、 $p = 1/3\sigma_n$ 、 $\sigma_n = \sigma_n$ ）である。 $\alpha$ は単一供試体での拘束圧（平均応力）に対する

一定の増分、 $\xi$ は不連続面の影響度を表している。不連続面の密度 $N_{dis}$ は式(3)で算出する。

$$N_{dis} = \frac{n}{H} \quad (3)$$

式(2)右辺の $(V_0 + \alpha p)$ は基質部における拘束圧の増加に伴う一定の速度増加を表しており、拘束圧の影響を平均応力 $p$ で表すことで、軸方向だけでなく側方向の影響も考慮した。不連続面の影響度 $\xi$ は0~1の値をとり、不連続面による弾性波速度の低下の割合を表している。不連続面が拘束圧から受ける影響は不連続面に垂直な成分のみと考えられるため、 $\xi$ は $\sigma_n$ の関数とした。 $\xi$ が満たすべき条件は不連続面が無い場合( $N_{dis}=0$ )に常に1を取ること、不連続面が増えても負の値にならないこと、垂直応力の増加に伴い $\xi$ は増加するが、 $N_{dis}$ が大きいほど $\xi$ は小さくなり、最大値（漸近値）も $N_{dis}$ が大きいほど小さくなることが挙げられる。以上の条件を満たし、試験結果にフィットするようなモデル曲線を模索し、結果によくフィットしたものを不連続面の影響度 $\xi$ の関数として式(4)のように表した。

$$\xi_{(\sigma_n,N_{dis})} = 1 - (1 - e^{-\frac{N_{dis}}{N_{dis,ref}}}) \cdot e^{-\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{n,ref}}\right)^m} \quad (4)$$

ここで、自然対数の底 $e$ 、無次元化するための係数 $N_{dis,ref}$ 、 $\sigma_{n,ref}$ である。図-7にフィッティングした曲線と測定結果の比較、表-1にP波、S波それぞれの $V_0$ 、 $\alpha$ 、 $N_{dis,ref}$ 、 $\sigma_{n,ref}$ を示す。

式(4)の関数 $\xi$ は、不連続面の密度が増加すると単調に低下していくが、その低下の割合を垂直拘束圧が増加することによって抑制する様子を表現しており、上記の条件も満たしている。 $N_{dis,ref}$ は、材料や端面の粗度、波の進

表-1 各パラメーター

	$V_0$ (m/s)	$\alpha$ (m/s/MN)	$N_{dis,ref}$ (1/m)	$\sigma_{n,ref}$ (MN)	$m$
P波	6008	637.2	3.6	3.6	0.4
S波	2897	342.3	5.8	1.2	

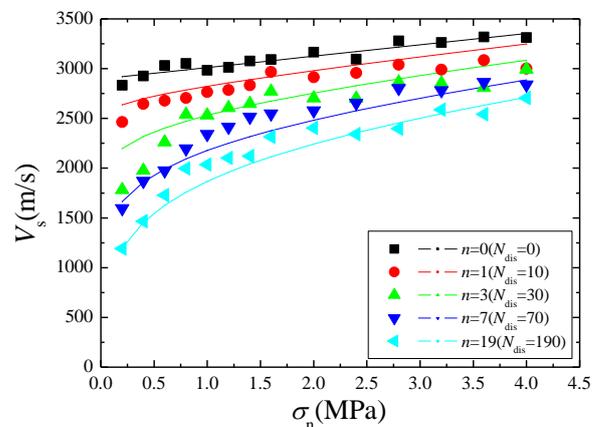
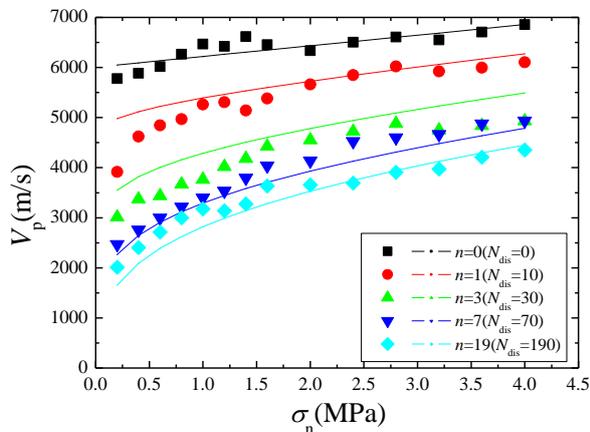


図-7 モデルと試験結果の比較（左：P波，右：S波）

行方向と不連続面のなす角度などによって、不連続面の密度が同じでも弾性波速度の低下の割合は異なると考えられる。一方 $\alpha_{ref}$ は、垂直拘束圧による弾性波速度の改善効果の度合いを表しており、接触具合の改善によるものだと考えられ、効果が大きい程小さくなる。今回の結果から、S波のほうが不連続面の密度の影響を大きく受け、垂直拘束圧による改善効果も大きいことがわかる。これは不連続面のがS波の振動モードと平行に入っていることで、端面の接触具合の影響をP波よりも大きく受けているのではないかと考えられる。

測定値と解析結果は概ね一致しており、測定値の特徴を概ね表現できることがわかる。ただし、今後は本稿で用いなかった材料に対して同様の検討を行い、モデルの妥当性や各係数の比較検討を行う必要がある。

## 5. まとめ

不連続面の密度と垂直拘束圧の影響を考慮した不連続性岩盤における弾性波速度モデルを提案した。このモデルの概要を以下に示す。

- 平均有効応力の増加に伴う、岩盤基質部の剛性増加を考慮した。
- 基質部の弾性波速度に、不連続面の密度と垂直拘束圧の関数である不連続面の影響度として表される0から1の値を取る補正係数をかけることで、不連続面による弾性波速度の低下を表現した。

上記の弾性波速度モデルは、以下に示す実験結果から得られた2つの知見を評価できるような関数で表した。

以下、実験から得られた知見を示す。

- 不連続面の枚数が多いほど弾性波速度の低下は著しく、残留する不連続面の影響も大きくなっている。これは、各不連続面において遅れ時間が生じ

ているためであると考えられるが、端面の微小な凹凸による接触状態が異なるため、すべての不連続面が同じ遅れ時間ではないと考えられる。この不連続面の遅れ時間に影響を与える要因については検討を行わなかった。

- 不連続性岩盤において拘束圧が弾性波速度に与える影響として、平均有効応力の増加に伴う基質部の剛性増加と不連続面に垂直な応力成分（垂直拘束圧）の増加に伴う、不連続面の密着度の増加による弾性波速度の増加が考えられ、低拘束圧レベルでは垂直拘束圧による影響が卓越している。

## 参考文献

- 1) 佐藤浩章：地震動評価のための地表に近い岩盤における減衰の測定の測定とそのモデル化，物理探査，第 65 巻，第 1&2 号，pp.37-51，2012.
- 2) 関西電力株式会社：大飯・高浜発電所の地震動評価に用いる条件設定について，地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会におけるワーキンググループ 2，第 67-3 号，pp.3，2010.
- 3) 谷本親伯，岸田潔：一軸圧縮状態での岩盤不連続面を透過する弾性波伝播特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.523/III-32，pp.49-58，1995.
- 4) Togashi, Y., Tani, K., Okada, T. and Sato, H. : Delay times of elastic waves at discontinuities in laminated specimens, Proc. 1st International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, 2011.
- 5) 長田翔平，岡田哲実，谷和夫，佐藤浩章：不連続面を有する供試体の高さ依存性を考慮した超音波速度測定における時間遅れの検討，第 41 回岩盤力学シンポジウム，pp.322-326，2012.
- 6) 国立天文台編：理科年表，CD-ROM，丸善，1996.

## THE PROPOSAL OF THE ELASTIC-WAVE-VELOCITY MODEL IN CONSIDERATION OF THE DENSITY OF DISCONTINUITY AND THE CONFINING PRESSURE OF A BASE ROCK

Hajime ONODA, Mamoru KIKUMOTO, Tetsuji OKADA, Hiroaki SATO and Kazuo TANI

The purpose of this research is clarifying experimentally effect of discontinuity on elastic wave velocity. Therefore, a series of elastic wave velocity measurements were conducted using the laminated specimens of aluminium to investigate the influence of the discontinuities and confining pressure. Results demonstrated that as confining pressure  $\sigma_c$  increase, elastic wave velocity increase but the influence of discontinuities remains. In consideration of these results, the elastic-wave-velocity model of the discontinuous base rock was proposed.