

積層供試体の弾性波速度計測による 不連続面での遅延時間の検討

富樫 陽太^{1*}・谷 和夫¹・岡田 哲実²・佐藤 浩章²

¹横浜国立大学大学院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²(財)電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

*E-mail: togashi-yota-kx@ynu.ac.jp

岩盤構造物の設計のために、不連続面を伴う岩盤の変形特性を把握する必要がある。しかし、RQDが小さくなるほどPS検層の結果から得られたせん断剛性率 G が小さくなるという知見があるものの不連続面による弾性波速度への影響が明らかでない。そこで本研究では、不連続面で走時が遅延すると仮定したモデルを考案し、荷重方向に垂直な不連続面を持つ積層供試体に対して、軸応力下で超音波速度計測を行った。その結果、軸応力 σ_a を0.1MPaから0.5MPaに増加すると、S波速度の不連続面での遅延時間は最大で56%、P波速度の不連続面での遅延時間は最大で43%小さくなった。これは軸応力をかけることで荷重方向に垂直な不連続面が密着したためであると考えられる。

Key Words : rock mass, discontinuity, elastic wave, laminated specimen

1. はじめに

岩盤構造物の設計のために、不連続面を伴う岩盤の変形特性を把握する必要がある。しかし、既往のサスペンションPS検層の結果によると、深度40m程度の砂岩層においてRQDが小さくなるほど(95%→15%)、P波速度 V_p が3割、S波速度 V_s が6割小さくなること示されているものの、不連続面による弾性波速度への影響が明らかでない^{1,2)}。更に、拘束圧が大きくなると不連続面を伴う岩石試料の弾性波速度(V_p , V_s)が小さくなるという知見があるものの、そのメカニズムが明らかでない^{3,4)}。そこで本研究では、不連続面で走時が遅延すると仮定したモデルを考案し、荷重方向に垂直な不連続面を持つ積層供試体に対して、軸応力下で超音波速度計測を行った。

2. 積層供試体における波動の伝播と不連続面における遅延時間を考慮したモデル

写真-1にアルミ積層供試体を示す。積層供試体とは直径 $D50\text{mm} \times H100\text{mm}$ の円柱供試体の端面と平行な不連続面で等分割したものである。写真に示すように左から積層数1, 2, 4, 8で、それぞれ不連続面の本数 n は0, 1, 3, 7である。

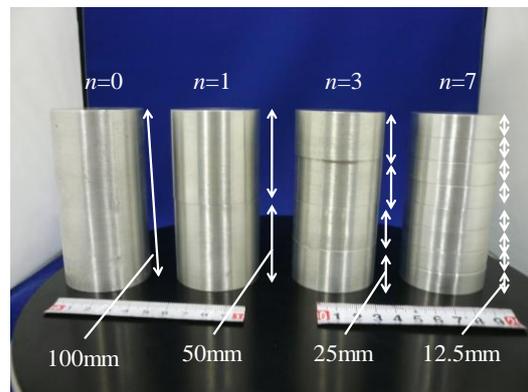


写真-1 積層供試体 (アルミ)

表-1 積層供試体の材料物性

Materials	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ν_d	G_d (MPa)	E_d (MPa)
Aluminium	6452	3091	0.35	26419	71388
Nylon	2673	1057	0.41	1281.6	3607.0
Basalt	5271	2616	0.34	17994	48098
Mudstone	2165	677	0.45	865.21	2501.8
Ryolitic tuff	5870	-	-	-	-

7である。

表-1に積層供試体の材料物性を示す。これらは $n=0$ の供試体を4回超音波速度計測したものの平均値である。供試体材料はアルミ(Aluminium)以外にナイロン(Nylon)、幌延で採取された玄武岩(Basalt)、相模原地下実験場(深

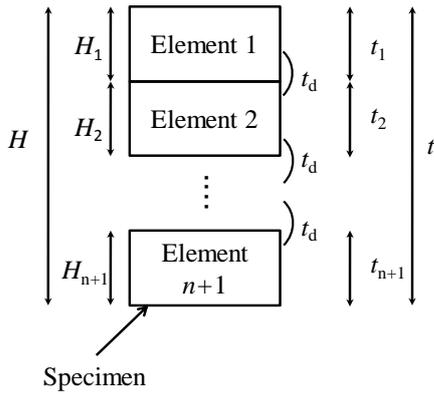


図-1 不連続面における遅延時間を考慮したモデル

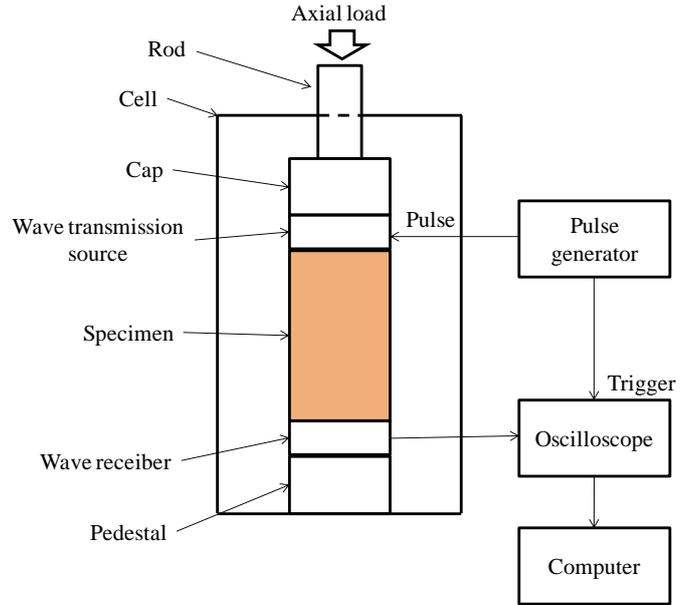


図-2 試験装置

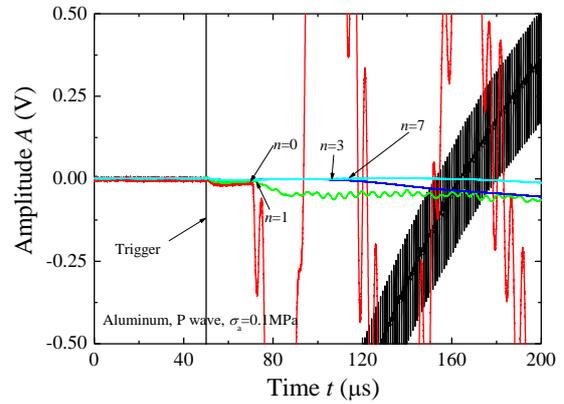
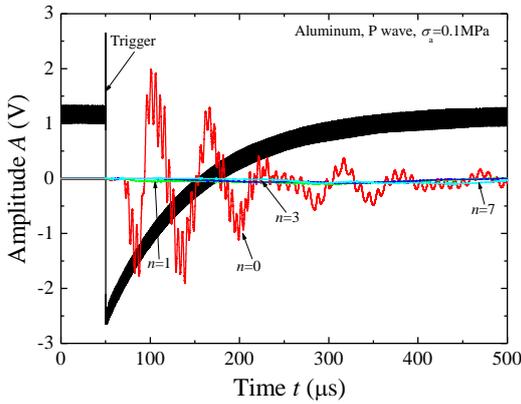


図-3 アルミの積層供試体で計測した時系列波形(左:全体,右:拡大)

度50m程度)で採取された泥岩(Mudstone)を用いた。流紋岩質凝灰岩(Rhyolitic tuff)に関しては同様の試験が行われたデータである³⁾。なお玄武岩と泥岩については平面研削用ダイヤモンドホイール(クリストンダイヤモンド工業, 1A1SD80P)を用いて端面処理した。

図-1 に弾性波速度の不連続面における遅延時間のモデルを示す。このモデルでは積層供試体の要素間の境界における走時の遅延をモデル化したもので、次の2の仮定のもとに成立している。1つ目は供試体上端から下端までの走時は連続で、2つ目はそれぞれの材料と性状が同じ供試体において不連続面における遅延時間 t_d が一定という仮定である。これらの仮定から要素内の速度 V_0 は式(1)、走時は式(2)となる。

$$V_0 = \frac{H_1}{t_1} = \frac{H_2}{t_2} = \dots = \frac{H_{n+1}}{t_{n+1}} \quad (1)$$

$$t = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{H_i}{V_0} + nt_d \quad (2)$$

式(1)、(2)から積層供試体の速度 V は式(3)となる。

$$V = \frac{H}{t} = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} H_i}{t} = \frac{1}{\frac{1}{V_0} + \frac{nt_d}{H}} \quad (3)$$

3. 試験方法

図-2に試験装置を示す。超音波速度計測は軸応力($\sigma_s \approx 0.1 \& 0.5 \text{MPa}$)の元で行った。発振子の発振周波数はP波が200kHzでS波が100kHzである。発振子と供試体上端、

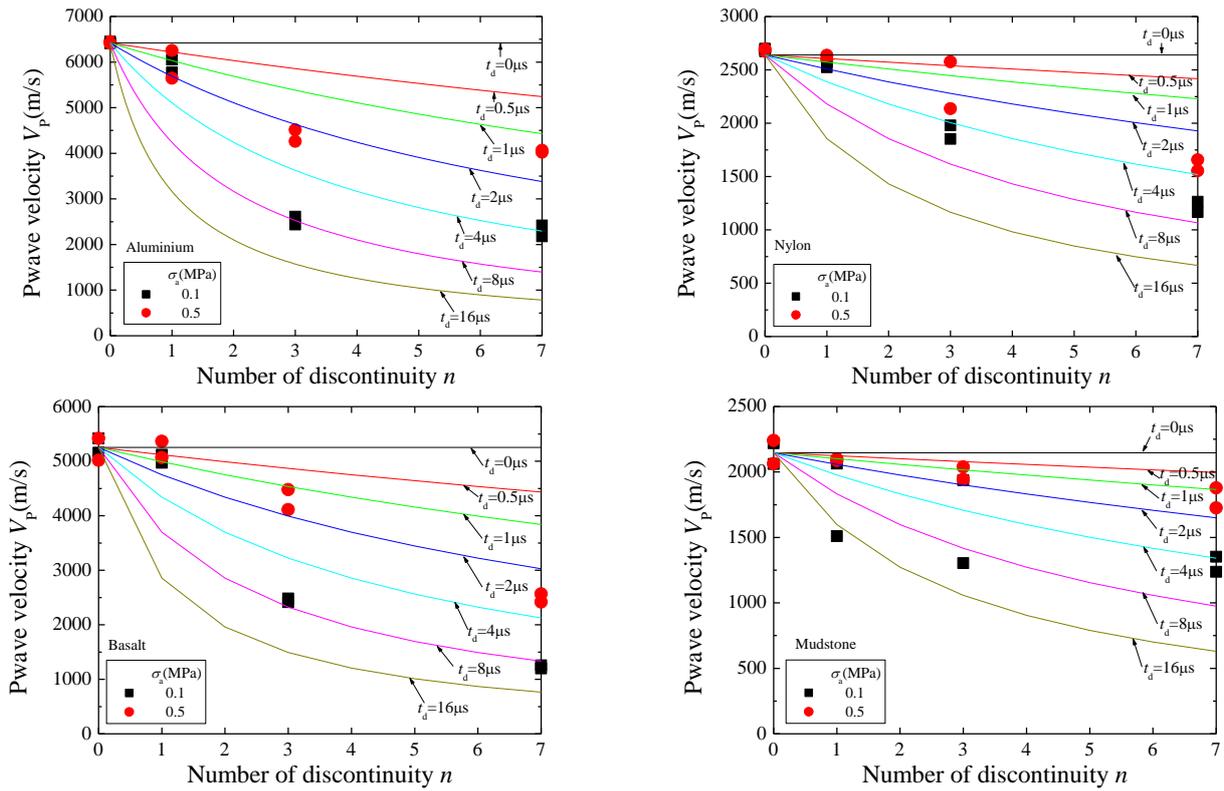


図-4P波速度 V_p と不連続面の本数 n の関係

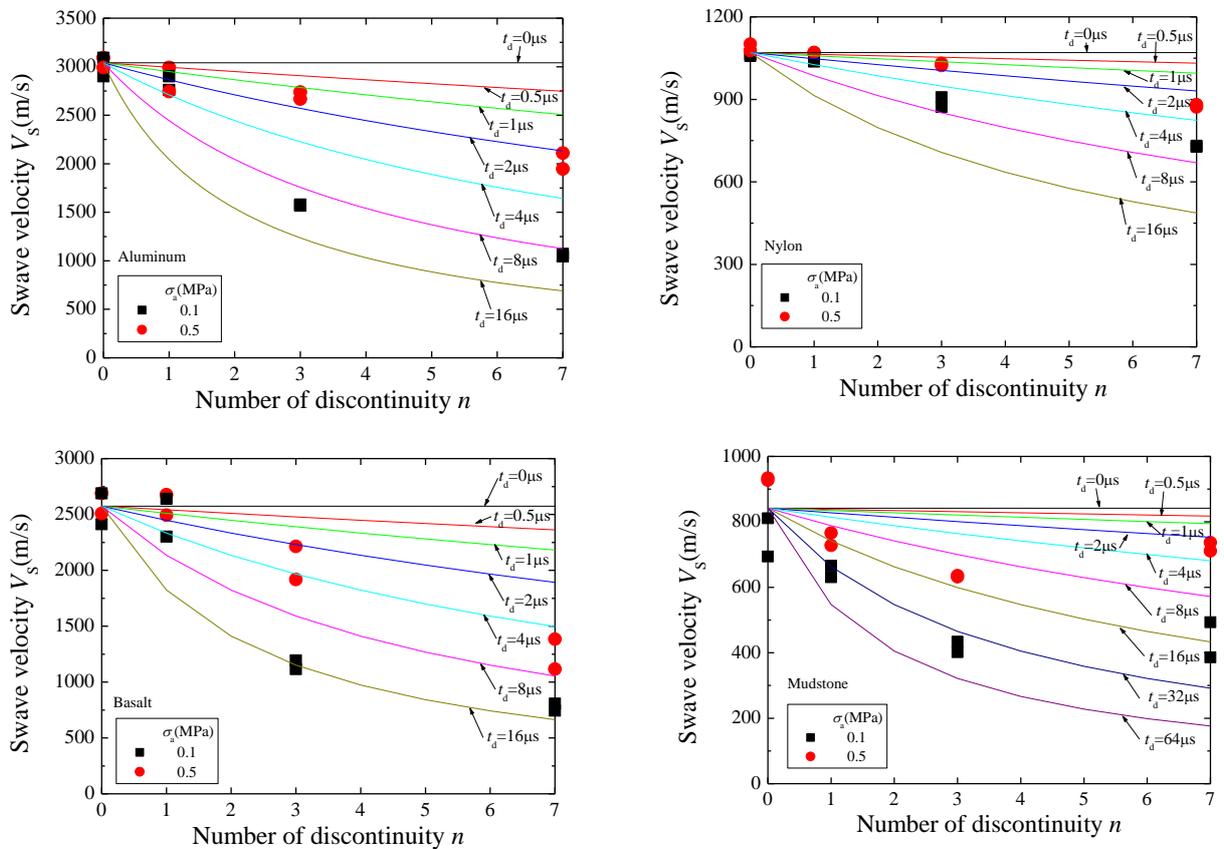


図-5S波速度 V_s と不連続面の本数 n の関係

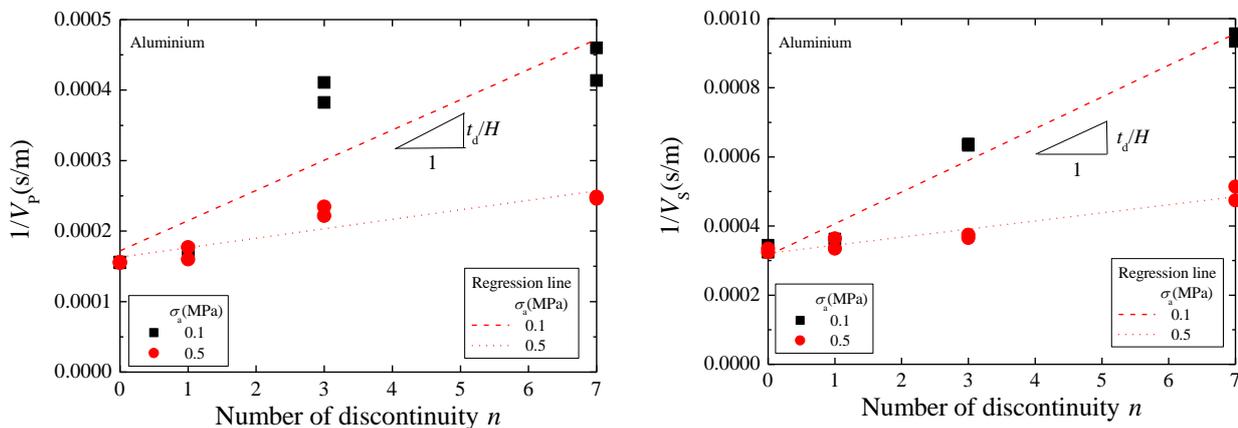


図-6 $1/V$ と n の関係の例(アルミ)

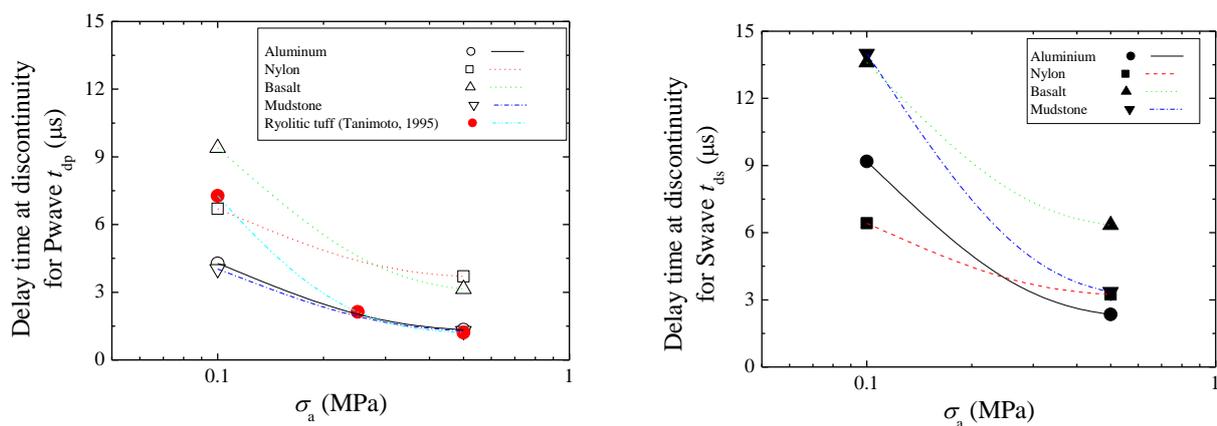


図-7 t_d と σ_a の関係(左:P波, 右:S波)

表-2 材料毎のモデル式のパラメータ

Material	P wave		S wave	
	α (s)	β (1/MPa)	α (s)	β (1/MPa)
Aluminium	5.72	2.90	12.9	3.41
Nylon	7.77	1.48	7.62	1.71
Basalt	12.3	2.74	16.5	1.91
Mudstone	5.36	2.85	20.0	3.57
Ryolitic tuff	8.86	4.25	-	-

4. 試験結果

また受振子と供試体下端の間には接着剤 (P波: ソニコート, S波: ソニコートSHN-325) を0.05~0.12g塗布し波形のデータは100MS/sのサンプリング間隔で記録した。なお解析に使用した波形は128回スタックし平均値化した。

試験条件は谷本ら³⁾に行われた軸応力下での超音波速度計測の条件を, サンプリング条件はYoshimitsu et al.⁵⁾

によって行われた三軸状態で超音波速度計測の条件を参考にした。

図-3にアルミ積層供試体で計測した波形を示す。矢印は走時の読み取り点である。走時の読み取りについてはニアフィールドエフェクトの補正を行い, ゼロクロス法に従っている⁶⁾。また式(2)の走時 t の計算等は, パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法 (JGS2110-2009) に準じている。

不連続面の本数 n が大きくなるほど, 走間が長く, 波形の振幅 A が小さくなる。これは不連続面において波のエネルギーが減衰し, 走時が遅れることを示している。

図-4にP波速度 V_p と不連続面の本数 n の関係を, 図-5にS波速度 V_s と不連続面の本数 n の関係を示す。これら

の図には試験結果の他に $t_d=0\sim 64\mu s$ のときの式(3)のモデル曲線を示してある。この際、モデル曲線の V_0 は表-1の値を用いている。

図-6に $1/V$ と n の関係の例(アルミ)を示す。この図6の関係を直線回帰し、回帰直線の傾き t_d/H から材料毎の不連続面における遅延時間 t_d を求めた。

図-7に t_d と σ_a の関係を示す。 σ_a が大きくなると t_d が小さくなる傾向がある。これは σ_a の上昇に伴い不連続面が密着するためであると考えられる。

軸応力 σ_a と t_d の相関性が高いと考えられるため、式(4)のモデル曲線を考案した。 α は σ_a がゼロの時の不連続面における遅延時間で、 β は応力依存の程度を表す指標である。なお図-7の材料毎のデータには式(4)で表されるモデル曲線でフィッティングしている。

$$t_d = \alpha e^{-\beta \sigma_a} \quad (4)$$

表-2に材料毎の (α, β) を示す。 α に関してはナイロンを除く他の材料で、P波のほうがS波よりも1/4~1/2倍小さい。 β に関しては玄武岩を除く他の材料で、S波のほうがP波よりも1.1倍~1.5倍大きい。これは、軸応力が小さいときは t_d の大きさがS波>P波で、軸応力の依存度もS>P波であるということを示している。

表-1と表-2を比較すると、 α に関しては、P波とS波の両方で、ヤング率 E_d の小さいものほど小さい値を示す。これは E_d が小さいものほど、不連続面が密着しやすいということと考えられる。 β に関しては、 E_d の大きいものほど大きい値を示す傾向にある。

5. まとめ

積層供試体の不連続面における走時の時間遅れを把握することを目的として、不連続面における遅延時間のモデルを考案し、軸応力下での超音波速度測定を行った結

果以下のことがわかった。

- ・不連続面の本数 n が大きくなると、弾性波速度(V_s, V_p)が小さくなる。これは不連続面において走時の遅れが生じているためと考えられる。
- ・軸応力 σ_a を0.1MPaから0.5MPaに増加すると、S波速度の不連続面での遅延時間 t_{db} は最大で56%、P波速度の不連続面での遅延時間 t_{dp} は最大で43%小さくなった。これは軸応力をかけることで載荷方向に垂直な不連続面が密着したためであると考えられる。
- ・軸応力が小さいときは t_d の大きさがS波>P波で、軸応力の依存度もS>P波であるということがわかった。

参考文献

- 1) 佐藤浩章, 東貞成, 芝良昭, 佐藤清隆, 高橋裕幸, 敦賀隆史: 地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その3), 電力中央研究所報告, N07013, 2007.
- 2) 石井香織, 岡田哲実, 谷和夫, 佐藤浩章: 岩盤の割れ目を模擬したアルミ積層供試体の弾性波速度の測定, Geo-Kanto2009, 地盤工学会, pp258~260, 2009.
- 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, pp49-58, 1995.
- 4) D. H. Johnston, M. N. Toksoz, & A. Timur: Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks, *Geophysics*, VOL. 44, NO. 4, pp691~711, 1979.
- 5) Nana. Yoshimitsu, Hironiri. Kawanaka, & Naoki. Takahashi: Broadband P waves transmitting through fracturing Westerly granite before and after the peak stress under triaxial compression condition, *E-letter*, Earth Planets Space, 61, e21~24, 2009.
- 6) 桑野玲子, ムルミサルジュ: ベンダーエレメント試験における三軸円柱供試体の径と高さの影響, 生産研速報, 60巻3号, pp225~pp227, 2008.

DELAY TIMES AT DISCONTINUITY IN LAMINATED SPECIMENS BY ELASTIC WAVE MEASUREMENT

Yota TOGASHI, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA and Hiroaki SATO

For the former method of elastic wave velocity measurement, some PS logging studies showed that S wave velocities of rock masses, V_s , were found to be dependent on the RQD values. However, the influence of the discontinuities of rock masses was not studied yet. Therefore, a series of elastic wave velocity measurements were conducted using the laminated specimens of metals and rock cores to investigate the influence of the discontinuities. Results demonstrated that as axial compression stress σ_a increase, delay time at discontinuity, t_d , becomes smaller. It is expected that as σ_a increase discontinuity become closed.