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

長田 翔平1*・岡田 哲実2・谷 和夫3・佐藤 浩章2

¹横浜国立大学 工学部(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5) ²財団法人電力中央研究所 地球工学研究所(〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646) ³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) *E-mail: nagata-shohei-zr@ynu.ac.jp

超音波速度測定において不連続面における走時の時間遅れに関する既往の検討では、供試体の高さの影響や、材料の影響が考慮されていない. そこでナイロンとアルミを対象に、不連続面のない単一層から成る供試体と、複数のピースを重ねて模擬的に不連続面を有する積層から成る供試体を作製し、パルス透過法による超音波速度測定を行った.単一層から成る供試体における測定から、供試体の高さが波長の5倍より低くなると、超音波速度が増加する傾向がみられた. この速度が単一層中の伝播距離に依存することを考慮したモデルを提案し、積層から成る供試体について妥当性を検討した結果、不連続面での走時の時間遅れも不連続面の密度に依存することがわかった.

Key Words : ultrasonic wave velocity, discontinuity, delay time, wavelength, specimen

1. はじめに

不連続性岩盤の地震時の挙動を把握するためには、せん断剛性率Gと減衰定数hが必要である. せん断剛性率G を求める手法の一つに超音波速度測定^bがある. これは 現位置で行われるPS検層等の物理探査での計測を室内 で行える有効な手法である.

超音波速度測定において不連続面を含まない単一層から成る供試体では、供試体の高さHが、波長λの5倍より低い場合に、超音波速度が真値よりも速く計測される傾向があることが知られているが、その程度やメカニズムは明らかではない^{2,3}.不連続面を含む岩石試料を用いた超音波速度測定に関する既往の研究により、不連続面が多いと超音波速度が低下することが示されているが、不連続面の密度の影響や材料の影響が考慮されていない^{4,5}. また、Togashi et al.は不連続面の数nをパラメータとしたモデル式を提案したが、試料の超音波速度は一定であり、不連続面の配置や性状、超音波の周波数の影響が考慮されていない⁵.

そこで,超音波速度測定における岩質部の伝播距離と 不連続面の密度の影響を明らかにすることを目的とする.

2. 測定に用いた装置及び測定方法

図-1に実験装置の概要を示す.「パルス透過法による 岩石の超音波速度測定方法(JGS1220-2009)」に準拠して, 供試体内を伝播する超音波の初動を読み取ることで超音 波速度を計測した.

材料はナイロン66(密度*ρ*=1.145g/cm³)とアルミニウ ム (*ρ*=2.791g/cm³) で, 直径 *D*=50mm で高さ *H*=5mm~120mmのものを使用した.



圧電素子よりなる振動子の固有振動数fは, P波では 200kHz, 500kHzの2種類, S波では100kHzの1種類を発振子, 受振子とも同じfのものを使用した.重りの質量は 966.91gで,供試体の上面に作用する軸応力 a=0.00726MPaである.また、オシロスコープでは 100MS/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.表-1に各材料の理 科年表[®]の超音波速度の値 V_{pT} , V_{sT} ,周波数fから求めた 波長 λ を示す.

供試体は1つの試料(ピース), すなわち単一層から 成る供試体と, 試料(ピース)を重ねることにより模擬 的に不連続面を有する積層から成る供試体の2種類ある. 1ピースの高さは, 5mm, 10mm, 12.5mm, 20mm, 25mm, 35mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm, 90mm, 100mm, 110mm, 120mmである.

3. 単一層から成る供試体の計測結果

不連続面を含まない単一層から成る供試体(供試体に 含まれる不連続面の数n=0)の計測結果を示す. 図-2は ナイロン66のP波,S波の超音波速度Vと供試体の高さHの関係を示しており,それぞれ V_{pT} または V_{sT} , λ で正規 化した.同様に,図-3にアルミニウムのP波,S波の超音 波速度Vと供試体の高さHの関係を示す.

JGS基準 (1220-2009) の範囲 (H/λ >5) では、概ね正規 化した超音波速度 V_p/V_{pT} , V_s/V_{sT} は1.0に収束するが、 H/λ < 5では超音波速度Vが速く計測される. H/λ →0における値 は、 V_{pT} や V_{sT} と比較して、ナイロン66のP波で最大8.3%、 S波で最大11.5%、アルミニウムのP波で最大15.5%、S波 で最大15.6%、速く計測される. V_p/V_{pT} , V_s/V_{sT} が H/λ →∞ で1に収束する双曲線関係を仮定してフィッティングを 行い、図中に実線で示した.

これは現地で行う弾性波探査でも同様であり,弾性波 の適切な波長を選択し,発振点と受振点に十分な間隔を 有する必要がある.

表-1	材料のVnT	$V_{\rm sT}$	及びλ
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		

材料	$V_{p,T}$ (m/s)	$V_{s,T}$ (m/s)	振動モード	f (kHz)	λ (mm)
ナイロン66	2620	1070	P波	200	13.10
				500	5.24
			S波	100	10.70
	6420	3040	P波	200	32.10
アルミニウム				500	12.84
			S波	100	30.40



図-2 単一層供試体で得られたV_p/V_{pT}, V_s/V_{sT}とH/Aの関係 (ナイロン66,上:P波,下:S波)



図-3 単一層供試体で得られたV_p/V_{pT}, V_s/V_{sT}とH/λの関係 (アルミニウム,上:P波,下:S波)

4. 積層から成る供試体の計測結果

複数の試料(ピース)を積み重ねた積層から成る供試体 $(n \ge 1)$ の計測結果を示す.積層の条件を変えて,供 試体の高さH=100mmとする条件(シリーズ1),2つの ピース (n=1)で供試体の高さを変える条件(シリーズ2),同じ高さのピースを重ねる条件(シリーズ3)の3 シリーズについて計測を行った.

(1) 計測される供試体の超音波速度V*

図-4に計測される供試体の超音波速度V*のモデルの概 念を示す.各ピースを伝播する超音波速度V;が図-2,図 -3に示すようにH/Aの関数と仮定するとi番目のピースの 走時tiは式(1)となる.

$$t_{\rm i} = \frac{H_{\rm i}}{V_{\rm i}(H_{\rm i}/\lambda)} \tag{1}$$

また,各不連続面における走時の遅れ時間なを一定と 仮定すると,供試体内を伝播する超音波の透過時間Tは 式(2)となる.

$$T = \sum_{i=1}^{n+1} t_i + nt_d = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{H_i}{V_i(H_i/\lambda)} + nt_d$$
(2)

式(2)より,計測される供試体の超音波速度V*は式(3) となる.

n+1

$$V^{*} = \frac{H}{T} = \frac{\sum_{i=1}^{N} H_{i}}{\sum_{i=1}^{n+1} \frac{H_{i}}{V_{i}(H_{i} / \lambda)} + nt_{d}}$$
(3)

(2) H=100mmで統一したn≥1の積層供試体(シリーズ 1)の計測結果とモデルとの比較

シリーズ1では各ピースの高さを調節して供試体の高 さH=100mmとした積層供試体について,超音波速度測 定を行った.その結果からナイロン66の計測した超音



図-4 計測される超音波速度V*のモデルの概念

波速度Vと不連続面の数nの関係と式(3)のモデルを図-5に 示す.同様にアルミニウムの計測結果と式(3)のモデル を図-6に示す.なお、アルミニウムのP波の積層供試体 の計測に関しては、初動の立ち上がり位置が読み取れな かった.

不連続面の本数が増えると超音波速度がほぼ線形に低下する.また、ナイロン66のP波に関しては、振動子の固有周波数f=200、500kHzに超音波速度Vは依存しない.式(3)のモデルによるとVとnは双曲線関係にあり、ほぼ線形な関係を示す実測結果とは調和しない.



図-5 シリーズ1のVとnの関係とモデルとの比較 (ナイロン66,上:P波,下:S波)



(アルミニウム,S波)

つまり, H=100mmという条件では1本の不連続面による遅れ時間なは一定という仮定は成り立たず,モデルの仮定から見直し,その要因を明らかにする必要がある.

(3) 2つのピース (n=1) で高さを変えた積層供試体 (シ リーズ2)の計測結果

シリーズ2では、ナイロン66のピースを2個重ねてn=1 のときの供試体の高さを変えた積層供試体を作製し、超 音波速度測定を行った.図-7に式(2)より求めた不連続面 による遅れ時間taと供試体の高さHの関係を示す.P波は Hに対してtopは一定の値を示しているが、S波はHが大き くなるとtopは低下し一定値に収束する傾向がみられる. つまり、S波では不連続面による遅れ時間なは供試体の 高さHに依存する.この理由については、現段階では明 らかではない.



図-7 シリーズ2のtaとHの関係

(4) 同じ高さのピースを重ねた積層供試体(シリーズ3)の計測結果

シリーズ3では、ナイロン66のH=12.5mmのピースを重ねて積層供試体を作製し、超音波速度測定を行った.図-8に式(2)より求めた不連続面による遅れ時間なと不連続面の数nの関係をシリーズ1の計測結果とともに示す.シリーズ1、シリーズ3ともに、P波はnが増えるとなっは大きくなる.一方、S波はシリーズ1もシリーズ3もn=1からn=3までなは小さくなり、n=3以降ではnが増えるとなは大きくなる傾向がみられた.また、シリーズ1も同じ傾向であるが、S波ではシリーズ3がシリーズ1より大きな値を示している.これはシリーズ1は供試体の高さ H=100mmで統一しているが、シリーズ3は供試体の高さがnによって異なり、図-7の関係の供試体の高さHが小さいことでなが大きくなる高さ依存性によるものと考えられる.

シリーズ1とシリーズ3では供試体の高さHが異なるに も関わらず、同様の傾向が得られたことから、モデルの 1ピースの超音波速度V_iがH_iλの関数という仮定が間違っ ているというわけではなく、不連続面による遅れ時間₄ は一定という仮定が間違っており、不連続面の数nに依 存するということが示された.



図-8 シリーズ2のtaとnの関係とシリーズ1との比較

5. 結論

不連続面を含まない単一層から成る供試体の超音波速 度測定の結果から、H/λ つでは超音波速度Vが理科年表 の値より速く計測される供試体の高さ依存性を示した. また、供試体の高さ依存性を考慮したモデルを提案し、 不連続面を有する積層から成る供試体の計測結果から、 1本の不連続面による遅れ時間なは不連続面の数nと供試 体の高さHに依存することを示した.nによる依存では、 P波はnが増えるとtopは大きくなり、S波はn=1からn=3ま でtoは小さくなり、n=3以降ではnが増えるとtoは大きく なる傾向を示した.Hによる依存では、P波はHに対して topは一定の値を示すが、S波はHが小さくなるとtoよ

今後は、様々な観点から1本の不連続面による遅れ時間なが不連続面の数nと供試体の高さHに依存する要因について明らかにし、モデル化を行い、各種岩盤の計測からモデルの可能性を議論する必要がある.

参考文献

- 1) 地盤工学会:パルス透過法による岩石の超音波速度測定,地盤材料試験の方法と解説 —二分冊の 1—, pp.259-270, 丸善, 2009.
- Sanchez-Salinero, I,Roesset, J.M. and Stokoe, K.H. : Analytical studies of body wave propagation and attenuation, *Geotechnical Engineeing Report GR 86-15*, The University of Texas at Austin,1986.
- 3) 緒方義弘,高多明:棒状岩石試験片の音速測定法に関する一考察,第4回岩の力学国内シンポジウム,pp.7-12,1973.
- 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.
- 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(accepted).
- 6)国立天文台編:理科年表, CD-ROM, 丸善, 1996.

EXAMINATION OF THE DELAY TIME IN THE ULTRASONIC WAVE TEST IN CONSIDERATION OF DEPENDENCE BY THE HEIGHT OF SPECIMEN INCLUDING DISCONTINYUITY

Shohei NAGATA, Tetsuji OKADA, Kazuo TANI and Hiroaki SATO

In ultrasonic wave test, neither the influence of the height of specimen, nor the influence of the material is taken into consideration in previous examination about the delay time of discontinuity. For Nylon and Aluminum, ultrasonic wave test was performed to specimen which consists of a single piece and has discontinuity in imitation was produced. The result for single piece test, shown, when the height of specimen is less than 5 pulse length, by decressing the height, ultrasonic velocity is increased. The model in consideration of height dependence was proposed, and this study shown that the delay time in 1 discontinuity is dependent on height of specimen and number of totaly discontinuity.