

新規制定の学会基準案「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法」について

地盤工学会基準部

1. ま え が き

今回公示する学会基準案は、新規制定として提案する岩石の超音波速度測定方法である。原案は「岩石の超音波速度測定方法基準化委員会」（委員構成を表—1に示す）において作成され、岩の試験・調査基準検討委員会および基準部において審議を重ねてきたものである。以下に基準案作成に至る経緯と基準化に当たって議論された主な検討課題について説明する。

表—1 岩石の超音波速度測定方法基準化委員会

委員長	岡 本 敏 郎	㈲電力中央研究所我孫子研究所
幹 事	川 崎 了	㈲電力中央研究所我孫子研究所
委 員	大 橋 武一郎	応用地質㈱
同	大 内 浩 二	中央開発㈱東京支社
同	京 谷 孝 史	東北大学大学院工学研究所
同	棚 部 一 久*	㈱開発電子測器研究所
同	守 屋 万 吉*	㈱圓井製作所電気開発部
同	山 辺 正	埼玉大学工学部建設工学科
同	結 城 則 行	川崎地質㈱関東支社
同	林 為 人	㈱ダイヤコンサルタント

* 平成8年10月より

なお、ここに公示する基準案についての意見は、書面にて平成9年11月30日までに地盤工学会基準部宛に提出していただきたい。この基準案は、会員から意見が出された場合には、それらを岩石の超音波速度測定方法基準化委員会および岩の試験・調査基準検討委員会で検討した後、基準部および理事会における所定の審議を経た上で基準として制定される予定である。

2. 基準作成の目的と経緯

岩の試験・調査基準検討委員会の設立と同時に岩石の超音波速度測定方法基準化委員会が設立された。これらの設立および基準化の経緯について本号「岩の試験・調査の基準化に関する学会活動について」に述べられており、これを参照していただきたい。

岩石の超音波速度測定方法を当学会が基準化の対象とした理由は、岩石の基本的物性を調べる重要な方法の一つであることと、国内外の実情を調査した結果地盤工学会が取り組むべき基準化の一つであると判断されたことの二つが主なものである。また試験法が内容的には成熟しており基準の制定が比較的容易であることも背景にある。試験方法の重要性の一面としてその試験方法の使

用頻度が考えられる。岩石の超音波速度測定は以前から硬岩のP波速度についてよく行われてきたが、最近は軟岩での測定も多くなってきており、P波速度だけでなくS波速度の測定も比較的多い。最近の調査では^{1),2)}、軟岩での室内変形試験が増えていること、超音波試験装置は三軸、繰返し三軸、一軸圧縮、繰返し中空ねじり装置に次いで多いことが示されている。一方岩石の超音波速度測定方法については国内外でいくつかの基準や指針がこれまで制定・提案されている。したがって、これらと整合をとりつつ、より一般的なものでかつ現状の技術レベルで妥当なものを作成していくことに主眼を置いた。そして実際の試験においてできるだけ利用していただけるような基準を目指すこととした。

3. 基準案作成にあたっての検討事項

本基準案作成にあたっていくつかの検討事項が生じたが、その主なものは以下のようである。

3.1 国内外の基準や指針の現状

岩石の超音波速度測定方法としてすでに制定・提案されている基準や指針は以下のようである。国外ではASTMの規格(1990)とISRMの指針(1978)、国内では建設省の基準案(1968)、日本国有鉄道の示方書(1983)、物理探査学会(1990)、土木学会の指針案(1991)である。このほか物理探査学会の前身である物理探査技術協会の要綱(1962)や地盤工学会の「岩の調査と試験」(1989)があり、コンクリート関係ではASTMの規格(1983, 1991再確認)、JIS A 1127(1993)、日本建築学会のマニュアル(1983)がある。これらの中には試験法の内容としてほかの基準などを引用しているものもあり、岩石の超音波速度測定方法の基準として特に整備されているのはASTMの規格、ISRMの指針および物理探査技術協会の要綱であろう。したがって今回の作成にあたってはこれらを特に参考にした。

3.2 基準の対象

超音波速度測定方法としてすでに共振法とパルス透過法が提案されそれぞれ指針や基準に取り入れられているが、コンクリート関係では品質の確認に大きな目的がありほとんど共振法を用いているのに対し、岩石としては上記基準や指針の類ではパルス透過法が最も実績があるのでこれを対象とした。また以前は硬岩のP波速度についてよく実施されてきたが、P波速度だけでなくS波速度の測定も比較的多くなってきていることから基準

ではP波とS波両方の速度を測定するようにした。また三軸室内に設置した状態で測定する場合についての基準化の要望があったが、実務で測定結果を利用するためには実地盤の状態にできるだけ近づけるという意味でその試験の重要性は認めるものの、拘束圧下にある場合は現時点では研究の意味合いが強いこと、基準としてはまず基本的な方法について基準化を先に行う必要があること、ほかの岩の試験法の基準化が進んでいないことからそれらに力を注ぐ必要があること、から今回は見送ることとした。

3.3 振動子

近年の圧電材料などの開発と応用はきわめて広く、本試験で対象とする振動子の種類もそれだけ多くなってきている。このため目的にかなう振動子を適切に選択しておくことが重要となってきている。振動子には材料の種類が多いことに伴い、振動モードや固有振動数の幅も様々である。そこで振動子についての規定は目的に沿う範囲で基本的なものにとどめた。このとき特に振動する方向を確認しておくことが肝要であり、その旨基準に盛り込んだ。また固有振動数についてはこれまで実績のあるものを中心とし、この幅を狭めるようにはしなかった。さらに固有振動数については、波が減衰して伝播ができなくなる場合の対処法として比較的低振動数の振動子を用いることがあることを示した。

3.4 供試体の形状および寸法

本試験に用いる供試体については、原理的に供試体の大きさと周波数などの条件を満たせば本基準で示した寸法よりも小さなものも対象とすべきであるが、本試験に引き続いてほかの力学試験が実施されるという実務上最

も有り得るケースを想定して、圧縮試験と引張り試験で用いる供試体とはほぼ同じ形状および寸法とした。また供試体の寸法や含まれる礫などの大きさに関しては固有振動数や粒径などとの相関が考えられるが、詳細な基礎データが十分でないのが現状であり、これらに関しほかの基準などで記述されているもので妥当と思われるものを選択した。

3.5 試験手順

具体的な試験の方法として、接着剤、振動子と供試体の密着時の圧力、試験結果の確認の方法、測定困難時の対処法が検討課題であった。接着剤については、P波測定では使用すること、S波測定では使用しないことが多いことを示し、接着剤としては市販のいくつかのものを列挙することとした。振動子と供試体の密着時の圧力については、測定結果に影響を与えない大きさは明確でないため、圧力を加える場合にはこれまでよく使用されている圧力以下とした。試験結果の確認の方法については再現性と異方性の二つが関係してくるのでこれらをできるだけ詳細に記述するようにした。測定困難時の対処法については、特に軟岩において伝播できなくなることがあるためその対処法としていくつかの方法を記述した。

参 考 文 献

- 1) 小菅義一・吉家 均・田中義久・高島孝次：室内における超音波速度一斉試験について、全国地質調査業協会連合会、全地連技術フォーラム'93講演集、1993。
- 2) TC-29 (Stress-Strain Testing of Geomaterials in the Laboratory) 国内委員会：地盤材料の室内せん断試験の現状に関するアンケート調査結果、土と基礎、Vol. 44, No. 10, pp. 64~66, 1996。

地盤工学会基準（案）

JGS

パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法 2111-199X

Method for Laboratory Measurement of Ultrasonic Wave Velocity of Rock by Pulse Test

1. 総 則

1.1 基準の目的

この基準は、超音波を用いて岩石の弾性波速度を求める方法を定めることを目的とする。

1.2 適用範囲

円柱または直方体に成形された岩石試料を対象とする。

1.3 用語の定義

パルス透過法とは超音波パルスを試料端で発振し他端で透過したパルスを受振する方法である。超音波速度とは超音波の透過時間から算出した速度をいう。

1.4 必要関連基準

この試験に用いる供試体は次の基準によって作

製する。

JIS M 0302-1975 岩石の圧縮強さ試験方法

JIS M 0303-1975 岩石の引張り強さ試験方法

【付帯条項】

1. 本基準と部分的に異なる方法を用いた場合には、その内容を報告事項に明記しなければならない。
- 1.2 本基準は硬質な土や人工地盤材料にも準用できる。
- 1.4 供試体の作製方法に関しては、JIS M 0301-1975 岩石の強さ試験用試料の採取方法および試験片の作製方法を参考とする。また供試体の密度算定には、JGS T 191-1990 土の湿潤密度試験方法を参考とする。

2. 試験用具

2.1 超音波速度測定装置

超音波速度測定装置は、基本的にパルス発生器、発振子、および測定装置から構成され、次に示す条件を満たすものとする。

- (1) パルス発生器は、振動子に衝撃を与えて、その振動子固有の振動を発生させるものである。
- (2) 発振子は超音波を発振および受振する基本要素であり、それぞれの振動子を発振子および受振子という。振動子は振動素子を収納した金属などの容器全体を指す。また振動素子を供試体に直接密着して利用してもよい。

振動子はP波用とS波用の2種類を用意する。振動子は、使用する環境条件や振動数、振動モードを考慮して適切なものを選択する。振動子の振動数は、測定対象となる供試体の力学特性、供試体の形状や寸法、含有される礫の粒径や内部に含まれる欠陥などにより、適切と思われる範囲で選定する。

- (3) 測定装置は、受振子からの信号を増幅したりインピーダンスを整合させる電子回路、波形を表示して透過時間を読み取る表示装置もしくは波形記録装置、および表示装置もしくは波形記録装置を同期させるトリガー回路で構成される。

2.2 その他の用具

- (1) はかり 感量0.01 gのもの
- (2) ノギス
- (3) 接着剤 P波測定の場合粘性のある材料、S波測定の場合は必要に応じ固化する材料

などが使用でき、バイモルフ振動子もこれらに含まれる。また比較的低周波の固有振動数を持つ振動子としては、ボルト締めランジュバン振動子、磁歪振動子などが使用できる。

- b. S波振動子の振動モードには、供試体接触面内の直線方向に振動するすべり振動と、回転方向に振動するねじり振動などがあるので、それらの特徴を理解して使用しなければならない。
 - c. 振動子の固有振動数としては、一般的には100 kHz～3 MHz程度を用いるが、減衰の大きな軟岩のような供試体では数10 kHzを用いることがある。
 - d. 振動素子を収納する容器の大きさは、容器を含んだ振動系を形成するので大きすぎないようにする必要があり、また利便性から供試体の直径程度にすることが多い。
- (3) 一般に使用される供試体の大きさや振動子の振動数を考慮すると、波形をデジタル記録する際のサンプリング時間または時間読み取り最小目盛は、少なくとも0.1 μ s以下であることが望ましい。

2.2

- (3) 接着剤は、振動子を供試体に直接密着する場合、もしくは振動子を収納した容器を用いて容器と供試体を密着する場合に使用する。接着剤としては、P波測定の場合はグリース、親水性クリーム、ワセリン、グリセリン、など粘性のある材料を振動子に薄く塗布する。またS波測定の場合は、接着剤を用いず、圧着だけによることが多い。S波測定において接着剤を使用するときには、固化後せん断力を伝達させる特性が必要であり、このような特性を有し試験後供試体と分離しやすい接着剤として、剝離性のよい瞬間接着剤、カナダバルサム、サリチル酸フェニル、レーキサイトセメントなどがある。

【付帯条項】

- 2.1 本装置の基本構成を図-1に示す。必要に応じて、ショットマーカー回路、遅延回路、フィルター、プリンターなどが付加される。

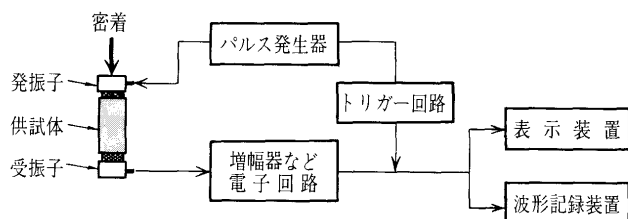


図-1 超音波速度測定装置の構成例

- (1) パルス発生器からの駆動信号波形としては衝撃波、正弦波、矩形波、ステップ波などが使用される。通常振動子の固有振動数と同程度のパルス波を生じさせるように駆動するものである。駆動電圧はできるだけ高く、繰り返し発生機能を有するものが好ましい。
- (2) a. 振動子としては、圧電振動子または電歪振動子

3. 供試体

3.1 供試体の形状および寸法

供試体の寸法は力学試験に用いる供試体に準じることとし、円柱もしくは直方体とする。供試体の長さもしくは長辺の長さ l は供試体の直径もしくは短辺の長さ d の0.5～2.5倍とする。 d は波長の5倍以上とする。

供試体に礫や欠陥などが含まれ、不均質性が見られる場合には、 d と l は礫や欠陥などの大きさの5倍以上とする。

3.2 供試体の性状および寸法の測定

供試体の上下の端面は平滑で、互いに平行であり、側面に垂直になるようにしたものを使用する。供試体の直径 d と長さ l の測定にあたっては、互いに直交する2方向の直径と4辺の長さを0.05 mmまで測定する。

3.3 その他

供試体の含水状態ができるだけ変化しないようにする。

供試体の密度は JGS T 191-1990 に準拠して求める。

供試体の性状を記録する。

【付帯条項】

3.1

- a. JIS M 0302-1975によれば、円柱供試体の直径は20～100 mm，正四角柱供試体の断面の1辺は20～70 mm，高さとの比は2に近いものとしている。また JIS M 0303-1975では、円柱供試体の直径は20～100 mm，高さとの比は0.5以上，1以下となっている。
- b. 供試体の寸法と振動子の固有振動数 f の関係は次の条件を満たすようにする。波長 λ とすると供試体の超音波速度 v は $v=f\lambda$ であるので，上記の条件 $d \geq 5\lambda$ から， $f \geq 5v/d$ となる。
- c. 供試体の構成粒子の大きさについては，平均粒径 $\bar{d}$ について条件を設定しておくことができる。すなわち，ASTM D 2845-90では $\lambda \geq 3\bar{d}$ とし，上記の条件 $d \geq 5\lambda$ から， $d \geq 15\bar{d}$ となる。

3.2

供試体の上下の端面の平面度と直交度に関しては，JIS M 0302-1975および JIS M 0303-1975に基づく。すなわち，供試体を定盤の上に置き供試体の高さの最大値と最小値の差が0.1 mm 以内となるようにし，さらに供試体の側面に直角定規をあてたとき側面と定規の間に明らかなすき間が見られないようにする。

4. 試験方法

4.1 試験の準備

試験の前に以下の作業を行う。

- ① 速度測定を行うのと同じように発振子と受振子を直接密着させる。
- ② このときの初動の立上がり位置を供試体の長さが0のときに相当するとする。

4.2 試験手順

P波測定とS波測定の順番は規定しない。ここではP波測定を先に実施する場合を示す。

(1) P波測定

- ① P波用の発振子と受振子の間に供試体を挟む。
- ② 振動子を供試体に十分密着させる。必要に応じ，少量の接着剤を供試体の両端面に塗布する。
- ③ 密着させるときの圧力は約98 kN/m²{1.0 kgf/cm²}を超えないようにする。また一連の試験で圧力をほぼ一定となるようにする。
- ④ 超音波パルスを発生させ，受振した波の初動

の立上がりが鋭いことを確認する。初動の立上がりが明りょうでない場合には出力や増幅度を増す。

- ⑤ ④の作業でも初動の立上がりが明りょうでない場合には①からの手順を再度行う。
 - ⑥ 以上によっても初動の立上がりを定めることができない場合にはほかの手段によることとする。
 - ⑦ 透過した波の立上がり部分から透過時間 T_p を原則として0.1 μ s まで読みとる。
 - ⑧ 同一供試体において発振子と受振子の位置を入れ替えて，①から④の手順を再度行い，合計2回の測定を行う。
- (2) S波測定
- ① S波用の発振子と受振子の間に供試体を挟む。このとき振動子の振動モードがすべり振動の場合にはその方向と供試体の性状との関係を記録する。
 - ②～⑥ (1)に示した②から⑥の手順に従い，同様の作業を行う。
 - ⑦ 透過時間 T_s を原則として0.1 μ s まで読みとる。
 - ⑧ 同一供試体において発振子と受振子の位置を入れ替えて，①からの手順を再度行い，合計2回の測定を行う。

【付帯条項】

- 4.1 密着は，重り，荷重計を介在したダミー，指圧によるものとし，その強さは重量や荷重計により確認する。

4.2

- a. ここで示した方法によっても立上がり部の改善がない場合には減衰の大きな軟質な岩の場合であることが多く，波形の記録を行う。
- b. 初動の立上がりが明りょうでなく軟質な岩の場合には低い周波数を持つ振動子を使用する。以上によっても初動の立上がりが明りょうでない場合は，受振した波のピークによって透過時間を求めてもよい。
- c. 同一供試体において発振子と受振子の位置を入れ替えても原理的にはP波速度は影響を受けないので，再現性をチェックするため入れ替えて2回測定する。このとき2回の透過時間の差が5%以上あるときは測定方法に問題がある可能性が高いため，再度測定を行う。S波測定においても，同様に2回の測定を行うのを原則とするが，層理などによる速度の異方性や不均質性の影響が大きいことがあるので，発振子と受振子の位置を入れ替えた場合2回の透過時間の差が5%以上あることがある。このときは振動モードや振動方向と供試体の性状との関係を詳しく記録する。

5. 試験結果の整理

- (1) P波速度 V_p (m/s) および S波速度 V_s (m/s) を次式で算定する。このとき2回測定した透過時間に対してそれぞれ算定する。

$$V_p = 10^4 \times l / T_p$$

$$V_s = 10^4 \times l / T_s$$

ここに、

l : 供試体の長さ (cm)

T_p : P波の透過時間 (μ s)

T_s : S波の透過時間 (μ s)

- (2) 超音波速度 V_p および V_s から、動ポアソン比 ν_d 、動せん断弾性係数 G_d (kN/m²) {kgf/cm²} および動弾性係数 E_d (kN/m²) {kgf/cm²} を次式で算定する。このとき V_p と V_s は(1)で求めた値の平均値を使用する。

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2\{(V_p/V_s)^2 - 1\}}$$

$$G_d = \rho_t \cdot V_s^2 \text{ (kN/m}^2\text{)}, G_d = 1.02 \times 10^{-2} \times \rho_t \cdot V_s^2 \text{ {kgf/cm}^2\text{}}$$

$$E_d = 2(1 + \nu_d) \cdot G_d$$

ここに、

ρ_t : 測定状態における供試体の密度 (g/cm³)

【付帯条項】

5. 有効数字3桁で算出する。

- (1) V_p および V_s を km/s 表示とするときは、 $V_p = 10 \times l / T_p$, $V_s = 10 \times l / T_s$ であり、 $G_d = 10^6 \times \rho_t \cdot V_s^2$ (kN/m²), $G_d = 1.02 \times 10^4 \times \rho_t \cdot V_s^2$ {kgf/m²} となる。

- (2) 2回計測したS波の透過時間の差が大きいときは、動ポアソン比、動せん断弾性係数および動弾性係数の計算をそれぞれの透過時間に対し行う。

6. 報告事項

試験結果について次の事項を報告する。

- (1) 供試体番号、採取場所 (深度)
- (2) 供試体の形状、寸法、測定時の密度、含水状態
- (3) 試験条件 (密着の圧力、密着方法、振動子の振動モードと固有振動数)
- (4) P波速度、S波速度
- (5) 動ポアソン比、動せん断弾性係数、動弾性係数 (ただし異方性顕著の場合を除く)
- (6) 本基準と部分的に異なる方法を用いた場合はその内容
- (7) その他特記すべき事項

【付帯事項】

6.

- a. 必要に応じ、調査名、調査地点名、試験年月日、試験機関、試験者を報告する。
- b. 必要に応じ、岩種と供試体の性状 (風化、割れ目、葉理、緻密の程度、組成鉱物などの地質性状) を詳細に報告する。
- c. 必要に応じ、地層名、地質年代などを報告する。
- d. 異方性が強い岩石の場合、超音波の透過方向およびそれと異方性の主軸などとの関係を報告する。