

超音波試験（土研法）による 新設の構造体コンクリート強度測定要領（案）

目 次

1. 適用範囲	1
2. 強度推定の原理と手順の概要	1
(1) 表面走査法による伝搬時間の測定と音速分布の求め方	1
(2) 強度推定	2
3. 測定装置	4
(1) 測定装置	4
(2) 発信探触子および受信探触子	4
4. 強度推定式の求め方	4
5. 構造体コンクリートの超音波伝搬時間の測定方法	5
(1) 測定箇所および測定数	5
(2) 測定方法	5
6. 構造体コンクリート内部の音速分布の計算	5
(1) 探触子間隔の補正	5
(2) 表層伝搬範囲の設定	6
(3) 音速分布の計算	6
7. 強度の推定	6
8. 基準材齢（28日）強度の求め方	6
9. 含水状態を考慮した補正	6
10. 判 定	8
11. 報 告	8
<u>12. 参 考</u>	8
資料1 コンクリート内部の音速分布推定方法	10
資料2 探触子間隔の補正係数の求め方	12
資料3 超音波による伝搬時間測定時の注意点	14
別添 超音波法による強度推定ワークシート	

2006年5月（H21修正）
（独）土木研究所

（社）日本非破壊検査協会（（株）八洋コンサルタント、（株）東横エルメス）

1. 適用範囲

この要領は、新設の構造体コンクリートの圧縮強度を超音波法（土研法）によって推定する方法に適用する。

2. 強度推定の原理と手順の概要

この要領は、コンクリートの音速から強度を推定する方法を示す。

コンクリートの品質は、使用材料、配合、材齢、環境条件などの影響を受ける。また、これらの影響は、コンクリート表面からの距離によって異なる。そのため、コンクリートの音速は表面からの距離によって異なっている。一般には図1(a)のように、表面の品質は低いので音速は遅く、内部ほど品質がよくなるため音速は速くなり、しだいに一定値に収束するような分布になっている。

(1) 表面走査法による伝搬時間の測定と音速分布の求め方

強度を推定するには、まず、このような音速分布を推定する必要がある。コンクリート内部の音速分布は、次のような手順で推定する。

① 表面走査法（図1）によって探触子間隔ごとの伝搬時間 t を測定する（5. 参照）。表面走査法とは、図1(b)のように同一平面上で探触子間隔を変化させながら伝搬時間を測定する方法である。

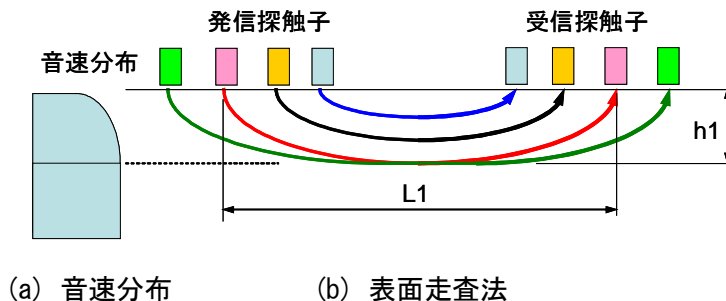


図1 表面走査法による探触子間隔と伝搬時間の測定

- ② 音速分布の計算に用いる探触子間隔と伝搬時間の範囲を選定する（②～⑤は6. 参照）。
- ③ 音速分布を図2のように仮定することによって、最速伝搬経路を変分法によって求める。
- ④ 変分法によって求めた最速伝搬経路を伝搬する時間 t_{cal} を計算によって求める。
- ⑤ 音速分布を変化させて伝搬時間

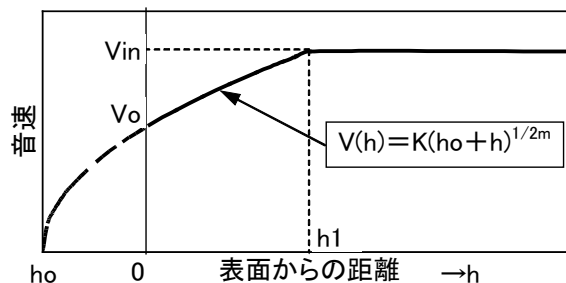


図2 音速分布の仮定

の計算値 t_{cal} を求め、 t_{cal} が測定した伝搬時間 t の最尤値となるときに、求めようとしている音速分布である（資料1）。

表面走査法を用いるにあたって、事前に探触子間隔の補正係数を求めておく必要がある。補正係数の求め方は、資料2のとおりである。

(2) 強度推定

次に、強度推定は次のように行う。

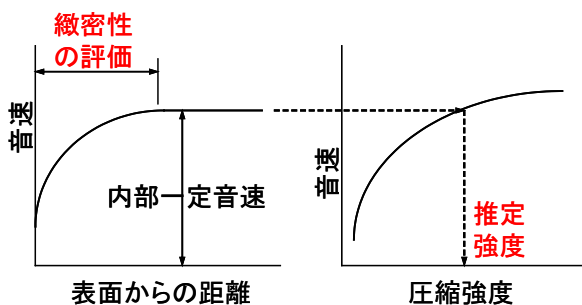
① 上記手順により音速分布は図3(a)のように求められる。

② 内部の一定になった音速（内部一定音速）を用いて強度推定を行う。

③ 図3(b)のようにあらかじめ（試験練りの時などに）円柱供試体を作製して水中養生を行い、音速と強度の関係から強度推定式を作成しておく（4.参照）。

④ 強度は、図3(a)の内部一定音速に一致する強度を図3(b)から推定する（7.参照）。

⑤ 水中養生による強度推定式によって推定した強度を、封かん養生の場合に補正する（9.参照）。



(a) 音速分布 (b) 強度と音速の関係

図3 強度、表層の緻密性の推定方法

注意 ③の強度推定式を作成するために、H19までは封かん養生した円柱供試体を用いることとしていた。封かん養生を行うことは難しいことなどから、水中養生することに修正した。ただし強度推定は、構造体内部の含水状態を考慮し、封かん状態を想定していることから、強度推定結果を補正する必要がある。詳細は9.参照。

⑥ この方法によって求めた音速分布は、コンクリート表層の品質（緻密性）を表しており、その評価もできる（図3(a)）。

強度推定のフローと、関連する記述部分は図4のとおりである。

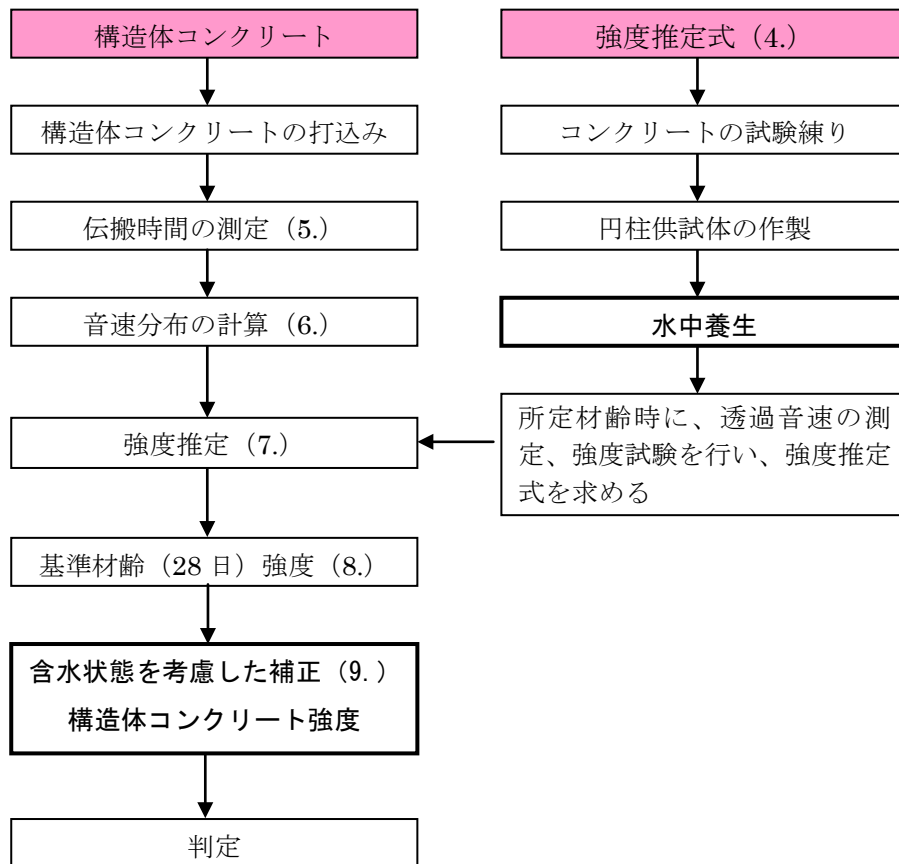


図4 強度推定フロー

3. 測定装置

(1) 測定装置

伝搬時間が直接デジタル表示できるものを原則とする。

表面走査法による測定が可能な出力のものを選択する。

(2) 発信探触子および受信探触子

発信探触子および受信探触子は、任意の振動子寸法のものを選択してもよい。

ただし、コンクリート表面（測定面）の荒さや凹凸の影響を受けにくくするために、できるだけ小さい径の探触子を用いるとよい。

参考 コンクリートは不均一であるため減衰が大きいこと、表面走査法による測定は超音波の指向方向に対して直角方向のエネルギーが小さい波を受信するため、測定に十分な出力を有するとともに、できるだけ低周波のものがよい。

4. 強度推定式の求め方

強度を推定するための基準となる強度推定式を事前に求めておく。

試験練りの時などに円柱供試体を作製し、水中養生する。所定材齢時に音速を測定し、そのあと強度試験を行う。

試験する材齢は、セメントの種類、検査する時期などを考慮して、28日強度が精度良く求められるようにする。普通セメント、高炉セメントB種を使用する場合は、少なくとも材齢1週、2週、4週、13週時の4材齢の結果を用いて強度推定式を作成する。早強セメントの場合は、3日、1週、4週、8週または13週の4材齢を用いる。

音速は、円柱供試体の長手方向を透過法によって測定する。

強度と音速の関係式を、指数関数によって回帰して求める（**図3(b)**）。

5. 構造体コンクリートの超音波伝搬時間の測定方法

(1) 測定箇所および測定数

測定箇所については、構造体コンクリートの強度を代表すると考えられる箇所をランダムに選定する。

コンクリート表面にジャンカ、コールドジョイント、ひび割れなどがある部分は避ける。表面走査法による測定線は、鉄筋の影響を避けるため、縦筋、横筋に対して斜め（できるだけ45度）に設ける。

測定箇所数は、1ロットにつき3測線とする。

測定結果に何らかの異常が観察されたり安定しない場合は、測定箇所を変更する。

(2) 測定方法

測定の手順は以下による。

- ① 測定装置の電源を入れる。
- ② 必要に応じ0点調整を行う。
- ③ 測線および探触子設置位置をけがく。探触子中心間隔は、100mm から 300mm まで 50mm ずつ増加させる。1,000mm までは 100mm ずつ増加させる。
- ④ 測定面に凹凸がある場合は目の粗い砥石（#25～#60）で研磨する。
- ⑤ 探触子設置箇所に接触媒質（グリースなど）を塗布する。
- ⑥ 発信探触子および受信探触子を所定の位置に圧着する。
- ⑦ 出力が安定するまで待ち、伝搬時間を $0.1\mu\text{s}$ まで読みとる。
- ⑧ 探触子中心間隔を変えて同様に伝搬時間を測定する。
- ⑨ 測定後、接触媒質をふき取り、必要に応じてベンジンなどで清浄する。

6. 構造体コンクリート内部の音速分布の計算

音速分布の計算は次の手順で行う。

(1) 探触子間隔の補正

表面走査法による探触子中心間隔と伝搬時間の測定結果のうち、探触子中心間隔は式(1)によって補正する。

$$L'=(L-x)(1+\alpha)\leq L \quad (1)$$

ここに、 L' : 補正間隔、 L 探触子の中心間隔、 x : 探触子を最も近づけたときの補正距離、 α : 補正係数である。ただし、 L が次第に大きくなり $(L-x)(1+\alpha)>L$ のとき、 $L=L'$ とする。

補正係数 x および α は、使用する装置により変化するため、あらかじめ求めておく。補正係数の求め方は、**資料2**による。

(2) 表層伝搬範囲の設定

超音波が表層の音速変化域を伝搬する範囲(内部音速分布を計算する範囲)を求める。

補正探触子間隔を伝搬時間で除して求めた「見かけの音速」と補正探触子間隔の関係は、**図5**のように間隔が広がるに従い速くなり、ある距離からはほぼ一定の音速になる。表層を伝搬する範囲は、見かけの音速の変化している部分の回帰曲線と、内部のほぼ一定の音速の平均または回帰直線の交点を求め、その距離(**図5**のL1)までとする。

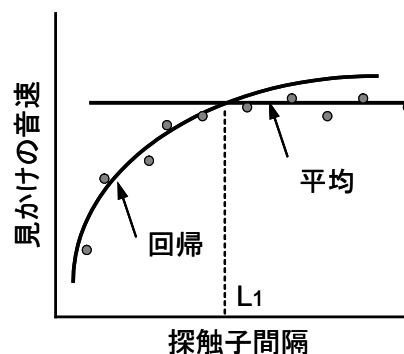


図5 探触子間隔と見かけの音速

(3) 音速分布の計算

音速変化域 L1 以下の測定結果を用いて、**資料1**に基づいて音速分布を計算する。

7. 強度の推定

図3のように、**4.**によって求めた強度推定式から、**6.**によって求めた内部一定音速のときの強度を求める。

8. 基準材齢(28日)強度の求め方

構造体コンクリートを測定する材齢は、必ずしも基準材齢(通常は28日)とは限らないため、式(2)により基準材齢強度 f_{c28} を求める。

$$f_{c28} = f_{ct} (\alpha + \beta t) / t \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = f_{c28}/a$ 、 $\beta = f_{c28}/b$ である。材齢補正係数 α 、 β を求めることにより、式(2)で求めた材齢 t (日) で求めた圧縮強度 f_{ct} を28日強度に補正することができる。

参考 式(2)は次のようにして求めた。

圧縮強度と材齢の関係は、式(3)の双曲線関数で表されるものと仮定する。

$$f_{ct} = t / (1/a + t/b) \quad (3)$$

ここに、 f_{ct} : 材齢 t (日) の圧縮強度、 a : $t=0$ の時の接線勾配、 b : 最終 ($t=\infty$) 到達強度を表す係数、である。材齢 t (日) の強度から28日強度 f_{c28} を求めるため、式(3)に $\alpha = f_{c28}/a$ 、 $\beta = f_{c28}/b$ 、 $b = f_{c28}$ を代入することにより式(2)を得る。

9. 含水状態を考慮した補正

(1) 補正の適用範囲

(2)の補正が適用できるのは、これまでの実験の結果より、**表1**のとおりである。

表1 補正方法の適用範囲

(a) セメントの種類および呼び強度

セメントの種類	普通ポルトランドセメント 高炉セメント B 種	早強ポルトランドセメント
呼び強度	24、27、30	36

(b) 水中養生した 28 日強度

水中養生した 28 日強度 f_{c28}	60MPa (N/mm ²) 未満
-------------------------	-------------------------------

(2) 補正方法

水中養生した円柱供試体による強度推定式を用いて強度を推定した場合、式(4)によって補正した値を構造体コンクリート強度とする。

$$f_c = k \cdot f_{cw} \quad (4)$$

ここに、 f_{cw} : 水中養生した円柱供試体による強度推定式を用いて推定した強度、 k : **表2 (図6)**の補正值である。

表2 補正值

水中養生した 28 日強度 f_{c28}	補正值 k
40 MPa 以下	1.1
40 MPa 以上	$k = 1.5 - 0.01 \times f_{c28}$

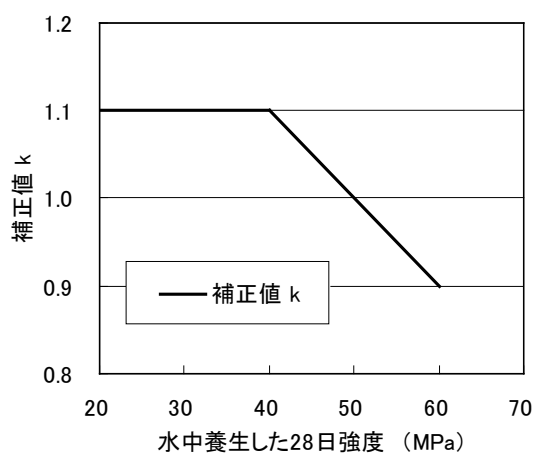


図6 補正值

10. 判 定

判定は「微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領（案）」の判定基準に基づいて行う。

11. 報 告

報告する事項は次のとおりである。

- (a) 試験年月日、試験場所、試験者名
- (b) 構造物とコンクリートに関する記録
- (c) 試験箇所の概要（試験体、構造物の概要、試験箇所位置図、配筋図、コンクリートの強度、試験材齢など）
- (d) 超音波装置の型式、製造番号
- (e) 音速に関する試験結果（探触子間隔、伝搬時間など）
- (f) コンクリートに関する試験結果（音速、圧縮強度など）
- (g) 強度推定結果
- (h) 基準材齢（28日）補正強度
- (i) 構造体コンクリート強度

12. 参 考

超音波（土研法）による推定強度とコア強度との関係を図7に参考として示す。図7は、「非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究」の一環として行なった実構造物の実験結果であり、推定強度はコア強度に対してほぼ±15%の範囲内に分布した。

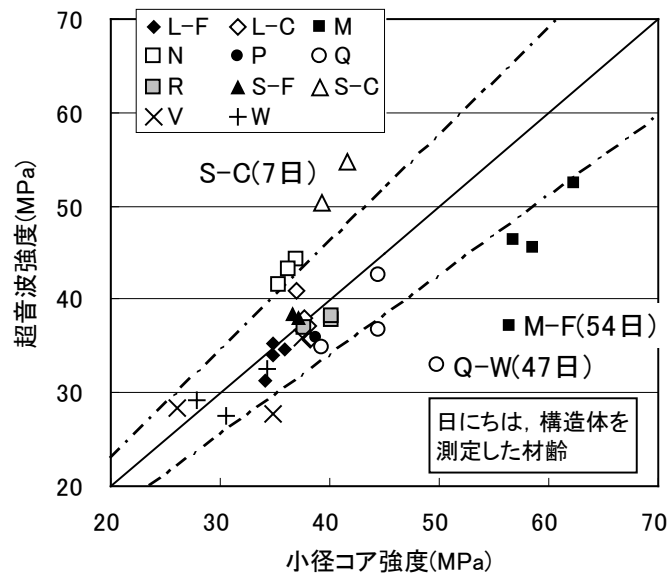


図7 土研法による強度推定結果とコア強度の関係

本要領に基づく計算ソフトについて

本要領の 4 章から 9 章までの音速－強度の関係式、音速分布、強度推定、基準材齢強度を求める計算ソフトを、土研のホームページに掲載している（超音波法による強度推定ワークシート及び同ワークシート）。

ただし、同ワークシートに設定している探触子間隔の補正係数（6 章参照）は、東横エルメス社製のエルソニックの場合である。そのほかの装置を用いる場合は、**資料 2** によって補正係数を求める。

資料1 音速分布の求め方

表面走査法によって測定した探触子間隔ごとの伝搬時間から、音速分布を次のように求める。

(1) 表層を伝搬する範囲（音速分布を計算する範囲）を、次のように決める。

探触子間隔を伝搬時間で除した音速（以下、「見かけの音速」と呼ぶ）と探触子間隔の関係を図示すると、**図 1.1**のように、間隔が短いとき見かけの音速は遅く、間隔が長くなるほど速くなり、ある距離からほぼ一定の音速になる。見かけの音速が変化する範囲は、最速伝搬経路が音速の変化している表層部分を伝搬しているものと考えられる。それより間隔が長くなると、内部の音速がほぼ一定の部分で伝搬するため、ほぼ一定の音速になるものと考えられる（**図 1.2**）。

そこで、表層を伝搬する範囲は、見かけの音速の変化している部分の回帰曲線と、内部のほぼ一定の音速の平均または回帰直線の交点までの距離 L_1 とする。

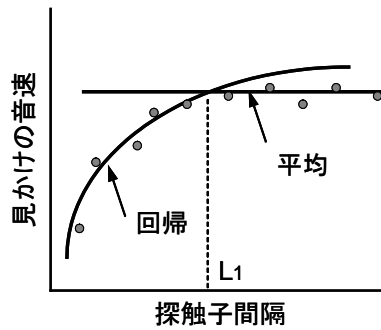


図 1.1 探触子間隔と見かけの音速の関係

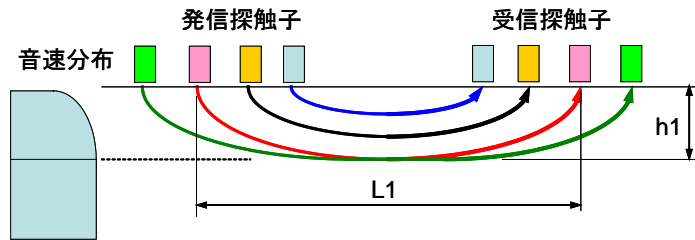


図 1.2 表面走査法による伝搬時間の測定と最速伝搬経路

(2) 音速分布を式(1.1)と仮定する（**図 1.3**）。

ここに、 $V(x)$: 音速分布, h_0 : 音速分布の原点から表面までの距離, h_1 : 表面からの距離, m : 正の整数である。

$$V(x) = K \cdot x^{\frac{1}{2m}} = K(h_0 + h_1)^{\frac{1}{2m}} \quad (1.1)$$

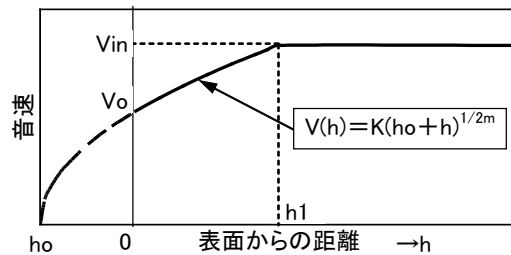


図 1.3 コンクリート内部の音速分布の仮定

(3) 表面走査法によって測定した探触子間

隔ごとの伝搬時間から、音速分布を式(1.1)と仮定すると、最速伝搬経路は変分法^{注)}によって式(1.2)で求められる。

注) 変分法の詳細については、解析力学に関する専門書を参照されたい。

$$y = \frac{(2m-1)!!}{(2m-2)!!} a^{2m} \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{x^{2m}}{a} \right) + \left[x^{\frac{2m-1}{2m}} + \sum_{r=1}^{m-1} \frac{(2m-2r+1)!!}{(2m-2r)!!} a^{2r} x^{\frac{2m-2r-1}{2m}} \right] \sqrt{a^2 - x^m} \quad (1.2)$$

ただし、

$$\sum_{r=1}^{m-1} \frac{(2m-2r+1)!!}{(2m-2r)!!} = \underbrace{\frac{2m-1}{2m-2}}_{r=1} + \underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)}{(2m-2)(2m-4)}}_{r=2} + \dots + \underbrace{\frac{(2m-1)(2m-3)\dots 5 \cdot 3}{(2m-2)(2m-4)\dots 4 \cdot 2}}_{r=m-1}$$

$$\frac{(2m-1)!!}{(2m-2)!!} = \frac{(2m-1)(2m-3)\dots 5 \cdot 3}{(2m-2)(2m-4)\dots 4 \cdot 2}$$

(4) 最速伝搬経路を伝搬する時間は、式(1.3)を積分することによって計算する。式(1.3)は、微小な伝搬距離 ds を伝搬する時間 dts を求めている (図 1.4)。

$$dts = \frac{ds}{V(x)} = \sqrt{\frac{1+y'^2}{V^2(x)}} dx \quad (1.3)$$

ここで、 ts : 表面伝搬時間、 ds : 微小な伝搬距離、 y' : 式(1.3)の微分である。

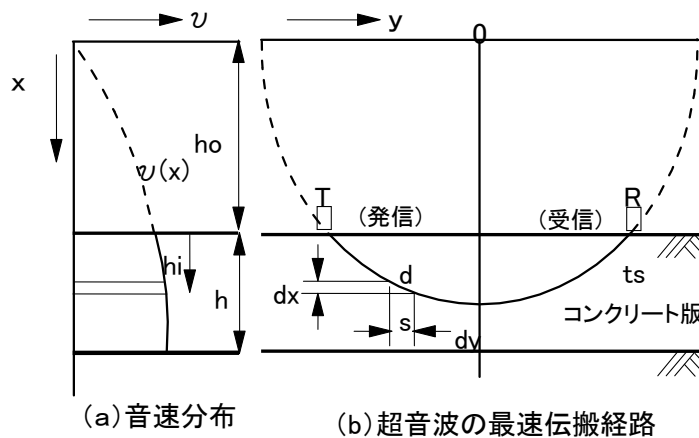


図 1.4 最速伝搬経路と伝搬時間の計算

資料2 探触子間隔の補正係数の求め方

探触子間隔の補正係数は次のようにして求める。

(1) 角柱供試体を作製する。

曲げ強度試験用の角柱供試体 150×150×530mm を作製し、水中養生を行う。

(2) 供試体側面を透過法により音速を測定し (図 2.1 (b))、打設面が遅く、底面が速いことを確認する (図 2.1 (c))。

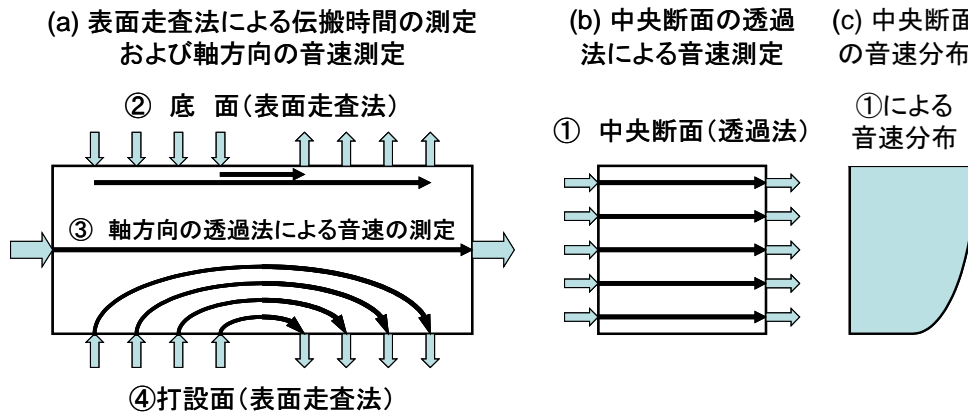


図 2.1 角柱供試体による補正係数の求め方

(3) 底面で表面走査法による伝搬時間を測定する (図 2.1 (a) ②)。

探触子中心間隔を伝搬時間で除して見かけの音速を求める。図示すると図 2.2 のようにしだいに一定値に収束する。

式(2.1)によって音速がほぼ一定になるように補正係数 x と α を求める (図2.2の Δ)。

$$L'=(L-x)(1+\alpha)\leq L \quad (2.1)$$

ここに、 L' : 補正間隔、 L : 探触子の中心間隔、 x : 探触子を最も近づけたときの補正距離、 α : 補正係数。ただし、 L が次第に大きくなり $(L-x)(1+\alpha)>L$ のとき、 $L'=L$ とする。

(4) 軸方向の音速を透過法によって測定し (図 2.1 (a) ③)、(3)によって求めた補正係数のときの音速とほぼ一致することを確認する (図 2.2 の Δ と透過音速)。

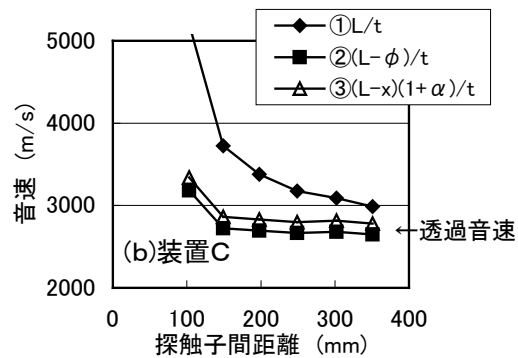
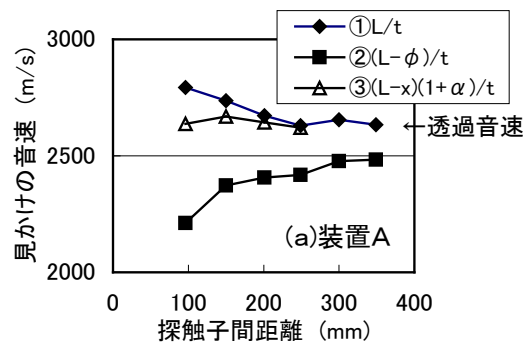


図 2.2 探触子間隔の補正

(5) 打設面を表面走査法によって伝搬時間を測定し（**図 2.1(a)④**）、**資料 1** によって音速分布を求め、中央断面の側面を透過法によって測定した音速分布とほぼ一致することを確認する（**図 2.3**）。

(6) (4)(5)を満足したとき、(3)で求めた補正係数を用いてよい。

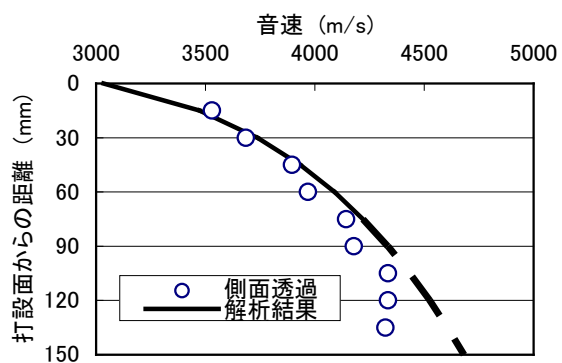


図 2.3 打設面から音速分布の確認

資料3 伝搬時間測定時の注意点

伝搬時間の測定を正確に行なうために、探触子とコンクリートの測定面とを、接触媒質を介して、しっかりと密着させることが大切です。

そのために以下の点に注意して測定をおこなって下さい。

1 測定面の前処理

超音波の伝達をよくするため、測定するコンクリート面の凹凸を無くします。

- ・ 砥石で平坦度 0.5 mm以下程度に研磨します。
- ・ 砂状の粒子は除去します。

2 接触媒質の塗布

超音波の伝達をよくするため、探触子を接触させる測定面に接触媒質を塗ります。

- ・ 接触媒質は、グリースなど粘性のあるものを使用してください。
- ・ 接触媒質は、刷毛・へらなどでコンクリート面に浸透するように、十分に塗ります。
- ・ 接触媒質中の砂粒など介在物は除いてください。

3 探触子の持ち方、当て方

超音波の伝達を安定させ、測定値を安定させるため、以下のような探触子の持ち方、測定面への当て方をします。

- ・ 下写真のように探触子下部を（現行形状のツバ付タイプはツバ部分に指を当てて）持ち、一定（1～3 kg程度）の力で測定面に押し当てます。
- ・ 探触子が僅かに動いただけで、測定値が変化するため、探触子を持つ手の側面や手首、肘などを測定面（又は周囲の構造物など）に置くと良いでしょう。

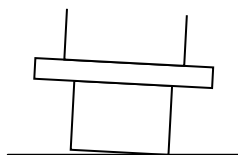


ツバ付タイプ

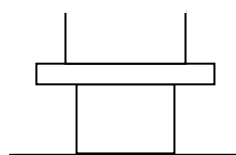


ツバ無しタイプ

- ・ 探触子振動面は、測定面に対して平行に接触するように押し当てます。



×



○