

衝撃弾性波試験（仮称）表面２点法による
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	2
2. 衝撃弾性波による強度推定の原理および手順の概要	2
3. 圧縮強度測定装置	3
(1) 圧縮強度測定装置の構成および機能	3
(2) 振動検出器の形態	4
(3) 圧縮強度測定装置の使用法	4
4. 圧縮強度推定式の作成方法	5
(1) 振動検出器の設置方法	6
(2) 測線の選定	7
(3) 打撃方法	7
(4) データ収集方法	8
6. 弾性波速度の算定方法	8
(1) 弾性波速度の算出	8
(2) 弾性波速度の補正	9
7. 圧縮強度の推定方法	10
(1) 推定強度の算出	10
(2) 推定強度の材齢補正	10
8. 判 定	10
9. 報 告	10
10. 参 考	11

H22(2010)年修正

1. 適用範囲

本要領書は、施工管理および検査の一環としてコンクリート構造物の圧縮強度を直接的に確認することを目的に、衝撃弾性波の伝播速度に基づく構造体コンクリートの圧縮強度測定を行う場合に適用する。適用対象とする部材寸法は、厚さ 100mm 以上、幅 200mm 以上、長さ 450mm または 700mm 以上を適用範囲とする。

部材の寸法に関する制約には、測定を行うときの測線の必要最小長さによるものと棒状または板状などの部材形状によるものがある。測線の必要最小長さによる制限は、5章の圧縮強度測定方法で述べるように、直交面打撃の場合は 450mm 以上、同一面打撃の場合は 700mm 以上の測線の長さが必要となるためである。部材形状による制限は、測定対象が棒状または板状の形状である場合、棒状体または板状体を伝播する弾性波速度が卓越し、本方法で対象とする半無限体を伝播する弾性波速度の測定に影響を与える恐れがあるために設けられたものである。

2. 衝撃弾性波による強度推定の原理および手順の概要

本強度測定方法は、衝撃弾性波の伝播速度（弾性波速度）に基づく構造体コンクリートの圧縮強度推定方法である。図-1 に表面 2 点法による圧縮強度推定方法の概要を示す。表面 2 点法とは、構造体コンクリートの弾性波速度測定方法の一つで、間隔および感振方向が固定された 2 個の加速度センサーを用いて衝撃弾性波の位相速度（伝播速度）を測定する方法である。ここでは、コンクリート表面を伝播する疎密波（縦波）の速度を測定するため、加速度センサーを 30cm の間隔で取り付けられた取っ手状の測定器具を振動検出器と呼ぶ。

表面 2 点法による構造体コンクリートの弾性波速度測定方法は、図-1 に示すように、コンクリート表面に振動検出器を接触させ、その近傍をハンマーで軽く叩いて衝撃弾性波を発生させ、その弾性波が 2 点間を伝播する位相差（伝播時間）を測定するものである。したがって、弾性波速度は 2 点間の距離（測定距離）を伝播時間で除すことにより求められる。この方法により、一般に、半無限体を伝播する縦波の速度（弾性波速度）が測定できる。

次に、測定された弾性波速度を強度推定式に代入することにより、圧縮強度が推定される。

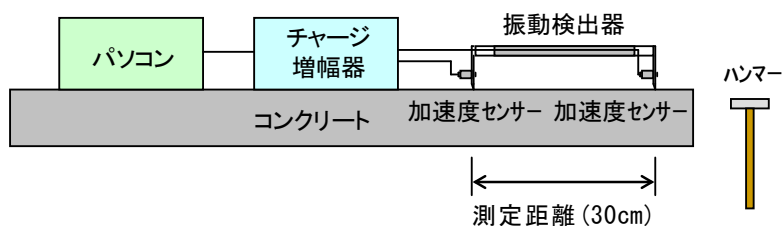


図-1 表面 2 点法による圧縮強度推定方法の概要

強度推定式とは、コンクリートの弾性波速度から圧縮強度を推定するための強度換算式（検量線）をいう。

一方、強度推定の手順を図-2 にフローチャートで示す。原則として事前に強度推定式を作成する必要があるが、打設するコンクリートと同じコンクリートの強度推定式が既にある場合は、それを用いてよい。強度推定式は、試験練りまたは現場実機試験などの機会に、使用するコンクリートの円柱供試体を作製し、その弾性波速度測定および圧縮強度試験を実施することにより作成する。強度測定を実施する構造体コンクリートの材齢、部位などを選定し、強度判定値を設定するなどの強度測定計画を立案する。計画に従い、構造体コンクリートの弾性波速度測定を実施し、予め準備した強度推定式に基づき、推定強度を算定する。推定強度が強度判定値に達していることが確認できれば、報告書を作成して終了となるが、達していない場合は適切な措置が必要である。

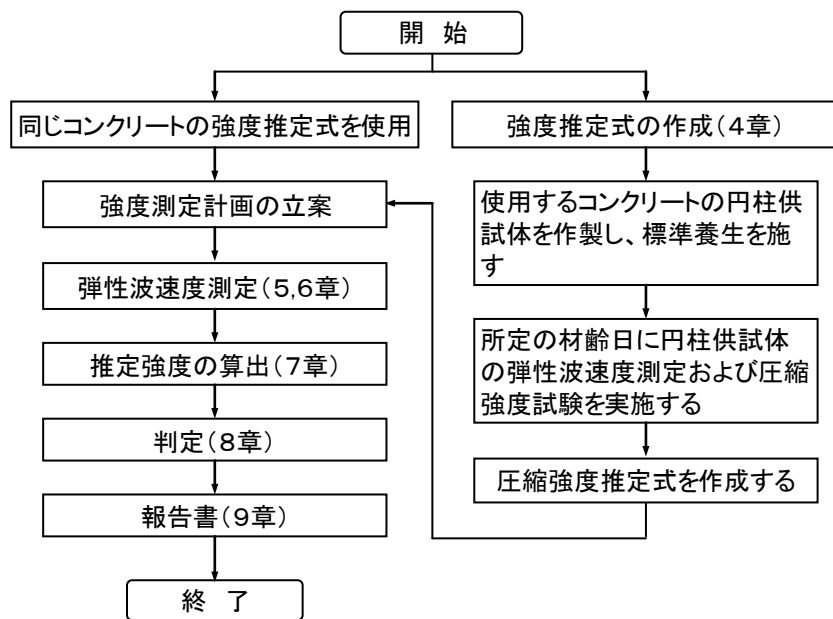


図-2 強度推定の手順

3. 圧縮強度測定装置

(1) 圧縮強度測定装置の構成および機能

表面2点法による圧縮強度推定を行う装置は、振動検出器、2チャンネルのチャージ増幅器およびパソコン（A/D変換器、ディスプレイを含む）から構成されている。この装置を圧縮強度測定装置と呼ぶ。圧縮強度測定装置は、振動検出器で捉えた2点の衝撃波形から縦波の伝播時間を解析し、弾性波速度を求めて推定強度を算出し、結果をリアルタイムにディスプレイに表示すると共にファイルに保存する機能を有する。圧縮強度測定装置の概観を写真-1に示す。



写真-1 圧縮強度測定装置の概観

(2) 振動検出器の形態

写真-2 に振動検出器の概観を示す。加速度センサーが測定器具に固定され、測定距離および感振方向が定まることにより、2点の波動を片手で容易に測定することができる。



写真-2 振動検出器の概観

(3) 圧縮強度測定装置の使用法

本装置の使用手順は次のようになる。測定を行う前に、振動検出器を接続し、パソコンを立ち上げ、測定準備を行う。振動検出器をコンクリートの測定位置に接触させ、その延長線上の近傍をハンマーで打撃する。瞬時に測定した弾性波速度値がディスプレイに表示されるので、2, 3回試し打撃を行い、速度値の傾向および良否を観察する。多少のバラツキはあるものの、再現性が見られ、表示された速度値が適切であると認めた場合、速度データとして収集する。速度値が不適切であると思われる場合は測線を変更する。

4. 圧縮強度推定式の作成方法

弾性波速度による圧縮強度推定式（検量線）を式(1)に示す。ここに、圧縮強度を f_c 、半無限体の弾性波速度を V および密度を ρ とする。表-1 に強度推定式の係数、図-3 に弾性波速度と圧縮強度との関係の一例を示す。ここでは、式(1)の係数 a 、 b 、 c の設定方法を以下に述べる。

$$f_c = a \cdot c \cdot \rho V^2 + b \quad (1)$$

表-1 強度推定式の係数の一例

ρ (g/cm ³)	a	b (N/mm ²)	c
2.3	1/220	-121.5	0.825

推定精度向上のため、事前に打設するコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を調べ、強度推定式を作成する。例えば、コンクリートの試験練りまたは実機試験の際に、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種の場合は材齢 7, 14, 28, 56 または 91 日、早強ポルトランドセメントの場合は 3, 7, 28, 56 または 91 日の 4 材齢の試験を対象に、円柱供試体を 3 本ずつ計 12 本作製し、標準養生または封緘養生を行う。各材齢時に弾性波速度測定および圧縮強度試験を行い、弾性波速度と圧縮強度との相関関係を求める。円柱供試体の弾性波速度測定は、写真-3 のように、反射波法により行う。半無限体の弾性波速度 V は、多重反射波のフーリエスペクトルから縦振動のピーク振動数 f を抽出し、円柱供試体の長さ L を用いて、式(2)より算出される。

$$V = 1.1 \times 2 L \cdot f \quad (2)$$

弾性波速度と圧縮強度との相関関係に式(1)を回帰させ、係数 a および b の値を求める。この

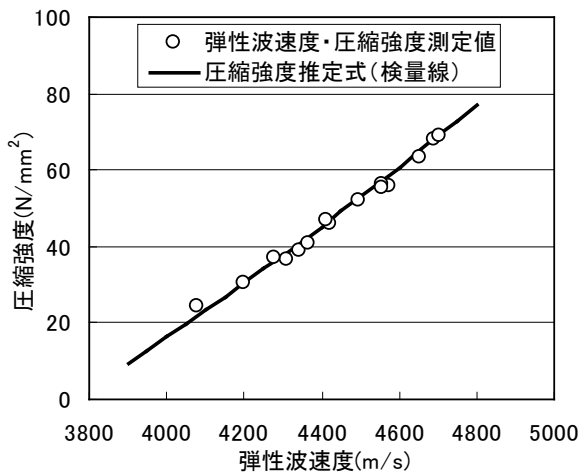


図-3 弾性波速度と圧縮強度との関係の一例



写真-3 反射波法による弾性波速度測定状況

とき、コンクリート密度は、試験に用いた円柱供試体の単位容積質量の平均値とするか、一般的な値として、普通コンクリートの場合は 2.3g/cm^3 、高強度コンクリートの場合は 2.4g/cm^3 とする。また、係数 c は、ポアソン比に関係する係数であり、コンクリートの構成が変化してもほとんど変わらないので、 0.825 を用いることとする。

5. 圧縮強度の測定方法

(1) 振動検出器の設置方法

振動検出器の設置方法と打撃面との関係を図-4 に示す。振動検出器に内蔵されたセンサーのうち、打撃点に近い方のセンサーを便宜的に A センサー、他方を B センサーと呼ぶこととする。打撃面は、図-4 (a), (b) に示すように、測定部位および形状により 2 種類がある。図-4 (a) は、

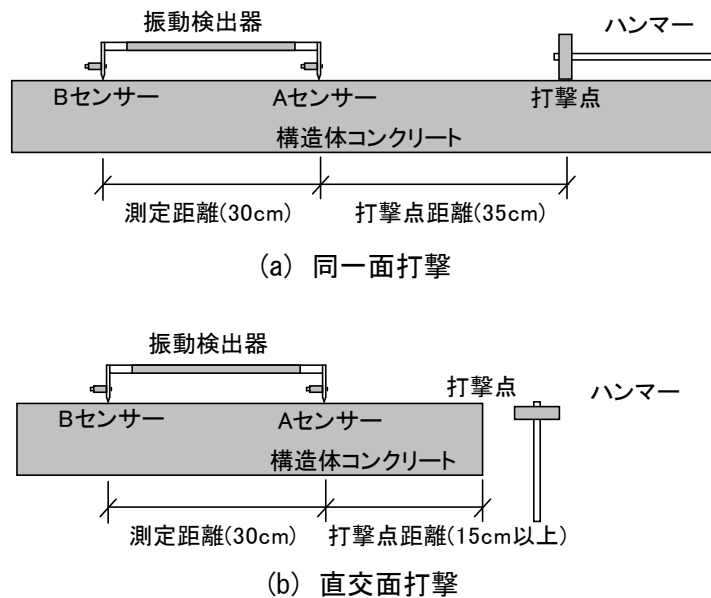


図-4 振動検出器の設置方法と打撃面との関係



写真-4 振動検出器による橋梁の圧縮強度測定状況

振動検出器が接している面と同一面を打撃する方法で、同一面打撃と呼ばれ、壁や床スラブのように広い平面で構成された部材の測定に用いられる。同一面打撃の場合、打撃点とAセンサーまでの打撃点距離は35cm必要である。図-4 (b)は、振動検出器が接している面と直交する端面を打撃する方法で、直交面打撃と呼ばれ、柱や梁のように近傍に直交する端面がある部材の測定に用いられる。直交面打撃の場合は、打撃点とAセンサーまでの打撃点距離は15cm程度でよいので、測線が短くなる。いずれの場合でも打撃点は、振動検出器のA、B両センサーのコンクリート接触点を結ぶ線上（測線）で、Aセンサーから延長した点である。振動検出器による橋梁の圧縮強度測定状況を写真-4に示す。

（2）測線の選定

強度を測定する位置において、振動検出器の二つの接触点およびハンマーの打撃点の3点を直線で結ぶ測線を選定する必要がある。選定する際に、以下の点に留意する。

- ① 測線を横断するひび割れの有無を確認し、ひび割れのない場所を選ぶ。
- ② ジャンカ等で粗骨材が露出している部分は避ける。
- ③ コンクリート中の鉄筋が弾性波速度に影響を及ぼすため、鉄筋に近傍（かぶり厚さを含め10cm以内）する平行な測線は避ける。鉄筋が近傍にある場合は、鉄筋となす角度が45度の測線を選ぶと良い。
- ④ 測線とコンクリート側面が平行する場合、または測線とひび割れが平行する場合は、10cm以上の間隔を設ける。
- ⑤ ハンマーで叩き易い位置を選ぶ。
- ⑥ 打撃点は、型枠面程度の平坦な部分を選び、気泡痕などの部分は避ける。コンクリート表面が凸凹の場合は、研磨機等で平らにすると良い。

（3）打撃方法

ハンマー等によりコンクリート表面を打撃して発生させた衝撃弾性波は、打撃位置や強さ、ハンマーの質量および測定部位やコンクリートの特性などに依存し、波形形状、周期および振幅などが一定ではない。打撃の変動は少ない方が望ましいので、打撃方法の注意点を列挙する。

- ① ハンマーで叩き易い姿勢で叩く。
- ② 打撃強さは一定になるように叩く。
- ③ ハンマーの反発は自然に任せる。
- ④ 打撃点は、一点を叩くように、位置ずれに注意する。
- ⑤ 打撃の間隔は、波動が減衰してから次の打撃を行うように、1秒以上空ける。

(4) データ収集方法

推定強度の確度を高めるために、表面2点法では、写真-5に示すように、1測線は近接する上下2本の測線を加えた3本で構成され、推定強度はそれらの平均値で評価する。すなわち、近接する3箇所の弾性波速度の平均値を1測線の測定値とする。さらに、弾性波速度測定値のバラツキを考慮するため、1箇所の弾性波速度は10個の測定データの平均値により求める。



写真-5 表面2点法における測線の取り方

6. 弾性波速度の算定方法

(1) 弾性波速度の算出

2点で検出した衝撃弾性波形から弾性波速度を算出する方法を示す。衝撃弾性波の立ち上り位置は、波形勾配比（最大波形勾配に対する波形勾配の比）が所定の値になった点と定義し、式(3)を満足する最大の時刻 t を算定することにより特定される。なお、波形勾配とは、立ち上り波形の接線勾配である。

$$r_w \geq (A_t - A_{t-1}) / (A_{t_m} - A_{t_m-1}) \quad (3)$$

ここに、図-5に示すように、 A_t は十分に短い時間間隔でデジタル化された衝撃弾性波形の時刻 t における振幅、 A_{t-1} は時刻 $t-1$ における振幅である。同様に、 A_{t_m} は最大波形勾配を示す時刻 t_m における振幅、 A_{t_m-1} は時刻 t_m-1 における振幅である。なお、波形勾配比 r_w は、1/20 から 1/15 が適切である。

衝撃弾性波形の立ち上り時刻を図-6に示

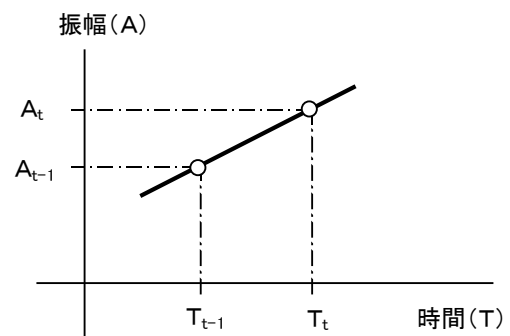


図-5 デジタル化された衝撃弾性波形

す。例えば、**図-4** に示す振動検出器のAセンサーが検出した衝撃弾性波形から算出した波形の立ち上り時刻 t を T_a とし、Bセンサーによる時刻を T_b とすれば、測定距離は 30cm なので、弾性波速度 V_p は式(4)より求められる。

$$V_p = 0.3 / (T_b - T_a) \quad (4)$$

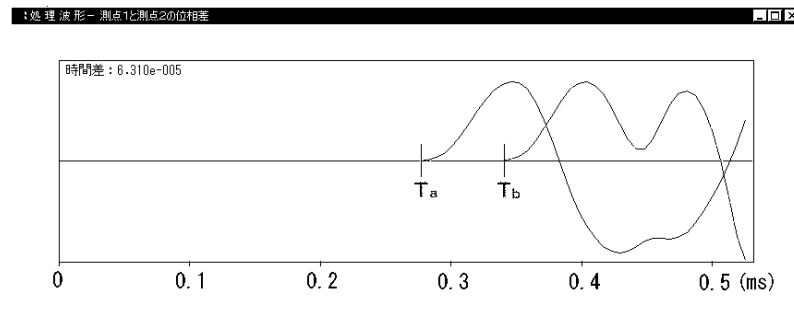


図-6 衝撃弾性波形の立ち上り時刻

(2) 弾性波速度の補正

表面 2 点法により測定された弾性波速度は、コンクリート表面の弾性波速度であるため、構造体内部の弾性波速度よりも若干遅い傾向がある。この表面と内部の速度差は、新設コンクリートの場合、主に表面付近のモルタルリッチな状態によるものと考えられる。表面付近では、粗骨材の見掛け上の密度が低下するため、相対的にモルタルの密度が増加する。これにより、コンクリート表面の弾性波速度は、モルタルの弾性波速度に依存するので、表面と内部の速度差はモルタルの弾性波速度が速くなるほど小さくなると考えられる。そこで、内部の速度は、表面の弾性波速度に比べ、3850m/s のとき 4.0%速く、5100m/s 以上では差がないものとし、その間は直線補間とする。このため、構造体内部の弾性波速度（補正弾性波速度）を V とし、コンクリート表面で測定された弾性波速度 V_p を式(5)により補正する。なお、3850m/s 以下では、差は 4.0%一定とする。但し、杭頭部のように、杭頭処理により内部のコンクリートが表面に露出した場合は、補正の必要はない。

$$V = V_p \times \{1.04 - 0.04(V_p - 3850)/1250\} \quad (5)$$

なお、コンクリート表面の弾性波速度は、乾燥により低下するため、測定する材齢が 30 日以上になると影響を受ける可能性があるため、乾燥を防止する対策を講ずる必要がある。対策の一例として、型枠脱型直後、測定予定の測線上に幅 10cm、長さ 50cm 程度の範囲で不透水性のテープを貼っておくと効果的である。

7. 圧縮強度の推定方法

(1) 推定強度の算出

4章で設定したコンクリートの密度 ρ および係数 a , b , c を強度推定式(1)に適用する。推定強度は、測定した弾性波速度 V_p を式(5)により構造体内部の弾性波速度 V に補正し、式(1)に代入することにより算出される。

(2) 推定強度の材齢補正

基準材齢としては通常 28 日であるが、測定できる時期は基準材齢とは限らない。基準材齢 28 日以前に測定された弾性波速度に基づく推定強度は、材齢 28 日の強度に補正する。28 日の基準材齢補正方法を次に示す。

コンクリート強度は双曲線関数で発現するものと仮定すると、材齢 t 日の強度 $f_c(t)$ は、材齢 28 日の強度 $f_c(28)$ および材齢補正係数 α , β により、式(6)で表される。

$$f_c(t) = \{t / (\alpha + \beta t)\} f_c(28) \quad (6)$$

ここに、材齢補正係数 β , α は、圧縮強度推定式の作成に使用した円柱供試体の圧縮強度と材齢との関係から、材齢 t 日 (7 日または 14 日) および 28 日の圧縮強度を用い、式(7), 式(8)により求められる。

$$\beta = (28 \cdot f_c(t) - t \cdot f_c(28)) / \{(28 - t) f_c(t)\} \quad (7)$$

$$\alpha = 28 \cdot (1 - \beta) \quad (8)$$

これにより、材齢 28 日の強度は、材齢 t' 日に測定した推定強度 $f_c(t')$ を用い、式(9)により求められる。なお、材齢 28 日以前に測定を行う場合、可能な限り 28 日に近い材齢とする。

$$f_c(28) = \{(\alpha + \beta t') / t'\} f_c(t') \quad (9)$$

8. 判 定

判定は微破壊・非破壊試験によるコンクリートの強度測定要領(案)の判定基準に基づいて行うこととする。

9. 報 告

報告は微破壊・非破壊試験によるコンクリートの強度測定要領(案)の報告に基づいて行うこととする。

10. 参 考

表面2点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。この図は、8つの橋梁構造物および2つのボックスカルバートについて実施した現場適用実験結果であり、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。なお、現場適用実験は、独立行政法人土木研究所が主催した非破壊・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ったものである。

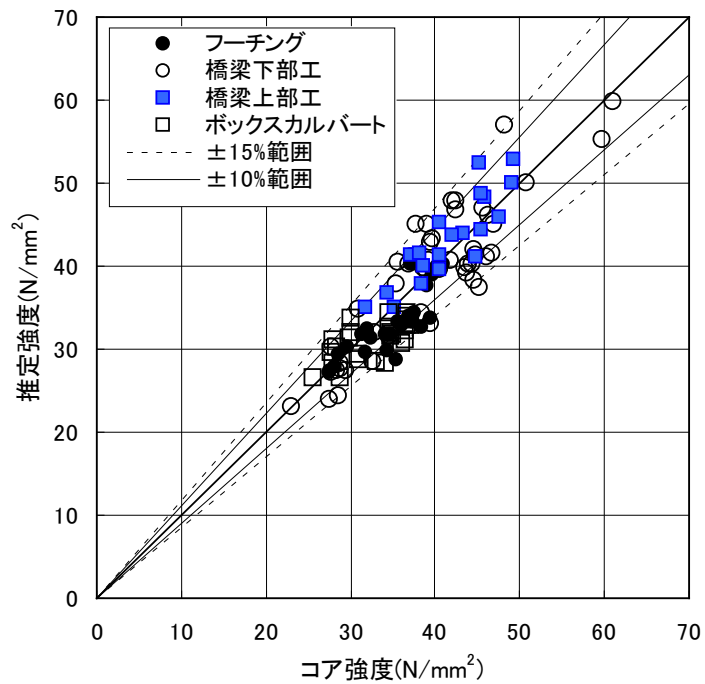


図-7 表面2点法による推定強度とコア強度との関係