

(3) 非破壊試験による構造体コンクリートの強度および緻密性の推定

岩野 聡史 リック(株) 立見 栄司 三井住友建設(株) 森濱 和正 (独)土木研究所

Part 3 Estimation of Compressive Strength and Density of Concrete in Structures Using Non-destructive Testing

Satoshi IWANO RIK Co.,Ltd., Eiji TATSUMI Sumitomo Mitsui Construction Co.,Ltd. and Kazumasa MORIHAMA Public Works Research Institute

キーワード 非破壊試験, 検査, 圧縮強度, 緻密性, 超音波, 衝撃弾性波, iTECS 法, 表面2点法, 機械インピーダンス

1. まえがき

構造部材を構成するコンクリート(構造体コンクリート)強度の検査は、構造部材の耐荷力が確保されていることを確認するために非常に重要である。本研究では、従来から研究されているリバウンドハンマの反発度による強度推定に対し、新たな方法として超音波、衝撃弾性波による弾性波速度、機械インピーダンスによる強度推定に関する検討結果を報告する。

また、コンクリートに要求される耐久性には、鉄筋腐食抵抗性、アルカリ骨材反応の抑制、凍害抵抗性など多くの項目がある。その中でも特に重要なのが鉄筋腐食を保護する性能である。この性能の検査は、かぶりコンクリートの緻密性であり、二酸化炭素の浸透に対する中性化抵抗性、塩素イオンの浸透抵抗性を有していることを確認することが重要である。これまでは、コアやドリルによる局部破壊を伴う透気・透水性に関する研究が行われている。

本研究では、非破壊試験による緻密性評価に関する研究を行った。研究内容は、接触時間および弾性波伝搬速度の変化による緻密性の評価である。前者の接触時間による緻密性の評価については既に報告しており¹⁾、ここでは、超音波および衝撃弾性波による伝搬速度の変化から表層の品質変化を評価する試みについて紹介する。

2. 非破壊試験による強度推定

以下に紹介する4種類の非破壊試験による強度推定は、いずれも①構造体コンクリートの強度を表す指標の測定と、②その指標から強度を換算するための強度推定式の作成、①の指標の測定結果を②の推定式に代入することによって行うことでは共通している。

強度推定を行った構造物は、(1)編の表5の9構造物(T, Uを除く)、12種類のコンクリートである。コンクリートの種類は、セメントが普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高がセメントB種の3種類、呼び強度は24~36であり、建設場所が異なることから使用されている骨材も異なっている。

非破壊試験による推定強度の精度を求めるため、主にφ25mmの小径コアによる強度試験も行った。構造体コンクリートの非破壊試験は、コア採取の前日に行った。

3. リバウンドハンマによる強度推定

国土交通省では2001年よりコンクリート強度の管理に、リバウンドハンマが用いられている。したがって、まずリバウンドハンマによる強度推定結果を示し、本研究で提案している非破壊試験方法の推定結果と比較する。

3.1 実験方法

リバウンドハンマの強度推定に用いる指標は、反発度である。強度推定式は、コンクリートの種類ごとにφ125×250mmの円柱供試体を45本作製し、水中、封かん、気乾養生を行い、1, 2, 4, 8, 13週の5材齢時に20kN 載荷して固定し、反発度を測定し、その後強度試験を行った。

円柱供試体、構造体コンクリートの反発度は、1箇所あたり16点打撃し、小さい値3点と大きい値3点を除く10点の平均値とした。

3.2 実験結果

図1に構造体で使用された12種類のコンクリートの、気乾養生した円柱供試体の反発度と強度の関係を示す。コンクリートの種類は全て異なっているが、反発度と強度の関係を指数関数で回帰した結果を図中に示すとおり、非常に良い相関関係がある。また、図中には強度推定によく用いられる材料学会式²⁾、そのほかの気乾養生の研究結果^{3), 4)}も示している。材料学会式は、水セメント比48~80%で検討されており、低い強度が

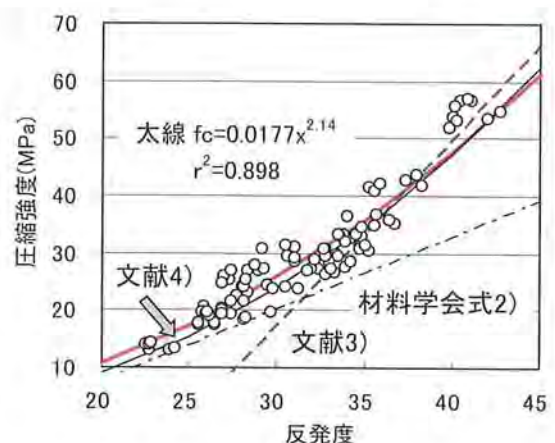


図1 気乾養生した円柱供試体の強度と反発度の関係

対象であり、その場合は実験結果に近いが、反発度、強度が高くなるとしだいに実験結果と乖離している。文献3)は、ほとんどの反発度が30以上の結果と直線近似しており、その範囲では実験結果とほぼ一致している。文献4)は、反発度と強度の関係を理論的に解析した結果であり、実験の回帰結果とよく一致している。

図2および3に、構造体コンクリートの反発度から材料学会式および本研究で求めた回帰式による強度推定結果を示す。図2の材料学会式による強度推定結果は従来からいわれているとおり±50%もばらついており³⁾、しかも全体的に小さく推定する傾向がある。図3の今回の実験による回帰結果を用いると、±30%程度に改善され、等値線に近づく傾向があり、材料学会式よりも改善されるものの、まだばらつきは大きい。

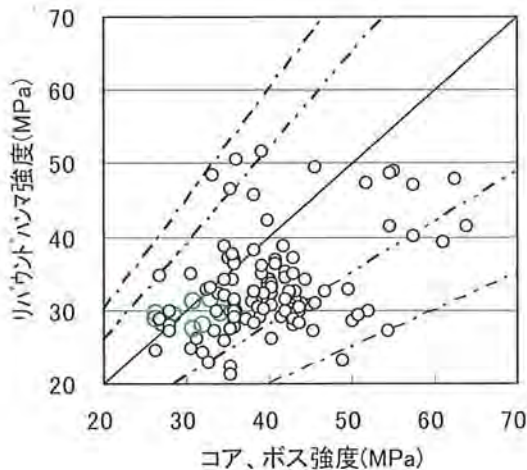


図2 材料学会式による強度推定結果

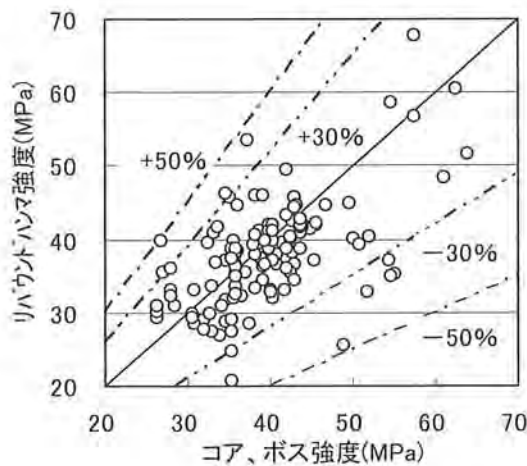


図3 今回の回帰結果による強度推定結果

4. 超音波（土研法）による強度推定

4.1 土研法の概要

超音波（以下、単に土研法という）による強度推定に用いる指標は、構造体コンクリートの内部一定音速である。内部一定音速の推定方法は、探触子間隔を変化させながら（通常100～1000mm）伝搬時間を測定し、距離と時間の関係を解析することによりコンクリート内部の音速分布を求めると図4(a)のように表面は遅く内部は速くなり、ある程度以上の深さからほぼ一定（内部一定音速）になる音速分布を推定することができる。

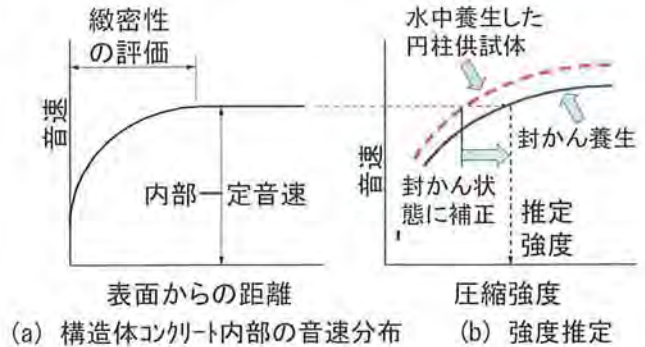


図4 土研法による強度推定

詳しくは文献6)などをご覧いただきたい。

強度推定式は、構造体コンクリート内部の含水状態を考慮し、封かん養生した円柱供試体の音速と強度の関係を用いることが土研法の原則である。両者の関係を指数関数によって回帰することにより強度推定式を求める。ただし、現場において封かん養生を行うことは難しいことなどから、実際には水中養生した円柱供試体を用いて、封かん養生の場合と同様に強度推定式を作成し、強度を推定する。この推定結果を、封かん養生の強度推定式の場合に補正することによって、構造体コンクリート強度の推定値を得る（図4(b)）⁷⁾。

4.2 強度推定精度

超音波による強度推定結果と小径コア強度の関係は図5のとおりである。推定結果は、小径コア強度の概ね±15%であるが、一部に誤差の大きい場合がある。通常、強度の検査は材齢4週（基準材齢）で行われるが、誤差が大きい場合は構造体の伝搬時間を測定した材齢が基準材齢よりもかなり早い場合（材齢1週）と、遅い場合（7～8週）である。この結果は、コンクリートの強度発現特性より説明可能な結果である¹⁾。2～6週の範囲内で測定した場合は概ね±15%であり、検査に用いる場合はできるだけ2～6週の範囲で測定することが望ましい。

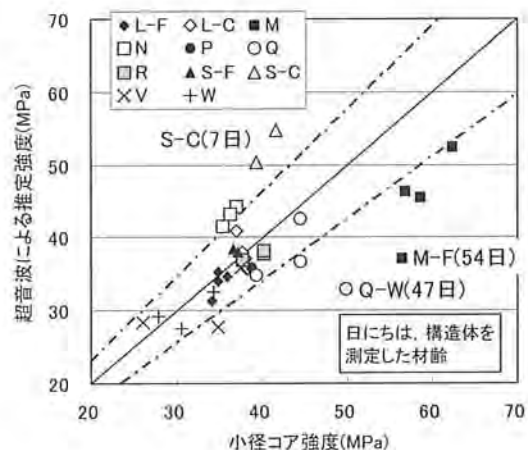


図5 土研法の測定精度

5. 衝撃弾性波（ITECS法）

5.1 ITECS法による強度推定方法

ITECS法の強度推定に用いる指標は、コンクリート中を伝搬する弾性波速度である。弾性波速度は、①ポアソン比、密度が一定であれば、弾性係数の平方根に比例すること、②弾性係数とコンクリートの圧縮強度には正の相関関係があること、①、②より、弾性波速度と圧縮強度には相関関係があることを利用し

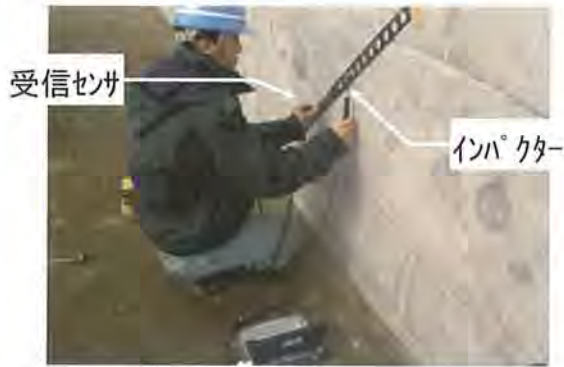


図6 構造体での速度測定状況

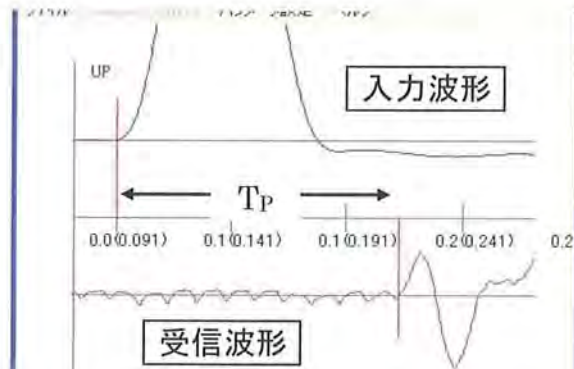


図7 構造体での速度測定波形例

て、構造体コンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を測定する。iTECS法による弾性波速度 V_p は、図6のようにインパクトと受信センサの距離 L を 200 ~ 1000mm まで 100mm ずつ増加させながら伝搬時間 T_p を測定して求める(図7)。

弾性波速度と圧縮強度の関係はコンクリートの配合によって変化することが確認されており⁸⁾、強度推定式は試験対象の構造体コンクリートと同一配合の円柱供試体を作製し、材齢を変化させて弾性波速度 V_p と圧縮強度 f_c を測定し、式(1)に示す両者の関係式を求め、強度推定式を作成する。

$$f_c = k \times V_p^\alpha \quad (k, \alpha: \text{係数}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

5.2 強度推定精度

新設構造物での弾性波速度測定例を図8に示す。図8は各入力点と受信点までの距離と伝搬時間の測定結果で、距離と伝搬時間は直線関係を示していることが分かる。既設のコンクリート構造物などでは、表面付近は劣化し、内部と比較して品質が低下しているような場合には、異なる直線関係を示すこととなる(8.2項参照)。これに対し、図8の測定例では、距離と伝搬

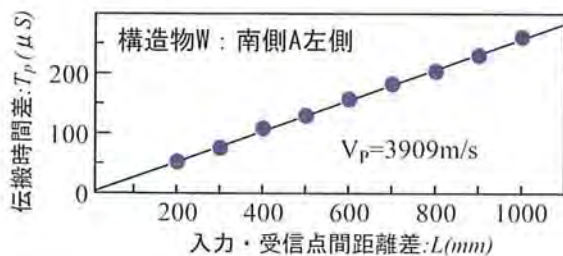


図8 新設構造物での伝搬時間測定結果例

時間は直線関係を示していることから、コンクリートの表面付近と内部では強度差が小さいものと判断できる。この場合は、各入力点と受信点の距離と伝搬時間から弾性波速度 V_p を測定し、全測定結果を平均処理して弾性波速度を決定する。

図9にiTECS法による圧縮強度の推定結果とコアの圧縮試験結果の比較を示す。圧縮強度約 20N/mm² ~ 約 55N/mm² の構造体コンクリートにおいて、概ね±15%の精度で圧縮強度を推定できることが確認された。

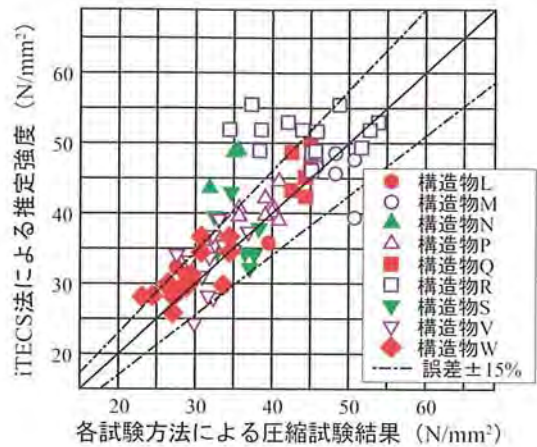


図9 推定結果と圧縮試験結果との比較

6. 衝撃弾性波(表面2点法)

6.1 表面2点法による強度推定方法

表面2点法による強度推定指標は、iTECS法と同様、弾性波速度である。ただし、弾性波速度の測定は、図10に示すように2個の加速度センサを300mmの間隔で取り付けられた振動検出器と呼ばれる器具を用いて衝撃弾性波の位相差(伝搬時間)を測定して求める方法である。

圧縮強度推定式⁹⁾は、iTECS法と同様にコンクリートの打設時に作製した円柱供試体により弾性波速度と圧縮強度との関係を求め、両者の相関関係に回帰することによって作成する。



図10 表面2点法による強度測定状況

6.2 強度推定精度

9種の構造物の圧縮強度推定式を図11にそれぞれ一例ずつ示す。求められた圧縮強度推定式は構造物ごとに大きく異なっていた。

推定強度とコア強度との関係を、実験を行った年ごとに区別して図12に示す。推定強度とコア強度とは非常に高い相関性を示し、その相関関係は、ほぼ±15%の範囲内に分布した。これ

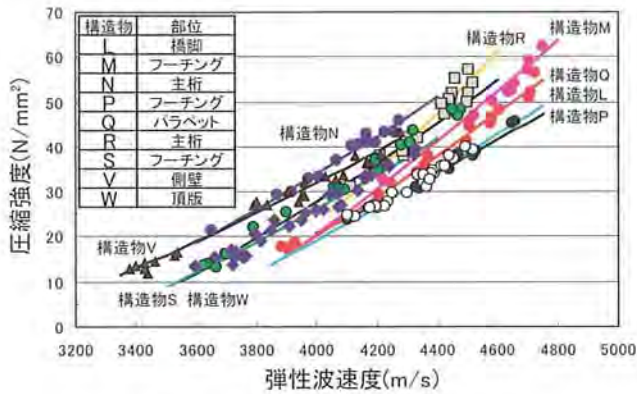


図11 弾性波速度と圧縮強度との関係

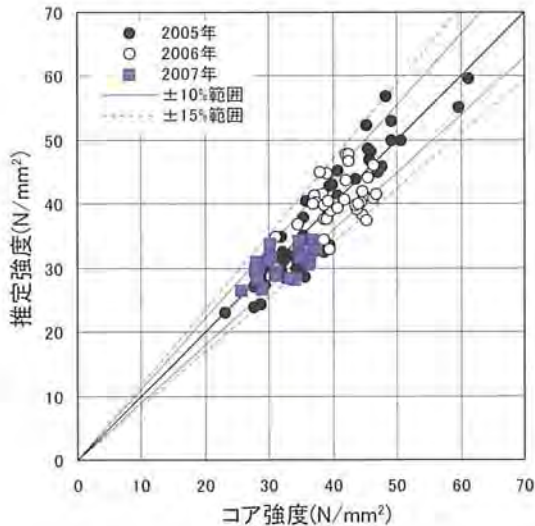


図12 表面2点法の推定精度

により、コンクリートの種類ごとに作成した圧縮強度推定式を用いれば、ほぼ±15%以内の推定精度が得られることを確認した。

7. 機械インピーダンス法

機械インピーダンス法の測定原理に関する模式図を図13に示す。ハンマー打撃による測定波形から、コンクリート表面のバネ係数 K を式(2)により求め、圧縮強度を推定する方法である。式(2)は、コンクリート表面をバネと仮定すると、ハンマー打撃による衝突エネルギーはバネのもつ弾性エネルギーに変換されることを利用して、ハンマー質量、衝突速度、バネ係数などをパラメータとして、バネ係数と測定量との関係から求められた式である。ここで、バネ係数は弾性係数を表す値であり、弾性係数と圧縮強度には正の相関関係があるといわれていることから、バネ係数と圧縮強度は直線比例関係にあることが確認されている¹⁰⁾。

$$K = (C/M) \cdot (A_{max}^3 / V_{max}^{3.6}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C は比例定数、 M はハンマー質量、 A_{max} は加速度の最大値 (m/s^2)、 V_{max} は加速度波形の後半部分を積分した速度波形の最大値 (m/s) である。

測定波形の後半部分はコンクリートがハンマーを押し戻す時間帯を示すことから、表面の劣化等の状況に影響されない、内部のバネ係数であり、これを圧縮強度推定の指標とした。また、

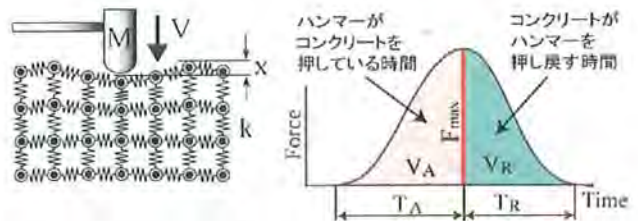


図13 機械インピーダンス測定による圧縮強度推定原理

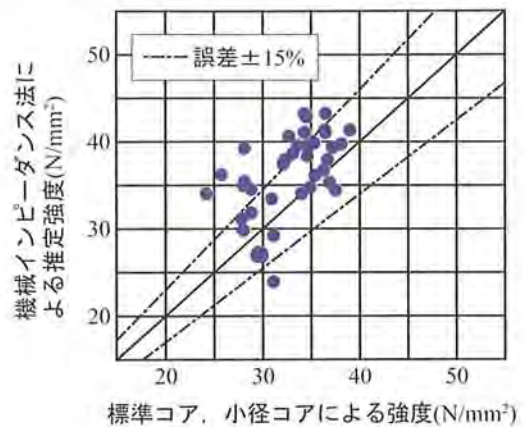


図14 機械インピーダンス法の推定精度

前述のとおり、バネ係数と圧縮強度は直線比例関係にあるが、両者の比例定数はコンクリートの配合によって異なるものと考えられる。そこで、本研究では測定対象とする構造体コンクリートと同一配合の圧縮強度試験用の供試体で定数 C を0.5と設定し、測定したバネ係数と圧縮強度の比例関係を求め、式(3)を強度推定式とした。

$$f_c = \alpha \cdot K \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 α : 比例定数である。

新設構造物で圧縮強度を推定した結果とコアの圧縮試験結果との比較を図14に示す。データ数は少ないが、概ね±15%の誤差である。

8. 経年変化

8.1 超音波法 (土研法)

コンクリート打設後約4週と数年経過後の表層品質の変化を、土研法およびITECS法がどの程度評価可能かを紹介する。比較に用いた供試体は(1)編の表4の①L型供試体Aの壁(4.9年経過後に測定)、②ボックス供試体の厚壁(同4.1年)、③壁供試体1(同3.0年)である。いずれも普通ポルトランドセメントを用い、呼び強度18であり、そのほかの供試体と比較して変化を生じやすいと考えられるものである。壁供試体は室内に保管されている。L型およびボックス供試体は屋外に保管されており、風雨にさらされている。

これらのコンクリート品質の変化を材齢1年と数年後の外観、小径コア強度で比較すると、室内保管していた壁供試体1は外観、強度ともほとんど変化していなかったが、屋外のL型とボックス供試体の表面は微細なひび割れが網目状にはいついた。また、小径コア強度は、低下する傾向があり、表層部分と内部の強度の違いは、表層の方が内部よりも低い傾向があった。

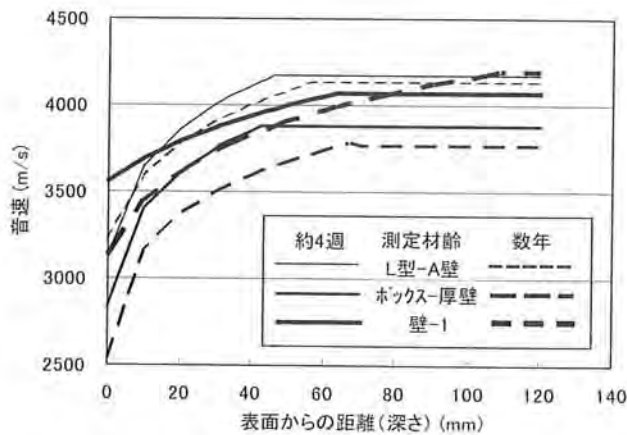


図15 土研法による音速分布の比較

土研法によるコンクリート内部の音速を、材齢4週程度と比較すると図15のようであった。凡例のとおり、実線は約4週時の結果、破線は数年経過後の結果である。供試体の違いは、線の太さによって区別している。まだ数年しか経過していないため、この結果から明確な違いを読みとるところまではいかないが、外観、小径コア強度の傾向とほぼ一致しており、表層の音速は低下している傾向があることなどを確認することができる。

8.2 衝撃弾性波法 (ITECS 法)

ITECS 法による構造体コンクリートの弾性波速度の測定方法は5.1のとおりである。既設供試体での測定例として、(1)編の供試体①L型壁A、②ボックス厚壁、③壁1について数年経過後に測定した結果を図16に示す。③壁1の距離と時間は直線関係であった。これに対し、①L型壁Aについて、各距離で測定した時間から求めた速度を各距離で比較した結果を図17に示すと、距離200mmから600mmの速度は距離700mm以降よりも遅くなっていることが分かる。つまり、図16での距離と時間の直線関係は2通り存在する結果となった。②ボックス厚壁も同様に2通りの直線関係が存在した。これは表面付近の品質が内部より劣る場合の結果であり、この場合での縦弾性波の伝

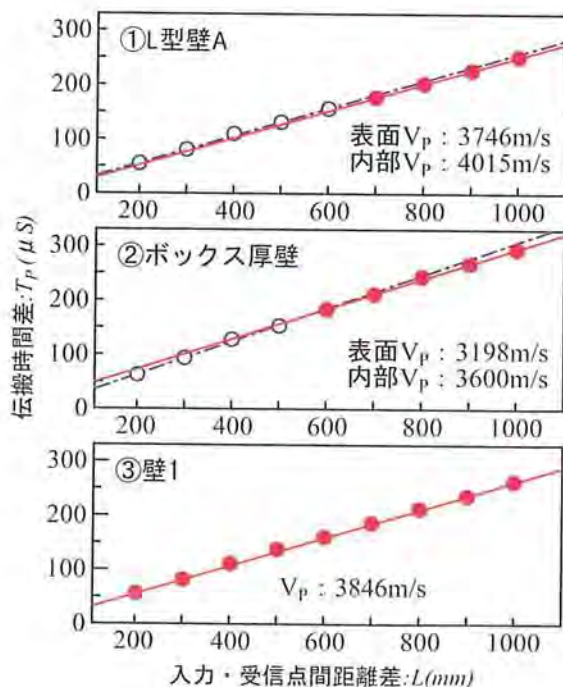


図16 既設供試体の伝搬距離と時間の関係

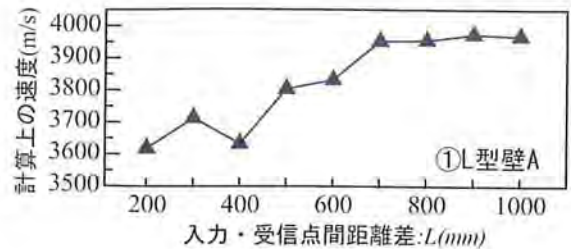


図17 伝搬距離と弾性波速度の関係 (L型壁A)

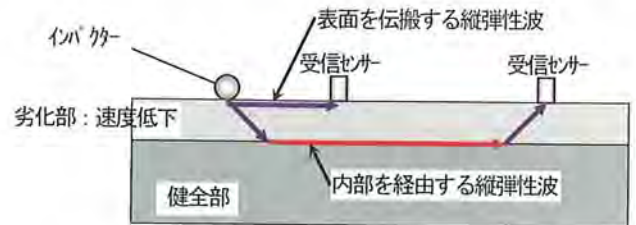


図18 表面が劣化している場合の縦弾性波伝搬模式図

搬模式図を図18に示す。入力・受信距離が短い場合には、表面を伝搬する経路が最短であることから、表面を伝搬する縦弾性波が最初に受信点に到達する。しかし、ある距離以上になると、表面を伝搬する縦弾性波の速度より内部を伝搬する縦弾性波の速度が速いことから、内部を経由する縦弾性波が最初に受信点に到達することとなる。

以上より、距離と時間の直線関係が複数存在するのにかよって、表面劣化の発生の有無を判断し、経年変化の1つの評価項目に利用できるものと期待される。

9. まとめ

非破壊試験 (土研法、ITECS法、表面2点法、機械インピーダンス法) および厳密には微破壊試験に分類されるリバウンドハンマによる強度推定結果を報告した。

従来から多用されているリバウンドハンマの強度推定精度は、強度推定に材料学会式を用いると $\pm 50\%$ 程度もばらつく。今回、実際に使用したコンクリートによる強度推定式を用いても $\pm 30\%$ 程度であった。

本研究により提案した4種類の非破壊試験方法による強度推定精度は、いずれも概ね $\pm 15\%$ 程度であった。

非破壊試験は、同一箇所を繰り返し測定ができるという長所がある。この特長を活かし、経年変化の測定結果を紹介した。まだ数年の結果であるが品質の変化を把握できる可能性を示しており、劣化状態の評価への適用が考えられる。今後も継続して測定する予定である。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 森濱和正: 弾性波法によるコンクリートの耐久性評価の試み, 非破壊検査, 55(1), pp.23-28, (2006)
- 2) 日本材料学会: シュミットハンマーによる圧縮強度推定式 (土木学会コンクリートライブラリー第38号, コンクリートの品質管理試験方法, pp.85-90, (1974))
- 3) (独) 土木研究所・日本構造物診断技術協会: 非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル, 技報堂出版, pp.182-188, (2003)

- 4) 谷口秀明ほか：テストハンマーによるコンクリートの硬度測定および強度推定の誤差要因に関する検討，土木学会論文集，No.767/V-64, pp.199-210, (2004)
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編][2002 制定]，pp.187
- 6) 森濱和正：超音波法(土研法)による構造物コンクリート強度の推定精度，コンクリート工学年次論文集，30(2), pp.727-732, (2008)
- 7) 森濱和正：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 超音波法その 15 強度推定式に関する検討，日本非破壊検査協会平成 20 年秋季大会講演概要集，pp.85-88, (2008)
- 8) 岩野聡史ほか：衝撃弾性波法による新設構造物での圧縮強度推定方法の検討，コンクリート工学年次論文報告集，28(1), pp.1835-1840, (2006)
- 9) 立見栄司，中田善久，河谷史郎：衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定法に関する研究—コンクリートの使用材料および調合の違いが弾性波速度に及ぼす影響—，日本建築学会構造系論文集，No.587, pp.15-21, (2005)
- 10) 久保元ほか：ハンマ打撃によるコンクリート強度の推定，コンクリート工学，44(5), pp.41-44, (2006)



岩野 聡史 リック(株) (143-0015 東京都大田区大森西 1-19-1) 技術研究所
1994 年入社以降，衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の非破壊試験に関する研究に従事。現在は，コンクリート構造物の現場調査業務にも携わっている
URL：<http://www.ri-k.co.jp/>



立見 栄司 三井住友建設(株) (270-0132 千葉県流山市駒木 518-1) 技術研究開発本部 技術開発センター・主席研究員
1973 年旧三井建設(株)に入社。建築構造物の振動に関する研究開発に携わる。2000 年より衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定法に関する研究に従事。2003 年合併により三井住友建設(株)と社名変更。2007 年定年退職後，再就職により現在に至る
URL：<http://www.smcon.co.jp/>

森濱 和正 <本誌 131 ページ参照>