

衝撃弾性波法による現地コンクリート構造物での圧縮強度の推定

Estimation of Compressive Strength of Concrete Structures by The Impact Elastic Wave Method

伊藤建設(株) 岩野 聡史 首藤 浩一
土木研究所 森濱 和正
アプライトリサーチ(株) 境 友昭
東海大学 極壇 邦夫

概 要

コンクリート構造物の圧縮強度を非破壊で推定する方法として、衝撃弾性波法により弾性波速度を測定して、換算式から圧縮強度を算出する方法を検討している。今回は3箇所の実構造物で、弾性波速度の計測方法と換算式の決定方法について吟味し、圧縮強度を推定した。この結果とコア採取による圧縮試験結果とを比較し、本法による推定精度や今後の課題について知見を得たので報告する。

キーワード：衝撃弾性波法、弾性波速度、圧縮強度、実構造物

1. はじめに

コンクリート構造物の圧縮強度を非破壊で推定する方法としては、テストハンマーにより表面の反発度を測定し、換算式から圧縮強度を算出する手法が広く用いられている。しかし、この手法では様々な要因により誤差が発生する問題が指摘されている¹⁾。また、長年供用した構造物などでは、表面のみが劣化し、内部は健全な状態である場合が予測されるが、この測定原理では、表面劣化部の影響を受け、健全な内部状態を評価できないことが懸念されている²⁾。そこで、コンクリート中を伝搬する弾性波の速度が、材料のポアソン比、密度が一定であれば弾性係数の平方根に比例すること、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と言われていること³⁾に着目し、衝撃弾性波法により弾性波速度を測定し、換算式から圧縮強度を算出する研究を行っている^{4) 5)}。この方法の推定精度は、弾性波速度の測定精度と、弾性波速度から圧縮強度への換算式の精度に依存する。今回、実構造物においても精度良く圧縮強度を推定すること目的とし、3箇所の実構造物およびコンクリート打設時に採取した円柱供試体で、弾性波速度の測定方法、換算式の決定方法について検討した。この結果を元に実構造物で推定した圧縮強度と、コア採取による圧縮試験結果とを比較検証したので報告する。

2. 実験概要

2. 1 過去の実験で得た換算式⁵⁾

過去の実験で、弾性波速度 V_p と圧縮強度 f_c を計測し、最小二乗法により、相関係数 0.95 で式(1)の関係式を得た。

$$f_c = 6.3 \cdot 10^{-18} \cdot V_p^{5.2} \cdot \dots \cdot (1)$$

両者の関係式は厳密に言えばコンクリートの材料、養生方法などによって異なる。このため、実構造物で圧縮強度を推定するには、対象構造物と同じ材料、養生方法で製作した供試体で、弾性波速度と圧縮強度の関係式を試験する必要がある。しかし、実用的な視点で考えると、この試験にはサンプル数や実構造物の養生条件をどこまで把握できるかなどの問題があると考えられる。そこで、換算式として式(1)を採用することを前提とし、この採用に問題がないかを検証することが合理的な検証手法であると考えられる。

2. 2 実験内容

2. 2. 1 各構造物での換算式の検証実験

各構造物において、コンクリート打設時にコンクリートを採取して製作した円柱供試体で、材齢を変化させて弾性波速度と圧縮強度を測定し、両者の関係を調べた。この結果から、換算式として式(1)を採用することに問題がないかどうかの検証を行った。

2. 2. 2 現地構造物での圧縮強度推定実験

実構造物で弾性波速度を測定し、2. 2. 1 で決定した換算式により圧縮強度を算出した。また、測定位置付近でφ100mmのコアを採取し、圧縮試験を行い、推定した圧縮強度との比較をした。

2. 3 実験した構造物

実験は3構造物で行った。各構造物の配合表、概要を表-1、表-2に示す。

表-1 コンクリートの配合

| 名称 | セメントの種類 | 呼び強度 | 粗骨材最大寸法 (mm) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単用量 (kg/m ³) | | | | | |
|-----|---------|------|--------------|-----------|---------|------------|----------|--------------------------|------|-----|------|-------|------|
| | | | | | | | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 | |
| | | | | | | | | | | | | AE減水 | AE |
| 現場A | 高炉B種 | 24 | 40 | 8 | 4.5 | 47.4 | 39.2 | 144 | 304 | 723 | 1138 | 0.121 | — |
| 現場B | 普通ポルト | 24 | 25 | 8 | 4.5 | 53.1 | 44.9 | 159 | 300 | 813 | 1031 | 4.2 | — |
| 現場C | 高炉B種 | 24 | 20 | 8 | 4.5 | 52.6 | 46.7 | 162 | 308 | 827 | 1033 | 4.03 | 2.37 |

表-2 実験した構造物の概要

| 名称 | 構造物 | 円柱供試体 | | | 実構造物 | |
|-----|------|-------|----------|---------------|---------------------------|-------|
| | | 個数 | 養生方法 | 材齢(日) | 幅*高さ*奥行 | 調査面 |
| 現場A | 擁壁底版 | 36 | 封緘 | 8~119 12種類 | 15.0*1.2~1.0 *3.0~2.0m | 打設面 |
| 現場B | 橋台底版 | 42 | 封緘、水中、断熱 | 6~91 4種類 | 15.4*1.6*8.0m | 側面 |
| 現場C | 橋台底版 | 45 | 封緘、水中 | 4~100 5種類 | 9.5*1.9*7.0m | 背面・前面 |

3. 各構造物での換算式の検証実験

3. 1 円柱供試体での弾性波速度計測方法

円柱供試体での弾性波速度の計測状況を図-1に示す。表面に加速度計（PCB社製、352C66型、測定振動数20kHz）を手で押し付け、その近傍を直径15mmの鋼球で打撃す

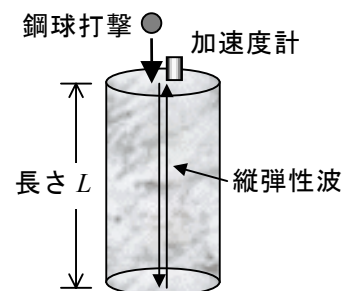


図-1 円柱供試体での測定状況

る。加速度計が検知した測定波形に対し、自己相関関数を求めてフーリエ展開を行い、縦弾性波が打撃面と底面間で多重反射することにより生成される振動数 f_0 を求める⁶⁾。サンプリングクロックは 10μ 秒、データ数は 800 個である。この振動数 f_0 と円柱供試体の長さ L から、弾性波速度 V_p を

$$V_p = 2 \cdot f_0 \cdot L \cdots \cdots (2)$$

により測定した。

3.2 各構造物での換算式の検証実験結果

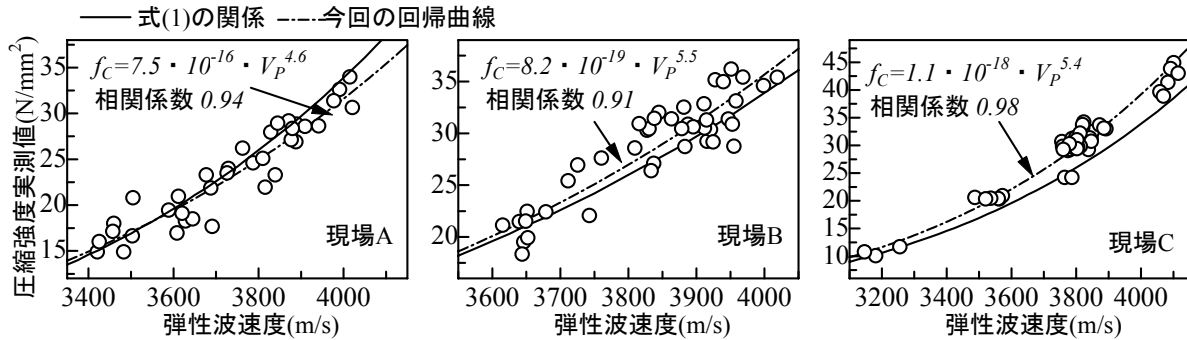


図-2 各構造物円柱供試体での圧縮強度と弾性波速度の関係

各構造物の円柱供試体で計測した弾性波速度と圧縮試験による圧縮強度との関係を図-2に示す。最小二乗法により、圧縮強度 f_c と弾性波速度 V_p の関係式を求めると、現場 A では相関係数 0.94 で式(3)、現場 B では相関係数 0.91 で式(4)、現場 C では相関係数 0.98 で式(5)と、各構造物とも式(1)とは完全には一致しない関係式が得られた。

$$f_c = 7.5 \cdot 10^{-16} \cdot V_p^{4.6} \cdots \cdots (3)$$

$$f_c = 8.2 \cdot 10^{-19} \cdot V_p^{5.5} \cdots \cdots (4)$$

$$f_c = 1.1 \cdot 10^{-18} \cdot V_p^{5.4} \cdots \cdots (5)$$

各構造物で弾性波速度 3000~5000m/s の範囲で、換算式として式(1)を採用することに問題がないかを検証するため、弾性波速度 3000,3025,⋯,5000m/s (25m/s 間隔、81 個)での式(1)による圧縮強度の推定値を $f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{c81}$ 、各構造物で今回の実験で得られた関係式による推定値を $f_{c'1}, f_{c'2}, \dots, f_{c'81}$ とし、寄与率 λ を

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{81} (f_{c_i} - f_{c'_i})^2}{\sum_{i=1}^{81} (f_{c_i} - \overline{f_{c_i}})^2} \cdots \cdots (6)$$

として求め、式(1)と今回の実験で得られた関係式とのバラツキの程度を調べた。その結果、現場 A の寄与率は 0.97、現場 B は 0.99 と高い値となった。これから、現場 A、B では換算式として式(1)を採用しても、今回の実験で得られた関係式を採用しても推定精度に差がなく、すなわち、式(1)を採用しても問題はないと判断できる。これに対し、現場 C での寄与率は 0.89 となった。これから、現場 C では換算式として、式(5)を採用することとした。

4. 現地構造物での圧縮強度推定実験

4.1 現地構造物での弾性波速度計測方法

(1) 現地構造物の状況



写真-1 現地構造物の状況（左：現場 A、中：現場 B、右：現場 C）

弾性波速度は 3.1 に示す通り、縦弾性波の多重反射による振動数と多重反射する位置が分かれば、式(2)により求められる。しかし、今回の構造物は、写真-1 に示す通り、現場 A では測定面から見た背面側に音響インピーダンスが 0 ではないステコン・地盤が密着した状態であり、振動数解析結果に影響が生じる⁷⁾。現場 B、現場 C では、測定面から見た厚さは 9m 以上となり、縦弾性波の多重反射による振動数を計測することは困難である。そこで、コンクリート表面を鋼球で打撃すると、縦弾性波が内部を球面状に伝搬する性質であることを利用し（模式図を図-3）、弾性波速度を測定することとした。

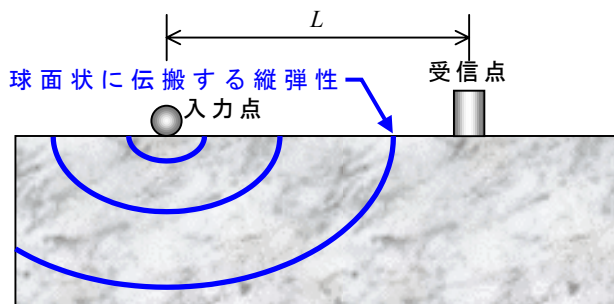


図-3 縦弾性波の伝搬模式図

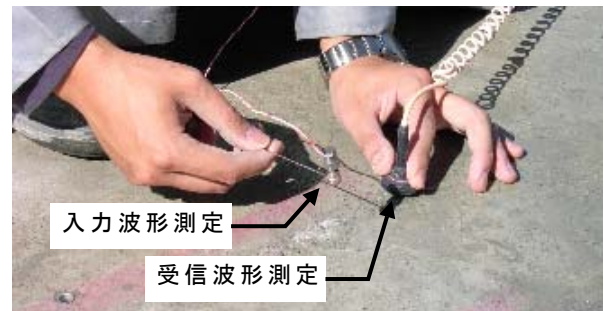


写真-2 弾性波速度測定状況

(2) 弾性波速度の計測方法

衝撃加速度計（PCB 社製 350B03 型）を取り付けた直径 10mm の鋼球でコンクリート表面を打撃し、表面に加速度計（PCB 社製 352C66 型、測定振動数 20kHz）を手で押し付けて、入力波形と受信波形を測定する。入力・受信点間距離は 100mm、200mm と 100mm 間隔で 1000mm まで変え、

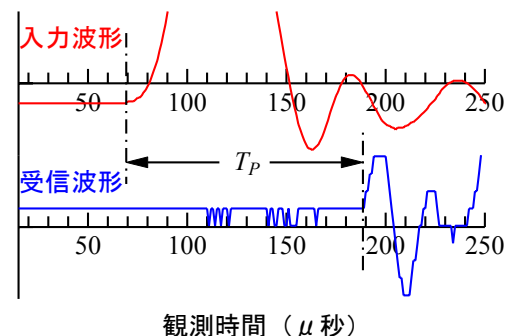


図-4 弾性波の到達時間差測定例

入力波形で発振時間、受信波形で最初に到達する振動の到達時間を計測して、縦弾性波の伝搬時間差を測定する（写真-2、図-4）。サンプリングクロックは 1μ 秒である。この様に、入力・受信点間距離を変えて、受信側に最初に到達する縦弾性波を測定する場合、縦弾性波の伝搬経路は、コンクリート表面と内部との品質の差によって、以下のとおり異なることが考えられる。

まず、表面と内部の品質がほぼ均一であれば、最初に受信側に到達する縦弾性波の伝搬経路はコンクリート表面となり、入力・受信点間距離 L と計測した到達時間差 T_p は式(7)の直線比例関係となる。

$$T_p = \alpha \cdot L + \beta \cdot \dots \dots \dots (7)$$

この場合では、計測結果から L と T_p の直線比例関係式を最小二乗法により求めると、 α から表面を伝搬する縦弾性波の速度が計測される。ここで、内部と表面の品質はほぼ均一であるので、内部を伝搬する縦弾性波の速度は、 α により計測した速度と同値であると考えられる。つまり、 α から圧縮強度の推定に必要な弾性波速度を決定できる。

一方、表面の品質が内部より劣る場合や、測定点の近傍に鉄筋が存在する場合には、最初に受信側に到達する縦弾性波の伝搬経路は、スネルの法則により、入力・受信点間距離 L によって異なることとなる。 L が短い範囲では表面付近を伝搬した経路となるが、 L が長くなるに従い、表面よりも伝搬速度の速い、内部や鉄筋を経由した経路となる。測定例として、供用後約 40 年が経過し、表面が劣化していると予想されるトンネルでの測定結果を図-5 に示す。

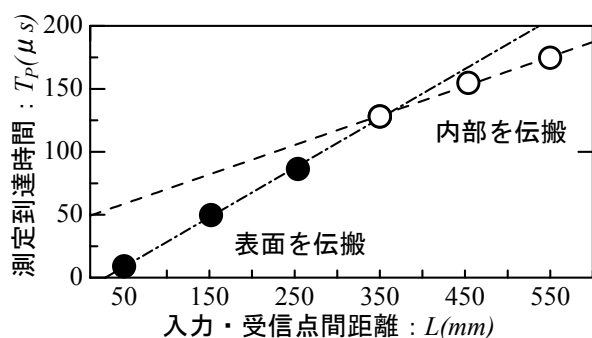


図-5 表面が劣化している場合での測定例



写真-3 トンネルでの測定状況

以上から、圧縮強度の推定に必要な弾性波速度を測定するには、入力・受信点を、鉄筋の近傍かつ配筋状況と平行となる直線上に設置せずに⁸⁾、測定結果から、適切な弾性波速度が測定される L の範囲を判別し、弾性波速度を決定する必要があることがわかる。

(3) 測定位置

表-3 各構造物の測定位置および材齢

| 構造物名 | 現場A | | | | | 現場B | | 現場C | | |
|------------|--------|----|----|----|----|-------|---|----------|---|---|
| | 底版 打設面 | | | | | 底版 側面 | | 底版 背面・前面 | | |
| 調査面 | | | | | | | | | | |
| 測定部位名 | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ① | ② | ① | ② | ③ |
| 材齢(日) | 41 | 34 | 74 | 18 | 11 | 25 | | 29 | | |
| 弾性波速度計測位置数 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| φ100コア本数 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

各構造物での測定位置および材齢を表-3 に示す。各部位に対して3箇所弾性波速度を計測し、圧縮強度を推定した。現場 B、現場 C は側面、背面・前面で、高さによって分けて打設されたことから、層の異なる3箇所測定した。測定位置の例として現場 B 部位①での測定位置を図-6 に示す。弾性

波速度は入力点と受信点の距離を変えて測定したが、入力点と受信点を左右に50mmずつ移動させ、中心位置は固定した。圧縮強度推定結果と比較するためのφ100mmの標準コアは、弾性波速度計測点の近傍で採取した。コアの本数は、現場Aは各部位毎に1本であるが、現場B、現場Cは層の異なる3本である。

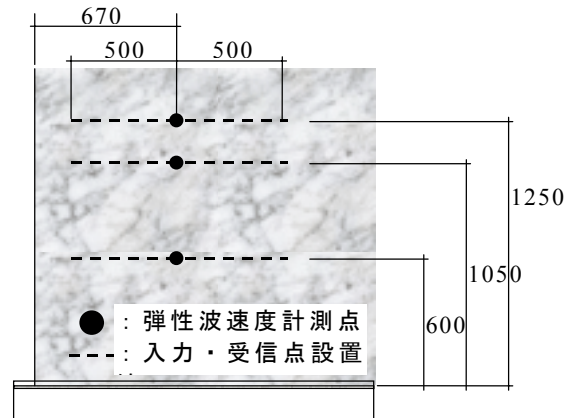


図-6 測定位置例 現場B部位① (単位 mm)

4.2 現地構造物での圧縮強度推定 実験結果

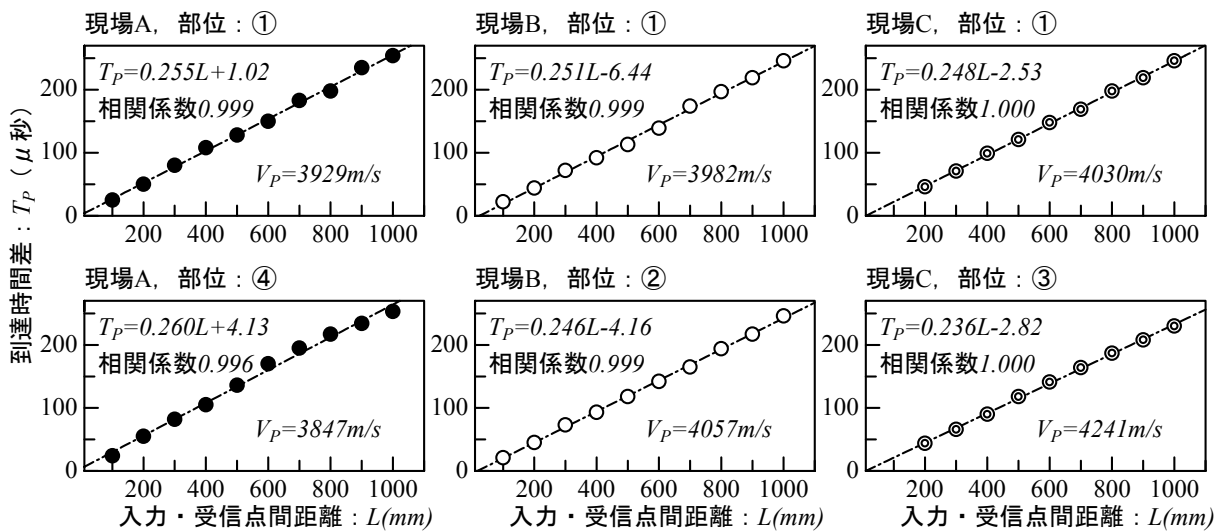


図-7 各構造物 部位での弾性波速度計測結果例

主な測定位置で計測した縦弾性波の到達時間差 T_p と入力・受信点間距離 L を図-7に示す。全測定位置とも縦弾性波の到達時間差は入力・受信点間距離と直線比例関係になった。これから、今回測定した構造物はコンクリート表面と内部の品質はほぼ均一で、回帰直線の傾きから測定する弾性波速度が、コンクリート内部を伝搬する縦弾性波の速度と同値であると判断できる。

各測定位置において測定した弾性波速度と、現場A、現場Bでは式(1)、現場Cでは式(5)を換算式として推定した圧縮強度、また、比較のために採取したコアでの圧縮試験結果を表-4に、両者の比較を図-8に示す。

現場Aは測定部位によって材齢が異なることから、圧縮強度の実試験値は測定部位によって異なった。換算式により推定した圧縮強度はこの違いに良く対応し、両者の誤差は平均で 2.9N/mm^2 となった。

現場B、現場Cは測定部位によって打設層が異なることから、圧縮強度の実試験値は測定部位によって異なった。現場Bでは、換算式により推定した圧縮強度は若干過大評価する傾向が見られ、誤差は平均で 4.8N/mm^2 となった。現場Cでは、換算式により推定した圧縮強度は実試験値より相当大きくなり、誤差は平均で 11.5N/mm^2 となった。

表-4 圧縮強度推定結果一覧

| 構造物名 | 部位名 | 弾性波速度 (m/s) | ①推定圧縮強度 (N/mm ²) | ②標準コア圧縮強度 測定結果(N/mm ²) | 誤差 (①-②) | 誤差平均 (絶対値) |
|------|-----|-------------|------------------------------|------------------------------------|----------|------------|
| 現場 A | ① | 3909 | 30.1 | 31.5 | -1.4 | 0.7 |
| | | 3943 | 31.5 | | 0.0 | |
| | | 3929 | 30.9 | | -0.6 | |
| | ② | 4062 | 36.7 | 36.8 | -0.1 | 3.3 |
| | | 4155 | 41.3 | | 4.5 | |
| | | 3940 | 31.3 | | -5.5 | |
| | ③ | 4093 | 38.2 | 34.4 | 3.8 | 3.3 |
| | | 4102 | 38.6 | | 4.2 | |
| | | 3967 | 32.5 | | -1.9 | |
| | ④ | 3847 | 27.7 | 29.7 | -2.0 | 4.1 |
| | | 3771 | 25.0 | | -4.7 | |
| | | 3750 | 24.2 | | -5.5 | |
| | ⑤ | 3868 | 28.5 | 26.0 | 2.5 | 2.9 |
| | | 3847 | 27.7 | | 1.7 | |
| | | 3923 | 30.6 | | 4.6 | |
| 現場 B | ① | 3957 | 32.0 | 27.8 | 4.2 | 4.6 |
| | | 4019 | 34.7 | 27.2 | 7.5 | |
| | | 3982 | 33.1 | 35.2 | -2.1 | |
| | ② | 4057 | 36.5 | 32.3 | 4.2 | 5.0 |
| | | 4089 | 38.0 | 33.8 | 4.2 | |
| | | 4037 | 35.6 | 28.9 | 6.7 | |
| 現場 C | ① | 4030 | 40.8 | 32.7 | 8.1 | 11.0 |
| | | 4188 | 50.3 | 35.0 | 15.3 | |
| | | 4111 | 45.5 | 36.0 | 9.5 | |
| | ② | 4113 | 45.6 | 35.9 | 9.7 | 12.1 |
| | | 4099 | 44.8 | 33.4 | 11.4 | |
| | | 4231 | 53.2 | 37.9 | 15.3 | |
| | ③ | 4009 | 39.7 | 30.7 | 9.0 | 11.4 |
| | | 4241 | 53.9 | 38.4 | 15.5 | |
| | | 4145 | 47.5 | 37.9 | 9.6 | |

以上から、現場 A、B では、換算式として式(1)を採用したこと、および、弾性波速度計測方法は適切であり、衝撃弾性波法により、コア採取による圧縮試験と概ね一致した推定が可能であることが示された。

一方、現場 C で、参考のため換算式に式(1)を採用すると、誤差は平均で 4.8N/mm² となり、推定精度は現場 B と同程度に向上した。推定精度は弾性波速度の測定精度と、換算式の精度に依存するが、現場 C で誤差が相当大きくなったのは、実構造物での弾性波速度測定方法ではなく、換算式の検証実験に問題があったと考えられる。

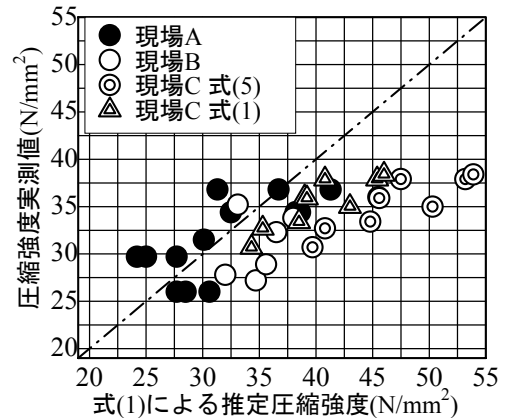


図-8 圧縮強度実測値と推定結果の比較

5. まとめ

衝撃弾性波法により、実構造物においても精度良く圧縮強度を推定することを目的とし、3箇所の実構造物で、弾性波速度の測定方法と換算式の決定方法について検討した。その結果を以下に示す。

①換算式は、過去の実験で得られた弾性波速度と圧縮強度の関係式を採用することを前提とし、この採用に問題がないかを検証した。その結果、現場 A、

Bでは、過去の関係式が採用できると判断できたのに対し、現場Cでは、新たに得られた弾性波速度と圧縮強度の関係式を採用した。

②圧縮強度の推定に必要な弾性波速度を、コンクリート表面で縦弾性波の伝搬時間を計測して測定するには、入力点と受信点の距離を変えて伝搬時間を計測し、縦弾性波の伝搬経路を吟味する必要がある。

③実際の構造物で圧縮強度を推定すると、現場A、Bでは、コア採取による圧縮試験との誤差は 2.9 N/mm^2 、 4.8 N/mm^2 となった。一方、現場Cでは、換算式の検証実験結果から、新たに得られた弾性波速度と圧縮強度の関係式を換算式として採用すると、誤差は 11.5 N/mm^2 と大きくなった。これに対し、過去の関係式を換算式として採用すると、誤差は 4.8 N/mm^2 であった。これから、換算式の検証方法に問題があると考えられる。

今後の課題として、精度の高い換算式を採用する検証方法を確立することや、既設構造物で弾性波速度と圧縮強度の関係調査が出来ない場合での換算式の検証方法について検討する必要がある。また、全体的に各構造物の圧縮強度を過大評価する傾向があり、その原因について検討して行きたい。なお、本研究は独立行政法人土木研究所との共同研究で行ったものであり、論文は研究成果の一部である。最後に、国土交通省北海道開発局釧路道路事務所、東北地方整備局福島工事事務所、中国地方整備局松江国道工事事務所にご協力頂いたことに感謝致します。

参考文献

- 1) 古賀裕久ほか：反発度法による新設構造物検査に関する検討，日本道路協会第24回日本道路会議一般論文集(A)，pp.342-343，2001.10
- 2) 山崎一義ほか：衝撃弾性波法によるRC造高架水槽の健全性評価，第30回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，第VI部門，No.5，2002.3
- 3) 河野清，田澤栄一，門司唱：新しいコンクリート工学，朝倉書店，1987.5
- 4) 岩野聡史，極檀邦夫，森濱和正：衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ、強度の推定，日本道路協会第24回日本道路会議一般論文集(A)，pp.336-337，2001.10
- 5) 岩野聡史ほか：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究 その23 弾性波法によるコンクリート強度の推定，日本非破壊検査協会平成13年度秋季大会講演概要集，pp.111-114，2001.10
- 6) 岩野聡史ほか：衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.547-552，2001.6
- 7) 岩野聡史，森濱和正，極檀邦夫，境友昭：衝撃弾性波法によるコンクリート厚さ測定における背面地盤の影響について，第30回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，第V部門，No.33，2002.3
- 8) 岩野聡史ほか：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究 その19 弾性波法による鉄筋かぶりの測定方法について，日本非破壊検査協会平成13年度春季大会講演概要集，pp.41-42，2001.5