

## 論文 機械インピーダンスによる円柱供試体の圧縮強度の推定

極 檀 邦夫<sup>\*1</sup>・久保 元樹<sup>\*2</sup>・境 友昭<sup>\*3</sup>・久保 元<sup>\*4</sup>

要旨：コンクリート強度の非破壊的推定方法として、わが国ではシュミットハンマー法が普及している。コンクリートのような不均質材料の場合、反発度は打撃面における骨材の有無、乾湿の状況、コンクリートの材令などによって異なるため、強度指標とするには多くの問題が残されている。インパルスハンマーの打撃波形を前半と後半に分け、後半の波形から機械インピーダンスを計算した。シュミットハンマー法では粗骨材や豆気泡を打撃すると異常値を示すことが多いが、インパルスハンマーの打撃応答波形は異常値の判定に有効であった。円柱供試体を用いた実験では機械インピーダンスと圧縮強度の相関が高い良好な結果を得た。

キーワード：機械インピーダンス, Smirnov 検定, 弾性波速度, 圧縮強度

### 1. まえがき

昭和39年の東京オリンピックの頃から道路、鉄道などの社会資本の建設が急激に増加した。その主要部分を占めるコンクリート構造物が、耐久年数を迎えていないにもかかわらず、トンネルのコンクリート崩落事故などの欠陥が報じられている。コンクリート構造物が所要の品質を保持しているかを検査し、適切に維持管理することが社会生活に密着するインフラストラクチャーでは重要である。

コンクリートの圧縮強度を非破壊的に検査する方法としてわが国では現在シュミットハンマー法が最も普及している。シュミットハンマー法は、硬化したコンクリートの表面を打撃し、ハンマー内の重錘のはね返り量を反発度 (Rebound number ; R) で示し、この反発度の大小によってコンクリートの圧縮強度を推定する。

一般に打撃時の反発度は、打撃エネルギー、被打撃体の形状、寸法ならびに材料の物理的特性にかかわる物理量であるが、必ずしも材料強度との間に一義的な関係があるというものではない。特にコンクリートのような不均質な材料において、シュミットハンマーのように局所的な打撃によるものは、反発度は打撃面における骨材の有無、乾湿の状況、コンクリートの材令などによって異なるため、強度推定の唯一の指標とするには多くの問題が残されている。

そこで、シュミットハンマーの代わりにインパルスハンマーを用いて、機械インピーダンス指標値を求めて圧縮強度との相関を検討した。インパルスハンマーは、ハンマー質量が数百グラムと軽いので打撃が容易であること、上向き下向きなどの打撃方向に影響されないこと、打撃応答波形データを記録できるので必要に応じて波形を分析し詳細に解析できること、波形データの解析方法を工夫することによって測定結果の誤差を軽減できる可能性が高いなどの特色がある<sup>1)</sup>。

今回は、まず基礎的な情報を得るために、直径150mm、高さ300mmの円柱供試体を測定対象とした。標本の代表値を得るための測定回数と、異常値の除去はどうするか、セメントの種類の影響、多重反射波から求めた弾性波速度と機械インピーダンスとの関係、圧縮強度と機械インピーダンスとの関係などについて報告する。

### 2. 機械インピーダンスについて

コンクリート構造物を半無限弾性体と仮定して、質量  $m$  のハンマーが速度  $V$  でコンクリート表面に衝突する場合を考える。ハンマーの速度が0となった時のコンクリート表面の最大変位量を  $x$  としコンクリート表面の変位と力の間にフックの法則が成立するとする。

すなわち、コンクリートの表面に発生する最大抵抗力  $F$  は、コンクリート表面の擬似的な

\*1 東海大学 工学部土木工学科 助教授 工修 (正会員)

\*2 東海大学 大学院工学研究科 学生

\*3 アプライドリサーチ(株) 代表取締役 工博

\*4 日東建設(株) 代表取締役 (正会員)

バネ係数を  $k$  とおくと  $F = kx$  として表現される。

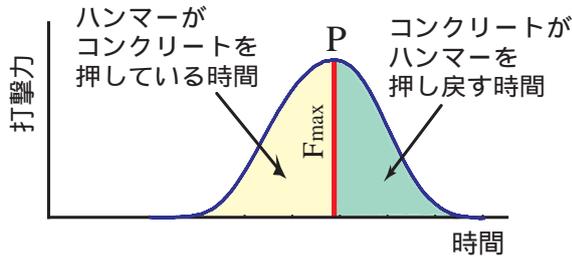


図 - 1 打撃力波形と機械インピーダンス

エネルギーの釣り合いからハンマーの最大運動エネルギー  $\frac{1}{2}mv^2$  と、コンクリート表面の最大ポテンシャルエネルギー  $\frac{1}{2}kx^2$  は等しいから、エネルギーの釣り合い式を展開し、 $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx^2 \Rightarrow \sqrt{mk} = \frac{F}{v}$  が得られる。ここで  $\sqrt{mk}$  は機械インピーダンスであるが、作用した力の最大値をハンマーの初速度で除することによって求められることになる。また、コンクリート表面に作用した打撃力はハンマーを剛体とみなした場合、ハンマーの質量と加速度の積に等しい。

すなわち、加速度を  $a$  とすると  $F = ma$  である。ところで、ハンマーの衝突速度はハンマーに作用した加速度を全時間にわたって積分することによって得られる。なぜならば、打撃時にハンマーに作用する加速度は、ハンマーの速度を低下させる方向の加速度つまり減速加速度であるからである。

実際の測定解析では、打撃力波形の前半  $Z_A$  と後半  $Z_R$  を分けて次式に示すような機械インピーダンス値を用いた。

$$Z_A = \frac{F}{V_A} \quad Z_R = \frac{F}{V_R}$$

これは図 - 1 に示すように、打撃力波形を最大値  $P$  に至るまでの前半と後半に分けたものである。

打撃力の前半部分は、コンクリート表面の剥離、劣化等の影響を受けると推測されるが、これに対し後半部分は、コンクリートがハンマーを押し戻す時間であるからコンクリートの弾性的特性を反映した指標となると考えられる。表面が劣化している場合は、ハンマーの衝突によって軟らかい表層は圧縮されつつ弾塑性変形するが、

波形の最大値以降はコンクリート内部の弾性によって復元する領域と考えて良いので、後半部分の機械インピーダンスに対する劣化の影響は、前半よりもかなり小さいと推量できる。

### 3. 測定項目および測定方法

#### 3.1 円柱供試体およびインパルスハンマー

円柱供試体と質量の異なるインパルスハンマーを図 - 2 に示す。

円柱供試体は、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントを使用した。設計強度は、15MPa から 36MPa まで 3MPa ごとに変えた 8 段階とした。いずれもスランブ 150mm、最大骨材 25mm、寸法は直径 150mm、高さ 300mm である。このほかに、学生実験の圧縮強度測定用に製作した供試体も使用した。

円柱供試体の設置方法としては、空中に吊す方法、コンクリート床版の上に設置する方法などがあり、設置条件の影響をうける可能性がある。種々の設置条件で試した結果、防振ゴム上に設置する方法が最も安定した値が得られており、このため図 - 2 に示すように供試体を防振ゴム上に置く方法を標準として用いた。

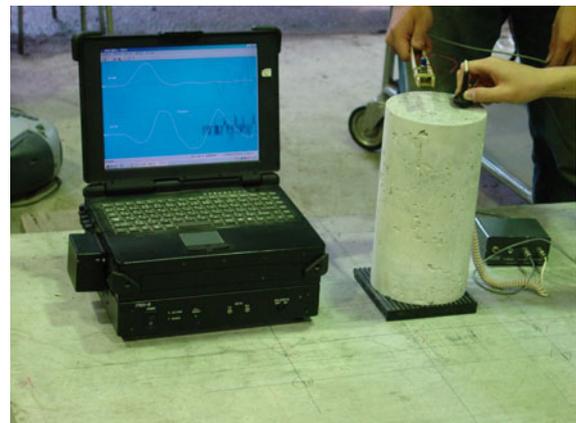


図 - 2 供試体とインパルスハンマー

インパルスハンマーには、半径 10mm の球面を持つハンマー質量 64g、130g、260g に加速度計 PCB 350B03 を取り付けた自作インパルスハンマーと、市販品のダイラン 5850A (ハンマー質量 98g) を用いた。インパルスハンマーによる測定では、できるだけ円柱供試体の中心付近を測定するため、中心点を通る 15mm メッシュを 25

点記してその交点を打撃する方法を用いた。自作インパルスハンマーは、落下高さを統一して打撃強度を一定にした。ダイトランハンマーの打撃強さは、同等になるように手加減したが多少は異なっている。

弾性波速度の測定は、中心付近に打点と加速度計を配置して行った。加速度計 PCB352C66 をテストピースの打撃測定面に押しつけて測定した。弾性波速度  $V$  はテストピース (高さ  $L$ ) の軸方向に多重反射する弾性波動の固有周波数 ( $f_0$ ) を測定し、 $V = 2f_0L$  として算出した。機械インピーダンス値と弾性波速度を測定した後で 1 軸圧縮試験を行った。なお、測定装置は 2ch 同時測定、サンプリング時間  $1 \mu s$ 、サンプリングデータ数 8000 個である。

### 3.2 測定方法の比較

インパルスハンマーによる機械インピーダンスは、強度指標値として用いることができるかというのが本研究のテーマである<sup>2,3)</sup>。まず、シュミットハンマー法の概略を記し、次に機械インピーダンスの場合について述べる。

#### (1) シュミットハンマー法の場合

シュミットハンマー法による測定の注意事項は次のとおりである。

##### (a) 測定準備

測定面は平らな面を選び、粗面はなるべく避ける。仕上層や上塗りのある場合は、これを除去し、コンクリート面を出す。次に備えつけのカーボランダムと砥石で、コンクリート表面を平滑になるように磨き、測定面のわずかな凹凸ならびに付着物や粉末などを除去する。また、測定面内にある豆板、空泡、露出している砂利などの部分は測定点から外す。

##### (b) 測定回数と異常値検出

測定箇所ごとのシュミットハンマーによる打撃点の数は、20 点を標準とする。打撃の際の反響音や、くぼみ具合で明らかに異常と認められるときの値、あるいは打撃時の値が、その測定部位における打撃値の平均値の  $\pm 20\%$  以上となったときは、異常値として捨てて、所定の数 (標準は 20 点) となるように測定値を補充する。

#### (2) 機械インピーダンスの場合

##### (a) 測定準備

現地測定を考慮してコンクリート表面の磨きはワイヤーブラシでゴミを除く程度に止め、砥石は使用しないこととした。また、測定点が豆板、空泡、砂利に遭遇した場合でもずらさない。

##### (b) 測定回数

打撃の際の反響音や、豆板、空泡、露出している砂利などの部分も、一切考慮しないで、測定点はメッシュ交点の 25 点とする。

## 4. 測定結果および考察

### 4.1 異常値抽出と測定回数の検討

何回測定して平均すれば、測定標本の代表値としてよいかを検討するには、確率論の中心極限定理と大数の法則がある。

機械インピーダンス測定においても、中心極限定理と大数の法則が成立しているかを確認するために 100 回、50 回、25 回と測定回数を変えて検討した。図 - 3 にヒストグラムと累加平均を示す。

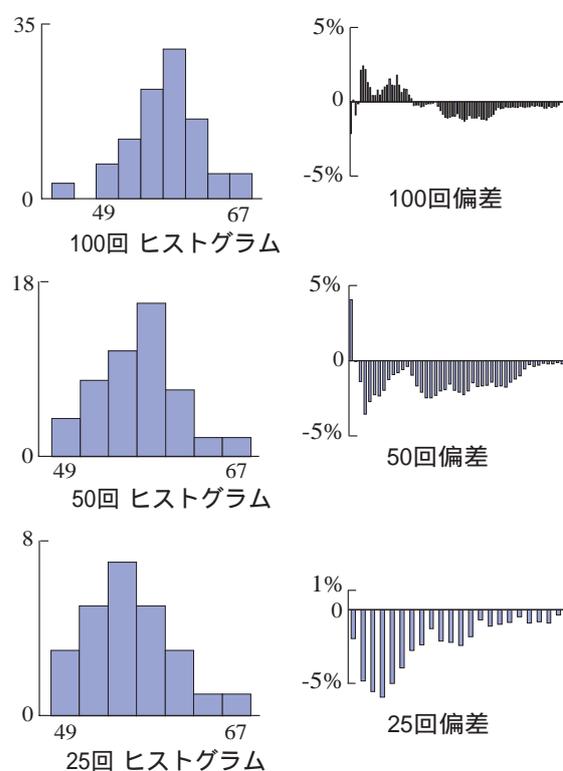


図 - 3 測定回数 100 回、50 回、25 回

中心極限定理は、測定数が増加すれば測定値の分布は正規分布関数に近づくという意味である。関連した極限定理に大数の法則がある。確

率変数  $X$  の平均値を  $m$  とすると、標本測定値の平均  $\bar{x}$  と  $m$  との差が、任意に小さい正数  $\epsilon$  以下になるような確率は 1 に近づくということになる。100 回から 25 回の測定回数の結果は、試行を繰り返す場合の頻度と確率の関連の正当性を示している。

異常値の検出は  $t$  分布検定に基づく Smirnov の棄却検定を用いた。Smirnov の検定の手順は次のとおりである。

- (1) 測定値を小さいものから大きいものの順に並べる。
- (2) 最大値または最小値とそれを含む全測定値の平均  $m$  には有意差なしと仮定する。
- (3) 基準値  $P$  は最大値と平均の差を標準偏差で割ったものである。
- (4) 有意水準 (1%か 5%) の数値  $Q$  と比較し  $P \geq Q$  ならば異常値とする。

45MPa 供試体を対象とした測定結果を図 - 4 に示す。4-a は、インパルスハンマーのハンマー質量 135g の場合における打撃力の応答波形であり、後半部分の機械インピーダンスは、 $Z_R$  最大値 90,  $Z_R$  平均値 80,  $Z_R$  最小値 60 である。

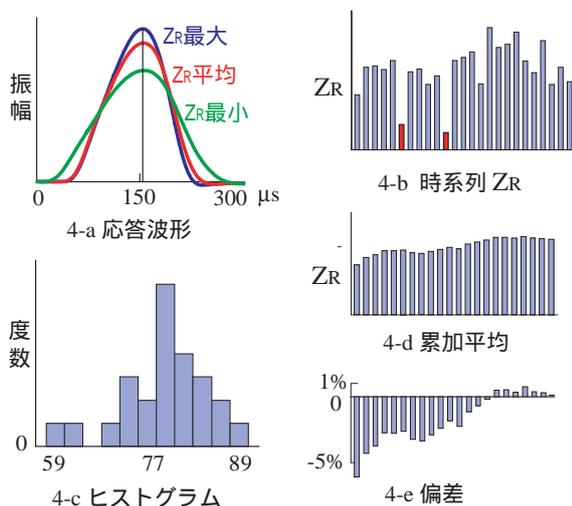


図 - 4 測定例 (45MPa)

4-b は、25 点の機械インピーダンス値を測定順序 (時系列) に従って棒グラフで表したものである。測定値にはばらつきがあり、図に示した最小値は異常に小さいように見える。

4-c は、4-b をヒストグラムで表したものである。正規分布に近い形であるが、最小値は飛びは

ずれて小さい値となっている。そこで、 $t$  分布検定に基づく Smirnov の棄却検定により異常値であるかを調べた。有意水準を 1% に設定し、前述の手順によって異常値の検出を行った結果、最小値とその次に小さい値が異常値と判定された。

4-d は、異常値を除いた機械インピーダンス値の累加平均値を示したものである。18 個目以降の累加平均値はほぼ一定の値を示している。

4-e は、機械インピーダンス平均値と各機械インピーダンス値の差 (偏差) を順番に示したもので、データ数が増加すると平均値に収束する様子が明確に示される。これから有効なデータ数が 25 個程度であれば、正規分布に近似するという中心極限定理や累加平均は平均値に近づくという大数の法則が成立していることが示される。

以上の検討から異常値を検定によって除外し、有効測定回数が 20 回を越えれば安定した測定データが得られることがわかった。

#### 4.2 機械インピーダンスと軟弱表層

インパルスハンマーで測定した打撃力波形は、ハンマーがコンクリート表面に衝突して離れるまでの単発的短時間での情報のみを対象としている。衝撃弾性波法によるコンクリートの欠陥探査のように波動がコンクリート内を多重反射するような「長時間」での情報を対象としているわけではない。このように表面を打撃する測定方法では、測定結果がコンクリート表面の状況に大きく左右される可能性が高い。

特に表面が劣化しているコンクリートなどではハンマーで打撃された時、コンクリート表面で塑性変形が進行する可能性があり、コンクリート表面を完全弾性体と仮定した測定の前提条件が成立しない場合も考慮しなければならない。このため本報告での測定方法では、打撃力波形の全体ではなくコンクリート表面がハンマーを押し戻す過程での機械インピーダンスに着目している。

図 - 5 は表面劣化の影響と、これを避けるための測定方法の可能性を検証するため、コンクリート表面にクッションとなる薄い紙を敷いて打撃した場合の波形例を示すものである。シュミットハンマー法等で測定している、いわゆる「反発度」に相当するのが打撃力波形の最大値  $F_{max}$

である

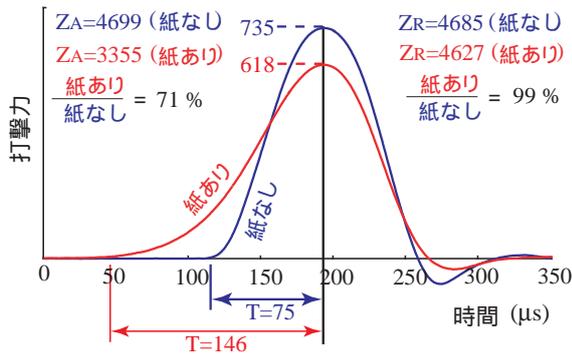


図 - 5 クッション紙の影響

紙がある場合とない場合とでは打撃力波形に違いがある。紙を敷いた場合には打撃力が最大値にいたるまでの時間が長いが直接打撃の場合にはこの時間が短い。また両者の波形とも打撃力がピークに達した後の波形では、ほぼ同様の減衰時間となっている。打撃時のハンマーの衝突速度は、両者の試行ともほぼ同様であり、また打撃力波形の積分値がハンマーの衝突速度に相当し、図からも紙を敷いた場合と直接打撃の場合で面積がほとんど等しいことがわかる。

つまり、衝突速度が同じでありながら紙を敷いている場合には、打撃力の最大値が小さいわけであるから結果的に機械インピーダンス値が小さいと判断される。これに対し打撃力波形の後半に着目すると、紙がある場合でも、ない場合でも波形の減衰時間はほぼ等しく、両者の波形が打撃力方向に相似であれば曲線下の面積と最大打撃力は比例することになる。すなわち、打撃力波形の後半部分に着目すれば、表面劣化の影響を避けてコンクリート構造自体の強度推定ができ、また前半部分に着目すれば、逆にコンクリート表面の劣化の指標化ができるということになる。

#### 4.3 機械インピーダンスと弾性波速度

##### (1) ハンマー質量の影響

弾性波速度は、円柱供試体を数十回往復した多重反射振動から計算しているので、供試体全体の平均的な物性を示すものと考えられる。一方、機械インピーダンスは表面を打撃したときのひずみが円柱供試体の高さ方向に一樣に生じると仮定して求めたものである。軽いハンマー

では、表面付近のコンクリートの物理的性質の影響を、重いハンマーでは、より深い層までの物性を受けると考えられる。また、高さ300mmを弾性波速度約4000m/sで往復する所要時間は200μsであることから、打撃力波形の測定中に供試体の底面から反射して戻ってくる弾性波の影響も考えられる。そこで、ハンマー質量を64g、98g、130g、260gと変えて打撃力波形を測定した機械インピーダンスと弾性波の関係を図-6に示す。

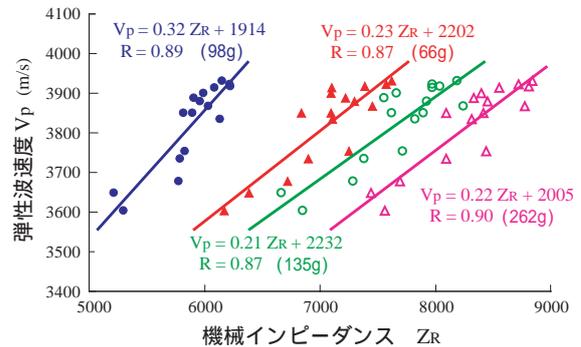


図 - 6 ハンマー質量の影響

ハンマー質量によって回帰直線の位置が異なり、質量が大きい程機械インピーダンスが大きくなる方にシフトしていることがわかる。ただし、質量98gのハンマーは汎用のインパルスハンマーであり、加速度ではなく、力波形を測定しているため解析された信号の係数が異なる。このため他のハンマー群とは異なった傾向を示している。しかしながら、いずれのハンマーの場合でも機械インピーダンスと弾性波速度は比例する関係にあることがわかる。

機械インピーダンスがハンマー質量の影響を受けるのは、機械インピーダンスの式が  $\sqrt{mk} = F/V$  であり、コンクリート表面の固有の値と考えられる「バネ係数」の平方根に対してハンマー質量の平方根が乗じられているからである。弾性波速度は縦弾性係数の平方根に比例する。また、縦弾性係数とコンクリート表面のいわゆる「バネ係数」には比例する関係があり、これから機械インピーダンスと弾性波速度に比例関係が成立するものと考えられる。

##### (2) セメントと骨材の影響

図-7は、弾性波速度と機械インピーダンス

がセメントの種類と骨材によって影響されるかを調べたものである。このときの機械インピーダンス値は、ハンマー質量の平方根で規準化した値を用いている。

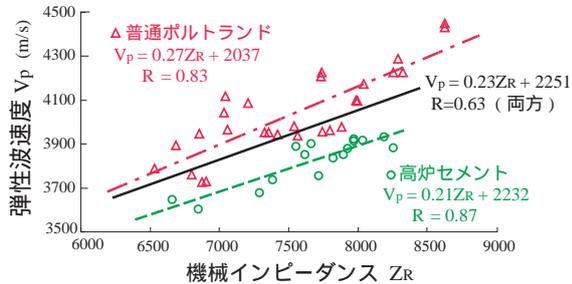


図 - 7 セメントと骨材の影響

シュミットハンマー法では、セメントの種類による影響は微小であるといわれているが、今回の測定では、普通ポルトランドセメントと高炉セメントでは図 - 7 に示すようにデータ集団が2つに分離している。普通ポルトランドセメントの供試体は、使用した骨材が違ふことや、学生実験用に製作した供試体も混じっているので相関係数が  $R = 0.83$  と小さくなっている。両方のデータから相関係数を求めると  $R = 0.63$  となった。

シュミットハンマー法の影響因子として、コンクリートの材料、材令、打撃面の状況、打撃方向などがあげられている。機械インピーダンスによって弾性波速度（圧縮強度の推定）を精度よく得るには影響因子の検討実験が必要である。

#### 4.4 機械インピーダンスと圧縮強度

機械インピーダンスと圧縮強度の関係を図 - 8 に示す。

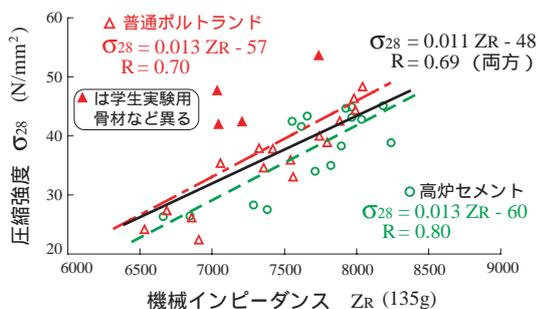


図 - 8 機械インピーダンスと圧縮強度

弾性波速度との関係の場合と同様にセメント

の種類によって若干の違いはあるが、機械インピーダンスと圧縮強度の間には比例関係が見いだせる。セメントの種類別の相関係数は 0.7 以上と高い値を示したが、全体を1つとするとやや相関の度合いが小さくなる。本来、機械インピーダンスと1軸圧縮強度は、力学的性質が全く異なるものである。機械インピーダンスを1軸圧縮強度の指標として使用しようとする場合、セメントの種類等を考慮した較正曲線を作成する必要があることを示唆しているものと考えられる。

#### 5. まとめ

機械インピーダンスと弾性波速度および圧縮強度の実験を総括すると次のとおりである。

- (1) 有効測定数を 25 点にすると、砂利、豆気泡などの打撃面の状況を考慮しないで測定しても、確率的に信頼のおける平均値が得られた。異常値の抽出には Smirnov 検定が有効と思われる。さらにインパルス応答波形には有益な情報が含まれているので信頼性の高い測定が可能と考えられる。
- (2) コンクリートの復元力に対応した後半の機械インピーダンスと弾性波速度および圧縮強度には相関関係が認められる。また、インパルスハンマーのハンマー質量の影響は微少と考えられる。
- (3) 機械インピーダンスは、コンクリートの材質（セメントの種類と使用骨材）の違いによって影響される結果となった。使用材料、施工条件が不明である現場の構造物コンクリートを測定するには今後の研究が必要である。

#### 参考文献

- 1) 境友昭, 極檀邦夫, 久保元樹, 久保元: 接触抵抗によるコンクリート強度の推定, 日本非破壊検査協会 シンポジウム論文集, pp.57-64, 2003.7.
- 2) 久保元樹, 極檀邦夫, 金田重夫, 境友昭: 打撃応答波形によるコンクリート強度の推定, 土木学会, 第58回年次学術講演会講演概要集 部門, pp.803-804, 2003.9.
- 3) 久保元樹, 極檀邦夫, 宮田義典, 佐々木博文, 境友昭, 久保元: 機械インピーダンスによるコンクリート圧縮強度の推定, 日本非破壊検査協会 平成15年度秋期講演概要集, pp.139-142, 2003.11.