

機械インピーダンスによる円柱供試体の弾性波速度の推定

東海大学 学生員 久保 元樹 羽根 隆人 極檀 邦夫
アプライドリサーチ 正会員 境 友昭
日東建設(株) 正会員 久保 元

1. まえがき

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。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ると思われる。円柱供試体を用いて、機械インピーダンスと弾性波速度の相関関係、およびハンマーの質量とセメントの種類の影響を調べた。

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した場合を考える。ハンマーの衝突によるコンクリート表面の変位量を 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。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バネ係数を k とおくと、 $F = kx$ となる。

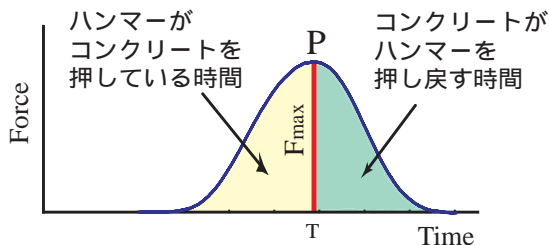


図-1 打撃力波形と機械インピーダンス

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ひずみエネルギー $\frac{1}{2}kx^2$ は等しいので、式を展開すると、 $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx^2 \Rightarrow \sqrt{mk} = \frac{F}{v}$ 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速度で除することによって求められることになる¹⁾。

実際の測定解析では、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て、次式に示すような機械インピーダンス Z_A と Z_R を用

いた。

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

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性質を反映した指標となると考えられる²⁾。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は劣化の影響は前半よりもかなり小さいと推量される。

3. 供試体と測定方法

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は、設計強度を 15MPa から 36MPa まで 3MPa ごとに変えた 8 段階のものを主とした。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。円柱供試体は防振ゴムにのせて測定した。

インパルスハンマーには、ハンマー質量 64g, 130g, 260g に加速度計 PCB350B03 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。中心点を通る 15mm メッシュを 25 点記してその交点をほぼ一定の強さで打撃した。

弾性波速度の測定は、加速度計 PCB352C66 を打撃面に押しつけて測定した。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 である。

4. 測定結果および解析

4.1 異常値の抽出と測定回数の検討

図-2は 圧縮強度 45MPa の測定結果である。

2-a は、インパルスハンマーのハンマー質量 130g の場合の機械インピーダンスの応答波形で、最大値、平均値、最小値を図示したものである。機械インピーダンスは、 $Z_{max} = 90$, $Z_{mean} = 80$, $Z_{min} = 60$ である。

2-b は、25 点の機械インピーダンス値を測定順序に従って棒グラフで表したものである。棒の長さが短い最小値が異常に小さいように見える。

2-c は、2-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、最小値は異常に小さいと思われる。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。(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

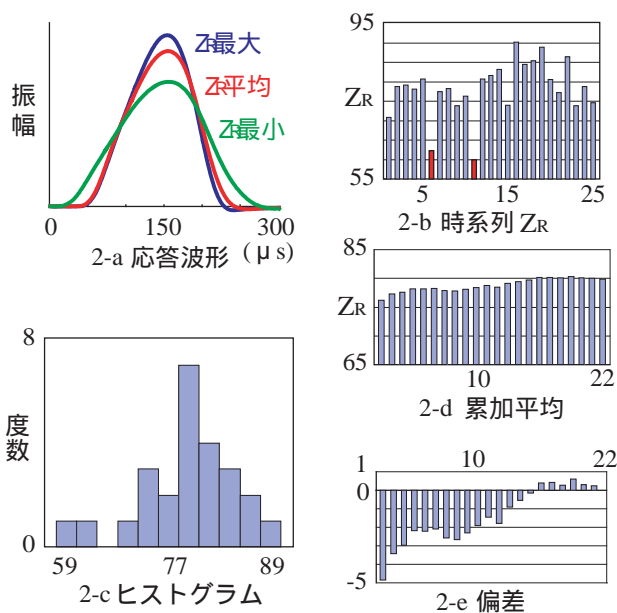


図-2 機械インピーダンスの検討

を標準偏差で割ったものである。(4) 有意水準 (1%) の数値 Q と比較し $P \geq Q$ ならば異常値とする。検定の結果、最小値とその次に小さい値が異常値と判定された。

2-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 の平均値以降はほぼ一定の値を示している。

2-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である。データ数が 25 個程度あれば、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わかった。

4.2 機械インピーダンスと弾性波速度の相関
弾性波速度と機械インピーダンスの関係を図-3 に示す。

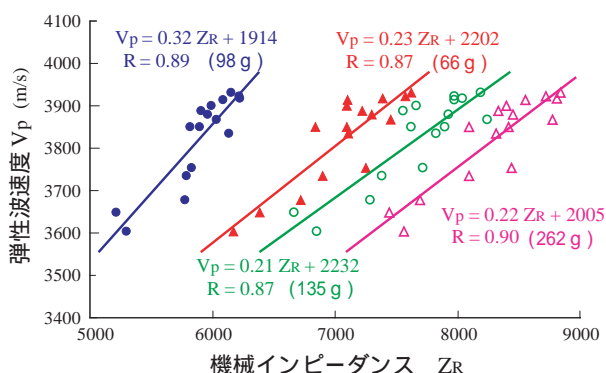


図-3 機械インピーダンスとハンマー質量

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ため、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様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

の影響を受けると考えられる。また、高さ 30cm を弾性波速度約 4000m/s で往復する所要時間は $200\mu s$ であることから、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 と変えて測定した。図-3 によると、相関係数は $R = 0.87 \sim 0.90$ となりハンマー質量の影響は認められなかった。

図-4 は、弾性波速度と機械インピーダンスがセメントの種類によって影響されるかを調べたものである。

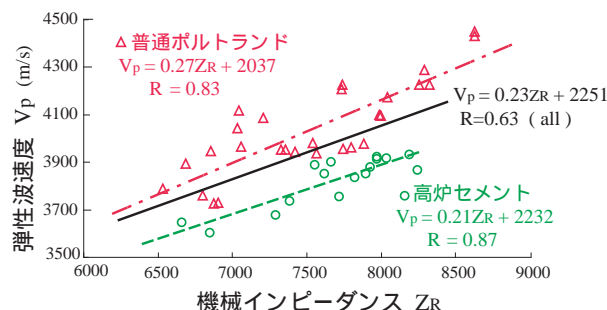


図-4 機械インピーダンスと弾性波速度

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ったり学生実験用の供試体も混じっているため相関係数が $R = 0.83$ と小さくなっている。全部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。

5. まとめ

機械インピーダンスと弾性波速度の実験を総括すると次のとおりである。

1. 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. インパルスハンマーのハンマー質量を 4 段階変えても、機械インピーダンスと弾性波速度との相関係数は、ほぼ同一なので影響は微小と考えられる。
3. コンクリートの材質 (セメントの種類と使用骨材) の違いによって機械インピーダンスは 2 つのグループに分離したので影響があるといえる。使用材料、施工条件が不明の実現場の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) 久保元樹他、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、2003.9.
- 2) 久保元樹他、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、秋期大会講演概要集、2003.11.