

動的ブリネル硬度によるコンクリートの圧縮強度推定

Estimation of Compressive Strength of Concrete by Dynamic Brinell Hardness

○久保 元樹 久保 元 日東建設株式会社
GENKI KUBO HAJIME KUBO Nitto Construction Inc.
境 友昭 アプライドリサーチ株式会社
TOMOAKI SAKAI Applied Research Inc.

概 要

ハンマ（打撃体）打撃によってコンクリートの圧縮強度を推定する方法として、機械インピーダンス法がある。本法は、弾性的特性から圧縮強度を推定するため、打撃体がコンクリートに押し返される反発過程に着目している。一方、打撃体の貫入過程については、今まで議論の対象となっていなかった。本論は、貫入過程の機械インピーダンスから動的ブリネル硬度を推定する方法について検討し、実際の圧縮強度との関係を実験的に求めたものである。

キーワード ブリネル硬度、強度評価、機械インピーダンス、非破壊試験

1. まえがき

コンクリート表面を打撃して圧縮強度を推定する試験方法として、反発硬度法と機械インピーダンス法がある。反発硬度法は、測定機器および測定方法についても JIS 基準で定められており、非破壊でコンクリートの強度を推定する方法として、最も普及している手法である。反発硬度法は、動的なブリネル硬度測定方法として開発された経緯があるが、実際の測定器は、コンクリートを打撃した時のハンマの跳ね返り高さを測定する機構となっており、反発度のみの測定では動的ブリネル硬度を決定できないことが分かっている¹⁾。一方、機械インピーダンス法は、打撃力波形を計測し、ハンマがコンクリートに押し返される反発過程に着目し、弾性的指標である機械インピーダンスを計測することにより圧縮強度を推定している。しかしながら、コンクリートの圧縮強度は破壊強度であり、機械インピーダンスとの間に物理的な関係があるわけではない。このため、機械インピーダンスから圧縮強度を推定するには、校正試験が必要となる。本論では、ハンマの貫入過程に着目し、動的ブリネル硬度を算出することで、圧縮強度の推定が可能か検討したものである。

2. 機械インピーダンス法の測定理論

従来から、打撃体の反発過程に着目して機械インピーダンスを算出し、圧縮強度の推定を行う方法がある。²⁾機械インピーダンス法は、コンクリートを完全弾性体と仮定し、質量 M の打撃体が任意の速度 V で衝突した時の現象を考える。打撃体の衝突によってコンクリートに弾性変形が生じるが、このときのエネルギーの釣り合いについて考えると、コンクリートの弾性変形は打撃体の運動エネルギーによって発生するため、エネルギー保存の法則から、式(1)が得られる。

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}Kx^2 \quad (1)$$

ここに、 K ：コンクリートのバネ係数 x ：打撃体の衝突によって生じたコンクリートの変位
また、力 F はフックの法則より式(2)となる。

$$F = Kx \quad (2)$$

式(2)を x について解き、式(1)に代入して整理すると、式(3)が得られる。

$$\sqrt{MK} = \frac{F}{V} \quad (3)$$

ここで、 \sqrt{MK} が機械インピーダンスと呼ばれる数値であり、打撃によって発生した力を衝突速度で除すことによって得られることが分かる。

機械インピーダンス法は、弾性的な指標からコンクリートの破壊強度を求めようとするものであるが、機械インピーダンスと圧縮強度の間には物理的な関係があるわけではない。このため、機械インピーダンスから圧縮強度を推定するためには、両者の関係性を関連付ける必要があり、校正試験を実施し、相関関係式を取得することによって圧縮強度の推定を行っている。この方法では、打撃によって実現された微小変形領域での弾性係数を推定し、次いで、破壊直前の弾性係数を推定、最後に破壊時のひずみを一定値と仮定し、 $\sigma = E\varepsilon$ から圧縮強度を推定する手順となるが、破壊時のひずみはあくまでも仮定であり、コンクリートの特性によって誤差が生じることとなる。直接ブリネル硬度が測定できれば、コンクリートの特性によらない圧縮強度の推定が可能となる。

2. 動的ブリネル硬度の測定理論

図1に示すように、コンクリート構造物の表面を、半径 r の球冠を持つ打撃体で打撃し、深さ x の圧痕を発生させる。ハンマとコンクリートの接触面積 A は、式(4)の通りである。

$$A = 2\pi r x \quad (4)$$

ハンマがコンクリート表面に衝突した時、発生する反力を F とすると、単位面積あたりのコンクリートの塑性変形抵抗 H_b (体積圧縮応力) は、式(5)の通りとなる。

$$H_b = \frac{F}{A} = \frac{F}{2\pi r x} \quad (5)$$

コンクリートの塑性変形抵抗 H_b は、動的ブリネル硬度に相当する。式(5)からわかる通り、動的ブリネル硬度を測定するためには、力 F と 圧痕の深さ x を求める必要がある。ブリネル硬度 H_b は、材料固有の値であり、打撃体の貫入深さ x に係わらず一定であるため、打撃体がコンクリート表面に貫入する時の運動方程式は、式(6)となり、単弦振動方程式となる。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\pi r H_b x = 0 \quad (6)$$

式(6)において、 $x = A \sin \omega t$ とおくと、式(7)、式(8)が得られる。

$$M\omega^2 + 2\pi r H_b = 0 \quad (7) \quad \omega = \sqrt{\frac{2\pi r H_b}{M}} \quad (8)$$

速度 v は、変位の1階微分であるから、式(9)となり、打撃体の初速度は、時刻 $t=0$ で V_0 となることから、式(10)が得られる。

$$v = -\omega A \cos \omega t \quad (9) \quad \left. \begin{array}{l} V_0 = -\omega t \\ A = -\frac{V_0}{\omega} \end{array} \right\} \quad (10)$$

さらに、力 F_{\max} について、式(6)~式(10)から式(11)が得られる。

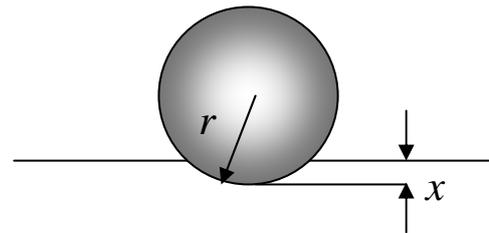


図1 打撃体の衝突モデル

$$F_{\max} = 2\pi r H_b A = \frac{2\pi r H_b}{\sqrt{\frac{2\pi r H_b}{M}}} V_0 = \sqrt{2\pi r H_b M} V_0 \quad (11)$$

F_{\max} は、最大打撃力であり、式(5)の F と等しい。これより、動的ブリネル硬度 H_b は、式(12)によって求められることがわかる。

$$H_b = \frac{1}{2\pi r M} \left(\frac{F_{\max}}{V_0} \right)^2 \quad (12)$$

3. 測定量からの算出

式(12)より、動的ブリネル硬度の算出は、力の最大値 F_{\max} と打撃体の初速度 V_0 を測定できれば算出できることが分かった。ここでは、実際の測定量からの算出方法を示す。図2は、図1の打撃体に加速度計を取り付けて、実際にコンクリートを打撃して得られた測定波形である。波形は、最大値となる時刻に対してほぼ左右対称の波形となる。加速度は、打撃体の質量を乗じることで打撃力となるため、図2の波形は、縦軸が加速度となっているが、打撃力波形とみなすことができる。

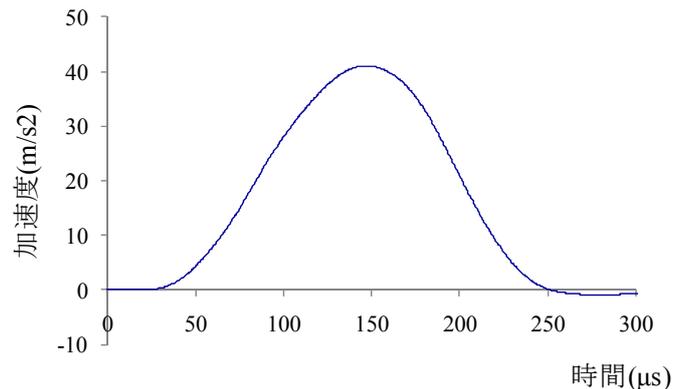


図2 打撃力（加速度）波形

打撃体の加速度が最大となる時刻は、コンクリート表面の変位が最大となる時刻であり、この時刻では打撃体の速度は0となる。打撃体は、任意の速度でコンクリートに衝突するため、加速度が最大となる時刻を T とすると、式(11)に示すように、時刻 T までの積分値が打撃体の初速度 V_0 となる。

$$V_0 = \int_0^T a(t) dt \quad (13)$$

また、力 F_{\max} は、打撃体の質量 M と最大加速度 a_{\max} の積によって求めることができる。

$$F = M a_{\max} \quad (14)$$

4. 測定結果

呼び強度を9水準に変化させた円柱供試体（30N/mm²～45N/mm²まで3N/mm²ずつ6水準、45N/mm²～60N/mm²まで5N/mm²ずつ3水準、合計9水準）の測定結果を図3から図4に示す。図3は、従来通り、打撃体の反発過程から、算出した機械インピーダンスの測定結果を示すものであり、図4は式(9)によって算出した動的ブリネル硬度指標値の測定結果である。図中赤線は、近似式から±15%の範囲を示している。圧縮強度と機械インピーダンスの関係、および圧縮強度と動的ブリネル硬度の関係ともに、指標値が大きくなると圧縮強度も大きくなる傾向を示している。相関係数は、機械インピーダンスが0.86程度、動的ブリネル硬度が0.73程度であり、両者ともに、有意な相関関係が認められ、±15～20%程度の範囲で圧縮強度の推定が可能であることがわかる。相関係数は、動的ブリネル硬度より、従来から行っている機械インピーダンスのほうが良好である。これは、コンクリートが非線形性を持った材料であるためと考えられる。打撃体が衝突した際に、コンクリート表面は弾性変形し、

ある一定以上の応力となった段階で塑性変形が進行すると想定しているが、実際にはコンクリートの表面は、脆弱層が存在し打撃初期の段階でも塑性変形が進行するため、この影響により、機械インピーダンスに比較してややばらつきの多い結果となったものと考えられる。

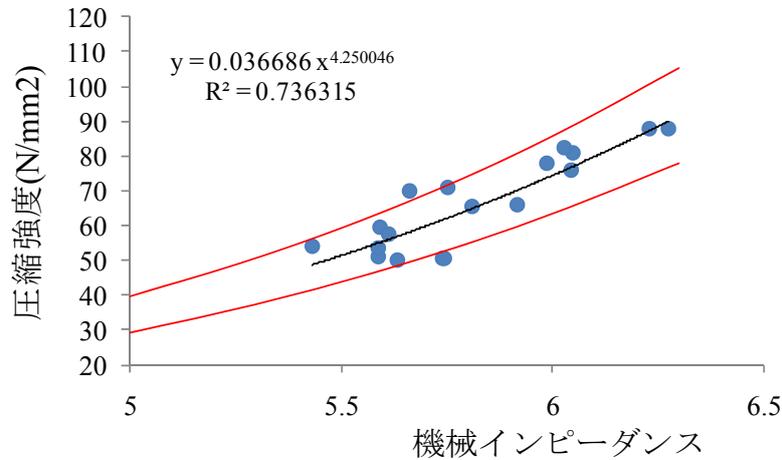


図3 圧縮強度と機械インピーダンス

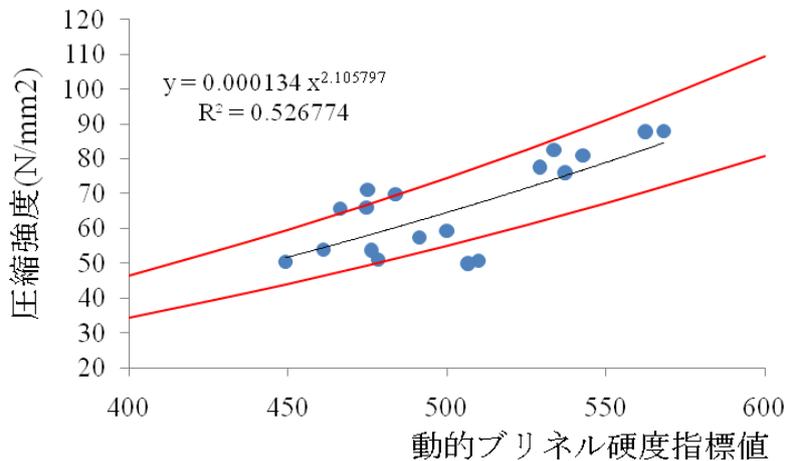


図4 圧縮強度と動的ブリネル硬度指標値

5. まとめ

本論では、打撃力波形のうち打撃体の貫入過程に着目し、動的ブリネル硬度から圧縮強度の推定が可能か検討を行った。打撃力波形から打撃体の初速度と力を求められれば、動的ブリネル硬度の算出が可能であり、圧縮強度の推定も±20%程度の精度で推定可能であることが分かった。しかしながら、従来通り、打撃力波形の反発過程から算出した機械インピーダンスを用いる方法のほうが相関係数は良好である。

参考文献

- 1) 境友昭 他、圧縮強度推定に関するリバウンドハンマ法の理論的検証、コンクリート工学会、年次大会、2014,7
- 2) 久保元樹 他、機械インピーダンス法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年度秋季講演概要集、2003,11