

ハンマ打撃によるコンクリート強度の推定

日東建設(株) 久保元, 金田重夫, 久保元樹
ITECS 技術協会 極壇 邦夫

ハンマ打撃によってコンクリートの弾性的性質を反映した指標値を得る方法について理論的検討を行い、ついでその指標値からコンクリートの1軸圧縮強度を推定する方法について、実験的な検討結果を示す。打撃によるコンクリート1軸圧縮強度推定方法としては、リバウンドハンマ法が広く普及しているが、本論ではその測定原理を理論的に検討し適用限界を示す。弾性指標からコンクリートの1軸圧縮強度を推定する上で、両者の相関関係のみならず測定値の分散について検討し、本論の結論として、コンクリート表面の単位面積当たりのバネ係数を指標とする方法の適用性が高いことを示す。

キーワード: コンクリート, 1軸圧縮強度, リバウンドハンマ, 機械インピーダンス

1. はじめに

ハンマ打撃によってコンクリートの強度を推定する方法として、すでにリバウンドハンマ法が一般化しており、測定装置および測定方法については JIS 基準¹⁾が定められている。リバウンドハンマ法は日本国内に導入されて50年以上の歴史があり、この間多くの技術者によってコンクリート強度の推定精度に関する検討および実用化のための検証実験がなされてきた²⁾。リバウンドハンマ法は、コンクリート表面での変形が塑性領域に至り、この塑性変形によって打撃エネルギーが吸収されることを測定原理としている。非破壊ではなく、いわば微破壊的な測定方法と言えよう³⁾。

これに対し著者らは、ハンマ打撃によってコンクリート表面のバネ係数あるいは機械インピーダンスを測定し、これらの弾性指標とコンクリートの圧縮強度を実験的手法によって関係づけ、コンクリート強度推定を行う方法について研究を行ってきた^{4),5),6)}。本論では、この測定方法を「機械インピーダンス法」と呼称し、リバウンドハンマ法と対比しながら、測定原理の違いと強度推定精度などについて論じる。

2. ハンマ打撃によるコンクリート強度推定方法

2.1 リバウンドハンマ法

リバウンドハンマ法は、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⁷⁾。ブリネル硬度 H_B は、図-1 に示すように剛体とみなし得る半径 R の球体を被測定面に静的な力 F で押しつけ、塑性変形によって表面に生じた圧痕の深さ x を計測し、

$$H_B = \frac{F}{2\pi R x} \quad (1)$$

として算出される値である。コンクリートの体積圧縮強度 σ_V とブリネル硬度の間には比例関係があり、

$$H_B = c \sigma_V \quad (2)$$

とすることができる。ここで、 c は任意の比例定数である。

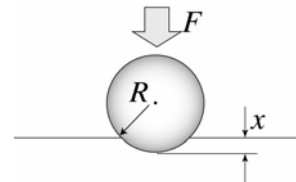


図-1 ブリネル硬度測定方法の概念

塑性変形過程での力 F が球体の貫入量に比例すると考えると、塑性変形によって消費されるエネルギー E_p は、

$$E_p = \frac{1}{2} F_{\max} x \quad (3)$$

である。式(2)を式(1)に代入して、圧痕の深さ x について解くと、

$$x = \frac{F}{2\pi R c \sigma_V} \quad (4)$$

となる。式(4)を式(3)に代入して整理すると、

$$E_p = \frac{F_{\max}^2}{4\pi R c \sigma_V} \quad (5)$$

が得られる。式(5)から、コンクリートの体積圧縮強度が小さいほど塑性変形エネルギーが大きくなることがわかる。すなわち、塑性変形エネルギーを計測することによって、コンクリートの体積圧縮強度が測定できることになる。

さて、リバウンドハンマ法では、打撃によって力 F を発生させるため、厳密に言えば静的な荷重を前提としているブリネル硬度測定方法とは、測定原理が異なる。そこで、動的現象であることを利用し、エネルギーの釣り合いを考える。

ハンマがコンクリート表面に衝突するときの速度を V_0 また、衝突後リバウンドするときの速度を V_r とすると、

$$\frac{1}{2} M V_0^2 = \frac{1}{2} M V_r^2 + \frac{F_{\max}^2}{4\pi R c \sigma_V} \quad (6)$$

のエネルギー釣り合い式が成立する。ただし、打撃エネルギーが一部波動エネルギーとなって逸散することは考

慮していない。なお式(6)において、 M はハンマの質量である。剛体と仮定した球体が反発するためには、コンクリート表面の弾性変形を考慮しなくてはならない。もし、コンクリート表面に弾性変形が生じないとすれば、剛体としての球体の反発はあり得ないからである。現象を簡単にするため、コンクリートの表面の持つ弾性変形に関する係数(バネ係数)という考えを導入する。ただし、この段階では、そのようなバネ係数がどのような物性によってもたらされるかは論じない。また、コンクリート表面の弾性変形エネルギーの全ては球体が反発するときの運動エネルギーに変換されるとする。すなわち、

$$\frac{1}{2}MV_r^2 = \frac{1}{2} \frac{F_{\max}^2}{K} \quad (7)$$

が成立するとする。 K は、コンクリート表面のバネ係数である。式(7)を F_{\max}^2 について解き、これを式(6)に代入して整理すると、

$$\frac{1}{2}MV_0^2 = \frac{1}{2}MV_r^2 \left(1 + \frac{K}{4\pi Rc\sigma_v} \right) \quad (8)$$

となる。リバウンドハンマ法では、ハンマの反発係数 ε を測定するが、式(8)を整理すると、反発係数と体積圧縮強度の関係式が得られる。

$$\varepsilon = \frac{V_r}{V_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K}{2\pi Rc\sigma_v}}} \quad (9)$$

式(9)において、 K が一定であれば、 $\sigma_v \rightarrow \infty$ において反発係数は1に収束し、また $\sigma_v \rightarrow 0$ の極限では反発係数は限りなく0になる。すなわち、反発係数と体積圧縮強度は単調増加関係にあることが分かる。図-2に体積圧縮強度と反発係数の関係を示す。

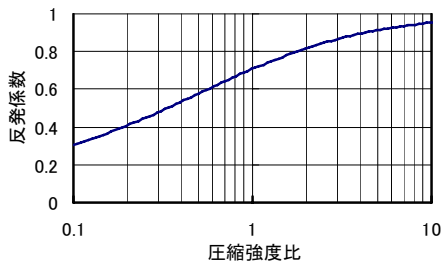


図-2 圧縮強度比($2\pi Rc\sigma_v / K$)と反発係数

図-2に示すように、体積圧縮強度が増加すれば、反発係数も増加する。すなわち、コンクリートの体積圧縮強度が1軸圧縮強度と強い関係があれば、リバウンドハンマ法によってコンクリートの1軸圧縮強度推定が可能であることが示される。しかしながら、後述するようにバネ係数 K と1軸圧縮強度には同様に単調増加関係があり、反発係数から1軸圧縮強度を推定する場合の図-2の成立性については十分な検討が必要である。

2.2 機械インピーダンス法

図-1と同様に球体がコンクリート表面に衝突する現象を考える。しかし、球体はコンクリート表面に弾性変形を与えるが塑性変形は生じさせないとする。この時のエネルギーの釣り合いについて考える。コンクリート表面での弾性変形は、球体が持つ運動エネルギーによってもたらされる。エネルギー保存の法則から、

$$\frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}Kx^2 = U \quad (10)$$

が成立する。なお、 U は、系の初期エネルギーである。球体がコンクリート表面に衝突する直前では、球体の運動エネルギーが最大であり、また球体の運動が停止した時点では、コンクリートの弾性変形エネルギーが最大となる。よって式(10)は、

$$\frac{1}{2}MV_{\max}^2 = \frac{1}{2}Kx_{\max}^2 \quad (11)$$

とすることができる。ここで、添字の \max は、最大値であることを意味する。さて、 K はバネ係数であるから、当然のことながら、

$$F_{\max} = Kx_{\max} \quad (12)$$

である。式(12)を x_{\max} について解き、これを式(11)に代入して整理すると、

$$\sqrt{MK} = \frac{F_{\max}}{V_{\max}} \quad (13)$$

が得られる。ここで、 \sqrt{MK} は、バネ質量系の機械インピーダンスであり、発生した力の最大値を球体速度の最大値(衝突時の初速度)で除すことによって得られる。

力および速度の最大値は、球体の加速度を計測することによって測定される。球体がコンクリート表面に衝突したときに生じる加速度の実体は、球体の速度を低減させる方向に作用する、いわば、減速加速度であり、速度が0となる時刻、つまり、加速度が最大となるまでの時間積分によって衝突初速度、また慣性の法則から、球体質量と最大加速度の積によって最大打撃力が得られる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} F_{\max} &= MA_{\max} \\ V_{\max} &= \int_0^T A(t)dt \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

である。ここで、 A は加速度、 T は加速度が最大となる時刻を意味する。機械インピーダンスとコンクリートの1軸圧縮強度との間に、論理的に説明できる関連性があるとは考えられていない。このため、機械インピーダンスの測定値から、コンクリートの1軸圧縮強度を推定するためには、両者の関係を実験的に関連付ける必要がある。すなわち、校正試験である。なお、測定方法の実用化の検討については次章で論じる。

2.3 コンクリート表面のバネ係数度による方法

球体が衝突すると、コンクリート表面には球体の貫入を阻止しようとする抵抗力が発生する。この貫入抵抗の発生事象として、①コンクリート表面の音響インピーダンスによる応力の発生、②コンクリート表面のバネ係数度(単位面積当たりのバネ係数)による変形抵抗を考える。音響インピーダンス z は、弾性体の変形速度とその時の応力の関係を示すもので、

$$z = \frac{\sigma}{v} \quad (15)$$

として定義される。ここで、 σ は弾性体に生じた応力、 v は変形速度(音響学では、粒子速度という)である。

音響インピーダンスに対して機械インピーダンスは、力と速度を関係付けるものであって、球体の接触面積が得られれば、音響インピーダンスから機械インピーダンスへの換算ができ、従って、変形速度によって誘発される抵抗力の定式化が可能である。

コンクリート表面のバネ係数度を k とおくと、コンクリート表面の衝突した球体の運動方程式は、

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\pi R z x \frac{dx}{dt} + 2\pi R k x^2 = 0 \quad (16)$$

となる。左辺第1項は、球体の慣性力、第2項は、コンクリート表面の変形速度に比例した抵抗、また第3項は、バネ抵抗を意味している。なお x は、コンクリート表面の弾性変形による球体の貫入量である。実際的な計測という視点からでは、式(16)の解析解を得る必要はなく、計測可能な量としての球体の最大加速度や最大速度によって、測定対象となるコンクリートのバネ係数度を得る方法を考える。この方法としてここでは、式(11)を有限差分法によって解く。有限差分法では、微分演算子を差分スキームに置換し、目的変数(変位 x)を離散化した数列として解く方法である。両側差分を用いた場合、式(11)に現れるそれぞれの微分演算子は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{1}{\delta t^2} (x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}) \\ \frac{dx}{dt} &= \frac{1}{2\delta t} (x_{i+1} - x_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

である。ここで、 i は、 x を時間間隔 δt で離散化した時の i 番目の値であることを示す加付番号である。式(17)を式(16)に代入して式を整理すると、

$$x_{i+1} = \frac{1}{1 + \frac{\pi R z \delta t}{M} x_i} \left(2x_i + \frac{\pi R z \delta t}{M} x_i x_{i-1} - \frac{2\pi R k \delta t^2}{M} x_i^2 - x_{i-1} \right) \quad (18)$$

が得られる。式(18)による計算結果を図-3に示す。実際に球形チップを持つハンマでコンクリート表面を打撃した時のハンマの加速度波形を図-4に示すが、計算波形と測定波形が非常によく似ていることがわかる。すなわち、コンクリート表面では、バネ係数度が加速度波形に対して支配的な影響を及ぼす要因であると推測される。式(18)を用いてハンマ質量、衝突速度、バネ係数度などをパラメータとして、バネ係数度と測定量との関係を求めると、速度と最大加速度の間には $A_{\max} = c_1 V_{\max}^{4/3}$ 、球体質量と最大加速度の間には、 $A_{\max} = c_2 M^{-1/3}$ の関係が認められることがわかった。これから、

$$k = \frac{c}{M} \frac{A_{\max}^3}{V_{\max}^4} \quad (19)$$

としてバネ係数度が得られることになる。なお、ここで使用した c, c_1, c_2 は、それぞれジメンジョンを持った比例係数である。

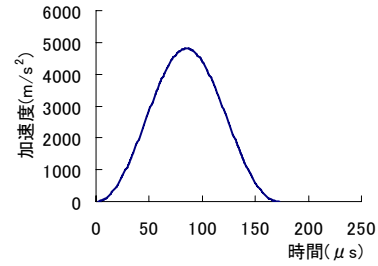


図-3 式(18)による計算結果(加速度波形)

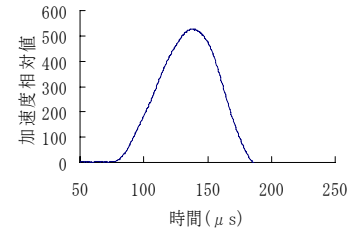


図-4 実際に測定されたハンマの加速度波形

3. 実コンクリートを対象とした1軸圧縮強度の推定

3.1 機械インピーダンスとバネ係数度の補正

理論的検討では、コンクリート表面に塑性化などの劣化が生じていないことを前提としていた。ところが、実際のコンクリートを打撃した場合の打撃力波形は、図-4に示すように、波形のピーク時刻に対して前半部分の方がピーク後半よりも広い面積となっていることが多い。波形の前半部分は、ハンマがコンクリート表面に変形を与える過程であり、本論ではこの部分をアクティブ側と称する。これに対し、後半部分は、コンクリート内に蓄積された弾性変形エネルギーがハンマの速度エネルギーに変換される過程であり、これによってハンマはコンクリート表面から押し戻されることになる。このため、本論ではこの部分をリアクティブ側と呼ぶ。コンクリート表面が塑性化しているような場合、アクティブ側ではハンマ打撃によってコンクリート表面が塑性変形し、次いで弾性変形する。リアクティブ側では、弾性変形エネルギーのみがハンマのリバウンドに使われる。すなわち、塑性変形が生じると、その分だけアクティブ側と比較してリアクティブ側の速度が減少することになる。この考え方は、リバウンドハンマの場合と同様である。ただし、リバウンドハンマの場合には、発生する打撃力によって塑性変形を生じさせるという違いがある。さて、コンクリートの弾性的性質から1軸圧縮強度を推定しようとする立場では、リアクティブ側のみに着目し、機械インピーダンスに対しては、

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{V_R} \quad (20)$$

を指標とする方法を用いる。アクティブ側には、コンクリート表面の塑性化など、弾性的性質を測定する上では好ましくない影響があるからである。ここで、 Z_R はリアクティブ側の速度 V_R から算出した機械インピーダン

スであり、これを補正機械インピーダンスと呼ぶ。同様に、コンクリート表面のバネ係数度については、

$$k = \frac{c}{M} \frac{A_{\max}^3}{V_R^4} \quad (21)$$

として指標値を算出する。

3.2 1軸圧縮強度と指標値の関係

1軸圧縮強度と各指標値の関係を求めるため、表-1に示す材料でコンクリート円柱供試体(直径 150mm 高さ 300mm)を作製し、材齢 28 日以降、リバウンドハンマ試験、縦弾性波速度測定およびハンマ打撃試験を行い、その後直ちに1軸圧縮試験を行う、という手順によって、本論で示す指標値と1軸圧縮強度の関係を調べた。

表-1 供試体

セメントの種類	粗骨材寸法(mm)	W/C(%)	呼び強度(N/mm ²)	スランプ(cm)
BB, N	25	37~65.2	15~36	8

表-2 に試験結果を示す。Z_R 値と1軸圧縮強度の間には比較的良好な相関関係があり、Z_R による1軸圧縮強度推定の可能性が示される。しかしながら、圧縮強度の変動係数と比較して、Z_R の変動係数が極端に小さく、Z_R から1軸圧縮強度を推定する場合の誤差が拡大する要因となる。変動係数が小さいと言う点では、表-2に示すようにリバウンドハンマ法によるR 値(リバウンド値)、縦弾性波速度も同様である。このように変動係数に大きな開きがある原因の一つは、弾性的特性を示す指標値と1軸圧縮強度には事象の違いがあるためと考えられる。

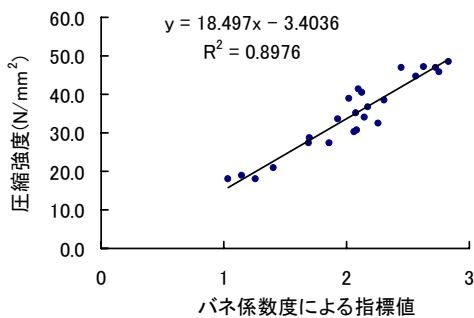


図-5 バネ係数度と圧縮強度の関係

表-2 実験データの統計量(データ数 27)

測定法	測定値	相関係数	変動係数
1軸圧縮試験	圧縮強度	—	29.5%
機械インピーダンス法	機械インピーダンス Z _R 値	0.85	6.7%
リバウンドハンマ法	リバウンド R 値	0.83	10.3%
弾性波速度法	弾性波速度	0.88	3.6%
バネ係数度法	バネ係数度	0.95	23.0%

相関係数は、各指標値と1軸圧縮強度の相関を示す。

図-5 は、バネ係数度と1軸圧縮強度の関係を示したも

のであるが、両者には強い相関関係が見られる。また、機械インピーダンスの場合と異なって、回帰式の切片の値が小さいこと、変動係数が大きいこと、が特徴となっている。このため、1軸圧縮強度を推定する上で、推定値の安定性が高いことがわかる。

4. 結論

コンクリートの1軸圧縮強度は破壊強度であり、縦弾性係数に基づいた測定量との間に、物理的な関係があるわけではない。しかし、非破壊試験による強度推定の観点では、1軸圧縮強度と相関関係の強い弾性指標を構成することが望ましい。現在主として使用されているリバウンドハンマ法、最近実用化された機械インピーダンス法およびコンクリート表面のバネ係数度による方法を理論的に検証し、コンクリート供試体を用いて1軸圧縮強度の推定精度について検討した。この結果、機械インピーダンス法およびリバウンドハンマ法では、測定量の変動係数が1軸圧縮強度の変動係数と比較して相対的に小さいことがわかった。これは、縦弾性波速度でも同様である。しかし、ハンマ打撃による測定方法では、コンクリート表面の局所的な強度の違いの影響を強く受ける可能性があり、測定量としての変動係数の小ささは、1軸圧縮強度の推定誤差につながる可能性が高い。それらと比較して、コンクリート表面のバネ係数度による方法は、変動係数が大きく、また1軸圧縮強度との相関関係も強く、コンクリート強度推定の有力な指標値と言えよう。

また、本論で示したように、反発速度に基づいて指標値を求めると、コンクリート表面塑性化の影響をある程度緩和することができることがわかった。

参考文献

- 1) JIS A 1155:2003 コンクリートの反発度の測定方法
- 2) 谷口秀明他；テストハンマ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，V-64，No.767，pp.199-210，2004.8
- 3) (独)土木研究所，(社)非破壊検査協会，他：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報告書(1)，土木研究所共同研究報告整理番号第 299 号，2004 年
- 4) 極檀邦夫他；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，コンクリート構造物の非破壊検査への期待シンポジウム論文集，Vol.1，pp.57-64，2003.7
- 5) 久保元樹他；円柱供試体の圧縮強度と弾性波速度，機械インピーダンスおよび弾性係数の相関関係，土木学会第 60 回年次学術講演会 pp.1207-1208，2005.9
- 6) 金田重夫他；機械インピーダンスによる剥離検知の基礎的実験，土木学会北海道支部論文報告集第 60 号，pp.746-747，2004.2
- 7) K.Gaede, E.Schmidt; Ruckprüfung von Beton mit dichtem Gefüge, 1960, 柏忠二編; コンクリートの非破壊試験法, pp.255-319, 1980