

非破壊によるコンクリート強度の推定—ブリネル硬度と機械インピーダンス

アプライドリサーチ (株)	正会員	○境	友昭
日東建設 (株)	正会員	久保	元樹
日東建設 (株)	正会員	久保	元
日東建設 (株)	正会員	金田	重夫

1. はじめに

機械インピーダンスからコンクリート表面のバネ定数を算出し、圧縮強度を推定する、いわゆる機械インピーダンス法¹⁾を提案している。しかし、この測定方法は、コンクリートが弾性体であることを前提としており、圧縮強度のような塑性域での特性と直接的に結びつくものではない。ところが、球が塑性体に静的貫入するブリネル硬度試験では、貫入量と貫入抵抗(塑性変形抵抗)が比例する関係にあり、すなわち、力学モデルとしては、バネ的な挙動を示すことになる。本論では、この特性に着目し、塑性域の強度指標であるブリネル硬度と機械インピーダンス法の関係について理論的考察を行う。

2. 変形パスからの考察

図1に、静的な変位—反力関係(a)とハンマ打撃時の打撃力波形(b)との対比を示す。加速度は、ハンマ質量を乗じると打撃力である。つまり、静的、動的に同じ荷重が作用した場合、(a)の最大値と(b)の最大値は、同じ値となる。また、(b)でピークの達する前の時間は、(a)の塑性変形パス、ピーク後の時間は弾性変形パスに相当する。

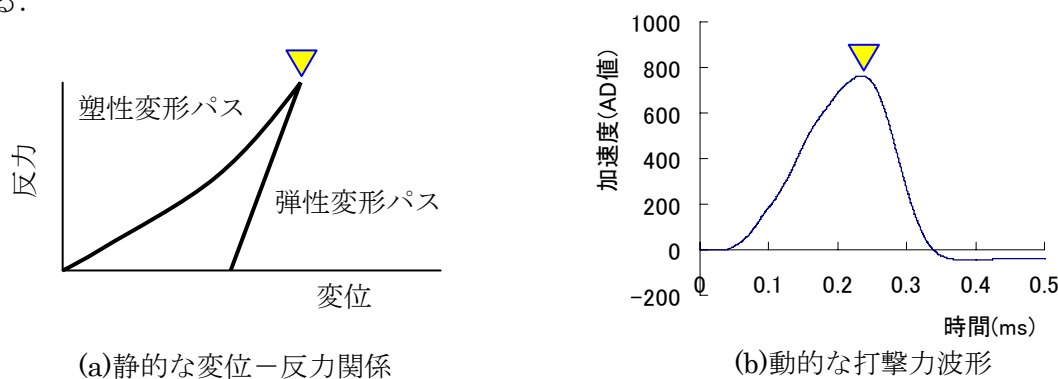


図1 静的荷重—変位関係と動的打撃力時間波形の対比

まず、最大反力(打撃力)に至るまでの過程でのエネルギーについて考察する。静的変形を線形とみなした場合のポテンシャルエネルギーは式(1)、また動的な場合の運動エネルギーは式(2)となる。また、いずれも変形が進行する過程であるから、ほぼ同様の経路を通過すると考えれば、両者のエネルギーは等しく、これにより、式(3)が成立する。

$$E_U = \frac{1}{2}Fd \quad (1) \quad E_K = \frac{1}{2}MV^2 \quad (2) \quad \frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}Fd \quad (3) \quad H_B = \frac{F}{2\pi d} \quad (4)$$

式(3)を変位量 d について解き、ブリネル硬度の定義式(4)に代入すると、式(5)が得られ、これを整理すると、ブリネル硬度と機械インピーダンスの関係式(6)が得られる。

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{4\pi} \frac{F^2}{H_B} \quad (5) \quad H_B = \frac{1}{2\pi M} \left(\frac{F}{V} \right)^2 \quad (6) \quad K = \frac{1}{M} \left(\frac{F}{V} \right)^2 \quad (7)$$

式(6)は、機械インピーダンス法で、コンクリート表面のバネ係数(K)を測定する式(7)と同じであるが、これは、 $2\pi H_B$ がブリネル硬度試験での「静的なバネ定数、式(9)」に相当する値となっていることから当然で

キーワード コンクリート強度、機械インピーダンス、ブリネル硬度、リバウンドハンマ

連絡先 〒300-2633 茨城県つくば市遠東 904-1 アプライドリサーチ (株) TEL:029-848-1095

ある。変形進行過程では、実際には塑性変形とともに弾性変形も進行する。すなわち、測定され「バネ定数」は、塑性バネと弾性バネが直列に結合されたバネと考えなければならない。ところが、弾性バネは塑性バネよりも十分に大きく、発揮されるバネ定数は塑性バネによって支配されているとしても誤差は少ないと考えられ、ここでは、変位進行過程での挙動について弾性バネ定数は考慮しない。

3. 運動方程式からの考察

コンクリート表面が塑性変形するにしろバネ的挙動を示すとすれば、ハンマ質量が付加されることによってバネ質量系の単弦振動系が成立する。この時の固有振動数(角振動数 ω)は式(8)となる。これをブリネル硬度の塑性バネ定数式(9)に代入して整理すると、式(10)が得られる。変位進行過程での固有振動数とブリネル硬度の関係である。

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (8) \quad K = 2\pi H_B \quad (9) \quad H_B = \frac{1}{2\pi} M \omega^2 \quad (10)$$

なお、機械インピーダンスが、式(11)であることを考慮すると、式(12)に示すように、式(6)と(9)は同じ式であることがわかる。

$$\sqrt{MK} = \frac{F}{V} \quad (11) \quad H_B = \frac{1}{2\pi M} MK = \frac{M}{2\pi} \frac{K}{M} = \frac{M}{2\pi} \omega^2 \quad (12)$$

4. 固有振動数による解析方法

機械インピーダンスによる解析では、変位進行過程での機械インピーダンスは使用していない。変位進行過程には、コンクリート表面の塑性変形が含まれており、健全なコンクリート表面のバネ定数を正しく測定できないからである。固有振動数による方法では、逆に変位進行過程でのバネ係数を求める。単弦振動の差分形式による運動方程式の解は、式(13)のようになり、これから変位進行過程での平均的な周波数は式(14)によって推定される。式(14)の処理では、波形を区分して固有振動数を求めることができる。例えば、打撃力が最大値に近接した時間帯での振動数を算出すれば、コンクリート表面の劣化の影響を受けないブリネル硬度が得られる。また、波形の初期過程を利用すれば、塑性化したコンクリートのブリネル硬度を得、その強度推定も可能となる。

$$y_i = 2 \cos \omega \Delta t \cdot y_{i-1} - y_{i-2} \quad (13) \quad \omega = \frac{1}{\Delta t} \cos^{-1} \left(\frac{1}{2N} \sum_i \frac{y_i + y_{i-2}}{y_{i-1}} \right) \quad (14)$$

図1の波形(農業用水路コンクリート)の波形を元に、固有振動数解析を行う。波形のピークから1/2以上、ピーク前半部分の波形を式(14)に適用すると1685Hzとなり、推定されるブリネル硬度は、113N/mm²である。文献²⁾によると、 $H_B = 5.2\sigma$ の関係があるとされており、圧縮強度は21.7N/mm²と推定される。

5. まとめ

これまで、機械インピーダンス法の理論的枠組みでは、変位リバウンド過程の弾性範囲の現象にのみ着目し、弾性係数から圧縮強度を推定するという方法を用いていた。しかしながら、球冠を持つハンマを使用する場合に限るという条件は付くものの、変位進行過程で塑性変形を含む場合であっても、塑性変形自体が擬似的にバネ的性質を示すことから、機械インピーダンス法、あるいは固有振動数によってコンクリートのブリネル硬度を測定することが可能であることがわかった。固有振動数から求めたブリネル硬度を元に文献²⁾によってコンクリートの圧縮強度を推定すると、ほぼ妥当に値となった。ただし、圧縮強度とブリネル硬度の関係については、定式化すべき事項であり、理論的、実験的な検討が待たれることは言うまでもない。

参考文献

- 1) 金田重夫他:インピーダンス法によるコンクリート強度推定・原理と誤差, 2010年土木学会年次講会, 2010
- 2) 谷口秀明: テストハンマによる構造体コンクリートの強度推定法に関する研究, 三井住友建設技術研究所 報告第5号, pp.39-50, 2007