

機械インピーダンス法による高強度コンクリートの強度推定について

ESTIMATION OF COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE BY MEANS OF MECHANICAL IMPEDANCE MEASUREMENT

日東建設株式会社 金田 重夫 久保 元
中野 泰宏 久保 元樹
アプライドリサーチ株式会社 境 友昭

比較的強度の高いコンクリート構造物に対するテストハンマの適用性について、疑問が呈せられることがある。一方、機械インピーダンスにおいても実際の値より小さな値を示すという問題点があった。しかし後者は、測定対象の弾性変形を前提としており、打撃によって塑性破壊が生じない場合でも適用できるという利点がある。本研究では、より広い範囲での圧縮強度推定手法を開発するため、コンクリートの弾性係数に着目し検討を行った。

キーワード：非破壊検査，高強度コンクリート，圧縮強度，推定

1. まえがき

テストハンマ及び機械インピーダンス法は、いずれもコンクリート表面をハンマで打撃してコンクリートの強度を推定しようとする方法である。しかし、両者には測定原理に基本的な違いがある。前者は、打撃によってコンクリート表面に塑性破壊が生じることを前提とし、その破壊時のエネルギー損失率を圧縮強度に結びつけている。これに対し後者は、コンクリートの縦弾性係数に由来する機械インピーダンスを測定し圧縮強度を推定するという手法を用いている。このため、テストハンマは、微破壊検査法、機械インピーダンス法は非破壊検査法というように違ったカテゴリに区分されている。

縦弾性係数に由来する測定量からコンクリート強度の推定を試みる方法として、近年国土交通省が採用した縦弾性波速度測定によるコンクリート強度の非破壊検査方法¹⁾がある。論理的には、縦弾性波速度からコンクリート強度推定が可能であれば、機械インピーダンスからもコンクリート強度推定が可能という推論が成立するし、実際に普通コンクリートの強度推定では機械インピーダンスによる方法が少しずつあるが浸透しつつある。しかしながら、普通コンクリートと同じ較正曲線を用いて圧縮強度 50N/mm^2 を越えるような高強度コンクリートの強度推定を行うと、実際の強度よりも低めの値となる傾向があった。この原因として、高強度コンクリートの場合、縦弾性係数は普通コンクリートと同程度であるものの許容歪み量が大きいいため高い強度となっている、縦弾性係数と歪み量の関係が普通コンクリートと高強度コンクリートでは異なり、高強度コンクリートは、高歪み領域での弾性係数が低下せず、結果的に高強度となる、が考えられた。いずれの場合でも、配合ごとにコンクリート供試体を多数製作して機械インピーダンス値と圧縮強度の関係を求めれば、簡単に機械インピーダンスからの強度推定が可能となる。しかし、縦弾性係数と圧縮強度の関係についての知見があれば、より簡便に配合、骨材、セメント成分が異なるコンクリートの強度推定較正式を構成することが可能となる。

2. コンクリートの弾性係数と圧縮強度

2.1 静弾性係数試験

図1は、コンクリート供試体(普通コンクリートは、W/Cの値、高強度コンクリートは設計強度で標記)での静弾性係数試験結果をもとに、歪み量と見掛けの弾性係数の関係をプロットしたものである。見掛けの弾性係数は、その時の応力を歪みで除した値、すなわち割線勾配を示している。図1では、

最大許容ひずみ量(供試体が破壊に至ったときのひずみ量)は、普通コンクリートあるいは高強度コンクリートに関わらず、ほぼ一定となっている。一例を除いて大凡 2,000 から 2,500 μ ストレインの範囲である。この結果から、高強度コンクリートは、普通コンクリートと比較して最大許容歪み量が大きく、このため機械インピーダンスが同じでも強度が高いとする仮説は成立しないことがわかる。

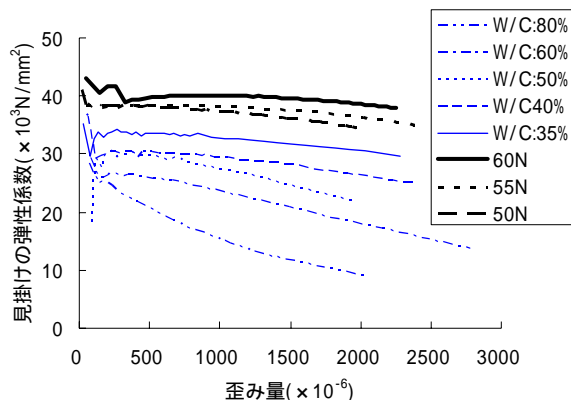


図 1 歪み量と見掛けの弾性係数の関係

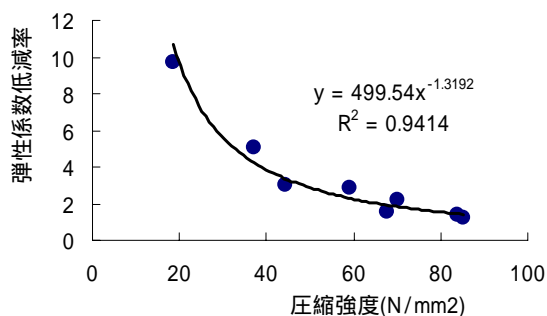


図 2 圧縮強度と弾性係数の低減率の関係

図 1 では、歪み量が増加するにしたがって、低強度コンクリートでは弾性係数の低下が大きくなる傾向が見られる。図 2 はこの傾向を明瞭化するため、この勾配を直線回帰式で求め、圧縮強度との関係でプロットしたものである。図から高強度のコンクリートほど、弾性係数の低減率が小さいことがわかる。両者の関係に理論的な背景はないが、参考のため両者の回帰関係を求めると、弾性係数の低減率は、圧縮強度の $4/3$ 乗に逆比例する傾向を示しているようである。この値は、縦弾性係数から圧縮強度に推定する場合の補正項となるものである。

2.2 弾性係数と圧縮強度の関係

静弾性係数試験の結果から見掛けの弾性係数が歪み量によって低下し、その低下の程度が圧縮強度の影響を受けていることがわかった。つまり、機械インピーダンス法で圧縮強度を推定しようとする場合、打撃時の応力によって推定強度に違いが生じることになる。

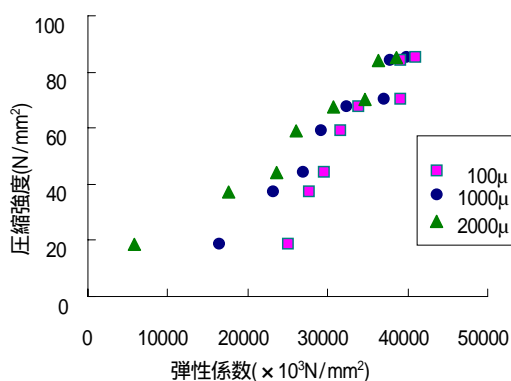


図 3 弾性係数と圧縮強度の関係

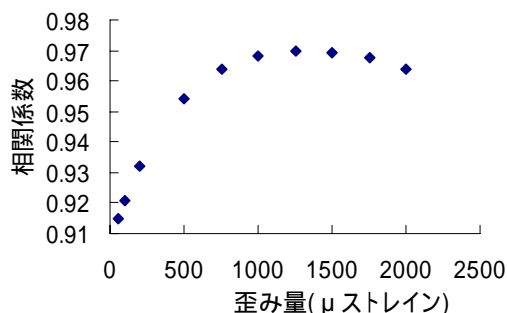


図 4 歪み量と圧縮強度推定時の相関係数の関係

図 3 は、歪みレベルが 100, 1000 及び 2000 μ ストレインでの見掛けの弾性係数と圧縮強度の関係をプロットしたものである。歪みレベルが小さい場合、両者の関係は直線からずれているように見受けられる。図 4 は、この傾向を検証するため、歪みレベルと圧縮強度推定時相関係数の関係をプロットしたものである。図 4 から、歪み量が 1250 μ ストレイン前後で相関係数が最大となり、歪み量が小さ

いと相関係数が小さい，すなわち，圧縮強度の推定誤差が大きくなる，ことがわかる．

3. 機械インピーダンス法への適用

3.1 機械インピーダンス法と縦弾性係数

前節の考察から，機械インピーダンス法では，コンクリート表面を打撃するが，この時の応力(歪みレベル)が圧縮強度推定精度に影響を与えることがわかった．打撃による応力は，ハンマの衝突速度を v とすると，打撃された接触面でのコンクリートの応力は，

$$\sigma = E\varepsilon = \rho cv \tag{1}$$

の関係によって求められる．ここで， ρ はコンクリートの密度， c は縦弾性波速度， ε は歪みである．なお ρc は，材料の持つ音響インピーダンスである．式(1)において，ポアソン比を考慮しない場合の縦弾性波速度が

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2}$$

となることを考慮すると，打撃による歪み量は，

$$\varepsilon = \frac{v}{c} \tag{3}$$

となり，コンクリートの弾性波速度に対する打撃速度の比によって推定されることがわかる．コンクリートの弾性波速度が 4,000m/s とすれば，ハンマの打撃速度が 0.5m/s で 1,250 μ ストレインの歪みが生じるという計算になる．しかし，静的な圧縮試験と異なって打撃ではハンマ接触面のように一部にしか大きな歪みが発生しない．

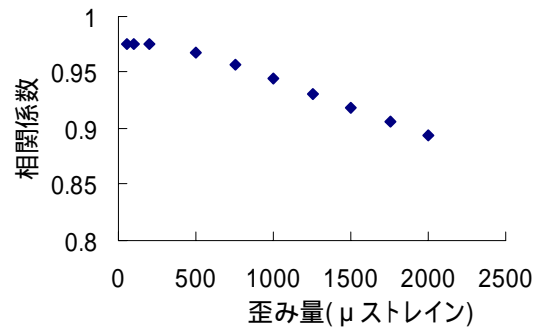
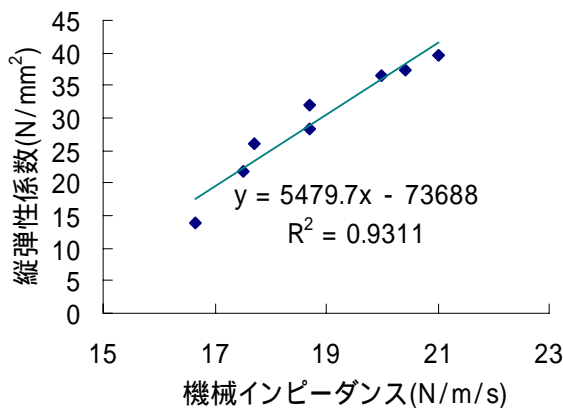


図5 機械インピーダンスと弾性係数の関係

図6 機械インピーダンスと弾性係数間の相関係数

図5は，普通及び高強度コンクリートを対象とした機械インピーダンスと縦弾性係数(歪み量 1,250 μ ストレイン)の関係を示している．両者には高い相関関係があるものの，無視できない大きさの切片がある．この相関係数を歪み量との関係で示したものが図6である．図から，測定された機械インピーダンス値は，歪みレベルが小さい時の方が縦弾性係数とより強い相関関係を持つことがわかる．すなわち，ハンマ打撃で実現化されているコンクリート構造物自体の歪みレベルは，静的圧縮試験と比較して非常に微小(約 1/10)であり，このため圧縮強度の推定精度が落ちているものと考えられる．

3.2 機械インピーダンス法と圧縮強度

機械インピーダンスから圧縮強度を推定する方法として，測定した機械インピーダンスとコンク

リートの圧縮強度のデータに基づいて較正曲線を求める方法， 圧縮強度と強い相関関係を持つ縦弾性係数，あるいはその指標値を測定によって求め，圧縮強度を推定する方法，がある．いずれも，経験的關係式を求めるとい手法であるが，ある程度論理的な根拠を持つ手法の方が広い適用性を持つ可能性が高い．

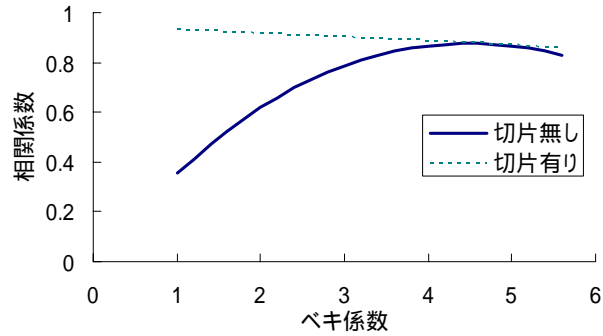
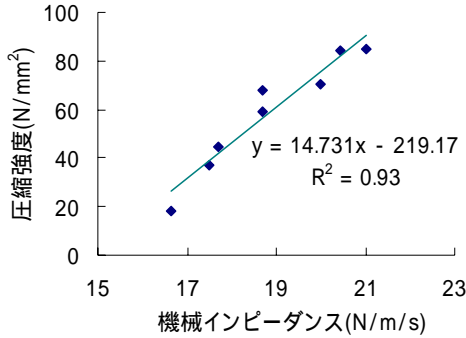


図7 機械インピーダンスと圧縮強度の関係

図8 機械インピーダンスと圧縮強度間の相関係数

図7は，機械インピーダンスの測定値と圧縮強度の関係を求めたものである．図では，普通コンクリートも高強度コンクリート同じデータとして取り扱っている．平均的に見れば，圧縮強度の設計値によって回帰直線を変える必要はないと判断される．図8は，機械インピーダンスの測定値のベキ乗値を求め，その値と圧縮強度の相関係数を算出したものである．図では，直線回帰式に切片を用いる場合と，そうでない場合の相関係数の変化を示している．図から明らかとなり，切片を許容する回帰式であれば，ベキ係数は1の方が高い相関係数となることがわかる．切片を用いない場合は，ベキ係数が4.4で最大に達し，特にベキ係数が小さい場合，相関が悪くなる傾向を示す．図4に示すとおり，縦弾性係数と圧縮強度の関係は切片が0となる回帰式で説明できるので，機械インピーダンスに基づいた指標値から圧縮強度を推定する場合にも回帰式の切片は0である方が望ましい．機械インピーダンスは，弾性係数の指標値の一つであるからである．コンクリート表面の持つバネ係数度を指標値とする場合，機械インピーダンス値の3乗を用いれば良いことを提案していたが²⁾，これに圧縮強度と縦弾性係数の低減率(圧縮強度の-1.32乗)の関係を考慮すれば，ベキ係数としては4.3乗が最適となるが，この値は図8とほぼ一致する．

4. まとめ

実験の結果，高強度コンクリートと普通コンクリートとは許容歪み量はほぼ同じであること，高強度コンクリートは，高歪み領域での弾性係数が低下しないため圧縮強度が高いことがわかった．これまで，機械インピーダンス指標値から圧縮強度を推定するための較正式として，高強度コンクリートと普通コンクリートを区分することを考えてきた．しかし，強度の関係なく統一的な取扱ができることの方が望ましいことは明らかである．すなわち，これまでの指標値(バネ係数度)に対して縦弾性係数の歪み依存性を考慮すれば，低歪み領域で測定した弾性係数から大きな歪み状態での弾性係数を推定することができ，圧縮強度推定精度の向上を図ることができる．機械インピーダンス測定から得られるコンクリート表面のバネ係数度に弾性係数の歪み依存性を考慮し，ベキ係数として4.3乗から4.4乗を用いる方法を提案する．

[参考文献]

- 1) 独立行政法人土木研究所ホームページ；衝撃弾性波試験 iTECS 法による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案)
- 2) 久保元，金田重夫，久保元樹，極檀邦夫；ハンマ打撃によるコンクリート強度の推定，会誌コンクリート工学，5月号 Vol.44, No.5, pp41-44, 2006.5