

報告 機械インピーダンス法によるコンクリートの強度推定

Estimation of compressive strength of concrete by mechanical impedance

○久保 元樹*1・岡本 真*1・久保 元*2・境 友昭*3

Genki KUBO, Makoto OKAMOTO, Hajime KUBO and Tomoaki SAKAI

要旨：コンクリートの圧縮強度を非破壊によって推定する方法では、弾性領域での測定から破壊時の応力を推定するという枠組みを持つ。測定技術から見たコンクリートは、非線形材料であるため、どのひずみ領域で測定するかによって、強度推定の手法や精度に影響を及ぼす。本論では、機械インピーダンス法による強度推定の理論的枠組みを示し、強度推定時の系統誤差の発生要因を明らかにし、その補正方法について考察を行うものである。

キーワード：非破壊検査、圧縮強度推定、機械インピーダンス、打撃試験

1. はじめに

コンクリートの圧縮強度を非破壊で推定する手法では、弾性領域での量を測定し、これから破壊時の応力を推定するという枠組みを持つ。コンクリートは、非破壊検査で使われるひずみ領域においても、非線形性を持ち、どのようなひずみ領域での量を測定するかによって測定値が異なり、強度推定の手法、また精度にも影響を及ぼす。筆者らは、機械インピーダンス法による圧縮強度の推定について検討を行ってきた¹⁾²⁾。本論では、機械インピーダンス法によるコンクリートの圧縮強度推定の理論的枠組みを示し、圧縮強度推定時の不確定要素、すなわち系統誤差の発生要因を明らかにするとともに、その補正方法についての考察を行うものである。

2. 実験の概要

実験は、養生条件を、標準養生と3日後脱型、28日まで散水した養生（以後、現場養生と呼称）の2種類、呼び強度を30, 33, 36, 39, 42, 45, 50, 55, 60N/mm²の9段階変化させたφ150mmの円柱供試体（合計18本）を対象に、機械インピーダンスの測定、静弾性係数の測定、圧縮強度試験の3つの試験を実施した。機械インピーダンスの測定は、加速度計を内蔵した重量380gのハンマを用い測定を実施した。静弾性係数試験及び圧縮強度試験は、JIS A 1108, JIS A 1149に準拠し実施した。呼び強度30N~39Nの円柱供試体に関しては、衝撃弾性波法により共振周波数を求め、共振周波数から弾性波速度の算出も実施した。

3. 機械インピーダンス法の原理

図-1に示すように、質量 M のハンマが、速度 V でバネ係数 K のコンクリートに衝突し、変位 D が発生する現象を考える。

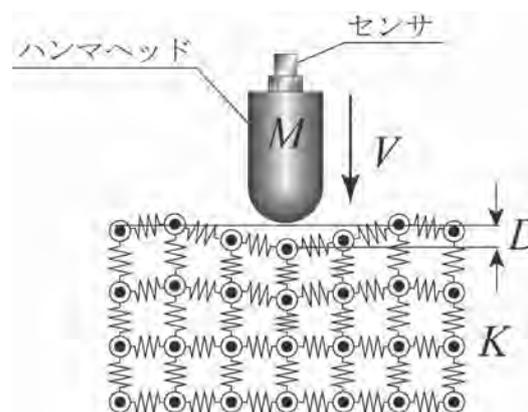


図-1 コンクリートの衝突モデル

エネルギーの釣り合いから、ハンマの持つ運動エネルギーとハンマの打撃によって生じたコンクリートの弾性変形エネルギーは等しく、式(1)が成立する。

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

フックの法則から、最大打撃力 F_{\max} は、

$$F_{\max} = KD_{\max} \quad (2)$$

であり、式(2)を D_{\max} について解き、式(1)に代入し整

*1 日東建設（株）札幌支店

Nitto Construction Inc., Sapporo Branch..

*2 日東建設（株）

Nitto Construction Inc., Head Office.

*3 アプライドリサーチ（株）

Applied Research Inc.

理すると式(3)が得られる。

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

式(3)に示す \sqrt{MK} は、バネ質量系の機械インピーダンス Z であり、打撃力の最大値を打撃速度で除すことで求められることが分かる。バネ係数は弾性係数相当値であるため、機械インピーダンスと弾性係数の間には比例関係が成立する。圧縮強度と弾性係数にも比例関係があることが知られており、機械インピーダンス法はこれを利用してコンクリートの圧縮強度を推定しようとするものである。

4. コンクリートの弾性係数と測定時の歪み領域

4.1 静弾性係数試験結果

図-2は、コンクリート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、その時の応力をひずみで除した値として算出している。

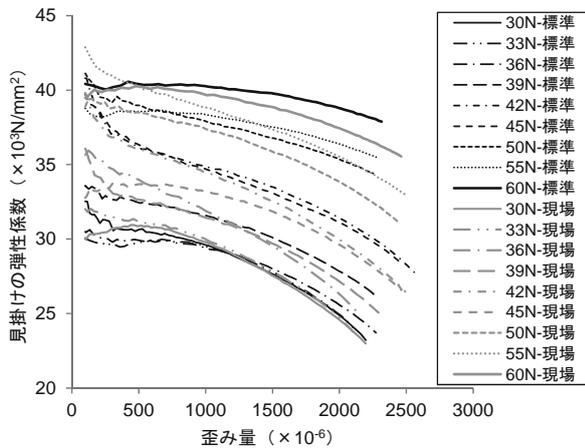


図-2 歪み量と見掛けの弾性係数の関係

図-2に示す通り、見掛けの弾性係数は、一定ではなく歪み依存性を持っており、コンクリートの強度が低いほど依存性が高い傾向がある。しかしながら、最大許容歪み量は、コンクリートの強度に関わらず、約2000から2500 μ ストレインの範囲で一定である。

図-3に、終局状態の弾性係数と圧縮強度の関係を示す。両者は比例関係にあり、相関係数は非常に高く、養生条件による違いも見られない。以上より、測定によって終局状態の弾性係数を精度よく推定できれば、終局状態の歪み量を一定と仮定することで、式(4)によって圧縮強度の推定が可能であることを示している。

$$\sigma_U = E_U \varepsilon_U \quad (4)$$

ここに、 σ ：応力 E ：弾性係数 ε ：歪みである。また添え字 U は、終局状態であることを意味している。ただし、ハンマ打撃によって生じるコンクリートの歪みは、微小と想定されるため、ハンマ打撃によって測定した弾性係数から終局状態の弾性係数を推定するという手続きが必要となる。なお、式(4)において、終局状態の歪み量を仮定する必要がある。本実験の結果から終局歪みは2000から2500 μ ストレインの間にあるため、2250 μ ストレインを終局歪みと仮定するが、実際の終局歪みと仮定した終局歪みの相違が誤差となる。

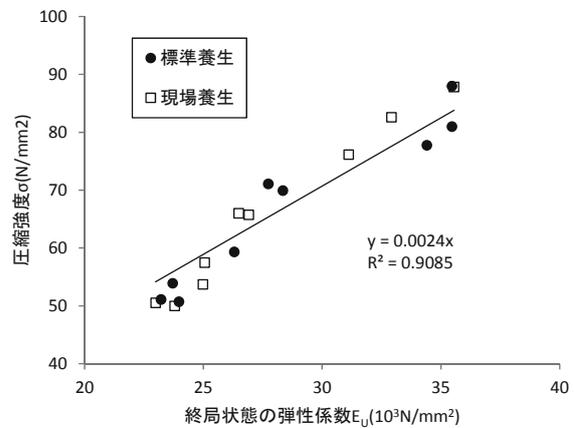


図-3 終局状態の弾性係数と圧縮強度の関係

4.2 測定時の歪み領域

機械インピーダンス法では、ハンマ打撃によって弾性係数を求めるが、静弾性係数試験結果から、弾性係数は歪み依存性を持っているため、ハンマ打撃によってどの程度の歪みが生じているか把握する必要がある。

打撃による応力は、ハンマの衝突速度を V とすると、式(5)として示される。

$$\sigma = E\varepsilon = \rho cV \quad (5)$$

ここに、 σ ：応力 ρ ：コンクリートの密度 ε ：歪み c ：縦弾性波速度である。なお、 ρc は、材料の持つ音響インピーダンスである。式(5)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式(6)となることを考慮すると、打撃によって発生する歪みは式(7)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で推定することが可能である。

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{V}{c} \quad (7)$$

本実験において、呼び強度 30 から 39 N/mm²の円柱供試体で弾性波速度を実測しており、その平均値は 3944m/s であった。打撃速度の平均値は、ハンマヘッドに内蔵した加速度計の測定データから算出したところ 1.56m/s であった。これから、打撃によって発生している歪みは、395 μ ストレインと考えられる。よって、測定時の歪み領域を 400 μ ストレインとして議論を進める。

4.3 圧縮強度と弾性係数の低減

図-4 は、図-2 に示す見掛けの弾性係数低減傾向を明瞭化するため、400 μ ストレイン時から終局状態の歪み領域の間で直線回帰し勾配を求め、圧縮強度との関係で示したものである。図から、標準養生と現場養生で多少傾向が異なるものの、圧縮強度が低いコンクリートほど、弾性係数の低下率が大きいことが分かる。弾性係数の低減率は、圧縮強度の-1.03 乗に比例している。この値は、縦弾性係数から圧縮強度を推定する場合の補正項となる。なお、本実験において、標準養生と現場養生で区別せず回帰しベキ乗値を求めているが、実際には、標準養生と現場養生でベキ乗の値が異なっている。また、本実験における圧縮強度の範囲外のコンクリートが混ざればベキ乗値は変動する。この変動は、機械インピーダンスから圧縮強度を推定する際の誤差要因となる。

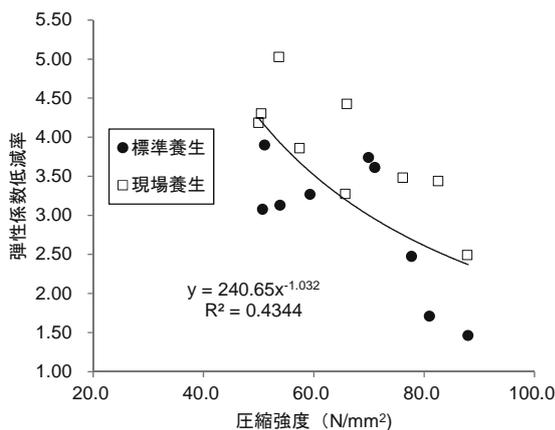


図-4 圧縮強度と見掛けの弾性係数低減率

4.4 非破壊領域と終局状態の弾性係数と機械インピーダンス

図-5 に、機械インピーダンスと測定上の歪み領域 (400 μ ストレイン時) の弾性係数の関係を、図-6 に

測定上の歪み領域 (400 μ ストレイン時) における弾性係数と終局状態の弾性係数の関係を示す。なお、400 μ ストレインは、実際に発生していると想定される歪み領域である。機械インピーダンスと弾性係数、測定時の弾性係数と終局状態の弾性係数にはそれぞれ比例関係が認められ、そのベキ乗値は、2.15 と 1.34 である。これらは、機械インピーダンスから終局状態の弾性係数を推定する際の補正項となり、ベキ係数としては、機械インピーダンスの 3.49 乗となる。実際に圧縮強度を推定する場合には、弾性係数の低減率 (圧縮強度の -1.03 乗) を考慮し、ベキ係数としては 4.52 乗が最適となる。

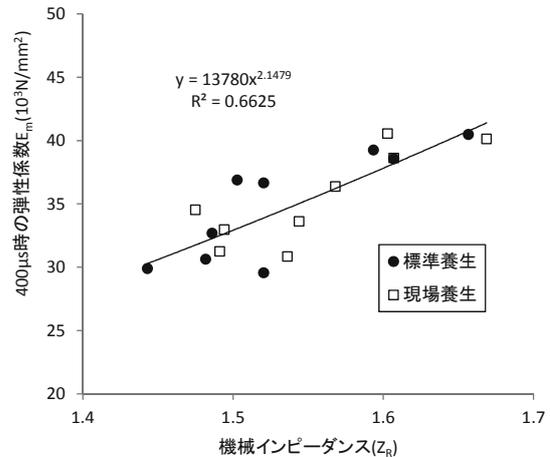


図-5 機械インピーダンスと 400 μ ストレイン時の弾性係数の関係

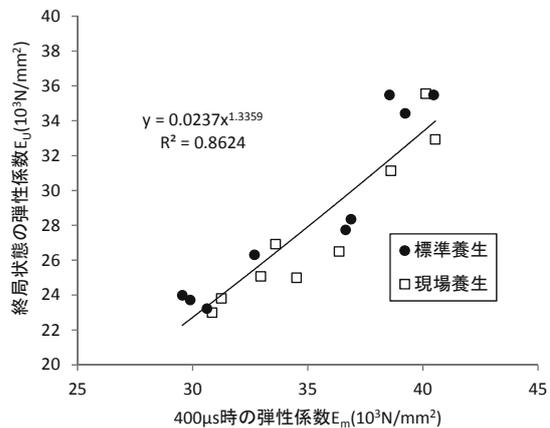


図-6 400 μ ストレインと終局での弾性係数の関係

4.5 機械インピーダンスから圧縮強度の推定

4.4 章において、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、機械インピーダンスの 4.52 乗を採用すれば良いことを、静弾性係数試験結果等から導いた。しかしながら、現実的には、機械インピーダンスと圧縮強度の関係を求める方法が直接的である。図-7 に、機械インピーダンスと圧縮強度の関係を示すが、

機械インピーダンスの 4.1 乗が圧縮強度と比例する関係となっていることがわかる。なお、両者の相関係数は、 $R=0.85$ であり、管理された状態であれば±15%程度の精度で圧縮強度の推定が可能である。

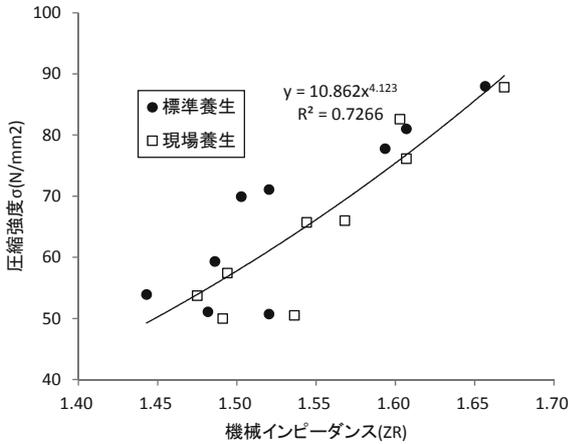


図-7 機械インピーダンスと圧縮強度の関係

5. 圧縮強度の推定手順と誤差

機械インピーダンスから圧縮強度を推定するには、

- ①機械インピーダンスの測定、
- ②測定上の歪み領域の弾性係数を推定。
- ③終局状態の弾性係数の推定。
- ④終局歪みを乗じる

というプロセスを踏む。各手順において、それぞれ誤差が発生する。図-8 は、各供試体の機械インピーダンスの測定値のバラつきを変動係数で示し、圧縮強度との関係を示したものである。図からわかる通り、圧縮強度が低いほど変動係数が大きく測定値のバラつきは強度に依存していることが分かる。測定値のバラつきと圧縮強度の間に相関関係が生じることは、バラつきの要因がコンクリート表面の弾性係数のバラつきに依存しているためであり、このバラつきは、機械インピーダンスを測定する際の誤差となる。

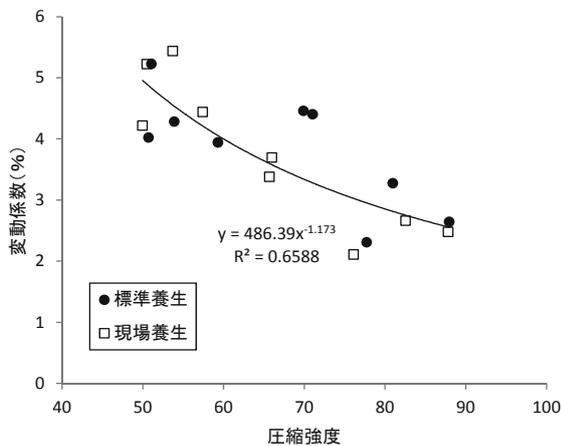


図-8 測定値のバラつき（強度依存性）

測定上の歪み領域の弾性係数を推定するプロセスでは、打撃によって発生した歪みの領域がどの程度であるかにより誤差が発生し、終局状態の弾性係数を推定する際には、弾性係数の低減率の変動による誤差が発生する。最後に、終局状態の弾性係数に終局歪みを乗じて圧縮強度を推定するが、実際の終局歪みと仮定した終局歪みの相違による誤差が発生する。各プロセスで発生する誤差の内、機械インピーダンスの測定と測定上の歪み領域に関しては、打撃回数を多く採用することや、打撃速度を制御することである程度縮小することが可能である。以上より、機械インピーダンスから圧縮強度を推定する際に大きく影響する誤差は、弾性係数の低減率の変動と、終局歪みの相違と言える。

6. まとめ

本論では、圧縮強度と養生条件の異なるφ150mmの円柱供試体を対象に実施した実験結果から、機械インピーダンス法による圧縮強度推定の枠組みについて検討した。

(1) 圧縮強度推定のプロセス

機械インピーダンスから圧縮強度を推定するには、①機械インピーダンスの測定、②測定上の歪み領域での弾性係数の推定、③終局状態の弾性係数の推定、④終局歪み乗算というプロセスが必要である。この中で、いくつかの仮定と実際のコンクリートの特性把握が必要である。

(2) 誤差の発生要因

非破壊領域の測定量から圧縮強度を推定するには、いくつかの仮定と実際のコンクリートの特性把握が必要であり、これらの仮定と実際の相違が誤差となって現れる。具体的には、機械インピーダンスの測定時のバラつき、打撃によって発生した歪み領域の程度、弾性係数の低減率の変動、実際の終局歪みと仮定した終局歪みの相違などである。このため、機械インピーダンス法による圧縮強度推定結果は相応の誤差を含んでいるが、管理された状態であれば±15%程度の範囲で強度推定が可能であることを示している。

参考文献

- 1) 久保 元, 他: ハンマ打撃によるコンクリート強度の推定, JCI 会誌「コンクリート工学」, pp.41-44, 2006.5
- 2) 金田重夫, 他: 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, JSNDI 第3回シンポジウム, 「コンクリート構造物の非破壊検査」論文集, pp.127-130, 2009.8