

論文 機械インピーダンス法による圧縮強度推定に関する誤差の発生要因と超高強度コンクリートへの適用性に関する実験的検討

久保 元樹^{*1}・市村 千佳^{*2}・八木 光^{*2}・笠井 哲郎^{*3}

要旨: 本研究では、W/C を 4 段階変化させた供試体を対象として、ハンマに内蔵した加速度計で測定した機械インピーダンスと圧縮強度および弾性係数の関係を調べ、機械インピーダンスから圧縮強度を推定する際の理論的枠組みや、誤差の発生要因、超高強度コンクリートへの適用性について検討した。その結果、強度推定には、コンクリートの終局ひずみなどいくつかの仮定が必要であり、これらの仮定と実際の相違が誤差となって現れることが分かった。また、超高強度コンクリートの適用性では、その物性が普通コンクリートと大きく異なることから、普通コンクリートと同じ圧縮強度推定式の適用が難しいことが明らかとなった。

キーワード: 機械インピーダンス, 圧縮強度, 弾性係数, 非破壊検査

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方法として、反発硬度法や衝撃弾性波法、超音波法がある。特に反発硬度法は、日本国内に導入されて 50 年以上の歴史があり、様々な技術者によって実用化のための実験がなされてきた¹⁾。反発硬度法は、重錘でコンクリートに接触させたプランジャー頭部を打撃することによって生じる重錘の反発距離を求める方法であり、打撃側の情報から圧縮強度を推定しようとする方法である。これに対し、著者らは、加速度計が内蔵されたハンマでコンクリート表面を打撃することで得られる打撃力波形を解析し、コンクリート表面の機械インピーダンスを算出して非破壊で圧縮強度を推定する方法について研究を行ってきた²⁾。この測定方法については、NDIS3434-3 機械インピーダンス試験方法³⁾として日本非破壊検査協会規格が制定されている。非破壊試験によって圧縮強度を推定する方法では、弾性領域の量を測定し、破壊時の応力（塑性領域の量）を推定する枠組みを持つが、コンクリートは非線形材料であり、どのようなひずみ領域での量を測定するかによって強度推定の精度に影響を及ぼすこととなる。機械インピーダンス法では、機械インピーダンスから弾性

係数を推定し、次いで圧縮強度を推定するという手順で圧縮強度の推定を行う事となる。機械インピーダンス法による圧縮強度推定の誤差は、測定波形から機械インピーダンスを決定する際の偶然誤差と機械インピーダンスから弾性係数を推定する際の系統誤差、弾性係数から圧縮強度を推定する際の系統誤差の和となる。本論は、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、その推定値の変動要因の内、系統誤差の発生要因を明らかにすることを目的として、円柱供試体を対象に実験を行った結果を報告するものである。また、圧縮強度が 100N/mm² を超える超高強度コンクリートへの対応についても検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 供試体

コンクリートの弾性係数は、W/C のみならず、骨材量によって変動する。このため、全ての配合で単位粗骨材量を一定として、W/C を 4 段階変化させたものを対象とした。コンクリートの配合を表-1 に示す。セメントは W/C35%, 50%および 65%では、普通ポルトランドセメントを、W/C20%はシリカフェュームプレミックスセメン

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	スランプ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A	混和剤 B
20	66.8*	20	3.2	32	155	775	461	998	9.85	0
35	17	20	3.9	42	162	463	717	998	4.52	1.80
50	14	20	5.0	45	167	334	809	998	6.97	0.30
65	20	20	3.5	46	173	265	856	998	2.31	0.80

※スランプフロー値

*1 日東建設(株) 技術開発部技術開発課 取締役部長 (正会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科

*3 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

トをそれぞれ使用した。細骨材と粗骨材は、W/Cに関わらず、細骨材は菊川支流産山砂（表乾密度:2.59g/cm³，吸水率:2.18%），粗骨材は青梅産硬質砂岩碎石（表乾密度:2.70g/cm³，吸水率:0.61%）を使用した。また、混和剤Aは、W/C20%およびW/C35%でポリカルボン酸系高性能AE減水剤を、W/C50%およびW/C65%でリグニン系AE減水剤をそれぞれ使用した。混和剤Bは、AE助剤（変性ロジン酸化合物系）である。円柱供試体の寸法は直径150mm×高さ300mmとし、W/C20%で3本、W/C35%、50%で各4本、W/C65%で2本の合計13本を測定対象とした。測定材齢は28日で、養生は、27日間水中養生（20℃）を行い、測定の前日に水揚げし、1日気中養生（20℃，RH:60%）させた後測定を実施した。なお、測定に先立ちコンクリート打設面に対し研磨処理を実施した。

2.2 測定方法

測定は、円柱供試体をコンクリート床の上にながたつきがないように設置し、図-1に示すように、円柱の型枠底面に5×5の20mmメッシュを押し、メッシュ交点（25点）を打撃した。機械インピーダンスは、25点の単純平均値とした。測定は加速度計を内蔵したヘッド質量380gのハンマを使用し、任意の速度で打撃を行った。加速度計の周波数範囲は5Hz～25kHzで、共振周波数35kHzのものを使用した。測定した時間波形は、サンプリング時間間隔0.5μs，データ数2000個で記録した。機械インピーダンスの測定後、円柱供試体の側面にひずみゲージを貼り付け、JIS A 1149およびJIS A 1108に準拠し、静弾性係数試験および圧縮強度試験を実施した。

3. 機械インピーダンスについて

3.1 基本原理

図-2にコンクリートを完全弾性体として仮定した際のハンマの衝突モデルを示す。この時、ハンマの持つ運動エネルギーとハンマの衝突によって生じたコンクリートのひずみエネルギーは等しく、式(1)に示す通りとなる。

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

ここに、 M ：ハンマの質量、 V ハンマの衝突速度、 k ：コンクリートのばね係数、 x ：変位である。

フックの法則から、力 F は、

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

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

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

\sqrt{Mk} は、ばね質量系の機械インピーダンス Z である。

式(3)からわかる通り、ハンマの質量が一定であれば、機

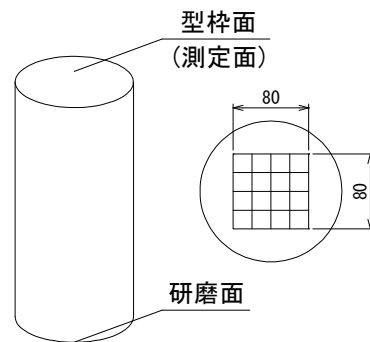


図-1 測定点の配置

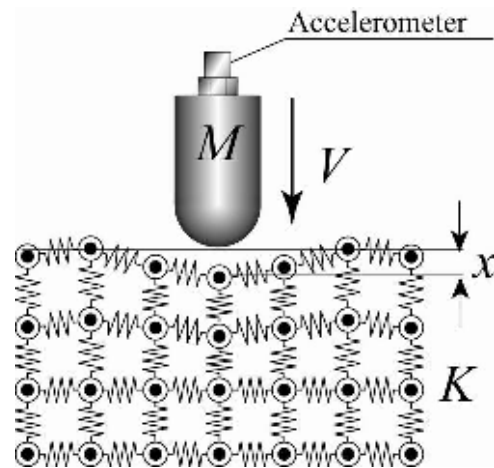


図-2 ハンマの衝突モデル

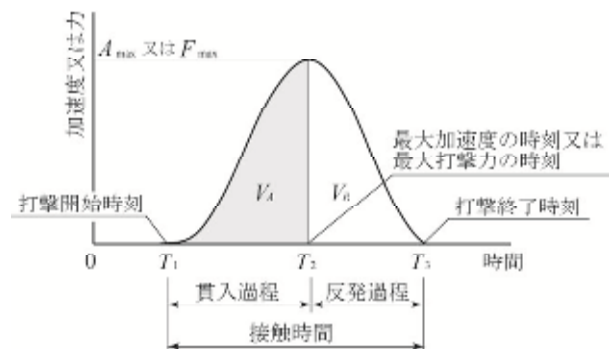


図-3 時間波形の例

械インピーダンスはばね係数 k と比例関係があり、コンクリートの弾性係数に相当する指標であることが分かる。

3.2 機械インピーダンスの算出方法

ハンマでコンクリートを打撃した際に得られる時間波形の一例を図-3に示す。波形は、正規分布に類似した上に凸の波形となる。打撃は、ハンマがコンクリートに貫入する貫入過程（作用）と、コンクリートがハンマを押し戻す反発過程（反作用）で構成される。図-3では、ピークより前半部分が貫入過程、後半部分が反発過程となる。コンクリートが完全弾性体である場合、時間波形は左右対称の波形となるが、実際のコンクリートは完全

弾性体ではなく、表面近傍が柔らかい非線形性を持った材料である。このため、健全なコンクリートであっても、ハンマがコンクリート表面の脆弱層を塑性変形させながら貫入する時間が含まれるため、反発過程に比較して貫入過程の時間が長くなる傾向がある。一方、反発過程においては、脆弱層の塑性変形は貫入過程で終了しているため、この影響を受けづらい。機械インピーダンス法は、コンクリートの弾性係数に相当する指標を得ることが目的であるため、反発過程に着目し式(4)によって時間波形から機械インピーダンスの算出を実施した。

$$Z_R = \frac{F_{\max}}{V_R^{1.2}} = \frac{MA_{\max}}{\left(\int_{T_2}^{T_3} A(t) dt\right)^{1.2}} \quad (4)$$

ここに、 Z_R ：反発過程の機械インピーダンス、 F_{\max} ：最大打撃力、 V_R ：ハンマの反発速度、 M ：ハンマの質量、 A_{\max} ：最大加速度、 $A(t)$ ：加速度の時間波形、 T_2 ：最大加速度の時刻、 T_3 ：打撃終了時刻である。

なお、式(4)の分母にあるべき乗値は、ハンマの打撃速度に対する補正項²⁾である。

4. 実験結果および考察

4.1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

コンクリートが弾性体とみなし得る場合、圧縮応力とひずみの間には、式(5)の関係がある。

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

ここに、 σ ：圧縮応力、 E ：弾性係数、 ε ：ひずみである。終局ひずみが一定であれば、弾性係数を測定することで圧縮強度の推定が可能となる。

図-4 は、各配合における応力-ひずみ曲線（各配合 2 本ずつの結果）を示したものである。W/C35, 50, 65%の終局ひずみは、W/C が小さいほど大きくなり概ね 1600 μ ストレインから 2200 μ ストレインの範囲となるが、W/C20%では 3000 μ 以上と大幅に大きい値となった。また、全ての W/C で応力-ひずみ曲線は直線関係ではない。

図-5 に各ひずみレベルにおける弾性係数の関係（各配合 2 本ずつの結果）を示す。弾性係数は、その時の応力をひずみで除した値である。弾性係数は、圧縮強度が大きいコンクリートほど直線性は高いものの、いずれの供試体においてもひずみが大きくなると弾性係数が低下する傾向を示している。また、コンクリートの強度が低いほど、弾性係数のひずみ依存性が高い傾向にある。これは、ハンマ打撃によって実現されているひずみは微小と考えられることから、ハンマ打撃によってコンクリートに与えられるひずみ領域での弾性係数と、終局状態の弾性係数は同値ではないことを示している。図-6 に終局状態の弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図は、W/C65%, 50%, 35%の結果および回帰式を赤で、W/C20%を含めた

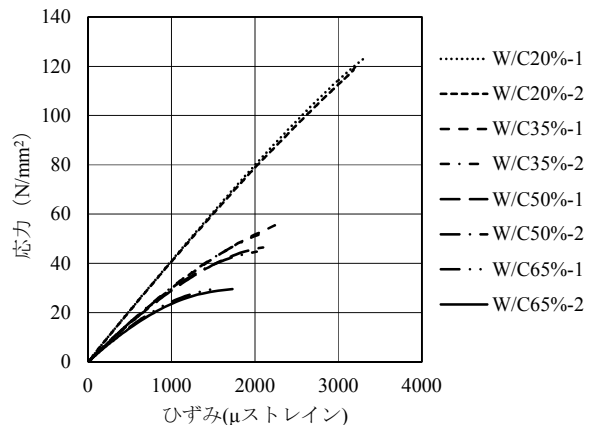


図-4 各配合の応力-ひずみ曲線

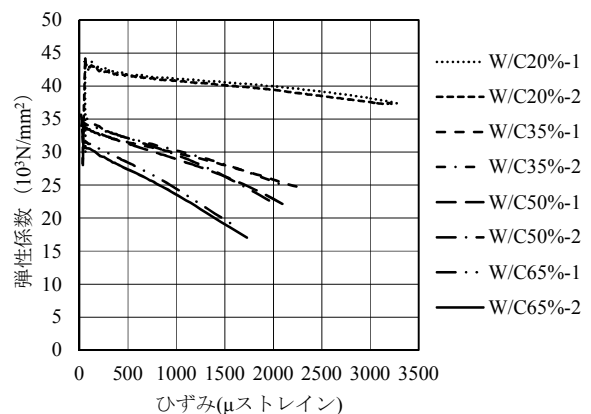


図-5 ひずみと各ひずみレベルの弾性係数の関係

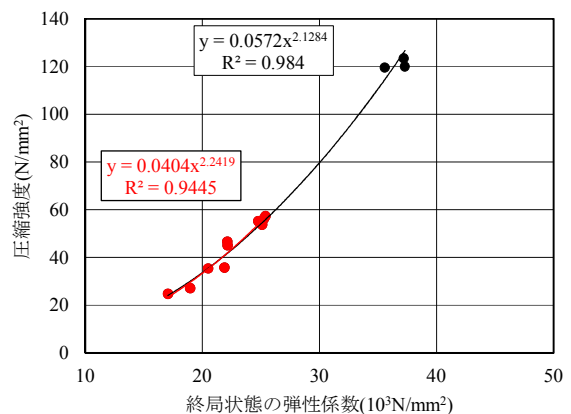


図-6 終局状態の弾性係数と圧縮強度の関係

結果および回帰式を黒で示している。これは、W/C20%の結果のみ、終局歪みがおおよそ 3300 μ ストレインと非常に高く、その他の配合と比較して傾向が明らかに異なるためである。終局状態の弾性係数と圧縮強度は寄与率が 0.9 以上と非常に良好な関係が確認できる。ハンマ打撃によるひずみ領域での弾性係数から終局状態の弾性係数を推定できれば、高い精度で圧縮強度の推定が可能であることが示唆される。なお、図-4 および図-5 に示す弾性係数のひずみ依存性と終局ひずみの値は、配合によって変動するものと考えられ、この変動が圧縮強度推

定における誤差要因になると考えられる。

4.2 ハンマ打撃によって実現されるひずみ領域

ハンマ打撃によってコンクリート表面に発生する応力 σ は、式(6)に示す通りとなる。

$$\sigma = E\varepsilon = \rho C_p v \quad (6)$$

ここに、 E : 弾性係数、 ε : ひずみ、 ρ : コンクリートの密度、 C_p : コンクリートの弾性波速度、 v : ハンマの衝突速度である。式(6)からハンマ打撃によるひずみ量は、

$$\varepsilon = \frac{v}{C_p} \quad (7)$$

となる。コンクリートの弾性波速度を 4000m/s、打撃速度をおおよそ 2m/s とすると、打撃によってコンクリート表面に発生するひずみ量は 500 μ ストレイン前後となる。実際には、静的な圧縮試験と異なり、ハンマ打撃ではハンマの接触面近傍にしかひずみが生じないため、ハンマ打撃で実現されているひずみは 500 μ ストレインより小さいと考えられるが、以下では、ハンマ打撃により 500 μ ストレインのひずみが生じていると仮定して議論を進める。なお、このひずみの値は本手法における最終的な強度推定値等に及ぼす影響は小さいと考えられるものの、この値の妥当性について今後検討が必要である。

4.3 圧縮強度推定式の構成

ハンマ打撃によってコンクリートの圧縮強度を推定する過程では、微小なひずみ領域での弾性係数から終局状態の弾性係数の推定が必要となる。図-7 は、500 μ ストレイン時の弾性係数と終局状態の弾性係数の関係を示したものである。図-6 と同じく W/C65%、50%、35%の結果および回帰式を赤で、W/C20%を含めた結果および回帰式を黒で示している。また、図中の回帰式は累乗近似を用いている。これは、線形近似式では切片を持つためである。線形近似式で切片を持つ関係となるのは、弾性係数が小さい範囲で、500 μ ストレイン時の値と比較して終局状態の値がより小さな値となる傾向を持つためである。図-7 の寄与率が W/C20%を含めると 0.94、含めない場合においても 0.84 であることから、両者には単調増加関係があることが認められる。この結果から、500 μ ストレインの領域での弾性係数を測定し、終局状態の弾性係数を推定すると、約 5%から 15%程度の誤差が含まれることを許容する必要がある。図-8 は機械インピーダンスと 500 μ ストレイン時の弾性係数の関係を示したものである。図-6 と同じく W/C65%、50%、35%の結果および回帰式を赤で、W/C20%を含めた結果および回帰式を黒で示している。W/C20%を含めない場合、機械インピーダンスの 0.73 乗と 500 μ ストレイン時の弾性係数に比例関係があり、500 μ ストレイン時の弾性係数の 2.01 乗と終局状態の弾性係数に比例関係がある。また、終局状態の弾性係数の 2.24 乗と圧縮強度に比例関係があるこ

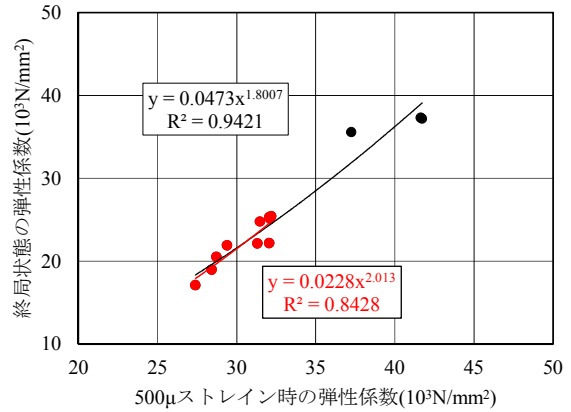


図-7 500 μ ストレイン時の弾性係数と終局状態の弾性係数の関係

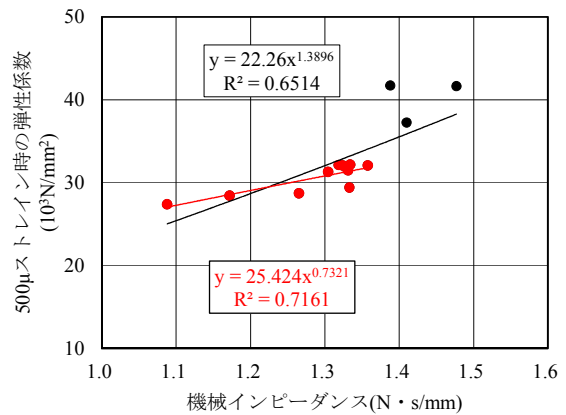


図-8 機械インピーダンスと 500 μ ストレイン時の弾性係数の関係

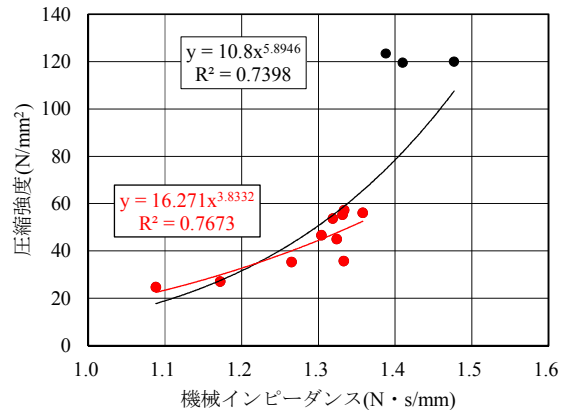


図-9 機械インピーダンスと圧縮強度の関係

とから、機械インピーダンスから圧縮強度を推定するには、機械インピーダンスの 3.29 乗が最適となる。W/C20%を含めた場合においては、機械インピーダンスと 500 μ ストレイン時の弾性係数の関係が 1.39 乗、500 μ ストレイン時の弾性係数と終局状態の弾性係数の関係が 1.80 乗、終局状態の弾性係数と圧縮強度の関係が 2.13 乗であることから、5.33 乗が最適となる。図-9 に機械インピーダンスと圧縮強度の関係を示す。W/C65%、50%、35%の結

果および回帰式を赤で、W/C20%を含めた結果および回帰式を黒で示している。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3.29乗または、5.33乗を用いればよいことを各種試験結果より導いた。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直接的に求める方法が簡単である。図-9の回帰式のベキ乗値は、W/C20%を含めない場合、3.83乗、W/C20%を含めた場合は5.89乗となっており、各種試験結果より導いたベキ乗値、3.29乗と5.33乗と概ね一致している。図-4および図-5からW/C20%を除く供試体においては、概ね終局ひずみが2000 μ ストレインであった。これから、機械インピーダンスより圧縮強度を推定する式は式(8)または式(9)の通りとなる。

$$\sigma = 2000 \times 10^{-6} \cdot Z_R^{3.29} \times 10^4 \quad (8)$$

$$\sigma = 2000 \times 10^{-6} \cdot Z_R^{5.33} \times 10^4 \quad (9)$$

4.4 圧縮強度推定式の適応性

式(8)および式(9)によって機械インピーダンス値から圧縮強度推定を実施した結果を図-10および図-11に示す。W/C65%、50%、35%の結果および回帰式を赤で、W/C20%を含めた結果および回帰式を黒で示している。式(8)は、W/C20%の供試体を除いた試験結果から導いた式である。図-10からW/C60%~35%までは当然のことながら、実際の圧縮強度と線形関係にあり、その傾きは0.95で寄与率が0.7と非破壊検査としては十分な精度で圧縮強度の推定が出来ている。一方、W/C20%においては、過小評価となっている。図-11は、W/C20%の結果も含めた試験結果から導いた式(9)より圧縮強度を推定したものであるが、W/C60%~35%において、傾きが0.55となり、実際の圧縮強度と比較して過大評価となっている。これは、W/C20%の終局ひずみが他の配合と比較して突出して大きく、材料としての性状が異なるためと考えられる。また、W/C20%の結果においても、推定強度のバラつきが大きくなっている。式(9)ではベキ乗値が大きく、機械インピーダンスの誤差がベキ乗値によって相対的に大きくなったことが原因と考えられる。図-4および図-5よりW/C20%のコンクリートの終局ひずみは、概ね3300 μ ストレインであることから、圧縮強度が100N/mm²を超えるような超高強度領域になるとコンクリートの性質が普通コンクリートと大きく異なる。このため、同一の式によって圧縮強度の推定を行う事が難しいものと考えられ、普通コンクリートの場合と超高強度コンクリートの場合で、圧縮強度推定式を使い分ける必要がある。W/C20%以外を式(8)で、W/C20%を式(9)によって圧縮強度推定値を求めた結果を図-12に示す。W/C20%を含めた回帰式の傾きは1.03となり、推定強度

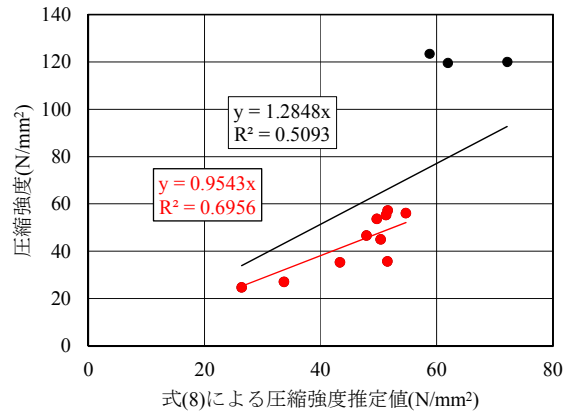


図-10 式(8)による圧縮強度推定値と圧縮強度

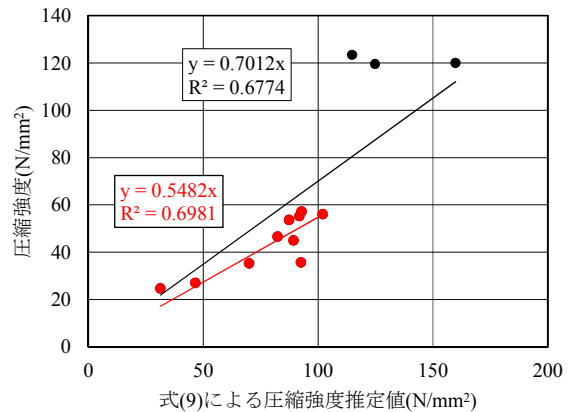


図-11 式(9)による圧縮強度推定値と圧縮強度

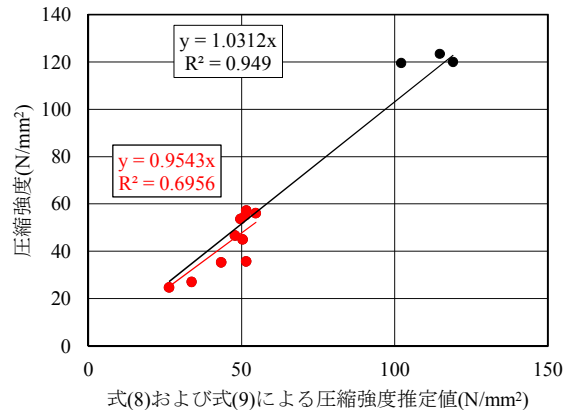


図-12 式(8)および式(9)による圧縮強度推定値と圧縮強度

と実際の圧縮強度は1対1の関係となることが確認できた。

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、まず、機械インピーダンスの測定を実施し、次いで測定上のひずみ領域(500 μ ストレイン程度)の弾性係数を推定し、次に終局状態の弾性係数の推定、最後に終局ひず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。測定上のひず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ひず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ひずみを乗じて圧縮強度を推定するが、実際の終局ひずみと仮定した終局ひずみの相違による誤差が発生する。特に測定結果に大きく影響すると考えられる誤差は、弾性係数の低減率の変動と、終局ひずみの相違であると考えられる。

6. まとめ

本論では、粗骨材量を同一として W/C を 20%、35%、50%、65% の 4 段階変化させた $\phi 150\text{mm} \times$ 高さ 300mm 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理論的枠組みおよび誤差の発生要因について検討した結果、次の事がわかった。

(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、a. 機械インピーダンスの測定、b. 測定上のひずみ領域での弾性係数の推定、c. 終局状態の弾性係数の推定、d. 終局ひずみ乗算というプロセスが必要である。

(2) 誤差の発生要因

弾性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ことが分かった。具体的には、打撃によって発生したひず

み領域の程度、弾性係数の低減率の変動、実際の終局ひずみと仮定した終局ひずみの相違などがこれにあたる。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、本実験の範囲であれば $\pm 15 \sim 20\%$ 程度の範囲で強度推定が可能であることがわかった。

(3) 超高強度コンクリートへの適用

圧縮強度が 100N/mm^2 を超えるような超高強度コンクリートは、終局ひずみが 3300μ ストレインとなり、普通コンクリートの物性とは大きく異なることがわかった。このため、超高強度コンクリートまでを包括した圧縮強度推定式の構築は難しく、測定対象コンクリートによって適宜、圧縮強度推定式を使い分けることが必要であることがわかった。

参考文献

- 1) 谷口秀明, 渡辺博志, 河野広隆, 藤田学: テストハンマー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
- 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, Vol.44, No.5, pp41~44, 2006.5
- 3) NDIS3434-3 コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第 3 部: 機械インピーダンス試験方法 2017.5.制定