

報告 反発度・反発速度比・機械インピーダンス・弾性波伝搬速度によるコンクリートの圧縮強度評価の相互比較

小松 由弥*1・内田 慎哉*2・野崎 峻*3・三谷 宗平*1

要旨: 本研究では、円柱および立方供試体を複数作製し、材齢 7, 14, 28, 56, 91 日において、反発度、反発速度比、機械インピーダンスおよび弾性波伝搬速度に基づく方法を適用し、各非破壊試験で得られる指標値と圧縮強度との関係を相互に比較した。その結果、いずれの指標値においても、圧縮強度と正の相関があることを確認した。また、立方供試体での相関は、円柱供試体のそれよりも強いことがわかった。加えて、反発度、反発速度比、機械インピーダンスに基づく方法は、立方供試体での各指標値が、円柱供試体でのそれよりも大きくなった。

キーワード: コンクリート、圧縮強度、反発度、反発速度比、機械インピーダンス、弾性波伝搬速度

1. はじめに

コンクリートの圧縮強度を推定する手法として、反発度に基づく方法がある。この方法は、ISO や JIS 規格、土木学会規準 (JSCE) などになっており、国内外で広く実務において利用されている。また、日本非破壊検査協会の規格 (NDIS) では、弾性波伝搬速度を指標値として新設コンクリート構造物の圧縮強度を評価する方法¹⁾も参考として記載されている。海外では、反発速度比に基づく方法も、EN や ASTM 規格、ACI 規準として制定されている。国内では、NDIS として、機械インピーダンスから圧縮強度を評価する方法の規格化も進められている。このように、コンクリートの圧縮強度を非破壊で評価する方法は、規格・規準化あるいは提案されつつあるものの、上記に挙げた非破壊試験を、同一の供試体にて相互に比較した事例は少ないのが現状である。

そこで本研究では、研究事例の蓄積を目的として、円柱および立方供試体を複数作製し、材齢 7, 14, 28, 56, 91 日に、反発度、反発速度比、機械インピーダンスおよび弾性波伝搬速度に基づく方法を適用し、各非破壊試験で得られる指標値と圧縮強度との関係を相互に比較した。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

コンクリートは、生コン工場で製造した呼び強度：24 を使用した。コンクリートの使用材料は、セメント：普通ポルトランドセメント (密度：3.16g/cm³)、水：地下水および上澄水、細骨材：滋賀県多賀町産砕砂 (表乾密度：2.67g/cm³、粗粒率：2.50) および京都府宇治市産砕砂 (表乾密度：2.63g/cm³、粗粒率：2.90)、粗骨材：京都

府宇治市産砕石 (表乾密度：2.66g/cm³、実積率：60%)、混和剤：AE 減水剤遅延型 I 種である。コンクリートの配(調)合を表-1 に示す。なお、フレッシュコンクリートの性状は、スランプ 11.5cm、空気量 3.3%である。

2.2 供試体および養生

供試体は、φ100×200mm の円柱供試体を 15 体、200×200×200mm の立方供試体を 5 体作製した。コンクリート打設後、試験材齢 (7, 14, 28, 56, 91 日) まで 20°C・80%R.H. の恒温恒湿室で封緘養生した。

3. 実験概要

各材齢において、円柱供試体 3 体および立方供試体 1 体を対象に、反発度、反発速度比、機械インピーダンスおよび弾性波伝搬速度に基づく方法の 4 種類の非破壊試験をそれぞれ適用した。非破壊試験による測定を終了した円柱供試体 3 体に対して、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき圧縮強度試験をそれぞれ行った。以下に、適用した各非破壊試験の特徴や測定概要をそれぞれ示す。

3.1 反発度に基づく方法

反発度：R は、JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」に規定されている構造 (表-2 参照) を有するリバウンドハンマー (NR 型) によって測定した。円柱

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	SI	S2	G	A
57	47.8	173	304	613	259	952	3.466

*1 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (学生会員)

*2 立命館大学 理工学部環境システム工学科講師 博士(工学) (正会員)

*3 立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻

供試体では、日本建築学会の文献²⁾を参考に、20kNの軸力を加えて、JIS A 1155 に準じて測定した。測定箇所は、供試体高さ方向の縁部からそれぞれ 50mm 離れた側面に選定し、互いに 25mm の間隔をもった 20 点とした。反発度は、測定値を昇順に並べ、一番大きい反発度から 6 個、一番小さい反発度から 5 個をそれぞれ除き、9 点の平均値とした。一方、立方供試体では、円柱供試体と同様、文献²⁾を参考に、100kNの軸力を加えて、JIS A 1155 に準じて測定した。測定箇所は、供試体の 1 側面 (200×200mm) において、縁部からそれぞれ 50mm 離れた内部 (100mm×100mm) に選定し、互いに 25mm の間隔をもった 25 点とした。反発度は、上位下位それぞれ 8 点の値を除外した 9 点の平均 (トリム平均) とした。

3.2 反発速度比に基づく方法

反発速度比： Q は、写真-1 に示すハンマーを使用した。ハンマーの構造を表-2 に示す。指標値： Q は、打撃直前と直後の速度を光学的にそれぞれ測定し、両者の比の百分率として求めた。円柱供試体での測定箇所は、反発度に基づく方法と同様、縁部からそれぞれ 50mm 離れた側面とした (写真-2 参照)。ただし、両手法の打撃点は同一点ではなく、いずれも互いに 25mm の間隔を有している。一方、立方供試体での打撃箇所は、反発度を測定した側面とは異なる 1 側面の縁部からそれぞれ 50mm 離れた内部において実施した。なお、載荷荷重、打撃回数および計算方法は、いずれの供試体においても、反発度に基づく方法と同じである。

3.3 機械インピーダンスに基づく方法

機械インピーダンス： Z は、式(1)によって定義され、打撃体がコンクリートに衝突したときに、発生した力： F とその結果生じる力と同じ方向の速度： V_A の比である。

$$Z = \frac{F}{V_A} \quad (1)$$

ここで、コンクリートが完全弾性体と仮定し、質量： M の打撃体が速度： V_A でコンクリート表面に衝突する現象を考える (図-1 参照)。打撃体の衝突によってコンクリートに弾性変形が生じると、エネルギー保存の法則から、

$$\frac{1}{2}MV_A^2 = \frac{1}{2}kd^2 \quad (2)$$

が成立する。ここで、 k ：コンクリートのバネ係数、 d ：打撃体の衝突によって生じるコンクリートの変位である。また、コンクリートを完全弾性体と仮定しているため、フックの法則により次式が成立する。

$$F = kd \quad (3)$$

式(3)を d について解き、これを式(2)に代入し整理すると、

$$\sqrt{Mk} = \frac{F_{\max}}{V_A} \quad (4)$$

が得られる。ここで、 F の添字 max は、最大値であるこ

表-2 各種ハンマーの構造

指標値	質量 (g)	重すいの質量 (g)	先端の球面半径 (mm)	衝撃エネルギー (N・m)
R	1400	360~380	24.0~25.0	2.10~2.30
Q	570	135	25	2.207
Z	512.5	380*	30	—

*：打撃体部分の質量



写真-1 反発速度比を測定するハンマー



写真-2 反発速度比の測定状況

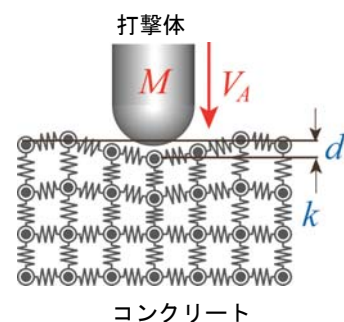


図-1 コンクリートと打撃体の衝突モデル



写真-3 機械インピーダンスを測定するハンマー

とを示している。式(1)と(4)より、 Mk の平方根が機械インピーダンスの物理的意味であり、コンクリート表層部分の機械的な動きにくさを示す指標である。

機械インピーダンス： Z は、写真-3 に示すハンマーを使用した。ハンマーの構造を表-2 に示す。ここで、図-2 に、打撃体でコンクリート表面を打撃した際の打撃波形の例を示す。この打撃波形は、打撃体として加速

度センサを内蔵したハンマーを使用して、センサで受信した加速度波形である。一般的に、コンクリートの表層部分は完全弾性体ではないため、打撃速度： V_1 と反発速度： V_2 （図-2 参照）は異なる値となり、 V_1 には塑性変形が含まれ、 V_2 には塑性変形後の弾性変形のみが反映される。本研究では、文献3に基づき、 V_2 を用いて式(5)により算出される Z を使用した。

$$Z = \frac{F_{\max}}{V_2} \approx \frac{MA_{\max}}{\left(\int_{T_2}^{T_3} A(t)dt\right)^{1.2}} \quad (5)$$

ここで、 F_{\max} ：最大打撃力、 A_{\max} ：最大加速度、 T_2 ：最大加速度を示す時刻、 T_3 ：打撃終了時刻、 $A(t)$ ：打撃力波形である。式中のべき乗値 1.2 は、速度補正係数である。

機械インピーダンスに基づく方法では、いずれの供試体においても、反発度や反発速度比に基づく方法で測定した箇所を打撃しないように、3.2 に示すとおりの方法で、測定箇所や測定点を選定した。なお、載荷荷重、打撃回数および計算方法は、いずれの供試体においても、反発度や反発速度比に基づく方法と同じである。立方供試体での測定状況を写真-4 に示す。

3.4 弾性波伝搬速度に基づく方法

弾性波伝搬速度： V はコンクリートの弾性係数によって変化する性質があるため、コンクリートの圧縮強度とも間接的に相関がある。この相関関係を利用して新設のコンクリート構造物で測定した弾性波伝搬速度から圧縮強度を評価する方法が提案されている。この方法では、測定した弾性波伝搬速度から圧縮強度を算出するために式(1)に示す圧縮強度評価式が用いられる。

$$f_c = \beta \times V^\alpha \quad (6)$$

ここで、 f_c ：圧縮強度、 α 、 β ：定数である。圧縮強度評価式は、評価対象のコンクリート構造物と使用材料や配合が等しい円柱供試体を作製し、材齢を変化させて弾性波伝搬速度の測定と圧縮強度試験を行い、最小二乗法により回帰させた指数関数から決定される。そこで本研究でも、NDIS¹⁾に準じて、式(6)に示す弾性波伝搬速度を算出した。具体的には、写真-5 に示すとおり、まず、円柱供試体の底面（型枠面）に加速度センサを設置し、その近傍を直径 9.5250mm (3/8in.) の鋼球で打撃する。使用した加速度センサの周波数応答（±3dB）は、0.2～20000Hz である。続いて、加速度センサで受振した信号は、サンプリング時間間隔：10μs、サンプリング数：5000 個でデジタル化した後、波形収集装置に電圧の時刻歴波形として記録した。最後に、電圧波形に対して高速フーリエ変換（FFT）を行い、周波数スペクトル上で振幅が最大となる周波数（基本周波数）を式(7)に代入して、弾性波伝搬速度を算出した。

$$V = 2Lf_0 \quad (7)$$

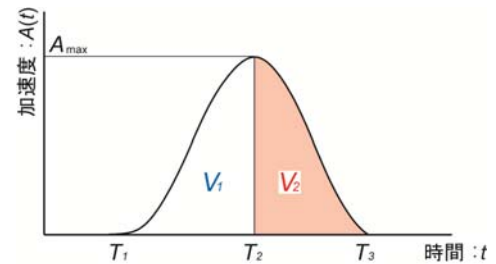


図-2 打撃波形の例

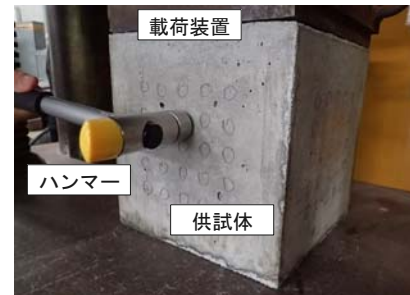


写真-4 機械インピーダンスの測定状況

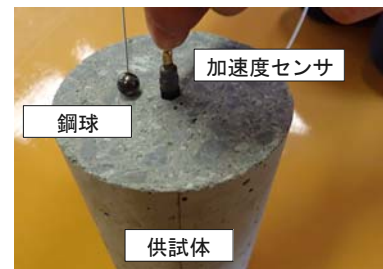


写真-5 弾性波伝搬速度の測定状況

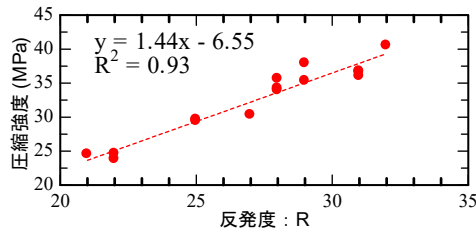
ここで、 L ：供試体高さ、 f_0 ：基本周波数である。なお、供試体高さは、ノギスにより有効数字 5 桁で測定した。また、周波数スペクトルは、電圧波形の各振幅値から電圧波形の平均値をそれぞれ差し引いて直流成分を除去し、かつ、後続のゼロを付与した 8192 個の振幅からなる波形に対して FFT を行い求めた。円柱供試体での測定回数は 20 回である。

本研究では、参考のため、立方供試体においても弾性波伝搬速度の計測を行った。弾性波の入力は、底面（型枠面）において、直径 15.8750mm (5/8in.) の鋼球で打撃することにより行った。使用した加速度センサ、波形取得条件および弾性波伝搬速度の計算方法は、円柱供試体と全て同じである。ただし、測定回数は 25 回に設定した。

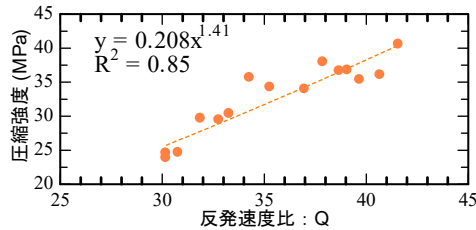
4. 実験結果および考察

4.1 円柱供試体における各指標値と圧縮強度との関係

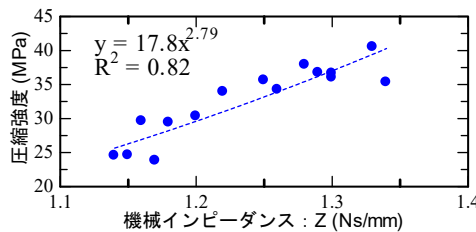
円柱供試体における各指標値： R 、 Q 、 Z 、 V と圧縮強度との関係を図-3 に示す。いずれの図も、円柱供試体 1 体ごとに各指標値と圧縮強度を求め、これを 15 体全ての供



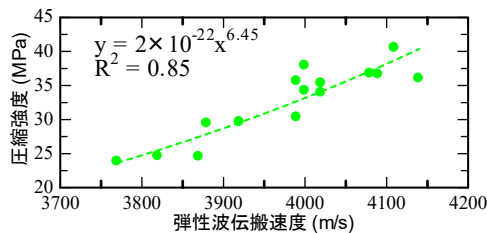
(a) 反発度 : R



(b) 反発速度比 : Q

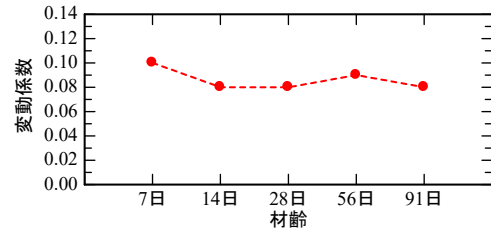


(c) 機械インピーダンス : Z

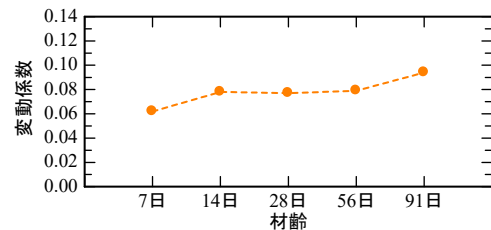


(d) 弾性波伝搬速度 : V

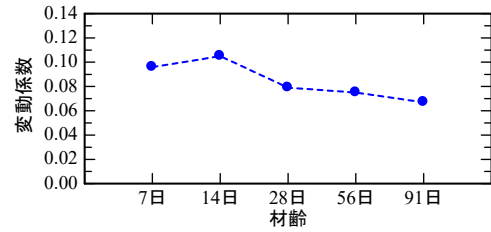
図-3 各指標値と圧縮強度との関係 (円柱供試体)



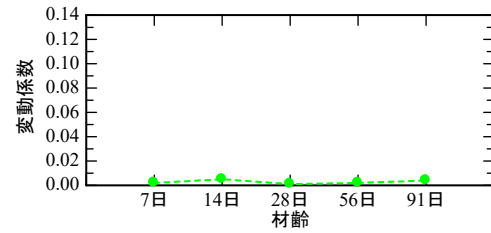
(a) 反発度 : R



(b) 反発速度比 : Q



(c) 機械インピーダンス : Z



(d) 弾性波伝搬速度 : V

図-4 各指標値の変動係数 (円柱供試体)

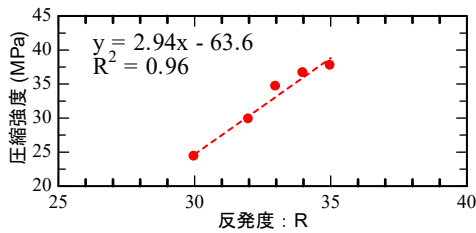
試体に対して設定した材齢で実施し、両者の関係をプロットしたものである。また、図中には、最小二乗法による近似式と決定係数を併せて示している。なお、近似式は、以下に基づき決定した。すなわち、 R と圧縮強度との関係は、日本材料学会⁴⁾や日本建築学会²⁾など多くの機関で提案されているが、いずれも一次関数である。そこで本研究でも、一次関数により近似することとした。これに対して、 Q は、Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM)で実施された実験結果⁵⁾に基づき指数関数で近似した。一方、 Z も、文献3にしたがって指数関数での近似とした。なお、 V は、NDIS¹⁾に示されている式(6)に基づき指数関数の近似とした。図より、いずれの指標値においても、決定係数は0.82~0.93の範囲にあり、圧縮強度と正の相関、しかも強い相関があることがわかる。

図-4に、変動係数と材齢の関係を指標値ごとに示す。図に示す変動係数は、いずれの指標値においても、各材

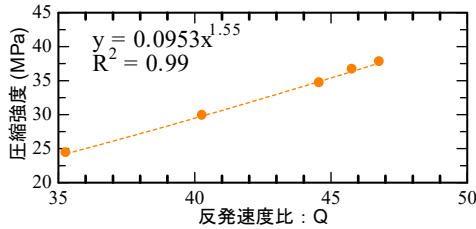
齢3体で計測した全ての指標値(棄却した指標値も含む)から算出した。図によれば、 R, Q, Z の変動係数は、いずれも6~10%の範囲に収まっている。これに対して、 V の変動係数は、1%以下と小さい。これより、弾性波伝搬速度は測定ごとに得られる値のばらつきは極めて小さいため、測定回数を少なくすることが可能である。また、指標値ごとに、変動係数の材齢に伴う変化傾向を確認すると、 R, V の変動係数は、材齢によらず概ね一定であった。これに対して、 Q は材齢とともに増加、 Z は低下する傾向を示した。なお、このような傾向を示す理由については不明であるため、今後の課題としたい。

4.2 立方供試体における各指標値と圧縮強度との関係

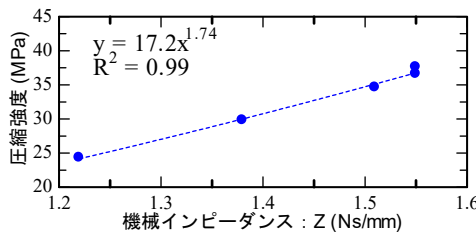
立方供試体における各指標値: R, Q, Z, V と圧縮強度との関係を図-5に示す。図に示す各指標値は各材齢にて立方供試体で得られた値であり、圧縮強度は各材齢にて非破壊試験による測定を終えた3体の円柱供試体での圧縮強度の平均値である。また、図中には、最小二乗法に



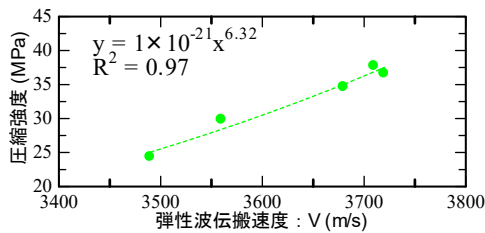
(a) 反発度 : R



(b) 反発速度比 : Q

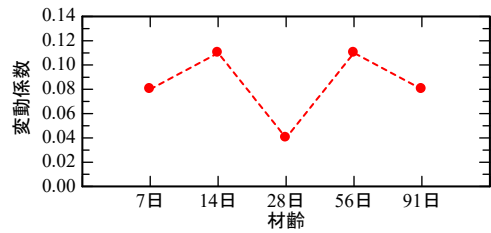


(c) 機械インピーダンス : Z

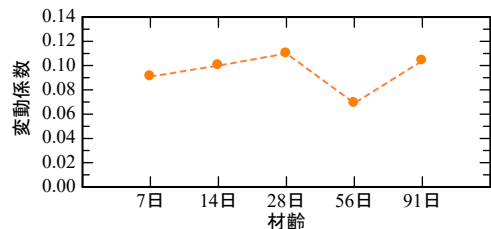


(d) 弾性波伝搬速度 : V

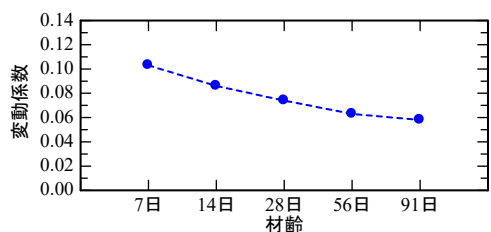
図-5 各指標値と圧縮強度との関係 (立方供試体)



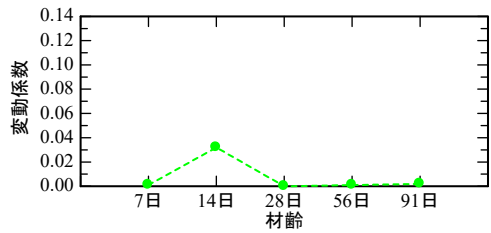
(a) 反発度 : R



(b) 反発速度比 : Q



(c) 機械インピーダンス : Z



(d) 弾性波伝搬速度 : V

図-6 各指標値の変動係数 (立方供試体)

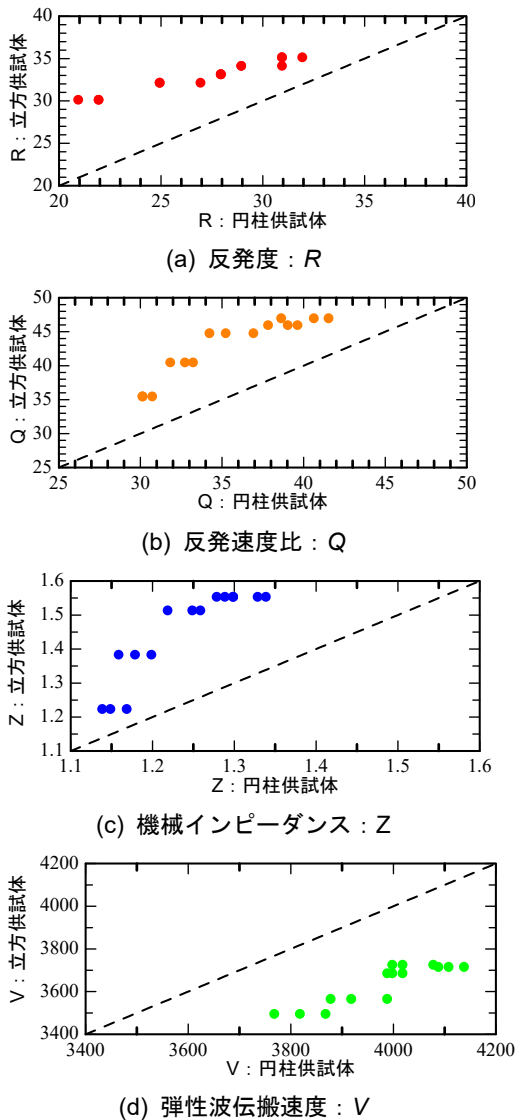
よる近似式と決定係数を併せて示している。各指標値と圧縮強度の近似式は4.1で概説した関数により求めている。図より、いずれの指標値においても、決定係数は0.96~0.99の範囲収まっており、圧縮強度と極めて強い相関がある。しかも、いずれの指標値の決定係数も、円柱供試体でのそれよりも大きくなり、相関が強くなった。ただし、圧縮強度は材齢とともに大きくなっているものの、材齢91日のZ、Vは材齢56日のそれと同じか小さくなった。この理由は不明であるが、材齢182、364日において、各非破壊試験および圧縮強度試験を計画している。これらの結果を踏まえて、理由に関する議論をしたい。

図-6に、変動係数と材齢の関係を指標値(棄却した指標値も含む)ごとに示す。R、Q、Zの変動係数はいずれも4~11%の範囲にあり、円柱供試体でのそれと同程度であった。打撃する部分が面ではなく曲率をもった円柱供試体での変動係数は、立方供試体でのそれよりも大きくなると考えられたが、本実験では、図-4および図-6

における各指標値の材齢ごとの比較においても、そのような傾向を確認することはできなかった。一方、Vの変動係数は4%以下と極めて小さく、円柱および立方供試体で概ね同程度であった。また、材齢に伴う各指標値の変動係数の変化傾向は、R、Qは無相関、Zは低下傾向、Vは材齢14日のみ若干大きい概ね一定であった。なお、このような傾向を示す理由については不明であるため、今後の課題としたい。

4.3 円柱供試体と立方供試体での各指標値の比較

図-7に、円柱供試体3体で得られた指標値と立方供試体1体で得られた指標値との対応関係を、指標値ごとにそれぞれ示す。図によれば、R、Q、Zは、立方供試体で得られた値の方が大きくなった。これは、打撃する面の曲率が影響していると推察される。以上より、実務の場面において、円柱供試体の側面で測定した指標値と圧縮強度との関係(圧縮強度評価式)に、実際の建造物の平面で測定した指標値を代入して圧縮強度を推定すると、



図ー7 各指標値における円柱と立方供試体の比較

推定した圧縮強度は実際のそれよりも大きくなる。したがって、運用にあたっては注意が必要であり、湯浅も同様の指摘⁹⁾をしている。これに対して、 V は、円柱供試体で得られた値の方が大きくなった。これは、弾性波伝搬速度を算出する際に必要となる供試体高さの測定方法に起因していると考えられる。円柱供試体では打設面を研磨した上でノギスにより高さを測定しているため、弾性波伝搬速度を測定する箇所での供試体高さは概ね一定で正確に測定可能であった。一方、立方供試体は打設面を研磨せずに供試体高さを4箇所の角部で測定したため、この値と速度測定した箇所の高さが異なっていたと推察される。すなわち、立方供試体では、ノギスで計測した供試体高さが弾性波の伝搬距離よりも短く、その結果、弾性波伝搬速度が小さくなった。したがって、弾

性波伝搬速度に基づく方法では、供試体高さ（弾性波伝搬距離）を正確に測定することが重要である。この観点から、供試体形状は、NDIS に記載の円柱が適切であることを改めて確認することができた。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 円柱および立方供試体を対象に、材齢 7, 14, 28, 56, 91 日において、反発度、反発速度比、機械インピーダンスおよび弾性波伝搬速度に基づく方法を適用した結果、各指標値と圧縮強度に、正の相関があることを改めて確認した。
 - (2) いずれの非破壊試験においても、立方供試体の決定係数が円柱供試体のそれよりも大きく、相関が強い。
 - (3) 反発度、反発速度比および機械インピーダンスに基づく方法では、立方供試体での各指標値が、円柱供試体のそれよりも大きくなった。
- 今後は、材齢 182, 364 日においても同様の実験を行い、また高強度コンクリートも対象とし、各非破壊試験で評価可能な圧縮強度の範囲やそれぞれの試験方法の特徴をまとめる予定である。

参考文献

- 1) NDIS 2426-2:2014 : コンクリートの非破壊試験—弾性波法—第 2 部: 衝撃弾性波法, 日本非破壊検査協会, pp.19-27, 2014.9
- 2) 日本建築学会: コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 1983
- 3) 境 友昭, 久保元樹, 久保 元: 打撃によるコンクリート強度の非破壊測定法理論の問題点に関する理論的検討, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.5, pp.373-378, 2015
- 4) 日本材料試験協会: シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針 (案), 材料試験, Vol.7, No.59, pp.426-430, 1958.8
- 5) D. Corbett: Advancing the Rebound Hammer Method: A New Concrete Test Hammer, Nondestructive Testing of Materials and Structures, Part I, pp.149-154, 2013
- 6) 湯浅 昇: リバウンドハンマーによる強度推定に関する話題提供—各種リバウンドハンマーの相互比較, リバウンドハンマーの反発度と圧縮強度との関係を求める方法の提案—, コンクリート工学, Vol.48, No.12, pp.23-30, 2010.12