

反発速度比を用いたコンクリート強度の推定

Estimating Concrete Strength Using Rebound Velocity Ratios

高木 雄介* 椎名 貴快**
Yusuke Takagi Takayoshi Shiina

要 約

本試験では、普通強度から高強度に至る9配合を対象に、反発度、反発速度比、エコーチップ硬さを測定し、強度推定の精度検証を行った。試験の結果、反発速度比を用いた測定方法は、従来の反発度法よりもデータのばらつきが小さく、高強度領域までの推定が可能であると考えられる。ただし、コンクリートの含水状態によって測定精度が影響を受ける可能性があり、留意する必要がある。また、エコー硬さ試験は、強度との関係性は確認されたが、変動係数が全体で13%前後と、データのばらつきが大きい結果となった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 試験概要および各種測定法
- § 3. 試験結果
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

非破壊によりコンクリートの強度推定を行う方法として、反発度法や超音波法、衝撃弾性波法などがある。この内、反発度法は、測定方法が簡便かつ迅速に行えるため、工事で広く利用されている。

反発度法は、リバウンドハンマーを用いてコンクリート表面を一定のエネルギーで打撃した時、リバウンドハンマー内のインパクトプランジャの跳ね返り高さ（反発度）を利用してコンクリート強度を推定する。しかし、圧縮強度の高い領域での推定精度に課題があると以前より指摘されていた。そのような中、近年では、より測定精度の高いとされる「反発速度比」を用いた方法や測定器が開発され、すでにEN（欧州規格）やASTMなどで採用されている。また我が国でもNEXCOが圧縮強度の管理方法¹⁾に取り入れており、NDIS（日本非破壊検査協会規格）での規格制定も近い。今後、反発速度比を用いた方法に移行していくと考えられるが、測定精度について十分な検証データがなかった。

そこで、普通強度から高強度に至る9配合で供試体を作製し、反発度および反発速度比を測定して、強度の推定精度を検証した。また同様の試験機構を有する、エコーチップ硬さ試験機でもデータを取得して比較した。

* 技術研究所土木技術グループ

** 技術研究所

本報告では、3種類の測定法でのコンクリート強度の推定精度について、試験で得られた知見を報告する。

§ 2. 試験概要および各種測定法

2-1 試験概要

本試験で使用したコンクリート材料を表一に、コンクリート配合を表二に示す。水セメント比（以下、W/Cとする）は、呼び強度18から100に相当する9水準とし、目標性状は、W/C \geq 50%の時、スランプ12 \pm 2.5 cm、空気量4.5 \pm 1.5%、35% \leq W/C \leq 45%の時、スランプ18 \pm 2.5 cm、空気量4.5 \pm 1.5%、W/C \leq 30%の時、スランプフロー配合、空気量2.0~4.5%とした。なお、AE剤、

表一 使用材料

記号	使用材料	密度 (g/cm ³)
W	水 (上水道水)	1.00
C	普通ポルトランドセメント	3.16
S	川砂 (大井川産)	表乾 2.57
G	砕石 2005 (栃木県鹿沼産)	表乾 2.65

表二 コンクリート配合表

W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
60.0	48.0	20	4.5	170	283	858	958
55.0	47.5				309	839	956
50.0	47.0				340	818	951
45.0	48.0			165	367	831	929
40.0	47.5				413	805	917
35.0	47.0				471	774	900
30.0	48.0				550	760	849
27.5	47.0				600	725	843
25.0	46.0				660	687	832

表一3 各試験機の比較

測定方法	リバウンドハンマー (反発度型 (NR))	リバウンドハンマー (反発速度比型)	エコーチップ硬さ試験
測定項目	反発の高さ	反発の速度	反発の速度
衝突エネルギー	2.207 Nm	2.207 Nm	0.0115 Nm
測定範囲	10~70 N/mm ²	10~100 N/mm ²	1~999 HL
角度補正	必要	不要	必要 (自動)
重量	約 1.4 kg	約 0.6 kg	約 1.5 kg
寸法	135(W)×270(D)×80(H) mm	55(W)×255(D)×55(H) mm	250(W)×162(D)×62(H) mm



リバウンドハンマー (反発度型)

リバウンドハンマー (反発速度比型)

エコーチップ硬さ試験機

写真一1 試験状況

高性能 AE 減水剤，空気量調整剤を用いて性状を確保し，試験は室温 20℃ 環境で実施した。測定方法はリバウンドハンマー (反発度型，反発速度比型)，エコーチップ硬さ試験の 3 方法で，各試験機の概要は表一3 に示す。

供試体は φ100 mm×200 mm の円柱供試体を使用し，試験材齢は 3 日，7 日，10 日，14 日，21 日および 28 日の 6 材齢とした。養生条件は，若材齢での試験条件を考慮して水中養生とし，試験前に水揚げし，表面の水分を十分に拭き取り試験を実施した。また，供試体の含水状態による測定値の変化を確認するため，材齢 28 日のみ，湿潤状態および乾燥状態の 2 条件でも試験を実施した。乾燥状態の供試体は，円柱供試体を試験前日より 105℃ で 24 時間乾燥させた後に試験を実施した。

文献¹⁾ を参考にして，供試体は圧縮試験機により軸力 25 kN 程度 (3.18 N/mm² 程度) で固定した状態で，各非破壊試験により側面で各々 20 点測定することを標準とした (写真一1)。なお，高強度となる W/C 25% の配合については，拘束軸力による影響を確認するため，50 kN (6.37 N/mm²) でも試験を行った。

また，通常のリバウンドハンマー試験では，コンクリート測定面の湿潤状態によって試験値に影響を与えるため補正を行うが，本試験では，3 種の測定方法を比較するため，値は補正なしの生値とした。各非破壊試験の測定値については，平均値より 20% 以上外れた値を棄却した上で平均を算出した。

2-2 リバウンドハンマー (反発度型)

リバウンドハンマーによる測定作業は，JIS A 1155：「コンクリートの反発度の測定方法²⁾」を参考にして行っ

た。反発度型のリバウンドハンマーは，圧縮強度 10~70 N/mm² のコンクリートに適用され，測定された R 値を元に，圧縮強度を推定する最も一般的なリバウンドハンマーである。

反発度からコンクリート強度を求める代表的な圧縮強度推定式として，以下の 2 式 (土木学会式：式 1，日本建築学会式：式 2) などがある。

土木学会式³⁾

$$F_c(N/mm^2) = -18.0 + 1.27R \quad (式 1)$$

日本建築学会式⁴⁾

$$F_c(N/mm^2) = (7.3R + 100) \times 0.098 \quad (式 2)$$

2-3 リバウンドハンマー (反発速度比型)

反発速度比の測定原理は，内蔵されている光学センサーに衝撃を与えた際の速度と対象に衝撃を与え跳ね返ってきた速度を測定し，エネルギーの比率より反発速度比 (Q 値) として算出している。測定範囲のカatalog値としては 10~100 N/mm² とされており，反発度を用いたりリバウンドハンマーと比較して広範囲での測定が可能とされている。また，反発速度比型の特徴として，打撃角度による補正が不要であり，試験機の重量は，本試験で使用した NR 型のリバウンドハンマーと比較して，半分以下であり，扱いやすい測定機となっている。

反発速度比型のリバウンドハンマーは，通常のリバウンドハンマーと同様に，試験値によって圧縮強度の推定が可能である。ここでは EU Curve および文献⁵⁾ に示されている推定式を参考比較として示した。なお，同文献

での供試体の測定条件は、乾燥供試体に対しての試験結果である。

EU Curve

$$F_c(N/mm^2) = 1.8943e^{0.064Q} \quad (式 3)$$

文献 5

$$F_c(N/mm^2) = 2.8046e^{0.057Q} \quad (式 4)$$

2-4 エコーチップ硬さ試験

エコーチップ硬さ試験機は、前節に示した反発速度比と同様の原理である。3mmのテストチップを衝突させ、その打撃速度および反発速度からエコーチップ硬さ値を求める試験機であり、ASTM A 956において金属の硬度を測定する方法・装置として規格化されている。打撃力はリバウンドハンマーと比較して1/200程度と小さく、影響深さは2cm以下と表層から浅い深さでの強度推定が可能であり、測定機がコンパクトで測定が容易であること、端部から5mm以上、隣接する測定点が3mm以上離れていれば測定ができ、供試体の寸法および形状の制限を受けにくいことなどの利点がある。

実構造物においてはコア供試体の複数の採取が難しい場合も考えられる。そのため、小径コア等の小さな供試体での試験への適用や、測定時の供試体の損傷が少ないため非破壊試験への適用に期待されている。

エコーチップ硬さ値 (HL) は、式5に示すように、測定されたインパクトボディの反発速度をその打撃速度で除し、1000倍した値として定義される。

エコーチップ硬さ値 (HL)

$$HL = \frac{V}{V_0} \times 1000 \quad (式 5)$$

ここで、
 HL：エコーチップ硬さ値
 V：インパクトボディの反発速度(m/sec)
 V₀：インパクトボディの打撃速度(m/sec)

本試験で使用した試験機はD型と呼ばれるインパクト装置を有するもので、測定素材グループを一般鋼として測定を行った。また、試験結果については、他の試験方法と同様に平均値より20%以上外れた値を棄却した上で平均を算出した。

§3. 試験結果

3-1 圧縮強度

各配合での圧縮強度の結果を図-1に示す。強度の実測値の範囲は10~110 N/mm²で、普通強度から高強度までの領域データを得られた。

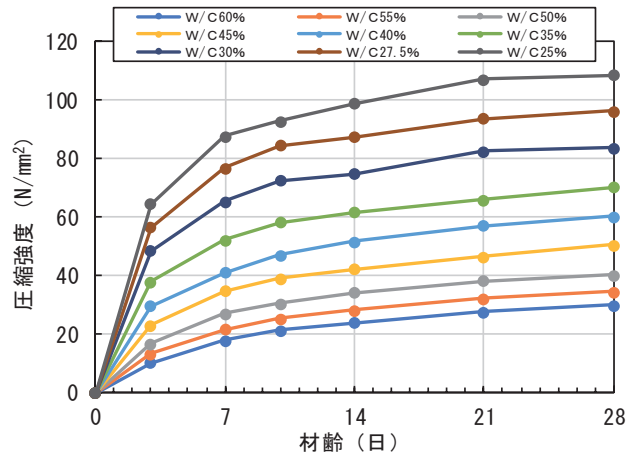


図-1 圧縮強度試験結果

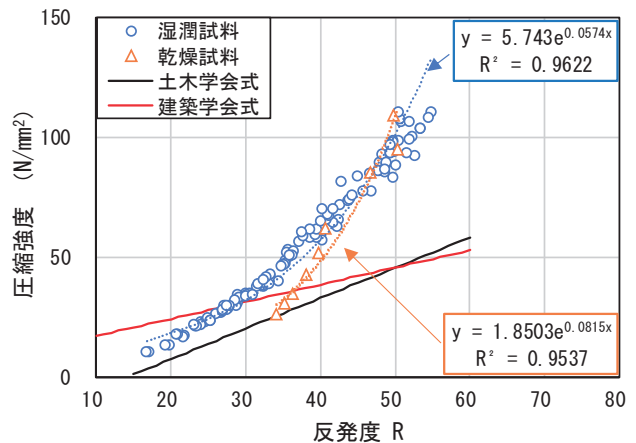


図-2 反発度と圧縮強度の関係

3-2 リバウンドハンマー (反発度型)

図-2にリバウンドハンマーでの試験結果を示す。また、図中には式1および式2の強度推定式も併記した。

湿潤試料の場合、R値は土木学会式で安全側に評価でき、一般的な湿潤状態での補正值+5を考慮した場合、従前からの知見と同様に、30 N/mm²以下の普通強度領域においては推定精度が高く、一方でR値が大きいほど実強度との乖離が大きくなる傾向があると考えられる。また、強度が50 N/mm²を超えたあたりからデータ自体のばらつきがやや大きいように見られた。

次に、乾燥試料の場合、湿潤状態での結果と同様に、高強度領域では学会式と乖離する傾向を示した。また、湿潤試料と比較して同一強度におけるR値が大きくなる傾向があり、特に強度が小さいほど差異が大きくなった。これは、コンクリートの含水状態が強度推定精度に影響することを示している。

3-3 リバウンドハンマー (反発速度比型)

図-3に反発速度比型のリバウンドハンマーの試験結果、および式3、式4による推定値を示す。乾燥供試体においては、式3による推定値と相関性が高く、推定精度が高いことが分かる。一方で、湿潤供試体においては、強度と反発速度比に同一の関係性は見られるものの、既

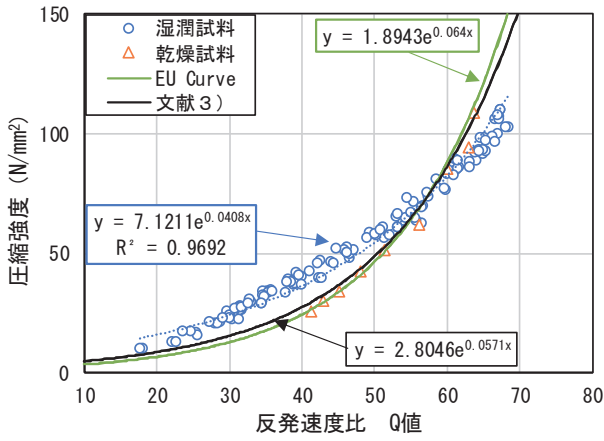


図-3 反発度比と圧縮強度の関係

存の推定式とは異なる傾向にある。これは通常のリバウンドハンマーと同様に、供試体の含水状態によって試験結果が異なることを示している。また、データのばらつきが全体的に小さいことが分かる。

以上より、供試体を乾かさずに湿潤状態で測定した場合の近似式として、式6が得られた。なお、累乗近似を行った場合が最も相関性が高い結果が得られたが、僅差であったため、乾燥状態の推定式を考慮し、指数近似式で示した。

(供試体が湿潤状況にある場合)

$$F_c = 7.1211e^{0.041Q} \quad (式6)$$

3-4 エコーチップ硬さ試験機

図-4にエコーチップ硬さ試験値および圧縮強度の関係を示す。リバウンドハンマーの試験結果と同様に、硬さ試験値と圧縮強度には一定の関係性がみられ、他の試験方法と同様にコンクリートにおいても強度推定が可能であることが分かる。湿潤供試体と乾燥供試体では、同じ強度であっても乾燥供試体の方が高い値を示す傾向があり、他の試験方法と同様に含水状態による補正が必要であると考えられる。

一方で、リバウンドハンマーでの試験結果と比較すると、値のばらつきがやや大きい傾向にあった。例えば、硬さ試験値(HL値)が300の場合、試験値による圧縮強度が40~60 N/mm²の範囲となり、精確な強度推定にはさらなる検討が必要であると考えられる。

また、圧縮強度で20 N/mm²を下回る供試体においては、湿潤試料では測定ができない場合もあったため、早期に試験を行う場合においては乾燥させた上で試験を行うことが望ましいと考える。

図-5に各材齢における測定値の近似線を示す。エコーチップ硬さ試験においては他の非破壊試験と異なりグラフ形状が線形となる傾向にある。また、各材齢において試験値を比較した場合、材齢3日での試験結果は、他の材齢と若干異なる傾向が得られた。そのため、前述の

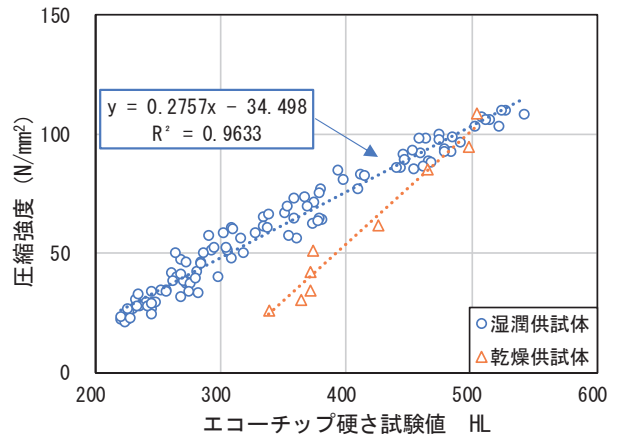


図-4 エコーチップ硬さと圧縮強度の関係

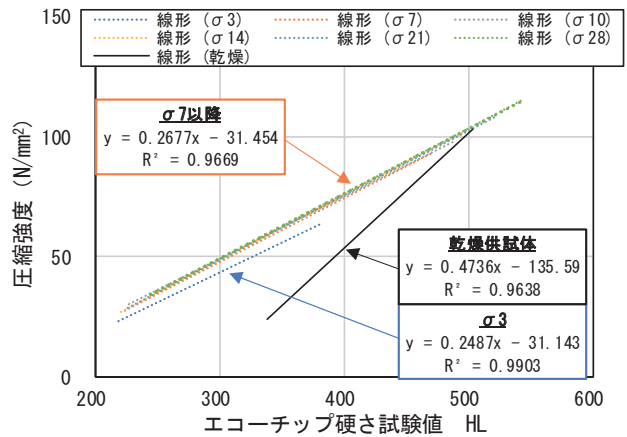


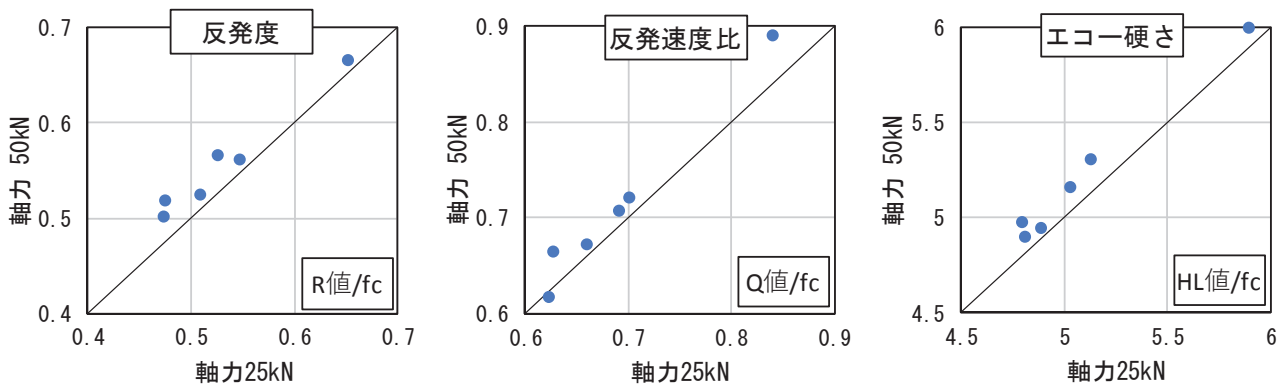
図-5 材齢ごとのエコーチップ硬さ試験結果

若材齢では測定不能であった結果を鑑みると、精度良く推定するには少なくとも7日以降の試験が望ましいと考えられる。

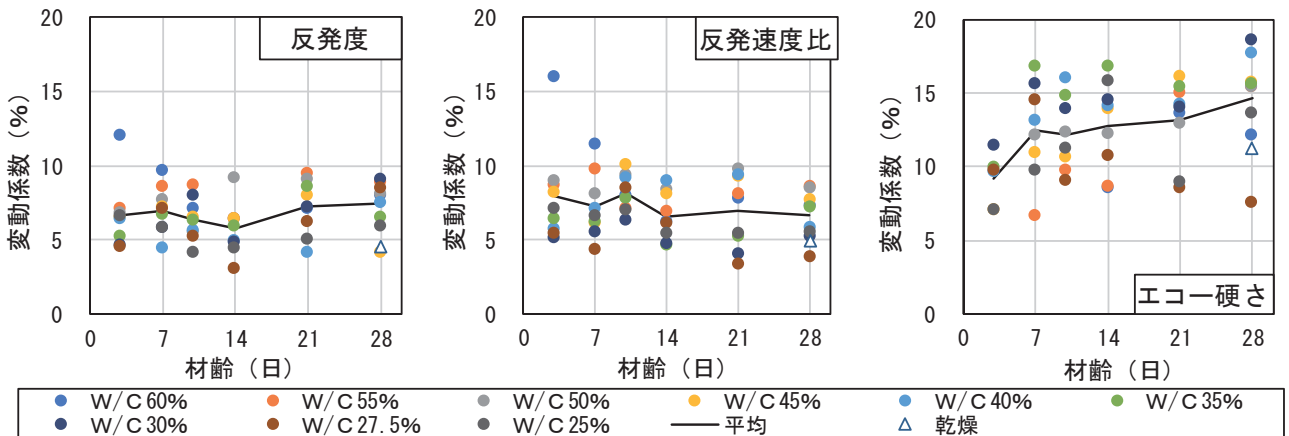
3-5 拘束軸力による影響

一般的に、試験時の供試体拘束軸力は25 kN以上とされている。一方で、陣内ら⁶⁾は、50 N/mm²以上の高強度領域において2.5 N/mm²では拘束力が足りず、強度と軸力の比が1/10以上であれば反発度が一定となることを示している。本試験の供試体においては、25 kNおよび50 kNの軸力はそれぞれ3.18 N/mm²および6.37 N/mm²の拘束力で試験を行い、軸力が試験値に与える影響を検討した。

測定値の条件を統一するため、各試験結果を圧縮強度で割った値を用いて、各軸力で比較したものを図-6に示す。僅差ではあるが、1点を除いて軸力が大きい供試体ほど、各種試験値が同等もしくはやや大きく出ている傾向にある。材齢3日の供試体の強度が63.8 N/mm²と軸力の10倍程度の強度を有しているが、材齢28日になると108.5 N/mm²となるため、加えていた軸力比は1/17程度となり、既報⁶⁾の報告では拘束力が不足していた可能性がある。そのため、63 N/mm²以上の試験値においては実際の値よりも小さく測定されていた可能性が考えられる。



図一六 拘束軸力による各種試験値の差



図一七 各試験方法の変動係数との関係

3-6 各試験機のばらつき

図一七に各試験機における変動係数と材齢の関係を示す。変動係数は配合毎に算出し、図中の平均値は湿潤供試体のデータのみを使用した。反発度および反発速度比試験では平均して7%前後の変動係数となり、材齢による変化も確認されなかった。ただし、W/C60%の配合のみ、材齢3および7日での変動係数が高い傾向にあり、低強度下においては測定値に差が生じやすい傾向にあった。一方で、エコー硬さ試験においては、平均の変動係数が全体で13%前後と、前者の試験方法と比較するとばらつきが大きい結果となった。試験機の測定メカニズムとしては共通する部分が多くあるが、原因として考えられるのは、測定時に加わるエネルギーが関係すると推察される。コンクリートという特性上、コンクリート表面は必ずしも平坦ではなく、内在する気泡や骨材の影響、さらには円柱供試体であるため曲面の影響を受けやすい。エコーチップ硬さ試験では、インパクト時のエネルギーが小さい分これらの影響を受けやすいのではないかと考えた。また、すべての試験方法に共通して、乾燥した供試体での試験では、平均値よりも3%程度変動係数が低くなる傾向にある。これは、前述したとおり、試験面の影響を大きく受ける試験方法のため、測定対象の水分状態によって試験結果が大きく影響を受けていることが分かる。

§ 4. まとめ

本報では、円柱供試体を用いて反発度、反発速度比およびエコーチップ硬さを測定し、強度推定について比較・検討を行った。以下に本試験で得られた知見を示す。

- (1) 反発度試験は、普通強度レベルでの強度推定精度は概ね確保できると考える。一方で、比較的強度の高い領域では、推定式よりも安全側に外れる結果となった。また、乾燥供試体は湿潤供試体とも異なる傾向がみられた。
- (2) 反発速度比を用いた試験では、乾燥供試体において推定式の値に酷似しており、精度が高いことが分かる。一方で、湿潤供試体においては、強度と反発速度比との間に一定の関係性は見られるものの、基準式とは異なる傾向にあった。
- (3) エコーチップ硬さ試験値と圧縮強度には一定の関係性がみられ、他の試験方法と同様に、コンクリートにおいても強度推定が可能である。湿潤供試体と乾燥供試体では、同じ強度であっても乾燥供試体の方が値が高い傾向にあり、他の試験方法と同様に水分状態による補正が必要であると判断できる。
- (4) 60 N/mm²以上の高強度領域においては、軸力が大きいほど、各種試験値が若干大きく出ている傾向にあり、これらの試験において精確性を求めるのである。

れば、軸力の検討も必要であることが分かる。

- (5) エコー硬さ試験においては、平均の変動係数が全体で13%前後と、他の試験方法と比較するとばらつきが大きくなる結果となった。また、すべての試験方法に共通して、乾燥した供試体での試験では、平均値よりも3%程度変動係数が低くなる傾向にあり、測定対象の水分状態によって試験結果が大きく影響を受けていることが分かる。
- (6) 既往の推定式を最も再現できたのは乾燥供試体を用いた反発速度比試験であった。ただし、供試体の含水状態が変化すると、それに伴って測定値も変化するため、試験の際は含水状態の管理が重要となる。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路(株)：コンクリート施工管理要領，平成29年7月
 - 2) JIS A 1155 コンクリートの反発度の測定方法，2003
 - 3) 土木学会：硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（JSCE-G 504-2007）
 - 4) 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
 - 5) 萩原直樹ほか：反発速度比を用いたコンクリートの強度推定に関する検討，土木学会第71回年次講演会，V 469
 - 6) 陣内浩ほか：高強度コンクリートの圧縮強度推定における反発度法の適用性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第683号，pp.9-16, 2013.
- 1) 東・中・西日本高速道路(株)：コンクリート施工管理