

論文 水中リバウンドハンマーを用いた水中不分離性コンクリートの品質管理に関する研究

渡邊 晋也^{*1}・迫田 惠三^{*2}・鉄 芳松^{*3}・望月 智弘^{*4}

要旨：本研究は、防水型的水中リバウンドハンマー試験機を用いて、水中不分離性コンクリートの施工躯体に対し水中にて圧縮強度の推定を検討したものである。実験の結果、水中不分離性コンクリートの強度発現にともない、水中反発度は大きくなることが判明した。また、流動距離による圧縮強度を推定したところ、水中反発度と圧縮強度には相関性が見られた。よって、従来水中不分離性コンクリートの品質管理方法とは別に筆者らが開発した水中リバウンドハンマー試験機を用いることで、水中不分離性コンクリートの施工躯体に対し水中で圧縮強度を推定することができることが判った。

キーワード：水中リバウンドハンマー、水中不分離性コンクリート、非破壊検査、強度推定

1. はじめに

水中不分離性コンクリートは、水中施工法として広く用いられている。この水中不分離性コンクリートの品質管理方法は、フレッシュコンクリートで、スランプフローや空気量の測定、硬化コンクリートでは、材齢 28 日の水中作製供試体による圧縮強度を測定することにより品質管理が行われている。¹⁾しかし、水中不分離性コンクリートは水中を広範囲に流動することから多少の材料分離が生じる事が考えられ、均一な品質のコンクリート構造物とは言い難い。現在、水中不分離性コンクリート打設後のコンクリート構造物の圧縮強度検査は、ほとんど行われていないのが現状である。この原因としては、水中でのコンクリート構造物の品質検査が困難なことが理由として挙げられる。

そこで、本研究では、筆者らが開発した水中リバウンドハンマー試験機を用いて、水中不分離性コンクリートの施工躯体に対して水中で圧縮強度を推定する手法について検討をおこなった。

2. 実験概要

2.1 水中リバウンドハンマー試験機概要

筆者らが開発した水中リバウンドハンマーを写真-1に示す。水中リバウンドハンマーは水中において透明度が低下した時、水深、対象物の異なる水中での測定を考慮し、確実に測定を行えるよう市販の NR 型リバウンドハンマーを用いた。水密性・耐圧性を確保する為に、リバウンドハンマーに専用のハウジングを製作した。ハウジングの材質は耐食アルミニウムで耐圧水深は 60m である。ハウジングの寸法は縦 27cm、横 25cm、奥行き 13cm である。陸上での重量は 4.1kg、水中での重量は 1.1kg となっている。潜水士一人でも簡易に取り扱え、水中での反力を必要としない。また、市販の NR 型リバウンドハンマーには特に改良を加えていないのが特徴である。

2.2 使用材料

本研究で用いたセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/c m³）細骨材に大井川産川砂（密度 2.61 g/c m³、粗粒率 2.70）粗骨材

*1 東海大学連合大学院 理工学研究科総合理工学専攻 大学院生 修士（工学）（正会員）

*2 東海大学 海洋学部海洋建設工学科 教授 工学博士（正会員）

*3 ㈱鉄組潜水工業所 代表取締役

*4 ㈱古川組 静岡支店

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	W	C	S	G	UWB	UWB・M	呼び強度	スランプフロー	空気量
(%)	(%)	(Kg/m ³)					(L/m ³)	(N/mm ²)	(cm)	(%)
54.1	38	238	461	566	935	2.86	11	21	55±5	4.5以下

UWB：水中不分離性混和剤

UWB・M：流動化剤



写真-1 水中リバウンドハンマー試験機

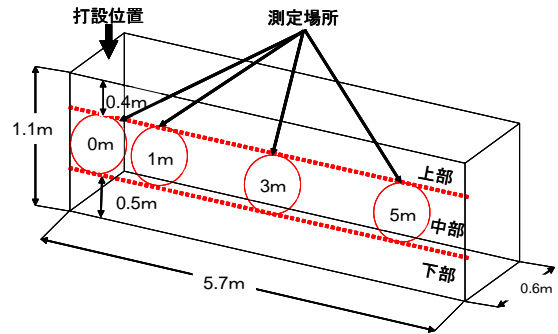


図-1 供試体寸法および測定場所

に大井川産川砂利（密度 2.65 g/cm³，実積率 63.5%）を使用した。混和剤として水中不分離性混和剤（セルロース系）流動化剤（トリアジン系）を使用した。

2.3 配合および練りませ

本研究で使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比を 54.1%，単位水量は 238kg/m³とし，スランプフローは 55±5cm，空気量は 4.5%以下とした。

水中不分離性コンクリートの練りませは，普通コンクリートを生コンプラントで練りませて運搬し，打設現場でアジテータ内に流動化剤を添加し流動化した。

2.4 供試体

供試体は，直径 10cm，高さ 20cm の円柱供試体とし，水中作製，気中作製の 2 種類を作製した。また，実構造物を想定して幅 0.6m×高さ 1.1m×長さ 5.7mの供試体（以下 5.7m供試体）を屋外のプール内に作製した。打設方法は鋼製型枠の端にトレミーを設置し，水中で最大で 30cm 自由落下する状態で打設した。

2.5 養生方法

円柱供試体は打設 1 日後に脱型し 20±3°C で標準養生を行った。また，水中作製供試体は標準養生と現場水中養生の 2 環境で養生を行った。5.7m供試体は打設後 5 日で脱型した。打設から試験終了日まで現場水中養生を行った。打設現場は，静岡県静岡市で養生期間の気温は平均 14°C（最高 25.8°C，最低 5°C）であった。また，養生プールの水温は平均 14.9°C（最高 21.4°C，最低 10.7°C）であった。

2.6 測定項目および測定方法

円柱供試体および 5.7m 供試体の力学的性質の測定は材齢 7，14，28 日で行った。5.7m 供試体の反発度測定場所は流動距離 0，1，3，5m の中部とした。各測定場所で水中反発度を測定した後にコア採取機を用いてコア供試体を採取した。測定項目は，フレッシュコンクリートでスランプフローと空気量試験および流動勾配，硬化コンクリートでは単位容積質量，縦波伝播速度，動弾性係数，静弾性係数，圧縮強度試験を行った。図-1 に供試体寸法および測定場所を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性質

表-2 に打設開始時と打設終了時のスランプフローと空気量試験の結果を示す。打設開始時と打設終了時を比較すると、スランプフロー値は9cm低下、空気量は0.4%上昇する結果となった。既往の研究結果²⁾と比較してもコンクリートの品質には特に問題はないと考えられる。

図-2 に流動勾配の結果を示す。打設開始5分での流動勾配は3%であった。打設時間の経過に伴い流動勾配は6~7%と一定勾配を保ちながら流動した。また、最終的には、天端は平坦になり、水中不分離性コンクリートの特徴であるセルフレベリング性が確認できた。

3.2 円柱供試体による品質管理

本研究で用いた水中不分離性コンクリートの円柱供試体による従来の品質管理を行った。図-3 に単位容積質量の結果を示す。全ての供試体で単位容積質量は 2.3 t/m^3 前後になる傾向が見られた。図-4 に圧縮強度の結果を示す。標準養生における水中作製供試体と気中作製供試体の圧縮強度は、気中作製供試体の方が大きかった。水中・気中強度比では7日で0.93, 14日は0.85, 28日で0.86となった。既往の研究結果³⁾と比較して同等の値を示した。また、水中作製標準養生供試体と水中作製現場養生供試体を比較した結果、若干ではあるが現場養生の方が強度の発現が低かった。この理由としては、養生水温が標準養生より低かったことが原因と考えられる。以上のことから、本研究で用いた水中不分離性コンクリートの品質には問題が無いことがわかる。

3.3 実構造物を想定した供試体による品質管理

5.7m供試体を用いて流動距離によるコンクリートの品質を検討した。5.7m供試体中部のコア供試体における流動距離と単位容積質量の関係を図-5 に示す。品質管理用円柱供試体と比較すると、全ての場所で単位容積質量が下回る結果が得られた。また、流動距離が3mを越えると単位容積質量が低下する傾向が見られた。このことから、本研究で使用した水中不分離性コンク

表-2 スランプフローと空気量試験結果

	打設開始時	打設終了時
スランプフロー試験 (cm)	62.5	53.5
空気量試験 (%)	1.8	2.2

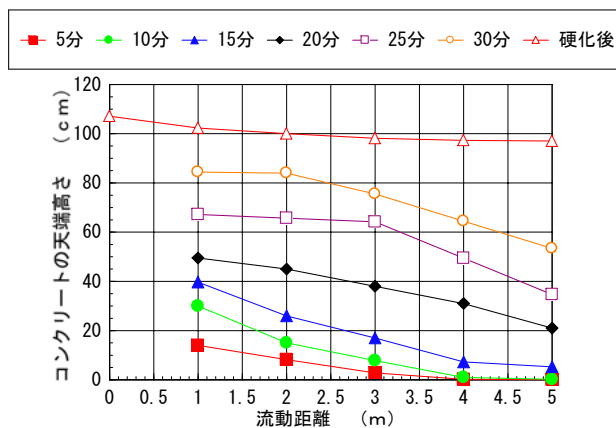


図-2 水中不分離性コンクリートの流動勾配

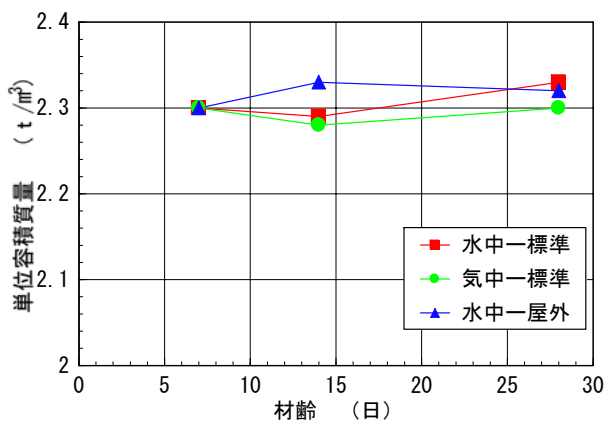


図-3 円柱供試体の単位容積質量

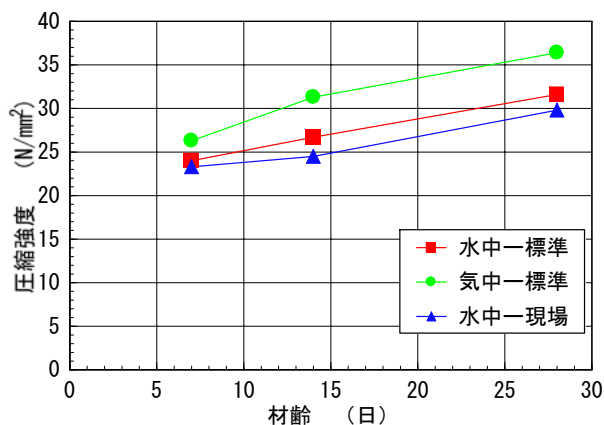


図-4 円柱供試体の圧縮強度

リートでは、流動距離が長くなると分離する傾向を示した。図-6に5.7m供試体中部での流動距離による材齢28日の縦波伝播速度を示す。比較のために円柱供試体の水中作製現場養生の結果を付記した。単位容積質量と同様に、流動距離が増すにつれ縦波伝播速度が遅くなる傾向が見られた。また、円柱供試体と比較して、5.7m供試体では縦波伝播速度が遅い傾向を示した。

図-7に5.7m供試体中部での流動距離による材齢28日の動弾性係数を示す。比較のために円柱供試体の水中作製現場養生の結果を付記した。

縦波伝播速度と同様に、流動距離が増すにつれて動弾性係数が低くなる傾向が得られた。また、静弾性係数も動弾性係数と同様な結果が得られた。

図-8に供試体中部でのコア供試体による流動距離と圧縮強度の関係を示す。単位容積質量、縦波伝播速度、動弾性係数、静弾性係数と同様に流動距離の増加に伴い圧縮強度は減少傾向を示した。

図-9、図-10に標準養生および現場養生の円柱供試体圧縮強度とコア供試体の圧縮強度との強度比の関係を示す。標準養生、現場養生ともに流動距離と圧縮強度比の関係は同様の傾向が見受けられる。

図からも明らかなように流動距離が長くなると圧縮強度比は低下、流動距離5mでの圧縮強度比は0.59~0.76の値となった。これは流動距離が増すにつれ、材料分離が大きくなったことが原因と考える。

以上のことから、本研究で使用した水中不分離性コンクリートは、流動距離が増すにつれコンクリー

ートでは、流動距離が長くなると分離する傾向を示した。図-6に5.7m供試体中部での流動距離による材齢28日の縦波伝播速度を示す。比較のために円柱供試体の水中作製現場養生の結果を付記した。単位容積質量と同様に、流動距離が増すにつれ縦波伝播速度が遅くなる傾向が見られた。また、円柱供試体と比較して、5.7m供試体では縦波伝播速度が遅い傾向を示した。

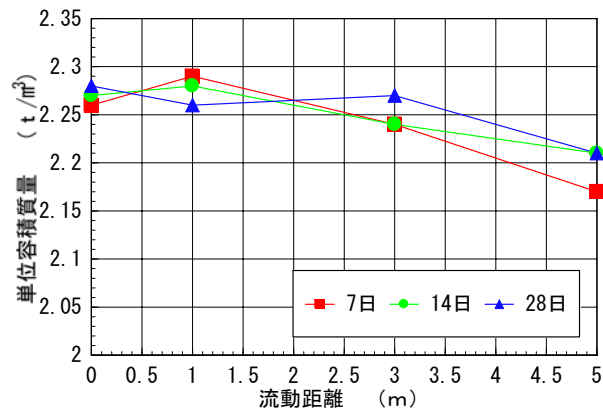


図-5 流動距離とコア供試体の単位容積質量の関係

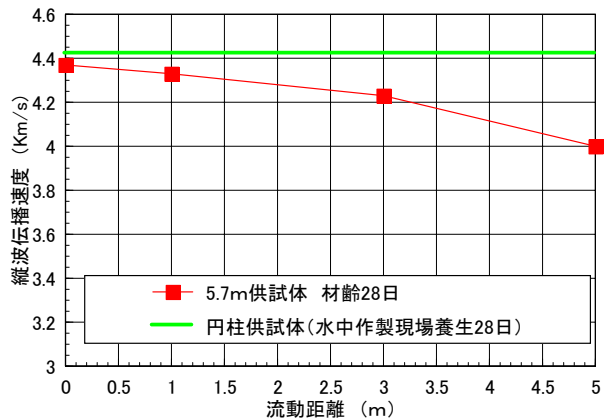


図-6 流動距離とコア供試体の縦波伝播速度の関係

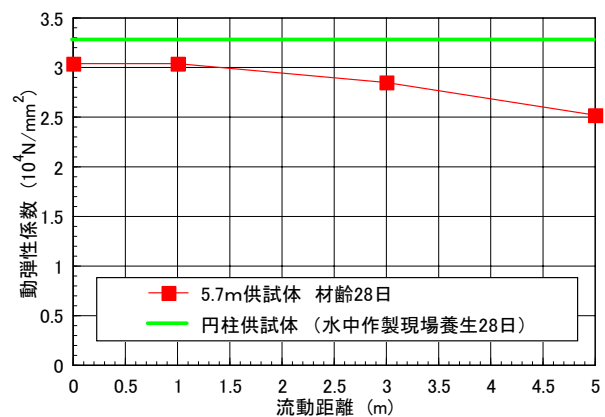


図-7 流動距離とコア供試体の動弾性係数の関係

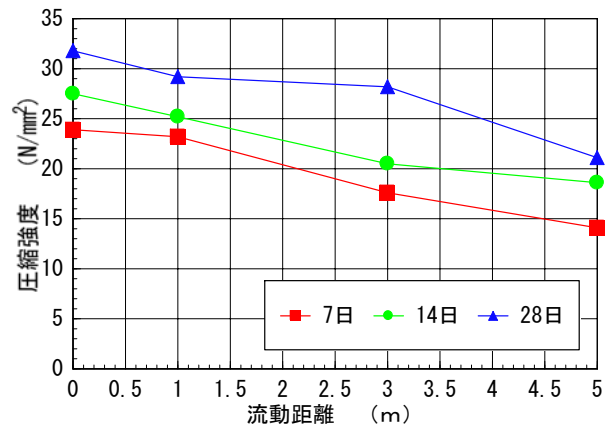


図-8 流動距離とコア供試体の圧縮強度の関係

トの材料分離が生じたことが考えられる。

3.4 水中反発度

流動距離と水中反発度との関係を図-11に示す。圧縮強度と同様に流動距離が増すにつれて水中反発度は低下した。材齢7日における流動距離0mの水中反発度は30.2、流動距離5mでは24.3の値、材齢28日では流動距離0mの水中反発度

は 35.6, 流動距離 5m では 30.5 の値を示した。材齢が経過するにつれて圧縮強度と同様に水中反発度の値は大きくなり, 流動距離が増すにつれ水中反発度は小さくなった。

3.5 水中反発度と推定圧縮強度

従来のリバウンドハンマー試験には強度推定式は数多く提案されている。そこで, 本研究では, 水中不分離性コンクリートの強度推定式を導き出した。水中不分離性コンクリートの場合, 図-8, 図-11 に示しているように圧縮強度が大きくなると水中反発度も大きくなる傾向が見られることから, 推定式を検討することが可能と判断した。図-12 に直線回帰と累乗回帰を行った水中反発度と圧縮強度の関係を示す。比較のため日本材料学会式を付記した。Fは圧縮強度(N/mm²), Rは水中反発度を表す。直線回帰を行った結果, 水中不分離性コンクリートの圧縮強度と水中反発度の相関係数は 0.79 という相関が得られた。直線回帰を行ったものが, 式 (1) である。

$$F = -15.21 + 1.27R \quad (1)$$

既往の研究⁵⁾⁶⁾で検討されてきた近似回帰や累乗回帰を行った推定圧縮強度式について, 本研究から得た結果を用いて累乗回帰式の検討を行った。直線回帰式と同様に累乗回帰式では相関係数は 0.79 という相関が得られた。累乗回帰を行ったものが, 式 (2) である。

$$F = 176.8 \times \left(\frac{R}{100} \right)^{1.71} \quad (2)$$

反発度法の推定値は, ±25%の誤差範囲で推定できることが知られている。水中リバウンドハンマーを用いた場合, 誤差範囲は式 (1) では-12.2%~23.0%, 式 (2) では-12.2%~24.5%の誤差範囲であった。よって, 陸上の反発

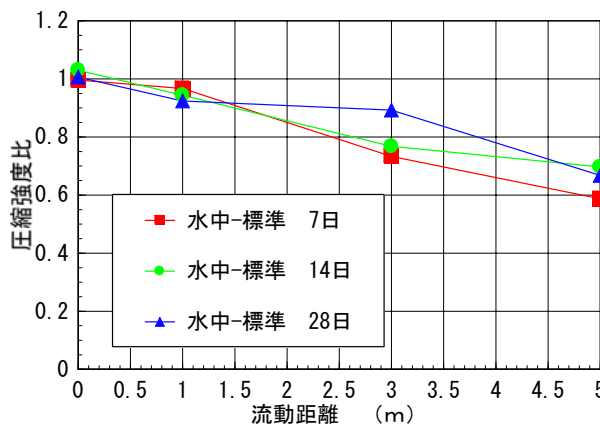


図-9 流動距離によるコア・円柱圧縮強度比の関係 (標準養生)

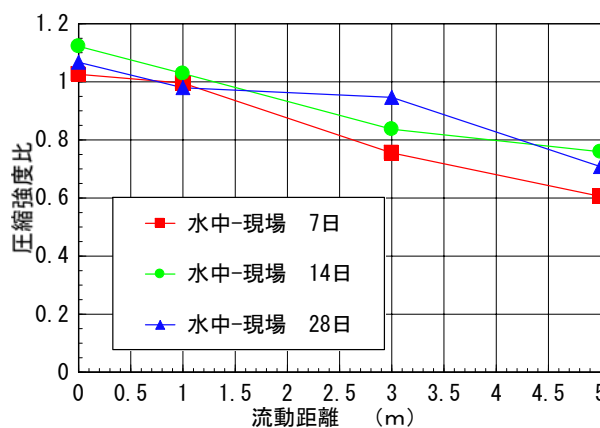


図-10 流動距離によるコア・円柱圧縮強度比の関係 (現場養生)

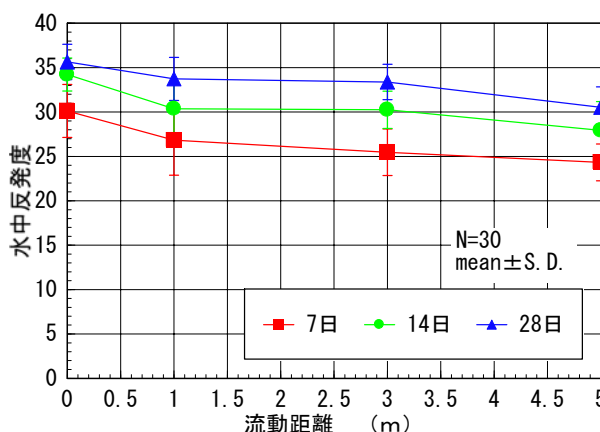


図-11 流動距離と水中反発度の関係

度法と比べ水中反発度法は誤差範囲では差異がない結果が得られた。また, 本研究から求めた水中不分離性コンクリートの推定圧縮強度式と日本材料学会式には直線回帰では, 傾きに差異

が認められなかった。しかし、近年の研究報告で、日本材料学会式は、高強度域で一致しなくなると言う報告が多数なされている。この理由として、日本材料学会式は坂・松井⁷⁾が行った実験結果をもとに決められたものであり、この時に使用したコンクリートの圧縮強度は5～40N/mm²であり、高強度域の検討を行っていないことが考えられる。本研究の推定式と日本材料学会式に差異が小さかった理由は、本研究で使用した水中不分離性コンクリートの圧縮強度が14.1～31.8N/mm²と低強度域を中心に検討した結果だと考えられる。

4. まとめ

水中リバウンドハンマー試験機を用いて水中反発度を測定し、水中不分離性コンクリートの施工躯体へのコンクリート強度を測定する新たな手法として検討を行った結果、明らかになったことを以下に示す。

- (1) 筆者らが開発した、水中リバウンドハンマー試験機を用いて水中反発度を測定することにより、簡易に水中不分離性コンクリートの施工躯体に対し圧縮強度を推定することができることを確認した。
- (2) 水中不分離性コンクリートの水中反発度による圧縮強度推定式を検討した結果、直線回帰式では日本材料学会式と同じ傾きを示した。
- (3) 水中反発度から水中不分離性コンクリートの圧縮強度を推定する場合、陸上の反発度法と同様に、±25%の誤差範囲で圧縮強度を推定できると考えられる。

謝辞 本研究を行うにあたり、日本海上工事(株)田崎邦男氏に貴重なご助力を頂いた。また、試験を行うにあたり、日本エルダルト(株)山西正朗氏、東海大学海洋学部生 江川康司氏、小口拓郎氏の協力を得た。ここに深く感謝の意を表します。

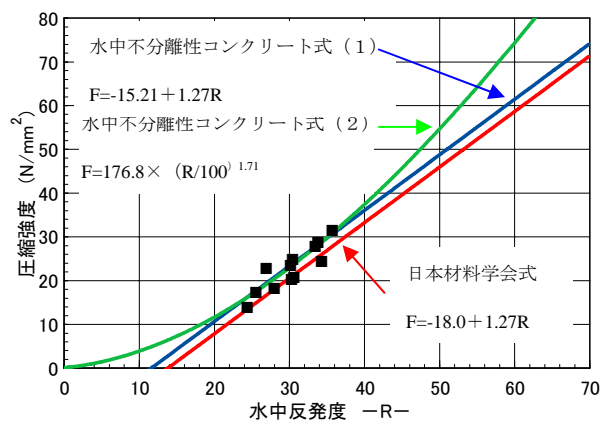


図-12 水中不分離性コンクリートの水中反発度と圧縮強度の関係

参考文献

- 1) 長瀧重義：コンクリートライブラリー第 67 号 水中不分離性コンクリート設計施工指針 (案)，社団法人土木学会，1991
- 2) 大友忠典ほか：水中流動が水中不分離性コンクリートの品質に及ぼす影響，水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集，pp. 181-188，1990
- 3) 佐野清史ほか：水中不分離性コンクリートの流動性と品質について，水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集，pp. 189-194，1990
- 4) 日本材料試験協会：シュミットテス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，第 7 巻，第 59 号，pp. 426-430，1958.8
- 5) 谷口秀明ほか：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，No. 767，V-64，pp. 199-210，2004.8
- 6) 小島政則ほか：水中にあるコンクリートのテストハンマー強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol27，pp1663-1668，2005.6
- 7) 坂静雄ほか：表面硬度法による実施コンクリートの強度判定方法，セメント技術年俵，Vol9，pp. 395-407，1955