エコーチップを用いたコンクリートの圧縮強度推定試験方法の提案

PROPOSAL OF TESTING METHOD FOR CONCRETE STRENGTH USING EQUOTIP

野中 英 ——— *1 湯浅 昇 ——— *2
三谷和裕 ——— *3 金森誠治 ——— *4

Akira NONAKA ——— *1 Noboru YUASA ——— *2
Kazuhiro MITANI ——— *3 Seiji KANAMORI ——— *4

キーワード：
エコーチップ, コンクリート, 試験方法, 圧縮強度, ばらつき, 角度補正, 影響深さ

Keywords:
Equotip, Concrete, Testing method, Compressive strength, Variability, Angle correction, Effective depth

In this research, the applicability to the concrete of the echo chip was examined in the beginning. The content was examination of difference, influence of direction of measurement, and influence depth. The following examination is a method of presuming compressive strength from Equotip hardness value. The method of the estimate of compressive strength was requested from the relation between Equotip hardness value of flat test piece and compressive strength of cylinder test piece.

1. はじめに

構造体に打ち込まれたコンクリートは、現場の環境条件、建物・部材の形状、施工条件、試験材齢などの要因により、構造体管理用の円柱供試体とは強度差が生じる。そこで、実構造物のコンクリート強度を非破壊試験により推定することは、施工および養生を踏まえた圧縮強度を把握する上で重要である。また、試験を任意の材齢で回数を多く行えるなどの利点もある。

非破壊試験によるコンクリートの圧縮強度の推定は、反発度および反発速度による方法、超音波による方法、引っかき傷幅による方法などがあり、反発度および反発速度による方法としてリバウンドハンマーによる方法が広く用いられている。最近では、反発度を測定するリバウンドハンマーの他に、反発速度を測定する方法がいくつか実用化されており、本研究ではその中で鉄の硬度を測定するエコーチップ硬さ試験機（以下、エコーチップとする）に着目した。

エコーチップは、図1に示すようにインパクトボディの打撃速度とその反発速度から、金属の硬度を測定する装置である。この装置は、鉄などの硬度を測定するための試験方法として普及しているが、コンクリートに適用した事例は少ない^{例え ば 3)}。エコーチップの測定原理は、リバウンドハンマーと同様にコンクリートを打撃したときの反発を測定するものである。その打撃力は、リバウンドハンマーと比し 1/200 程度と小さいことから、その影響深さはリバウンドハンマーの影響深さ 1~2cm より小さいと推測され、コンクリートの表面から数 mm 程度の深さの圧縮強度の推定に適用出来ると考えられる。

本研究では、エコーチップをコンクリートへの強度推定への適用を図ることを目的として、エコーチップ硬さ値のばらつき、打撃方向の影響、影響深さについて検討した。最後に、文献2)に示されている考え方に準じて、□300×300×150mm 供試体（以下、平面供試体とする）を用いたエコーチップ硬さ値とφ100×200mm 供試体

（以下、円柱供試体とする）の圧縮強度との関係を検討し、コンクリートの圧縮強度を推定する試験方法を示した。

2. エコーチップの概要

エコーチップは、図1に示す直径 3mm のテストチップの付いたインパクトボディを所定の速度で供試体表面に衝突させ、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装置であり、ASTM A 956 “Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products”において鉄の硬度を測定する方法として規格化されている。

エコーチップの特徴は、衝突エネルギーがリバウンドハンマーの 2100~2300N・mm に対し 11.5N・mm と小さいこと、計測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が挙げられる。

式(1)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 倍した値をエコーチップ硬さ値 (HL) とした。

$$HL = \frac{V}{V_0} \times 1000 \quad \dots (1)$$

ここに、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)

図1 エコーチップ

^{*1} ㈱熊谷組技術研究所 課長・博士 (工学)
(〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)
^{*2} 日本大学生産工学部建築工学科 教授・博士 (工学)
^{*3} ㈱熊谷組技術研究所 研究員
^{*4} ㈱熊谷組技術研究所 副部長

^{*1} Manager, Kumagaigumi Technical Research and Development Institute, M. Eng.
^{*2} Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.
^{*3} Researcher, Kumagaigumi Technical Research and Development Institute
^{*4} Deputy General Manager, Kumagaigumi Technical Research and Development Institute

3. エコーチップのコンクリートへの適用性の検討

3.1 エコーチップ硬さ値のばらつきに関する検討

(1)はじめに

本章では、エコーチップをコンクリートへ適用した場合のエコーチップ硬さ値のばらつきをヒストグラムで示すとともに、標準偏差、変動係数を求めた。

(2)実験概要

a.実験の要因と水準

表1に、実験の要因と水準を示す。実験の要因は主に測定回数とし、測定するコンクリートの品質を変化させるために水セメントおよび測定材齢を変化させた。

b.コンクリートの使用材料および割合

表2に使用材料を、表3に使用したコンクリートの割合を示す。コンクリートの水セメント比は、40、60、80%の3種類とした。スランプの目標値を $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量の目標値を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

c.供試体および養生

平面供試体は、寸法を図2に示す壁を模擬した $300 \times 300 \times 150\text{mm}$ とし、 $300 \times 150\text{mm}$ の上面からコンクリートを打設した。そして、所定の測定材齢まで型枠内に存置し、封かん養生とした。

d.エコーチップ硬さ値の測定

エコーチップ硬さ値の測定は、ローディングチューブを押し締め、インパクトボディをチャックし、供試体にセットした後にローディ

ングチューブを押すことにより行った。

エコーチップ測定時には、供試体の載荷重として文献1)に記載されている 25kgf/cm^2 (2.5N/mm^2)を参考に、 $300 \times 150\text{mm}$ の上下面に 120kN の荷重を加えた。

測定位置は、図2に示す $300 \times 300\text{mm}$ の1面とし、 20mm 間隔で225回測定したもの、図中の点線の範囲で100回を測定したもの、図中の塗りつぶした上下各8回の16回測定したものの3種類とし

図3 エコーチップ硬さ値の度数分布

図2 平面供試体概要図 (単位: mm)

表1 実験の要因と水準 (ばらつきの検討)

要因	水準
測定回数	16回, 100回, 250回
水セメント比	40%, 60%, 80%
測定材齢	1日, 3日, 7日, 28日

表2 使用材料

水	つくば市水道水
セメント	T社製普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)
細骨材	S1: つくば市産川砂(表乾密度 2.50g/cm^3) S2: つくば市産砕砂(表乾密度 2.59g/cm^3)
粗骨材	つくば市産砕石(表乾密度 2.59g/cm^3)
混和剤	Ad1: B社製高性能AE減水剤 Ad2: F社製増粘剤1液型高性能AE減水剤 Ad3: 空気量調整剤

表3 コンクリートの割合

W/C (%)	s/a (%)	単位量					化学混和剤(g/m³)		
		水	セメント	細骨材		粗骨材	Ad1	Ad2	Ad3
				S1	S2				
40	42.7	185	463	333	344	950	3936	—	463
60	47.0	185	308	395	409	950	2464	—	616
80	48.8	185	231	425	440	950	—	1848	347

た。エコーチップの測定は、測定回数の違いにより図2の右に四角で示した中の一点を各々測定し、その間隔は5mm以上とした。また、圧縮強度試験は、また、圧縮強度試験は、300×300×150mm平面供試体と同様に養生した供試体を用い、JIS A 1108 (2006)に準じて行った。

(3)実験結果

a.度数分布

図3に、エコーチップ硬さ値の度数分布を示す。図中の横軸は、エコーチップ硬さ値の階級を示している。階級は、10毎とし、下一桁が0～9までを1つにまとめて表記した。度数分布は測定回数、エコーチップ硬さ値により違いが少なかったため、一例を示した。

度数分布は、測定回数が225回の場合では、概ね正規分布に近くなった。測定回数が少なくなるのに従い、分布する範囲が大きいことから取り得る値の範囲も大きくなり、ばらつきが大きかった。

コンクリートの調合および測定材齢による影響では、水セメント比が小さいほど、測定材齢が遅くなるほど分布する範囲は大きくなった。これは後述するが、変動係数の平均値が12～15%であることから、測定値が大きくなったことにより、分布する範囲も大きくなったと考えられる。

b.測定回数とエコーチップ硬さ値、標準偏差、変動係数

表4に、測定回数とエコーチップ硬さ値の平均値、標準偏差、変動係数および圧縮強度を示す。

エコーチップ硬さ値は、測定回数による大きな違いは認められなかった。

標準偏差は、225回測定した場合に、水セメント比が小さくなるほど、測定材齢が大きくなるほど大きくなった。測定回数が100回、16回と少なくなるにつれて、その傾向は明確ではなくなった。このとき、変動係数の平均値が12～15%であることから、測定値が大きくなったことにより、標準偏差は大きくなったと考えられる。変動係数が測定回数が少ない場合に小さくなっているが、2cmの範囲で測定回数により異なる点を測定したことが影響したと考えられる。

エコーチップ硬さ値の測定でも反発度と同様に、異常値が認めら

表4 測定回数毎のエコーチップ硬さ値、標準偏差、変動係数および圧縮強度

W/C (%)	材齢 (日)	エコーチップ硬さ値			標準偏差			変動係数(%)			圧縮 強度 (N/mm ²)
		16 回	100 回	225 回	16 回	100 回	225 回	16 回	100 回	225 回	
40	1	270	295	274	36.0	31.7	39.7	13.3	10.8	14.5	17.9
	3	346	318	325	49.2	61.2	51.7	14.2	19.3	15.9	33.9
	7	380	387	370	37.0	39.9	50.0	9.7	10.3	13.5	41.9
	28	395	388	382	39.4	50.1	55.3	10.0	12.9	14.5	51.4
60	1	184	196	188	27.3	21.4	24.1	14.8	10.9	12.8	6.9
	3	246	257	253	38.0	32.0	37.2	15.4	12.5	14.7	17.1
	7	292	307	283	28.2	27.8	39.6	9.7	9.0	14.0	24.2
	28	333	324	326	44.3	48.3	44.6	13.3	14.9	13.7	30.8
80	1	155	155	154	14.7	18.7	21.0	9.5	21.1	13.6	2.3
	3	178	169	167	30.5	20.3	24.3	17.1	12.0	14.5	7.5
	7	194	205	205	32.5	25.4	33.0	16.8	12.4	16.1	12.0
	28	226	236	236	23.1	30.4	39.4	10.2	12.9	16.7	17.4
平均											
								12.8	12.5	14.5	

表5 実験の要因と水準（測定方向の違いの検討）

要因	水準
測定方向	横方向、上方向、下方向
水セメント比	40%、60%、80%
測定材齢	1日、3日、7日、28日

れた。そのため、エコーチップにおいても反発度と同様に平均の±20%の範囲を外れる値については除却が必要と考えられる。

3.2 エコーチップ硬さ値の測定方向の影響に関する検討

(1)はじめに

リバウンドハンマーは、既往の研究報告⁹⁾でも述べているように、測定方向を変えた場合に測定値が異なる。そこで、測定方向を変えた場合には、信頼すべき資料に基づいて測定値を修正し、強度の推定を行わなければならないとしている。また、しかるべき資料が得られない場合には、文献に示す補正值を用いて反発度Rの補正を行った後、強度を補正してもよいとしている。

エコーチップでも、鉄などの硬度の測定について、測定方向の違いによる補正值がASTM A 956に示されている。しかし、これは鉄を測定した場合の補正值であり、コンクリートを測定した場合の補正值ではない。

本検討では、エコーチップ硬さ値の測定方向の違いによる補正值を検討するため、測定方向として横方向、下方向、上方向の3種類の打撃を行い、横方向を基準とした補正值を求めた。

(2)実験概要

a.実験の要因と水準

表5に、実験の要因と水準を示す。実験は、エコーチップ硬さ試験機の測定方向を、横方向、下方向、上方向の3種類とした。また、使用するコンクリートの品質（強度）を変化させるため、水セメント比および乾燥開始材齢を変化させた。

b.コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料および調合は、3.1(2)b.に示すものとした。

c.供試体および養生

供試体および養生は、3.1(2)c.に示すものとした。

d.エコーチップの測定

エコーチップの測定は、3.1(2)d.と同様に行った。なお、エコーチップの測定は、荷重を加えず、アングルで作製した鋼製の治具を用い、鉄骨のフレームに固定して実施した。測定回数は、1方向あたり100回とした。なお、測定位置は、図2に示す横方向で②、上方向で③、下方向で④とした。

(3)実験結果および考察

a.測定方向とエコーチップ硬さ値

図4に、測定方向の違いによる材齢とエコーチップ硬さ値の関係

図4 測定方向の違いによる材齢とエコーチップ硬さ値の関係

を示す。エコーチップ硬さ値は、いずれの水セメント比、測定材齢でも測定方向が下、横、上の順で大きくなった。

b.角度補正値の検討

コンクリート部材を測定する場合には、鉛直部材が多く、測定方向は横となることが多い。リバウンドハンマーの角度補正値も横方向が基準となっている。そこで、エコーチップの角度補正値の基準も横方向とすることとした。

図5に、測定方向横のエコーチップ硬さ値と測定方向上下のエコーチップ硬さ値の関係を示す。測定方向横を基準とした測定方向の違いによるエコーチップ硬さ値の関係は、各々1本の近似線で示すことができ、その相関は高かった。

図5の回帰式から測定方向横に対する測定方向上、測定方向下の値を求め、その値から角度補正値を求めた。回帰式から求めた角度補正値は、表6に示す通りであった。

3.3 エコーチップ硬さ値に及ぼす影響深さの検討

(1)はじめに

リバウンドハンマーの反発度に及ぼす影響深さは、表層から1～2cm程度であり、それ以上の深さの内部のコンクリート強度は反映されないと言われている⁴⁾。エコーチップは、リバウンドハンマーに比し、衝突エネルギーが小さいため、影響深さも小さいと考えられる⁵⁾。ここでは、コンクリートの表面に、セメントペーストの厚さおよび強度を変化させて作製した供試体により測定を行い、エコーチップ硬さ値に及ぼす影響深さを検討した。

(2)実験概要

a.実験の要因と水準

実験の要因は、セメントペーストの厚さおよびセメントペースト、コンクリートの圧縮強度とした。セメントペーストの厚さは、1, 2, 3, 5, 7.5, 10mm および比較用の100mmとした。また、表面と内部の強度を変化させるため、表層セメントペーストの水セメント比を60, 80, 100%, 内部コンクリートの水セメント比を40, 60, 80%と変化した。

表6 回帰式から求めたエコーチップ硬さ値と角度補正値

回帰式から求めたエコーチップ硬さ値			角度補正値	
測定方向横	測定方向上	測定方向下	測定方向上	測定方向下
100	114	97	-14	3
150	164	146	-14	4
200	215	195	-15	5
250	265	243	-15	7
300	316	292	-16	8
350	367	341	-17	9
400	417	390	-17	10

表7 セメントペーストの使用材料

水	つくば市上水道水
セメント	T社製普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³)
混和剤	Ad1 : B社製高性能AE減水剤 Vt : 2液型増粘剤 (Vt(A), Vt(B))

表8 セメントペーストの調合

W/C(%)	単位量(kg/m ³)		混和剤(kg/m ³)		
	水	セメント	Ad1	Vt(A)	Vt(B)
60	665	1091	2.9	6.9	6.9
80	717	869	4.3	10.0	10.0
100	760	760	5.7	17.1	17.1

b.セメントペーストおよびコンクリートの使用材料および調合

表7に、セメントペーストの使用材料を、表8にセメントペーストの調合を示す。コンクリートの使用材料および調合は、3.1(2)b.に示すものとした。セメントペーストは、分離を生じさせないため2液型の増粘剤を添加した。

材齢28日(エコーチップ硬さ値測定材齢)の圧縮強度は、表層セメントペーストがW/C=100%で11.0N/mm²、W/C=80%で19.6N/mm²、W/C=60%で35.2N/mm²、内部コンクリートがW/C=80%で17.1N/mm²、W/C=60%で29.8N/mm²、W/C=40%で57.9N/mm²であった。

c.供試体および養生

図6に、供試体の概要図を示す。供試体は、寸法を150×150×150mmとし、セメントペーストの厚さD1, D2, D3, D4を1, 2, 3, 5, 7.5, 10mmと変化させた。供試体は、材齢28日まで温度20℃の恒温室内で封かん養生とした。

d.エコーチップ硬さ値の測定

エコーチップ硬さ値の測定は、供試体に荷重を与えず、材齢28日の脱型直後に、3.1(2)d.と同様の方法で行った。測定は、図6に示す測定範囲で20mm間隔とし、測定回数は25回とした。

(3)実験結果

図7に、表層セメントペースト厚さとエコーチップ硬さ値の関係を示す。表層セメントペースト厚さを1, 2, 3, 5, 7.5, 10mmとした場合のエコーチップ硬さ値は、セメントペースト単体と比しセメントペーストの水セメント比が100%で1mmより深い内部の影

図5 測定方向横のエコーチップ硬さ値と測定方向上下のエコーチップ硬さ値の関係

図6 影響深さ供試体の概要図(単位:mm)

図7 表層セメントペースト厚さとエコーチップ硬さ値の関係

響は受けず、水セメント比 80%, 60%では 2mm より深い内部の影響を受けない。また、コンクリート単体との比較では、セメントペースト 1mm を境に変化している。このことから、本実験の範囲内では、少なくとも表面から 3mm 以上深い内部のコンクリート強度の影響は反映していないといえる。

4. エコーチップによるコンクリートの強度推定に関する検討

4.1 はじめに

リバウンドハンマーでは、文献 2)において「コンクリートの反発度および反発速度比の関係の求め方」として、①φ100mm 円柱供試体の圧縮強度と 300×300×150mm 平面供試体の反発度および反発速度比の関係、②φ100mm もしくはφ150mm 円柱供試体の反発度および反発速度比を測定した後、同一の供試体で圧縮強度を求めその関係を求める方法が提案されている。②の方法では、湯浅の文献²⁾によりコンクリート表面の曲率が大きくなると反発度が小さくなることが示されている。このことは、φ100×200mm 円柱供試体の側面のみで、キャリブレーションを求め、実構造物では平らな面で測定し、それらにより強度を推定する場合、強度は大きく推定され危険側の評価となることを示している。

ここでは、文献 2)の考え方に準じて、平面供試体のエコーチップ硬さ値と円柱供試体の圧縮強度の関係を求め、コンクリートの圧縮強度を推定する方法を検討する。また、φ100×200mm 円柱供試体のみにより硬さ値と圧縮強度の関係を構築する場合における曲率に関する補正値について検討した。

4.2 実験概要

(1)実験の要因と水準

表 9 に、実験の要因と水準を示す。実験の要因は、水セメント比、試験体寸法、測定材齢とした。

(2)コンクリートの使用材料および調査

使用材料を、表 10 に示す。コンクリートの調査は、表 11 に示す水セメント比 40, 60, 80%の 3 種類とした。スランブの目標値を 18±2.5cm, 空気量の目標値を 4.5±1.5%とした。

(3)供試体の概要

平面供試体は、寸法を 300×300×150mm とした。測定範囲は、文献 2)を参考に、外周部から 37.5mm 以上離れた内側とした。円柱供試体は、寸法を φ100×200mm とした。

表 9 実験の要因と水準（コンクリートの強度推定）

要因	水準
水セメント比	40%, 60%, 80%
試験体寸法	300×300×150mm, φ100×200mm
測定材齢	1 日, 3 日, 7 日, 28 日

表 10 使用材料

水	習志野市上水道水
セメント	研究用普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³)
細骨材	大井川産川砂(表乾密度 2.62g/cm ³)
粗骨材	大井川産川砂利(表乾密度 2.66g/cm ³)
混和剤	Ad1: B 社製 AE 減水剤 Ad3: 空気量調整剤

表 11 コンクリートの調査

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				化学混和剤 (g/m ³)	
		水	セメント	細骨材	粗骨材	Ad1	Ad3
40	47.5	185	463	672	977	1852	694
60	46.3	185	308	820	970	771	924
80	47.3	185	231	878	962	578	631

平面供試体および円柱供試体は、所定の測定材齢まで温度 20℃の恒温室内で封かん養生を行った。

(4)試験方法

a.エコーチップ硬さ値の測定

エコーチップ硬さ値の測定は、材齢 1, 3, 7, 28 日において、封かん養生終了直後に、平面供試体の 300×150mm の上下方向に 120kN の荷重を加えて行った。測定面は、300×300mm の 2 面、1 面あたりの測定点数は 8 回の計 16 回、測定点の間隔は 25mm 以上離れた。エコーチップ硬さ値は、2 面 16 回の平均値とし、JIS A 1155(コンクリートの反発度の測定方法)と同様に、その偏差が平均値の±20%の範囲を外れる値については除却した。

b.圧縮強度の測定

圧縮強度は、材齢 1, 3, 7, 28 日において、JIS A 1108 に準じて測定した。また、エコーチップの曲面による影響を確認するため、圧縮強度試験前に 20kN の荷重を加え、エコーチップの測定を 1 つの供試体で 12 点行った。

図8 コンクリートの強度発現

図9 平面供試体のエコーチップ硬さ値の経時変化

図10 平面供試体のエコーチップ硬さ値と圧縮強度の関係

4.3 実験結果および考察

図8は、コンクリートの強度発現を示したものである。

(1) エコーチップ硬さ値の経時変化

図9は、平面供試体のエコーチップ硬さ値の経時変化を示したものである。圧縮強度に対応するように平面供試体のエコーチップ硬さ値は、いずれの水セメント比においても、材齢の経過に伴い大きくなる傾向がみられ、材齢7日までは大きく増加し、それ以降は緩やかに増加した。

円柱供試体のエコーチップ硬さ値は、平面供試体と増加の傾向は同じであったが、値は若干小さくなった。

(2) エコーチップ硬さ値と圧縮強度の関係

図10は、エコーチップ硬さ値と圧縮強度の関係を示したものである。エコーチップ硬さ値と圧縮強度の関係は、一本の近似線で示すことができ、その近似式は $y=0.14x-16.41$ 、決定係数は0.96であった。この近似式を用いて、エコーチップによる圧縮強度の推定が可能であると考えられる。

(3) エコーチップ硬さ値の曲率による相違

図11は、円柱供試体と平面供試体のエコーチップ硬さ値の関係を示したものである。エコーチップ硬さ値は、平面供試体と比し円柱供試体で小さくなった。本実験では、円柱供試体の値に1.05倍すると平面供試体の値に補正された。圧縮強度の推定は、円柱供試体の値を平面供試体の値に補正し、図10を用いて行うこととする。なお、既往の研究²⁾におけるリバウンドハンマーの倍率は、1.09であった。

5. まとめ

エコーチップのコンクリートへの適用性を評価するため、ばらつき、測定方向、影響深さの確認を行うとともに、圧縮強度推定方法を検討した。得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 標準偏差はエコーチップ硬さ値が大きくなるのに従い大きくなるが、変動係数としては12～15%であった。
- (2) エコーチップ硬さ値における横方向に対する角度補正値を示した。
- (3) エコーチップの硬さ値は、表層強度が小さい程、mm単位の表層極薄い層に影響を受ける。3mmより深い内部のコンクリート強度は反映していないことがわかった。

図11 エコーチップ硬さ値の曲率の影響

- (4) 平面供試体のエコーチップ硬さ値と圧縮強度の関係を求め、その関係より圧縮強度を推定する方法を示した。また、関係を求める際に使用する供試体の曲率の影響を示し、平面における硬さ値に補正する方法を示した。

【参考文献】

- 1) 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、丸善、pp.10～28、1983.2
- 2) 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
- 3) 重松岳史、豊福俊泰、亀井頼隆：エコーチップ硬さ試験による構造物中のコンクリートの品質兼検査方法に関する研究、土木学会西武支部研究発表会、pp.A-572～573、2002.3
- 4) 建材試験センター：コンクリート構造物の非破壊試験・微破壊試験の研究と実用化、建材試験センター2013、Vol.4、pp.2～8、2013.4
- 5) 湯浅昇、三谷和裕、金森誠治、野中英：コンクリートの圧縮強度推定を目的としたエコーチップ硬さ試験に関する検討その1～その3、日本建築学会大会学術講演梗概集A-1、pp.347-352、2015

[2016年10月4日原稿受理 2016年11月9日採用決定]