報告　RC 構造物の検査への非破壊試験の適用

森濱　和正[*1]・山口　順一郎[*2]・松塚　忠政[*3]・中村　英佑[*4]

要旨：新設の鉄筋コンクリート構造物の性能を確認するために，非破壊試験によって構造物を直接検査する方法を検討している。今回，実構造物に非破壊試験を適用して検査を試みたので，その結果を報告する。検査項目と使用した方法は，電磁波レーダによる配筋状態，かぶり厚さ，φ25mm の小径コアとφ10mm の超小径コアによる強度，超音波法による強度および表層の緻密性である。実験の結果，電磁波レーダによるかぶり厚さ，小径コアによる強度の検査は可能であるが，超小径コア，超音波は使用目的や適用範囲の検討が必要である。

キーワード：電磁波レーダ，小径コア，超音波法，かぶり厚さ，コンクリート強度，緻密性

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性や耐荷性能が確保されているかどうかを確認するためには，新設時にその構造物が所要の性能・品質を有しているかどうかを確認しておくことが必要である。

ところが，竣工時の検査の現状は，通常，出来形および表面状態を除いて，構造物の性能・品質を直接検査しておらず，新設時の構造物の性能・品質はほとんど確認されていない。

そのため，筆者らは，新設の鉄筋コンクリート構造物を非破壊試験によって直接検査する方法を提案し [1)]，さまざまな検討を行なっている [2,3,4)]。今回，実構造物でこれまでの成果を確認する機会を得たので，その結果を報告する。

検査項目は，耐久性確保の観点からかぶり厚さ，コンクリート表層の緻密性，耐荷力の観点からコンクリート強度である。かぶり厚さの測定には電磁波レーダ（以下，レーダ）を用いた。レーダの課題は，非破壊で比誘電率を推定することであり，鉄筋径を用いる方法 [5)]を改良し，コンクリート内部の比誘電率の分布を求めた。強度はφ25mm の小径コア，φ10mm の超小径コア [6)]と超音波，緻密性も超音波を用いた [7)]。

2. 構造物の概要

対象構造物は，新設の橋脚のフーチング（構造物 G）と，長期材齢時の検査を想定して 1 年経過した橋脚 2 基（P1，P2）の竪壁（構造物 H）の 2 構造物である。両構造物は近接して建設されており，コンクリートは同じプラントから供給されたが，呼び強度，粗骨材は異なっている。

構造物 G は，幅 11.4m，奥行き 8.4m，厚さ 2.5m である（図−1）。コンクリートは，設計基準強度は 24MPa であるが，呼び強度 30 で，石灰岩の粗骨材（最大寸法 Gmax 20mm）が使われている。検査した面は側面の 4 面であり，橋軸に直角な面（右岸，左岸面）の配筋状態は，縦に D35 が 125mm ピッチ，横に D19 が 200mm ピッチである。橋軸に平行な面（上流，下流面）の配筋は，縦に D29 が 250mm ピッチ，横に D19 が 200mm ピッチである。コンクリート打込み後，4 日で脱型し，直ちに埋め戻す計画のものであり，材齢 5，6 日で検査のための実験を行なった。

構造物 H の 2 基の橋脚は，施工業者は異なるものの，形状，コンクリート，配筋は同じである。形状は小判状であるが，両端部は六面で構成され（図−2），直線部には凹凸を有する模様を

*1 土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム　主任研究員　(正会員)
*2 土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム　交流研究員　(正会員)
*3 土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム　交流研究員　工修(正会員)
*4 土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム　研究員　工修(正会員)

施しており，検査の対象は両端部の六面である。竪壁の厚さは 2.0m，幅は 8.0m である。コンクリートの呼び強度は 24 であり，粗骨材の Gmax は 20mm である。鉄筋は，軸方向に D38 が 125mm ピッチ，帯鉄筋は D22 が 150mm ピッチである。

3. 検査方法

3.1 円柱供試体による音速，強度試験

構造物 G は，図-1 の下流面の①～⑥の位置の打込み時にコンクリートを採取して円柱供試体 φ100×200mm を作製した。③を除き各 2 組(1 組 3 本)作製し，1 組は封かん養生，もう 1 組は標準水中養生を行い，材齢 28 日に音速を測定したあと強度試験を行なった。③は 9 組作製し，6 組は封かん養生，3 組標準水中養生とし，材齢を変えて音速測定し強度試験を行なった。

構造物 H は，通常の工事と同じように 1 台目のアジテータ車からコンクリートを採取して 4 組作製し，2 組ずつ標準水中養生と現場養生を行い，材齢 7 日，28 日に強度試験を行なった。

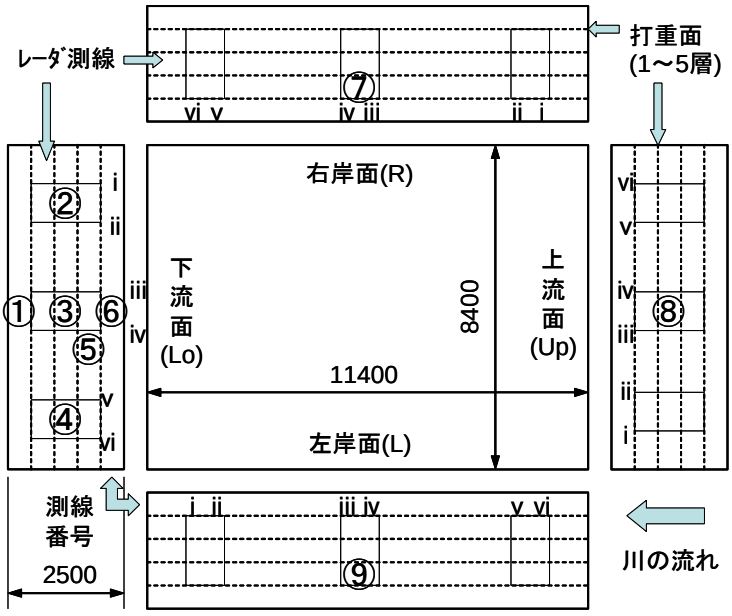

図-1　構造物 G の形状・寸法，測定位置

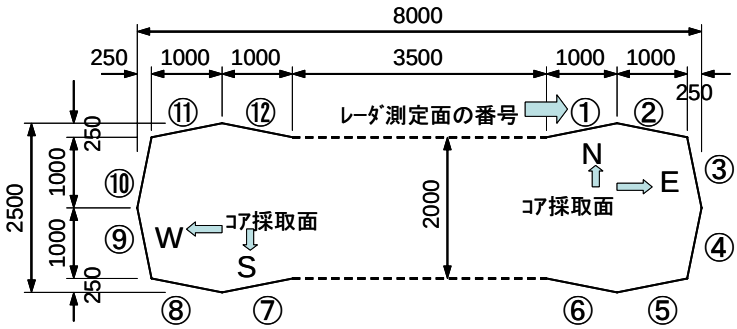

図-2　構造物 H の形状・寸法，測定位置

3.2 レーダによる配筋位置，かぶり厚さの測定

配筋状態の確認のために鉄筋位置を測定するとともに，かぶり厚さの測定位置を決めるため，また，鉄筋の影響を避けて超音波による強度，緻密性を推定するため，さらには，コアを採取する位置を決めるために，配筋位置を測定した。

構造物 G の配筋位置，かぶり厚さの測定は，図-1 の 4 面の両側と中央部の高さ 1.5m×1m の測線上を，レーダを走査した。音速測定，コア採取のために①～⑨の配筋状態を確認した。

構造物 H の配筋位置，かぶり厚さの測定は，図-2 の 12 面（①～⑫）の 1.5×0.65m を走査した。音速測定，コア採取のために N，E，S，W の配筋状態を確認した。

かぶり厚さを求めるため，比誘電率を次のように求めた。S，N の位置で，レーダ装置の比誘電率を 3 段階設定を変え，軸方向鉄筋，帯鉄筋のかぶり厚さを求め，各比誘電率のときの鉄筋までの往復伝搬時間 t を式(1)によって計算する。

$$t = do \cdot \sqrt{\varepsilon o} / C \qquad (1)$$

ここに εo，do：設定比誘電率とそのときの測定かぶり厚さ，C：電磁波の空気中の速度である。

コンクリート内の比誘電率は，含水率の影響を強く受けることから，比誘電率の分布を図-3 のように仮定すると式(2)となり，往復伝搬時間とかぶり厚さの関係は式(3)から，式(4)を得る。

$$\sqrt{\varepsilon} = x/(1/a + x/(c-b)) + b \qquad (2)$$

$$t/2 = \int \sqrt{\varepsilon}\, dx / C \qquad (3)$$

$$C \cdot t/2 = c \cdot x - (c-b)^2/a \times LN(a \cdot x - b + c) \qquad (4)$$

ここに，ε：比誘電率，a，b，c：回帰係数であり，a は x=0 のときの接線の傾き，b は表面の

比誘電率，c は x=∞のときの比誘電率を表す係数である。

測定結果を式(4)によって回帰することにより誘電率分布を求めることができる。

3.3 超音波による強度，表層の緻密性の評価

超音波による強度，表層の緻密性の評価方法については，文献 2)を参照願いたい。

3.4 コアによるかぶり厚さ，吸水率，強度試験

構造物 G の③，⑦～⑨，構造物 H の N，S の位置では，縦筋，横筋までの小径コアを採取し，かぶり厚さを測定した。そのあと 50mm ずつ切断して強度試験を行なった。

構造物 G の①～⑤からφ100mm 標準コア，構造物 H の E，W からφ65mm 標準コア，小径コア，超小径コアを採取し，強度試験を行なった。標準コアは，採取直後に半径方向の音速を表面から 10mm ピッチで測定し，一部のコアは約 10mm ずつ輪切りにして吸水率を測定した。

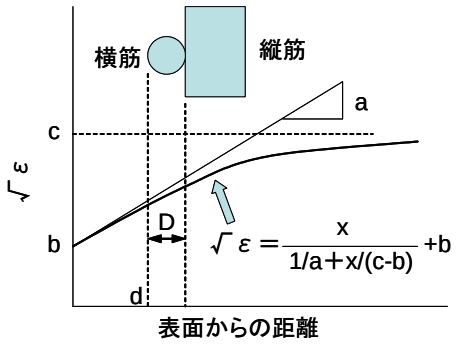

図-3　比誘電率分布の仮定

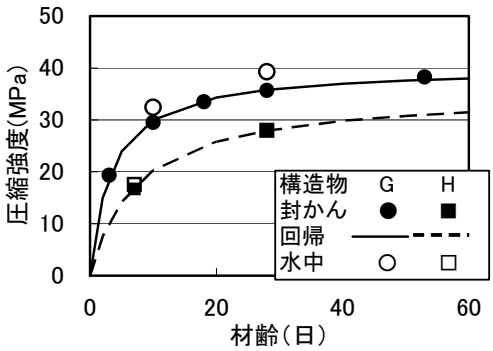

図-4　円柱供試体の材齢と圧縮強度の関係

4. 測定結果

4.1 円柱供試体の音速，強度試験結果

円柱供試体の強度と材齢の関係，強度と音速の関係を図-4，図-5 に示す。強度と材齢の関係を式(5)で回帰し，材齢補正係数 [7]を式(6)によって求めた結果，音速と強度の関係を式(7)によって回帰した結果は表-1 のとおりである。

$$fct=t/(1/a+t/b) \quad (5)$$

$$\alpha=fct/a,\quad \beta=fct/b \quad (6)$$

$$fct=k1\cdot\exp(k2\cdot V) \quad (7)$$

ここに，fct：材齢 t 日の圧縮強度，t：材齢，a，b，k1，k2：回帰係数，V：音速である。

構造物 H の円柱供試体の音速は測定していないため，表-1 の係数 k1，k2 の値は，これまでの実験で求めた各種コンクリートの 28 日強度と式(7)の係数の関係から求めた値である [8]。

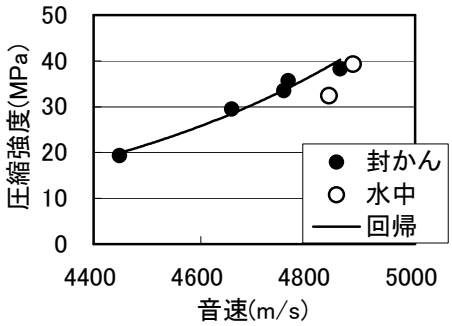

図-5　構造物 G の音速と強度の関係

4.2 配筋位置，かぶり厚さの測定結果

レーダにより配筋位置も測定予定であったが，時間の制約から測定できなかった。ただし，かぶり厚さを実測するために、レーダで鉄筋位置を探査し小径コアを採取している。今回は 16 本、他の実験で 100 本程度の小径コアを採取している。今回，1 本鉄筋位置をはずしてしまった。それ以外はすべて 1 回で鉄筋位置のコアを採取している。今回はずした場合も装置の測定限界

表-1 強度，音速の回帰結果

構造物	材齢-強度			材齢補正係数		音速-強度		
	a	b	r	α	β	k1	k2	r
G	11.93	40.12	0.998	3.002	0.893	0.00983	0.00171	0.977
H	4.76	35.38	0.998	5.878	0.790	0.01991	0.00175	―

（かぶり厚さ 200mm）近くの場合であり，その後慎重に探査することにより鉄筋位置のコアを採取することができた。これらの結果より，レーダは十分な精度で鉄筋位置を探査できることは明らかである。

かぶり厚さ結果の前に鉄筋径を用いた比誘電率の結果を示すと図-6，図-7 のようになった。図中にはコアによる実測かぶり厚さから求めた平均比誘電率の結果も示している（平均比誘電率であるため，かぶり厚さは 1/2 で表示）。鉄筋径を用いる方法はばらつきが大きい。その原因は，用いたレーダ装置の分解能は 2～3mm であり，鉄筋径を求める精度が低いためである[5)]。そのため，今回，かぶり厚さを求めるための比誘電率は，コアの実測結果を式(4)で回帰することによって求め，その結果も図中に示した。実測結果に注目すると，深くなるほど比誘電率は大きくなっており，多くの規格はコアを採取して平均比誘電率を設定することになっているが，その方法は精度上問題があることを示している。

かぶり厚さの結果を設計値との差で表し，その最大と最小の結果を示すと図-8，図-9 のようになった。図-8 は横筋の結果であり，高さ方向の分布を示している。この結果より，設計値に対して-20～60mm もずれている。マイナス側は耐久性の問題があり，プラス側は耐荷力の低下につながる。測定した面ごとの標準偏差を求めると，ほとんどは 5mm 以下であった。ところが，図-8 の「P1 変化」の標準偏差は 8.3mm で最も大きかった場合であり，はらみ・へこみ，倒れなどを確認することができる。これらのことから，かぶり厚さの判定値の目安は，測定上は，±10mm 程度と考えられる。

図-9 は縦筋の結果であり，P1 は約 10mm 平行移動していると推定できる。P2 は，最小の場合でもほぼ設計値，最大は 30mm 大きくなっており，はじめからかぶり厚さが大きかったものと推測できる。

以上の結果より，配筋状態，かぶり厚さを検査することにより，コンクリート打設後の配筋

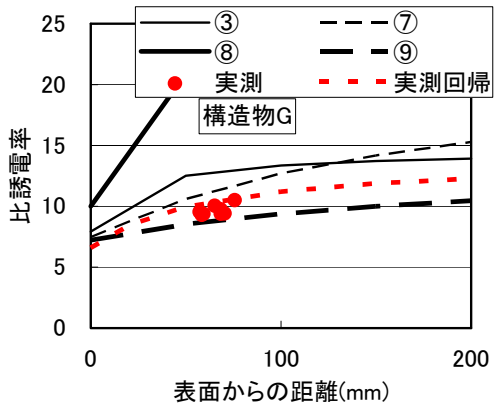

図-6　構造物 G の比誘電率分布

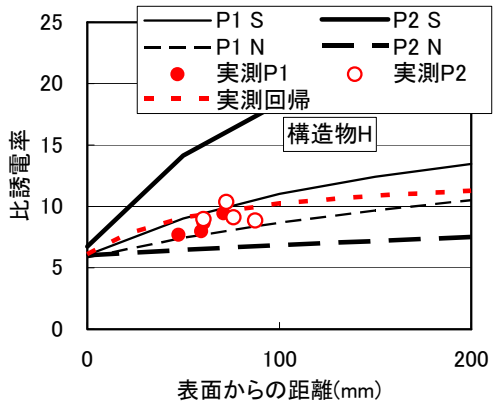

図-7　構造物 H の比誘電率分布

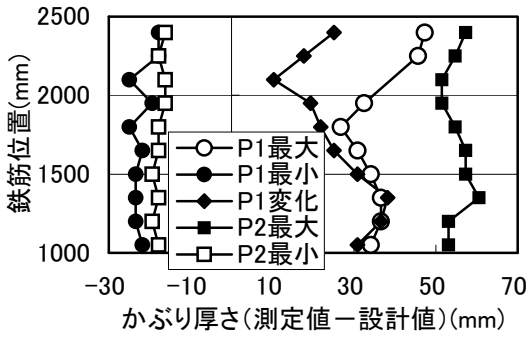

図-8　構造物 H，横筋のかぶり厚さ

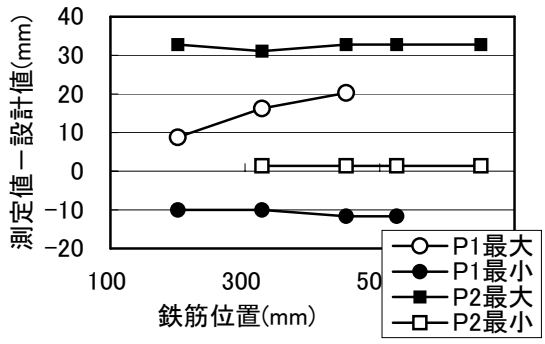

図-9　構造物 H，縦筋のかぶり厚さ

状態，かぶり厚さが把握でき，今後，配筋精度の向上に役立つものと考えられる。

4.3 強度試験結果

標準コア，小径・超小径コア，超音波による強度試験結果の 28 日補正強度に加え，標準水中養生した円柱供試体の 28 日強度も合わせて図-10 に示した。小径コアは，4 本のコアの，表面から 1 個目と 2 個目，計 8 個の平均値である [9]。超小径コアも 4 本のコアの 8 個の平均値であるが，表面から 2 個目と 3 個目を用いた。超小径コアの場合，表面の 1 個目の結果が標準コア，小径コアよりもかなり大きかったり小さかったり，ばらつきが非常に大きかったため除いた。

標準コア強度は，通常，標準水中養生した円柱供試体の強度より小さくなる場合が多いが，今回の結果はわずかに大きい場合もあった。

構造物 G の小径コア 28 日の結果は，標準コアよりわずかに大きくなっており，良好な結果であった [9]。しかし，10 日の強度を 28 日に補正した結果は小さくなっており，早期にコアを採取（材齢 6 日）することによる問題，補正方法による問題などが考えられる。超音波により材齢 5 日に推定した結果の 28 日補正強度はさらに小さい結果となった。しかし，いずれの結果も呼び強度に対しては合格と判定できる結果であった。

なお，超小径コアについては，採取しようとしたが，細かく破砕して強度試験できるものはわずかであった。材齢 6 日でも強度は 20MPa 程度発現しており，これまでの実験では採取可能であった。今回は，これまでにかなり使用したコアビットを用いたことが原因と考えられた。

構造物 H の水中養生した強度結果は，P1，P2 ともほぼ同じであった。しかし，標準コア，小径コア，超小径コア，超音波による強度結果は，いずれも P2 は P1 よりもすべて小さかった。特に内部音速の結果は，P1，P2 ともばらつきは小さかったものの，P2 は P1 よりも 360m/s も小さかった。これらの結果より，P1，P2 とも同じ配合のコンクリートが使用されたが，締固めや養生方法などによって P1，P2 のコンクリートの品質は異なったものと考えられる。このことからも，RC 構造物を直接検査する必要性がある。

小径コアの結果は，標準コアよりわずかに小さかった。

超小径コアについては，構造物 H では強度が高かった（約 40MPa）ため採取することができた。しかし強度は，標準コア，小径コアよりも小さかった。通常，寸法効果によりそれらより大きくなる場合が多いが [6]，今回は，構造物 G でもふれたとおり，コアビットの問題である。

超音波による強度推定結果は，P1 は標準コア，小径コア強度とほぼ一致しているが，P2 は呼び強度を大きく下回った（18.3MPa）。上記のとおり，P1 と P2 のコンクリート品質は異なり，強度を推定する式が異なっているものと考えられる。このような場合，どのように対処するのかを検討しておく必要がある。

4.4 緻密性の結果

コンクリート表層の音速と吸水率の関係は図-11 のようになった。音速が最も遅く吸水率が大きいのが表面であり，音速が速くなるに従いコンクリート表面からの距離が大きく（内部深く）

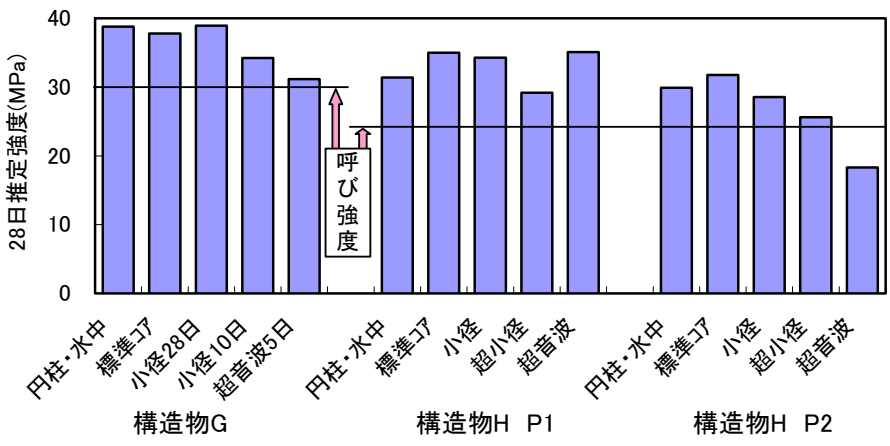

図-10 強度推定結果

なり，吸水率もしだいに小さくなっている。これまでの実験結果から，音速 4000m/s 程度になると吸水率はほぼ一定になる傾向があり [10]，今回の結果もほぼそのような傾向がある。

また，構造物 G（呼び強度 30）と H（24）を比較すると，G は表面の音速からほぼ 4000m/s になっており，吸水率は表面も内部もほぼ一定になっている。しかし，H は上記のとおり音速が速くなるほど吸水率も小さくなっており，音速分布は表層の品質を表しているものと考えられる。今後，音速分布と耐久性の関係を明確にする必要がある。

5. まとめ

レーダによる鉄筋のかぶり厚さ，小径コア，超小径コアによる強度，超音波による強度，緻密性の評価から，次のことが明らかになった。

(1) レーダによるかぶり厚さの測定には比誘電率の設定が必要であり，鉄筋径による設定方法を検討したが，ばらつきが大きかった。レーダ装置の分解能の改善が必要である。

(2) かぶり厚さの測定結果から設計値からのズレ（移動，はらみ，倒れなど）を把握できた。

(3) 今後，かぶり厚さの検査を導入することにより，耐久性の評価や配筋精度の向上につながるものと考えられる。

(4) 強度については，小径コアを用いることにより精度良く判定することができる。

(5) 超小径コアによる強度判定についても使用できる可能性は高い。ただし，適用範囲など試験方法を厳格に決めることが必要である。

(6) 超音波による強度判定は，封かん養生した円柱供試体の音速と強度を用いることによって行うことができる。ただし，音速と強度の関係が得られていない場合，推定式の係数の決め方を検討する必要がある。

(7) 音速分布によりコンクリート表層の緻密性評価の可能性もある。今後，耐久性との関係を明確にする必要がある。

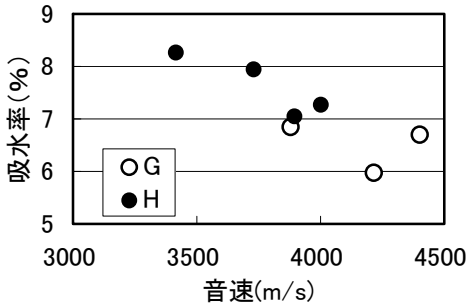

図-11　音速と吸水率の関係

参考文献

1) 森濱和正ほか：非破壊試験によるコンクリートの品質、部材厚さ、かぶり厚さの検査方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.1, pp.511-516, 2001.7

2) 森濱和正ほか：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する研究 第 1 報 実験概要および超音波法，非破壊検査，Vol.52, No.9, pp.497-503, 2003.9

3) 同上 第 2 報 レーダ法および衝撃弾性波法，Vol.52, No.12, pp. 691-696, 2003.12

4) 森濱和正ほか：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究 共通 その 1 研究概要，日本非破壊検査協会平成 15 年春季大会講演概要集，pp.125-126, 2003.5

5) 山口順一郎ほか：電磁波レーダ測定におけるコンクリートの比誘電率とかぶり測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp. 1875-1880, 2004.7

6) 片平博ほか：コア試験体の小径化が圧縮強度に与える影響に関する実験的研究，同上，pp. 399-404, 2004.7

7) 森濱和正ほか：超音波法を用いたコンクリート内部の音速分布測定による圧縮強度推定方法の提案，同上，pp.1917-1922, 2004.7

8) 森濱和正ほか：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究報告書(3)，土木研究所・10 機関の共同研究，pp.Ⅵ.2-1～2, 2005.1

9) 佐藤文則ほか：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定精度に関する一考察，土木学会第 59 回年次学術講演会第 V 部，pp. 305-306, 2004.9

10) 森濱和正ほか：超音波法によるコンクリートの品質評価，弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ 61，pp. 273-280, 2004.8