

論文 構造体コンクリートの超音波法による緻密性の評価

森濱 和正*1

要旨: 新設鉄筋コンクリート構造物を、非破壊・微破壊試験によって直接検査する方法について検討している。今回は超音波法を用いて、耐久性に大きな影響を及ぼすコンクリート表層の緻密性評価について検討した結果を報告する。検討した方法は、コンクリート内部の音速分布を推定し、その音速分布と耐久性の指標である吸水率との関係を求めた。その結果、耐久性の評価が可能であることを明らかにした。

キーワード: 構造体コンクリート, 非破壊試験, 耐久性評価, 超音波法, 音速分布

1. はじめに

新設鉄筋コンクリート (RC) 構造物が要求性能を満足していることを確認するために、施工時の中間あるいは竣工時の検査は重要である。ところが、検査の現状は、構造体の品質を検査していないため、新設 RC 構造物の性能を確認するものとはなっていない。筆者らは、新設 RC 構造物を非破壊・微破壊試験によって検査し、維持管理にも役立つ方法を提案するために、さまざまな検討を行い¹⁻⁵⁾、鉄筋のかぶり厚さ⁴⁾や、コンクリート強度の検査方法⁵⁾を提案してきた。

RC 構造物にとって最も問題になっているのは耐久性であり、新設時に耐久性が評価できることが望まれている。筆者らは、既に超音波法による耐久性評価の可能性について報告しているが⁶⁾、まだ定性的な評価に限られており、今回、構造体コンクリートの耐久性の検査方法を確立することをめざし、検討した結果について報告する。

耐久性には多くの項目がある。ここでは、RC 構造物の耐久性にとって最も期待されている鉄筋の腐食に対する抵抗性の評価を対象とする。鉄筋腐食の主要な原因は、コンクリートの中性化と塩化物イオンの拡散である。そのため、鉄筋の腐食抵抗性を評価するには、二酸化炭素や塩化物イオンのコンクリート内への浸透・拡散の抵抗性を確認する必要がある。

腐食促進物質のコンクリート内への浸透・拡散抵抗性を確保するためには、かぶり厚さの確保とコンクリート表層が緻密であることが必要であり、ここでは後者の緻密性について超音波法を用いて評価する方法の検討について報告する。

2. 緻密性試験方法の問題点

緻密性を評価する主な試験方法は、表-1のとおりである⁶⁾。これまで、多くの場合、電気泳動法などによる塩化物イオンの拡散係数や、促進中性化試験による中性化速度の試験が行われている。

しかし、構造体コンクリートの耐久性を検査するために、標準コアを採取してこれらの試験を行う場合、損傷が大きいこと、結果が得られ

表-1 耐久性評価試験方法の比較⁶⁾

区分	試験方法	評価対象	不均質性	精度
非破壊	超音波	緻密性	○	今後、検討が必要
	衝撃弾性波			
	トレント法	透気性		
	電磁波レーダ	塩化物イオン量		
微破壊	ボス供試体	中性化、塩化物イオンのモニタリング	×	○
	ドリル法	中性化深さ		○
		塩化物イオン量		△
		透気・透水		△
小径コア	中性化深さ、塩化物イオン量	○		
破壊	標準コア	各種試験		(基準)

*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 総括主任研究員 (正会員)

るまでに長時間を要するなどの問題があることから、実質的には検査に用いることはできない。

微破壊試験による同様の試験も検討されているが、損傷を小さくすることはできるものの、試験時間の問題を解決することはできない。ドリル法による透気・透水試験は、比較的短時間で試験できるが、含水率の影響が大きいなどの問題がある。

最近、非破壊試験方法も研究されている。しかし、後述する超音波法以外の非破壊・微破壊・破壊試験方法は、ある一定長さのコンクリートは均一であることを仮定している。ところが、構造体コンクリートの耐久性は、表層コンクリートの耐久性能が重要な役割を果たすが、表層コンクリートは、一般には、表面に近いほど品質は劣っていることが知られており⁷⁾、均一ではない。そのため、表層の緻密性の評価は、不均

質性を評価することが重要である。

3. 超音波法による緻密性の評価方法

筆者らが提案している超音波法による緻密性の評価は、コンクリート内部の音速分布を推定することによって行う方法である。音速分布の推定方法は、既に文献 2), 6)などで報告しており、ここでは割愛する。この方法により図-1のようにコンクリート内部の音速分布を推定することができる。図中の曲線および直線が推定した音速分布であり、プロットはコアの半径方向の音速測定結果である。表面の音速 V_0 は遅く、内部ほど速いが、しだいに音速は一定になる。音速分布の推定では、表面音速 V_0 、一定音速(内部一定音速 V_1)とそこまでの距離 h_1 を求める。

これまでは、音速分布が緻密性を表していることを確認するために、コアを採取して薄く輪

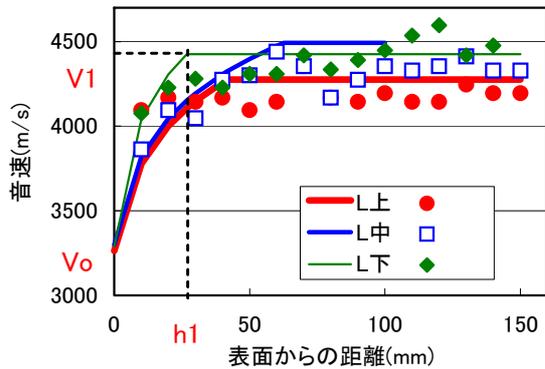


図-1 コンクリート内部の音速分布⁹⁾

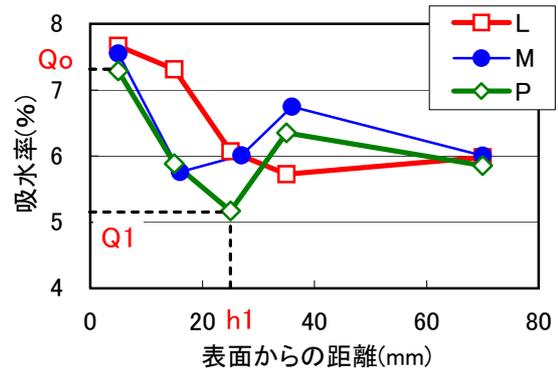


図-2 コンクリート内部の吸水率分布⁹⁾

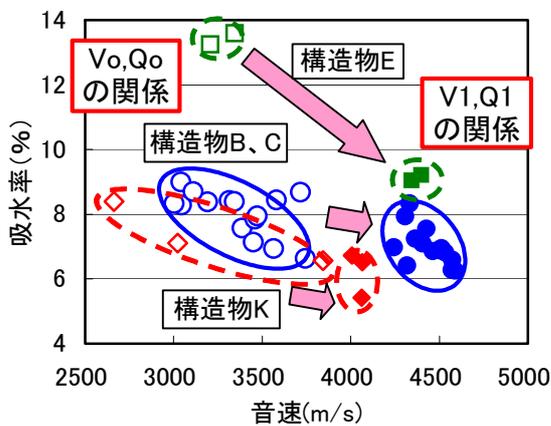


図-3 音速と吸水率の関係⁹⁾

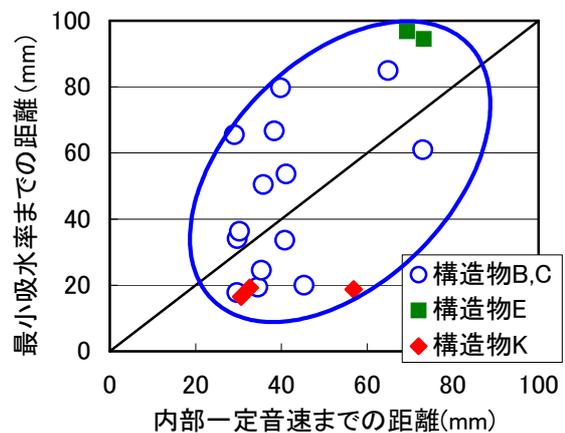


図-4 内部一定音速位置と最小吸水率位置の関係⁹⁾

切りにした両面の顕微鏡による気泡分布の測定⁸⁾や、吸水率⁶⁾、細孔量⁶⁾の測定結果と音速の関係を求め、両者には相関関係があり、音速と緻密性には密接な関係があることを明らかにしている。

例えば、音速分布(図-1)の V_0 、 V_1 、 h_1 と、吸水率分布(図-2)から表面の切片の吸水率(表面吸水率) Q_0 、吸水率が最も小さい最小吸水率 Q_1 、最小吸水率までの距離 h_1 の関係を求めると、図-3および図-4のような関係が得られる⁹⁾。音速と吸水率の関係は、音速が速いと吸水率は小さくなる。内部一定音速までの距離 h_1 と最小吸水率までの距離 h_1 の関係もおおよそ同じ位置に対応しているようである。しかし、図-3の音速と吸水率の関係は、構造物によってかなり異なっている。配合条件、養生条件の違いなどの影響を受けていることが考えられることから、それらの関係を求めることとした。

4. 各種条件下における音速と緻密性の関係

4.1 実験方法

これまで測定してきた多くの供試体の測定結果^{2),6),9)}から、セメントの種類、養生条件、経時変化を測定しているものを抽出し、音速分布に関する指標 V_0 、 V_1 、 h_1 と、吸水率分布に関する指標 Q_0 、 Q_1 、 h_1 の関係を求めた。

4.2 実験に用いた供試体の概要

実験は、壁状の供試体を用いて2回行なった。

1回目の供試体は、高さ1.8m、幅2.55m、厚さは上が0.28m、下が0.65mの台形状の断面である。コンクリートは、普通ポルトランドセメント(N)を用い、呼び強度は18、27、40の3種類である。

以下、コンクリートの種類を、セメントの種類と呼び強度でN18のように示す。配合を表-2に示す。養生は、7日間湿布養生を行なった。

2回目の供試体は、高さ1.5m、幅2.0m、厚さ0.3mである。コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用い、呼び強度は18、24と、高炉セメントB種(B)を用い、呼び強度24の3種類である。配合を表-2に示す。養生は、3日間湿布養生を行なった。

2回とも、音速の測定は、供試体高さの中間付近を水平に測線をとった。測線は最大1000mmとし、探触子中心間隔400mmまでは50mmずつ増やしながらか超音波伝搬時間を測定し、それ以上は100mmずつ増やしながらか測定した。

吸水率測定のためのコア採取は、音速測定を中心付近で行なった。コアは $\phi 100\text{mm}$ であり、10mm程度の厚さに輪切りにし、吸水率を測定した。

4.3 実験結果

音速分布に関する指標 V_0 、 V_1 、 h_1 、吸水率分布に関する指標 Q_0 、 Q_1 、 h_1 と材齢の関係を図-5および図-6に示す。

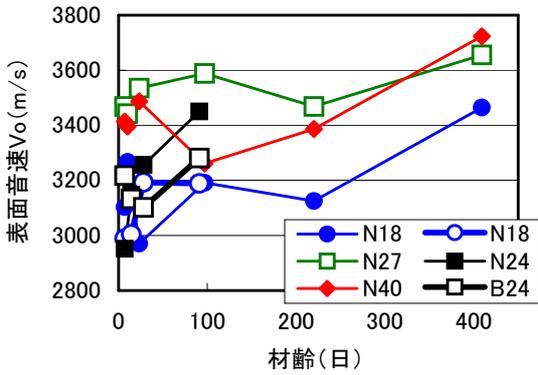
図-5の音速分布について、(1)図の表面音速 V_0 と材齢の関係より、 V_0 は、材齢の進行に伴いわずかに速くなる傾向にあること、また、呼び強度が大きい(水セメント比が小さい)ほど速くなる傾向にあるようであるが、それほど明確ではない。 V_0 は、主に探触子間隔が短いときの伝搬時間から求められるため、バラツキが大きいものと考えられる。

内部一定音速 V_1 は、(2)図のとおり材齢の進行とともに速くなること、呼び強度が大きくな

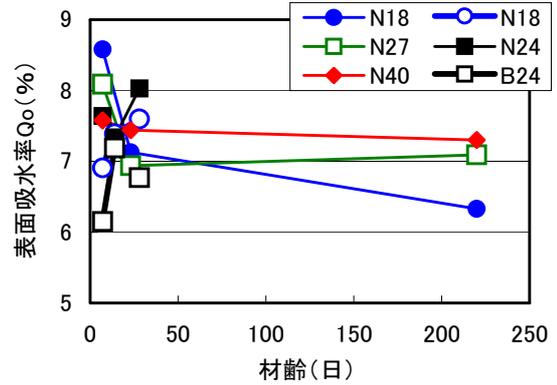
表-2 コンクリートの配合

実験	セメントの種類	呼び強度	粗骨材の最大寸法	スラブ ^o (cm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)				
								水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
1回目の実験	N	18	25mm	8	4.5	63.0	44.9	158	251	824	1026	2.69
		27						158	320	771	1023	3.42
		40						159	419	696	1015	4.48
2回目の実験	N	18	20mm	8	4.5	67.0	44.9	160	239	849	1049	2.55
		24						157	274	813	1065	2.92
	B	24		8	4.5	56.5	43.6	153	271	818	1065	2.89

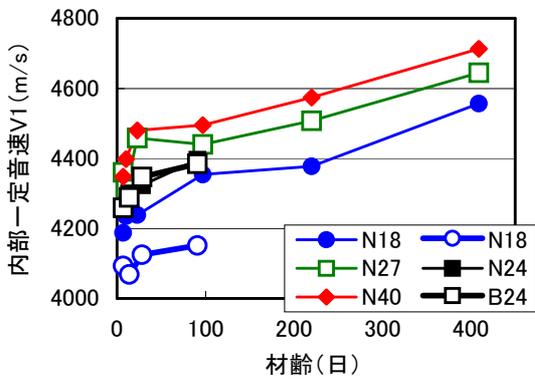
注) 凡例の左が1回目, 右が2回目



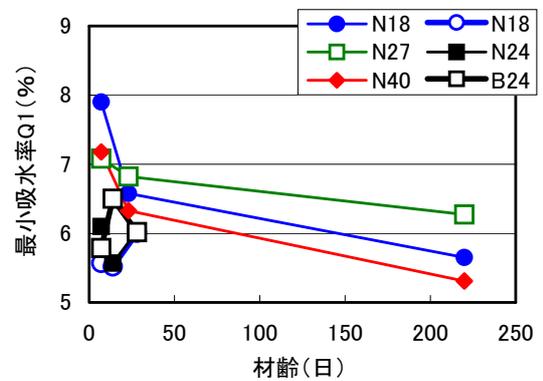
(1) 表面音速 V_o と材齢の関係



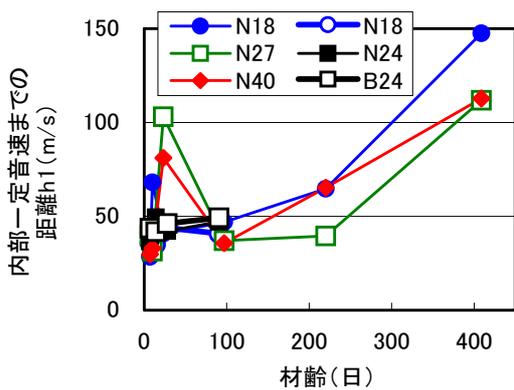
(1) 表面吸水率 Q_o と材齢の関係



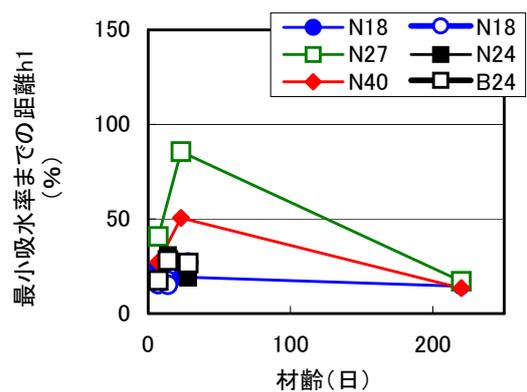
(2) 内部一定音速 V_1 と材齢の関係



(2) 最小吸水率 Q_1 と材齢の関係



(3) 内部一定音速までの距離 h_1 と材齢の関係



(3) 最小吸水率までの距離 h_1 と材齢の関係

図-5 音速分布に関する指標 V_o , V_1 , h_1 と材齢の関係

図-6 吸水率分布に関する指標 Q_o , Q_1 , h_1 と材齢の関係

るほど速くなっており、コンクリートの品質をよく表している。V1は、主に探触子間隔が広く、何点も測定した結果から求められるため、比較的安定した結果が得られるものと考えられる。

(3) 図の内部一定音速までの距離 $h1$ は、材齢の進行に伴い大きくなる傾向があるようである。

図-6の吸水率分布は明確な関係はわかりにくいため、図-7のように音速との関係で表した。

(1) 図の表面音速 V_0 と表面吸水率 Q_0 は、呼び強度によって V_0 の変化はあるものの、 Q_0 との関係は不明である。

(2) 図の内部一定音速 $V1$ と最小吸水率 $Q1$ の関係は、 $Q1$ が小さくなるほど $V1$ は速くなる傾向があり、 $V1$ は緻密性を表している。呼び強度による $Q1$ の違いはほとんどないが、 $V1$ は呼び強度が大きいほど速くなっている。

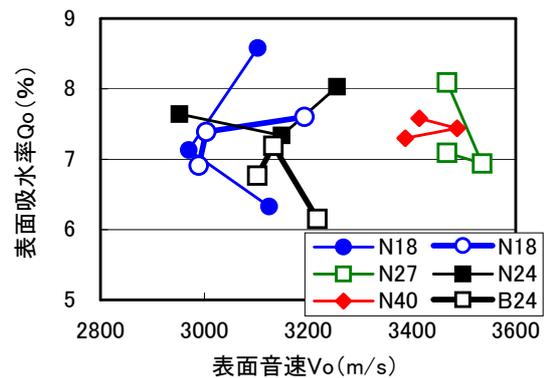
(3) 図の内部一定音速までの距離と最小吸水率までの距離は、後者が小さい傾向はあるが、ほぼ相関関係があることがわかる。

4.4 水セメント比と内部一定音速の関係

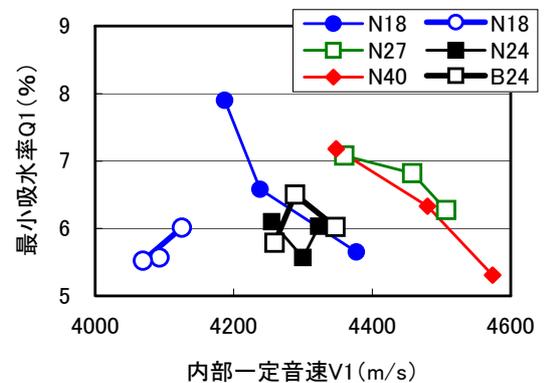
以上の結果より、表層の音速と吸水率の明確な関係は得られなかったものの、内部一定音速 $V1$ は緻密性を表していることがわかった。そこで次に水セメント比と $V1$ の関係を材齢ごとに表すと図-8のようになる。

水セメント比と $V1$ の関係は、材齢ごとに明確な相関関係があることがわかる。水セメント比が大きくなると直線関係からはずれる傾向があるため、2回目のN18 (W/C=67%)を除いて一次回帰したときの回帰係数と寄与率 r^2 を表-3に示す。表-3のとおり、傾きは、材齢4週はやや大きいものの、そのほかの材齢はほぼ同じである。傾きがほぼ同じであるため、Y切片は材齢に伴い大きくなっている。寄与率は、1週がやや小さいものの、それでも0.7以上である。そのほかの材齢では0.9以上と、非常に高い。

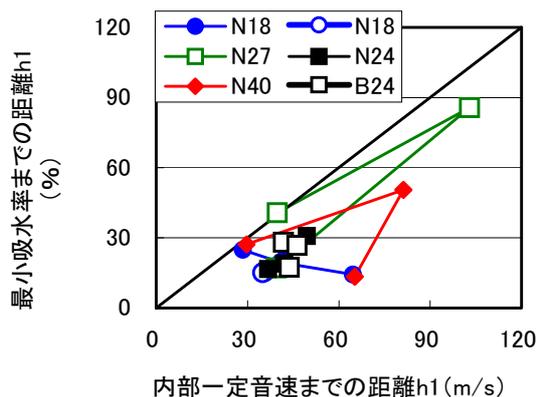
塩化物イオンの拡散係数、中性化速度係数などは、水セメント比と強い相関関係があることはよく知られていることである。水セメント比と $V1$ に強い相関関係があるということは、 $V1$



(1) 表面音速 V_0 と表面吸水率 Q_0 の関係



(2) 内部一定音速 $V1$ と最小吸水率 $Q1$ の関係



(3) 内部一定音速までの距離と最小吸水率までの距離の関係

図-7 音速分布の指標と吸水率分布の指標の関係

によって耐久性も評価できるものと考えられる。

実際に文献 6)でも、音速分布によって塩分浸透深さや中性化深さをある程度推定できることもわかっており、今回、材齢ごとに水セメント比と V1 の間に高い相関関係があることがわかったことから、構造体コンクリートをどの材齢で検査しても耐久性を評価できることを示している。

5. まとめ

筆者らの提案する超音波法によってコンクリート内部の音速分布を推定し、耐久性を評価することができないか検討した。その結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 音速分布と、緻密性の指標値として吸水率の関係を求めると、呼び強度ごとに内部一定音速 V1 と比較的高い相関関係があることがわかった。
- (2) 水セメント比と V1 の関係を測定材齢ごとに求め、非常に高い相関関係があり、しかも傾きがほぼ一定で、切片は材齢に伴い大きくなる傾向があり、耐久性評価に適用可能である。
- (3) Qo と Vo については、明確な関係が得られなかった。ただし、(2)のとおり V1 と水セメント比は高い相関関係があることから、表層の耐久性が劣っている部分も音速分布によって評価できるのではないかと考えられる。今後の検討課題としたい。

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

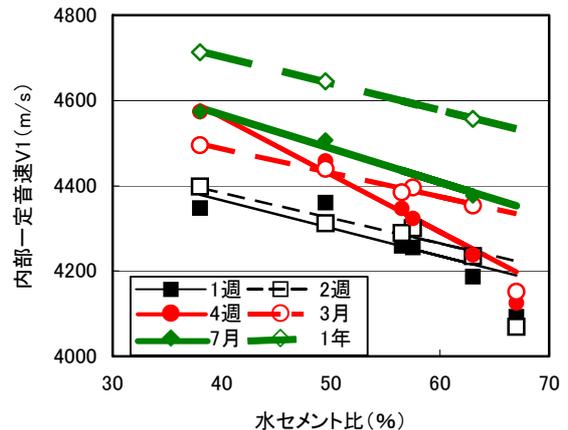


図-8 水セメント比と内部一定音速の関係

表-3 水セメント比と V1 の回帰結果

材齢	傾き	切片	r ²
1 週	-6.53	4627	0.761
2 週	-5.94	4621	0.942
4 週	-13.45	5099	0.984
3 箇月	-5.65	4713	0.983
7 箇月	-7.93	4884	0.952
1 年	-6.25	4952	0.999

- 4) 中村英祐ほか：鉄筋径を利用した非破壊試験による比誘電率分布とかぶりの推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp. 1801-1806, 2005.6
- 5) 森濱和正ほか：構造体コンクリートの非破壊・微破壊試験による強度検査に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp. 1931-1936, 2006.7
- 6) 森濱和正ほか：超音波法によるコンクリート品質の評価，コンクリート工学，Vol.44, No.5, pp.35-40, 2006.5
- 7) 例えば，湯浅昇ほか：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，第 509 号，pp.9-16, 1998.7
- 8) 森濱和正ほか：コンクリート表層の凍結融解抵抗性の評価 その 1 表面からの距離と空気量，気泡間隔係数，その 2 音速分布と空気量，気泡間隔係数の関係，第 60 回セメント技術大会講演要旨，pp.102-103, pp.124-125, 2006.5
- 9) 森濱和正：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超音波法 その 12 音速分布による緻密性の評価，日本非破壊検査協会，平成 18 年秋季大会講演概要集，pp.133-136, 2006.10