

平成24年度

非破壊試験によるコンクリートの品質検査に関する基礎的検討

(独) 土木研究所寒地土木研究所耐寒材料チーム ○水田真紀
吉田 行
田口史雄

コンクリートの品質に及ぼす施工の影響を把握し、出来上がりコンクリートの品質検査方法の確立を目的として、超音波法と表層透気試験 (Torrent法) の2種類の非破壊試験方法の品質検査方法としての適用性を検討した。各試験を実施したコンクリート供試体では、品質に影響する外的要因として養生条件、内的要因として配合条件 (セメント種類とW/C) を考慮した。その結果、いくつかのケースで、養生や配合条件に影響された品質の相違を確認することができ、本研究で検討した2種類の非破壊試験方法でコンクリートの品質を評価できる可能性があることが示唆された。

キーワード：長寿命化、品質検査、透気係数、超音波伝播速度

1. はじめに

表-1 供試体一覧

コンクリート標準示方書 (施工編)¹⁾ で規定されているように、コンクリートに求められる基本的な品質には、均質性、ワーカビリティ、強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性等がある。そして、コンクリート構造物の要求性能が満足されるためには、これらの品質が保証されていることが不可欠である。このように、コンクリートの品質は、構造物の要求性能を満たす絶対条件であり、建設物が設計で規定した性能を保有していることを竣工時に検証するシステムの確立が望まれている。このような背景を鑑み、およそ10年前から、土木学会で、コンクリートの表層品質を定量評価する研究活動が始まり、一定の成果²⁾を上げている。

そこで本研究では、コンクリートの品質に及ぼす施工の影響を把握し、出来上がりコンクリートの品質検査方法の確立を目的として、超音波法と二重チャンバー方式の表層透気試験 (Torrent法) の2種類の非破壊試験方法について、品質検査方法としての適用性を検討した。そして、各試験方法が、養生条件および配合条件の異なるコンクリートの品質をどの程度評価することができるかを確認した。

2. 試験概要

(1) 試験計画

本研究では、コンクリートの品質に影響を与える要因

供試体名	セメント種類	W/C	養生温度	養生条件
N50-20S5	普通ポルトランドセメント (S)	50%	20°C	湿布5日
N50-20W				水中28日
N50-5S5			5°C	湿布5日
N50-5S7				湿布7日
N50-5W				水中28日
N45-20S3		45%	20°C	湿布3日
N45-20S5				湿布5日
N45-20W			5°C	水中28日
N45-5S5				湿布5日
N45-5S7				湿布7日
N45-5W	水中28日			
B50-20S7	高炉セメント B種(B)	50%	20°C	湿布7日
B50-20W				水中28日
B50-5S7			5°C	湿布7日
B50-5S12				湿布12日
B50-5W				水中28日
B45-20S5		45%	20°C	湿布5日
B45-20S7				湿布7日
B45-20W			5°C	水中28日
B45-5S7				湿布7日
B45-5S12				湿布12日
B45-5W	水中28日			

として、内的要因と外的要因の2種類を考慮し、実験を計画した。内的要因はコンクリート配合条件として、セ

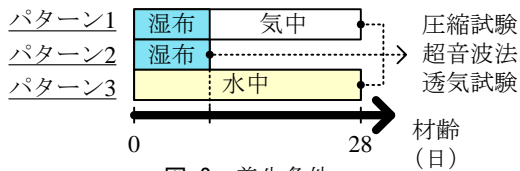


図-2 養生条件

表-2 コンクリート配合

シリーズ	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP1 (C%)	SP2 (C%)
				W	C	S	G		
N50	N	50	44	145	290	844	1077	0.15	0.0075
N45		45			322	832	1072	0.25	0.0052
B50	B	50	44	145	290	840	1074	0.15	0.0095
B45		45			322	827	1057	0.20	0.0093

※SP1 : AE減水剤 (リグニンスルホン酸塩系)

SP2 : AE剤 (樹脂酸塩系)

表-3 使用材料の物理特性

材料	物理特性
セメント	普通ポルトランドセメント (N) : 密度3.16g/cm ³ 、比表面積3,340cm ² /g
	高炉セメントB種 (B) : 密度3.05g/cm ³ 、比表面積3,750cm ² /g
骨材	細骨材 (S) : 苫小牧樽前産海砂 除塩済み、密度2.67g/cm ³ 、吸水率0.87%、粗粒率2.85
	粗骨材 (G) : 小樽見晴産砕石 密度2.68g/cm ³ 、吸水率1.45%、最大骨材寸法25mm

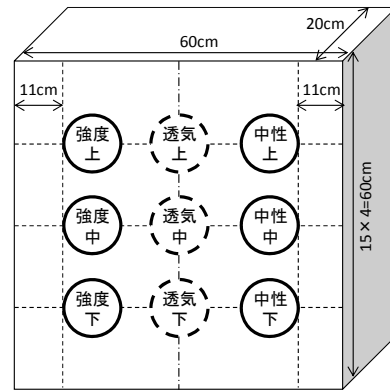


図-3 コア採取位置

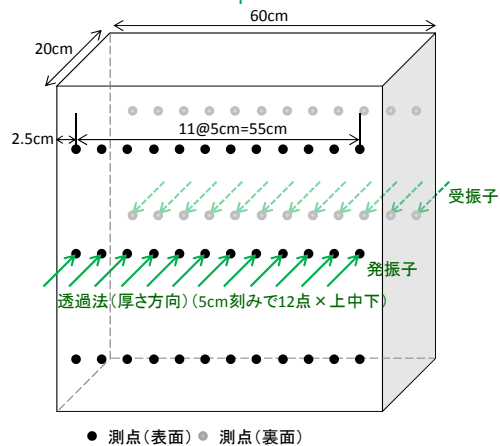
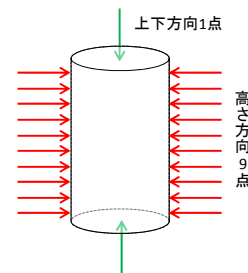


図-4 超音波伝播速度の測定

メント種類 (普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種) と水セメント比 (以下、W/C) を取り上げた。そして、外的要因は養生条件とし、各要因を適宜組み合わせた供試体を製作した。すべての供試体名とともに、内的および外的要因の組み合わせを表-1に示す。ここで、供試体名は、セメント種類、W/C、養生温度、養生条件の順に記号を並べて表している。

図-2に、養生方法と各測定項目の組み合わせパターンを示す。パターン1では、設定した日数の湿布養生後、材齢28日まで気中養生し、各種試験を行った。そしてパターン2では設定した日数の湿布養生後、さらにパターン3では28日間の水中養生後、すぐに各種試験を実施した。したがって、パターン3では、各種試験を実施するときのコンクリートは飽水状態である。さらに、パターン1および3では、材齢28日に各種試験を行い、パターン2では、供試体毎に材齢が異なる。

(2) 供試体作製

供試体は、形状と寸法の異なる3種類とし、円柱供試体φ10×20cm、壁状供試体幅60×高さ60×奥行20cm、角柱供試体20×20×20cmとした。ここで、脱型時期は、20℃養生ではセメント種類に拘らず材齢1日、5℃養生では普通セメントで材齢2日、高炉セメントで材齢3日とし、封緘状態で静置した。ただし、壁状供試体のみ、普通セメントでは養生温度に拘らず材齢2日、高炉セメントでは20℃養生で材齢3日、5℃養生で材齢4日とした。よって、湿布養生あるいは水中養生の期間は、脱型までの封緘状態の期間を含んでいる。また、脱型後の湿布養生期間については、コンクリート標準示方書 (施工編)¹⁾の湿潤養生期間の標準を参考に、3、5、7、12日から選定した。

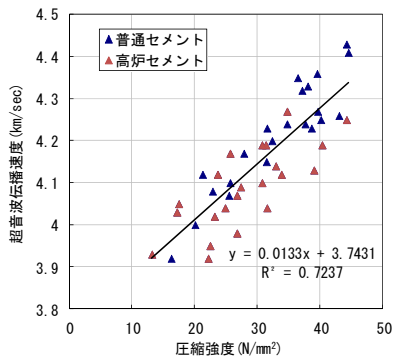


図-5 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

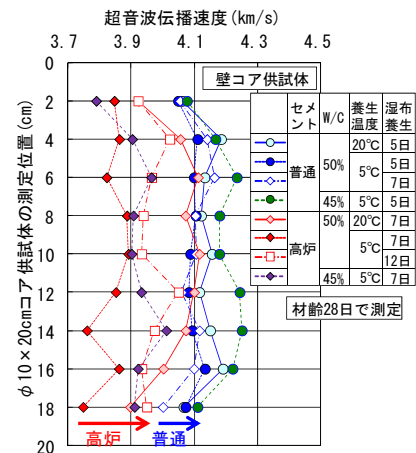


図-7 供試体表面と内部の品質の違い

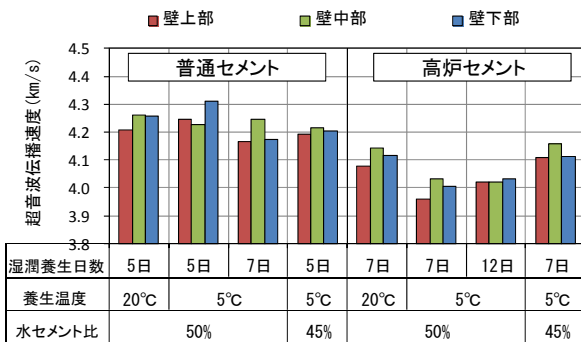


図-6 供試体高さ方向の品質の違い

した。供試体の形状毎の測定箇所を図-4に示す。

c) 透気係数

非破壊でコンクリート表層の透気性を評価するため、二重チャンバー方式の表層透気試験 (Torment法)³⁾ を行い、透気係数を測定した。本試験は、壁状供試体と角柱供試体について実施した。この方法によれば、シングルチャンバー法で課題であった、コンクリートのごく表層にある脆弱層の影響を排除できるとされている。

(3) コンクリート配合

コンクリートの配合を表-2に、使用したセメントと骨材の物理特性を表-3に示す。単位水量を一定とし、W/Cは50%と45%の2水準として配合を決定した。また、目標とするスランプと空気量をそれぞれ $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、 $4.5 \pm 1.0\%$ とし、すべての配合のコンクリートで同程度のワーカビリティが得られるように表-2に示す量のAE減水剤とAE剤を添加した。

(4) 測定項目

本研究では、超音波伝播速度と透気係数を測定するため、2種類の非破壊試験を実施した。さらに、コンクリートの圧縮強度を得るための破壊試験も行った。各試験の概要を以下に説明する。

a) 圧縮強度

円柱供試体 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ と壁状供試体から採取したコア供試体 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ について、JIS A 1108に準拠した圧縮強度試験を実施した。そして、円柱供試体では3本の平均値を圧縮強度とし、壁状供試体では図-3に示す部位毎の圧縮強度を測定した。

b) 超音波伝播速度

円柱供試体 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ と壁状供試体から採取したコア供試体 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ に対して、発振子と受振子で試料を挟む透過法によって超音波伝播速度を測定した。また、壁状供試体については、コア採取前、供試体の高さ3水準に対する厚さ (20cm) 方向の超音波伝播速度を測定

3. 結果および考察

(1) 超音波法によるコンクリート品質の評価

本節では、各コンクリート供試体について、透過法による超音波伝播速度を測定した結果を考察した。

a) 圧縮強度との関係

図-5に、超音波伝播速度と圧縮強度の関係を示す。ここで、超音波伝播速度は図-4に示す圧縮載荷方向の結果であり、圧縮強度は壁状供試体から採取したコア供試体を除く、すべての円柱供試体から得られた結果である。また、図-2に示す時期に両試験を行ったため、供試体によって材齢、含水状態が異なっているが、超音波伝播速度結果に対して含水率の補正を行っていない。

図より、本研究で想定した配合条件と養生条件の範囲内では、圧縮強度と超音波伝播速度の間には良い相関が見られた。したがって、本研究で想定した配合条件と養生条件の範囲内であれば、コンクリートの基本的品質の一つである圧縮強度を、透過法で測定した超音波伝播速度から推定することは可能であると考えられる。

b) 供試体高さ方向の品質の違い

高さ方向の超音波伝播速度の違いを把握するため、壁状供試体の各位置 (上、中、下) の結果を比較した。セメント種類毎に、配合条件、養生条件とともに図-6に示す。ここで、全ての結果は材齢28日での測定値である。

図より、普通セメントを使用した場合、配合条件、養

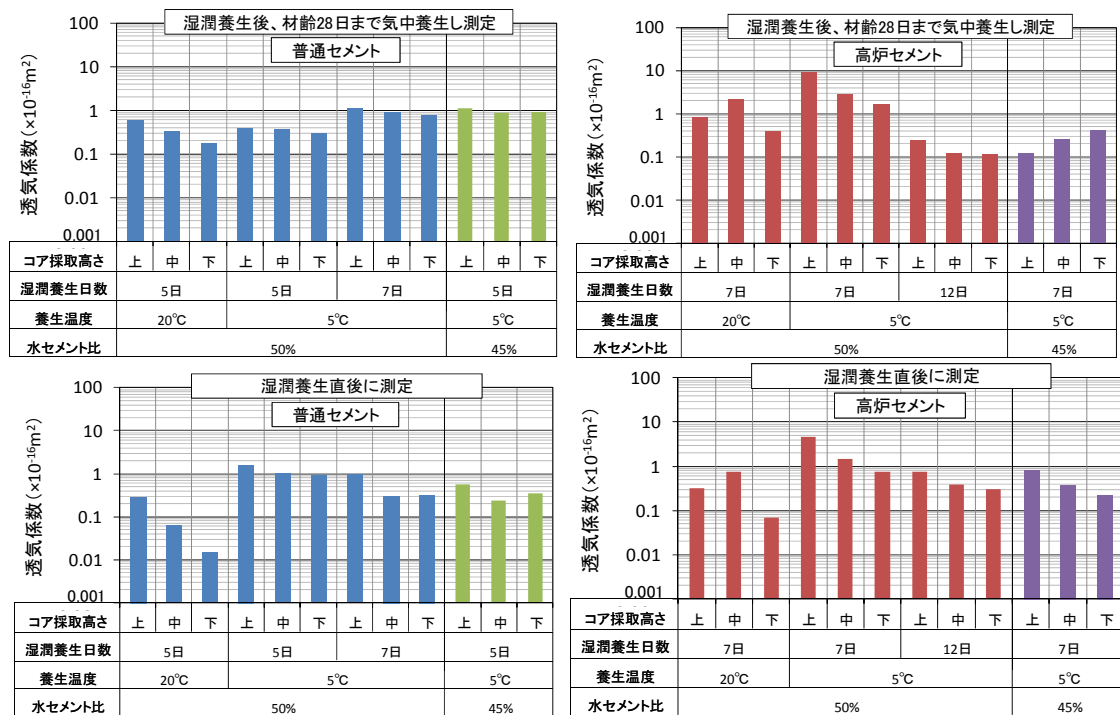


図-8 壁状供試体の透気係数

生条件の違いは明確にならなかった。これは、圧縮強度と比較し、超音波伝播速度の発現傾向は早いとの報告⁴⁾があり、配合条件や養生条件の違いが明確な差として生じなかったと考えられる。一方、高炉セメントを用いた場合、養生温度が高いほど、あるいはW/Cが低いほど、超音波伝播速度が速くなった。これは、高炉セメントの硬化過程に関する研究⁹⁾も精力的に行われているが、高炉セメントの場合、水和物相組成や空隙構造が普通セメントの水和反応で形成されるものと大きく異なっているためと推察される。このため、長期強度発現性が良好な高炉セメントを用いたコンクリートの場合、材齢28日までの超音波伝播速度は、配合や養生条件の違いを反映する可能性があり、今後さらに、測定時期を考慮した超音波法による品質評価方法を検討していく必要がある。

次に、各供試体の高さ方向の超音波伝播速度を比較すると、壁上部、つまり打設面に近い方が壁中部や下部と比べて超音波伝播速度が小さくなる傾向が見られた。また、この傾向は、いずれのセメントを用いた場合も同様であった。このような供試体高さ方向の超音波伝播速度の違いは、コンクリートの構成材料の比重差により、ブリーディングが生じた影響が表れたものと考えられる。つまり、コンクリートの超音波伝播速度はセメントペーストよりも速いとの既往の研究結果⁷⁾にあるように、ブリーディングにより骨材が沈降し、上部の骨材量が少なくなったことによるものと考えられる。

c) 供試体表面と内部の品質の違い

図-7に、壁状供試体から水平方向に採取したコア供試体に対して、直径方向に透過した超音波伝播速度の結果

を示す。ここで、図のy軸の0および20cmは壁状供試体表面（型枠面）に対応している。

図より、セメント種類、配合条件、養生条件に拘らず、超音波伝播速度は表面近くで最も遅くなり、内部になるほど速くなる傾向があった。つまり、供試体内部と表面でコンクリートの品質が異なることが分かった。本研究で検討したコンクリートの超音波伝播速度は圧縮強度と相関があったこと、さらに、音波伝播速度が遅くなる範囲が、コンクリートの乾燥が圧縮強度に及ぼす影響を検討した既往の研究結果⁸⁾とほぼ同程度であったことから、乾燥による品質低下を超音波法で評価できると考えられる。

(2) 透気係数による評価

本節では、各コンクリート供試体について、表層透気試験を実施した結果を考察した。

a) 供試体高さ方向の品質の違い

図-8に壁状供試体の透気係数について、配合条件、養生条件とともに示す。ここで、上図は所定期間の湿潤養生後に材齢28日まで気中養生を行い、透気係数を測定した結果、下図は所定の期間、湿潤養生を行った直後に測定した結果であり、供試体の表裏1点ずつ、計2点の平均値を示している。また、透気係数の算出では、含水率の補正を行っていない。

図より、いくつかの供試体に例外はあるものの、全体的には供試体上部より下部の方が透気係数が小さくなり、高さ方向の傾向を捉えることができた。これは、ブリーディングにより、供試体上部の空隙量が多くなった影響

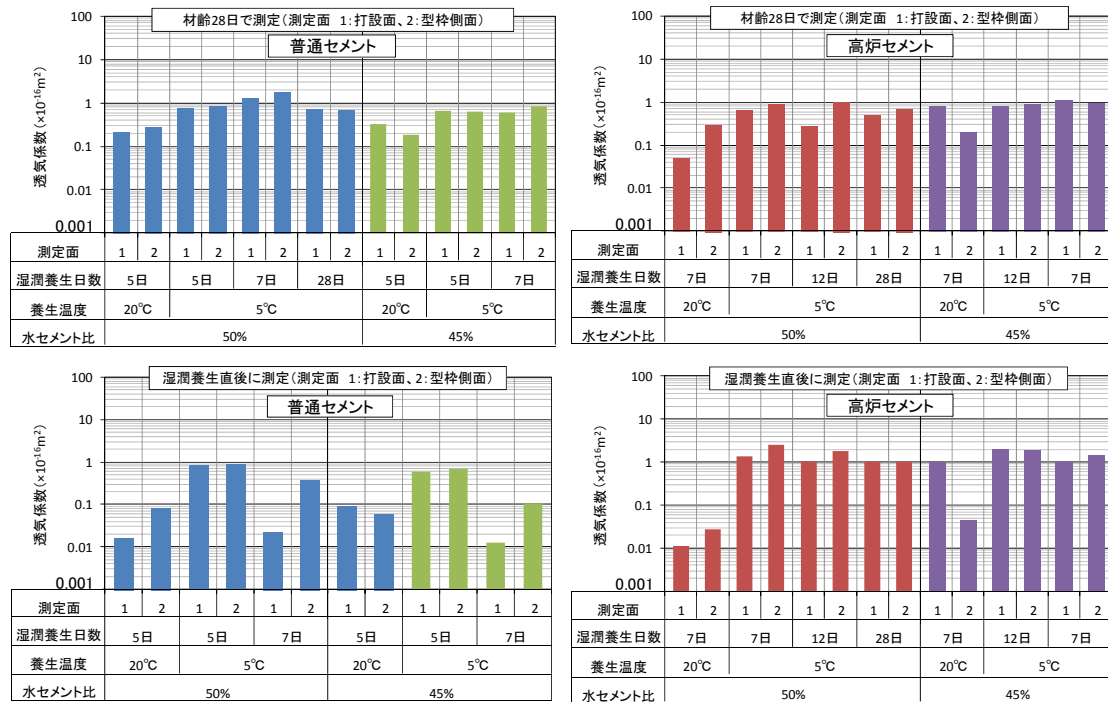


図-9 角柱供試体の透気係数

を受けたものと考えられる。

次に、養生条件、配合条件の違いによる影響を見てみると、普通セメントを用いた場合については、材齢28日の測定結果（上図）に明確な差はなかったが、湿布養生直後（下図）では養生温度が高いほど、湿布養生期間が長いほど、W/Cが小さいほど、透気係数が小さくなる傾向が見られた。一方、高炉セメントを用いた場合、同様の傾向が、湿布養生直後（下図）だけでなく材齢28日（上図）でも観察された。

以上より、普通セメントあるいは高炉セメントを配合したコンクリートの場合、材齢28日までに透気係数を測定すれば、表層部コンクリートの養生による影響を評価できる可能性がある。

b) 測定面の違いによる影響

角柱供試体20×20×20cmについての透気係数の結果を図-9に示す。ここでは、打設面と型枠側面の2面に対して、表面透気試験を実施した。なお、上図は所定期間の湿布養生後に材齢28日まで気中養生を行い、透気係数を測定した結果、下図は所定の期間、湿布養生を行った直後に測定した結果であり、いずれも2個の角柱供試体の平均値である。また、透気係数の算出では、含水率の補正を行っていない。

材齢28日の測定結果である上図によると、測定面の違いが与える影響は小さいと考えられる。前項の結果より、打設面での測定はブリーディング等の影響を受けると考えられるが、ここで検討した角柱供試体の高さが、壁状供試体に比べて小さかったため、測定面による差があまり生じなかったと推察される。また、養生条件、配合条

件による影響を見ると、いずれのセメントの場合でも、養生温度が高いほど透気係数が小さくなったが、他の条件の違いによる影響は明確にはならなかった。

次に、湿布養生直後に測定した結果である下図によると、上図の結果よりも、特に普通セメントを用いた場合で測定面の違いが大きくなった。そこで、型枠面の測定結果に着目すると、普通セメントを配合したコンクリートの場合、養生温度が高いほど、湿布養生期間が長いほど、W/Cが小さいほど、透気係数が小さくなる傾向が観察された。一方、高炉セメントの場合には、湿布養生期間、W/Cによる影響は見られず、養生温度による影響のみが顕著であった。

以上より、測定面の違いは明らかにはならなかったが、前項と同様、普通セメントあるいは高炉セメントを配合したコンクリートでは、材齢28日までに透気係数を測定すれば、表層部コンクリートの養生による影響を評価できる可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの品質に影響を与える要因として、養生条件と配合条件（セメント種類、W/C）を考慮し、各コンクリート供試体に対して、超音波法と表面透気試験を実施した。得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 本研究で想定した養生条件、配合条件の範囲内では、コンクリートの圧縮強度と超音波伝播速度の間には、良い相関が見られた。よって、透過法で測定した超

- 音波伝播速度から圧縮強度を推定することは可能であると考えられる。
- (2) 高炉セメントを用いたコンクリートの場合、材齢28日までの超音波伝播速度は、配合や養生条件の違いを反映する可能性がある。
 - (3) コンクリート表層部の乾燥による品質低下を超音波法で評価できると考えられる。
 - (4) 普通セメントあるいは高炉セメントを配合したコンクリートでは、材齢28日までに透気係数を測定すれば、表層部コンクリートの養生による影響を評価できる可能性がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年度コンクリート標準示方書（施工編），pp.28—41, pp.126-129, pp.126-129, pp.159-166, 2008.3.
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 97「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集」，2012.
- 3) R.J.Torrent : A Two-Chamber Vacuum Cell for Measuring the Coefficient of Permeability to Air of the Concrete Cover on Site, *Materials and Structures*, Vol.25, pp.358-365, 1992.
- 4) 坂詰和子，十代田知三，勝畑恭一：コンクリート中の超音波伝播速度に影響する因子—材令および乾湿条件（養生／試験時）—，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），No.1524, pp.1047-1048, 1995.8.
- 5) 坂井悦郎，井元晴丈，大門正機：高炉セメント硬化体の相組成と強度発現性，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.135-140, 2004.
- 6) 佐川孝広，石田哲也，Yao LUAN，名和豊春：高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性，土木学会論文集E，Vol.66, No.3, pp.311-324, 2010.9.
- 7) 勝畑恭一，十代田知三，西澤英樹：コンクリート中の超音波伝播速度に影響する因子—骨材の有無および分布—，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），No.1422, pp.843-844, 1994.9.
- 8) 湯浅 昇，笠井芳夫，松井 勇：構造体コンクリートの表層から内部にいたる圧縮強度分布，セメント・コンクリート論文集，No.51, 論文 144, pp.840-845, 1997.