

論文 蒸気養生時における凝結硬化中のコンクリートの強度推定に関する基礎的研究

阪口 裕紀*1・小澤 満津雄*2

要旨: プレキャストコンクリート製品の製造には、一般的に蒸気養生が行われている。蒸気養生を行ったコンクリートの初期強度発現を予測し、適切な脱型時期を定めることが重要である。本研究では、蒸気養生時における凝結硬化中のコンクリートの強度推定を行うことを目的として、温度変化を与えたモルタルおよびコンクリートの凝結硬化中の超音波伝播速度と圧縮強度の計測を行い、測定結果から圧縮強度の経時変化の推定を試みた。その結果、モルタルやコンクリートの積算温度と超音波伝播速度の関係と実圧縮強度の測定値から凝結硬化中の圧縮強度発現を推定できる可能性が示された。

キーワード: プレキャストコンクリート, 蒸気養生, 超音波伝播速度, 積算温度, 凝結硬化過程

1. はじめに

現在、建設業における課題の一つとして人材不足が挙げられる。国交省は i-Construction の取り組みの一つとしてコンクリート工場の生産性向上を掲げており、建設現場の省力化・効率化および工期短縮を図るため、プレキャストコンクリート（以下、PCa）製品の活用を推進している。PCa 製品の製造には、一般的に蒸気養生が行われている。蒸気養生を行うことによって、材齢初期におけるコンクリートの強度発現を促進し、脱型強度を早期に得ることで、型枠の転用率を上げ、PCa 製品の生産性の向上を図っている¹⁾。ここで更なる生産性向上を図るため、蒸気養生を行ったコンクリートの初期強度発現を予測し、適切な脱型時期を定めることが重要である。蒸気養生を行ったコンクリートの強度発現は、常温時のコンクリートの強度発現とは大きく異なることから、市販の解析ソフトによる温度解析の精度が合わないのが現状である。既往の研究では、セメント系材料の凝結硬化過程における物性の変化を検討²⁾³⁾したもの、超音波伝播速度(以下、US)とコンクリートの圧縮強度との相関性を検討⁴⁾したもの、蒸気養生がコンクリートの強度発現に及ぼす影響を検討⁵⁾したもの、蒸気養生時の水和反応と細孔構造を検討⁶⁾したものおよび積算温度による初期強度を推定する方法⁷⁾などがあるが、蒸気養生中のコンクリートの強度推定を行ったものは少ない。

そこで、本研究では、蒸気養生時における凝結硬化中のコンクリートの強度推定を行うことを目的として、温度変化を与えたモルタルの凝結硬化中の US と圧縮強度の検証を行った。さらに実際の PCa 製品製造工場にて、蒸気養生を行ったコンクリートの凝結試験結果と US の

測定結果から圧縮強度の経時変化の推定を試みた。

2. モルタルを使用した実験

2.1 使用材料および配合

実験に使用したモルタルの配合を表-1、使用材料を表-2に示す。モルタルの配合は、水セメント比を 0.5 とし、セメントの種類は、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を使用した。モルタルの圧縮強度は材齢 3 日時点で 23.3 N/mm²であった。

表-1 モルタル配合

W/C	単位量 kg/m ³					圧縮強度 N/mm ²
	W	C	S1	S2	Ad	
0.5	245	490	736	736	0.49	23.3

表-2 使用材料

C	普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm ³)
S1	佐野市中町産細目砕砂(吸水率1.06%, 絶乾密度2.60g/cm ³)
S2	大間々町小平産砕砂(吸水率1.93%, 絶乾密度2.68g/cm ³)
Ad	高性能減水剤



写真-1 恒温養生槽

*1 丸栄コンクリート工業株式会社 総合技術研究所 技術開発部 (正会員)

*2 群馬大学 理工学府 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

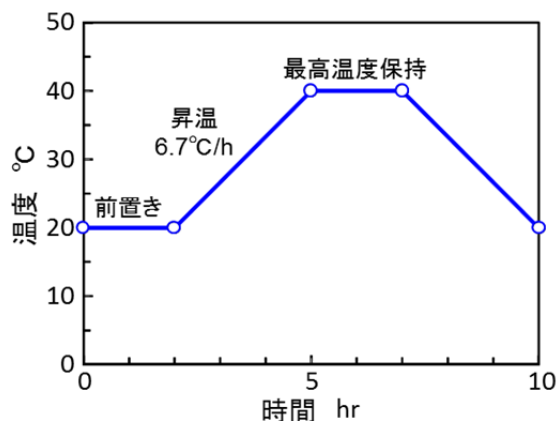


図-1 温度設定パターン

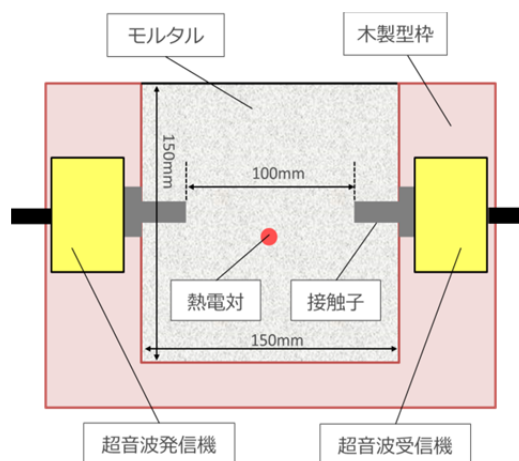


図-2 供試体概要

2.2 養生方法

図-1に蒸気養生の温度設定パターン、写真-1に恒温養生槽を示す。外気温20℃で2時間の前置き養生を行った後、恒温養生槽内を最高温度40℃まで3時間で昇温させ、40℃となった時点から2時間保持させた。その後は自然冷却とした。

2.3 試験方法

図-2に供試体概要を示す。供試体寸法は立方体の150×150×150mmとした。型枠は木製を使用し、供試体中心部に熱電対を設置した。型枠の側面に鋼製ボルトを配置してモルタルとの接触子とした。接触子間の距離は100mmとした。接触子間の距離は温度上昇によって変化することが予想されるが、今回は打設前の距離を基準としてUSを算出した。型枠にモルタルを打設し、接触子に超音波計測用の発信子と受信子を密着させ、接触子間の超音波伝播時間を計測し、接触子間の距離と伝播時間の関係から、凝結硬化中のモルタルのUSを算出した。併せて同形状の型枠にモルタルを打設し、プロクター貫入試験を実施した。貫入抵抗試験より凝結の始発時間と終結時間を推定した。凝結の始発は3.5N/mm²、終結は28N/mm²とした。圧縮強度試験用にφ100×200mmの円柱供試体を作製した。US計測用供試体と貫入抵抗試験用供試体および圧縮強度試験用供試体を恒温養生槽に入れて、温度変化を与えた。US計測、貫入抵抗試験は計測毎に恒温養生槽から供試体を取り出し、計測を行った。得られた圧縮強度と凝結時間およびUSのデータから凝結硬化中の圧縮強度推定式を検討した。本研究で用いた凝結硬化過程での圧縮強度推定式を式(1)、積算温度の算出式を式(2)に示す。式(1)に用いている基準積算温度は、練り混ぜ時ミキサーに水を投入した時間から圧縮強度試験を実施した時間までの積算温度とする。

$$f_c(mt) = \frac{US(mt) - US(mt_{ini})}{US(N) - US(mt_{ini})} \cdot f_c(N) \quad (1)$$

$$mt = \sum \Delta t \times (\theta + 10) \quad (2)$$

ここに

$f_c(mt)$: 積算温度 mt での推定圧縮強度 N/mm²

mt : 積算温度 °C・hr

N : 基準積算温度 °C・hr

mt_{ini} : 凝結始発時の積算温度 °C・hr

$f_c(N)$: 基準積算温度 N の圧縮強度 N/mm²

$US(mt)$: 積算温度 mt の US m/s

$US(mt_{ini})$: 凝結始発時の積算温度 mt_{ini} での US m/s

$US(N)$: 基準積算温度 N 時の US m/s

θ : 供試体温度 °C

t : 経過時間 hr

2.4 実験結果および考察

図-3にUS供試体の内部温度と恒温槽内温度の経時変化を示す。恒温槽内温度が上昇するに伴い、US供試体の内部温度も上昇していることが分かる。供試体内部の最高温度は45℃であった。

図-4に貫入抵抗値の経時変化を示す。貫入抵抗値は、セメントの水和反応が促進して、時間の経過に伴い増加する傾向を示した。凝結の始発時間、終結時間はそれぞれ4.5時間と6.5時間であった。

図-5に材齢初期の積算温度600°C・hrまでのUSと積算温度の関係を示す。積算温度が大きくなるとUSの値は増加する傾向を示した。積算温度100°C・hr付近を変化点として、その後急激にUSの値が増加していることが分かる。一方凝結始発時間4.5時間における積算温度は155°C・hr付近であった。USの変化点と凝結始発点の関係について、内田ら²⁾はセメント系材料が状態変化する点であると報告している。しかし、今回計測したデータではUSの変化点と凝結始発点に違いが生じた。蒸気養生によって、セメントの水和反応が促進されるため、USの変化点は凝結始発点前の水和反応による物性変化を捉

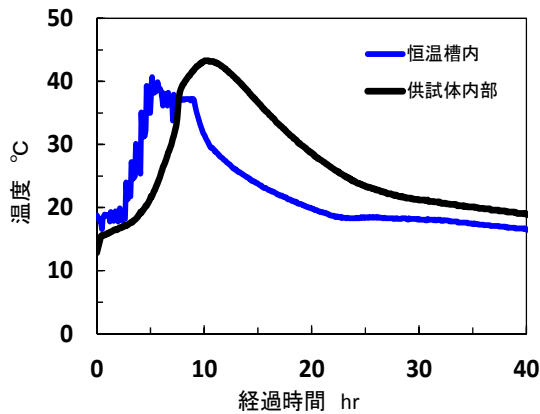


図-3 温度実測値

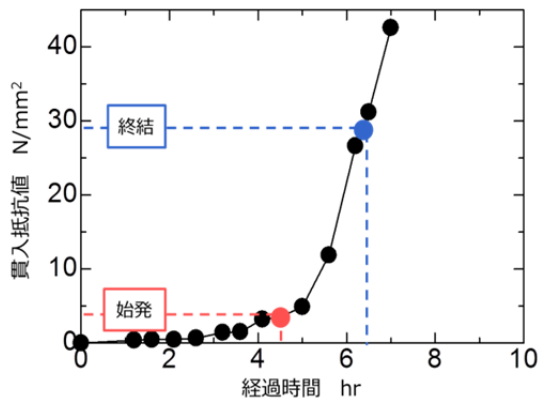


図-4 凝結試験結果

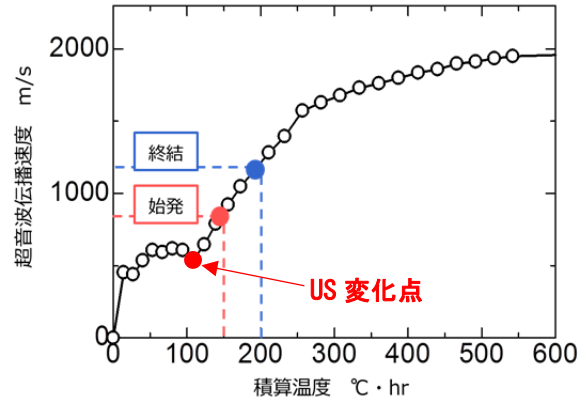


図-5 US と積算温度の関係

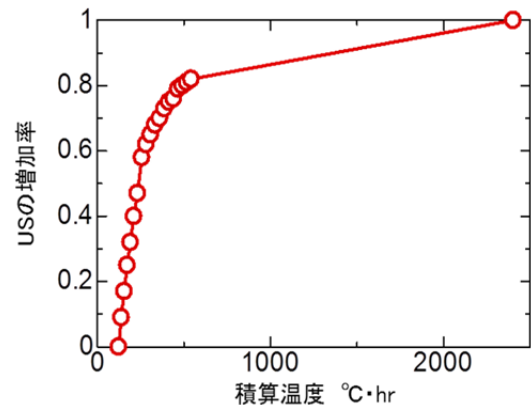


図-6 積算温度とUSの増加率の関係

えていると考えられる。この点については、まだ計測データ数が少ないため、今後さらにデータを蓄積して検討する必要がある。

図-6に凝結始発以降のUS増加率を示す。モルタルの基準積算温度を材齢3日時点の $2400^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ とした場合、 $500^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ までで0.8程度まで増加した。

図-7に式(1)を用いて圧縮強度を推定した結果を示す。US増加率がコンクリート強度の増加を示す指標となると仮定して、強度試験が可能な材齢の強度を基準値とした場合、凝結硬化中の強度発現がどのようになるか試算した。円柱供試体の圧縮強度は、材齢3日で 23.3 N/mm^2 、積算温度は $2400^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ であった。この値を基準として凝結始発付近から圧縮強度は増加し、積算温度 $500^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ では 19 N/mm^2 であった。

以上より、モルタルのUSの経時変化と凝結試験結果を使用することで、凝結硬化過程の圧縮強度の推定ができる可能性が示された。

3. コンクリートを使用した実験

モルタルでの凝結硬化中のUSと圧縮強度の検証後、実際のPCa製品製造工場にて蒸気養生中のコンクリートの凝結試験結果とUSの測定結果から圧縮強度の経時変化の推定を行った。

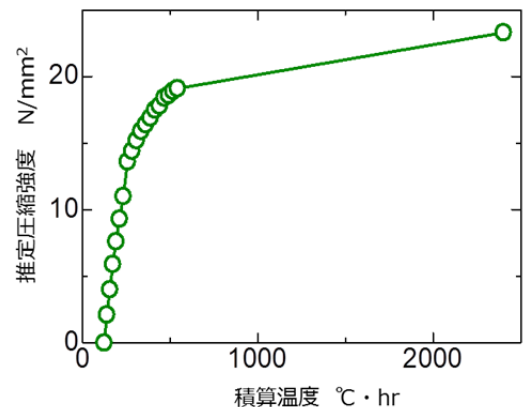


図-7 圧縮強度の推定結果

3.1 使用材料および配合

実験に使用したコンクリートの配合を表-3、使用材料を表-4に示す。コンクリートの配合は、水セメント比を0.49とし、セメントの種類は普通ポルトランドセメント(密度 3.15 g/cm^3)を使用した。コンクリートの圧縮強度は材齢3日時点で 35.5 N/mm^2 であった。

3.2 養生方法

図-8に蒸気養生の温度設定パターンを示す。外気温 10°C で2時間の前置き養生を行った後、最高温度 65°C まで3時間で昇温させ、 65°C となった時点から2時間保持させた。その後は自然冷却とした。

表-3 コンクリートの配合

W/C	単位量 kg/m ³						圧縮強度 N/mm ²
	W	C	S	G	LP	Ad	
0.49	170	347	814	943	123	2.82	35.5

表-4 使用材料

C	普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm ³)
S	埼玉県秩父郡産砕砂(吸水率1.36%, 絶乾密度2.61g/cm ³)
G	埼玉県秩父郡産砕砂(吸水率0.95%, 絶乾密度2.66g/cm ³)
LP	石灰石微粉末(密度2.70g/cm ³)
Ad	高性能減水剤

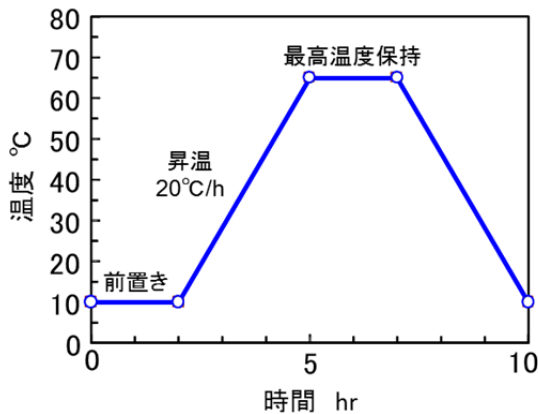


図-8 温度設定パターン



写真-2 蒸気養生槽

3.3 試験方法

モルタル実験において計測方法の確認を行い、同じ考えが成り立つと仮定して実機でのコンクリートで試みた。供試体は、モルタル試験の時に使用した型枠を使用し、供試体中央に熱電対を設置した。超音波伝搬速度の計測もモルタル試験と同様に、型枠にコンクリートを打設し、接触子に超音波計測用の発信子と受信子を密着させ、接触子間の超音波伝搬速度を計測し、US を求めた。プロクター貫入試験は、ウェットスクリーニングしたモルタル分を型枠に打設して計測した。モルタル試験同様に凝結の始発時間と終結時間の推定を行った。圧縮強度試験用にφ100×200mmの円柱供試体を作製した。US計測用供試体、貫入抵抗試験用供試体、および圧縮強度試験用供

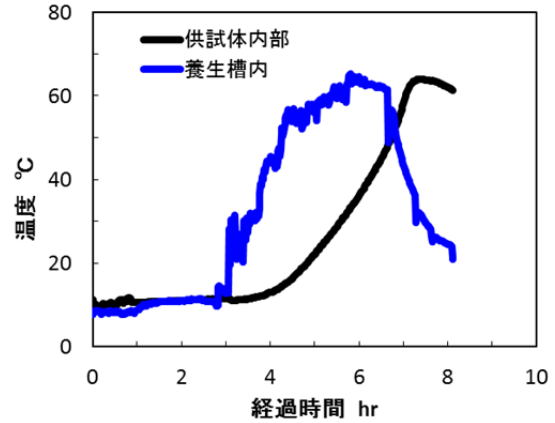


図-9 温度実測値

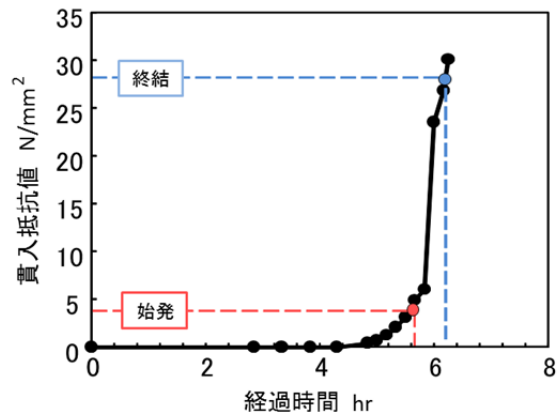


図-10 凝結試験結果

試体を写真-2の蒸気養生槽に入れて、温度変化を与えた。US計測、貫入抵抗試験は計測毎に蒸気養生槽から供試体を取り出し、計測を行った。モルタル試験で得られた凝結硬化中の圧縮強度推定式を使用して、圧縮強度を推定した。

3.4 実験結果および考察

図-9にUS供試体の内部温度と蒸気養生槽内温度の経時変化を示す。蒸気養生槽内温度が上昇するに伴い、US供試体の内部温度も上昇していることが分かる。供試体内部の最高温度は64°Cであった。

図-10に貫入抵抗値の経時変化を示す。貫入抵抗値は、セメントの水和反応が促進して、時間の経過に伴い増加する傾向を示した。凝結の始発時間、終結時間はそれぞれ5.7時間と6.3時間であった。

図-11に材齢初期の積算温度250°C・hrまでのUSと積算温度の関係を示す。積算温度が上がるにつれてUSの値は増加する傾向を示した。積算温度116°C・hr付近を変化点として、その後急激にUSの値が増加していることが分かる。一方凝結始発に相当する積算温度は154°C・hr付近であった。モルタル試験同様、USの変化点と凝結始発点が異なった。

図-12に凝結始発以降のUSの増加率を示す。コン

クリートの基準積算温度を材齢1日時点の $800^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ とした場合、USの増加率は、積算温度 $305^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ までで0.8程度であった。

図-1.3に式(1)を用いて圧縮強度を推定した結果を示す。円柱供試体の圧縮強度は材齢1日で 14.5 N/mm^2 、積算温度は $800^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ であった。この値を基準として凝結始発付近から圧縮強度は増加し、積算温度 $305^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ では 11.3 N/mm^2 であった。積算温度 $305^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ 時点の円柱供試体の圧縮強度は、 7.1 N/mm^2 であった。推定値より実際の強度が小さくなる結果となった。この結果については、円柱供試体の載荷面の平滑性が影響したと考えられる。若材齢の供試体の載荷面を研磨したが、強度が発現しておらず、平滑にすることが出来なかった。凝結硬化中のコンクリートについて圧縮強度試験を実施する場合、載荷面の平滑性が結果に大きく影響するため、キャッピングの方法などを検討する必要がある、今後の検討課題としたい。

以上より、US増加率がコンクリート強度の増加を示す指標となると仮定した場合、コンクリートのUSの経時変化と実圧縮強度の測定値を使用することで、凝結硬化過程のコンクリートの圧縮強度を推定することができる可能性が示された。

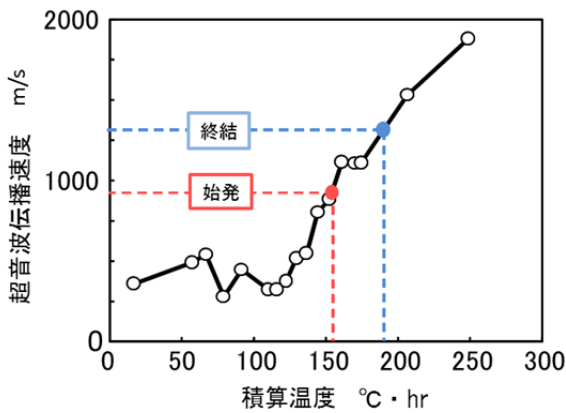


図-1.1 USと積算温度の関係

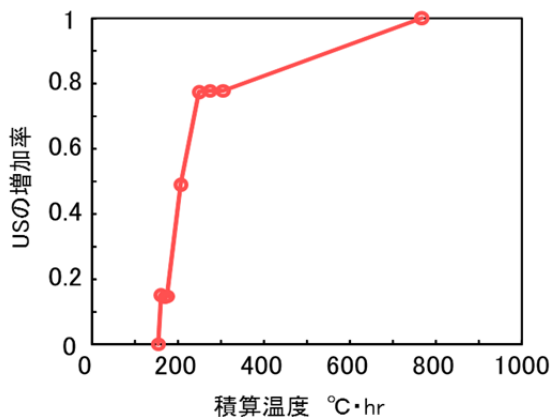


図-1.2 積算温度とUSの増加率の関係

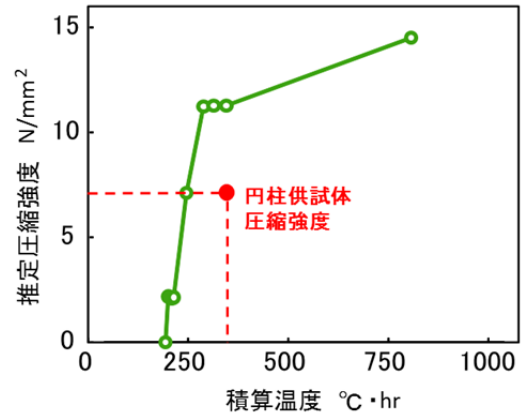


図-1.3 圧縮強度の推定結果

4. まとめ

温度変化を与えたモルタルの凝結硬化中のUSと圧縮強度の検証を行い、実際のPCa製品製造工場にて、蒸気養生を行ったコンクリートの凝結試験結果とUSの測定結果から圧縮強度の経時変化の推定を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 超音波法により、モルタルやコンクリートの凝結硬化の変化を確認できることがわかった。
- (2) US増加率がコンクリート強度の増加を示す指標となると仮定して、モルタルやコンクリートの積算温度と超音波伝播速度の関係と実圧縮強度の測定値より、凝結硬化中の圧縮強度発現を推定できる可能性がある。

今回の実験では、始発以降の強度試験結果が得られていないため、今後は強度試験を実施し、推定値との比較を行う予定である。凝結硬化中のコンクリートについて圧縮強度試験を実施する場合、載荷面の平滑性が結果に大きく影響するため、キャッピングの方法などを検討する必要がある、今後の検討課題としたい。今回の知見より、適切な脱型時期を定めることができれば、PCa製品の更なる生産性の向上が図れる。今後、蒸気養生中のPCa部材への適用に向け、さらにデータ蓄積を行う予定である。

参考文献

- 1) 河野清：コンクリート製品の促進養生，コンクリートジャーナル，pp.22-28，Vol.4，No.3-4，1966
- 2) 内田慎哉，河村彰男，鎌田敏郎，久田真：超音波測定に基づくコンクリートの硬化挙動の評価手法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1569-1574，Vol.24，No.1，2002
- 3) 寺本篤史，五十嵐豪，丸山一平：硬化過程におけるモルタルの動弾性係数に及ぼす骨材量の影響に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，pp.132-139，No.65，2011

- 4) 佐藤周之, 服部九二雄, 緒方英彦, 高田龍一: 各種コンクリート供試体の強度発現と養生・締固め効果, —非破壊試験方法によるコンクリートの強度推定(Ⅲ)—, 農業土木学会論文集, No.199, pp.83-88, 1999.2
- 5) 丸山貴吉, 中島望, 橋本紳一郎, 伊達重之: プレキャストコンクリートの初期強度発現に関する研究, コンクリート工学年次論文集, pp.577-582, Vol.37, No.2, 2016
- 6) 鏡健太, 佐藤正己, 梅村靖弘: 蒸気養生履歴がフライアッシュモルタルの水和反応と細孔構造に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, pp.144~150, vol.66, 2012
- 7) 蓮尾孝一, 西本好克, 松田拓, 河上浩司: 積算温度方式による若材齢強度の推定法—主に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの検討—, 三井住友建設技術研究所報告, pp.145~150, 第2号, 2004