

省エネ型給熱養生方式を用いた低温環境モルタルの 強度発現特性に関する実験的考察

The fundamental study on the strength development of low environment
mortar using energy saving heat curing systems

北見工業大学	工学部	社会環境工学科	○学生員	山下 哲	(Satoru Yamashita)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	学生員	元木 冴	(Sae Motoki)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正 員	崔 希燮	(Heesup Choi)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正 員	井上真澄	(Masumi Inoue)
北見工業大学	工学部	社会環境工学科	正 員	岡田包儀	(Kaneyoshi Okada)
エクセン株式会社			非会員	斎藤能雄	(Yosio Saitou)
エクセン株式会社			非会員	井上 和	(Wataru Inoue)
エクセン株式会社			非会員	福地新一	(Shinichi Fukuti)

1. はじめに

寒中コンクリート施工では、凝結硬化の初期にコンクリート中で水分が凍結することにより生じる初期凍害と低温による強度発現の遅れが問題となる^{1,2)}。そのため、初期凍害の対策として、打設後のコンクリート強度が 5N/mm^2 となるまでコンクリートを凍結させないように初期養生を行うことが土木学会コンクリート標準示方書および日本建築学会 JASS5 で推奨されている^{3,4)}。また、通常の冬期施工現場での強度発現の遅延が予想される場合、一般的に配合の補正とともに保温養生および給熱養生による対応がなされている。一方、一般的な寒冷地域で採用されている給熱養生は、**図-1**のように、養生上屋内にて施工層のコンクリート構造体周囲を断熱防水シートなどで覆い、熱風機(ジェットヒーター)によって内部空間を加熱する方法が主流である。しかし、このような方法は、熱効率が低く、燃焼ガス(CO , CO_2)の発生によってコンクリート構造体の強度発現や耐久性能に悪影響を及ぼす可能性が指摘されている⁵⁾。また、熱源からの距離によっては、養生温度の局所的な過不足が発生することで、コンクリート構造体の強度が均等に発現されない可能性もある⁵⁾。

そこで著者は、これらの問題点を解決する新たな給熱養生方式として温水循環式エアヒーターを用いた給熱養生を提案している⁶⁾。この養生システムの概要を**図-2**に示す。専用ユニットに搭載された簡易ボイラーで温水を作り出し、専用の循環ポンプを用いて循環ホースへ温水を供給する。この温水循環ホースをコンクリート打設面あるいは型枠外部に設置することで、コンクリート構造体を直接的に給熱するものである。本システムは、寒中コンクリートの品質管理における初期凍害の防止および早期脱型のための初期強度発現の確保に寄与すると同時に、適切な温湿度環境を維持することで良質かつ経済的な寒中コンクリート施工の実現が期待される。

本研究では低温環境下にて温水循環ホースにより給熱養生したコンクリートの強度発現特性を明らかにすることを目的として、打設直後からのコンクリートの温度履歴と圧縮強度を測定し、その相関関係について検討を行った。また、同試験体を用いて各材齢における水和生成

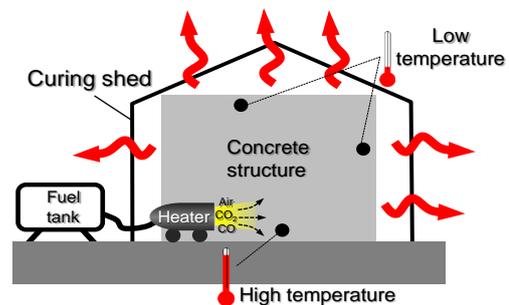


図-1 既往の給熱養生方法

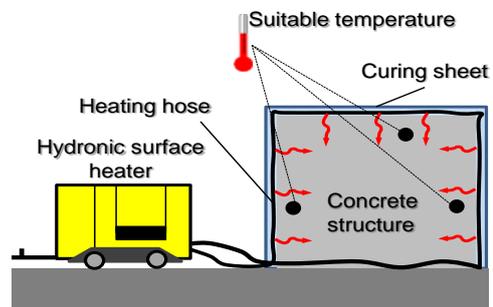


図-2 温水循環式の給熱養生方法^{5,6)}

物と空隙率の量的変化を測定し、比較・評価を行った。

2. 実験方法

2.1 概要

低温環境下で温水循環式エアヒーターを用いて給熱養生したコンクリートの強度発現特性を明らかにすることを目的として、小型モルタル試験体($\phi 5 \times 10\text{cm}$)を用いて打設直後からのモルタル試験体の温度履歴と圧縮強度を測定し、その相関関係の検討を行った。また、同試験体を用いて各材齢における水和生成物と空隙率の量的変化を測定し、比較・評価を行った。

2.2 実験条件および使用材料

表-1 に実験因子を、**図-3** に試験体概要を示す。厳冬の施工を想定して、外気温は -5°C と -10°C の2ケースとした。実験は断熱材(スチレンボード)に $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の

表-1 実験因子

試験体	記号	温水循環ホース 内部溶液温度	養生方法	評価項目	測定期間
20℃一定	20_C	—	断熱シート2重 (温水ホースを含む型枠全 面) + 湿潤シート養生 (打設面)	-温度変化 -積算温度 -圧縮強度 -TG-DTA -MIP	1, 3, 7, 14 日
5℃一定	5_C	—			
-5℃_ホース有	(-)5_O	60℃			
-5℃_ホース無	(-)5_X	—			
-10℃_ホース有	(-)10_O	70℃			
-10℃_ホース無	(-)10_X	—			

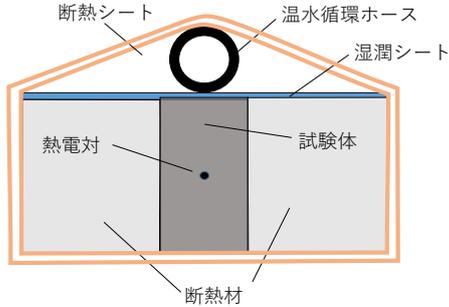


図-3 試験体の概念図

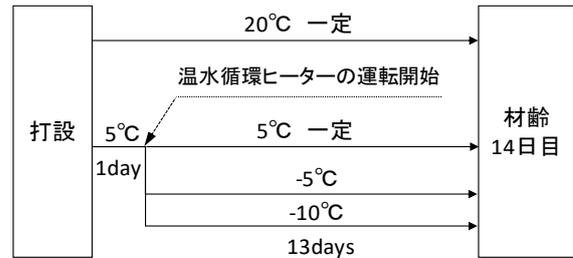


図-4 実験フロー

モールドを挿入後、モルタル打設を行った。その後図-4の実験フローに従い、24 時間後に温水循環ホースをモルタル試験体の表面中央部に設置した。また、比較用として5℃および20℃で恒温養生するケースも用意した。コンクリートの養生温度については「土木学会コンクリート標準示方書および日本建築学会 JASS5」を参考 3,4)にして試験体の表面温度で $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、ホース間中央部および下端部温度で $20^\circ\text{C} \times 8$ 割以上を目標値に設定した。ホース内部溶液の設定温度は、上記の温度条件に基づいて温度解析⁹⁾を行い、外気温 -5°C の場合はホースの内部溶液温度を 60°C 、外気温が -10°C の場合はホースの内部溶液温度 70°C とした。なお、図-3 に示すように、いずれのケースも熱効率性を向上させるため、温水循環ホース表面と型枠材表面に断熱シートを2重に設置した。加えて、養生期間中の乾燥収縮による微細ひび割れの進展を防止するため、日本建築学会「寒中コンクリート施工指針」⁷⁾に準じて、実際の現場で使用されている養生シートを温水循環ホースとコンクリート表面との間に挿入した。

図-4 に実験フローを示す。打設直後から1日間(24h)は、初期凍害防止のため、土木学会「コンクリート標準示方書」を参考³⁾に、 5°C の恒温環境下で養生した。その後、2日目よりケースごとの外気温に設定し、温水循環式エアヒーターによる給熱養生を開始した。試験体は、粗骨材の含有が試験体の温度測定結果に及ぼす影響(計測誤差)を除外するためモルタル試験体とした。配合は「セメント物理試験方法(JIS A 5201)」に準拠して、質量比でセメント：標準砂=1：3、水セメント比 0.55 として試験体を作製した。使用材料は、普通ポルトランドセメント (C, 密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)、けい砂5号 (S, 密度： $2.61\text{g}/\text{cm}^3$)を使用した。

図-4 の条件で各モルタル試験体の温度変化を測定し

た。測定材齢は各1, 3, 7, 14日とし、モルタル温度は、試験体中央部に熱電対を埋め込み、データロガーを用いて10分毎の経時計測を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-5 に各ケースにおける圧縮強度の経時変化を示す。実験結果より、打設直後から材齢1日目まで 5°C で養生した場合、温水循環ホースの設置有無に関わらずいずれのケースでも、約 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧縮強度を示し、 20°C 一定の 20_C のケースの $7.2\text{N}/\text{mm}^2$ に比べ、大きく強度が低下する傾向を示した。しかし、材齢1日目から14日目まで -5°C と -10°C で養生した場合、温水循環ホースを設置した(-)5_O と(-)10_O のケースは、材齢3日目に各々 $13.6\text{N}/\text{mm}^2$ と $12.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、材齢7日目に各々 $21.6\text{N}/\text{mm}^2$ と $21.1\text{N}/\text{mm}^2$ 、材齢14日目に各々 $30.3\text{N}/\text{mm}^2$ と $29.7\text{N}/\text{mm}^2$ を示した。特に、打設直後から 20°C で養生を行った 20_C($32.7\text{N}/\text{mm}^2$)と材齢14日の時点で圧縮強度がほぼ同程度であった。また、各材齢の 5°C 一定の 5_C の圧縮強度と比べ、約30~50%程度強度が増加する傾向を示した。これにより、材齢1日目から材齢14日にかけての温水循環ホースの設置による強度の経時変化から、(-)5_O と(-)10_O のケースでは材齢を経ることで、さらに強度増進が可能であると考えられる。一方、材齢1日目から14日目まで -5°C と -10°C で養生した場合、温水循環ホースを設置しない(-)5_X と(-)10_X はいずれの材齢においても水和反応速度の低下による低い圧縮強度を示した。また、 5°C 一定の 5_C の圧縮強度との差は大きく、特に、(-)10_X は凍害によってセメントと反応する水量が急減することで強度発現が低下したと考えられる。

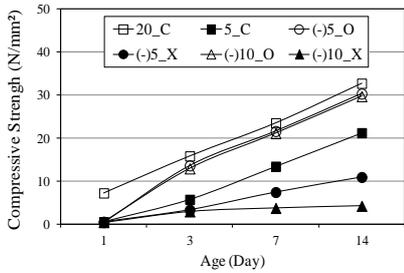


図-5 圧縮強度

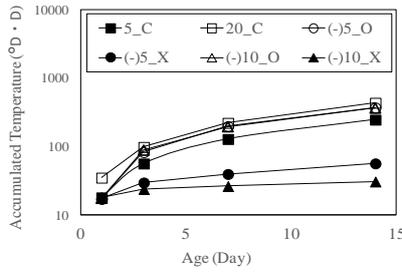


図-6 積算温度

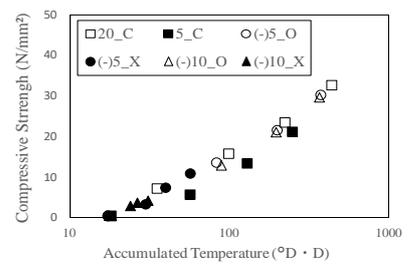


図-7 積算温度と圧縮強度の関係

3.2 積算温度

図-6 に建築土木標準仕様書(JASS5)の鉄筋コンクリート工事⁴⁾に準じて得られた各ケースの積算温度の経時変化を示す。まず打設直後から材齢1日目まで5°Cで養生した場合、温水循環ホースの設置有無に関わらずいずれのケースでも、約17°D・D程度の積算温度を示し、20°C一定の20_Cのケースの35°D・Dに比べ、多少低くなる傾向を示した。また、材齢1日目から14日目まで-5°Cと-10°Cで養生した場合、温水循環ホースを設置した(-)5_Oと(-)10_Oでは、材齢3日目に各々83°D・Dと87°D・D、材齢7日目に各々198°D・Dと195°D・D、材齢14日目に各々372°D・Dと366°D・Dを示した。各材齢の20_Cの積算温度に比べると、若干下回る傾向であるが、低温環境下でも温水循環ホースの熱供給による水和反応の進行により、20_Cの積算温度との差は小さいものであった。材齢1日後からの5°C一定の5_Cの積算温度に比べると、(-)5_Oと(-)10_Oの全ての積算温度は上回る傾向を示した。一方、材齢1日目から14日目まで-5°Cと-10°Cで定温養生した場合、温水循環ホースを設置しない(-)5_Xと(-)10_Xでは、いずれの材齢においても低い積算温度を示し、5_Cと20_Cのケースの積算温度との差も大きくなった。

3.3 圧縮強度と積算温度の相関関係

図-7 に各ケースの圧縮強度と積算温度の関係を示す。モルタルの積算温度(°D・D)と圧縮強度の関係は、全てのケースにおいて概ね線形的な関係を示している。特に、5°C一定の5_Cと比較して、温水循環ホースを設置した(-)5_Oと(-)10_Oのケースでは、低い積算温度でも高い強度発現を示していることが確認できる。一方、温水循環ホースを設置しない(-)5_Xと(-)10_Xのケースでは、凍害の影響による積算温度や圧縮強度が低くなる傾向を示した。一般に低温環境下でのコンクリートの強度発現は、セメントと反応する水の温度低下によって水和反応速度が遅くなるため、フレッシュ状態からのコンクリートの温度管理が重要となる。本研究で提案する温水循環ホースを用いた給熱養生は、打設直後から凍害の防止とともにセメントと反応する水量の増大に寄与することから、コンクリートの強度増進に繋がると考えられる。

3.4 水和生成物の量的変化

本研究では、熱重量—示差熱分析方法(TG-DTA)⁸⁾を用いて、各ケースにおける水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)

およびC-S-Hゲルの生成量を算出した。図-8にその経時変化を示す。-5°Cと-10°C環境下での温水循環ホースを設置した(-)5_Oと(-)10_Oでは、水和生成物の生成量が材齢を経るごとに増加しており、低温環境下での養生においても温水循環ホースの設置によってモルタルの水和が円滑に進行していたものと推定される。特に、(-)5_Oと(-)10_Oの材齢14日におけるC-S-Hゲルの生成量が、5_Cと比べ、上回るとともに20_Cとの比較においては、ほぼ同等な傾向を示した。一方、温水循環ホースを設置しない(-)5_Xと(-)10_Xのケースは、上述のように、凍害の影響によるセメントと反応する水の化学ポテンシャル量が低下し、水和がほとんど進行していないため水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)およびC-S-Hゲルの生成量が低くなったと考えられる。したがって、温水循環ホースの設置によって低温環境下においても水和反応が促進されC-S-Hゲルの生成により組織の緻密化が図られ、強度の増加が可能であると考えられる。

3.5 空隙構造特性の変化

図-9～図-12は水銀圧入ポロシメーター(MIP)を用いて測定した細孔分布の経時変化を示す。

まず図-9と図-10に示す外気温-10°Cの条件に着目する。材齢1日目では、5°C一定で24時間の初期養生をしているため温水循環ホースの設置有無に関わらず同等な細孔分布が確認できた。しかし、材齢3日以降は温水循環ホースを設置した(-)10_Oが温水循環ホースを設置しない(-)10_Xより、細孔径分布のピークが細孔径が小さい方に移動する現象が見られた。特に、(-)10_Oの細孔分布は、(-)10_Xに比べ、0.1~0.01μmの範囲の細孔が増加し、1~10μmの範囲に存在していた細孔が温水循環ホースの給熱養生によって1μm以下の細孔に移動することとともにその量も減少している。また、図-11の外気温-5°Cにて温水循環ホースを設置した(-)5_Oの細孔分布は、(-)10_Oの場合と概ね傾向が一致した。一方、図-11の20°C一定条件で養生を行った20_Cと比較すると、材齢3日以降は(-)10_Oと(-)5_Oの細孔分布と類似の傾向を示した。

以上より、低温環境下での温水循環式エアヒーターを用いた給熱養生は、コンクリートの水和反応に必要な水の化学ポテンシャル量の増大に寄与し、寒中コンクリートの効果的温度管理と強度発現とともにコンクリートの品質確保が可能であると考えられる。

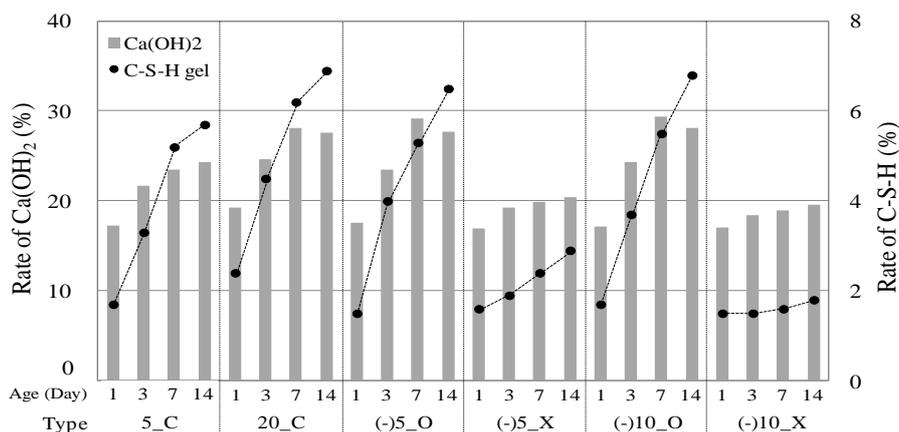


図-8 水和生成物の生成量の経時変化

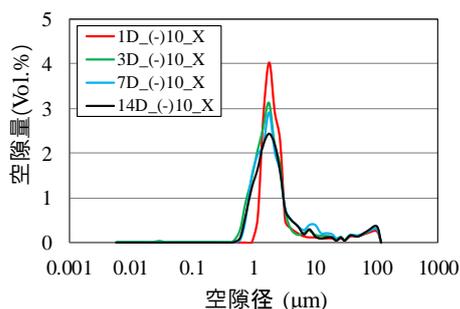


図-9 (-)10_X

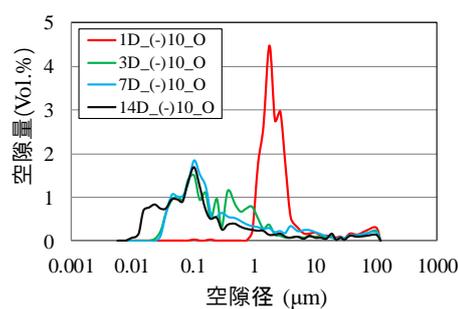


図-10 (-)10_O

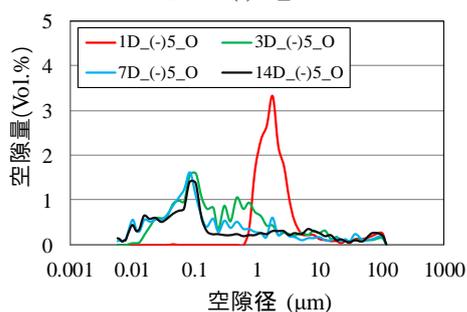


図-11 (-)5_O

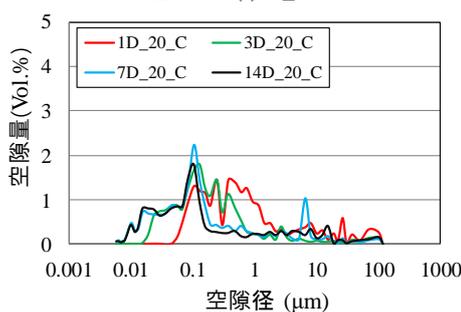


図-12 20_C

4. まとめ

本研究では、厳冬期の施工を想定した-5℃および-10℃の低温環境において、温水循環式エアヒーターを用いて給熱養生を行った場合のコンクリートの強度発現に及ぼす影響を明らかにするための実験を行った。以下に本研究の範囲で得られた知見を示す。

- 1) 低温環境下での温水循環ホースをコンクリート表面に設置することで効果的なコンクリートの温度管理とともにコンクリートの強度増進による打設初期からの凍害防止が可能であると考えられる。
- 2) 温水循環ホースによる給熱養生により水和生成物の生成量が増加するとともに、硬化体組織の緻密化が確認された。

以上より本給熱養生方式は、寒中コンクリートの効果的な温度管理と強度発現とともにコンクリートの品質確保に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) 浜幸雄, 鎌田英治, 耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結環境下における強度増進性状と水分凍結, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.2, pp.73-80, 1997
- 2) 鮎田耕一, 桜井宏, 小笠原育穂, 耐寒剤を使用したコンクリートの低温域での強度発現性状, セメント・コンクリート論文集, Vol.49, pp.234-239, 1995
- 3) コンクリート標準示方書, 土木学会, 1991
- 4) 建築工事標準仕様書・同解説(JASS5)鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 1997
- 5) Cold Weather Concreting with Hydronic Heaters, Journal of American Concrete Institute(ACI), Vol.22, No.4, pp.51-55, 2000
- 6) 元木冨, 崔希燮, 井上真澄, 岡田包儀, 関田舜, 福地新一, 省エネ型給熱養生方式による寒中コンクリートの養生温度制御に関する一考察, 寒地技術シンポジウム論文集, Vol.1, pp.1-6, 2016
- 7) 寒中コンクリート施工指針・同解説, 日本建築学会, 2010
- 8) R.Vedalakhshi, et al., Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique, Thermochemica Acta, Vol.407, pp.49-60, 2003