論文 温水循環式給熱養生方法を用いたコンクリートの強度発現特性

小原 総基*1・井上 真澄*2・崔 希燮*3・斎藤 能雄*4

要旨:寒中施工における新しい給熱養生方法として,適切な温度環境を維持することで良質かつ経済的な養 生が期待できる温水循環式給熱養生方法がある。本研究では,温水循環式ヒーター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ために,低温実験室において給熱養生したコンクリートの温度履歴, 圧縮強度と水和生成物の経時変化を測定するとともに,厳冬期における屋外環境下での実大養生実験を行っ た。その結果,本システムを用いて給熱養生することにより,コンクリートの効果的な温度管理が可能であ り,水和促進に伴い水和生成物の生成量が増大することで良好な強度発現性が得られることを確認した。 キーワード:温水循環式ヒーター,給熱養生,強度発現,寒中コンクリート,温度履歴

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、コンクリート強度が 5N/mm² となるまではコンクリ ートを凍結させないように初期養生を行うことが土木 学会のコンクリート標準示方書³⁾および日本建築学会の JASS5⁴⁾で推奨されている。この場合、一般的には配合の 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,寒冷地域で採用されている給熱養生は,図-1に 示すように,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, CO₂)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,養生温度の局部的な 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)。

そこで著者らは、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ヒーターを用いた給熱養 生を提案している^{の,7)}。**図-2**にこの養生システムの概要 を示す。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いて初期凍 害の防止および早期脱型のための初期強度発現を確保



することと同時に,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に寄与 するものと期待される。

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、低温実験室において給熱養生した コンクリートの温度履歴および圧縮強度と水和生成物 の経時変化を測定する(実験 1)とともに、厳冬期における 屋外環境下での実大養生実験(実験 2)を行い、従来型給熱 養生方法との比較検討を行った。

*1 北見工業大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (学生会員) *2 北見工業大学 工学部地域未来デザイン工学科准教授 博士(工学) (正会員) *3 北見工業大学 工学部地域未来デザイン工学科助教 博士(工学) (正会員) *4 エクセン(株) R&D センター 開発部

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	測定材齢
20℃一定	20_C	_	断熱シート2層 (温水ホース含む型枠全面)	- 温度履歴 - 積箟温度	
(-)10℃_ホース有	(-)10_0	70°C		- 圧縮強度	1, 3, 7, 28 日
(-)10℃_ホース無	(-)10_X	_	湿潤シート養生 (打設面)	- IG-DIA - SEM	





2. 低温実験室における給熱養生実験(実験1)

2.1 概要

低温環境下で温水循環式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、コンクリート試験体(q10×20cm)を用いて 打設直後から材齢 28 日までの試験体の温度履歴と圧縮 強度を測定した。また、各材齢における水和生成物の経 時変化については熱分析(TG-DTA)や SEM で測定し、強 度との相関関係について検討を行った。

2.2 実験条件および方法

表-1 に実験条件および因子を,図-3 に低温実験室の温度設定条件を示す。低温実験室の温度設定は,打設 直後から材齢1日までは,「日本建築学会 JASS5」⁴⁾を参 考にして10℃に設定した。その後厳冬期の外気温を想定 して温度設定は-10℃一定とし,温水循環式ヒーターによ る給熱養生を開始した。実験は,温水循環ホース設置の 有無による2ケースに加えて,打設直後から20℃一定の 温度条件としたケースも含め計3ケースで強度発現性の 比較を行った。

図-4に試験体の概要を示す。断熱材(スタイロフォーム)にφ10×20cmのモールドを所定の位置に挿入した試験 体を作製し,打設後24時間経過した時点で温水循環ホ ースをコンクリート試験体の表面中央部に設置した。コ ンクリートの養生温度は,土木学会のコンクリート標準 示方書³⁾および日本建築学会のJASS5⁴⁾を参考にして試 験体の表面温度で20±1℃,また試験体下端部では既報告 ⁶⁾に基づいて20℃×80%以上を目標値に設定した。温水循

W/C		混和剤			
(%)	W	С	S	G	(kg/m ³)
52.0	153	295	948	1005	2.950

表-2 コンクリートの配合





図-4 試験体の概要

環ホース内部溶液の設定温度は,設定した外気温(-10℃) と上記コンクリート養生温度の目標値に基づいて温度 解析^{6,7)}を行い,70℃に設定した。なお,図-4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(天然ゴム,内径:15.9mm,外径:25.0mm) 表面と型枠材表面に厚み 3mm の断熱シート(熱伝導率: 0.01623(W/mk),片面アルミ蒸着発泡ポリエチレン)を 2 層で被覆した。加えて,養生期間中における打設面の乾 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」⁸に準じて,実際 の現場で使用されている厚み 3mm の湿潤シート(初期保 水量1300ml/m²)を温水循環ホースとコンクリート試験体 打設面との間に挿入した。

コンクリートの配合は, **表**-2 に示す設計基準強度 24MPa(スランプ 8cm, G_{max}=20mm, W/C=52%, 普通ポル トランドセメント使用, 練上がり温度 13.3℃)の配合を用 いた。コンクリートの温度履歴は, 図-4 に示すように 円柱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, 材齢 3 日までは 30 分毎に, その後材齢 28 日ま では 60 分毎の経時計測を行った。表-1 に示す各評価項 目は, 材齢 1, 3, 7, 28 日に測定した。

2.3 実験結果および考察

(1) 温度履歴

図-5 に各ケースにおけるコンクリートの温度履歴を 示す。20℃一定で養生した 20_C では,打設直後より水 和熱の影響により温度が上昇し,材齢1日でコンクリー ト温度がピーク(約23℃)に達した後,徐々に温度が降下 し,材齢3日以降は20℃程度を推移した。

一方,温水循環ホースを設置した(-)10_Oでは,材齢1 日が経過した時点で温水循環式ヒーターを稼働させる ため,材齢1日以降も温水循環ホースによる給熱により 温度が上昇し,材齢3日でピーク温度(約24℃)に達した。 その後,温度は徐々に降下し,材齢10日以降では16℃ 程度を推移した。温水循環ホースを設置していない (-)10_Xは,材齢1日までは(-)10_Oと同一の養生条件の ため,水和熱により同様な温度上昇を示すものの,材齢 1日以降は-10℃の低温環境下に曝されることで温度が急 激に低下した。



図-5 コンクリートの温度履歴

(2) 圧縮強度

図-6 に各ケースにおける圧縮強度の経時変化を示す。 材齢 1 日から-10℃の低温環境下において温水循環ホー スを設置して給熱養生した(-)10_0 では,材齢 3 日に 16.5N/mm²,材齢 7 日に 26.9N/mm²,材齢 28 日に 36.2N/mm²を示した。打設直後から 20℃で養生を行った 20_C は,材齢 28 日強度が 32.9N/mm² であり,温水循環 ホースで養生した場合の方が若干高くなることを確認 した。

一方, 温水循環ホースを設置していない(-)10_X は, 材 齢3日に7.83N/mm², 材齢7日に8.45N/mm², 材齢28日 に9.41N/mm²であり, 材齢3日以降の強度増進が小さい。 材齢1日以降は, -10℃の低温環境に曝される材齢1日以 降は, コンクリート中の水分が凍結してセメントと反応 する水量が急減することにより水和反応速度が低下し, 強度発現が低下したものと考えられる。

(3) 圧縮強度と積算温度の相関関係

図-7 に圧縮強度と積算温度の関係を示す。積算温度は、建築工事標準仕様書(JASS5)の鉄筋コンクリート工事



⁴⁾に準じて算出した。コンクリートの積算温度(°D・D)と 圧縮強度の関係は、全てのケースを含めて概ね線形的な 関係を示している。特に(-)10_Oでは、20_Cと比較する と同様の強度発現を示していることを確認した。一方 (-)10_Xのプロット点は、積算温度や圧縮強度が低い範 囲に位置した。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 水循環ホースによる給熱養生は、低温環境下におけるコ ンクリートの適切な温度管理とともに、水和進行にも寄 与することでコンクリートの強度増進に繋がったもの と考えられる。

(4) 水和生成物の量的変化

本システムにより給熱養生を行ったコンクリート試 験体の水和生成物の量的変化を測定するため,熱重量-示 差熱分析方法(TG-DTA)⁹⁾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。(-)10_0 では材 齢1日で Ca(OH)2:17.1%,C-S-H ゲル:1.7%,材齢28 日でそれぞれ27.8%,7.5%と水和生成物の生成量が材齢 を経るに伴い増加しており,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コンクリートの水 和が円滑に進行していたものと推定される。特に, (-)10 0 の材齢28日におけるC-S-H ゲル生成量 は、20_C(7.3%)とほぼ同等な生成量を示した。一方 (-)10_Xでは、材齢1日でCa(OH)2:17%、C-S-Hゲル: 1.5%、材齢28日においてそれぞれ2.0%、1.9%であった。 これは、上述のように水分の凍結によりセメントと反応 する水の量が減少して水和がほとんど進行していない ため、Ca(OH)2およびC-S-Hゲルの生成量が低くなった ためであると考えられる。

(5) 水和生成物の結晶観察

図-9に材齢28日における水和生成物のSEM 観察結 果を示す。(-)10_Oでは、水和反応の促進に伴うエトリン ガイトや水酸化カルシウムはほとんど確認されず、C-S-Hゲルが幅広く確認されており、低温環境下においても 温水循環ホースの設置により水和反応が良好に進行し たものと考えられる。これに対して(-)10_Xでは、未水和 セメントとともに多量のエトリンガイドや水酸化カル シウムが確認された一方で、C-S-Hゲルはほとんど確認 されなかった。

3. 屋外環境下での実大養生実験(実験 2)

3.1 概要

実低温環境における温水循環式給熱養生方法の養生 効果を確認するため, RC 床版模擬試験体を対象とした 実大養生実験を行った。測定項目は,打設直後からの温 度履歴と圧縮強度の経時変化とし,養生上屋内でジェッ トヒーターを用いた給熱養生との比較を行った。実験場 所は,北見工業大学の屋外試験場とし,給熱養生期間は 11月下旬から12月上旬にかけての2週間とした。図-10に屋外試験期間中の外気温¹⁰を示す。



3.2 実験条件および方法

表-3 に実験条件および因子を,図-11 に RC 床版模 擬試験体(B×L×H, 3000mm×2000mm×300mm)の概要を, 図-12 に試験体の養生条件および温度測定位置を示す。 温水循環式ヒーターを用いた場合,材齢1日までは試験 体周囲のみを断熱防水シートで囲いジェットヒーター を使用して 10℃に温度管理した。その後,養生シートを



図-8 水和生成物の生成量の経時変化

C-S-H Sign

(a) (-)10 O (5000倍)



(b) (-)10_X (5000倍) 図-9 SEMによる水和生成物観察(材齢 28日)

試験体			測点略号	ホース内部 溶液温度	評価項目
ジェット		中央部	JH_M		
ヒーター		端部	JH_S		温度
	ホース	中央部	HH_M_O	60°C	腹歴
温水循環	有	端部	HH_S_O	00 C	圧縮
ヒーター	ホース	中央部	HH_M_X		強度
	無	端部	HH_S_X		

表-3 実験条件および因子(実験 2)

撤去して、図-11 に示すように温水循環ホースを試験体 打設面に 30cm 間隔^{6,7)}で設置し,温水循環式ヒーターを 稼働させた。試験体の目標管理温度は,実験1と同じく 試験体の表面部で 20±1℃,中央部および下端部で 20℃ ×80%以上とし,想定した気象条件(最高気温+5℃,最低 気温-5℃)を考慮した温度解析の結果から,ホース内部溶 液温度は 60℃,ホース表面と型枠材表面に被覆する断熱 シートは単層とした。また、図-12 に示すようにホース 表面と試験体の間には湿潤シートを設置した。温水循環 ホースを設置しない場合は,材齢1日までは上述と同様 に 10℃で温度管理した後は,断熱シートで単層被覆して 実環境に曝した。一方,ジェットヒーターを用いた場合 は、実際の寒中施工における管理温度を参考にして打設 直後から給熱養生終了まで上屋内の温度を 10~15℃に



図-11 RC 床版模擬試験体概要



図-12 試験体の養生条件および温度測定位置

管理した。

コンクリート温度の測定は、図-12のように試験体の 中央部と端部の2箇所(いずれも打設面から150mmの位 置)に熱電対を埋め込み、データロガーを用いて経時計測 を行った。試験体は、実験1と同じコンクリート配合を 用いて作製し、材齢1、3、7、14日で各ケースの試験体 中央部付近(図-11の赤枠部)からコアを各材齢3本ずつ 計12本採取し、圧縮強度を測定した。

3.3 実験結果および考察

(1) 温度履歴

図-13と図-14に材齢7日までのコンクリートの温 度履歴を示す。図-13のジェットヒーター(JH)で給熱養 生した場合,打設直後から水和熱の影響によりコンクリ ート温度が上昇し材齢0.5日付近で温度ピーク(約25℃) を迎え,その後徐々に温度が降下するものの,材齢4日 以降は15℃程度を推移することを確認した。一方,図-14の温水循環ホース(HH)を設置した場合,材齢1日ま での10℃養生下では,水和熱の影響によりコンクリート 温度が上昇した。その後,温水循環式ヒーターを稼働し た結果,材齢1日以降も温度は上昇し,材齢2日で温度 ピーク(約28℃)に達した。その後,材齢5日を経過する と15℃程度で安定した。

次に温度測定位置で比較すると、ジェットヒーターの 場合には、試験体の中央部と端部で同様の温度履歴を示 した。しかし、温水循環ホースの場合には、温度ピーク 以降の履歴において試験体端部の温度履歴が中央部よ りも 5℃程度低くなった。本実験では、当初想定した気 象条件(最高気温+5℃,最低気温-5℃)を踏まえた 2 次元





温度解析 ^{0,7}に基づき,試験体を被覆する断熱シートの 層数(本実験では単層被覆)とホース内部溶液温度(60℃) を決定した。しかし,実際の外気温は変動が大きく,特 に材齢 3 日以降は図-10 に示すように最低気温が-13℃ 程度まで下がったこともあり,断熱シートによる保温効 果が十分に得られず,端部と中央部の温度差に繋がった ものと考えられる。本実験で対象とした RC 床版のよう に打設面からの給熱を行う場合には,断熱シートの被覆 層数を増やして保温効果を高める必要があると考えら れる。

(2) 圧縮強度

図-15 に各養生ケースの圧縮強度の経時変化を示す。 図中には標準水中養生したサンプルの材齢7日および28 日強度も示した。材齢3日以降の強度に着目すると,温 水循環ホースにより給熱養生した場合,ジェットヒータ ーの場合よりも強度発現が良好であり,材齢7日時点で は標準養生したサンプルの材齢28日強度と同程度の値 を示した。

図-16 に各養生ケースの試験体中央部における温度 履歴を、図-17 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。温 水ホースによる給熱開始以降から材齢5日付近に至る期 間において、温水ホースを設置した場合の方がジェット ヒーターよりも高い温度履歴を受けており、材齢3日以 降の良好な強度発現に繋がったものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、低温環境下において温水循環式ヒーター を用いて給熱養生を行ったコンクリートの強度発現特 性を明らかにするための物理化学的実験とともに、屋外 環境下での実大養生実験を行った。以下に本研究の範囲 で得られた知見を示す。

 低温環境下において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温度管理とともにコ ンクリートの良好な強度発現が得られた。また、水和 生成物の生成量増加とともに硬化体組織の緻密化に も寄与しており、これにより強度増進したものと考え られる。 2) 日平均気温が-5℃を下回るような厳冬期の実環境下 において、温水循環ホースをコンクリート表面に設置 して給熱養生することにより、コンクリートの良好な 強度増進が確認された。

謝辞

実大養生実験の遂行にあたり、日本高圧コンクリート (株)にご協力をいただいた。ここに記して、厚く感謝の意 を表す。

参考文献

- 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, 1997.7
- 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,
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書(施工編), p.166, 2017
- 4)日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.424-425, 2018
- Chet Grochoski: Cold Weather Concreting with Hydronic Heaters, Journal of American Concrete Institute(ACI), Vol.22, No.4, pp.51-55, 2000
- 6) 元木冴ほか:温水循環式給熱養生方法を利用した寒中 コンクリートの品質確保に関する研究,寒地技術論 文・報告集, Vol.33, pp.59-64, 2017.11
- 7) 元木冴ほか: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,寒地技術論 文・報告集, Vol.32, pp.74-79, 2016.11
- 8) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説, 2010
- R. Vedalakshmi, et al.: Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique, Thermochimica Acta, Vol.407, pp.49-60, 2003
- 10) 気象庁ホームページ:http://www.jma.go.jp