

省エネ型給熱養生方式を用いた 寒中コンクリートの養生温度制御および有効利用に関する研究

A study on the curing temperature control of cold weather concrete using energy-saving heat curing systems and effective utilization

北見工業大学 工学部	社会環境工学科	○学生員	元木 冨 (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	R&D センター	非会員	関田 舜 (Shun Sekita)
エクセン株式会社	営業部	非会員	福地新一 (Shinichi Fukuchi)

1. はじめに

我が国のみならず寒冷地域の国々で採用されている給熱養生は、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³⁾。また、熱源からの距離によっては、局部的に熱供給が過大となったり、逆に過不足な部分が発生したりすることで、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³⁾。そのため、冬期のコンクリート施工の普遍化のためには、鉄筋コンクリート構造体の品質確保のために適正な養生方法を提示する必要がある⁴⁾。

そこで本研究では、既存給熱養生方法の問題点を改善・補完し、寒中施工におけるコンクリート構造体の品質確保の方策として、温水循環式エアヒーターを用いた

省エネ型給熱養生システムの開発を目的とする。図-1 に本研究の流れを示す。

2. 実験

2.1 温水循環エアヒーターを用いたコンクリートの養生温度分布履歴の検討

(1) 実験概要

温水循環ホースの設置がコンクリート温度分布に及ぼす影響を明らかにするため、恒温環境下 (10±1℃) に図-2 に示す模擬試験体を作製し、温水循環ホースの温度条件や養生条件をパラメータとした実験を行った。また、実験条件と同一パラメータにより2次元温度解析を行い、実験値と解析値の比較検討により2次元温度解析の妥当性を検証した。なお、2次元温度解析は、「電磁界解析ソフト」を使用し、有限要素法による温度解析を行い、各境界条件は、土木学会「コンクリート標準示方書」等を参考¹⁾に設定した。

(2) 実験条件および使用材料

実験条件は、図-2 のように温水循環ホースを試験体長手方向 (以降、縦方向モデルと称す) の中央部に設置し、図-3 のように温水循環ホースを覆う断熱シートの有無で2ケースとした。また、温水循環ホースの温度は、ホース内部温度を55℃に設定し、温度10±1℃、湿度60±5%の環境条件で実験と解析を行った。表-1 に解析に用いた条件 (材料物性値) を示す。解析時間は2日間とした。

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0.50として試験体を作製した。ただし、本実験ではモルタルの水和による影響を除外するため、打設直後から材齢28日まで水中養生を行った試験体を対象として実験を行った。使用材料は、普通ポルトランドセメント (C、密度：3.16g/cm³)、けい砂5号 (S、密度：2.61g/cm³) を使用し、試験体は55×15×15cm (L×B×H) の形状のものを作製した。

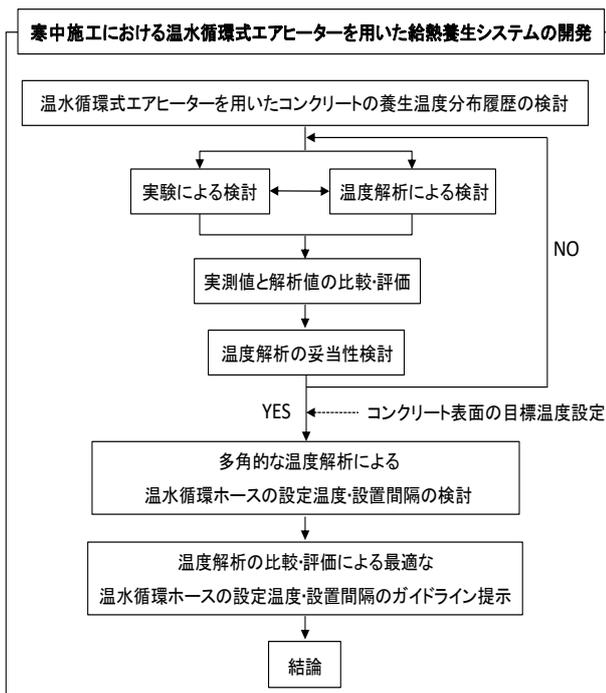


図-1 本研究の流れ図

表-1 解析条件 (材料物性値)

区分	熱伝導率 (λ) W/mk	熱容量 (C) J/m ³ k	比熱 (c) J/kgk	密度 (ρ) kg/m ³	寸法 mm	素材
コンクリート ¹⁾	2.6	2.520E+06	1.05E+03	2400		
温水循環ホース	0.15	2.280E+06	1.90E+03	1200	外径 25.0 内径 15.9	ポリウレタンゴム
合板+シート ⁵⁾	0.61	4.160E+06	4.18E+03	997	厚み 12.0	湿潤 100%の水の物性仮定
断熱シート ⁶⁾	0.01623	1.820E+04	7.60E+02	24	厚み 3.0	フォームポリスチレン
空気	0.0241	1.301E+03	1.01E+03	1		
型枠	0.16	7.90E+05	1.30E+03	608	厚み 12.0	ラワン材

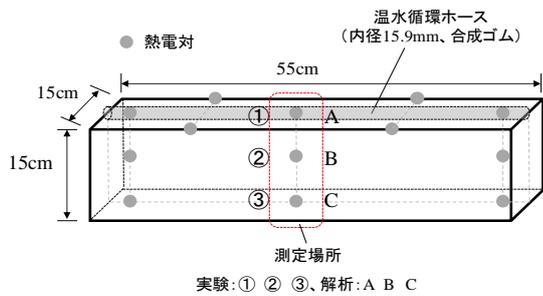


図-2 モルタル試験体温度測定位置

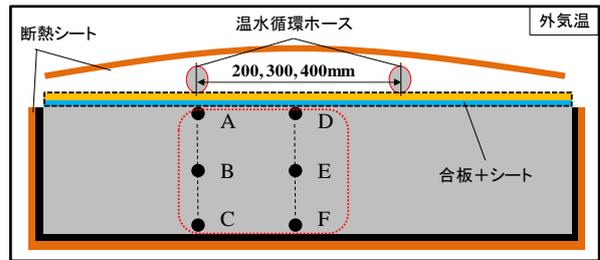


図-4 温水循環ホースの間隔調整の概念図

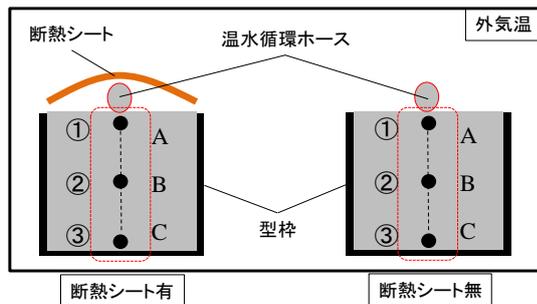


図-3 解析モデルと試験体の概念図

2.2 温度解析による温水循環ホースの設定温度・設置間隔の検討

(1) 解析概要

温水循環ホースの設置間隔やコンクリート温度の変化を明らかにするため、2.1 節の実験および解析の結果に基づき、温水循環ホースの温度条件、養生条件などをパラメータとした解析を行った。温度管理については「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^{1,2)}にして試験体の表面温度で $20 \pm 1^\circ\text{C}$ を目安とした。また、ホース間中央部および下端部温度を $20^\circ\text{C} \times 8$ 割以上を目標値と設定して解析を行った。

(2) 解析因子および条件

温水循環ホースの設置条件は、図-4 に示すように温水循環ホースを試験体長手方向に対して直角に設置した横方向モデルとした。横方向モデルでは、温水循環ホースの設置間隔を 200mm (2 列)、300mm (2 列)、400mm (2 列) として、さらに温水循環ホースの内部温度を 40°C 、 50°C 、 60°C の 3 ケースで解析を行い、温水循環ホースの設置間隔および設定温度の変化によるコンクリートの温度分布履歴や適切な温水循環ホースの設置間隔の検討を行った。ここで、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設置した。他の解析条件として、外気温度は 10°C 、解析時間は 7 日間に設定し、前述の解析条件と同一境界条件で解析を行った (表-1 参照)。また、本解析では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」⁵⁾ に準じて、実際の現場で使用されている合板および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することにした。

3. 実験結果および考察

3.1 温水循環エアヒーターを用いたコンクリートの養生温度分布履歴の検討

図-5 と図-6 に温水循環ホースを実測値に合わせて、温水循環ホースの内部温度を 55°C と設定した場合の解析値と実測値を比較した。実験結果より、試験体表面部からの温度分布が読み取れ、試験体表面に設置した温水循環ホースの熱源が試験体下端部まで伝達していることが確認された。また、いずれのケースにおいても 0.5 日程度で試験体の温度変化がなくなり、その後は一定の温度を推移することを確認した。断熱シートの有無で比較すると、断熱シート有の方が断熱シート無の方より試験体の表面温度のみならず下端部も約 $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 高くなった。従って、断熱シートによる被覆は、温水循環ホースの熱源を効率的にコンクリートに伝達する上で重要な役割を果たすと考えられる。また、断熱シートの有無に関わらず、実験値と解析値は概ね一致しており、本解析手法の妥当性が確認された。

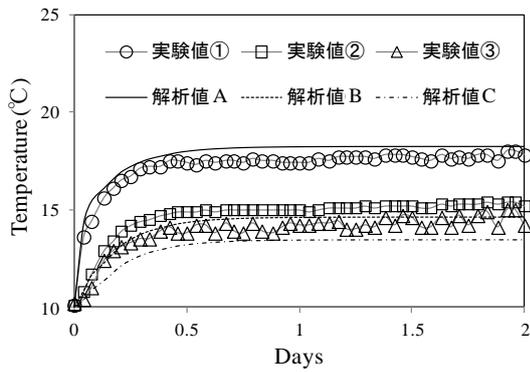


図-5 断熱シート有 (55°C)

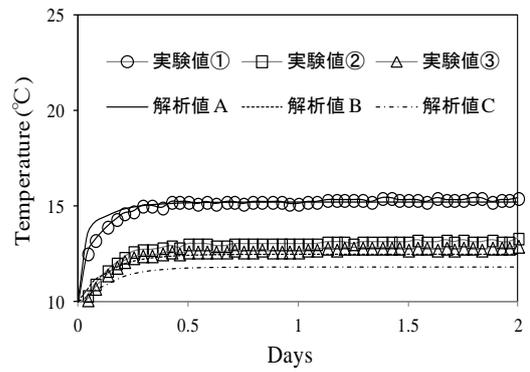


図-6 断熱シート無 (55°C)

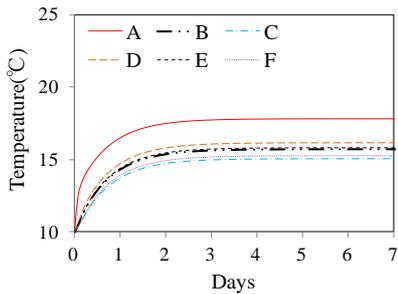


図-7 横方向_200mm、40°C

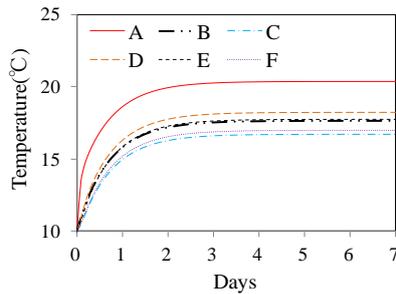


図-8 横方向_200mm、50°C

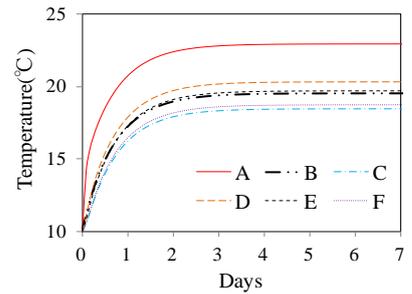


図-9 横方向_200mm、60°C

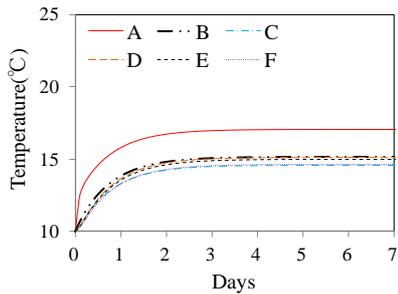


図-10 横方向_300mm、40°C

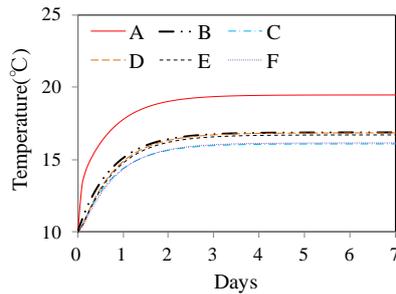


図-11 横方向_300mm、50°C

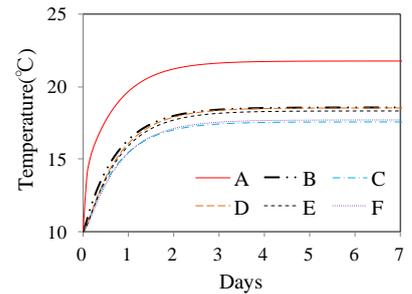


図-12 横方向_300mm、60°C

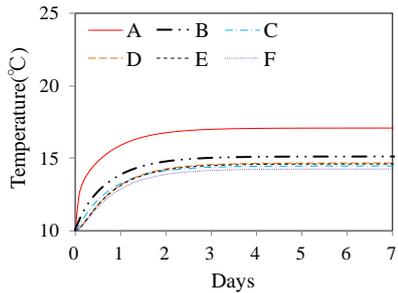


図-13 横方向_400mm、40°C

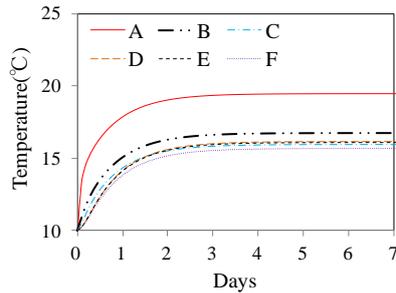


図-14 横方向_400mm、50°C

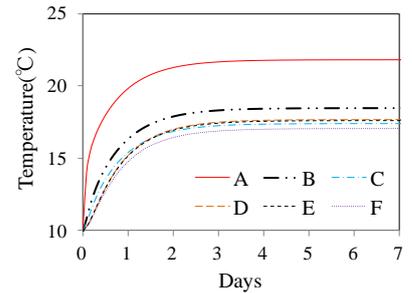


図-15 横方向_400mm、60°C

表-2 温水循環ホースの設定温度および設置間隔の調整による解析結果 (解析 7 日目)

温水循環 ホース	設置間隔	200mm			300mm			400mm		
	設定温度	40°C	50°C	60°C	40°C	50°C	60°C	40°C	50°C	60°C
コンクリート 温度測定位置	表面 A 点	17.7	21.1	23.0	17.1	19.4	21.8	17.1	19.4	21.8
	表面 D 点	16.2	19.2	20.3	15.1	16.8	18.6	14.6	16.2	17.7
	底面 C 点	15.1	17.6	18.4	14.6	16.1	17.6	14.5	15.9	17.4
	底面 F 点	15.3	17.3	18.8	14.6	16.2	17.7	14.3	15.7	17.1

3.2 温度解析によるコンクリートの温度分布履歴や適切な温水循環ホースの設置間隔の検討

図-7 から図-15 に横方向モデルの解析結果を示す。いずれのケースとも約2日以後から、試験体の温度変化がなくなり、その後は概ね一定の温度を推移することが確認できた。

表-2 には、温水循環ホースの設定温度と設置間隔ごとに、解析7日目におけるコンクリート温度(表面および底面)の解析値を整理した。解析結果より、温水循環ホースの設置間隔に関わらず、いずれのケースにおいてもホース内部温度を60℃に設定するとコンクリート温度が20℃を超えており、コンクリート表面部における乾燥収縮に伴うひび割れ発生の懸念がある。また、ホース内部温度を40℃に設定した場合、いずれのケースにおいてもコンクリートの下端部の温度は本解析で設定している「20℃×8割以上(16℃以上)」の条件を満足していないことが確認できた。そのため、寒中コンクリートの品質管理を考慮して、本解析で目標設定している「コンクリートの表面温度は20℃以下、ホース間中央部および下端部温度は20℃×8割以上」の条件を鑑みると、ホース内部温度を50℃に設定し、温水循環ホースの設置間隔の範囲を300mm～400mmとすることが熱効率性や施工性・経済性の側面で適切であると考えられる。

4. まとめ

本研究では低温環境下における温水循環式エアヒーターを用いたコンクリートの多角的な養生温度分布履歴を検討するため、まず模擬試験体を用いて温水循環ホースの設置がコンクリート温度分布に及ぼす影響について実験を行った。また、実験条件と同一パラメータにより2次元温度解析を行い、実験値と解析値を比較検証した。さらに、2次元温度解析の妥当性を確認した上で、温水循環ホースの設置間隔やホース温度条件、養生条件などをパラメータとした解析を行い、コンクリートの温度分布履歴や適切な温水循環ホースの設置間隔について比較・評価を行った。以下に本研究の範囲で得られた知見を示す。

(1) 恒温環境下(10±1℃)での模擬試験体を用いた実験より、試験体表面部からの温度分布が読み取れ、試験体表面に設置した温水循環ホースの熱源が試験体下端部まで伝達していることが確認された。また、その結果は、同一パラメータでの2次元温度解析の結果と概ね一致しており、本解析手法の妥当性が確認された。

(2) ホース温度やホース設置間隔、養生条件をパラメータとした解析より、ホース設置間隔がコンクリートの温度分布に及ぼす影響を確認した。いずれの温度条件においても2日程度で試験体の温度変化がなくなり、その後は一定の温度を推移することを確認した。

(3) 同解析より、本技術の現場適用性を鑑みると、ホース内部温度を50℃に設定し温水循環ホースの設置間隔を300mm～400mmの範囲で設定することが熱効率性や施工性・経済性の側面で適切であると判断される。

今後の課題として、実部材を想定した試験体モデルを用いて、ホースの温度設定や設置間隔、外気温など多様な条件で温度解析を行うとともに、より定量的な結果を得るため実験値との比較検証が必要である。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書: 土木学会、1991
- 2) 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
- 3) Cold Weather Concreting with Hydronic Heaters: Journal of American Concrete Institute(ACI), 22(4), pp.51-55, 2000
- 4) ACI Committee 306: Cold-Weather Concreting, ACI 306R-88, reapproved 1997, American Concrete Institute(ACI), Farmington Hills, Michigan, 1997
- 5) 寒中コンクリート施工指針・同解説: 日本建築学会、2010
- 6) 菊地シート工業株式会社 HP, www.kikuchi-sheet.co.jp