

温水循環ホースを埋設したコンクリートの温度挙動に関する解析的検討

Analytical study on temperature behavior of concrete with embedded heating hose

北見工業大学工学部社会環境工学科

北見工業大学大学院工学研究科社会環境工学専攻

北見工業大学工学部社会環境系

北見工業大学工学部社会環境系

エクセン(株)

エクセン(株)

○学生員 成岡大吾 (Daigo Narioka)

学生員 小原総基 (Soki Obara)

正 員 崔 希燮 (Heesup Choi)

正 員 井上真澄 (Masumi Inoue)

非会員 斎藤能雄 (Yoshio Saito)

非会員 井上 和 (Wataru Inoue)

1. はじめに

寒中施工では、コンクリートの初期凍害や強度発現の遅れが問題となるため、一定の強度(5N/mm²)を発現するまでは、適切な初期養生を行うことが推奨されている¹⁾²⁾。特に積雪寒冷地域では給熱養生を行うのが一般的であり、構造体周囲に仮設の上屋を設置し、熱風機等により内部空間を温度制御する方法が主流である。

一方、新しい給熱養生方法として、図-1 に示すような温水循環ヒーターを用いた給熱養生システムがある³⁾。温水循環ヒーターは、簡易ボイラーで温水を作り出し、循環ポンプを用いてホースへ温水を供給するシステムである。本システムは、温水循環ホース(以下、温水ホース)をコンクリート打込み面あるいは型枠外部に設置するとともに、温水ホースと構造体全体を断熱シートなどで被覆して熱損失を抑えることで、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、仮設上屋内部全体を暖める従来型の手法に比較して、熱効率が高く不要な燃焼ガス(CO、CO₂)を発生しないことから省エネかつクリーンな給熱養生が可能となる。

著者らは、これまで道路橋示方書の基準⁴⁾に準じて部材厚を150~300mmに設定したRC床版を想定して、温水ホースを打込み面のみに設置して1面から給熱した場合の養生効果について検討を行ってきた。外気温に応じて温水ホースの内部溶液温度や配置間隔を適切に設定し断熱シートで温水ホースを含む躯体全体を被覆することにより、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ることを明らかにしている⁵⁾。一方で部材厚が大きくなると1面からの均等な熱供給には限界があり⁶⁾、本システムの汎用化には部材厚の大きな構造体への適用が課題となる。

そこで本研究では、本給熱養生システムの部材厚を有する構造体への適用を目的として、温水ホースを躯体内部に埋設して躯体内部からコンクリートを給熱する方法について基礎的検討を行った。図-2 に温水ホースを埋設した給熱養生の概念図を示す。まずコンクリート打込み前に予め温水ホースを設置し、打込み終了後、ホース内部に温水を循環させることでコンクリートを給熱し温度管理を行う。給熱養生終了後、温水ホース内部にグラウト材を充填することによりコンクリートと一体化を図る。

このような温度管理を目的として温水ホースを埋設する場合、埋設材料として熱効率性の高い鋼製のものを使

用することが一般的である。しかし、鋼製材料は、曲げや切断の加工に専用の機械を必要とするため、躯体内部への配置作業において補強筋と干渉する場合の調整が困難であること、一定間隔で接続部を設ける必要がありその漏水対策が必要であること、重量物であることから施工に労力を要するなどの課題がある。このような課題を鑑みると、施工性や経済性の観点から軽量かつ柔軟性と切断性を兼ね備える樹脂系のものが埋設材料として有利であると考えられる。

本研究では、寒中施工において温水ホースを躯体内部に埋設して給熱養生したコンクリートの温度挙動を把握することを目的として、埋設する温水ホースの材料の違いがコンクリートの温度挙動に与える影響について解析的検討を行った。

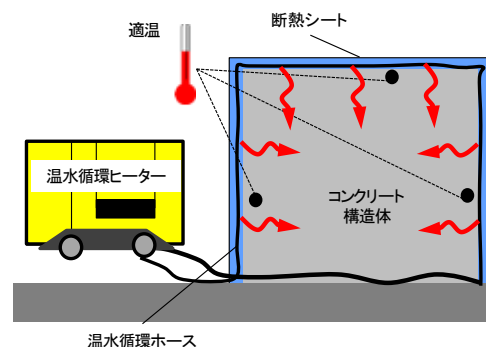


図-1 温水循環ヒーターを用いた給熱養生システム

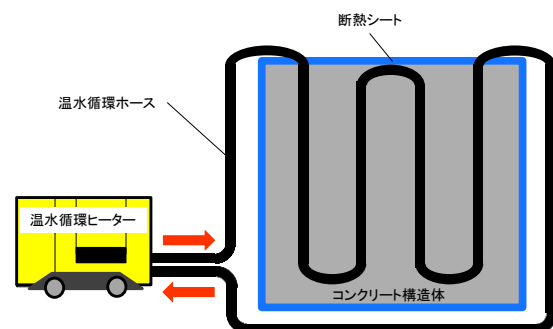


図-2 温水ホースを埋設した給熱養生

表-1 解析因子

埋設材料	外気温(一定)	断熱シート	ホース内溶液温度
ポリエチレン(高密度)、ポリアミド(ナイロン 6)、ポリ塩化ビニル(軟質)、ポリプロピレン	0°C	1 層	20~60°C

表-2 埋設する温水ホースの材料物性値⁷⁾

埋設材料	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
ポリエチレン(高密度)	0.49	1.796E+06	1.88E+03	953
ポリアミド(ナイロン 6)	0.21	2.176E+06	1.93E+03	1130
ポリ塩化ビニル(軟質)	0.15	2.077E+06	1.67E+03	1240
ポリプロピレン	0.10	1.745E+06	1.93E+03	906

表-3 材料物性値

材料	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
コンクリート ⁸⁾	2.6	2.520E+06	1.05E+03	2400
空気	0.0241	1.301E+03	1.01E+03	1
断熱シート ⁹⁾	0.01623	1.820E+04	7.60E+02	24

2. 温度解析

2.1 概要

本解析では、埋設する温水ホースの材料がコンクリートの温度挙動に与える影響を把握することを目的として、温水ホースの材料や温水ホースを循環する内部溶液の温度をパラメータとした解析的検討を行った。解析には、既往研究で妥当性を検証した「電磁解析ソフト」³⁾を使用し、有限要素法による2次元温度解析を行った。

2.2 解析因子および条件

表-1 に本解析因子を、表-2 に埋設する温水ホースの材料物性を、表-3 にその他の材料物性値を示す。

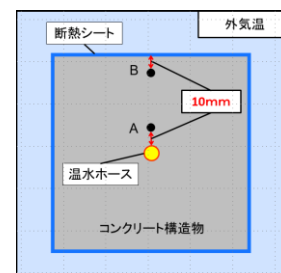
コンクリート躯体内に埋設する温水ホースには、現場施工性や経済性の観点から軽量かつ柔軟性と切断性を兼ね備える樹脂系ホースのうち市販されているものの中から熱伝導率の異なる材料として、ポリエチレン、ポリアミド(ナイロン 6)、ポリ塩化ビニル(軟質)、ポリプロピレンの4種類を選定した。

図-3 に解析モデルの概要を示す。本解析では、図-3(a)に示す 300×300mm 寸法のコンクリート躯体中央部に温水ホースを 1 本埋設した場合と、図-3(b)に示す 300×600mm 寸法のコンクリート躯体中央部に温水ホースを 2 本埋設した場合の 2 ケースで温度解析を行った。温水ホースの寸法(内外径)は、市販されているポリエチレン製ホースの寸法を参考に内径 25.0mm、外径 34.0mm とし、温水ホースを 2 本配置する場合の配置間隔は、既往研究を参考に 300mm³⁾とした。

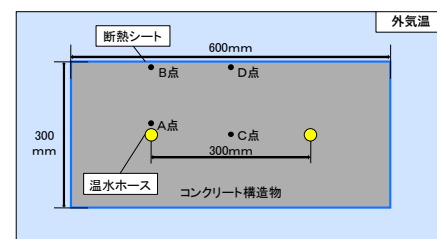
外気温は寒中施工を想定して 0°C とし、コンクリート躯体の初期温度は寒中施工におけるコンクリートの打込み温度^{1),2)}を参考に 10°C とした。なお、本解析では水和熱の影響は考慮していない。温水ホースの内部溶液温度は 20°C~60°C の範囲で設定し、解析期間は 7 日間とした。また、本システムを用いた給熱養生を行う場合、熱効率

性を確保する上でコンクリート構造体表面を断熱シートで被覆することが有効であることから、本解析では断熱シートを単層で被覆⁹⁾した。コンクリート内部の温度測点は、図-3(a)に示す A 点と B 点、図-3(b)に示す A 点、B 点、C 点、D 点とした。なお、A、B、D 点については熱源や外気への接触による影響を考慮し、コンクリート表面と埋設した温水ホース表面から 10mm 離れた位置を測点とした。また、C 点は 2 本の温水ホースの中心点とした。

コンクリートの目標養生温度は「土木学会コンクリート標準示方書」¹⁾および「日本建築学会 JASS5」²⁾を参考にして、ケース 1 の場合は A 点で 20±1°C、B 点で 20°C



(a) ケース 1(300×300mm : 温水ホース 1 本)



(b) ケース 2(300×600mm : 温水ホース 2 本)

図-3 温度解析モデル

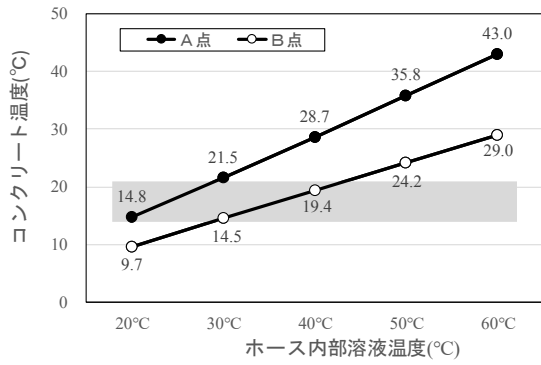


図-4 ポリエチレン(高密度) : ケース 1

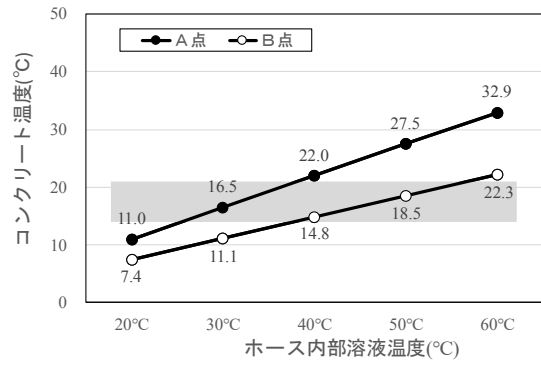


図-5 ポリアミド(ナイロン6) : ケース 1

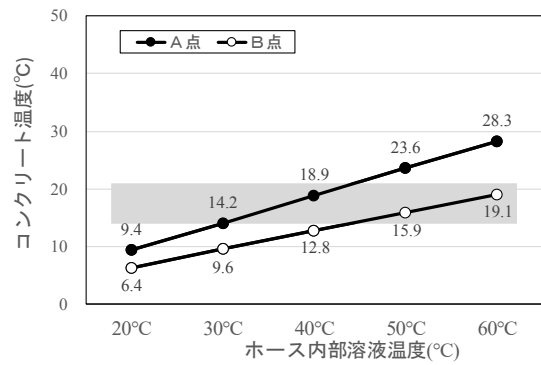


図-6 ポリ塩化ビニル(軟質) : ケース 1

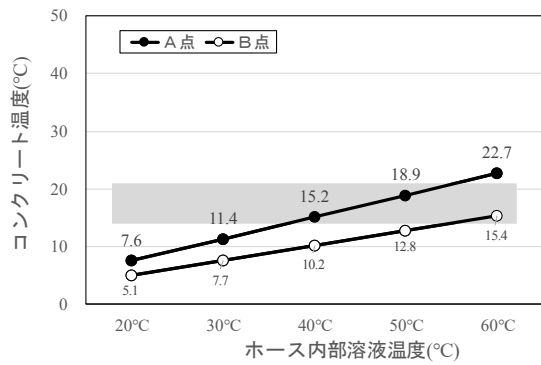


図-7 ポリプロピレン : ケース 1

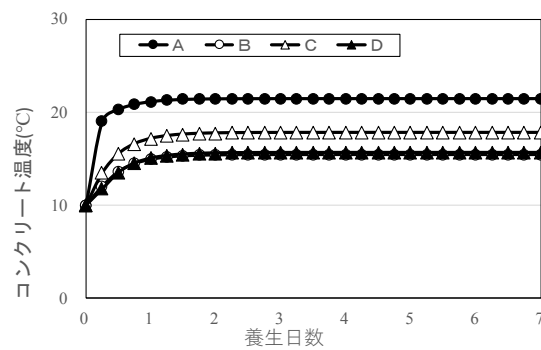


図-8 ポリエチレン : ケース 2

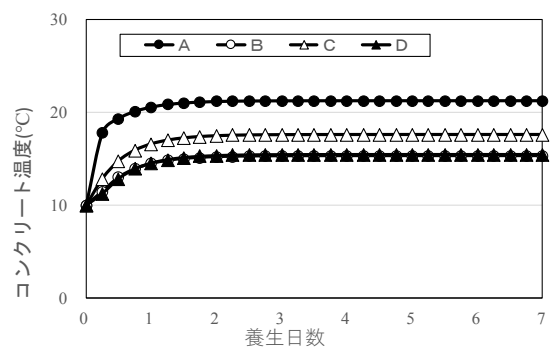


図-9 ポリアミド(ナイロン6) : ケース 2

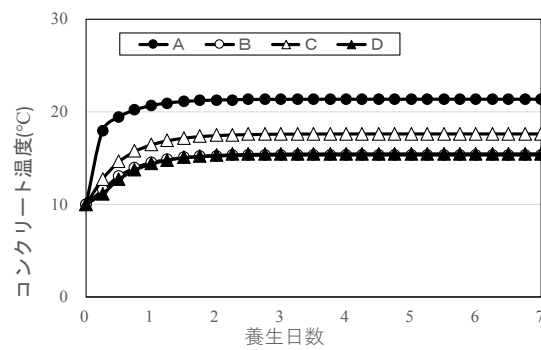


図-10 ポリ塩化ビニル(軟質) : ケース 2

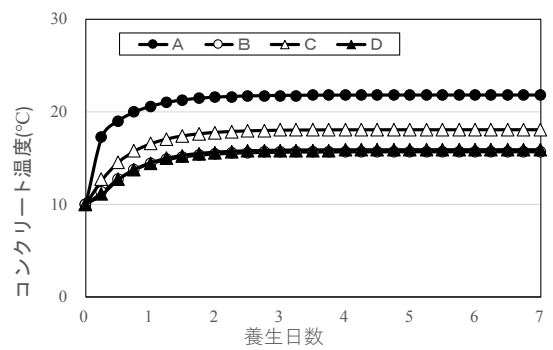


図-11 ポリプロピレン : ケース 2

表-4 温度解析結果(ケース 2)

温水循環ホース	埋設材料	ポリエチレン	ポリアミド	ポリ塩化ビニル	ポリプロピレン
	ホース内部溶液温度	28℃	35℃	40℃	50℃
コンクリート 温度測定位置	A 点	21.5	21.3	21.3	21.7
	B 点	15.5	15.3	15.3	15.7
	C 点	17.8	17.7	17.6	18.0
	D 点	15.6	15.5	15.5	15.8

×(-30%)に、ケース 2 の場合はケース 1 の温度解析結果に基づき A 点の目標温度で 21℃、B～D 点で $20\pm 1^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}\times(-30\%)$ に設定した。既往研究では、この目標温度を満足することで、標準水中養生($20\pm 1^{\circ}\text{C}$)と同等の強度発現が得られることが確認されている。¹⁰⁾

3. 結果および考察

図-4～図-7 に温水ホースを 1 本埋設したケース 1 におけるホース内部溶液温度とコンクリート温度の関係を示す。図中にはコンクリートの目標養生温度である $20\pm 1^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}\times(-30\%)$ の範囲をグレー色で示した。解析結果より、埋設材料の熱伝導率をはじめとした物性値の違いによりコンクリートの温度履歴に明確な差異が確認された。本解析条件において上述の目標温度範囲を満足するホース内部溶液温度は、ポリエチレンの場合に約 30℃、ポリアミド(ナイロン 6)の場合に約 40℃、ポリ塩化ビニル(軟質)の場合に約 50℃、ポリプロピレンの場合に約 60℃であった。

表-4 に温水ホースを 2 本埋設したケース 2 の解析結果を示す。これは、コンクリート内部の各測点(B～D 点)における温度が目標温度範囲を概ね満足し、A 点において 21℃を満足する場合のホース内部溶液温度を解析的に抽出したものである。これによるとホース内部溶液温度は、ポリエチレンの場合に 28℃、ポリアミドの場合に 35℃、ポリ塩化ビニルの場合に 40℃、ポリプロピレンの場合に 50℃であり、ケース 1 と同じく熱伝導率が最も高いポリエチレンの場合に温度設定が低くなった。また、ケース 1 と比較すると、コンクリート内部の熱供給源が 2 本になることでコンクリートの給熱効果が高まり、ホース内部溶液温度が全ての材料で低くなったものと考えられる。

表-4 に示す埋設材料毎に得られたホース内部溶液温度で給熱した場合のコンクリート温度の経時変化を図-8～図-11 に示す。いずれのケースも材齢 1 日から 2 日まで温度上昇がみられ、その後は一定の温度を推移した。また、熱伝導率が最も高いポリエチレンでは他の埋設材料に比べて、コンクリート温度が上昇し一定になるまでの時間が短くなる傾向にあった。

以上より、熱伝導率の高い材料を温水ホースに使用することはホース内部溶液温度の低下につながり、より効率的かつ経済的な給熱養生システムを構築する上で有利になると考えられる。

4. まとめ

本研究では、温水ホースを躯体内部に埋設した場合の

コンクリートの温度挙動を把握するため、温水ホースの材料の違いがコンクリートの温度挙動に与える影響について解析的検討を行った。その結果、埋設材料の熱伝導率をはじめとした物性値の違いによりコンクリートの温度履歴に明確な差異が確認された。熱伝導率の高い材料を温水ホースに使用することはホース内部溶液温度の低下につながり、より効率的かつ経済的な給熱養生システムを構築する上で有利になると考えられる。

今後、本解析モデルをベースとして温水循環ホースを埋設したコンクリート試験体を作製し、給熱したコンクリートの温度履歴を測定して本解析結果との比較検証を行うとともに、その養生効果(強度発現)について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：2017 制定コンクリート標準示方書(施工編)、2018.3
- 2) 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、2018.7
- 3) 元木冨、崔希燮、井上真澄、山下哲、岡田包儀、斉藤能雄、井上和、福地新一：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
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 コンクリート橋・コンクリート部材編、2017
- 5) 小原総基、井上真澄、崔希燮、斉藤能雄：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.1、
- 6) 小原総基、崔希燮、井上真澄、斉藤能雄、井上和、中村雅樹：コンクリート床版を対象とした温水循環式給熱養生方法における最適温度設定方法の提案、土木学会北海道支部論文報告集、E-19、2019.1
- 7) 高分子学会：高分子データハンドブック(応用編)、培風館、1986.1
- 8) 土木学会：2017 制定コンクリート標準示方書(設計編)、2018.3
- 9) 菊池シート工業株式会社 HP、www.kikuchi-sheet.co.jp
- 10) 山下哲、崔希燮、井上真澄、元木冨、岡田包儀、斉藤能雄、井上和、福地新一：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、土木学会北海道支部論文報告集、E-27、2018.1