

凍害環境下における鋼コンクリート合成床版の温度解析

Temperature analysis of a steel-concrete composite slab under frost damage environment

北海道大学大学院工学院 ○学生員 藤田隼生 (Hayao Fujita)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 何 興文 (Xingwen He)
 寒地土木研究所 正会員 表 真也 (Shinya Omote)
 日本橋梁建設協会 正会員 久保圭吾 (Keigo Kubo)

1. はじめに

積雪寒冷地での RC 床版では、凍害により床版上面が劣化損傷を受けたとみられる事例が数多く報告されている。これは輪荷重等により発生した舗装や床版のひび割れから雨水・融雪水が浸入し、長年にわたる凍結と融解の繰り返し作用により床版上面のコンクリート表面にスケリングが発生し、かぶりコンクリートが砂利化したものと考えられている¹⁾。近年、高強度化や施工省力化を目的として採用が増加している鋼コンクリート合成床版²⁾においても床版上面はコンクリートであることから同様の現象が生じる可能性があることが懸念されている。

また、鋼コンクリート合成床版は下面に鋼板を有するため、コンクリート中の水分が下面から蒸発せず水分量が多くなると思われることや、床版内に熱伝導率の大きい鋼材が多く埋め込まれており、気温や日射等の変化が床版内部のコンクリート温度に与える影響が大きいと考えられるなど凍害に対する懸念要素は多い。にもかかわらず、RC 床版と比較して凍害劣化の研究はあまり行われていないため、鋼コンクリート合成床版に着目した凍害劣化の調査、研究が必要とされている。

本研究では有限要素解析を用いて鋼コンクリート合成床版が受ける温度変化を調査することを目的としており、本論文では北海道大学、寒地土木研究所、日本橋梁建設協会が共同して行っている温度変化実験³⁾をもとに鋼コンクリート合成床版の解析モデルを作成し、温度解析によって床版内部の温度分布性状に対する検討を行っている。

2. 温度変化実験の概要

実験では合成床版の種類を形鋼、帯鋼、ロビンソン (Stud)、トラスの 4 種に大別しており、各種合成床版と比較のための RC 床版を加えた 5 種類の供試体を作成している。供試体の寸法は縮小モデルとした場合、実橋床版との比較が困難であることから実物大モデルとしている。実験供試体を図-1 に示す。供試体内部は合成床版の鋼材が側面に露出すると、側面からの温度変化の影響を大きく受けると考えられることから 30mm 程度内側に据えるものとする。また、実験に際しては側面からの温度変化の影響を排除するため、側面を厚さ 10cm の発泡スチロールで断熱した状態で実施するものとする。

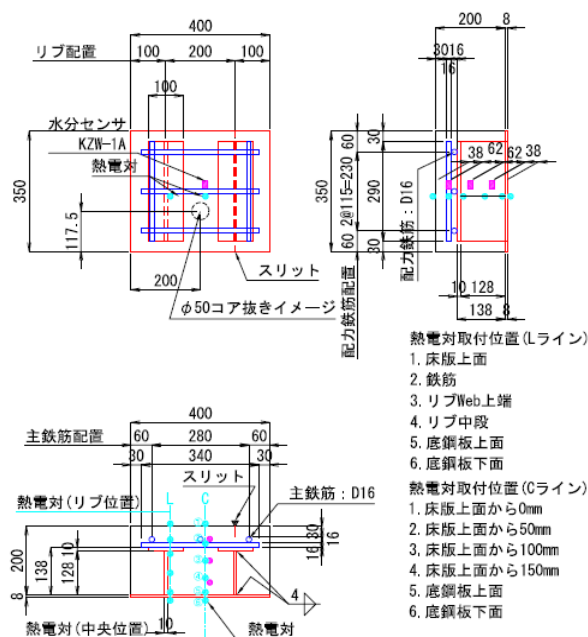
温度変化実験の方法は供試体を冷却試験器に入れ器内

温度を 20℃から-20℃まで変化させるもので、温度勾配は 20℃と-20℃の間を 30 分で変化させる急冷条件とする。また、器内温度が-20℃となった後は内部の温度が定常化するまで温度を維持する。床版内温度を計測するための熱電対の取り付け位置は供試体ごとに中央部 (C ライン) とリブ位置 (L ライン) の 2 か所となっており、中央部では床版上面から 0mm、50mm、100mm、150mm、底鋼板上面、底鋼板下面の計 6 点で計測、リブ位置では供試体ごとに床版上面から 0mm、床版上面側鉄筋位置、リブ上端、中段、下端 (底鋼板上面)、底鋼板下面の計 6 点で計測している。

3. 温度解析

3.1 解析モデル

解析で使用する有限要素モデルとして形鋼、帯鋼、ロビンソン (Stud)、トラス、RC 床版の 5 体を作成した。各有限要素モデルの寸法は、実験と同様に橋軸方向 400mm×橋軸直角方向 350mm×床版厚 208mm (RC 床版は 200mm) となっている。また、橋軸方向は x 軸、橋軸直角方向は y 軸、床版厚方向は z 軸となるようにした。全体図と各種合成床版内部の鋼材部を図-2 に示す。コ



ンクリート部分はすべて8節点ソリッド要素で作成しており、鋼材は種類によって8節点ソリッド要素と梁要素を使い分けている。使用する鋼材の種類を表-1に示す。

梁要素化する鋼材はD16鉄筋、ロビンソンのStud、トラスの斜材SWRMで、梁要素は一要素当たりの寸法が8節点ソリッド要素の各辺と同じ10mmになるように要素分割し、コンクリート要素の各節点と共有するようにしている。また、梁要素は各部材ごとに断面積を設定しており、Studに関しては頭と胴体で区別してある。各梁要素の断面積を表-2に示す。梁要素の配置に関しては、床版上面側のD16鉄筋は断面の太さを考慮して上面から38mm、54mmの位置に配置し鉄筋同士が重ならないようにしてある。帯鋼では床版下面側のD16鉄筋を通す孔の部分を実験供試体のものと断面積がほぼ同じになるように幅40mm、高さ50mmの長方形断面で作成しており、孔を通るD16鉄筋は長方形断面の下端から10mm上の位置に配置している。トラスに使用する斜材の梁要素は斜材一本当たりの長さが150mmとなるように橋軸方向30mm×橋軸直角方向70mm×床版厚130mmの要素内で10mmの梁要素をつなげて再現している。また、RC床版の床版下面側のD16鉄筋については上面側と同様の配置としている。

コンクリートと鋼材の熱的材料特性に関して、熱伝導率と比熱はそれぞれ0℃～常温で使用される値^{4), 5)}を参考に決定している。コンクリートと鋼材の材料特性を表-3に示す。

3.2 解析条件

解析モデルの妥当性を検証するため、有限要素解析ソフトMSC.Marc⁶⁾を用いて温度変化実験を元に24時間の非定常熱伝導解析^{7), 8)}を行い各種床版内部の温度分布変化を観察した。初期条件としてモデルの全節点温度を20℃とし、境界条件として床版上面と底鋼板上面の節点温度を実験値と同様に時間経過で-20℃まで変化させた。境界条件を図-3に示す。また、モデルの側面は断熱境界条件とする。床版下面側は底鋼板下面ではなく上面の節点温度を変化させているが理由は後述する。

温度計測は実験において断面高さごとに設置されている熱電対を含む床版厚方向のライン上(図-2参照)で行い、モデル中央部とリブ位置の2カ所で計測する。基本的に計測位置は各モデル共通としているが、ロビンソンの中央部は実験と同様に中央部に配置されているStudの影響を考えて中央部から約30mm程度離れた位置にラインを置いている。また、トラスのリブ位置では断面高さ10mmごとに斜材の配置に沿った節点で計測している。RCにはリブ鋼材は無いため、実験と同様に中央部から橋軸方向に70mm程度離れた位置をリブ位置として計測している。温度計測のタイミングは解析開始から6時間までは1時間ごとに、その後は8、10、12、16、20時間経過後に計測を行う。

3.3 解析結果

(1) 中央部における断面高さ-温度関係

中央部における経過時間ごとの断面高さ-温度関係を

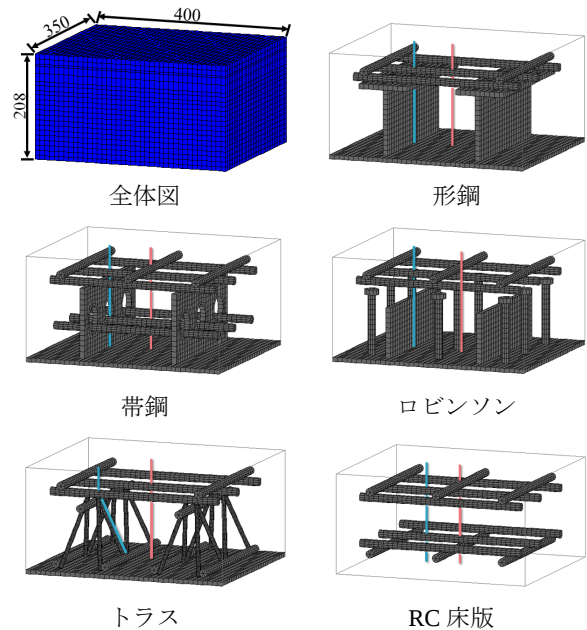


図-2 全体図と各種合成床版の鋼材部

表-1 鋼材の種類

床版タイプ	鋼材・鉄筋等	寸法(mm)	数量
形鋼タイプ	PL	400×8×350	1
	PL	128×10×290	2
	PL	100×10×290	2
	D16	340	3
	D16	290	2
帯鋼タイプ	PL	400×8×350	1
	PL	138×10×290	2
	D16	340	6
	D16	290	3
ロビンソンタイプ	PL	400×8×350	1
	PL	100×10×290	2
	Stud	φ16×130	9
	D16	340	3
	D16	290	3
トラスタイプ	PL	400×8×350	1
	上弦材D16	290	2
	下弦材D16	290	4
	斜材SWRM	8	4
	D16	340	3
	D16	290	2
RC床版	D16	340	6
	D16	290	6

表-2 梁要素の断面積

鋼材名	直径 (mm)	断面積 (mm ²)
D16	15.9	198.6
Stud (頭)	29	660.52
Stud (胴)	16	201.062
斜材 SWRM	8	50.265

表-3 材料特性

	コンクリート	鋼材
熱伝導率 (W/m・K)	1.5	50
比熱 (J/kg・K)	1050	460
密度 (kg/m ³)	2300	7800

図-4 に示す。縦軸に底鋼板下面を 0mm とした場合の断面高さ、横軸に温度を取っており実線でのプロットが解析値、破線でのプロットが実験値となっている。また、破線上のシンボルマークは熱電対の位置と経過時間を表している。

合成床版の結果は経過時間 1 時間までは実験値を良く再現していると言えるが、時間経過につれて床版の下面側を中心に解析値の温度が高くなる傾向がある。逆に RC 床版では上面側は時間経過につれて実験値を良く再現するようになるが、下面側は合成床版と違い実験値より温度が下がりやすくなっている。

全体として実験における冷却試験器の配置上、下面側の温度低下は遅くなる傾向があり、解析ではこの部分がうまく再現出来ていないと思われる。これは床版下面側の境界条件を底鋼板上面のものに設定した分、温度が下がりにくくなったためと考えられる。

(2) リブ位置における断面高さ－温度関係

リブ位置における経過時間ごとの断面高さ－温度関係を図-5 に示す。図の形式は図-4 に準ずる。形鋼に関しては大まかな傾向は再現出来ているものの、実験値と比較して全体的に温度が高くなる傾向がみられる。特にリブ上端位置において実験値との差が大きくなっている。帯鋼に関しては下面側から 50mm 付近で解析値が折れ曲がっており実験値とのずれが見られる。これはモデル作成時に D16 鉄筋を通すための孔を円ではなく長方形で再現したため、孔の下端とその上の節点の間で温度差が大きくなってしまったものと考えられる。また、床版上面側は中央部とは逆に実験値より温度が低下する結果となった。この点は形鋼以外の合成床版に共通している。ロビンソンの結果は他の合成床版と同様に上面側は実験値より下がりやすくなっているものの、下面側は実験値を良く再現していると言える。トラスもロビンソンと同様の傾向がみられる。トラスにおいて下面側の解析値が歪んでいるのは、斜材部分の梁要素上にある計測点の間隔が一定でないためで分布自体に支障はないと思われる。RC 床版では床版下面側から見て鉄筋位置までは実験値を良く再現しているが、それ以降の断面高さでは中央部で見られたように解析値の方が実験値より温度が高くなる傾向がある。

全体として合成床版は中央部とは逆に床版上面側の鉄筋位置で実験値との相違がみられる。また、形鋼とその他の合成床版で傾向が逆になっていることから底鋼板上下面での温度差が影響しているものと考えられる。

(3) リブ位置－中央部間での温度分布

リブ位置－中央部間における温度差－距離関係を図-6 に示す。リブ位置側を基準に縦軸にリブ位置側との温度差を、横軸にリブ位置側からの距離を取っている。この図ではモデルごとに最も温度差が大きくなる断面高さ・時間でのリブ位置－中央部間の温度分布をプロットしており、リブ鋼板を有しているものは中央部と比較して温度差が大きくなるが、その差は最大の形鋼でも 3℃ 未満という結果になった。境界条件が 20℃ から -20℃ の急冷条件であることを考えると、実際の環境下においてはこれ以上の温度差は生まれにくいと考えられる。

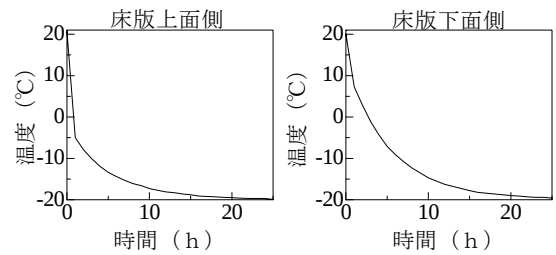


図-3 床版上下面側の境界条件

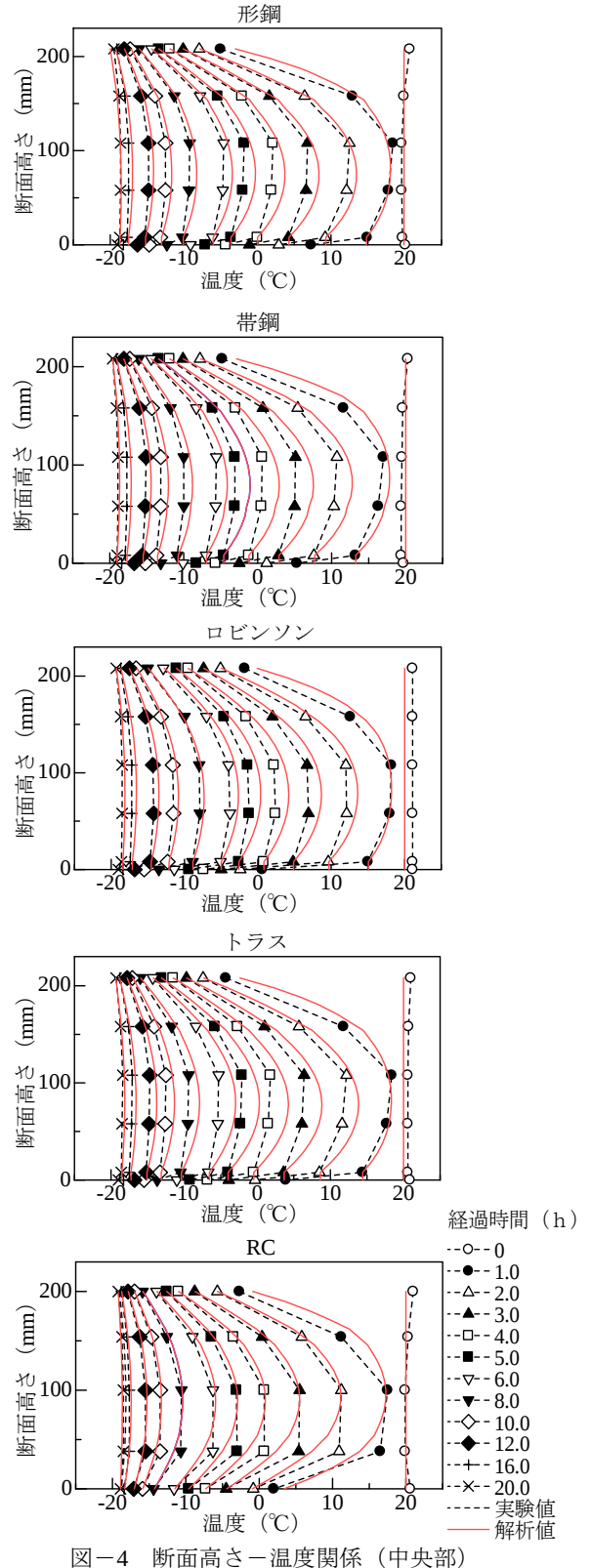


図-4 断面高さ－温度関係 (中央部)

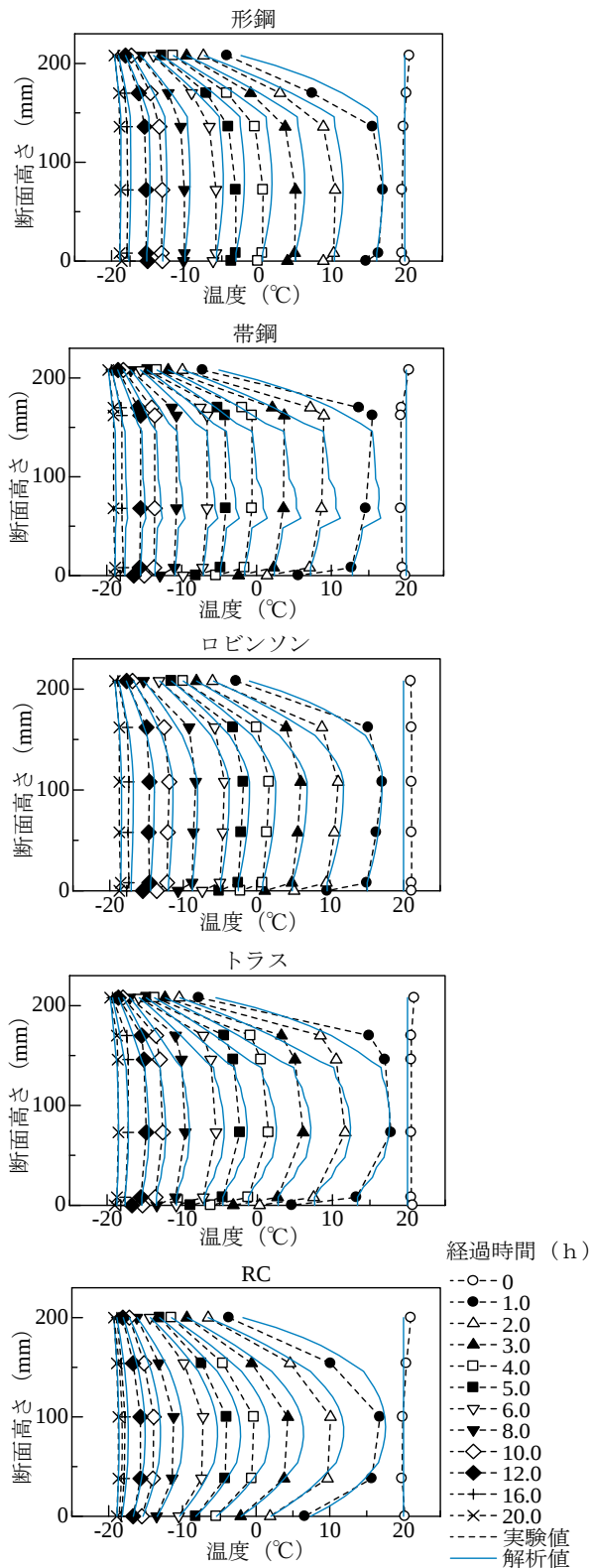


図-5 断面高さ-温度関係 (リブ位置)

(4) 底鋼板上下面での温度分布について

3.2 節で記述した床版下面側の境界条件として底鋼板下面の節点温度を変化させた場合、解析では鋼板上下面の温度差はほとんど見られず、床版下面側のコンクリート温度が実験より大幅に低下する結果となった。この理由から今回の解析では床版下面側の境界条件で底鋼板上面の節点温度を変化させている。実験において各種合成

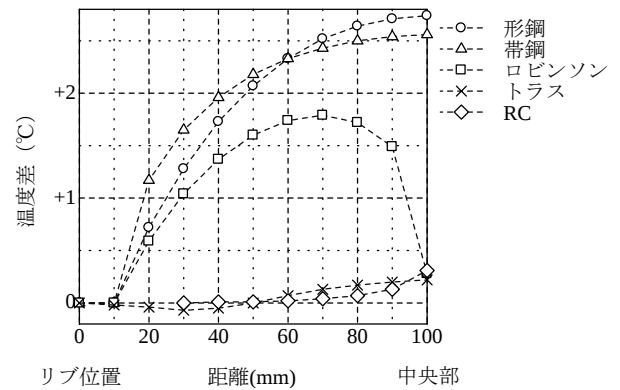


図-6 リブ位置と中央部間の温度差-距離関係

床版における底鋼板付近の条件は同一であるにもかかわらず、供試体間で底鋼板上下面の温度差に差異が生じているため、供試体によっては底鋼板上面とコンクリートの間に間隙が存在する可能性がある。間隙が存在する場合、底鋼板上面とコンクリートの間で温度がうまく伝達されず床版内のコンクリート温度は低下しにくくなるが、間隙に水分が溜まることもあるため留意する必要がある。

4. まとめ

本論文では北海道大学、寒地土木研究所、および日本橋梁建設協会が共同して行っている温度変化実験をもとに有限要素解析を用いて鋼コンクリート合成床版の解析モデルを各種作成し、温度解析によって床版内部の温度分布性状に対する検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 温度解析において作成した解析モデルが床版内の温度分布性状を比較的良好に再現出来ていることを確認した。
- 2) 各供試体の温度分布についてリブ位置-中央部間における同一断面高さ上の温度差は最大でも 3°C 未満であることを確認した。
- 3) 合成床版において底鋼板の上下面で解析値と実験値に差異があることを確認した。

参考文献

- 1) 長谷川寿夫、藤原忠司著：凍害、技報堂出版、1988.
- 2) NBC 研究会：新しい合成床版と橋、1996.
- 3) 北海道大学、寒地土木研究所、日本橋梁建設協会：鋼コンクリート合成床版の凍害に関する共同研究、2012.
- 4) 国立天文台：理科年表、丸善株式会社、1991.
- 5) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点' 11、pp69-70、2011
- 6) エムエスシーソフトウェア株式会社：MSC.Marc 入門トレーニングコースノート、pp73-95、2005.
- 7) 黒田英夫著：3 次元熱伝導解析プログラム、CQ 出版社、2003.
- 8) JSME テキストシリーズ：伝熱工学、日本機械学会、2005.