

鋼コンクリート合成床版の凍害に関する実験的研究

技術委員会 床版小委員会

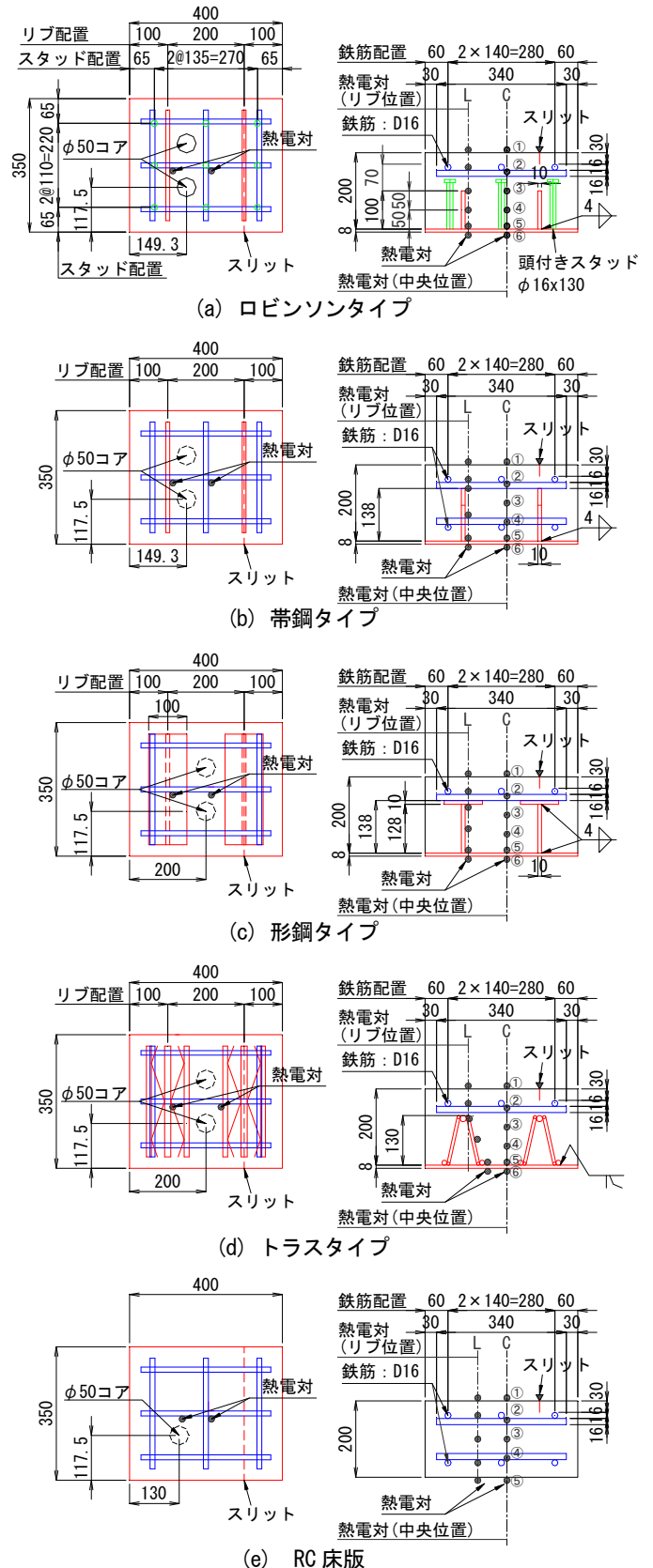
久保圭吾、皆田龍一、酒井武志、入部孝夫

1. はじめに

道路橋の床版は、直接輪荷重を支持するため、橋梁を構成する部材の中でも特に損傷を受けやすい。さらに、積雪寒冷地や凍結防止剤を散布する地域では、凍害、塩害等の影響を受けることから過酷な環境条件下にある。近年、積雪寒冷地における橋梁 RC 床版では、上面のかぶりコンクリートの砂利化が進展し、床版コンクリートが抜け落ちる等の損傷事例が多く報告されるようになってきた¹⁾。

本研究で対象としている鋼コンクリート合成床版（以下、合成床版）は、床版下面に配置した鋼板（以下、底鋼板）を鉄筋コンクリート版と合成させた床版形式であり、高耐久性、施工省力化を利点として数多くの橋梁で採用されている。合成床版の底鋼板は、コンクリート施工時の型枠として機能するとともに、底鋼板上に配置したずれ止めによりコンクリートと一体化されている。この構造特性により合成床版は、下面からの水分の発散がないためコンクリート中の水分量が多くなることが考えられる上、内部に熱伝導率の大きな鋼材が多いことで温度変化が大きく、RC 床版に比べて凍害の進行が早くなることが懸念される。さらに、合成床版では、コンクリートに膨張材を添加することから、コンクリート中の空隙の減少による耐凍害性の低下も懸念される。

そこで、本研究では、合成床版の耐凍害性を調査することを目的として、各種試験を実施した。まず、4種類のずれ止め形状が異なる合成床版と RC 床版を模擬した供試体を用いて、コンクリート中の水分量を計測して底鋼板の有無による影響を確認するとともに、凍結融解温度域における熱伝導実験を実施して、合成床版のコンクリート中に埋め込まれた鋼材が温度分布に及ぼす影響を比較検討した。これらの計測・検討結果から、最も凍結融解の影響を受けると考えられるずれ止め形状の合成床版による凍結融解試験を実施して、スケーリング量の計測、コア抜き供試体を用いた超音波伝播速度の測定を行った。また、合成床版はコンクリートが鋼板で拘束されるため、拘束が凍結融解試験



図一 供試体の形状

結果に及ぼす影響を把握することを目的として、拘束条件が異なる凍結融解試験を実施した。本稿では、これらの結果について報告する。

2. 実験供試体

本章では、第3章～第5章で述べる実験で使用した供試体について示す。

合成床版は、ずれ止めの種類で大別するとロビンソン、帯鋼、形鋼、トラスの4種類がある。実験ではこの4種類のタイプの供試体と比較のためにRC床版の供試体も用意した(図-1)。各種合成床版のコンクリートは、呼び強度 30 で乾燥収縮によるひび割れを抑制するため膨張材を添加している。RC床版については、標準配合の呼び強度 24 と合成床版と同じ配合のコンクリートで供試体を製作した(以下、RC床版 24、RC床版 30)。

供試体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橋軸方向 400mm×橋軸直角方向 350mm×床版厚 208mm の実物大モデルとした(図-1)。実橋では、床版上に舗装が施されるが、舗装が無い状態の方が実際より厳しい条件となると考えられる。また、実験時における側面からの温度変化の影響を排除するため、床版内部の鋼材を外側から 30mm 程度内側に控えた上で、側面を厚さ 100mm 程度の発泡スチロールで囲い断熱状態とした。なお、ひび割れからの水の浸入による影響を確認するため、床版上面にひび割れを模したスリット(幅:約 1mm、深さ:約 30mm)

を設けた供試体も準備した。

供試体の製作は屋内で行い、散水養生を1週間実施した。RC床版の底型枠は養生終了後に脱型した。供試体の種類と、各種試験で用いた供試体のタイプを表-1に示す。

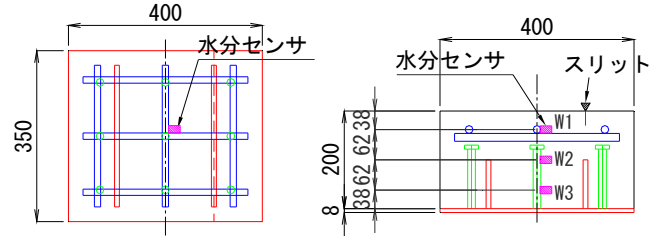
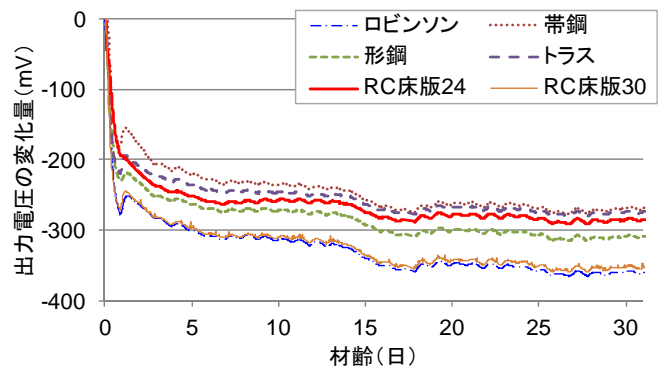
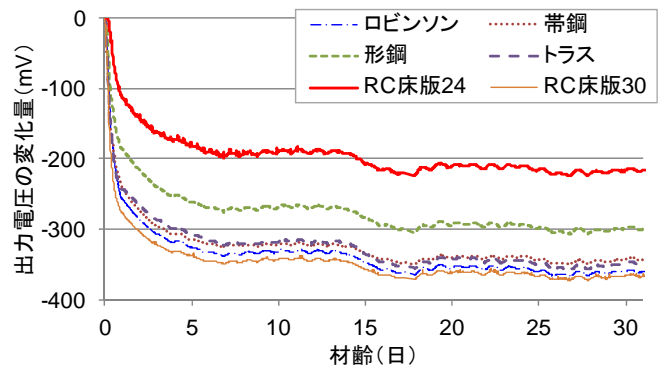


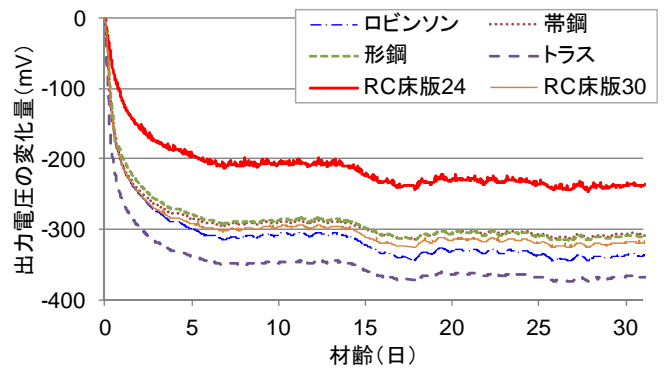
図-2 水分センサ設置位置



(a) 上側 (W1)



(b) 中央 (W2)



(c) 下側 (W3)

図-3 各測定位置における出力電圧の変化量

表-1 供試体の種類と試験ケース

床版タイプ	コンクリート	スリット	試験ケース		
			水分量計測(第3章)	温度変化(第4章)	凍結融解(第5章)
合成床版	30-8-20N (膨張材) W/C:47.8%	ロビンソン	無	○	○
			有		
		帯鋼	無	○	○
			有		○
		形鋼	無	○	
			有		○
		トラス	無	○	
			有		
RC床版	24-8-20N W/C:54.9%	無	○	○	
		有		○	

3. コンクリート内部の水分量計測

3. 1 計測概要

表-1 に示すとおり水分量は、スリットを入れていない6体の供試体にコンクリート水分センサ(KZW-1A)を試験体中央の厚さ方向に3箇所設置して計測した。センサの設置位置は、ロビンソンタイプを代表例として図-2 に示す。各供試体のセンサ設置位置は全て同じである。使用したコンクリート水分センサは、印加電圧放電時の残留出力電圧を測定して、コンクリート内部の自由水の相対的な変化を電気的にかつ非破壊で捉えるものである。また、使用した水分センサは熱電対付きで出力電圧測定位置のコンクリート温度を同時計測している。

3. 2 計測結果

計測した出力電圧の変化量を図-3 に示す。出力電圧値は、計測したコンクリート温度で補正している。

上側(W1)の出力電圧の変化量を他の測定位置と比較すると、床版構造の違いによる明確な差異はみられなかった。これは養生時における散水が影響しているものと推察される。中央(W2)と下側(W3)は、中央(W2)で若干形鋼タイプの水分量が多い傾向が見られるものの、床版形式の違いによる明確な差異が見られず、底鋼板の有無による水分量の影響は見られなかった。

一方、呼び強度24のRC床版は、呼び強度30の合成床版とRC床版と比較して出力電圧の変化量が小さくなった。これは、呼び強度24の水セメント比が呼び強度30のものより大きく、水和反応後の自由水量の差により、呼び強度24の内部水分量が大きくなったものと考えられる。

4. 温度変化による熱伝導実験と熱伝導解析

合成床版のコンクリート中に埋め込まれた鋼材が温度分布に及ぼす影響を確認するため、凍結融解温度域における熱伝導実験と有限要素法を用いた熱伝導解析を実施した²⁾。

4. 1 実験概要

供試体内部温度を計測するための熱電対は、試験体

中央(C)と鋼材が配置されているリブ位置(L)の2箇所とした。合成床版は種類によってリブ高さが異なるため、リブ位置の熱電対取り付け位置は各供試体で異なっている。合成床版の供試体は、中央位置では床版上面から0mm、50mm、100mm、150mm、底鋼板上下面の計6点で計測し、リブ位置では床版上面から0mm、床版上面側鉄筋、リブ上端、リブ高さ中央、リブ下端(底鋼板上表面)、底鋼板下面の計6点で計測している。また、試験器内の温度も合わせて計測している。各供試体の熱電対設置位置を図-1 に示す。

温度変化は、試験器内の温度を20℃から-20℃まで変化させた。初期状態は、試験器内と供試体内部の温度が20℃で定常化している状態とした。試験器内の温度勾配は20℃と-20℃の間を30分で変化させ、供試体内部の温度が定常状態となるまで試験器内温度を維持した。実験時の温度条件を図-4 に示す。

4. 2 実験結果

中央位置(C)における中央高さ(③)での温度推移の比較を図-5 に示す。実験の結果、合成床版とRC床版で温度推移の差は3℃以内であり有意な差は見られなかったが、僅かながら、RC、次いで帯鋼タイプの温度低下が早い傾向が見られた。

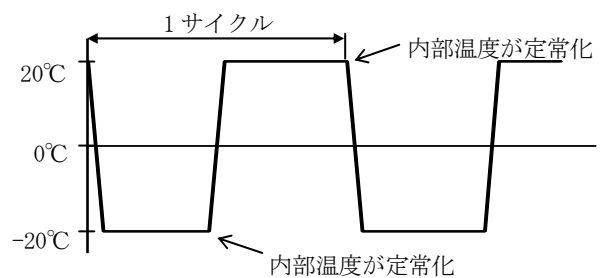


図-4 試験器内温度変化

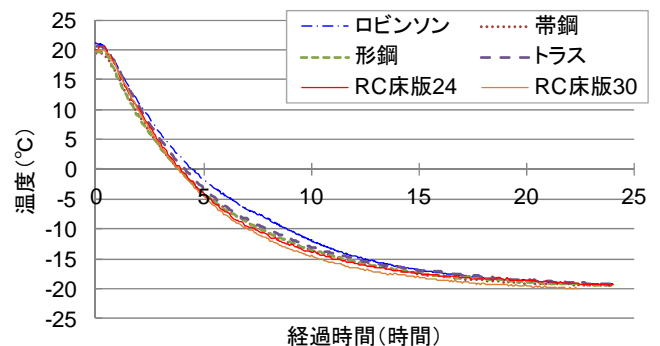


図-5 中央位置(C)中央高さ(③)における温度推移

リブ位置 (L) での厚さ方向温度分布を図-6に、中央位置 (C) での厚さ方向温度分布を図-7に示す。シンボルは熱電対位置を表しており、最上段のシンボルは試験器内温度を示している。リブ位置 (L) は、中央位置 (C) と比較して鋼材の影響により温度低下が若干早い傾向にあるものの、リブ位置中央高さにおいても合成床版と RC 床版との間に大きな差は見られなかった。

4. 3 解析手法

(1) 解析モデル

熱伝導解析には MSC. Marc³⁾を用いて、熱伝導実験に対して 24 時間の非定常熱伝導解析⁴⁾を行い、床版内部の温度分布を計算した。

解析で使用する有限要素モデルとしてロビンソン、帯鋼、形鋼、トラス、RC床版の5種類を作成した。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。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おり、帯鋼の孔やトラスの斜材を表現するために、3次元解析としている。

(2) 境界条件

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計測値と同様の経過で-20℃まで変化させた。また、モデルの側面は断熱境界条件とした。

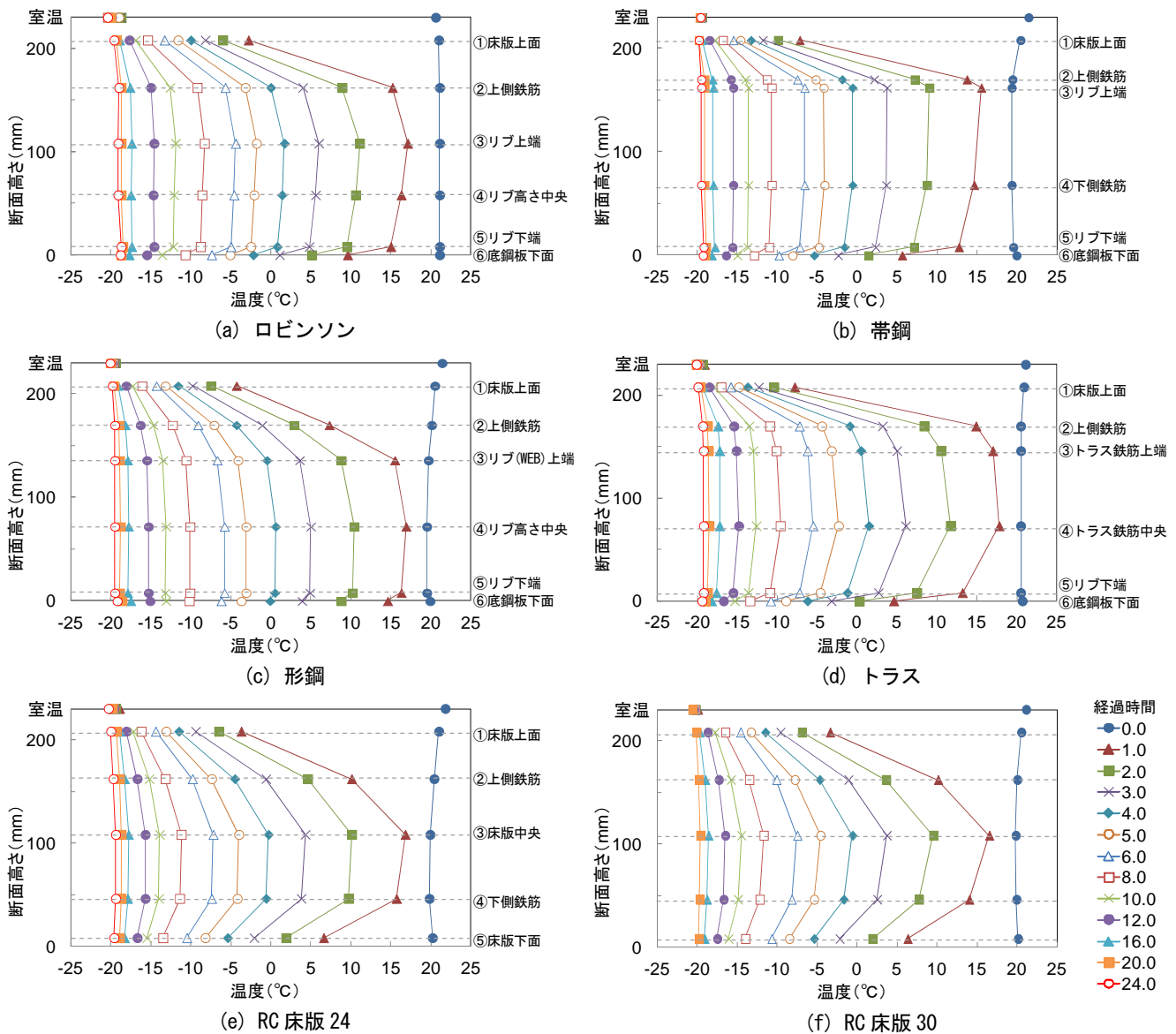
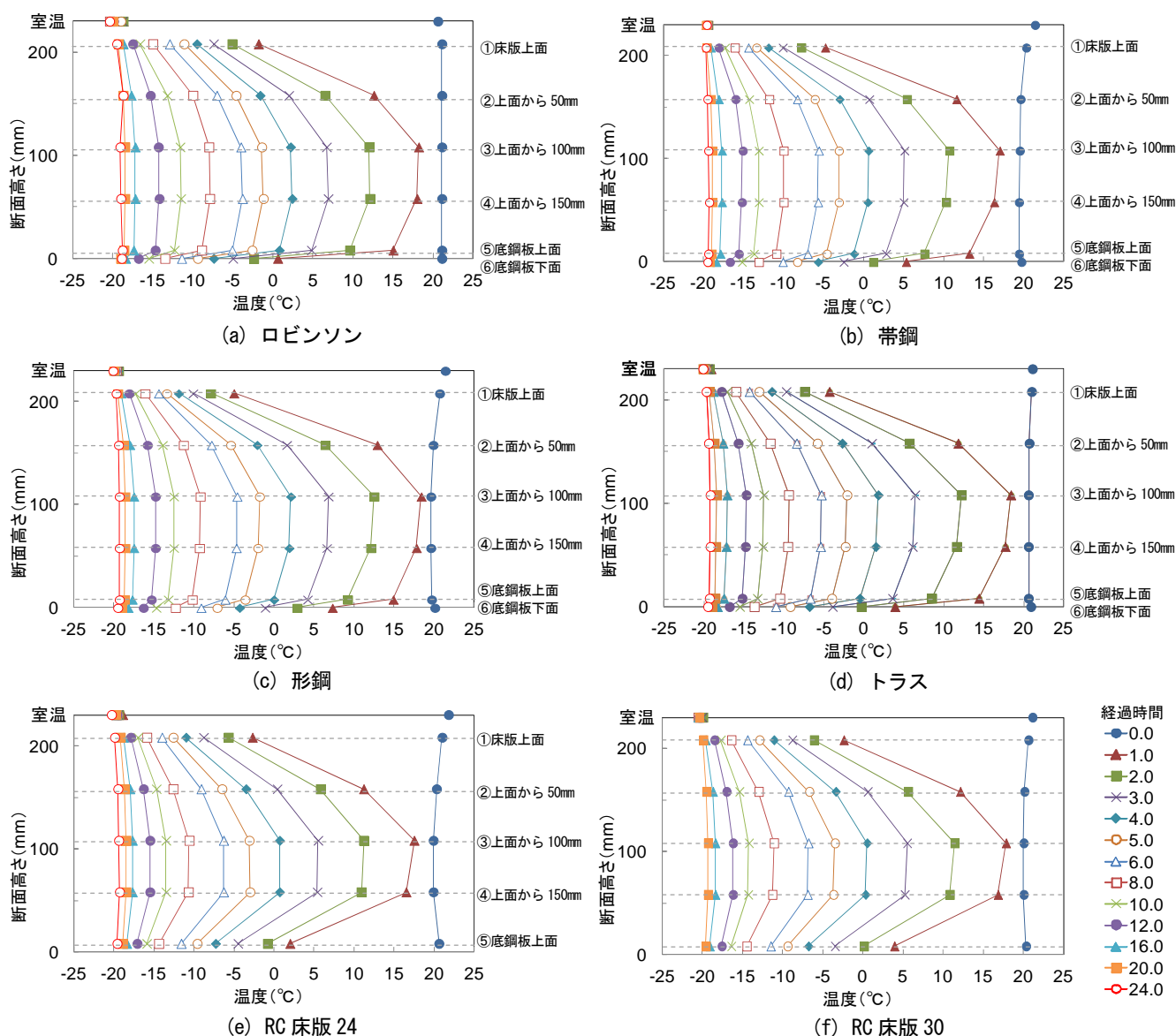


図-6 リブ位置 (L) における厚さ方向の温度分布



図ー7 中央位置 (C) における厚さ方向の温度分布

解析による床版内部温度は、実験において設定された中央位置とリブ位置の2か所の温度を取得し比較検討した。基本的に取得位置は各モデル共通としているが、ロビンソンの中央位置は実験と同様に中央に配置されているスタッドの影響を考慮して中央から30mm程度離れた位置としている。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。

(3) 材料特性

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°C～常温で使用される値を参考に決定している^{5), 6)}。温度条件では0°C以下も含む

表ー2 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

が、ここでは温度依存性は考えていない。コンクリートと鋼材の材料特性を表ー2に示す。

4. 4 解析結果

(1) リブ位置における温度分布

リブ位置における経過時間ごとの温度分布を図ー8に示す。形鋼に関しては、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っている。特にリブ上端位置において実験値との差が大きく

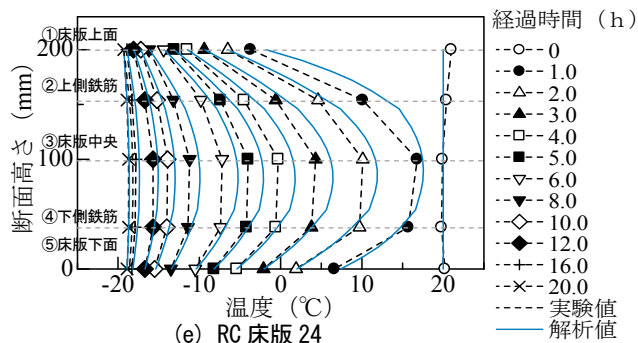
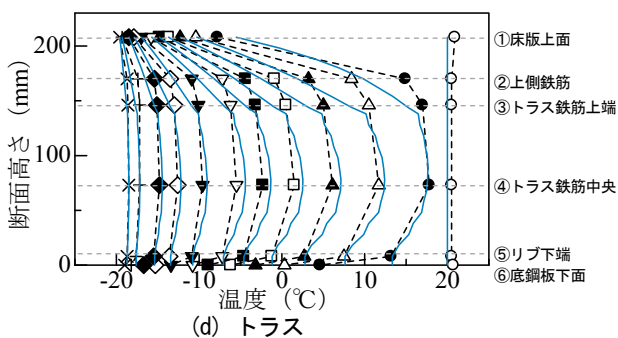
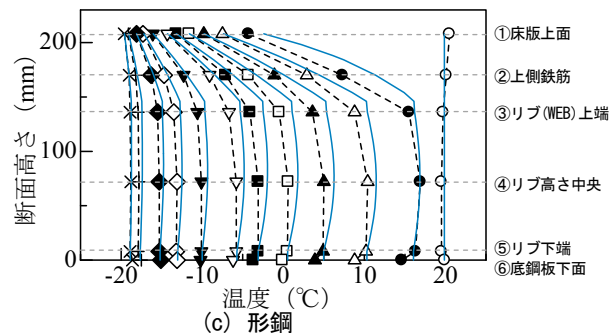
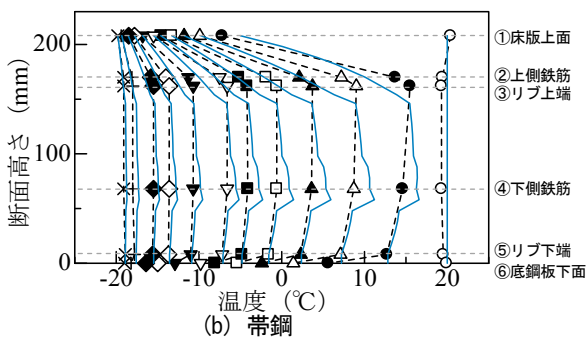
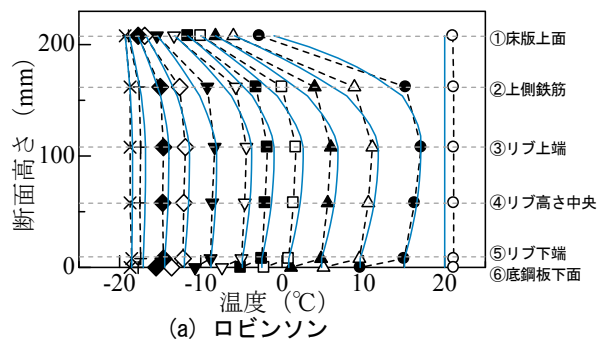


図-8 リブ位置 (L) の断面高さ-温度関係

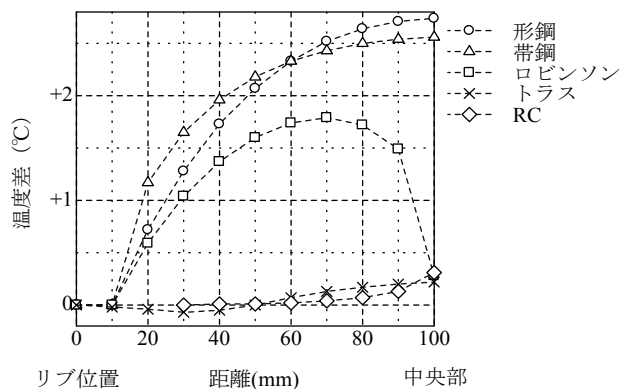


図-9 リブ位置 (L) と中央位置 (C) 間の温度差

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、D16 鉄筋がリブの孔を通過しており、この部分の熱伝達が不連続となったためと思われる。また、床版上面側はリブ高さ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。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リブ高さ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。

(2) リブ位置-中央位置間での温度分布

リブ位置-中央位置間における温度差を図-8 に示す。リブ位置側を基準に縦軸にリブ位置側と中央位置との温度差を、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で時間でのリブ位置-中央位置間の温度分布を示しており、リブ鋼板を有しているものは中央位置とリブ位置とで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°C 未満という結果になった。境界条件が 20°C から -20°C 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温度差は、ほとんど生じないと考えられ、鋼材がコンクリート内に多く配置される場合でも温度変化は小さいことがわかった。

5. 床版形状供試体による凍結融解試験

合成床版に採用されている各種ずれ止め形状、コン

クリート強度等の違いが耐凍害性に及ぼす影響を把握することを目的として、合成床版を模擬した供試体による凍結融解試験を実施した。

5. 1 試験概要

凍結融解試験の供試体の種類は、第3章のコンクリート内部水分量計測、第4章の温度変化による熱伝導実験の結果から最も凍結融解の影響を受けると考えられる供試体を選定（帯鋼タイプ：温度変化、形鋼タイプ：水分量）した。

試験は上面に 3%NaCl 溶液を張った状態で、試験器内の温度を 20℃から-30℃まで変化させた。温度勾配は 20℃と-30℃の間を 30 分で変化させ、試験器内の温度は+20℃の状態を 7 時間、-30℃の状態を 16 時間維持した。供試体内部の温度が定常状態となるまで試験器内温度を維持した。この温度条件で 200 サイクル凍結融解を行い、所定のサイクルでスケーリング量を計測した。なお、“形鋼スリット有”供試体は、100 サイクル終了後 φ50mm のコアを 1 箇所抜き、床版深さ方向の凍害の影響を調べるため、超音波伝播速度を計測した。この供試体は、底鋼板に滞水した場合の影響を調べる

ため、コア抜き後の孔に 3%NaCl 溶液を入れて試験を継続した。また、凍結融解試験終了後、供試体を切断し断面観察を行った。

5. 2 試験結果および考察

(1) スケーリング量

スケーリングの発生状況（100 サイクル、200 サイクル）を図-10 に、スケーリング量の測定結果を図-11 に示す。いずれの供試体においてもスケーリング量は 50 サイクル程度まで増加し、その後ほぼ定常化した。スケーリング量は、RC 床版 24 ではスリットの有無による差が多少あるものの有意な差ではなかった。合成床版と RC 床版 30 を、RC 床版 24 と比較すると 1/4 程度のスケーリング量となり、コンクリート強度（水セメント比）がスケーリングに大きく影響することがわかった。

(2) 超音波伝播速度

200 サイクルで試験終了後、各供試体からコア抜き（φ50mm×2 本）を行い、床版の厚さ方向に超音波伝播速度の測定を行った（図-12）。その結果、ばらつきが大きいものの、全般的に上面側の伝播速度が小さい

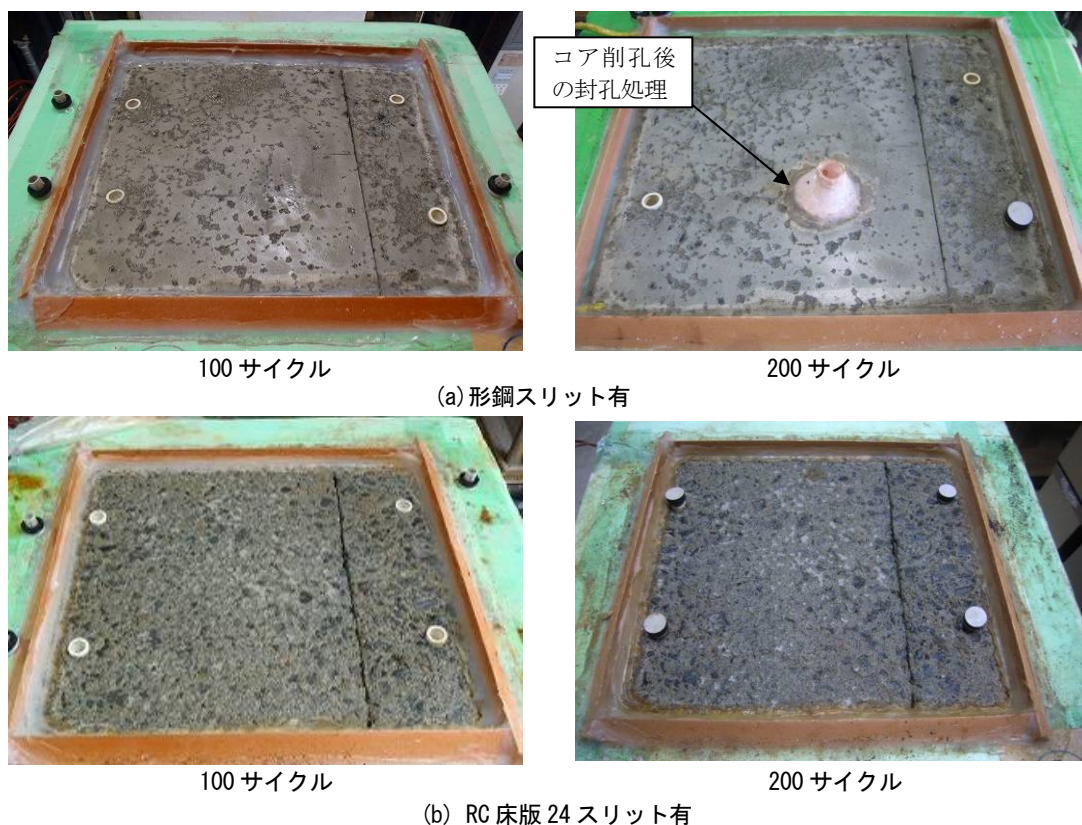


図-10 スケーリングの発生状況

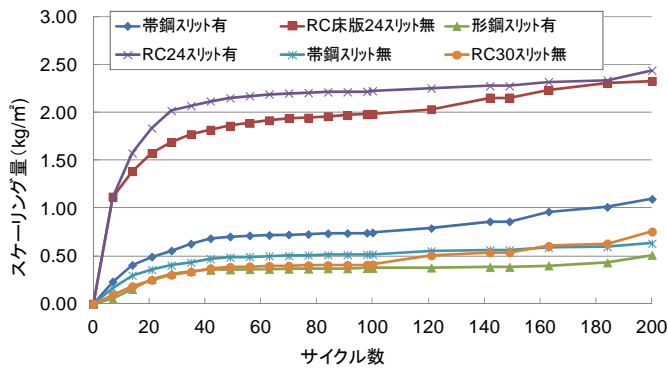


図-1 1 スケージング量

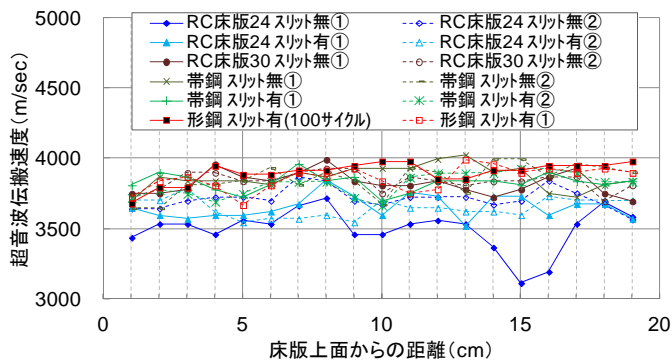


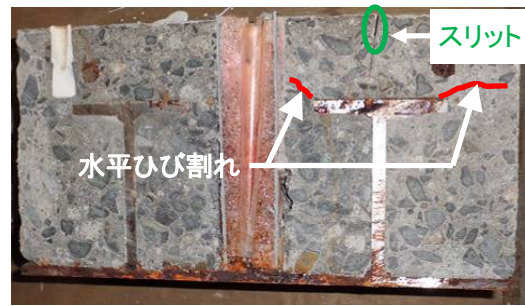
図-1 2 超音波伝播速度

傾向がみられることから、凍害は上面からの影響が大きいと考えられる。また、コンクリート強度により多少の差を確認できるものの、合成床版とRC床版の差はほとんど見られないことから、底鋼板の有無や鋼材量などの構造的要因が、超音波伝播速度に与える影響は小さいと考えられる。なお、RC床版24の供試体で床版上面から15cm付近の超音波伝播速度が低下しているのは、コア採取時にひび割れが生じたためである。

(3) 断面観察

凍結融解試験を200サイクルで終了後、供試体を切断し断面を観察した。この結果、“帯鋼スリット有”と“形鋼スリット有”でひび割れを模したスリット付近ではない箇所から各々鉄筋や形鋼から水平ひび割れが確認された(図-13(a))。また、“RC床版24スリット有”で上面からのひび割れが上側鉄筋に到達し、これから水平にひび割れが生じていた(図-13(b))。このため凍害によるひび割れは、RC床版、合成床版に関わらず、上側から生じたひび割れが上側鉄筋に到達し、その後水平に進展していくと推察される。

100サイクルでコア抜き後の孔から底鋼板上に3%NaCl溶液を入れた“形鋼スリット有”供試体では、底鋼板に錆は見られるものの、水をためた底鋼板近傍



(a) 形鋼スリット有



(b) RC床版24スリット無

図-1 3 供試体切断面

のコンクリートに損傷は見られなかったことから、合成床版の底鋼板上に水が浸入してもコンクリートの凍害に与える影響は小さいと考えられる。

6. 拘束を受ける凍結融解試験

コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を試験する方法として、コンクリートの凍結融解試験方法(JIS A 1148)がある。JIS規格では、供試体は一辺の長さを100mmとした正方形断面で長さ400mmの角柱供試体とし、試験に用いる供試体容器はゴム製と定められている。これらはJIS規格を制定するにあたって実施された試験結果⁷⁾が基となっており、供試体周囲の水膜の厚さを一定にできるゴム製容器で統一する必要があると報告されている。一方、合成床版は、コンクリートが鋼板で拘束されており、界面に浸入した水の凍結時における膨張圧が大きくなり凍害の進行が早くなることが懸念される。そこで、供試体容器の材質・形状及び供試体の形状・採取方法の違いが凍結融解試験結果に及ぼす影響を把握することを目的として、各種容器や供試体を用いた凍結融解試験を実施した。

6. 1 試験概要

供試体は、鋼製型枠を用いて製作した角柱(100mm×100mm×400mm)と円柱(φ100mm×200mm)、及び木製型枠を用いて製作したコンクリート版から採

表-3 供試体容器

容器材質	形状	外径寸法 (mm)	厚さ
ゴム製	角柱	115×115×560	3mm
	円柱	φ115×530	3mm
鋼製	角柱	120×120×500	2mm
	円柱	φ120×500	2mm

表-4 試験ケース

	供試体形状	容器材質	容器形状
A	角柱	ゴム製	角柱
B	円柱		
C	円柱コア		
D	角柱	鋼製	角柱
E	円柱		
F	円柱コア		
G	円柱	ゴム製	円柱
H	円柱コア		
I	円柱		
J	円柱コア	鋼製	

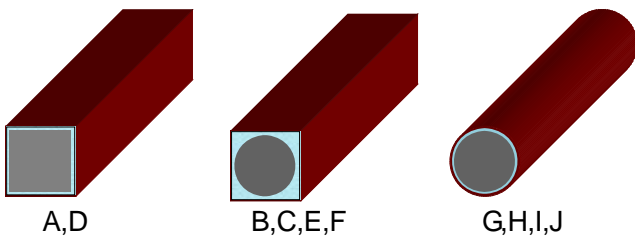


図-14 各試験ケースの模式図

取した円柱コア供試体 (φ100 mm×200 mm) の3種類とした。使用したコンクリートの配合は、RC-4の品質条件 (北海道開発局) を満足させるため 27-8-20N (W/C:50%) とした。各供試体は、コンクリート打込み後 28 日間標準養生を行った。

試験に使用した供試体容器の形状寸法は表-3 に示すとおりで、いずれの容器にも供試体周囲の水膜の厚さを一定に確保するための突起を取付けた。試験ケースは、表-4 に示すとおり 10 ケースとした。各試験ケースの模式図を図-14 に示す。試験ケース A が JIS 規格の供試体形状と供試体容器である。供試体は各試験ケース 3 本とした。試験方法は JIS A 1148 (A 法) により、試験途中で供試体が破壊したものを除き 800 サイクルまで実施した。

6. 2 試験結果および考察

たわみ振動による一次共鳴振動数と質量の測定は 30 サイクルごとに行い、相対動弾性係数と質量減少率を算出した。ゴム製容器を用いた供試体の相対動弾性係数を図-15 に、質量減少率を図-16 に示す。鋼製容

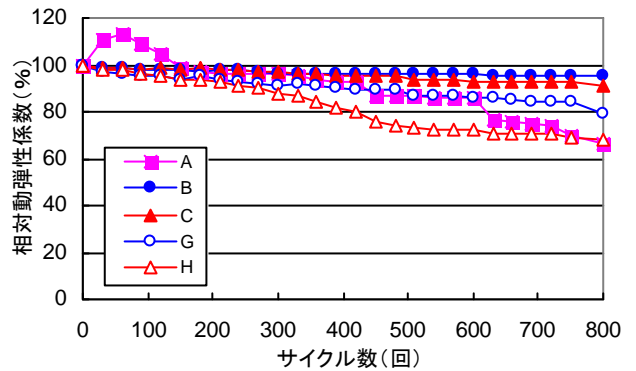


図-15 ゴム製容器を用いた供試体の相対動弾性係数

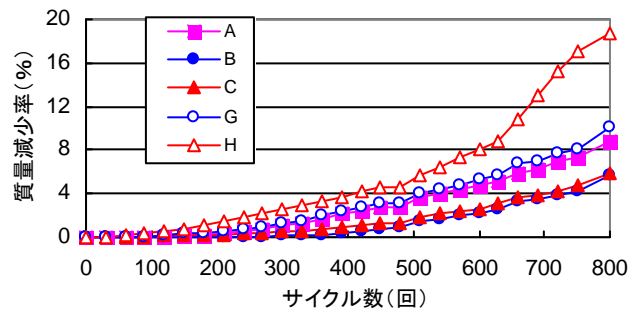


図-16 ゴム製容器を用いた供試体の質量減少率

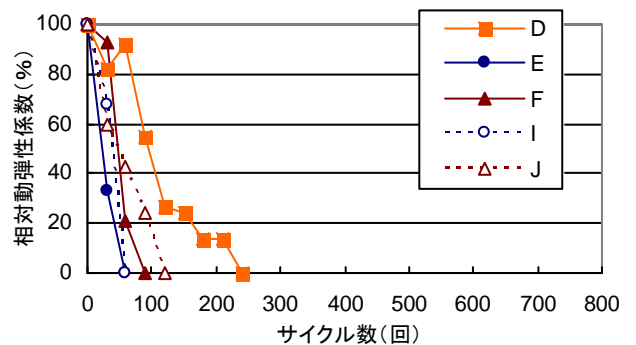


図-17 鋼製容器を用いた供試体の相対動弾性係数

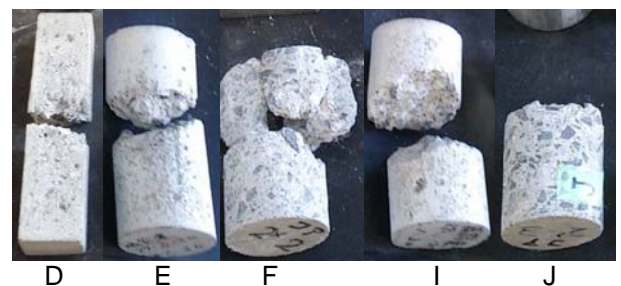


図-18 鋼製容器を用いた供試体の破壊状況

器を用いた供試体の相対動弾性係数を図-17 に示す。各値は供試体 3 本の平均値である。

(1) 容器材質の影響

ゴム製容器では、全てのケースで相対動弾性係数が、JIS 規格の 300 サイクルで 80% 以上、試験終了時の 800 サイクルで 60% 以上となった。一方、鋼製容器では 60 ~ 240 サイクルで全ての供試体が破壊した。破壊状況

を図-18に示す。本試験では、水膜の体積変化に伴う鋼製容器の変形が目視では見られなかったことから、過大な外部拘束力が供試体に作用して凍害劣化が早まったと考えられる。

(2) ゴム製容器における容器形状と供試体形状の影響

角柱容器に円柱供試体を入れたケースBとCは、420サイクル程度まで角柱供試体を入れたJIS規格のケースAと同程度の相対動弾性係数、質量減少率となったが、試験終了時ではケースAより相対動弾性係数が大きく質量減少率が小さい結果となった。また、円柱容器に円柱供試体を入れたケースGとHは、他の試験結果と比較して相対動弾性係数が小さく質量減少率が大きい結果となった。これは、角柱容器と円柱供試体の隙間が大きいケースBとCでは、他の試験ケースより外部拘束力が小さく、凍害劣化が生じにくい状況であったためと考えられる。

(3) ゴム製容器におけるコア抜き供試体の影響

同じ円柱形状のケースGとHを比較すると、円柱容器に入れた場合では、コア抜き供試体Hの凍害劣化が進行しやすい結果となった。これは、コア抜き供試体では骨材が外部に露出している面積が大きいことからスケーリングが発生しやすいためと考えられる。一方、JIS規格のケースAと比較して、角柱容器にコア抜き供試体を入れたケースCでは相対動弾性係数が大きく質量減少率が小さい結果となった。これは、ケースCの結果が円柱供試体のケースBとほとんど変わらないことから、外部拘束力が小さい場合は、凍害に対する骨材露出の影響がほとんどないためと考えられる。

合成床版では、第5章の実験で底鋼板上面に水を入れた凍結融解試験を実施し、床版中に水が浸入しても凍害による大きな損傷は生じないことを確認しているものの、拘束の影響を受ける可能性があるため、床版内に浸入した水を速やかに抜き水抜き孔を配置する等の配慮が必要と考えられる。

7. まとめ

- 1) コンクリート内部の水分量計測では、底鋼板の有無による水分量の違いは見られなかった。
- 2) 熱伝導実験と熱伝導解析の結果、底鋼板やリブ鋼材がコンクリート内部の温度変化に与える影響はほ

とんどないことがわかった。

- 3) 凍結融解が合成床版に与える影響はスケーリング量、超音波伝播速度の変化から、標準的な配合のRC床版に比べて小さいことがわかった。これは、凍害損傷が水セメント比に大きく影響を受けるためである。
- 4) 凍結融解により上面から進展したひび割れは、上側鉄筋またはリブに到達すると、RC床版、合成床版ともに水平にひび割れが進展する可能性があることがわかった。
- 5) 拘束を受ける凍結融解試験では供試体容器の外部拘束力が凍害劣化に与える影響が大きく、コア抜き供試体は外部拘束力が大きい場合、凍害劣化が促進されることがわかった。

本研究は、北海道大学、寒地土木研究所、日本橋梁建設協会による共同研究の成果に基づく。共同研究の関係各位に謝意を表す。

[参考文献]

- 1) 三田村浩, 佐藤京, 本田幸一, 松井繁之: 道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1420-1431, 2009. 3
- 2) 松本高志, 藤田隼生, 林川俊郎, 表真也, 久保圭吾: 凍結融解環境下における鋼コンクリート合成床版の熱伝導解析, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 1140-1149, 2014. 3
- 3) 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, pp. 73-95, 2005
- 4) 黒田英夫著: 3次元熱伝導解析プログラム, CQ出版社, 2003
- 5) 国立天文台: 理科年表, 丸善株式会社, 1991
- 6) 日本コンクリート工学会: コンクリート技術の要点' 11, pp. 69-70, 2011
- 7) (財) 建材試験センター: 構造材料の安全性に関する標準化のための研究調査・研究報告書, 昭和52年度通商産業省工業技術院委託