

## 論文

## 鋼コンクリート合成床版の凍害に関する実験的研究

皆田龍一\*, 酒井武志\*, 久保圭吾\*\*, 表真也\*\*\*, 岡田慎哉\*\*\*\*, 林川俊郎\*\*\*\*\*, 松本高志\*\*\*\*\*

\*修(工), (一社) 日本橋梁建設協会 (〒105-0003 東京都港区西新橋1丁目)

\*\*博(工), (一社) 日本橋梁建設協会 (〒105-0003 東京都港区西新橋1丁目)

\*\*\* (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-86024 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

\*\*\*\*博(工), (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-86024 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

\*\*\*\*\* 工博, 北海道大学教授, 工学研究院北方圏環境政策工学部門 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\*\*\*\* Ph.D., 北海道大学准教授, 工学研究院北方圏環境政策工学部門 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

鋼コンクリート合成床版は、下面に鋼板を有することから、コンクリート中の水分が下面から蒸発せず、水分量が多くなることが懸念される。また、コンクリートと比べ熱伝導率の大きい鋼材がコンクリート中に埋め込まれており、気温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。このため、合成床版の耐凍害性を調査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、水分量、内部温度、スケーリング量などを計測した。本論文では、これらの結果について報告するとともに、外部拘束を受ける状態が凍結融解に及ぼす影響についても報告する。

キーワード：鋼コンクリート合成床版、凍結融解試験、外部拘束力

## 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<sup>1)</sup>。

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。本論文では、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

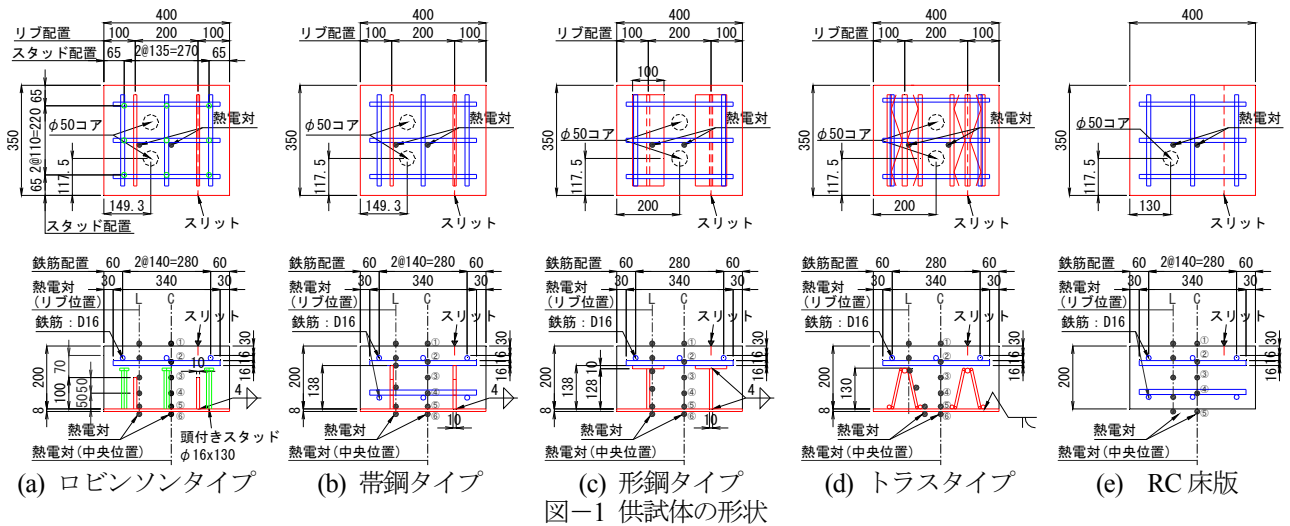


図-1 供試体の形状

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. 供試体の種類と試験ケースを表-1 に示す.

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	○	○
		帯鋼	有		
			無	○	○
		形鋼	有		
			無	○	○
		トラス	有		
			無	○	○
		RC床版	24-8-20N W/C:54.9%	有	○
無	○			○	
有				○	

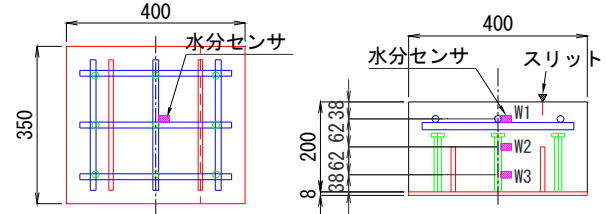


図-2 水分センサ設置位置

### 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氣的にかつ非破壊で捉えるものである.

#### 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みられるものの、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.

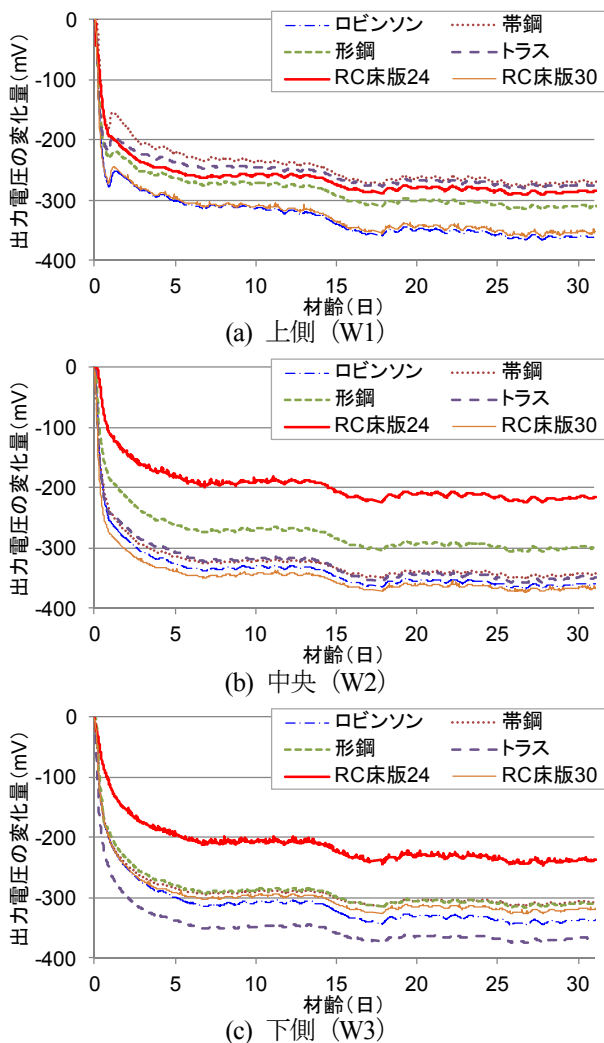


図-3 各測定位置における出力電圧の変化量

#### 4. 温度変化による熱伝導実験

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。また、合成床版の実環境下での凍結融解挙動を推定することを目的に、積雪寒冷地環境を参考に2つのケースについて熱伝導解析を実施している。解析については参考文献2)を参照されたい。

##### 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

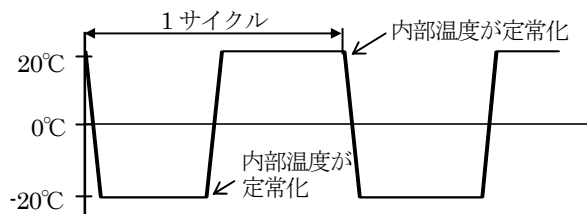


図-4 試験器内温度変化

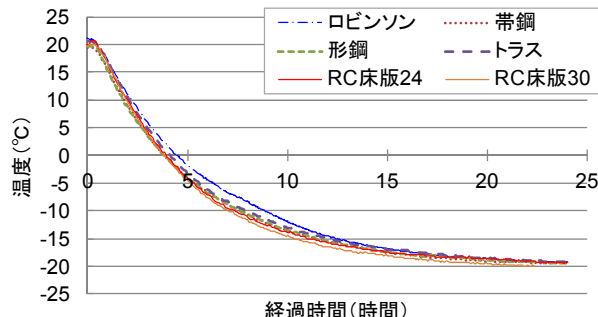


図-5 中央位置 (C) 中央高さ (③) における温度推移  
器内の温度も合わせて計測している。各供試体の熱電対設置位置を図-1に示す。

温度変化は、試験器内の温度を20°Cから-20°C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°Cで定常化している状態とした。試験器内の温度勾配は20°Cと-20°C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°C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。

リブ位置 (L) での厚さ方向温度分布を図-6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。床版上面と下面で温度低下の速度が異なるのは試験器内の冷気が器内の上部から下部に向かって流れているため、床版の上面側が冷やされやすくなっているものと考えられる。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。

#### 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。

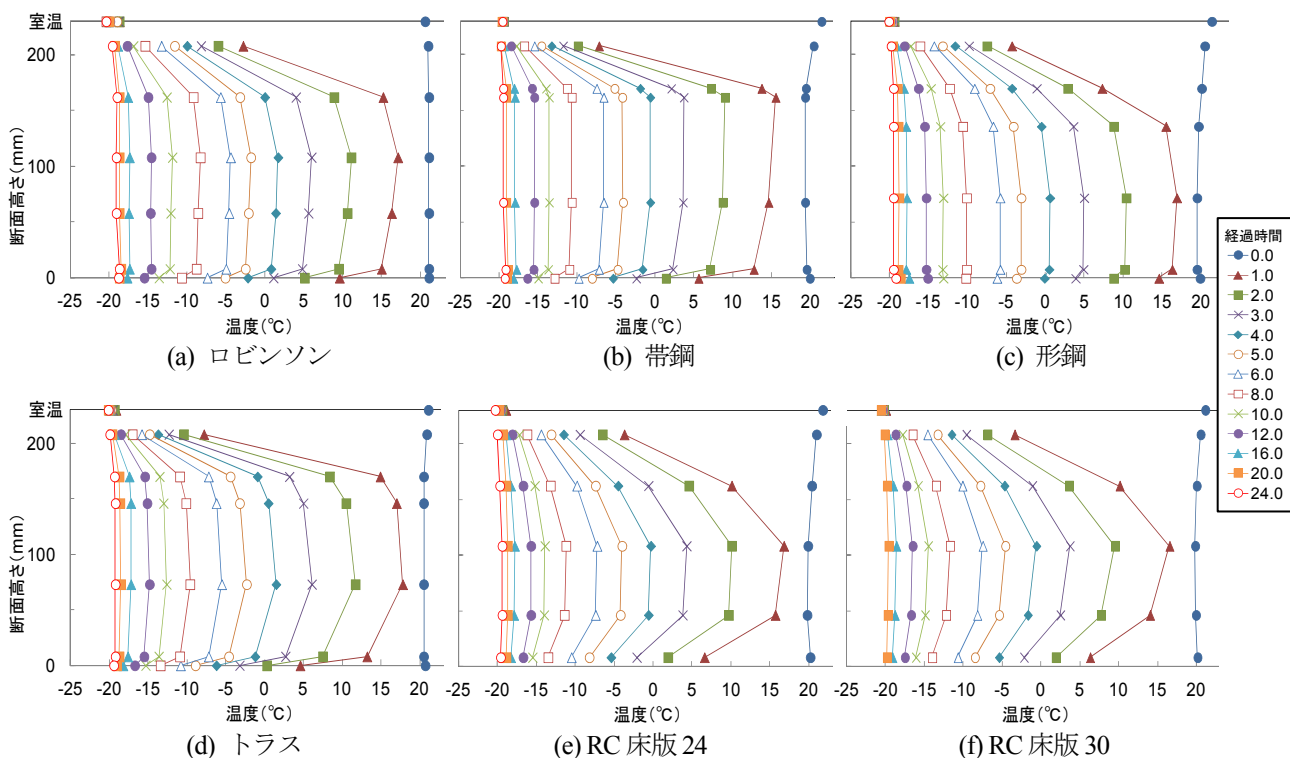


図-6 リブ位置における厚さ方向の温度分布

## 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°Cから-30°Cまで変化させた。温度勾配は20°Cと-30°Cの開を30分で変化させ、試験器内の温度は+20°Cの状態を7時間、-30°Cの状態を16時間維持した。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

スケーリング量の測定結果を図-7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-8）。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-8(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-8(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のコンクリートに損傷は見られなかつ



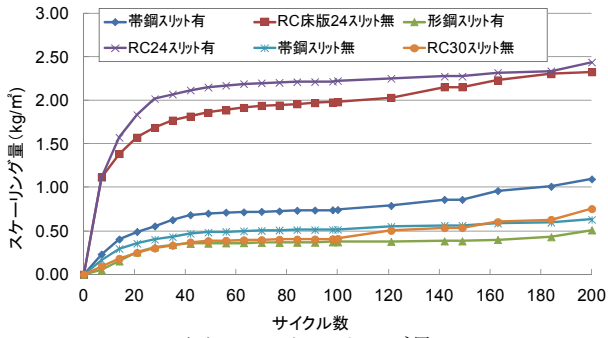


図-6 スケーリング量

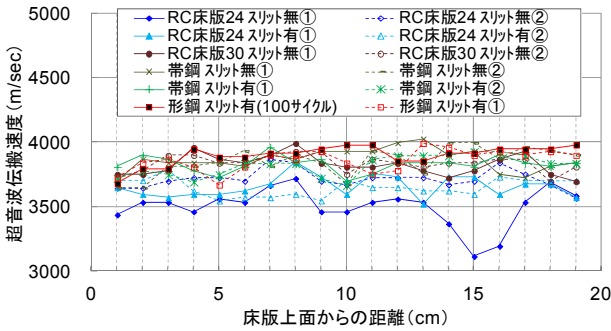


図-7 超音波伝播速度

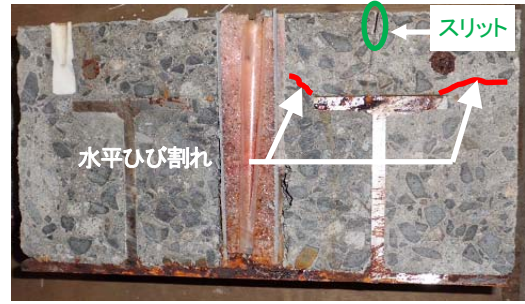
たことから、合成床版の底鋼板上に水が浸入してもコンクリートの凍害に与える影響は小さいと考えられる。

## 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 400 mm 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<sup>3)</sup>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 (100 mm×100 mm×400 mm) と円柱 ( $\phi$  100 mm×200 mm)、及び木製型枠を用いて製作したコンクリート版から採取した円柱コア供試体 ( $\phi$  100 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。



(a) 形鋼スリット有



(b) RC 床版 24 スリット無

図-8 供試体切断面

試験に使用した供試体容器の形状寸法は表-2 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-3 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-9 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の算出した結果を、それぞれ図-10、図-11 に示す。

#### (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。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。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。

表-2 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-3 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	円柱

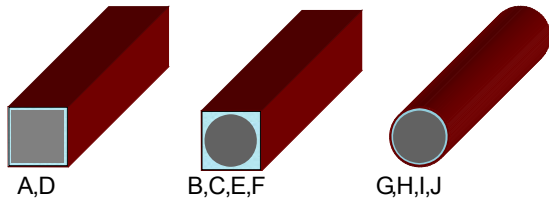


図-9 各試験ケースの模式図

### (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く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) 熱伝導実験では、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

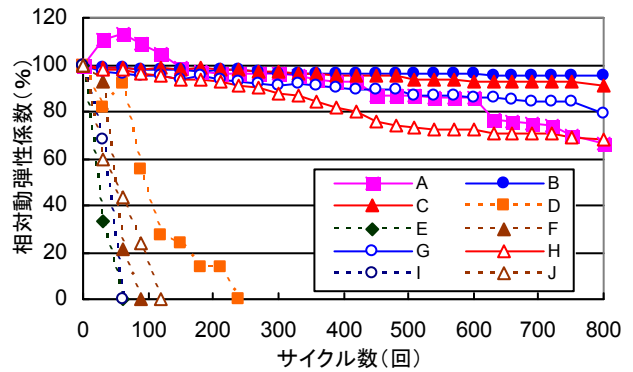


図-10 相対動弾性係数

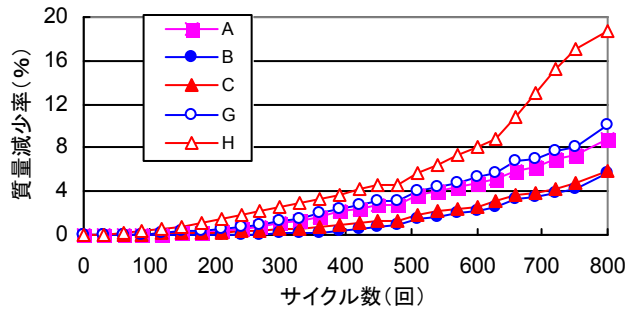


図-11 ゴム製容器を用いた供試体の質量減少率

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。

## 謝辞

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) (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