

道路橋床版の凍害劣化損傷に関する研究

共同研究報告書

令和3年3月

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所
国立大学法人北海道大学
一般社団法人日本橋梁建設協会

Copyright © (2021) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て発行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

道路橋床版の凍害劣化損傷に関する研究 共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ 寒地構造チーム

上席研究員	西 弘明 ^{※1}
総括主任研究員	今野 久志
主任研究員	角間 恒 ^{※2}
研究員	寺澤 貴裕
元主任研究員	岡田 慎哉 ^{※3}
元主任研究員	佐藤 孝司 ^{※4}
元主任研究員	白戸 義孝 ^{※5}
元研究員	西城 能利雄 ^{※6}

国立大学法人北海道大学

教授	松本 高志
元助教	何 興文 ^{※7}

一般社団法人日本橋梁建設協会
床版小委員会 床版技術部会

部会長	春日井 俊博 ^{※8}
WG長	久保 圭吾 ^{※9}
委員	皆田 龍一 ^{※10}
委員	酒井 武志 ^{※11}
委員	山崎 敏宏 ^{※12}
委員	大畑 和夫 ^{※12}
元委員	小野 博之 ^{※12}
元委員	宮田 朋和 ^{※12}

- ※ 1 : 現 寒地基礎技術研究グループ
※ 2 : 現 国土交通省北海道開発局 釧路開発建設部
※ 3 : 現 企画室
※ 4 : 現 国土交通省北海道開発局 札幌開発建設部
※ 5 : 現 寒地技術推進室
※ 6 : 現 国土交通省北海道開発局 小樽開発建設部
※ 7 : 現 大連理工大学 教授
※ 8 : 現 委員長
※ 9 : 現 元部会長
※ 10 : 現 WG長
※ 11 : 現 副部会長
※ 12 : 現 元部会員

要旨

本研究では、凍害劣化損傷に及ぼす床版内の鉄筋や鋼材などの影響や、凍害環境下における輪荷重の影響を評価するための各種実験を実施し、床版の凍害劣化損傷メカニズムを把握するとともに、このような損傷が発生する環境条件の明確化や、床版における凍害に対する構造的対策の検討を行った。床版の現地調査と床版構造における凍害対策の検討として、RC床版で発生する部分滞水現象や床版面形状の実態調査を行うとともに、凍害対策を提案した。また、凍害劣化に及ぼす床版構造の影響評価に関する検討として、層状ひび割れのあるコンクリートの力学的特性やコンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響を示した。また、模擬ひび割れを導入したRC部材の載荷実験を実施し、水平ひび割れ等が構造性能に及ぼす影響を確認した。凍害環境下における輪荷重の影響評価に関する検討では、凍結融解作用を受ける滞水環境下で、輪荷重が床版劣化に及ぼす影響を凍結融解-疲労複合サイクル試験により検討している。凍害損傷の影響を受ける地域の明確化に関する検討では、床版上面の土砂化を効率的に点検・調査するためには、構造条件に着目することがより重要になることを示した。

キーワード：鋼橋 RC 床版、寒冷地、凍害、疲労、層状ひび割れ、床版面形状

目次

1. はじめに	1
1. 1 研究背景	1
1. 2 研究目的	1
1. 3 研究内容	1
1. 4 研究期間	1
2. 研究概要	2
2. 1 床版の現地調査と床版構造における凍害対策に関する検討	2
(1) RC 床版で発生する部分滞水現象の調査	2
(2) 道路橋床版面形状の実態調査と凍害対策	3
2. 2 凍害劣化に及ぼす床版構造の影響評価に関する検討	4
(1) 層状ひび割れのあるコンクリートの力学的特性	4
(2) コンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響	5
(3) 模擬ひび割れを導入した RC 部材の載荷実験	6
2. 3 凍害環境下における輪荷重の影響評価に関する検討	8
2. 4 凍害損傷の影響を受ける地域の明確化に関する検討	9
3 本共同研究に関連する既発表論文	10
4 総括	12
付録	13

1. はじめに

1. 1 研究背景

積雪寒冷地における道路橋の床版は、凍害や融雪剤による塩害等の影響を受け、床版コンクリートの抜け落ちなどの重大な損傷事例が数多く報告されるようになってきた。床版に損傷が生じると直ちに交通障害に繋がることから、凍害劣化損傷機構の解明および補修・補強による延命手法の確立が急務となっている。

1. 2 研究目的

本研究では、凍害劣化損傷に及ぼす床版内の鉄筋や鋼材などの影響や、凍害環境下における輪荷重の影響を評価するための各種実験を実施し、床版の凍害劣化損傷メカニズムを把握するとともに、このような損傷が発生する気象等の環境条件の明確化や、床版における凍害に対する構造的対策の検討を行う。

1. 3 研究内容

積雪寒冷地における橋梁床版の凍害劣化損傷について以下の検討を行う。

- ① 床版の現地調査と床版構造における凍害対策
- ② 凍害劣化に及ぼす床版構造の影響評価
- ③ 凍害環境下における輪荷重の影響評価
- ④ 凍害損傷の影響を受ける地域の明確化

1. 4 研究期間

平成 27 年 2 月 ～ 平成 30 年 3 月

2. 研究概要

本章では、各検討項目における実施内容や結果について概説する。なお、各検討項目の詳細については、見出しに3章の論文リストの文献番号を付記しているため、巻末の付録として掲載している既発表論文を参照されたい。

2. 1 床版の現地調査と床版構造における凍害対策に関する検討

(1) RC 床版で発生する部分滞水現象の調査[文献 1 (pp. 15-18)]

降雨降雪により橋面に存在する水の排水は維持管理上重要であり、特に舗装面からの浸透水が床版面で速やかに排水されなかった場合、床版劣化が促進すると考えられる。そのため、橋梁においては、橋面上の水を排出するために排水設備が設置されている。排水ます、導水パイプ、床版水抜きなどの排水装置について道路橋床版防水便覧などで設置間隔が例示されているものの、各設備及び橋面全体の排水能力については定量的な分担や性能が必ずしも明瞭になっていない。また、排水装置に至る以前に、床版表面上では部分的に滞水が発生し得る。こうした部分的な滞水はその箇所での床版劣化を周辺より著しく促進する可能性がある。床版表面における部分的滞水現象には床版表面形状が影響すると考えられるが、道路構造令や道路橋床版防水便覧に部分的滞水の発生に関連した床版表面形状についての基準や規定は明記されていない。このように、効果的な排水のためには床版表面から排水装置へと体系的で定量的な排水性能の把握と評価が必要となる。

本検討では、床版表面上における部分的な滞水発生に及ぼす床版表面形状の影響を把握するため、供用開始前の橋梁において床版表面形状の測定（写真 2-1）および散水試験による滞水発生傾向の調査を行った。その結果、本調査の範囲内では、図 2-1 に示すように凹部では水分量が他よりも高い値となるなど、床版上に生じる部分的な滞水と床版表面形状には関連性があることを確認した。



写真 2-1 牽引式路面性状測定装置による表面形状の測定状況

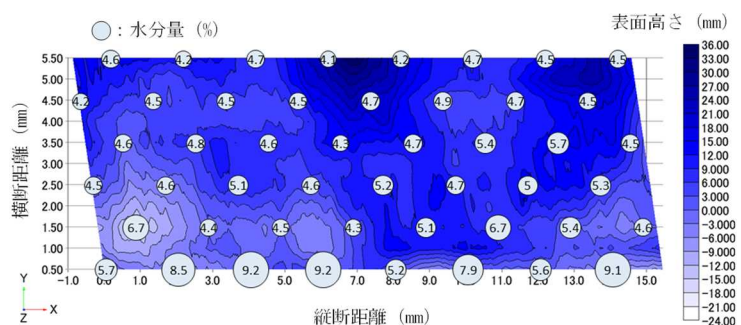


図 2-1 水分量と表面形状の重ね合わせの例

(2) 道路橋床版面形状の実態調査と凍害対策[文献2 (pp. 19-24)、3]

一般的な排水計画では、伸縮装置や地覆の近傍といった床版の縦断および横断方向の端部に排水ます、導水パイプ、床版水抜きなどの排水装置が配置され、床版面に設置される排水勾配により雨水を排水装置に集めて橋梁外に排出する。一方で、供用中の橋梁においては滞水箇所が散在しており、排水性能が的確に発揮されていないことが懸念される。このような部分的な滞水が発生する原因の一つに、床版面に発生している不陸が挙げられ、床版上の滞水が排水装置まで流下するのを阻害していると考えられる。実際に新設橋では、防水層および舗装を敷設する前の床版上において、降雨後に部分的な滞水が発生している事例も散見される。ここで、土木工事における出来高管理基準に着目すると、床版面形状に関係する測定項目(規格値)として基準高および厚さがある。しかし、これらは床版面形状を管理するための規格値ではないため、基準高に関しては1径間当たり2箇所(支点付近)で、厚さに関しては型枠設置時に概ね10m²当たり1箇所測定が行われている程度であり、床版面の不陸を捉えることはできない。以上の背景より、床版の長寿命化を図るためには、床版面に発生する不陸を抑制できる施工方法の開発や出来形管理方法の強化を含めた、排水性能の改善技術の構築が必要であると考えている。本検討では、防水層を敷設する直前の床版において床版面形状の測定(写真2-2)を実施し、実橋における床版面形状の実態を調査した。また、散水試験を実施することで、床版面形状と滞水発生傾向の関係性を調査している。

調査の結果、床版面形状の測定を実施した橋梁ではいずれも、横断方向と比較して縦断方向に床版面の不陸が顕著になる結果であり、平均的な縦断面に対して最大で10~40mm程度の凹凸が発生していた。また、散水試験より、対象橋梁においては縦断方向に水が流下しにくく、平均的な床版面に対して標高が低くなる箇所(図2-2)、および、排水を阻害する上り方向の局所的な勾配が発生している箇所で、湿潤状態が長く維持されやすい結果を得た。現行の排水計画で見込んでいる排水性能と比較した場合、供用中の橋梁では縦断方向への排水性能が低下している可能性が高いと考えられる。以上の結果をふまえ、床版面の不陸に起因する排水性能の低下を抑制するため、出来形管理基準の強化や床版打設後に発生している不陸の修整、排水装置の追加設置といった対策を講じる必要があることを提言した。



写真 2-2 牽引式路面性状測定装置による床版面形状の測定状況

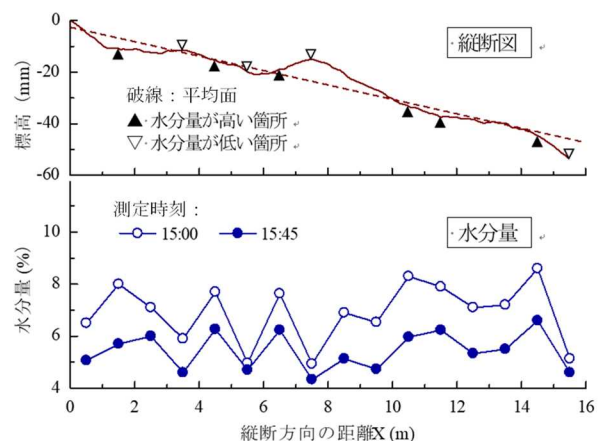


図 2-2 縦断方向の水分量分布の例

2. 2 凍害劣化に及ぼす床版構造の影響評価に関する検討

(1) 層状ひび割れのあるコンクリートの力学的特性[文献4 (pp. 27-30)]

寒冷地では、凍害による橋梁の劣化が顕著であり、北海道で平成18年度に行われた橋梁点検結果によると、695橋のうち約17.3%に凍害劣化または凍害との複合劣化が認められた。凍害に対する評価方法、修繕方法の確立が求められるなか、特に凍結融解により発生する層状ひび割れ(写真2-3)をもつ床版の特性については、十分に解明されていない。本検討では、供用後の橋梁床版から切り出した試験体を用いて、層状ひび割れのあるコンクリートの超音波伝播速度および圧縮強度の測定を行った。

圧縮強度試験結果を図2-3に示す。床版鉛直方向(層状ひび割れ直角方向)に圧縮試験を実施した結果、凍結融解作用を与えたコンクリートを使用した試験で得られるような静弾性係数の著しい低下が認められた。また、床版水平方向(層状ひび割れ平行方向)に圧縮試験を実施した結果、静弾性係数が低下することなく圧縮強度が健全時の40~60%に低下した。これらの結果を併せると、層状ひび割れのあるコンクリートでは、層状ひび割れ鉛直方向と水平方向とで力学的特性が大きく異なることが示唆された。このため、床版鉛直方向の相対動弾性係数によって、層状ひび割れによる床版鉛直方向の圧縮強度低下を推定できる可能性や、層状ひび割れのあるコンクリートでは、載荷方向によらず、載荷直角方向の相対動弾性係数によって圧縮強度の低下を推定できる可能性がある。

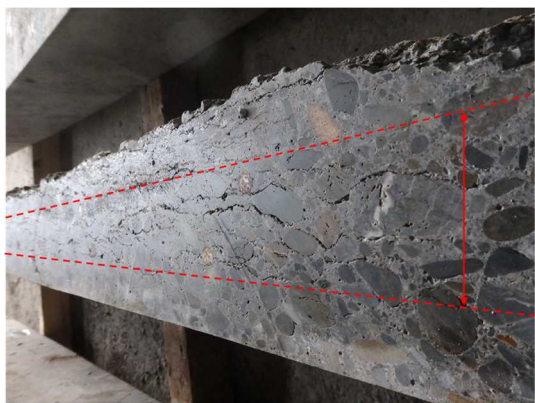


写真 2-3 層状ひび割れの発生状況

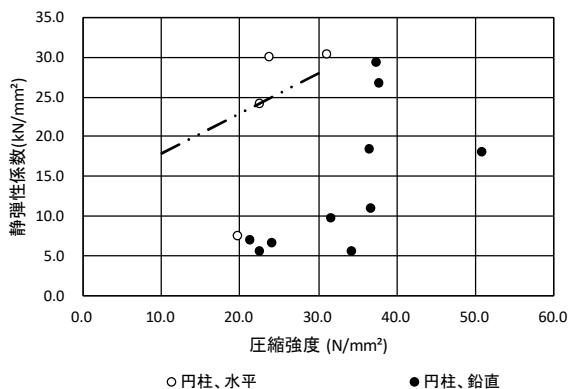
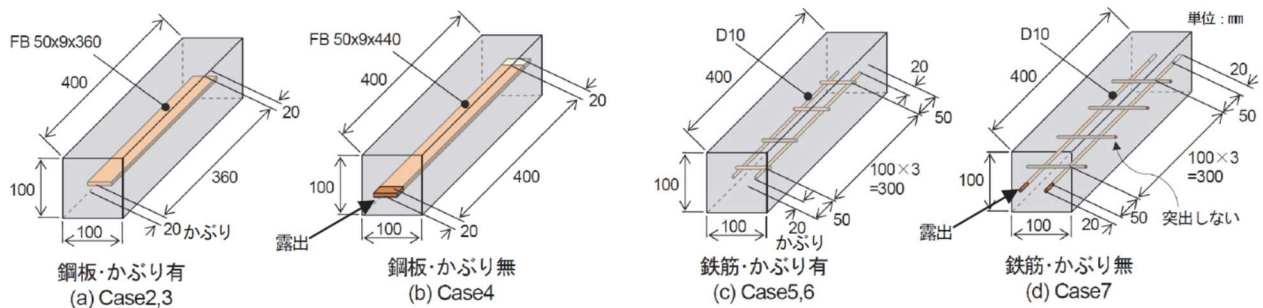


図 2-3 静弾性係数と圧縮強度の関係

(2) コンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響[文献5 (pp. 31-32)]

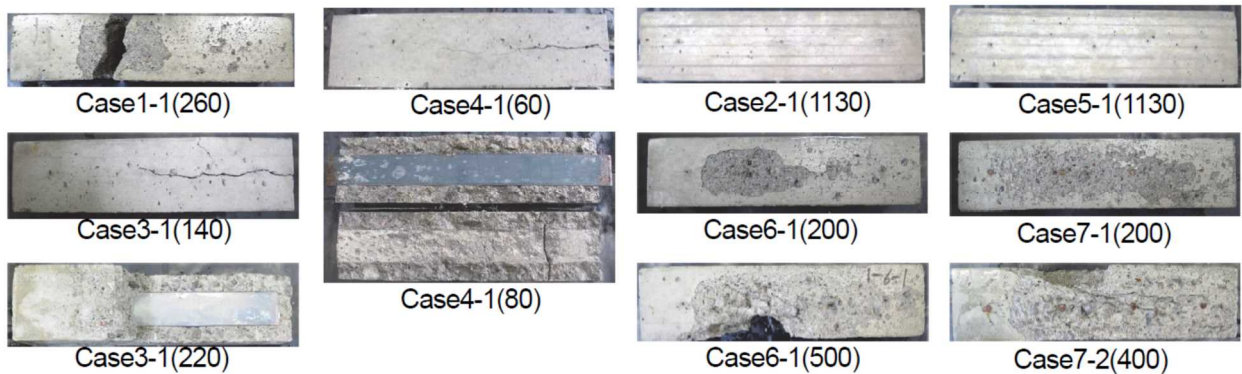
先行研究において、鋼コンクリート合成床版を模擬した供試体による凍結融解試験や拘束条件が異なる凍結融解試験を実施した結果、凍結融解によりコンクリート表面から進展したひび割れは、鉄筋もしくは補強リブに到達すると水平にひび割れが進展する可能性があることを確認している。そのため、本検討では、コンクリート内部の鋼材が凍結融解によるひび割れ進展に与える影響を把握することを目的に、鋼材の種類と配置を変えた供試体（図2-4）を用いて凍結融解試験を実施した。

凍結融解試験の結果から、写真2-4に示すように、コンクリート内部に鋼板がある場合、コンクリートと鋼板の境界部やひび割れからコンクリート内部に水が浸入すると鋼板に沿ってひび割れが発生し、急激に凍害劣化が促進されることを明らかにした。また、水の影響が無い場合は、コンクリート内部の鋼材が耐凍害性に与える影響はないことを示した。



注) Case1: コンクリート内部に鋼材が無い供試体

図2-4 供試体の模式図



注) () 内の数値は凍結融解サイクル数

写真2-4 供試体の経時変化および破壊状況

(3) 模擬ひび割れを導入した RC 部材の載荷実験

[文献 6 (pp. 33-36)、7、8、9、10 (pp. 49-50)]

道路橋 RC 床版の耐久性に関しては、これまで疲労破壊に対する耐久性が研究されてきており、輪荷重走行試験機による疲労損傷の進展と最終的な抜け落ちの再現と疲労寿命の評価がなされてきた。近年、疲労に加えて塩害や凍害によると考えられる損傷も生じた複合劣化床版の事例が見られるようになっている。こうした床版においては、コンクリートに水平ひび割れが発生して上面が土砂化を起こす形態をとることが観察されてきている。複合劣化を起こした床版の寿命評価をするにあたっては、損傷破壊現象の理解と再現が必要である。そのため、本検討では、水平ひび割れと輪荷重走行によって形成されるひび割れにより影響を受ける床版の構造挙動を把握することを目的に、人工的に水平ひび割れを導入した RC はりや床版に対して輪荷重走行試験機により疲労載荷を行った。

水平模擬ひび割れを導入した 3 種類の RC 梁供試体の曲げ載荷実験の結果、供試体に導入したひび割れの周辺ではせん断方向の変形が発生していることや、導入ひび割れが曲げせん断ひび割れとつながる挙動 (図 2-5(a) (b)) が確認された。さらに、上下に二つの導入ひび割れがある場合には、上下からそれぞれ進展して繋がり、一本のひびを形成する挙動 (図 2-5(c)) となることを確認した。

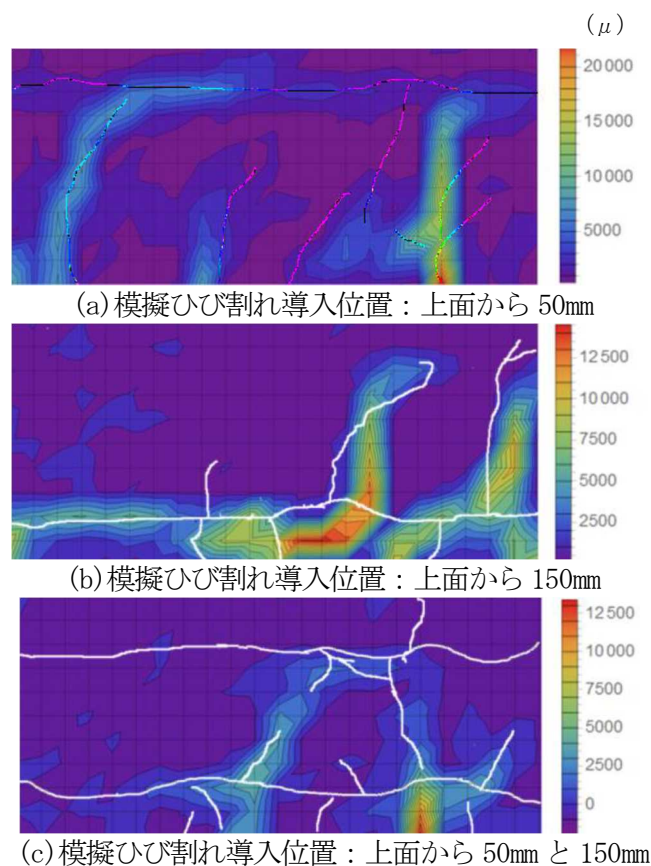


図 2-5 最大主ひずみ分布図

膨張剤の散布によって水平ひび割れを導入した RC 床版の輪荷重走行実験を行った結果、水平ひび割れを導入した床版の移動荷重載荷時の変形挙動について以下の点が確認された。載荷位置が支間中央に移動するにつれて、水平ひび割れ上側と下側に曲げ変形の変位分布の広がり、重ね梁の曲げ変形領域が広がった。また、水平ひび割れ上側にて載荷位置直下を中心とした鉛直方向たわみ分布が認められ、この分布は輪荷重の移動に伴い中心が動いていた（図 2-6）。一方、水平ひび割れ下側では鉛直方向たわみ分布の中心が異なり、支間中央にあることを確認した。

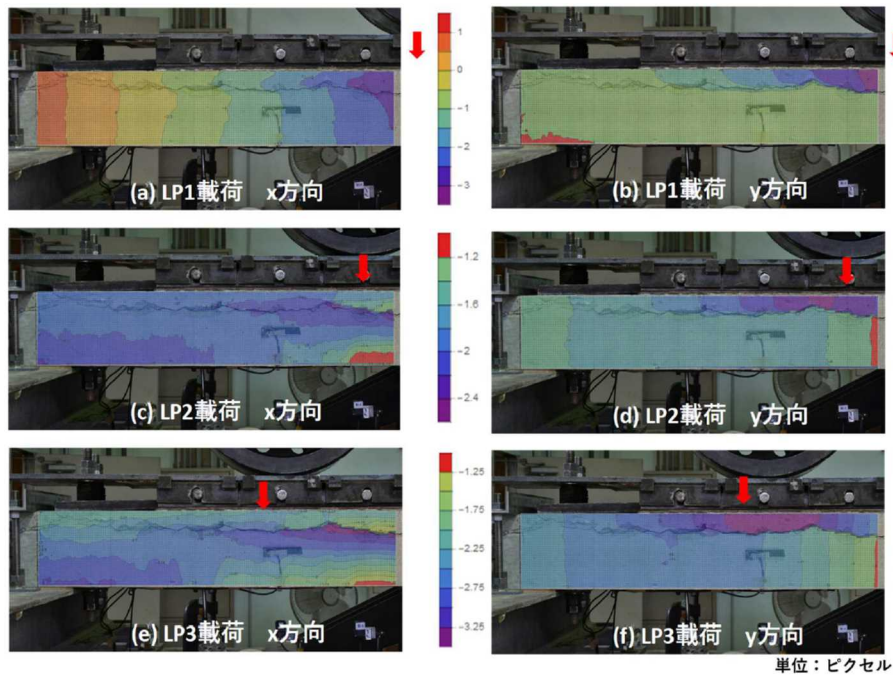


図 2-6 輪荷重走行後の静的載荷時の変位分布の一例

2. 3 凍害環境下における輪荷重の影響評価に関する検討[文献 11 (pp. 51-52)、12、13]

道路橋の床版は輪荷重による疲労損傷が生じるが、床版上面に水が滞水すると浸入した水によるひび割れのすり磨き等により急速に損傷が進行し、これに凍結融解が作用すると床版劣化が加速されることが懸念される。そこで、凍結融解作用を受ける滞水環境下で、輪荷重が床版劣化に及ぼす影響を凍結融解-疲労複合サイクル試験により検討した。供試体および試験装置を図 2-7、写真 2-5 に示す。凍結融解-疲労複合サイクル試験を行った結果、凍結融解を与えていない場合には 1668 回で水漏れが生じるのに対し、凍結融解を与えた場合には 920 回で水漏れが発生した。このことから、水張り状態における荷重の繰り返し载荷によるひび割れの進展を凍結融解が加速している可能性があることを確認した。また、写真 2-6 に示す切断面の観察結果から、起点となるスリットから生じたひび割れは、鉄筋位置まで進展すると、ひび割れに浸入した水の水圧により、鉄筋に沿う形で水平ひび割れが生じ、これに凍結融解作用が加わると水平ひび割れの進展を助長する可能性のあることを明らかにした。

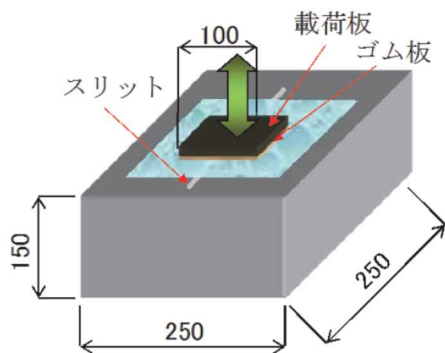


図 2-7 供試体の模式図 (単位:mm)



写真 2-5 試験装置

	800kN 静的	16kN Case1	90kN Case2	90kN(水なし) Case2'	90kN(凍結融解) Case4
中央	スリット ひび割れ	スリット	スリット ひび割れ	スリット	スリット ひび割れ
鉄筋位置	鉄筋	鉄筋	ひび割れ	鉄筋	スリット ひび割れ
端部	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ

図 2-6 切断面の観察

2. 4 凍害損傷の影響を受ける地域の明確化に関する検討[文献 14 (pp. 59-62)、15]

道路橋 RC 床版の劣化は、複数の要因が複合して作用することで発生している場合が多い。北海道においては、凍害等に起因する上面の土砂化の発生・進行が顕著であり、輪荷重走行との複合作用により抜け落ちに至ることもある。膨大な量の床版を効率的に点検・調査するためには劣化損傷箇所のスクリーニングが不可欠であるが、土砂化に関しては発生傾向が必ずしも明確になっていない。これは、既往の調査事例のほとんどが、外観調査や材料試験に基づく個々の橋梁での劣化状況調査に留まり、土砂化が発生している橋梁や床版部位の特徴を統一的に整理できていないことに原因があると考えられる。本検討では、床版上面の土砂化発生傾向を把握し、点検・調査を効率的に行ううえでの基礎資料を得るため、北海道内の国道橋において舗装切削による床版上面の目視調査が行われた事例を収集し、環境条件および構造条件の観点から土砂化が発生しやすい条件を整理した。

本検討で得られた知見を要約すると表 2-1 に示すとおりである。対象とした 58 橋 72 箇所に対する土砂化調査事例において、竣工後の経過年数が 30 年未満の橋梁で土砂化が発生している事例は見られなかった。コンクリートの凍害の発生しやすさと関連のある凍害危険度および凍結防止剤散布量に関しては、土砂化発生状況との間に一定の傾向を見出すことができなかった。構造条件に着目すると、滞水と輪荷重走行の影響を同時に受ける場合に加え、曲線半径が小さい橋梁や床版支間あたりに左右 2 輪が走行する主桁配置となる橋梁において土砂化事例が多いことがわかった。上記より、床版上面の土砂化を効率的に点検・調査するためには、構造条件に着目することがより重要になることを示した。

表 2-1 土砂化発生状況のまとめ

整理項目	土砂化発生状況	土砂化発生への影響度	
経過年数	竣工後 30 年以上が経過した橋梁において発生している	大	
環境条件	凍害危険度	凍害危険度によらず発生している	小
	凍結防止剤散布量	土砂化発生状況との間に関係性は見られない	小
構造条件	曲線半径	曲率半径が小さい橋梁で発生しやすい	大
	縦断方向位置	縦断方向の位置によらず発生している	小
	横断方向位置	滞水および輪荷重の作用を同時に受ける箇所、同一床版支間内に左右 2 輪が走行する主桁・走行車線配置となる橋梁で発生しやすい	大

3 本共同研究に関連する既発表論文

本共同研究に関する成果の一部は、下記の論文等にとりまとめて公表した。なお、下記には本共同研究の期間外に実施した予備検討における研究成果についても参考として含めている。

- 1) 安田優子, 角間 恒, 白戸義孝, 松本高志: RC床版で発生する部分滞水現象の調査, 平成29年度土木学会北海道支部論文報告集, 第74号, A-39, 2018.1
- 2) 角間 恒, 白戸義孝, 西 弘明: 道路橋床版面形状の実態調査, 第61回(2017年度)北海道開発技術研究発表会発表論文集, 管6, 2018.2
- 3) 角間 恒, 白戸義孝, 安田優子, 松本高志: 床版面形状に基づく橋面排水性能に関する考察, 土木学会第73回年次学術講演会, CS8-024, pp.47-48, 2018.8
- 4) 松田有加, 角間 恒, 松本高志, 西 弘明: 層状ひび割れのあるコンクリートの力学的特性について, 平成29年度土木学会北海道支部論文報告集, 第74号, A-40, 2018.1
- 5) 皆田龍一, 久保圭吾, 佐藤孝司, 角間 恒, 松本高志: コンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響, 土木学会第72回年次学術講演会, I-152, pp.303-304, 2017.9
- 6) 松江晃太, 角間 恒, 松本高志: 水平模擬ひび割れを導入したRC梁の変形挙動の画像解析, 平成28年度土木学会北海道支部論文報告集, 第73号, A-33, 2017.2
- 7) 角間 恒, 渡邊晋也, 西 弘明, 松本高志: 内部劣化を有するRC部材の曲げ耐荷性能について, 平成28年度土木学会北海道支部論文報告集, 第73号, A-35, 2017.2
- 8) 松江晃太, 角間 恒, 松本高志: 模擬劣化RC梁の曲げ挙動と補修の効果に関する画像解析, 平成29年度土木学会北海道支部論文報告集, 第74号, A-46, 2018.1
- 9) 松江晃太, 角間 恒, 松本高志, 西 弘明: 画像解析を用いた水平模擬ひび割れを有するRC梁の曲げ挙動に関する検討, 平成30年度土木学会北海道支部論文報告集, 第75号, A-16, 2019.1
- 10) 永井崇雅, 松江晃太, 松本高志, 角間 恒, 西 弘明: 移動荷重下の模擬劣化RC床版の変形挙動に関する画像解析, 平成30年度土木学会北海道支部論文報告集, 第75号, A-27, 2019.1
- 11) 宮田朋和, 久保圭吾, 佐藤孝司, 角間 恒, 松本高志: 凍結融解環境下において輪荷重が床版の劣化損傷に及ぼす影響, 土木学会第72回年次学術講演会, I-153, 2017.9

- 12) 酒井武志, 久保圭吾, 白戸義孝, 角間 恒, 松本高志: コンクリート系床版の凍害の影響に関する実験的研究, 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 83-86, 2018. 11
- 13) 山崎敏宏, 久保圭吾, 白戸義孝, 角間 恒, 松本高志: 寒冷地の床版上面滞水が床版劣化に及ぼす影響, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I-362, 2018. 8
- 14) 角間 恒, 白戸義孝, 西 弘明, 松田有加, 松本高志: 北海道における道路橋 RC 床版の土砂化発生傾向の整理, 平成 29 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 74 号, A-38, 2018. 1
- 15) 白戸義孝, 角間 恒, 西 弘明: 北海道における床版上面劣化の発生傾向の整理, 第 61 回(2017 年度)北海道開発技術研究発表会発表論文集, 管 5, 2018. 2
- 16) 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
- 17) 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: 鋼コンクリート合成床版の凍害に関する実験的研究, 第 8 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 183-188, 2014. 10

4. 総括

本研究では、凍害劣化損傷に及ぼす床版内の鉄筋や鋼材などの影響や、凍害環境下における輪荷重の影響を評価するための各種実験を実施し、床版の凍害劣化損傷メカニズムを把握するとともに、このような損傷が発生する気象等の環境条件の明確化や、床版における凍害に対する構造的対策の検討を行った。

床版の現地調査と床版構造における凍害対策の検討として、RC 床版で発生する部分滞水現象や床版面形状の実態調査を行うとともに、凍害対策を提案した。また、凍害劣化に及ぼす床版構造の影響評価に関する検討として、層状ひび割れのあるコンクリートの力学的特性やコンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響を示した。また、模擬ひび割れを導入した RC 部材の載荷実験を実施し、水平ひび割れ等が構造性能に及ぼす影響を確認した。凍害環境下における輪荷重の影響評価に関する検討では、凍結融解作用を受ける滞水環境下で、輪荷重が床版劣化に及ぼす影響を凍結融解—疲労複合サイクル試験により検討している。凍害損傷の影響を受ける地域の明確化に関する検討では、床版上面の土砂化を効率的に点検・調査するためには、構造条件に着目することがより重要になることを示した。

付録

3章の論文目録において土木学会関連の論文集等に掲載された論文を付録として掲載する。

RC 床版で発生する部分滞水現象の調査

Investigation of partial water stagnation occurring on RC slab

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 安田優子 (Yuko Yasuda)
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 白戸義孝 (Yoshitaka Shiroto)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

降雨降雪により橋面に存在する水の排水は維持管理上重要であり、特に舗装面からの浸透水が床版面で速やかに排水されなかった場合、床版劣化が促進すると考えられている。そのため橋梁においては、橋面上の水を排出するために排水設備が設置される。排水ます、導水パイプ、床版水抜きなどの排水設備について防水便覧などで設置間隔が例示されているが、各設備及び橋面全体の排水能力については定量的な分担や性能が必ずしも明瞭になっていない。

また、排水設備に至る以前に、床版表面上では部分的に滞水が発生し得る。こうした部分的な滞水はその箇所での床版劣化を周辺より著しく促進する可能性がある。床版表面における部分的滞水現象には床版表面形状が影響すると考えられるが、道路構造令¹⁾や道路橋床版防水便覧²⁾に部分的滞水の発生に関連した床版表面形状についての基準や規定は明記されていない。

このように、効果的な排水のためには床版表面から排水設備へと体系的で定量的な排水性能の把握と評価が必要となる。本研究では、この中でも床版表面上における部分的な滞水発生に及ぼす床版表面形状の影響を把握するため、供用開始前の橋梁において床版表面形状の測定および散水試験による滞水発生傾向の調査を行った。

2. 試験概要

2.1 対象橋梁

本試験で対象とした橋梁の諸元を表-1 に示す。本橋梁は未開通であり、防水層、舗装の施工前に試験を行った。

2.2 試験方法

図-1 中の斜線で示す、L 側車線の約 4 分の 1 にあたる 5m×15.47m の範囲を試験範囲とし、床版表面形状の測定を行う。また、同範囲において散水し、表面湿潤状態の経時変化を測定する。

(1) 表面形状の測定

表面形状の測定には牽引式路面性状測定装置（株式会社クマタカエンジニアリング、MRP-3000）を用いる。本装置では、レーザ光により装置と測定面との相対高さを、内蔵されたジャイロセンサにより装置の傾きを測定することで、絶対高さでの凹凸測定を可能にしている。測定は試験範囲を 500mm×500mm の格子状に区切ったときの格子線上（縦断方向 11 測線、横断方向 31 測線）で実施した。写真-1 に測定状況を示す。

表-1 橋梁の諸元

道路規格	第1種第3級
設計速度	V=80km/h
構造形式	単純合成鋼鈑桁橋
橋長	38m
支間	36.4m
幅員	19.842m~18.238m
曲線半径	2000m
斜角	80° 00'00"
縦断勾配	-0.33825%
横断勾配	2%
設計荷重	B 活荷重

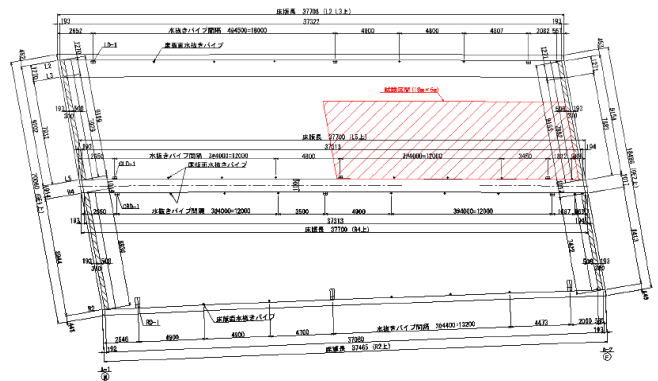


図-1 試験範囲



写真-1 表面形状の測定状況

(2) 表面湿潤状態変化の測定

試験範囲に散水した後、高周波容量式水分計（株式会社ケット科学研究所、HI-520）を用いて表面湿潤状態の経時変化を測定する。測定位置は試験範囲を 1000mm×1000mm の格子状に区切ったときの格子点に対し千鳥状



写真-2 散水状況

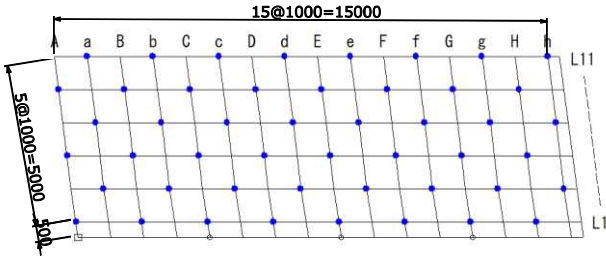


図-2 水分量の測定位置

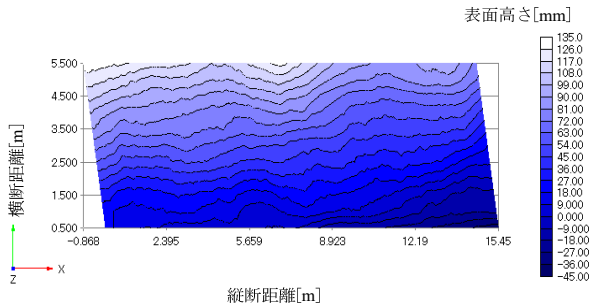


図-3 表面形状のコンター図

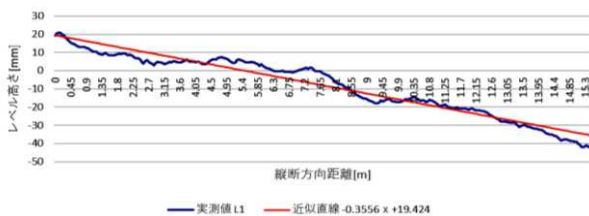


図-4 縦断面図と平均縦断勾配 (L1 の例)

に設けた (図-2)。

散水の手順として、まず 12:00 に試験範囲全面に対し総容量 40L の散水を行い、2 時間後の 14:00 に 1 回目の測定を行った。その後 14:30 に試験範囲全面に 30L の追加散水を行い、その 30 分後の 15:00 および 1 時間 15 分後の 15:45 に 2 回目および 3 回目の測定を行った。なお、試験時の環境条件は気温 22.4℃、湿度 77% であった。

写真-2 には散水状況を示す。

3. 試験結果と考察

3.1 表面形状の測定結果

表面形状測定で得られた床版表面の凹凸を図-3 のコンター図に示す。

(1) 平均縦断勾配

表面形状測定で得られた 11 測線の縦断面図のそれぞれ

表-2 平均縦断勾配の一覧

測線	平均縦断勾配	設計縦断勾配との差
L1	-0.3556	-0.0174
L2	-0.2388	0.0995
L3	-0.2526	0.0857
L4	-0.2534	0.0849
L5	-0.2678	0.0705
L6	-0.2838	0.0546
L7	-0.2920	0.0463
L8	-0.2770	0.0613
L9	-0.2862	0.0521
L10	-0.2578	0.0805
L11	-0.3052	0.0331
差の平均		0.0591

(単位: %)

設計床版面との差[mm]

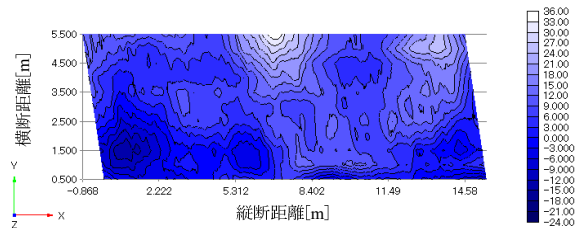


図-5 設計床版面との差

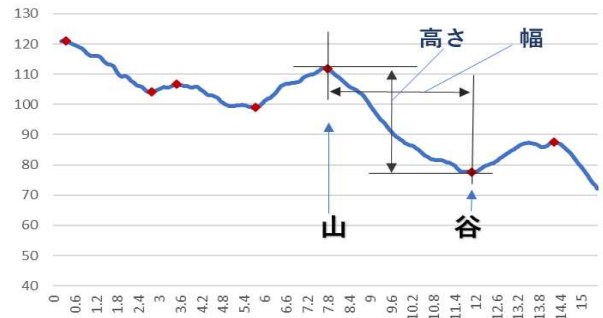


図-6 凹凸に関する定義

について最小二乗法を用いて近似直線を求め (図-4 参照)、近似直線の傾き (以下、平均縦断勾配) と設計勾配の差を計算した結果を表-2 に示す。表-2 から分かる通り、本測定で得られた平均縦断勾配は L1 を除いて設計勾配より小さい結果になった。また、道路構造令において、縦断勾配 0.3~0.5%程度により路面排水は十分に行われるとしているが、測線 L2~L10 においてはこれを満たさない結果になった。

(2) 凹凸性状

次に、表面形状の実測値と、横断勾配および縦断勾配をそれぞれ 2%および-0.33825%とする設計床版面との差を図-5 に図示した。図より、本試験範囲において部分的に設計面より高いあるいは低い箇所が数箇所あり、設計床版面との差の最大値は、凸部で約 36mm、凹部で約 15mm であった。

凹凸性状を分析するため、11 測線の縦断面図それぞれを移動平均により平滑化した後、図-6 に示すように、極大点および極小点から「山」および「谷」を抽出した。

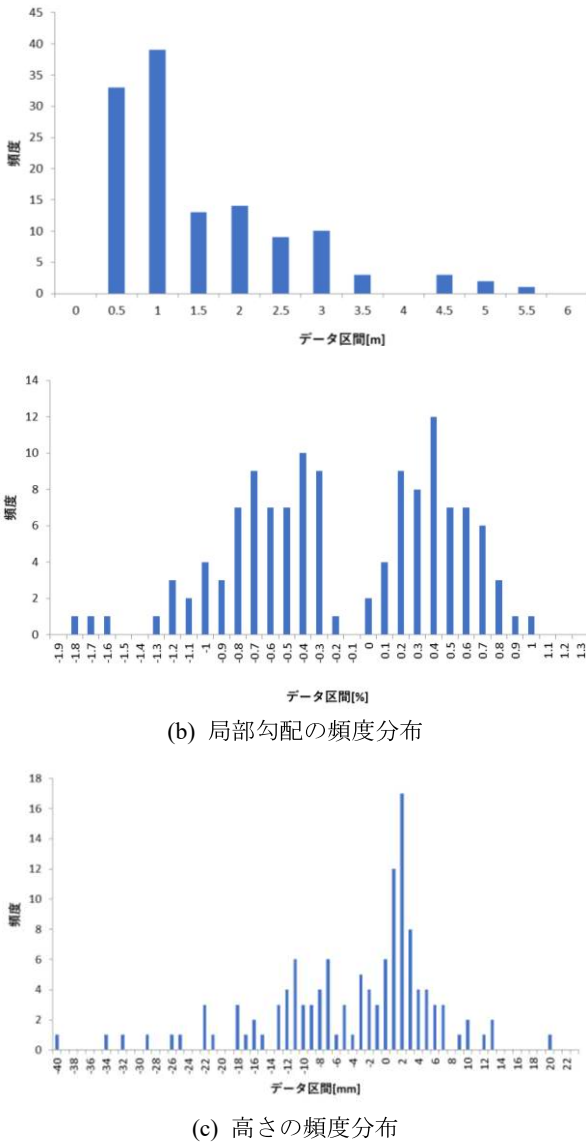


図-7 凹凸性状

抽出した山および谷から、隣り合う山と谷との距離(幅)、局所的な縦断勾配(局部勾配)、標高差(高さ)を求め、図-7にヒストグラムとして表示した。

図-7(a)から分かる通り、一つの山から谷までの長さが3.5mを超えるものは少なく、1m以内の不陸が連なって表面の凹凸が形成されていると考えられる。また、1~3mの幅を持つ凹凸も一定数ある。

図-7(b)に示した局部勾配のヒストグラムはデータ数126個であり、そのうち排水を阻害する可能性がある上り方向の局部勾配となるデータは58個であった。

図-7(c)から、縦断方向に沿った山-谷の高低差は-4~7mm以内のものが多く、次いで-18~-7mmが多い。図-7(a)と合わせると、1m以内の幅の凹凸に関しては-4~7mm、1~3mの幅の凹凸に関しては-18~-7mmの高低差を持つものが多いことが分かる。

3. 2 散水試験の結果

(1) 水分量の分布

図-8に、測定範囲における散水後の水分量の経時変化を示す。図中の黒点が測定位置である。設計上2%の

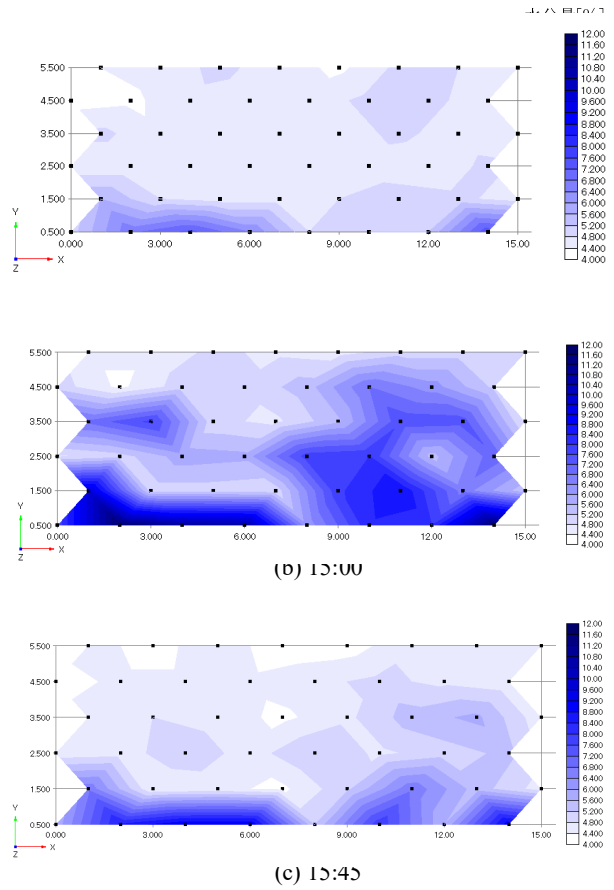


図-8 水分量の経時変化



(a) 散水直後



(b) 散水120分後

写真-3 床版表面の湿潤状態の変化

横断勾配が設置されており、勾配下部側(Y=0.5~1.5m付近)で水分量が多くなっている。特に端部であるY=0.5に着目すると、排水ますや床版水抜きのない位置で水分量が高くなる傾向があることが分かる。これは、横断勾配に沿って地覆にたどり着いた水を縦断方向に排水できていないことを示している。結果として排水装置の

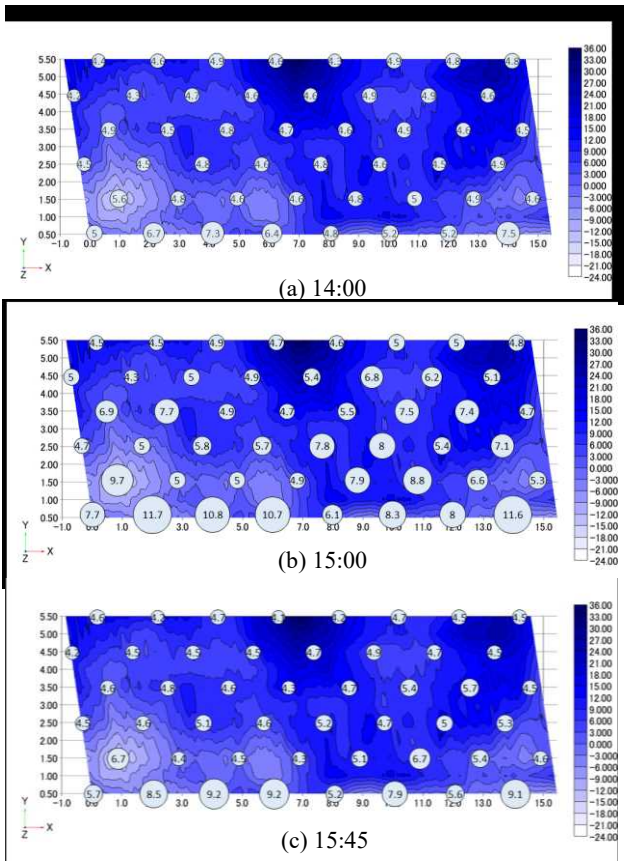


図-9 水分量の経時変化と床版表面形状

間に水が溜まりやすくなっており、供用後の変状要因になりうる。

また、3回の測定すべてにおいて周囲より水分量が多くなっている箇所が複数あり、部分的に滞水が生じやすい箇所があることを意味する。これは、散水後の床版表面の観察（写真-3）において部分的な湿潤箇所が確認されていることにも矛盾しない。写真では奥が地覆部であり、地覆部周辺に滞水していることもわかる。

(2) 表面形状と水分量の関係

上述のとおり、部分的な滞水が発生する傾向が見られるため、表面形状との関連性を考える。

水分量の測定値をバブル表示し、図-5に示した表面形状と重ね合わせたものが図-9である。

この図から、凹部では水分量が高くなる値になっていることが分かる。凹部の水分量は時間経過により減少しているが、滞水位置は変化していない。よって水分量の減少は勾配による排水ではなく蒸発によるものであると分かる。また、凸部では周囲より水分量が低くなっている。加えて、凸部の勾配上部で水分量が高くなっている箇所があり、これは凸部が排水を阻害していると言える。以上は、床版表面の凹凸が部分滞水の原因になっていることを表している。

4. まとめ

本試験により、防水層施工前における床版表面の凹凸性状の把握を行った。これは、防水層や舗装のない状態であり必ずしも実橋での滞水状況を示すものではないが、試験の範囲内で床版上に生じる部分的な滞水と床版表面形状には関連性があることを確認できた。

本研究では、設計床版面に対する凹凸に着目して滞水状況の把握を行ったが、床版表面に滞水が発生するかどうかは、凹凸だけでなく縦断および横断勾配の大小にも依存することが想定される。1橋のみを対象とした本試験では、勾配の影響を評価するには至っておらず、表面形状と滞水傾向の関連性を詳細に検討するためには、複数の橋梁での調査を行い、結果を比較することが必要となる。

そうした調査に基づき、排水機能を阻害しない凹凸管理方法の検討を行うことが今後の課題となる。

謝辞

本試験を実施するにあたり、北海道開発局網走開発建設部遠軽開発事務所には多大なるご協力をいただきました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用、2015.
- 2) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007.

平成29年度

道路橋床版面形状の実態調査

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○角間 恒
白戸義孝
西 弘明

道路橋の床版面には、路面から浸入する雨水を速やかに排出するための勾配が設置されるが、施工直後に床版面の不陸に起因する部分滞水が生じている事例があり、排水性能の低下が懸念されている。本研究では、床版の長寿命化に資する排水性能の改善技術を構築するための基礎データを得ることを目的に、防水層敷設前における床版面形状の実態を把握するとともに、散水試験により床版面形状と滞水発生箇所との関連性を調査した。

キーワード：床版面、滞水、排水

1. はじめに

床版で発生する劣化の多くは路面から浸入する水に起因して発生・進行する。したがって、床版の耐久性を確保するためには、遮水性に優れた舗装の採用や防水層の設置によって床版への水の浸入を防ぐこと、ならびに、適切な排水設計を行うことによって床版上および防水層上で発生する滞水を早期に排出することが重要になる。

一般的な排水計画では、伸縮装置や地覆の近傍といった床版の縦断および横断方向の端部に排水ますや床版水抜き、導水パイプ等の排水装置が配置され、床版面に設置される排水勾配により雨水を排水装置に集水して橋梁外に排出する。一方で、供用中の橋梁においては滞水箇所が散在しており、排水性能が的確に発揮されていないことが懸念される。このような部分的な滞水が発生する原因の一つに、床版面に発生している不陸が挙げられ、床版上に浸入した水が排水装置まで流下するのを阻害していると考えられる。実際に新設橋では、防水層および舗装を敷設する前の床版上において、降雨後に部分的な滞水が発生している事例も散見される。

ここで、土木工事における出来高管理基準¹⁾に着目すると、床版面形状に関係する測定項目（規格値）として

基準高および厚さがある。しかし、これらは床版面形状を管理するための規格値ではないため、基準高に関しては1径間当たり2箇所（支点付近）で、厚さに関しては型枠設置時に概ね10m²当たり1箇所²⁾で測定が行われている程度であり、床版面の不陸を捉えることはできない。

以上の背景より、床版の長寿命化を図るためには、床版面に発生する不陸を抑制できる施工方法の開発や出来高管理方法の強化を含めた、排水性能の改善技術の構築が必要であると考えている。本研究では、その基礎的な検討として、防水層を敷設する直前の床版において床版面形状の測定を実施し、実橋における床版面形状の実態を調査した。また、散水試験を実施することで、床版面形状と滞水発生傾向の関係性を調査した。

2. 床版面形状の測定

(1) 測定方法

a) 対象橋梁

床版面形状の調査は、北海道開発局が管理する国道橋4橋（以下、A～D橋）において実施した。各橋梁の諸元を表-1に示す。4橋のうちA橋は鋼コンクリート合成

表-1 対象橋梁の諸元（設計・計画値）

項目	A橋	B橋	C橋	D橋
橋長	38.00	170.00	19.45	639.60
幅員	18.24～19.84	8.10	12.15	10.25
縦断勾配	0.34%	Level	Level	0.10%
横断勾配	片2.00%	拌2.00%	片5.00%	拌2.00%
上部構造形式 [*]	単純合成鉄桁	単純合成箱桁	単純非合成鉄桁	単純合成鉄桁
供用開始	供用前	1963年	1969年	1962年
適用示方書	平成24年道路橋示方書	昭和31年鋼道路橋設計示方書	昭和31年鋼道路橋設計示方書	昭和31年鋼道路橋設計示方書

※測定を実施した径間での上部構造形式

排水ます ● 床版水抜き ○ 原点 ■ 伸縮装置 ▬ 地覆 - - 測定ライン

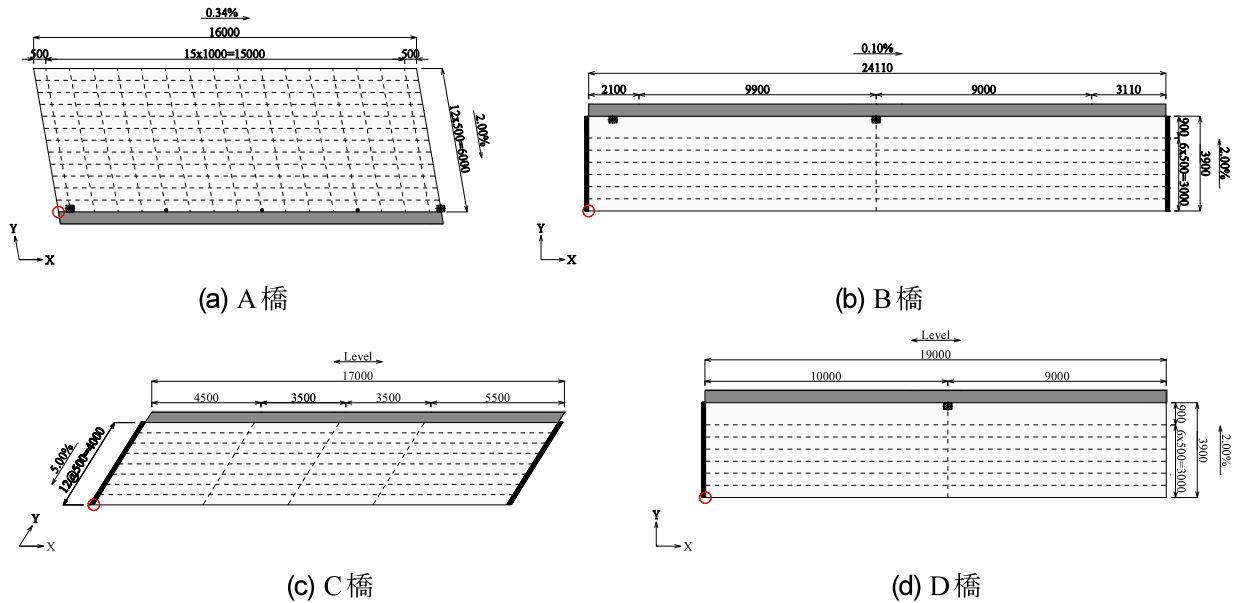


図-1 測定範囲の模式図

床版を有する新設橋であり、床版コンクリートを打設した後のコテ仕上げ面において測定を実施した。B～D橋はRC床版を有する既設橋であり、いずれも舗装工事の中で舗装切削機によりアスファルト舗装を撤去した状態で測定を実施した。なお、C橋において舗装切削不足によるアスファルト混合物の残存箇所が、D橋において伸縮装置の前後3m程度の範囲で床版補修箇所があったのを除き、測定結果に影響を与えるような床版の劣化等は見られなかった。

b) 測定システム

床版面形状の測定には、牽引式路面性状測定装置(MRP-3000)を使用した。本装置では、レーザ光により装置と測定面との相対高さを、内蔵されたジャイロセンサにより装置の傾きを測定することで、絶対高さでの標高測定を可能にしている。写真-1には測定状況の写真を示す。

c) 測定範囲

図-1には、各橋梁における測定範囲を模式的に示す。図中の矢印は横断勾配および縦断勾配を表し、矢印の向きが標高が下がる排水方向を指す。また、図中の原点およびXY軸は、測定結果を整理する際の原点座標および座標軸を表す。

測定は、いずれの橋梁においても縦断方向に15～25m程度、横断方向4～6m程度の範囲で実施した。図中の破線が床版面形状(縦断図あるいは横断図)の測定ラインであり、横断方向に0.5m間隔で設置した測定ライン上において、1橋当たり6～11個の縦断図を取得した。また、横断図については、A橋では縦断方向に1m間隔で設置した16個の測定ラインで、B～D橋では測定範囲内に設置した1～3個の測定ラインで取得した。なお、



写真-1 床版面形状の測定状況

標高値の取得は測定装置の移動距離50mm毎に行った。

(2) 測定結果

以下には、各橋梁で測定した横断図および縦断図の例を示す。本研究では、それぞれの図における最大標高を標高0mmとして基準化した相対的な横断図および縦断図により示す。また、横断図および縦断図の特性を把握するため、それぞれの縦断図および横断図に対して最小二乗法による直線近似から平均的な床版面形状(以下、平均横断面および平均縦断面)を求め、近似直線の傾き(以下、平均横断勾配および平均縦断勾配)、近似直線と実測値との差の最大値(以下、凸部最大高さおよび凹部最大深さ)、近似直線に対する実測値の標準偏差を整理した。

a) 横断図

図-2は各橋梁で得られた横断図の例であり、図中の実線が実測値、破線が平均横断面を示す。測定を実施した4橋においては、後述する縦断方向と比較して、横断方向において床版の不陸が小さくなる結果であった。平均

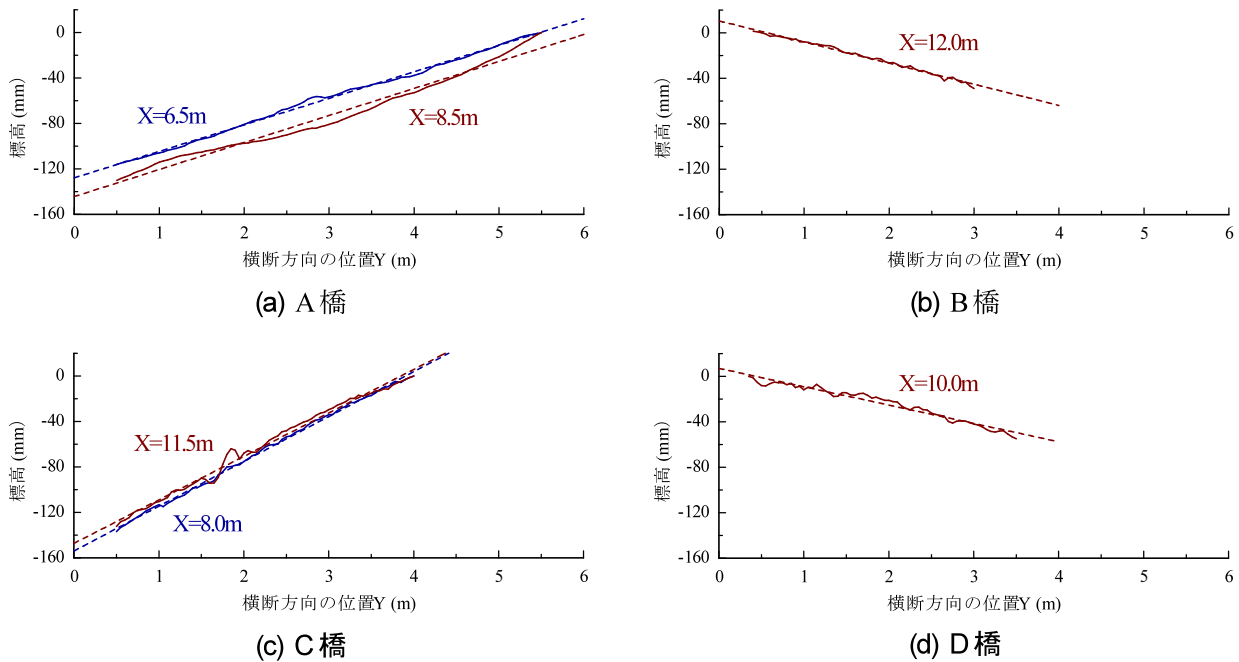


図-2 横断面の例

表-2 横断面の特性

項目		A橋	B橋	C橋	D橋
測定ライン数		16	1	3	1
平均横断勾配 (%)	平均	2.28	1.86	3.78	1.62
	範囲	1.94~2.54	—	3.56~3.95	—
凸部最大高さ (mm)	平均	5.44	2.37	6.83	5.46
	範囲	2.49~13.50	—	2.83~12.61	—
凹部最大深さ (mm)	平均	4.24	3.86	7.67	7.19
	範囲	2.31~8.07	—	3.76~10.02	—
標準偏差 (mm)	平均	2.33	1.31	2.62	2.96
	範囲	1.23~5.25	—	1.66~3.90	—

横断面との差を見たとき、A橋では、X=8.5mのようにY=2~5mの範囲で数メートルにわたって最大深さ8mm程度の凹部が形成されている箇所や、X=6.5mのようにY=2.5~3mの比較的狭い範囲に最大高さ5mm程度の凸部が形成されている箇所があった。B橋では、他橋と比較して横断方向に対する不陸が小さく、概ね様の横断面が形成されている。C橋のX=11.5mでは、Y=1.5~2mにかけて局部的に不陸が大きくなる箇所があるが、これは前述した舗装切削不足によりアスファルト混合物が残存している箇所と一致する。この残存したアスファルト混合物は、本測定の後には的確に除去されており、防水層を設置する際にはB橋と同様に横断方向への不陸が少ない状態となっていた。D橋においては、A橋と比較して規模が小さい不陸が連なって横断面が形成される特徴がある。

表-2に横断面の特性をまとめる。A橋において16個の測定ラインでの平均横断勾配は1.94~2.54%（平均2.28%）であり、設計値2.00%と比較してやや大きめの勾配であった。一方、B~D橋においては平均横断勾配が

それぞれ1.86、3.78、1.62%であり、いずれも計画値と比較して横断勾配がやや小さくなる傾向がある。

床版面の不陸の程度を表す指標として標準偏差に着目すると、A橋で1.23~5.25mm（平均2.33mm）、B橋で1.31mm、C橋で1.66~3.90mm（平均2.62mm）、D橋で2.96mmであった。C橋の結果が、前述のアスファルト混合物の残存箇所を含んだものであることを考慮すると、測定を実施した4橋においては、A橋およびD橋で不陸の程度が相対的に大きい結果であった。

b) 縦断面

図-3に各橋梁で得られた縦断面の例を示す。縦断面に関しては、いずれの橋梁においても横断面と比較して床版面の不陸が顕著に現われている。例えばA橋のY=1.0mにおいては、X=8~12mにかけて最大高さ10mm程度の凸部が見られる。その直前のX=5~7mにかけては最大深さ6mm程度の凹み部が生じており、2m程度の範囲で平均縦断勾配の方向に反する16mmの高低差が生じていることになる。同様の床版面形状は、C橋の

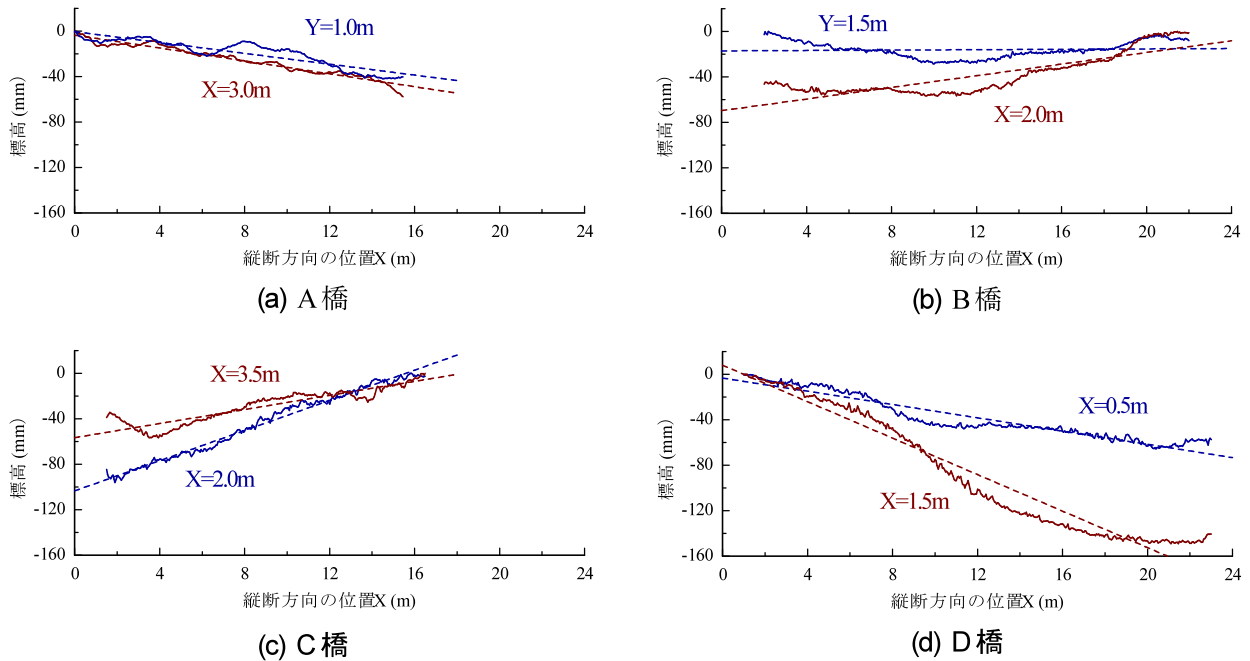


図-3 縦断面図の例

表-3 縦断面図の特性

項目		A橋	B橋	C橋	D橋
測定ライン数		11	6	7	6
平均縦断勾配 (%)	平均	0.28	0.24	0.56	0.62
	範囲	0.24~0.36	-0.05~0.69	0.31~0.79	0.29~0.80
凸部最大高さ (mm)	平均	10.58	20.09	15.88	27.82
	範囲	5.03~20.22	8.35~33.11	8.97~24.98	13.79~36.85
凹部最大深さ (mm)	平均	9.61	13.23	11.66	18.63
	範囲	7.21~11.55	7.15~18.80	8.54~18.43	13.01~21.64
標準偏差 (mm)	平均	4.71	8.10	5.54	9.64
	範囲	2.68~7.09	3.72~11.86	3.48~7.44	6.03~12.09

Y=3.5mにおいても X=2~4mの範囲で見られている。こうした箇所は、平均縦断面とは勾配の方向が異なり局所的に上り勾配となるために滞水が生じやすく、舗装や防水層、床版の劣化損傷が懸念される箇所と言える。B橋においては、測定を実施した 24m の範囲で下に凸となる放物線型の床版面形状が形成されていた。本橋においては、図-1(b)に示すように X=12m の位置に排水ますが設置されており、結果として効果的な排水装置の配置となっているが、凹部と排水装置の位置が一致しない場合には滞水箇所になり得る。

新設橋 (A 橋) と既設橋 (B~D 橋) を比較すると、既設橋において細かい不陸が形成されている傾向が見られる。これは、床版面の仕上げ方法に起因するものと考えられ、舗装切削機により舗装を撤去した後の床版面では、規模の小さな不陸が形成されやすい。こうした比較的規模の小さい不陸と床版面における滞水現象との関係性については今後検証を行う必要があるが、床版面における細かい不陸に関しては、防水層の付着性能を低下さ

せる要因となることが指摘されており²⁾、舗装、防水層、床版の耐久性に影響を与える可能性がある。

表-3 に縦断面図の特性をまとめると、凸部最大高さおよび凹部最大深さに着目すると、対象とした 4 橋梁においては平均的な床版面に対して最大で 10~40mm 程度の凹凸が発生しており、横断方向と比較して不陸の規模が大きくなっていた。また、平均縦断面に対する標準偏差を見ても、縦断方向で不陸が顕著であることが明らかである。なお、A~D 橋の縦断面図の特性を比較すると、A 橋において不陸が最も小さく、D 橋において不陸が最も顕著である結果と解釈できるが、必ずしも床版面の不陸が排水性能の低下を招くわけではない。例えば、A 橋においては、前述のように局所的に縦断勾配が反転する箇所があり縦断方向への排水性能の低下が懸念されるが、D 橋においては、縦断方向に対して一方向に標高が低下しており、平均縦断面との標高差が排水を阻害しない。したがって、排水の観点においては、床版面の不陸と縦断勾配との組み合わせにより性能を評価することが重要である。

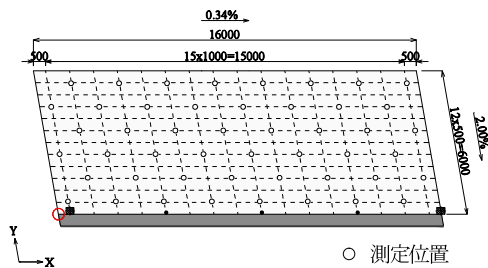


図-4 水分量の測定位置



写真-2 散水試験の状況

表-4 散水試験の手順

時刻	項目
11:30	水分量測定 (1回目)
12:00	散水 (0.44L/m ²)
14:00	水分量測定 (2回目)
14:30	散水 (0.33L/m ²)
15:00	水分量測定 (3回目)
15:45	水分量測定 (4回目)

3. 散水試験

2章より、合計4橋という限られた調査結果ではあるが、床版面には排水を阻害する可能性がある不陸が発生していることが明らかとなった。本章では、前述のA橋において散水試験を実施し、床版面の不陸と床版面に発生する部分的な滞水現象との関係性を調査した。

(1) 試験方法

散水試験は、A橋を対象として、前述の床版面形状の測定範囲全面に散水した後、床版面の水分量の経時変化を測定した。水分量の測定には高周波容量式水分計(HI-520)を使用し、図-4に示す測定位置において実施した。試験開始日時は2017年8月30日12:00であり、その時の天候は曇り、気温は22.4℃、湿度は77%であった。

写真-2に散水試験の状況を、表-4に試験手順を示す。試験では、まず床版面が乾燥した状態において1回目の水分量測定を行い、水分量の初期値を取得した。その後、試験範囲全面に対して1回目の散水(0.44L/m²)を実施し、それから1時間が経過した時点で2回目の水分量測定を実施した。1回目の散水から2時間30分が経過した

14:30には試験範囲全面に対して2回目の散水(0.33L/m²)を実施し、その後、15:00および15:45に3回目および4回目の水分量測定を実施した。

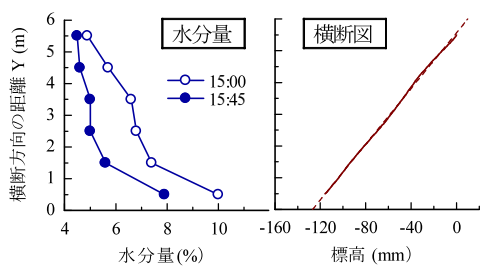
(2) 試験結果

水分量の測定結果として、15:00および15:45において縦断面および横断面の上で測定した水分量の分布を図-5に示す。ここでは、測定ライン上で取得した水分量(横断方向3点/ライン、縦断方向8点/ライン)の平均値によって各縦断面および横断面上での滞水傾向を整理した。また、図中には、A橋で取得した16個の横断面および11個の縦断面に基づく平均的な横断面および縦断面も示す。写真-3には、試験中における床版面の湿潤状況の例として、14:00の水分量測定を行った直後にX=8~14mの範囲を撮影した写真を示す。

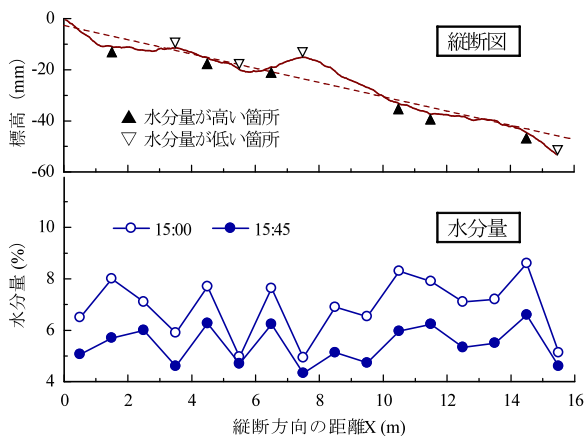
図-5(a)に示す横断方向への水分量分布を見ると、概ね勾配の高い側で水分量が低く、勾配の低い地覆側に向かって水分量が高くなっている。これは、床版面に設置された勾配によって供給した水が地覆方向に流下していることを意味する。ただし、地覆に最も近いY=0.5mの測定ライン上では水分量が極端に高くなる傾向が見られている。このことは、横断勾配によって地覆付近に集められた水が縦断方向に流下せず、橋梁外に排水されていないことを表す。実際に、写真-3において地覆付近に着目すると、各排水装置の中間部において著しい滞水が発生していることが確認できる。なお、15:00から15:45の間での水分量の変化を見ると、横断方向の位置によらず水分量が概ね一様に2%程度低下していることから、水分がある量以下になると、排水ではなく表面からの乾燥が床版面の水分量低下の要因になっていたと推察される。

図-5(b)に示す縦断方向への水分量分布を見ると、縦断方向の距離に対して水分量が徐々に増加するような水分量分布にはなっておらず、水分量の高い箇所と低い箇所が不連続に現われている。このことは、写真-3において、縦断方向に乾燥箇所と湿潤箇所が交互に現われていることから確認できる。また、縦断面図と水分量分布を比較すると、破線で示す平均面に対して標高が低い箇所および、局所的な縦断勾配が小さい箇所では水分量が高くなる傾向がある。一方、水分量が低くなりやすい箇所の特徴に、平均面に対して標高差が高いこと(極大点になること)や不陸によって縦断勾配が局所的に大きくなることなどが挙げられる。

以上のことより、A橋においては、床版面に発生している不陸に起因して、縦断方向での排水性能の低下が生じていた。さらに、B~D橋においても、A橋と同様に縦断方向への不陸が顕著であったことを踏まえると、既設橋梁においては、設計時の排水計画で見込んだ排水性能に対して、縦断方向への排水性能が低下している可能性が高いと考えられる。

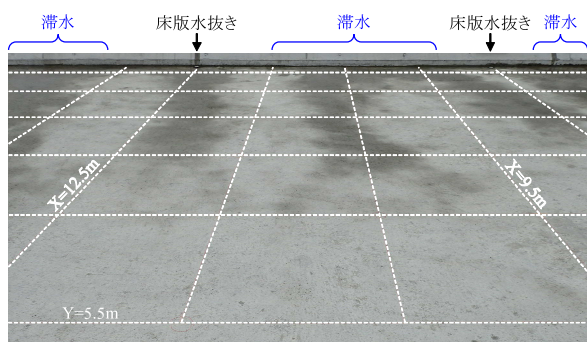


(a) 横断方向



(b) 縦断方向

図-5 水分量分布



※破線は床版面形状測定ラインの一部 (1m間隔)

写真-3 床版面の湿潤状況の例 (14:15)

4. 床版面の排水性能の改善方法

床版面の不陸に起因する排水性能の低下を抑制し、さらに排水性能の向上を図るためには、以下に示す対策を講じることが必要になる。

一つは、床版面に発生する不陸を修正する方法である。本研究より、新設橋および既設橋ともに、床版面には排水を阻害する不陸が発生していることが明らかであり、これを排除することで、床版上に浸入した水が排水装置に至るまでの排水経路を確保する必要がある。特に、交通開放までの時間的制約が比較的少ない新設橋においては、出来高管理基準を強化する、あるいは、現行の管理方法に加えて床版面形状の測定を行い、不陸がある場合にはコンクリートの研掃などにより不陸を解消することが望ましい。

もう一つは、排水装置を追加設置する方法である。現

行の排水計画では、縦断勾配が1%以下の場合には5m間隔で、1%を超える場合には10m間隔で排水ますあるいは床版水抜きが設置する³⁾のが一般的である。しかしながら、本研究からは、上記の排水計画では床版上に浸入した水を排水するには不十分であることが示唆されることから、排水装置を追加することで排水性能の向上を図る必要があると考えられる。特に既設床版においては、時間等の制約が厳しい中で床版面の不陸を修整するのは容易でないことから、防水層の敷設や舗装打換えに併せて排水装置の追加設置を検討するのがよい。その際、単に既存の排水装置の中間に設置するのでは期待する効果が得られない可能性があることから、床版面の縦断図を測定するなどして、滞水が発生しやすい床版面の凹部に的確に設置する必要がある。

5. おわりに

本研究では、北海道内の国道橋4橋において床版面形状の測定を実施し、床版面形状の実態を把握した。また、そのうちの1橋において散水試験を実施し、床版面形状と滞水発生箇所との関連性を調査した。これらにより得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 床版面形状の測定を実施した橋梁ではいずれも、横断方向と比較して縦断方向に床版面の不陸が顕著になる結果であり、平均的な縦断面に対して最大で10~40mm程度の凹凸が発生していた。
- 2) 散水試験より、対象橋梁においては縦断方向に水が流下されにくく、平均的な床版面に対して標高が低くなる箇所、および、排水を阻害する上り方向の局所的な勾配が発生している箇所、湿潤状態が長く維持されやすい結果を得た。1)の結果も考慮すると、現行の排水計画で見込んでいた排水性能と比較した場合、供用中の橋梁では縦断方向への排水性能が低下している可能性が高いと言える。
- 3) 床版面の不陸に起因する排水性能の低下を抑制するため、出来高管理基準の強化や床版打設後に発生している不陸の修整、排水装置の追加設置といった対策を講じる必要があることを提言した。

謝辞

本研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局には多大なるご協力いただきました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：土木工事施工管理基準（案）、2016。
- 2) 土木学会：道路橋床版防水システムガイドライン 2016、2016。
- 3) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007。

床版面形状に基づく橋面排水性能に関する考察

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 ○角間 恒
 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 正会員 白戸義孝
 北海道大学 学生員 安田優子
 北海道大学 正会員 松本高志

1. はじめに

床版の耐久性を確保するためには、床版への水の浸入を防ぐ「防水機能」とともに、路面から浸入する水を橋梁外に排出する「排水機能」が適切に機能を発揮しなければならない。ここで排水に関しては、縦断および横断方向の端部に排水装置を配置し、排水勾配によって雨水を排水装置に集水して橋梁外に排出するのが一般的である¹⁾。しかしながら、供用中の橋梁においては滞水箇所が散在するなど、路面から床版・防水層上に浸入した水を排出するための排水性能の不足が懸念される。

本研究では、床版・防水層上での排水を阻害する要因の一つとして床版面に発生している不陸に着目し、実橋において床版面形状を測定した結果を基に、橋面排水における問題点について考察を行った。

2. 測定概要

(1) 対象橋梁

本研究では、北海道内の道路橋4橋(A～D橋)を測定対象とした(表-1)。4橋のうち1橋(A橋)は鋼コンクリート合成床版を有する新設橋、残りの3橋(B～D橋)はRC床版を有する既設橋であり、前者では床版コンクリート打設後のコテ仕上げ面で、後者では舗装切削機によりアスファルト舗装を撤去した直後の床版面にて測定を実施した。

(2) 測定方法

本測定では、牽引式路面性状測定装置(MRP-3000)を使用して縦断図および横断図を取得した(写真-1)。測定範囲や取得した縦・横断図の数は橋梁毎に異なるが、縦断方向15～25m×横断方向4～6mの範囲から、1橋当たり縦断図を6～11個、横断図を1～16個取得した。標高値のサンプリングは、測定装置の移動距離50mm毎に行った。なお、橋梁によっては部分的にアスファルト混合物が残存する箇所や床版補修が行われた箇所が見られたが、これらを含まないように測定ラインを設定した。

表-1 対象橋梁の諸元(設計値)

橋梁	供用開始(年)	縦断勾配(%)	横断勾配(%)
A	供用前	0.34	片2.00
B	1963	Level	拝2.00
C	1969	Level	片5.00
D	1962	0.10	拝2.00

3. 測定結果

(1) 縦断図の例

図-1には、測定結果の例として、地覆からの距離が1mおよび3m程度の位置で取得した縦断図を示す。全体的な傾向として、新設・既設によらず、測定を実施した断面の大半で数m規模の凹凸が連なって縦断方向に床版面が形成されている傾向が見られた。また、既設橋(B～D橋)では、舗装切削により発生したと考えられる細かい凹凸が発生していることがわかる。さらに、B橋のように、測定位置によって縦断図の特徴が大きく異なる橋梁もあった。



写真-1 測定状況

キーワード 床版, 床版面形状, 排水性能

連絡先 〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 TEL 011-841-1698

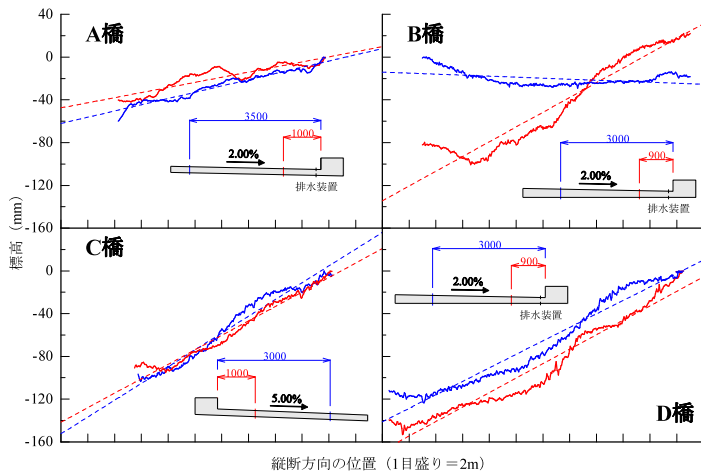


図-1 縦断図の例

(2) 縦・横断図の特性

床版面形状の特性を把握するため、取得した全ての縦・横断図に対して、最小二乗法による直線近似を行ったときの近似直線の傾き（以下、平均勾配）、および、標高値の標準偏差を求めた結果を図-2に示す。図中の丸印は縦・横断勾配の設計値を、橋梁名の括弧内の数字は測定ラインの数を表す。

新設橋であるA橋においては、縦・横断の両方向で設計勾配が測定した平均勾配の範囲内にあるだけでなく、測定ライン数が多いにもかかわらず、ばらつきが少ない結果であった。このことから、本橋では現行の出来形管理によって床版面全体としては概ね設計どおりの排水勾配が確保されているといえる。ただし、標準偏差は縦断方向で大きくなる傾向があり、測定位置によっては平坦な床版面が形成されていないことがわかる。

既設橋のB～D橋では、いずれも設計値と比較して縦断勾配は大きく、横断勾配は小さくなる傾向がある。また標準偏差からは、縦断方向への不陸がA橋と比較しても顕著であることがわかる。これらの橋梁については、本測定前の床版面形状が不明であり、不陸と舗装切削との関連性は明確ではないが、縦断方向に刃を回転させる切削機構と切削時に発生する機械振動等が相まって、舗装切削によって縦断方向に不陸が形成された可能性がある。

(3) 橋面排水における問題点

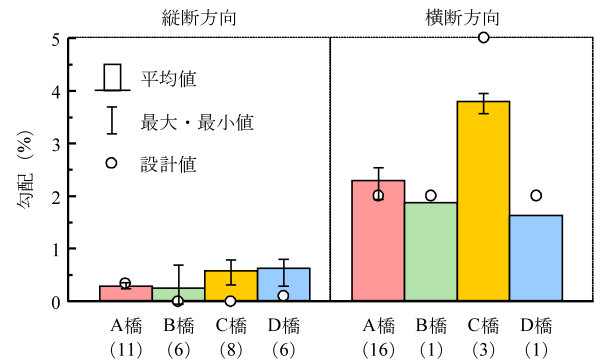
以上の結果から、新設・既設にかかわらず床版面には縦断方向に不陸が形成されやすく、横断勾配に対して縦断勾配が小さい橋梁においては、縦断方向への排水性能が本質的に低だけでなく、不陸の存在が床版・防水層上の水を縦断方向に排水する性能をさらに低下させている可能性がある。実際に、A橋において散水を行った結果、写真-2に示すように、横断勾配をもって地覆付近に集められた水を排水装置までの確に流下できず、隣り合う床版水抜きの間で著しい滞水が発生する様子が確認された。こうした状況から、縦断方向への排水性能の向上を図るため、床版面形状の改善や排水装置の追加設置等が必要になると考えられる。

4. おわりに

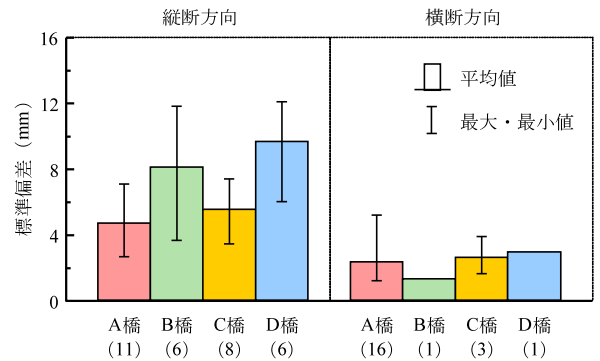
本研究により、床版面に形成される不陸により縦断方向への排水性能低下が懸念されることを示した。今後は、排水性能を改善する手法について検討していきたい。

参考文献

1) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧，2007.



(a) 平均勾配



(b) 標準偏差

図-2 縦・横断図の特性

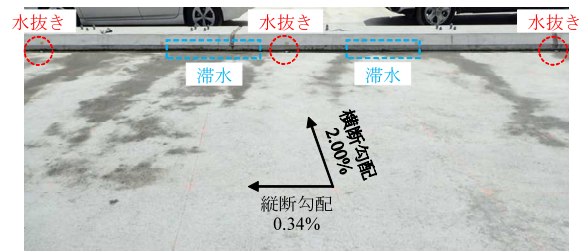


写真-2 床版面の滞水状況

層状ひび割れのあるコンクリートの力学的特性について

Mechanical characteristics of concrete with layered cracks

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 松田有加 (Yuka Matsuda)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. まえがき

寒冷地では、凍害による橋梁の劣化が顕著であり、北海道で平成 18 年度に行われた橋梁点検結果によると、695 橋のうち約 17.3%に凍害劣化または凍害との複合劣化が認められたり。凍害に対する評価方法、修繕方法の確立が求められるなか、特に凍結融解により発生する層状ひび割れをもつ床版の特性については、いまだ十分に明確にされていない。

本研究では、供用後の橋梁床版から切り出した試験体を用いて、層状ひび割れのあるコンクリートの超音波伝播速度および圧縮強度の測定を行う。そしてその結果より、超音波伝播速度を用いて圧縮強度を推定する方法について検討する。

2. 試験方法

2.1 対象橋梁

北海道内で 46 年供用された後に撤去された床版を対象とした。表-1 に橋梁諸元を、図-1 に橋梁一般図を、写真-1 に本研究で対象とする箇所における床版下面の状況を示す。本床版では、凍害とアルカリシリカ反応による複合劣化が進行していたことが確認されている²⁾。写真-2 には撤去床版切断面における層状ひび割れの状況を示しており、最も下方にあるもので上側鉄筋と下側鉄筋の中間辺りの深さに位置していた。

2.2 超音波伝播速度および圧縮強度の測定

(1) 試験体種類

本研究では、上記の床版から採取した円柱形状および立方体形状のコンクリート試験体を使用する。円柱試験体の採取方向は床版厚さ方向（以下、鉛直方向）と床版面内方向（以下、水平方向）の 2 種類とした。水平方向に採取する円柱試験体および立方体試験体は、上側鉄筋と下側鉄筋の中間部（写真-2 中の赤色矢印）の層状ひ

表-1 橋梁諸元

凍害危険度	3
大型車交通量	192 台/日（上下合計）
架設年次	昭和 46 年
適用基準	昭和 39 年鋼道路橋設計示方書
上部構造形式	2 径間単純合成鋼桁橋
橋長、幅員	34.0m, 8.20m



写真-1 床版下面の状況

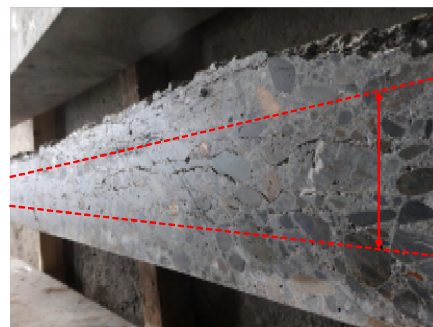


写真-2 層状ひび割れの発生状況

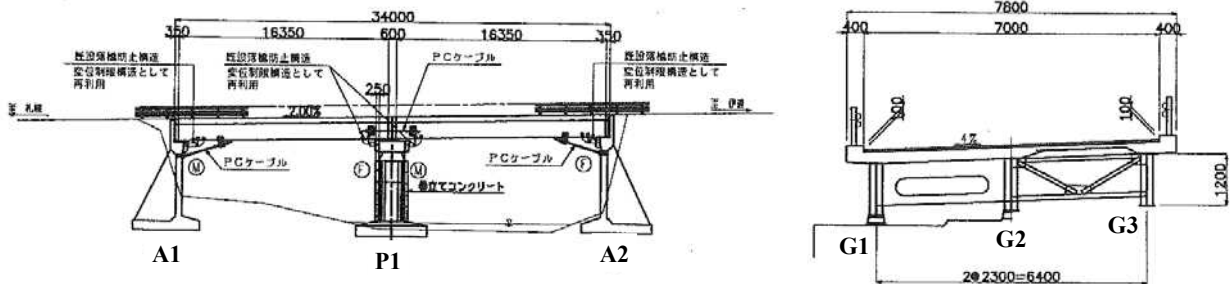


図-1 橋梁一般図

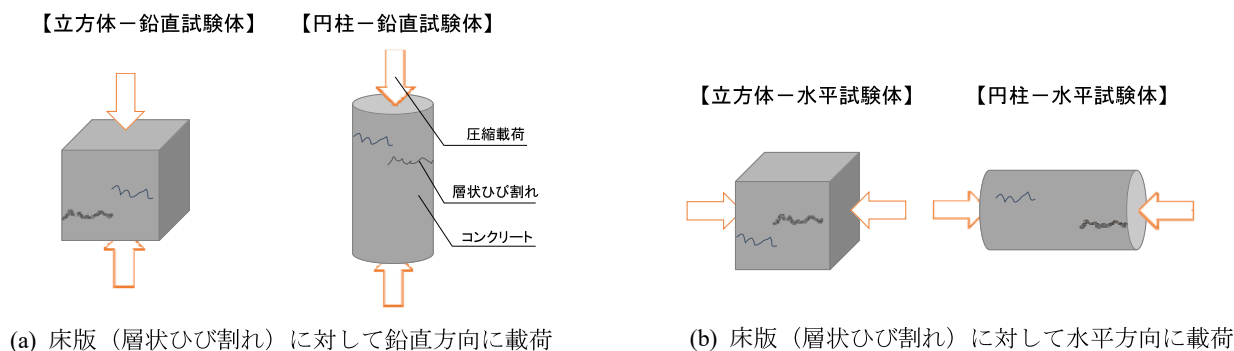


図-2 圧縮強度の測定方向

ひ割れを多く含む部分から採取している。また、層状ひび割れの発生していない箇所からも鉛直方向に円柱試験体を採取して試験を実施することで、圧縮強度に与える層状ひび割れの影響を確認できるようにした。

円柱試験体の寸法は、径 50mm および 73mm の 2 種類である。高さは径の 2 倍を基本としたが、一部では 2 倍に満たないものがあつた。立方体試験体の寸法は一辺 50mm、60mm、80mm の 3 種類である。円柱試験体は鉄筋を避けた上で、できるだけ大きな径で採取したため、寸法は 2 種類となっている。立方体試験体も同様の理由で 3 種類の寸法があり、試験体の形状を円柱のみとしなかったのは、立方体の方が分離しにくく、効率的に採取できるためである。

(2) 超音波伝播速度の測定方法

採取した試験体について、透過法による超音波伝播速度の測定を実施した。透過方向は、後述する圧縮強度試験における載荷方向を基本とし、立方体試験および一部の円柱試験体については、載荷直角方向にも測定を実施した。

(3) 圧縮・静弾性係数試験方法

圧縮強度および静弾性係数の測定は、「コンクリートの静弾性係数試験方法 (JIS A 1149)」に準拠(あるいは参考に)して行った。なお、立方体試験体の圧縮強度については、既往の研究³⁾を参考に、測定値に 0.8 を乗ずることで円柱試験体の値に補正した。

床版においてコンクリートの力学的特性を調査する場合、床版鉛直方向(層状ひび割れに対して直角方向)の特性を対象とすることがほとんどであるが、耐荷性能評価の観点ではむしろ床版水平方向(層状ひび割れに対して平行方向)の特性が重要であると考えられる。そこで、本研究では、通常の床版鉛直方向への圧縮・静弾性係数試験(以下、圧縮試験)だけでなく、床版水平方向に載荷する場合についても試験を実施した。図-2 には、圧縮強度の測定方向を示す。以下では、試験体形状や載荷方法の違いを区別する表記法として、試験体名に「形状-床版(層状ひび割れ)に対する載荷方向」試験体という呼称を用いる。例えば、「円柱-水平試験体」は水平方向に採取した円柱試験体に対して床版水平方向に圧縮試験を実施したことを、「立方体-鉛直試験体」は立方体試験体に対して床版鉛直方向に圧縮試験を実施したことを意味する。

表-2 超音波伝播速度とコンクリートの品質

超音波伝播速度 (m/s)	コンクリートの品質	試験体数	
		床版水平	床版鉛直
4,600 以上	優	2	1
3,700~4,600	良	4	4
3,100~3,700	やや良	0	7
2,100~3,100	不良	6	2
2,100 以下	不可	7	1
合計		19	15

3. 試験結果

3.1 超音波伝播速度

JCI 基準集⁴⁾による超音波伝播速度によるコンクリートの品質評価基準、またそれにより区分した試験体の数を表-2 に示す。「やや良」以下の評価となった試験体が過半数を占め、コンクリートの劣化が進行していることを表している。

3.2 圧縮強度および静弾性係数

図-3 に円柱試験体に関する静弾性係数と圧縮強度との関係を示す。図中の二点差線は、コンクリート標準示方書⁵⁾(以下、示方書)による健全なコンクリートにおける静弾性係数と圧縮強度の関係を示したものである。また、破線で囲った 2 体は健全部から採取した試験体の結果である。

図より、層状ひび割れに対して直角方向に載荷を行った円柱-鉛直試験体では、健全部での結果と比較して静弾性係数および圧縮強度が低下し、示方書での関係と比較しても静弾性係数が著しく低下していることがわかる。このような結果は、凍結融解試験に供した試験体⁶⁾にもみられる凍害を受けたコンクリートの一般的な特性と言える。

一方、層状ひび割れに対して平行方向に載荷を行った円柱-水平試験体では、1 体を除いて静弾性係数と圧縮強度の関係が示方書における関係に概ね一致し、健全部から採取した試験体から得られた結果と比較した場合には、圧縮強度が 40~60%程度に低下する結果であった。この結果は、静弾性係数の著しい低下が見られた鉛直試験体での試験結果および既往の研究とは異なるものであり、圧縮強度を層状ひび割れに対して鉛直方向に測定する場合と水平方向に測定する場合で、得られる力学的特

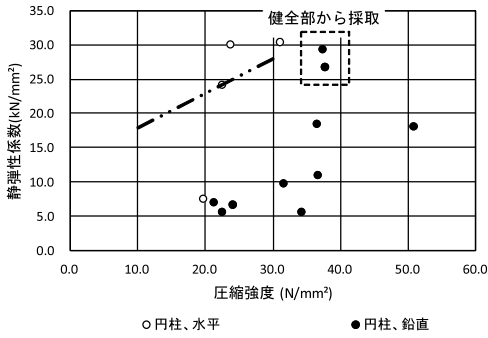
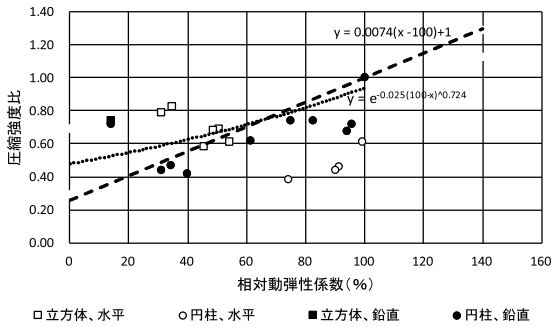
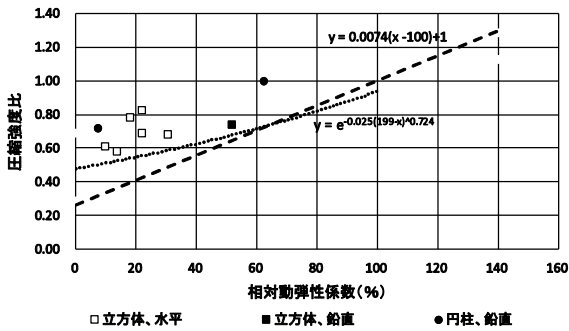


図-3 静弾性係数と圧縮強度



(a) 荷重方向の相対動弾性係数による整理



(b) 荷重直角方向の相対動弾性係数による整理

図-4 圧縮強度比と相対動弾性係数との関係

性が大きく異なることを意味する。なお、円柱-水平試験体のうち1体では静弾性係数の低下が見られたが、この試験体では下面から進展した曲げひび割れが試験体の軸直角方向に貫通しており、その影響を受けていたと考えられる。

3.3 超音波伝播速度による圧縮強度の推定

既往の研究より、コンクリートの圧縮強度と相対動弾性係数には相関関係があることが分かっている⁶⁾。本研究においては、超音波伝播速度から算出した相対動弾性係数と圧縮強度比との関係を整理し、これまでに提案された圧縮強度低下の推定式の層状ひび割れコンクリートへの適用性を検討した。

(1) 相対動弾性係数および強度比

相対動弾性係数および圧縮強度比は、式(1)および式(2)により定義する。

$$E = VL_n^2 / VL_0^2 \times 100 \quad (1)$$

$$R_c = f_n / f_0 \quad (2)$$

ここで、 E ：相対動弾性係数(%)、 VL_n ：超音波伝播速度、 VL_0 ：超音波伝播速度基準値、 R_c ：圧縮強度比、 f_n ：圧縮強度、 f_0 ：圧縮強度基準値である。超音波伝播速度基準値および圧縮強度基準値には、供用開始前の健全状態での測定値を用いるべきであるが、それらのデータを得ることは困難である。そのため、本研究では、得られた超音波伝播速度(各試験体の最大値)と圧縮強度のそれぞれの最大値を基準値とした。

また、文献7においては、「縦断方向における超音波伝播速度の測定が不可能である場合、それに対して直角方向における超音波伝播速度の最小値を用いることで、耐凍結融解特性の評価が行える」としており、本研究においても、複数箇所を測定している試験体については、最小値を用いることとした。

(2) 既往の推定式

式(3)⁸⁾および式(4)⁹⁾に、既往の研究により導出された圧縮強度比と相対動弾性係数との関係式を示す。

$$R_c = \exp\{-0.025(100-E)^{0.724}\} \quad (3)$$

$$R_c = 0.0074(E-100)+1 \quad (4)$$

式(3)は、径100mm×高さ200mmの円柱試験体を凍結融解試験に供し、相対動弾性係数と圧縮強度の関係を調査したものである。相対動弾性係数は超音波伝播速度から算出されており、超音波伝播速度の測定方向は荷重方向と同方向である。

式(4)は、凍害を受けたRC開水路側壁から径100mm×高さ200mmの円柱試験体を採用し、試験を行っている。また、相対動弾性係数を得るための超音波伝播速度は荷重方向に測定されていた。なお、この研究では開水路側壁から採取したコアの他に、試験室内で製作し凍結融解試験に供した試験体および既往の研究で使われたデータを基にしてこの式を導出している。

(3) 荷重方向の相対動弾性係数による整理

図-4(a)に、圧縮荷重方向に超音波伝播速度を測定した場合に関する、圧縮強度比と相対動弾性係数の関係を示す。

図より、円柱-鉛直試験体に関しては、相対動弾性係数の低下に伴い圧縮強度が線形的に低下する傾向は既往の研究と一致する。このことから、層状ひび割れ直角方向の相対動弾性係数を測定することで、層状ひび割れ直角方向の圧縮強度低下を推定できる可能性が高い。ただし、既往の式と比較すると、相対動弾性係数が同程度のとき、本試験結果において圧縮強度を小さく見積もる結果となっている。これは、既往の研究と本研究とで測定した相対動弾性係数の持つ意味合いが異なることに起因する。既往の研究では凍結融解試験により一様に劣化した試験体を使用しているが、本研究で対象とした実橋から採取した試験体では、一つの試験体の中でも深さ方向に劣化程度が大きく異なる。つまり、本研究では、劣化が分布する試験体に対する平均的な相対動弾性係数を測定したに過ぎず、劣化程度が小さい部位での超音波伝播の影響を受けて相対動弾性係数が大きめに測定されやすくなるためであると考えられる。

また、層状ひび割れに対して水平方向に荷重した場合、

圧縮強度比と相対動弾性係数に相関関係はなく、相対動弾性係数によらず圧縮強度比 0.4~0.8 の範囲に分布する結果となった。

以上より、既往の研究で提案されている相対動弾性係数に基づく圧縮強度低下の推定式は、層状ひび割れに対する方向によって適用性が異なり、層状ひび割れに平行方向の強度推定には適用が困難であると言える。

(4) 載荷直角方向の相対動弾性係数による整理

図-4(b)に、圧縮載荷方向に対して直角方向に超音波伝播速度を測定した場合に関する、圧縮強度比と相対動弾性係数の関係を示す。図より、サンプル数は少ないものの、載荷方向によらず圧縮強度比と相対動弾性係数には線形の関係が成立する傾向があり、載荷直角方向の相対動弾性係数により圧縮強度を推定できる可能性がある。

なお、本試験結果と既往の式を比較すると、多くの試験体が既往の式を上回っているが、これは立方体試験体で得られた圧縮強度を円柱試験体に補正するための係数に起因していると考えている。本研究では、型枠を用いて製作した試験体の圧縮試験から得られている補正係数 0.8 を採用したが、構造物から切り出した試験体に対する適用性は現段階で不明である。したがって、既往の強度低下推定式の妥当性については、今後詳細な検討を要する。

4. まとめ

本研究から得られた主な結果を以下にまとめる。

- 1) 床版鉛直方向（層状ひび割れ直角方向）に圧縮試験を実施した結果、凍結融解作用を与えたコンクリートを使用した試験で得られるような静弾性係数の著しい低下が見られた。
- 2) 床版水平方向（層状ひび割れ平行方向）に圧縮試験を実施した結果、静弾性係数が低下することなく圧縮強度が健全時の 40~60%に低下した。1)の結果を併せると、層状ひび割れのあるコンクリートでは、層状ひび割れ鉛直方向と水平方向とで力学的特性が大きく異なることが示唆される。
- 3) 床版鉛直方向の相対動弾性係数によって、層状ひび割れによる床版鉛直方向の圧縮強度低下を推定できる可能性がある。
- 4) 層状ひび割れのあるコンクリートでは、載荷方向によらず、載荷直角方向の相対動弾性係数によって圧縮強度の低下を推定できる可能性がある。

本研究で得た結果は、1 橋のみを対象とし、またサンプル数も少ない。今後は、劣化程度の異なる部位や他の橋梁から採取した試験体に対しても同様の試験を実施する。これにより、データの充実を図り、本研究で得られた知見の妥当性を検証する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、(一社)施工技術総合研究所・渡邊晋也氏には多大なるご協力をいただきました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 花田真吉、杉山隆文、馬場道隆：積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の複合劣化要因に関する調査報告—橋梁点検—、プレストレスとコンクリート技術協会第 20 回シンポジウム論文集、283-286、2011。
- 2) 角間恒、佐藤孝司、渡邊晋也、谷倉泉：凍害・ASR による複合劣化が生じた RC 床版の調査事例、第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.37-40、2016。
- 3) A.M. Neville：ネビルのコンクリートの特性、技報堂出版、1979。
- 4) 日本コンクリート工学協会、JCI 基準集、2004。
- 5) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕、2012。
- 6) 日本コンクリート工学協会、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書、2008。
- 7) 高田龍一、郭世文、緒方英彦、服部九二雄：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性能評価に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.26、No.1、pp.1911-1916、2004。
- 8) 野口博章、満木泰郎、溝渕利明、山田啓介：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化深度評価に関する基礎的研究、土木学会論文集 E、Vol.62、No.3、pp.592-605、2006。
- 9) 周藤将司、緒方英彦、石神暁郎、佐藤智：凍害劣化の生じたコンクリートの力学的特性および現地非破壊試験による動弾性係数の評価法に関する研究、農業農村工学論文集、Vol.84、No.3、pp.I291-I299、2016。

コンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響

(一社)日本橋梁建設協会 正会員 ○皆田 龍一 正会員 久保 圭吾
 (国研)土木研究所寒地土木研究所 正会員 佐藤 孝司 正会員 角間 恒
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本 高志

1. はじめに

これまで筆者らは、鋼コンクリート合成床版の耐凍害性を調査することを目的として、鋼コンクリート合成床版を模擬した供試体による凍結融解試験や拘束条件が異なる凍結融解試験を実施した。その結果、凍結融解によりコンクリート表面から進展したひび割れは、鉄筋もしくは補強リブに到達すると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¹⁾。そこで、コンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響を把握することを目的として、鋼材の種類と配置を変えた供試体を用いて凍結融解試験を実施した。

2. 試験概要

凍結融解試験の供試体は 100mm×100mm×400mm の角柱として、配合が 24-8-20N (W/C:54.5%) のコンクリートで製作した。試験ケースとその模式図を、それぞれ表-1、図-1 に示す。Case1 はコンクリート内部に鋼材が無い供試体である。コンクリート表面から進展したひび割れが鋼材位置まで貫通した場合と貫通していない場合を模擬して、それぞれ鋼材を露出したケース (Case4,7) とかぶりを確保したケースの供試体 (Case2,3,5,6) を用意した。コンクリート内部に埋め込んだ鋼材は、合成床版の補強リブを模擬した板厚 9mm の鋼板と D10 の鉄筋を用いた。また、水の影響が無い状態でコンクリート内部の鋼材が凍害に及ぼす影響を確認するため、

Case2,5 は気中で凍結融解試験を実施した。供試体数は各試験ケース 5 本とした。供試体容器は凍結融解による劣化を促進させるため、外部拘束力が大きい鋼製容器 (角柱, 120mm×120mm×500mm, t=2mm) を用いた。供試体容器の内側は、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り付けた。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 720 サイクルまで実施した。超音波伝播速度は 10~50 サイクルごとに計測した。

3. 試験結果及び考察

試験機の容量に制限があり、2 回に分けて凍結融解試験を行った。図-2 に示す超音波伝播速度の計測結果は、同時に凍結融解試験を実施した各試験ケースの供試体 3 本分である。写真-1 に各供試体の経時変化および破壊状況を示す。

コンクリート内部に鋼材が無い Case1 は、260~280 サイクルで供試体の中央付近から割

表-1 試験ケース

	内部鋼材		水の影響
	鋼材	かぶり	
Case1	---	---	有
Case2	鋼板	有	無
Case3	鋼板	有	有
Case4	鋼板	無	有
Case5	鉄筋	有	無
Case6	鉄筋	有	有
Case7	鉄筋	無	有

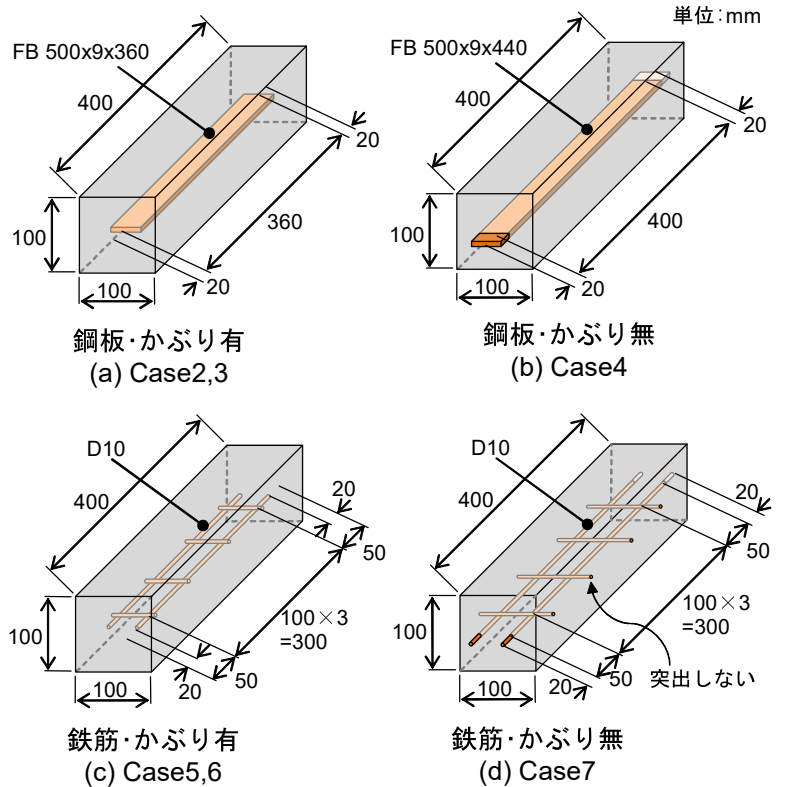


図-1 供試体の模式図

キーワード 凍結融解試験, 凍害, 鋼コンクリート合成床版, 超音波伝播速度

連絡先 〒105-0003 東京都港区西新橋1丁目6番11号 (一社)日本橋梁建設協会 TEL 03-3507-5225

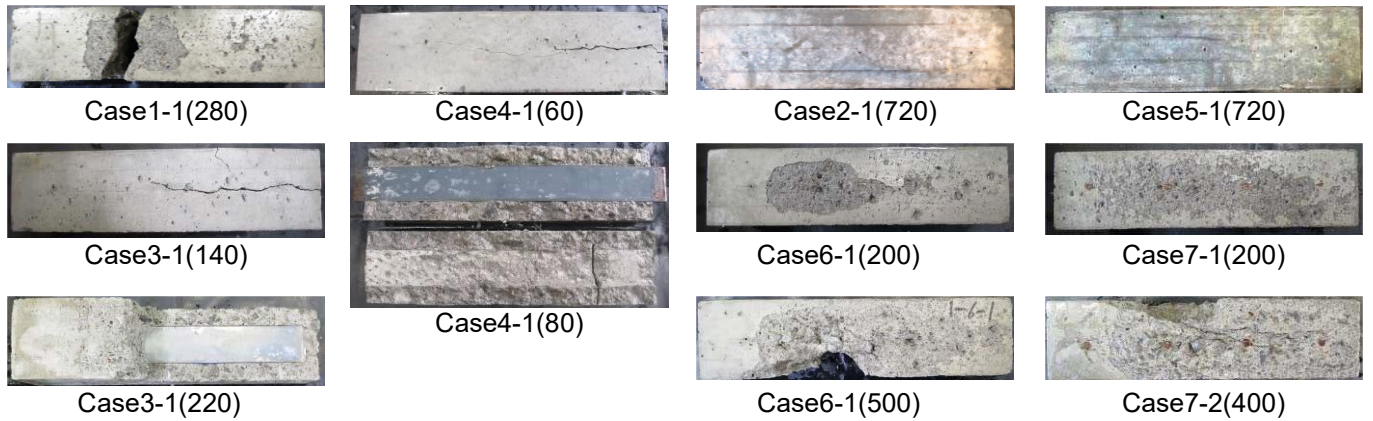


写真-1 供試体の経時変化および破壊状況

※()内はサイクル数

裂するように破壊した。鋼板がコンクリート内部にある場合(Case3,4)は、鋼板に沿ってひび割れが発生し、それぞれ200~300, 40~120サイクルで破壊した。鋼板を露出したCase4は、今回の試験ケースで最も早く破壊しており、コンクリートと鋼板の境界部やひび割れから水が浸入することで、凍害劣化が早まったと考えられる。一方、鉄筋がコンクリート内部にある場合(Case6,7)は、供試体中央付近からスケーリングが始まり、それぞれ440~520, 400~460サイクルで破壊した。Case1と比べ破壊に至るまでのサイクル数が増加したのは、鉄筋の拘束効果によるものと考えられる。なお、鋼板のものと同様に、若干ではあるが鋼材を露出したCase7の凍害劣化が早くなった。

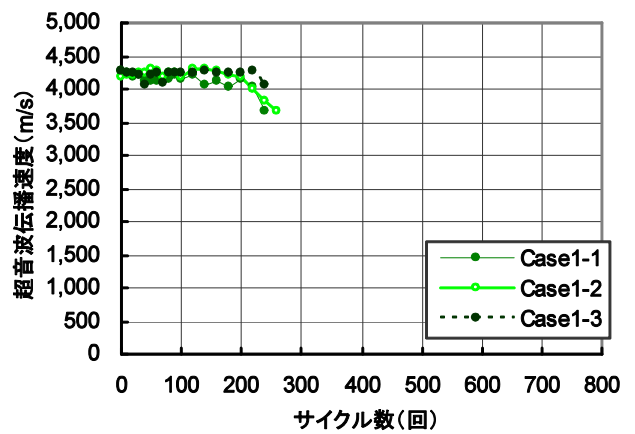
水の影響が無い場合(Case2,5)では、鋼板及び鉄筋がコンクリート内部に存在しても720サイクルまで超音波伝播速度は低下せず、供試体にスケーリングやひび割れ等の凍害劣化はみられなかった。気中では供試体に外部拘束力がほとんど作用しないことから、凍害劣化が生じにくい状況であったためと考えられる。また、熱伝導率の高い鋼材がコンクリート中にある場合でも、温度変化により鋼材がコンクリートに与える影響はほとんどないと考えられる。

4. まとめ

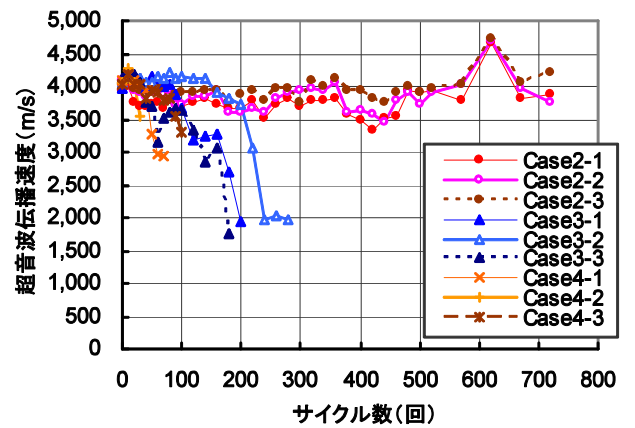
本試験の結果から、コンクリート内部に鋼板がある場合、ひび割れ等によりコンクリート内部に水が浸入すると急激に凍害劣化が促進されることがわかった。また、水の影響が無い場合、コンクリート内部の鋼材が耐凍害性に与える影響はないことがわかった。

参考文献

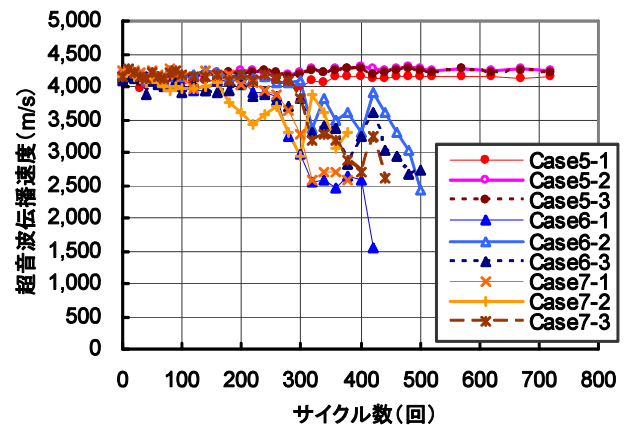
- 1) 皆田龍一, 酒井武志, 久保圭吾, 表真也, 岡田慎哉, 林川俊郎, 松本高志: 鋼コンクリート合成床版の凍害に関する実験的研究, 第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.183-188, 2014.10



(a) Case1



(b) Case2,3,4



(c) Case5,6,7

図-2 超音波伝播速度

水平模擬ひび割れを導入した RC 梁の変形挙動の画像解析

Image analysis about the deformation behaviors of RC beams with artificial horizontal cracks

北海道大学工学部
寒地土木研究所
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 松江 晃太 (Kota Matsue)
正員 角間 恒 (Ko Kakuma)
正員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

1. まえがき

積雪寒冷地の道路橋 RC 床版では、従来報告されてきた疲労による損傷に加えて、凍害によるものと考えられる損傷が報告されている。前者の劣化損傷はよく知られているように、床版下面において一方向ひび割れ形成の後に二方向ひび割れが形成されて、最終的には梁状化した床版が押し抜きせん断破壊をする形態をたどる。一方で、後者は床版上面から劣化損傷が発生し、床版コンクリートには水平方向に層状にひび割れが発生するという形態を呈する。こうした床版の内部に生じる形態の劣化損傷については、劣化損傷の範囲・度合と構造性能との関係がまだ明らかでない点が多く、その解明が必要とされている。

本研究では、内部劣化が生じた床版の性能評価手法の確立に向けた基礎的段階として、劣化部を有する梁部材の静的荷重実験を実施する。本検討では、膨張剤とコンクリートの練混ぜ水との反応により発生する膨張圧を利用して人工的に水平方向の模擬ひび割れを導入した RC 梁部材を対象としている。こうした RC 部材においては、荷重前に形成された模擬ひび割れ及び荷重に伴い形成されるひび割れ周辺に複雑な変位が生じ、構造挙動・性能にも影響を及ぼすものと考えられる。ここでは、既往の研究¹⁾²⁾でも有効性が示されている画像解析を用いて、面的な変位場を計測することで、軸方向、せん断方向、最大及び最小主ひずみを算出し、変形挙動の特徴を捉えることを目的としている。

石膏を設置する。荷重は、概ね曲げひび割れの発生までは荷重制御により、それ以降は変位制御で行った。

計測項目は、画像解析に加えて、荷重、変位、表面ひずみとした。

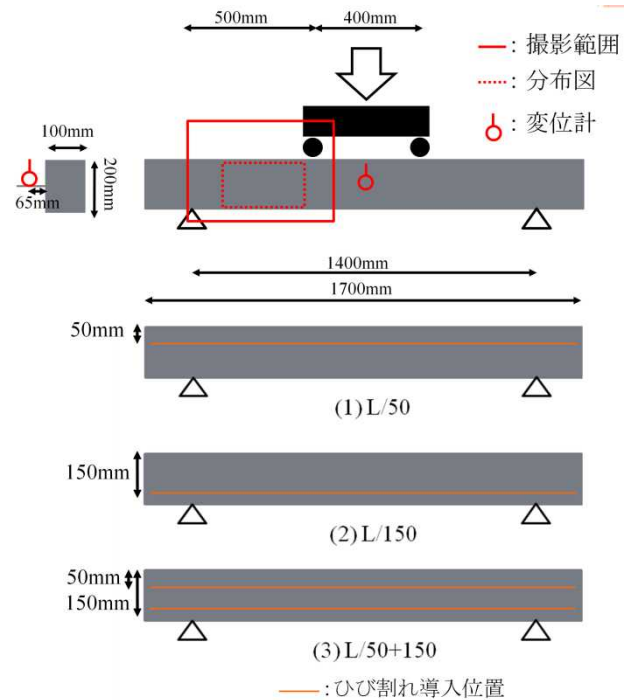


図-1 供試体寸法と供試体構成

2. RC 梁の曲げ荷重実験

2.1 供試体

曲げ荷重実験に用いた供試体は、図-1に示す長方形断面のRC梁(長さ1700mm、高さ200mm、幅100mm)である。供試体の支間長は1400mm、せん断スパン500mm、曲げスパン400mm、せん断スパン比は3.3であり、せん断スパン内にはせん断補強筋が100mm間隔で配置されている。本供試体はせん断余裕度1.83の曲げ破壊型として設計されている。実験に用いられた3種類の供試体の導入模擬劣化を表-1に示す。模擬劣化は膨張剤の散布により局所的なひび割れを導入している(図-1)。模擬劣化部ではコンクリートのポップアウトや水平ひび割れを荷重前に確認している。

2.2 荷重方法

荷重は4点曲げ荷重により行われた(図-1)。荷重は、幅50mm、厚さ9mmの荷重板を介して供試体に作用させ、荷重が均一に伝わるように供試体と荷重板の間には

表-1 供試体構成

劣化形態 (想定劣化要因)	供試体名	ひび割れ位置 (mm)
水平ひび割れ (疲労)	L/50	50
	L/150	150
	L/50+150	50+150

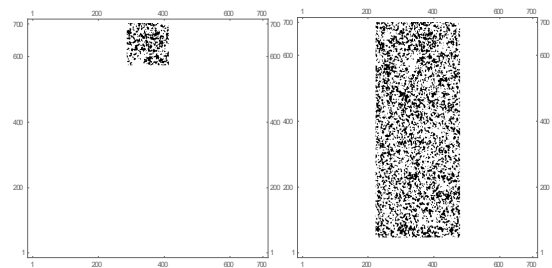


図-2 変形前(左)と変形後(右)の着目領域

3. 画像解析手法

3.1 画像撮影

画像撮影には Nikon のデジタルカメラ D3100 を使用した。画素数は 4608×3072 ピクセル(約 1400 万画素)である。撮影は供試体の側面の図-1 に示す実線枠内を対象とした。まず载荷前(変形前)に撮影を行い、载荷開始後(変形後)として、降伏点までは約 10kN ごとに画像撮影を行い、降伏点以降は 1.5 δ_y、2.0 δ_y、3.0 δ_y 時に画像撮影を行った。なお、供試体の撮影表面にはラメスプレーによるランダムパターンを付与している。撮影表面は、変位計設置面と反対側の側面であり、コンタクトゲージとは同じ面としている。

3.2 画像相関

撮影した画像は二値化画像に変換している。二値化画像において、200 ピクセル間隔で格子状に着目点を設定する。着目点は梁軸方向に 24 点、梁周方向に 12 点の合計 288 点とした。

変形前画像において、128×128 ピクセルの正方形領域を二値化画像から切り出した。一方で、変形後画像からは 256×650 ピクセルの長方形領域を切り出した。長方形領域は、変形した着目点を含むように、変位方向に長辺を取っている。切り出した領域の外の値を 0 (黒)とし、それぞれ切り出した画像を含む 700×700 ピクセルの画像を作成した(図-2)。

変形前後の着目領域画像について相互相関を求め、最大値を得る位置が変形後の着目点である。変形前後の着目点の位置により変位を求めることができる。

変形前の着目領域画像を $g(i,j)$ 、変形後を $f(i,j)$ としたとき、相互相関関数は、

$$(f * g)(k,l) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q f(i,j)g(i+k,j+l) \quad (1)$$

である。また、 g は、

$$g(i+p,j+p) = g(i,j) \quad (2)$$

のように循環するとする。

相関定理より、式(1)をフーリエ変換すると、右辺は f と g のフーリエ変換の積となる。この積を求めた後に、逆フーリエ変換をすることで、相互相関係数を求めた。画像相関により得られた変位量はピクセル単位である。より細かく変位量を求めるために、サブピクセル単位で推定を行った¹⁾²⁾。

3.3 ひずみの算出

得られた変位量よりひずみを求める。格子状にある 4 つの着目点の水平方向変位と鉛直方向変位より、梁軸方向ひずみ、せん断ひずみ、最大主ひずみ、最小主ひずみが求められる。

4. 画像解析結果

本論文では、破壊直前の供試体撮影画像について行った画像解析結果について主に述べる。L/50 は荷重 59.9kN、変位 18.62mm 時(図-3①)、L/150 は荷重 58.5kN、変位 16.94mm 時(図-3②)、L/50+150 は荷重 59.3kN、変位 19.32mm 時(図-3③)の結果である。以後の図中には、载荷後の各供試体裏面の導入ひび割れを含

んだひび割れのスケッチを透視図として重ねて白線で表示する。

4.1 L/50

L/50 の分布図について、図-4 に梁軸方向ひずみ、図-5 にせん断ひずみ、図-6 に最大主ひずみ、図-7 に最大主ひずみベクトル、図-8 に最小主ひずみ、図-9 に最小主ひずみベクトルを示す。ベクトルは矢印の傾きで方向を、長さで大きさを表す。

梁軸方向ひずみ分布では曲げせん断ひび割れの周辺で梁軸方向の開口によるひずみが確認された。せん断ひずみ分布では導入ひび割れ周辺で、特に図左側でのひずみの発生が確認できる。ここでは導入ひび割れがせん断方向にずれていることが分かる。最大主ひずみ分布では、上記を合わせた曲げせん断ひび割れと導入ひび割れの周辺でひずみが発生していることが確認できる。特に、スパン左側に発生したひび割れが進展して導入ひび割れ周辺に影響を及ぼしたような分布がみてとれる。最大主ひずみベクトルでは導入ひび割れのひびが開くような右下方向の均一な方向のベクトルの分布がみてとれる。最小主ひずみ分布では、導入ひび割れ周辺の図右側を中心に大きなひずみが発生していることが分かる。最小主ひずみベクトルでは導入ひび割れに沿って均一なベクトルが分布し、導入ひび割れが圧縮されていると考えられる。以上の分布では、白線で表した裏面のひび割れ位置ともほぼ合致している。

4.2 L/150

L/150 の分布図について、図-10 に梁軸方向ひずみ、図-11 にせん断ひずみ、図-12 に最大主ひずみ、図-13 に最大主ひずみベクトル、図-14 に最小主ひずみ、図-15 に最小主ひずみベクトルを示す。

梁軸方向ひずみ分布では図右側に曲げせん断ひび割れの開口によると考えられる分布が 2 本確認できる。図中央の裏面の斜めひび割れ周辺では垂直方向にのびる分布が確認できる。せん断ひずみ分布図では導入ひび割れの周辺、特に中央に、ひび割れのせん断によると考えられる分布が見られる。最大主ひずみ分布では導入ひび割れ周辺と曲げせん断ひび割れ周辺に顕著な分布が見られる。右側の曲げせん断ひび割れは下面より伸びているようだが、左側のものは導入ひび割れよりつながっている分布が強い。最大主ひずみベクトルでは導入ひび割れ左側か

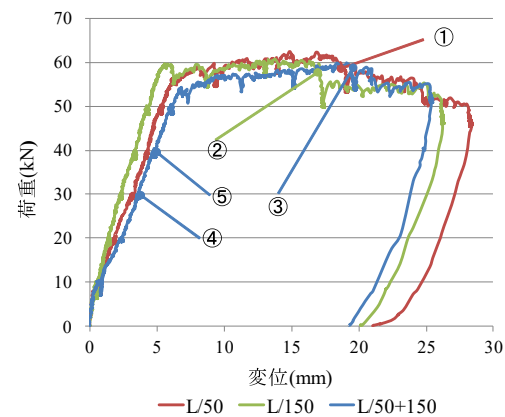


図-3 荷重-変位曲線

ら中央部のななめひび割れにかけて右下方向の均一な向きのベクトルが並んでいる。スパン右側では全体的に右下方向にベクトルの方向が揃っている。最小主ひずみ分布図では導入ひび割れ左側の周辺で大きな値がみとれる。最小主ひずみベクトルでは導入ひび割れ側で均一なベクトル分布がみられ、ひび割れが圧縮されていることが考えられる。

4.3 L/50+150

L/50+150の分布図について、図-16に梁軸方向ひずみ、図-17にせん断ひずみ、図-18に最大主ひずみ、図-19に最大主ひずみベクトル、図-20に最小主ひずみ、図-21に最小主ひずみベクトルを示す。

梁軸方向ひずみ分布では導入ひび割れ周辺で顕著なひずみ分布はないことが確認できる。裏面で下の導入ひび割れ中央から発生したひび割れに沿って開口によると考えられる分布がみとれるが、L/50とL/150と比較してそれほど大きくはない。せん断ひずみ分布では上と下の導入ひび割れをつなぐように斜めに分布していることが確認できる。最大主ひずみ分布は両図を合わせた形になるが、同様に上下の導入ひび割れをつなぐ斜め分布が顕著である。最大主ひずみベクトルでは中央部のひび割れが斜めに右下方向に開くような分布が確認できる。上下ともに導入ひび割れでは、L/50とL/150と異なり、斜めひび割れと同等の大きさのひずみは観察されなかつ

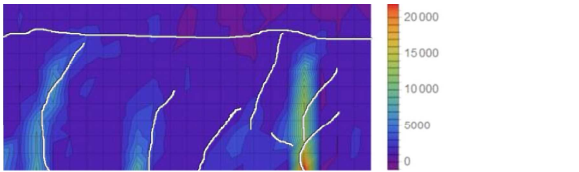


図-4 L/50 梁軸方向ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

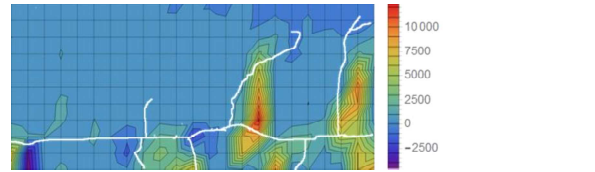


図-10 L/150 梁軸方向ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

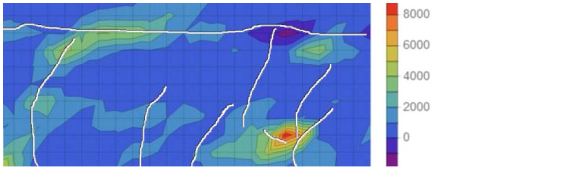


図-5 L/50 せん断ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

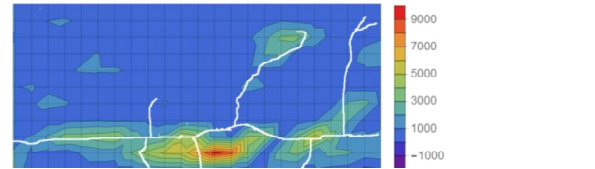


図-11 L/150 せん断ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

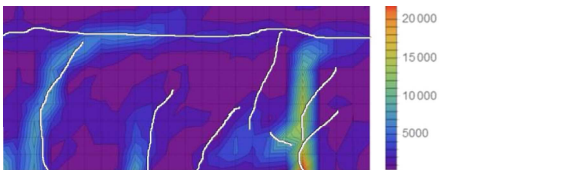


図-6 L/50 最大主ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

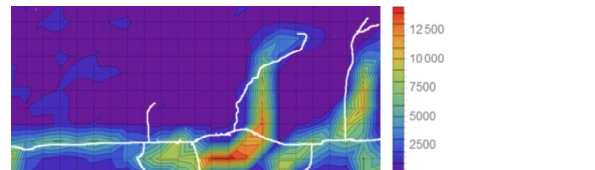


図-12 L/150 最大主ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

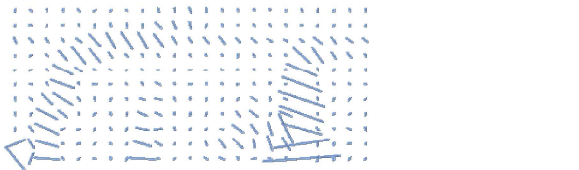


図-7 L/50 最大主ひずみベクトル(59.9kN、18.62mm)

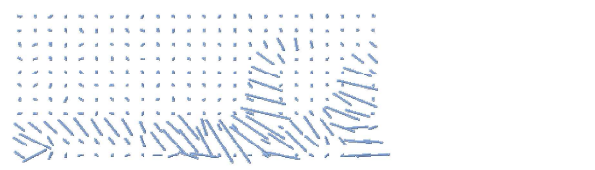


図-13 L/150 最小主ひずみベクトル(58.5kN、16.94mm)

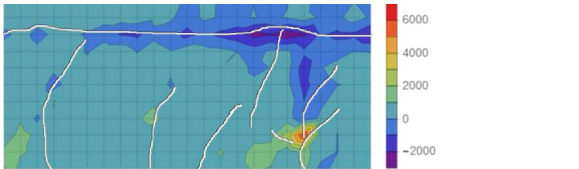


図-8 L/50 最小主ひずみ分布図(59.9kN、18.62mm)

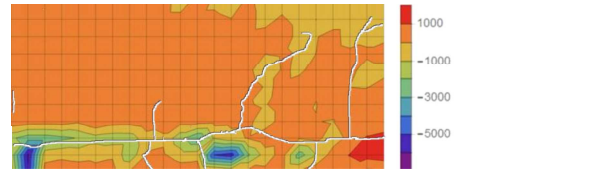


図-14 L/150 最小主ひずみ分布図(58.5kN、16.94mm)

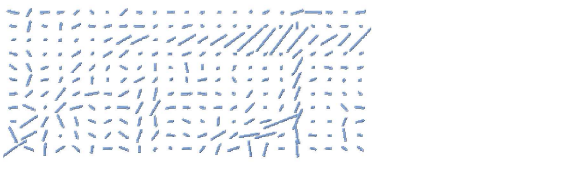


図-9 L/50 最小主ひずみベクトル(59.9kN、18.62mm)

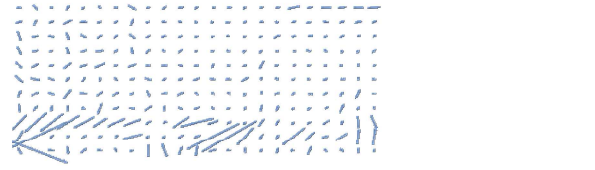


図-15 L/150 最小主ひずみベクトル(58.5kN、16.94mm)

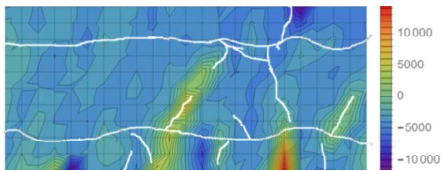


図-16 L/50+150 梁軸方向ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

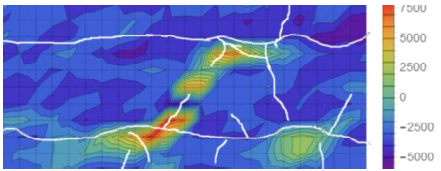


図-17 L/50+150 せん断ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

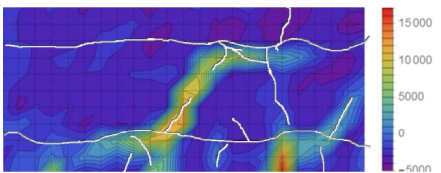


図-18 L/50+150 最大主ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

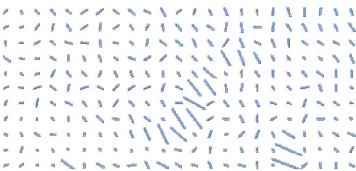


図-19 L/50+150 最大主ひずみベクトル(59.3kN、19.32mm)

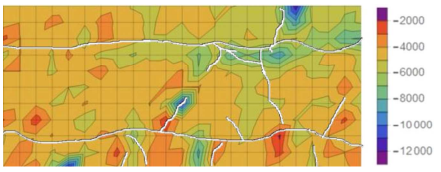


図-20 L/50+150 最小主ひずみ分布図(59.3kN、19.32mm)

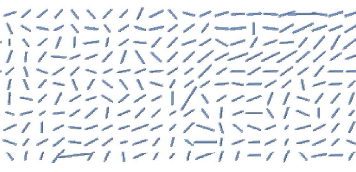


図-21 L/50+150 最小主ひずみベクトル(59.3kN、19.32mm)

た。最小主ひずみ分布では上導入ひび割れの右側で大きな値が確認できる。最小主ひずみベクトルではスパン右上から左下にかけて、対角線上に沿うように最大ひずみ

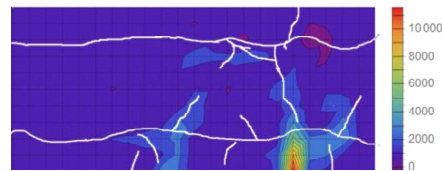


図-22 L/50+150 最大主ひずみ分布図(30kN、3.64mm)

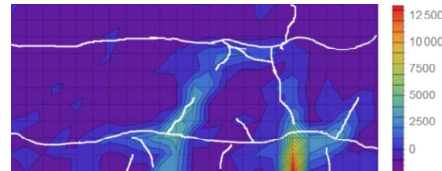


図-23 L/50+150 最大主ひずみ分布図(40kN、4.10mm)

ベクトルと直交する左下方向のベクトルが分布している。

図-22 に荷重 30kN、変位 3.64mm 時(図-3④)の最大主ひずみ、図-23 に荷重 40kN、変位 4.10mm 時(図-3⑤)の最大主ひずみを示す。曲げせん断ひび割れが下面より先行して伸びるとともに、上導入ひび割れでも開口が見られる。荷重増加とともにこれらが伸びてつながっていく過程が推定される。

5. まとめ

本研究では、水平模擬ひび割れを導入した 3 種類の RC 梁供試体の曲げ荷重実験を行い、画像解析により変形挙動の検討を行った。導入ひび割れの影響について以下の点が確認された。

第一に、供試体を導入したひび割れの周辺ではせん断方向の変形が発生していること。

第二に、導入ひび割れが曲げせん断ひび割れとつながる挙動が確認できたこと。上下に二つの導入ひび割れがある場合には、上下からそれぞれ進展し繋がり、一本のひびを形成する挙動が確認できたこと。

今回の報告は、撮影した画像の一部の解析に留まるため、今後各段階の詳細な解析を進めていく。

参考文献

- 1)松本高志、櫻庭浩樹：箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動と画像解析によるひずみ計測、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.67、No.2(応用力学論文集 Vol.14)、pp.I_793-I_800、2011。
- 2)松本高志、何興文、林川俊郎：画像解析の高密度化による箱形断面 CFRP 梁の損傷挙動の検討、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.70、No.2(応用力学論文集 Vol.17)、pp.I_909-I_919、2014。

内部劣化を有する RC 部材の曲げ耐荷性能について

Flexural behavior of RC members with simulated internal deterioration

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○正会員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 (一社)施工技術総合研究所 正会員 渡邊晋也 (Shinya Watanabe)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
 北海道大学大学院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

道路橋 RC 床版の劣化形態は多岐にわたるが、凍害やアルカリシリカ反応（以下、ASR）、塩害といった材料劣化に起因するものに関しては、劣化が床版内部から発生する特徴がある。また、疲労荷重のみで破壊に至る場合にも、鉄筋位置、すなわち床版内部に水平ひび割れが進展することが輪荷重走行試験により確認されている¹⁾。

RC 床版内部に発生する劣化については、各種の非破壊・微破壊調査手法の開発²⁾により、劣化が表面の変状として顕在化する以前での検出が可能になりつつある。一方、健全度評価は主にコアの各種試験結果に基づいて行われており、劣化形態を考慮した構造性能評価は行われていない。これは、劣化性状（形態や程度）と構造性能（耐荷性や疲労耐久性）との関係性が明らかでないことに起因しており、RC 床版を適切に維持管理するためには、内部劣化に関する調査結果を基に構造性能を適切に評価する手法を確立する必要がある。

本研究では、内部劣化が生じた RC 床版の性能評価手法の確立に向けた基礎的検討として、各種模擬劣化を導入した RC 梁部材の曲げ載荷実験を実施し、内部劣化の形態が曲げ耐力や剛性などの曲げ耐荷性能に与える影響の把握を試みた。

2. 実験方法

2.1 実験ケース

表-1 に、本研究に使用した供試体 7 体の概要を示す。N は劣化を導入しない基準供試体、L/50、L/150、L/50+150 は梁軸方向に 1 または 2 本の局所的な水平ひび割れを導入した供試体（以下、L シリーズ）、D/50、D/100、D/200 は梁の所定箇所ランダムなひび割れを導入した供試体（以下、D シリーズ）である。ここで、L シリーズは疲労により発生する軸方向鉄筋近傍での水平ひび割れを、D シリーズは凍害や ASR により発生する複数の水平ひび割れを想定している。

2.2 供試体

2.2.1 概要

(1) 基準供試体

基準供試体 N の形状・配筋図を図-1 に示す。実験には幅 100mm、高さ 200mm の矩形断面を有する長さ 1,700mm の梁供試体を使用した。引張鉄筋、圧縮鉄筋、せん断補強鉄筋には D13 (SD345)、D6 (SD345)、D6 (SD295A) を使用し、引張側鉄筋比 1.56%とした。鉄筋の降伏強度（ミルシート記載値）はそれぞれ

402N/mm²、371N/mm²、340N/mm² である。支点間隔は 1,400mm、せん断スパン比は 3.3 であり、せん断余裕度 1.83 の曲げ破壊型として設計した。

実験開始時におけるコンクリートの圧縮強度は 27.8N/mm²、静弾性係数は 21.6kN/mm² である。

(2) L シリーズ

L シリーズでは、水平ひび割れ位置を供試体パラメータとし、L/50 では上面から 50mm、L/150 では 150mm、L/50+150 では 50mm および 150mm の位置にひび割れを導入した。本シリーズの製作では、ひび割れ導入位置をコンクリートの打ち重ね箇所とし、打ち重ね面（先打ち側）に散布した膨張材とコンクリートの練混ぜ水との反応による膨張圧を利用してひび割れを導入した。

表-1 実験ケース一覧

供試体名	劣化性状 (想定する劣化要因)	ひび割れ位置 または 劣化深さ*
N	健全	なし
L/50	鉄筋近傍での 水平ひび割れ (疲労)	50
L/150		150
L/50+150		50、150
D/50	複数の水平ひび割れ (凍害、ASR)	50
D/100		100
D/200		200

※供試体上面からの距離 (mm)

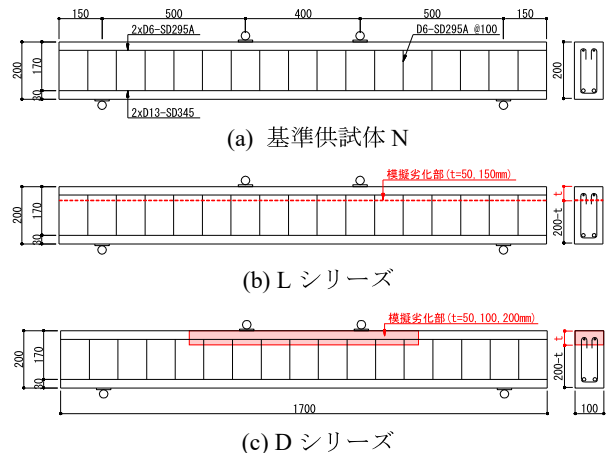


図-1 供試体の形状・配筋図

(3) D シリーズ

D シリーズでは、上面からの劣化深さを供試体パラメータとし、D/50 では上面から 50mm、D/100 では 100mm、D/200 では 200mm を劣化深さとした。本シリーズの製作では、劣化部分に打設するコンクリートの練混ぜ時に膨張材を添加し、練混ぜ水との反応による膨張圧を利用してひび割れを導入した。コンクリート自体に膨張材を練混ぜるため、L シリーズと比較してひび割れ本数が多く、ひび割れ発生方向のランダム性が強いものになる。

2.2.2 供試体の外観と劣化状況

後述する図-5 には、実験開始前の膨張過程において生じた供試体表面のひび割れ状況を示しており、L シリーズでは梁全長にわたった水平ひび割れの発生が、D シリーズでは劣化部分において梁軸方向を卓越方向とする複数のひび割れの発生が確認できる。実験開始時に実施したクラックスケールによるひび割れ幅計測では、L シリーズおよび D シリーズともにひび割れ幅が 0.2~0.5mm の範囲に分布する傾向が見られた。

また、コンクリートの劣化状態を把握するため、透過法による超音波速度の測定を行った。図-2 には、梁高さ方向を透過方向としたときの測定結果を示す。劣化部での超音波速度の平均値は、N の 3,417m/sec に対し、L/50、L/150、L/50+150、D/50、D/100、D/200 の順に、それぞれ 0.93、0.94、0.80、0.64、0.71、0.56 まで低下し、D シリーズで超音波速度の低下が顕著であった。

2.3 載荷方法

載荷は、等曲げスパン 400mm、せん断スパン 500mm とする 4 点曲げにより実施した。載荷には油圧ジャッキを使用し、目視できる曲げひび割れが発生するまでは荷重制御により、その後は変位制御に切替え、供試体が破壊に至るまで単調に荷重を増加させた。なお、膨張過程で載荷板付近にコンクリートのポップアウトや角落ちが生じた供試体については、実験開始前に当該箇所をエポキシ樹脂系接着剤により補修した後、実験に供した。

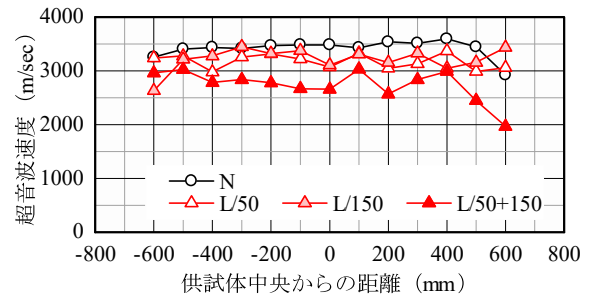
2.4 計測方法

実験における計測項目は、荷重、供試体変位および供試体表面ひずみとし、荷重および供試体変位の計測は動的に、供試体表面ひずみの計測はコンタクトゲージ法（標点距離 100mm）により静的に実施した。静的計測のタイミングは、降伏荷重までは荷重 10kN ごと、降伏荷重後は供試体中央変位が降伏荷重時の 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 倍になるときとした。

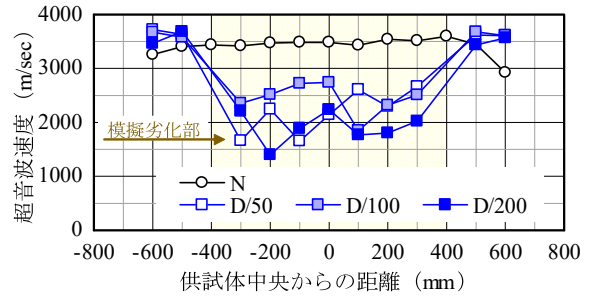
3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

図-3 に、各供試体の荷重と供試体中央変位（以下、中央変位）の関係を示す。図中の破線は、土木学会コンクリート標準示方書³⁾に基づいて計算した基準供試体 N の降伏荷重である。L シリーズおよび D シリーズにおいて、ひび割れ発生荷重は N と同程度であり、ひび割れ発生後の剛性、降伏荷重、最大荷重は低下した。また、供試体の破壊形態はいずれも曲げ破壊であったが、両シリーズとも上縁コンクリートの圧壊に伴う急激な荷



(a) L シリーズ



(b) D シリーズ

図-2 超音波速度

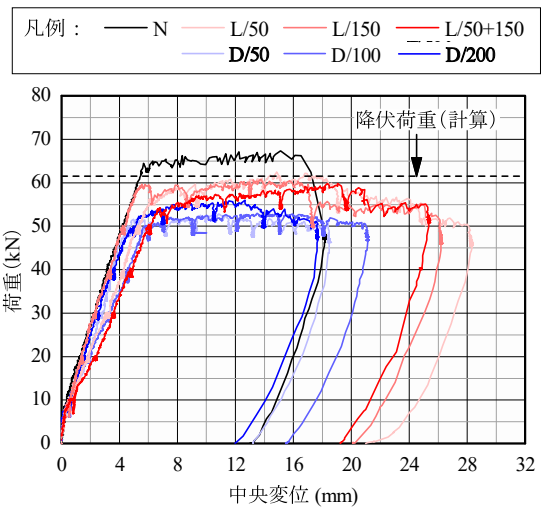


図-3 荷重-中央変位関係

重低下は見られず、圧壊後に緩やかな荷重低下を呈した。

3.2 剛性および耐力

図-4 に各供試体の降伏荷重、降伏時の割線剛性および最大荷重（これらをまとめて以下、曲げ耐力性能）と超音波速度との関係を示す。ここで、縦軸は N の計測値で無次元化した値、横軸は梁全長での平均値（N、L シリーズ）あるいは劣化部での平均値（D シリーズ）である。

(1) L シリーズ

L シリーズでは、超音波速度の低下に比例して曲げ耐力性能の低下が大きくなる傾向がある。水平ひび割れは、剛性に与える影響が特に大きく、圧縮鉄筋位置に水平ひび割れがある L/50 および L/50+150 で剛性の低下が顕著であった。また、L/50+150 では、引張鉄筋位置での水平ひび割れにより鉄筋・コンクリート間の応力伝達機構が低下するため、L/50 と比較して曲げ耐力性能の低下が大きい。

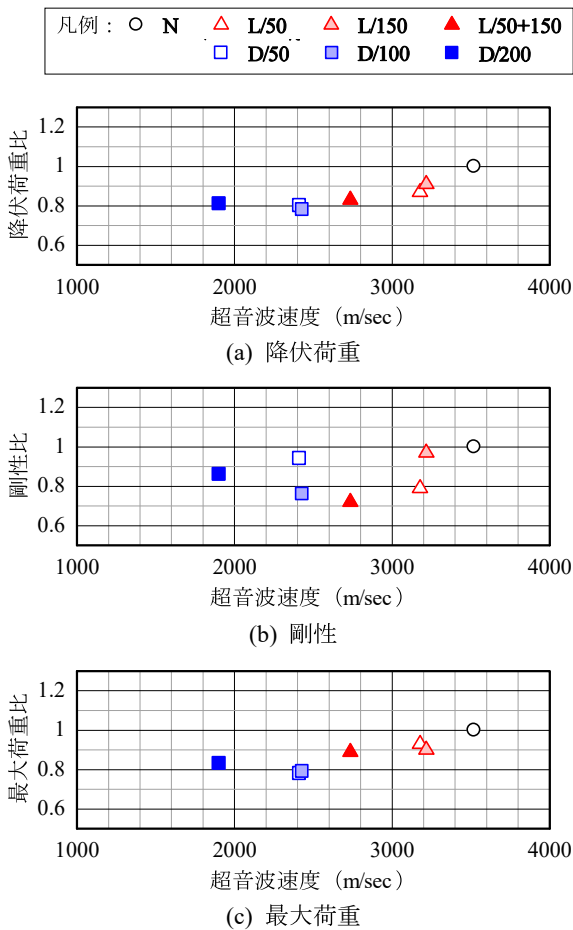


図-4 曲げ耐荷性能

(2) D シリーズ

D シリーズでは、L シリーズと比較して降伏荷重および最大荷重の低下が大きい。D/50 と D/100 では超音波速度が同程度であるにも関わらず D/100 で剛性の低下が顕著であり、凍害や ASR に関しては、ある特定の範囲で著しく劣化が進行するよりも、コンクリートの劣化が軽度であっても深さ方向に広く進行した場合に部材性能が低下する可能性があることを示唆する。一方、全断面劣化となる D/200 では、D/100 から剛性が改善される結果であった。ASR を対象にした既往の実験⁴⁾では、コンクリートの膨張が鉄筋により拘束される場合、ケミカルプレストレスが導入され、部材剛性が増加することが報告されているが、劣化部に引張鉄筋を配置した D/200 において同様の効果が得られたものと考えられる。一方で、N と同等までの剛性改善は見られなかったが、これには膨張過程で発生した鉄筋位置での水平ひび割れによる鉄筋付着強度の低下などが影響していると考えられる。

3.3 ひび割れ性状

図-5 に、実験終了時における供試体のひび割れ性状を示す。

(1) L シリーズ

L/50 では、曲げひび割れの発生範囲や進展が N と同様であり、等曲げスパン内では下方からのひび割れが水平ひび割れ位置でも連続的に上方に進展する。一方、せん断スパンにおいては、水平ひび割れ位置より上方へひび割れが進展しにくくなる傾向がある。

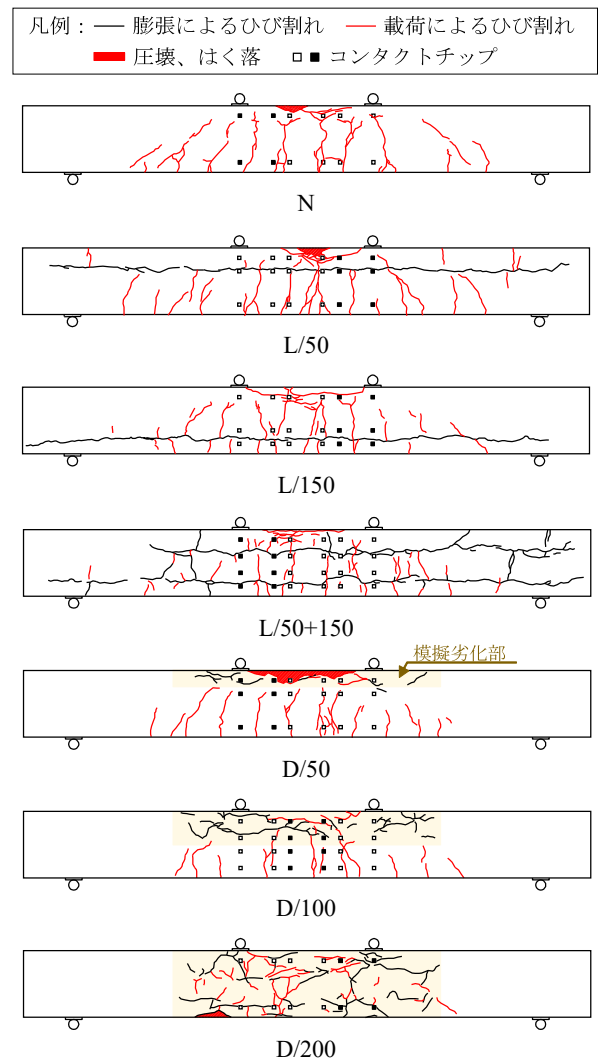


図-5 ひび割れ性状

L/150 では、ひび割れの進展傾向は N と同様であるが、下縁側では曲げひび割れが水平ひび割れを貫通せず不連続に進展しており、引張鉄筋位置への水平ひび割れの導入によりダウエル効果が消失していたことを表している。

L/50+150 では、供試体の上方においては L/50 と同様に等曲げスパンのみ曲げひび割れが水平ひび割れより上方に進展し、下方においては L/150 と同様にせん断スパンで曲げひび割れが不連続に進展する性状が見られる。

(2) D シリーズ

D/50 および D/100 では、曲げひび割れの本数や間隔に N との大きな差異はないが、劣化部へのひび割れは等曲げスパンに限られている。また、D/100 においては、圧縮鉄筋位置で水平方向に進展するひび割れが見られている。

D/200 では、典型的な曲げひび割れの発生・進展がなく、ひび割れ幅の拡大も特定の領域で発生した。また、荷重により発生したひび割れの多くは膨張過程で導入されたひび割れを起点・終点とする特徴がある。これらは、コンクリートの膨張により鉄筋付着が消失してひび割れの分散性が低下したこと、供試体に予め導入された領域内の弱部に沿ってひび割れの進展が卓越したことを表している。

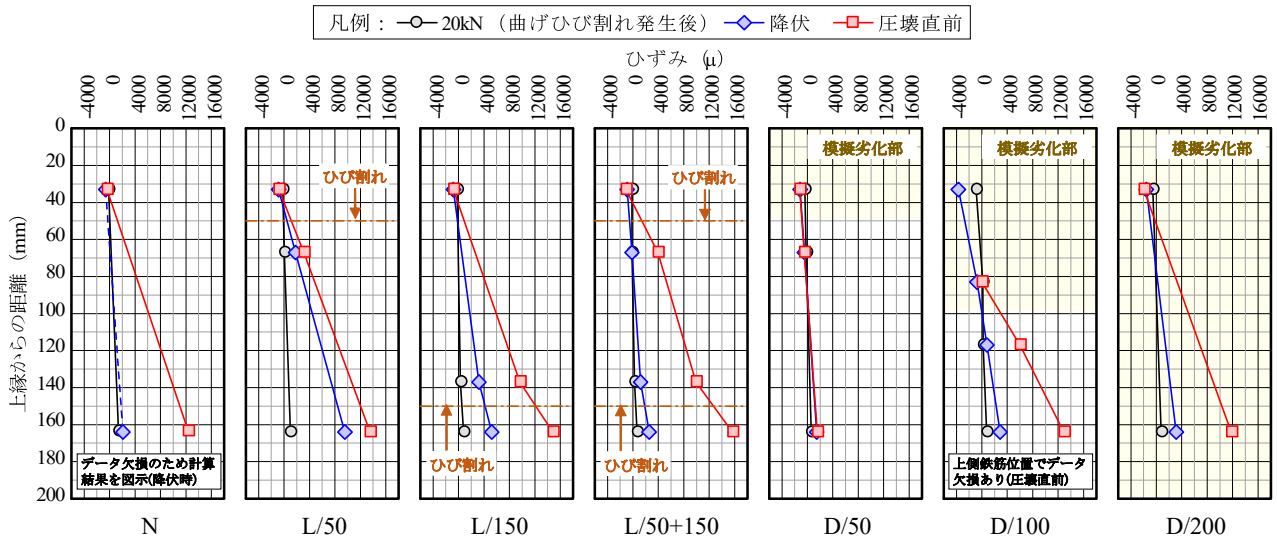


図-6 供試体表面のひずみ分布

3.4 表面ひずみ

図-6 に、コンタクトゲージ法により計測した供試体表面軸方向ひずみの分布を示す。本実験では、供試体中央および供試体中央から±150mm の位置の 3 断面において表面ひずみを計測したが、コンタクトチップと曲げひび割れの位置を考慮して、平均的な曲げ挙動を捉えていると考えられる断面（図-5 中の黒色中塗りで示すコンタクトチップ）に関する結果を図示する。なお、本図に示すひずみは荷重により生じたひずみであり、膨張によるひずみは含んでいない。

(1) L シリーズ

L/50 では、圧壊直前まで高さ方向 3 点でのひずみに線形関係の分布があり、平面保持が成立している。最大荷重直前に着目すると、N と概ね同様のひずみ分布であり、上側のみに水平ひび割れがある場合、水平ひび割れが曲げ挙動に与える影響は小さいと考えられる。実際に、図-4 に示したように、N に対する最大荷重および最大荷重時中央変位の比はそれぞれ 0.93 および 0.98 であり、他の供試体と比較して耐力低下が小さかった。

L/150 および L/50+150 では、水平ひび割れの上下でひずみ分布の勾配変化が見られる。前述したように、本供試体では水平ひび割れ位置で曲げひび割れが不連続となるひび割れ性状が確認されており、水平ひび割れがダウエル効果の消失や鉄筋の付着切れに類似した応力伝達機構の低下をもたらすことで、水平ひび割れのせん断ずれが生じていたと推察される。

(2) D シリーズ

D シリーズでは、本実験の範囲では概ね平面保持が成立し、D/50 および D/100 では劣化部コンクリートでの弾性係数の低下によって劣化深さが大きくなるほど中立軸位置が下がる。また、D/100 では、劣化部と健全部で若干のひずみ分布の勾配変化が見られるが、着目した断面では膨張により発生した水平ひび割れの拡大が見られており、この位置で応力伝達が損なわれたことが影響し

ている。D/200 では、D/50 および D/100 と比較して上方に中立軸が位置しており、ケミカルプレストレス効果により曲げ剛性が改善されていたことを表すものである。

4. おわりに

本研究では、RC 床版に発生する疲労を想定した局所的な水平ひび割れ、あるいは、凍害や ASR を想定した複数の水平ひび割れを導入した RC 梁の曲げ荷重実験を実施し、部材内部の劣化形態が曲げ耐荷性能に与える影響を確認した。その結果、本研究の範囲では、内部劣化により曲げ耐力や剛性が低下し、劣化の位置・深さによって低下度が異なること、ならびに、内部劣化が与える影響は剛性において顕著に見られることを示した。

本実験では、劣化の形態および位置・深さに着目して RC 梁部材の曲げ耐荷性能を評価したが、実際の RC 床版に生じる内部劣化は供用環境によって劣化程度が異なり、また破壊形態も異なる。したがって、内部劣化が生じた RC 床版の性能評価手法を確立するためには、実構造物における破壊形態を対象として、内部劣化の形態だけでなく程度も考慮できるように劣化性状と構造性能との関係性を体系的に整理する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術、2008。
- 2) 例えば、渡邊晋也、谷倉泉、佐藤智：コンクリート床版内部に発生した水平ひび割れの微破壊調査方法、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、CS10-007、2015。
- 3) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書、2013。
- 4) 小柳治、六郷恵哲、内田裕市、長瀬道雄：著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.947-952、1993。

模擬劣化 RC 梁の曲げ挙動と補修の効果に関する画像解析

Image Analysis on the Flexural Behavior of RC Beams with Artificial Damage and the Effects of Repair

北海道大学大学院工学院 ○学生員 松江 晃太 (Kota Matsue)
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

1. まえがき

道路橋 RC 床版では、従来報告されてきた疲労による損傷に加えて、凍害や塩害、アルカリシリカ反応等によるものと考えられる損傷が報告されている。特に積雪寒冷地において凍害の影響は顕著であり、床版上面から劣化損傷が発生し、床版コンクリートには水平方向に層状にひび割れが発生するという形態を呈する。こうした床版の内部に生じる形態の劣化損傷については、劣化損傷の範囲・度合と構造性能との関係がまだ明らかでない点が多く、その解明が必要とされている。

本研究では、内部劣化が生じた床版の性能評価手法の確立に向けた基礎的段階として、劣化部を有する梁部材の静的載荷実験を実施する。本検討では、膨張剤とコンクリートの練混ぜ水との反応により発生する膨張圧を利用して人工的に模擬ひび割れを導入したもの、さらにはその後補修を加えたものを対象とし、比較検討する。こうした RC 部材においては、載荷前に形成された模擬ひび割れ及び載荷に伴い形成されるひび割れ周辺に複雑な変位が生じ、構造挙動・性能にも影響を及ぼすものと考えられる¹⁾。ここでは、既往の研究²⁾³⁾⁴⁾でも有効性が示されている画像解析を用いて、面的な変位場を計測することで最大及び最小主ひずみを算出し、補修に関連した変形挙動の特徴を捉えることを目的としている。

2. RC 梁の曲げ載荷実験

2.1 供試体

曲げ載荷実験に用いた供試体は、図-1に示す長方形断面のRC梁(長さ1700mm、高さ200mm、幅100mm)である。供試体の支間長は1400mm、せん断スパン500mm、曲げスパン400mm、せん断スパン比は3.3であり、せん断スパン内にはせん断補強筋が100mm間隔で配置されている。本供試体はせん断余裕度1.83の曲げ破壊型として設計されている。6種類の供試体の導入模擬劣化を表-1に示す。図-1に示す導入ひび割れ範囲の異なる供試体3種類と補修有無の2種類、計6種類の供試体を使用した。供試体の模擬劣化は膨張剤の混入により局所的なひび割れを導入している。模擬劣化部ではコンクリートのポップアウトやひび割れを載荷前に確認している。また、補修は供試体中央部から±100mm、±300mmの位置、計4ヶ所に上面から170mm(下側鉄筋位置)まで削孔し樹脂を注入した(図-1)。

2.2 載荷方法

載荷は4点曲げ載荷により行われた(図-1)。荷重は、幅 50mm、厚さ 9mm の載荷板を介して供試体に作用さ

せ、荷重が均一に伝わるように供試体と載荷板の間には石膏を設置する。載荷は、概ね曲げひび割れの発生までは荷重制御により、それ以降は変位制御で行った。計測項目は、画像解析に加えて、荷重、変位、表面ひずみ(コンタクトゲージ)としている。

3. 画像解析手法

3.1 画像撮影

画像撮影にはNikonのデジタルカメラD3100を使用した。画素数は4608×3072ピクセル(約1400万画素)であ

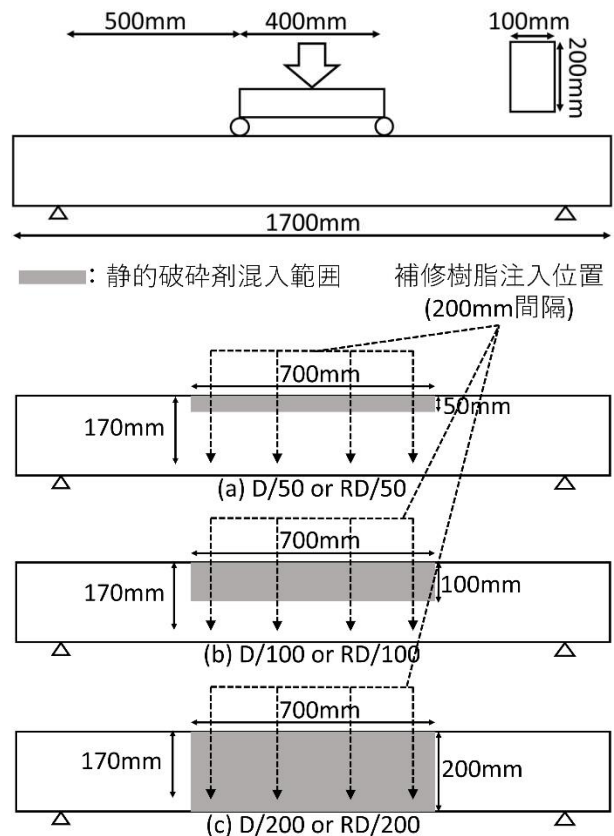


図-1 供試体寸法と構成

表-1 供試体構成

劣化形態 (想定劣化要因)	供試体名	ひび割れ範囲 (mm)
ひび割れ (凍害)	D/50 or RD/50	50
	D/100 or RD/100	100
	D/200 or RD/200	200

る。撮影は供試体の側面の図-2 に示す実線枠内を対象とした。まず载荷前(変形前)に撮影を行い、载荷開始後(変形後)として、降伏点までは約 10kN ごとに画像撮影を行い、降伏点以降は 1.5 δ 、2.0 δ 、3.0 δ 時に画像撮影を行った。なお、供試体の撮影表面にはラメスプレーによるランダムパターンを付与している。撮影表面は、変位計設置面と反対側の側面であり、コンタクトゲージとは同じ面としている。

3.2 画像相関

撮影した画像は二値化画像に変換している。二値化画像において、200 ピクセル間隔で格子状に着目点を図-2 に示す分布図範囲に設定する。着目点は補修無では各スパンそれぞれ梁軸方向に 24 点、梁周方向に 12 点の合計 576 点とし、補修有では各スパンそれぞれ梁軸方向に 23 点、梁周方向に 10 点の合計 460 点とした。

変形前画像において、128×128 ピクセルの正方形領域を二値化画像から切り出した。一方で、変形後画像からは 256×650 ピクセルの長方形領域を切り出した。長方形領域は、変形した着目点を含むように、変位方向に長辺を取っている。切り出した領域の外の値を 0 (黒) とし、それぞれ切り出した画像を含む 700×700 ピクセルの画像を作成した。

変形前後の着目領域画像について相互相関を求め、最大値を得る位置が変形後の着目点である。変形前後の着目点の位置により変位を求めることができる。

3.3 ひずみの算出

得られた変位量よりひずみを求める。格子状にある 4 つの着目点の水平方向変位と鉛直方向変位より、梁軸方向ひずみと梁周方向ひずみを経て、最大主ひずみ、最小主ひずみが求められる。

4. 画像解析結果

本論文では、降伏点直前の供試体撮影画像について行った画像解析結果について述べる。D/50 は荷重 51.3kN、変位 4.83mm 時(図-3①)、RD/50 は荷重 52.9kN、変位 5.78mm 時(図-3②)、D/100 は荷重 50.2kN、変位 5.81mm 時(図-3③)、RD/100 は荷重 49.1kN、変位 5.78mm 時(図-3④)、D/200 は荷重 52.2kN、変位 5.32mm 時(図-3⑤)、RD/200 は荷重 51.6kN、変位 5.63mm 時(図-3⑥)の結果である。以後の図-4 から 15 の図中には、载荷後の各供

試体裏面の導入ひび割れを含んだ全ひび割れのスケッチを透視図として重ねて白線で表示する。

4.1 D/50 と RD/50

D/50 について、図-4 に最大主ひずみ、図-5 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは、曲げスパンからせん断スパンに発生した曲げひび割れに対応する分布が見られ、曲げスパン中心部で大きな開口ひび割れに対応した分布が確認できる。これらは反対側側面のひび割れスケッチと概ね一致している。また、曲げスパン圧縮縁においても上下方向に開く引張方向の分布が見られる。最小主ひずみでは、供試体上部に導入した模擬劣化領域(図-1)に合致した圧縮方向の分布が見られる。また曲げスパン圧縮縁において、最大主ひずみと同位置に左右方向に潰れる圧縮方向の分布が見られた。

RD/50 について、図-6 に最大主ひずみ、図-7 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは D/50 と同様の曲げひび割れによる分布が見られ、せん断スパン側に少し広がっている様子が見られる。最小主ひずみでは载荷点位置から支点方向に圧縮ひずみの分布が広がっている。D/50 で見られた模擬劣化領域に合致した圧縮方向の分布は見られず、曲げスパン模擬劣化領域中央での圧縮ひずみの改善はみられたが、载荷版近傍よりせん断スパン側で圧縮ひずみが発生していた。

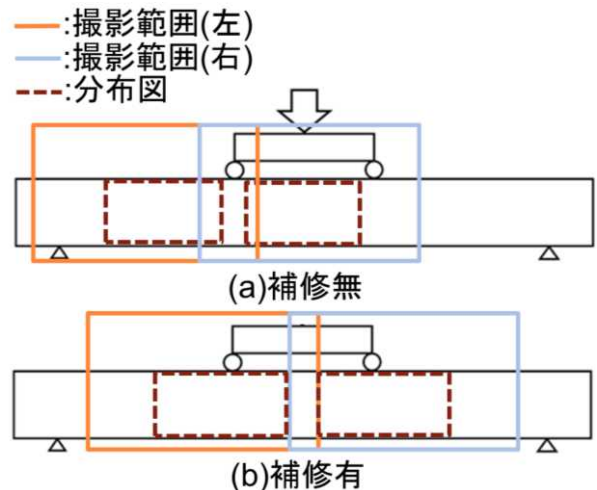


図-2 撮影範囲と分布図

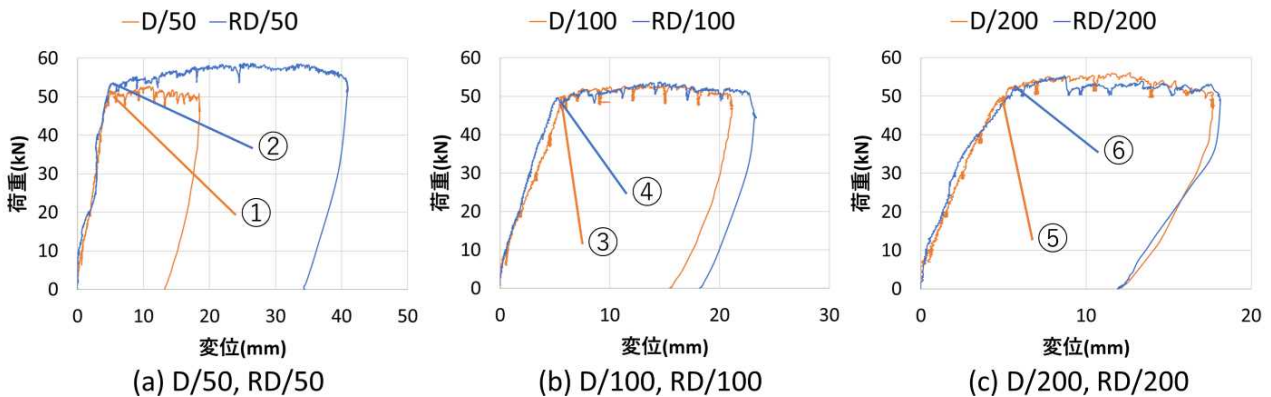


図-3 荷重-変位曲線

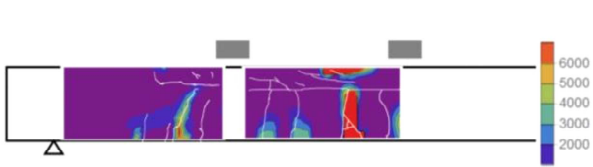


図-4 D/50 最大主ひずみ分布図 (51.3kN,4.83mm)

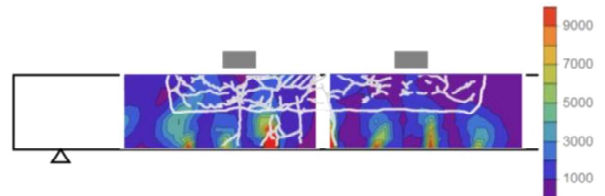


図-10 RD/100 最大主ひずみ分布図 (49.1kN,5.78mm)

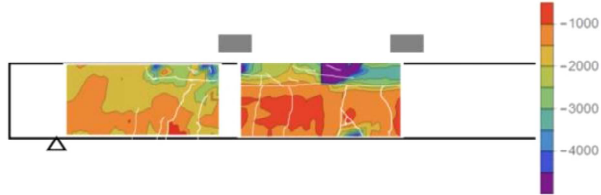


図-5 D/50 最小主ひずみ分布図 (51.3kN,4.83mm)

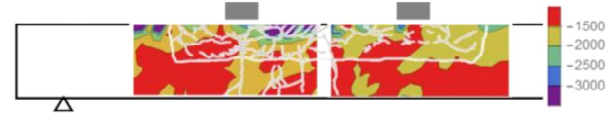


図-11 RD/100 最小主ひずみ分布図 (49.1kN,5.78mm)

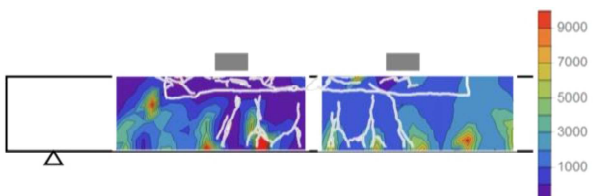


図-6 RD/50 最大主ひずみ分布図 (52.9kN,5.78mm)

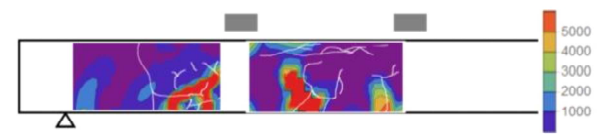


図-12 D/200 最大主ひずみ分布図 (52.2kN,5.32mm)



図-7 RD/50 最小主ひずみ分布図 (52.9kN,5.78mm)

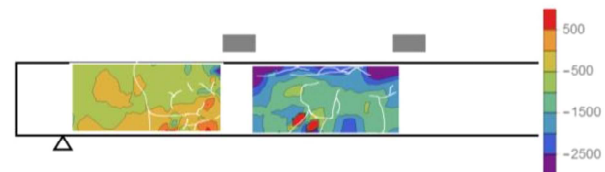


図-13 D/200 最小主ひずみ分布図 (52.2kN,5.32mm)

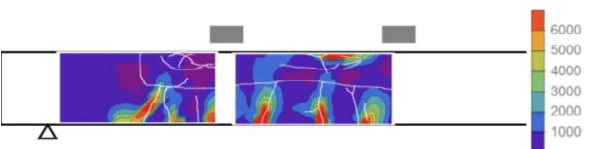


図-8 D/100 最大主ひずみ分布図 (50.2kN,5.81mm)

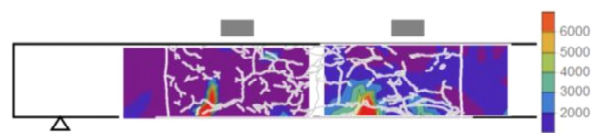


図-14 RD/200 最大主ひずみ分布図 (51.6kN,5.63mm)

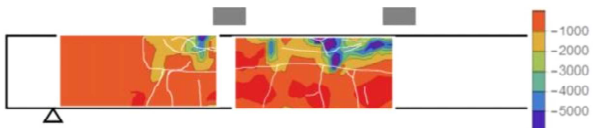


図-9 D/100 最小主ひずみ分布図 (50.2kN,5.81mm)

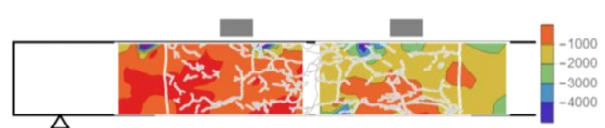


図-15 RD/200 最小主ひずみ分布図 (51.6kN,5.63mm)

以上に基づき、模擬劣化領域の軸方向圧縮については補修による改善効果は曲げスパンに一部あり、せん断スパンには最小主ひずみ分布の変化が現れたとまとめられる。

4.2 D/100 と RD/100

D/100 について、図-8 に最大主ひずみ、図-9 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは開口ひび割れによるひずみ分布が見られ、曲げスパン圧縮縁では圧縮による浮き上がりによると考えられる強い分布が確認

できる。最小主ひずみでは模擬劣化領域と概ね合致する圧縮ひずみの分布と鉛直方向の局所的な分布が見られる。

RD/100 について、図-10 に最大主ひずみ、図-11 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみでは D/100 同様、数本の開口ひび割れによる分布が確認できたが、曲げスパン圧縮縁の強い分布は見られなかった。最小主ひずみでは曲げスパン内の圧縮縁で水平方向に広がりのある分布が見られた。しかし模擬劣化領域全域での圧縮ひずみは発生しておらず、領域内外での違いも認められなかった。

以上より、補修によって模擬劣化領域全体の軸応力圧縮の分布は解消方向にあり、局所的な分布は鉛直から水平方向に変化したとまとめられる。

4.3 D/200 と RD/200

D/200 について、図-12 に最大主ひずみ、図-13 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみではせん断スパンで 1 か所、曲げスパンでは 2 箇所、強く幅の広い分布が見られる。D/50 及び D/100 と異なりいずれも特徴的であり、直線的に進展せずにそれぞれ角度の浅い斜め状と階段状の進展をしている。一部、ひび割れスケッチとは一致している部分もある。最小主ひずみでは曲げスパン圧縮縁で載荷板近傍を中心とした圧縮ひずみの分布が確認できる。

RD/200 について、図-14 に最大主ひずみ、図-15 に最小主ひずみの分布図を示す。最大主ひずみの強い分布はせん断スパンと曲げスパンで 1 箇所ずつ見られ、RD/50 及び RD/100 と大きく異なり、D/200 と同様である。ひび割れスケッチは補修前の D/200 と同様に不規則なひび割れの発生を示しているが、最大主ひずみ分布とは一致していない。最小主ひずみでは模擬劣化領域もしくはひび割れと関連した分布は見られず、一部圧縮縁に強い分布が見られる。

以上により、全断面を模擬劣化させた場合、載荷によるひずみの分布は通常と大きく異なる。補修による影響はひび割れによる分布形状には認められず、模擬劣化領域内外での違いも認められなかった。

5. まとめ

本研究では、静的破砕剤により模擬劣化を導入した 3 種類とそれらに樹脂注入により補修を加えた 3 種類、計 6 種類の RC 梁供試体の曲げ載荷実験を行い、画像解析

により変形挙動の比較を行った。

模擬劣化における導入ひび割れの影響とそれに対する補修の効果について、以下の点が確認された。

第一に、模擬劣化の深さが梁の圧縮側の一部である場合(D/50 及び D/100)、引張縁からは曲げひび割れによるひずみ分布、圧縮側には模擬劣化領域と合致する圧縮ひずみ分布と圧壊状のひずみ分布が見られた。この場合の補修の効果としては(RD/50 及び RD/100)、最大主ひずみの引張側に特段の変化は見られず、圧縮側では局所的な分布が見られなくなった。最小主ひずみの変化では、模擬劣化領域全体の軸方向圧縮は解消方向にあるものの、局所的な分布は変化して残った。

第二に、模擬劣化の深さが梁高全体に及ぶ場合(D/200)、引張縁からの曲げひび割れによる強いひずみ分布の箇所数は大きく減り、幅は広く、角度の浅い斜め状もしくは階段状の特徴的な分布が見られた。また、圧縮側には曲げスパン圧縮縁で載荷板近傍を中心とした圧縮ひずみ分布が見られたが、模擬劣化領域内外での差異は認められなかった。この場合の補修(RD/200)では効果は認められず、ひび割れによる分布形状にも模擬劣化領域内外差にも確認できなかった。

今回の報告は、撮影した画像の一部の解析に留まるため、今後各荷重段階の詳細な解析を進めていく予定である。

参考文献

- 1)角間恒、渡邊晋也、西弘明、松本高志：内部劣化を有する RC 部材の曲げ耐荷性能について、第 73 号土木学会北海道支部論文報告集、A-35、2017。
- 2)松江晃太、角間恒、松本高志：水平模擬ひび割れを導入した RC 梁の変形挙動の画像解析、第 73 号土木学会北海道支部論文報告集、A-33、2017。
- 3)松本高志、櫻庭浩樹：箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動と画像解析によるひずみ計測、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.67、No.2(応用力学論文集 Vol.14)、pp.I_793-I_800、2011。
- 4)松本高志、何興文、林川俊郎：画像解析の高密度化による箱形断面 CFRP 梁の損傷挙動の検討、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.70、No.2(応用力学論文集 Vol.17)、pp.I_909-I_919、2014。

画像解析を用いた水平模擬ひび割れを有する RC 梁の曲げ挙動に関する検討

Observation on the Flexural Behaviors of RC Beams with Artificial Horizontal Cracks by Image Analysis

北海道大学大学院工学院 ○学生員 松江 晃太 (Kota Matsue)
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 北海道大学大学院工学研究院 正員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. まえがき

道路橋 RC 床版では、従来報告されてきた疲労による損傷に加えて、塩害や凍害、アルカリシリカ反応等によるものと考えられる損傷が報告されている。疲労の劣化損傷はよく知られているように、床版下面において一方向ひび割れ形成の後に二方向ひび割れが形成されて、最終的には梁状化した床版が押し抜きせん断破壊をする形態をたどる。また、塩害においては鉄筋腐食により局所的な水平方向のひび割れが発生するという形態を呈する。こうした床版の内部に生じる形態の劣化損傷については、劣化損傷の範囲・度合と構造性能との関係がまだ明らかでない点が多く、その解明が必要とされている。

本研究では、内部劣化が生じた床版の性能評価手法の確立に向けた基礎的段階として、劣化部を有する梁部材の静的載荷実験を実施する。本検討では、膨張剤とコンクリートの練混ぜ水との反応により発生する膨張圧を利用して人工的に水平方向の模擬ひび割れを導入したもの、さらにはその後補修を加えたものを対象とし、比較検討する。こうした RC 部材においては、載荷前に形成された模擬ひび割れ及び載荷に伴い形成されるひび割れ周りに複雑な変位が生じ、構造挙動・性能にも影響を及ぼすものと考えられる¹⁾²⁾。ここでは、既往の研究²⁾でも有性が示されている画像解析を用いて、面的な変位場を測することで最大及び最小主ひび割れを算出し変形挙動特徴を捉えることを目的としている。

2. RC 梁の曲げ載荷実験

2.1 供試体

図-1に供試体の寸法及び配筋図を示す。曲げ載荷実験に用いた供試体は、長方形断面のRC梁(長さ1700mm 高さ200mm、幅100mm)である。供試体の支間長1400mm、せん断スパン500mm、曲げスパン400mm、せん断スパン比は3.3であり、せん断スパン内にはせん断補強筋が100mm間隔で配置されている。本供試体はせん断余裕度1.83の曲げ破壊型として設計されている。図-1に示す基準供試体(N)、導入ひび割れ位置の異なる補修を含まない供試体3種類(Lシリーズ)、さらにLシリーズにそれぞれ補修を加えた3種類(RLシリーズ)、計7種類の供試体を使用した。供試体の模擬劣化は上側鉄筋もしくは下側鉄筋の位置への膨張剤の散布により、局所的な水平方向のひび割れを導入している。模擬劣化部ではコンクリートのポップアウトやひび割れを載荷前に確認している。また、補修は供試体中央部から±100mm、

300mmの位置、計4ヶ所に上面から170mm(下側鉄筋位置)まで削孔し樹脂を注入した(図-1)。

2.2 載荷方法

載荷は4点曲げ載荷により行われた。荷重は、幅50mm、厚さ9mmの載荷板を介して供試体に作用させ、荷重が均一に伝わるように供試体と載荷板の間には石膏を設置する。載荷は、概ね曲げひび割れの発生までは荷重制御により、それ以降は変位制御で行った。計測項目は、画像解析に加えて、荷重、変位、表面ひずみ(コンタクトゲージ)としている。

3. 画像解析手法

3.1 画像撮影

画像撮影にはNikonのデジタルカメラD3100を使用した。画素数は4608×3072ピクセル(約1400万画素)である。撮影は供試体の側面を対象とした。まず載荷前(変形前)に撮影を行い、載荷開始後(変形後)として、降伏点までは約10kNごとに画像撮影を行い、降伏点以降は

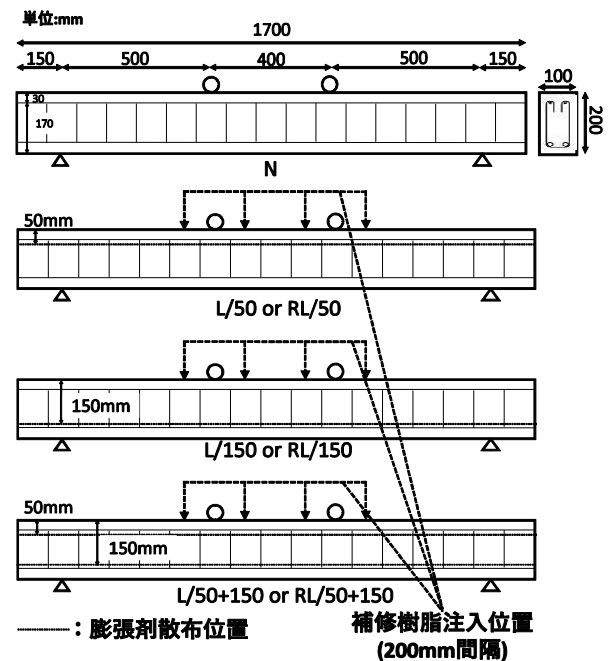


図-1 供試体概要

クトゲージは同じ面に設置とし、撮影範囲に含む。

3.2 画像相関

撮影した画像は二値化画像に変換している。二値化画像において、100ピクセル間隔で格子状に着目点を供試体側面に設定する。着目点は補修無では各スパンそれぞれ梁軸方向に51点、梁高さ方向に19点の合計969点とし、補修有では左右の範囲それぞれ梁軸方向に68点、梁高さ方向に19点の合計1292点とした。

変形前画像において、128×128ピクセルの正方形領域を二値化画像から切り出した。一方で、変形後画像からは256×650ピクセルの長方形領域を切り出した。長方形領域は、変形した着目点を含むように、変位方向に長辺を取っている。切り出した領域の外の値を0(黒)とし、それぞれ切り出した画像を含む700×700ピクセルの画像を作成した。

変形前後の着目領域画像について相互相関を求め、最大値を得る位置が変形後の着目点である。変形前後の着目点の位置により変位を求めることができる。

3.3 ひずみの算出

得られた変位量よりひずみを求める。格子状にある4つの着目点の水平方向変位と鉛直方向変位より、梁軸方向ひずみと梁高さ方向ひずみを経て、最大主ひずみ、最小主ひずみが求められる。

4. 結果

図-2に各供試体の荷重-変位曲線を示す。表-1に各供試体の降伏荷重と変位、図-2(b)との合致点を示す。Nと比較し、Lシリーズ及びRLシリーズの降伏荷重、最大荷重は低下した。供試体の破壊形態はいずれも曲げ破壊であった。

本論文では、主に降伏点直前のLシリーズ及びRLシリーズの供試体撮影画像について行った画像解析結果について述べる。図-3に載荷後のNの供試体表面の全ひび割れのスケッチを示す。図-4から図-6にはLシリーズ及びRLシリーズの降伏点直前の最大主ひずみと最小主ひずみの分布図及びベクトル図を示す。図中には、載荷後の各供試体裏面の導入ひび割れを含んだ全ひび割れのスケッチを透視図として重ねて表示する。

4.1 L/50 と RL/50

L/50 について、ひび割れスケッチでは、曲げひび割

れの発生位置や本数が N と同様であることが確認できる。また、N では曲げひび割れが圧縮縁近辺までひび割れが進展しているが、L/50 では水平ひび割れ位置より上方へ進展しづらくなる傾向があることがわかる。最大主ひずみでは曲げスパンで発生した曲げひび割れに対応する分布が見られ、曲げスパン中心部で大きな開口ひび割れに対応した分布が確認できる。これらは反対側側面のひび割れスケッチと概ね一致している。左側せん断スパンでは開口ひび割れの進行方向が水平ひび割れ位置で導入ひび割れ方向に変わったことが確認できる。最小主ひずみでは、曲げスパン圧縮縁での水平ひび割れ位置より上側で水平方向に潰れる圧縮方向の分布が見られる。また、ひずみベクトル図よりせん断スパンでの水平ひび割れの水平方向のずれが確認できる。

RL/50 について、ひび割れスケッチでは、ひび割れ発生範囲および進展傾向は L/50 と同様に水平ひび割れ位置より上方へ進展しづらい傾向にあることがわかる。最大主ひずみでも L/50 と同様の曲げひび割れによる分布が見られ、右側せん断スパンで下方からのひび割れ進展が水平ひび割れにつながる挙動がみられる。最小主ひずみでは、右側せん断支間の水平ひび割れでは、載荷点と支点を結ぶ斜め方向の局所的な圧縮ひずみ分布が確認でき、水平ひび割れが閉口方向に潰されながらずれていることがわかる。また、曲げスパン圧縮縁での圧縮ひずみ分布範囲及び傾向は L/50 と同様であった。

以上から、中立軸が水平ひび割れ位置近辺にあると推察される。また、せん断スパンにおいて水平ひび割れのずれが確認できた。

表-1 降伏荷重と変位

供試体	降伏荷重 (kN)	変位 (mm)	図-2(b)との合致点
N	64.4	5.67	—
L/50	55.9	6.23	(1)
RL/50	54.1	5.58	(2)
L150	58.8	5.32	(3)
RL/150	53.3	5.93	(4)
L/50+150	53.7	6.58	(5)
RL/50+150	53.4	6.45	(6)

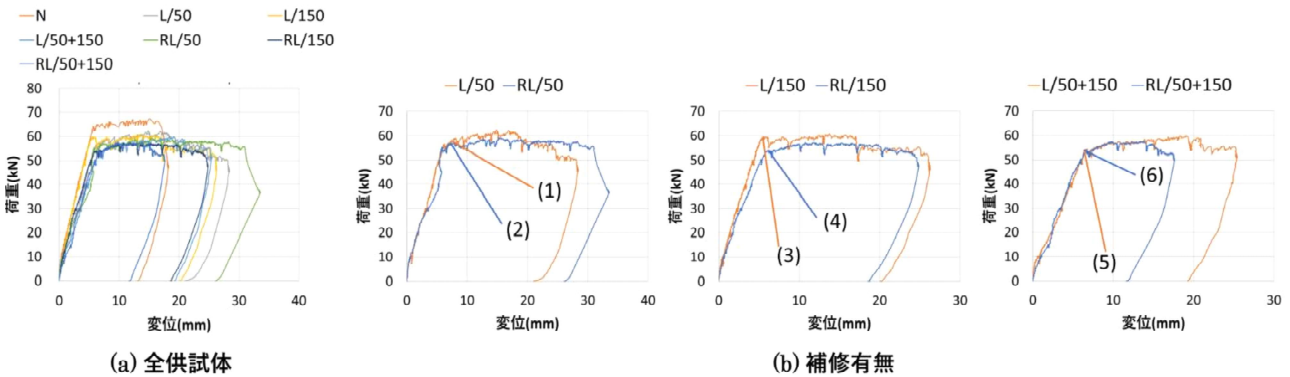


図-2 荷重-変位曲線

4.2 L/150 と RL/150

L/150 について、ひび割れスケッチから水平ひび割れとつながるせん断ひび割れの発生が確認できる。また、N と比較してひび割れ発生範囲は曲げスパン側にやや縮小傾向にあるが、曲げひび割れ進展の程度はNと同様であった。最大主ひずみでは水平ひび割れに沿った局所的

なひずみ分布がみられ、開口しなからずれが生じている。下縁側では曲げひび割れが水平ひび割れ位置で屈曲して進展している。最小主ひずみでは、載荷板近傍を中心とした梁高さ方向の局所的な圧縮ひずみがみられ、曲げスパン圧縮縁での圧縮ひずみは L/50 と比べて小さく、幅も小さいことがわかる。

RL/150について、最大主ひずみではL/150同様に水平ひび割れ位置での局所的な分布が確認でき、ひび割れスケッチからもひび割れの発生範囲及び進展傾向が類似していることがわかる。最小主ひずみでは載荷板近傍での強い分布は見られず、L シリーズでみられた程度の水平ひび割れ位置周辺での明瞭な差異も確認できなかった。

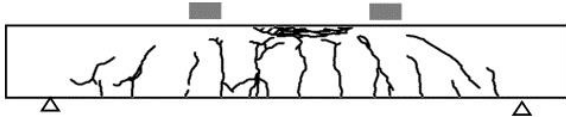


図-3 N ひび割れ性状

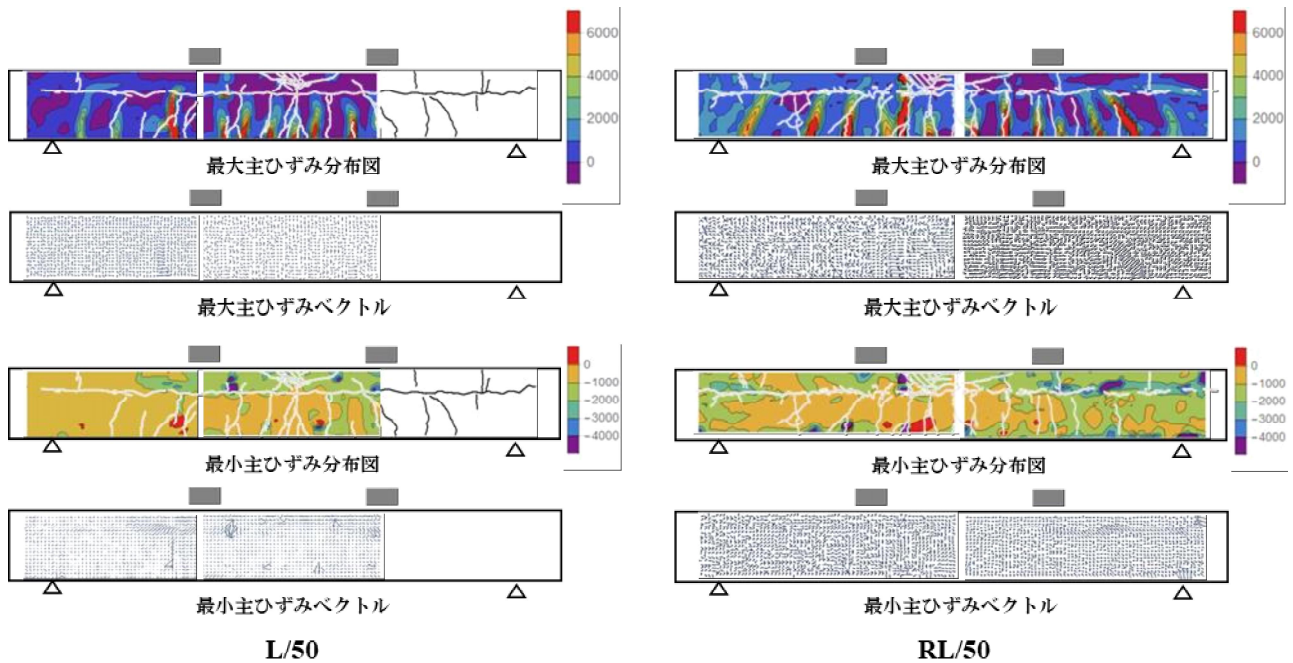


図-4 L/50 と RL/50 最大主ひずみ及び最小主ひずみ

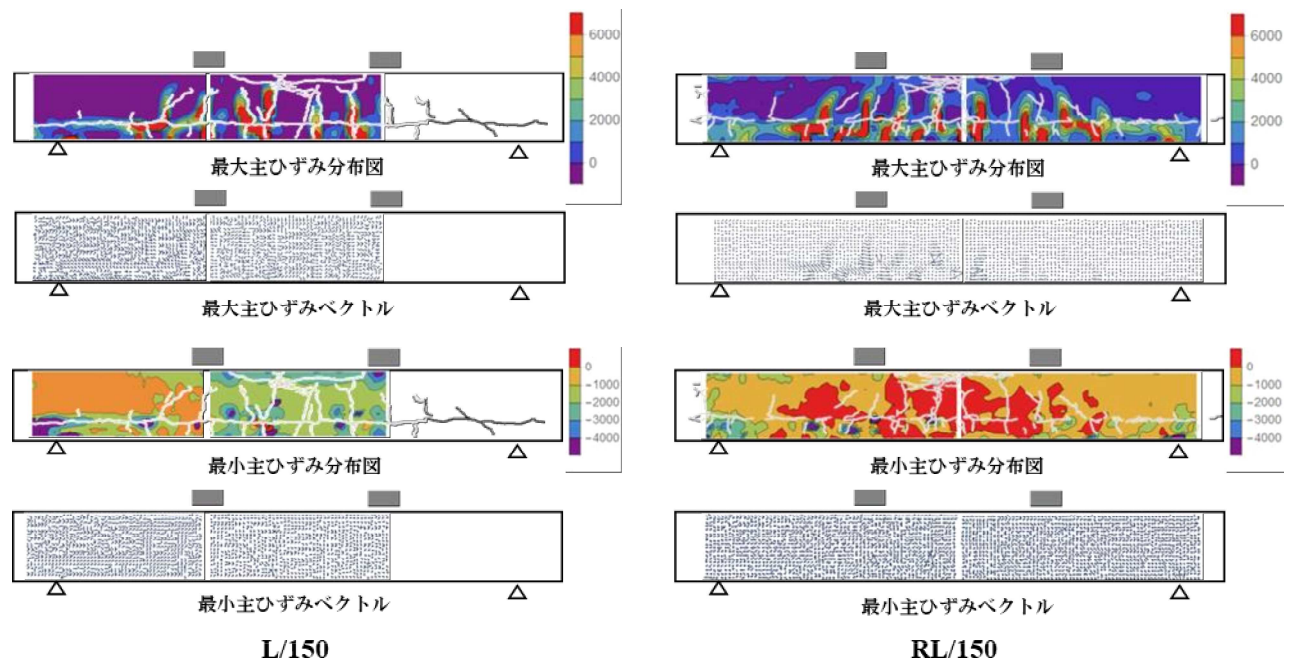


図-5 /150 と RL/150 最大主ひずみ及び最小主ひずみ

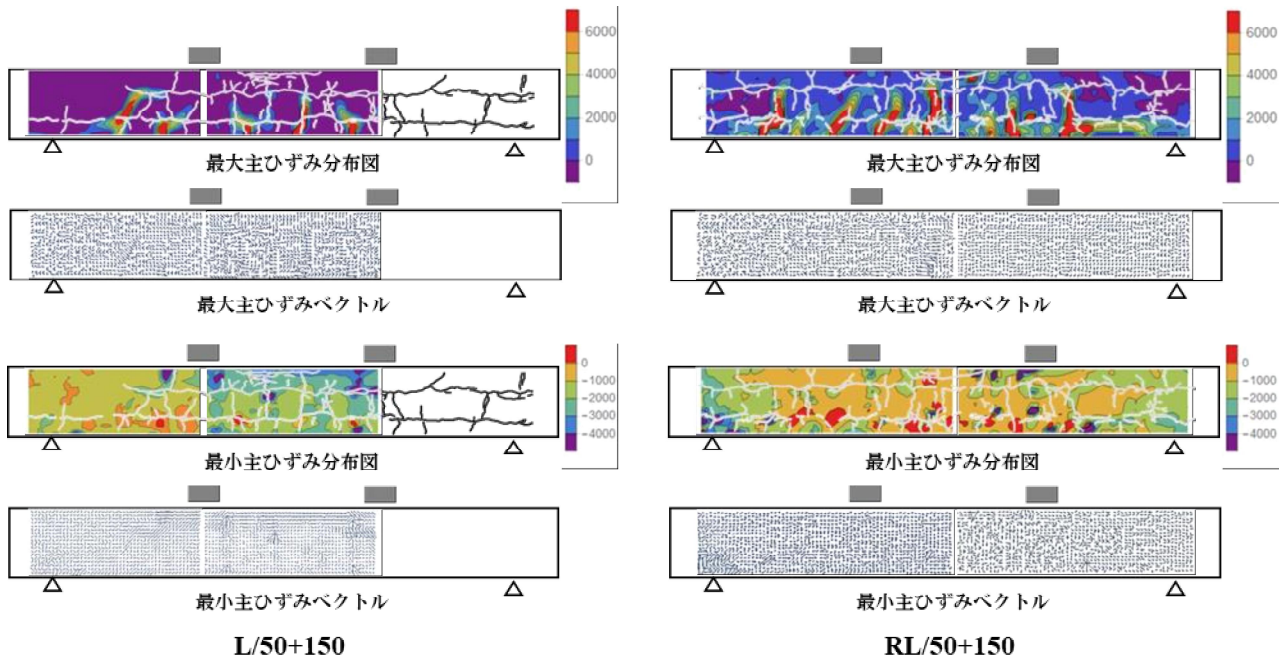


図-6 L/50+150 と RL/50+150 最大主ひずみ及び最小主ひずみ

また、ベクトル図から水平ひび割れが開口しながらずれが生じていることが左右のせん断スパンそれぞれで確認できる。

以上から、下縁側で発生する曲げひび割れが水平ひび割れ位置で屈曲して進展する傾向がみられる。また、水平ひび割れが開口しながらずれが生じる挙動が確認できた。

4.3 L/50+150 と RL/50+150

L/50+150 について、曲げひび割れの本数、発生範囲が L/150 と同様であり、N と比較すると曲げスパン方向にやや縮小傾向にある。最大主ひずみでは導入ひび割れ周辺で顕著なひずみ分布はなく、左側せん断スパンでの上下の水平ひび割れをつなぐせん断ひび割れの発生が特徴的である。上側水平ひび割れ位置では L/50 同様に、水平ひび割れ位置より上方にひび割れ進展しづらい傾向にあり、下側水平ひび割れ位置では L/150 同様に、曲げひび割れが水平ひび割れ位置で屈曲して進展する。これらの傾向はひび割れスケッチからも確認できる。最小主ひずみでは L/150 と同様に、曲げスパン内の上側水平ひび割れ位置より上方で水平方向圧縮ひずみの分布が確認できる。ベクトル図より、せん断スパンにおける上下の水平ひび割れそれぞれで水平方向のずれが見られる。

RL/50+150 について、曲げひび割れの発生範囲及び進展傾向は L/50+150 と同様である。最大主ひずみでは開口ひび割れの発生範囲がややせん断方向に広がっており、L/50+150 でも見られた上下水平ひび割れをつなぐせん断ひび割れの発生が、左右のせん断スパンそれぞれで確認でき、水平ひび割れのずれが水平方向に生じている。最小主ひずみは水平ひび割れ位置より上方での圧縮ひずみ分布は見られず、水平ひび割れと関連した分布は確認できなかった。

以上より、水平ひび割れを二本導入した場合、上下の

水平ひび割れをつなぐひび割れの発生がみられた。上側の水平ひび割れ位置では中立軸が形成されていると推察できる。また、上下の水平ひび割れそれぞれで、ずれの発生が確認できた。

5. まとめ

本研究では、基準供試体 1 種類、膨張剤の散布により水平ひび割れを模擬的に導入した 3 種類とそれらに樹脂注入による補修を加えた 3 種類、計 7 種類の RC 梁供試体の曲げ載荷実験を行い、画像解析により変形挙動の比較を行った。

模擬劣化における導入ひび割れの影響とそれに対する補修の効果について、以下の点が確認された。

第一に、導入ひび割れ位置で曲げひび割れが直線的ではなく屈曲して進展する、もしくはせん断ひび割れがつながるような挙動が確認できたこと。

第二に、模擬ひび割れが圧縮鉄筋位置にある場合、中立軸が模擬ひび割れ位置周辺に形成されると推察できること。

第三に、せん断スパンにて水平ひび割れのずれが確認できたこと。

今回の報告は、撮影した画像の一部の解析に留まるため、今後各荷重段階の詳細な解析を進めていく予定である。

参考文献

- 1)角間恒、渡邊晋也、西弘明、松本高志：内部劣化を有する RC 部材の曲げ耐荷性能について、第 73 号土木学会北海道支部論文報告集、A-35、2017。
- 2)松江晃太、角間恒、松本高志：模擬劣化 RC 梁の曲げ挙動と補修の効果に関する画像解析、第 74 号土木学会北海道支部論文報告集、A-46、2018。

移動荷重下の模擬劣化 RC 床版の変形挙動に関する画像解析

Image analysis of the deformation behaviors of artificially damaged RC slab under moving wheel load

北海道大学工学部	○学生員	永井 崇雅	(Takamasa Nagai)
北海道大学工学院	学生員	松江 晃太	(Kota Matsue)
北海道大学大学院工学研究院	正 員	松本 高志	(Takashi Matsumoto)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所	正 員	角間 恒	(Ko Kakuma)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所	正 員	西 弘明	(Hiroaki Nishi)

1. まえがき

道路橋 RC 床版の耐久性に関しては、これまで疲労破壊に対する耐久性が研究されてきており、輪荷重走行試験機による疲労損傷の進展と最終的な抜け落ちの再現と疲労寿命の評価がなされてきた。近年、疲労に加えて塩害や凍害によると考えられる損傷も生じた複合劣化床版の事例が見られるようになってきている。こうした床版においては、コンクリートに水平ひび割れが発生して上面が砂利化を起こす形態をとることが観察されてきている。

複合劣化を起こした床版の寿命評価をするにあたっては、損傷破壊現象の理解と再現が必要である。本研究では、人工的に水平ひび割れを導入した床版に対して輪荷重走行試験機により疲労荷重を行い、荷重前に導入した水平ひび割れと輪荷重走行により形成される周辺のひび割れとにより影響を受ける床版の構造挙動を把握することを目的としている¹⁾。その手法として既往の研究でも有効性が示されている画像解析を用いることで、面的な変位場を計測し、模擬劣化床版の変形挙動の特徴を把握しようとするものである。

2. RC 床版の移動輪荷重載荷実験

2.1 供試体

移動輪荷重載荷実験に用いた供試体は、図-1に示す長方形断面のRC梁（長さ1500mm、幅600mm、厚さ180mm）であり、軸方向鉄筋はD19（SD345）である。供試体には模擬劣化を導入しており、上側鉄筋位置での膨張剤の散布（0.6kg/m²）によって鉄筋腐食による局所的な水平ひび割れの発生を模擬した。

2.2 載荷方法

クランク式の輪荷重走行試験機を使用し、図-2に示すように輪荷重の走行方向に模擬劣化状態が同じ供試体二体を設置して同時に載荷を行った。輪荷重の載荷には鉄輪を使用し、供試体上面に載荷ブロックを敷き並べた上に連続走行させた。載荷ブロックの寸法は走行直角方向 500mm×走行方向幅 200mm、輪荷重の走行範囲は供試体境界を中心とする2mである。また所定回数の100kNの輪荷重走行を行ったのち図-2に示す位置(LP1、LP2、LP3)に輪荷重を移動して、100kNの静的載荷を行なった。LP3は供試体支点間中心の載荷ブロック位置であり、LP2とLP1は右方に隣接する載荷ブロック位置である。LP1からLP3の順に載荷していくことで移動荷重下床版の変形挙動を計測した。

3. 画像解析手法

3.1 画像撮影

画像撮影にはNikonのデジタルカメラD3100を使用した。画素数は4608×3072ピクセル（約1400万画素）である。撮影は、①所定回数までの輪荷重走行、②静的載荷前後の撮影、の繰り返しにより行った。なお、供試体の撮影表面にはラメスプレーによるランダムパターンを付与している。

3.2 画像関連

撮影した画像は二値化画像に変換している。二値化画像において、25ピクセル間隔で格子状に計測点を設定した。計測点はそれぞれ梁軸方向に166点、梁高さ方向に35点の合計5810点とした。

4. 画像解析結果

供試体には輪荷重走行45000回後に砂利化が認められ、深さが約4cmに達したため輪荷重走行を終了した。ここでは輪荷重走行9000回終了後に行った静的載荷時の画像解析について述べる。図-3にLP1からLP3に載荷を行った際のx方向（梁軸方向）およびy方向（梁高さ方向）の変位分布を示す。

4.1 LP1 載荷

x方向変位は、載荷点側で少し異なるものの、水平ひび割れの上側と下側で等高線は連続しており、少し伸縮を伴った剛体変位であった。y方向変位はひび割れ上側では載荷位置近傍で大きくなるたわみの変位分布が見ら

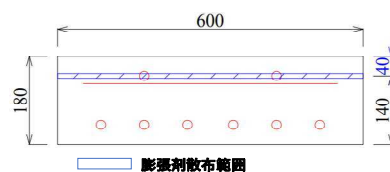


図-1 供試体断面（単位：mm）

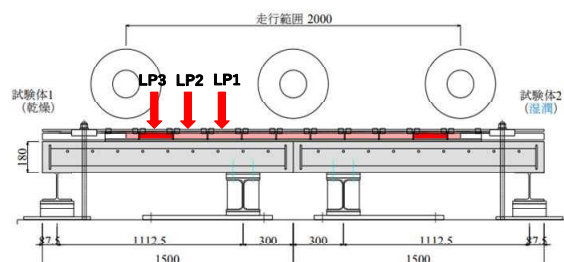


図-2 移動輪荷重載荷の概要（単位：mm）

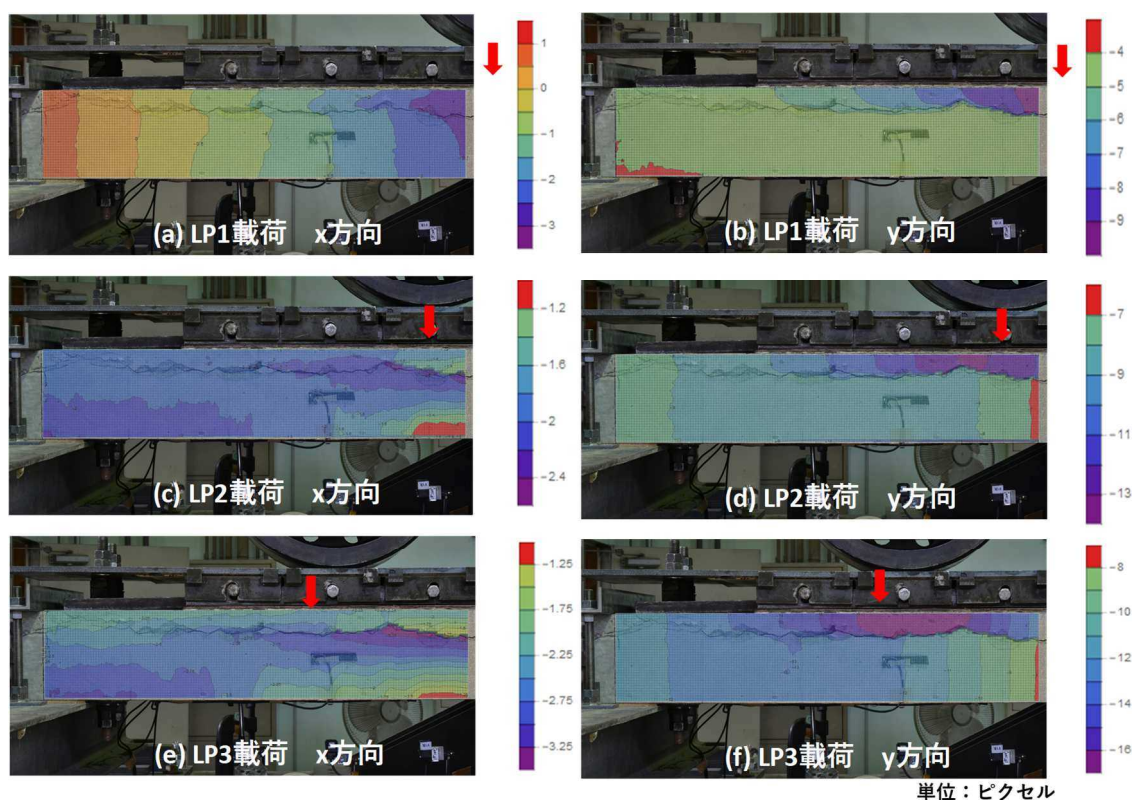


図-3 9000回走行後静的荷重時の変位分布 (x : 水平、y : 鉛直)

れたが、下側では見られずほぼ一様であった。荷重位置が支点近傍であり、荷重により上側がたわんで水平ひび割れが閉まったものの、支間中心部への影響は小さく下側には影響がなかったと推測される。

4.2 LP2 荷重

x 方向変位では水平方向の等高線が確認でき、供試体上面から水平ひび割れ直上まで段階的に変位が小さくなっている。また、水平ひび割れ直下では上面での変位より大きな変位が見られ、下面に向けて同様の分布で段階的に変位が小さくなっている。以上から重ね梁のような挙動が確認される。y 方向変位は梁軸方向に対して垂直の等高線が確認でき、水平ひび割れ上側では荷重位置を中心として大きなたわみ変位分布となっているが、下側では支間中央にたわみ変位分布の中心がある。

4.3 LP3 荷重

x 方向変位、y 方向変位ともに LP2 と同様の分布傾向がみられた。水平ひび割れ上側と下側で変位分布は不連続となっており、それぞれが曲げ変形の変位分布を示した。LP2 荷重と比較すると LP3 荷重は先述の特徴がより顕著に表れており、重ね梁のような挙動が確認された。

4.4 移動荷重下での挙動

x 方向変位は、LP1 荷重では剛体変位と考えられる変位が見られた。LP2 から LP3 への荷重の移動にともない、水平ひび割れ上側と下側において曲げ変形の変位分布とみられる分布が確認でき、荷重の移動に伴い範囲が広がる様子が見られた。

y 方向変位では、水平ひび割れ上側では荷重位置直下で最大変位が確認でき、同位置の下側に比べ大きな変位を示している。また、この分布傾向は LP1 から LP3 で同

様であり、荷重位置の移動に伴い最大変位位置も移動しており、たわみと共に水平ひび割れが閉じている様子が見られる。

5. まとめ

本研究では膨張剤の散布によって水平ひび割れを導入した RC 床版の荷重重走行実験を行い、移動荷重下での変形挙動の検討を画像解析により行った。

水平ひび割れを導入した床版の移動荷重荷重時の変形挙動について以下の点が確認された。第一に、荷重位置が支間中央に移動するにつれて、水平ひび割れ上側と下側に曲げ変形の変位分布の広がりが見られ、重ね梁の曲げ変形領域が広がったと見られた。第二に、水平ひび割れ上側にて荷重位置直下を中心とした鉛直方向たわみ分布が見られたこと。この分布は荷重の移動に伴い中心が動いた。一方、水平ひび割れ下側では鉛直方向たわみ分布の中心が異なり、支間中央にあった。

今回の報告は、撮影した画像の一部の解析に留まるため、今後荷重重走行荷重の各段階の詳細な解析を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 角間恒、渡邊晋也、西弘明、松本高志：内部劣化を有する RC 部材の曲げ耐荷性能について、第 73 号土木学会北海道支部論文報告集、A-35、2017。
- 2) 松江晃太、角間恒、松本高志：水平模擬ひび割れを導入した RC 梁の変形挙動の画像解析、第 73 号土木学会北海道支部論文報告集、A-33、2017。

凍結融解環境下において輪荷重が床版の劣化損傷に及ぼす影響

(一社)日本橋梁建設協会 正会員 ○宮田 朋和 正会員 久保 圭吾
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 佐藤 孝司 正会員 角間 恒
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本 高志

1. はじめに

道路橋の床版は、輪荷重による疲労損傷が生じるが、床版上面に水が滞水するとひび割れのすり磨きにより急速に損傷が進行する。これに凍結融解が作用すると床版の凍害劣化の進展が早くなることが懸念される。そこで、本研究では凍結融解環境下において輪荷重が床版の劣化損傷に及ぼす影響を実験により調査したので、その内容を報告する。

2. 試験概要

供試体は、幅 250mm×長さ 250mm×床版厚 150mm で、床版上面にひび割れを模擬した長さ 40mm のスリットを設けた。また、上面から 45mm の位置にはスリット平行方向に、55mm の位置にはスリット直交方向にそれぞれ鉄筋 (D10) を 2 本配置した。荷重は、100mm×100mm の載荷板を介して定点疲労荷重を行うが、水の影響を確認するために、床版上面に水を張った状態で試験を実施した。

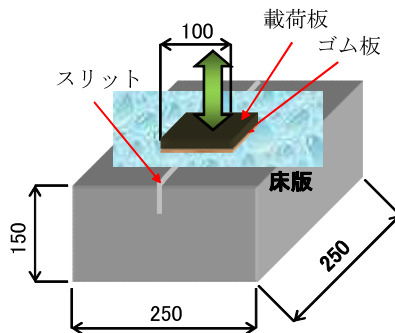


図-1 供試体の模式図



写真-1 試験装置

このとき、輪荷重が走行することを模擬するため、試験機にバネを設置し、除荷時に載荷板が供試体から離れ、水が供給されるようにした。供試体の模式図を図-1 に、試験装置を写真-1 に示す。さらに、凍結融解の影響を確認するために、凍結融解+疲労(凍結融解試験 30 サイクル+定点疲労荷重試験 5 万回)の条件の他に、凍結融解を与えない疲労試験のみの条件でも試験を行った。載荷荷重は過積載車による接地圧 1.6N/mm²を想定した 16kN と、試験機最大荷重の 90kN の 2 通りで行った。試験ケースを表-1 に、凍結融解試験と定点疲労荷重試験の条件を表-2、表-3 に示す。

表-1 試験ケース

ケース番号	試験条件	載荷荷重 (kN)
Case1	疲労のみ	16
Case2	疲労のみ	90
Case3	凍結融解+疲労	16
Case4	凍結融解+疲労	90

表-2 凍結融解試験の条件

試験方法	気中凍結水中融解
試験温度	-20℃から+20℃
サイクル数	30サイクル/ステップ
超音波伝播速度の測定頻度	15サイクル毎
超音波伝播速度の測線	5測線/体 1~2:鉛直, 3~5:水平

3. 試験結果

3.1 超音波伝播速度の測定

各供試体において図-2 に示す位置で超音波伝播速度を測定した。測定の頻度は、凍結融解 15 サイクル毎および疲労荷重 5 万回時である。ここでは、凍結融解を与えた場合のケースは凍結融解 30 サイクル+疲労荷重 5 万回を 2 ステップまで、疲労荷重のみケースは 1 サイクルまでの結果を示す。図-3 に超音波伝播速度を示すが、載荷荷重の大

表-3 定点疲労荷重試験の条件

制御方法	荷重制御 ばね変位の制御による
疲労荷重	16kNまたは90kN
載荷周波数	1.0Hz (正弦波形)
載荷回数	5万回/ステップ
測定項目	供試体状況の観察

キーワード 凍結融解, 凍害, 輪荷重, 超音波伝播速度

連絡先 〒105-0003 東京都港区西新橋 1 丁目 6 番 11 号 (一社) 日本橋梁建設協会 TEL 03-3507-5225

きい Case2, Case4 で、若干低下している傾向は見られるものの Case1, Case3 では、ほとんど変化は生じていない。90kN を載荷した Case2 は、疲労載荷 165 回で供試体にひび割れが発生した後、1668 回で水漏れが生じたため試験を終了した。凍結融解を 30 サイクル実施した Case4 は、疲労載荷 920 回でひび割れと水漏れが生じた。

3.2 静的載荷試験

Case2, Case4 の供試体が 90kN で破壊に至ったことから、水の影響を確認するために、同様の供試体 2 体 (スリットあり 1 体, スリットなし 1 体) を用いて、水張りなしで静的載荷試験を行った。この結果、図-4 に試験時の荷重-ひずみ関係を示すように、いずれの供試体も約 800kN で破壊した。

3.3 破壊断面の観察

疲労載荷した Case2, Case4 と静的載荷した供試体 2 体に対して、スリットに直交する方向に供試体を 2cm ピッチで切断して断面を観察した。代表的な切断断面を写真-2 に示す。写真に示すように疲労載荷した供試体はスリットから下面に鉄筋に直交してひび割れが発生しており、一部、水平ひび割れのようなものが確認された。静的載荷した供試体においては、スリットありの供試体でもスリットがひび割れの起点となっていなかった。

4. まとめ

- 1) 凍結融解-疲労複合サイクル試験を行った結果、凍結融解 30 サイクル+疲労載荷 5 万回を 2 ステップ行った時点では、輪荷重を模した 16kN の試験では明確な劣化は見られなかった。
- 2) 静的載荷では約 800kN で破壊するが、水張り疲労載荷では 90kN で 900~1700 回程度で破壊する結果となった。このことから、ひび割れから水が浸入することでひび割れの進展を促進し、大幅に耐久性が低下する可能性があることがわかった。
- 3) 床版上面に滞水がある場合は、水の影響によりひび割れが鉄筋に達すると鉄筋に沿って進展しており、これが水平ひび割れに発展する可能性がある。

本試験は複合サイクル試験を継続中であり、今後の 16kN 載荷試験によって凍害と輪荷重による疲労の複合劣化の状況を明らかにする予定である。

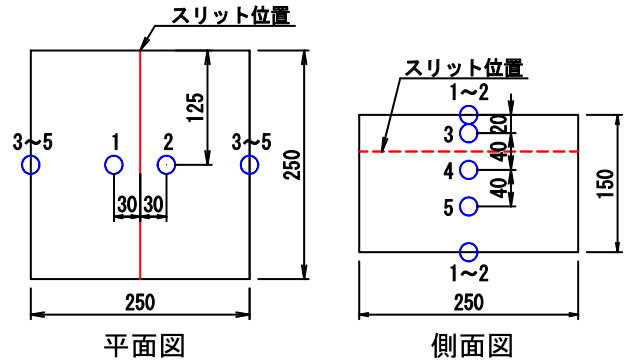


図-2 超音波伝播速度の測定位置

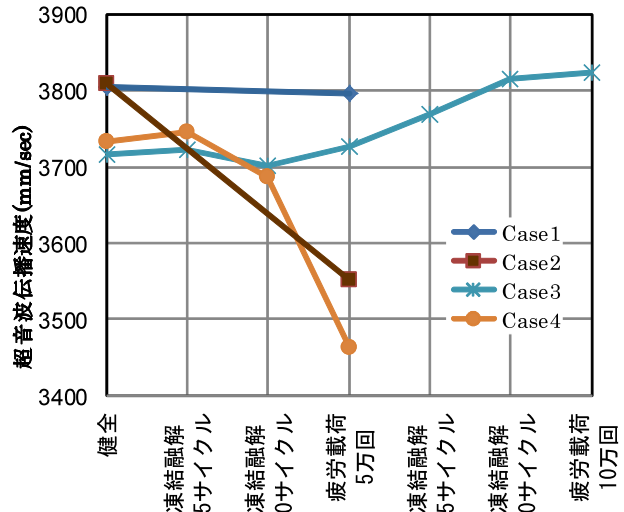


図-3 超音波伝播速度

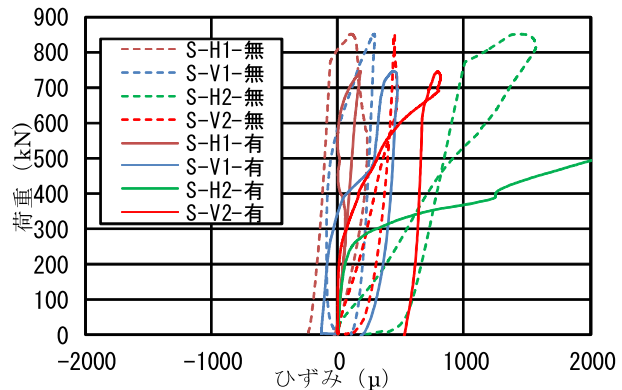


図-4 静的載荷試験

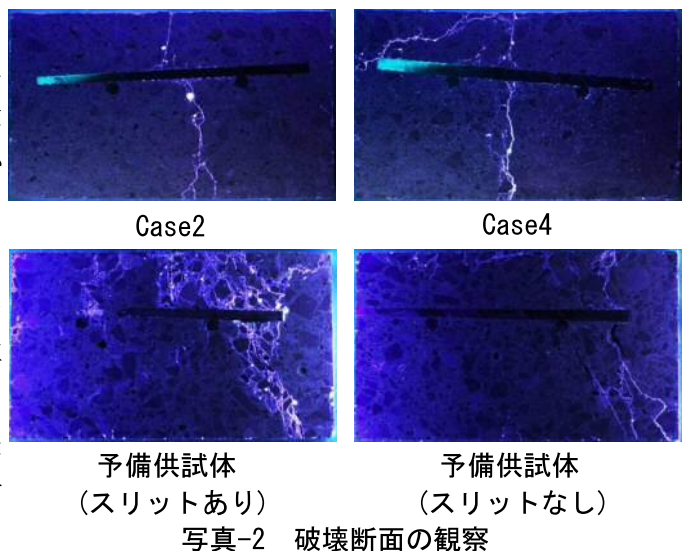


写真-2 破壊断面の観察

論文

コンクリート系床版の凍害の影響に関する実験的研究

酒井武志*, 久保圭吾**, 白戸義孝***, 角間恒****, 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)

*** (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

****博(工), (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

***** Ph.D., (大) 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)

凍結融解環境下にある道路橋のコンクリート系床版において, 内部鋼材が凍害に及ぼす影響を把握するため, 鋼材の種類と配置を変えた供試体を用いて凍結融解試験を実施した. また, 同様の環境下の床版が滞水した状況において, 凍結融解作用に加えて輪荷重を繰り返し载荷した場合の床版劣化へ及ぼす影響を把握するため, 凍結融解と定点疲労载荷をサイクルとした試験を実施した. 本論文では, これらの結果について報告する.

キーワード: コンクリート系床版, 凍結融解, 内部鋼材, 輪荷重

1. はじめに

これまで筆者らは, 鋼コンクリート合成床版の耐凍害性を調査することを目的として, 鋼コンクリート合成床版を模擬した供試体による凍結融解試験や拘束条件が異なる凍結融解試験を実施した¹⁾. その結果, 凍結融解によりコンクリート表面から進展したひび割れは, 鉄筋もしくは補強リブに到達すると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. そこで, コンクリート内部の鋼材が凍結融解によるひび割れ進展に与える影響を把握することを目的として, 鋼材の種類と配置を変えた供試体を用いて凍結融解試験を実施した.

また, 道路橋の床版は, 輪荷重による疲労損傷が生じるが, 床版上面に水が滞水すると浸入した水によるひび割れのすり磨き等により急速に損傷が進行し, これに凍結融解が作用すると床版劣化が加速されることが懸念される. そこで, 凍結融解作用を受ける滞水環境下で, 輪荷重が床版劣化に及ぼす影響を凍結融解—疲労複合

サイクル試験により検討した.

2. コンクリート内部の鋼材の影響

2.1 凍結融解試験の概要

凍結融解試験の供試体は 100mm×100mm×400mm の角柱として, 配合が 24-8-20N (W/C:54.5%) のコンクリートで製作した. 試験ケースとその模式図を, それぞれ

表-1 試験ケース

試験ケース	内部鋼材		水の 影響
	鋼材	かぶり	
Case1	—	—	有
Case2	鋼板	有	無(気中)
Case3	鋼板	有	有
Case4	鋼板	無(端部露出)	有
Case5	鉄筋	有	無(気中)
Case6	鉄筋	有	有
Case7	鉄筋	無(端部露出)	有

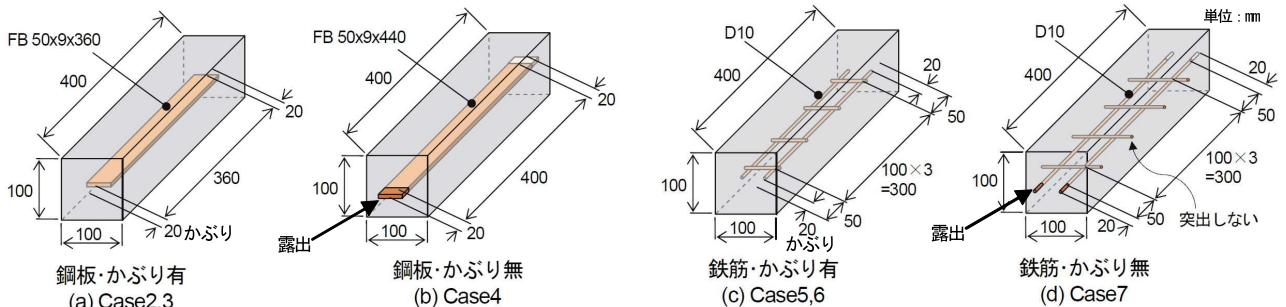


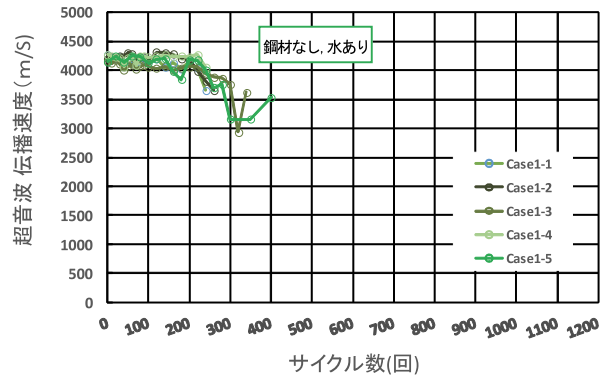
図-1 供試体の模式図

表-1, 図-1 に示す. Case1 はコンクリート内部に鋼材が無い供試体である. コンクリート表面から進展したひび割れが鋼材位置まで貫通した場合と貫通していない場合を模擬して, それぞれ鋼材を供試体先端で露出させたケース (Case4,7) と鋼材端部にかぶり(20mm)を確保したケースの供試体 (Case2,3,5,6) を用意した. コンクリート内部に埋め込んだ鋼材は, 合成床版の補強リブを模擬した板厚 9mm の鋼板と D10 の鉄筋を用いた. また, 水の影響が無い状態の温度変化でコンクリート内部の鋼材がコンクリートに与える影響を確認するため, Case2,5 は気中で凍結融解試験を実施した. 供試体数は各試験ケース 5 本とした. 供試体容器は凍結融解による劣化を促進させるため, 外部拘束力が大きい鋼製容器 (角柱, 120mm×120mm×500mm, t=2mm) を用いた. 供試体容器の内側は, 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り付けた. 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 1130 サイクルまで実施した. 超音波伝播速度は 10~50 サイクルごとに計測した.

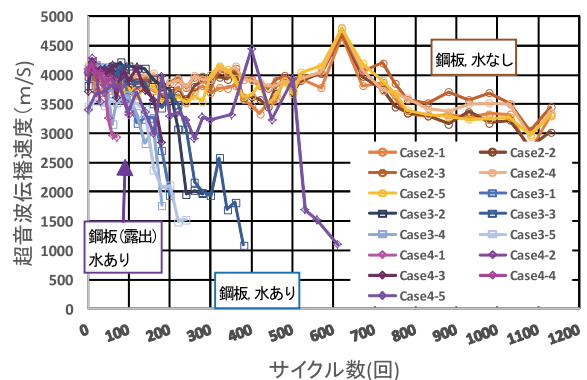
2.2 試験結果及び考察

試験機の容量に制限があり, 各試験ケースを 2 回(枝番 1~3 と 4,5)に分けて凍結融解試験を行った. 図-2 に超音波伝播速度の計測結果を, 写真-1 に各供試体の経時変化および破壊状況を示す. なお, ここではコンクリートの分離や破断を目視で確認した場合を破壊とした.

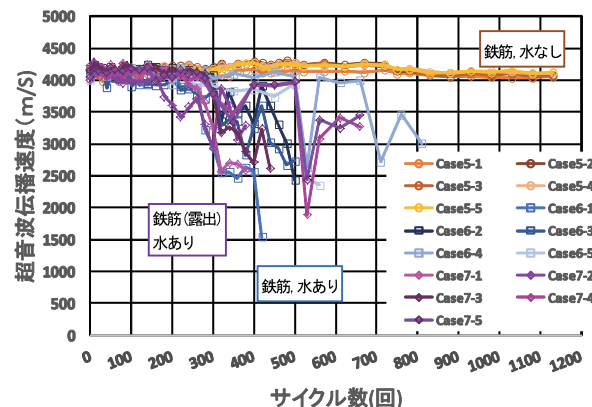
コンクリート内部に鋼材が無い Case1 は, 260~450 サイクルで供試体の中央付近から割裂するように破壊した. 鋼板がコンクリート内部にある場合(Case3,4)は, 鋼板に沿ってひび割れが発生し, それぞれ 200~400, 40~660 サイクルで破壊した. 鋼板を露出した Case4 は, 今回の試験ケースで最も早く破壊 (Case4-5 を除くと 200 サイクルまでに破壊) しており, コンクリートと鋼板の境界部やひび割れから水が浸入することで, 凍害劣化が早まったと考えられる. 一方, 鉄筋がコンクリート内部にある場合(Case6,7)は, 供試体中央付近からスケリングが始まり, それぞれ 440~810, 400~710 サイクルで破壊した. Case1 と比べ破壊に至るまでのサイクル数が



(a) Case1



(b) Case2,3,4



(c) Case5,6,7

図-2 超音波伝播速度

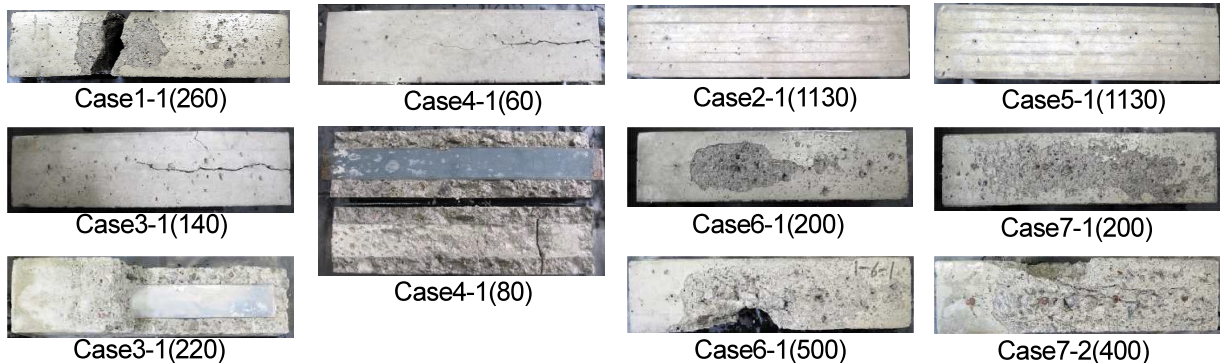


写真-1 供試体の経時変化および破壊状況

※()内はサイクル数

増加したのは、鉄筋の拘束効果によるものと考えられる。なお、鋼板のものと同様に、若干ではあるが鋼材を露出した Case7 の凍害劣化が早くなった。

水の影響が無い場合(Case2,5)では、鋼板及び鉄筋がコンクリート内部に存在しても 1130 サイクルまで超音波伝播速度の大きな低下はなく、供試体にスケーリングやひび割れ等の凍害劣化はみられなかった。気中では供試体に外部拘束力が作用しないうえ、コンクリート内部の水分では凍害劣化が生じないことによるものと考えられる。また、熱伝導率の高い鋼材がコンクリート中にある場合でも、温度変化により鋼材がコンクリートに与える影響はほとんどないと考えられる。

3. 寒冷地の床版上面滞水の影響

3.1 凍結融解—疲労複合サイクル試験の概要

供試体は図-3 に示すとおり、幅 250mm×長さ 250mm×床版厚 150mm で、床版上面にひび割れを模擬した深さ 40mm(上側鉄筋かぶりと同じ)、幅 1mm のスリットを設けた。また、上面から 45mm の位置にはスリット直交方向に、55mm の位置にはスリット平行方向にそれぞれ鉄筋 (D10) を 2 本配置(100mm 間隔)し、前述の試験と同様に配合が 24-8-20N (W/C:54.5%) のコンクリートで製作した。荷重は、100mm×100mm の荷重板を介して定点疲労荷重を行うが、水の影響を確認するために、床版上面に水を張った状態で試験を実施した。このとき、荷重車が走り抜けることを模擬するため、試験機にバネを設置し、除荷時に荷重板が供試体から離れ、水が供給されるようにした。供試体の模式図を図-4 に、試験装置を写真-2 に示す。

荷重荷重は過積載車による接地圧 $1.6\text{N}/\text{mm}^2$ を想定した 16kN と、試験機最大荷重の 90kN の 2 通りで行った。Case3,4 では、凍結融解の影響を確認するために、凍結融解+疲労(凍結融解試験 30 サイクル+定点疲労荷重試験 5 万回)を 2 ステップ実施後、疲労試験のみを継続することとした。試験ケースを表-2 に、凍結融解試験と定点疲労荷重試験の条件を表-3、表-4 に示す。なお、水の影響を確認するため、水を張らないケース (Case2') を追加している。

3.2 試験結果

(1) 疲労荷重試験

各ケースの試験結果を表-2 に示す。荷重荷重が 16kN の Case1 では 200 万回荷重後もひび割れは生じなかった。荷重荷重が 90kN の場合、Case2 では疲労荷重 165 回で側面にひび割れが発生した後、1668 回で水漏れが生じた。Case4 では凍結融解を 30 サイクル実施後、疲労荷重 920 回でひび割れと水漏れが生じた。水を張らずに疲労荷重試験を行った Case2' は 130 万回でひび割れが発生したが、150 万回まで荷重を継続した。なお、静的に破壊し

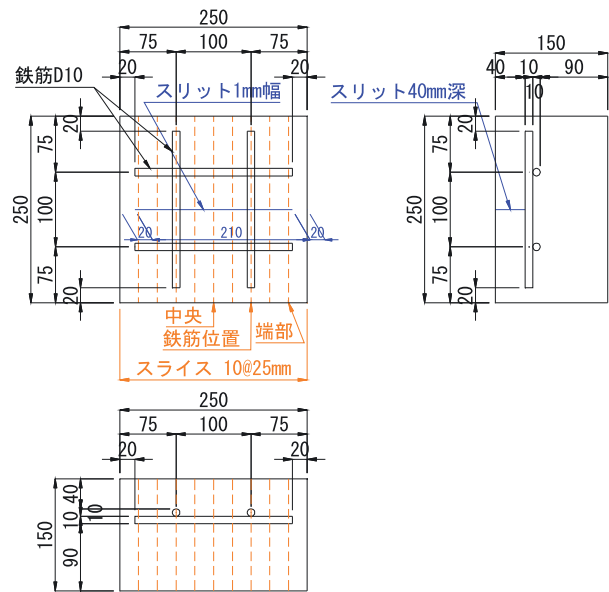


図-3 供試体の形状

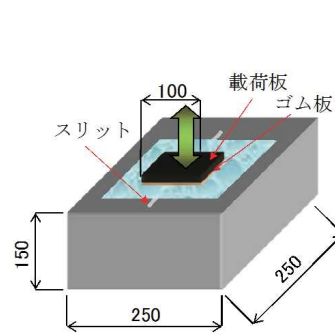


図-4 供試体の模式図



写真-2 試験装置

表-2 試験ケースと試験結果

試験ケース	試験条件	荷重荷重 (kN)	試験結果
Case1	疲労+水張り	16	200 万回：ひび割れなし
Case2	疲労+水張り	90	165 回：ひび割れ発生 1668 回：水漏れ発生
Case2'	疲労のみ	90	130 万回：ひび割れ発生 150 万回まで荷重
Case3	凍結融解+疲労+水張り	16	10 万回：ひび割れなし 疲労試験継続中
Case4	凍結融解+疲労+水張り	90	920 回：ひび割れ、水漏れ発生

表-3 凍結融解試験の条件

試験方法	気中凍結水中融解
試験温度	-20℃から+20℃
サイクル数	30サイクル/ステップ

表-4 定点疲労荷重試験の条件

制御方法	荷重制御 ばね変位の制御による
疲労荷重	16kNまたは90kN
荷重周波数	1.0Hz (正弦波形)
測定項目	供試体状況の観察

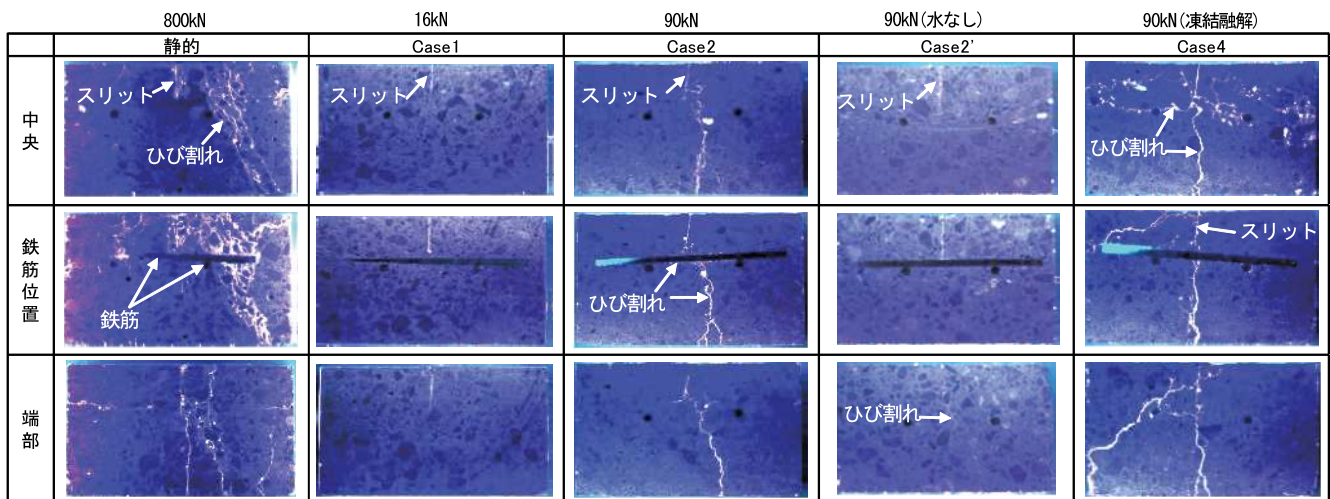


図-5 切断面の観察

た供試体の破壊荷重が約 800kN である²⁾ことから、水環境下で疲労荷重が作用すると、大幅に耐久性、耐荷性とも低下することが確認できた。また、凍結融解を与えていない Case2 では 1668 回で水漏れが生じるのに対し、凍結融解を与えた Case4 は 920 回で水漏れが発生していることから、凍結融解がひび割れの進展を加速している可能性がある。

(2) 切断面の観察

試験終了後の供試体をスリットに直交する方向に 25mm ピッチで切断(図-3 参照)したときの、中央、鉄筋位置、端部における切断面を図-5 に示す。200 万回疲労载荷後もひび割れが生じなかった Case1 は、供試体内部にもひび割れは確認できなかった。Case2, Case4 はスリットから下方に鉄筋に直交してひび割れが発生しており、一部で鉄筋に沿った水平ひび割れが確認された。

別途行った静的载荷試験²⁾の結果(図-5「静的」)では、供試体中央でのスリット下方への進展が見られないことから、滞水状態での疲労の影響によりひび割れが進展することが確認できた。水張りを行っていない Case2' はスリットから下方に鉄筋に直交してひび割れが発生しているものの、鉄筋に沿った水平ひび割れの進展は見られなかった。これは、荷重の繰り返し载荷によりひび割れに水圧が作用し、この水圧により鉄筋に沿った方向にひび割れを進展させた可能性があり、水張りを行っていない Case2' には水平ひび割れは生じなかったのではないかと考える。また、この水平方向のひび割れは、凍結融解作用を与えた Case4 の方が、進展が大きいことから、凍結融解作用が水平ひび割れの進展を助長する可能性があるかと推察される。

4. まとめ

- (1) 凍結融解試験の結果から、コンクリート内部に鋼板がある場合、コンクリートと鋼板の境界部やひび割

れからコンクリート内部に水が浸入すると鋼板に沿ってひび割れが発生し、急激に凍害劣化が促進されることがわかった。また、水の影響が無い場合、コンクリート内部の鋼材が耐凍害性に与える影響はないことがわかった。

- (2) 凍結融解—疲労複合サイクル試験を行った結果、凍結融解を与えていない Case2 では 1668 回で水漏れが生じるのに対し、凍結融解を与えた Case4 は 920 回で水漏れが発生していることから、水張り状態における荷重の繰り返し载荷によるひび割れの進展を凍結融解が加速している可能性があることが分かった。
- (3) 切断面を観察した結果、起点となるスリットから生じたひび割れは、鉄筋位置まで進展すると、ひび割れに浸入した水の水圧により、鉄筋に沿う形で水平ひび割れが生じ、これに凍結融解作用が加わると水平ひび割れの進展を助長する可能性があることが分かった。

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) 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: 鋼コンクリート合成床版の凍害に関する実験的研究, 第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.183-188, 2014.10
- 2) 宮田朋和, 久保圭吾, 佐藤孝司, 角間恒, 松本高志: 凍結融解環境下において輪荷重が床版の劣化損傷に及ぼす影響, 第 72 回年次学術講演会講演概要集, I-153, 2017.9

(2018 年 7 月 20 日受付)

でひび割れと水漏れが生じた。水を張らずに疲労载荷試験を行った Case2' は 130 万回でひび割れが発生したが、150 万回まで载荷を継続した。なお、静的に破壊した供試体の破壊荷重が約 800kN¹⁾であることから、水環境下で疲労荷重が作用すると、大幅に耐久性、耐荷性とも低下することが確認できた。また、凍結融解を与えていない Case2 では 1668 回で水漏れが生じるのに対し、凍結融解を与えた Case4 は 920 回で水漏れが発生していることから、凍結融解がひび割れの進展を加速している可能性がある。

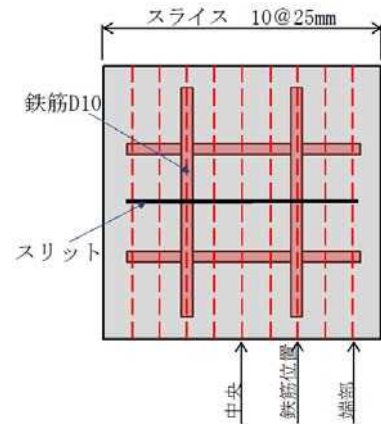


図-2 供試体スライス位置図

3.2 切断面の観察

試験終了後の供試体をスリットに直交する方向に 25mm ピッチで切断 (図-2 参照) したときの、中央、鉄筋位置、端部における切断面を図-3 に示す。200 万回疲労载荷後もひび割れが生じなかった Case1 は、供試体内部にもひび割れは確認できなかった。Case2, Case4 はスリットから下方に鉄筋に直交してひび割れが発生しており、一部、鉄筋に沿った水平ひび割れが確認された。静的試験では、供試体中央でのスリット下方への進展が見られないことから、疲労の影響によりひび割れが進展することが確認できた。水張りを行っていない Case2' はスリットから下方に鉄筋に直交してひび割れが発生しているものの、鉄筋に沿った水平ひび割れの進展は見られなかった。これは、輪荷重载荷によりひび割れに水圧が作用し、この水圧により鉄筋に沿った方向にひび割れを進展させた可能性があり、水張りを行っていない Case2' には水平ひび割れは生じなかったのではないかと考える。また、この水平方向のひび割れは、凍結融解作用を与えた Case4 の方が、進展が大きいことから、凍結融解作用が水平ひび割れの進展を助長する可能性があるかと推察される。

	静的	Case1	Case2	Case2'	Case4
中央					
鉄筋位置					
端部					

図-3 切断面の観察

4. まとめ

- 1) 凍結融解-疲労複合サイクル試験を行った結果、凍結融解を与えていない Case2 では 1668 回で水漏れが生じるのに対し、凍結融解を与えた Case4 は 920 回で水漏れが発生していることから、凍結融解がひび割れの進展を加速している可能性があることが分かった。
- 2) 切断面を観察した結果、起点となるスリットから生じたひび割れは、鉄筋位置まで進展すると、ひび割れに浸入した水の水圧により、鉄筋に沿う形で水平ひび割れが生じ、これに凍結融解作用が加わると水平ひび割れの進展を助長する可能性のあることが分かった。

参考文献

1) 宮田朋和, 久保圭吾, 佐藤孝司, 角間恒, 松本高志: 凍結融解環境下において輪荷重が床版の劣化損傷に及ぼす影響, 第 72 回年次学術講演会講演概要集, I-153, 2017.9

北海道における道路橋 RC 床版の土砂化発生傾向の整理

Analysis of a tendency of slab deterioration in Hokkaido

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○正会員 白戸義孝 (Yoshitaka Hiroaki)
 (国研)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
 北海道大学 学生員 松田有加 (Yuka Matsuda)
 北海道大学大学院 正会員 松本高志 (Takashi Matsumoto)

1. はじめに

道路橋 RC 床版（以下、床版）の劣化は、複数の要因が複合して作用することで発生している場合が多い。北海道においては、凍害等に起因する上面の土砂化と輪荷重走行との複合作用により抜け落ちに至ることもある¹⁾。

膨大な量の床版を効率的に点検・調査するためには劣化損傷箇所のスクリーニングが不可欠であるが、土砂化に関しては、北海道内全域で発生していることが報告されている²⁾ものの、その発生傾向は必ずしも明確になっていない。これは、既往の調査事例のほとんどが、外観調査や材料試験に基づく個々の橋梁での劣化状況調査に留まっており、土砂化が発生している橋梁や床版部位の特徴を統一的に整理できていないことに原因があると考えられる。

そこで本研究では、北海道における床版上面の土砂化発生傾向を把握するため、北海道内の国道橋において舗装切削による床版上面の目視調査が行われた事例を収集し、環境条件および構造条件の観点から土砂化が発生しやすい条件を整理した。

2. 整理方法

2.1 対象データ

本検討では、北海道開発局が管理する道路橋のうち、RC 床版を床版形式とする鋼板桁橋を上部構造とし、かつ、平成 21~28 年度に舗装損傷箇所に対して部分切削による床版上面の劣化状況調査が行われた橋梁を対象とした。以降では、平成 29 年 4~9 月の間に収集できた 58 橋分の調査結果を基に土砂化の発生傾向を整理する。

2.2 整理項目

土砂化発生傾向の整理に際し、まず対象とする 58 橋に関して、表-1 を基に橋梁諸元や供用環境を整理した。

次に、「該当橋梁のどの箇所で調査が行われているか」を分類するため、表-2 から選択する方法により、調査が実施された縦横断方向の位置や輪荷重走行位置との関係性等を整理した。なお、同一橋梁内において調査箇所の特徴が類似する複数箇所で調査が行われている場合には、土砂化が最も進行している 1 箇所のみを抽出した。この結果、最終的には舗装切削 72 箇所に関するデータにより整理を行うことになった。

最後に、72 箇所における床版上面の状況を土砂化の有無に分類した。分類に当たっては、収集した資料にある記載を踏襲することを基本とした。

表-1 橋梁諸元および供用環境に関する整理項目

種類	項目例
橋梁諸元	竣工年、上部工形式、交差物件、適用示方書、床版厚、主桁本数、主桁間隔、斜角、曲線半径、縦断勾配、横断勾配
供用環境	気象条件、大型車交通量、塩害地域区分、凍結防止剤散布量、凍害危険度、コンクリートに反応性骨材が含まれる可能性

表-2 調査箇所に関する整理項目

方向	項目	選択肢
縦断方向	位置	伸縮装置・中間支点部、その他
横断方向	位置	中央線、車道外側線、路肩、その他
	輪荷重走行位置	走行位置、非走行位置
	横断勾配	上側、下側、その他
	床版支間当たりの走行車輪数	0 輪、1 輪、1~2 輪、2 輪

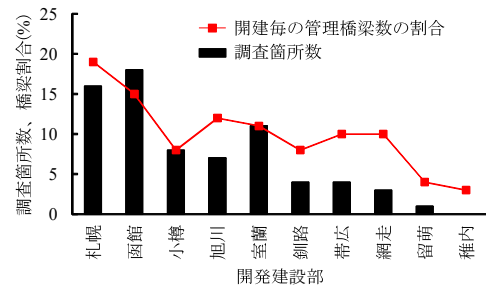


図-1 開発建設部別の調査箇所数

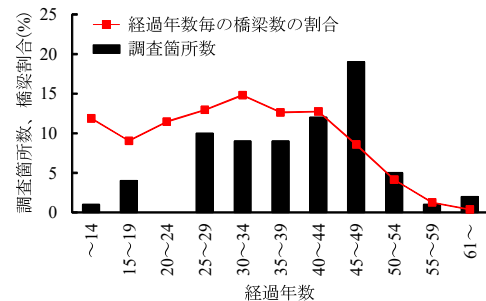


図-2 経過年数別の調査箇所数

2.3 対象データの概要

図-1 には、上記の 72 箇所を、該当橋梁を管理する開発建設部（以下、開建）別に分類した結果を、各開建の管理橋梁数の割合とともに示している。図より、対象

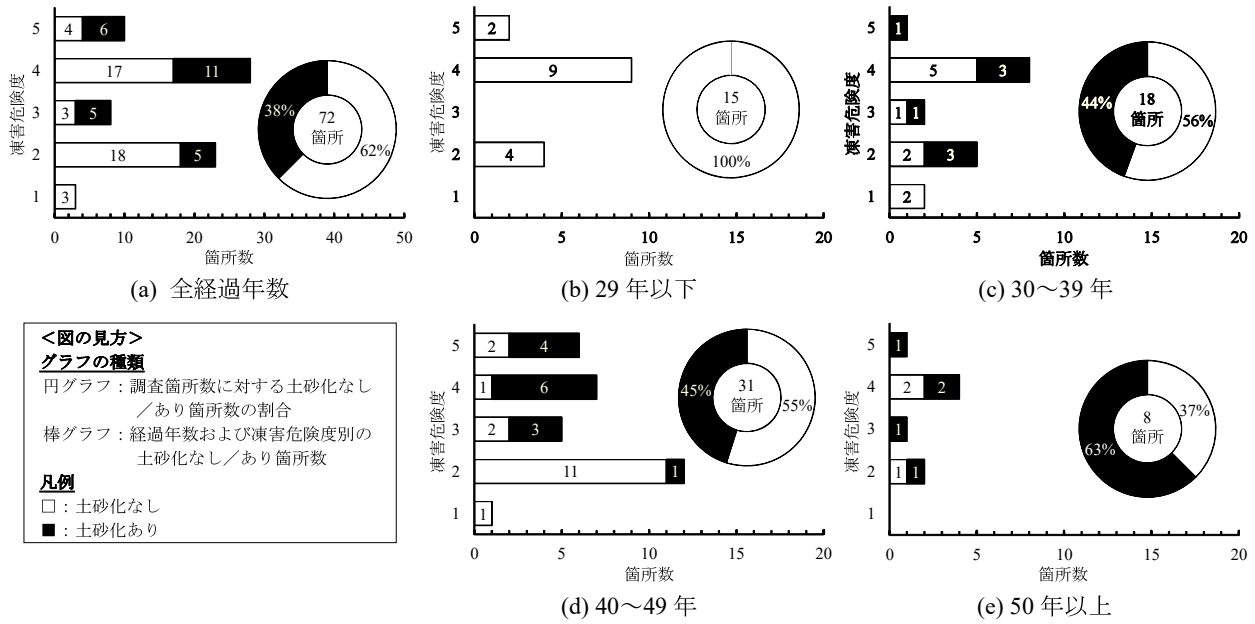


図-3 経過年数および凍害危険度の影響

とするデータは札幌開建、函館開建、室蘭開建で多く、地域毎のデータ数にはやや偏りがある。

図-2 は、竣工から調査時までの経過年数別に調査箇所数を集計した結果である。図中には、本検討で対象とした調査期間（平成 21～28 年度）の大よそ中間である、平成 25 年 4 月における北海道開発局の全管理橋梁数を経過年数別に整理した結果も示している。経過年数別に調査箇所数を見ると、調査の大半は 25～49 年が経過した橋梁で実施されており、その中でも 45～49 年が経過した橋梁での調査が全体の 30%と最も多かった。

3. 土砂化発生状況

以下には、土砂化発生状況を整理した結果の一部を説明する。

3.1 経過年数による整理

図-3 の円グラフに、調査箇所数に対する土砂化発生箇所の割合（以下、土砂化発生割合）を経過年数別に整理した結果を示す。経過年数 29 年以下の橋梁においては、調査を実施した全 15 箇所の中に土砂化が発生していた箇所は見られなかった。また、30 年以上が経過した橋梁における土砂化発生割合は、30～39 年で 44%、40～49 年で 45%、50 年以上で 63%と、経過年数が増加するにつれて調査箇所において土砂化が発生している割合が増加する。これらのことより、サンプル数のごく限られている中での整理ではあるが、経過年数 30 年以上の橋梁において舗装損傷が見られる場合には、その直下で土砂化が発生している可能性を想定した点検・調査が不可欠であり、一方で、経過年数 30 年未満の橋梁においては、舗装損傷が生じている場合であっても、その時点で耐荷性能が著しく低下するような土砂化の発生を想定した点検・調査が必要になる可能性は低いと言える。

3.2 環境条件による整理

(1) 凍害危険度

地域毎の凍害の発生しやすさを表す指標に凍害危険度³⁾があり、コンクリート構造物の健全度評価において参

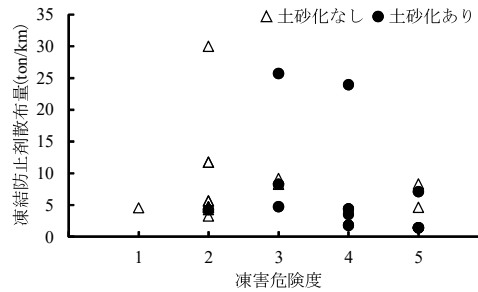


図-4 凍結防止剤散布量の影響

照されることが多い。図-3 の棒グラフには、経過年数別に集計した土砂化発生箇所数を、さらに凍害危険度別に整理した結果を示す。土砂化発生事例のある経過年数 30 年以上に着目すると、経過年数 40～49 年における凍害危険度 2 の地域での土砂化発生割合がやや低くなっている以外、凍害危険度が高くなることで土砂化発生箇所数や土砂化発生割合が極端に増加するような傾向は見られていない。北海道開発局が管理する全橋梁に対する凍害危険度別の橋梁割合は、凍害危険度 1 の橋梁が全体の 10%に満たないのを除き、凍害危険度 2～5 の橋梁がそれぞれ 20～25%程度であり母数に偏りがないことから、凍害危険度と土砂化の発生しやすさは必ずしも関連していないと言える。これは、土砂化の発生および進行が舗装や防水層といった床版上に設置される材料の劣化損傷の影響を強く受けることや、床版上面の土砂化が凍害だけでなく単に滞水条件での輪荷重走行によっても生じることに起因する。

以上より、床版の点検・調査を行う際には、凍害危険度によらず北海道のほぼ全域で一様に土砂化が発生している可能性があると考えられる必要がある。

(2) 凍結防止剤散布量

寒冷地において冬季に散布する凍結防止剤は、コンクリートの凍害やアルカリシリカ反応を促進する。そこで、土砂化発生状況と凍結防止剤散布量との関係を把握するため、調査箇所数の多い経過年数 40～49 年の橋梁に着

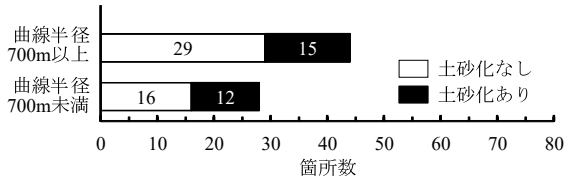


図-5 曲線半径の影響

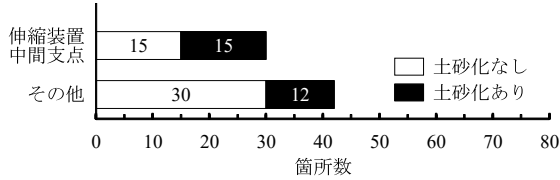


図-6 縦断方向位置の影響

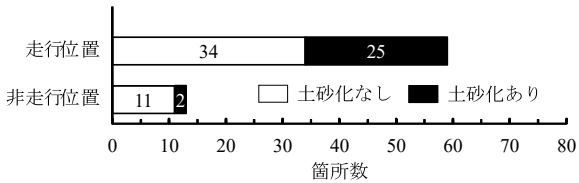


図-7 輪荷重走行位置の影響

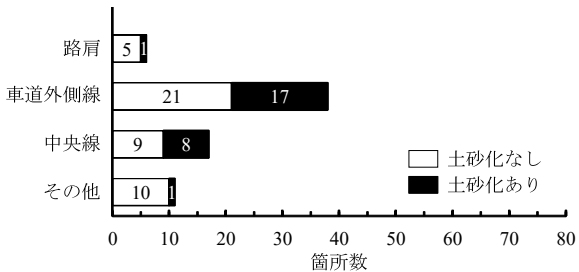


図-8 横断方向位置の影響

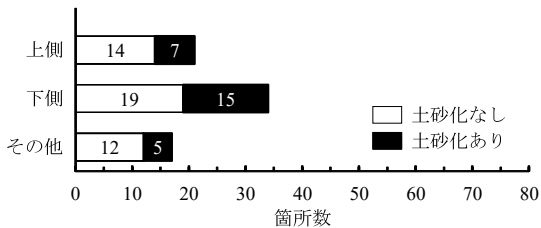


図-9 横断勾配に対する位置の影響

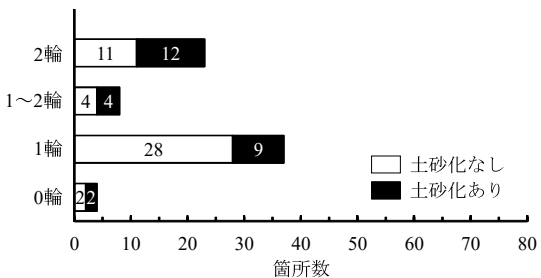


図-10 床版支間当たりの走行車輪数の影響

目し、土砂化発生の有無別に凍結防止剤散布量と凍害危険度との関係を整理した結果を図-4 に示す。ここで使用した凍結防止剤散布量は、平成 26 年度における路線毎の平均的な散布量であり、各橋梁での実散布量を表すものではない。

図より、経過年数および凍害危険度が同程度であっても調査箇所によって土砂化の発生状況が異なり、凍結防止剤散布量が多い橋梁で土砂化が発生しやすくなるよう

な傾向は見出せない。これは、前述の凍害危険度に関しても言えたことであるが、路面に散布した凍結防止剤が床版内に侵入するかどうかは舗装や防水層の状態に依存するところが大きく、単に散布量のみでは土砂化発生への影響度を押し量ることはできないものと考えられる。

3.3 構造条件に関する整理

(1) 道路線形

土砂化発生状況と構造条件の関係として、始めに曲線半径の影響に着目した。図-5 には、曲線半径 700m を閾値として土砂化発生状況を整理した結果を示す。図より、曲率半径 700m 以上と 700m 未満とで土砂化の発生箇所数は同程度であり、また、土砂化発生割合に関しては 700m 未満の場合に 40%程度と大きくなる傾向がある。北海道開発局が管理する橋梁に占める曲線半径 700m 未満の橋梁の割合が 20%程度であることを考慮すると、上記の結果からは、曲率半径が小さい橋梁では土砂化の危険度が高くなっている可能性があることを示す。この要因として、曲率半径が小さいことによるねじりモーメントや水平せん断力の増大が、舗装および床版の劣化損傷を引き起こし、その結果として水密性の低下を招いていることが挙げられる。

(2) 縦断方向の位置

図-6 に、縦断方向の位置別に土砂化発生箇所数を整理した結果を示す。一般的に、伸縮装置の近傍は大型車が段差部を通過するときに衝撃力が作用し、さらに伸縮装置が縦断勾配の下側になる場合には滞水の影響が顕著になることから、床版の劣化が早期に生じる箇所とされる。一方で、本整理における土砂化発生箇所は、伸縮装置あるいは中間支点部で 15 箇所、その他で 12 箇所となっており、伸縮装置付近に限らず縦断方向全体にわたって土砂化が発生している結果であった。

(3) 横断方向の位置

図-7 および 8 は、輪荷重走行位置別および横断方向の位置別に土砂化発生箇所数を整理した結果である。図より、本整理で確認された土砂化のうち 90%以上が輪荷重走行位置に集中して発生しており、横断方向の位置別では車道外側線付近が 17 箇所と最も多く、次いで多いのが中央線付近の 8 箇所であった。また、図-9 には、横断勾配に対する位置に着目して土砂化発生箇所数を整理した結果を示しており、降水の排出先となる横断勾配の下側で土砂化が発生しやすいことがわかる。

本整理において、全ての土砂化発生箇所 (27 箇所) の半数以上の 15 箇所が「輪荷重走行位置」および「横断勾配下側」の両者に当てはまっており、この結果は、滞水が生じやすい輪荷重走行位置で土砂化が発生しやすいことを示している。また、本整理では、横断勾配に対する位置を整理するとき、中央線付近を「上側」または「その他」に分類したが、実際には舗装目地との位置関係から床版上に水が供給されやすい箇所になる。したがって、「滞水の影響を受けるか否か」の観点で整理すると、輪荷重走行と水の組合せによって土砂化が発生しやすいことがより明確になることが推察される。

(4) 輪荷重走行位置と主桁配置

図-10 に、床版支間当たりの走行車輪数別に土砂化

表-3 土砂化発生状況のまとめ

整理項目		土砂化発生状況	土砂化発生への影響度
経過年数		竣工後 30 年以上が経過した橋梁において発生している	大
環境条件	凍害危険度	凍害危険度によらず発生している	小
	凍結防止剤散布量	土砂化発生状況との間に関係性は見られない	小
構造条件	曲線半径	曲率半径が小さい橋梁で発生しやすい	大
	縦断方向位置	縦断方向の位置によらず発生している	小
	横断方向位置	滞水および輪荷重の作用を同時に受ける箇所、同一床版支間内に左右 2 輪が走行する主桁・走行車線配置となる橋梁で発生しやすい	大

発生箇所数を整理した結果を示しており、土砂化発生箇所数および土砂化発生割合から、床版支間当たりの走行車輪数が 2 輪となる箇所でも多くの土砂化が発生していることがわかる。さらに、そのうちのほとんどは、3 主桁からなる鋼鈹桁橋において同一床版支間内の主桁近傍に左右 2 輪が走行する主桁・走行車線配置の橋梁で起きていた。過去に報告されている床版抜け落ち事例の中に、同様の条件で発生しているものは多くあり⁴⁾、「3 主桁かつ同一支間内に左右 2 輪が走行する」条件は、床版の土砂化のみならず、抜け落ちにも進展しやすい条件であると言える。上記の主桁および車線の配置において土砂化が発生しやすい要因としては、主桁上に発生する負の曲げモーメントによる舗装および床版上面のひび割れ、あるいは、主桁拘束（ジベルやスラブ止めによる拘束）により発生する初期の乾燥収縮ひび割れ等に起因し、床版内に水が浸入しやすい状態が形成されていることが挙げられる。また、床版の抜け落ちに関しては、主桁近傍を走行することでせん断力が卓越すること、主桁近傍では支間中央部と比較して配筋鉄筋量が減じられていること⁹⁾、ハンチ部での鉄筋曲げ上げ⁹⁾により断面急変部となっていること等の要因が推察される。

3.4 整理結果のまとめ

上記において土砂化発生状況を整理した結果をまとめると表-3 のようになり、床版上面の土砂化が構造的要因の影響を強く受けて発生していることが示唆される結果となった。

凍害やアルカリシリカ反応、塩害といった材料劣化が著しく進行したコンクリート構造物に対しては、環境条件に着目して劣化要因の調査および健全度の評価が行われる傾向が強い。一方で、本整理の結果は、舗装や防水層によって上面が覆われている床版で発生する土砂化を点検・調査する場合には、材料劣化の発生やすさに関連する環境条件もさることながら、材料劣化の要因となる水の浸入経路（舗装のうきやひび割れ、床版上面のひび割れ）の発生やすさに関連する構造条件に着目することがより重要になることを示していると考えられる。

4. おわりに

本研究では、北海道内における RC 床版の土砂化発生状況を整理した。その結果、得られた知見を以下にまとめる。

1) 対象とした 58 橋 72 箇所に対する土砂化調査事例において、竣工後の経過年数が 30 年未満の橋梁で土砂

化が発生している事例は見られなかった。

- 2) コンクリートの凍害の発生しやすさと関連のある凍害危険度および凍結防止剤散布量に関しては、土砂化発生状況との間に一定の傾向を見出すことができなかった。
- 3) 構造条件に着目すると、滞水と輪荷重走行の影響を同時に受ける場合に加え、曲線半径が小さい橋梁や床版支間当たりに左右 2 輪が走行する主桁配置となる橋梁において土砂化事例が多いことがわかった。
- 4) 上記より、床版上面の土砂化を効率的に点検・調査するためには、構造条件に着目することがより重要になることを示した。

最後に、本研究は、舗装の部分切削部での目視調査結果を基に、極限られた事例に対し土砂化発生状況を整理した結果である。今後は、本整理で対象とした項目以外の他の環境および構造条件はもちろんのこと、鋼鈹桁以外を上部構造とする橋梁にも分析範囲を広げるなどしてデータの充実を図ることで、土砂化発生に及ぼす各種条件の影響度を明確にしていきたい。さらに、その結果を基に、床版の点検・調査時における着目点を体系的に整理することを目指す。

謝辞

本研究の実施にあたり、北海道開発局には多大なるご協力いただきました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 國松博一、山谷直孝、澤松俊寿：一般国道 275 号志寸川橋の床版陥没について—陥没の発生から復旧まで—、国土交通省北海道開発局第 56 回（平成 24 年度）北海道開発技術研究発表会、2013。
- 2) 小野貴之：積雪寒冷地における既設橋梁 RC 床版の疲労耐久性に関する実験的研究、2009。
- 3) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技術年報 XXIX、pp.248-253、1975。
- 4) 菊地智宏、神康英、木下正俊：一般国道 237 号振内橋の損傷と対策について、国土交通省北海道開発局第 58 回（平成 26 年度）北海道開発技術研究発表会、2015。
- 5) 例えば、日本道路協会：道路橋示方書、1972。

平成29年度

北海道における床版上面劣化の発生傾向の整理

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○白戸義孝
角間 恒
西 弘明

寒冷地における道路橋RC床版の維持管理では、コンクリートの土砂化や層状ひび割れといった上面側から発生する劣化を早期に発見することが重要になる。本研究では、床版上面を点検・調査する時の着目点を整理することを目的に、北海道内において舗装切削を伴う床版上面の劣化状況調査ならびにコア採取によるひび割れ調査が行われた事例を収集し、土砂化や層状ひび割れの発生傾向を整理した。

キーワード：床版、土砂化、発生傾向

1. はじめに

道路橋 RC 床版（以下、床版）の劣化は、複数の要因が複合して作用することで発生している場合が多い。北海道においては、凍害等に起因する上面の土砂化の発生・進行が顕著であり、輪荷重走行との複合作用により抜け落ちに至ることもある。

膨大な量の床版を効率的に点検・調査するためには劣化損傷箇所のスクリーニングが不可欠であるが、土砂化に関しては発生傾向が必ずしも明確になっていない。これは、既往の調査事例のほとんどが、外観調査や材料試験に基づく個々の橋梁での劣化状況調査に留まり、土砂化が発生している橋梁や床版部位の特徴を統一的に整理できていないことに原因があると考えられる。

本研究では、床版上面の土砂化発生傾向を把握し、点検・調査を効率的に行ううえでの基礎資料を得るため、北海道内の国道橋において舗装切削による床版上面の目視調査が行われた事例を収集し、環境条件および構造条件の観点から土砂化が発生しやすい条件を整理した。

表-1 橋梁諸元および供用環境に関する整理項目

種類	項目例
橋梁諸元	竣工年、上部工形式、交差物件、適用示方書、床版厚、主桁本数、主桁間隔、斜角、曲線半径、縦断勾配、横断勾配
供用環境	気象条件、大型車交通量、塩害地域区分、凍結防止剤散布量、凍害危険度、コンクリートに反応性骨材が含まれる可能性

表-2 調査箇所に関する整理項目

方向	項目	選択肢
縦断方向	位置	伸縮装置・中間支点部、その他
横断方向	位置	中央線、車道外側線、路肩、その他
	輪荷重走行位置	走行位置、非走行位置
	横断勾配	上側、下側、その他
	床版支間当たりの走行車輪数	0 輪、1 輪、1~2 輪、2 輪

2. 整理方法

(1) 対象データ

本検討では、北海道開発局が管理する道路橋のうち、RC 床版を床版形式とする鋼桁橋を上部構造とし、かつ、平成 21~28 年度に舗装損傷箇所に対して部分切削による床版上面の劣化状況調査が行われた橋梁を対象とした。以降では、平成 29 年 4~9 月の間に収集できた 58 橋分の調査結果を基に土砂化の発生傾向を整理する。

(2) 整理項目

土砂化発生傾向の整理に際し、まず対象とする 58 橋

に関して、表-1 を基に橋梁諸元や供用環境を整理した。次に、「床版のどの箇所で調査が行われているか」を分類するため、表-2 から選択する方法により、調査が実施された縦横断方向の位置や輪荷重走行位置との関係性等を整理した。なお、同一橋梁内において調査箇所の特徴が類似する複数箇所でも調査が行われている場合には、土砂化が最も進行している 1 箇所のみを抽出した。この結果、最終的には舗装切削 72 箇所に関するデータにより整理を行うことになった。最後に、72 箇所における床版上面の状況を、土砂化の有無に分類した。分類に当たっては、収集した資料にある記載を踏襲した。

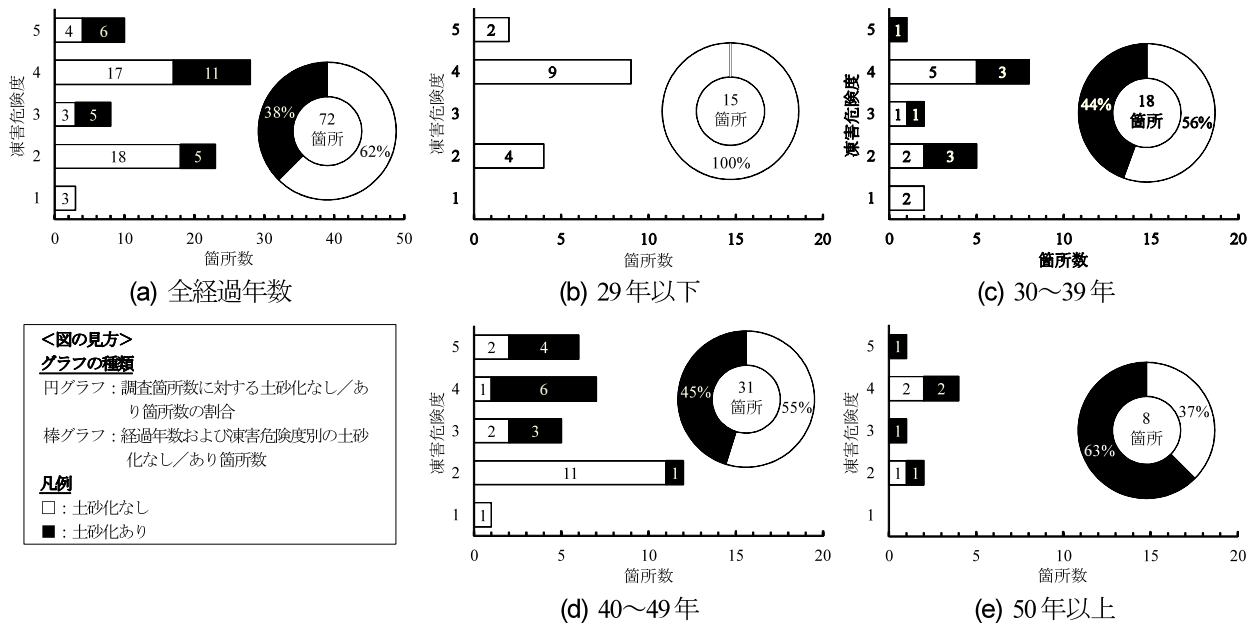


図-3 経過年数および凍害危険度の影響

3. 土砂化発生状況

以下には、土砂化発生状況を整理した結果の一部を説明する。

(1) 経過年数による整理

図-3の円グラフに、調査箇所数に対する土砂化発生箇所の割合（以下、土砂化発生割合）を経過年数別に整理した結果を示す。経過年数29年以下の橋梁においては、調査を実施した全15箇所の中に土砂化が発生していた箇所は見られなかった。また、30年以上が経過した橋梁においては、経過年数が増加するにつれて調査箇所において土砂化発生割合が増加する。これらのことより、サンプル数のごく限られている中での整理ではあるが、経過年数30年以上の橋梁において舗装損傷が見られる場合には、その直下で土砂化が発生している可能性を想定した点検・調査が不可欠であり、一方で、経過年数30年未満の橋梁においては、舗装損傷が生じている場合であっても、その時点で耐荷性能が著しく低下するような土砂化の発生を想定した点検・調査が必要になる可能性が低いことを表している。

(2) 環境条件による整理

a) 凍害危険度

地域毎の凍害の発生しやすさを表す指標に凍害危険度²⁾があり、コンクリート構造物の健全度評価において参照されることが多い。図-3の棒グラフには、経過年数別に集計した土砂化発生箇所数を、さらに凍害危険度別に整理した結果を示す。土砂化発生事例のある経過年数30年以上に着目すると、経過年数40~49年における凍害危険度2の地域での土砂化発生割合がやや低くなって

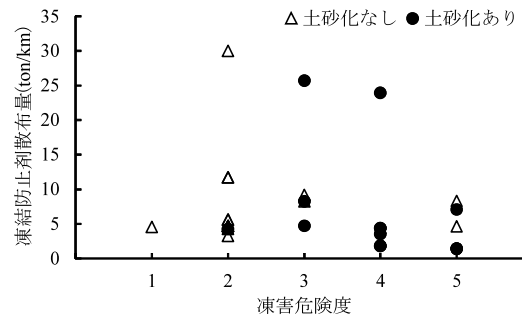


図-4 凍結防止剤散布量の影響

いる以外、凍害危険度が高くなることで土砂化発生箇所数や土砂化発生割合が極端に増加するような傾向は見られていない。北海道開発局が管理する全橋梁に対する凍害危険度別の橋梁割合は、凍害危険度1の橋梁が全体の10%に満たないのを除き、凍害危険度2~5の橋梁がそれぞれ20~25%程度であり母数に偏りが無いことから、凍害危険度と土砂化の発生しやすさは必ずしも関連していないと言える。これは、土砂化の発生が床版上に設置される舗装や防水層の劣化損傷の影響を強く受けることや、床版上面の土砂化が凍害だけでなく単に滞水条件での輪荷重走行によっても生じることに起因する。

以上より、床版の点検・調査を行う際には、凍害危険度によらず北海道のほぼ全域で一様に土砂化が発生している可能性があると考えられる必要がある。

b) 凍結防止剤散布量

寒冷地において冬季に散布する凍結防止剤は、コンクリートの凍害やアルカリシリカ反応を促進する。そこで、土砂化発生状況と凍結防止剤散布量との関係を把握するため、調査箇所数の多い経過年数40~49年の橋梁に着目し、土砂化発生の有無別に凍結防止剤散布量と凍害危険度との関係を整理した結果を図-4に示す。ここで使

用した凍結防止剤散布量は、平成 26 年度における路線毎の平均的な散布量であり、各橋梁での実散布量を表すものではない。

図より、経過年数および凍害危険度が同程度であっても調査箇所によって土砂化の発生状況が異なり、凍結防止剤散布量が多い橋梁で土砂化が発生しやすくなるような傾向は見出せない。これは、前述の凍害危険度に関しても言えたことであるが、路面に散布した凍結防止剤が床版内に侵入するか否かは舗装や防水層の状態に依存するところが大きく、単に散布量のみでは土砂化発生への影響度を推し量ることはできないものと考えられる。

(3) 構造条件に関する整理

a) 道路線形

土砂化発生状況と構造条件の関係として、まず曲線半径の影響に着目した。図-5 には、曲線半径 700m を閾値として土砂化発生状況を整理した結果を示す。図より、曲線半径 700m 以上と 700m 未満とで土砂化の発生箇所数は同程度であり、また、土砂化発生割合に関しては 700m 未満の場合に大きくなる傾向がある。北海道開発局が管理する橋梁に占める曲線半径 700m 未満の橋梁の割合が 20%程度であることを考慮すると、上記の結果から、曲線半径が小さい橋梁では土砂化の危険度が高くなっている可能性がある。この要因として、曲線半径が小さいことによるねじりモーメントや水平せん断力の増大が舗装および床版の劣化損傷を引き起こし、その結果として、水密性の低下を招いていることが挙げられる。

b) 縦断方向の位置

図-6 に、縦断方向の位置別に土砂化発生箇所数を整理した結果を示す。一般的に、伸縮装置の近傍は大型車が段差部を通過するときに衝撃力が作用し、さらに伸縮装置が縦断勾配の下側になる場合には滞水の影響が顕著になるため、床版の劣化が早期に生じる箇所とされる。一方で、本整理における土砂化発生箇所は、伸縮装置あるいは中間支点部で 15 箇所、その他で 12 箇所となっており、伸縮装置付近に限らず縦断方向全体にわたって土砂化が発生している結果であった。

c) 横断方向の位置

図-7 および図-8 は、輪荷重走行位置別および横断方向の位置別に土砂化発生箇所数を整理した結果である。図より、本整理で確認された土砂化のうち 90%以上が輪荷重走行位置に集中して発生しており、横断方向の位置別では車道外側線付近が 17 箇所と最も多く、次いで多いのが中央線付近の 8 箇所であった。また、図-9 には、横断勾配に対する位置に着目して土砂化発生箇所数を整理した結果を示しており、降水の排出先となる横断勾配の下側で土砂化が発生しやすいことがわかる。

本整理では、全土砂化発生箇所（27 箇所）の半数以上の 15 箇所が「輪荷重走行位置」と「横断勾配下側」の両者に当てはまっており、この結果は、滞水が生じや

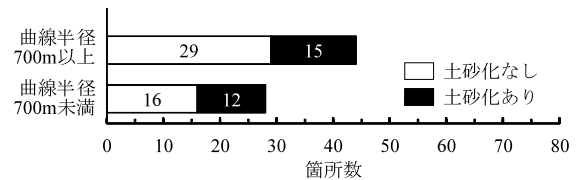


図-5 曲線半径の影響

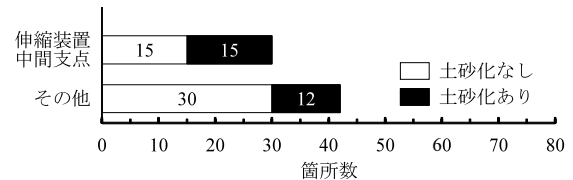


図-6 縦断方向位置の影響

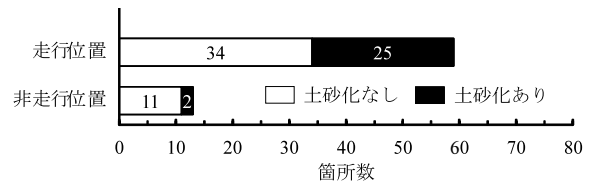


図-7 輪荷重走行位置の影響

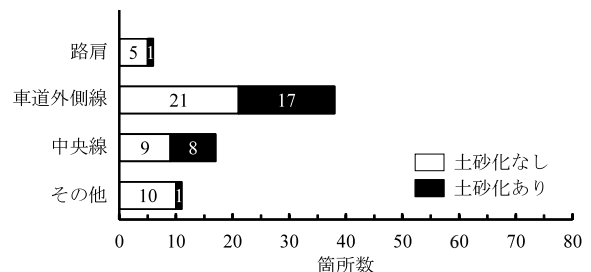


図-8 横断方向位置の影響

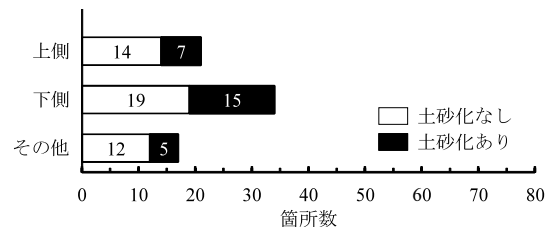


図-9 横断勾配に対する位置の影響

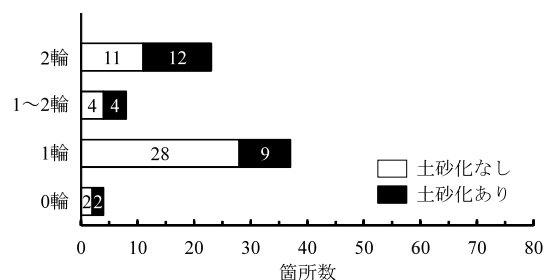


図-10 床版支間当たりの走行車輪数の影響

すい輪荷重走行位置で土砂化が発生しやすいことを意味する。また、本整理では、横断勾配に対する位置を整理するとき、中央線付近を「上側」または「その他」に分類したが、実際には舗装目地との位置関係から床版上に水が供給されやすい箇所になる。したがって、「滞水の影響」の観点で整理すると、輪荷重走行と水の組合せによって土砂化が発生しやすいことがより明確になる。

表-3 土砂化発生状況のまとめ

整理項目		土砂化発生状況	土砂化発生への影響度
経過年数		竣工後 30 年以上が経過した橋梁において発生している	大
環境条件	凍害危険度	凍害危険度によらず発生している	小
	凍結防止剤散布量	土砂化発生状況との間に関係性は見られない	小
構造条件	曲線半径	曲率半径が小さい橋梁で発生しやすい	大
	縦断方向位置	縦断方向の位置によらず発生している	小
	横断方向位置	滞水および輪荷重の作用を同時に受ける箇所、同一床版支間内に左右 2 輪が走行する主桁・走行車線配置となる橋梁で発生しやすい	大

d) 輪荷重走行位置と主桁配置

図-10 に、床版支間当たりの走行車輪数別に土砂化発生箇所数を整理した結果を示しており、土砂化発生箇所数および土砂化発生割合から、床版支間当たりの走行車輪数が 2 輪となる箇所が多く土砂化が発生していることがわかる。さらに、そのほとんどは、3 主桁からなる鋼鉄桁橋において同一床版支間内の主桁近傍に左右 2 輪が走行する主桁・走行車線配置の橋梁で起きていた。過去に報告されている床版抜け落ち事例の中に、同様の条件で発生しているものは多くあり、「3 主桁かつ同一支間内に左右 2 輪が走行する」条件は、床版の土砂化のみならず、抜け落ちにも進展しやすい条件であると言える。上記の主桁および車線の配置において土砂化が発生しやすい要因としては、主桁上に発生する負の曲げモーメントによる舗装および床版上面のひび割れ、あるいは、主桁拘束（ジベルやスラブ止めによる拘束）により発生する初期の乾燥収縮ひび割れ等に起因し、床版内に水が浸入しやすい状態が形成されていることが挙げられる。

e) 整理結果のまとめ

上記において土砂化発生状況を整理した結果を表-3 まとめる。凍害やアルカリシリカ反応といった材料劣化が著しく進行したコンクリート構造物に対しては、環境条件に着目して劣化要因の調査および健全度の評価が行われる傾向が強い。一方で、本整理の結果は、舗装や防水層によって上面が覆われている床版で発生する土砂化を点検・調査する場合には、環境条件もさることながら、材料劣化の要因となる水の浸入経路（舗装のうきやひび割れ、床版上面のひび割れ）の発生しやすさと関連する構造条件に着目することがより重要になることが示唆される結果が得られた。

4. おわりに

本研究では、北海道内における RC 床版の土砂化発生状況を整理した。得られた知見を以下にまとめる。

1) 対象とした 58 橋 72 箇所に対する土砂化調査事例において、竣工後の経過年数が 30 年未満の橋梁で土砂化が発生している事例は見られなかった。

- 2) コンクリートの凍害の発生しやすさと関連のある凍害危険度および凍結防止剤散布量に関しては、土砂化発生状況との間に一定の傾向を見出すことができなかった。
- 3) 構造条件に着目すると、滞水と輪荷重走行の影響を同時に受ける場合に加え、曲線半径が小さい橋梁や床版支間当たりに左右 2 輪が走行する主桁配置となる橋梁において土砂化事例が多いことがわかった。
- 4) 上記より、床版上面の土砂化を効率的に点検・調査するためには、構造条件に着目することがより重要になることを示した。

本研究は、舗装の部分切削部での目視調査結果を基に、極限られた事例に対し土砂化発生状況を整理した。今後は、本整理で対象とした項目以外の環境および構造条件はもちろんのこと、鋼鉄桁以外を上部構造とする橋梁にも分析範囲を広げるなどしてデータの充実を図る。これにより、土砂化発生に及ぼす各種条件の影響度をより明確にし、その結果を基に、床版の点検・調査時における着目点を体系的に整理する。

謝辞

本研究に使用したデータは国土交通省北海道開発局よりご提供いただきました。また、データ整理に際しては、北海道大学工学部の松本高志教授および松田有加氏にご協力いただきました。ここに付記し、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 國松博一、山谷直孝、澤松俊寿：一般国道 275 号志寸川橋の床版陥没について—陥没の発生から復旧まで—、国土交通省北海道開発局第 56 回（平成 24 年度）北海道開発技術研究発表会、2013。
- 2) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技術年報 XXIX、pp.248-253、1975。
- 3) 菊地智宏、神康英、木下正俊：一般国道 237 号振内橋の損傷と対策について、国土交通省北海道開発局第 58 回（平成 26 年度）北海道開発技術研究発表会、2015。

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

Heat conduction analysis of steel-concrete composite decks under freeze-thaw environment

松本高志*, 藤田隼生**, 林川俊郎***, 表真也****, 久保圭吾*****

Takashi Matsumoto, Hayao Fujita, Toshiro Hayashikawa, Shinya Omote, Keigo Kubo

*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)

takashim@eng.hokudai.ac.jp

**北海道大学, 工学院北方圏環境政策工学専攻 (同上)

***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 (同上)

****寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

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

This paper investigates the temperature distribution of four steel-concrete composite decks and one RC deck under freeze-thaw temperature by laboratory experiment and finite element analysis. Differences of temperature distribution among five decks are discussed, and the comparison between experiment and analysis is made. There is a good agreement between analysis and experiment, and it is found that differences arise due to structural details. Furthermore, the amount of freeze-thaw in concrete is estimated for two simplified cases, and it is found that environmental conditions affect the temperature distribution inside the decks together with structural details.

Key Words: composite deck, heat conduction analysis, freeze-thaw environment

キーワード: 合成床版, 熱伝導解析, 凍結融解環境

1. はじめに

積雪寒冷地におけるRC床版では、凍害により床版上面のコンクリートが劣化損傷を受けている事例が報告されている¹⁾。こうした事例では、アスファルト舗装下においてかぶりコンクリートが砂利化し、場合によってはコンクリートが抜け落ちて路面陥没している。その原因として、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、長期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ールリングが発生し、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。

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)は高強度、高耐久性、施工省力化を利点としており、多数の採用事例が報告されている²⁾。合成床版における凍害劣化の研究はRC床版と比較してあまり行われていないが、熱伝導率の大きな鋼材がコンクリート内部に埋め込まれていること、コンクリート中の水分移動に対して底鋼板などの鋼材が存在することなど、

気温や日射等の環境条件の変化が合成床版のコンクリート温度については凍結融解に影響を及ぼすことが考えられるため、合成床版について凍害劣化の調査研究が必要とされている。

本研究では、まず、4種類の鋼コンクリート合成床版に対する凍結融解温度域における熱伝導実験を対象として、有限要素法を用いた熱伝導解析を実施した。これにより、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実験と比較検討している。次に、鋼コンクリート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する。これにより、合成床版の断面構成と周辺気温条件の影響を検討する。なお、ここでは基礎的な段階として、解析において応力やひずみ、さらにはスケールリングなどの損傷は考慮していないことを付け加えておく。

2. 合成床版の熱伝導実験の概要

本章では、第3章にて解析対象とする合成床版の熱伝導実験について概要を述べる。2.1節では供試体寸法および実験方法について述べ、各種合成床版の供試体、温度計測位置、温度条件について説明する。2.2節では熱伝導実験の結果について、供試体の中央位置とリブ位置の2箇所の温度分布について述べる。

2.1 供試体寸法および実験方法

(1) 供試体

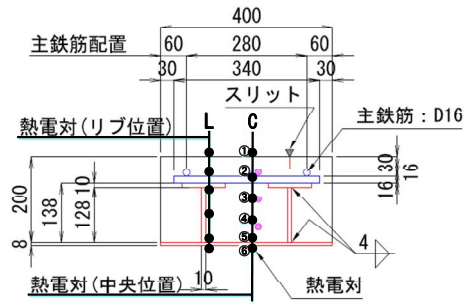
合成床版には大別して形鋼、帯鋼、ロビンソン、トラスの4種類がある。実験ではこの4種類のタイプの供試体と比較のためのRC床版を加えた計5種類の供試体を用いた。各種合成床版のコンクリートは乾燥収縮によるひび割れを抑制するため、膨張剤を添加した圧縮強度 30N/mm^2 のものを使用しており、RC床版については圧縮強度 24N/mm^2 の標準配合のものを使用している。

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 $400\text{mm} \times$ 橋軸直角方向 $350\text{mm} \times$ 床版厚 208mm の実物大モデルとした(図-1)。舗装は含まれていないが、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 30mm 程度内側に据えた上で、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。

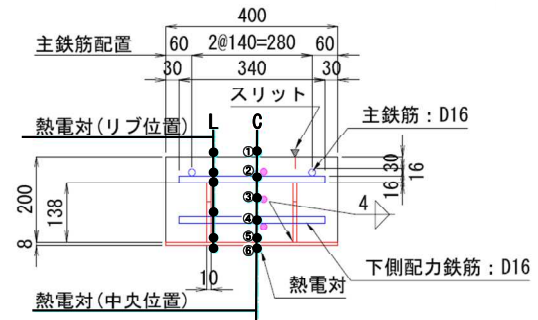
(2) 温度計測位置

供試体内部温度を計測するための熱電対の取り付け位置は、中央位置と鋼材が配置されているリブ位置の2箇所となっている。中央位置では床版上面から 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、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。また、試験器内の温度も合わせて計測している。計測は実験開始から供試体内部温度が定常化するまで5分間隔で行った。

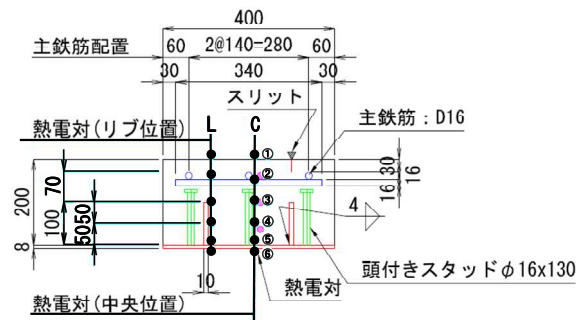
合成床版の種類によりリブ形状が異なるため、リブ位置の熱電対取り付け位置は異なる。各供試体の計測位置を図-1に示す。形鋼(図-1(a))では、リブ鋼板に沿った熱電対は、リブ鋼板の高さが 138mm であることから、熱電対は底鋼板上面から 0mm 、 64mm 、 128mm の高さに配置されている。帯鋼(図-1(b))に関しては、リブ鋼板沿いの熱電対が底鋼板上面から 0mm 、 69mm 、 138mm の位置にあり、またリブ中段の計測位置では鋼板に開けられた孔を通る鉄筋に接触させるようにしている。ロビンソン(図-1(c))では中央にスタッドが配置されているため、熱電対は中央から 30mm 程度離れてあり、これを中央位置と呼ぶ。また、リブ鋼板沿いの熱電対位置はリブ鋼板の高さが 100mm であることから、底鋼板上面から 0mm 、 50mm 、 100mm の位置となっている。トラス



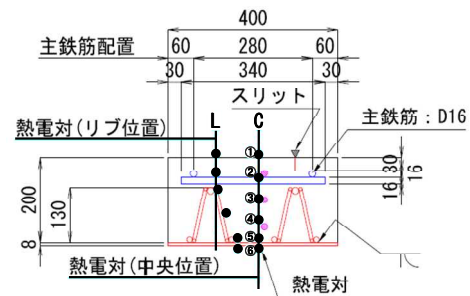
(a) 形鋼



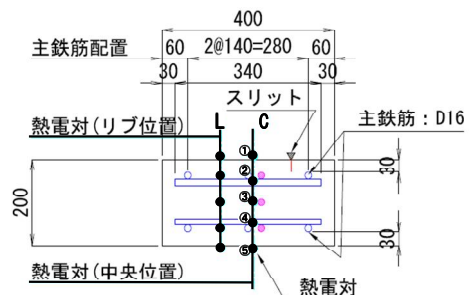
(b) 帯鋼



(c) ロビンソン



(d) トラス



(e) RC

図-1 各供試体の温度計測位置

ス(図-1(d))では、リブ位置の計測はトラス斜材に沿った位置で行われる。RC床版(図-1(e))には鋼材部が無いので、中央位置から70mm程度離れた場所をリブ位置と呼ぶ。計測位置は床版上面、上側鉄筋、床版中段、下側鉄筋、床版下面となっている。

(3) 温度条件

温度条件は供試体内部の温度分布が明瞭になる急冷条件である。供試体を環境試験器内に静置して、試験器内温度を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。温度勾配は20℃と-20℃の間を30分で変化させる急冷条件とし、試験器内温度が-20℃となった後は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-2に示す。

2.2 実験結果

実験で得られた供試体中央位置およびリブ位置での厚さ方向温度分布を図-3と図-4に示す。

(1) 中央位置における温度分布

図-3では、試験開始から6時間後までは1時間ごとに計測結果を示しており、その後は8, 10, 12, 16, 20, 24時間後の結果を示している。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である。

供試体間において初期温度や床版上下面の温度推移に若干の差があることに留意が必要である。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。逆に下面側は直接冷気が当たらないためか温度の低下が遅く、供試体間の差も大きくなっている。

中央位置における中央高さでの温度推移の比較を図-5に示す。本実験の範囲内では合成床版とRC床版の間に大きな差は見られず、大きくとも3℃以内であった。僅かの差であるが、RC、次いで帯鋼の温度低下が早い。

(2) リブ位置における温度分布

図-4にリブ位置での厚さ方向温度分布を示す。図の読み方は中央位置と同様であり、留意点についても同様である。全体としてリブ鋼板沿いの計測位置では、中央

位置と比較して温度分布がなだらかである。例えば、1時間経過後のリブ上端、中段、下端の温度差は、トラスを除いて約3℃以内に収まっている。また、若干温度が低下しやすいことから、鋼材の影響が確認できる。

しかしながら、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い。合成床版間の比較では中央位置と同様に帯鋼の温度低下が僅かながら早い。一方、中央位置よりも床版上下面における温度推移の供試体間での差は大きく、特に下面側においては1時間経過後で最大10℃近くの差がある(図-4の形鋼とトラス)。本来、供試体の表面温度を全供試体において一様に推移させなければならないが、この差が床版内の温度分布に影響を与えている可能性があるため、供試体間での比較検討は慎重に行わなければならない。

3. 合成床版の熱伝導解析

本章では、第2章で述べた各種鋼コンクリート合成床版の熱伝導実験について、有限要素法による熱伝導解析の結果と比較検討する。3.1節では解析モデル、境界条件、材料特性について述べる。また、3.2節では実験結果と解析結果の比較を行い、各種合成床版の温度分布性状について検討する。

3.1 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形鋼、帯鋼、ロビンソン、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、ロビンソンのスタッド、トラスの斜材SWRMで、梁要素は1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、スタッド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

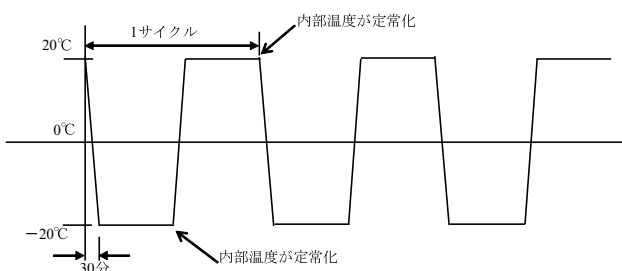
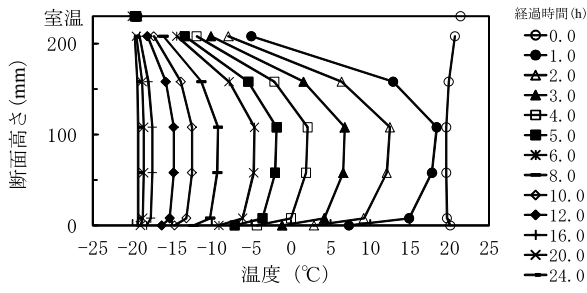
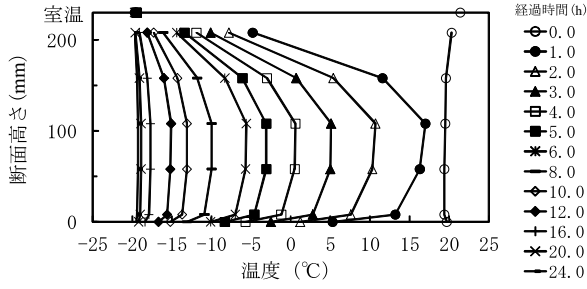


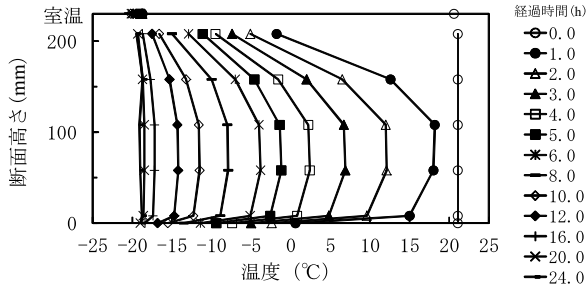
図-2 試験器内温度



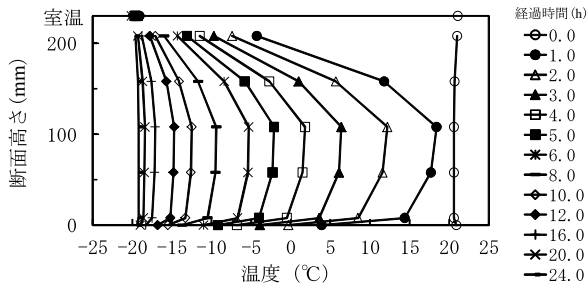
(a) 形鋼



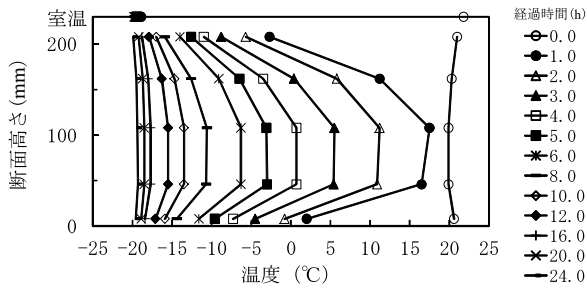
(b) 帯鋼



(c) ロビンソン

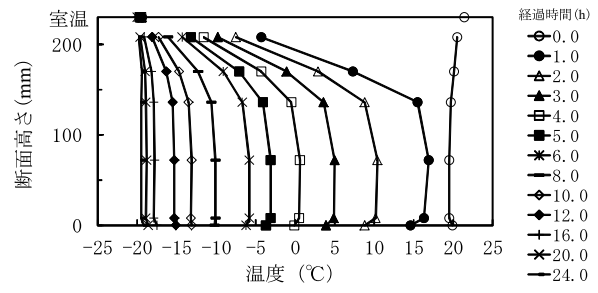


(d) トラス

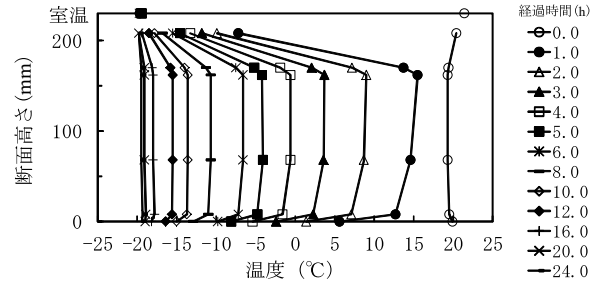


(e) RC

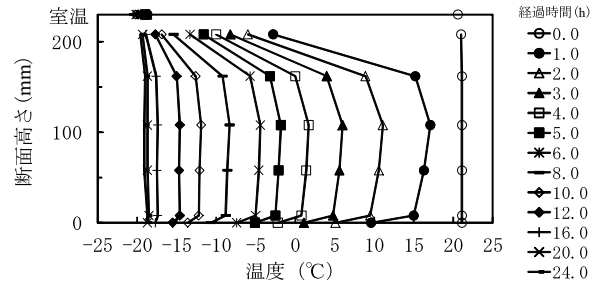
図-3 中央位置における厚さ方向の温度分布



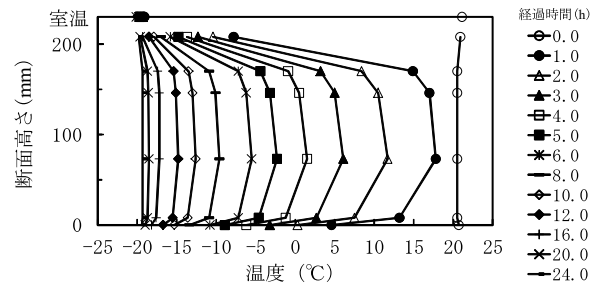
(a) 形鋼



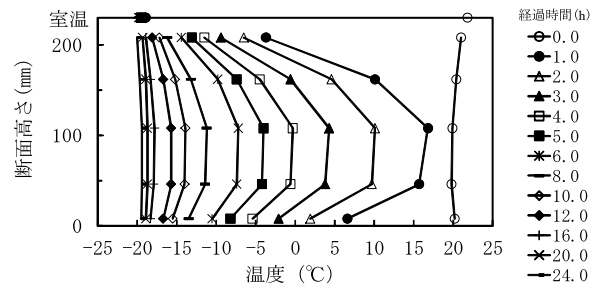
(b) 帯鋼



(c) ロビンソン



(d) トラス



(e) RC

図-4 リブ位置における厚さ方向の温度分布

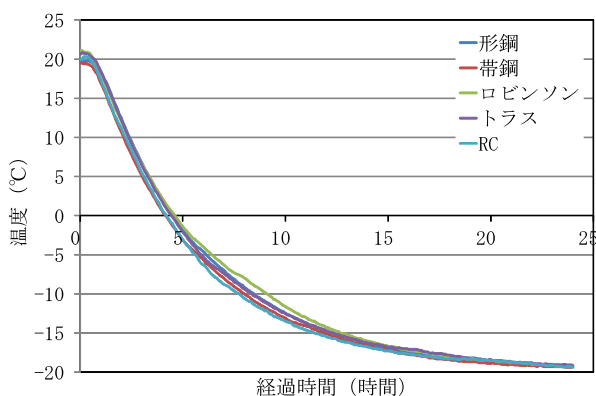


図-5 中央位置中央高さにおける温度推移

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

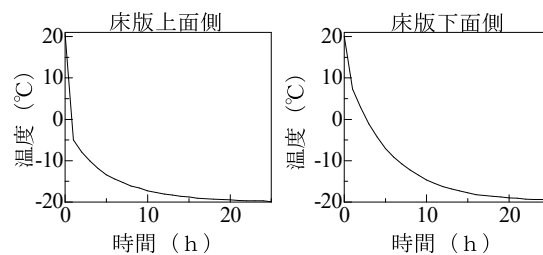


図-6 床版上下面側の境界条件の一例

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×床版厚さ方向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。

ソリッド要素部の要素数は29400、節点数は32472であり、梁要素数はモデルによって異なる。上記の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°C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°Cまで変化させた。境界条件を図-6に示す。床版下面側は底鋼板下面ではなく底鋼板上面の節点温度を変化させているが理由は3.2節(1)項で述べる。また、モデルの側面は断熱境界条件とした。

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する。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。温度取得は解析開始から6時間後までは1時間ごとに、その後は8、10、12、16、20時間経過後に行う。

(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-3に示す。

3.2 解析結果

(1) 底鋼板上下面の温度

形鋼タイプの床版下面側の境界条件として、底鋼板下

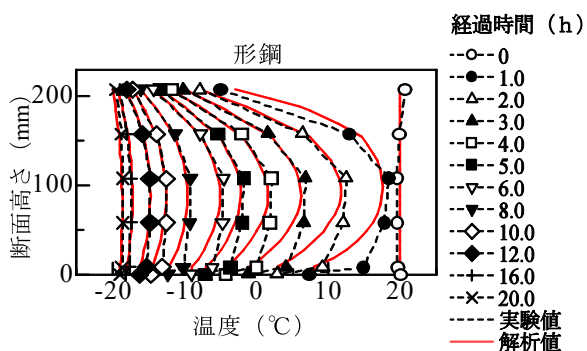


図-7 床版下面側境界条件を底鋼板下面とした場合

面の節点温度とした場合の温度分布を図-7に示す。一方で、底鋼板上面の節点温度とした場合の形鋼タイプの温度分布は図-8に含まれている。実験結果において、底鋼板の上面と下面で大きな温度差が観察される。これは図-8と図-9にあるように、形鋼タイプのリブ位置を除いて全ての実験結果に見られる。

前者の境界条件の場合、床版上面より鉄筋位置までは実験値を良く再現しているが、リブ上段から底鋼板上面までにおいて実験値と解析値に大きなずれが生じている。また、解析による温度は底鋼板上面と下面でほとんど変わらない。一方で後者の境界条件では、底鋼板下面の一致は無論得られないものの、内部の温度分布については前者より良好に再現していると判断できる。これはおそらく実験供試体には底鋼板とコンクリートが完全に連続しておらず、間隙により熱伝導が抑えられている可能性が考えられる。

(2) 中央位置における温度分布

中央位置における経過時間ごとの温度分布を図-8に示す。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内での供試体配置上、下面側の温度低下は遅くなる傾向がある。一方で、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。

(3) 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-9に示す。図の形式は図-8に準ずる。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。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位置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。

(4) 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-10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と同時間でのリブ位置—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はこれ以上の温度差は生まれにくいと考えられる。

4. 合成床版の凍結融解挙動のパラメトリックスタディ

本章では、鋼コンクリート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、第3章のモデルを用いたパラメトリックスタディを行う。これにより、合成床版の断面構成と周辺気温条件の影響を検討する。解析ケースは、①札幌市の冬期気温変化、②実橋梁の路面温度変化の2ケースとする。

4.1節では、境界条件とコンクリートの凍結融解判定条件を述べる。4.2節では、合成床版の凍結融解作用量を推定し、床版内コンクリートの凍結融解挙動について考察を行っている。

4.1 解析手法

(1) 境界条件

①札幌市の冬期気温変化

札幌市の冬期気温変化として、気温が氷点下になる11月中旬から3月中旬までの間を対象とした。各月の気温は過去10年間の中で平均的なものをそれぞれ抽出するようにした(図-11)。

解析は各週単位で分けて行い、1週当たり計168時間の非定常解析とする。1ヶ月4週の28日として、月末の数日は省略する。境界条件として床版上面と下面の温度

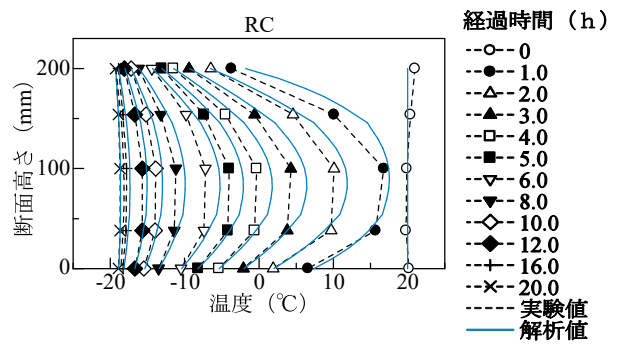
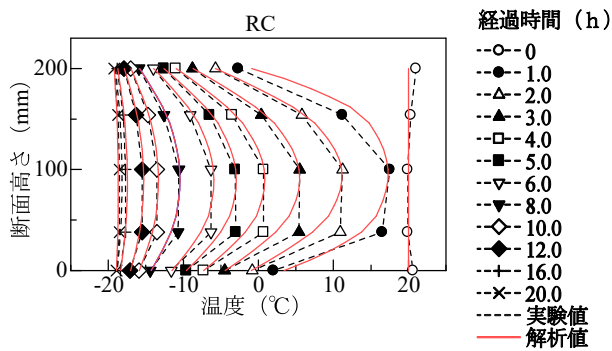
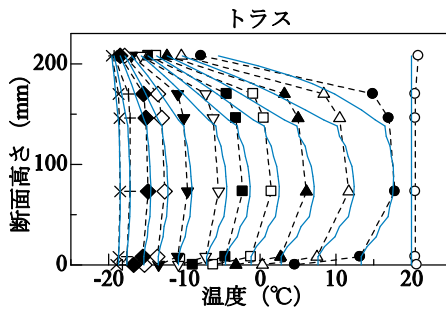
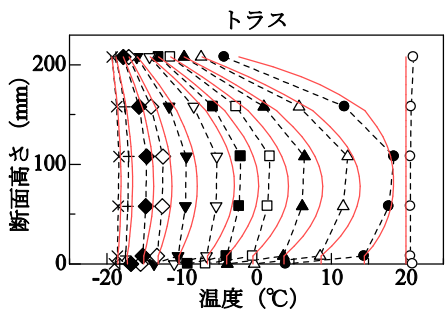
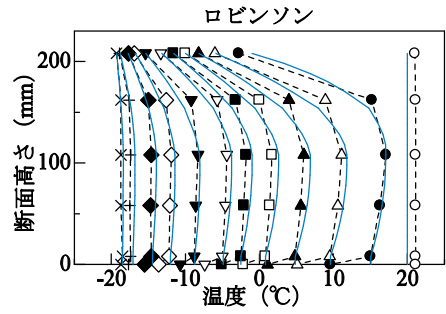
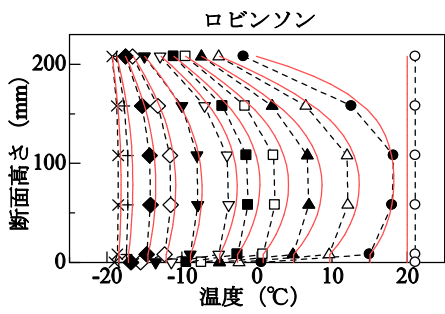
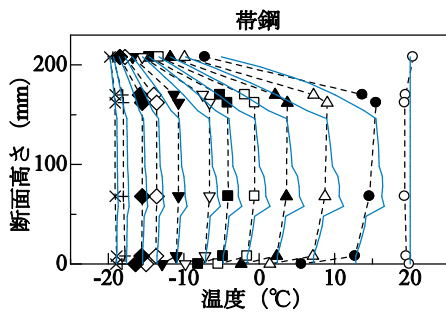
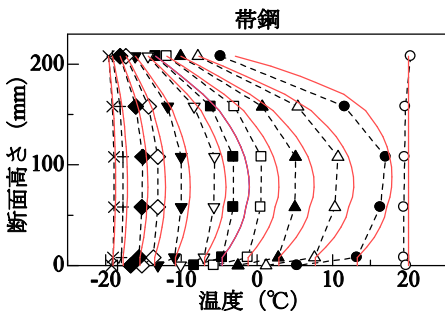
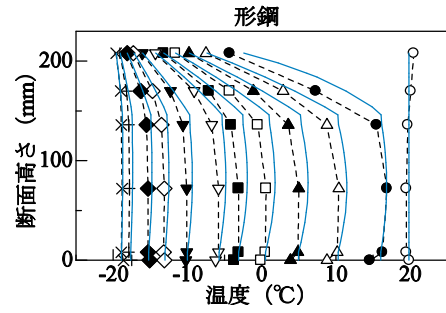
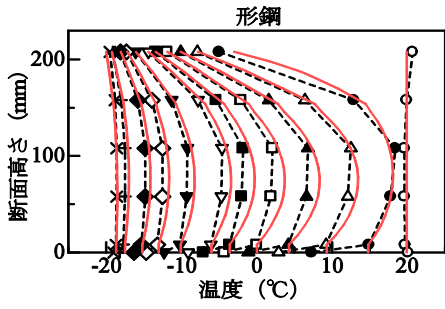


図-8 断面高さ-温度関係 (中央位置)

図-9 断面高さ-温度関係 (リブ位置)

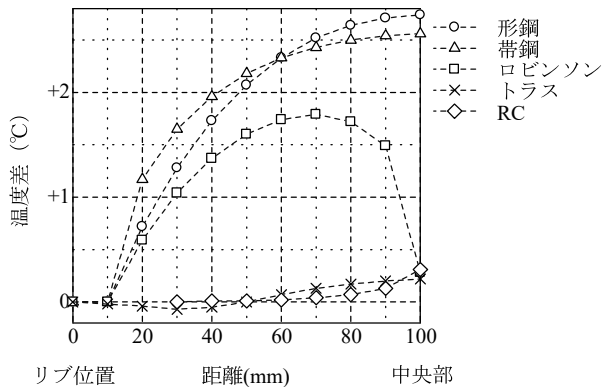


図-10 リブ位置と中央位置間の温度差

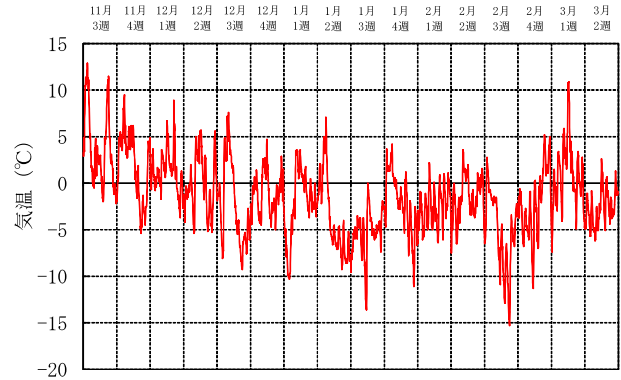


図-11 札幌市の気温変化

を外気温と同様に变化させる。また、初期条件として、床版内部には過去6時間前までの外気温を平均した温度を与え、床版上下面には解析開始時の外気温をあらかじめ与えてある。側面は断熱境界条件とする。解析ステップは1ステップ1時間としステップごとに床版上下面の温度境界条件を更新する。

②実橋梁の路面温度変化

図-12は2005年12月20～23日の札幌市内の国道河川橋(鋼箱桁RC床版)において計測された床版上下面温度と外気温を表したものである⁷⁾。縦軸が温度、横軸が時間であり、0時間が2005年12月20日の午前0時に該当する。以降23日までの4日間を表している。

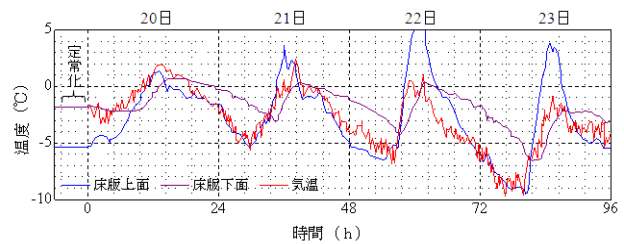


図-12 実橋梁における温度変化¹⁾

解析は4日間通しての計96時間の非定常熱伝導解析とする。境界条件として床版上面と下面温度を更新させる。また、初期条件として0時間時点での床版上下面温度をあらかじめ与えておき、床版内部の温度が定常化したのち解析を開始する。定常化を行う時間は6時間としている。

(2) 凍結融解判定条件

①札幌市の冬期気温変化

着目範囲は供試体の対称性を考慮して、床版上面から見て図-13の範囲とする。ただし、合成床版については底鋼板下面部分を範囲から除外する。凍結融解の判定は節点ごとの温度推移で決定し、コンクリートが凍結し始めるとされる -1°C 以下になり、再び 0°C 以上になった際に凍結融解が起こったとみなす。

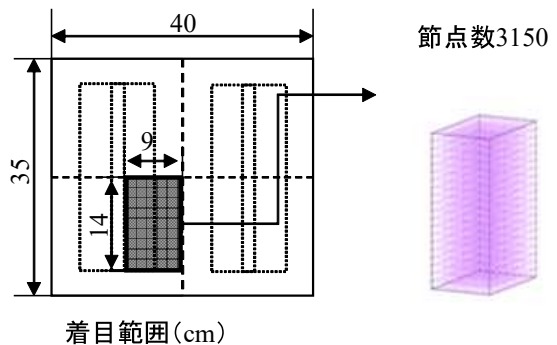


図-13 ケース①の着目範囲

②実橋梁の路面温度変化

着目範囲は供試体の対称性を考慮して床版上面から見た図-14の範囲とする。ただし、合成床版については底鋼板部分を範囲から除外する。着目範囲の体積は橋軸方向20cm×橋軸直角方向17cm×床版厚20cmの 6800cm^3 となっている。橋軸方向2cm×橋軸直角方向2cm×床版厚方向2cmの立方体体積ブロックの中心節点温度を代表温度とする。凍結融解の判定は温度推移で決定し、中心節点温度が①と同様にコンクリートが凍結し始めるとされる -1°C 以下になり再び 0°C 以上になった際に凍結融解が起こったとみなす。

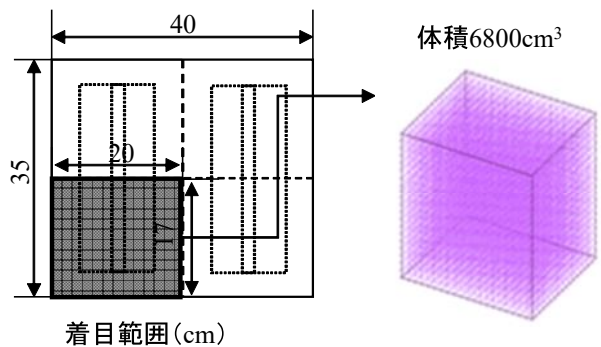


図-14 ケース②の着目範囲

4.2 解析結果

①札幌市の冬期気温変化

図-15 に週ごとの凍結融解節点数を示す。各節点における凍結融解節点数の積算を縦軸に、計測した期間を横軸にとっている。大まかな傾向としては、全てのモデルが横並び、もしくは形鋼、帯鋼、ロビンソンとトラス、RC に差が出る場合の2種類であった。気温変化との関係では、11、12月の平均気温低下と共に節点数が増え、週中ほぼ零下であった1月3週と2月3週では節点数が少なく、概ね±5°Cの範囲内で0°Cを超えて変化した回数が多い12月2週、12月4週、2月1週、3月1週で節点数が多くなる傾向が見られる。

②実橋梁の路面温度変化

各モデルにおける日ごとの凍結融解体積を図-16 に示す。全体として形鋼、帯鋼、ロビンソンの凍結融解量が多く、トラス、RC床版と比較して全体積の1~2割程度の差が見られる。逆に23日においてトラス、RC床版の凍結融解量が多くなっているのは、下面側の温度が前の数日間より下がったことで鋼材量の多い合成床版の床版上面側の凍結融解量が減少したためと考えられる。

断面高さごとの凍結融解体積を表-4 に示す。この温度条件では、床版コンクリートが全体的に-1°Cを下回り凍結条件を満たしたが、融解に関しては上側鉄筋位置を境に最高到達温度に1~2°Cの差があり、上側鉄筋より低い位置では鋼材部を含むために到達できる最高温度が0~1°Cと低くなっている。

5. まとめ

本研究では、4種類の鋼コンクリート合成床版に対する凍結融解温度域における熱伝導実験を対象として、有限要素法を用いた熱伝導解析を実施した。また、鋼コンクリート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た。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

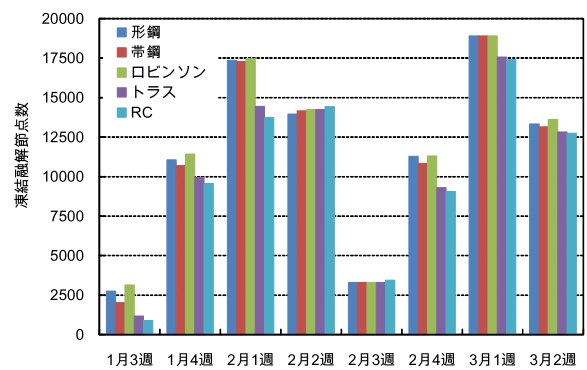
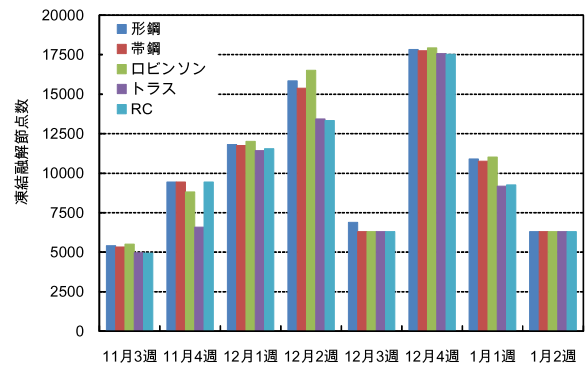


図-15 各週の凍結融解節点数

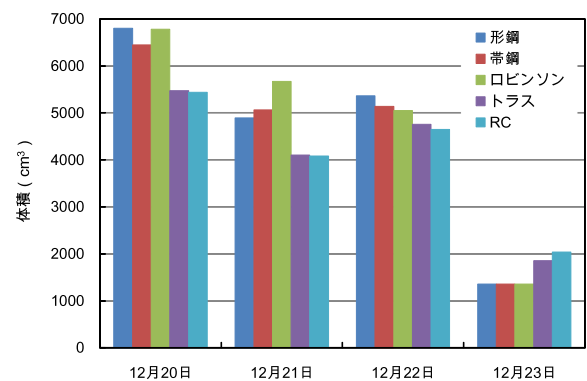


図-16 実橋梁環境下での凍結融解体積

表-4 コンクリート下面からの断面高さごとの凍結融解体積 (cm³)

断面高さ	20日					21日					22日					23日				
	形鋼	帯鋼	ロビンソン	トラス	RC	形鋼	帯鋼	ロビンソン	トラス	RC	形鋼	帯鋼	ロビンソン	トラス	RC	形鋼	帯鋼	ロビンソン	トラス	RC
18~20cm	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680
16~18cm	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680
14~16cm	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	0	0	0	496	680
12~14cm	680	324	660	0	0	372	680	680	568	680	680	680	680	680	680	0	0	0	0	0
10~12cm	680	680	680	32	0	104	56	144	0	0	680	680	680	680	680	0	0	0	0	0
8~10cm	680	680	680	680	680	96	56	248	0	0	680	680	680	680	568	0	0	0	0	0
6~8cm	680	680	680	680	680	240	188	516	0	0	248	168	112	0	0	0	0	0	0	0
4~6cm	680	680	680	680	680	680	680	680	136	0	168	88	64	0	0	0	0	0	0	0
2~4cm	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	184	120	112	0	0	0	0	0	0	0
0~2cm	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	680	0	0	0	0	0
合計	6800	6444	6780	5472	5440	4892	5060	5668	4104	4080	5360	5136	5048	4760	4648	1360	1360	1360	1856	2040

実験において観察された底鋼板上下面での温度差を考慮した境界条件を与えることで、床版内の温度分布をおおむね再現していることを確認した。合成床版において鋼材部の影響による温度低下は確認できたが、トラスを除く3種類の間で明確な差は見られなかった。実験と同様の温度条件のもとで各種合成床版内に生じる温度差は最大の場合でも3°C未満となる。なお、底鋼板上下面の温度差についてはより詳細な検討が必要である。

5種類の床版の凍結融解量の推定では、形鋼、帯鋼、ロビンソンのグループとトラス、RCのグループに分けられ、前者は体積比で1~2割程度上回る。鋼材部が凍結融解の起こりやすさに与える影響としてはリブ鋼板の影響が大きく、底鋼板の影響は小さいものと考えられる。

床版の上下面の温度が異なるケースにおいては、下面温度が終日0°C以下で上面温度が0°C以上の時間帯がある場合、上記の后者の凍結融解量が上回ることもある。これは、鋼材により床版下側の温度上昇と融解が抑えられることによる。

最後に課題として、本研究は各種合成床版の凍結融解温度域の熱伝導解析を実施したものであり、応力やひずみの影響やコンクリートの凍結融解挙動と損傷進行は範囲外であり、鋼材による拘束や界面の影響などについては、今後より現象を忠実にモデル化した解析が必要と考えられる。

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.
- 2) 日本橋梁建設協会: 合成床版への取り組み—開発の歴史・現在および将来—, 橋梁技術発表会, pp. 23-33, 2006.
- 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, pp73-95, 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, pp69-70, 2011.
- 7) 高橋尚人, 徳永ロベルト, 浅野基樹, 石川信敬: 橋梁部路面温度推定モデルの構築について, 寒地土木研究所月報, No. 643, pp. 40-48, 2006.

(2013年9月25日受付)

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

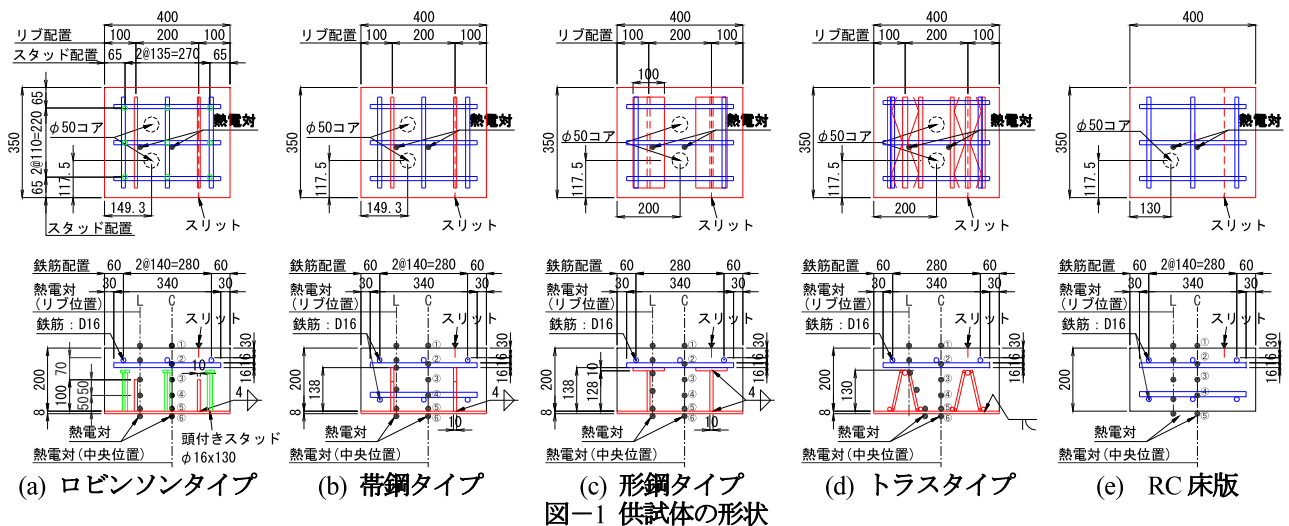


図-1 供試体の形状

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%	無	○	○	○	
		有	○	○	○	
		有			○	

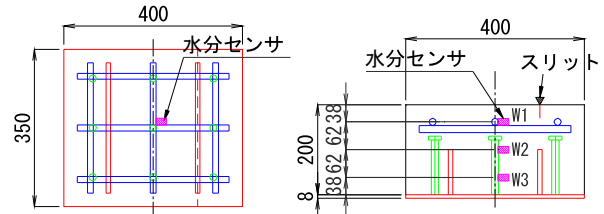


図-2 水分センサ設置位置

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。

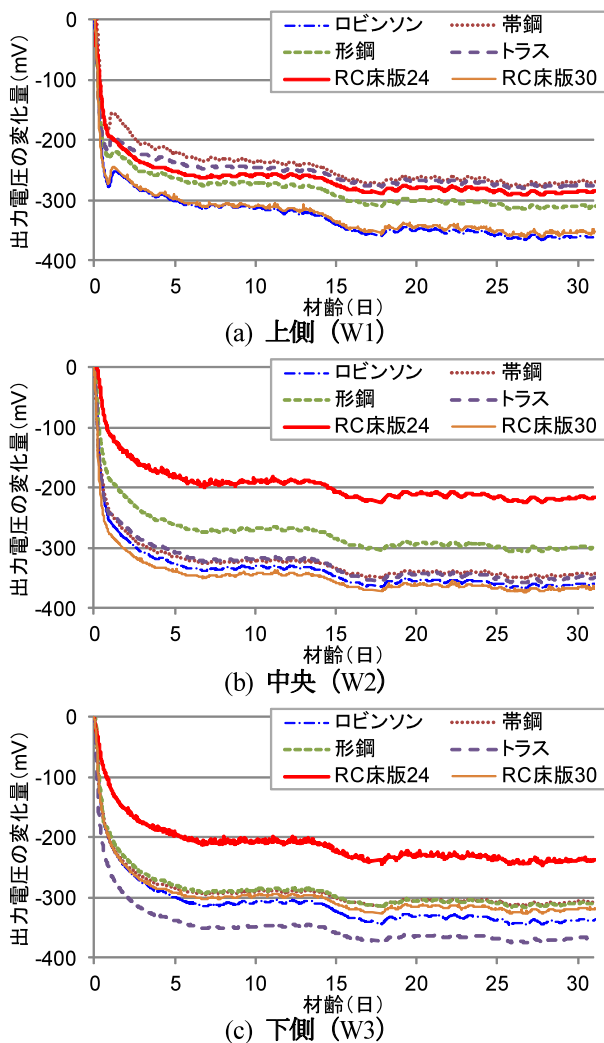


図-3 各測定位置における出力電圧の変化量

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

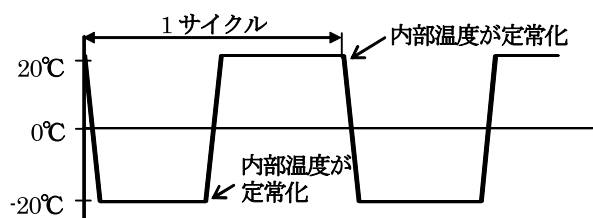


図-4 試験器内温度変化

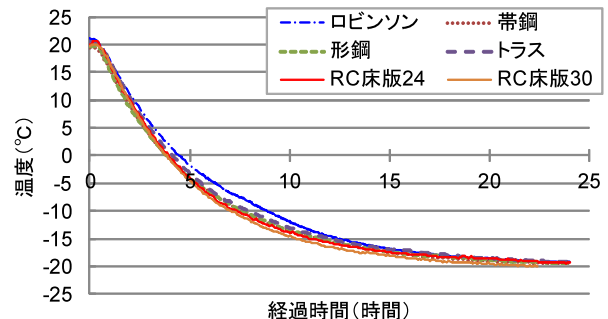


図-5 中央位置(C)中央高さ(3)における温度推移器内の温度も合わせて計測している。各供試体の熱電対設置位置を図-1に示す。

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。

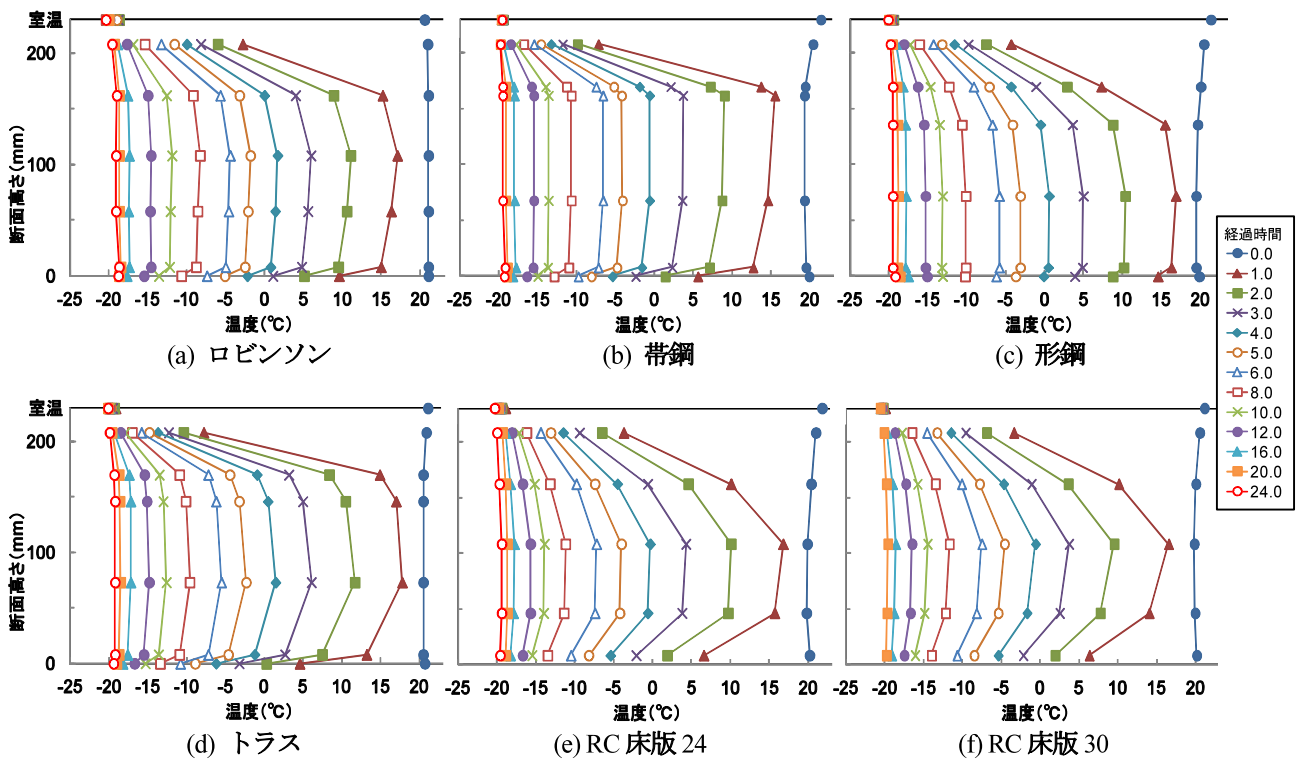


図-6 リブ位置における厚さ方向の温度分布

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分に変化させ、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

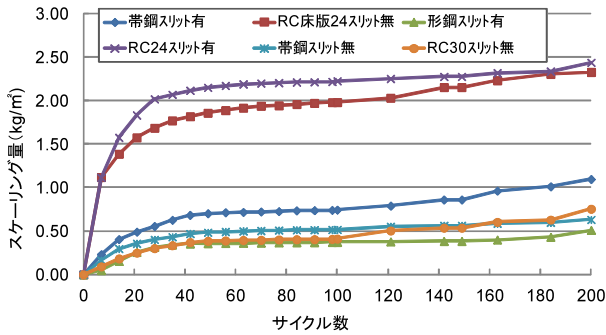


図-6 スケールリング量

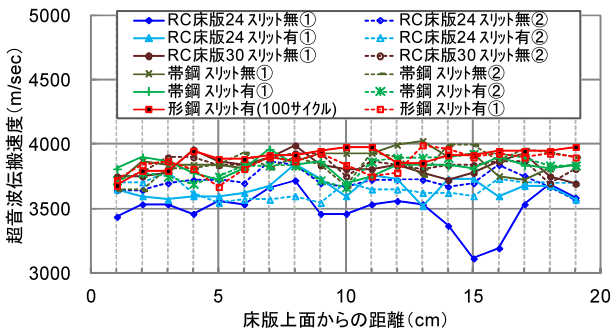


図-7 超音波伝播速度

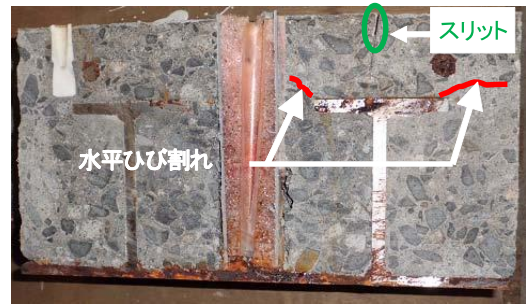
たことから、合成床版の底鋼板上に水が浸入してもコンクリートの凍害に与える影響は小さいと考えられる。

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³⁾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 (φ 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 (φ 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

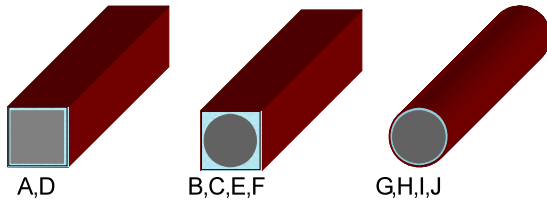


図-9 各試験ケースの模式図

(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

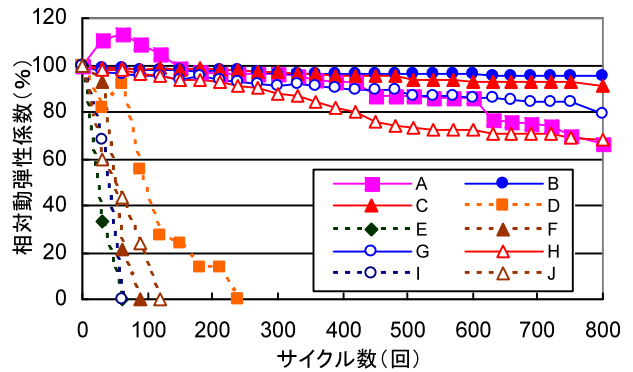


図-10 相対動弾性係数

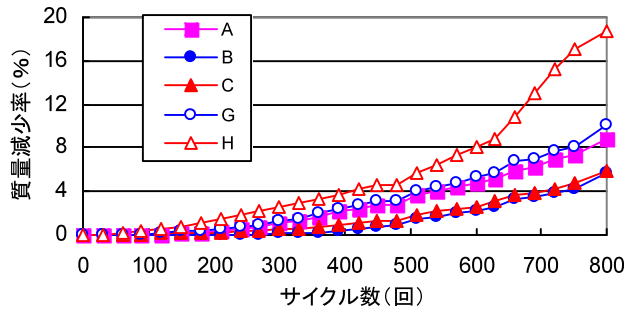


図-11 ゴム製容器を用いた供試体の質量減少率

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

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.542 March 2021

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046