

論文

加熱アスファルト敷設時の熱がコンクリート床版上面と防水層の 力学的な一体性に及ぼす影響

島倉稔宗*, 小松怜史**, 樋口勇輝***, 田中伸介****

*横浜国立大学, 博士課程前期, 大学院都市イノベーション学府
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

**工博, 横浜国立大学, 助教, 大学院都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

***ニチレキ (株), 研究員, 技術研究所 研究 3 課 (〒329-0412 栃木県下野市柴 272)

****ニチレキ (株), 静岡営業所 (〒419-0201 静岡県富士市厚原 2266)

防水層を仕上げ面に敷設すると, アスファルト敷設時の熱でコンクリート内が水蒸気で圧力が高まりやすく, 防水層直下の仕上げ面付近のコンクリートに微細ひび割れが生じる場合があるのではないかと考え, 実験的に検証した. その結果, 含水率が高く (HI-100 で約 6%), 空気量が少ないとき (約 1.5%), 仕上げ面を研磨しなかったときに, 微細ひび割れが確認された. この微細ひび割れは, コンクリート仕上げ面のせん断疲労抵抗性 (コンクリートと防水層もしくは舗装との一体性) を低下させることも分かった. 対策としては, 高浸透型複合防水層を用いる, 仕上げ面を研磨し脆弱層を除去する, 硬化コンクリートの空気量を確保すること等が考えられる.

キーワード: コンクリート床版, 膨れ抵抗性, 微細ひび割れ, せん断疲労抵抗性

1. はじめに

道路橋コンクリート床版の疲労耐久性は, 水が侵入することで大きく低下することが知られている¹⁾. そこで, 平成 14 年の道路橋示方書において, コンクリート床版とアスファルト舗装との間に防水層を設置することが規定された²⁾. しかし, コンクリート床版と防水層との接着性を確保するための検討は十分とは言えず, 供用開始後, コンクリート床版と防水層との界面付近で不具合が数多く生じている³⁾.

コンクリート床版と防水層との界面付近で起こる不具合の事例として, コンクリート床版内部の水分が蒸発することにより, 防水層を持ち上げるブリスタリングと呼ばれる膨れ現象, 防水層に穴を空けてしまうピンホールと呼ばれる現象が挙げられる. このような膨れ現象を抑制するために, 防水層の膨れ抵抗性試験が提案されている⁴⁾. しかし, 筆者らの研究で, 防水層の膨れ現象は, これまで指摘されている含水率の大小だけでなく, コンクリートの品質も大きく影響することがわかった⁵⁾.

また, 野村らはアスファルト敷設時の温度履歴をコンクリート仕上げ面に与えると, ごく表層に微細ひび割れ

が生じることを報告している⁶⁾. 当該論文では, メカニズムまでは言及されていない. 筆者らは仮説として, コンクリート表面の温度が上昇することで, コンクリート仕上げ面付近で水蒸気による内圧が高まる爆裂に近い現象, コンクリート表面から内部にかけて温度勾配が生じることでコンクリートに温度応力が生じているなど複数の要因を考えている. 実橋で考えた場合, 防水層が敷設されていると, コンクリートの内圧の高まりを助長するのではないかと. つまり, 先述したような微細ひび割れの発生を誘発しやすいのではないかと考えるに至った. さらに交通荷重が作用すると, コンクリートにせん断力が繰り返し作用するため, 微細ひび割れが起点となり, 仕上げ面でコンクリートの破壊が進行し, 防水層の破壊や舗装の劣化につながる可能性も考えられる.

そこで本研究では, 加熱アスファルト敷設の熱がコンクリート床版上面と防水層の力学的な一体性に及ぼす影響について実験的に検討した. 具体的には, コンクリートの配合 (W/C および空気量), 仕上げ面の養生条件, コンクリートの含水率, 仕上げ面の表面研磨の有無 (実橋面での研掃を模擬) 等の条件が異なる試験体を製作し, 3 種類の防水層を仕上げ面に設置し, アスファルト敷設

時の温度履歴を与えた。その後、仕上げ面が観察できるように試験体を切断し、マイクロスコプで切断面を観察した（以後、加温実験とする）。さらに、微細ひび割れが生じていると考えられる試験体と微細ひび割れが生じていないと考えられる試験体で、それぞれコンクリートのせん断疲労抵抗性を計測した（以後、せん断疲労実験とする）。

2. 実験概要

2.1 試験体概要と実験の流れ

(1) 加温実験

本研究ではφ100×200mmの円柱試験体を作製した。円柱試験体の配合を表-1に示す。また、円柱試験体の試験パラメータ一覧を表-2に示す。W/Cおよび空気量を実際のコンクリート床版（RCおよびPC）で使用されている上下限值程度に設定した。つまり、実橋における現象解明、対策案の提案を見据えたパラメータ設定とした。打込み面の養生条件は、28日間封緘養生もしくは、1日封緘後、27日間屋内暴露（外気と同じ温湿度であるが降雨は作用しない条件）とした。実橋では、コンクリート橋面を研掃することも多いことから、仕上げ面を5mm程度ハンドグラインダーで研磨した試験体も用意した。

材齢28日経過後、仕上げ面の表層品質を分析するため、シングルチャンバー法による表層透気試験を実施した⁷⁾。シングルチャンバー法は、原位置で迅速かつ簡易的にコンクリートの耐久性を評価することを目的に開発された試験方法である。チャンバーをコンクリート表面に取り付け、真空ポンプでチャンバー内を減圧させ、コンクリートから流入する空気によってチャンバー内の圧力が回復する（大気圧に戻る）までの時間を計測する。計測結果から、評価指標として簡易透気係数（A.P.I.）を算出する。シングルチャンバー法は、ごく表層の微細ひび割れに影響を受けることが報告されている⁸⁾。このことを逆手にとり、仕上げ面付近（表層）の細孔構造や微細ひび割れ等の検知がしやすいと考え⁹⁾、本試験法を採用した。

仕上げ面付近の品質を計測した後、仕上げ面の含水率を調整した。含水率調整には、過去の論文を参考に⁹⁾、電気抵抗式の市販の含水計（Kett社、HI-100）を使用した（写真-1）。含水率を6%（カウント値600前後、滞水状態と定義されている）、3%程度（カウント値200程度、表乾状態と定義されている）に調整した。防水便覧¹⁰⁾に記載されている含水率の規定値以下であることも別途確認している。

含水率調整後、仕上げ面に防水層を設置した（写真-2）。防水層は3種類用意した。1つ目はアスファルト塗布系防水層で、新設、補修問わず様々な場所で使用されているものを選定した。

表-1 円柱試験体の配合

W/C (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	AE 剤	AE 減水剤
55	1.6	174	317	814	1032	0	0
55	6.0	154	282	749	1073	1.41	0
35	1.5	173	498	681	1017	0	1.50
35	7.0	150	443	627	1062	4.43	0.89

表-2 円柱試験体の試験パラメータ

配合	養生	研磨の有無および含水率	防水層
<ul style="list-style-type: none"> W/C=35% (Air=1.5%,7.0%) W/C=55% (Air=1.6%,6.0%) 	<ul style="list-style-type: none"> 1日封緘養生+気中養生27日 28日間封緘養生 	<ul style="list-style-type: none"> 研磨有 (カウント値600) 研磨無(カウント値200,600) 	<ul style="list-style-type: none"> アスファルト塗膜系防水層 高性能型シート系防水層 高浸透型複合防水層



写真-1 使用した含水計（Kett社、HI-100）



写真-2 3種類の防水層を施工した円柱試験体（左からアスファルト塗膜系防水層、高性能型シート系防水層、高浸透型複合防水層）



写真-3 加温の様子

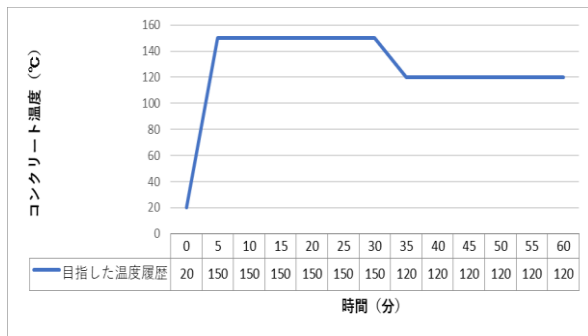


図-1 試験体に与えた温度履歴

表-3 角柱試験体のコンクリートの配合

W/C(%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
55	1.6	174	317	814	1032



図-2 せん断疲労試験の試験体固定方法・荷重方法

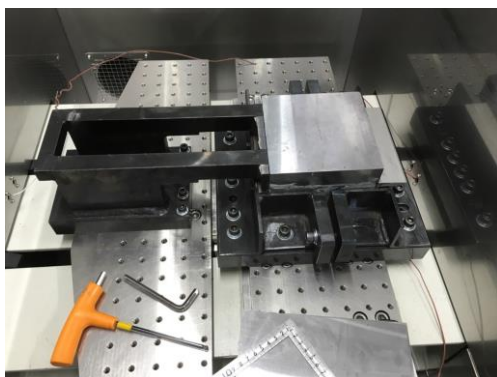


写真-4 せん断疲労試験の様子

この防水層は本検討の中では、プリスタリングなどの膨れ現象が比較的起きやすいと考えて選定した。2つ目は高性能型シート系防水層である。二次プライマーを塗布した後に、貼付アスファルトを用いてシート系防水層を施工する。プリスタリングなどの膨れ現象が起きにくいとされている。膨れ現象を抑制する防水層の方が、水蒸気で内圧が高まり、微細ひび割れが生じやすいものと考え、選定した。3つ目は高浸透型複合防水層である。プライマーがコンクリートに浸透するタイプで、ひび割れ等に含浸し、コンクリート表層の改質等を期待してつくられたものになる。本実験で発生する可能性のある微細ひび割れの抑制にも効果があるのではないかと考え選定した。

防水層設置後、ホットプレート (YAMAZEN, YHE-B130B) でアスファルト敷設時 (一次転圧まで) の温度履歴を試験体仕上げ面 (防水層面) に与えた (写真-3)。温度履歴は野村らの論文⁶⁾を参考としている。実際に与えた温度履歴の一例を図-1に示す。なお今回の実験では、アスファルトの温度を直接計測して制御したわけではなく、防水層直下の試験体側面の温度を赤外線温度計で測定して温度制御を行った。試験体の温度が外気温まで低下した後、試験体周囲をエポキシ樹脂で硬化させ、コンクリートカッターで仕上げ面が観察できるように切断した。なお、観察場所は試験体仕上げ面の中央付近のみとした (端部はカット時に角欠けしやすいため観察対象外とした)。

(2) せん断疲労実験

アスファルト敷設時の温度履歴を受けたコンクリート仕上げ面のせん断疲労抵抗性を評価するため、300×300×100mmの角柱試験体を作製した。コンクリートの配合を表-3に示す。加温実験の結果から、微細ひび割れが発生しやすいと考えられる配合を選定した。仕上げ面を28日間封緘養生後、試験体の仕上げ面を所定の含水率 (HI-100で6%、3%程度) となるまで浸漬させた。含水率調整後、コンクリートカッターで150×150×70mmにカットし、耐熱性のエポキシ樹脂 (防水層の代替品として、コンクリート内部から水蒸気の蒸発を防ぐ) を仕上げ面に塗布してから、ホットプレートで加温した。与えた温度履歴は円柱試験体と同じである (図-1参照)。加温後、仕上げ面 (エポキシ樹脂塗布面) に鋼板 (150×150×30mm) を接着剤で固定し、せん断疲労実験を実施した。

荷重回数や最大・最小応力は既往の論文⁹⁾を参考にした。具体的には、荷重は片振りの荷重制御で行った。0.15N/mm²の最大応力で1万回、0.3N/mm²の最大応力で1万回0.6N/mm²の最大応力で10万回と段階的に応力レベルを上げ荷重を行った。最低応力はそれぞれ最大応力の5%の応力とした。負荷波形は正弦波、繰返し周波数は全て2Hzとした。せん断力をコンクリート仕上げ面付近に作用させるため、仕上げ面から10mmを解放し、そ

れより深い位置の試験体側面は固定した。試験体の固定および載荷方法のイメージを図-2に示す。また実際の試験体をせん断疲労試験にセットした図を写真-4に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 シングルチャンバー法の計測結果

測定結果を図-3に示す。これまで多くの研究者が指摘しているように、養生期間が長い試験体の方が、養生期間が短い試験体よりも簡易透気係数が小さくなった。養生期間の長い試験体の方が表層付近の空隙が少なく緻密となったからであると考えられる。

また、表面研磨をした試験体の方が、研磨していない試験体よりも簡易透気係数が小さくなった。表面研磨を実施したことで、ごく表層の脆弱なコンクリートを取り除かれたためであると推察している。

3.2 加温実験の結果

微細ひび割れの発生の有無を確認するにあたり、試験体カットによる微細ひび割れの発生が生じないことを確認する必要がある。そこで加温していない試験体のカット面を確認した。

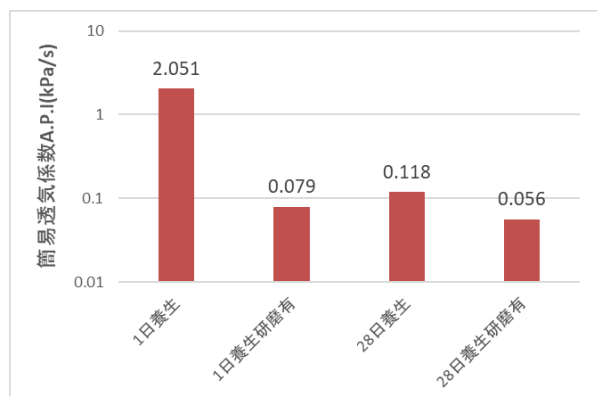


図-3 円柱試験体のシングルチャンバー法での測定結果 (W/C=35%, Air=1.5%)

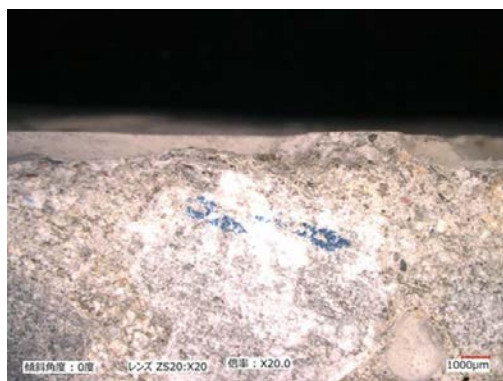


写真-5 加温なしの円柱試験体の断面の様子 (W/C=35%, Air=1.5%)

その結果、仕上げ面付近に変状は見られなかった (写真-5)。

以下では、微細ひび割れが発生したケース、微細ひび割れの発生を抑制できたケースについて、観察結果を紹介する。なお、微細ひび割れの発生位置は、いずれも仕上げ面から1~2mm程度の深さであった。

(1) 含水率の影響

アスファルト塗膜系防水層を設置した場合において、含水率が高くかつ空気量の小さな試験体で微細ひび割れが確認された。含水率が高いことで、加温時にコンクリート内部の圧力が上昇したことが、微細ひび割れ発生の一因と考えられる。(写真-6参照)

(2) 研磨の影響

仕上げ面を研磨した試験体では、いずれの条件でも微細ひび割れは確認されなかった (写真-7参照)。仕上げ面に強度の低い脆弱層がある場合、微細ひび割れ発生のリスクが高いことがわかった。この結果を逆手にとらえれば、橋面であれば研掃して脆弱層を取り除くことで微細ひび割れ発生のリスクは低く抑えられると推察できる。

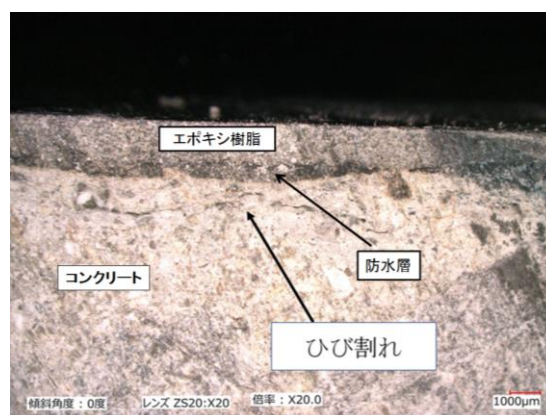


写真-6 W/C=35%, Air=1.5%, 1日養生, アスファルト塗膜系防水層, 含水率大の円柱試験体の切断面の様子



写真-7 W/C=35%, Air=1.5%, 1日養生, アスファルト塗膜系防水層, 研磨有, 含水率大の円柱試験体の切断面の様子



写真-8 W/C=55%,Air=6.0%, 28日養生, アスファルト塗膜系防水層, 含水率大の円柱試験体の切断面の様子



写真-9 W/C=35%,Air=1.5%, 28日養生, 高浸透型複合防水層, 含水率大の円柱試験体の断面の様子

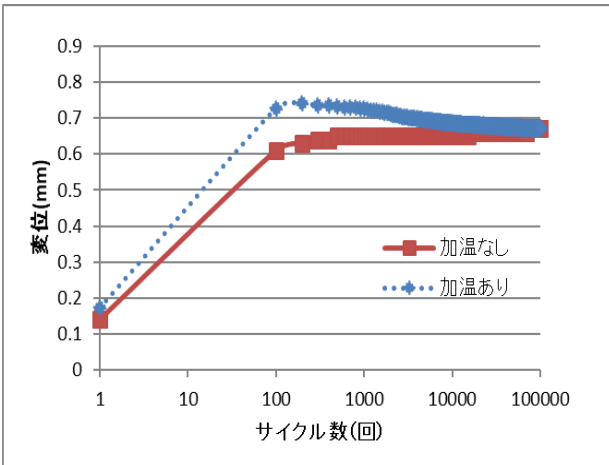


図-4 最大応力 0.60N/mm^2 のときの相対変位の経時変化

(3) 空気量の影響

含水率が高く、空気量が小さい試験体で微細ひび割れが発生したことは先述のとおりである。しかし、空気量を大きくすることで、微細ひび割れの発生を抑制することができた(写真-8参照)。

この事実からも、微細ひび割れの発生にはコンクリー

ト内部での水蒸気による圧力上昇が関係しているものと考えられる。硬化コンクリートの残存空気量は施工方法(仕上げ方法)にも大きく影響されることが知られている。実橋で対策する場合は、注意が必要である。

(4) 防水層の影響

浸透系プライマーを使用した試験体では、すべてのケースにおいて微細ひび割れの発生を抑制することができた(写真-9参照)。これは、浸透系プライマーがコンクリート表層に浸透することで表層を補強していること等が可能性として考えられる。

(5) 養生の影響

今回の実験では、異なる養生条件下で微細ひび割れの発生状況を比較したが、大きな違いは確認できなかった。一方、養生によって表層付近のコンクリートの緻密さが異なるため、コンクリート爆裂のしやすさが異なるという知見がある¹¹⁾。今回の実験では微細ひび割れが入る位置が上面から1mm程度と非常に浅い領域であるため養生の効果が顕著にみられなかったのではないかと推察している。

(6) W/Cの影響

今回の実験では、W/Cの違いは微細ひび割れの発生状況に大きく影響しなかった。加温で影響を受けるのはごく表層のコンクリートのみである。仕上げ面付近の実際のW/Cは、設計W/Cとは異なっていた可能性が考えられる。

3.3 せん断疲労実験の結果

図-4に最大応力 0.60N/mm^2 のときのコンクリート角柱試験体と鋼板の相対変位の経緯変化を示す。微細ひび割れが発生していると考えられる加温した試験体と、加温していない試験体(他の条件はすべて同じ)の結果を示す。実験の結果、サイクル数100回程度まで、加温している試験体の方が加温していない試験体よりも、相対変位が大きくなる傾向がみられた。微細ひび割れを起点として、コンクリートの破壊が進行し、層間でずれが生じたと考察している。また、サイクル数が100回程度を超えると、加温試験体では相対変位が小さくなるように変形した。これは、繰り返し載荷する間に、鋼板が回転したことが原因と考えている。実際に、試験後に鋼板を確認したところ、回転した様子が確認された。

実際の橋面で考えた場合、このような層間のずれは、防水層の破壊や舗装の劣化の一要因となるのではないかと推察される。

4. まとめ

本研究では、アスファルト敷設時の温度履歴を、防水層を敷設したコンクリート円柱試験体に加え、仕上げ面付近のコンクリート断面をマイクロスコップで観察した。さらに、加温した試験体のせん断疲労抵抗性を、加

温していない試験体と比べて評価した。その結果、得られた結論は以下の通りである。

- (1) アスファルト塗膜系防水層を用いた場合、含水率が高く、仕上げ面に脆弱層のある試験体もしくは空気量が少ない試験体で微細ひび割れの発生が確認された。含水率が高いことで、水蒸気でコンクリート内の圧力が高まったことが微細ひび割れ発生の一因として考えられる。
- (2) 微細ひび割れの発生を抑制する方法として、含水率を低くすること、硬化後のコンクリートの空気量を十分確保すること、仕上げ面を研磨することで脆弱層を除去すること、高浸透型複合防水層の利用などが考えられる。
- (3) 加温した試験体は、加温していない試験体と比較して、せん断疲労抵抗性が劣ることが分かった。実橋で考えた場合、コンクリートと防水層・舗装の力学的な一体性の低下の可能性があると推察される。

本検討から、従来のような床版上面の含水率の確認だけでなく、コンクリート床版上面の表層品質まで含めたコンクリート-防水層の一体性評価の構築が必須であることが分かった。

また、微細ひび割れの発生メカニズムの解明も今後の課題と考えている。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号：18K13811、代表：小松怜史）の助成を受けて実施した。また、非破壊試験を実施するにあたり、東京理科大学の加藤氏（今本研究室）に試験装置をお借りしました。この場を借りて深謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ 28，道路橋床版防水システムガイドライン，pp6-17，2016
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 I，共通編，p107，2011
- 3) 西弘明，今野久志，岡田慎哉，佐藤京，表真也，澤松俊寿：高機能防水システムによる床版劣化防止に関する研究，土木研究所研究成果報告書，p9，2016
- 4) 東日本高速道路株式会社，中日本株式会社，西日本株式会社：NEXCO 試験方法，第 4 編，構造物関係試験方法，433，2013
- 5) 十川貴之，小松怜史，田中伸介：コンクリート床版上面の表層品質が防水層との一体性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，40 巻，1 号，pp405-410，2018.7
- 6) 野村昌弘，浦修造，石井浩司，鳥居和之：加熱アスファルト混合物敷設が鋼橋 RC 床版に与える影響と実橋でのコアの詳細分析，コンクリート工学年次論文集，No.1，pp931-936，2017
- 7) 今本啓一，山崎順二，下澤和幸，永山勝，二村誠二：構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性の検討，日本建築学会構造系論文集，第 607 号，pp31-38，2006
- 8) 野中英，湯浅昇：表層コンクリートの簡易な透気試験方法の比較，ISSN 2186-5647，pp515-518，2015
- 9) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集 Vol.59A，pp1113-1123，2013
- 10) 日本道路協会：道路橋防水便覧 2007.3.
- 11) 池尾陽作：高強度コンクリートの耐火性能（爆裂）に関する研究，コンクリート工学，Vol.37，No.8，pp.53-57，1999.8

(2018年7月20日受付)