

論文 コンクリート床版の上面増厚に用いる低弾性なSFRCの開発

青木 聡*1・蒲 和也*2・郭 度連*3・吉田 雅義*4

要旨: コンクリート床版に用いる新たな上面増厚材として、静弾性係数が低いSFRC「ラテックス改質SFRC (LSF)」を開発した。LSFの静弾性係数は、現在、首都高の上面増厚に使用しているPCMと同程度で、従来のSFRCに対して約3割低い。疲労耐久性はPCMよりやや高く、材料費はPCMの半額程度に削減できる。

首都高速道路でLSFを使用した上面増厚の試験施工を行い、良好に施工できることを確認した。

キーワード: コンクリート床版, SFRC, 上面増厚, 静弾性係数, 低弾性

1. はじめに

首都高速道路は、大型車交通量が多い上に、渋滞が頻繁に発生する区間もあり、舗装打換えのサイクルが短い。その結果、床版上面のかぶりコンクリートが切削される機会が多くなり、箇所によってはかぶりが消失していることもある(写真-1)。かぶり不足は、鉄筋腐食などの劣化を促進させる恐れがあることから計画的に対策を講じる必要がある。かぶり不足が生じた床版に講じる対策として上面増厚工法がある。上面増厚は、舗装の基層部分をコンクリート系の材料に置換え、既設床版と一体化することで床版を増厚する(図-1)。最も使用実績が多い増厚材料は、鋼繊維補強超速硬コンクリート(以下、SFRC)であるが、他機関ではSFRCで増厚した270橋のうち約40橋で、施工してから数年後にポットホールなどの路面変状が確認されている¹⁾。増厚部と既設床版の層間剥離に伴う早期劣化と考えられており、増厚部と既設床版の静弾性係数の違いによるひずみ差や層間に接着剤を設置しなかったことが原因とされている¹⁾²⁾³⁾。

首都高速道路では、SFRCの早期劣化事例を踏まえて超速硬型ポリマーセメントモルタル(以下、PCM)を用いた上面増厚工法を開発⁴⁾し、2016年から実橋に適用している。PCMは、図-1に示すように静弾性係数が既設

床版と同程度であり、増厚部と既設床版とのひずみ差を軽減できる。しかし、PCMは高価であり、コスト削減が課題であった。そこで、材料費削減を目的として「ラテックス改質SFRC(以下、LSF)」を開発した。本稿では、LSFの基礎物性、輪荷重走行試験結果、試験施工による適用性検証結果について報告する。

2. 配合検討

2.1 検討概要

PCMは単位セメント量が多くなるため、コンクリートよりも材料単価が高く、工事コストが増高する要因の一つとなっている。そこで、モルタルよりもセメント量が少ないコンクリートを基材としてコスト削減を図ることにした。また、PCMの開発コンセプトを踏襲して既設床版と同程度の静弾性係数となる配合を検討した。粗骨材の静弾性係数が高いことから、コンクリートの静弾性係数はモルタルよりも高くなる傾向にある。静弾性係数を低減させるには、粗骨材量を低減することや軽量骨材を使用することが考えられるが、コスト増やコンクリートの強度低下が懸念される。そこで、本研究ではラテックス(ゴムのコロイド状水分散物)による改質と特殊弾性骨材(写真-2)を使用することで低弾性化を図った。

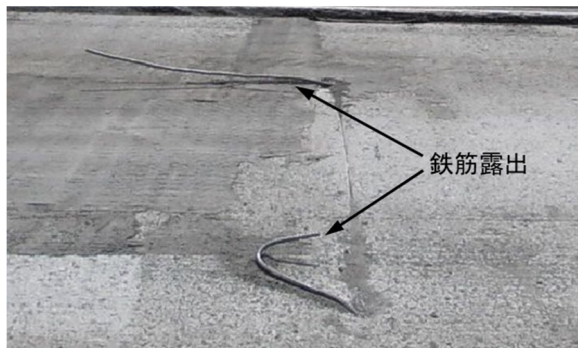


写真-1 床版上面のかぶり消失事例

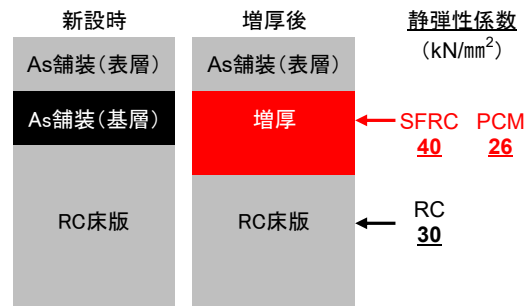


図-1 上面増厚工法の断面構成と静弾性係数

*1 (一財)首都高速道路技術センター 構造技術研究所 第一構造研究開発室 技術主幹 (正会員)

*2 首都高速道路(株) 技術部 技術推進課 担当課長

*3 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所 無機グループ グループリーダー 博士(工学)(正会員)

*4 (株)NIPPO 総合技術部 技術研究所 研究第一グループ 副主任研究員

2.2 増厚材の標準配合

表-1(a)に LSF の標準配合を示す。使用材料は、水、ラテックス、結合材、細骨材、粗骨材、鋼繊維である。練り混ぜ水の約 60%を平均粒径 200nm の SBR (スチレン-ブタチレン-ラバー) ラテックスに置換している。結合材は、普通ポルトランドセメントと特殊カルシウムアルミネート系の速硬性混和材をプレミックスした粉体を用いている。骨材の最大粒径は 13mm であり、細骨材の 14%を特殊弾性骨材に置換している。特殊弾性骨材の粒径は細骨材と同等の 1~2.5 mm である。鋼繊維は、鋼床版補強用 SFRC の標準仕様⁵⁾である直径 0.6mm、長さ 30mm のフック付き鋼繊維を用いている。材料性能を比較した SFRC、PCM の配合例を表-1(b)、(c)に示す。

2.3 LSF の材料物性

表-2 に主な試験項目および評価基準を示す。試験方法および評価基準は、PCM もしくは鋼床版補強用 SFRC の規定⁵⁾⁶⁾を準用した。主な試験結果を以下に示す。

(1) 初期材齢の圧縮強度

図-2 に初期材齢の圧縮強度を示す。標準配合の水結合材比 38.9%に加えて、34.8%、43.2%の 3 水準で確認した。3 水準とも材齢 3 時間において評価基準である 12 N/mm²を大きく超えている。

(2) 圧縮強度と静弾性係数 (材齢 28 日)

図-3 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。LSF は、PCM と同等の圧縮強度および静弾性係数となっており、静弾性係数は従来の SFRC に対して約 30%低減している。圧縮強度は基準値の 24 N/mm²を大きく超えている。

(3) 曲げ靱性

図-4 に曲げタフネス試験による荷重とたわみの関係を示す。LSF は SFRC よりも高い曲げ靱性を有している。荷重-たわみ曲線下の面積から求めた破壊エネルギー吸収量 (kN・mm) は、SFRC、PCM の約 1.3 倍となる。LSF は、ラテックスを添加することで、鋼繊維とコンクリートの付着力が増加し、鋼繊維の引き抜け抵抗性が向上するため、曲げ靱性が高くなると考えられる。

(4) 乾燥収縮量

図-5 に収縮ひずみと材齢の関係を示す。コンクリートの練り上がりから 2 時間後に基長を測定している。いずれも材齢 1 日までの収縮量が大きい。水和熱によって上昇したコンクリート温度が降下したことによる影響と

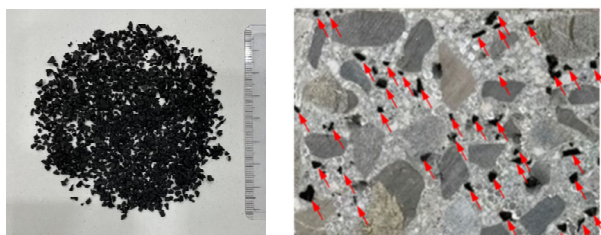


写真-2 特殊弾性骨材

表-1 増厚材の標準配合

(a) : LSF						
単位量 (kg/m ³)						
水セメント比 (W+L)/B	W	L	B	S	G	SF
38.9%	62	114	453	717	930	100

W: 水, L: ラテックス, B: 結合材, S: 細骨材, G: 粗骨材, SF: 鋼繊維

(b) : SFRC					
単位量 (kg/m ³)					
水セメント比 W/C	W	C	S	G	SF
40.5%	166	410	707	1077	100

W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, SF: 鋼繊維

(c) : PCM			
単位量 (kg/m ³)			
水	ポリマーエマルジョン水溶液	プレミックス粉体	鋼繊維
147	93	1950	100

表-2 LSF 硬化体物性の試験項目および評価基準

試験項目	試験方法	評価基準	準用
圧縮強度	JIS A 1108	3h: 12N/mm ² 以上	PCM ⁶⁾
		28d: 24N/mm ² 以上	
静弾性係数	JIS A 1149	28kN/mm ² 以下	SFRC ⁵⁾
曲げ強度	JSCE G552	5N/mm ² 以上	
収縮ひずみ	JIS A 1129	400μ以下	

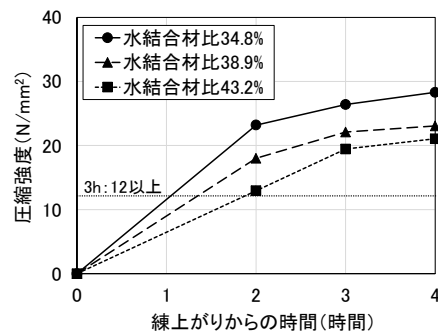


図-2 初期材齢の圧縮強度 (LSF)

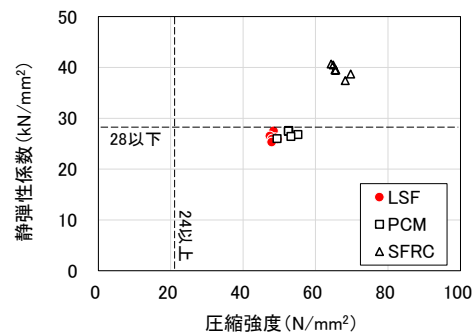


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係 (材齢 28 日)

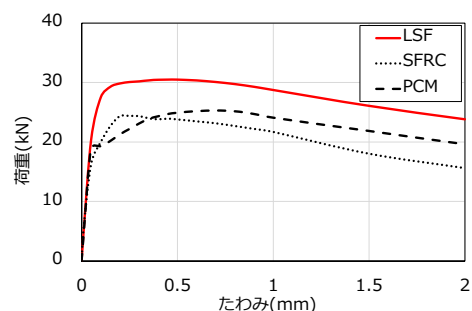


図-4 曲げタフネス試験結果

考えられる。水和熱による影響を除いた材齢1日から28日までの収縮ひずみ、すなわち乾燥収縮によるひずみは、PCMは 210μ (-400-190)、SFRCは -119μ (=147-266)であり、LSFは -26μ (=133-159)である。LSFは乾燥収縮量が小さく、初期ひび割れを生じさせるリスクを低減できると考えられる。

3. 輪荷重走行試験

3.1 試験概要

LSFで増厚したRC床版の耐久性を評価するため、既往の試験と同じ水張り条件で輪荷重走行試験（以下、輪荷重試験）（写真-3）を行った。

既設のRC床版を模したRC床版試験体は、昭和39年鋼道路橋設計示方書に基づき製作した（図-6）。厚さは190mmであり、かぶりコンクリートを20mm切削した後、エポキシ系接着剤を塗布し、LSFを厚さ50mmで打設した（表-3）。LSFは鉄輪走行位置の近傍の橋軸方向および中央付近の橋軸直角方向に施工目地を設けて、2回に分けて打設した（図-7）。なお、水の浸入に対する影響を確認するため、施工目地の打継面（コバ面）には接着剤を塗布していない。

載荷荷重は157kNから開始し、4万回（往復2万回）走行する毎に19.6kNずつ増加させる階段載荷方式で行った。試験体上面には幅500mm×200mmの載荷板を敷いている。一定回数走行させる毎に一旦除荷し、静的載荷を行って載荷時と除荷時のたわみを計測した。

3.2 疲労耐久性

図-8に床版中央における活荷重たわみ（載荷時たわみと除荷時たわみの差）と157kNに換算した等価繰返し回数との関係を示す。なお、S-N線の傾きは $-1/12.76$ としている⁸⁾。活荷重たわみが急増した時を疲労限界と考え、その時の回数を図に示している。この回数を疲労寿命と考え、LSFの疲労寿命はPCM⁴⁾の1.86倍（LSF7,800万回/PCM4,200万回）であった。LSFは、PCMより高い疲労耐久性を有していると考えられる。輪荷重試験は疲労限界以降、押抜せん断破壊に至るまで行った。

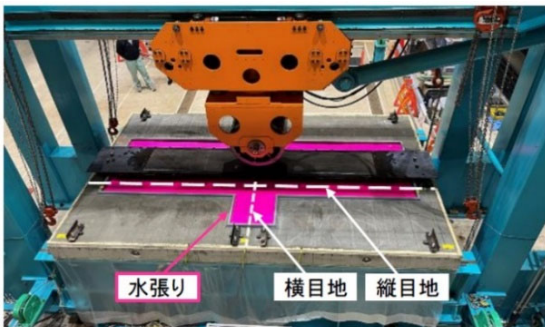


写真-3 輪荷重走行試験状況

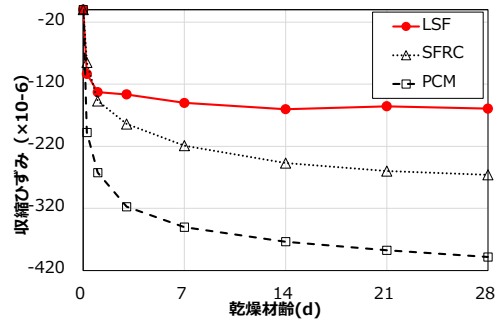


図-5 収縮ひずみと材齢の関係

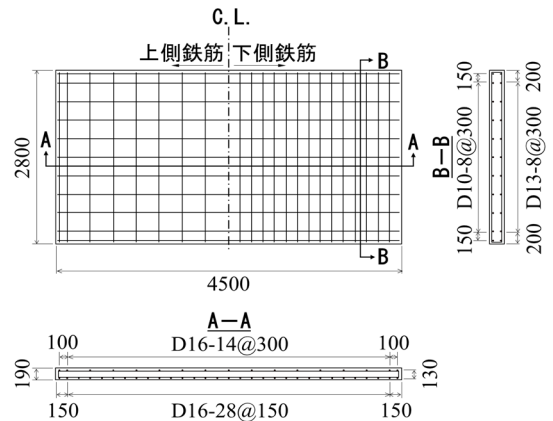


図-6 RC床版試験体配筋図

表-3 増厚施工手順（輪荷重試験）

STEP1	STEP2	STEP3
床版製作	上面切削	上面増厚
190mm	-20mm 170mm	+50mm 170mm
		接着剤

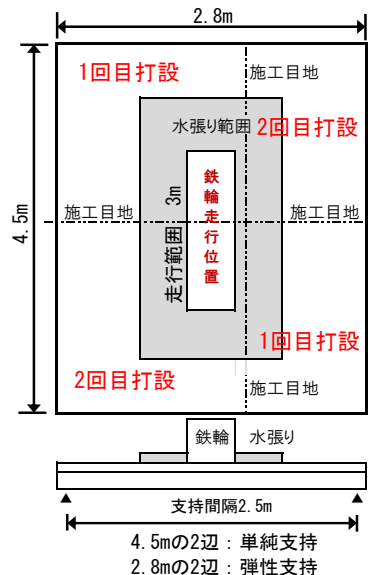


図-7 施工目地を設けた輪荷重試験体

3.3 破壊性状

(a)LSF 上面

図-9 a)、写真-4 に LSF の押抜せん断破壊時の変状を示す。図には目視および打音で確認された変状を示している。最初に生じた変状は、157kN 等価繰り返し回数 9,884 万回で、中央付近の載荷板脇で濁音が確認された。その後、11,054 万回時点で、水張り範囲端部の横目地が開口してひび割れが生じ、水張り枠外に水がしみ出した。

その後、走行中央部の浮きが打音検査で明確になり、濁音範囲が拡大した。終局時には載荷板に沿って橋軸方向ひび割れが生じ、載荷板撤去後に、浮きが広範囲で確認された。

(b)RC 床版下面

図-9 b)に RC 床版下面のひび割れ状況と漏水位置(太線)を示す。4 万回終了時点までは、主に橋軸方向の長いひび割れが載荷板直下で発生した。等価繰り返し回数 1,000 万回時点で全面に直角方向や斜め方向のひび割れが拡大し、格子状となった。

1,000 万回から終局までは、1,000 万回以前に発生したひび割れ間に細かなひび割れが生じた。初期の漏水は、等価繰り返し回数 11,054 万回時点で LSF の施工目地直下で確認された。

終局直前では、漏水を伴う段差ひび割れが発生して、走行軸中央から両側 500mm~800mm の位置に、長さ約 2,000mm の範囲で段差が生じた。

3.4 切断面

図-10 に試験後の橋軸方向中央付近での切断面の模式図を示す。LSF 試験体(図-10(a))は、載荷幅 500mm の範囲に下面から鉛直方向に延びるひび割れ、増厚部と床版の界面付近に水平方向のひび割れ、界面付近の水平ひび割れの端部から斜め 45° 方向のひび割れがみられる。増厚部表面には、載荷幅付近に厚さ方向に貫通していない微細なひび割れが生じていた。

PCM⁴⁾試験体(図-10(b))においても、ひび割れの位置、長さは LSF と同様で大きな違いは見られなかった。

4. 試験施工

4.1 試験概要

首都高速道路で LSF を使用した上面増厚の試験施工を行った。施工延長は 45.5m、施工面積は 297m²である。対象橋梁の構造諸元を表-4 に示す。1964 年に供用を開始、59 年経過した橋梁である。また、1983 年に縦桁補強を実施している。図-11 に LSF の舗装構成を示す。既設舗装を基層まで撤去後、舗装設計施工要領⁹⁾に規定された高浸透型防水材及びエポキシ系接着剤を RC 床版上面の全面に塗布した後に、基層部分に LSF を打設した。

高浸透型防水材の主成分は、エポキシアクリレートで、

低温時においても優れた浸透性能を発揮する。その後に塗布する接着剤は 2 液混合のエポキシ系接着剤で、LSF の水和熱を受けて化学反応が促進、付着強度が増進する。

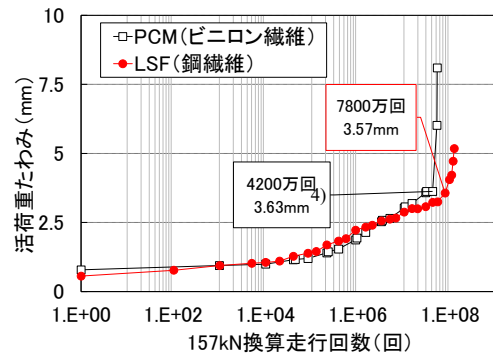


図-8 活荷重たわみと等価繰り返し回数の関係

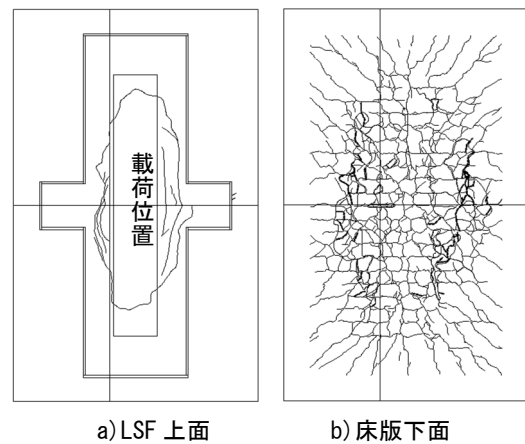


図-9 試験体上下面の変状

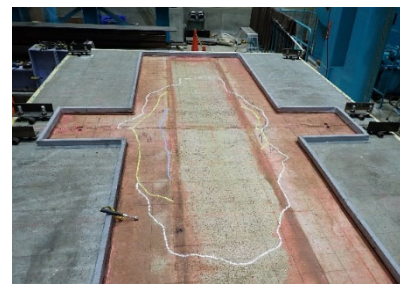


写真-4 LSF 試験体の終局時の状態

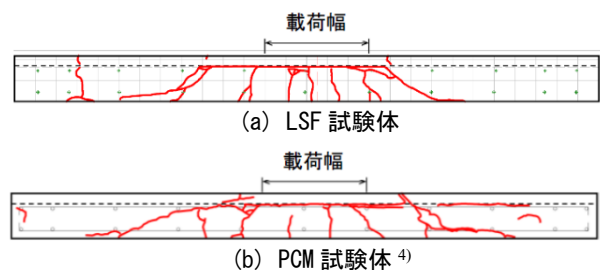


図-10 試験体の切断面(橋軸直角方向)

4.2 実施状況

図-12に施工フロー図を示す。片側2車線のうち1車線を規制して施工した。1日で1車線を施工することとし、施工時間は16時から翌5時までの13時間を予定していたが、いずれの車線も10時間以内で施工を完了することができた。

LSFの打設状況を写真-5, 6, 7に示す。LSFは移動式プラント車で練り混ぜ、一輪車とバックホーにより運搬・打設を行った。床版上面に敷設されたLSFは作業員がレーキで敷き均し、SFRCの施工と同じフィニッシャーで締め固めを行った。

LSFのフレッシュ性状は、スランプ、3時間強度とも品質管理基準を満足した(表-5)。また、材齢28日の硬化体物性値も基準値を満足した(表-6)。

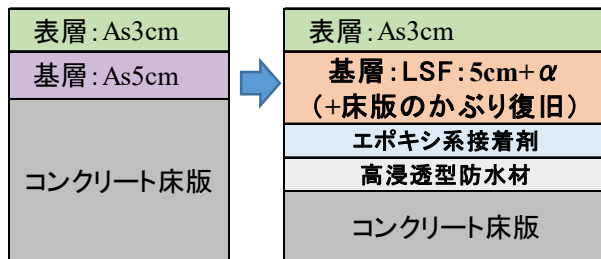


図-11 LSFの舗装構成



写真-5 LSFの打設工

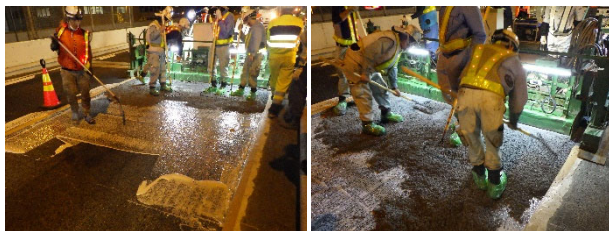


写真-6 LSFの敷き均し・締め固め



写真-7 LSF施工後の状態（3時間養生後）

5. まとめ

本研究では、上面増厚工法の材料費削減と低弾性化を目的に新たなコンクリート増厚材（LSF）を開発した。

LSFの静弾性係数はPCMと同程度であり、曲げ靱性はSFRCと比べて1.35倍、疲労耐久性はPCMより高い。また、LSFの乾燥収縮量は極めて小さく、初期ひび割れを生じさせるリスクが低減する。材料費は、PCMが約160万円/m³に対して、LSFは約80万円/m³になる見込みである。

実橋で試験施工を行い、品質、施工性ともに良好であることを確認した。引き続き、経過観察する予定である。

表-4 構造諸元

しゅん功年、適用基準	1964 (S44) 年, S39道示 ⁹⁾	
上部工形式	鋼単純合成 I 桁 22m, 23.5m	
床版	種類, 床版厚	R C 床版, 18cm
	コンクリート材料	普通骨材, 普通コンクリート
	設計基準強度	280kgf/cm ²
床版補強	1983 (S58) 年, 縦桁補強 (2本)	



図-12 LSF施工フロー

表-5 LSFの現場品質管理項目と測定結果

	1日目	2日目	3日目	4日目
	左EX65~67 22m	左EX67~69 23.5m	右EX65~67 22m	右EX67~69 23.5m
外気温 (°C)	31.7	30.1	31.8	31.7
LSF練り混ぜ時の温度 (°C)	34.5	32.7	34.9	34.0
スランプ値	6.5±1.5cm	7.0	6.5	5.5
3時間強度	12N/mm ² 以上	19.7	20.2	21.8
打設時間	90分以内	90	90	80
付着強度(3~4h)	1.0N/mm ² 以上	1.74	1.80	1.99
		2.02		

表-6 現場施工時の硬化体物性値（材齢28日）

	基準	1日目	2日目	3日目	4日目
圧縮強度 (N/mm ²)	24以上	45.0	47.7	45.2	47.0
静弾性係数 (kN/mm ²)	28以下	26.4	27.2	26.3	26.5

謝辞：本研究は、ショーボンド建設㈱，㈱NIPPO と（一財）首都高速道路技術センターとの共同研究により進めてきた。関係機関に所属する職員に多大な御協力を頂いた。この場を借りて、厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 中央道 諏訪南～諏訪間におけるコンクリート床版の補修，中日本高速道路㈱八王子支社，EXTEC No.81，pp.39-41，2007
- 2) 長谷俊彦，和田圭仙，後藤昭彦：上面増厚床版における劣化要因の検証と耐久性向上対策の検討，コンクリート工学，Vol.50，No.3，pp.245-253，2012.3
- 3) 横山広，浦修造，関口幹夫，堀川都志雄：床版の劣化現象および床版補強工法に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.451-455，2010
- 4) 青木聡，蔵治賢太郎，持田泰子：PCM 舗装による RC 床版上面増厚工法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1485-1490，2018
- 5) 土研ほか：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究（その 2・3・4）報告書 SFRC 舗装による既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル（案），pp.20，2009.1
- 6) 首都高速道路株式会社，舗装設計施工要領，2021.10
- 7) 中谷昌一，内田賢一，西川和廣，神田昌幸，宮崎和彦，川間重一ほか：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所，国総研資料第 28 号，2002.3
- 8) 松井繁之，木村元哉，蓑毛勉：増厚工法による RC 床版補強の耐久性評価，構造工学論文集(土木学会)，Vol.38A，pp.1085-1096，1992.3
- 9) 鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説 昭和 39 年 6 月，日本道路協会