

## SFRC 舗装による鋼床版の疲労耐久性向上対策

## MEASURES AGAINST FATIGUE DAMAGES IN ORTHOTROPIC STEEL DECK PLATE

児玉孝喜\* , 加形護\*\* , 伴康夫\*\*\* , 海老沢秀治\*\*\*\* , 鈴木康範\*\*\*\*\*

Takayoshi KODAMA, Mamoru KAGATA, Yasuo Ban, Hideharu EBISAWA and Yasunori SUZUKI

ABSTRACT Fatigue damage of orthotropic steel bridge decks caused by increasing traffic volumes and higher wheel loads has been reported. SFRC paving reinforcing method is considered to be one of the promising countermeasures for improving the fatigue durability of existing orthotropic steel deck. This paper describes features of adhesives and the results of constructions on SFRC-method.

KEYWORDS : 鋼床版, エポキシ接着剤, 疲労, 接着接合  
Orthotropic steel deck, epoxy adhesives, fatigue, glue

## 1. まえがき

近年, 重車両の通行する鋼床版をもつ橋梁では, 疲労損傷き裂の発生が数多く報告されている. とくに, デッキプレート溶接部に生じるき裂は鋼床版上のアスファルト舗装の損傷を招き, まれにデッキプレートを貫通して路面陥没に至った事例も報告<sup>1), 2)</sup>されており, 鋼床版橋梁の疲労対策は路面管理上の大きな課題となっている.

この疲労損傷の対策として, 鋼床版の変形に追従可能なよう設計されたたわみ性に富むアスファルト舗装にかえて, 剛性の高い鋼繊維補強コンクリート(以下, SFRC)を用いることで輪荷重による鋼床版の局部変形を抑えて疲労耐久性を向上させるコンクリート舗装による対策工法が実施<sup>3)</sup>されている. 鋼床版上のSFRC舗装は, 昭和62年に名古屋高速道路公社<sup>4)</sup>において初めて採用された. ここでは縦断勾配の大きいランプ部や料金所等におけるアスファルト舗装の流動損傷対策として, デッキプレートとSFRCとの接合はスタッドジベルによるものとし, コンクリート打継目には防水目的で接着剤が用いられた. 一方, 今日では, 接合方法の違いについて, 局部的な合成挙動の相違<sup>5)</sup>から, SFRC舗装を鋼床版の疲労対策として用いる場合のデッキプレートとの接合には, 全面エポキシ樹脂接着剤を塗布するとともに, コンクリート打込みエリアの周囲のみに付着界面の剥離に対する用心としてスタッドジベルが暫定的に用いられている. 2層橋である横浜ベイブリッジの下層部である一般国道357号では, 端部にスタッドジベルを2列配列した上で接着剤を塗布して厚さ75mmのSFRCが打ち込まれている. 首都高速道路株式会社の鋼床版<sup>6)</sup>においては, 高耐久型エポキシ樹脂系接着剤を用いることによってスタッドジベルを用いずに接着剤を全面塗布した後に主桁直上のみCFRP格子筋を幅1m程度で敷設して厚さ50mmのSFRCが打ち込まれている等の施工事例がある.

本報は, 鋼床版疲労対策として適用されている鋼床版上SFRC技術について, 接着接合の主な特徴やこれまでの適用事例等についてまとめたものである.

\* 鹿島道路(株)生産技術本部構造物解析・対策G課長(〒102-8566 東京都文京区後楽1-7-27)

\*\* 鹿島道路(株)技術研究所所長(〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

\*\*\* 鹿島道路(株)生産技術本部機械部部长(〒102-8566 東京都文京区後楽1-7-27)

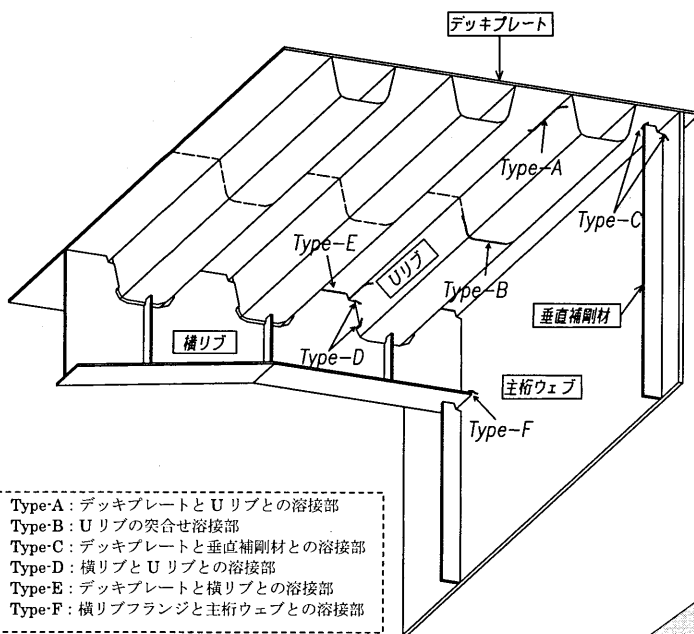
\*\*\*\* 鹿島道路(株)生産技術本部技術部部长(〒102-8566 東京都文京区後楽1-7-27)

\*\*\*\*\* 住友大阪セメント(株)技師長(〒274-8601 千葉県船橋市豊富町585)

## 2. 鋼床版疲労損傷の原因

鋼床版は、薄い鋼板により構成された構造であり、直接輪荷重の影響を受けるため、設計上疲労への配慮が必要である。平成 14 年に改訂された道路橋示方書<sup>7)</sup>では、疲労耐久性向上を図るために鋼床版の製作・施工に関する規定の充実が図られるとともに、同時に発刊された「鋼道路橋の疲労設計指針」(日本道路協会, 平成 14 年)では構造詳細による鋼床版の疲労設計の考え方や方法が示されている。

一方、既設橋では、大型車の交通条件の厳しい路線を中心に、1980 年代半ば頃より疲労損傷き裂の発生が報告されている。き裂は図-1 に示すように、横リブとUリブの溶接部、デッキプレートとUリブの溶接部、デッキプレートと垂直補剛材との溶接部に多く発生している。デッキプレートとUリブ溶接部に生じるき裂は、図-2 に示すように、デッキプレート貫通型き裂と溶接ビード貫通型き裂に分けられる。このき裂の発生について、大型車交通量などの荷重、構造詳細などの設計、溶接品質などの製作などが要因として考えられており、図-3 のように活荷重により鋼板どうしの接合部である溶接部付近のデッキプレートの局部変形・応力集中の繰り返しによる影響が大きい<sup>8)</sup>。大平高架橋における補強前後の活荷重(静的載荷)によるひずみ計測結果<sup>9)</sup>によれば、活荷重による鋼床版全体の版としての正曲げと車輪が直下に載荷した時のUリブウェブ上の負曲げ挙動が確認されている。すなわち、デッキプレートとUリブ溶接部においては、車両の走行によって版全体としての正曲げによる引張ひずみが生じるものの、輪直下(前輪、後前輪、後後輪)では瞬時に負曲げによる圧縮ひずみへと反転しており、このひずみ範囲(または応力範囲)が大きく疲労に影響を与えていると考えられる。



- Type-A: デッキプレートとUリブとの溶接部
- Type-B: Uリブの突合せ溶接部
- Type-C: デッキプレートと垂直補剛材との溶接部
- Type-D: 横リブとUリブとの溶接部
- Type-E: デッキプレートと横リブとの溶接部
- Type-F: 横リブフランジと主桁ウェブとの溶接部

図-1 疲労損傷の主な発生位置

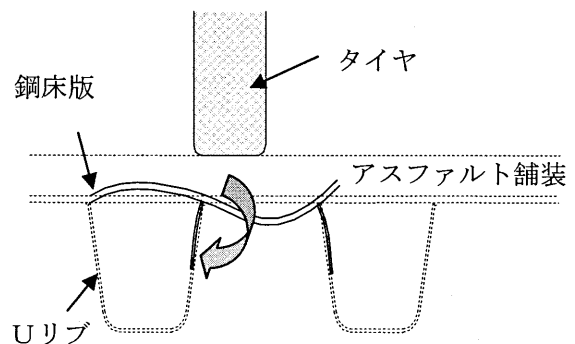


図-3 活荷重によるデッキプレートの変形図

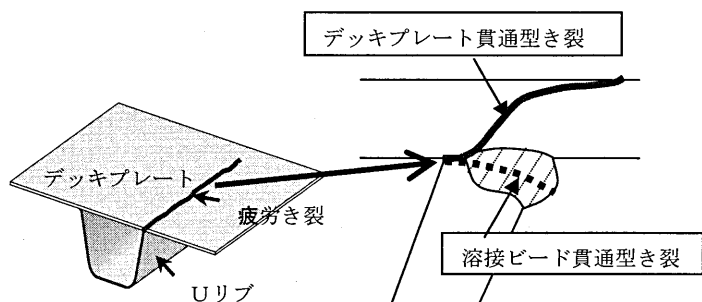


図-2 デッキプレートとUリブ溶接部のき裂

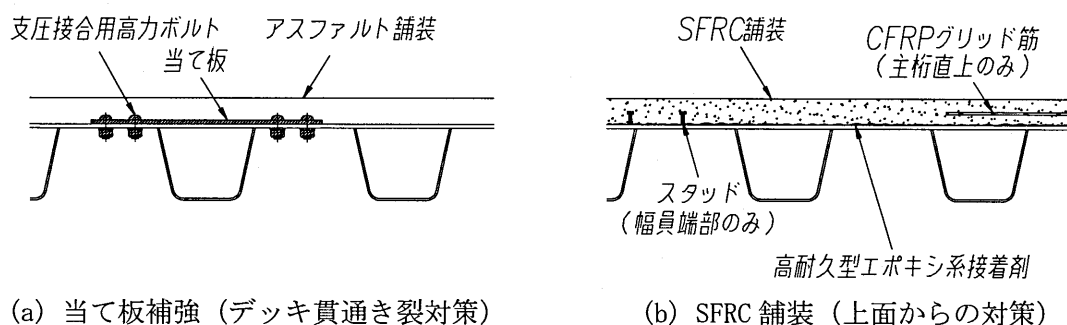


図-4 補修補強対策

### 3. 鋼床版疲労損傷に対する補修補強対策<sup>10)</sup>

鋼床版の疲労損傷に対する対策について、き裂による部材の破断部分については鋼部材による断面補強 (図-4 (a) 参照) があげられる。この当て板補強は、死荷重増の影響やデッキプレートの補強の場合には舗装との取り合い等にも配慮しておく必要がある。このため、鋼床版自体の鋼部材による断面補強の他、より合理的に鋼床版全体を補強する上で、剛性の高い舗装を敷設し、デッキプレートと合成させて鋼床版各部の局部応力・変形を軽減させることにより疲労耐久性を向上させる工法 (図-4 (b) 参照) が選択肢の一つとして挙げられる。

### 4. 鋼床版上SFRCとは

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) とは、鋼繊維をコンクリートに混入させた複合コンクリート材料のことである。コンクリート内部にひび割れが生じた後のひび割れ幅の抑制や靱性向上等の特徴を有している。鋼床版上SFRCとは、鋼床版溶接部に生じている疲労損傷の補強ならびに予防保全対策として、鋼床版と剛性の高いSFRCの一体化によってデッキプレートの面外曲げ剛性を向上させて、鋼床版の輪荷重による局部変形 (局部応力) を抑えることで疲労耐久性を向上させるコンクリート舗装による鋼床版疲労対策工法である。疲労対策としての鋼床版上SFRCの設計厚は、ウェブ直上の負曲げは別途対策を講じることを前提に既設のアスファルト舗装と同じ厚さで打ち換えられることから、ウェブ付近の鋼床版変形への良好な追随性 (靱性による効果) やコンクリートに生じるひび割れ幅の抑制効果からSFRCが用いられている。

鋼床版におけるSFRCとデッキプレートの接合方法としてはスタッドジベルまたは接着剤を用いる2つの方法が実用化されており、いずれの方法においても既設のアスファルト舗装よりも局部変形の抑制効果を有していることが確認されている。しかし、スタッドジベルによる接合においてはジベルとジベルの間等局部的な変形が接着接合よりも大きいこと、溶接による裏面塗装への影響懸念、維持修繕作業における時間的制約、維持修繕における損傷懸念等から、疲労対策としてはより局部変形の抑制が可能である全面にエポキシ樹脂系接着剤を塗布する接着接合が用いられている。この接着によって接合される鋼床版上SFRC舗装については、都市内のように表層としてアスファルト舗装が必要な場合 (2層タイプ) と、補強効果またはコストに重点を置いた場合の全断面コンクリート (1層タイプ) の2種類がある。両断面とも疲労に対する補強効果を有していることが確認されている。

### 5. 鋼床版上SFRC舗装に用いる接着剤について

#### 5.1 層間における付着の課題

コンクリートによる付着オーバーレイについて、オーバーレイ厚を設計する際に問題となるのは層間の付着率の選択であり、付着率を良好に保持できるならばオーバーレイ厚を小さくできるものの、十分な付着方法が採られなければその厚さはかなり大きいものとならざるをえない。層間の付着を高めるた

めの方法としてはいろいろな処理方法または材料が検討されているが、コンクリートの付着オーバーレイにおいては付着率の選択が設計上の大きな課題となっている。また、一般に付着を層間の引張またはせん断強度で評価すると強度の再現性が低いことやバラツキが大きいことが知られている。これは試験後の破壊位置が付着界面や内部破壊等異なる場合が多いことや試験装置間の差に関する検証等十分に行われていないことも影響している。

接着接合における良好な付着とは、目標強度を満足した上で接着剤の中で破断する凝集破壊またはオーバーレイしたコンクリートの内部で破壊が生じること（内部破壊）が良好な破壊形態<sup>1) 12)</sup>とされており、バラツキが少ないことが良好な接合といえる。付着界面で破壊する場合には、その界面の状態変化（凹凸度の変化、粉塵、湿度、水分量等）によってもばらつくので、必要な付着強度を確保できない部分がある確率で生じると考えられることから、避けなければならない破壊形態である。

鋼床版上SFRCの接合について、打ち込むコンクリートの厚さは既設アスファルト舗装厚以内という制約があることから、ここでの接合においてはデッキプレートとSFRCの一体化がなされ、試験においてはその破壊位置が内部破壊となる接合を得る必要がある。接着剤は一般に固体と固体の接合に用いられているものであり、フレッシュコンクリートを対象とした新たな接合においてもこのような高い付着性能を確保することが大きな課題であり、接着剤の付着性能または耐久性は、本工法における補強効果を左右する重要因子である。

## 5.2 フレッシュコンクリートを用いた接着接合

接着接合におけるエポキシ系接着剤とフレッシュコンクリートとの付着機構を把握するために、ここでは、被付着体としてコンクリートを用いて確認した。これは、コンクリートが気乾状態であり、しかも接着接合にはカッター面を使用しているため、凹凸が少なく鋼床版とほぼ同様な接着接合特性を有すると考えられたからである。セメントペースト、砂量を変えたモルタル3水準、コンクリートの計5種類について、付着強度の比較を行った。コンクリートについては、細骨材率（40～49%）が付着強度に及ぼす影響も確認した。実験に用いたエポキシ系接着剤の性状を表-1に、コンクリートの仕様を表-2に、配合を表-3に示す。なお、セメントペーストは表-3における単位水量と単位セメント量の割合で練り混ぜたものを用いた。モルタルは、セメントペースト配合をベースに、砂とセメントの質量比であるs/cを0.1、0.5、2.4（表-3のモルタル分のs/cに相当）の3水準とした。ベースコンクリートは表-3に示す配合を用いてΦ100×200mm供試体を作製し、高さ50mmとなるよう3等分にダイヤモンドカッターでカッティングし、カッティング面を被着体表面とした。さらに、Φ100×200mm型枠内に高さ100mm程度のダミー材料で、オーバーレイコンクリートの打込み厚さが50mmとなるよう高さ調整を行いながら硬化したベースコンクリートを設置した。オーバーレイコンクリートは、エポキシ系接着剤を塗布してから1時間経過後に打設して型枠バイブレータで締め固めた（20℃、60%R.H.）。付着の評価は、材齢7日で直接引張試験（直径100mm、高さ100mmの円柱供試体、引張速度0.4MPa/min.）によって行った。

表-2 コンクリートの仕様

項目	内容
設計基準曲げ強度	5.0N/mm <sup>2</sup>
配合曲げ強度	5.85 N/mm <sup>2</sup> (割増し1.17)
スランプ	6.5±1.5cm (打ち込み直前)
空気量	4.5±1.5% (打ち込み直前)

表-1 実験に使用した接着剤の諸性能

試験項目	試験方法	試験値 (目標値)
硬化物比重	JIS K 7112	1.41 (1.4±0.2)
可使時間 (分/20℃)	温度上昇法	73 (10以上)
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K 7208	79.1 (50以上)
圧縮弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K 7208	3060 (1000以上)
曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K 7203	65.5 (35以上)
引張せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JIS K 6850	14.9 (10以上)
付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	JHS 412	2.9 (1.5以上)

表-3 コンクリートの配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S1	S2	G
20	47.0	44.4	157	334	472	325	1030

オーバーレイ材料が異なる場合の直接引張試験の結果を図-5に示す。セメントペーストならびにS/Cが0.1と0.5のモルタルの付着強度は0.4N/mm<sup>2</sup>程度であるのに対し、S/Cが2.4のモルタルでは1.8N/mm<sup>2</sup>、コンクリートでは2.6N/mm<sup>2</sup>と顕著に大きくなった。すなわち、骨材が無い、または少ない配合の場合には著しく付着強度が低くなるという結果であった。セメントモルタル内の砂量を変えた場合(S/C:0~4.4)の引張強度との関係を図-6に示す。セメントモルタル内の砂量が増えるにしたがって高い付着強度を示している。コンクリートについて、細骨材率を変えた時の付着強度との関係を図-7に示す。細骨材率の値にかかわらず付着強度はほぼ同一の値となっている。このことから、エポキシ系接着剤とフレッシュコンクリートとの付着においては、エポキシ系接着剤がフレッシュコンクリート中の細骨材および粗骨材と強固に接着し、その後にフレッシュコンクリートが硬化して付着強度が若干増大するという機構であると考えられる。すなわち、接着剤は初めから固体であるものとは強固に接着するが、接着剤の硬化初期では流体状を呈しているものとの接着力はかなり小さいものと考えられる。

### 5.3 成分に関する影響

フレッシュコンクリートとの接合において、エポキシ樹脂系接着剤成分とセメントが接触する場合の強度への影響について、セメントモルタル供試体を用いて確認した。これは、フレッシュコンクリートとの接合においては骨材がエポキシ樹脂系接着剤と付着することによって接合しその後にセメントの水和反応によってフレッシュコンクリートが硬化することから、エポキシ樹脂系接着剤によるセメントへの影響をより検出しやすいモルタル供試体とした。各成分はセメント量の1%添加してφ50×100mmのセメントモルタル供試体を作製し圧縮強度試験に用いた。検討に用いた接着剤成分を表-4に示す。なお、セメントモルタルの配合は、単位水量を226kg/m<sup>3</sup>、W/Cを40%、s/cを2.0とした。養生は打込み直後から表面をポリシールで覆い20±3℃で封緘養生とした。試験材齢は7日とし、試験当日に脱型し圧縮強度試験に供した。載荷速度はそれぞれJIS A 1108に準拠した。さらに、硬化不良を起こしたものと標準供試体の界面付近のモルタル分を採取してX線回折法(XRD)および熱重量-示差熱分析(TG/DTA)によりエポキシ樹脂系接着剤のセメント水和反応に対する影響を確認した。XRDによる分析は、セメント水和物としてCa(OH)<sub>2</sub>を、未水和のセメント成分としてC<sub>3</sub>Sを対象とした。

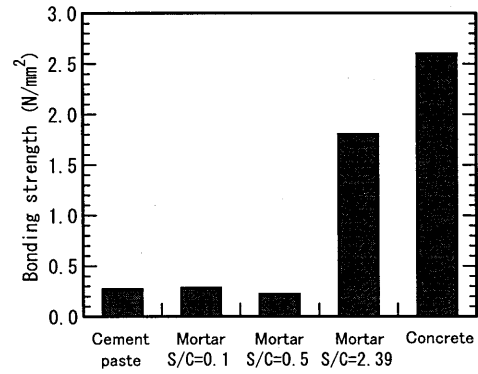


図-5 オーバーレイ材料と付着強度の関係

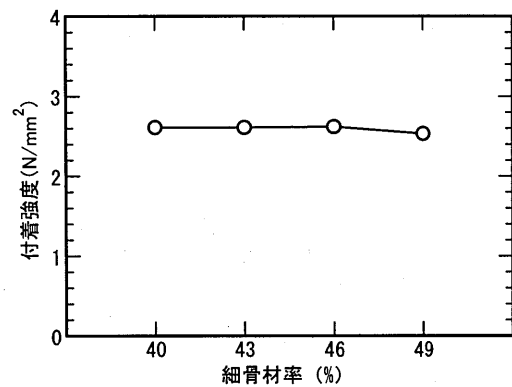


図-7 細骨材率と引張強度の関係

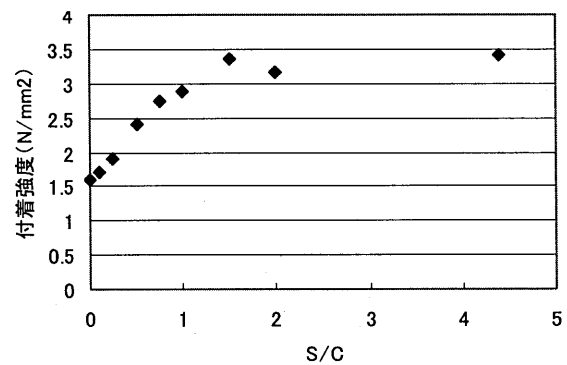


図-6 セメントモルタル内の砂量と引張強度の関係

セメントモルタルに主剤または硬化剤を添加した時の圧縮強度試験の結果を図-8に示す。主な特徴を以下のとおりである。No.9は親水性のアミンであり、疎水性アミンであるNo.8と比較して大きく圧縮強度が低下している。親水性材料をセメントモルタル中に混合すると、セメントモルタルの水分が奪われて強度特性が低下したものと考えられる。ポリアミンの種類 (No.12~17) について、マンニヒ変性ポリアミン (No.13) を用いたものは、圧縮強度はほぼ0に近く硬化不良が生じていた。セメントモルタルの色の変色もみられセメントの水和反応への影響が考えられる。エポキシ主剤 (No.2, 4)、硬化促進剤 (No.7)、石油樹脂 (No.17) と染料 (No.18) は、大きな影響は認められない。つぎに、硬化不良が確認されたNo.13供試体とNo.1標準配合について、X線回折およびTG/DTAの測定を行った。試験結果を図-9、図-10に示す。ここでのターゲットはセメント主成分であるC<sub>3</sub>Sとその水和に伴うCa(OH)<sub>2</sub>である。標準配合ではCa(OH)<sub>2</sub>のピークが認められたが、No.13ではC<sub>3</sub>Sのピークが大きく、Ca(OH)<sub>2</sub>のピークが認められなかった。また、TG/DTAにおいても、標準配合では450℃付近からCa(OH)<sub>2</sub>の脱水による吸熱ピークを伴う減量が見られたが、No.13ではほとんど認められず、水和が阻害されていることが確認された。以上のことから、フレッシュコンクリートとの接合に用いるエポキシ樹脂系接着剤の調合においては、各成分によるセメント水和や硬化に対する影響を確認しながら調合を行う必要がある。

表-4 検討に用いたエポキシ接着剤用組成材料

成分	番号	名称	概要
—	1	標準	普通セメントモルタル (W=226kg/m <sup>3</sup> , W/C=0%, s/c=.0)
主剤	2, 4	エポキシ主剤A, B	感温性の異なる主剤材料 (ビスフェノール型)
	3	粘性調整剤	粘度の低減材, ガラス転移点低減作用剤 (反応型)
	5	ゴム変性エポキシ	ゴム変性型エポキシ樹脂, 靱性向上・T <sub>g</sub> 低減作用剤
	6	シランカップリング剤	有機材料と無機材料の結合促進剤
	7	硬化促進剤	硬化反応時間の短縮
硬化剤	8~11	アミンA~D	成分の異なる4種類
	12~16	ポリアミンA~E	成分の異なる6種類
	17	石油樹脂	非反応型添加剤 (配合比率調整剤)
	18	染料	着色剤

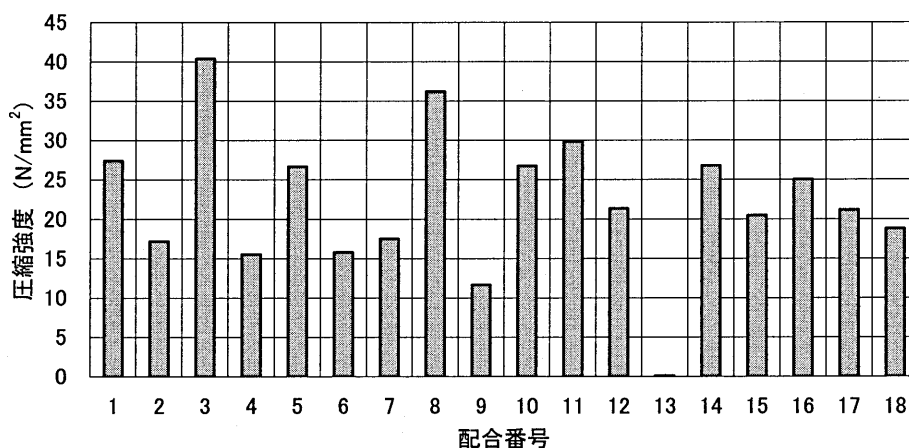


図-8 接着剤成分を添加した場合の圧縮強度試験結果

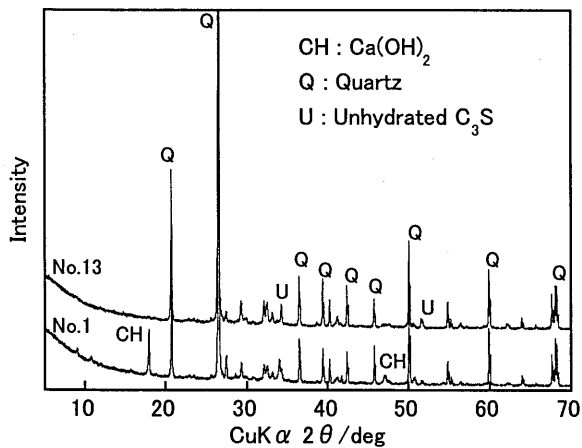


図-9 X線回折結果

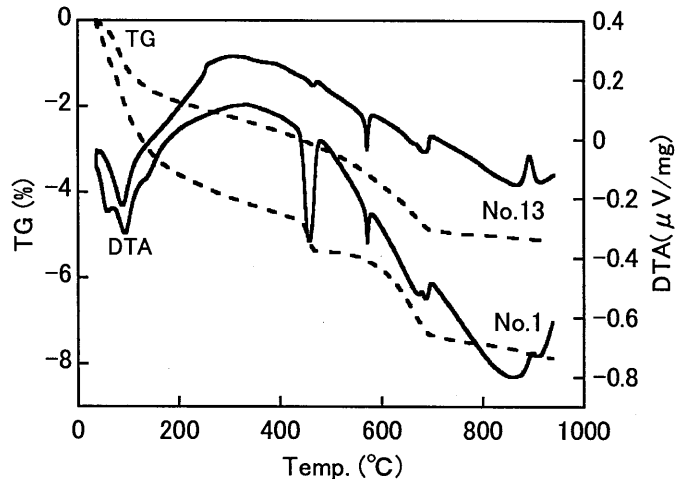


図-10 TG/DTA測定結果

#### 5.4 接着剤の選定

接着剤はこれまで固体と固体を接合させる材料としてさまざまな開発がなされている。しかし、フレッシュコンクリートとの接合は新しい接合方法であり、セメント水和反応との調和等新たな調合技術が必要である。フレッシュコンクリートとの接合を目的として調合された接着剤については室内での水浸状態における、良好な疲労抵抗性・高温抵抗性・低温抵抗性<sup>13) 14) 15)</sup>を有していることや実規模供試体を用いた水浸状態での輪荷重走行試験において14tf輪荷重走行・400万回走行後においても界面の引張強度が低下していない<sup>16)</sup>ことが確認されている(従来のものは温水暴露後の引張強度とせん断強度、水浸状態での疲労抵抗性の低下がとくに著しい)。本工法をより耐久性の高い対策工法とするには、疲労、水、温度変化に対する耐久性が検証されている材料、例えばこれまで施工実績を有する高耐久型エポキシ樹脂系接着剤等の適用が有効であると考えられる。

### 6. 鋼床版上SFRC舗装の適用事例

#### 6.1 適用のフロー

SFRC舗装を施工する前に、鋼桁のき裂調査ならびに補修を実施する必要がある。SFRC舗装はデッキプレートに内在しているき裂などを抑制する効果が確認<sup>17)</sup>されており、すべてのき裂を補修する必要はないが、デッキプレートを貫通しているき裂や、長いき裂は、当て板などにて補強を行う必要がある。従って、鋼桁の損傷が軽度の時期に、つまり出来るだけ早い時期にSFRC舗装を施工すれば、桁補修費を最小限に抑えられると考えられる。SFRC舗装工法の適用について、一般的なフローとして図-11に示す。

#### 6.2 これまでの主な適用事例

施工の仕様は、交通規制の条件、規制可能日数、コンクリート供給の制約、施工幅員等の条件に応じて、使用するセメントの種類(早強セメントもしくは超速硬セメント)、フィニッシャの種類やコンクリートのスランプの範囲等が設定されている。

これまで施工されたSFRC舗装の適用事例の概要を表-5に、主な特徴を6.3節以降に示す。

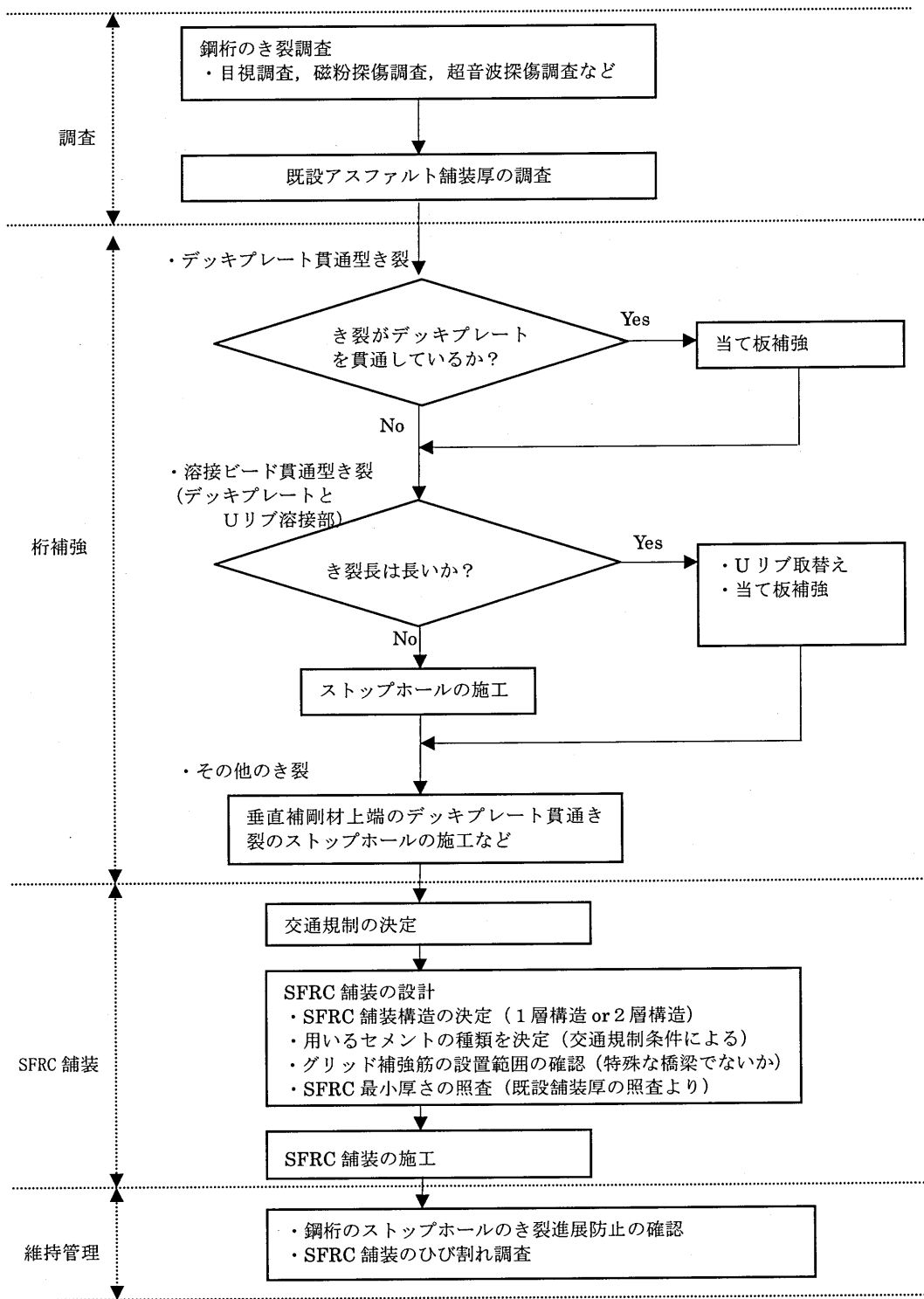


図-11 一般的なSFRC舗装工法の適用フローの例



表-5 SFRCの適用事例の概要

	横浜ベイブリッジ下層, 一般国道 356 号	湘南大橋 (神奈川県藤沢市)	大平高架橋 (栃木県小山市)	首都高速道路	
舗装構成図					
橋梁形式	3 径間連続鋼トラス斜張橋	3 径間連続鋼床版箱桁 2 連	3 径間連続鋼床版箱桁・単純鋼床版版桁	3 径間連続鋼床版箱桁など	
建設年次	2004 年	1986 年	1983 年	1977 年 (M橋)	
鋼桁の補修補強	なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デッキプレート貫通型き裂深さが 6mm 以上の箇所にて板補強</li> <li>・垂直補剛材上端の切断</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デッキプレートを貫通したき裂の当て板補強</li> <li>・垂直補剛材上端の切断</li> <li>・溶接ビード貫通型き裂へのストップ・ホルの施工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デッキプレートを貫通したき裂の当て板補強</li> <li>・溶接ビード貫通型き裂長 300mm 以上の当て板補強, 300 未満ストップ・ホル施工</li> </ul>	
SFRC 施工年次	2004 年 (新設)	2005 年 (20 年後)	2007 年 (25 年後)	2007 年から	
施工面積	27,400m <sup>2</sup>	3,600m <sup>2</sup>	1,526m <sup>2</sup>	7,300m <sup>2</sup>	
SFRC 舗装厚	75mm	80~90mm	75mm	50mm (+アスファルト舗装 30mm)	
設計基準強度	29.4N/mm <sup>2</sup> (材齢 7 日)	24N/mm <sup>2</sup> (材齢 3 時間)	29.4N/mm <sup>2</sup> (材齢 7 日)	24N/mm <sup>2</sup> (材齢 3 時間)	
配合	セメント	早強セメント (膨張材使用)	超速硬セメント	早強セメント (膨張材使用)	超速硬セメント
	粗骨材最大寸法	15mm	20mm	15mm	15mm (13mm) <sup>※1</sup>
	スランプ	8.0±2.5cm	5.0±1.5cm	5.0±1.5cm	6.5±1.5cm
	SF 混入量	120kg/m <sup>3</sup>	100kg/m <sup>3</sup>	120kg/m <sup>3</sup>	100kg/m <sup>3</sup>
交通規制	新設, ただし前後の取付道路が未完成	夜間の全面交通止め 21 時~翌朝 6 時	全面交通止め 約 1ヶ月間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・24 時間 1 車線規制</li> <li>・夜間 1 車線規制</li> </ul>	
既設アスファルト舗装	—	80~90mm シート防水	75mm シート防水	80mm 基層: グース	
施工	切削方法	—	1 次: 切削機+人力+ウォータージェット 2 次: 仮舗装撤去	切削機+人力+ウォータージェット	切削機+人力が多い
	研掃処理	1 種ケレン	1 種ケレン	1 種ケレン	1 種ケレン
	CFRP 格子筋 100×100mm	使用しない	全面配置	主桁ウェブ上 1.0m 幅	主桁ウェブ上 1.0m 幅
	スタッドシベル	SFRC 版舗設箇所の端部と施工継目に設置	SFRC 版舗設箇所の端部と施工継目に設置	SFRC 版舗設箇所の端部と施工継目に設置	使用しない
	接着剤	エポキシ系	K 工区: 高耐久型エポキシ系 N 工区: エポキシ系	高耐久型エポキシ系+専用プライマー	高耐久型エポキシ系
	コンクリート供給	バックホウ	横ベルコン	バックホウ	縦ベルコン
	コンクリートフィニッシュ	増厚用大型フィニッシュ	増厚用大型フィニッシュ	増厚用大型フィニッシュ	専用小型フィニッシュ
	養生	真空養生+シート	シート	シート	シート
SFRC 舗装, 桁補強以外の対策	なし	走行車線を変更し疲労損傷部への輪載荷をさけた	なし	なし	
施工または適用上の課題	前後の取付道路が未完成であったため, 海上 40m までコンクリートをポンプ圧送した。また, 凍結の懸念があったため, 真空養生を用いた。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・98 箇所の当て板補強があるためグリッド補強筋を全面に配置</li> <li>・交通規制の制約から 1 次施工で既設舗装撤去し仮舗装, 2 次施工で SFRC 舗装を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・デッキプレートを研掃後に専用プライマーで保護</li> <li>・既設シート防水をウォータージェットで撤去</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1 車線規制に対応したコンクリートフィニッシュ, ベルコンの開発</li> <li>・冬期の養生時間の短縮のために養生方法を検討</li> </ul>	
SFRC の効果確認等	活荷重によるひずみのモニタリング	SFRC 補強前後の活荷重によるひずみ計測	SFRC 補強前後の活荷重によるひずみ計測, 3ヶ月間の乾燥収縮計測	SFRC 補強前後の活荷重によるひずみ計測, 1年間の乾燥収縮計測	

※1: 実際は 13mm トップ (6 号砕石) を使用しているがコンクリートのふるい目に 13mm がないため表示は 15mm トップとした。

### 6.3 横浜ベイブリッジ下層部

#### (1) SFRC 採用の経緯

横浜ベイブリッジ下層部は、コンテナ車など重車両の往来が非常に多く、鋼床版の疲労軽減策として、当初設計であるグースアスファルト舗装の見直しがなされ、舗装による鋼床版デッキプレートの剛性増大方策として、鋼床版とSFRC（鋼繊維補強コンクリート）とを一体化する補強工法が、委員会による検討を経て我が国で初めて採用された。橋梁の標準横断面図を図-12に、SFRC舗装の標準断面図を図-13に示す。

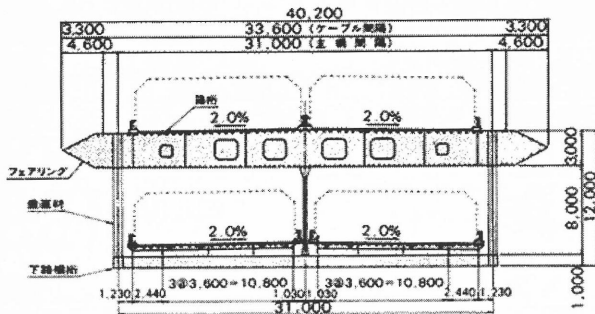


図-12 橋梁 標準横断面図

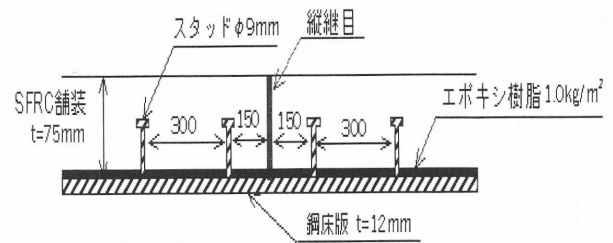


図-13 SFRC舗装 標準断面図

#### (2) 主な対応策

当該工事での主な検討結果を表-6に、施工状況を写真-1、写真-2に示す。

表-6 当工事での主な検討結果

項目	対応策
海面上約40mの鋼床版への資機材搬入	仮設構台（ベント）＋300tクレーン
海面上約40m鋼床版上へのコンクリート供給	ポンプ車によるベースコンクリートの圧送
鋼繊維の分散混入	分散装置 → エアブロー → ミキサー車
鋼床版とSFRC舗装との一体化	鋼床版を研掃し、防錆を兼ねた樹脂プライマーを塗布し、SFRC舗設直前にエポキシ樹脂塗布
SFRC舗装版端部の反り防止	スタッドジベル打設 2列@300mm
上路走行車両・舗設機械の振動、縦横断勾配でのコンクリートのダレ防止、平坦性の確保	コンクリート床版増厚用フィニッシャ、コンクリート縦仕上げ機の採用
コンクリート初期凍害防止、ダレ抑制	真空脱水工法の採用
目地	伸縮目地部は剛性低下となり目地材料は耐久性に劣るため、接着剤を塗布して突合せ構造とした。
養生	強風下での養生であるため、風の影響によるひび割れ抑制のため養生は、「シート＋マット＋シート（＋防風ネット）」とした。

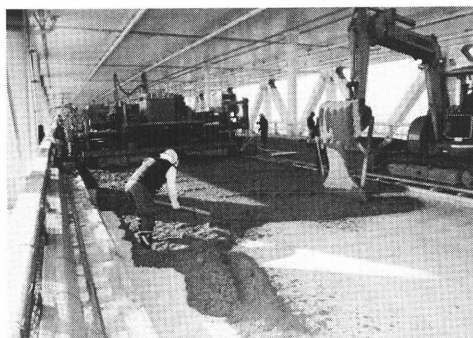


写真-1 SFRC敷上げ

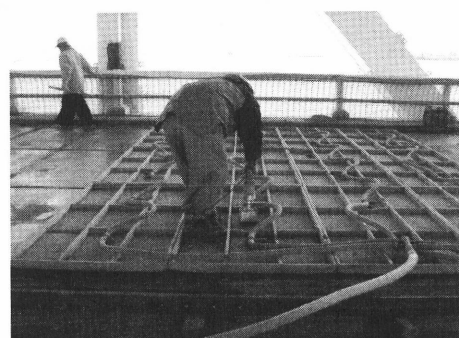
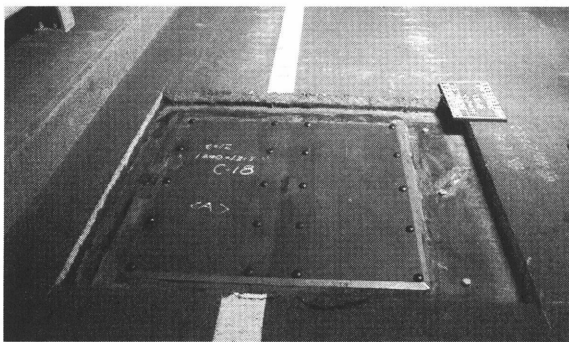


写真-2 真空脱水工法

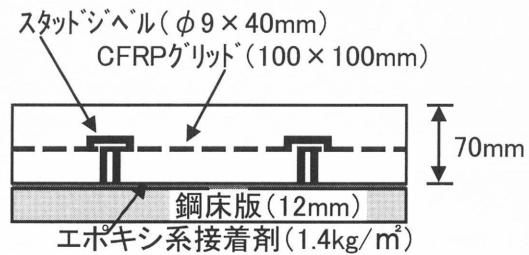
## 6.4 湘南大橋

### (1) SFRC 採用の経緯

平成 11 年 9 月、鋼床版部の舗装に発生したポットホールを調査したところ鋼床版デッキプレート  
の貫通き裂が確認された。その後、超音波探傷試験による調査を行ったところ、き裂の発生位置は走  
行車両の車輪直下であり、発生原因は車両通過時の板曲げ応力による疲労であることが判明した。そ  
こで、発生したき裂への対応としては、当て板補強（写真－3 参照）を応急的に行った。この時の当  
て板補強による応力低減効果は 3 割程度であった。その後デッキプレート厚さ 12mm に対して 6mm  
貫通した時点で当て板補強を用いたところ、平成 15 年度末ではこの当て板補強の数が 98 箇所に達し  
た。応急的な後追い対策の継続は交通への影響が大きいことから、平成 14 年度に恒久対策工法検討  
会（主催：平塚土木事務所）を設け補強方法について検討をするとともに、その後の一般国道 357 号  
横浜ベイブリッジ舗装工事を参考として試験施工工事による仕様検討を行い、最終的な仕様を検討会  
で討議の上定めた。SFRC 舗装の標準断面図を図－14 に示す。



写真－3 当て板補強 (1.2×1.2m)



図－14 SFRC 舗装標準断面図

### (2) 主な対応策

当該工事での主な検討結果を表－7 に示す。

表－7 当工事での主な検討結果

項目	対応策
使用資機材の選定	ハンドリングタイムを1時間確保することを前提として超速硬セメント、防水層の剥ぎ取りに用いるウォータージェット（圧力 2,300kgf/cm <sup>2</sup> 、水量約 32 リットル/分）。
接着剤の仕様	養生時間はコンクリートの打込みから4時間。最低塗布厚を 0.5mm とし、急速施工での塗布厚さのバラツキから平均厚さを 1.0mm。
補強筋の選定	負曲げに対するひび割れ分散効果・ひび割れ幅の抑制効果、腐食抵抗性から CFRP (100mm 間隔、断面積 39.2mm <sup>2</sup> ) を採用。
接着剤の疲労抵抗性	接着剤により一体化された鋼床版と SF コンクリートの繰返し载荷に対する付着性能を正曲げにより確認。模擬鋼床版の大きさは、1.5m×1.4m×12mm(t)、Uリブ2本付き（厚さ 6mm）。試験機は、（独）土木研究所所有の「大型構造物繰返し载荷試験装置（繰返し最大荷重 50tf、载荷面積 20cm×20cm×2（間隔 10cm））を使用。
構内試験舗装による仕様確認	模擬床版上におけるモデル施工として公開実施。打設時の鋼床版表面温度の高温による影響等によって付着強度が目標強度を満足できない箇所と打設直後に表面ひび割れの発生あり。SFRC の配合見直し（スランプを当初計画の 8cm から 5cm へと変更し、さらに乾燥収縮量低減が図れるよう単位水量と単位セメント量の低減）を行った上で再度同様な構内試験施工を実施した。2回目工場試験施工では、付着強度は目標強度を満足し初期のひび割れ発生がないことを確認。

## 6.5 大平高架橋

### (1) SFRC 採用の経緯

大平高架橋は国道 50 号の 31 径間、全長 987m の道路橋である。1983 年に上り線 2 車線（高崎方向）が完成し、2005 年に上り線に並行して下り線 2 車線が開通した。上り線は 20 年以上供用しており、車輪通過直下の鋼床版溶接部には、デッキプレートと U リブとの溶接部等に疲労損傷が見られていた。そこで、疲労対策の一環として、鋼床版各部の局所応力の軽減を図るために、上り線の U リブを用いた鋼床版の 3 径間連続 2 箱桁 1 連、単純鋼床版 2 連、延長 213m に SFRC が採用された。SFRC 舗装の標準断面図を図-15 に示す。

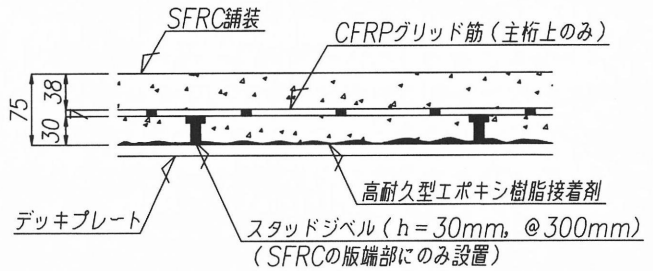


図-15 SFRC 舗装標準断面図

### (2) 主な対応策

当該工事での主な検討結果を表-8 に、施工状況を写真-4、写真-5 に示す。

表-8 当工事での主な検討結果

項目	対応策
補強筋の設置幅	有限要素解析を用いて検討。CFRP 格子筋は、床版コンクリートの許容引張応力度を超える範囲とし、さらに定着として 2 マス確保するよう設置幅を設定した。
補強筋の設置高さ	有限要素解析を用いて効果を確認するとともに、将来の維持補修から表面 30mm の切削が可能となるよう、上かぶりを 38mm とした。
スタッドジベル	維持補修において表面 30mm の切削が可能となるよう、高さを 30mm とした（費用は少しコストアップ）。
鋼繊維の分散混入	糊付きは圧縮強度が少し低下すること、人力投入ではミキサー回転時に空気量の巻き込み量が多くなりやはり圧縮強度の低下につながることから、比較的短時間で均等に投入可能なエアブロー方式によってミキサー車に鋼繊維を投入した。
混和材量	乾燥収縮量を低減させるために、膨張材（低添加型 20kg/m <sup>3</sup> ）を用いるとともに、混和剤として高性能 AE 減水剤を用いた。
シート防水の撤去	ウォータージェットを用いて撤去した。
研掃後の錆止め	研掃からコンクリート打設までの間が 7 日間程度空くことから、研掃直後には接着剤と相性の良いプライマーを用いた。



写真-4 接着剤の塗布



写真-5 コンクリートの打ち込み

## 6.6 首都高速道路

### (1) SFRC 採用の経緯

2004 年度に既設鋼床版上に大型車両が繰り返し通過することで発生する疲労き裂を確認して以来、鋼床版の耐久性の確保に向けた対策の検討をはじめ、2005 年度には疲労損傷対策としての技術公募が行われた。直ちに補修を行うという観点から、実現性や室内の実験結果などを踏まえて、2007 年 1 月にパイロット工事を行っている。SFRC 舗装の標準断面図を図-16 に、水浸輪荷重走行疲労試験の状況を写真-6 に示す。

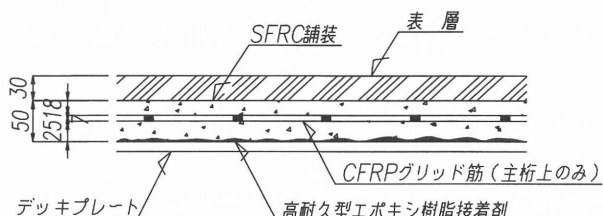


図-16 SFRC 舗装標準断面図

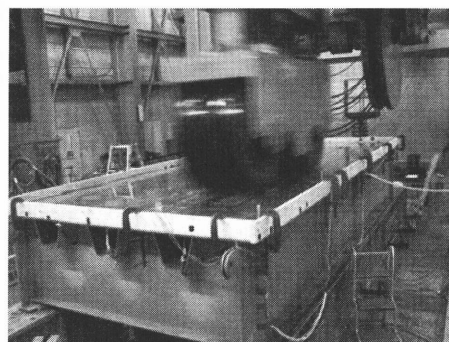


写真-6 水浸輪荷重走行疲労試験

### (2) 主な対応策

当該 SFRC 舗装工事での主な検討結果を表-9 に示す。

表-9 当工事での主な検討結果

項目	対応策
配合	骨材最大寸法はアスファルト混合物用の 6 号砕石 (最大寸法 13mm) を用いた。スランプは用いる機械の性能に合わせ、 $6.5 \pm 1.5\text{cm}$ とした。 SFRC 版の剛性向上と乾燥収縮量の低減を目的として用いる砕石を選定した。
スタッドジベル	水浸輪荷重疲労試験においてスタッドジベルを用いなくても界面での引張強度が低下しないことを確認したことから、用いないこととした。
コンクリート供給	1 車線内での施工であるため、縦ベルコンを専用に製作し、このベルコンの下で接着剤の塗布作業を行うこととした。そのため、ベルコンによる供給を連続的なものとするために連続練り式モーター車によってコンクリートの練混ぜを行うこととした。
締固め・仕上げ	図-16 に示すとおり、コンクリートの充填性から下かぶりは 25mm、CFRP 格子筋の厚さは 7mm、上かぶりとしては最低骨材 1 個程度を確保するために骨材最大寸法である 13mm より主桁部での最小厚さは 45mm となる。コンクリートフィニッシャの目標高さに対する仕上がり誤差は 5mm 以内で制御することを前提に SFRC の最小厚さを 50mm とした。つまり、用いるコンクリートフィニッシャは目標高さに対して $\pm 5\text{mm}$ の範囲に仕上げ可能な精度を有するものとした。そのため、施工においてもレールを用いて正確な基準高さを確認した上で下がり管理で高さを制御する等、機械と施工の両方からこの厳しい仕上げ精度に対応する。
幅員	車線側の端部において隅角部荷重による影響による斜めに生じるひび割れの発生を避けるために、Uリブ 1 本分程度路肩側に幅員を上げた。
目地	一般に目地材の耐久性は小さく、目地材の剥奪等の破損を早期に招き雨水の浸入口となる可能性があるため、突合せ部であるコンクリート打継目が開口しないよう接着剤を塗布する。
補強筋	主桁直上負曲げ部でのデッキプレートから SFRC の剥離を抑制するために、CFRP 格子筋を用いる。

## 7. あとがき

鋼床版疲労対策として適用されている鋼床版上SFRC技術について、接着接合の主な特徴やこれまでの適用事例等について報告した。鋼床版橋梁における疲労対策について、本工法の検討に際しては、鋼構造、無機材料（コンクリート）と有機材料（接着剤）、そしてコンクリート舗装に関する高度な知識と経験の融合が不可欠であり、今後も鋭意研究がすすめられていくものと期待される。本報が同様な課題を抱えている関係者の一助になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 西川和廣：SFRCによる鋼床版舗装－鋼とコンクリートの新しい関係－，橋梁と基礎，2005-8，pp. 84-87
- 2) 山田健太郎：重交通下における鋼床版の疲労損傷－名古屋周辺での事例－，土木学会第10回鋼構造と橋に関するシンポジウム，2007-8，pp. 11-18
- 3) 加形護ほか：SFRC舗装による鋼床版の疲労損傷対策－一般国道357号横浜ベイブリッジ舗装工事－，橋梁と基礎，2004-10，pp. 27-32
- 4) 鷺見高典ほか：SFRC舗装を施工した鋼床版の供用22年経過後の応力測定，土木学会第63回年次学術講演会，平成20年9月，pp. 421-422
- 5) 一宮充ほか：SFRC舗装を舗設した鋼床版の移動輪荷重載荷試験，土木学会第61回年次学術講演会，平成18年9月，pp. 1115-1116
- 6) 梶原仁ほか：一車線規制に対応した鋼床版上SFRC施工事例，第62回セメント技術大会，平成2008-05，pp. 100-101
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，2002-03
- 8) 三木千壽ほか：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集No. 780/I-70，2005. 1，pp. 57-69
- 9) 児玉孝喜ほか：大平高架橋の鋼床版におけるSFRC舗装によるひずみ低減効果，土木学会第6回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2008-06，pp. 111-120
- 10) 村越潤ほか：鋼床版の疲労損傷と補修・補強技術に関する検討，土木学会鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集Vol. 10，2007-08，pp. 19-37
- 11) 新保正樹編：エポキシ樹脂ハンドブック，日刊工業新聞社，pp. 299
- 12) 原賀康介：信頼性の高い接着設計のための基本条件と耐久性評価法，接着学会誌，2007-08，pp. 319-324
- 13) 武蔵俊行ほか：コンクリート舗装における接着剤による付着オーバーレイ工法の疲労耐久性に関する研究，土木学会第63回年次学術講演会，2008-09，pp. 287-288
- 14) 伊藤清志ほか：道路橋鋼床版上SFRC舗装に適用する接着剤の耐久性に関する一検討，土木学会第63回年次学術講演会，2008-09，pp. 277-278
- 15) 神下竜三：コンクリート付着オーバーレイ工法の寒冷地への適用に関する基礎的研究，第63回セメント技術大会，2009-05，pp. 74-75
- 16) 小野秀一ほか：鋼繊維補強コンクリートを敷設した鋼床版の水浸輪荷重疲労試験，土木学会第62回年次学術講演会，2007-09，pp. 57-58
- 17) 下里哲弘ほか：疲労損傷を受けた鋼床版におけるSFRC補強後の疲労耐久性検証試験，土木学会第62回年次学術講演会，2007-09，pp. 43-44