鋼床版の疲労対策技術の性能検証

PERFORMANCE VERIFICATION OF RETROFITTING METHOD FOR ORTHOTROPIC STEEL DECK

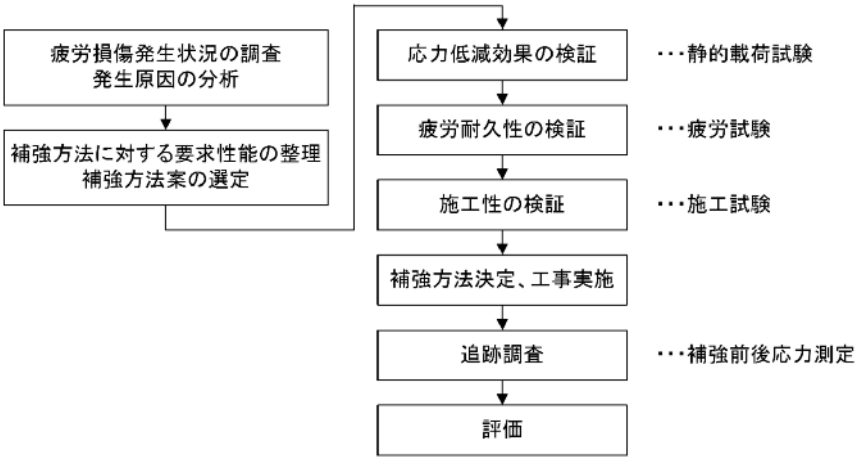
若林　登*
Noboru WAKABAYASHI

ABSTRACT　A number of fatigue cracks have been detected in orthotropic steel decks of highway bridges. In order to retrofit existing orthotropic steel decks the SFRC pavement works are being carried out in Metropolitan Expressway. This paper presents the outline of the performance verification of SFRC pavement.

KEYWORDS：鋼床版，疲労，補強，SFRC，載荷試験，疲労試験
orthotropic steel deck, fatigue, retrofit, SFRC, loading test, fatigue test

１．まえがき

鋼床版は，デッキプレートを縦リブと横リブで補剛した床版構造であり，自動車荷重を直接支え，主構造に伝達する部材である。比較的薄い鋼板を溶接により組立てること，死荷重応力の割合が小さく活荷重による繰返し応力の影響を強く受けることから，道路橋の中では疲労の影響を受けやすい部位である。昭和 55 年の道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編では，疲労破壊を防ぐため，Ｔ荷重１台載荷に対する縦リブの許容曲げ引張・圧縮応力度が規定されたが，この規定は現在の目で見れば疲労に対する配慮としては不十分なものであり，供用中の鋼床版にはさまざまなタイプの疲労亀裂が発生している。首都高速道路ではトラフリブ形式鋼床版の疲労耐久性向上対策としてＳＦＲＣ（Steel Fiber Reinforced Concrete，鋼繊維補強コンクリート）舗装工事を実施中であるが，本稿ではＳＦＲＣ舗装を補強方法として決定するまでの過程で行った性能検証の概要について紹介する。



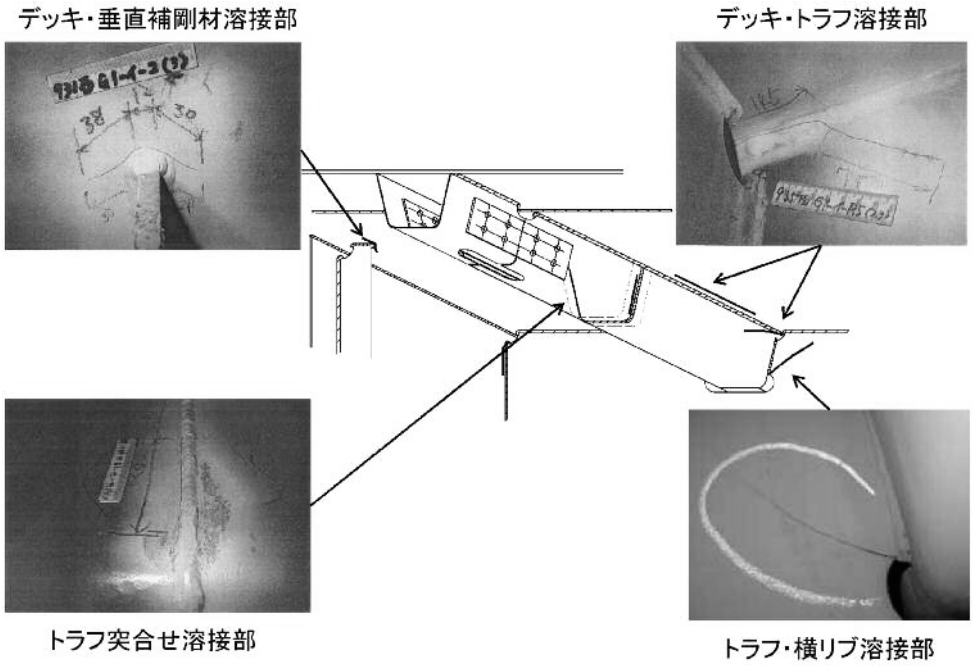
図－１　補強方法検討フロー

*首都高速道路㈱ 保全･交通部 鋼構造物疲労対策課（〒100-8930　東京都千代田区霞が関 1-4-1）

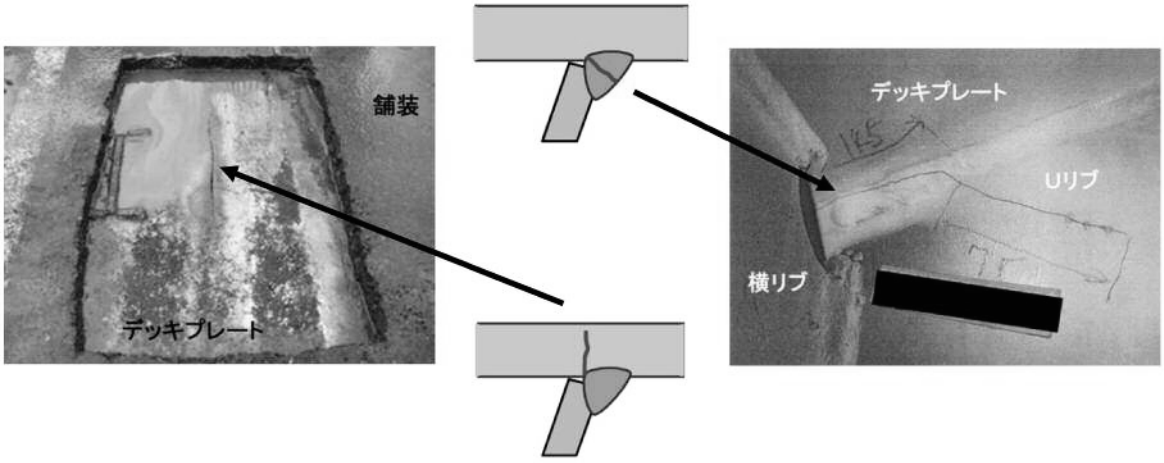
２．疲労損傷発生状況と原因

2.1　疲労損傷発生状況[1)~4)]

首都高速道路では，平成 13～14 年に供用開始から 20 年以上経過した湾岸線の鋼床版箱桁橋の点検によりデッキプレートとトラフリブの溶接部，トラフリブと横リブの溶接部，デッキプレートと垂直補剛材の溶接部，トラフリブの突合せ溶接部等，さまざまな疲労亀裂が走行車両の輪直下に集中して発見され，平成 16 年には供用開始から 15 年以上経過した中央環状線で舗装の変状がきっかけでデッキプレートを貫通する亀裂が発見された。トラフリブ形式鋼床版のデッキプレートとトラフリブの溶接部に発生する亀裂には，溶接部のルートを起点にデッキプレートを貫通する方向に進展する「デッキ貫通亀裂」と溶接ビードを貫通する方向に進展する「ビード貫通亀裂」の２つのタイプがある。ビード貫通亀裂の場合でも，溶接ビードに沿って進展した亀裂がデッキプレートに向かって分岐し，デッキプレートを貫通した事例が報告されている。デッキ貫通亀裂とビード貫通亀裂は，著しく進展した場合，車両の走行安全性や構造物の安全性に重大な影響を与える恐れがあり，その対策は道路橋を維持管理するうえで重要な課題の一つである。



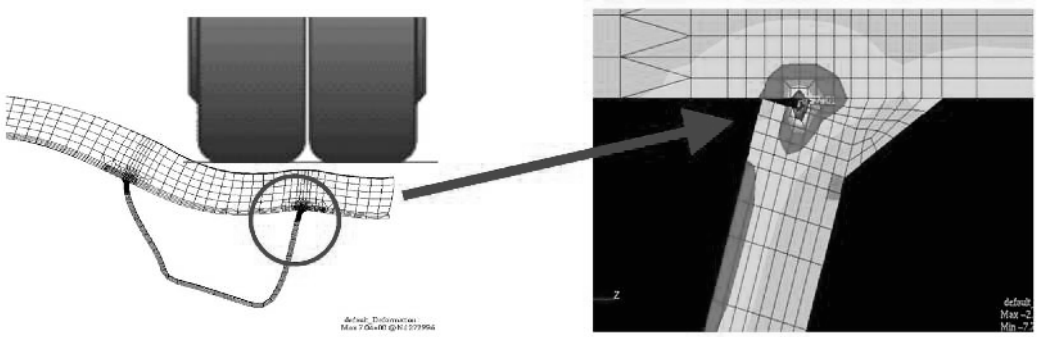
図－２　鋼床版に発生する疲労亀裂



図－３　デッキ貫通亀裂（左）とビード貫通亀裂（右）

2.2　疲労損傷発生原因[4)]

疲労損傷発生の原因を分析するため，疲労亀裂が発生している橋梁で荷重車を用いた走行試験を行い，車両の走行に伴って発生する応力を測定するとともに，橋梁全体の挙動を考慮できる全体モデル，デッキプレートとトラフリブの溶接部などの着目箇所周辺における板の変形挙動や局部応力を評価する部分モデル，溶接部のルートの応力を評価する詳細モデルの３段階によるＦＥＭ解析を行った。解析の結果，デッキプレートとトラフリブの溶接部では輪荷重の直接載荷によるトラフリブウェブ間のデッキプレートのたわみとそれに追従するトラフリブの相互変形挙動が原因となり，ルートに応力集中が生じ，疲労亀裂が発生すると考えられた。



図－４　デッキプレートとトラフリブの溶接部の応力集中

３．補強方法の選定

3.1　補強方法に対する要求性能

鋼床版にはさまざまなタイプの疲労亀裂が発生し，亀裂を発生させる載荷条件，応力・変形挙動はタイプごとに異なる。疲労耐久性向上のための補強方法の検討にあたっては，デッキ貫通亀裂とビード貫通亀裂を主な対象とした。補強方法に対する要求性能は，亀裂発生の原因である応力集中の低減と疲労耐久性が第一であるが，供用中の高速道路に適用することから，既設構造物の安全性及び使用性への影響，施工時の交通運用への影響及び走行車両の安全性も重要である。

(1)応力低減効果

・デッキ貫通亀裂及びビード貫通亀裂発生の原因となるデッキプレートとトラフリブの溶接部のルートに生じる応力集中に対して十分な応力低減効果を有すること。

(2)疲労耐久性

・補強された鋼床版，補強に用いる材料が十分な疲労耐久性を有し，応力低減効果が持続すること。

(3)既設構造物への影響

・補強による死荷重増，舗装構成の変更などが既設構造物の安全性，使用性に与える影響が許容できる範囲にあること。

(4)施工性

・補強工事が高速道路の交通運用，走行車両の安全性に与える影響が許容できる範囲にあること。

3.2. 補強方法案[5)]

補強方法案として，ＳＦＲＣ舗装，鋼板敷設，トラフリブ内軽量骨材コンクリート充填（以下，リブ充填）の３案が選定された。補強方法のイメージを図－５に示す。

(1)ＳＦＲＣ舗装

デッキプレート上面にＳＦＲＣを敷設し，接着剤やスタッドジベルを用いてデッキプレートと合成させ，デッキプレートの剛性を向上させる方法である。他機関において舗装厚 75～80㎜ 全てをＳＦＲＣに置換え，接着剤とスタッドジベルによりデッキプレートと合成させた事例が既にあったが，首都

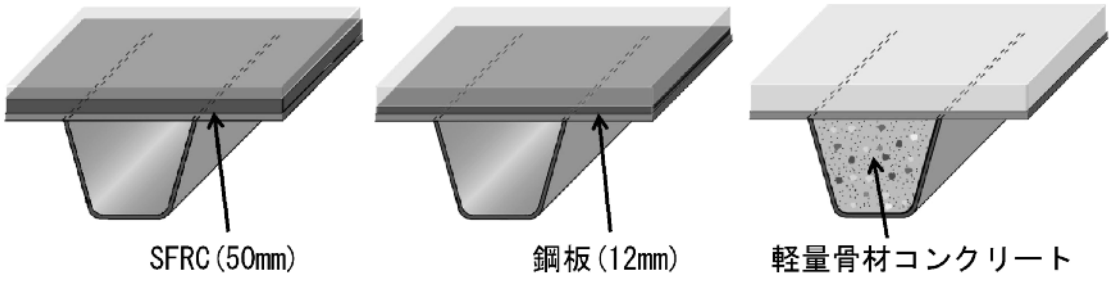
高速道路では走行性の確保，舗装の高機能化のため，鋼床版上の舗装厚 80㎜ に対し，基層 50㎜ をＳＦＲＣ，表層 30㎜ をアスファルトとし，ＳＦＲＣは接着剤のみでデッキプレートと合成させる舗装構成としたので，この違いが応力低減効果及び疲労耐久性に与える影響の検証が必要であった。また，他機関の事例は供用開始前の工事及び通行止め工事であったが，首都高速道路の通行止めは社会的影響が非常に大きいため，１車線規制で安全かつ効率的に施工できる必要がある。

(2)鋼板敷設

デッキプレート上面に補強鋼板を敷設し，高力ボルトで接合する方法である。この方法は，デッキ貫通亀裂が発見された当初から，路面の陥没を防止するための応急処置として実施されていたが，トラフリブ内側のデッキプレートにボルトを配置できないため応力をどの程度低減できるか検証が必要であった。また，この方法で鋼床版を面的に補強する場合は上部構造の死荷重増が問題となる。

(3)リブ充填

トラフリブ内部に軽量骨材コンクリートを充填する方法である。前述の補強方法と違い，高速道路を規制せずに施工できる利点があるが，コンクリート充填による新たな応力集中の発生，リブ間のデッキプレートの応力性状等の検証が必要であった。また，コンクリート充填による死荷重増も問題である。



(a)ＳＦＲＣ舗装　　(b)鋼板敷設　　(c)リブ充填

図－５　補強方法のイメージ

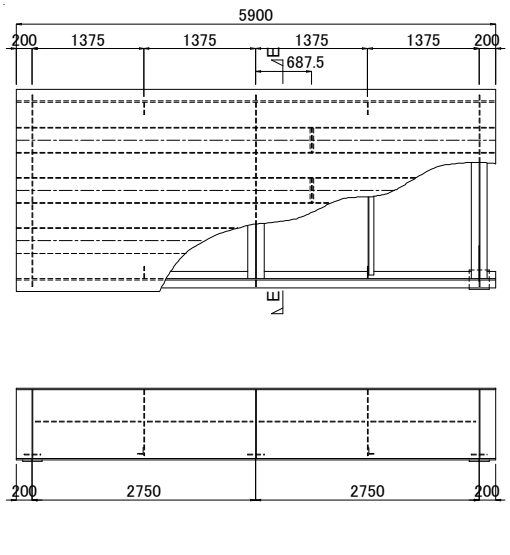
４．応力低減効果の検証[5)]

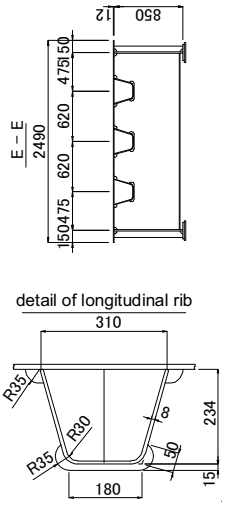
4.1　静的載荷試験

各補強方法による応力低減効果を検証するため，実橋の一部を模した試験体を作成し，無補強１ケース，補強後３ケースに対して実トラックによる静的載荷試験を行った。

実験に用いた試験体を図－６に示す。デッキプレート，リブ等の板厚，部材の配置は，疲労損傷が発生した湾岸線の実橋を参考に決めた。通常のアスファルト舗装が敷設された鋼床版においてもアスファルト舗装の剛性がデッキプレートの変形を抑制することが知られているが，夏季にはアスファルト舗装の剛性が低下することを考慮し，本試験の無補強のケースではアスファルト舗装は敷設していない。

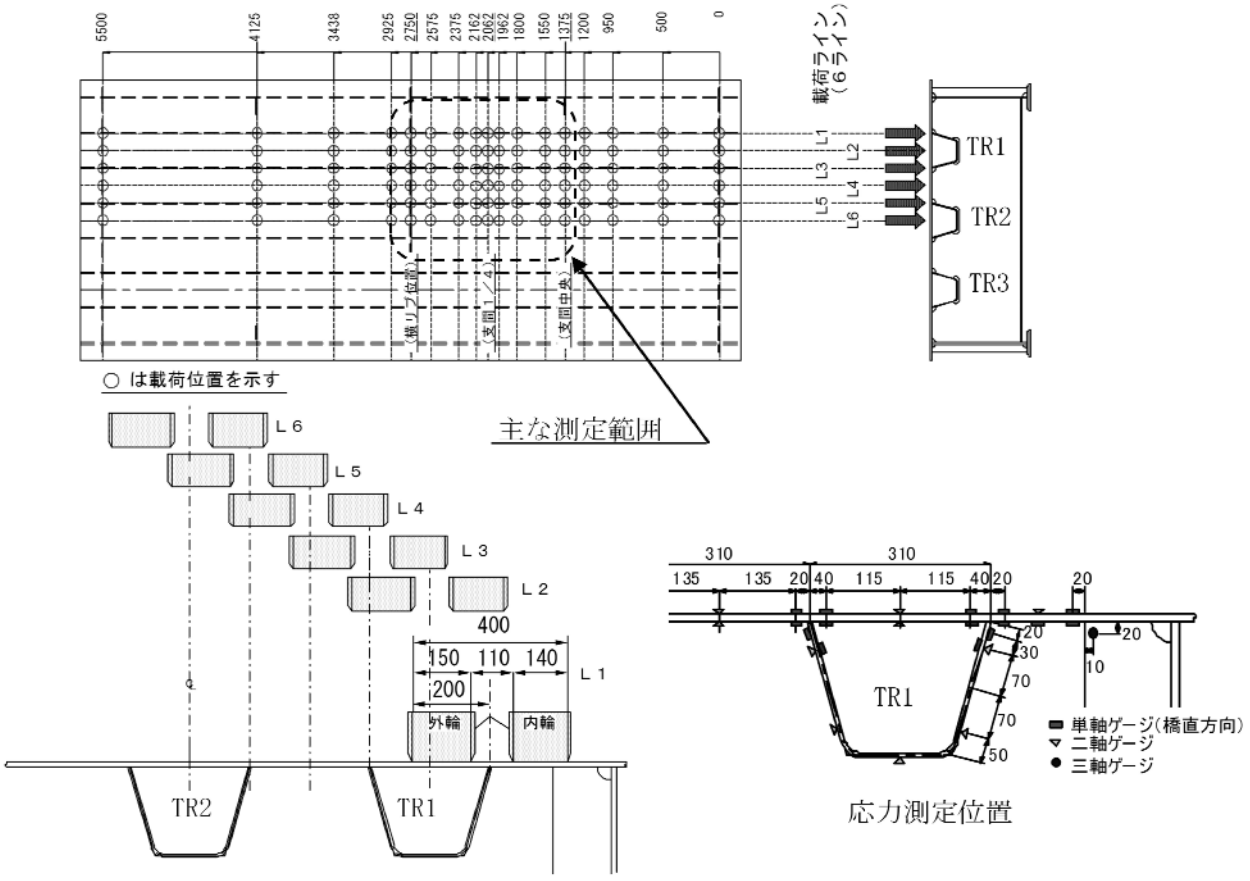
荷重載荷位置と応力測定位置を図－８に示す。荷重載荷位置は，橋軸直角方向についてはトラックのダブルタイヤがウェブ寄りのトラフリブウェブを跨ぐ形で載荷するＬ１から中央のトラフリブウェブ直上に載荷するＬ６の６ラインとし，各ラインにおいて橋軸方向に載荷位置を順次移動させる影響線載荷とした。応力測定の一番の着目箇所はデッキプレートとトラフリブの溶接部であり，溶接部を取囲む形でデッキプレートのトラフリブ内側及び外側，トラフリブウェブの３箇所について外面と内面の応力を測定した。





図－６　静的載荷試験体

図－７　静的載荷試験実施状況



図－８　荷重載荷位置と応力測定位置

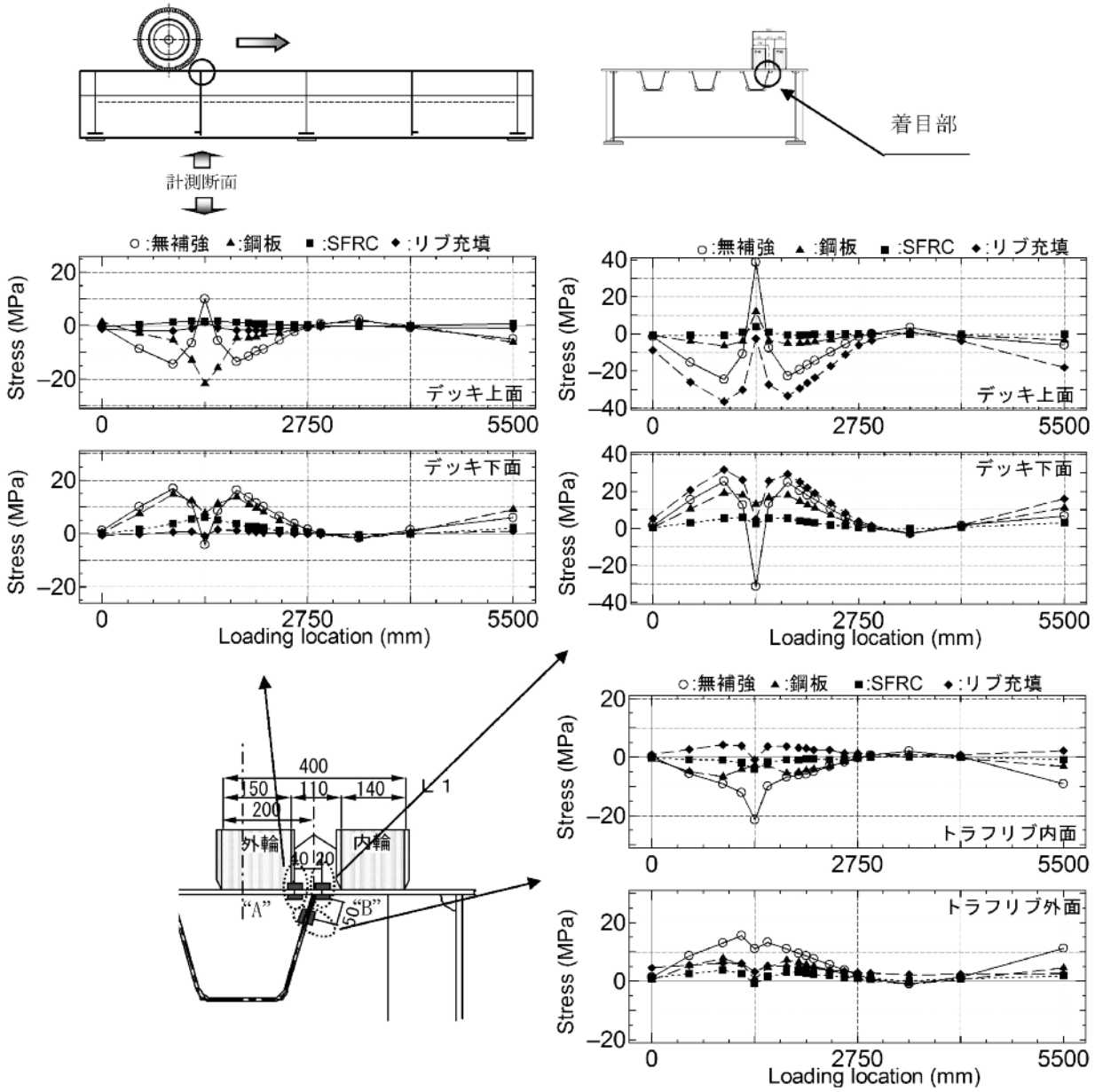
4.2　試験結果

試験結果の一例として，Ｌ１ライン載荷時における縦リブ支間中央のデッキプレートとトラフリブの溶接部近傍の応力挙動を図－９に示す。無補強の場合，デッキプレートの応力は荷重の載荷により始めは上面圧縮，下面引張の曲げ応力が生じるが，荷重が直上に載荷されると上面引張，下面圧縮に反転する。前者は版としてのたわみによる変形，後者はトラフリブウェブを支点とする局部的な変形

と考えられ，輪荷重の通過により二つの変形モードが混合して発生することがわかる。

次に荷重の移動に伴う応力振幅を表－１に示す。ＳＦＲＣ舗装は，着目する溶接部近傍３箇所の応力振幅が無補強に比べ10～30%程度まで低減し，応力低減効果が良好である。鋼板敷設は，トラフリブ外側デッキプレート下面，トラフリブウェブ内面については 30～40%程度まで応力が低減するが，トラフリブ内側デッキプレート下面では80%程度である。これはトラフリブ内側のデッキプレートにボルトを配置できないことが原因と考えられる。リブ充填は，トラフリブ内側デッキプレート下面，トラフリブウェブ内面では10～20%程度まで応力が低減するが，トラフリブ外側デッキプレート下面では60%程度である。これはリブ間のデッキプレートの剛性が向上しないことが原因と考えられる。

この結果から，ＳＦＲＣ舗装は十分な応力低減効果を有するが，鋼板敷設とリブ充填は応力低減効果が不十分と判断した。



図－９　デッキプレートとトラフリブの溶接部近傍の応力挙動（縦リブ支間中央）

表－１　輪荷重の移動に伴う応力振幅（縦リブ支間中央）

	無補強	SFRC舗装	鋼板敷設	リブ充填
デッキプレート下面（トラフリブ内側）	21	7（0.33）	17（0.81）	2（0.10）
デッキプレート下面（トラフリブ外側）	57	6（0.11）	22（0.39）	34（0.60）
トラフリブウェブ内面	23	4（0.17）	8（0.35）	5（0.22）

単位：MPa、（）内は無補強との比率

５．疲労耐久性の検証[6),7)]

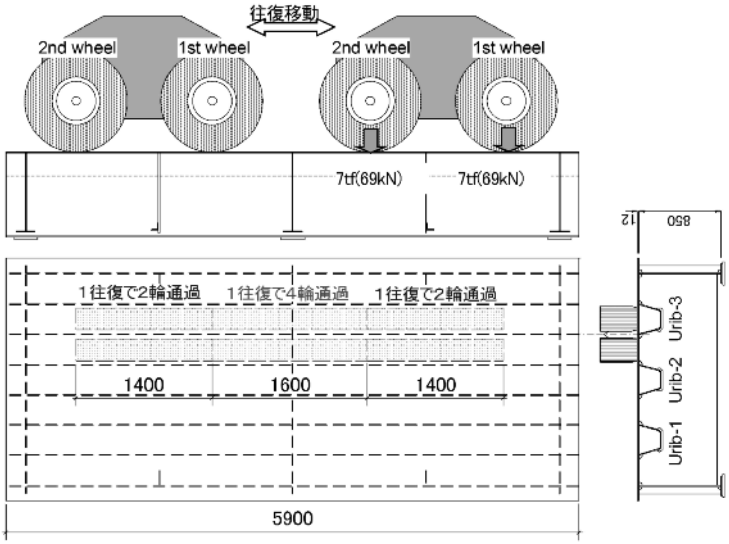
5.1　輪荷重移動載荷疲労試験

静的載荷試験により十分な応力低減効果が確認されたＳＦＲＣ舗装による補強について，疲労耐久性を検証するため疲労試験を実施した。疲労試験は、輪荷重の移動に伴う複雑な応力挙動を再現するため，日本道路公団試験研究所（現㈱高速道路総合技術研究所）が所有する輪荷重移動載荷疲労試験機を用いた。

荷重はトラックの後輪片側を模した２軸のダブルタイヤにより載荷され、図－11 に示すように、２軸のダブルタイヤが１往復することにより，試験体中央の横リブ交差部は 4 回（軸），端部の一般部は 2 回（軸）載荷される。荷重の大きさはダブルタイヤ１軸当たりの荷重を 7 トン（69kN）とした。これは，車両制限令で定められている軸重の上限 10 トンに衝撃係数 0.4 を考慮したものに相当する。

橋軸直角方向の載荷位置は，ＦＥＭ解析や静的載荷試験の結果、実橋の大型車両走行位置を考慮し、ダブルタイヤがトラフリブウェブを跨ぐ位置とした。

図－10　輪荷重移動載荷疲労試験機



図－11　輪荷重移動範囲，載荷位置

試験体は，静的載荷試験と同じ試験体を用い，無補強，ＳＦＲＣ舗装，ＳＦＲＣ舗装（水浸）の３ケースで行った。それぞれの試験条件を表－２に示す。ＳＦＲＣ舗装（水浸）は，ＳＦＲＣ舗装自体の耐久性を検証するため，気中で 50 万往復載荷した後，50～100 万往復はＳＦＲＣ舗装表面に水を張り，水浸状態で載荷したものである。ＳＦＲＣとデッキプレートの付着強度の改善を図るため，接着剤には耐水性能や温度軟化性能を向上させた高耐久型エポキシ樹脂接着剤を用い，接着剤塗布前にデ

ッキプレート表面をショットブラストにより研掃した。また，ＳＦＲＣ舗装厚が何らかの原因で 50㎜確保できなくなる場合を想定し，ＳＦＲＣ舗装厚を 40㎜とした。

表－２　試験条件

	無補強	SFRC舗装	SFRC舗装(水浸)
載荷回数、気中・水浸	0～145.9万往復:気中	0～110万往復:気中	0～ 50万往復:気中 50～100万往復:水浸
SFRC舗装厚	－	50mm	40mm
コンクリート圧縮強度	－	30N/mm^2	24N/mm^2
接着剤	－	エポキシ樹脂接着剤	高耐久型エポキシ樹脂接着剤
デッキプレート表面処理	－	無機ジンクリッチペイント ＋ディスクグラインダー	ショットブラストにより研掃

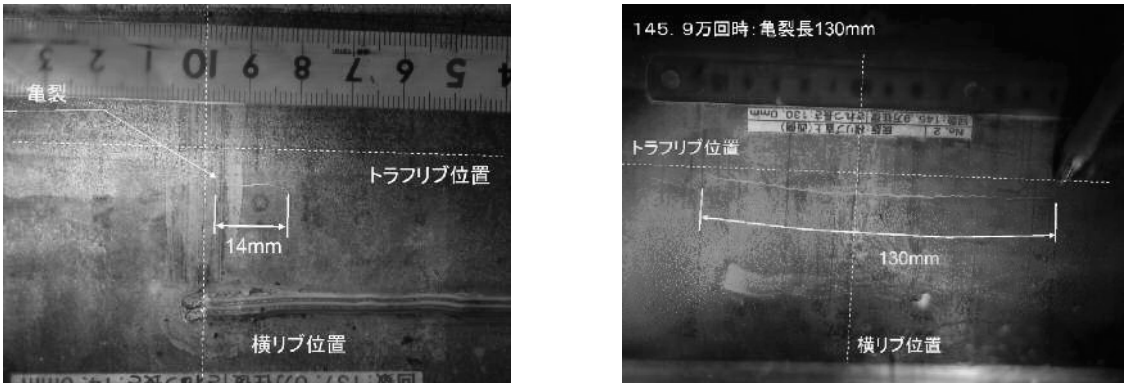
5.2　試験結果

(1)無補強

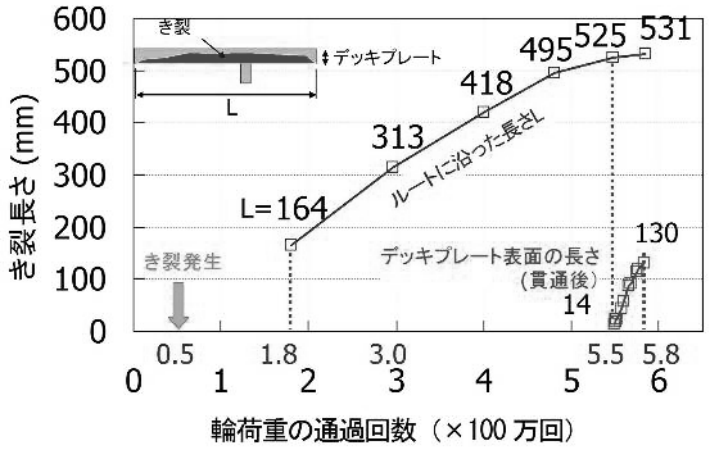
疲労試験は 145.9 万往復，横リブ交差部で 580 万回の繰返し載荷を行った。

図－12 に示すように，横リブ交差部では 550 万回でデッキプレート表面に長さ 14㎜の亀裂が検出され，試験終了時（580 万回）には 130㎜に進展した。疲労試験中にデッキプレート上面から超音波探傷試験により測定したデッキプレートに内在する亀裂長さとデッキプレート表面に現れた亀裂長さの変化を図－13 に示す。ＵＴは 180 万回以降行ったが，後述する応力性状の変化から，約 50 万回で亀裂が発生したと推定される。亀裂はデッキプレートに内在した状態で橋軸方向に進展し，550 万回で亀裂長さが 500㎜を超えた頃，デッキプレートを貫通している。デッキプレートを貫通した亀裂は内在時に比べ，亀裂の進展が速いことがわかる。

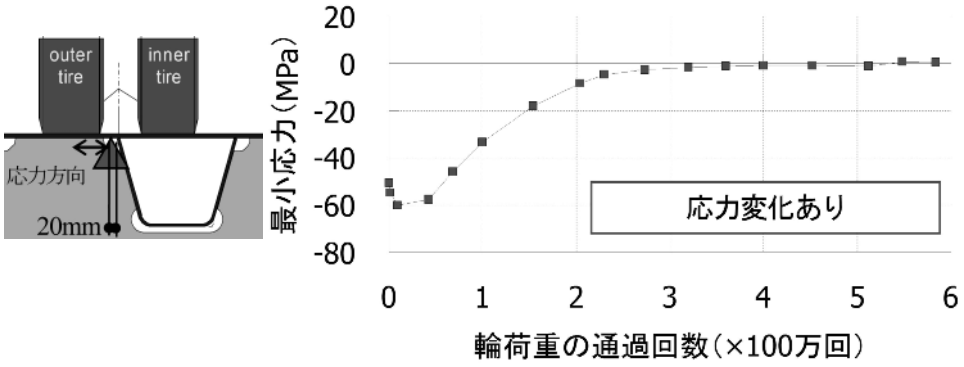
図－14 にデッキプレート下面で測定した最小主応力の変化を示す。約 50 万回以降応力の絶対値が低下しているが，これは 50 万回でデッキプレートとトラフリブの溶接部に亀裂が発生し，デッキプレートのたわみをトラフリブが拘束することにより生じていた応力が，亀裂の進展により徐々に開放されたためと考えられる。



図－12　デッキプレート表面に現れた亀裂（左：550 万回、右：試験終了時＝580 万回）



図－13　デッキ内在亀裂とデッキ貫通亀裂の長さの変化



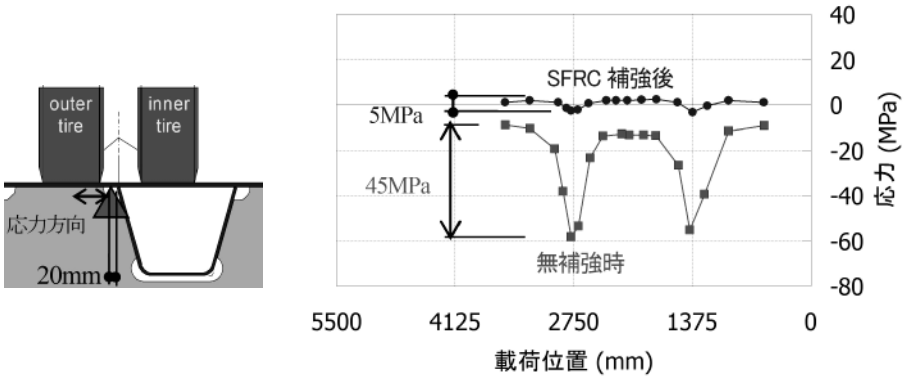
図－14　応力性状の変化（横リブ交差部デッキプレート下面）

(2) ＳＦＲＣ舗装

疲労試験は 110 万往復行い，試験終了後ＳＦＲＣを撤去し，デッキプレート表面のＭＴ，ＵＴを行ったが，デッキプレート表面及び内部に亀裂は発見されなかった。また，デッキプレートとトラフリブの溶接部表面にも亀裂は検出されなかった。

図－15 に輪荷重の移動に伴う応力の変化を示すが，ＳＦＲＣ舗装により応力範囲は低減している。また，図－16 に繰返し載荷の進行に伴う応力性状の変化を示すが，応力低減効果は 110 万往復の繰返し載荷を通じて持続している。

試験終了後，ＳＦＲＣ表面のひび割れ観察，ＳＦＲＣとデッキプレートの付着強度試験を行った。ＳＦＲＣ表面には幅 0.03㎜ 以下，長さ 30～100㎜ 程度の微細なひび割れが観察されたが，コア抜き調査を行った結果，ひび割れ深さは 10㎜ 程度で，ＳＦＲＣ層を貫通するようなものは見られなかった。付着強度は，輪荷重非載荷部では平均 3.7N/㎟ でＳＦＲＣ内で破断したが，輪荷重載荷部では平均 1.5 N/㎟ で接着剤とデッキプレートの境界部で破断したことから，繰返し載荷に伴う付着強度の低下が確認された。付着強度の目安と考えられた床版上面増厚工法における新旧コンクリート間の付着強度 1N/㎟ が確保されていること，応力低減効果が持続したことから，この程度の付着強度の低下は問題ないと考えられたが，実橋では雨水の影響等を受けることから、より厳しい条件下における耐久性の検証，付着強度の改善が必要と考えられた。



図－15　輪荷重の移動に伴う応力変化

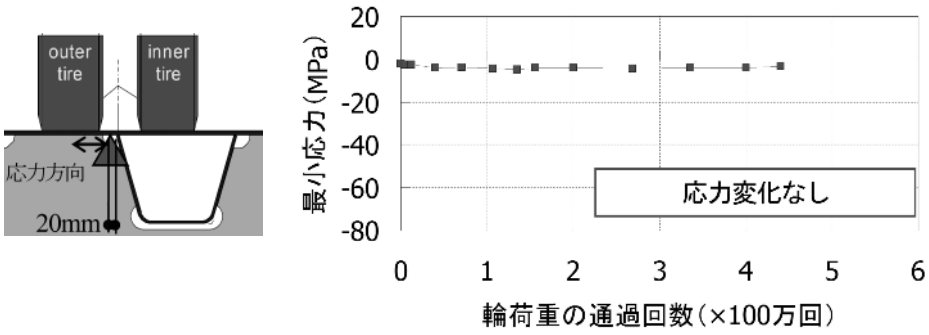
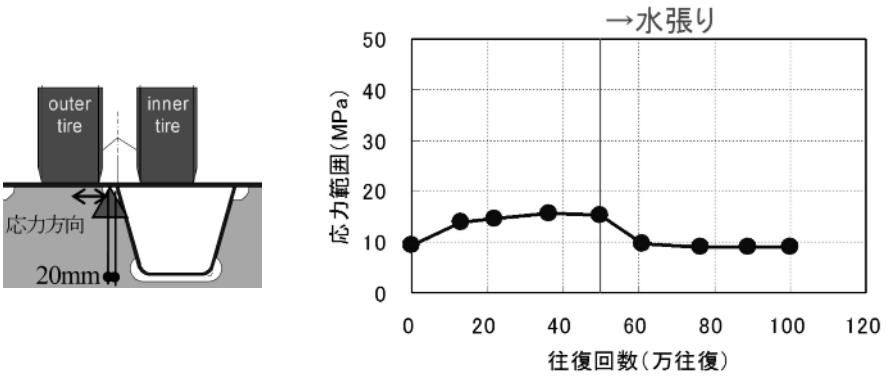


図-16　応力性状の変化（横リブ交差部デッキプレート下面）

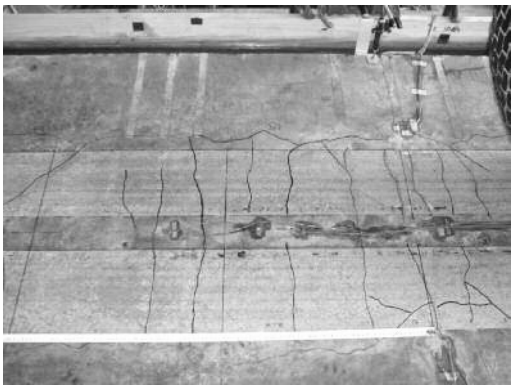
(3) ＳＦＲＣ舗装（水浸）

図－17 に横リブ交差部デッキプレート下面の応力性状の変化を示す。繰返し載荷が進行しても応力の変化は見られず，応力低減効果は試験終了時まで持続している。

試験終了後に行ったＳＦＲＣ表面のひび割れ観察では，図－18，19 に示すように，輪荷重載荷部にひび割れが発生し，ひび割れ幅が 0.04㎜ を超えるもの，ひび割れがＳＦＲＣ層を貫通するものも見られた。付着強度は，輪荷重非載荷部では平均 3.2N/㎜2，輪荷重載荷部では平均 3.3 N/㎜2 で，破断はいずれもＳＦＲＣ内部で発生していた。表－３に示すように、ショットブラストしたデッキプレートに高耐久型エポキシ樹脂接着剤を使用することにより，水浸状態の厳しい条件下でＳＦＲＣ層に貫通ひび割れが発生するような場合でも，輪荷重載荷部の付着強度が改善されることが確認された。



図－17　応力性状の変化（横リブ交差部デッキプレート下面）



図－18　ひびわれ発生状況

図－19　貫通ひび割れ

表－３　試験条件と付着強度の比較

		SFRC舗装	SFRC舗装（水浸）
試験条件	接着剤	エポキシ樹脂接着剤	高耐久型エポキシ樹脂接着剤
	デッキプレート表面処理	無機ジンクリッチペイント ＋ディスクグラインダー	ショットブラストにより研掃
	載荷回数、気中・水浸	0～110万往復：気中	0～ 50万往復：気中 50～100万往復：水浸
付着強度	輪荷重非載荷部	3.7N/mm^2	3.2N/mm^2
	輪荷重載荷部	1.5N/mm^2	3.3N/mm^2

⑷ まとめ

・厚さ 50㎜ のＳＦＲＣ舗装を接着剤でデッキプレートと合成させる補強方法は十分な応力低減効果を有する。

・応力低減効果は，繰返し載荷 100 万往復（横リブ交差部 400 万回）の範囲では持続する。

・ＳＦＲＣ舗装は，気中ではひび割れの発生，進行は限定的であるが，水浸状態ではひび割れが進行し貫通する場合もあるので，防水層等の対策が必要である。

・ＳＦＲＣ舗装とデッキプレートの付着強度は，接着剤の特性，デッキプレート表面処理の影響を受けるが，デッキプレート表面にショットブラストを行い，高耐久型エポキシ樹脂接着剤を用いた場合，水浸状態でも 100 万往復（横リブ交差部 400 万回）の繰返し載荷の範囲では付着強度は低下しない。

６．施工性の検証

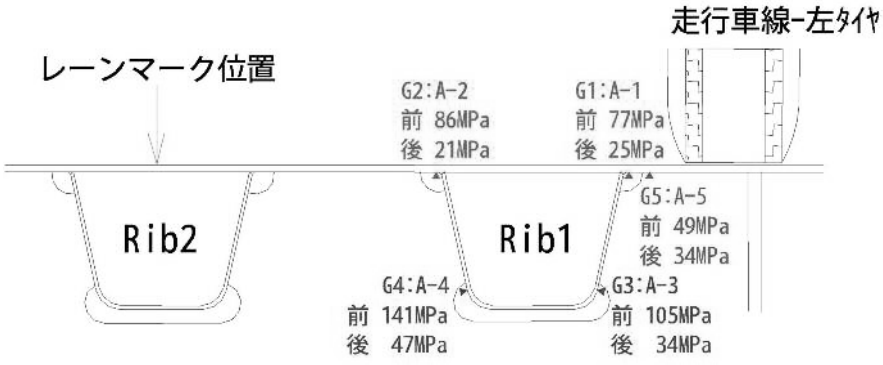
首都高速道路よりも先にＳＦＲＣ舗装工事を実施した事例は供用前の工事や夜間全面通行止め工事であったが，首都高速道路の通行止め工事は社会的影響が非常に大きく，片側２車線または３車線のうち１車線を規制し，安全かつ効率的に施工できる工法の開発が必要であった。この問題を解決するため，施工帯を挟んで配置したレール上を，ベルトコンベアを利用してコンクリートを縦方向と横方向に送りながら，自走するコンクリート材料供給装置を開発した。この装置を用いたＳＦＲＣ舗装工事の安全性，施工能率，品質等を検証するため，まず舗装会社敷地内で施工試験を行い，次に片側３車線の高速道路を２車線規制し，その中の１車線だけを利用した試験工事を実施した。このような段階的な試験を踏まえた後，１車線規制によるＳＦＲＣ舗装工事に着手した。

図－20　施工試験実施状況

７．実橋における応力低減の検証[8),9)]

ＳＦＲＣ舗装が鋼床版の疲労耐久性向上のための補強方法として要求性能を満足することが確認できたので，平成 19 年に湾岸線の鋼床版箱桁橋でＳＦＲＣ舗装による補強工事を行い，応力低減効果を検証するため補強前後の応力を測定した。応力測定は一般車両の走行による動波形を 24 時間収録し，動波形分析及びレインフロー法による頻度解析を行った。応力測定結果の一例として，ダイヤフラム交差部の最大応力範囲を図－21 に示す。荷重車による走行試験ではないので補強前後の応力を単純に比較することはできないが，デッキプレート下面の補強後の応力は補強前の 20～30%程度に低減している。

実橋におけるモニタリングはその後も継続し，補強工事から 6 か月後，1 年 10 か月後においても応力低減効果が持続していることを確認している。



図－21　ＳＦＲＣ舗装による補強前後の最大応力範囲

８．あとがき

ＳＦＲＣ舗装によるトラフリブ形式鋼床版の補強工事は平成 19 年から湾岸線及び中央環状線を対象に実施してきたが，平成 24 年からはレインボーブリッジの補強工事も行っている。これまでの点検結果から経験的に，供用開始から 15～20 年以上経過した重交通路線ではデッキプレートとトラフリブの溶接部に疲労亀裂が発生する傾向にあり，これからも補強工事は継続していかなければならない。

最後にＳＦＲＣ舗装による鋼床版の疲労対策技術は，ＳＦＲＣ舗装全般に関しては鹿島道路㈱との共同研究，輪荷重移動載荷疲労試験による疲労耐久性の検証に関しては日本道路公団試験研究所（現㈱高速道路総合技術研究所）との共同研究のもと日本建設機械施工協会施工技術総合研究所で実施した成果である。また，検討の過程では「首都高速道路の鋼構造物の点検・補修・補強に関する調査研究委員会」（委員長：法政大学森教授）のご指導をいただいた。関係された方々に深くお礼を申しあげます。

参考文献

1) 吉川直志，伊東昇，大塚敬三，町田文孝，三木千壽：Uリブを用いた鋼床版の疲労損傷事例，土木学会第 57 回年次学術講演会論文集，Ⅰ-277，pp.553-554，2002.9
2) 平林泰明，牛越裕幸，木ノ本剛：首都高速道路における鋼床版疲労損傷，第 10 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.39-53，2007.8
3) 牛越裕幸，下里哲弘，木下琢雄，弓削太郎：鋼床版デッキプレートとトラフリブ溶接部に発生した亀裂の進展性状と応急対策実施状況，土木学会第 61 回年次学術講演会論文集，Ⅰ-544，pp.1085-1086，2006.9
4) 三木千壽，菅沼久忠，冨澤雅幸，町田文孝：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，pp.57-69，2005.1
5) 小野秀一，下里哲弘，増井隆，町田文孝，三木千壽：既設鋼床版の疲労性能向上を目的とした補強検討，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.213-226，2005.10
6) 小野秀一，平林泰明，下里哲弘，稲葉尚文，村野益巳，三木千壽：既設鋼床版の疲労性状と鋼繊維補強コンクリート敷設工法による疲労強度改善効果に関する研究，土木学会論文集Ａ，Vol.65 No2，pp.335-347，2009.4
7) 小野秀一，牛越裕幸，下里哲弘，稲葉尚文，富田芳男：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 回年次学術講演会論文集，CS2-018，pp.57-58，2007.9
8) 牛越裕幸，下里哲弘，弓削太郎，児玉孝喜：実橋における既設鋼床版への SFRC 補強効果確認計測，土木学会第 62 回年次学術講演会論文集，CS2-019，pp.59-60，2007.9
9) 弓削太郎，中野博文：実橋鋼床版 SFRC 補強部モニタリング応力計測結果，土木学会第 64 回年学術講演会論文集，Ⅰ-552，pp.1103-1104，2009.9