

ポリマーセメントモルタルを用いた 既設鋼床版の疲労耐久性向上検討

阪神高速道路(株) 技術部 技術開発グループ 青木 康素
(財) 阪神高速道路管理技術センター 調査研究部 調査研究課 高田 佳彦
阪神高速道路(株) 神戸管理部 調査設計グループ 中島 隆

要 旨

近年、車両の大型化や供用年数の経過に伴い、鋼床版の疲労損傷が多数報告されている。鋼床版の疲労損傷の主要因としては、デッキプレートが薄いために発生する局部変形に起因する応力集中と、設計荷重を超過した輪荷重の走行が考えられる。よって、デッキプレートの曲げ剛性を上げ、荷重分散性能を向上させ、局部変形を低減することが有効な補強である。今回、閉断面 U リブを有する鋼床版デッキプレート上面にポリマーセメントモルタルを打設し、鋼床版を合成床版化する工法を検討した。本工法の補強効果を確認するために、静的載荷試験及び輪荷重走行試験を実施した。また、実橋での適用性に関して、神戸湾岸線鋼床版部でポリマーセメントモルタルの試験施工を実施した。同時に、鋼床版下面の鋼部材にてポリマーセメントモルタル施工前後での実働応力計測を実施し、実橋での応力低減効果を確認した。

キーワード: 鋼床版, 疲労損傷, ポリマーセメントモルタル, 合成床版化, 静的載荷試験, 輪荷重走行試験, 実働応力計測

はじめに

車両の大型化や供用年数の経過に伴い、鋼床版の疲労損傷が多数報告されている。鋼床版の疲労損傷の主要因としては、薄肉集成の構造的な弱点、溶接継手強度の不足、過積載車両の通行が挙げられる。構造的な弱点として特に、デッキプレートが薄いために、輪荷重が載荷されると、デッキプレートの局部変形が生じ、これに起因した応力集中が溶接部に生じ、疲労損傷につながる。そこで、デッキプレート上面にモルタル材料を打設し、デッキプレートと合成構造化し、断面剛性を上げ、局部変形を抑制する補強方法が提案されている¹⁾。従来、鋼床版上の舗装基層部には、グ

ースアスファルト混合物は、高温下では軟化し、低温下では硬化する温度依存性を有している。このため、温度条件によって弾性係数が変化し、定常的な合成効果は期待できない。今回、硬化後には温度依存性を有さないポリマーセメントモルタルに着目した。セメント混和用ポリマーディスページョンとしてゴムラテックス(SBR ラテックス)を使用したポリマーセメントモルタルである。既設鋼床版上へのポリマーセメントモルタル打設による、合成床版化(以下、PMM (Polymer Modified Mortar) 鋼床版と称す)を図り、鋼床版の発生応力の低減効果を検討した。

鋼床版には、開断面リブ形式と閉断面リブ形式があり、本検討では、閉断面リブ形式の鋼床版を対象とした。閉断面リブを有する鋼床版で、これ

までに確認されている疲労損傷の発生部位は大別して、縦リブ・デッキプレート溶接部、縦リブ・横リブ交差部、垂直補剛材・デッキプレート溶接部の3箇所である。これら3箇所に着目して、PMM 鋼床版の補強効果を確認するために、静的載荷試験及び輪荷重走行試験を実施した。また、PMM 鋼床版と同様に、モルタル材料を打設し合成構造化した鋼床版において、雨水の存在下で合成構造の耐久性が大幅に低減することが報告されている²⁾。これを受けて、PMM 鋼床版の水環境下での疲労耐久性を確認するために、PMM 鋼床版の水張り状態での輪荷重走行試験を実施した。

また、上記試験で応力低減効果が確認されたことを受けて、神戸湾岸線鋼床版部でポリマーセメントモルタルの試験施工を実施し、同時に、鋼床版下面の鋼部材の各所にて実働応力計測を実施した。以下に検討結果を報告する。

1. 試験の概要

1-1 鋼床版供試体

図-1に供試体及び輪荷重走行位置を示す。供試体は、縦リブにUリブを用いた閉断面鋼床版である。実橋を模して、供試体には、添接部と密閉ダイヤフラムを設けてある。床版の平面寸法は橋軸

方向3880mm、橋軸直角方向2810mm、Uリブは4本、横リブは3本で構成し、添接版を挟んだ横リブ間隔は実橋とほぼ等しい2400mmである。添接部以外では、デッキプレート厚は12mm、Uリブ厚は6mmである。デッキプレートとUリブとの溶接は、実橋に準じて、脚長6mmを確保し、溶接ビードの溶け込み量はUリブ板厚の20～30%とした。本鋼床版は橋軸方向の床版中心軸に対し、対称な構造である。

なお、本供試体は、既往の研究で輪荷重走行試験を実施した供試体を再利用したものである^{3),4)}。過去の輪荷重走行試験は、図-1の水張り試験範囲で実施したため、疲労損傷を受け、き裂が発生している。き裂が本検討での試験に影響しないように、このき裂発生位置を当て板補修した。水張り試験での供試体の評価領域は、既に損傷を受け補修した範囲ではあるが、PMM 鋼床版への水の影響を定性的に評価できる。

1-2 ポリマーセメントモルタル

(1) 基本性質

鋼床版のデッキプレート上に打設したポリマーセメントモルタルの硬化後の代表的な性質は、高接着力、曲げ変形追従性、防水性能、温度依存性なしである⁵⁾。表-1に今回使用した配合を示す。また、表-2に材料試験結果を示す。

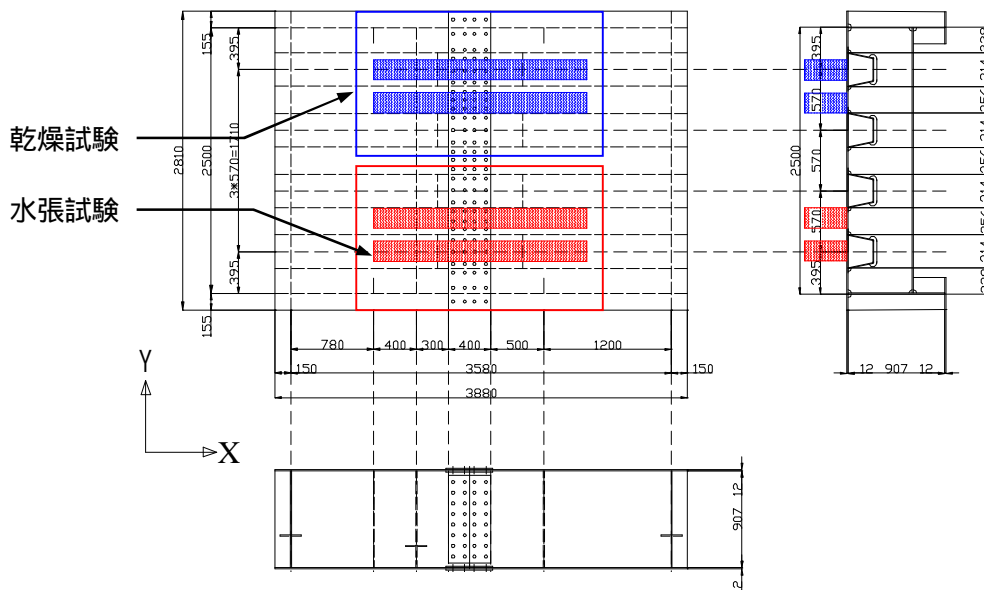


図-1 供試体及び走行位置

表-1 ポリマーセメントモルタルの配合

W/C (%)	P/C (%)	C/S	単位量(kg/m ³)			
			セメント	水	珪砂	ゴムラテックス
32	18	1/3	463	45	1389	187



図-2 ポリマーセメントモルタル打設状況

(2) ポリマーセメントモルタルの施工

図-2 に PMM 鋼床版の施工の様子を示す。デッキプレート上面をブラスト処理し、振動締めによりポリマーセメントモルタルを 45mm 厚で施工した。

1-3 試験方法

(1) 試験機及び載荷荷重

試験機は、大阪大学所有の輪荷重走行試験機を使用した。載荷荷重は 118kN とし、ダブルタイヤを模擬した載荷ブロックを使用した。接地面が大型車後輪のダブルタイヤ接地面に近くなるよう、200×190mm の鉄製ブロックを 120mm の間隔で橋軸方向に 11 個並列配置した。使用した載荷ブロック荷重については、別途 FEM 解析により実橋での発生応力範囲と、供試体での発生応力範囲がほぼ一致する載荷荷重を設定した³⁾。

(2) 支持条件

支持条件は、支点は主桁と横リブが交差する 4 隅点とし、各点において鉛直方向の沈下と、橋軸まわりの回転を拘束した単純支持とした。

(3) 静的載荷試験

静的載荷は、PMM 鋼床版の応力低減効果の確認のため、輪荷重走行試験開始前に実施した。また、輪荷重走行試験中の損傷度合、合成効果の保

表-2 材料試験結果

	材齢			
	3時間	1日	7日	28日
圧縮強度 (MPa)	7.01	12.56	16.92	19.88
引張強度 (MPa)	/			1.84
弾性係数 (GPa)	/		13.8	15.7

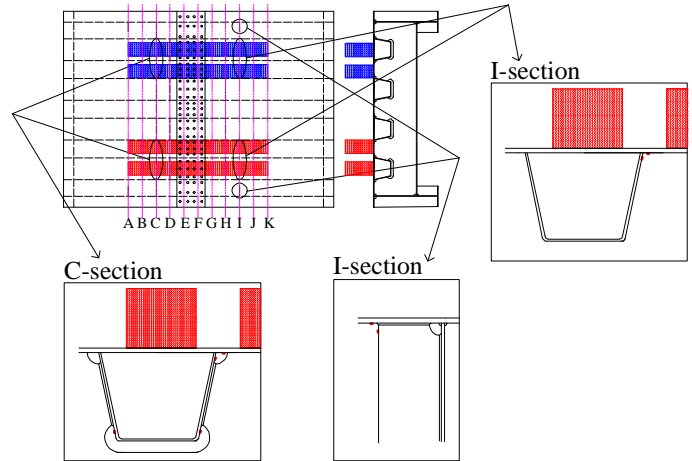


図-3 測定位置と断面の名称

持率を発生応力から評価するために、適宜走行試験を中断し、静的載荷試験を実施した。

溶接部近傍の応力測定に用いたひずみゲージは、溶接線に対して直角方向に、また、溶接止端部から 5mm の位置を基本とし貼付した。応力測定位置を図-3 に示す。また、鉛直方向のたわみを図-3 の I 断面（垂直補剛材のある断面）のデッキプレート、U リブ各点で計測した。

(4) 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験は、車両通過に伴う鋼床版の疲労現象を模擬するために実施した。応力測定位置及びたわみ測定位置は静的載荷試験と同様である。応力値、たわみ値、ポリマーセメントモルタルのひび割れ状況の経時変化より疲労損傷度合を評価した。

また、雨水の存在下での、PMM 鋼床版の構造的な疲労耐久性と舗装体としての耐久性を確認するために水張り試験を実施した。図-4 に水張り試験の概略を示す。ポリマーセメントモルタル端部（図-4 の丸部）よりデッキとモルタルとの界

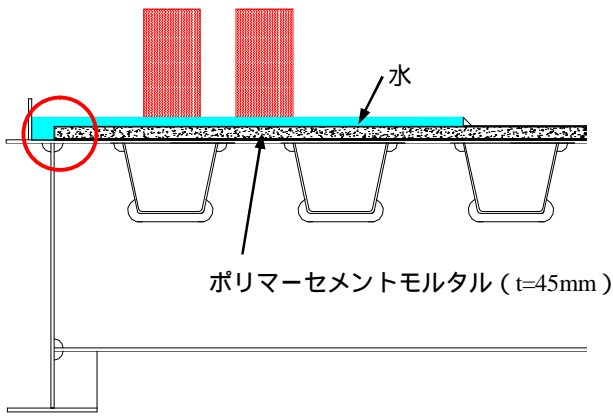


図-4 水張り試験の概要

面に、水が浸入するように、水を床版上面に張り、輪荷重走行試験を実施した。

2. 補強効果確認の静的載荷試験結果

走行試験前の静的載荷試験は打設から8日後に実施し、圧縮強度は17MPa程度であった。PMM鋼床版の応力低減効果について、各種測定値から考察する。なお、疲労現象を捉えるために、走行回数0回と走行回数95万回（水張りは41万回）後の測定値を併記する。

以下に図-3の応力測定位置での応力範囲、応力範囲の比率（PMM / 無補強）について考察する。

a) Uリブ支間部におけるUリブ縦溶接線

は、Uリブ支間部のUリブ縦溶接線近傍である。なお、これらは、水張り試験範囲で静的載荷し、応力測定した位置であるが、既存の疲労き裂の発生位置からは遠く、当て板補修の影響

等は無視できるものとし、応力低減効果を評価した。

図-5に示すように、Uリブ支間中央I断面では、デッキプレート側止端Iは無補強198.1MPa、PMMは21.6MPa(0.11)、Uリブ側止端であるIは無補強92.4MPa、PMMは33.8MPa(0.37)であった。I断面以外の支間部断面でも計測した結果、総合してデッキプレート側止端部は10~15%程度、Uリブ側止端部は40~50%程度まで発生応力が低減していた。以上より、Uリブ支間部では、合成床版化による応力低減効果が顕著に現れていた。

b) Uリブ横リブ交差部におけるUリブ縦溶接線

は、横リブ交差部のデッキ側のスカーラップ部における、Uリブ縦溶接線近傍である。

図-6に示すようにUリブ側では無補強では52.3MPa、PMMは38.2MPa(0.73)と、応力低減効果がやや低い。デッキプレート下面では無補強12.7MPa、PMMは19.6MPa(1.54)と、応力が増加している。ただ応力値が低く、疲労損傷に与える影響は小さいと考えられる。

Uリブと横リブの交差部では、荷重を横リブが支持するために、デッキプレートの橋軸直角方向の剛性寄与が小さいため、PMM鋼床版の応力低減効果はやや低い結果であった。

c) デッキプレートと垂直補剛材との溶接部

デッキプレートと垂直補剛材との溶接部について、は垂直補剛材コバ面、はデッキプレート

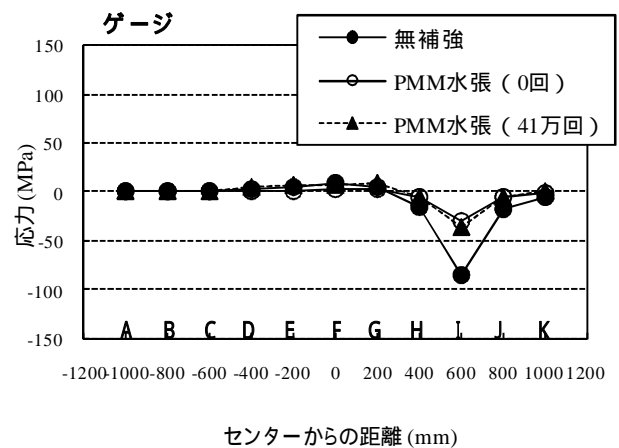
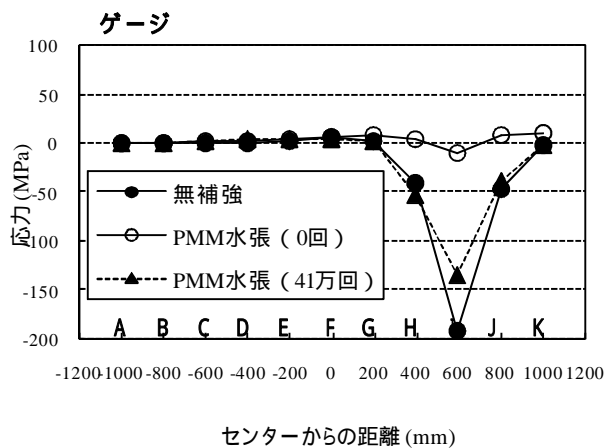


図-5 Uリブ支間部の縦溶接線近傍の応力の橋軸方向影響線 (I断面)

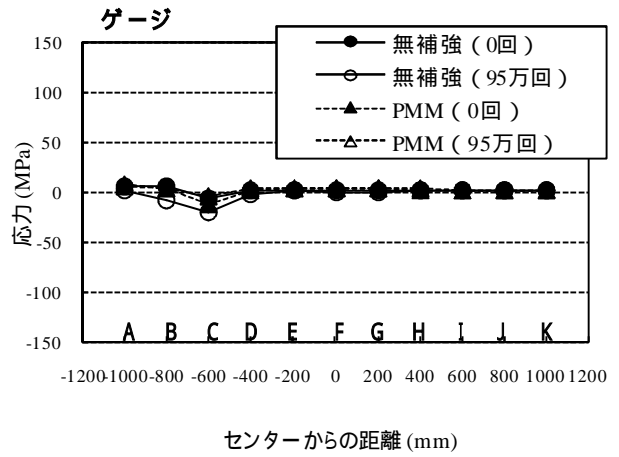
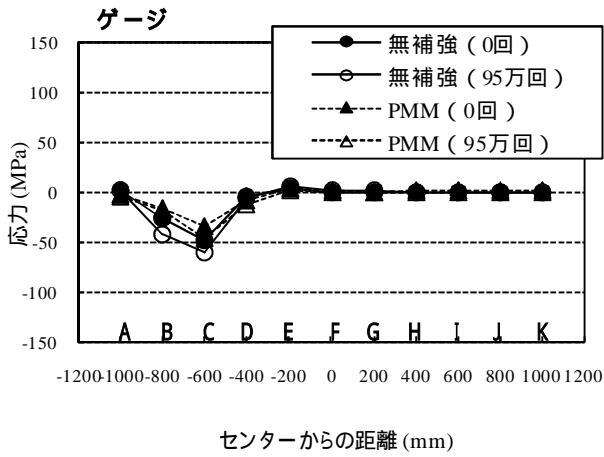


図-6 Uリブ横リブ交差部のUリブ縦溶接線近傍の応力の橋軸方向影響線

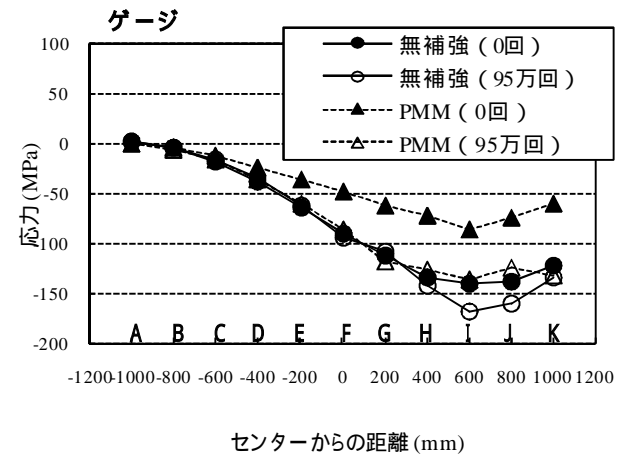
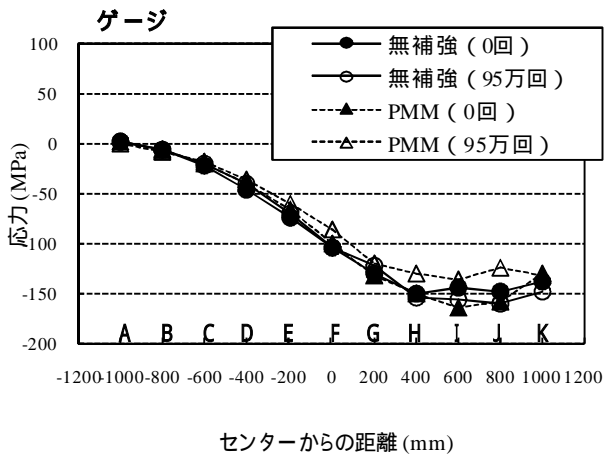


図-7 デッキプレートと垂直補剛材の溶接部近傍の応力の橋軸方向影響線

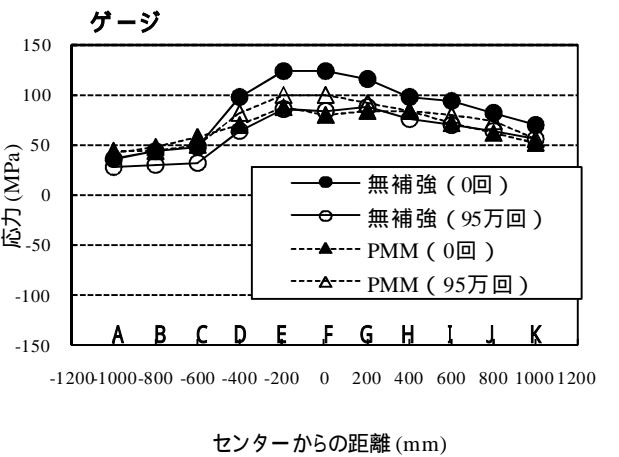
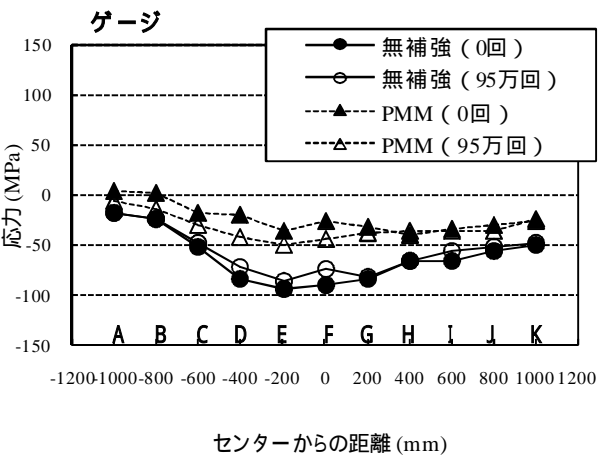


図-8 Uリブ横リブ交差部下側スカーラップ返し溶接部近傍の応力の橋軸方向影響線

下面である。

図-7 のように は無補強 152.6MPa, PMM は 166.0MPa (1.08)。 は無補強 143.5MPa, PMM は 84.6MPa (0.59)であった。 のデッキプレート下面は, PMM 鋼床版の合成効果により応力が

60%程度まで低減している。一方, 垂直材コバ面では, 応力が増加している。これは, 鋼床版は薄肉構造であるため荷重抵抗範囲が局所的であったのに対して, 版全体の剛性向上によって, PMM 鋼床版では荷重抵抗範囲が拡大し, 垂直補剛材に

対する荷重が増加したことが要因と推定される。デッキプレートと垂直補剛材との溶接部では、半円切り欠き等の応力低減対策と併用する必要があると考えられる。

d) Uリブ横リブ交差部下側スカーラップ部の廻し溶接部

図-8 に示すように、 σ では無補強 77.7MPa, PMM は 43.4MPa (0.56)。 σ_{max} では無補強 87.9MPa, PMM は 46.6MPa (0.53) と、50%程度発生応力が低減している。

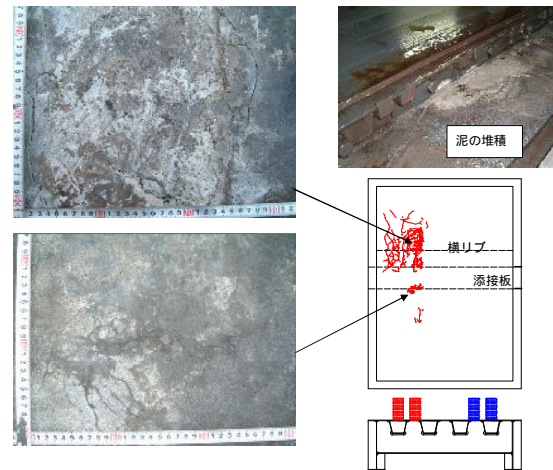


図-9 水張り試験後の試験体の破壊状況

3. 輪荷重走行試験結果

3-1 乾燥状態での走行試験

200万回走行後、鋼床版に疲労き裂は発見されなかった。ポリマーセメントモルタルは、目視において、Uリブ支間部の荷重ブロック直下に幅0.1mm程度、長さ50mm程度のひび割れが確認された他は、損傷は発見されなかった。局部応力について、図-6～8で、0回と95万回荷重時を比較すると、少し応力が増加しているが、急増しておらず、弾性範囲内にある。また、確認されたひび割れ損傷も軽微なものであることから、乾燥試験でのPMM鋼床版の耐久性は十分確保されていたと推定される。

3-2 水張り状態での走行試験

(1) 試験での損傷状況

水張り試験においては、14万回でデッキとポリマーセメントモルタル界面に水の浸入を確認し、41万回でポリマーセメントモルタル上面に顕著なひび割れを確認し、試験を終了した。

図-9に水張り試験後の供試体の破壊状況を示す。ポリマーセメントモルタル上面において横リブの直上及び添接板付近に多くひび割れが発生していた。上面には図-9右上のように、泥のようなものが噴射し堆積した跡が横リブ直上付近で確認された。泥の堆積は、RC床版におけるいわゆる骨材化現象に相似なものと推察される。RC床版では、水環境下で疲労寿命が1/20～1/100に低下すると

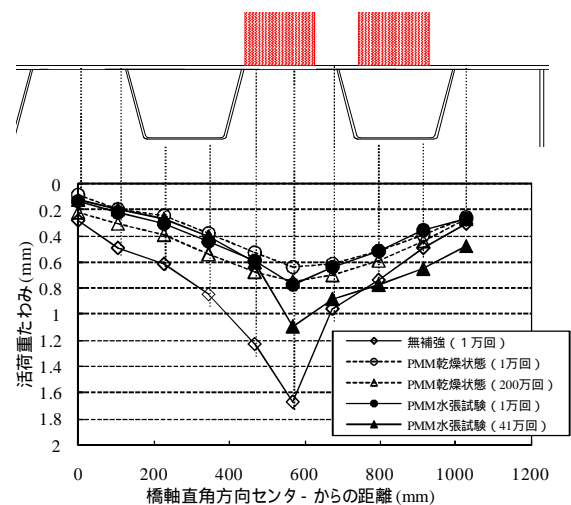


図-10 Uリブ支間中央のたわみ分布

言われており、過去には1/300に低下した例も報告されている^{6),7)}。輪荷重の繰返し荷重に起因する水圧作用とポリマーセメントモルタルのひび割れ面でのすり磨き現象の結果、ポリマーセメントモルタルの材料分離が生じ、セメント成分と樹脂ゴム成分が流れ出たと考えられる。水環境下でのPMM鋼床版の耐久性を確保するためには、防水層を施工する必要がある。

(2) たわみ分布

Uリブ支間中央断面 (I断面) のたわみ分布を図-10に示す。I断面に輪荷重を荷重した際の、I断面のたわみ分布を示している。

乾燥試験では、疲労試験前後を比較すると断面で全体的にたわみが増加している。これに対して、水張り試験では、全体的なたわみ増加ではなく、主桁側端部付近においてたわみ増加が確認された。

ポリマーセメントモルタルの剛性が低下し、輪荷重直下でたわみが増加している。しかし、走行範囲から紙面左側では、たわみの増加は生じておらず、輪荷重走行範囲から端部までの範囲で部分的に剛性の低下を生じているものと推定される。また、たわみの最大値は、無補強時のたわみに比較して 65%程度であり、合成効果は残存していると言える。

4. 神戸湾岸線での実働応力計測

4-1 試験施工概要

兵庫県道高速湾岸線（5号湾岸線）4径間連続鋼床版箱桁（海下 S-202～海下 S-205）の2径間海下 S-204、海下 S-205 でポリマーセメントモルタルの試験施工を実施した。舗装構成は、ポリマーセメントモルタルを基層（45mm）とし、海下 S-204 では表層を排水性舗装（35mm）、海下 S-205 では表層を密粒舗装（35mm）としている。それぞれ走行車線のみ橋軸方向に 46.9m、50.5m の試験施工を行った。表層の仕様については、阪神高速道路基準における標準仕様であり、舗装厚のみ 35mm と変えている。

4-2 実働応力計測

(1) 計測位置及び計測方法

海下 S-204 を対象に、ポリマーセメントモルタル

施工前後での実働応力計測を実施した。主な計測位置は、鋼床版下面の U リブ支間部の U リブとデッキプレート溶接部近傍である。発生応力性状を把握するため、総重量 245kN に調整した大型 3 軸トラックを低速走行（2km/hr）させた。

(2) 実働応力計測結果

鋼床版下面各所での応力計測結果の内、実橋を模擬した鋼床版供試体の静的载荷試験結果より、PMM 鋼床版工法の補強効果が顕著であった、U リブ支間部のデッキプレートと U リブの溶接部に着目する。

図-11 では、後輪ダブルタイヤ 2 軸の直上载荷による圧縮応力成分について、荷重直下の測点、
、
で応力が低減していることが分かる。特に、デッキプレート側止端近傍では、40%程度まで応力範囲が低減している。デッキプレート側止端近傍、
では、版作用による引張応力成分と荷重直上载荷によるデッキプレートの局所変形に起因する圧縮応力成分の重ね合せの波形となっており、輪荷重载荷に伴う圧縮応力についての補強効果は確認されたが、版作用による引張応力の低減効果は小さい結果となった。また、施工前の基層舗装剛性の影響により、応力低減率が鋼床版供試体試験より低かったことが推察される。

前輪シングルタイヤの载荷による応力波形では、施工前後で変化が少なく、また、U リブウェブ側止端近傍では増加している。ダブルタイヤが U

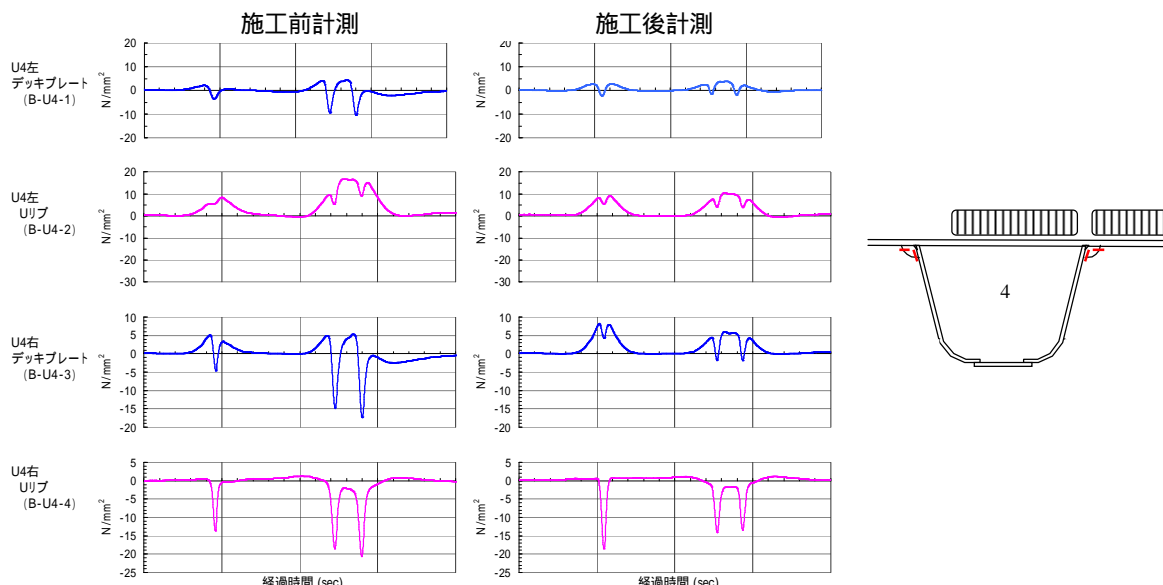


図-11 実働応力計測波形（Uリブ支間部载荷）

リブウェブを挟み込む載荷走行位置では、前輪はウェブ直上を通過するため、この圧縮応力は荷重反力分が出ている。これには、走行位置の影響が大きく、今回の応力計測では、ダブルタイヤの橋軸直角方向の走行位置に精度を要求し、低速走行中タイヤ位置を調整したため、前輪通過位置が異なっていた可能性が高い。

なお、施工前後の実働応力計測時の気温はそれぞれ 18℃、25℃ であり、表層剛性が施工後計測時には低下している点に注意されたい。

5. まとめ

静的載荷において、応力低減効果が認められ、また、実働応力計測においても応力が低減していたことから、PMM鋼床版の疲労耐久性の向上効果が期待できる。繰返しの輪荷重走行負荷により、PMM鋼床版の応力低減効果が低下する。それでも、デッキプレートとUリブ溶接部では、応力低減効果が残存している。水張り試験においては、材料的な疲労破壊が先行し、局所的な剛性の低下

が生じる結果となった。水環境下での耐久性を確保するためには、防水層を施工する必要がある。

参考文献

- 1) 小野秀一，下里哲弘，増井隆，町田文孝，三木千尋：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-73，2005.10.
- 2) 三田村浩，石川博之，福田一郎，加藤静雄，松井繁之：高靱性セメント複合材料で上面増厚した鋼床版の水中環境下の輪荷重走行試験，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2006.7.
- 3) 高田佳彦，平野敏彦，坂野昌弘，松井繁之：阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷と要因分析の検討，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2006.7.
- 4) 平野敏彦，高田佳彦，松井繁之，坂野昌弘：鋼床版のUリブと横リブ交差部の疲労き裂に着目した移動輪荷重試験報告，土木学会第61回年次学術講演会，2006.9.
- 5) 大垣賀津雄，清藤英明，矢野裕也，宮本裕久：鋼・コンクリート合成構造界面の付着および防食性能向上に関する研究，第5回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，2003.11.
- 6) 松井繁之：移動輪荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について，第9回コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，pp.627-632，1987年.
- 7) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性，平成3年12月.

A STUDY ON IMPROVEMENT OF FATIGUE DURABILITY IN THE EXISTING ORTHOTROPIC STEEL DECK WITH POLYMER MODIFIED MORTAR

Yasumoto AOKI, Yoshihiko TAKADA and Takashi NAKASHIMA

Recently, fatigue damages of orthotropic steel decks have been reported according to increasing active load and to progress of in-service time. Main factors of fatigue damages are contemplated the stress concentration attributed to the local deformation of the thin deck plate. Therefore, it is effective reinforcement to increase bending stiffness of the deck plate, which leads to improve the load dispersion performance and to reduce the local deformation. The authors focused composite steel deck which constituted by casting polymer modified mortar on the deck plate. In addition, the authors studied the durability and stiffening effects of the composite steel deck in the static and fatigue loading tests.

青木 康素



阪神高速道路株式会社
技術部 技術開発グループ
Yasumoto Aoki

高田 佳彦



財団法人阪神高速道路管理技術センター
調査研究部 調査研究課
Yoshihiko Takada

中島 隆



阪神高速道路株式会社
神戸管理部 調査設計グループ
Takashi Nakashima