

舗装材に着目した鋼床版の疲労対策に関する解析的検討

Analytical study on fatigue control measures for steel deck plates paying attention to paving materials

横山広*¹, 安東祐樹*², 関口幹夫*³, 堀川都志雄*⁴
 Hiroshi Yokoyama, Yuuki Andou, Mikio Sekiguchi, Toshio Horikawa

- *¹ ショーボンド建設株式会社 中部支社 (〒920-0362, 石川県金沢市古府 1-140)
- *² ショーボンド建設株式会社 補修工学研究所 (〒305-0003, 茨城県つくば市桜 1-17)
- *³ 東京都土木技術センター 技術調査課 (〒136-0075, 東京都江東区新砂 1-9-15)
- *⁴ 工博, 大阪工業大学 都市デザイン工学科 (〒535-0002, 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Fatigue cracking of steel deck plates has become a major problem in recent years. In this study, the deflection of and bending stresses in paved steel deck plates were analyzed by using a thick plate theory for laminated plates. The reinforcing effects of different paving materials, namely, conventional paving asphalt, concrete and MMA resin mortar, were evaluated. Calculation results indicate that as a paving material, concrete has an excellent reinforcing effect but requires an auxiliary construction method, such as stud doweling, for achieving structural integrity and, in a non-composite state, requires careful consideration because of the occurrence of excessive bending stresses in the concrete. MMA resin mortar is an excellent material that can be used for fatigue control because it is an effective reinforcing material even when used in a thin layer, it is easy to work with, and it has high bond strength.

Key words: steel deck plate, thick plate theory, asphalt pavement, concrete pavement, MMA resin mortar

1. はじめに

鋼床版はコンクリート系床版と比較して軽量であることから、長大橋や桁高が制限される橋梁等において広く建設されている。初期の鋼床版はデッキプレートとバルブリブプレートで構成されており、最近ではコスト削減を目的にUリブを採用したものが一般化している。しかしながら近年になって、それらの鋼床版に疲労亀裂が生じるという問題が顕在化するようになった¹⁾。それらの亀裂は鋼床版を構成するデッキプレートとリブの溶接接合部分で発生しており、初期には橋面舗装のひび割れとして発見されるが、それが進展することによる舗装変状が通行車輛に危険を及ぼすことは十分に予測されることである。

現行の道路橋示方書による鋼床版の設計法は、最小板厚が制限されているものの、膜効果を期待することでデッキプレート自体の応力計算は規定されていない。しかしながら現実問題として疲労亀裂が発生していることから、実橋のデッキプレートには相当の曲げ応力が発生しているものと推察され、既往の研究による有限要素法を用いた解析でも局所的に板曲げによる過大な応力の発生が認められている²⁾。

これらの疲労亀裂の対策工法として、舗装をコンクリートに変更する工法³⁾や鋼板を溶接や高力ボルト接合で一体化させるあて板工法によるもの、及びポリマーセメント系モルタルをデッキプレート上面に敷設する工法等が試験的に実施され、その効果の確認が進められており、実橋にも適用され始めている⁴⁾。鋼床版

の疲労亀裂への対策工法は、その構造から橋面上での施工となることが想定されるので、交通規制や天候の影響を受けることになり、それらの制約条件を加味した工法の立案が望まれることとなる。

そこで本研究では、輪荷重下でのデッキプレートの応力分布の把握を目的として、舗装を考慮した積層モデルに厚板理論を適用した解析を実施する。ここで、本研究で採用した厚板理論とは、Kirchhoff-Loveの仮定から誘導される薄板理論とは異なり、3次元弾性論による Galerkin-vector と Boussinesq の関数の Z 方向成分に基づく厳密な理論である。その基礎微分方程式は式(1)のように示され、実際の応力値の算定では、フーリエ級数を用いて計算を行っている。厚板理論を採用した理由は、有限要素法の適用が困難な異種材料を積層した界面の付着部分のずれによるせん断応力の解析でも厳密な解が得られることによる。

$$\Delta \Delta f_3 = 0, \quad \Delta \phi_3 = 0 \quad (1)$$

$$\text{ここに,} \quad \Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$$

変位関数 u, v, w と変位関数 f_3, ϕ_3 の関係は以下のように示される。

$$2\mu u = -\partial^2 f_3 / \partial x \partial z + \partial \phi_3 / \partial y$$

$$2\mu v = -\partial^2 f_3 / \partial y \partial z - \partial \phi_3 / \partial x$$

$$2\mu w = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\partial^2 / \partial z^2 + \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} (\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2) \right] f_3$$

ここに, λ, μ : Lamé の定数

本研究では厚板理論による計算で、初めに①アスファルト舗装が敷設された鋼床版の応力状態を把握し、次に②舗装材料をコンクリートに変えた場合の応力低減への効果を確認する。なお、コンクリート厚さは舗装全厚の 80mm とした場合の他にコンクリートを 50mm とし、その上層にアスファルト 30mm を敷設した計算も行うものとする。また、鋼とコンクリートの界面ではずれがないものとした合成と界面にずれが生じた場合の非合成の 2 種類の条件も考慮する。次に、③硬化速度が早く耐久性に優れていることから、薄層舗装や伸縮装置の段差修正で使用される MMA 樹脂モルタルをデッキプレート上面に敷設した場合の計算を実施し、その有効性を確認する。

2. モデルと計算条件

計算モデルを図-1 に示す。本研究ではデッキプレート厚さを一般的な $t=12\text{mm}$ とし、バルブリブプレートで補剛された鋼床版を想定しており、リブ間隔や横桁の支持間隔は、都市部の高速道路の標準的な断面構成を参考にしている⁵⁾。載荷する荷重は道路橋示方書に規定されている B 活荷重とし、ダブルタイヤとするために図に示すような橋軸直角方向中心に $b=100\text{mm}$ のあきを考慮している。なお、デッキプレートに対して最も不利な載荷条件となるように、荷重はリブを跨ぐように載荷するものとした。表-1 は計算に用いた材料の諸元と物性値を示したもので、アスファルトと MMA 樹脂モルタルは感温性が高いことから、夏期と冬期で異なるヤング係数を設定している。MMA 樹脂モルタルの物性値は堤下による既往の研究の成果を参考にした⁶⁾。

3. アスファルト舗装が敷設された鋼床版

一般に鋼床版の舗装にはグースアスファルトが用いられているがその基本物性は通常のアスファルト舗装と同等であり、夏期と冬期ではヤング係数が大きく異なることが知られている。図-2 は夏期と冬期のデッキプレート下縁でのたわみ分布を示したものである。アスファルト舗装のヤング係数の違いにより、舗装の剛性が寄与する冬期ではたわみが小さくなる傾向が伺える。図にはリブ位置を示しているが、リブ間中心でたわみが最大値となっており、計算条件が適切に反映されていることが判る。

図-3 はデッキプレートの上縁と下縁の曲げ応力の分布を示したものである。図によれば活荷重の載荷に対しては膜としての抵抗ではなく、板曲げ作用による応力分布が認められ、夏期のヤング係数の低下による舗装剛性が低下している状態では $\sigma_p=200\text{N/mm}^2$ を超える過大な曲げ引張応力の発生が認められる。またリ

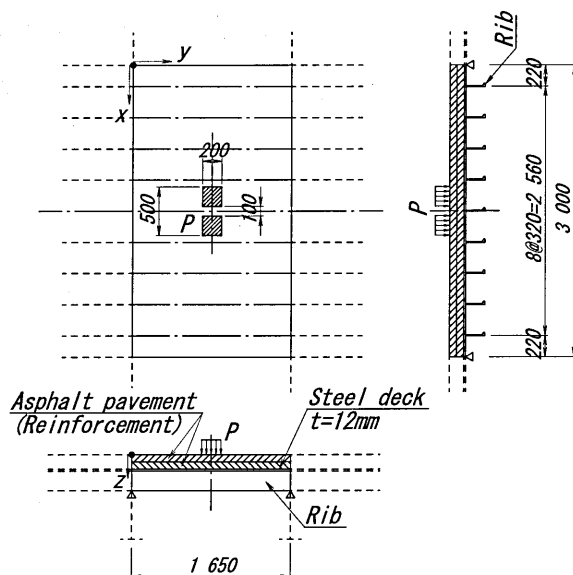


図-1 モデルの形状 (単位: mm)

表-1 材料の諸元と物性値

材料名	厚さ・サイズ (mm)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
デッキプレート	12	200	0.3
バルブリブプレート	200×10	200	0.3
コンクリート	50, 80	28	0.2
アスファルト	80	夏期 0.05	0.4
		冬期 2.00	
MMA	20	夏期 14.5	0.45
		冬期 23.9	

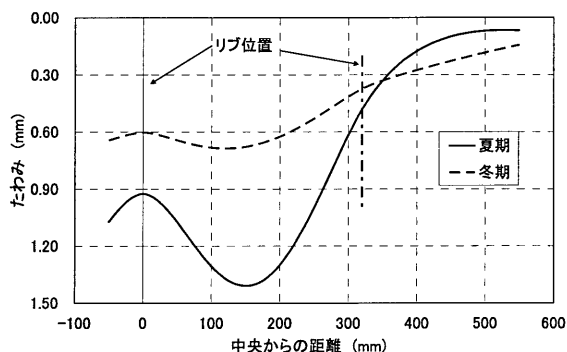


図-2 アスファルト舗装でのたわみ分布

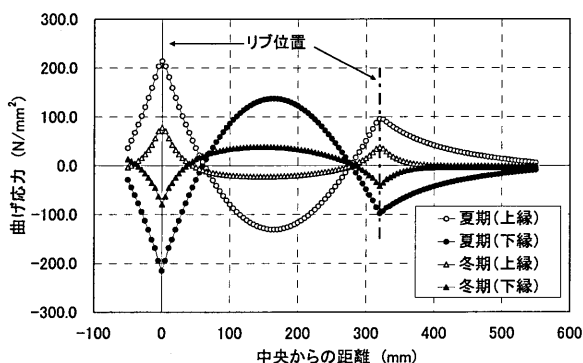


図-3 アスファルト舗装での曲げ応力の分布

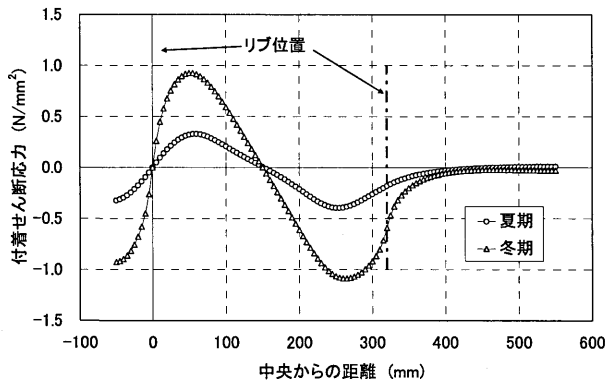


図-4 付着せん断応力の分布 (アスファルト)

ブ間の中央付近でも $\sigma_p=140\text{N/mm}^2$ 程度の曲げ引張応力が発生しており、B活荷重を考慮した荷重状態であることから、実走行荷重に対しても疲労損傷が発生する環境下にあることが推察される。

荷重載荷によりアスファルト舗装とデッキプレートとの界面に発生するずれによるせん断の応力、本研究ではその応力を付着せん断応力と定義し、その応力分布を図-4に示す。図によれば界面の付着せん断応力は舗装のヤング係数が大きな値となる冬期に最大値を示し、 $\tau_p=0.9\text{N/mm}^2$ 程度の値となる。また、その発生位置はダブルタイヤ片側のエッジ部分となっていることが認められる。コンクリート床版における防水層の付着応力の規定値が $\tau_a=0.2\text{N/mm}^2$ であることを考慮すれば、計算結果の付着せん断応力は過大な値であり、舗装はく離が進展する可能性がある。

4. コンクリート舗装の補強効果

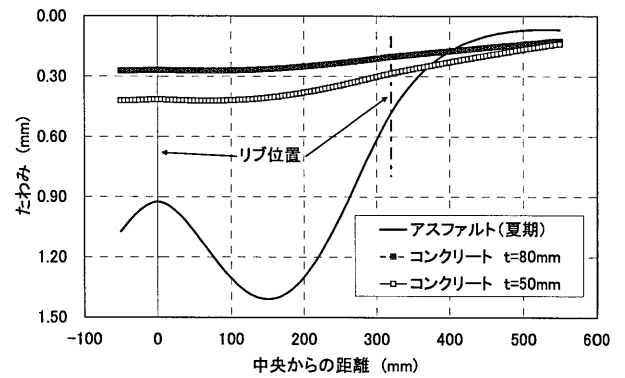
4.1 デッキプレートの計算結果

アスファルト舗装をコンクリートにした場合のたわみ分布を図-5に示す。図-5(a)はコンクリートとデッキプレートがずれのない合成された状態として計算した結果を示したものであり、非合成状態の図-5(b)と比較すれば、合成効果によるたわみの軽減が理解できる。図には夏期のアスファルト舗装でのたわみ分布を示しているが、合成、非合成ともにたわみは大幅に低減されておりその補強効果の大きさが伺える。

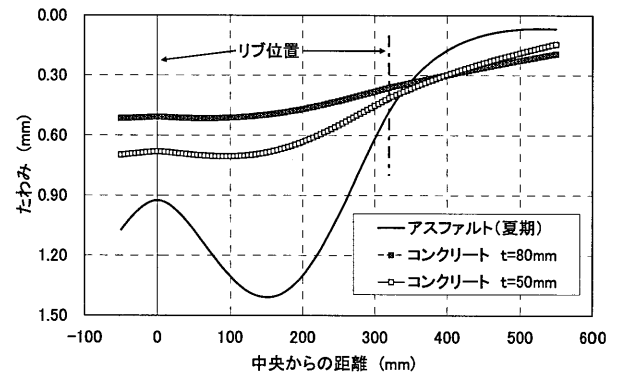
図-6はデッキプレート上縁の橋軸直角方向の曲げ応力の分布を示したものである。図-6(a)は合成状態のもので(b)は非合成状態の計算結果を示している。図-3によるリブ上のアスファルト舗装のみの場合の夏期での曲げ引張応力が $\sigma_p=214\text{N/mm}^2$ であるのに対し、コンクリートに変えた場合には $t=50\text{mm}$ の非合成状態でも $\sigma_p=43\text{N/mm}^2$ まで低減されることが判る。

4.2 コンクリート舗装の計算結果

合成状態での界面の付着せん断応力の分布を図-7に示す。図によればコンクリート厚さが大きくなれば

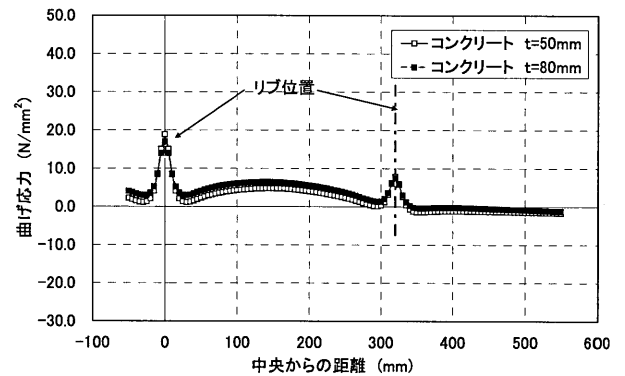


(a) デッキプレートと合成

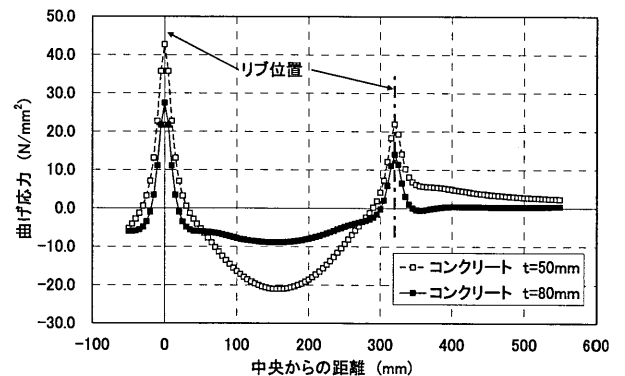


(b) デッキプレートと非合成

図-5 コンクリート舗装でのたわみ分布



(a) デッキプレートと合成



(b) デッキプレートと非合成

図-6 デッキプレート上縁の曲げ応力

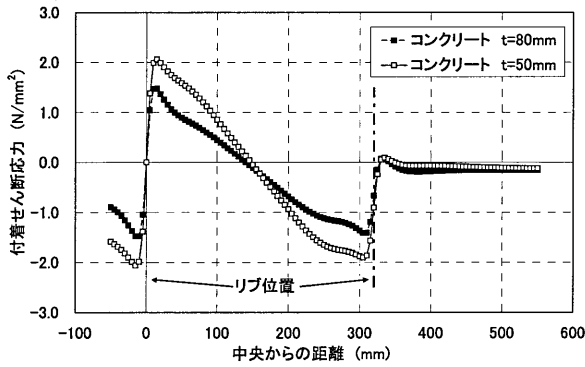


図-7 付着せん断応力の分布 (コンクリート)

付着せん断応力は小さくなるのが認められ、そのピークは荷重端ではなくリブ位置であることが判る。なお、コンクリート厚さ $t=50\text{mm}$ における付着せん断応力のピーク値は $\tau_c=2.1\text{N/mm}^2$ と過大な値になっており、一体性を期待する場合には、スタッド等のずれ止めの配置やエポキシ樹脂等の打継用接着剤をデッキプレート上に塗布してからコンクリートを打設するなどの対策が必要となる。

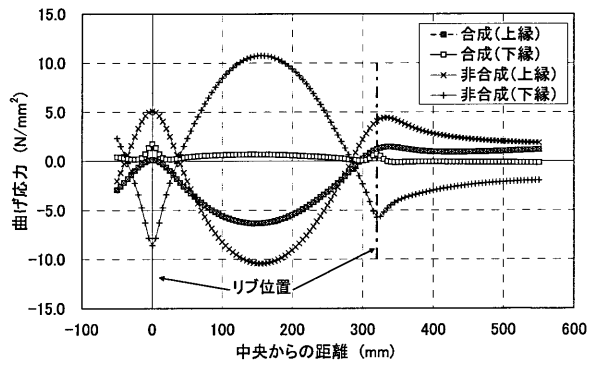
図-8にはコンクリートに発生する曲げ応力を示しており、図-8(a)がコンクリート厚さ $t=50\text{mm}$ のもので(b)が $t=80\text{mm}$ の計算結果である。図-8(a)によれば曲げ引張応力は非合成状態のリブ間中心のコンクリート下縁で最大となっており、曲げ強度⁷⁾ $f_{bk}=4.06\text{N/mm}^2$ に対して、 $\sigma_c=10.8\text{N/mm}^2$ という大きな値となっている。またリブ上でも $\sigma_c=5.1\text{N/mm}^2$ が発生しており、舗装表面側のひび割れ発生の危険性が伺える。合成状態における引張り応力のレベルは小さく、デッキプレートが引張りに抵抗していることが表現されている。

図-8(b)の $t=80\text{mm}$ の場合には、非合成状態における下縁の最大値が $\sigma_c=6.5\text{N/mm}^2$ で $t=50\text{mm}$ の60%まで低下している。リブ上では圧縮応力が発生しており、リブの変形によるものと考えられる。なお、上縁の応力分布が荷重端で変化しているが、コンクリート厚さが大きくなることでデッキプレートの寄与分が減少したためと推察される。

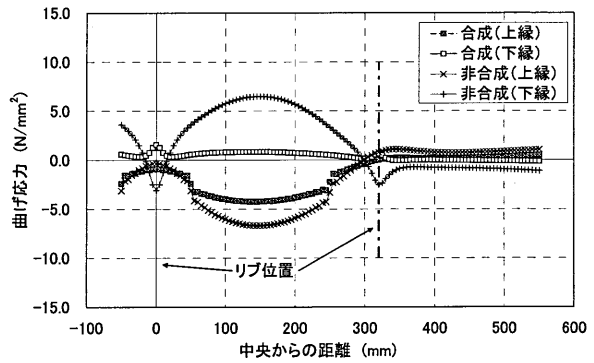
5. MMA樹脂モルタルの補強効果

5.1 MMA樹脂モルタルの特長

本研究で対象としたMMA樹脂モルタルは樹脂材料と細骨材との複合材料であり、結合材として用いるMMA樹脂は熱可塑性樹脂でメチルメタクリレート(Methyl Methacrylate)を主成分とする反応性樹脂である。常温で硬化させる場合の硬化剤にはBPO(過酸化ベンゾイル)を加えることでラジカル反応を起こさせている。ラジカル反応は硬化が早いことと雰囲気温度の影響を受けにくいという特長がある。よって、短時間での交通解放を必要とする場合や厳冬期の作業でも使用



(a) コンクリート厚さ $t=50\text{mm}$



(b) コンクリート厚さ $t=80\text{mm}$

図-8 コンクリートの曲げ応力

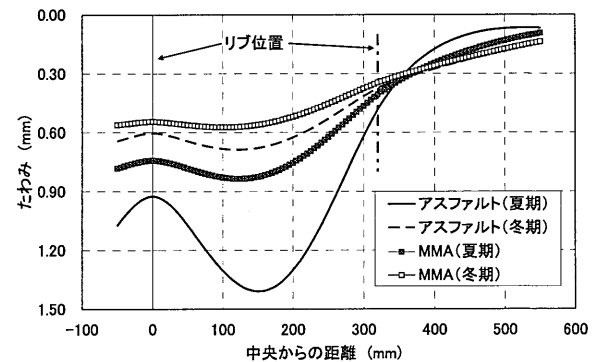


図-9 MMA樹脂モルタル敷設時のたわみ

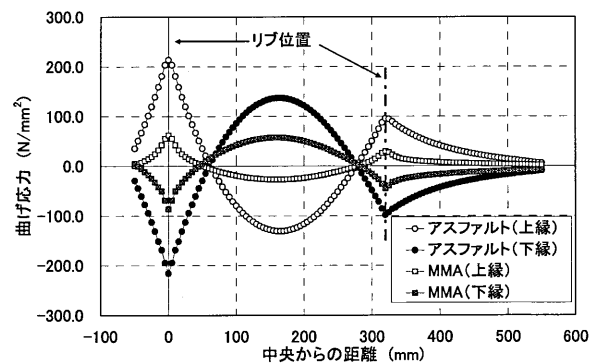


図-10 デッキプレートの曲げ応力

が可能であり、伸縮装置付近の段差修正や嵩上げ等に数多くの実績を有している。また、硬化物は耐候性、耐薬品性、耐摩耗性に優れており耐久性が要求される用途に特に有効な材料である。

5.2 MMA樹脂モルタルの計算結果

MMA樹脂モルタルをデッキプレート上に $t=20\text{mm}$ 敷設し、その上層に $t=60\text{mm}$ のアスファルト舗装とした場合のたわみ分布を図-9に示す。MMA樹脂モルタルもアスファルト舗装と同様に感温性を有しており、雰囲気温度の違いでヤング係数が異なるという性質があるため、計算は夏期と冬期を設定している。たわみの低減率は夏期が60%で冬期が83%となっており、アスファルト舗装が剛性に寄与しない夏期に補強効果が高くなっている。

図-10はデッキプレート上縁と下縁の曲げ応力を示したもので、夏期のヤング係数で計算している。ピーク値はリブ上となっており、アスファルト舗装における曲げ引張応力が $\sigma_p=214\text{N/mm}^2$ でMMA樹脂モルタルの場合には $\sigma_p=62\text{N/mm}^2$ と約30%まで応力値が低減されていることから、 $t=20\text{mm}$ と薄層での設定でも高い補強硬化を有することが判る。

MMA樹脂モルタルは高い付着強度を有する材料であり、母材との一体性に優れている。図-11はデッキプレートとモルタルの界面に発生する付着せん断応力を示したもので、ピーク値は $\tau_m=3.4\text{N/mm}^2$ となっており、荷重端から20mm程度のリブ側で発生している。一般的な有機樹脂材料の鋼板に対する付着せん断強度は $\tau_a=10\text{N/mm}^2$ 程度であることから実橋への適用には問題はないと考えられる。

図-12はMMA樹脂モルタルに発生する橋軸直角方向の曲げ応力の分布を示したもので、曲げ引張応力のピークはリブ上となっており、その値は夏期の場合における $\sigma_m=10.3\text{N/mm}^2$ である。冬期ではモルタル上に敷設されているアスファルトの剛性が活荷重の抵抗に寄与するので値は小さくなっている。MMA樹脂モルタルはその配合や細骨材の選定により強度を調整することが可能で、曲げ強度が $\sigma_a=30\text{N/mm}^2$ 程度の材料を供給することも可能であることから、補強材料として十分に適用が可能であると考えられる。

5.3 MMA樹脂モルタルの実施工

樹脂材料の多くは水分の存在が問題となり、硬化不良等の原因となることが知られている。本研究で対象としたMMA樹脂モルタルも例外ではなく、雨天での施工は困難となる。図-13に施工フローチャートを示すが、樹脂材料は接着界面の状態にその品質が左右されるので、プラスト処理は必須となる。その後接着性を向上させるために樹脂プライマーを塗布し、モルタルを敷設する。材料の特長で説明したとおり、硬化時間が短いので施工時間の限られる橋面上の施工でも

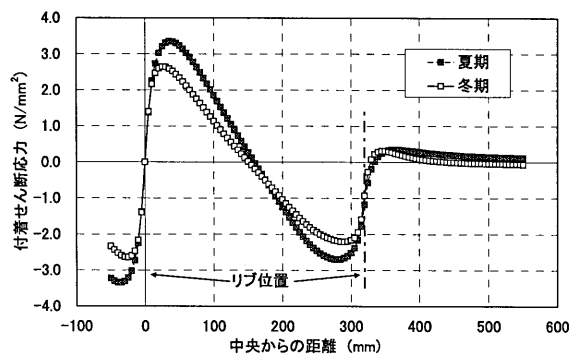


図-11 付着せん断応力の分布
(MMA樹脂モルタル)

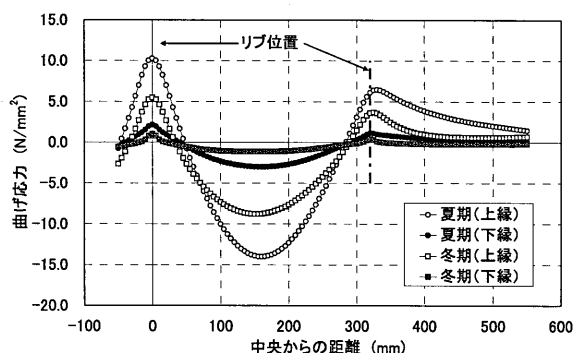


図-12 MMA樹脂モルタルの曲げ応力

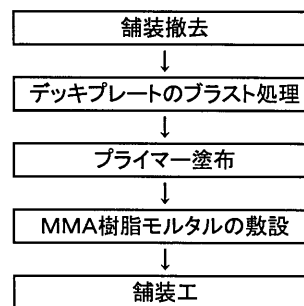


図-13 MMA樹脂モルタルの施工フロー

施工性は良い。

6. まとめ

本研究では、鋼床版に発生した疲労亀裂問題への対応として積層板を対象とした厚板理論を適用し、界面のせん断応力などの厳密解を得ることで応力状態を把握し、コンクリート舗装やMMA樹脂モルタルによる応力低減の効果を確認した。以下に得られた知見を列挙する。

- (1) デッキプレート上にアスファルト舗装が敷設された場合の計算では、アスファルトのヤング係数が低下する夏期でデッキプレートの曲げ応力が大き

くなり、リブ上では $\sigma_p=200\text{N/mm}^2$ を超過する値が認められた。また、付着せん断応力はヤング係数が大きくなる冬期に最大値を示し、 $\tau_p=0.9\text{N/mm}^2$ 程度の過大な値となっている。

- (2) 舗装をコンクリートにした場合には、たわみ変形が大幅に低減され、リブ上の曲げ応力もコンクリート厚さが $t=50\text{mm}$ で非合成状態とした場合でも $\sigma_p=200\text{N/mm}^2$ 程度が $\sigma_p=43\text{N/mm}^2$ まで低減されることが示された。
- (3) コンクリート舗装がデッキプレートと合成されている場合の付着せん断応力のピークは荷重端ではなくリブ位置で発生しており、 $t=50\text{mm}$ における付着せん断応力のピーク値は $\tau_c=2.1\text{N/mm}^2$ と過大な値になっている。よって、一体性を期待する場合には、スタッド等のずれ止めの配置やエポキシ樹脂等の打継用接着剤の併用が必要である。
- (4) コンクリート舗装に発生する曲げ応力は、 $t=50\text{mm}$ の方が $t=80\text{mm}$ よりも大きく、リブ間中心のコンクリート下縁で最大となり、 $\sigma_c=10.8\text{N/mm}^2$ という大きな値を示した。リブ上でも $\sigma_c=5.1\text{N/mm}^2$ が発生しており、舗装表面側にひび割れ発生が発生すると考えられる。
- (5) デッキプレート直上に $t=20\text{mm}$ のMMA樹脂モルタルを敷設した場合のたわみは、アスファルト舗装とした場合の夏期に対して 60%まで低減され、デッキプレートの曲げ引張応力も $\sigma_p=62\text{N/mm}^2$ と約 30%まで値が低減されており、十分な補強効果が伺える。
- (6) MMA樹脂モルタルとデッキプレートの界面に発生する付着せん断応力とモルタル上縁に発生する曲げ応力は、ともに強度に対して問題となるレベルではなく、補強材料として適用可能であると考えられる。

本研究では鋼床版の疲労損傷対策を解析的に検討することで、各方面で検討されているコンクリート舗装とした場合の問題点や、その他に効果が見込める材料を提案した。今後はモデル実験を通してその有効性を確認する予定である。

参考文献)

- 1) 川畑篤敬, 井口進, 内田大介, 松下裕明, 玉越隆史, 石尾真理: 鋼床版橋梁の疲労損傷を対象とした調査点検手法の立案に向けた実橋調査, 第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.241-246, 2006.7.
- 2) 村越潤, 有馬敬育: 鋼床版における最近の疲労損傷事例と対策に関する検討—デッキプレート内進展亀裂を対象として—, 第5回道路橋床版シンポジウム, pp.13-24, 2006.7.
- 3) 西川和廣: SFRRCによる鋼床版舗装, 橋梁と基礎(2005-8), pp.84-87.
- 4) 三田村浩, 須田久美子, 坂田昇, 平石剛紀, 赤代恵司: 鋼床版への高靱性繊維補強セメント複合材料ECCを用いた補強工法の適用, 橋梁と基礎(2005-8), pp.88-91.
- 5) 首都高速道路厚生会: 首都高速道路鋼構造物設計基準, pp.54-59, 平成4年4月
- 6) 堤下隆司: MMA樹脂コンクリートによる損傷RC床版の補強工法に関する研究, 大阪工業大学学位請求論文, 2004.11.
- 7) 横山広, 関口幹夫, 堀川都志雄: 道路橋鉄筋コンクリート床版の曲げ強度に関する検討, 第60回年次学術講演会講演概要集, pp.301-302, 平成17年9月