

FRP 格子筋による鋼床版舗装構造の改良と疲労耐久性の向上

Improvement on the structure of steel plate deck pavement and its fatigue durability

林 健治*, 三浦 尚**, 関根健一***, 村山雅人****, 長屋五郎*****, 小野昌二*****
Kenji HAYASHI, Takashi MIURA, Kenichi SEKINE, Masato MURAYAMA, Goro NAGAYA and Shoji ONO

*博(工), トピー工業(株), 技術統括部技術研究所 (〒441-8510 愛知県豊橋市明海町 1)

**工博, 東北大学名誉教授 (〒167-0051 東京都杉並区荻窪 4-28-9-702)

***日鉄コンポジット(株) (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

****博(工), 東亜道路工業(株), 技術研究所第二研究室 (〒300-2622 つくば市要 315-126)

*****工修, トピー工業(株), 技術統括部技術研究所 (〒441-8510 愛知県豊橋市明海町 1)

In steel highway bridges, fatigue problems on steel plate deck have been increasing and consequently establishing the repair/retrofit method have become urgent issues. We proposed a new structure of the steel plate deck pavement with FRP grid, which possessed enough fatigue performance due to reducing normal stress in welded part of the steel plate deck and U-rib. In this paper, the characteristics of the proposed structure were summarized on the basis of results of some studies, and it was proved that the new structure with FRP grid possessed the retrofitting effect enough in comparison with the structure without FRP grid, through the results of bending tests of specimens modeling their structures and finite element analyses.

Key Words : FRP grid, Steel plate deck pavement, Retrofit, Effect of stress reduction

キーワード : FRP 格子筋, 鋼床版舗装, 補強, 応力低減効果

1. はじめに

重車両交通量の増大に伴い、鋼道路橋の鋼床版では、デッキプレートと縦リブの溶接部に発生した疲労き裂がデッキを貫通して舗装部に大きな損傷を与えるという、従来見られなかった損傷事例が報告¹⁾され、適切な対策を講じる必要性が指摘されている。このような部位の補強方法として、損傷部を高力ボルトにより当て板補強する方法²⁾が一般的であると考えられるが、施工が煩雑であるとともに、補強効果が損傷部近傍に限定されるという欠点があり、より効率的・効果的な補強方法が求められている。

最近、予防保全の観点から、舗装部の構造に着目した研究が散見³⁾されるようになり、新たな補修・補強の可能性を示唆するものとして注目されている。このような状況の下、著者らは、鋼床版の舗装構造として多用されている基層のグースアスファルトと表層の密粒度アスファルトの間にFRP格子筋を入れて、輪荷重を分散し、鋼床版への補剛効果の増大が期待できる改良構造を提案した^{4)~8)}。

本研究では、この改良構造の特徴を述べるとともに、鋼床版舗装構造の部分モデルを用いた曲げ載荷実験及び実構造に近いモデル試験体の有限要素解析等を通して、予防保全の観点から、新たな改良構造の有効性を明らかにし、着目部位の応力低減効果に基づく試算結果より、本構造が疲労耐久性の向上に大きく寄与することを明らかにする。

2. 本構造の特徴

鋼床版のデッキプレートと縦リブの溶接部に見られる疲労損傷やその他の溶接部から発生した疲労損傷に対する補修・補強法として、疲労き裂の溶接補修やUリブ内へのコンクリートの充填補強などの事例を除き、損傷部を高力ボルトにより当て板補強する方法が比較的多用されている³⁾。そこで、以下では、当て板補強法との比較という観点から、本構造 (Fig.1 参照) の特徴を要約する。

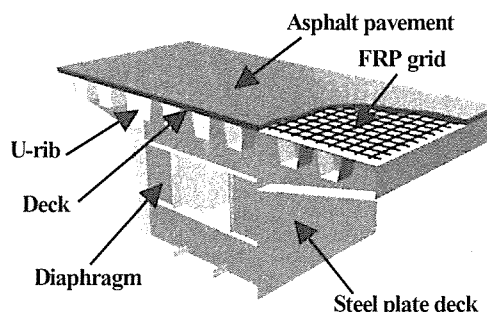


Fig.1 Typical steel plate deck and structure proposed

- ①補剛効果が高く、発生応力を大幅に低減できる。また、発生応力の低減により、疲労寿命を延ばすことができる。
- ②鋼床版側の補修・補強法と併用でき、より有効な対策

を講じることができる。また、舗装部の耐久性の向上も期待でき、方法の選択肢が広がる。

③本構造による補強法は、鋼床版全体に亘って有効に機能し、すべての部位の発生応力を低減することができるので、応力の流れを変化させることはなく、他の部位からの疲労き裂の発生を拘束する。

④予防保全の観点から、新設鋼床版橋の補強に、また、アスファルト混合物を有する全ての舗装構造の補強に効果を発揮するものと考えられる。

⑤使用したFRP格子筋は、アスファルトの変形に対する追随性を拘束するものではなく、わだち掘れに対する効果を十分に期待することができる。

⑥アスファルト混合物の基層と表層の間にFRP格子筋を挿入するには、表層のアスファルト混合物を撤去し、打換えを行う必要があるが、施工は比較的容易である。また、メンテナンスも容易に実施できる。

⑦ただし、FRP格子筋を用いた鋼床版舗装工事に関わる費用は、従来の舗装工事に比べ、現状では、2倍ほどの工事費を要することに留意しなければならない。

以上のように、舗装構造の補強法、また、鋼床版の耐久性の向上法として、FRP格子筋に注目した主な理由は、軽量で高強度であり、取り付けが容易であるとともに錆びず、耐食性に優れている等の特性を有することによるが、以下では、特に、①について定量的な検討を行った結果を述べる。②～⑦については、今後、実施工を行った段階で報告したい。

3. 基本構造の選定

鋼床版舗装の改良構造として、基層のグースアスファルトと表層の密粒度アスファルトの間にFRP格子筋を挿入する構造を基本と考え、1)FRP格子筋の最適な挿入位置、2)FRP格子筋の最適断面、3)基層にFRPグレーチングを挿入した場合について、実験的な検討を行い、基本構造を選定した⁴⁾。以下にその概要を述べる。

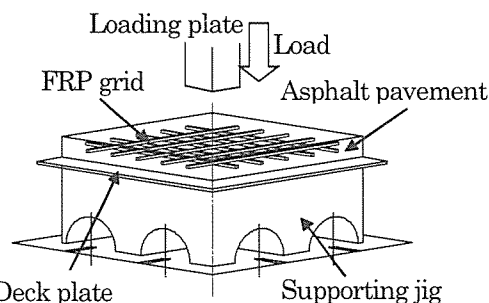


Fig.2 Loading conditions(4-sides simple support)

3.1 挿入位置の選定

鋼床版のデッキプレートと舗装部から構成される部分モデル試験体を作製した (Fig.2 参照)。試験体は800mm×800mmの正方形で、板厚12mmのSM400Aの鋼板に、表層・基層ともに40mmのアスファルト混合物を打設した。試験体のタイプはFRPの配置により次の3種類とした。

1)記号N：通常のアスファルト舗装で、表層に密粒度アスファルト、基層にグースアスファルトを使用した。

2)M：Nの表層と基層の間にFRP格子筋を配置した。ここで、FRP格子筋の格子はピッチ50mmの正方形で、断面積は17.5mm²である。

3)B：Nのデッキプレートと基層の間に上記のFRP格子筋を配置した。

(1) 実験概要

曲げ載荷実験は200kNの油圧サーボ型疲労試験機を用いた。実験は、舗装面から載荷する場合(縦リブ間の正曲げを対象とし、分散効果+補剛効果を狙ったもの)とデッキ面から載荷する場合(縦リブ周辺の負曲げを対象とし、補剛効果のみを狙ったもの)の2種類とし、載荷幅を100mm×100mmとして試験体の中央部を載荷した。支持条件はFig.2に示す4辺単純支持とした。載荷は、所定の荷重の負荷と除荷を3回繰り返すことにより行った。

(2) 実験結果

FRP格子筋による補強効果(分散効果+補剛効果)は、荷重と荷重載荷点直下の変位及びデッキプレートに生じるひずみを計測して、荷重-変位曲線及び荷重-ひずみ曲線の初期接線剛性を評価・比較することにより行った。ここでは、前者の結果のみを報告する。4辺単純支持で舗装面を上にして実験した場合の荷重と変位の関係をFig.3に示す。荷重-変位の関係は、2回目、3回目の結果がほぼ同じであったので2回目の結果を採用した。同図より荷重-変位曲線の傾き(初期接線剛性)を求め、FRP格子筋で補強した場合の荷重-変位曲線の傾きを無補強の場合と比較すると、中間補強(M)、下面補強(B)の何れの場合でも、無補強(N)の場合よりも傾きが大きく(剛性が高く)、大きな補強効果を得ていることが確認された。また、Mの方がBよりも効果が大きいことが明らかとなった。

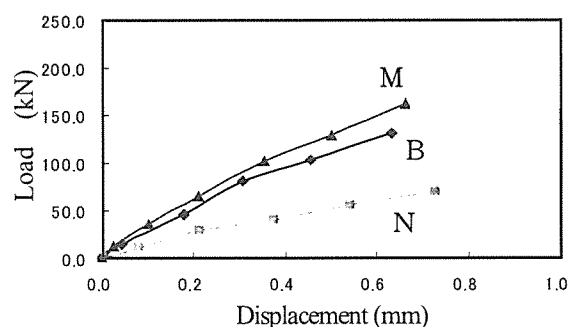


Fig.3 Load-displacement curves(at positive bending)

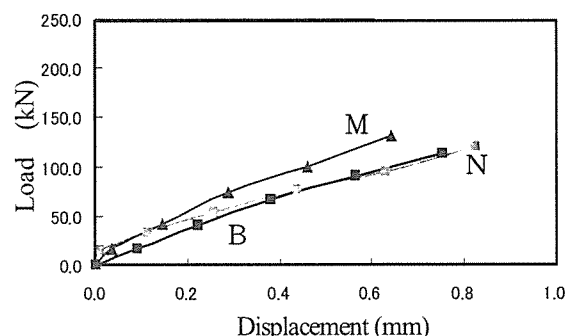


Fig.4 Load-displacement curves(at negative bending)

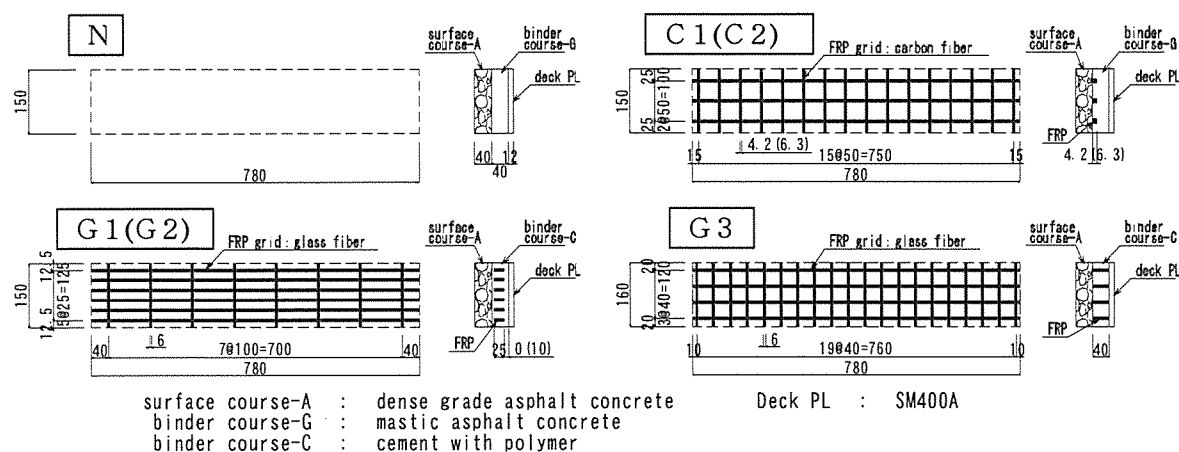


Fig.5 Specimen configurations and dimensions

一方、舗装面を下にした場合の荷重と変位の関係をFig.4に示す。MはNより傾きが大きく、補剛効果が認められるが、舗装面を上にした場合よりも効果が小さい。両者の違いは、分散効果の影響に起因するものと考えられる。また、BはNとほぼ同じであり、補剛効果が認められない。

Fig.3, Fig.4より、本実験の範囲内では、**M**の方が**B**よりも効果が大きいことが示された。したがって、FRP格子筋の挿入位置は、グースアスファルトと密粒度アスファルトの間が望ましいものと考えられる。また、舗装面を上にした場合よりも舗装面を下にした場合の方が、換言すれば、正曲げよりも負曲げの方が補強効果は小さくなることが確認された。それゆえ、後者の載荷方式で補強効果を調べる方が安全側の評価となることが示された。

3.2 本構造の最適化

ここでは、本構造の最適化を目的とし、基層のグースアスファルト混合物と表層の密粒度アスファルト混合物の間に挿入するFRP格子筋の断面積を変えた場合、基層にFRPグレーチングを挿入した場合、また、グレーチング、アスファルト及び鋼床版デッキプレートとの一体化を促進するために、グレーチングに切り込みやスペーサを挿入した場合について、舗装構造の部分モデル試験体を製作し、曲げ載荷実験を実施して、より効果的な構造形式を選定することとした⁵⁾。

(1) 試験体

鋼床版のデッキと舗装部から構成される部分モデル試験体の形状と寸法をFig.5に示す。ここで、試験体の幅を150mm、長さを780mmとし、デッキには、板厚12mmのSM400A鋼板を用いた。また、FRP格子筋及びグレーチング等の配置により試験体のタイプは以下の6種類とした。

1) 基層にグースアスファルト混合物、表層に密粒度アスファルト混合物を用いた通常のアスファルト舗装構造 (FRP格子筋なし) : 記号N (鋼床版のデッキプレートと基層の接着には、特殊ゴム、特殊樹脂等を混合したアスファルト溶剤系接着剤を使用し、基層と表層の接着にはゴム入りアスファルト乳剤を用いた。)

2) 基層と表層の間にFRP格子筋 (品種CR-6及びCR-10

の断面積は、各々 17.5mm^2 、 39.2mm^2 であり、図中の数値は厚さmmを表す)を挿入した舗装構造: 記号C1 (前者CR-6)、C2 (後者CR-10) (鋼床版のデッキプレートと基層の接着と、基層と表層の接着には、それぞれ1)のアスファルト溶剤系接着剤、ゴム入りアスファルト乳剤を使用した。)

3) 基層にグースアスファルト混合物の代わりにFRPグレーチング (品種GS2525: 升目25mm×100mm、厚さ25mm)を挿入した舗装構造: 記号G1 (基層の充填材及び接着剤として樹脂入りセメントを、また、基層と表層の接着には、上記のアスファルト乳剤を使用し、C2よりも剛性の向上を狙ったものである。)

4) G1にスペーサ挿入 (作業性の向上とアスファルト充填性の確保及び一体化の促進のため)した舗装構造: 記号G2

5) 基層にFRPグレーチング (品種GS4040: 升目40mm×40mm、厚さ40mm)を挿入した構造: 記号G3 (G1よりもさらに剛性の向上を、同時に切り込み挿入により作業性の向上とアスファルト充填性の確保を狙ったものであり、基層の充填材及び接着剤として樹脂入りセメントを使用した。なお、基層と表層の接着には、同様に上記の乳剤を用いた。)

C1、C2に関して、断面積が大きく、鉄筋D6、D10の剛性に匹敵するCR-13やCR-16を使用することも考えられるが、基層と表層のアスファルト混合物との一体化及び追従性を勘案して、今回はCR-10のC2までを検討することとした。なお、1)のNに対して、基層のグースアスファルト混合物の厚さを50mmとする場合も考えられるが、FRP格子筋の挿入による補強効果等の基本特性はほぼ対応するものと考えられるので、試験体のタイプとして取り入れなかった。

(2) 実験概要

曲げ載荷実験は200kNの油圧サーボ型疲労試験機を用いて行った。載荷条件は、Fig.6に示すように4点曲げとし、押し治具 (本来、自動車荷重を想定し、載荷幅として輪荷重に対応したものをを用いるべきであるが、寸法等の制約により補強効果の確認を優先して載荷幅を設定した)を

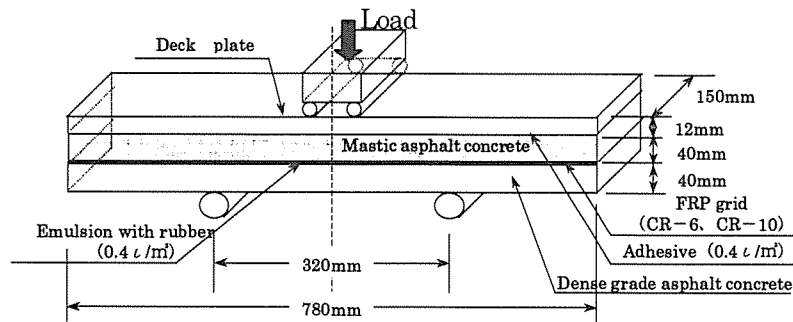


Fig.6 Loading conditions (4-points bending tests)

介して荷重を伝達する方式を採用した。ここで、受け治具の間隔は、鋼床版の縦リブ間隔を考慮して320mmとした。

載荷は定めた目標荷重まで一定速度で行い、載荷速度を0.1mm/secとした。目標荷重（初期接線剛性を用いて補強効果や補剛効果を評価することとしたため、試験体の荷重と変位の関係が線形弾性の範囲内に収まるように荷重を設定した）は、7～12kNであり、目標荷重到達後、その段階における変位を1分間保持し、除荷を行い、このサイクルを3回繰り返した。3回目の荷重－変位曲線を用いて初期接線剛性を求めた。なお、試験体の温度は約20℃に保持されるように工夫した。

計測項目は、主に荷重載荷点直下（試験体中央部）の変位とひずみであり、荷重とこれらを連続計測して、荷重と変位、荷重とひずみの関係を求めた。

(3) 実験結果

各試験体における荷重と変位の関係を Fig.7 に示す（それぞれ2体載荷実験を行った結果を示している。C1、G1、Nに若干のばらつきが見られるが、データの傾向に差は認められない）。また、Fig.7 を用いて各試験体の初期接線剛性を評価し、通常の鋼床版舗装のN試験体を基準として、C1～G3の剛比を算出した結果（平均値）を Fig.8 に示す。ここに、剛比は補強効果（輪荷重の分散効果と一体化による補剛効果の総和）を表すものであり、この数値が高いもの程、補強効果が高いことを表す。

Fig.8 より、補強効果はC2が最も高く、Nの約1.6倍となっている。次いで、G2、G3、C1となっているが、G1が逆に約0.8とNより低くなっている。G1の結果については、不明な点が多いが、グレーチングがデッキプレートや舗装と一体化せず、重ね梁として挙動しているためと推察される。C1よりC2が大きな値を示した理由は、当然のことながら、C2の剛性が高いことに起因している（上記の(1)で述べたように、一体化及び追従性の要求と高剛性の要求は相容れないものがあり、双方のバランスを勘案し、構造を選定する必要がある）。

使用する接着剤により得られた結果は変わる可能性があり、今後も十分な検討が必要であるが、今回の実験の範囲内では、FRP格子筋（断面積39.2mm²）を舗装部に間に挿入した構造C2が最も高い補強効果を示し、優れていることが判明した。以下では、この舗装構造を用い、補強効果に及ぼす温度及び載荷速度の影響等を調べる。

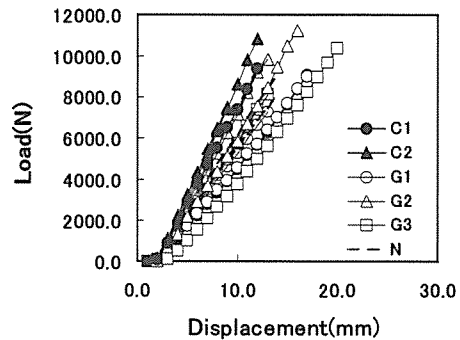


Fig.7 Load-displacement curves at each specimen

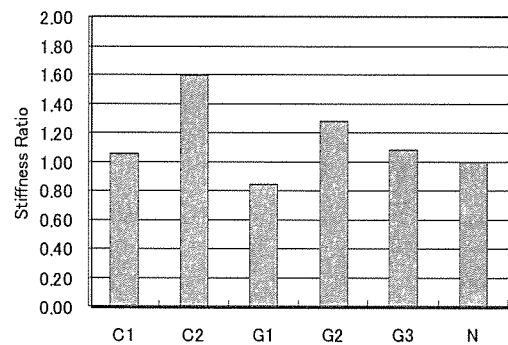


Fig.8 Stiffness ratio of each specimen to N

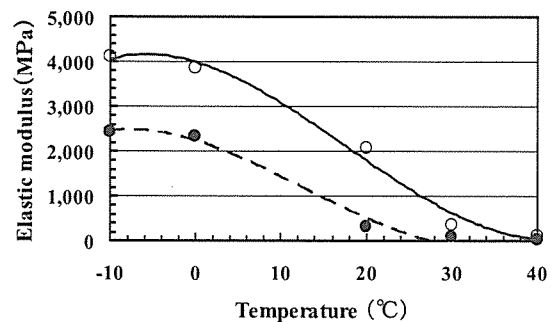


Fig.9 Temperature dependence of elastic modulus

4. 補強効果の温度依存性

前章の結果は、室温（ほぼ20℃）で曲げ載荷実験を行った結果であり、Fig.9に示すようなアスファルト混合物の温度依存性⁸⁾を考慮すると、（鋼床版の表面温度は、夏

季では、40℃以上となることも多いので40℃以上では、異なる結果となることも予想される。そこで、20℃と併せて40℃における提案構造の補強効果を調べた⁶⁾。以下に、その結果を述べる。

4.1 試験体と実験概要

3章で選定された基本構造C2（基層のグースアスファルト混合物と表層の密粒度アスファルト混合物の間に断面積39.2mm²のFRP格子筋を挿入した舗装構造）と、通常のアスファルト舗装構造N、比較のため基層にFRPグレーチング（升目40mm×40mm、厚さ40mm）を挿入した舗装構造G3の3種類の試験体を用意した。

実験方法は、3.2節と基本的には同じであり、Fig.6の載荷条件の下に、4点曲げ載荷実験を実施した。載荷速度、目標荷重、荷重サイクル、計測項目及び評価項目も3.2節と同様である。なお、室温（約20℃）で行った実験では、温度制御は行わなかったが、設定温度が40℃の場合には、試験体を40℃の恒温槽に12時間程入れ、取り出した後、温度低下を防ぐため、側面にヒータ及び断熱材を当て、40℃に保つように制御した。

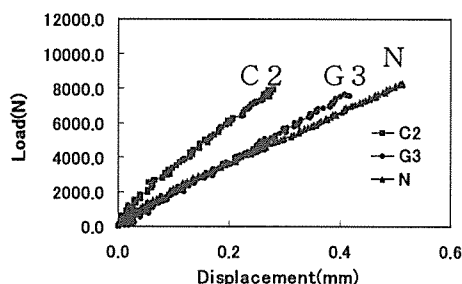


Fig.10 Load-displacement curves (at 20 °C)

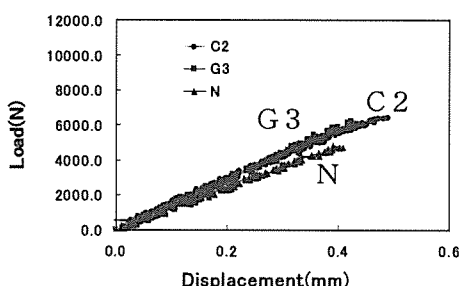


Fig.11 Load-displacement curves (at 40 °C)

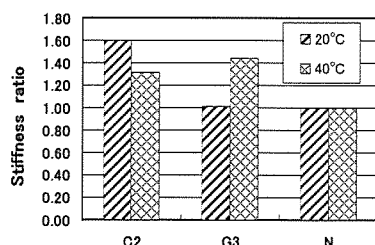


Fig.12 Stiffness ratio of each specimen to N

4.2 実験結果

FRP格子筋による補強効果（C2、G3）の評価は、

無補強のN（設定温度20℃及び40℃）の初期接線剛性に対する剛比を算定することと等価と考え、値を算出した。設定温度20℃及び40℃における各試験体の荷重と変位の関係をそれぞれFig.10及びFig.11に示す。また、剛比を求めた結果をFig.12に示す。

C2は各設定温度のNに比し、20℃では約1.6倍、40℃では約1.3倍となり、温度の上昇に伴い補強効果は低下している。但し、アスファルト混合物の変形抵抗がほとんど期待できない40℃の場合でも、Nに対し約1.3倍もの剛性を確保していることは特筆すべき点と考えられる。したがって、温度の上昇に伴い補強効果が低下するものの、無補強Nの場合と比較して、十分な補強効果を有することが明らかとなった。

一方、G3は20℃では約1.0倍、40℃では約1.4倍となり、逆に増大している。これは、20℃の場合とは異なり、40℃では荷重がグレーチングを介して円滑にデッキに伝達されたためと考えられる。

5. 補強効果に及ぼす載荷速度の影響

前章までの実験では、曲げ載荷時における載荷速度を何れも0.1mm/secとして行った。言うまでもないが、鋼床版は、直接、自動車荷重を受ける構造となっており、その速度の影響、換言すれば、補強効果に及ぼす載荷速度の影響は無視できないものと考えられる。そこで、載荷速度をパラメータとして、室温（20℃）と40℃における基本構造C2の補強効果に及ぼす影響を調べた⁷⁾。以下に、その概要を述べる。

5.1 試験体と実験概要

鋼床版のデッキと舗装部から構成される部分モデル試験体（前章と同様にN、C2、G3の3つのタイプを取り上げる）の形状と寸法はFig.5のとおりである。

実験方法は、基本的には3.2節、4.1節と同じであり、Fig.6の載荷条件の下で、4点曲げ載荷実験を行った。目標荷重、荷重サイクル、計測項目及び評価項目も3.2節、4.1節と同じである。ここで、載荷は、設定した目標荷重まで一定の速度で実施し、その載荷速度を0.1mm/sec、0.25mm/sec、0.5mm/secの3段階（0.2Hz～1.1Hz）とした。なお、室温で行った実験では、前章と同様に温度制御は行わなかったが、設定温度が40℃の場合には、試験体を40℃に保持するように制御した（モニタリングの結果、試験体の温度は、部位により37℃～41℃の値を示したが、全体としてほぼ40℃を保持できた）。

5.2 実験結果

試験体温度20℃及び40℃の場合について、試験体Nに対する試験体C2とG3の補強効果に及ぼす載荷速度の影響を調べた結果をそれぞれFig.13、Fig.14に示す。

試験体温度20℃の場合では、C2、G3の何れも載荷速度0.1mm/secと0.25mm/secで剛比がほぼ等しく、0.5mm/secで大きくなっている。C2とG3を比較すると、C2の方が大きく、両者の差は載荷速度の影響を受けず、ほぼ一定である。一方、40℃の場合では、C2とG3とも

に荷重速度に影響を受けず、ほぼ一定であり、C2とG3を比較すると、G3の方が大きく、両者の差もほぼ一定である。

以上の結果より、C2は、20℃で剛比が1.6を超え、40℃でも1.3を超えており、高い補強効果を有することが判明した。40℃を超える領域では、不明な点があり、十分であるとは言い難いが、モデル試験体のレベルでは、1.3倍の補強効果を有すると言っても過言でない。

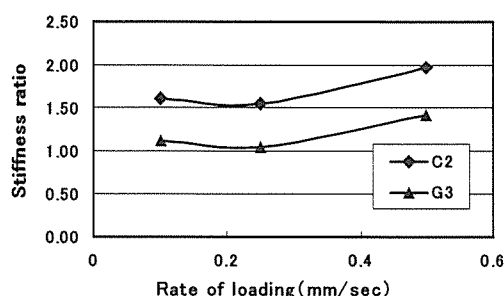


Fig.13 Effect of rate of loading (at 20 °C)

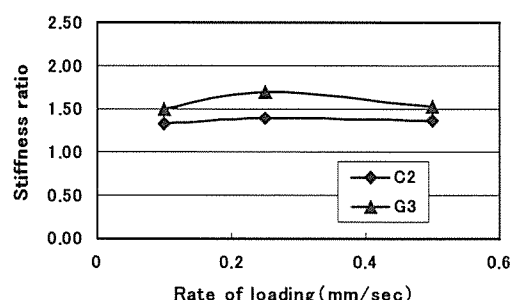


Fig.14 Effect of rate of loading (at 40 °C)

6. 補剛効果による余寿命の向上

応力低減による疲労耐久性の向上について、前述までの結果を整理する。

いま、従来の舗装構造を有する鋼床版の発生応力範囲を $\Delta\sigma_1$ 、対応する疲労寿命を N_1 とし、FRP格子筋を用いた新しい舗装構造を有する鋼床版の発生応力を $\Delta\sigma_2$ 、対応する疲労寿命を N_2 とすると、次の関係⁹⁾が成立する(直応力を受ける継手では $m=3$)。

$$\Delta\sigma_1^m \cdot N_1 = \Delta\sigma_2^m \cdot N_2 \quad (1)$$

式(2)を整理すると、

$$N_2/N_1 = (\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_2)^m \quad (2)$$

となる。ここで、FRP格子筋による補強効果を応力低減効果 r で表すと、

$$\Delta\sigma_2 = (1-r) \cdot \Delta\sigma_1 \quad (3)$$

となり、これを式(2)に代入することにより

$$N_2/N_1 = \{1/(1-r)\}^m \quad (4)$$

が得られる。FRP格子筋を用いて補強することにより、疲労寿命が N_2/N_1 倍となる。

本構造は、発生応力を23%以上低減することができるので、 $r=0.23$ とし、式(4)に代入すると、 $N_2/N_1=2.19$ 倍となり、疲労寿命を2倍以上にすることが期待できる。それゆえ、補強の選択肢の一つとなり得る。

7. 実構造の応力低減効果の推定

前章までの検討は、鋼床版舗装構造の一部を取り出した部材レベルの補強効果を調べたものであり、構造物レベルでも、同様な補強効果が得られるか否かは明らかでない。本章では、構造物レベルでも、前章と同様な結果が得られ、疲労耐久性の向上に寄与することを検証するために、鋼床版舗装構造を構成する主要な部材を含む実物大の部分モデル試験体について、有限要素法に基づく応力解析を実施し、FRP格子筋による応力低減効果を数値的に明らかにしようとするものである。

以下では、有限要素法に基づく数値解析の手順を示し、数値解析による応力低減効果の推定結果から、疲労耐久性の向上に寄与することを示す。

7.1 解析モデルと数値解析の妥当性

それぞれ2体の縦リブと横リブで構成される Fig.15 に示す鋼床版モデル試験体を取り扱うものとする。舗装構造には Fig.5 の C2 タイプ(グースアスファルトと密粒度アスファルトの間に断面積 39.2mm^2 、ピッチ 50mm のFRP格子筋を挿入するもの)を用いるものとする。

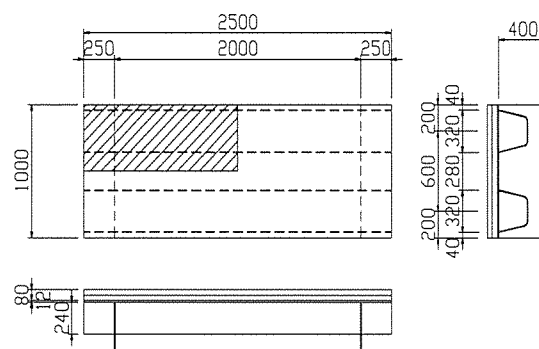


Fig.15 Partial model specimens for steel plate deck

Table 1 Mechanical properties used for finite element analyses

		Elastic modulus	*)
FRP grid		100,000 MPa	0.30
Dense grade asphalt	20℃	320	0.35
	40℃	13	0.35
Mastic asphalt	20℃	2,067	0.35
	40℃	127	0.35
Deck plate, SM400A, t=12mm		205,800	0.30

*) : Poisson's ratio

解析に使用した材料定数は、Table 1 の通りである。構造物レベルの試験体 (Fig.15 参照) について、有限要素法 (FEM) による応力解析する前に Fig.6 のモデルを対象として、FEM解析を行い、解析仮定、解析条件及び材料定数の妥当性を検証した。その結果、以上の妥当性を検証するとともに、Fig.3, Fig.4, Fig.7, Fig.10, Fig.11 の荷重-変位曲線と良好に一致することを確認したが、詳細については、省略する。したがって、Fig.15 の構造物レベルの試験体について、応力解析を実施しても差し支えない。

なお、有限要素法に基づく応力解析（線形弾性問題）には、汎用有限要素解析ソフトウェア MSC・MARC を使用した。

つぎに、Fig.15 の構造試験体について、応力解析を行うために使用したメッシュ図を Fig.16 に示す。

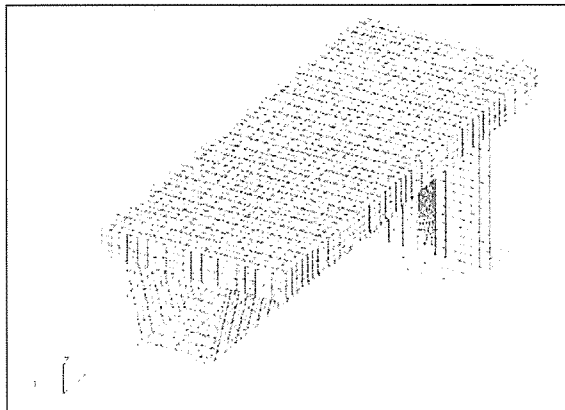


Fig.16 Mesh for partial model specimens

ここで、節点数 16,470、要素数 16,065 であり、要素の最小メッシュは $6 \times 6 \times 6 \text{ mm}$ である。デッキプレート、縦リブ及び横リブはシェル要素を、FRP 格子筋は梁要素を、アスファルト舗装部はソリッド要素を用いた。

解析は、対称性を考慮して、Fig.15 の試験体の $1/4$ を切り出し、横リブ下フランジの並進変位と回転を拘束して実施した。荷重の載荷幅は $200 \times 200 \text{ mm}$ とし、道路橋示方書に準拠して全載荷荷重 100 kN を用いた。また、載荷形式としてシングルタイヤ及びダブルタイヤに相当する方式を用いた。ダブルタイヤの事例を Fig.17 に示す。

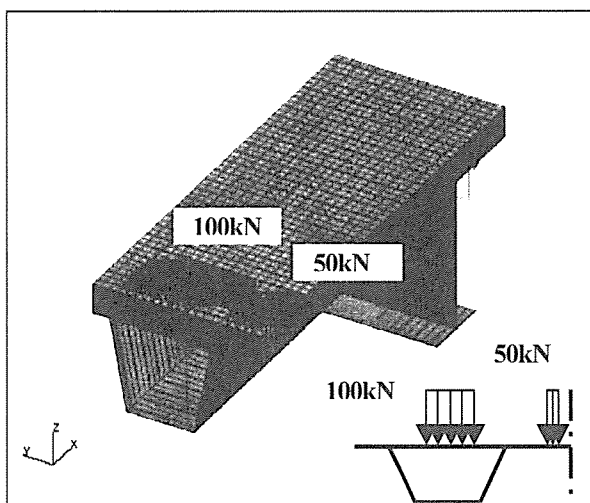


Fig.17 Loading conditions at double tire

7.2 解析結果

部材モデル試験体と同様に、 20°C と 40°C における解析結果、補強の有無（FRP 格子筋を使用した事例と無補強の事例）、シングルタイヤとダブルタイヤの事例、併せて 8 ケースについて解析を行った。一例として、載荷形式としてダブルタイヤ方式を用い、 20°C における無補強の場合

と FRP 格子筋による補強を実施した事例の解析結果をそれぞれ Fig.18, Fig.19 に示す。

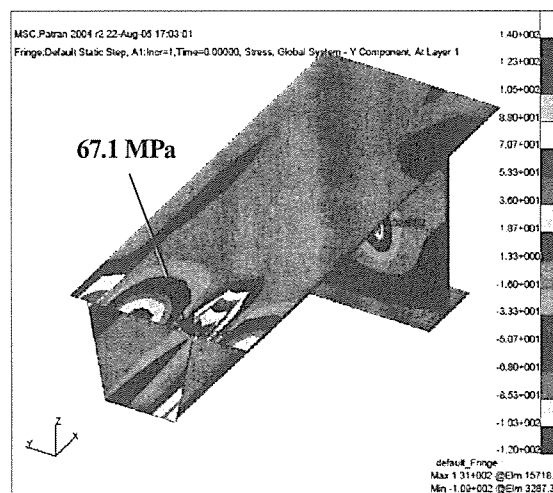


Fig.18 Numerical results without reinforcement

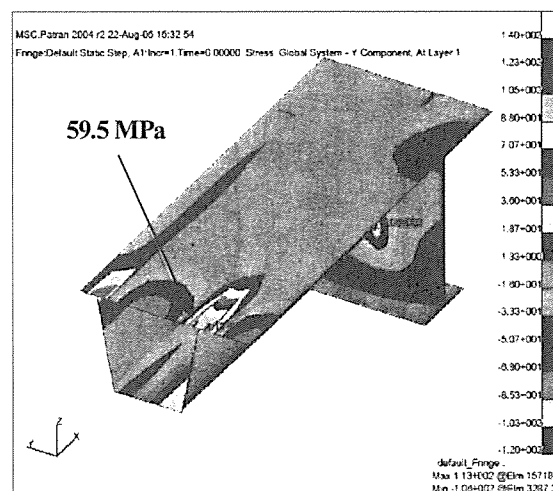


Fig.19 Numerical results with reinforcement

Table 2 Numerical results obtained by FE Analyses

Loading condition	Temperature	Without reinforcement	With reinforcement
Single tire	20°C	31.4 MPa	27.9 MPa (0.82)
	40°C	62.2 MPa	53.9 MPa (0.87)
Double tire	20°C	67.1 MPa	59.5 MPa (0.89)
	40°C	129.3 MPa	—

FEM による応力解析の結果を纏めたものが Table 2 である。デッキプレートと縦リブの溶接部に発生した最大応力（溶接線に直交する方向；発生位置を Fig.18, Fig.19 に矢印で表示）を示している。() 内の数値は、無補強の応力を基準にして、除した値を示す。FRP 格子筋による応力低減効果は、 $11\% \sim 18\%$ 程度であり、部材レベルの応力低減効果（最低でも 23% ）よりも、低下しているが、構造物レベルでも、補強効果を有し、疲労寿命を $1.37 \sim 1.81$ 倍

とし、延命化を計ることができる。したがって、本舗装構造を既設の補強構造として、あるいは、新設構造の予防保全の観点から実施する補強工法として、採用することは有意義であると考えられる。

なお、部材モデルと比較して、構造物モデルで、応力低減効果が減少する理由は、主に、デッキプレートと縦リブの交差部の構造を部材モデルでは、反映していないためと考えられる。即ち、この部位の形状に起因する応力集中の影響を構造物モデルでは受けるためであり、構造的応力集中が応力低減効果に及ぼす影響を明らかにする必要があるが、今後の課題としたい。

以上、本章では、有限要素法による応力解析の結果を通して、構造物試験体の疲労試験を実施することなく、応力低減効果、引いては、疲労耐久性の向上に関する検討を行い、部材モデルよりも効果は小さくなるが、疲労寿命を増加させ、延命化を計れることが明らかとなった。

8. まとめ

本研究では、1)FRP格子筋を舗装部に挿入した鋼床版舗装の改良構造を提案した。また、2)既存のFRP格子筋を活用し、断面形状や挿入位置等をパラメータとして、補強効果が最も高い、鋼床版舗装の基本構造を決定した。つぎに、3)補強効果の温度依存性を調べ、温度の上昇に伴い補強効果は低下するものの、無補強の場合と比較して、40℃でも23%の応力低減効果を発揮し、十分な補強効果を有することを明らかにした。また、4)載荷速度の影響を調べ、20℃では、載荷速度の上昇に伴い、補強効果は若干増大するものの、本研究の範囲内では、大きな影響は受けないことを検証した。さらに、5)実構造に近い構造物レベルの試験体について、有限要素解析を実施し、任意の輪荷重位置に対する補強効果を確認し、構造物レベルでも、部材レベルと同様に十分な補強効果を有することを確認・検

証した。

以上より、本構造は、鋼床版舗装の優れた構造の一つとして、あるいは、予防保全の観点から実施する補強方法の選択肢の一つとして、今後の展開が期待できるものと考えられる。なお、有限要素解析で実施した構造物レベルの試験体について、今後、曲げ載荷実験及び疲労試験を実施する予定であり、上記の5)の解析結果の妥当性を改めて検証したい。

参考文献

- 1)吉川ほか：Uリブを用いた鋼床版の疲労損傷事例，土木学会第 57 回年次学術講演会概要集，1-277，pp.553-554，2002
- 2)日本道路協会：鋼橋の疲労，pp.66-68，1997
- 3)児玉ほか：鋼床版上 SFRC 舗装の疲労に関する一検討，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，1-503，pp.1003-1004，2005
- 4)三浦ほか：FRP 格子筋を用いた鋼床版舗装の新しい補強構造とその補強効果，平成 17 年度土木学会関西支部年次学術講演会，pp.991-992，2005
- 5) 林ほか：FRP 格子筋を用いた新しい鋼床版舗装構造の検討，材料学会第 54 期学術講演会，No.232，pp.297-298，2005
- 6) 三浦ほか：FRP 格子筋を用いた新しい鋼床版舗装構造の補強効果に及ぼす温度の影響，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，1-497，pp.991-992，2005
- 7) 三浦ほか：FRP 格子筋を用いた新しい鋼床版舗装構造の補強効果に及ぼす載荷速度の影響，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，1-498，pp.993-994，2005
- 8) 村山ほか：FRP 格子筋を用いたアスファルト混合物層による鋼床版の補強効果，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，5-152，pp.303-304，2005
- 9)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，pp.9-27，2002