

論文

サンドイッチ構造を有する GFRP 床版のせん断耐力 の確保に関する基礎的検討

浅沼峻*, 大西弘志**, 古川陽大***

*岩手大学大学院, 総合科学研究科地域創生専攻 (〒020-0066 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5)

** 博士 (工), 岩手大学教授, 理工学部システム創成工学科 (〒020-0066 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5)

***岩手大学, 理工学部システム創成工学科 (〒020-0066 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5)

FRP 材料を用いた床版のひとつに, 発泡系材料などをコア材としたサンドイッチ構造を有する GFRP 床版がある. サンドイッチ構造の床版においては, 非常に薄い GFRP に輪荷重が局所的に作用する. そのため, 上面の GFRP 板において, 局所的なせん断応力が発生し, せん断破壊に至ることが懸念される. そこで, 本論文では, GFRP 上面にせん断耐力を確保できるような剛性を持つ舗装を設置し, その補強効果について解析的検討を行った.

キーワード: GFRP 床版, サンドイッチ構造, せん断応力

1. はじめに

近年, 我が国において, 橋梁をはじめとする社会基盤構造物の老朽化に伴い, その維持管理が大きな課題となっている. 特に, 補修や補強, 架け替えなどの要因となるものとして, 鋼材腐食による損傷が多く確認されている. 例えば, 平成 26 年度から平成 28 年度に実施された道路橋定期点検においては, 健全性診断区分が IV と診断された橋梁のうち, 鋼上部構造だけで見ると 81%が鋼材腐食による損傷となっており, 全体のほとんどを占めている¹⁾. また, 上部構造の損傷による架け替え理由においても, 鋼材の腐食が 60.8% (平成 28 年度調査) を占めている²⁾. このような事態に対して, 損傷部材の補修や補強などが迅速に行われているが, 従来の材料を使用する限り再度修復が必要となる場合がある.

そこで, 構造物の維持管理における負担を削減するべく, 耐食性に優れた FRP が着目されている. FRP は強度や耐久性, 軽量性にも優れた材料であり, 自動車や船舶, 航空・宇宙分野への利用も期待され, 開発が進んでいる. 一方で, 我が国の社会基盤構造物, 特に, 橋梁においては, 歩道橋への適用事例がいくつかある程度であり, 道路橋にいたっては, ほとんど事例がないのが現状である. それは, 材料費などの初期費用の高さが原因となっている. しかし, 先ほど述べたように, 橋梁部材に FRP を導入することで, 維持管理における費用は抑えられるため, 初期費用だけでなく, 維持管理費も含めた LCC 全体で評価されれば, 結果的に経済的になることが期待される.

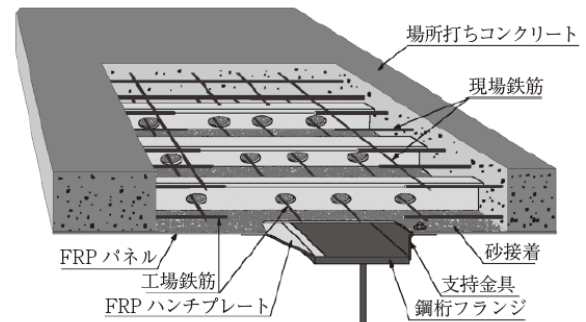


図-1 FRP 合成床版³⁾

また, FRP の橋梁への適用事例が少ないことから, FRP 橋梁の設計において, 明確ではない部分も多く, 今後も実験や解析などによるさらなる検討が必要とされている.

2. FRP の床版への適用

FRP の橋梁への適用例として, FRP の軽量性を活かして, 床版への適用が挙げられる. FRP を用いた床版にはいくつか形式があり, 道路橋床版として, 国内において施工事例があるのは, 図-1 に示すような FRP 合成床版である. FRP 合成床版は FRP をコンクリートと一体化させ, 鉄筋コンクリートと FRP の合成断面として荷重に抵抗する合成床版である³⁾. また, このように FRP をコンクリートや鋼材と合成して使用する形式の他に, FRP のみで荷重に抵抗させる床版形式も研究事例としてある.

例えば、グレーチングのようなFRPの格子構造の上下面にFRPの平板を接着させることで一体化させた床版^{4),5)}やFRPの円筒材や角管材といった簡易的な中間材をFRPの平板材によって挟んだ接着接合による床版形式⁹⁾などがある。このような床版では引抜成形によって製造されたFRP材料を用いることが多い。

一方、本研究において、検討を行うFRP床版はこれらのうち前者のように複合構造を持つ、サンドイッチ構造GFRP床版である。サンドイッチ構造GFRP床版とは、発泡系材料や木材などをコア材として、その上下面をGFRPの板材で挟み込んだものである。図-2にサンドイッチ構造GFRP床版のイメージを示す。白色の部分がコア材となる部分であり、それを灰色の部分のGFRPによって挟み込んでいる。この床版は、コア材として、発泡系材料や木材のように軽量なものを使用することで床版全体の軽量化を図り、弾性係数の小さいコア材と弾性係数の大きいGFRP板とで分担して、荷重に抵抗するようにしている。そのため、コア材の弾性係数が小さい分、上下面の板材間の距離を大きくし、断面を大きくすることによって、曲げ荷重に対して抵抗することが可能である⁷⁾。しかし、道路橋床版においては、輪荷重の押し抜きせん断作用による破壊が最も懸念される破壊モードであり、このような荷重に対しては、非常に薄いGFRP板によって抵抗することが求められるため、押し抜きせん断荷重に対する抵抗について、検討を行う必要がある。

GFRP板の押し抜きせん断について言及している既往の研究について、次章に示す。

3. サンドイッチ構造GFRP床版に生じるせん断破壊

既往の研究^{8),9)}において、サンドイッチ構造GFRP床版を対象に定点載荷疲労試験、輪荷重走行試験が行われている。

文献8)においては、GFRP板で構成した箱断面中に発泡材料(発泡ウレタン)を充填した床材に対して、定点載荷疲労試験が行われた。この試験においては、床材下面からの十分な支持が期待できる環境での利用を想定していたため、試験体の底面にゴム板を敷いて、試験体底面の全面が一様に支持された。

また、文献8)において、定点載荷疲労試験で用いられた試験体と同様の形式を持つ床材(寸法は異なる)に対して、輪荷重走行試験が行われた。また、このとき、補剛用の板材を床材内部に設置した補剛リブありの試験体についても、補剛リブなしの試験体と比較して疲労耐久性の検討が行われている。

一方で、文献8)にて行われた輪荷重走行試験の結果から補剛リブの有無によって、床材の疲労耐久性が異なることが分かったため、文献9)では、補剛リブの疲労耐久性に及ぼす影響範囲を調査するため、補剛リブに対して偏心載荷をした場合の疲労耐久性について検討が行わ

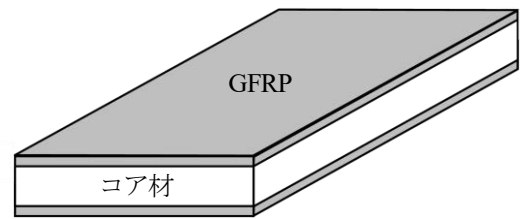


図-2 サンドイッチ構造GFRP床版のイメージ

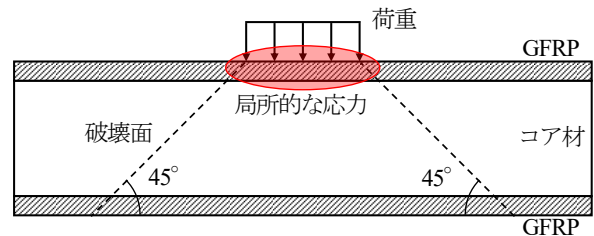


図-3 サンドイッチ構造GFRP床版の押し抜きせん断破壊

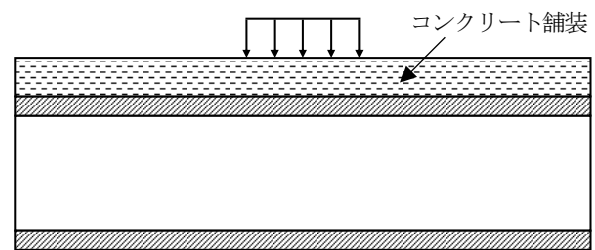


図-4 コンクリート舗装の設置

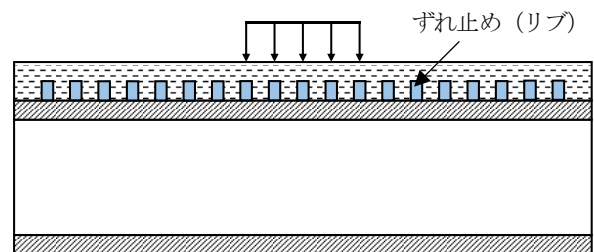


図-5 ずれ止め(リブ)の設置

れている。

これらの疲労試験からは、試験体が上面GFRP板の押し抜きせん断破壊によって終局するということが分かっている^{8),9)}。図-3にサンドイッチ構造GFRP床版の押し抜きせん断による破壊の模式図を示す。一般に押し抜きせん断による破壊は、載荷範囲の外周から板厚方向へ45°の角度で破壊面が生じるとされている。文献8)の定点載荷疲労試験や輪荷重走行試験においても載荷範囲に沿う上面GFRP板の陥没破壊が見られた。そのため、サンドイッチ構造GFRP床版のような非常に薄いGFRP板を有する床版形式においては、輪荷重のように非常に大きな荷重が局所的に作用する場合、押し抜きせん断破壊に対する耐久性を検討する必要がある。

本研究では、サンドイッチ構造GFRP床版の上面に生じる局所的なせん断応力の発生を抑制するために、床版

上面にコンクリート舗装を設置し、それによってせん断耐力を確保することを考えた。なお、図-4 にサンドイッチ構造 GFRP 床版にコンクリート舗装を設置した場合のイメージを示す。

一方で、床版上面の GFRP に舗装を設置する際、GFRP の上面に単に載せるだけでは、荷重によって舗装面がずれる可能性がある。舗装面がずれると、舗装から床版へ荷重を適切に伝達できず、せん断耐力の確保としての効果が発揮できないことが考えられる。そのため、舗装と床版を一体化させることは必要である。そこで、上面の GFRP 板表面にずれ止めとしてのリップを設置することを考えた。なお、ずれ止めを設置した場合の床版のイメージを図-5 に示す。

4. 補剛リップによるせん断応力の発生

サンドイッチ構造 GFRP 床版のせん断耐力の確保における方策として、主に2つが挙げられる。一つは、床版上面にせん断耐力を確保できるような一定の剛性を持つ舗装を設置する方法であり、もう一つは、上面 GFRP 板の下側に補剛リップを設ける方法である。前者は、本研究において検討が行われている方法であるが、後者は、既往の研究^{7),8),9)}において検討が行われている。

4.1 輪荷重走行試験

文献8)及び文献9)においては、3章でも述べたように、補剛リップを床材内部に設置した試験体について、輪荷重走行試験が行われた。補剛リップありの試験体においては、試験体中央の補剛リップの際に沿って、GFRP 板が陥没し、GFRP のせん断破壊が生じた。補剛リップ付近でのせん断破壊の発生状況のイメージを図-6 に示す。図のように床版中央に補剛リップが配置される場合、荷重範囲に対して、補剛リップの縁、すなわち赤色のあたりでせん断破壊が生じる。そのため、補剛リップの存在は上面 GFRP 板の破壊に影響を与えていることが考えられる。

4.2 補剛リップを有する床版の FEM 解析

文献7)においては、補剛リップを設置したサンドイッチ構造 GFRP 床版について、有限要素モデルによる解析が行われている。そのモデルについて、図-7 に示す。このモデルにおいては、上面 GFRP 板の下側、すなわち、コア材内部に補剛リップを格子状に配置している。このモデルでの解析結果から、補剛リップありのモデルでは、補剛リップなしのモデルに比べて、荷重点付近でのせん断応力の増加が見られた⁷⁾。そのため、解析によっても、補剛リップの有無による影響に関して、同様の傾向が示唆されている。

また、文献7)、文献8)及び文献9)のように、ウレタンのようなコア材内部に補剛リップを設置するには、ウレタンを床版内部に充填させる際、補剛リップの形状に合わ

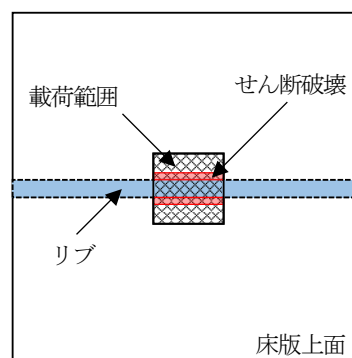


図-6 サンドイッチ構造 GFRP 床版の補剛リップ付近でのせん断破壊

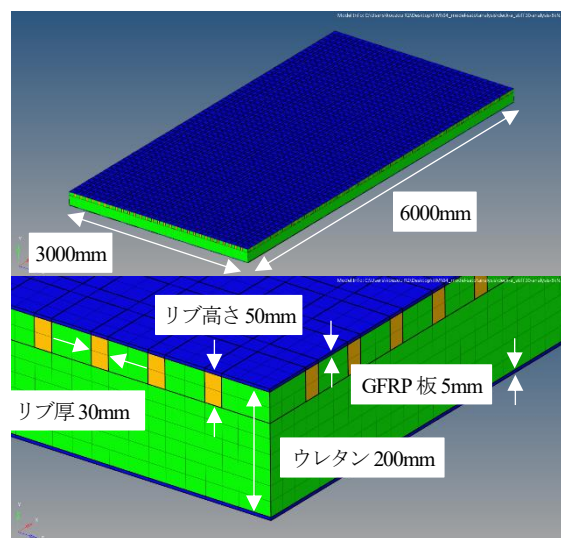


図-7 補剛リップを有するサンドイッチ構造 GFRP 床版のモデル⁷⁾

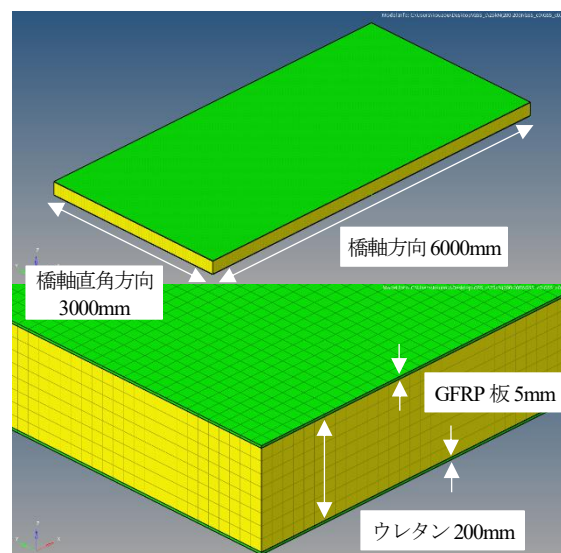


図-8 サンドイッチ構造 GFRP 床版の基本モデル

せてウレタンを切り出すなど、床版の製作における困難が伴う。

したがって、本研究においては、コア材内部の補剛リップによってせん断耐力の向上を図る方策ではなく、床版

表-1 舗装厚さごとのリブの寸法 (単位: mm)

舗装厚さ	リブ厚	リブ高さ	リブ間隔
20	10	10	100
30		15	
40		20	
50		25	
60		30	

(※リブ間隔はリブ同士の中心間距離)

表-2 解析に用いた物性値

材料	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
GFRP	13800	0.26
硬質ウレタンフォーム	10.3	0.0
コンクリート	23000	0.2
鋼材	210000	0.3

上面の舗装面によってせん断耐力を確保することを目標とした。

5. FEM 解析

5.1 解析概要

せん断耐力の確保に関して、サンドイッチ構造 GFRP 床版のコンクリート舗装による効果を確認するために、舗装厚さをパラメータとして、有限要素法による線形解析を行った。解析モデルの作成には Altair Engineering 製の HyperMesh を使用し、解析ソルバーには同社製の Optistruct を使用した。また、本研究の解析において基本となるモデルを図-8 に示す。なお、基本モデルにおけるメッシュサイズは、基礎メッシュ長を 25mm とし、GFRP 板の板厚方向のみ 5mm とした。基本モデルにおける要素数は 288000 である。また、床版のコア材は硬質ウレタンフォームとして、解析モデルはソリッド要素によって構成した。また、支持条件は 4 辺単純支持とし、荷重は既往の研究⁷⁾を参考にして、床版中央 200mm×200mm の範囲に 25kN を載荷した。図-9 に床版における載荷位置を示す。また、舗装厚さは 0mm 及び 20mm から 60mm まで 10mm ごとに検討を行った。なお、例として、舗装厚さ 40mm のモデルを図-10 (a) に示す。

また、舗装内のリブの有無によるせん断応力の発生についても検討を行った。リブの材料は GFRP あるいは、鋼材によって構成した。また、リブの高さは舗装厚さの 1/2 までとし、リブの厚さは 10mm とした。また、リブの間隔はリブ同士の中心間距離でとり、100mm とした。なお、例として、図-10 (b) に舗装厚さ 40mm の床版において、リブを設置したモデルを示す。なお、リブと GFRP 板あるいはリブとコンクリートの境界条件は、剛結とし

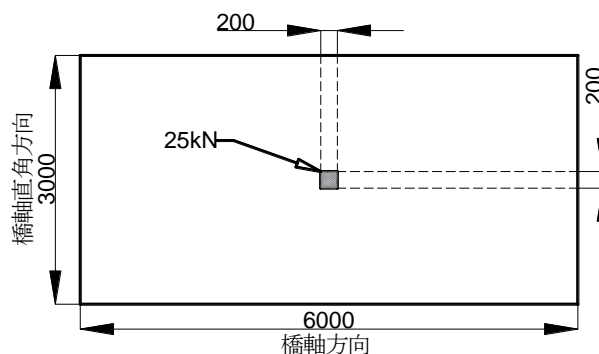
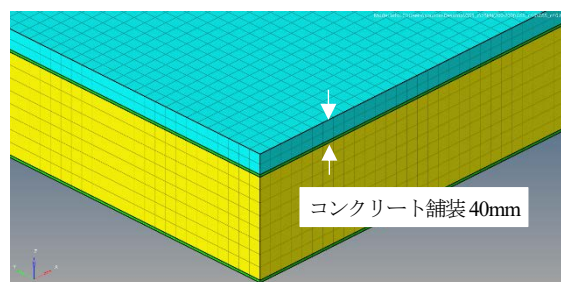
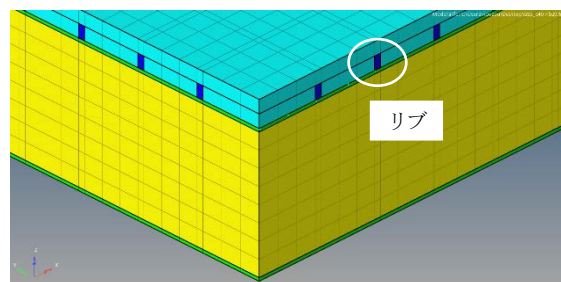


図-9 載荷位置



(a) リブなし



(b) リブあり

図-10 舗装厚さ 40mm のモデル

ている。また、舗装厚さごとのリブの寸法について、表-1 に示す。

また、本研究においては、コンクリート舗装による効果について、たわみが制限値以内となるか、せん断応力が舗装前と比べてどの程度低減されているかという観点で評価を行った。なお、たわみの制限値は、「FRP 歩道橋設計・施工指針 (案)」¹⁰⁾を参考にして、L/400 (7.5mm) あるいは、L/600 (5.0mm) (L: スパン) とした。また、解析に用いた物性値を表-2 に示す。

5.2 解析結果

解析から得られた床版のたわみの最大値と舗装厚さの関係、橋軸方向中心線におけるたわみ分布 (リブなし) をそれぞれ図-11 及び図-12 に示す。図-11 及び図-12 より、舗装を設置することでたわみは低減された。また、図-11 より、たわみと舗装厚さの関係については、リブなしとリブありでほとんど同様のグラフとなった。また、リブの有無に関わらず、おおよそ舗装厚さ 30mm

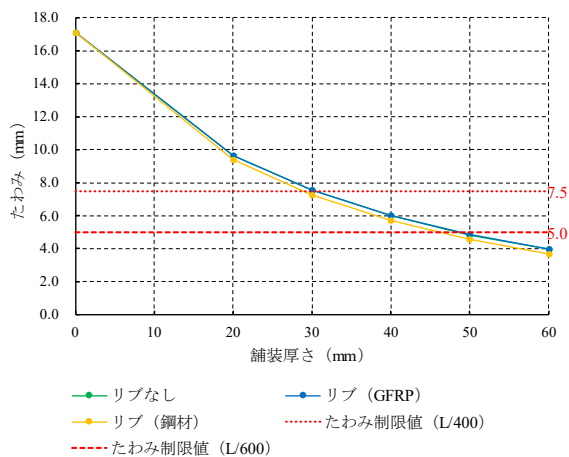


図-11 たわみの最大値と舗装厚さの関係

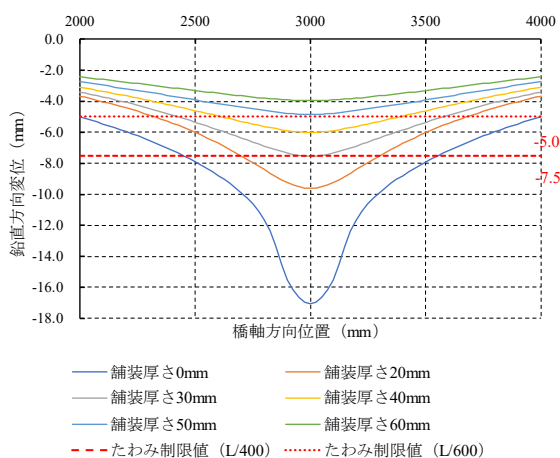


図-12 橋軸方向中心線におけるたわみ分布 (リブなし)

以上でL/400 (7.5mm) 以内を満たし、舗装厚さ 50mm 以上でL/600 (5.0mm) 以内を満たすことができた。しかし、本研究においては、荷重について、一般に床版設計において用いられる T 荷重 100kN (200mm×500mm) ではなく、25kN (200mm×200mm) としているため、実際にはさらに舗装厚さが必要となることが考えられる。また、たわみは舗装厚さ 30~50mm でも制限値に対して余裕があまりない。これは、硬質ウレタンフォームのような発砲系材料のコア材では、床版全体として、剛性不足となっていることが考えられる。そのため、今後は、発砲系材料と同様に軽量であり、発砲系材料よりも弾性係数の大きい木材をコア材としたサンドイッチ構造 GFRP 床版の検討も必要である。

一方、上面 GFRP 板のせん断応力の最大値と舗装厚さの関係、舗装厚さ 0mm に対するせん断応力の比をそれぞれ図-13 及び表-3 に示す。ただし、せん断応力の比は舗装厚さ 0mm の場合を 1.00 とする。図-13 より、せん断応力も舗装を設置することで低減された。特に、舗

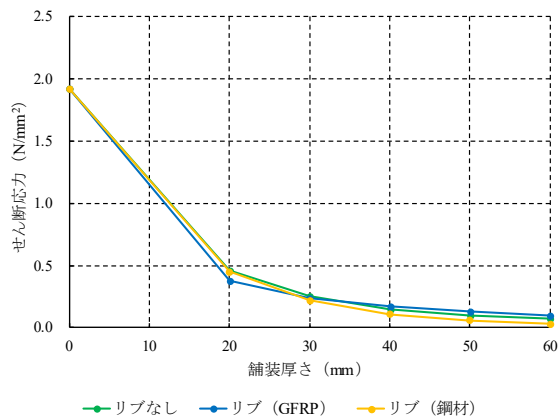


図-13 せん断応力の最大値と舗装厚さの関係

表-3 舗装厚さ 0mm に対するせん断応力の比

舗装厚さ (mm)	リブなし	GFRP リブ	鋼材リブ
0	1.00	1.00	1.00
20	0.24	0.20	0.23
30	0.13	0.13	0.11
40	0.08	0.09	0.06
50	0.05	0.07	0.03
60	0.04	0.05	0.02

装を設置することでせん断応力が 0.5N/mm² 以下と非常に小さくなっている。また、表-3 より、舗装厚さ 20mm でも低減率が 76%~80%と非常に高くなっている。また、図-13 より、せん断応力と舗装厚さの関係については、たわみの場合と同様に、リブの有無にかかわらず、同様の減少傾向となっている。これは、文献8) や文献9) において、リブに沿ったせん断破壊が見られたことや文献7) において、リブの存在によってせん断応力が増加したこととは異なる結果となっている。この要因としては、今回の解析においては、リブの寸法が床版に対して小さいために床版の剛性にあまり寄与していないことが考えられる。今回は薄い舗装の内部にリブを設置したことや舗装厚さに合わせてリブ高さのみの変更を行ったため、リブの寸法が小さくなってしまった。そのため、リブによってせん断応力の低減を期待するにはリブ厚やリブ間隔の改善が必要である。

また、解析結果から、今回検討を行った床版における最適な舗装厚さを決定する。ただし、せん断応力の発生は非常に小さかったことから、最適な舗装厚さはたわみによって決定することとする。したがって、図-11 より、たわみ制限値 L/400 (7.5mm) あるいは L/600 (5.0mm) 以下となっている舗装厚さ 40mm と舗装厚さ 50mm が最適な舗装厚さとなる。

6. まとめ

本研究で行った FEM 解析により、以下のことが確認できた。

- (1) たわみはリブの有無に関わらず、50mm 以上の舗装により、L/600 を満たし、40mm 以上の舗装により、L/400 を満たすことができる。
- (2) 発砲系材料をコア材としたサンドイッチ構造 GFRP 床版は、道路橋床版への適用を考えた場合、床版全体として剛性不足となる可能性がある。
- (3) せん断応力もリブの有無にかかわらず、同様の減少傾向を示し、舗装によって 76%以上と十分に低減される。
- (4) 舗装の内部に設置されるリブは、舗装厚さによって寸法が制限されるため、床版の剛性への寄与があまり期待できない。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，日本橋梁建設協会，プレストレスト・コンクリート建設業協会，建設コンサルタンツ協会，国立研究開発法人 土木研究所：国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書，第 1121 号，道路橋の耐久性の信頼性向上に関する研究，pp.8，2020.7.
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料，第 1112 号，橋梁の架替に関する調査結果 (V)，I-23，2020.6.
- 3) 久保圭吾：FRP 合成床版，コンクリート工学，pp.108-

114，2014.

- 4) 大西弘志，山本竜一，西田雅之：格子構造を有する FRP 床版の静的載荷試験，第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演論文集，pp.178-185，2014.
- 5) 大西弘志，西田雅之，清水則善，八重樫功隠：格子構造を有する FRP 床版の静的曲げ載荷試験，第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.62-1-62-6，2013.
- 6) 栗田真輝，高橋浩介，大西弘志：接着接合により構成された GFRP 床材の曲げ強度，第 12 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.43-1-43-6，2017.
- 7) 佐藤 淳哉，大西 弘志，菅原 智大，浅沼 峻：サンドイッチ構造を有する FRP 版構造部材の補強に関する検討，第 14 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.22-1-22-7，2021.
- 8) 大西弘志，西田雅之：発泡材料を活用した床版の力学挙動に関する基礎的研究，第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.181-186，2012.
- 9) 大西弘志，西田雅之：ウレタン発泡体を用いた床材の疲労耐久性における荷重通行位置の影響，第 4 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集，pp.67-72，2012.
- 10) 社団法人 土木学会 複合構造委員会 FRP 歩道橋設計ガイドライン小委員会 委員長 中村俊一：複合構造シリーズ 04，FRP 歩道橋設計・施工指針 (案)，pp.99-104，2011.

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)