サンドイッチ構造FRP床版の道路橋への適用に関する基礎的検討

浅沼　崚[1]・大西　弘志[2]・古川　陽大[3]

[1]学生会員　岩手大学大学院　総合科学研究科　地域創生専攻（〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5）
E-mail: g0122003@iwate-u.ac.jp

[2]正会員　岩手大学教授　理工学部　システム創成工学科（〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5）
E-mail: onishi@iwate-u.ac.jp

[3]岩手大学　理工学部　システム創成工学科（〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5）
E-mail: s0819056@iwate-u.ac.jp

我が国では多くの社会基盤構造物において鋼材の腐食やコンクリートの塩害などによる劣化損傷が発生している．そこで，鋼材やコンクリートに替わる新材料として，耐食性に優れる FRP が注目されている．

FRP を用いた床版形式の一つに，軽量な木材や発泡系材料等を芯材とし，その上下を FRP 板材で挟み込んだサンドイッチ構造を有する床版（以下，サンドイッチ構造 FRP 床版）がある．サンドイッチ構造 FRP 床版を道路橋へ適用する場合，外力として非常に大きな部分等分布荷重である輪荷重が局所的に作用し，床版上面の FRP 板にせん断破壊が発生する可能性を考慮しなければならない．床版上面の局所的なせん断破壊を抑止するために著者らは床版上面にコンクリート舗装を設置し，輪荷重の作用に伴うせん断応力を低減することを考えた．本研究では，床版全体の曲げ耐力の向上を目的とした床版下面の FRP 板材の材料変更についても FEM 解析により検討を行った．

Key Words: *FRP Decks, Sandwich Structure, Shearing Stress*

1.　はじめに

我が国の橋梁をはじめとする社会基盤分野では，多くの構造物で老朽化による劣化損傷が生じている．それらを補修・補強することで構造物の長寿命化が図られているが，ときには補修・補強だけでなく，橋梁の更新・架替が必要になる場合もある．また，橋梁における損傷箇所には様々なものがあるが，特に，道路橋においては床版部材が劣化損傷を最も受けやすい部材のひとつである．その要因の多くは，車両の荷重が直接的に繰り返し作用することによる疲労損傷や凍結防止剤などの塩分によるコンクリート床版の損傷，鋼床版をはじめとする鋼材の腐食などである[1)]．

そこで，このような床版の劣化損傷に対する方策として，高耐食性をもつ繊維強化プラスチック FRP のような新材料による代替が注目されている．FRP の優れた耐食性を活かすことで，コンクリート床版の塩分による損傷や鋼材の腐食などを防ぐことが可能であり，補修・補強や更新・架替の必要性が削減できる．また，FRP は軽量性にも優れている．そのため，既設橋梁における床版の更新が必要となった場合でも，床版を支持している桁や下部工への負荷の低減も期待でき，橋梁の耐久性に余裕を持たせることが可能である．

一方，我が国における FRP の橋梁への適用事例はあまり多くはない．FRP を主要材料とした FRP 橋梁は，伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋など歩道橋に関しては，いくつか事例があるが，道路橋においては事例がほとんどなく，検討が不十分である．そのため，FRP の橋梁への適用に向けて，強度や耐久性に関する検討は必要である．

2.　サンドイッチ構造 FRP 床版

FRP を用いた床版形式の一つに，軽量な木材や発泡系材料等を芯材とし，その上下を FRP 板材で挟み込んだサンドイッチ構造を有する床版がある．サンドイッチ構造 FRP 床版のイメージを図-1 に示す．サンドイッチ構造 FRP 床版は上下面の弾性係数の大きい板材と軽量な芯材によって構成された軽量化床版である．実用例としては，

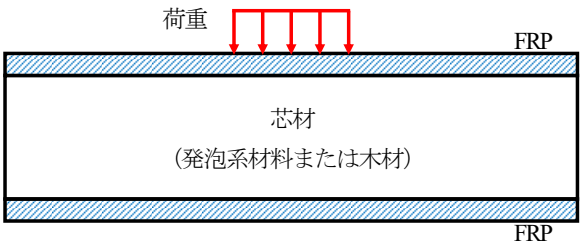

図-1　サンドイッチ構造 FRP 床版の断面

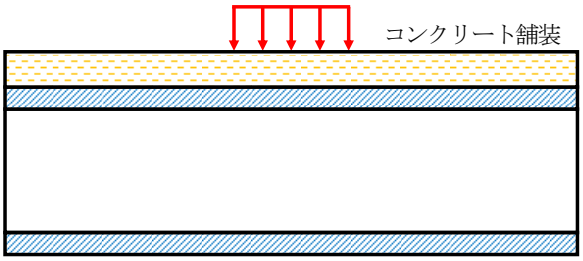

図-2　コンクリート舗装を設置した
サンドイッチ構造 FRP 床版

軽量であることから，歩道橋床版としての利用や既設橋梁における歩道拡幅部への利用などが挙げられる [2]．このような構造を有する床版では，上下面の板材と芯材とで作用荷重に対して分担して抵抗し，板材間の芯材の厚さを確保することで，曲げに対して抵抗が可能となる [3]．しかし，道路橋床版として利用する場合には，輪荷重のような非常に大きな荷重が局所的に繰り返し作用する．そのため，そのような荷重がサンドイッチ構造 FRP 床版の非常に薄い上面の板材に直接作用することから，輪荷重による押し抜きせん断破壊の発生が懸念される．また，一般的に道路橋床版において，押し抜きせん断は最も影響の大きい負荷とされているため，押し抜きせん断に対する耐久性の検討は必要である．

そこで，著者らはサンドイッチ構造 FRP 床版の上面にコンクリート舗装を設置することで，輪荷重による押し抜きせん断作用に対する耐力を確保することを考えた．コンクリート舗装を設置したサンドイッチ構造 FRP 床版のイメージを**図-2** に示す．次章ではサンドイッチ構造 FRP 床版の押し抜きせん断に関連する実験的検討を行った事例 [4]とコンクリート舗装による効果を解析によって確認した事例 [5]を示す．

3.　サンドイッチ構造 FRP 床版における せん断破壊

(1)　定点載荷疲労試験と輪荷重走行試験

文献 4)では，FRP と発泡系材料を組み合わせた床材を対象に疲労耐久性の検討が行われている．この床材は底面が一様に支持された環境下での使用が想定されていたため，支持条件は床材底面の一様な支持として，実験が行われている [4]．まず，定点載荷疲労試験は厚さ 80mm ほどの床材に対して行われた．また，床材の断面は厚さ 3mm の FRP 板による中空断面内に発泡材料が充填された構造である．この床材の上面中央 50mm×50mm の範囲に繰り返し荷重を載荷したところ，この構造を有する床材は最終的に上面 FRP 板のせん断破壊による終局を迎えることが分かっている [4]．

一方，同様の構造を有する床材に対して輪荷重走行試験が行われた．床材の断面は定点載荷疲労試験で用いられた床材と同様となっている．この試験でも上面 FRP 板のせん断破壊が確認されており，輪荷重の走行範囲における上面 FRP 板の陥没が生じ，床材は終局を迎えている [4]．

これらの実験結果から，本論文で検討を行う，軽量な芯材を FRP の板材によって上下面を挟み込んだサンドイッチ構造 FRP 床版においても同様の破壊形式が懸念される．

(2)　コンクリート舗装によるせん断耐力の確保

文献 5)ではサンドイッチ構造 FRP 床版の上面にコンクリート舗装を設置し，せん断耐力がどの程度確保できるのか確認するために FEM 解析が行われている．文献 5)で検討を行ったサンドイッチ構造 FRP 床版は上下面を両方ともに GFRP 板材としている．床版の寸法は橋軸方向 6000mm×橋軸直角方向 3000mm×厚さ 210mm となっており，床版断面は厚さ 200mm の芯材（硬質ウレタンフォーム）を厚さ 5mm の GFRP 板材で挟み込んだ構造となっている．また，コンクリート舗装は 0mm 及び 20～60mm まで 10mm ごとに厚さを変更し，解析を行っている．支持条件は 4 辺単純支持であり，荷重は床版中央の 200mm×200mm の範囲に分布荷重 25kN を作用させた．なお，解析で用いた各材料の物性値は本論文（5 章）のものと同様である．

文献 5)で得られた床版全体のたわみの最大値と舗装厚さの関係及び上面 GFRP 板に発生するせん断応力の最大値と舗装厚さの関係を**図-3** 及び**図-4** に示す．**図-3** よりコンクリート舗装を設置することでたわみは減少した．また，たわみ制限値として「FRP 歩道橋設計・施工指針（案）」[6]を参考に L/400：7.5mm や L/600：5.0mm（L：スパン=3000mm）を設定したが，舗装厚さ 40mm で L/400 を満たし，舗装厚さ 50mm で L/600 を満たすことができている．一方，**図-4** よりせん断応力も舗装によって十分に低減されており，舗装厚さ 0mm で 2.0N/mm^2 ほどだったせん断応力が，舗装厚さ 20mm 以降では 0.5N/mm^2 以下となっている．

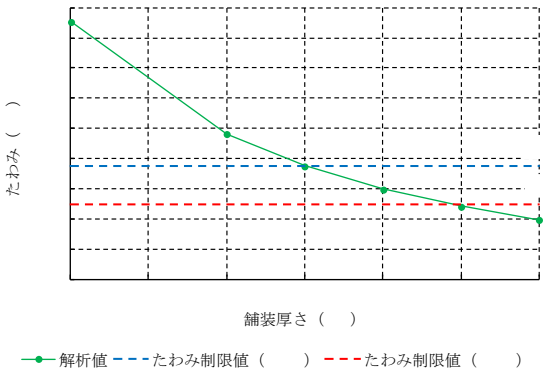

図-3　たわみと舗装厚さの関係[5)]

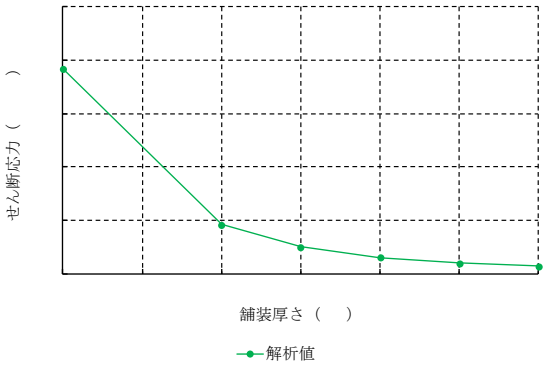

図-4　上面 GFRP 板のせん断応力と舗装厚さの関係[5)]

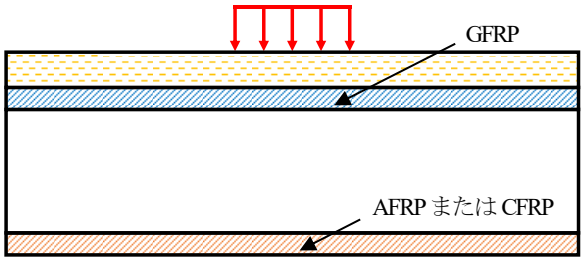

図-5　下面板材を置き換えたサンドイッチ構造 FRP 床版

4.　サンドイッチ構造 FRP 床版の下面板材の強化

文献 5)においてサンドイッチ構造 FRP 床版のコンクリート舗装による効果を確認できた．しかし，上面 GFRP 板に発生するせん断応力の値は十分小さい値となっている一方で，たわみに関しては 40mm あるいは 50mm の舗装を設置しても制限値に対してあまり余裕はない．また，コンクリート舗装をさらに厚くすることで，剛性を大きくすることは可能であるが，床版の死荷重が増加してしまう．そこで，本検討では，よりたわみを低減できるようにサンドイッチ構造 FRP 床版の下面板材を従来の GFRP からより剛性の高い AFRP や CFRP に置き換え，その効果を確認することとした．なお，下面板材を置き換えたサンドイッチ構造 FRP 床版のイメージを図-5 に示す．

表-1　床版の寸法（単位：mm）

橋軸方向	橋軸直角方向	床版厚
6000	3000	210

表-2　各材料の寸法（単位：mm）

材料	橋軸方向	橋軸直角方向	厚さ
GFRP（上面）	6000	3000	5
硬質ウレタンフォーム（芯材）			200
GFRP/AFRP/CFRP（下面）			5

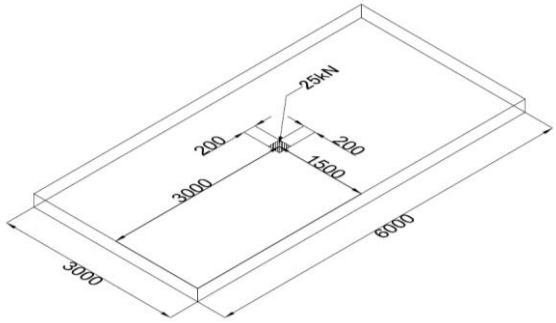

図-6　載荷位置

5.　FEM 解析

(1)　サンドイッチ構造 FRP 床版の下面板材の強化

サンドイッチ構造 FRP 床版の下面板材を従来の GFRP からより剛性の高い AFRP や CFRP に置き換えることによる効果を確認するために，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 の Hyper Mesh を使用し，解析ソルバーには，同社の Optistruct を使用した．また，解析モデルはすべてソリッド要素で構成した．本検討における床版の寸法と各材料の寸法を表-1 及び表-2 に示す．なお，床版を構成する芯材は硬質ウレタンフォームとする．床版の支持条件は 4 辺単純支持とし，荷重は床版中央の 200mm×200mm の範囲に 25kN を載荷した．荷重の載荷位置を図-6 に示す．

また，文献 5)において同様の床版形式に対して，コンクリートによる橋面舗装を施したモデルについて，舗装厚さをパラメータとして解析を行っている．そこでは，たわみ制限値を評価基準として，最適な舗装厚さの検討を行っている．そのため，文献 5)において，たわみの制限値 L/400：7.5mm あるいは L/600：5.0mm を満たしている舗装厚さ 40mm 及び 50mm の場合のモデルについて，

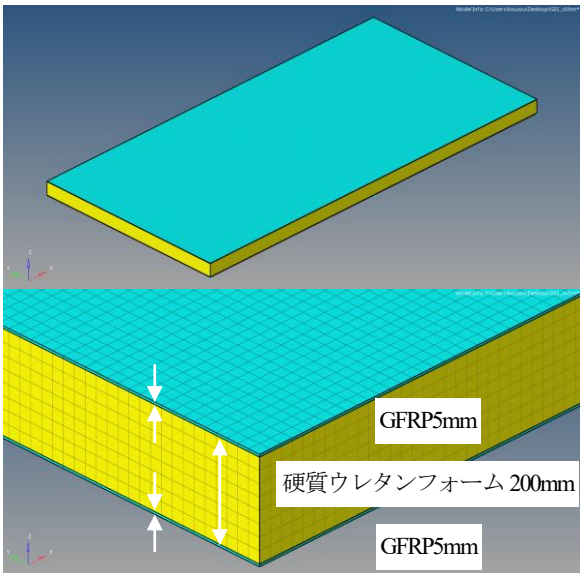

図-7　サンドイッチ構造 FRP 床版の基本モデル

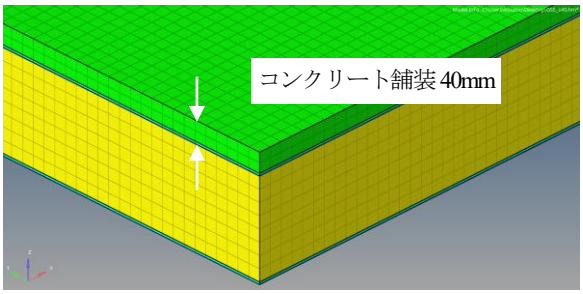

図-8　舗装厚さ 40mm のモデル（GG - c40）

表-3　各材料の物性値

材料	弾性係数（N/mm²）	ポアソン比
GFRP	13800	0.26
AFRP	118000	0.3
CFRP	220000	0.3
硬質ウレタンフォーム	10.3	0.0
コンクリート	23000	0.2

下面板材の置き換えを行い，本検討の比較対象とした．したがって，モデルはコンクリート舗装 40mm を設置した「上面：GFRP，下面：GFRP」の GG - c40，「上面：GFRP，下面：AFRP」の GA - c40，「上面：GFRP，下面：CFRP」の GC - c40 と，同様に，コンクリート舗装 50mm を設置した GG - c50，GA - c50，GC - c50 の 6 つとする．また，本検討においてもたわみと上面 GFRP におけるせん断応力を比較することとする．サンドイッチ構造 FRP 床版の基本モデルと舗装厚さ 40mm の場合のモデル（GG - c40）を図-7 及び図-8 に示す．なお，解析で用いた各材料の物性値を表-3 に示す．

解析によって得られた床版全体におけるたわみの最大値と上面 GFRP 板におけるせん断応力の最大値を表-4 に示す．また，たわみと弾性係数の関係及びせん断応力と

表-4　床版全体のたわみ及び上面 GFRP 板におけるせん断応力の最大値

(a)　舗装厚さ 40mm

モデル	たわみ (mm)	せん断応力 (N/mm²)
GG - c40	6.00（1.00）	0.15
GA - c40	5.29（0.88）	0.15
GC - c40	5.20（0.87）	0.15

(b)　舗装厚さ 50mm

モデル	たわみ (mm)	せん断応力 (N/mm²)
GG - c50	4.84（1.00）	0.10
GA - c50	4.26（0.88）	0.10
GC - c50	4.18（0.86）	0.10

（※括弧内は GG の値を 1.00 としたときの比）

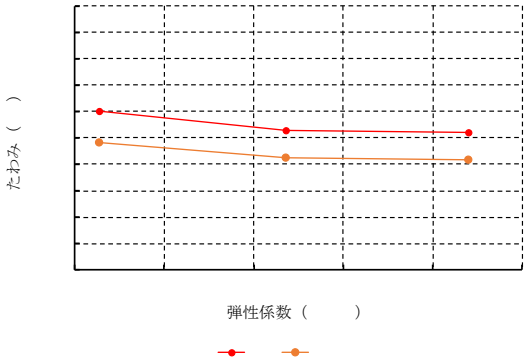

図-9　たわみと弾性係数の関係

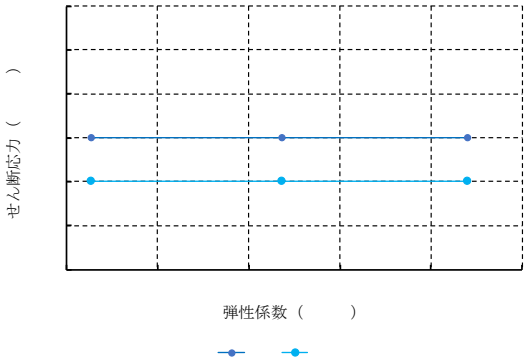

図-10　せん断応力と弾性係数の関係

弾性係数の関係を図-9 及び図-10 に示す．なお，凡例として，コンクリート舗装が 40mm のモデルを c40，50mm のモデルを c50 とする．また，橋軸方向中心軸におけるたわみ分布について，例として，GG と GC の比較を図-11 に示す．表-4 よりたわみは下面板材をより剛性の高いものに置き換えることで 12～14%程度低減されている．しかし，図-9 や図-11 を見ても分かるように，全体的にたわみの低減量は小さい．また，図-9 より AFRP と CFRP で弾性

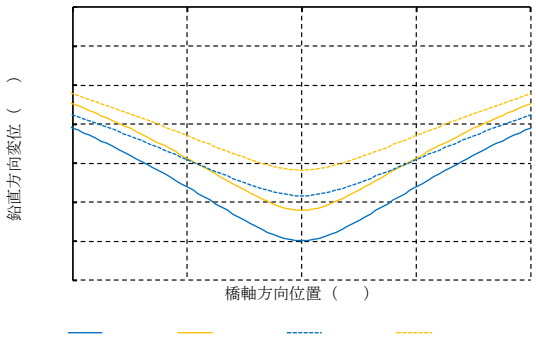

図-11　橋軸方向中心軸におけるたわみ分布
（芯材：ウレタン，GG と GC の比較）

表-5　床版の寸法（単位：mm）

橋軸方向	橋軸直角方向	床版厚
6000	3000	90 - 110

表-6　各材料の厚さ（単位：mm）

モデル	GFRP（上面）	木材（芯材）	GFRP（下面）
w80	5	80	5
w85		85	
w90		90	
w95		95	
w100		100	

係数は大きな差があるにもかかわらず，たわみの低減量はあまり大きく変わらなかった．これらは，芯材を挟み込んでいる上下の板材が 5mm と薄いため，剛性の高い材料に置き換えたことによる効果があまり現れなかったことが考えられる．そのため，下面板材の置き換えによる効果を大きくするためには，板材の厚さを改善する必要がある．

一方，上面 GFRP 板に発生するせん断応力については，**表-4** や**図-10** より下面板材の置き換えによって低減されていない．これは，下面板材がせん断に対する抵抗にあまり寄与していないことが考えられる．

(2)　芯材を木材としたサンドイッチ構造 FRP 床版

従来のサンドイッチ構造FRP床版の下面板材をより剛性の高いものに置き換えることで，あまりたわみは低減できなかった．そのため，この方策よりも文献 5)にて行ったコンクリート舗装を設置する方策の方がより大きい効果が期待できる．しかし，コンクリート舗装を設置すると舗装を設置しない場合に比べて，死荷重が大きく増加してしまう．また，芯材としている硬質ウレタンフォームのような発泡系材料は非常に軽く，使い勝手がよいが，弾性係数が非常に小さく，道路橋床版として使用するには，剛性や強度に懸念が残る．そこで，サンドイッチ構造FRP床版の芯材として利用される材料として木材も挙げられる．一般的に，木材は硬質ウレタンフォームのような発泡系材料よりも密度が少し大きいがコンクリートよりは小さく，ウレタンよりも弾性係数が大きいことから，コンクリート舗装の厚さを低減し，死荷重を小さくすることが期待できる．

表-7　木材の物性値

材料	弾性係数（N/mm²）	ポアソン比
木材	7500	0.4

表-8　床版全体のたわみ及び上面 GFRP 板における
せん断応力の最大値

モデル	たわみ (mm)	せん断応力 (N/mm²)
w80	5.80	0.19
w85	4.97	0.12
w90	4.30	0.09
w95	3.74	0.11
w100	3.28	0.16

そこで，本検討では芯材を木材としたサンドイッチ構造 FRP`床版について，たわみや上面 GFRP 板におけるせん断応力がどの程度発生するかを確認するために，芯材の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．また，芯材が硬質ウレタンフォームの場合と比べて，どの程度床版を軽量化できるか確認をするために，床版の重量の比較も行った．解析ソフトや解析モデルの要素の種類は(1)節と同様である．また，床版の寸法や各材料の寸法は芯材の厚さ以外は(1)節と同様とし，床版の支持条件や荷重条件も(1)節と同様とする．本検討における床版の寸法と各材料の厚さを**表-5** 及び**表-6** に示す．なお，解析で用いた GFRP の物性値は(1)節と同様であり，木材の物性値を**表-7** に示す．

解析によって得られた床版全体におけるたわみの最大値と上面 GFRP 板におけるせん断応力の最大値を**表-8** に示す．また，たわみと芯材厚さの関係及びせん断応力と芯材厚さの関係を**図-12** 及び**図-13** に示す．**表-8** や**図-12** より芯材を木材とした場合，芯材が薄くてもたわみやせん断応力は十分小さくなっている．特に，芯材の厚さが 80mm の w80 でも，たわみが 5.80mm となっており， コンクリート舗装を設置している GG - c40 のたわみ 6.00mm と同程度のたわみとなっている．また，**表-8** や**図-13** よりせん断応力についても，芯材が硬質ウレタンフォームの時と同様十分小さくなっている．そのため，芯材が木材の場合，コンクリート舗装を設置しなくても，芯材が硬質ウレタンフォームの床版にコンクリート舗装を設置したものと同等の剛性や強度が期待できる可能性がある．

一方，たわみの制限値 L/600：5.0mm を満たしている GG - c50 と w85 の床版重量を算出し，どの程度重量を低

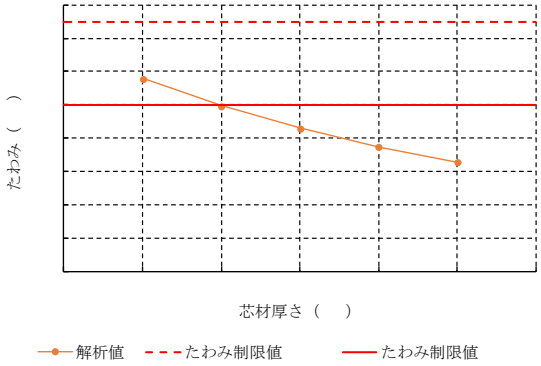

図-12　たわみと芯材厚さの関係

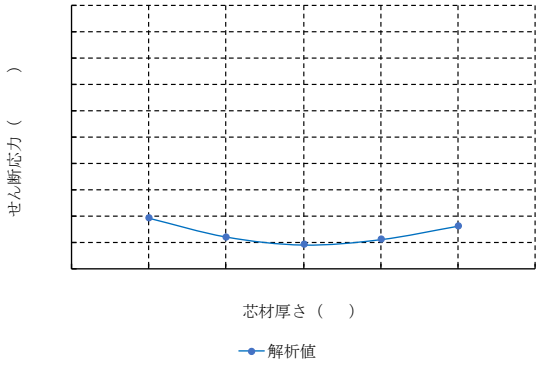

図-13　せん断応力と芯材厚さの関係

減できるのか比較する．床版重量の算出に用いた各材料の密度と各モデルの床版重量を**表-9**及び**表-10**に示す．**表-10** より同程度のたわみとなっている床版について，芯材を木材とすることで，1,597kg すなわち 63%削減することができている．そのため，芯材を硬質ウレタンフォームをとし，コンクリート舗装によって補強した床版よりも軽量化を図ることが期待できる．したがって，今後は芯材を木材としたサンドイッチ構造FRP床版についても検討が必要である．

6.　まとめ

本検討の FEM 解析により，サンドイッチ構造 FRP 床版について，以下の内容が確認できた．

(1)　下面板材を GFRP から AFRP あるいは CFRP に置き換えることで，舗装厚さ 40mm あるいは舗装厚さ 50mm の場合には，たわみを 12～14%低減できる．

(2)　サンドイッチ構造FRP床版を構成する板材は非常に薄いため，下面板材を強化することによる効果は小さい．

表-9　各材料の密度

材料	密度（g/cm^3）
GFRP	2.0
硬質ウレタンフォーム	0.03
木材	0.38
コンクリート	2.3

表-10　サンドイッチ構造床版の重量

モデル	重量（kg）
GG-c50	2,538（1.00）
w85	941（0.37）

（※括弧内は GG-c50 を 1.00 としたときの比）

(3)　同様に，サンドイッチ構造FRP床版を構成する板材は非常に薄いため，下面板材の置き換えによる効果は，AFRP と CFRP とであまり大きな差はない．

(4)　芯材に木材を使用することで，芯材が薄くても，芯材に硬質ウレタンフォームを使用した床版にコンクリート舗装を設置したものと同等の剛性及び強度を期待できる．

(5)　芯材に木材を使用することで，コンクリート舗装の厚さを削減し，軽量化が期待できる．

参考文献

1)　土木学会：鋼構造シリーズ 35，道路橋床版の維持管理マニュアル 2020，pp.9-44，2020.

2)　ヤマハ発動機株式会社：FRP ソリューション，［製品例紹介］歩道橋用超軽量床版，FRP サンドイッチ床版，https://www.yamaha-motor.co.jp/frp/example/sandwichpanel/.

3)　佐藤 淳哉，大西 弘志，菅原 智大，浅沼 崚：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.

4)　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.

5)　浅沼崚，大西弘志：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，第 12 回道路橋床版シンポジウム論文報告集　投稿中，2022.

6)　土木学会：複合構造シリーズ 04，FRP 歩道橋設計・施工指針（案），pp.99-104，2011.

(Received August 26, 2022)

FUNDAMENTAL STUDY ON APPLICATION OF SANDWICH STRUCTURE FRP DECKS TO ROAD BRIDGES

Ryo ASANUMA, Hiroshi ONISHI and Hinata FURUKAWA

In Japan, many infrastructures are deteriorated and damaged by corrosion of steel materials and salt damage to concrete. Therefore, FRP with its superior corrosion resistance is attracting attention as a new material to replace steel and concrete.

One of the deck types using FRP is the decks with the sandwich structure composed of a core, such as lightweight wood or foamed material, sandwiched by FRP plates (hereinafter referred to as "sandwich structure FRP decks"). When sandwich structure FRP decks are applied to road bridges, the possibility of shear failure of the FRP plates on the upper surface of the decks must be considered due to the localized action of significant uniform loads, the wheel loads, as an external force. In order to reduce localized shear failure on the upper surface of the decks, the authors considered installing concrete pavement on the upper surface of the decks and reducing shear stresses due to the action of the wheel loads. In this study, the material change of FRP plates on the underside of the decks was also investigated by FEM analysis in order to improve the flexural capacity of the entire decks.