

格子構造FRP床版の複合化に関する研究

山本 竜一¹・大西 弘志²・西田 雅之³

¹学生会員 岩手大学大学院 工学研究科社会環境工学専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)

E-mail:t2515016@iwate-u.ac.jp

²正会員 岩手大学准教授 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.ac.jp

³日本エフ・アール・ピー(株) 技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町2-2-13)

E-mail:nishida@nihon.co.jp

道路橋等の社会基盤構造物に用いる新しい素材としてアルミニウム合金に代表される軽金属や各種FRPが考えられている。その中でもガラス繊維を用いたGFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)は経済性に優れると同時に軽量であり、環境因子に対する耐久性にも非常に優れていることがわかっている。これまでに開発されたGFRP製道路橋床版では設計時に曲げモーメントに対する抵抗のみを考える傾向が強く、大部分の床版では橋軸直角方向にリブを伸ばす部材構成を持たせている。このような部材では輪荷重走行時の床版の挙動を支配するせん断力の作用に対する抵抗が十分に与えられているとは限らない。そこで著者らはせん断力に対する抵抗性に優れた構造として、格子構造に着目した床版を開発している。本稿では格子構造を有するGFRP床版に対する静的載荷試験のとそのFEM解析結果について報告する。

Key Words : road bridge deck, GFRP, grid molding method, static loading test, numerical analysis

1. はじめに

近年、わが国では道路橋を始めとした社会基盤の老朽化が問題となっている。この問題の中でも道路橋についてはその総数が約70万橋と非常に多いことから社会基盤としての道路網の機能を維持する上で非常に大きな問題であると認識されている¹⁾。道路橋の老朽化問題に対応するため、自治体等の各道路管理団体は道路橋の維持管理の効率化や各橋梁の供用期間の延長を目的とした長期維持管理修繕計画の策定を進めている²⁾。しかし、現在の状況を根本的に改善するためには一定の割合で既存構造物をより耐久性に優れた構造物に置き換え、維持管理業務自体を削減する必要がある。このための方策の一つとして、現行の建設材料よりも耐久性に優れた材料により構造物を構成することが考えられている。既存建材に置き換わる新素材の候補の一つとして繊維強化樹脂(Fiber Reinforced Plastics, 以下, FRP)がある。FRPは中に配置する樹脂の種類によって、ガラス繊維強化樹脂(以下, GFRP)やアラミド繊維強化樹脂(以下, AFRP)、炭素繊維強化樹脂(CFRP)などがある。これらの中でもGFRPはその軽量さや経済性などの面で橋梁に適用しやすい材料であると考えられている。GFRPは、

従来の材料 にはない耐候性・耐食性をも有しており、今後の土木分野への適用に向けた研究開発が期待されている。

これまでに開発されたGFRP製の道路橋床版の多くでは設計時に曲げモーメントに対する抵抗のみを考える傾向が強く、大部分の床版では図-1³⁾に示すような断面構成を採用している。これに対し、道路橋RC床版の疲労に関する既往の研究では、RC床版の疲労損傷は輪荷重の繰り返し走行により一方向ひび割れの発生(図-2(a))から二方向ひび割れの発生(図-2(b))へと進展し、ひび

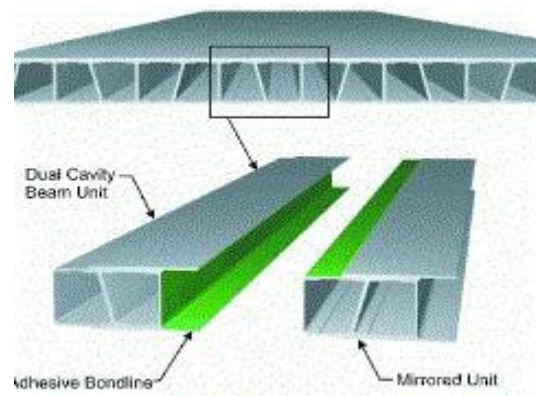


図-1 既存 GFRP 床版例

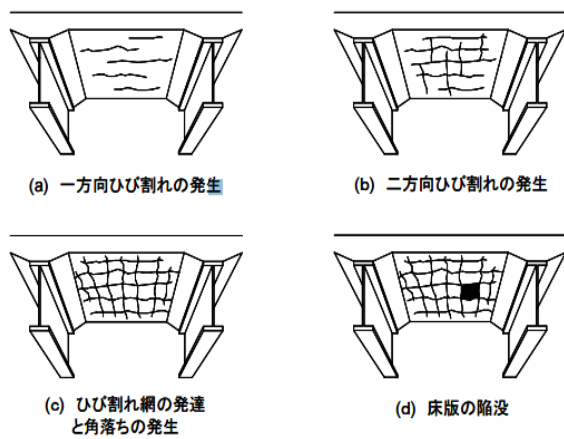


図-2 RC床版における疲労破壊過程

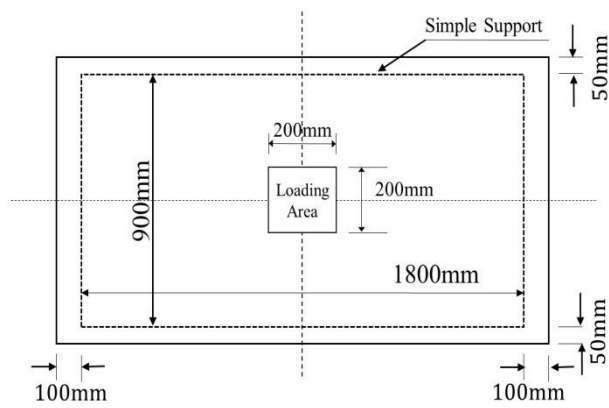


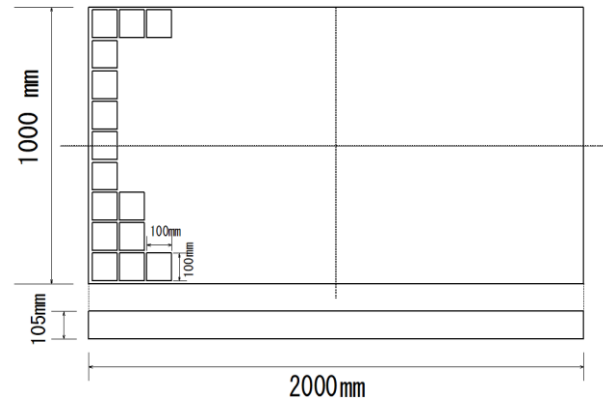
図-4 供試体支持条件

割れ網の細網化と角落ちの発生や上下面から発生・進展したひび割れの貫通に伴う床版の梁状化へと移行し（図-2 (c)），最終的には床版コンクリートの押し抜きせん断破壊によって抜け落ちることが明らかになっている．以上のことから，著者らはせん断力に対する抵抗性の向上や過剰な局部変形の発生を防止できる構造形態としてGFRPによる格子構造に着目し，道路橋床版を構成することを考案した．

本論文では格子構造（Grating structure）を有したGFRP床版（以下，G-GFRP床版）に対し静的載荷試験を実施した結果について報告し，G-GFRP床版の実用化に向けた性能向上手法の一つとして，ポリマーセメントモルタル（以下，PCM）により上面増厚補強したG-GFRP床版の押し抜きせん断挙動および押し抜きせん断耐荷力について3次元有限要素解析による評価を試みた．

2. G-GFRP床版の押し抜きせん断試験

載荷試験に使用した供試体は長さ2000mm，幅1000mm，



(a) 供試体寸法



(b) 供試体（格子部）

図-3 供試体概要

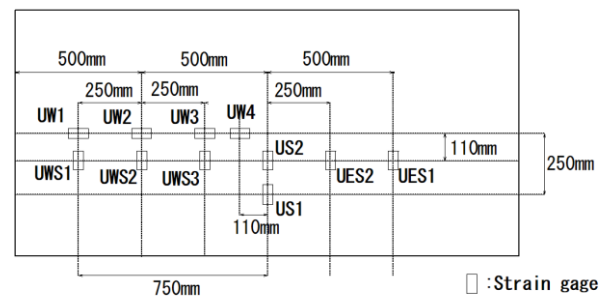


図-5 ひずみゲージ配置

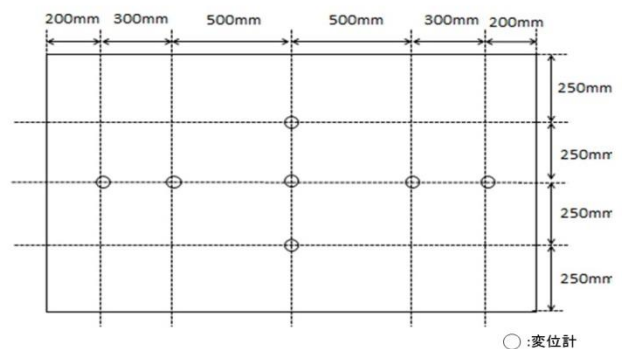


図-6 変位計配置

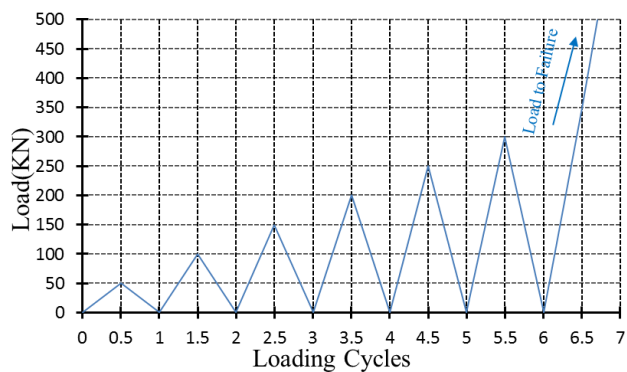


図-7 荷重プログラム

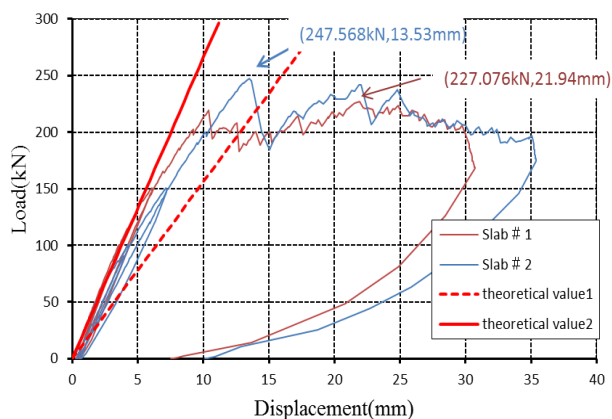


図-9 荷重-たわみ曲線



(a) 供試体全体



(b) 荷重版付近

図-8 試験状況

厚さ105mmのG-GFRP床版である(図-3)。供試体に使用したGFRPの物性値(カタログ値)を表-1に示す。今回使用したGFRPの物性値等の数値は比重3.4, 弾性係数(繊維方向)9006MPa, 弾性係数(繊維直角方向)3812MPa, 引張強度261.53MPa, 繊維含有率55%~70%, 曲げ強度330MPa, 曲げ弾性率19700MPa, せん断強度23.9MPaである。本試験で使用した床版は格子構造部分(開口部100mm×100mm)をグリッドモールド成形法で製作し, 上下にGFRP板を接着した形状となっている。供試体の数は2体であり, うち一体の床版下面には補強のためにCFRPシートを接着した。荷重試験における支持条件は図-4に示す単純支持条件である。今回の試験に使用した供試体をそれぞれSlab#1, Slab#2とした。

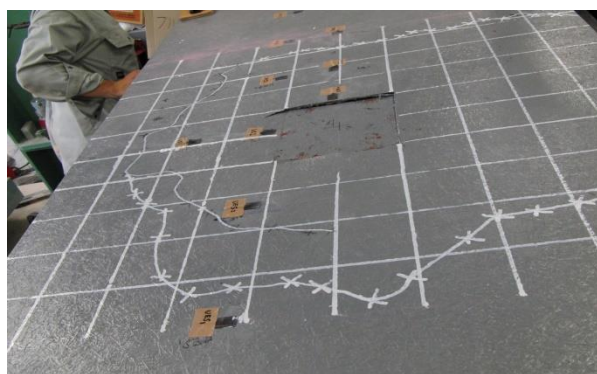
(1) 実験概要

(a) 測定項目

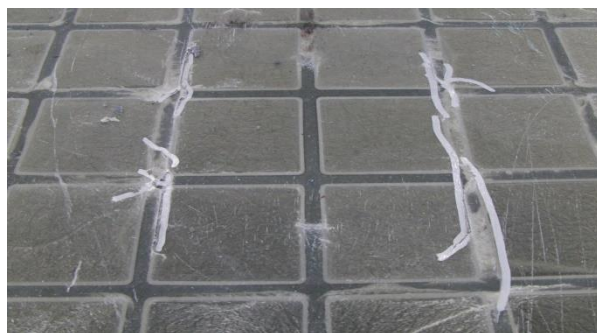
本研究では荷重試験時に供試体の挙動を確認するための測定項目として, 供試体の変位とひずみを計測した。今回の実験におけるひずみゲージの配置を図-5に, 変位計配置を図-6に示す。

(b) 荷重方法

今回の試験では図-4に示す, 床版上面中央の200mm×200mmの範囲に荷重を載荷した(図-8)。また, 荷重に

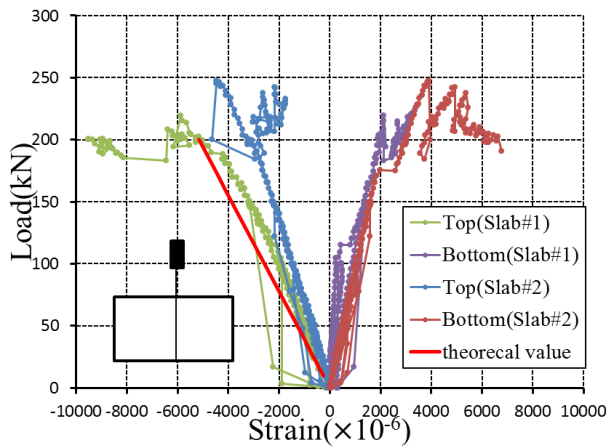


(a) 床版上面

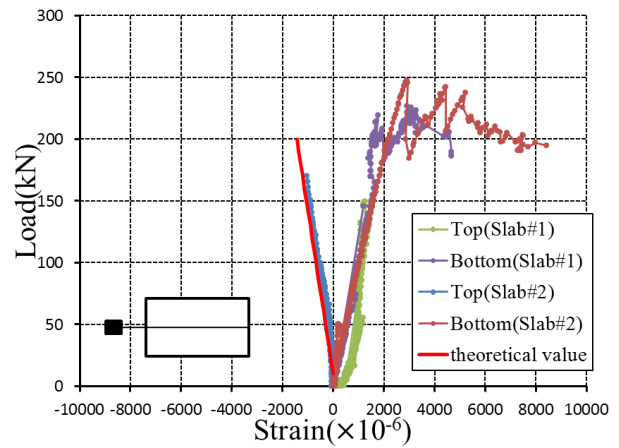


(b) 格子構造部

図-10 床版上面の破壊状況

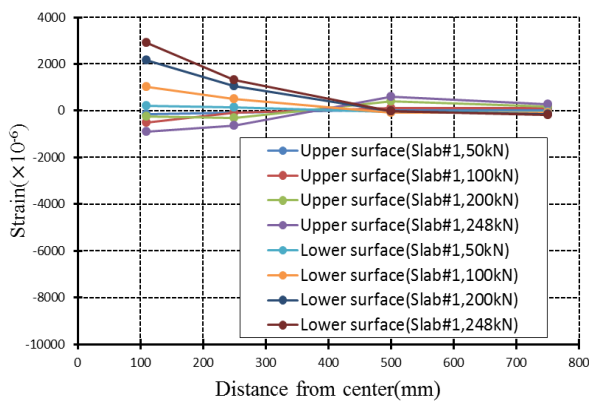


(a) 短辺方向

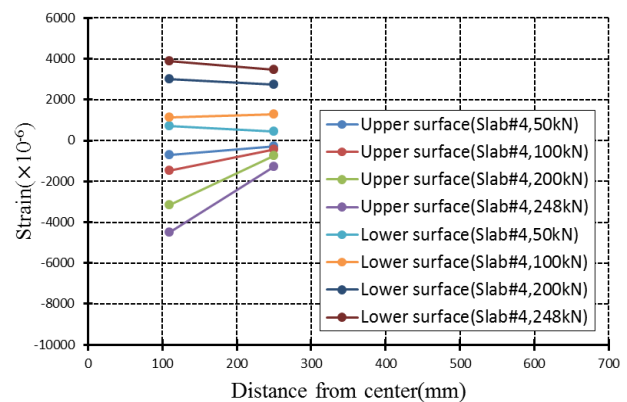


(b) 長辺方向

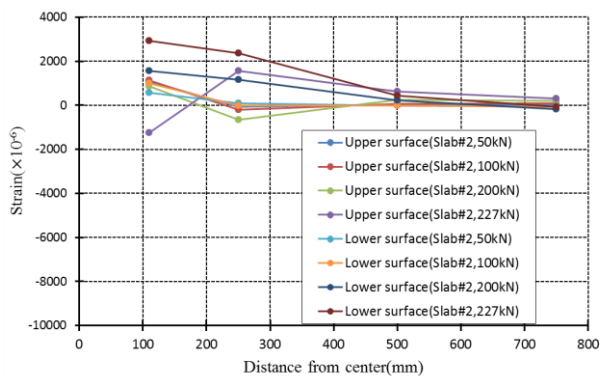
図-11 荷重－ひずみ関係



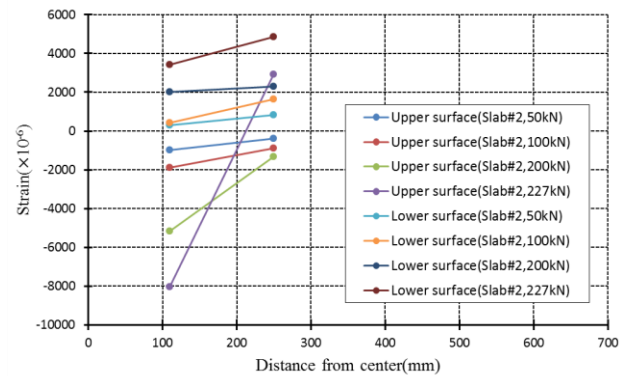
(a) 長辺方向(Slab#1)



(b) 短辺方向(Slab#1)



(c) 長辺方向(Slab#2)



(d) 短辺方向(Slab#2)

図-12 ひずみ分布図

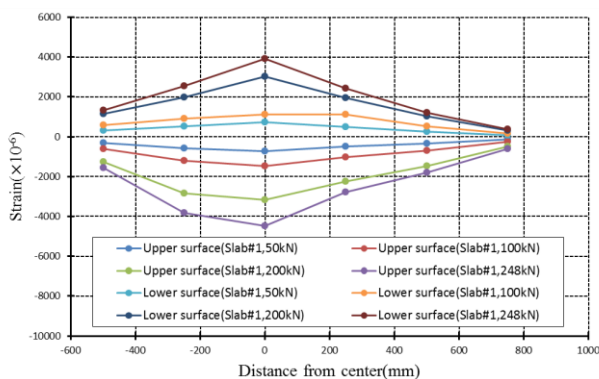
際しては50kNずつ最大荷重を漸増させる繰り返し載荷を行った(図-7)。

載荷に際しては荷重の増大に伴い、供試体の四隅に支点からの浮き上がりが発生することが懸念されたため、床版の四隅に万力を設置し、浮き上がりを防止した(図-8(a))。

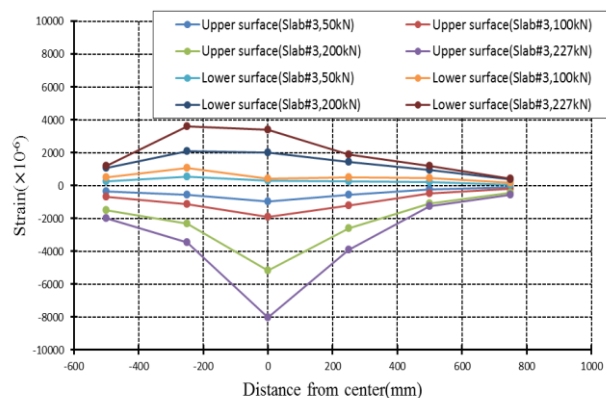
3. 実験結果

(1) 荷重－たわみ関係および破壊形状

荷重－たわみ曲線を図-9に示す。Slab#1では床版中央のたわみが10.39mmの時、荷重が219.58kNを示したのち荷重の増減を繰り返しながら最大荷重227.076kN(たわみ：21.94mm)を示した。また、CFRPシートにより、床版下面を補強したSlab#2では床版中央のたわみが13.53mmの時に



(a)Slab#1



(b)Slab#2

図-13 長辺方向ひずみ分布

表-1 材料特性

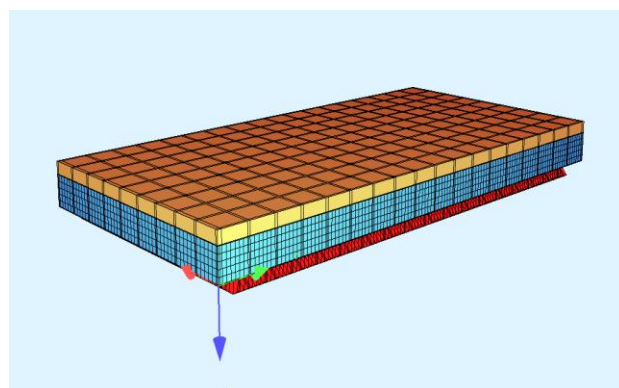
	圧縮強度[N/mm ²]	引張強度[N/mm ²]	弾性係数[kN/mm ²]
PCM(増厚幅40mm)	35.00		26.50
GFRP		261.53	9.006

247.57kNの最大荷重を示している。

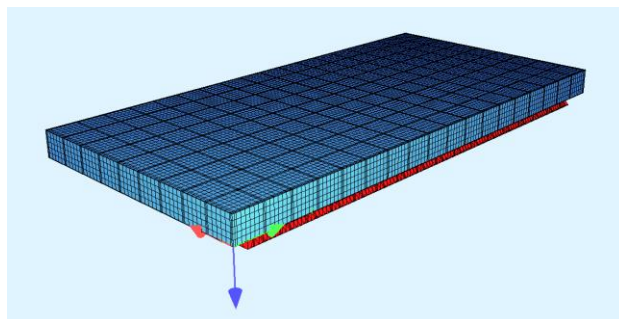
なお,今回の実験ではSlab#1で30mm, Slab#2で35mmの最大変位を確認しているがこの時点においても床版下面にはスキンプレーットの破壊等は確認できなかった.それに対し床版上面ではスキンプレーットの剥離が確認でき,格子構造部にもせん断破壊が確認できた.また,供試体表面のゲルコート部もFRPから剥離しており,一定の変形が発生したのちの床版上面のひずみデータは信頼性に問題があると考えらるべきである.荷重-たわみ曲線の弾性域において床版下面にCFRPシートを塗布したSlab#2よりSlab#1の傾きのほうが若干大きくなってしまっているが,Slab#1と比較しSlab#2では最大変位13.53mmまで荷重の減少が見られない.このことから床版下面にCFRPシートを補強したことによって,床版に粘り強さを与えることができたと考えられる.床版上面の破壊状況を図-10に示す.床版上面の剥離は载荷初期に発生したものであり,今後はこの剥離が有害なものにならないように検討しなければならない.赤線はFEMにより求めた理論値となっており”theoretical value1”, ”theoretical value2” はそれぞれ繊維含有率40%, 90%となっている.これにより実験に近いたわみをおおよそ再現ができていているものと思われる。

(2) ひずみの発生状況

载荷版付近における荷重-ひずみ曲線を図-11に示す.図-11より荷重-ひずみ関係は短辺方向と長辺方向で挙動が大きく異なっている. また, Slab #1で確認されている上面での引張ひずみの発生は载荷版付近の変形に伴い,早期に上面の平板部が格子部と剥離し, 局所的な浮きを



(a) PCM 上面増厚 GFRP 床版



(b) GFRP 床版

図-14 解析プログラム

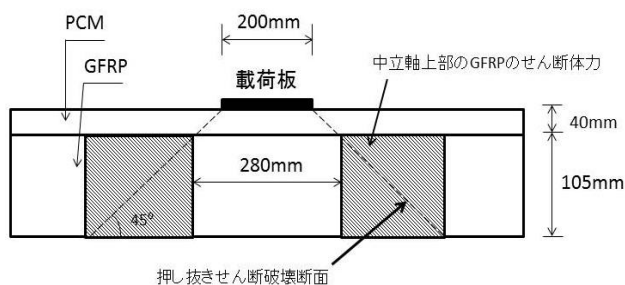
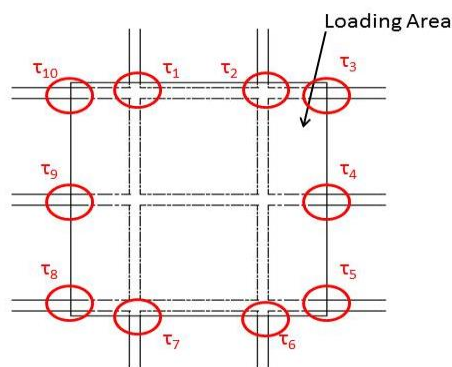
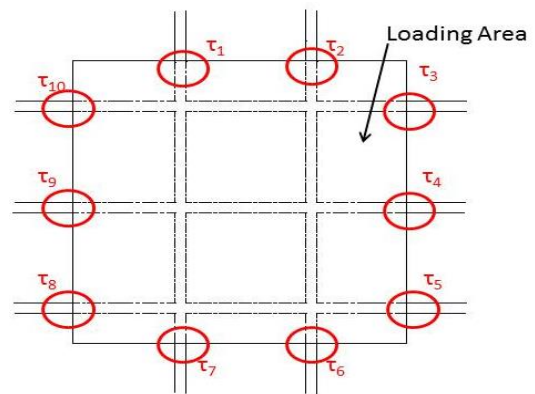


図-15 押し抜きせん断破壊面

生じていた可能性を示しているものと考えられる. また, 赤線は理論値であるが長辺方向上面ではSlab#1がほぼ理



(a) GFRP 床版



(b) PCM 増厚 GFRP 床版

図-16 荷重の影響する範囲

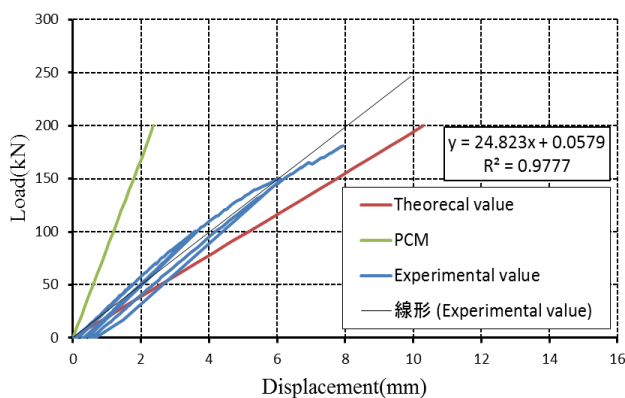


図-17 荷重－変位関係

論値と同様の挙動を示した。短辺方向では荷重が200kNを超過したのちのひずみの乱れが著しい結果となった。

次に、各供試体内でのひずみの分布を図-12に示す。この図の中の長辺方向の分布は長辺方向中心線上のひずみ分布を、短辺方向の分布は短辺方向中心線上のひずみ分布を示している。この結果から長辺方向への荷重の分散が広がっているものの、500mmの位置ではほぼ荷重による影響が認められなくなっている。また短辺方向の分布をみると、大きなひずみを確認できることから、単純支持供試体は1方向性板としての挙動を示しているものと判断できる。図-13に供試体における、載荷板縁より10mm支持桁よりの位置で計測した短辺方向のひずみの分布を示す。これらの図を見ると、一部供試体内での平板部と格子部の剥離に起因すると思われるひずみ分布の乱れは確認できるものの、非常に広い範囲にひずみが分散していることがわかり、このことから格子構造FRP床版が荷重分散性能に優れていることがわかる。

4. 押し抜きせん断解析

表-3 各リブにおけるせん断応力

	τ 1	τ 3	τ 4
GFRP床版	18.2	19.3	31.6
PCM増厚	19.5	20.1	30.5

表-4 解析結果

	Save	Smax	Su
GFRP床版	158.5333	237.8	239
PCM増厚	182.9231	240.2	239

(1) 解析対象床版

解析対象床版は実験に用いた格子構造床版ならびに、床版上面にPCMを増厚した床版である。ここでは、床版に与えたせん断力に対し、格子部の耐荷力が十分な効果を果たしているか、また上面に増厚させたPCMが既設GFRP床版の補強効果にどのような影響を及ぼすのかを把握するために行った。解析に用いたPCMの強度、弾性係数、増厚幅を表-1に示す。

(2) 解析モデル

本解析では3次元有限要素解析プログラムSOFISTICを用いて解析対象床版を図-14に示すように要素分割した。本解析においてGFRPとPCMとは完全付着を仮定した。押し抜きせん断破壊面を図-15に示す。

(3) 解析方法

図-15にリブに対してせん断荷重のかかる範囲を示す。載荷に伴うせん断応力は格子構造部のリブがすべて受けるものとし、最大荷重227kN時のリブが受けるせん断応力に対しせん断耐力を照査した。

$$\tau_{max} = \sum \tau_{n(n=1,2,3,4..)}$$

$$A = 1000[mm^2]$$

$$S_{max} = A\tau_{max}$$

$$S_{ave} = \frac{S_{max}}{1.5}$$

(4) 解析結果

床版上面の格子構造部における荷重のかかる範囲を図-16に示す。図-16(a)ではスキンプレートを挟み、その上に荷重がかかっているが、上面をPCMで増厚した場合、図-15のようにせん断面が広域になるのでそれを考慮した荷重範囲を図-16(b)に示した。各供試体の弾性域における荷重－変位関係について実験結果と解析結果に比較を図-17に示す。この結果より、弾性域での傾きでは実験値と解析による傾きには21.8%の差異が生じてしまった。PCMを床版上面に増厚した床版の解析結果については極端に傾きが大きな結果が出ているが、GFRPとPCMを完全付着として解析していることから今後、実験における検討や増厚幅を考慮した見当が必要であると考ええる。

表-3にそれぞれ、各リブにおける τ_1 、 τ_3 、 τ_4 の値を示す。格子構造部において長方形断面のせん断応力度分布により、上下2枚のスキンプレートを結ぶリブの断面積($A=1000mm^2$)を乗した平均せん断応力度、最大せん断応力度を表-4に示す。これにより想定した最大荷重よりGFRP床版においては4.8%の差異が生じ、PCMを上面に増厚したGFRP床版では5.8%程の差異が生じた。また、カタログ値のせん断耐力より算出した最大せん断耐力と比べるとほぼ一致した値となった。本解析では格子構造部における弾性域でのせん断応力に着目しているが、着目したリブの破壊が生じた後は荷重の範囲が広域になることも考慮し今後検討を進める必要があると考える。また、GFRPとPCMの完全付着状態を仮定し解析しているため、PCMの剥離による破壊状態を考慮していない。今後は境界面の付着特性、弾性率の差、増厚幅、引張強度を考慮した上面増厚補強効果の確認が必要である。

4. まとめ

本研究では輪荷重走行に伴い作用するせん断力に対する抵抗性に優れていると思われる格子構造を持たせたGFRP床版に対して静的載荷試験を実施するとともに、PCMによって上面を増厚したGFRP床版を想定し、その解析を行った。その結果から以下の知見を得ることができた。

- (a) 格子構造FRP床版は単純支持条件において230kNほどの最大荷重を示した。下面に塗布したCFRPシートによる合成の向上は見られなかったが、その原因としては荷重に伴い格子部のリブがせん断破壊を呈したことが考えられる。

- (b) 格子構造は大きな変形性能を有しており、構造形式から床版に粘り強さを与えることに成功しているものと考えられる。
- (c) たわみやひずみの分布から格子構造FRP床版は優れた荷重分配性能を有していることが推定される。
- (d) 荷重－変位関係の図より、傾きが繊維含有率40%~90%の間に収まっていることから実験に近いたわみをおおよそ再現できているものと思われる。
- (e) 本試験では、載荷に伴い上面のスキンプレートが早期に剥離してしまう結果となった。今後この剥離が有害なものにならないように検討を進める必要がある。
- (f) たわみやひずみの分布から格子構造FRP床版は優れた荷重分配性能を有していることが推定される。
- (g) 解析結果より解析モデルは最大荷重よりGFRP床版においては4.8%の差異が生じ、PCMを上面に増厚したGFRP床版では5.8%程の差異が生じた。
- (h) 今回はGFRPとPCMの完全付着状態を仮定し解析しているため、PCMの剥離による破壊状態を考慮していない。今後は境界面の付着特性、弾性率の差、増厚幅、引張強度を考慮した上面増厚補強効果の確認が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 橋梁の寿命予測－道路橋RC床版の疲労寿命予測－，安全工学，Vol.30No.6，pp.432－440，1991.
- 2) 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集，No.348/V－1，pp.133－141，1984..
- 3) <http://www.compositesworld.com/articles/a-guide-to-selection-of-methacrylate-urethane-and-epoxy-adhesives>.
- 4) FRP 橋梁-技術とその展望-.
- 5) 野坂 克義,久部 修弘, 松村 政秀: CFRP 板補強 GFRP 桁の拡幅歩道橋への適用に 関する実験的検討 第 11 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集
- 6) 小林 朗, 松井 繁之: 連続繊維シート接着工法の道路橋 RC 床版の 疲労耐久性向上効果に関する検討 第 5 回複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演集
- 7) 東山浩士, 小田憲司: 下面増厚補強した RC 床版の押し抜きせん断挙動に関する 3 次元非線形有限要素解析 第 4 回道路橋床版シンポジウム講演論文集
- 8) 東山浩士, 住田有果理: 鋼繊維補強 RC 床版の押し抜きせん断耐荷力式の提案と比較 第 7 回道路橋床版論文報告集
- 9) Julio F.Davalos, An Chen, Pizhong Qiao: FRP DECK AND STEEL GIRDER BRIDGE SYSTEMS
- 10) 松井繁之編著, 道路橋床版 設計・施工と維持管理
- 11) 田村 修一, 保呂 秀次, 久保 圭吾, 角間 恒, 岡田 慎哉, 松井 繁之: FRP 歩道用拡幅床版の実橋への 適用性に関する研究 第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム

A STUDY ON COMPOSITE FRP-DECK WITH GRID STRUCTURE

Ryuichi YAMAMOTO, Hiroshi ONISHI, Masayuki NISHIDA

Recently, many researchers try to develop the road bridge with FRP. Thus far, GFR deck has been designed to have resistance to only bending moment and it had structural members configured ribs of bridge axial direction. But the structural members may not have resistance to actions of shear force which occurs when wheel load. So we are focusing grating structure deck as it has excellent structure for resistance to shear force. Here we report the experimental results of static loading tests on GFRP deck having grating structure and the FEM analysis results.