

FRPを用いた床版拡幅構造に関する実験的研究

角間 恒¹・西 弘明²・岡田 慎哉³・表 真也⁴・松井 繁之⁵

¹正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail:kakuma@ceri.go.jp

²正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail:h-nishi@ceri.go.jp

³正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail:okada@ceri.go.jp

⁴正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail:03119@ceri.go.jp

⁵フェロー 大阪工業大学 八幡工学実験場構造実験センター (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷4)
E-mail:s-matsui@rsh

積雪地域の道路橋では、冬期間の路肩への堆雪による幅員の減少が、走行および歩行の安全性・快適性を阻害する要因となっており、床版拡幅による幅員確保の必要性が高まっている。本研究では、死荷重増加の軽減や耐腐食性の向上が期待できるFRPを用いた床版拡幅構造について、主に積雪地域の車道拡幅を対象とした拡幅断面の設定および既設RC床版とFRP拡幅部との接合構造の検討を行い、接合部に着目した要素試験により応力状態や終局耐力、破壊性状の把握を行った。

要素試験結果においては、終局状態においても、既設床版とFRP拡幅部との間に明確な開口は確認されず、提案する構造が十分な耐荷性を有していることを示した。

Key Words : FRP, widening of RC deck slabs, composite structure

1. はじめに

既設道路橋では、幅員が狭小であることに起因して橋梁が路線のボトルネックとなり交通障害が発生する。特に積雪地域においては、冬期間は、路肩への堆雪により実質的な橋梁幅員およびそれに伴う走行安全性・快適性、歩行者の安全性の低下を招いており、道路管理上の大きな問題となっている(写真-1)。

橋梁の床版拡幅による幅員の確保は、以上の問題を解消する方策の一つであり、架け替えあるいは既設上部工・下部工の変更を伴う既設橋梁自体の拡幅といった大規模な対策に対し、拡幅部が床版に限定されるため、既設構造の変更が少なく経済的な拡幅が可能となる。

床版拡幅の従来工法においては、鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)や鋼床版が使用されてきたが、死荷重の増加や腐食が問題となる。近年では、アルミニウム合金製の拡幅床版を既設床版に添加する工法¹⁾の適用例があるが、鋼材との異種金属接触による腐食や、線膨脹係数が鋼材やコンクリートの約2倍程度であるため温度差による伸縮対策に留意する必要がある



写真-1 積雪による幅員の狭小化の例

ほか、歩行者の安全対策を目的とした歩道拡幅への適用に限られている。

そこで著者らは、比強度が高く、耐腐食性に優れ、近年、歩道橋や合成床版としての利用など橋梁構造物への適用例^{2,3)}のあるFRPに着目して、既設床版の拡幅工法の検討を行うこととした。本研究では、主に積雪寒冷地における既設RC床版車道部の拡幅を検討の対象として拡幅構造の諸条件の設定および既設RC床版部とFRPを用いた拡幅床版(以下、FRP拡幅床版)の

接合構造に関する検討を行った後、要素試験に基づき、FRP拡幅床版の応力状態や終局耐力、破壊性状等の基礎的性状の把握を行った。

2. FRP拡幅床版の概要

本章では、FRP拡幅床版に関して、北海道における橋梁幅員の現状を基にした床版拡幅量の設定、断面形状の検討、および、既設RC床版との接合部の構造に関する検討を行う。

(1) 床版拡幅量

FRP拡幅床版の張り出し量は、歩道を有さない片側1車線の橋梁に着目して、北海道内の3,000橋梁あまりの幅員および現行の道路構造令等に基づき算出することとした。道路構造令⁴⁾によると、冬季路肩は0.5m以上を確保する必要があるが、北海道では雪質が乾燥して粘着力が少なく、落ちこぼれや吹き溜まりの度合いが多いため、堆雪余裕幅0.5mを加えた冬季路肩1.0m以上を確保する必要がある⁵⁾。冬季において歩道を有さない片側1車線の橋梁に必要な最大幅員は、3種1級の道路で9.0m（車道幅：3.5m×2車線＝7.0m，路肩：1.0m×2＝2.0m）であることから、ここではまず、全幅員が9.0m以下の橋梁を狭小幅員として抽出した。図-1には、幅員ごとの橋梁数を示しており、調査対象とした橋梁のうち45%程度が狭小幅員に該当している。

次に、抽出した橋梁の幅員と道路規格に基づき算出した幅員不足量を比較した結果を図-2に示す。抽出した約1,200橋梁のうち、最も幅員が不足するもので3.0m程度の幅員不足が確認された。全体的には北海道における落ちこぼれ幅が確保されていない橋梁が多く、60%程度が現行の道路規格を満足していない結果であった。

以上より、拡幅量として最大3.0m程度を想定することで、概ね狭小幅員を解消するだけの道路拡幅が可能となると考えられる。また、片側だけの拡幅に限定されるような条件を対象とせず、既設橋梁両側が拡幅できるような橋梁を想定して、片側の拡幅量は最大で1.5m程度とする。

(2) 断面形状

FRP拡幅床版の断面形状は、過去に土木研究所で輪荷重走行試験を実施している断面と同様に、高さ150～250mm、幅200～250mm程度を有する矩形断面⁶⁾を基本とし、施工性や構造性を考慮して、橋梁拡幅に適した断面形状について検討することとした。

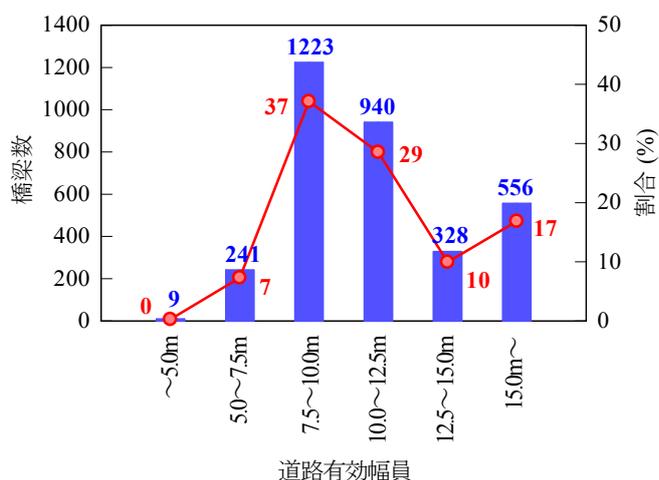


図-1 道路幅員の分布

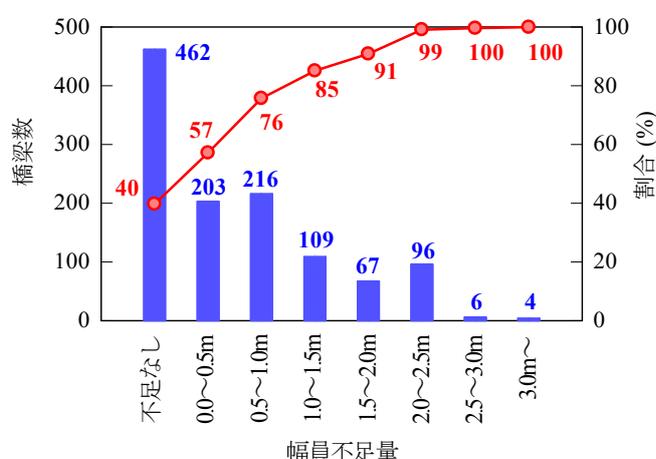


図-2 幅員不足量の分布

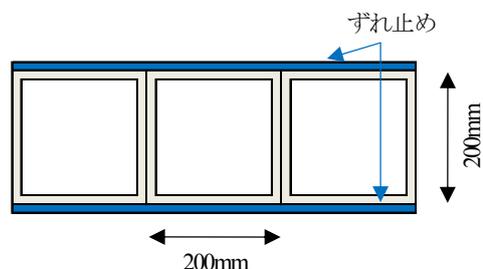


図-3 FRP 拡幅床版の断面形状

断面は、単ボックス断面を基本構造とし、橋軸方向への連続性を確保するため上下面にFRPプレートを接着することで一体化する構造とした（図-3）。一体成形した複ボックス断面を基本構造とする場合と比較して構造自体が単純であり、施工が困難な架設条件への適用や配筋状況等の現場条件による構造変更への対応が比較的容易であると考えられる。

FRP拡幅床版の断面寸法については、FRP自体は高強度材料であるため、断面を小さくできると考えられるが、弾性係数が小さいためたわみが大きくなり、鋪

装のひび割れや防水層の剥離といった問題が生じる懸念がある。したがって、断面寸法の検討においては、道路橋示方書における桁のたわみの規定に準拠し、支間長Lに対してたわみ量がL/500以下となるようにする。

図-4には、断面形状の検討に用いた床版拡幅モデルを示す。ここでは、既往の道路幅員7.5mを9.0mに拡幅する状況を想定する。その他、検討モデル設定の条件は以下のとおりである。

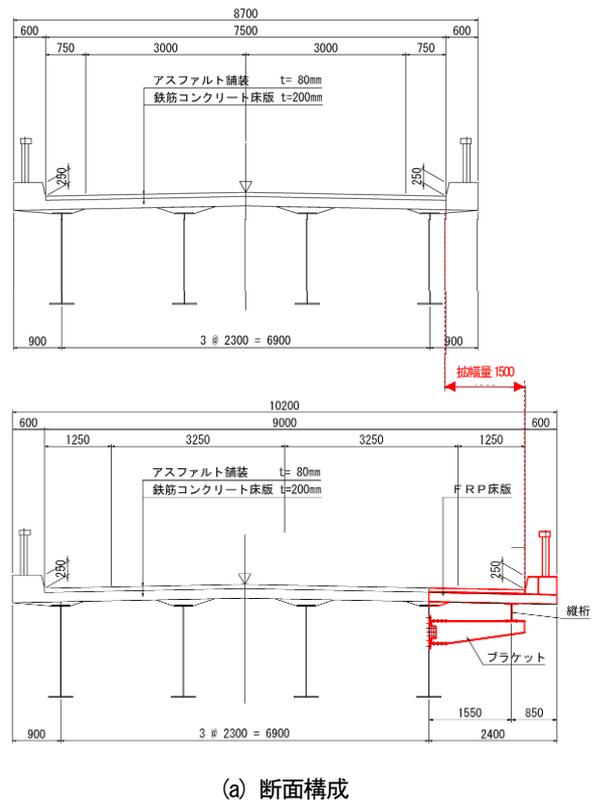
- 橋種は単純鉄桁を想定し、拡幅前幅員に対し3@2.3mの桁配置とする。
- 上記桁間隔より、RC床版厚200mmとする。
- 考慮する荷重は、死荷重（舗装、床版、地覆）および活荷重（T活荷重）であり、T活荷重はFRP拡幅部のたわみが最も大きくなるFRP床版の支間中央に載荷することとする。舗装、RC床版、地覆の単位体積重量は22.5、24.5、24.5kN/m³、部材厚は0.08、0.20、0.33mである。
- 拡幅後の片持ち部床版下面には縦桁を配置することとし、設置位置は地覆内側250mmの位置とする。これは、道路橋示方書に規定される地覆内側での活荷重載荷位置に対応する。

表-1にFRP拡幅部のたわみを算出した結果をまとめる。L/500を基準にたわみを制限する場合、検討モデル（支間1.55m）におけるたわみ許容値は3.1mmであり、250mm×250mmの断面としたときには板厚によらずたわみ量を満足し、200mm×200mmの断面としたときには、板厚を8mm以上とすることでたわみ量を満足する。以上を踏まえ、断面寸法の決定においては、既設床版との取り合いを考慮する必要があることから、FRP床材の断面は既設床版と同様の200mmとするのが望ましく、本検討では200mm×200mmの矩形断面、板厚8mmを基本とした。

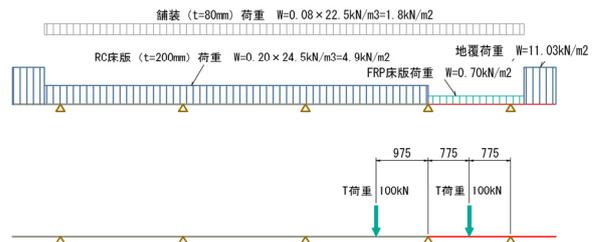
(3) 接合部の構造

FRPによる既設コンクリート系床版の拡幅を考える場合、最も問題となるのが既設床版との接合部であり、構造性はもとより施工性に配慮した接合方法が必要である。本検討では、接合構造として、表-2に示す曲げ伝達方式3案および単純支持方式1案の計4案を抽出し、現場での施工性や既設構造への影響、実用性を比較した結果、「曲げ伝達方式①FRP拡幅床版側で定着する構造」を選定した。

本接合構造では、増設ブラケット上に設置した縦桁によりFRP拡幅床版を支持し、既設床版の鉄筋をFRP拡幅床版内にて定着することで既設床版とFRP拡幅床版を一体化し、曲げ応力を各々に伝達する。鉄筋の定



(a) 断面構成



(b) 梁モデル

図-4 拡幅検討モデル

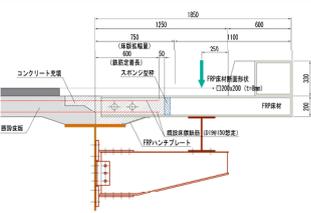
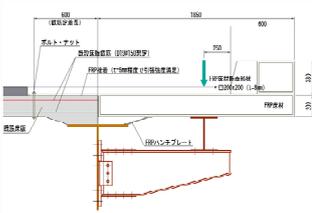
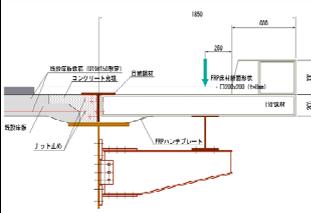
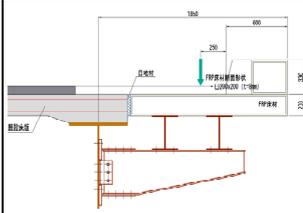
表-1 たわみ計算値

板厚	断面寸法 (mm)		
	250×250	200×200	150×150
6mm	1.7	3.5	8.7
8mm	1.3	2.7	6.8
10mm	1.0	2.2	5.6
12mm	0.9	1.8	4.9

着長は次式⁷⁾より算出し、FRP拡幅床版内に確実にコンクリートを充填するため、流動性の高いコンクリートを既設RC床版側から流し込むことで、定着長を確保した。

$$l_a = \frac{\sigma_{sa}}{4\tau_{0a}} \phi \quad (1)$$

表-2 接合部の検討

曲げ伝達方式			④単純支持方式
①FRP床材側で定着	②既設 RC 床版側で定着	③接合部を桁上に集約	
			
<p>【構造概要】</p> <ul style="list-style-type: none"> 既設床版の鉄筋を増設する FRP 床材側で定着する。定着長分にコンクリートを充填する。 <p>【評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> 構造自体が比較的単純であり、また既設床版側の作業を軽減できるため、適用可能性が高い。 既設鉄筋の利用が困難な場合の施工、狭所へのコンクリート充填について検討が必要となる。 	<p>【構造概要】</p> <ul style="list-style-type: none"> FRP 床材の上面板を既設床版側に延伸し、既設床版と FRP 材をボルトで接合する。 <p>【評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> 配筋状況によっては既設床版への削孔が困難となる。 既設床版側の施工を要するため、交通への影響が大きく、適用可能性は高くない。 	<p>【構造概要】</p> <ul style="list-style-type: none"> 桁上に目地鋼材を設置し、既設床版と FRP 床材を目地鋼材と接合する。 <p>【評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> FRP 材と目地鋼材部は工場での製作・接合が可能であり、現場施工が容易である。 構造自体はコンパクトで交通への影響が少ない。 狭所へのコンクリート充填について検討が必要となる。 	<p>【構造概要】</p> <ul style="list-style-type: none"> 既設主桁にブラケットを設置し、FRP 床材を 2 本の支持桁により支持する。 <p>【評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> FRP 床材を単体の構造として考えるため、構造上の課題は少ない。 支持桁を 2 本配置するため死荷重が増加し、既設構造の補強が必要となる場合もある。

ここに、 l_a ：付着応力度より算出する重ね継手長 (mm)， σ_{sa} ：鉄筋の許容引張応力度 (N/mm²)， τ_{ka} ：コンクリートの許容付着応力度 (N/mm²)， ϕ ：鉄筋の直径 (mm) である。

3. 要素試験

提案するFRP拡幅床版について、応力状態や破壊荷重および破壊性状を確認することを目的として、要素供試体を用いた静的載荷試験を実施した。

(1) 供試体

供試体は、前述の拡幅幅員構成を基に、主桁および横行により支持された床版を想定して製作した。図-5に、供試体形状・寸法および配筋図を示す。供試体寸法は、RC床版部が2,800mm×600mm×200mm，FRP床版部が1,650mm×600mm×215mmであり、支持間隔はRC床版支間が2,400mm，FRP床版支間が1,600mmである。接合部の鉄筋定着長を確保するため、接合面から500mmの区間のFRP床版内にはコンクリートを充填している。FRP材は、2.1節における検討結果を踏まえて200mm×200mmの矩形断面を基本としたが、材料入手の関係で、図-3と異なり、チャンネル材の上側および下側にそれぞれ厚さ10mmおよび5mmのFRP板材を接着させることで矩形断面を形成し、各セルを連結している。ただし、FRP断面の選定に当たっては、図-3の剛性とほぼ等しくなるように断面を決定した。供試体幅は、荷重の載荷状態を網羅できる範囲として、FRP材3

セル分 (200mm×3=600mm) とした。なお、各セルの連結は上下のFRP板材のみにより行い、FRP材の腹板の接着等は行っていない。

コンクリートの圧縮強度および弾性係数はそれぞれ24.8N/mm²，19.4kN/mm²であり、鉄筋にはD16およびD19を使用した。

(2) 載荷方法

弾性範囲内での挙動および終局限界状態に着目した2つの静的載荷試験を行っており、それぞれの載荷位置は本節内において後述する。荷重の載荷は、幅員方向幅が200mm，道路軸方向幅が500mmの載荷板を介して行っている。なお、接合部に生じる曲げ応力が大きくなるよう、載荷板の長辺を供試体の支間方向に、単辺を幅方向に一致させており、T荷重の作用を考慮する場合とは載荷板の向きが異なっている。

供試体は、主桁位置に鋼製架台を配置し、丸鋼を介して回転可能な2辺単純支持とする。支持部においては、荷重載荷時に浮き上がりが生じることを防ぐため、浮き上がり防止材を設置する。

以下に、荷重載荷位置について記す。

a) 弾性範囲に関する載荷試験

本試験では、弾性範囲内における静的載荷により、応力 (ひずみ) および変位の確認を行う。載荷には油圧アクチュエータ (最大荷重100kN) を用い、載荷位置は図-6に示すように、①-C：FRP床版側支間中央位置のFRPセル中央ライン，①-W：FRP床版側支間中央位置のFRP腹板上ライン，②-C：RC床版側支間中央位置のFRPセル中央ライン，②-W：RC床版側支間中央位

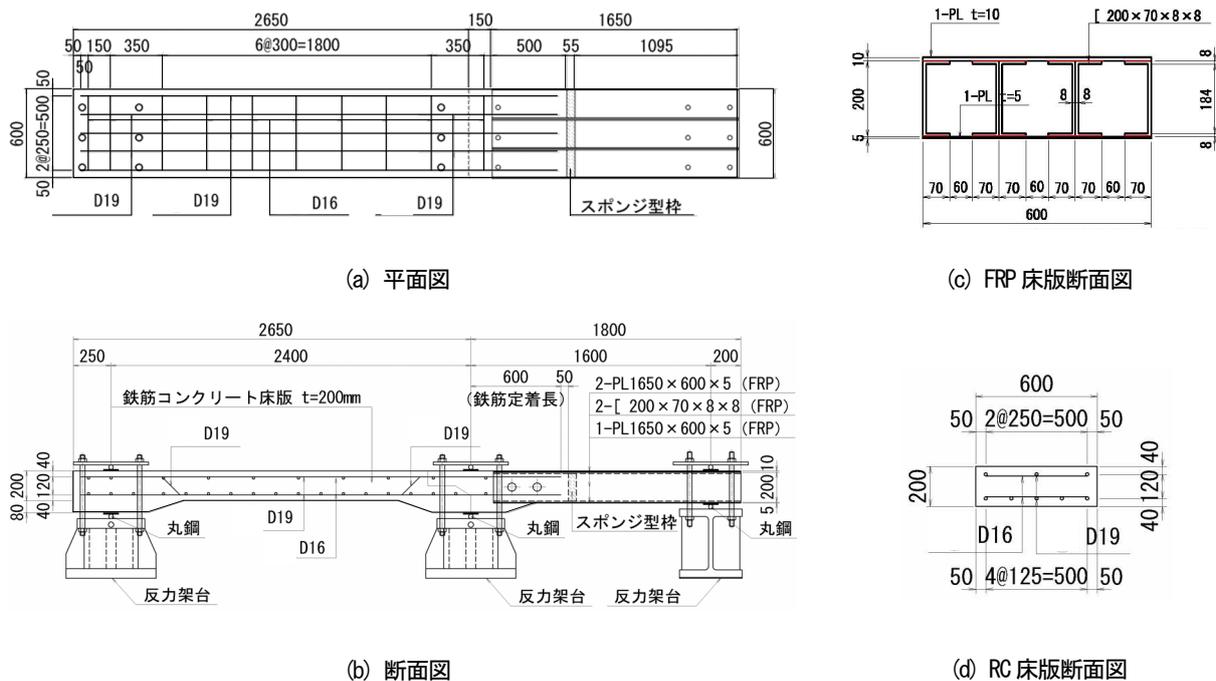


図-5 供試体形状・寸法

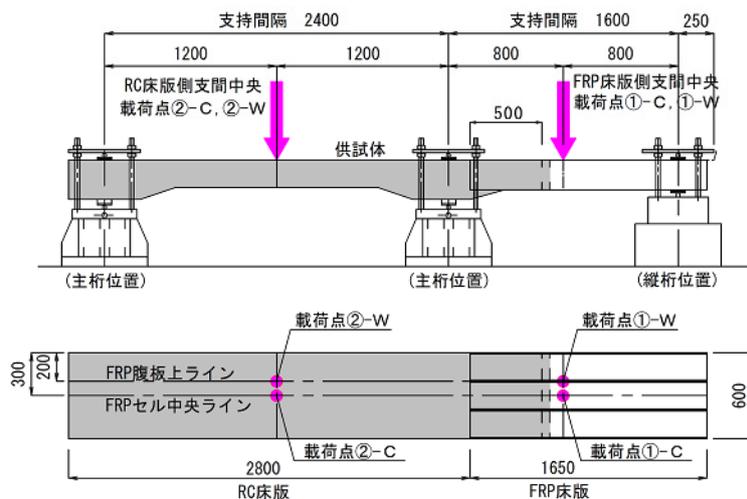


図-6 荷重位置

置のFRP腹板上ラインの4箇所とした。荷重荷重はT荷重を参考に100kNとした。

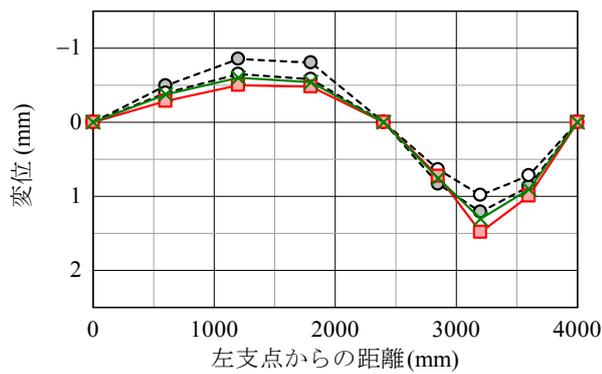
b) 終局限界に関する荷重試験

本試験では、要素供試体の終局耐力や破壊性状を確認する。荷重位置は、FRP床版側支間中央位置のFRPセル中央ライン（図-6中、①-C）の1箇所とし、油圧ジャッキ（最大荷重1000kN）を用いて破壊に至るまで荷重を増加させた。

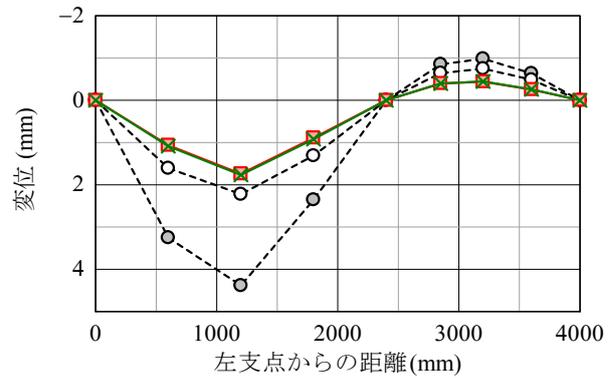
4. 要素試験結果

(1) 弾性範囲に関する荷重試験

図-7に、荷重100kN時における下面変位、上面応力および下面応力の支間方向の分布を示す。計測値は、供試体の中心線（中央セル）における値であり、支間方向のひずみにRC床版側では鉄筋のヤング係数 200kN/mm^2 、FRP側ではFRPのヤング係数 30kN/mm^2 を掛け合わせた値としている。図中には、引張側のコンクリート断面を無視した場合と全断面有効とした場合に関するフレーム解析の結果も併せて示している。解析条件として、RC床版ではコンクリートおよび鉄筋の弾性係数をそれぞれ 19kN/mm^2 、 200kN/mm^2 とし、荷重強度を 2.940kN/m とした。FRP材は弾性係数を 30kN/mm^2 、

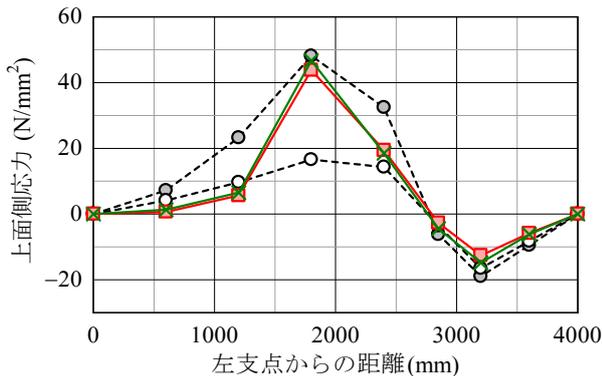


(a-1) FRP側載荷 (①-C, ①-W)

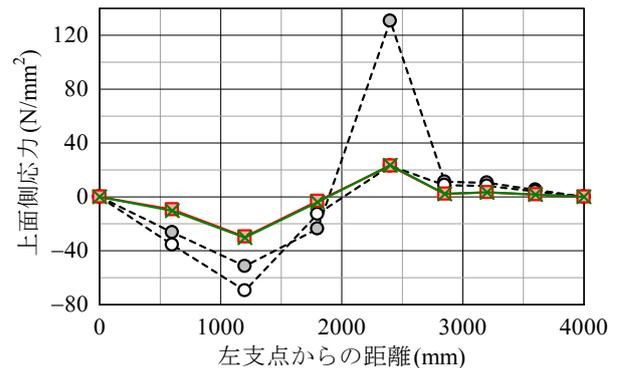


(a-2) RC側載荷 (②-C, ②-W)

(a) 変位分布

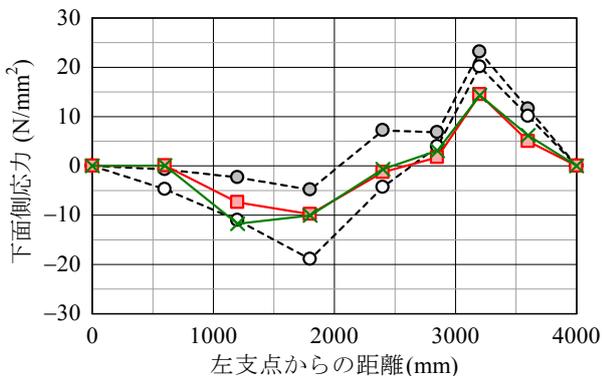


(b-1) FRP側載荷 (①-C, ①-W)

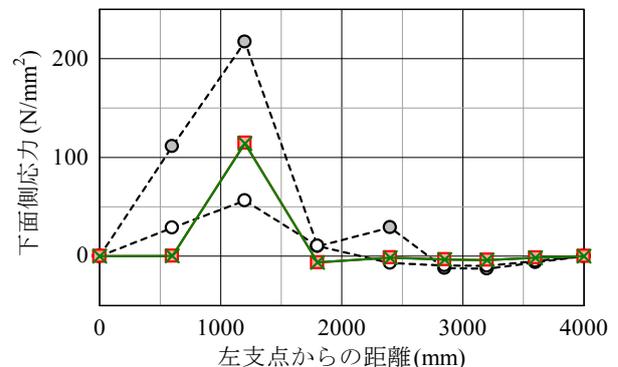


(b-2) RC側載荷 (②-C, ②-W)

(b) 上面側応力分布



(c-1) FRP側載荷 (①-C, ①-W)



(c-2) RC側載荷 (②-C, ②-W)

(c) 下面側応力分布

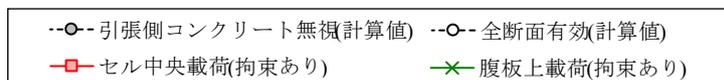


図-7 変位および応力の分布 (100kN 載荷時)

荷重強度を0.466kN/mとした。

実験により得られた変位および応力の分布は、解析により得られた分布と同様の形状であり、理論計算により基本的な挙動を概ね再現できている。100kNの載荷によりFRP拡幅部に生じる応力度は、最大で20N/mm²程度であり、FRPの材料強度に対して十分に余裕があることが確認された。RC拡幅部においては、

実験値がひび割れ考慮の有無による2ケースの解析値の中間的な値を示す傾向が見受けられるが、RC床版側全体に渡ってひび割れが発生していることから、ややひび割れの影響を受けた応力性状であると言える。

また、図-7においては、載荷位置をFRP腹板上としたときの変位および応力の分布も示しているが、FRP腹板上に載荷した場合の変位および応力の計測値はセ

ル中央に荷重した場合とほぼ同値であり、荷重位置を供試体幅方向に移動させFRPセル連結部に荷重を作用させたことによる影響は見られていない。本試験では、供試体幅600mmに対して荷重板幅が500mmであり、荷重板が3つのFRPセルを跨ぐために荷重を分散した影響があるが、チャンネル材の上下に接着したFRP板材で一体化することで各FRPセルが十分に連結されていたと考えられる。

図-8は、①-C荷重時および①-W荷重時における荷重点直下のFRP断面のひずみ分布である。図より、FRP腹板上に荷重した①-Wでは、各セルの中央上側（図中計測点②および⑤の上側）においてピークを持つひずみ分布となっている。一方、FRPセル中央に荷重した①-Cの上板材および下板材のひずみでは、若干偏心荷重による傾きは見られるものの、緩やかなひずみ分布となっている。

(2) 終局限界に関する荷重試験

終局限界に関する荷重試験で計測された荷重位置における荷重-変位関係を図-9に、試験終了時の供試体破壊状況を写真-2に示す。荷重が390.0kNに達したときにFRP床版上板材の剥離とともに一度荷重の低下が生じるが、それ以前では弾性的な挙動を示している。その後、再び荷重は増加したが、荷重409.9kNでは接合部においてFRP床版下板材が剥離するとともに、接合部でRC床版のハンチの剥落が生じた。この時、変位が急増し荷重が376kNまで低下したことから、終局に至ったものとして荷重を終了した。破壊箇所は、FRP材の接着箇所であり、FRP材の座屈などの材料破壊は生じていなかった。また、終局時におけるRC床版とFRP床版の接合部の開口量は0.03~0.04mmであり、既設RC床版とFRP拡幅部との接合部は健全な状態であり、十分な一体性を有していることが確認された（写真-3）。

5. まとめ

本研究では、既設橋梁の幅員が狭小であることに起因して発生する交通障害や安全性の低下に対する対策として、FRPを用いた既設RC床版の拡幅工法を示し、静的荷重試験に基づき、応力性状や終局耐力、破壊性状等の把握を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 本研究で示す床版拡幅構造は、道路橋示方書や道路構造令等の規準類および北海道内橋梁における幅員の現状に基づき、拡幅量や断面寸法等を決定した。
- 2) 既設RC床版とFRP拡幅部との接合は、現場での施

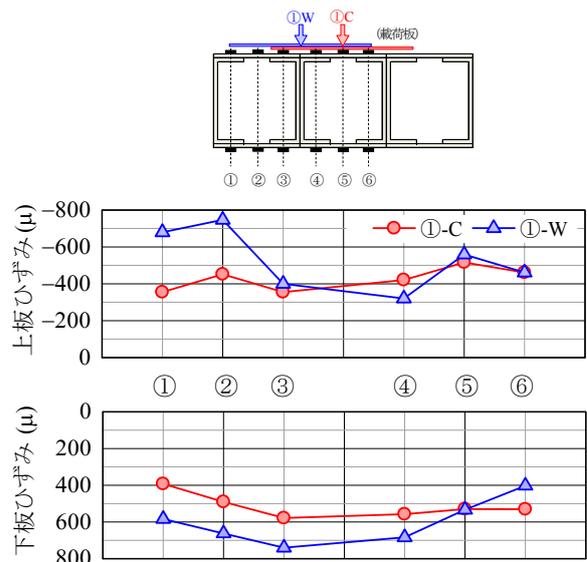


図-8 FRP 材断面のひずみ分布（荷重点直下の断面）

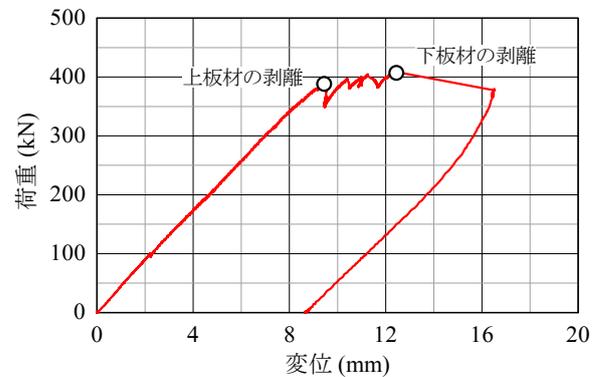


図-9 荷重-変位関係

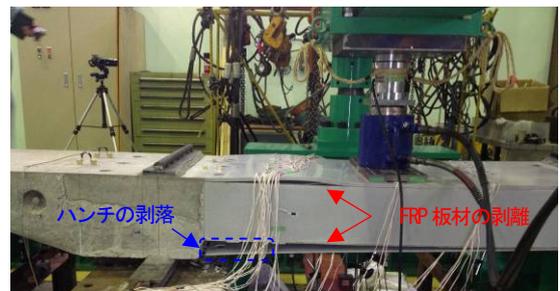
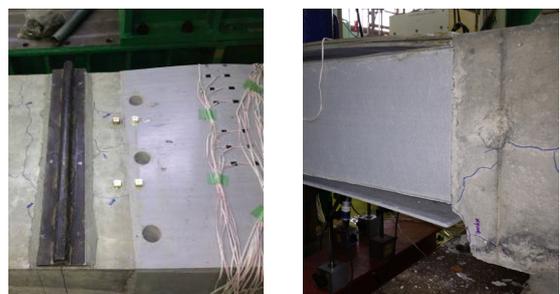


写真-2 供試体の破壊状況



(a) 上面 (b) 側面

写真-3 接合部の損傷状況

工性や既設構造への影響等について検討した結果、既設床版の鉄筋をFRP床版内で定着させる曲げ伝達方式とした。

- 3) 要素試験結果において、100kNの荷重によってFRPに発生する応力は、FRPの材料強度を大きく下回る。また、既設RC床版とFRP拡幅部との接合およびFRPセル同士の連結が十分に確保されており、フレーム解析により挙動を概ね再現できるものであった。
- 4) 終局限界に関する荷重試験において、供試体の最終的な破壊は、FRP床版におけるチャンネル材と上下板材の剥離によるものであり、最大荷重は410kN程度であった。また、終局状態においても接合部の明確な開口は生じておらず、採用した接合構造により既設RC床版とFRP拡幅床版の一体性が十分に確保されることを確認した。

今後の課題として、要素供試体あるいは実物大床版供試体を用いた疲労荷重試験による接合部の疲労耐久

性の検証や、地覆部および車両防護柵との接合方法の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 山田雅義, 武本頼和: アルミ床版による新加古川大橋拡幅について, 第1回アルミニウム合金構造物実現のためのシンポジウム, pp.26-27, 2004.
- 2) 北山暢彦, 宇野名右衛門: 「伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋」の設計・製作・架設, 石川島播磨技報 2001 橋梁特集号, pp.82-86, 2001.
- 3) 久保圭吾, 西田正人, 河西龍彦, 筒井秀樹, 松井繁之: 棧橋構造に適用したFRP合成床版の設計と施工, 第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.315-320, 2006.
- 4) 日本道路協会: 道路構造令の解説と運用, 2004.
- 5) 北海道開発局: 北海道における道路構造の考え方(案), 2005.
- 6) 長屋優子, 村越潤, 新井恵一: FRP部材の接合部の強度特性に関する基礎検討, 土木学会第59回年次学術講演会, 2004.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説II鋼橋編, 2002.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE WIDENING METHOD OF RC SLABS USING FRP

Ko KAKUMA, Hiroaki NISHI, Shinya OKADA,
Shinya OMOTE and Shigeyuki MATSUI

On highway bridges in snowy regions, the narrowing of road width due to snow bank on shoulders affects safety and amenity of running and walking, then, it is necessary to widen existing slabs and secure required road width. The objectives of this study is to present the widening method of existing RC slabs for snowy regions using FRP with light weight and high corrosion resistance and to investigate fundamental behaviors by static loading test.

As a result of test, defined opening between existing slab and FRP section could not be observed at failure, and it was shown that proposed widening structures provides sufficient load carrying properties.