

FRP 歩道拡幅床版の高欄基部耐力に関する研究

Study on structural strength of the connection part of guard fence on FRP sidewalk expanded from highway bridges

(独)土木研究所寒地土木研究所 ○正 員 角間 恒 (Ko Kakuma)
 (独)土木研究所寒地土木研究所 正 員 岡田慎哉 (Shinya Okada)
 宮地エンジニアリング(株) 正 員 久保圭吾 (Keigo Kubo)
 大阪大学 フェロー 松井繁之 (Shigeyuki Matsui)

1. はじめに

歩道および歩行者自転車道では、道路構造令により確保すべき幅員が規定されている。ところが、道路橋に関して言えば、幅員設計が旧来の道路構造令に基づくことや架設当初から交通環境が大きく変化することにより、必要幅員が確保されていない橋梁が数多く存在しており、歩道拡幅による使用者の安全性向上が求められている。

橋梁の歩道を拡幅する場合、死荷重を軽減するために鋼製の歩道を既設橋梁に添架することが多いが、上部工重量の増加により既設桁の補強や下部工の補強等が必要となることがある。また、海岸部や凍結防止剤を散布する積雪寒冷地では、塩害による鋼材の腐食も問題となる。

こうした背景から、著者らは、歩道部の軽量化および高耐食化が期待できるガラス繊維強化プラスチック (Glass fiber reinforced plastics: 以下、FRP) を用いた道路橋の歩道拡幅構造を考案し、各種載荷実験により耐荷性能の評価を行ってきた^{1) 2)}。本論文では、考案した拡幅構造の設計手法を検討することを目的に、一連の実験のうち、歩行者自転車用柵着部 (以下、高欄基部) の耐荷性能を確認した水平荷重載荷実験²⁾について、3次元 FEM 解析により高欄基部の応力性状の評価を行い、耐力設計手法を検討した結果を報告する。

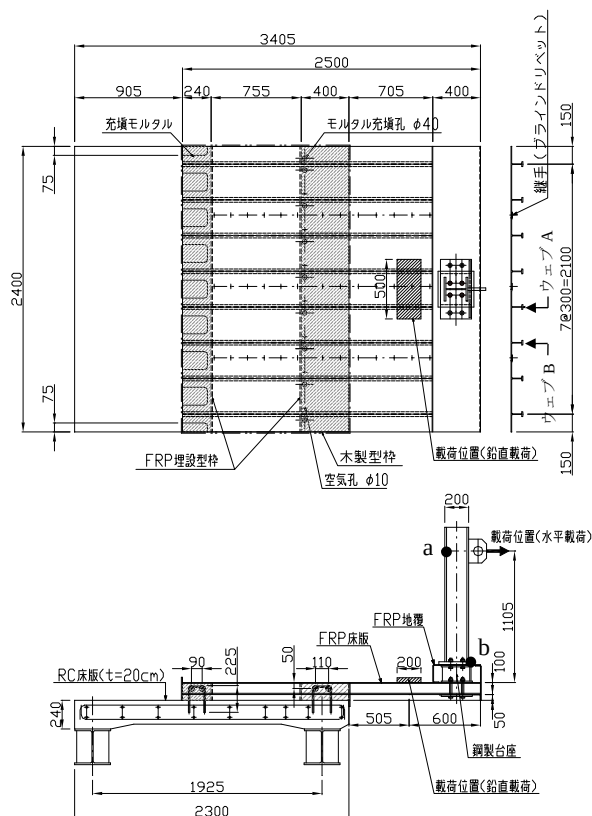
2. 水平荷重載荷実験²⁾

本実験は、高欄基部の耐荷性能を検討するため、実物大床版供試体を製作し、高欄頂部への水平荷重載荷に対する最大荷重や破壊形態を確認したものである。

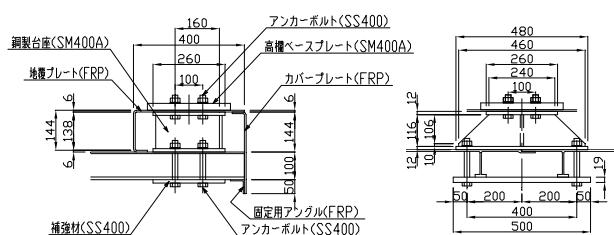
図-1 に実験供試体を示す。FRP 床版には π 形断面の GFRP 引抜成形材 (以下、FRP 成形材) を用いており、本供試体では、全長 2,500mm、幅 600mm の FRP 成形材を橋軸方向に 4 枚並べ、継手部をエポキシ樹脂接着剤とブラインドリベットで接合した。FRP 床版の固定は、RC 床版に設置したアンカーボルトと FRP 床版内に流し込む充填モルタルとの定着により一体化を図った。高欄基部は、FRP 成形材で施工した地覆の内側に鋼製台座を設置し、これと補強板で FRP 床版を挟み込む構造とした。ただし、高欄支柱には載荷の容易さを考慮して H 鋼を使用した。

材料試験から得られた本供試体の FRP 成形材に関する基本的な材料特性を表-1 および表-2 に示す。また、床版コンクリートの圧縮強度と弾性係数は、実験時材令 (58 日) でそれぞれ 35.9N/mm²、28.4kN/mm²であった。

水平荷重は、高欄頂部 (FRP 床版上面から 1,150mm



(a) 供試体全体図



(b) 高欄基部詳細図

図-1 供試体図

の位置) に設置したワイヤーロープをチェーンブロックで引き込む方法で載荷し、破壊に至るまで荷重を漸増させた。なお、高欄基部の曲げモーメントが歩行者自転車用柵の設計水平荷重 2,500N/m (種別 SP)³⁾ によるモーメントと等価となるときの荷重 5.7kN を本実験における設計荷重とした。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

図-2 に、解析モデルの要素分割図を示す。モデルの作成においては、FRP 床版張出部（張出部先端から 1,105mm）のみを考慮し、RC 床版側の端部を固定端として取り扱った。また、供試体および荷重の対称性を考慮して 1/2 モデルを使用した。高欄基部の応力性状を検討するため、高欄支柱、補強板、鋼製台座、アンカーボルトおよび地覆プレートも詳細にモデル化しており、その際、それぞれの境界部は完全剛結とせず、接触時の摩擦を考慮することで過度に変形を拘束しないようにした。

なお、解析には、FEM 解析の汎用コードである MSC.Marc(ver.2010.2.0)を使用した。

3.2 材料特性

FRP 成形材は直交異方性材料としてモデル化した。また、材料破壊の判定を行うため、複合材料の破壊規準である Hoffman 則⁴⁾による破壊指数を算出した。

$$F = \frac{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2}{\sigma_{11}^{TU} \sigma_{11}^{CU}} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{22}^{TU} \sigma_{22}^{CU}} + \frac{\sigma_{11}^{CU} - \sigma_{11}^{TU}}{\sigma_{11}^{TU} \sigma_{11}^{CU}} \sigma_1 + \frac{\sigma_{22}^{CU} - \sigma_{22}^{TU}}{\sigma_{22}^{TU} \sigma_{22}^{CU}} \sigma_2 + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{12}^{U2}} \quad (1)$$

ここで、 F =破壊指数、 σ_1, σ_2 =直応力、 τ_{12} =面内せん断応力、 $\sigma_{11}^{TU}, \sigma_{22}^{TU}$ =引張強度、 $\sigma_{11}^{CU}, \sigma_{22}^{CU}$ =圧縮強度、 τ_{12}^{U2} =面内せん断強度であり、添え字の 1 は繊維方向、2 は繊維直角方向を表す。材料特性には表-1 および表-2 の値を使用し、材料試験を実施していないパラメータについては文献⁵⁾やメーカー試験値等から仮定した。

高欄、鋼製台座、補強板、アンカーボルトは、弾性係数 200kN/mm²、ポアソン比 0.3 の弾性体として扱った。

4. 結果および考察

4.1 荷重-変位関係

図-3 に、実験および解析により得られた荷重と水平変位の関係を示す。水平変位の計測位置は、図-1a(a) に示す荷重位置（点 a）および地覆頂部（点 b）である。実験では、荷重 6kN 辺りから剛性の低下が見られ、荷重 12.1kN で荷重の低下に至った。最大荷重 12.1kN は設計荷重 5.7kN の約 2 倍であり、本高欄基部構造は設計水平荷重に対して十分な耐力を有するものであった。

解析では、実験において非線形性が見られるようになる荷重 6kN 程度まで実験結果とよく一致しており、高欄基部の詳細なモデル化により水平荷重作用時の基礎的な挙動の再現を再現できると判断できる。なお、実験における非線形挙動は、FRP 成形材のせん断変形の非線形性や微視的破壊の進行によるものであると推察される。

4.2 破壊性状

写真-1 に、実験終了時におけるウェブ A（図-1 参照）の損傷状況を示す。FRP 床版の最終的な破壊は、鋼製台座直下でウェブ上縁が圧縮せん断破壊する形態であり、これに伴って上フランジとウェブの境界部に沿ってき裂が生じていた。破壊時には鋼製台座と補強板を連結するボルトに緩みが生じていたが、破壊に至るまでに水平変位の急変が見られていないことから、破壊までは

表-1 FRP 成形材繊維方向の材料試験結果

引張強度*1 N/mm ²	圧縮強度*2 N/mm ²	引張弾性率*1 kN/mm ²
409	313	35

（試験方法：*1=JIS K 7054、*2=JIS K 7056）

表-2 FRP 成形材ウェブ繊維直角方向の圧縮試験結果

部位	強度 N/mm ²	弾性率 kN/mm ²	試験片の 採取位置
a. 上フランジ側	114.2	18.8	
b. ウェブ中央	101.8	13.4	
c. 下フランジ側	101.4	12.0	

（試験方法：JIS K 6911）

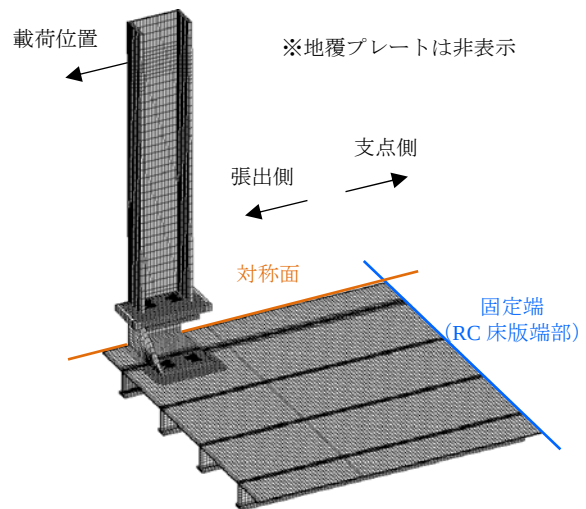


図-2 要素分割図

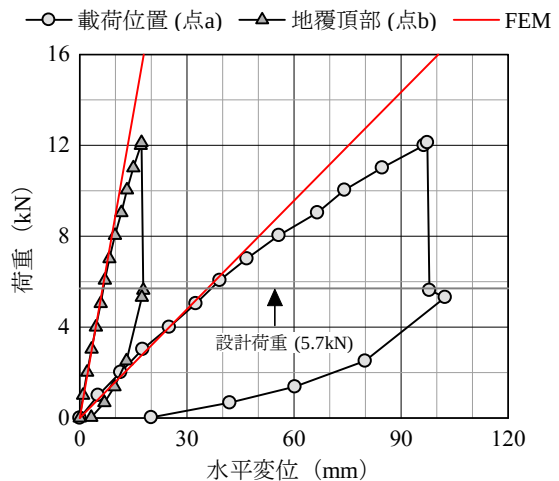


図-3 荷重と変位の関係

FRP 床版と鋼製台座の間で滑りは生じていなかったと考えられる。目視調査では、その他の箇所に損傷は見られなかった。

図-4 に、解析より得られた高欄基部近傍の FRP ウェブにおける Hoffman の破壊指数コンター図を示す。絶対値が 1 を超える箇所で FRP 成形材の材料破壊が生じていることを表す。解析では、荷重 6kN のときに台座プレートと FRP 床版の接触箇所で最初の材料破壊が



写真-1 ウェブ A の損傷状況

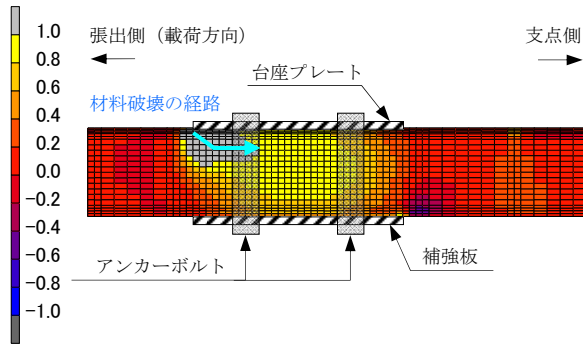


図-4 ウェブ A の破壊指数コンター図 (12kN 時)

生じた後、支点側に向かって破壊指数が分布していく破壊性状となった。

図-5 および図-6 に、荷重 12kN 時のウェブ A および B の鉛直応力および面内せん断応力のコンター図を示す。図-5 より、ウェブ A においては、高欄基部の曲げモーメントによる台座プレートおよび補強板の支圧応力によって台座プレート端部および補強板端部でウェブに局所的な圧縮応力が作用する様子が確認される。また、図-6 からは、台座プレートの接触位置から始点側に向かってウェブの面内せん断応力が大きくなる傾向が見られる。ウェブ B においては、台座プレートおよび補強板の設置範囲内で鉛直方向圧縮応力と面内せん断応力がともにウェブ A と比較して無視できるほど小さく、基部モーメントに対しては中央 2 本以外のウェブが荷重分担に寄与しないものと考えられる。

図-7 には、FEM 解析から得られたウェブ A の材料破壊の進展経路上の 2 点において、破壊指数を曲げ応力成分とせん断応力成分に分解した結果を示す。ここで、曲げ応力成分は式(1)の右辺第 1~4 項の和、せん断応力成分は同第 5 項の値である。図より、材料破壊の起点となる台座プレート端部 (図中の点 a) では破壊指数の 86% を曲げ応力成分が占める一方で、材料破壊の経路上の点 b ではほとんどをせん断応力成分が占める。このことから、高欄基部の破壊は局所的なウェブの圧壊が生じた後に支点側に向かってせん断破壊が発生する形態であり、実験で観察された破壊形態を再現するものであった。

4.3 耐力設計手法の検討

FEM 解析により高欄基部の耐荷挙動を概ね再現できたことから、本節では、実験および解析より確認されたウェブの圧壊による破壊形態に着目して、高欄基部の応力性状に基づき耐力設計の考え方を検討した。

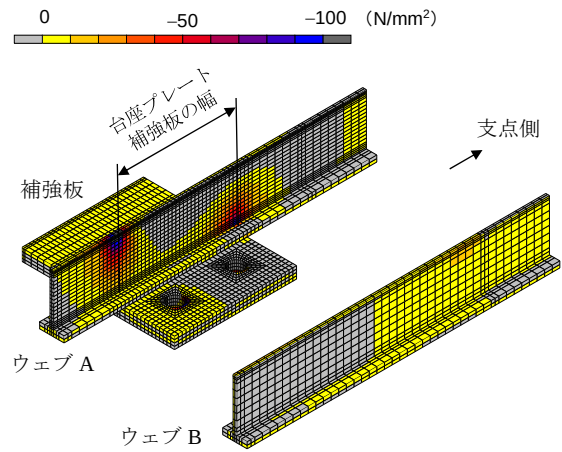


図-5 ウェブの鉛直応力コンター図 (12kN 時)

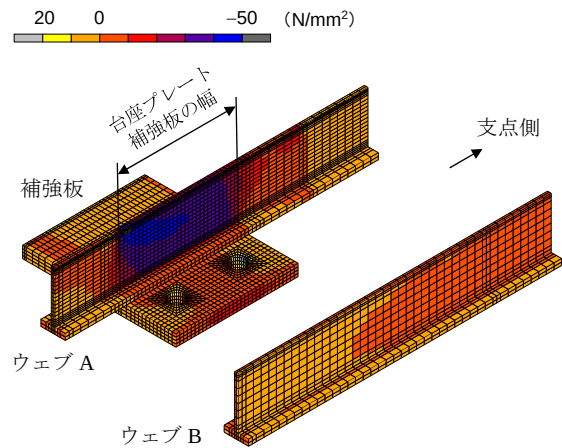


図-6 ウェブの面内せん断応力コンター図 (12kN 時)

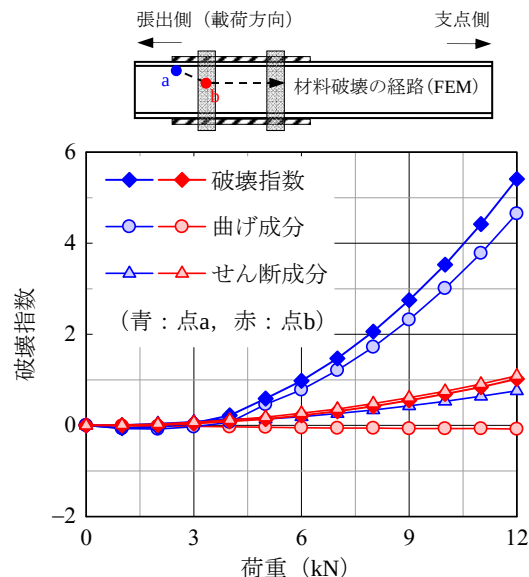
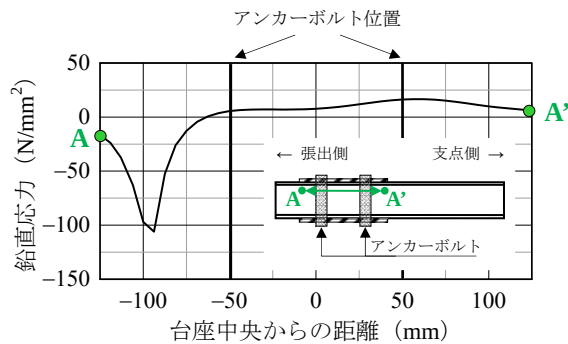
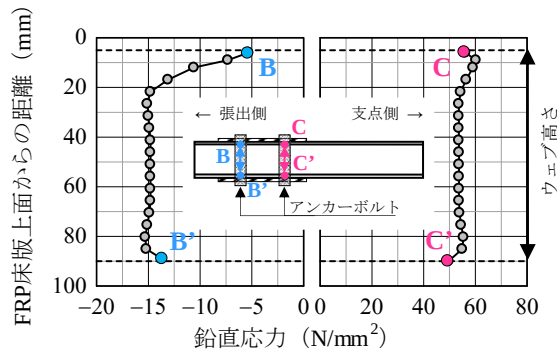


図-7 応力成分の比較 (水平載荷)

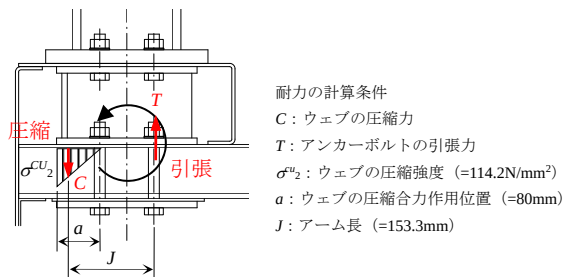
図-8 に、FEM 解析から得られた荷重 12kN 時のウェブ A の鉛直応力ならびにアンカーボルトの軸応力分布を示す。ここで、ウェブの応力は材料破壊の起点となるウェブ上端 (図中 A-A') を、アンカーボルトは断面の中心 (図中 B-B', C-C') を着目線とした。図-8(a)において、圧縮応力となる範囲で横軸とグラフに囲まれ



(a) FRP ウェブの鉛直応力分布



(b) アンカーボルトの軸応力分布



(c) 荷重分担の模式図

図-8 高欄基部の応力性状 (FEM 解析、12kN 時)

面積にウェブの板厚を掛け合わせた値をウェブが負担する圧縮力 C_{web} 、図-8(b)におけるアンカーボルトの応力(平均値)に断面積を掛け合わせた値をアンカーボルトが負担する圧縮力 C_{anchor} とすると、圧縮力の比は $1/4.66 (=C_{anchor}/C_{web})$ となり、圧縮力の 82% をウェブが負担する結果となった。このことより、高欄基部の曲げモーメントによる圧縮力はウェブのみで受け持つと簡略化でき、ウェブの圧壊に対する耐力を次式により簡便に計算できると考えられる(図-8(c))。

$$P_{max} = \frac{C \times J}{H_0} \quad (2)$$

ここで、 P_{max} =計算耐力、 C =ウェブが負担する圧縮力、 J =モーメントアーム長、 H_0 =荷重高さである。

以上に基づき、本実験供試体の高欄基部耐力を計算し、実験結果と比較した。なお、ウェブの圧縮力 C については、図-8(a)に示すウェブの応力分布において、張出側のアンカーボルト位置付近で応力の符号が反転していることから、部材軸方向の応力分担範囲を張出側の台座プレート端部からアンカーボルト位置までの 80mm の

範囲とし、前述のようにウェブ 2 本で圧縮力に抵抗するとして圧縮合力とその作用位置を決定した。アーム長 J については、アンカー方式の橋梁用防護柵に関する定着部の強度照査方法³⁾に基づき、アンカーボルトのみで引張力を分担すると仮定してアーム長を求めた。また、計算に用いるウェブの圧縮強度はウェブ上端での繊維直角方向圧縮強度 114.2N/mm^2 (表-2 参照)とした。

その結果、得られた高欄基部耐力は 7.6kN であり、計算耐力が安全側の耐力を与え、その耐力比は $1.59 (=7.6/12.1)$ であった。実際にはアンカーボルトの他に地覆による荷重分配も考えられることから、計算結果が耐力をやや過大に見込む傾向があるが、基部の曲げモーメントに対する各ウェブの荷重分担寄与率ならびにウェブとアンカーボルトの圧縮力分担率を適切に評価することで、ウェブの圧壊に関して、概ね設計時の安全率を考慮した耐力の設計が可能であると推察される。

ただし、上記は一つの実験ケース・破壊形態に着目して設計手法を検討した結果であり、荷重分担性状に関していくつかの仮定条件を含んだものである。したがって、今後は追加実験による荷重分担性状の検証や他の破壊形態(例えば、アンカーボルトの降伏)も想定に入れた耐力設計手法の検討を要するものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、FRP を用いた道路橋歩道拡幅床版について、高欄基部の耐荷性能を確認した水平荷重載荷実験に関する 3 次元 FEM 解析を実施し、応力性状の詳細評価ならびにウェブの圧壊に着目した高欄基部耐力の設計手法の検討を行った。得られた知見を以下に記す。

- 1) 高欄基部を詳細にモデル化した FEM 解析により、水平荷重時の荷重-変位関係ならびに破壊形態を大略再現できる。
- 2) 曲げモーメントに対する荷重分担性状を適切に評価することで、設計時の安全率を見込んだウェブ圧壊耐力の計算が可能であると示唆される。

今後は、各種要素試験等を通して設計・施工方法に関する検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 角間恒、岡田慎哉、久保圭吾、松井繁之：FRP を用いた歩道拡幅床版の耐荷性能について、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、pp.845-846、2013。
- 2) 久保圭吾、角間恒、岡田慎哉、松井繁之：FRP を用いた歩道拡幅床版における高欄基部の耐荷性能、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、pp.847-848、2013。
- 3) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説、2008。
- 4) Hoffman, O. : The Brittle Strength of Orthotropic Materials、Journal of Composite Materials、Vol.1、No.2、pp.200-206、1967。
- 5) 土木研究所：FRP を用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書(II)ー引抜成形 GFRP 材を用いた車道用床版の輪荷重走行試験一、2007。