

GFRP部材の接合方法

Joining Method of GFRP Member

張 惟敦* 山本 尚樹** 北山 暢彦*** 佐伯 彰一**** 山城 和男*****

Iton CHOU, Naoki YAMAMOTO, Nobuhiko KITAYAMA, Shoichi SAEKI, Kazuo YAMASHIRO

ABSTRACT This paper describes a part of experimental and analytical results on the evaluation of the structural soundness in the GFRP pedestrian bridge constructed in Okinawa prefecture. Experimental results on the strength evaluation of bolt joining in the truss structure under the pedestrian deck are introduced. Also, the analytical results based on FEM on the behavior of main girder joint after pre-stressed are described. Future works are proposed in the last part of the paper.

Key Words: GFRP, 接合方法, 歩道橋, ボルト継手, 強度評価
Glass Fiber Reinforced Plastics, joining method, pedestrian bridge,
bolt joint, strength evaluation

1. 緒言

GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics: ガラス繊維強化樹脂) を適用した構造物の場合でも鋼構造物と同様に、接合方法が非常に重要な技術となる。特に、橋梁などの大型構造物になるほどその重要性は増し、接合構造によって構造物の成否が決まると言っても過言ではない。しかし、残念ながら現状では、厚肉GFRP部材を橋梁などの大型構造物に適用する際の接合方法に関して、系統のかつ組織的に研究された例は見当たらない。

従来、GFRPが適用されてきた一般産業分野では、部材間の接合は接着接合、あるいはφ4.8程度の小口径リベットによる機械的接合がほとんどである。FRP引抜き材に関しては、国内でJIS^[1]とはなっているが、その接合方法に関して、簡易的な技術マニュアル^[2]が作成されている

程度である。また、FRP設計便覧としてたとえば文献[3]～[5]があるが、それほど多くはない。一方、欧米では、引抜き材を適用した構造に関する設計マニュアルとして、たとえば文献[6]および文献[7]がある。また、引抜き材を使用したボルト接合構造の試験評価や解析評価に関する研究も多く^[8-16]、中でもMatthewsら^[16]は、FRPの機械的接合構造や接着接合構造に関する実験および解析的研究を総合的にまとめている。他方、航空機分野では、大型構造物であるにもかかわらず軽量化要求が大きいため、φ6.4程度の小口径リベットによる機械的接合と接着接合とが主流である^[17,18]。FRP部材のボルト接合に関する研究においても、組物複合材料に関するもの^[19]や2軸疲労に関するもの^[20]など、複合材料学会を中心に研究がなされてきているが、これまでの研究では、厚肉GFRP部材を大口径ボルトで接合する方法に関するものは皆無である。

GFRPはCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics: 炭素繊維強化樹脂) と異なり、比較的価格も安く、一般産業用途で適用されていることが多い。特に1990年頃から、土木・建築分野への適用^[21-23]が図られているが、最近では、橋梁分野への適用を狙った研究^[24-29]がなされてきている。これらは、従来の鉄鋼材料やコンクリートに比べてGFRPが軽量であることや耐腐食性に優れていることを利用し、応急車道橋や歩道橋の開発を

* 工博 石川島播磨重工(株) 基盤技術研究所
課長 (〒135-8732 東京都江東区豊洲 3-1-15)

** 石川島播磨重工(株) 基盤技術研究所
(〒135-8732 東京都江東区豊洲 3-1-15)

*** 石川島播磨重工(株) 橋梁事業部
(〒135-8322 東京都江東区毛利 1-19-10)

**** 工博(財) 土木研究センター 理事
(〒300-2624 茨城県つくば市西沢 2-2)

***** 沖縄県土木建築部中部土木事務所 課長
(〒901-2221 沖縄県宜野湾市伊佐 3-4-1)

対象としている。この流れの中で、本年4月には、主構造部材にFRPを適用する歩道橋としては国内初となる沖縄県伊平平良川線ロードパーク連絡歩道橋^[30-32]が竣工している。

そこで、本報告では、このFRP製歩道橋（橋長37.760m、有効幅員3.5mの2径間連続桁橋）を開発するにあたって実施した構造強度試験のうち、床組みトラス構造におけるボルト接合強度確認試験^[33,34]および主桁継手部での挙動を確認するために行ったFEM解析^[35,36]の結果を一部紹介する。

2. ボルト接合強度確認試験

FRP製歩道橋の断面図を図1に、床組みトラス構造外観を図2に示す。対傾構はGFRP引抜きチャンネル材C103材（103×51.5×9×9）およびC200材（200×70×7×10）からなり、ガセットプレート（GFRP製）を挟んで抱き合わせ、SUS製M22ボルトで締結した構造となっている。

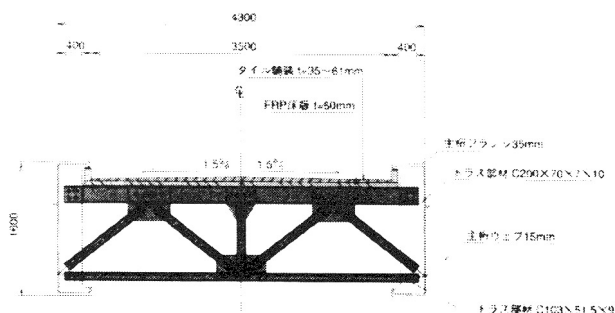


図1 FRP製歩道橋断面概要図

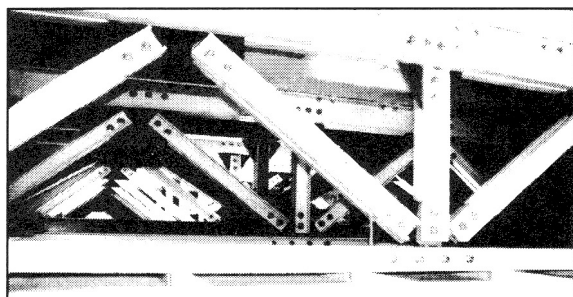


図2 FRP製歩道橋の床組みトラス構造外観

2. 1 供試材および試験体

試験体は対傾構斜材を模擬した1/1スケールのもので、試験体両端にあるガセットプレート部を鋼製プレートで補強し、引張／圧縮荷重を加えても端部で破壊が生じない形状とした。パラメータとしては、荷重負荷形態（引張／圧縮）、使用チャンネル部材（C103材／C200材）、ボルト接合

方法（接着併用／接着無し）を取り上げ、合計8種類の試験体とした。試験体数は各種類につき3体とし、ボルト縁端距離は50mm、ボルト中心間隔は80mmで1水準とした。C103材の場合にはボルト2本での締結、C200材の場合にはボルト4本（2列×2列）の締結となっている。なお、試験体は旭硝子マテックス（株）において製作した。

2. 2 試験方法

試験は（株）東京衡機製造所製600t構造物試験機を使用して実施した。試験実施状況の一例を図3に示す。

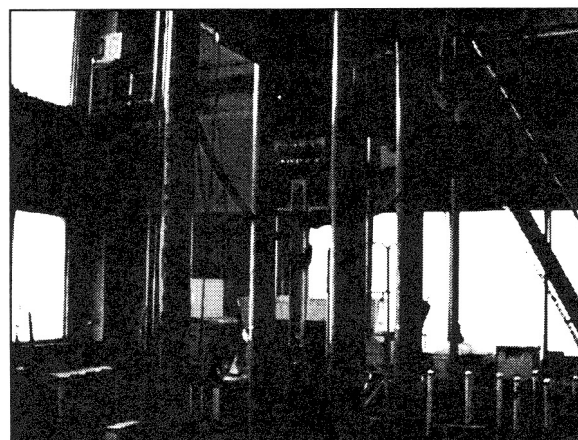


図3 ボルト接合強度確認試験実施状況

引張試験と圧縮試験とを実施したが、試験速度は両試験ともクロスヘッド速度一定（約2mm/min）とした。試験においては最大荷重値を取得し、最終破壊に至るまでの破壊モードについて観察を行った。

2. 3 試験結果および考察

試験結果を表1に示す。この結果から次のことがわかる。

- (1) 同一条件で引張強度と圧縮強度とを比較すると、C103材、C200材ともに圧縮強度の方が高く、C103材で約1.5倍、C200材で約1.1倍高い。
- (2) 同一条件であればC103材の圧縮強度を除き、接着を併用した方が最終強度は高くなる。接着による接合強度への寄与分は、C103材の場合引張で約13%、C200材では引張、圧縮とも約3%である。
- (3) 最大荷重値で評価すれば、設計荷重に対する安全率は、最低でも5以上ある。実橋では接着併用のボルト接合としているため、

表1 ボルト接合強度確認試験結果概要

試験体の種別	最大荷重 (kN)	設計荷重 (kN)	安全率
C103AT	199	30.6	6.5
C103NT	177	30.6	5.8
C103AC	274	30.6	9.0
C103NC	291	30.6	9.5
C200AT	608	87.8	6.9
C200NT	591	87.8	6.7
C200AC	657	87.8	7.5
C200NC	640	87.8	7.3

(注1) 試験体の種別の表記について

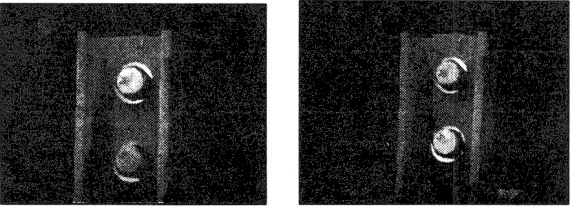
- (1) 使用引抜き材 C103 : C103材
C200 : C200材
- (2) 接着併用の有無 A : 接着あり
N : 接着なし
- (3) 試験形態 T : 引張
C : 圧縮

(注2) 最大荷重値は試験体3体の平均値

安全率は6以上あると言える。

次に、破壊モードに関して観察した結果の一例を図4および図5に示す。

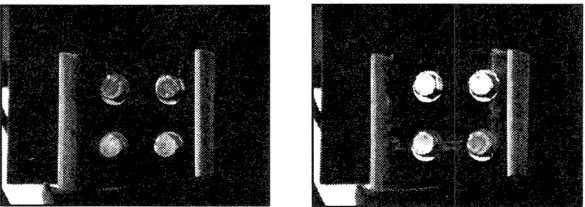
図4はC103材の引張荷重下での破壊状況を示している。この場合、端部でき裂が発生し、ボルト孔端部からの端抜けで最終的に破壊していることがわかる。



(a) 破壊初期 (b) 最終破壊

図4 C103材 引張試験における破壊モード例

図5はC200材の引張荷重下での破壊状況を示している。この場合には、ボルト孔縁端からほぼ同時にき裂が発生・進展していくことがわかる。



(a) 破壊初期 (b) 最終破壊

図5 C200材 引張試験における破壊モード例

F R P製歩道橋のボルト接合においては、M22ボルトに対してボルト孔径はボルト径と同一の

22mmとしている。このため、特にC200材の破壊モードに見られるように、4個のボルト孔縁端からき裂がほぼ同時に発生する結果となったものと考えられる。つまり、4本のボルトともに支圧効果を示していると言える。

小口径リベット（たとえばφ6.35）による接合においては、縁端距離eと孔径dとの比e/dに関して3以上、安全設計では4.5以上を推奨している⁹⁾。これと対比すると、今回のM22ボルト接合の場合e/d=2.27であり、先の推奨値は満たしていない。しかし、実験によって得られた結果から、設計荷重に対して強度余裕は十分にあると考えられる。M22のような大口径ボルトを適用する場合の設計指針や小口径リベットとの相違など、今後十分な検討をしていく必要があると考える。

3. 主桁継手部に関するF E M解析

F R P製歩道橋の主桁は3分割構造となっている。図6に主桁継手部の概要図を示す。

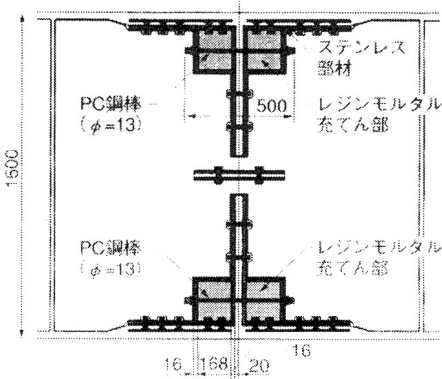


図6 主桁継手部の構造概要図^[31]

継手部では PC 鋼棒を利用し，ステンレス部材にプレストレスを与えて締め付ける構造としている．そこで，プレストレスによる荷重伝達経路を把握するため，FEM解析による検討を実施した．

3. 1 FEM解析モデルおよび解析方法

解析モデルを図7に示す．荷重伝達経路を明らかにしたい継手部近傍のGFRP，ステンレス部材およびレジンモルタル部にはソリッド要素を用い，継手部から離れたところではGFRP部材にシェル要素を用いた．ソリッド要素とシェル要素との結合部は，剛体要素を用いて軸力と曲げとが伝わるようにした．PC 鋼棒には軸力だけを伝えるトラス要素を用いている．また，フランジ部が離れる可能性を考慮し，下側フランジ部の接触面にはギャップ要素を使用して継手部が離れる現象も追えるようにした．

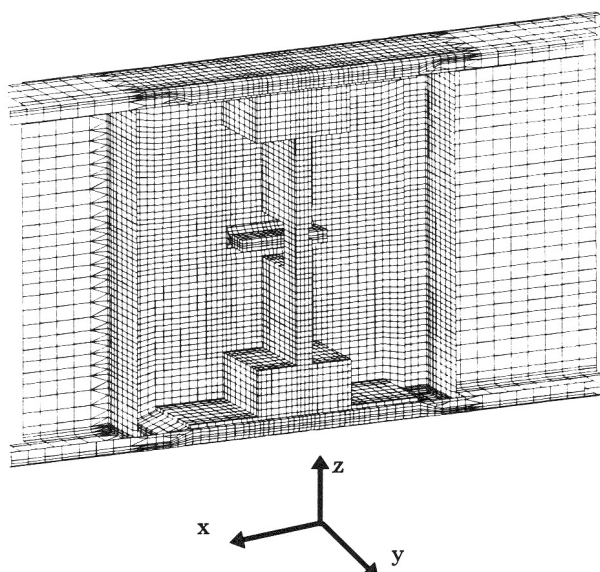


図7 主桁継手部FEM解析モデル

材料定数は，ステンレス部材，レジンモルタルおよびPC 鋼棒を等方性材料，GFRPを積層面内擬似等方性，積層面外（肉厚方向）異方性とし，次のように仮定している．

ステンレス部材：

ヤング率 206 GPa，ポアソン比 0.3

レジンモルタル：

ヤング率 2.5 GPa，ポアソン比 0.3

PC 鋼棒：

ヤング率 196 GPa，ポアソン比 0.3

GFRP：

面内ヤング率 13.7 GPa，主ポアソン比 0.235

面外ヤング率 5.9 GPa，面外ポアソン比 0.4
せん断弾性率 2.75 GPa

荷重としては，プレストレスとしてPC 鋼棒に592MPa（60.4kgf/mm²）を与えている．FEM解析コードは汎用解析コードABAQUSを用いた．

3. 2 解析結果および考察

図8および図9に592MPa（60.4kgf/mm²）のプレストレスをPC 鋼棒に与えたときの，継手部近傍GFRP部材とステンレス部材の橋軸方向応力分布図を示す．

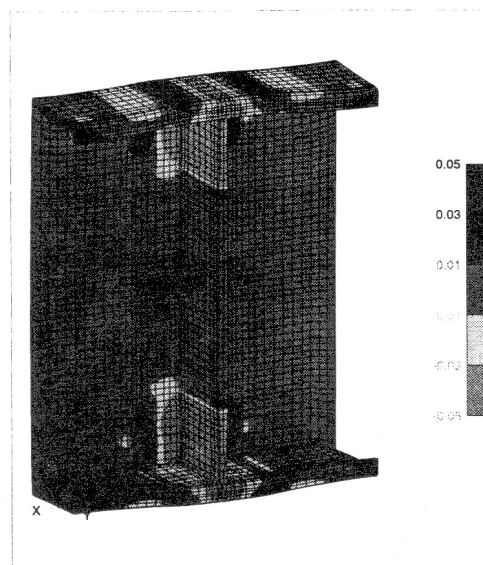


図8 GFRP部材における橋軸方向応力分布
(単位：kgf/mm²)

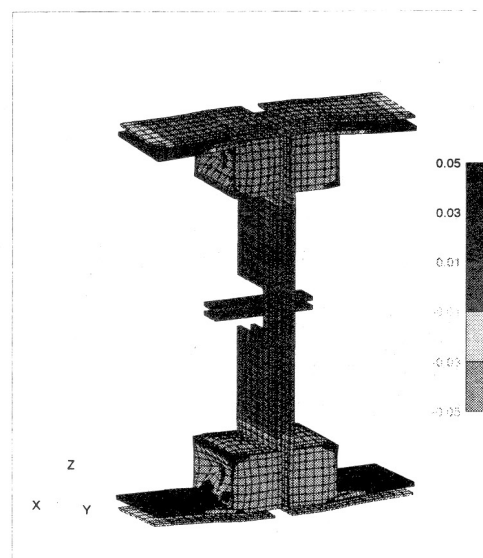


図9 ステンレス部材における橋軸方向応力分布
(単位：kgf/mm²)

図8から、PC 鋼棒の位置ではGFRP部材に高い圧縮応力が作用しているが、上下フランジの応力レベルは低いことがわかる。一方、図9から、PC 鋼棒に導入されたプレストレスは、まずレジンモルタルを覆っているステンレス部材に伝達され、GFRPフランジ裏面部のステンレスプレートを介し、GFRPフランジに埋め込まれたステンレスプレートに伝わっていく様子がわかる。

これから、主桁継手部での荷重伝達経路としては、PC 鋼棒 → レジンモルタル表面のステンレスプレート → GFRPフランジ裏面のステンレスプレート → GFRPフランジに埋め込まれたステンレスプレート → GFRPフランジの順であると言える。フランジ部では主としてステンレスプレートの方に荷重が伝達され、GFRP部分には低い応力でしか伝達されないのは、ステンレス部材に比べてGFRP部材のヤング率が非常に小さいことによると考えられる。

なお、プレストレス導入時点では、フランジ部接触面で継手部が離れることはない。

4. 結 言

FRP製歩道橋の開発に際して、実橋で採用したボルト接合構造に関する強度確認試験を実施し、ボルト接合部における最終強度と設計荷重に対する安全率およびき裂発生から最終破壊までの破壊モードが確認できた。

また、主桁継手部について、PC 鋼棒にプレストレスを導入したときのFEM解析を実施し、継手部における荷重伝達経路を明らかにした。

本報告で紹介した確認試験では、歩道橋を短期間で開発する制約から十分なパラメータスタディを行ってはいない。緒言で述べたように、従来のFRP構造物の機械的接合は小口径リベットが主流であるため、橋梁分野で適用されるような大口径ボルト（たとえばM22）による接合に関しては、適用経験が無いのと同時に設計で利用できるデータの蓄積も無いのが実状である。今後、橋梁分野でFRPを適用していくためには、このような接合強度データに関して、組織的な協力での蓄積と整備体制が不可欠であると考えられる。

なお、本報告では、沖縄県伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋の開発に際して実施した構造強度確認試験で得られた成果の一部を紹介している。GFRP部材の接合方法に関しては様々な方法があるため、なるべく多くの参考文献を載せた。今後の検討の参考となれば幸いである。

【謝辞】

本報告は、沖縄県伊計平良川線ロードパーク連

絡歩道橋の開発に際して実施した構造強度確認試験で得られた成果の一部である。沖縄県土木建築部中部土木事務所土木第一課の方々、建設省土木研究所 明嵐政司室長および関係各位に謝意を表する。

【参考文献】

- [1] JIS K 7015：繊維強化プラスチック引抜材
- [2] （社）強化プラスチック協会編：繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル
- [3] （社）強化プラスチック協会編：FRP構造設計便覧
- [4] 林毅編：複合材料工学，日科技連
- [5] 日本複合材料学会編：複合材料ハンドブック，日刊工業新聞社
- [6] 米国MMFG社（Morrison Molded Fiber Glass Company）Design Manual
- [7] The European Structural Polymeric Composites Group. : Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook
- [8] S. J. Smith, I. D. Parsons and K. D. Hjelmstad : An experimental study of the behavior of connections for pultruded GFRP I-beams and rectangular tubes, Composite Structures, 42, pp.281-290, 1998.
- [9] L. C. Bank and A. S. Mosallam : Design and Performance of Connections for Pultruded Frame Structures, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 13, pp.199-212, 1994.
- [10] L. C. Bank, J. Yin and L. Moore : Experimental and Numerical Evaluation of Beam-To-Column Connections for Pultruded Structures, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 15, pp.1052-1067, 1996.
- [11] A. S. Mosallam, M. K. Abdelhamid and J. H. Conway : Performance of Pultruded FRP Connections under Static and Dynamic Loads, Journal of Reinforced Plastics and Composites 13, pp.386-407, 1994.
- [12] A. S. Mosallam : Stiffness and Strength Characteristics of PFRP UC/Beam-To-Column Connections, Composite Material Technology, PD-Vol.53, Proceedings, ASME Energy-Sources Technology Conference and Expo., pp.275-283, 1993.
- [13] L. C. Bank, A. S. Mosallam and H. E. Gonsior : Beam-To-Column Connections for Pultruded

- FRP Structures, Suprenant B, editor. Serviceability and durability of construction materials, Proceedings of the First Materials Engineering Congress, ASCE, pp.804-813, 1990.
- [14] L. C. Bank and A. S. Mosallam : Creep and Failure of A Full-Size Fiber Reinforced Plastic Pultruded Frame,” Kozik T., Hui D, editors. Composite Material Technology, ASME PD 32, pp.49-56, 1990.
- [15] A. S. Mosallam and L. C. Bank : Short-Term Behavior of Pultruded Fiber-Reinforced Plastic Frame, Journal of Structural Engineering, pp.1937-1954, 1992.
- [16] F. L. Matthews edition : Joining Fibre-Reinforced Plastics , ELSEVIER APPLIED SCIENCE , 1987.
- [17] 小倉信和：アルミニウム薄板リベット継手の疲労強度，安全工学，37，5，pp.311-319，1998
- [18] 菊川廣繁：炭素繊維複合材構造継ぎ手の疲労強度設計について，日本複合材料学会誌，22，3，pp.100-107，1996
- [19] 濱田泰以，前川善一郎，横山敦士，藤田章洋：平打組物複合材料の機械的継手強度，日本複合材料学会誌，16，4，pp.155-162，1990
- [20] 網島貞男，藤井透，大窪和也，椎名徹：円孔を有する複合材料の疲労切り欠き係数に及ぼす2軸組み合わせ応力比の影響，日本複合材料学会誌，18，1，pp.10-16，1992
- [21] 睦好宏史：FRPの建設構造物への適用について，日本複合材料学会誌，18，3，p.95-101，1992
- [22] 中辻照幸：複合材料によるコンクリート構造物の補強・補修－I．－土木・建築分野への複合材料の適用の現状と将来展望－，日本複合材料学会誌，22，4，pp.129-135，1996
- [23] 出口吉孝，横山光紀：こんなところに複合材料－地域密着型の複合材料 農業・土木分野におけるFRP－，日本複合材料学会誌，24，5，pp.197-200，1998
- [24] 西崎到：FRPの土木構造材料への利用の動向，日本複合材料学会誌，26，2，pp.37-42，2000
- [25] 建設省土木研究所：繊維強化構造材料の歩道橋への利用可能性の検討，土木研究所資料，第3291号（1994）
- [26] 佐々木巖：FRPを構造材料に用いた歩道橋，土木技術資料，38，11，pp.4-5，1996
- [27] 建設省土木研究所材料施工部化学研究室，（社）強化プラスチック協会，石川島播磨重工業（株），佐藤工業（株），ショーボンド建設（株），東急建設（株），（株）富士ビー・エス：繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書（I）－一次構造材料としてのFRPの適用事例調査－（共同研究報告書 第210号），1998. 10
- [28] 建設省土木研究所材料施工部化学研究室，（社）強化プラスチック協会，石川島播磨重工業（株），佐藤工業（株），ショーボンド建設（株），東急建設（株），（株）富士ビー・エス：繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書（II），2000. 3
- [29] 宇野名右衛門，鈴木統，張惟敦，明嵐政司，小山達雄：FRPの応急橋梁への適用，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集I-A7，pp.14-15，1999
- [30] 北山暢彦，佐伯彰一，山城和男：沖縄県におけるFRP横断歩道橋の概要，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，I-A 230，2000
- [31] 野中賢，日経コンストラクション4月28日号，pp.28-32，2000
- [32] プラスチック産業資材新聞，第712号，2000
- [33] 張惟敦，鎌田敬治，木村忠，佐伯彰一，山城和男：FRP橋梁のボルト接合に関する実験的考察，日本機械学会，M&M2000 材料力学部門講演会講演論文集，pp.341-342，2000
- [34] 張惟敦，鎌田敬治，木村忠，佐伯彰一，山城和男：FRP製歩道橋のボルト接合強度に関する検討，強化プラスチック協会，第45回FRP CON-EX 2000 講演要旨集，pp.B-7/1-7/2，2000
- [35] 山本尚樹，張惟敦，佐伯彰一，山城和男：FRP桁橋の主桁継手構造に関する解析的検討，日本機械学会，M&M2000 材料力学部門講演会講演論文集，pp.343-344，2000
- [36] 山本尚樹，張惟敦，佐伯彰一，山城和男：FRP製歩道橋の主桁継手構造に関するFEM解析，強化プラスチック協会，第45回FRP CON-EX 2000 講演要旨集，pp.B-8/1-8/2，2000