

繊維強化プラスチックの橋梁への適用事例に関する研究

Study on Application of Fiber Reinforced Plastic for Bridges

明嵐政司¹、西崎到²、木嶋健³、佐々木巖⁴

Seishi MEIARASHI, Itaru NISHIZAKI, Takeshi KISHIMA, Iwao SASAKI

ABSTRACT High durability of fiber reinforced plastic is expected to realize free maintenance bridges. The authors first completed the synthesis research on FRP application for structure members. The papers that treated FRP as structure members had been collected through searching for some data bases.

The summary brought the authors to the results which highlighted the material & structure design and cost problems. The first issue is a relative low elastic modulus of GFRP. The second one is a reliable joint and deck structure. Third one is much higher cost of FRP bridges than those of steel or concrete bridges. These results finally indicates us that future research in such areas has been required for improvement of FRP bridges.

Key Words : 繊維強化プラスチック、橋梁、設計、材料、継ぎ手

Fiber Reinforced Plastic, Bridge, Design, Material, Joint

1. はじめに

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic, 以下FRPと略す。) は軽量・高強度・高耐食性能を有しており、航空機産業・小型船舶・スポーツ用品などで広く使われている。土木分野では、プレストレスコンクリート緊張ケーブル・グラウンドアンカー・コンクリート補強などに使われ始めている。筆者らは、繊維強化プラスチックの上記特性を考慮すると、このような補助的な材料としての利用にとどまらず、補強の対象となっている鋼材や鉄筋コンクリートに代わる利用が可能であると考えている。

ただし、繊維強化プラスチックは、鋼材やコンクリートに比べると材料設計の自由度が大きく、その反面として標準的な材料規格も整備されていないので、取り扱いが複雑である。しかし、そのような点を考慮しても、土木構造物に求められる高耐久性を実現するには、繊維強化プラスチックの材料特性は、非常に魅力的に思われる。

そこで、繊維強化プラスチックを主要部材とし

- 1 工博 土木研究所 化学研究室長
 - 2 土木研究所 化学研究室主任研究員
 - 3 土木研究所 化学研究室主任研究員
 - 4 土木研究所 化学研究室研究員
- (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

て活用するための手始めとして、既存の学術雑誌や専門図書に報告されている事例を収集した。これらの文献に記載されている内容から、繊維強化プラスチックを採用した理由と繊維強化プラスチック製構造物の普及を阻害する要因も検討した。

なお、本研究は土木研究所共同研究「繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究」(1997~1999年)の研究成果の一部である。

2. 文献調査

2.1 情報源

1993~1998年に国内外で発表された文献を下記の情報源から収集した。

- a) JICST(Japan Information Center for Science and Technology)のオンラインデータベース
- b) 土木学会会誌及び論文集
- c) JCI(Japan Concrete Institute)の会誌及び論文集
- d) ASCE(American Society of Civil Engineers)の会誌及び論文集
- e) ACI(American Concrete Institute)の会誌及び論文集
- f) 橋梁と基礎
- g) プレストレスコンクリート
- h) 強化プラスチック

- i) FRP International
- j) Composit
- k) SPIの論文集 (Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastic Industry)
- l) ICCI(International Conference on Composites in Infrastructure)の論文集及びショートコース資料
- m) ACMBS(Application of Composite Material for Bridge and Structure)の論文集

2.2 検索条件

検索条件を「FRPを構造材料に使用して建設された土木構造物」とした。土木分野では、FRPをケーブル・シート等の補強用材料として用いることが多いが、これらの用途は含まない。また、車両・船舶・航空機関連の適用事例も除外した。土木分野以外に採択した文献の中には、建築分野のものがあるが、それらはすべて構造設計を伴うものである。

3. 適用動向に関する分析

3.1 適用動向

検索条件に該当した文献は全46編¹⁾⁻⁴⁶⁾であった。主な出典源は”SPI”(Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastic Industry)が10編, “ICCI’98”(The Second International Conference on Composites in Infrastructure)が8編, “FRP Composites in Construction Application”が8編である。この3出典源からの文献が26編となり、全体の半分以上を占めている。試験施工も含めて施工された構造物は22件であった。そのうち、道路橋は27%、歩道橋は37%、栈橋は18%であり、広い意味での橋梁としての適用が適用事例の約82%を占めている。その他には、水門・ガードレール・アンテナ塔・階段などがある。

国別検索文献数は米国80%、英国10%、オランダ5%、日本5%である。米国の検索文献数が突出している理由として二つあると著者らは考えている。

第一には、米国が1980年代に顕在化した社会資本の疲弊に対して戦略的な対応を図っていることである。米国土木学会内のCERF(Civil Engineering Research Fund)を中心としてCONMAT (the High-Performance CONstruction MATerial and Systems Program) が1994年に提案された⁴⁷⁾こともその一例である。計画開始年次は不明であるが、計画期間は10年である。総研究予算は約20億ドルである。研究対象材料の中心はFRPであり、約9億ドルが向けられている。また、そのFRP主要な適用対象

は車道橋である。

第二は、1980年代後半から1990年代初頭の戦後の冷戦構造の崩壊の影響である。米国の軍事産業のうちの航空機産業では、先に述べたようにFRPを多用してきた。しかし、冷戦崩壊による軍事予算の削減は、それらの産業の民需産業への転換を余儀なくさせている。

3.2 FRP材料・製作

3.2.1 繊維強化材

プラスチックの補強のために繊維強化材が用いられる。繊維強化材によって材料の強度や弾性率を向上させることが出来る。繊維強化材としては、ガラス繊維・炭素繊維のような無機材料とアラミド繊維・ポリエステル繊維のような有機材料がある。ガラス繊維は、安価であるがFRPの弾性率が低い。炭素繊維を用いると高強度・高弾性率のFRPを実現できるが、高価なものになる。検索文献から得られた適用事例中に見られるFRPに使用されている繊維は、ガラス繊維48件、炭素繊維2件であった。このように比較的安価なガラス繊維を使用した事例が最も多く報告されている。

3.2.2 樹脂

通常は熱硬化製樹脂が用いられる。樹脂の価格を反映して、最も安価な不飽和ポリエステルが多用されている。耐食性は、エポキシ樹脂が最も高く、ビニルエステル樹脂、不飽和ポリエステル樹脂の順になる。用途によっては、耐炎性・耐熱性に優れたフェノール樹脂が使われる。

検索された文献中の構造物に使用されていた樹脂は、不飽和ポリエステル16件、ビニルエステル15件、フェノール1件、その他及び不明20件であり、不飽和ポリエステル及びビニルエステルが多用されていた。

3.2.3 成型方法

FRPの代表的な成型方法を以下に示す。

a) ハンドレイアップ

型の上に繊維強化材料（主にクロス、不織布）を置き、ローラー刷毛を使って樹脂を塗り付け、必要な厚さまで積層し、無圧常温で硬化する方法である。人件費が高い場合には、製作費用が高価となる。多種少量の生産に向いている。

b) フィラメントワインディング法

繊維強化材料（主にガラスロービング）を前もって樹脂に含浸し、回転しているマンドレル（芯金）に張力をかけながら巻き付けて硬化させる成型方法である。形状（円筒状または球形）に

制約はあるが強化繊維材料の強さを十分利用できる成形方法である

c)引抜成形法

繊維強化材料を製造ライン方向に引き出しながら樹脂を含浸させ、加熱金型内を通して硬化させ、連続的に生産する成形方法である。長さ方向に一定断面形状を有した成形品を任意の長さで得ることができ、長手方向の強度が大きい製品が得られる。量産による材料コストの低減が見込める。

引用文献のうち引抜成形法が31件、ハンドレイアップ9件、フィラメントワインディング1件、その他及び不明13件であった。

3.3 接合技術

検索文献中に見られた部材接合技術の事例は5件と比較的少ない。代表例を以下に示す。

3.3.1 ボルト接合⁶⁾

E.T.Techtonics社（米国ペンシルベニア州フィラデルフィア）のLONGSPAN PRESTEK System（引抜パイプ・アングル・チャンネル・平板からなるポニートラス）には既に多くの実績がある。部材には、角パイプ（50.8mm×50.8mm）・チャンネル材（幅152.4mm及び203.2mm）が使われている。継ぎ手には19mm径のボルト（SUS304、A307）が使用されている。継ぎ手部の一例を図1に示す。

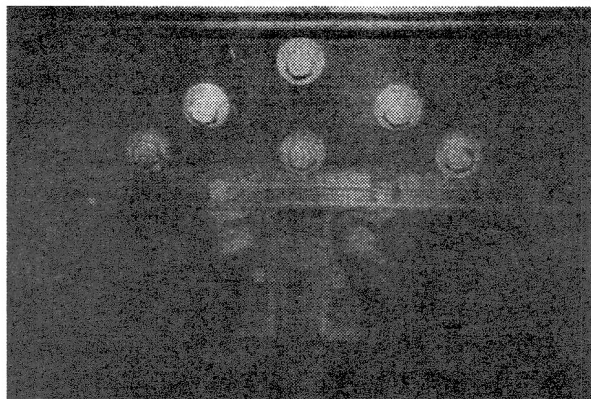


図1 金属ボルト接合

3.3.2 接着剤とブラインドファスナー⁸⁾

図2に示すように、同じ大きさの二つの台形の上辺を合わせたような断面と正六角形の断面を組み合わせて床版としている。床版下の桁には引抜成形されたI桁（305×305×12.7mm）が使われている。床版の組立には接着剤が、床版と桁との接合には接着剤とブラインドファスナーが使用されている。

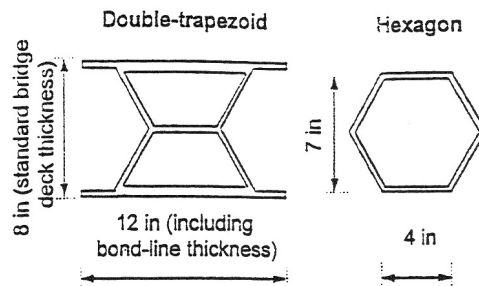


図2 接着剤とブラインドファスナー

3.3.3 ドッグボーンと接着剤¹⁹⁾

Aberfeldy橋の床版は7室のセル（一つのセルの大きさは80×80mm）からなるプランクと角パイプ（80×80mm）から作られている。縦桁・横桁は角パイプ（80×80mm）からなっている。プランクや角パイプの側面での接合に工夫がある。角パイプの4つの側面の内、3つの側面には図3に示すような断面の溝がある。溝のある側面同士を接合する際には、ドッグボーン（犬の餌として与える骨）状断面の鍵となる部材が挿入される。プランクあるいは角パイプの側面は接着剤を併用して接合されている。

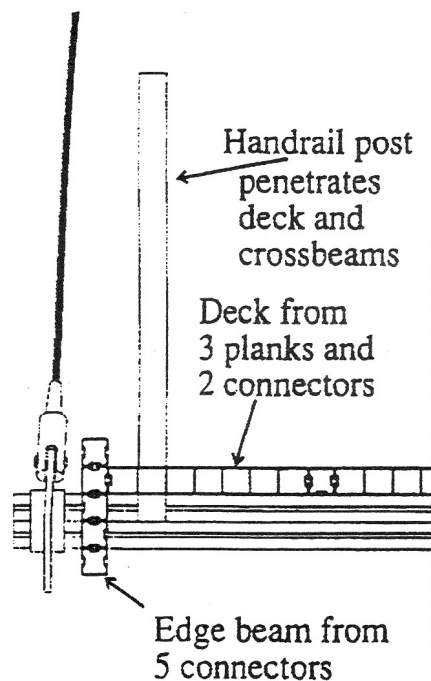
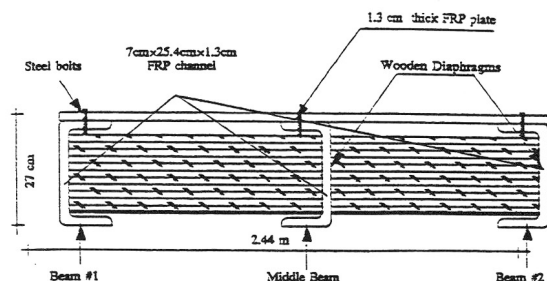


図3 ドッグボーンと接着剤の併用接合

3.3.4 ボルトと接着剤²³⁾

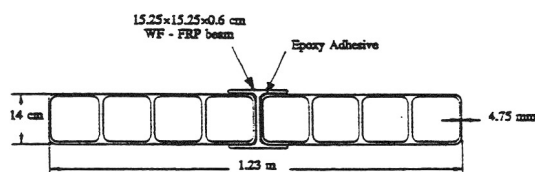
図4はウエストヴァージニア大学が提案する2種類の上部工の接合を示している。一方はI桁と平

板、他方はI桁とセル断面版の接合である。その報告では、ボルトのみの場合に対してボルトと接着剤を併用した場合には、接合断面の曲げ剛性が10%向上したとの記述が見られた。



(a) I 桁と平板の接合

FIG. 5. Cross Section of Floor Test Specimen F-1



(b) I 桁とセル断面版の接合

図4 ボルトと接着剤による接合

3.3.5 スナップジョイント⁴⁰⁾

FRPの成型機メーカーであるGoldsworthy社は、図5のようなスナップジョイントを提案している。この継ぎ手を用いて、高さ28メートルの送電専用塔が建設されている。海洋発電場所の送電線塔も建設されている。



図5 スナップジョイント

母材の積層構成によって、継ぎ手部の破壊形態は影響を受ける。継ぎ手部に対するクリープ及び疲労試験データも必要である。これらの検索された文献は、ここに示した母材の積層構成が破壊形態に与える影響や疲労に対する安全性を保証していない。具体的な構造物の継ぎ手部の設計を行う

ためにも、十分な実験解析データの蓄積が必要である

3.4 事例中に示される課題

検索文献中に示されたFRPの構造材料として解決すべき課題の上位には、「高コスト」(11件)、「低剛性」(7件)、「耐久性データが少ない」(5件)が上がった。

4. 結論

検索した文献内容の分析結果から得られた事柄をまとめた結果を以下に示す。

- (1) 検索した文献の主な出典源は、「SPI」(50th Annual Conference, Composites Institute, The Society of the Plastic Industry)、「ICCI'98」(The Second International Conference on Composites in Infrastructure),「FRP Composites in Construction Application」であり、この3出典源からの文献が全体の半分以上を占めていた。
- (2) 検索した文献中に示される実際に施工されたFRP構造物のうち、道路橋・歩道橋・栈橋が約82%を占めていた。
- (3) 検索文献の約8割が米国のものであった。
- (4) FRPの繊維強化材としては比較的安価なガラス繊維を使用した事例が最も多く報告されている。
- (5) FRPの樹脂としては、不飽和ポリエステル及びビニルエステルが多用されている。
- (6) FRPの成形方法としては、約60%の31件が引抜成形法によるものであり、ハンドレイアップ成形法によるものが9件となっている。
- (7) 検索文献中に見られた部材接合技術の事例は7件と比較的少ない。
- (8) 鋼構造物の接合に從來から使用されているボルト接合及びボルト接合と接着剤との併用等の事例があった。しかし、接合部分の強度やクリープ及び疲労に関するデータはさらに少ないので、今後のさらなるデータの蓄積が必要である。
- (9) 調査文献中に示されたFRP構造物の課題としては、「同じ規模の鋼製あるいは鉄筋コンクリート製の橋梁に比べると、コストが高い。」、「GFRPは弾性率が鋼材に比べると小さいこと。」、「材料の信頼性を証明するデータが少ないこと。」が挙げられている。継ぎ手構造の設計方法の確立に加えて、これらの問題を解決するための調査研究を実施する必要がある。

参考文献

- (1) Brooks Natalie : Honeycomb: the Next Bridge Building Material, Reinforced Plastics July/August 1995, pp40-42,1995
- (2) Composites Begin to Bridge the Gap, Reinforced Plastics November 1996, pp22-26,1996
- (3) John P. Busel : Advanced Composite Materials Vehicular Bridge, FRP Composites in Construction Application A PROFILE IN PROGRESS, pp81, 1995
- (4) M. A. Eriki, P. Yantha, M. F. Green, G.E. Johansen, R. Wilson, D. Maurer : Experimental Behavior of a Reinforced Plastic Vehicle Bridge, 50th Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., January 30 - February 1, Session 11-E, pp1-5, 1995
- (5) John P. Busel : Lift Bridge Solves Problem in England : FRP Composites in Construction Application A PROFILE IN PROGRESS, pp13, 1995
- (6) G.Eric Johansen, Roy W. Wilson, Frederic Roll, Noah Olson, Martin H. Millman, Michael Silvey : Advanced Composite Material Support Frames: An Evaluation of the Bow Meadow Bridge at Lake Crescent, WA, SPI, 51th, Session 7-D, pp1-9, 1996
- (7) D.Richards, C.Dumlao, M.Henderson, D.Foster : Methods of Installation and the Structural Analysis of Two Short Span Composite Highway Bridges, International Composites EXPO'98, Session 4-E, 1998
- (8) Roberto Lopez-Anido, Hota V.S.Gangarao, Jonathan Trovillon and John Busel : Development and Demonstration of a Modular FRP Deck for Bridge Construction and Replacement, 52th SPI, Session 16-D, 1997
- (9) "Light but Strong", Road & Bridges August 1997, pp38-40, 1997
- (10) M.Chajes, J.Gillespie, D.Mertz, H.Shenton : Advanced Composite Bridges in Delaware", ICCI'98 Vol.1, pp645-650, 1998
- (11) J. Lesko, J.L., et al : Laboratory & Field Characterization of the Tom's Creek Bridge Composite Superstructure, ICCI'98 Vol1, pp634-644, 1998
- (12) J. Lesko, J.L., et al : Tom's Creek Bridge Rehabilitation and Field Durability Study, SPI 52th, Session 9-E pp1-6, 1997
- (13) Richard, D. et al : Methods of Installation and the Structural Analysis of Two Short Span Composite Highway Bridges, International Composite EXPO'98, Session 4-E, 1998
- (14) Bridge Are Best at SPI, Reinforced Plastics April 1997, Vol.41 No.4, pp72-78, 1997
- (15) Robert Lopetz-Anido, Hota V.S. Gangarao, Venkata Vedam, Nikki Overby : Design and Evaluation of Modular FRP Bridge Deck, 52th SPI Session 3-E/1 ~ /6, 1997
- (16) C.Dumlao, K. Lauraitis, E. Abrehamson, B.Hurlbut, M.Jacoby, A.Miller, A.Thomas : Demonstration Low-Cost Modular Composite Highway Bridge, ICCI'96, pp1141-1155, 1996
- (17) Barry Duickson, Sanjeev Kumar, Hemanth Thippeswamy : The McKinleyville Bridge – An Innovative Fiber Reinforced Plastic, Concrete and Steel Bridge, Proceeding of Annual International Bridge Conference Vol.13, pp304-309, 1996
- (18) G.Eric Johansen, Roy j. Wilson, F.Roll, P. Garret Gaudini, K.Gray : Design and Construction of FRP Pedestrian Bridge" Reopening the Point Bonita Lighthouse Trail", 52th SPI, Session 3-F, 1997
- (19) William J. Harvey : A Reinforced Plastic Footbridge, Aberfeldy, UK, Structural Engineering International 4/93, pp229-232, 1993
- (20) G. Eric Johansen and Richard hanson : Strength/Stiffness Characteristics of a Prestressed RP Truss Structural System, 50th SPI Session 5-E, pp1-3, 1995
- (21) John P. Busel, : Composite Grating for Public Pier, FRP composites in Construction Application A Profile in Progress, pp25, 1995
- (22) Jon P. Busel : US Navy Test Pier Showcases Composites, FRP composites in Construction Application A Profile in Progress, pp19, 1995
- (23) Sotiris N. Sotiropoulos, Hota V.S. GangRao, Ahmed N.K.Mongi : Theoretical and Experimental Evaluation of FRP Components and Systems, Journal of Structural Engineering Vol.120 No.2, pp464-485, 1994
- (24) G.E.Johansen, R.J. Wilson, P. Roll, P.G. Gaudini, S.T. Ribble, A.J. Fogle, K.E. Gray, R.M. Mehdi, V.M.S. Choy : Design and Construction of Two FRP Pedestrian Bridges in Haleakala National Park, Maui, Hawaii, Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS, pp975-982, 1996
- (25) Kin Liao, Robert I. Altkorn, Scott M. Milkovich, Jose Gomez, et al. : Long-Term Durability of Composites in Secondary Infrastructure Application,

- 28th International SAMPE Technical Conference, pp1278-1289, 1996
- (26) John P. Busel : World's First FRP-Glulam Ocean Pier, FRP Composites in Construction Application A Profile in Progress, pp76, 1995
- (27) John P. Busel : Sea Life Park-Fiberglass Bridges, FRP Composites in Construction Application A Profile Progress, p81, 1995
- (28) John P. Busel : Structural Walkway/Bridge, FRP Composites in Construction Application A Profile Progress, p81, 1995
- (29) Bradley N. Robson, Michael W. Whitney, Issam E. Harik, Theodore Hopwood II : Design of the Longest RP Suspension Bridge in the World", 50th Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., January 30 - February 1, Session 11-A, pp1-6, 1995
- (30) R.J. Wilson, G.E. Johansen, S. Ribble and A. Fogle : Design and Construction of a Lightweight FRP Work Platform for Use at Oyster Creek Nuclear Power Plant", 52th Annual Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., Session 3B, pp1-6, 1997
- (31) I.Nishizaki, I Sasaki, et al. : Feasibility Study of the Application of FRP to Pedestrian Bridges, ICCI'96, pp1174-1185, 1996
- (32) I.Sasaki, I. Nishizaki, et al. : A Bridge Constructed Entirely of Composites; and the Results of Load testing, ICCI'98 Vol.1, pp657-666, 1998
- (33) Polyester Span, New Civil Engineering 21/28 August, pp36-37, 1997
- (34) R.Noordzij : Design and Manufacturing of Full Composites Pedestrian Bridge, Second International Conference on Composites in Infrastructure Vol.1, pp443-455, 1998
- (35) Magdi A. Khalifa, Osama A. Hodhod, Mohammed A. Zaki : Analysis and Design Methodology for an FRP cable-stayed pedestrian Bridge, Composites Part B, pp307-317, 1996
- (36) Glen Mandio : Two Federal Agencies Experiment with Composite Bridges: Case Studies on the Acceptance of Composite Material, International Composites EXPO'97 Proceedings (SPI), Session 3-A, pp1-7, 1997
- (37) E.D.Morsi, J.Larralde, "Design and Construction of Fiberglass Truss for a Long-Span Fiberglass Building", 49th annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., February 7-9, Session 14-A, pp1-4, 1994
- (38) J. Rick, P.E. Volk : Composites in Civil Infrastructure and Marine Applications, ICCI'96, pp1115-1125, 1996
- (39) 建設塗料工業株式会社 : FRP材を使用した足場工の研究について, 橋梁塗料 Vol.21 No.1, pp25-33, 1993
- (40) W.B. Goldworthy, C. Hiel : Composite Structures are a Snap, ICCI'98, 1998
- (41) M. Chowdhury, R. Hall : Performance Evaluation of Full-Scale Composite and Steel Wickets for Use at Olmsted Locks & Dam, ICCI'98 Vol.1, pp667-681, 1998
- (42) John P. Busel : FRP Stairtower Meets the Challenge, FRP Composites in Construction Application A Profile in Progress pp10, 1995
- (43) John P. Busel : Eliminating Corrosion Niagara Falls, FRP Composites in Construction Application A Profile in Progress, pp9, 1995
- (44) Alrik L. Svenson, Martin W. Hargrave, Ala Tabiei, Lawrence C. Bank, Tang : Design of Pultruded Beams for Optimization of Impact Performance, 50th Annual Conference, Composites, The Society of the Plastics Industry, Inc., 1995, Session 10-E, 1995
- (45) 大淵政義 : 強化プラスチック(FRP)を利用した雪崩予防柵の施工、北陸の建設技術 Vol. 25, pp22-25, 1997
- (46) E. Steinberg, M. Johnson: Structural Analysis of a Fiberglass Antenna Tower, second International Conference on Composites in Infrastructure, pp493-503, 1980
- (47) Civil Engineering Research Foundation : Materials for Tomorrow's Infrastructure: Ten Year Plan for Deploying High-Performance Construction Materials and Systems, December 27, 1994
- (48) 土木研究所、強化プラスチック協会、石川島播磨重工業株式会社、佐藤工業株式会社、ショーボンド建設株式会社、東急建設株式会社、株式会社富士ピー・エス : 繊維プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書 (I)、平成10年10月