

FRP と鋼材とのハイブリッド建築に関する調査研究

Investigation on Hybrid Building Constructions Consisting of FRP and Steel Structural Materials

米丸啓介*, 山田聖志**

Keisuke Yonemaru, Seishi Yamada

*清水建設 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3 丁目 4-17)

**豊橋技術科学大学 建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

The demands in steel structure construction are complicated in the design of hybrid systems which are combined with various materials. The Japanese Society of Steel Construction has recently published "the reports for the state of arts of the construction of new hybrid structures", and has dealt with woody material, glass material, and fiber reinforcement polymer (FRP) material for combination with steel materials. This paper will summarize the investigation results about the hybrid construction of FRP and steel and point out its future developments.

Key Words: FRP, hybrid construction, joint, trial design,

キーワード: FRP, ハイブリッド建築, 接合部, 試設計

1. はじめに

鋼構造建築への要求が複雑化, 多様化していることに対して, それ以外の材料を組み合わせたハイブリッド構造の可能性が期待されている. 日本鋼構造協会 (JSSC) では「新ハイブリッド建築の事例分析と設計課題に関する調査研究小委員会」を設置し, 3 年間, 鋼材に木質材・ガラス材・繊維補強ポリマ (FRP) 材を組み合わせる構成される, 合成部材や混合構造システムを対象として, 既往の設計事例の整理・分析を行い, これら新しいハイブリッド建築構造システムが広く普及するための克服すべき課題を明確にする作業を実施し, テクニカルレポート¹⁾としてまとめた. 本報では, これらのうち FRP と鋼材とのハイブリッド建築に関する調査成果について報告し, 今後の展望について考察する.

建築構造を軽量化することは, 材料の運搬や施工時の重機の軽減から二酸化炭素排出を抑制し, 環境負荷を低減させる効果大きい. 特に屋根架構を軽量化すると, その支持架構の部材断面を小さく抑えることができ, 耐震改修時に重い屋根構造を軽量化するだけで, 支持架構の耐震補強を不要にできる場合が少なくない. FRP (繊維補強ポリマ) 材は鋼材の約 1/4 の比重であり, 引張強度がほぼ同等であるので, 体育館などの屋根トラス架構に採用したとすると, 屋根葺き材や天井仕上げの有無などの影響をうけるものの, 概略, 屋根重量としては 2/3 程度になると期待される. すなわち, 耐震改修でこうした効果を利用するとしたら, 支持架

構の主体構造の耐震性能指標 I_s は, (靱性指標 F 値が 1 程度なら) 約 1.5 倍に向上することになる. また, FRP は単に軽量である (強度重量比が大きい) というだけでなく, 断熱性・耐腐食性・非磁性・加工性などにも優れており, 鋼材などの従来の建築構造材料と組み合わせることで, 特殊環境下での新しい建築物の創生が期待される.

FRP のこうした魅力的な特性を利用し, 鋼構造建築に FRP を取り入れたハイブリッド化による新しい構造システム構築に寄与することを目的として, FRP と鋼材とのハイブリッド建築にかかわる調査を行った. 現在, FRP は宇宙・航空機産業分野の構造材料として欠かせない主要材料となっており, 自動車分野への適用も開始されている. また, 土木の歩道橋への適用は米国においては 400 件を超えている²⁾. 最近バイオプラスチックの研究も活発化しているなど, 素材関係の技術開発が進んできた現状にある. こうした状況のもとで, FRP と鋼とのハイブリッド化に関連する現状と課題を整理しておくことは, 極めて意義深い.

2. FRP の基本事項と近年の動向

FRP は建築においてまだ一般的な構造材料でないので, 使用材料, 成形方法, 機械的物性の特徴など, FRP を構造材料として使用する際の基本事項について整理した. 整理した項目について, 表 1 にまとめる.

これらの中で, 引抜成形法によって製造される FRP

形材は、比較的成本が安く、生産性に優れており、現状では最も建材用途に適したものとされているので、近年の動向について調査した。このFRP引抜成形部材については、社団法人強化プラスチック協会において標準化の動きがある。現状の「JIS K 7015 繊維強化プラスチック引抜材」を見直し、より使いやすくなるための手順であり、標準的な型材断面の一覧と、標準的な材料構成におけるFRP引抜成形材の力学的特性という形でまとめられる。現状では、製造メーカー間で内容の検討が行われている段階で、標準化がなされれば、形鋼と同様にFRP引抜成形材の部材断面を選定することが出来るようになる。

また、同協会では、「繊維強化フェノール基複合材料設計基準」³⁾をまとめた。これは、特に、大きな需要が期待できる建築業界に向けた設計基準であり、建築の設計者を意識した内容となっている。現状では、FRPの使用基材がガラス繊維とフェノール樹脂に限定され、それらの構成も限定されている。しかし、具体的な試験方法や考え方が記されており、同様の手順を踏めば新たな材料構成のFRPが適宜内容を追加できるような構成でまとめられている。今後の発展が期待される。

2000年の建築基準法改正以降、それまでの第38条に基づく個別物件での認定による新素材の実用化の道が閉ざされ、現状では、FRPを建築構造材料として適用するためには多くの手順を踏まなければならない。それには、材料の標準化や整備された設計基準の存在が重要な意味を持つ。FRP業界のこうした動きは、建築ユーザーにとって歓迎することであり、今後の動向に注目したい。

3. FRP 接合実験の文献調査

FRPは、鋼材のように溶接接合ができないためボルト接合などの機械的接合もしくは接着接合が用いられている。このようなFRPの接合部では、FRPの力学特性に加えて、ボルト孔の大きさや位置など幾何学的な要因や、接着剤の有無や種類により接合強度が大きく影響を受ける。まだ標準化がなされないFRP構造を設計するためには設計データが必要であると考えた。このため、FRP接合部の設計データを提供することを目的に、FRP接合実験に関する文献調査を行った。調査範囲は、日本建築学会が1996年以降の大会学術梗概集と構造系論文集、土木学会が2000年以降の年次学術講演会講演概要集とFRP橋梁に関する論文集などであり、26件の文献をピックアップし、FRPの接合形式を整理した。接合形式の概要を表2にまとめる。また、機械接合、接着接合ならびにソケット接合の形式について、それぞれ図1、図2ならびに図3に示す。

例示した実験データの中からソケット接合の実験に

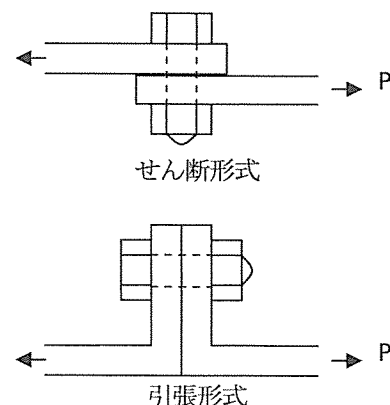
ついて以下に示す。

表－1 FRPの基本事項

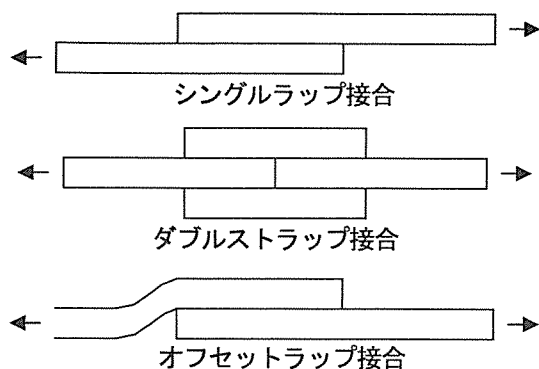
項 目	種 類
繊維強化	ガラス繊維 (Glass Fiber)
	炭素繊維 (Carbon Fiber)
マトリックス	オルソ系不飽和ポリエステル樹脂
	イソ系不飽和ポリエステル樹脂
	ビニルエステル樹脂
	エポキシ樹脂
	フェノール樹脂
成形方法	引抜き成形法
	ハンドレイアップ (HLU) 成形法
	フィラメントワインディング (FW) 成形法
	レジントランスファー (RTM) 成形法

表－2 FRPの接合形式の種類と特長

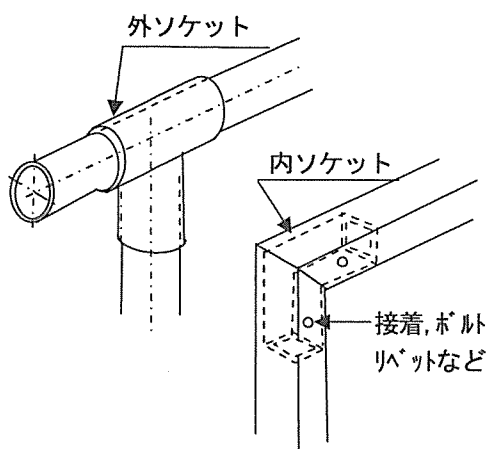
種類	特 長
機械接合	○組立分解が容易、接合強度のばらつきが少ない、引き剥がしに対する抵抗が強い ▲FRPに穿孔加工する、一般部より継手部の強度が低下する、孔部からクラックが伝播しやすい
接着接合	○穿孔加工が不要、ボルトやリベットなどによる重量増加がない ▲組立や分解に手間がかかる、環境条件に接合部強度が影響される
ソケット接合	閉鎖型断面を持つ部材に用いられる接合形式。機械接合や接着接合が併用される。



図－1 機械接合の形式



図ー2 接着接合形式の例



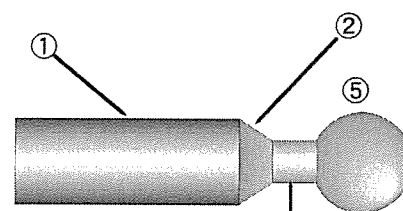
図ー3 ソケット接合形式の例

○ソケット接合の実験例

屋根構造用 CFRP (炭素繊維強化プラスチック) 製立体トラスの開発の際に行われた実験である⁴⁾。同トラス構造では図4に示すようなステンレス製ノーズコーンと CFRP 製パイプを接合部に用いることを念頭に、図5に示すステンレス製ノーズコーンを内ソケットとしてリベットで固定した接合部の引張試験および圧縮試験を行った。

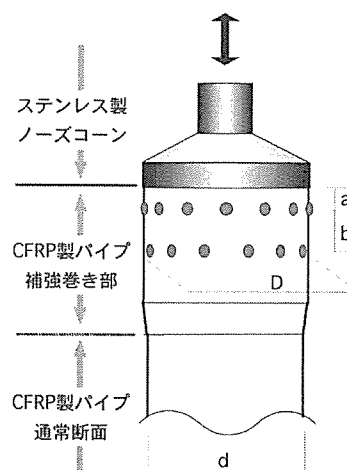
引張試験における荷重と継手の抜け出し量の関係を図6に示す。最終的には継手が抜け出して破壊し、最大荷重の 2/3 程度の位置で急激な剛性低下が見られた。

圧縮試験では、CFRP 製パイプの通常断面部で圧縮破壊を起こしており、目視では継手部のダメージは確認できなかった。圧縮試験時の荷重と変位の関係は、引張試験とは異なり終始弾性挙動を示した。CFRP 製パイプ部分の圧縮破壊または局部座屈により試験体の圧縮強さが決定されているため、継手の圧縮強さは少なくともパイプの圧縮強さ以上であることが確認された。圧縮に対してはリベット部分と CFRP パイプ端部断面-ノーズコーン間の接触面の両方で負担するため引張に比べて高い継手強度を示したものと考えられる。

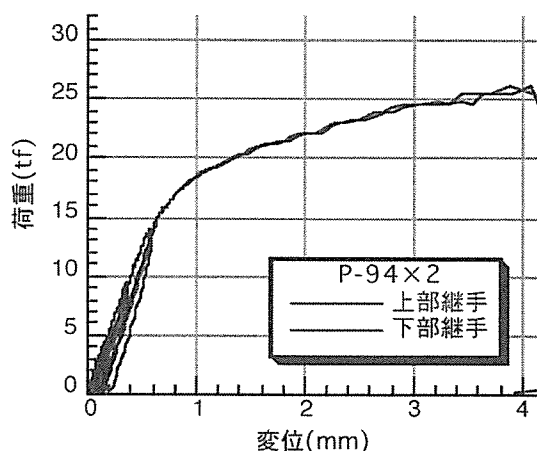


- ① : CFRP製パイプ
- ② : ステンレス製ノーズコーン
- ③ : ベアリングボルト (内部)
- ④ : アルミニウム製カラー
- ⑤ : アルミニウム製ハブ

図ー4 CFRP 製トラス部材



図ー5 継手の詳細図

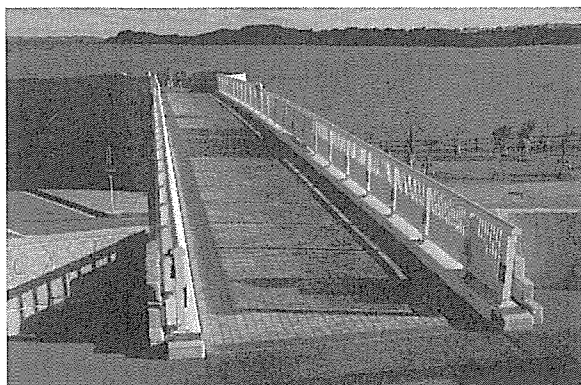


図ー6 荷重と継手抜け出し量の関係

4. 建設事例の調査

FRP と鋼とのハイブリッド建築に関する調査研究ではあるが、事例が非常に少ないことから、やや対象範囲を広げて土木分野も含めた FRP を構造材料に適用した建設事例について調査した。

土木分野での事例は橋梁、なかでも歩道橋が多い。



写真－1 沖縄のFRP歩道橋

写真－1は1999年に沖縄県の本島と伊計島を結ぶ海中道路にあるロードパークに建設された歩道橋である。道路の中央分離帯に橋脚を立てた2径間連続桁形式で、全長は37.7mである。主桁はハンドレイアップ成形によるGFRP製で、床板には引抜き成形によるGFRPの中空パネルが用いられている。建設地の両側は海であり、この事例において部材をFRP化した目的は耐腐食性である。FRP橋梁に関しては、土木学会の出版物「構造工学シリーズ14：FRP橋梁－技術とその展望－」⁵⁾などに整理されているので参照されたい。

建築分野に関して、FRP構造材料適用の動きは、海外のほうが早かったようである⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。その歴史を大まかに並べると次のようである。1950年代から1960年代にFRP製の住宅が建設される時期があったが、FRP製部材の品質が悪くそれほど数が出なかった。1970年代のオイルショックで材料費が高騰し全く建設されなくなった。その後、1990年代に再びFRPの材料特性に着目した研究開発が開始された。リサイクル等の課題は残すが、2. FRPの基本事項と近年の動向で取り上げた引き抜き成形方法の発達により高品質な型材が比較的安価に供給されるようになったことが大きな原因の一つである。写真－2に示すのは、ポリエステル樹脂を用いたGFRP製の引抜き型材によるフレーム構造を採用した5階建ての事務所ビルである。この建物は、元は1999年にスイスで開かれた建築展に出品された「アイキャッチャー」と呼ばれる多目的の建物であったが、その後バーゼルに移築されて事務所ビルとして実際に使われている。この建物における最も重要なFRPの性質は熱伝導率の低さであり、室外とのヒートブリッジをつくらないため、写真にみられるような構造部材を直接外部に露出させるような設計が可能になった。

国内における建築物の一例を写真－3に示す。○ソケット接合の実験例で示したCFRP製立体トラスを屋根構造に採用した建物である。建物用途は工場内の社員食堂であり、CFRP製立体トラス構造が覆う部分の面積は315m²である。トラス部材の主要部分にフィラメントワインディング成形によるフェノール樹脂を用



写真－2 アイキャッチャーの外観



写真－3 社員食堂の内観

いたCFRPパイプが採用されており、柱が鋼管であることから、FRPと鋼とのハイブリッド建築である。1997年の竣工で、旧建築基準法第38条に基づく個別認定による建物である。軽量のCFRP製立体トラス構造の採用で、施工時の安全性の向上と省力化とが図れた。

5. 屋根トラス架構の試設計

FRPを建築構造材料として適用した場合の既存材料との違いを具体的に把握するために、既存の体育館屋根架構をFRP構造材料で置き換える試設計を行った。対象とした体育館(図－7)の屋根架構は、型鋼で構成される平弦トラス構造で、スパンが28m、せいが2.25mである。試設計では、屋根のトラス架構(図－8)を構成する型鋼を一般的な引抜き成形によるGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)形材で置き換えた。GFRPの許容応力度及び弾性係数は、2. FRPの基本事項と近年の動向で示した「繊維強化フェノール基複合材料設計基準」の「ガラス繊維強化フェノール基引抜き成形複合材料の特性例」に準拠した。

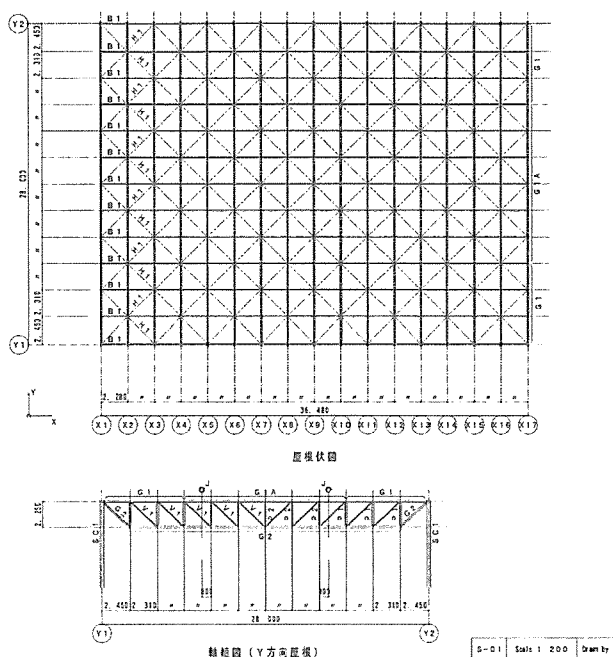


図-7 体育館の伏図と軸組図

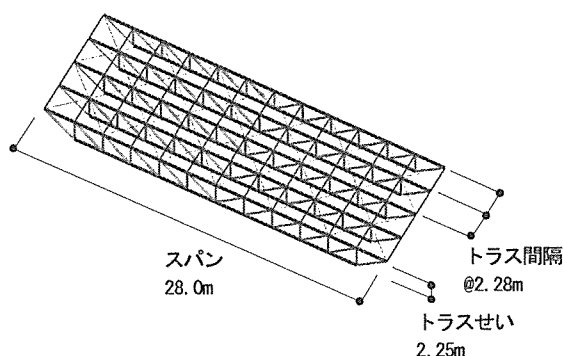


図-8 トラス架構

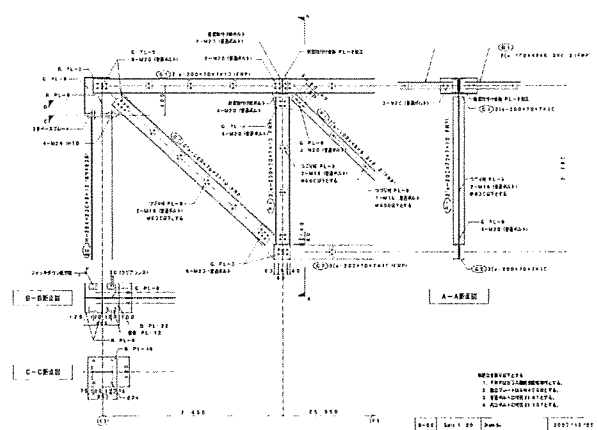


図-9 接合部の詳細図

従来の鋼構造と比べて

- 圧縮と引張で異なる弾性率の扱い方,
- 弾性率のばらつきを考慮したたわみの割り増し
- 応力集中に対処するための部分的な補強
- 弾性材料特有の構造安全性の考え方

など、FRP 特有の設計上の注意点は多数あるが、汎用

の構造解析プログラムを用いた構造設計ができ、鉄骨平面トラス屋根の構造体を FRP 型材で置換可能であることが示された。置換後の屋根トラス架構の接合部詳細を図-9に示す。なお、この接合部詳細に基づいた接合部実験が松本らにより本調査研究の範囲内で実施され構造安全性が確認された。その詳細については本シンポジウムで別途発表される¹⁰⁾予定である。部材置換後の架構重量はオリジナルの約 2/3 であった。

6. 課題の整理

FRP を建築構造材料として適用することのメリットは1. はじめにで示したとおりであるが、積極的に使用する動きは現状ではみられない。また、これまでの適用事例を調査しまとめたが、国内外を合わせても数えるほどしかない。FRP の建築構造への普及展開の大きな障害として次の2項目が挙げられる。

- (1) FRP は従来の建設材料に比べてコストが高い。
- (2) 実案件に適用する際には煩雑な法規的な手続きが必要である。

FRP は、材料自体が比較的高価で、製造するのにさらに手間とコストを要するため、鋼やコンクリートとのコスト競争では劣勢となるのは必然である。即ち、単に従来材料の代替としての適用ではなく、軽量・高耐久性という FRP の特徴を、コストアップ分に見合うだけの利点として展開する必要がある。

一方で、最近、環境性能が重要視されるようになってきているが、軽量化＝省燃費である自動車や航空機への適用が促進されている。ところで、建設における構造部材の軽量化のメリットは、建設時の二酸化炭素排出量の削減と耐震性能の向上への寄与はあるものの、それらはいずれもユーザー側からみると副次的とみなされがちである。植物素材を繊維にしてバイオプラスチックを樹脂としたバイオ FRP の研究が米国での新規テーマになっていることもあり、持続性社会構築の観点から、今まさに“軽い建築構造材料”の利用促進を国家的戦略として検討する時期にさしかかっていると言える。更に、通常の建築物の、現状の建て替えサイクルにおいては、特殊な腐食環境を除き、構造部材の耐久性が問題になることはなかったが、近年、200 年住宅など、従来よりも大幅に長寿命化させた建築物の構想が議論されるようになった。こうした観点から、FRP のような高耐久性構造材料は、これまで以上に必要とされるようになって考えられ、こうした高耐久性部材を利用した建物資産価値の評価方法の整備も必要となる。

以上のような将来展望はあるものの、現状では FRP を建築構造材料として実建物に適用しようとする場合、建築基準法に則した建築材料としての認定獲得に向けた作業が必要であり、追加の費用、期間、労力をユー

ザーに強い仕組みになっている。このことは、前述したユーザー側が感じ取りにくいメリットと併せて、FRPを建築物に適用しようとするユーザーや建築家のFRP活用のモチベーションを著しく喪失させる。そうした状況をユーザー側が打破するのは困難であり、建材用途の拡大を望むFRP業界や、これからの建築物のあり方をテーマにして真摯に活動している大学並びに公的研究機関の先導が必要である。2. FRPの基本事項と近年の動向で紹介した「繊維強化フェノール基複合材料設計基準」³⁾はその活動の一環である。また、FRPの中でも比較的建材用途に適しているとされている引抜成形部材については、標準化が進められており、ユーザーが、形鋼を用いる場合と同様、高品質のFRP部材が利用できる体制も整いつつある。

仮にFRPが構造材料として自由に使えるようになっても、構造的、材料的な効率性を考慮すると適材適所の使い方になると予想できる。鋼構造において軽さや耐久性が特に必要となる部分だけを、FRPに置き換えるFRPと鋼とのハイブリッド構造は、現状での最も有望な構造システムである。その際、接合部の設計技術が非常に重要で、そのためのバックデータを3. FRP接合実験の文献調査で概要を示したように文献調査により整理した。

FRP どちらの接合については、これまでボルト接合、接着接合やソケット接合などの接合形式ごとに主として実験的手法により接合強度に関する実験が行われてきた。FRPは、強化繊維の種類、一方向材やマット材などの繊維材の形態、マトリックス樹脂の種類、積層構成などによって強度特性が大きく異なる。FRP接合の接合強度は、このFRPの強度特性に加え、ボルト孔の位置や配置、接着剤の有無や種類、接合材の形状などによる影響も大きい。このため、FRP構造の接合部の設計にあたっては個別に実験的に接合強度を確認する必要がある場合が多い。FRPと鋼とのハイブリッド構造の実用化のためには、FRP接合の接合強度に関する実験データを蓄積しデータベースを構築するとともに、汎用性のあるFRP材料と接合形式に対しては材料や接合部の構造諸元を規格化し、接合部の耐力が容易に計算できるよう設計法の標準化を図ることが必要であると考えられる。

5. 屋根トラス架構の試設計で概説したが、既存の体育館における鉄骨平面トラス屋根の構造体をFRP型材で置き換えて試設計して適用可能性を判断した。トラス架構自体の重量が原設計の2/3と大幅な軽量化が実現できている。

7. おわりに

家庭製品としてFRPが普及してから40年間、建築分野においてFRPは有望な新構造材料であると常に

言及されてきたにもかかわらず、試験的な適用しかなくされていない。これまでの研究成果から、建築構造材としての効率的な使い方や問題点が徐々に明らかになっている。加えて、FRPの軽量・高耐久性という特徴は、これからの建築物の要求性能と合致しており、FRPと鋼を組み合わせた合理的なハイブリッド建築構造システムの創生を期待したい。

謝辞

本調査研究は日本鋼構造協会に設置された「新ハイブリッド建築の事例分析と設計課題に関する調査小委員会、W.G.3：鋼-FRP系ハイブリッド建築（主査：山田聖志教授）」の活動として行われたものです。ワーキンググループメンバー、執筆協力者、ならびに情報提供者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：新しい建築空間－ハイブリッド構造の新展開－（新ハイブリッド構造建築の事例分析と設計課題に関する小委員会・報告書）、JSSCテクニカルレポートNo.82, 2009.3.
- 2) 山田聖志, 吉田安寿, 熊田哲規, Eric Johansen, Roy Wilson：強化プラスチック, Vol.54, No.11, pp.458-464, 2008.11.
- 3) 強化プラスチック協会：繊維強化フェノール基複合材料設計基準, 2007.12.
- 4) 米丸啓介, 木本幸胤, 杉崎健一, 他：CFRP製立体トラスの開発（その3：継手の特性）、日本建築学会講演概要集, pp.1089-1090, 1996.9.
- 5) 土木学会FRP橋梁研究小委員会：構造工学シリーズ14 FRP橋梁－技術とその展望－, 土木学会, 2004.1.
- 6) Howard Smallowitz：Reshaping the future of plastic buildings, CIVIL ENGINEERING, ASCE, pp.38-41, 1985.5.
- 7) Thomas Keller：Towards Structural Forms for Composite Fiber Materials, Structural Engineering International 4/99, pp.297-300, 1999.4.
- 8) Thomas Keller：Material-tailored use of FRP composites in bridge and building construction, CIAS International Seminar 2007, pp.319-331, 2007.4.
- 9) Lawrence C. Bank：Composites for Construction: Structural Design With FRP Materials, John Wiley & Sons Inc, 2006.7.
- 10) 松本幸大, 斎藤翔, 山田聖志, 西田賢二, 近田純生：大口徑ボルトと鋼ガセットを有するFRP引抜形材の継手接合部の載荷実験, 第3回FRP複合構造・橋梁シンポジウム論文集, 2009.7.