一般社団法人繊維補修補強協会講演会　講演概要（2025 年 11 月 17 日）

CFRP を利用した環境配慮型建築へのチャレンジ

（講師）Arup　アソシエイト　伊藤潤一郎氏

本稿は、2025 年大阪・関西万博のパビリオンとして建設された「ブルーオーシャンドーム」を主題に、新素材を用いた環境配慮型建築への取り組みについて、建設をサポートされた Arup 社アソシエイト伊藤潤一郎氏にご講演いただいた内容を、協会事務局にて要旨を取りまとめたものです。

■はじめに

建築の中に新素材を使うことは設計者としてもハードルが高いですが、本日はテクニカルな事項よりも、私がこのプロジェクトを通じて、新素材、特に CFRP を使って、感じたことを皆さんに理解いただけたら嬉しいと思います。

【プロジェクト概要】

・クライアント ZERI （Zero Emission Research and Initiative）
・建築家 坂茂建築設計事務所
・構造・設備計画 Arup
・建築家からの要望　Ⅰ．埋立地に適した軽量な架構
　Ⅱ．新素材の採用
　Ⅲ．移設可能な構造計画

プロジェクトをサポートするうえで難しかったのは、構造材料をこの建築コンセプトにあったチャレンジングなものにすることでした。建築家のイメージとして示された３つのつながるドームの中央、最も大きなドームに、プラスチックを社会に有効に利用する展示趣旨を示して、CFRP を使った建物としています。

ここでまず問題になったものが CFRP のような新素材を建築構造材料として使うことでした。万博という特別な環境下ではありましたが、この認可を得るために、大阪市や国土交通省と協議を重ね、性能評価の取得という道筋を立てることができました。しかしながら実施内容は、仮設建築物ではあるものの大臣認定と同様の性能確認を多くの実験を通して把握することが必要となり、三大学の協力を得ることができてようやく着手することができました。

■ドームの概要

3 つの連続するドームは、左右が直径 20 m高さ 7 mのドームで、それぞれ竹集成材と紙管を主な構造材としており、中央が直径 42 m高さ 15 mの CFRP を構造材としたドームとなっています。CFRP のドームは、最外装は膜材が取り付けられた鋼管の層で、この外装を直交するＸＹ２方向２層のアーチ状の CFRP 製の管（径 100 ㎜、厚５㎜、長さ５ｍの管を連結）がシェルドームを構成して支持する３層の構造となっています。

CFRP を構造材料とすると大変軽いドームができます。鉄では 30 kg / ㎡くらいの重量となるものが 2 kg / ㎡となります。但し、CFRP はコストが高いこともありますが、脱炭素の視点からは使用量を 1 kg / ㎡代とする必要があります。また、CFRP の製作上、取り外しのできる FRP の接合部構造が難航しました。建築の世界では CFRP はまだ未知の存在で指針類が全く見当たらず、試行錯誤の連続でした。

竹集成材のドームですが、東南アジア等海外では竹材は仮設で使うイメージで恒久建築に使うことは難しいことが理解されていますが、今回の作品では建築にも使えることを世界にアピールできました。但し、これも、とてつもないコストがかかります。

紙管のドームですが、紙管は湿度に敏感で呼吸するように伸縮します。湿度荷重というような環境管理が必要なセンシティブな材料です。また素材重量は大きいですが、リサイクル材料でありコストは低いという特徴があります。

■環境配慮の視点

このプロジェクトを国際的な賞に応募しベスト 30 に入ったのですが、受賞はできませんでした。建築構造の分野でしたが、評価項目には、炭素使用量、環境配慮、社会への影響というような事項の記述が求められており、構造システムといった項目は求められていません。世界の主流は構造分野といえども環境への配慮が重要になってきています。建築学会賞でも構造やデザイン性はありますが、作品のストーリー性、文化に対する影響度などに評価の軸がシフトしてきていることが伺えます。

今回の事例でも炭素量を把握しながら計画を進めましたが、CFRP の炭素量はずば抜けて大きい。CO_2 は CF の 44 kgに対して鉄や紙は 1 kgです。ですが、建築に使った単位面積当たりの炭素排出量を SCORS で評価すると、竹集成材ドームは 89 kg / ㎡、紙管ドームは 70 kg / ㎡、CFRP ドームでは 106 kg / ㎡です。普通に設計すると 400 kg / ㎡とかで、改修だけやっても 100 ～150 kg / ㎡です。ランク A の 2030 年目標のすばらしい建築でも 100 ～150 kg / ㎡です。グローバルな指標で比較しても、CFRP を使ったから炭素排出量が大きくなったとは感じませんので、建築物としても有用であるという説明をしています。

これには、設計の際に例えば CO_2 を 250 kgにしようというような目標値をもって取り組むことが重要で、またそうしないと達成できない。このドームはコンクリートを使ってい

ないなどドラスチックな環境へのやさしさを進めると CFRP でもその領域にたどり着けると説明したら、地震や台風がある環境下での構造物として実現していることは非常に素晴らしいと Structural Awards2025 で評価されました。この際も使用材料と CO_2 量を添付していないと応募すらできない、構造という分野だけでは考えられないというのが世界の風潮であることを理解しながら進めることが必要です。新素材もまたそのような側面を持っていると思いますので、今回の取り組みは意味があったと感じています。（上記kgはkg CO_2 e/kg、kg /㎡はkg CO_2 e/ ㎡）

■CFRP によるドーム架構の実現

CFRP を使ったとにかく軽い建築を計画した結果、34 kg / ㎡しかないので杭を一切打たずに 40m の大スパン建築ができました。CFRP を建築構造に使用した過去の事例は 1997 年から 1999 年に屋根のトラス部材に使用された例がありますが、以降は確認できませんでした。

軽い、しなやかといった CFRP の特性を使ってどのような架構にするかを様々に検討して、この架構に至りました。接合方法を決めるのにも長い時間がかかりました。CFRP を使うのだから、管相互の接合部など継ぎ目がシームレスで、きれいに外れてというような設計者の要望はありましたが、構造的合理性ばかりでなく CFRP の製造方法の制約もあり、構造設計者と製作側そして施工側から様々なアイデアが検討され、次第にレベルアップしてモデル化され、次は耐力の確認でした。解析ソフトを用いて耐力等を検討するのですが、大変な費用もかかりました。解析結果が出ても良し悪しの評価が難しく、評価のためにはさらに実験が必要となりました。CFRP の性能には温度依存性があるので、ドーム内の温度環境評価や材料の温度特性の把握から始めることも必要でした。新しい素材というのは知らなければいけないことがたくさんあって、その意味では楽しいこともあったと思います。これらの実験の結果は建築学会論文にも掲載されていると思いますのでご参考にしてください。

ようやく実際の建設に至って CFRP 部材が製造される段階では、製品の検査方法も新たに設定する必要がありました。従来の材料であれば、設計者は製造者に注文すればよかったものが、検査方法も設計者自らが設定し、製造品質を管理する必要がありました。製品に対する検査手法といったものもこれから是非作っていただきたいと思います。

これは竹集成材や紙管も同様で、製造し、試験を行い、そうやってできた部材を検査するという、大学の先生方にもご協力いただいて、山のような仕事を非常に熱心にこなしていただき、ようやく出来上がったという感じです。

■おわりに

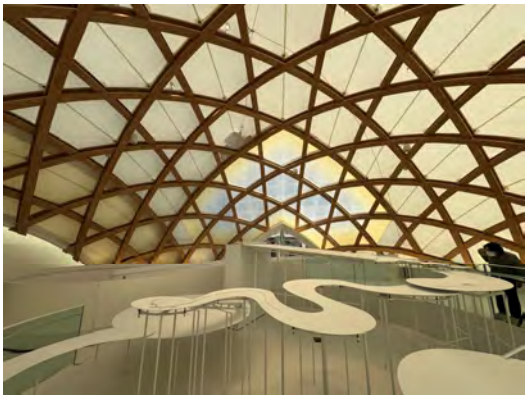
完成したドームを見ると 40 mの直径に 100 ㎜径の CFRP は非常に細い。このような繊細な構造の建築が本当に日本において実現できたということ、新しい素材を使った建築の可能性が万博という一般建築より低い制約状況下であってもこれだけ難しいということがわかりました。今後、国内に移築などがあって、一般建築の対象になったらさらに大変なことになると思いますが、もし機会がありましたらチャレンジしてみたいと感じています。

以上

ご講演風景

ブルーオーシャンドーム（講師提供）

CFRP ドーム内観



竹合成材ドームと紙管ドーム内観（講師提供）