

新国立競技場の FRP 製屋根の基本設計とコスト検討

上村拓矢、武西加奈子、工博 西野義則、工博 田村進一
所属 株式会社 NBL 研究所

概要： デザインコンペ採用の 2 本の湾曲支柱による大屋根、長さ約 300m の建設費用及び建築物の耐久劣化のメンテナンス費用削減に関して、従来の高張力鋼による建設と異なるカーボン繊維及びガラス繊維強化 FRP 製の工事実施設計をおこなった結果、工事費用が既存の工法では約 1500 億円と言われた大屋根が 100 億円でさらに、メンテナンスは 40 年間フリーとなること、そして工事期間は 2 年で完成可能であることが判明したので報告する。

キーワード：国立競技場の立替工事、FRP 製の大屋根、ガラス繊維強化プラスチックの大屋根、短工期、費用 1/10.

1. はじめに

900MPa など高張力鋼をボックス構造にすることで、大型構造物を形成する従来工法は、約 3km 明石大橋の橋脚や約 800m の大型タンカー構造体を構築することができるのは周知であるが、いずれの場合も巨大構造物であるため組立輸送が可能な海洋構造物に限られていた。

一方、全長約 60m のボーイング 787 型機はカーボン繊維強化 FRP 製で作られるようになり、複合材料の特徴である軽くて強い材料の普及が目覚ましくなった。



図 1 公開された国立競技場

その理由は、材料の強度を比較すると高張力鋼材が密度約 8 で約 1000MPa の強度が限界であるのに対して、密度約 1.3 のカーボン FRP は 4000MPa と重量比強度で比較すると、約 $8/1.3 \times 4000/1000 = 24.6$ 倍と圧倒的に差が出る。この材料を用いて 60m*60m の大きさの 787 型航空機同様の設計で 300m*300m の約 25 倍の面積に当たる大型屋根を基本設計して、製作コスト・工事期間の比較を行う。さらに、比強度では約 30%劣るが材料価格が 5 倍安価なガラス繊維強化 FRP でも検討を行う。FRP 材の優位な点は現場で大型構造物を繊維と樹脂を型材に積層することで構築できる特徴である。すなわち、陸送・組立が鋼材に比べて圧倒的に優位となる条件が判明、さらに金属材料などは酸化劣化する(錆びる)が FRP は耐久性に優れ、100 年間塗装な

ども不用なメンテナンスフリー材料である。耐久性に問題があるのは、開閉式屋根の機械部材と天井半透明シート、空調機や座席・トイレなど流行性が必要な非耐久材のみで、通常 40 年でリプレス必要と言われている以外はメンテナンスフリーである。

結果として、大屋根に関する工事費は、少なくとも 1/10 以下の約 100 億円に短縮され、工期が余裕で約 50% 削減できる見込みが明らかになった。

2. 基本構造

カーボン繊維またはガラス繊維の特徴は、高張力に強いことであるが、他方で一方向性の繊維素材からなるため、必要な強度方向に材料を配置積層する必要がある。すなわち、構造体は中空内圧容器体(航空機の胴体構造などに類似)が最も適する構造である。図 1 のデザインの鳥瞰図 2 から見て、構造体は楕円形状に亀の甲羅をかぶせ、天井開放機能を備えた



図 2 国立競技場の鳥瞰図

①2 対の曲がり梁と③4 対のサブ曲がり梁を下部の基本フレームとなる②楕円フレームに組みこんだ構造を採用している。この構造機能モデルは、図 3 に示すことができる。

メインフレームを構成する 300m スパンの①アーチフレーム、基礎フレームを構成する 300m の②円形フレーム、①②を直交方向に接続する③サブフレーム、①②③フレーム間に固定の半透明FRP屋根を、弓型曲がり小梁を用いてFRPコルゲートを固定する等間隔に張り巡らすテンションロープ、さらに中央部には 2 方向の弓型ルー

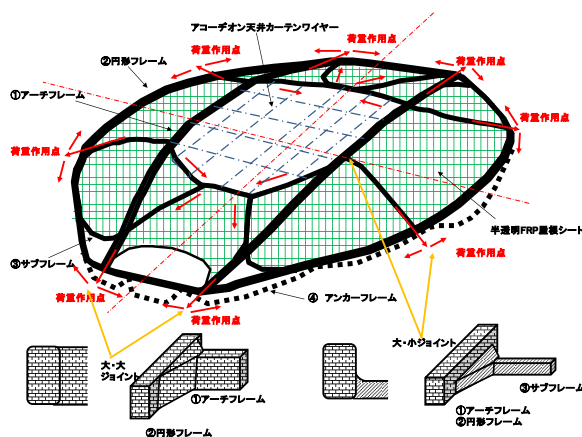


図 3 計画大屋根の基本構造図

開閉可能なFRPコリゲートまたは、テントシート構造の屋根としている。この構造では①の曲がり梁を主体に②円形フレームに大・大ジョイント、大・小ジョイントで③のサブフレームとも共通の構造形式で一体化、8 カ所の荷重作用点で均一な荷重バランスとなる構造形式を採用している。すなわち、それぞれの梁は応力分散がなされ、多方向からの荷重に対応できるように設計されている。

3. FRP 大型構造物の現場製造法

これらの部材①②③は全て共通のジョイント構造を持つこと、その基本ボックス構造を構成する構造材が、同様にすべてが共通で繊維強化プラスチック材から構成される。図 4 は基本となる FRP ボックス構造体の詳細構造と FRP 構造体を得るための方法に

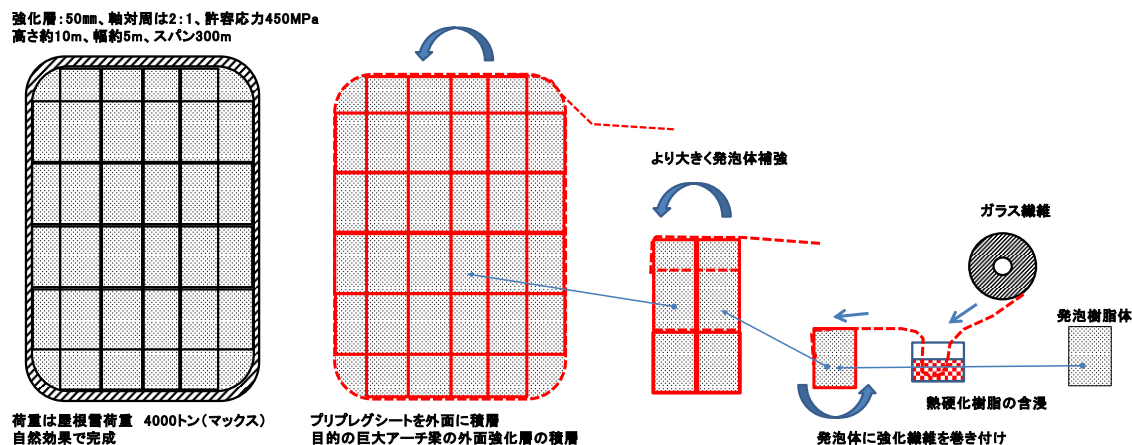


図 4 梁の構造の製造法の説明図

ついでの説明図である。右から例えば塩化ビニールやポリスチロールなどからなる 20~60 倍率に独立発泡した標準の例えば 1*2m 立方樹脂体に、すだれ織りした直交異方の強化繊維体に常温硬化型の例えばエポキシ・ウレタン変性ポリエステルなど樹脂を含浸させて、外面積層、プレゲル化した後、ウレタン発泡材など間合に塗布して 2 ブロックを組み合わせ同様に強化材で一体化、次いで 4 ブロックを同様に集合体を大きくして、積層作業は樹脂含浸の繊維体を順次積層して巻きつける手法で、10m*10m*300m の大型の構造物を構築する。基本的には、再外層の積層は 4 面それぞれ 2 回の反転で積層する。つなぎ部以外には積層後の外面からのフィルムバックによる真空付着などは行わないで、作業台をクレーンでつるして連続積層作業を行う。なお、この作業は、雨天時は約 20m のスライドテント屋根下で行う。また、能率的な積層作業には掃海艇など大型 FRP 構造体を作るのと同様に自動含浸器や真空バイブレータ層間脱泡機なども用いるとよい。また、15℃以下では遠赤外ヒータなどを必要とするが、超大型構造物も 1 週間程度で成形できる。部材の成形が終了後に同一現場で大型部材の接合積層を開始する。これには接合間に同様にまずウレタン発泡で一体化、次いで外層を順次積層する。初期に 5mm 程度を早期硬化するなど(ホットパッチと呼ぶ)して構造物の組立促進を図ることを推奨する。なお、FRP 構造物の大型組立の日本における実績は、高さ 200m を超える煙突、60m の掃海艇などであるが、大型造水プラントなどの大型配管では数千トンを超える一体の構造物を製作した実績もあり、技術的には問題はない。

4. FRP 製の国立競技場の推定性能

一般に、大屋根に係る屋根には、短期最大荷重としては積雪がある。他に台風、地震などの荷重があるが、それらは重なり合わないことを前提とした設計がなされる。すなわち、大屋根の場合は、最大荷重は積雪である。通常、最大積雪量は 200kg/m^2 程度を基本とし、以上の積雪は自然落下する傾斜勾配を設ける設計を行うことが要求される。

- 荷重: 雪荷重が最大で0.5mと仮定で 200kg/m^2 (約14130トン)とする。
 風荷重、地震荷重は以下であるため、自重と積雪のみで検討。
- 梁: ①アーチ: 長さ300m、高さ50m、自重は約1515トン
 近似垂直荷重: $w = (14130000/6 + 1515000)/30000(\text{kg/cm})$
 = 129 kg/cm(自重含む最大荷重)
- ②円形フレーム: 300m径
 近似引張荷重: $F = \pi * 300 * 300 * 0.2 / 4 / 2 / 3(\text{ton})$
 = 2355 ton 引張荷重
- ③サブフレーム: 長さ250m、4本、荷重50%負担
 近似垂直荷重: $w_2 = 14000000 / 2 / 4 / 25000(\text{kg/cm})$
 = 7.0 kg/cm
- 自重: FRPは密度1.7 ①アーチ: $10 * 10\text{m}$ 、50mm強化材
 ②③サブフレーム: $5 * 5\text{m}$ 、50mm強化材
- ②円形フレーム総延長: $L = \pi * 300 = 900\text{m}$, 1900トン
 ③総延長: $L_2 = 1500\text{m}$ 3150トン
- 応力計算: ①③は曲梁の両端支持曲げモーメントで①がスパン大で
 ③の引張力に比べても最も応力が高い。
 よって、①の応力概算計算のみを示す。

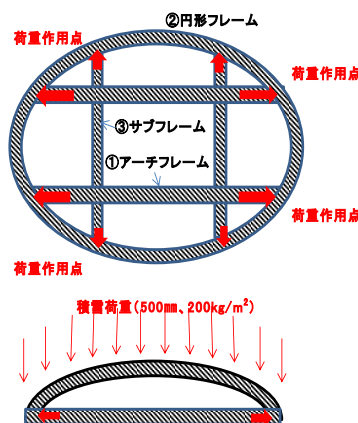


図5 基本構造梁に加わる荷重

図5は、図3の構造モデルをさらに簡素化した基本計画用の計算モデルである。荷重条件は、積雪で積層材料はガラス繊維強化FRPである。それぞれの部材①②③の設計条件・荷重条件を示している。ここで、応力計算は、①アーチフレームに作用する応力が最大となることから、①の応力計算を行う。さらに、100年耐久とするために選択される積層材料の許容応力(必要耐久性能)は、図6-1~6-2に示す。

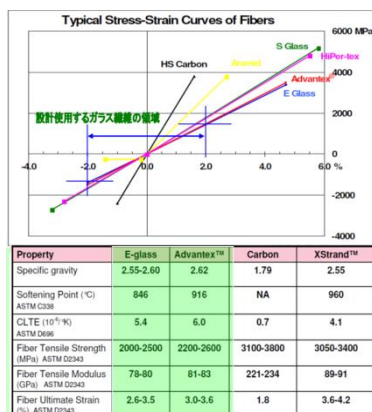


図6-1 各種強化繊維

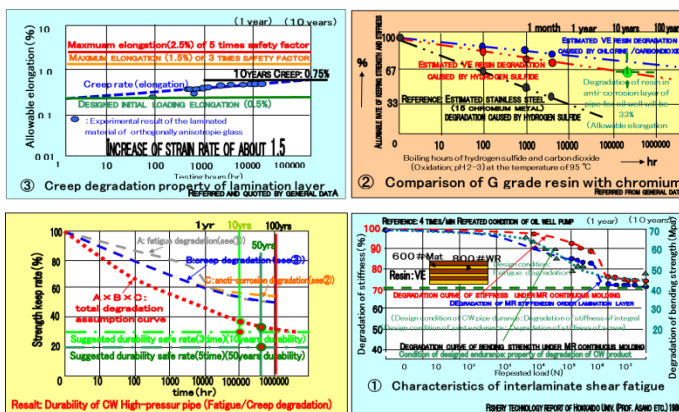


図6-2 耐久100年設計(Sf5-10)

図6-1から、E-Glassの最大伸度2%、1800MPaの50%Vol、軸対周方向1:2配分の直交異方性強化繊維を用いるとする。この場合の理論破断強度は、600MPaであるが、均一配向ができず、Max450MPaとして設計する。図6-2は、FRPに関する著明な文献

を引用した①は疲労劣化、②は耐食劣化、③はクリープ劣化曲線である。広く一般には AWWA (アメリカ水道管技術標準) の耐久設計基準の図中央の赤破線が示す①*②*③が製品の耐久性能であるとの定義が使用されているため、100年後の許容応力は、これらの条件を加味すると劣化が約70%程度考えることが必要と見受けられる。すなわち、エラーを考えると、安全率表示では、8倍程度あれば問題なく耐えると考えられる。すなわち、これは溶液が pH2、クリープ100年、疲労 10^8 回の耐久能力劣化を想定した約70%となったことを示すも、薬液にも荷重も疲労もこれほど過酷な条件とならないことから、必要十分な劣化想定である。

耐久100年の設計・概算コスト計算書(40年間メンテナンスフリー)

許容応力	FRP材料はガラス繊維一般材を用いた場合 長さ方向破断応力: 450MPa, 周方向破断応力 225MPa 50%Vol 応力計算は、薄肉簡易計算。 3方向支持の条件 断面2次モーメントは角管で近似: $Z=1/6(h_2^4-h_1^4)/h_2$ 曲げモーメントは分布の両端固定: $M=wL^2/24$ 梁長さ300m	梁の大きさ: 1000 cm 強化層肉厚: 5 cm 材料の密度: 1.7 荷重: 129 kg/cm Z: 3308417 cm単位 M: 4837500000 kgcm単位	最大作用応力 1482 kg/cm ²
	耐久許容20%以内、13%で安全率約8倍(100年耐久) 強化層厚さ 約50mm、密度1.7、発泡材40~60倍発泡 セパレータは強化材の一部使用で概算	ガラス繊維使用FRP材で製作可能 (屋根材約200トンシートFRP含む、総重量は概略計算は過剰なため8000トン以下と推定)	①300m梁自重 3030トン ②円形フレーム自重 約1900トン ③サブフレーム自重 約3150トン 合計約8000トン。
見積	総自重: 約8000トン ガラス繊維 約4000トン 樹脂 約3900トン シート 100トン	材料価格(@単価2017年有効価格) 費用(万円) ¥@4000000円/トン 16億円 (国際資材) ¥@6000000円/トン 23億4000万円 (国内資材) ¥@18000000円/トン 18億円 (国内資材)	合計 57億4000万円
	工事・加工費: 100名 * 500日 * 5万円 約25億円 消耗費: 約1億円 重機レンタル: 100トンクレーン10基、小型ユニック・ホーク10基 * 600日 ¥@8万円/日 約9億6000万円 仮設費: ¥@5000 * 2年 * 900000㎡ 約9億円 (足場など仮設資材、工事電源含む)		総工事費(基礎除く) 91億円(税抜) 管理費・設計費除く (概略10%入れて100億円)
		合計 33億6000万円	

上記の計算書は、図5に示す計算条件で許容応力を求めた結果である。選択された材料の持つ強度450MPaに対して最大積雪時の作用応力は5.3kgf/mm²(約53MPa、破断450MPa)、設計破断値の約12%であることから、残留劣化許容破断値の約30%にまだ十分な余裕がある小さな値である。

すなわち、この設計は概略100年耐久となっていることが明らかである。(参考:造水プラントなど大型構造物では安全率5倍、20%の許容荷重では40年の耐久とされ、多くの実績と信頼がある。)

5. 製作コストの推計

FRP構造物は耐久性が十分であることを照明したが、次に最も重要なコストを試算する。上記表に示す見積もり金額は、基礎工事を除く屋根上部構造を対象に試算した結果、約100億円あれば実行可能であることが証明される。計算根拠は、このような工事経験から、必要な治具、仮設材、人件費、運搬機、材料費を実績にもとづき計算した。

すなわち、総重量8000トンの大型FRP構造体工事が約100億円と見積もったのは、¥1250/kgの単価のFRP大型工事を意味する。これは国際相場の約2倍の価格である

ので、適正な予算と解釈する。

なお、構造材と小梁や弓型曲がり梁やロープなどの取りつけは、ステンレスビョウ止による取付とし、工事用作業台もフック M10 の埋設ロックで固定される。なお、開閉屋根など上部メンテナンスには、開口幅の移動ゴンドラの設置を推奨する。

さらに、構造物の防火基準を難燃か準難燃とする検討の必要性もあるが、空間が大きく、その必要性の確認も必要である。

結論：公開されている鋼材によるボックス構造体の製作予定価格は約 1500 億円などとのこと、さらに開口屋根など除外、ここで検討した結果とあまりにも必要コストが異なる。すなわち、計画を FRP 製にして、国際入札を行えば、答えは推定通りとなることが判明する。工期は 2 年で問題ないと追記する。