アラミド繊維補強を用いた木造 HPシェルと鉄骨張弦梁による ハイブリッド構造の設計 (その 1)

—山寺郵便局の構造デザインとその展開—

DESIGN OF HYBRID STRUCTURE CONSISTING OF STEEL BEAM STRING STRUCTURE AND WOODEN HP-SHELL REINFORCED BY ARAMID FIBER (PART 1)

—Development of the structural design of the
Yamadera Post Office—

相原俊弘 —*1 三ツ井雅人 —*2
マリン・カトフ —*3 小田島正仁 —*4
幾島亜希子 —*5 鈴木良博 —*6
板垣直行 —*7 伊藤邦明 —*8

Toshihiro AIHARA —*1 Masato MITSUI —*2
Marin KATOV —*3 Masahito ODASHIMA —*4
Akiko IKUSHIMA —*5 Yoshihiro SUZUKI —*6
Naoyuki ITAGAKI —*7 Kuniaki ITO —*8

キーワード：
ハイブリッド構造, 木造 HP シェル, アラミド繊維, 鉄骨張弦梁, 積雪大荷重

Keywords:
Hybrid structure, Wooden HP-shell, Aramid fiber, Steel beam string structure, Large snow load

The research and development of hybrid structures cannot be referred as one with sufficiently actual results. In this report we suggested the wooden HP shells made by lumbers of two layers by which the direction lies at right angles with the lugscrew bolt. Here, an aramid fiber sheet is introduced into four wooden HP shells so that the intensity and rigidity of the shells are strengthened. This hybrid structure further combined with steel string beam structure is applied to Yamadera Post Office in Yamagata Prefecture.

1. はじめに

近年建築構造の分野において、ハイブリッド構造の開発・研究が進んできている。ここで言うハイブリッド構造とは、単に一つの部材が異種の材料の組み合わせで出来ているばかりではなく、架構のそれぞれが、異なる構法の組み合わせによって出来ている事が必要である。そしてその事により単一システムの構造にはない性能の発展や空間の魅力を獲得しているものとして捉えたい。このような考え方は研究・開発の分野においてもまだ始まったばかりであり、実例もそれ程多くないと思われる。設計の実務の分野においても、今後様々な発展形が望まれている状況と考えられる。

ここでは、直交した2層の木板の交差部をラグスクリューボルトによって固定し、構成した4枚の木造HPシェルにアラミド繊維シートを導入してシェルの強度と剛性を補い、さらに鉄骨張弦梁を組み合わせて架構全体の安定性を確保して、新しいシステムによるシンプルで軽快な構造空間を演出し、山形県の山寺郵便局の設計(設計: 南一誠+伊藤邦明)において応用した構造設計例を報告するものである。

図1 建築平面図

2. 山寺郵便局について

山寺立石寺は芭蕉の句でも知られる古刹である。下から見上げる山容や中腹から見下ろす景観は、一時は年間100万人を超える参拝客を惹きつけた魅力を持っている。建物敷地はこの立石寺の南のふもと、JR山寺駅の近くにあり、景観上の配慮を意識する場所であると共に、この地は豪雪地帯であり設計用積雪深度は100cmである。

郵便局の主要な空間はロビーと一体化した事務室空間であり、柱のない広々とした空間に柔かい反射光がトップライトからシェルの曲面をなす天井に沿って落ち、職場の快適性を支えるであろうことも意図した。

この郵便局の設計に相応しいと考えられた構造と構法を追求した結果、アラミド繊維シートによって補強されたフィンランド産製材による木造HPシェルと鉄骨張弦梁架構からなるハイブリッド構造による軽快な屋根が考えられた。この形は屋根の中央部に降り積もった雪を屋根周辺部に滞雪させ、屋根荷重の中央集中を避けてその軽

写真1 木造HPシェル内側・鉄骨張弦梁見上げ

写真2 HPシェル屋根東側立面

*1 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 博士後期課程・工修
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)
(株)S.D.G.代表

*2 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 博士前期課程

*3 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 助手・工博

*4 (株)伊藤都市建築研究所

*5 (株)S.D.G.

*6 (株)C.A.E.

*7 秋田県立大学システム科学技術学部 講師・工博

*8 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

*1 Graduate Student, Graduate School of Architecture, Tohoku Univ., M. Eng.

Structural Design Group Inc., Structural Designer

*2 Graduate Student, Graduate School of Architecture, Tohoku Univ.

*3 Research Assoc., Graduate School of Architecture, Tohoku Univ., Dr. Eng.

*4 Kuniaki Ito Architect & Associates Inc.

*5 Structural Design Group Inc.

*6 Cosmic Architects & Engineers Inc.

*7 Lecturer, Faculty of Systems Science & Technology, Akita Prefectural Univ., Dr. Eng.

*8 Prof., Graduate School of Architecture, Tohoku Univ., Dr. Eng. & Architect

減を意図すると共に、寺院建築の特徴である反った大屋根をも意識しており、夕日を浴びた屋根のシルエットは山寺の雰囲気によく溶け込んでいと感じられる。

3. 木造 HP シェルと鉄骨張弦梁によるハイブリッド構造

3-1 ハイブリッド構造の成立

建物屋根を構成するのは4枚の木造HPシェルの組み合わせたものであるがその平面内に直接屋根の鉛直荷重を受ける柱等の支持材は無い。当初の計画ではピラミッド状のフレームをx, y両方向の中央に設ける事などが考えられたが、構造検討を進めた結果、積雪大荷重に対してはテンションバーを用いて推力（スラスト）に対応し、構造全体に強度と剛性を与える鉄骨張弦梁構造との併用がスマートな方法と考えられた（図2）。

しかも積雪荷重に対してのみではなく、風荷重や地震力に対しても安定した性能（強度と変形）を保ちながら外周に配置された鉄筋コンクリート造の下部構造へ力を伝達する為には、単なるテンションバーのみならず中央部に鉛直材を設けて圧縮側の上弦材と結び、トラスの要素を持たせて屋根全体の剛性を確保するのが良いとの検討結果を得て、この鉛直材を丸鋼棒で細く作ることによって軽快さを表現しながらも有効な架構とすることが出来た。

テンションバーは2枚一組のフラットバーとし、照明機器の取付用レールと一体となって意匠的に見せるものとなった。

下部構造は建築計画に応じて配置された25cm厚の剛な鉄筋コンクリート造耐力壁によって構成されており、剛な床架構と一体になって地震・積雪等の荷重を支持している。

このように、上部より「柔（木造シェル）」と「強（鉄骨張弦トラス架構）」と「剛（鉄筋コンクリート壁式構造）」の組み合わせによるハイブリッド構造が成立するに至ったのである。

図2 鉄骨張弦梁・屋根架構システム

3-2 システムの構成

3-2-1 木造 HP シェル

当初の意匠設計側からの提案は、木製のフラットバー（25mm厚×140mm幅）を敷き並べたものを、材軸が直交するように2層に重ねてシェルの構成することが出来ないか、というものであった。4枚のシェル構造の1枚のサイズが6.5m×8.0m程度であり、積雪が100cm×30N/m²/cm=3,000N/m²という厳しい基本荷重条件であったが、

検討を重ねたところ不明な点は残るが成立の見通しが立ち、計画を進めることとなった。

板と板の幅方向の取り合い部は、コスト低減と施工性向上の観点から雇い実（やといざね）とし、板の剛性については上下の層の接合を強度・剛性に信頼性のあるラグスクリューによる接合とする事で確保することとした。そのため設計上は5cm厚の木板としての解析と、更に一体化が失われてきた場合のために1枚の2.5cm厚の場合の解析も行った。そしてHPシェルの面内・面外応力に対して、1枚でも許容値以内にほとんど収まっていることを確認した。

HPシェルの水平剛性は境界条件の有利さにより確保される。この4枚のHPシェルは各々4辺が10cm角材にラグスクリューボルトで固定される事によりピン支持されている。このうち3辺はさらに材が延長され隣のHPシェル又は同構法の平屋根と一体となり、水平変形が拘束されている。残る外周1辺は鉄骨の縁梁（裾梁）上の角材で支持されて屋根の縁を形成しているから、拘束されている隅角部の間でのはらみ出しによる水平変形のための許容とすることが出来る。しかしこのはらみ出しは縁梁を中間でつなぐ直交タイで殆ど抑えられるため、周辺自由なHPシェルに比べ同厚でも剛性・強度レベルはかなり高いものとして設計することが出来ている（図2、図3）。

屋根全体のHPシェルのトップからボトムにかけての対角線方向については、主応力である引張力に加えて面内ねじれせん断力も作用するためこれが本シェルにおける最大応力ゾーンであると判断し、アラミド繊維シートを接着剤を使用して上下層の間に挟んで一体化する補強を行ったが、これについては施工の項にて後述する。

材種に関しては設計の早い段階から検討が行われ、コスト面の有利さと乾燥収縮が少ない点からフィンランド産ホワイトウッド（スプルースの一種）とした。もうひとつは、シェル面がそのまま室内仕上げ面として見えるために肌合いの良いものを選んだ。

部材サイズ（板幅）に関しては規格品としてロットが存在する部材サイズを使用するという事から140mmで決定に至っている。

図3 木造 HP シェル構成図・やといざね詳細図

3-2-2 鉄骨張弦梁

鉄骨張弦梁架構は、 x, y 各方向のスパン上中央に井桁状に配置した4つのトラスによって構成されている。このトラスは圧縮側となる上弦材を溝形鋼 (C-200×90×8×13.5: SM400A)、センターに配置され上下を結ぶ鉛直支柱(センターストラット)を丸鋼(45φ: SM490A)、そして引張側となる下弦材を2本1組のフラットバー (2FB-9×75: SN490A) にて構成されており、これにより屋根全体の剛性を確保し、かつHPシェルのスラストに抵抗するものとしている。上弦材は x, y 各方向の部材が中央の交差部において、斜めのダイヤフラム (十字形プレート) によって一体化されて水平剛性を保っている (図2)。

3-2-3 各部材料

①ラグスクリューボルト

本HPシェルは x, y 各方向に直交するように配置した板材が2層に重なったものとして構成されているが、この上下層を一体化する為に強度・剛性に信頼性のあるラグスクリューボルト (8φ-40mm) を使用して強固な一体化を目指すこととした。面内ねじれせん断力に対してはこのラグスクリューボルトのせん断耐力が支配的な抵抗要素であると考えられる。

②アラミド繊維シートの採用と接着剤

先述した通り本HPシェルにおいては、トップからボトムにかけての対角線方向に主応力である引張応力が作用し、さらに面内ねじれせん断応力も存在することから、この最大応力ゾーンにアラミド繊維シートを配置することとした。単純にHPシェルの菱形変形の抑制・強度の確保という観点で板の存在応力を解析して検討し、シート幅は300mmとして (JISによる保証耐力の試験値157kN/枚) 接着剤を使用して上下の層の間に接着して挟み込むことで十分な効果が期待できると判断した (図3)。

また接着剤については、実建物において使用実績のあるウレタン樹脂系接着剤を採用している。

4. 木造HPシェルの応力と変形

本建物に使用したHPシェルの応力解析は有限要素法解析により行った。木造HPシェルの1枚を15×15の矩形ユニットに分割し、鉄骨張弦梁架構は線材に置換して両者を一体化して解析を行った。また、解析全体の整合性の確認の為に鉄骨張弦梁架構のみを取り出して、3次元立体解析を別途行った (表1、図4)。

結果として張弦梁架構中央部のたわみは両者において0.75cm～0.86cmとなり、比較的合致したものとなった。ただし木材に関しては後述の材料実験から得られた弾性係数を解析に用いたが、せん断弾性係数については使用解析ソフトの解析条件制限の関係上 $G = 0.25 E$ としているため、別途実施したせん断実験より得られた値よりかなり大きい数値となっているので、シェルの応力解析結果の取り扱いに関しては参考値として考慮するという事になる。

結果としてG+P+Sの積雪100cmの載荷時における鉛直変位は、シェル中央部において約10mm程度であるから、シェル1枚の短辺スパン5.5mに対して約1/550に収まっており、無理がなくかつ過剰でもない適切な状況であると考えられる。

表1 HPシェル解析条件一覧

	E(kN/mm ²)	G(kN/mm ²)	解析モデル	荷重条件
1	1.612	0.108	厚さ50mm換算	G+P
2				G+P+S(full)
3				G+P+S(20-50)
4	12.861	0.108	厚さ25mm換算	G+P
5				G+P+S(full)
6				G+P+S(20-50)

※弾性係数・せん断弾性係数は実験結果報告に基づく平均値を採用。

※弾性係数について、1.612は板厚50mmとして換算したもの、

12.861は板厚25mmとして換算したもの。単位はいずれもkN/mm²。

※せん断弾性係数について、0.108はアラミド繊維補強ありの時の算定値。

単位はkN/mm²。

※荷重条件中、S(雪荷重)について、(full)とは100cm(3000N/m²)考慮時、(20-50)とは実情に近い20cm(頂部)～50cm(下部)の積雪考慮時のこと。

図4 FEM解析結果 (CASE2 - 曲げ応力)

5. 施工

本敷地の地盤は表層からすぐにN値50以上の良好な砂礫層が露出しているため、基礎は地中梁を含む剛な礎板となる鉄筋コンクリート造とし、鉄筋コンクリート耐力壁をバランスよく配置した壁式構造として上部の屋根架構を支える形式としている。本報告では鉄骨工事と屋根 (HPシェル) 工事について報告を行う。

5-1 鉄骨工事

厳しい建設コストを考えると、特殊な張弦梁構造といえども合理的に製作できる必要があったので、部材は市販のH鋼や溝形鋼及びフラットバーなどを用い、取り合い詳細もボルト接合を中心として出来るだけ簡略化を図った。しかしながら張弦の引張応力が集中する中心部では、センターストラットは接合部において機械構造用の丸鋼を削って四角形として、引張力を伝達するフラットバー突合せ溶接としており、施工者には本箇所の溶接には細心の注意を払ってもらう事とし、その結果超音波探傷試験において合格欠陥もほとんど無い良好な施工とすることが出来た。

またボルト接合部が多くあるため、出来上がりの寸法誤差の目標を1mm程度として工場内で仮組みを行って調整し、製作精度が確保できることを予め確認した。そこで現場では特にキャンパー (起り) を設けずに製作を行ったが、支保工除去後の鉛直変位は約15mmであった。

5-2 木造工事 (屋根工事)

HPシェル周辺部において、RC造耐力壁の上部に鉄骨の縁梁 (据梁) を配置して屋根のHPシェルを受けることとしているが、この鉄骨縁梁と木造のシェル本体を直接接合・固定することは工法上無理がある。そこでこの両者の接合を容易にし精度を確保するために、間に100mm角の木材 (米マツ) を設置した。これにより鉄骨梁と角材をボルトジョイントとし、角材と木造HPシェルを釘打ち (ラグスク

(鉄骨架構・現場状況)

(HPシェル用板1層目敷き込み)

(アラミド繊維シート貼付)

写真3 施工状況

そこで現場組立案、つまり建物内部のほぼ全面に仮設支保工を組み、部材を一本ずつHPシェルの形状通りに設置・取り付けを行うのが無理のない工法と考えられた。ノンステージ工法に比して若干の手間が増えることとなったが、施工上は無理なく順調に組み立てることができた。

6. 変形の測定

本建物は2002年1月に竣工しているが、竣工後もHPシェル本体のほぼ中央部及び鉄骨張弦梁中央部において、竣工前(2001年末)より継続して鉛直変位の測定を行っている。2002年3月上旬までは積雪や気候の変化を考慮して測定の頻度はやや多めに、以降は折を見て現地を訪れて測定を実施している。

その結果、シェル中間部において2002年初頭の最大積雪時(約50~70cm)における最大たわみが15~20mm、鉄骨張弦梁のセンターストラット下端における最大変形はその後の最高時点の高さからの変形を見ても10mm未満であった。測定の精度を鑑みても荷重と変形の関係に不自然な点はさほど認められず、設計の妥当性が窺えるの

りューボルト)という簡単な接合を実現した。これは若干の施工誤差を吸収できるジョイント材としての効果をも持つものとなっている。

HPシェルは直線的配置の板材の組み合わせにより曲面を構成することが出来るシステムであるが、直線的材であるとはいえ実際の木板には厚みと幅があって、HPシェルの形状を構成する事によるねじれを、板材であるホワイトウッドに与える事になる。雇い実の採用はこれを見込んで出来るだけHPシェル曲面全体を一体化させることが目的であったが、仮設工事を含めたHPシェルの組立・設置工事もこの観点から検討がなされた。

当初の組立て工事には地組み(シェル先組み)によるノンステージ工法を考えていたが、完成した版の剛性が大きく、形状が所定のHPシェルの形状になじまない懸念があった。

ではないかと考えられる(写真4・図5)。

なおこの測定は現在も継続して行っており、今後も適当な期間を置いて計測を実施していくことにしている。

図5 木造HPシェル及び鉄骨張弦梁の鉛直高さの変動状況

7. まとめ

本物件においては25mm厚さのホワイトウッドを直交させ、ラグスクリーボルトによって固定した2層構造のHPシェルを構成、さらに層間にアラミド繊維を組み込んでシェルの強度と剛性を確保している。そして鉄骨の張弦梁構造と組み合わせたハイブリッド構造として、16m×13.5mの大空間を無柱空間として、かつ1mの積雪に耐え得る設計を行った設計例の報告であるが、その意義をまとめると以下の通りと考えている。

- (1) 市販の製材品木材とラグスクリーボルトを使用した簡易な木造HPシェルの実現は汎用性が高い上に、構成を変えることによりさらなるスパン延長など、新構法展開の可能性がある。
- (2) 木造と鉄骨を組み合わせたハイブリッド構造は近年様々な形で発展を遂げてきているが、HPシェルと張弦梁という組み合わせは殆ど前例が無く、このようなシステムを成立させる事には建築設計及び構造デザインの発展という観点上意義があると考えられる。
- (3) アラミド繊維は高強度で引張剛性に優れる性質を持ちながらも、建築一般での使用例は極めて少ない。しかし、他の材料とのハイブリッド構造として用いる事ができるならば、建築及び構造設計上におけるデザインの選択肢を広げるという事の意義は極めて大きいと言える。

謝辞

東北郵政局施設情報部、郵政互助会、山寺郵便局の皆様には大変お世話になりました。また、本建築の設計並びに施工、及び構造実験用試験体作成においては、藤寿産業より実験用ホワイトウッド材、ファイベックス株式会社よりアラミド繊維及び技術情報の提供を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- ・板垣直行、伊藤邦明、相原俊弘、三ツ井雅人：「HPシェルに用いられた木質積層板の力学的特性に関する実験的研究」、日本建築学会東北支部研究報告集・構造系、第65号、PP.55-58、2002
- ・Karl-Heinz Gotz, Dieter Hoor, Karl Mohler, Julius Natterer: Timber Design and Construction Sourcebook: A Comprehensive Guide to Methods and Practice

[2002年10月18日原稿受理 2003年2月25日採用決定]

写真4 積雪時のHPシェル屋根(南側)