アルミニウム合金を用いたハニカムとサンドイッチパネル構造の設計

—構造の抽象化による新しい空間表現の実現—

新谷真人 —*1 堀田祐介 —*2
永井拓生 —*2

キーワード:

アルミニウム合金構造, ハニカムコアとサンドイッチパネル, シンボリックなパビリオン, 透過する構造

Keywords:

Aluminium structure, Combined with honeycomb and sandwiched panel, Symbolic pavilion, Transparent structure

DESIGN OF HONEYCOMB AND SANDWICHED PANEL STRUCTURE WITH THE USE OF ALUMINUM ALLOY

—A new spacial expression realized by abstracting the structure—

Masato ARAYA —*1 Yusuke HOTTA —*2
Takuo NAGAI —*2

This Paper reports Honeycomb structure made of aluminum alloy in "Brugge 2002 Pavilion". Honeycomb and Sandwiched-panel have completely different strength and rigidity each other. The layout of these structural elements defines the stress diagrams in the both of structure and expression of the architectural patterns. The transparency of honeycomb, directed by the diagrams, makes the space and the structure of the pavilion abstractive. The synthesis of architectural expression and structural system harmonizes the Pavilion to the town with the medieval atmosphere. The work inherits "Realization of new spatial expression by abstracted structure" in "K residence at Sakura Jousui".

1. 序論

近年建築に用いられる構造材料として、鉄・コンクリート等の材料に加え、アルミニウム、ステンレスなどの新しい合金材料が注目されている¹⁾。中でもアルミニウム合金は、軽量で耐食性及び強度に優れているばかりでなく、延性に富み比較的やわらかいため、加工性も高い。このような特性を持つアルミニウム合金は、ハニカムのような複雑な形状も精度良く容易に実現でき、高い精度の要求される設計に対応できる材料として将来性は高い。これまでに、難波和彦（建築設計）・飯島俊比古（構造設計）の「アルミエコハウス²⁾」や伊東豊雄（建築設計）・新谷真人（構造設計）の「桜上水 K 邸³⁾」などがアルミニウム合金を用いた住宅として実現されている。

本論では、この様な新しい構造材料としてアルミニウム合金を用いた「ブルージェ・パビリオン」のハニカム構造について報告を行なう。

既に技術報告を行なった「桜上水 K 邸」の構造システム⁴⁾は、柱・梁の軸組みが鉛直荷重を支持し、壁の仕上げ面としても用いられるアルミパネルは、水平力に抵抗する耐震要素となる。同様に屋根と床にもアルミパネルが用いられ、屋根パネルは防水機能も兼ねている。柱は外側が角型の断面で、内側に十字型断面をもつ「田」の字型のアンボンドブレースのような形状で構成され、座屈耐力を高めながら、サッシ枠と一体化されている^{5), 6)}。全ての部位にアルミニウムの素材特性を活かした建築と構造機能の一体化が果たされ、共通化による部位概念の消失・抽象化によって新たな建築表現がなされたものであった。

今回報告を行なうブルージェ・パビリオンは、アルミニウム合金の帯板を折り曲げて作られたハニカム要素と、それを両面からはさむサンドイッチパネルで構成される。二つの構造要素はそれぞれ全く異なる強度と剛性を有する。この二つの要素の配置が構造の応力を規定し、ハニカム要素の透過性が構造を抽象化して内部と外部を一体化した空間を表現している。建築表現と構造システムの融合によって、パビリオンは最も現代的でありながら中世のたたずまいをもつ街並み

と調和している。この建物は桜上水「K 邸」と用途・形・構造は全く異なるものの、「構造の抽象化による新しい空間表現の実現」を継承するものである。

2. ブルージェ・パビリオン設計の経緯と概要

EU（ヨーロッパ連合）は連合の成立を記念して、毎年ヨーロッパの都市の中から2つを選び、その年の文化首都とする制度を設けた。選ばれた都市は文化首都にふさわしい事業をおこなう。2002 年、この文化首都としてベルギーのブルージェ市が選ばれた。ブルージェ市は中世において城塞都市を形成していた。掘割の中にかつての町並みを残し、現在は観光都市とし世界的にも有名である。事業の一環として市当局は、市発祥の地であり遺跡が埋蔵されているブルク広場に、シンボリックな施設の建設を計画した。施設建設の主要なテーマの一つは、中世の面影を残しながら停滞する市中心部の建築デザイン活動の活性化であった。

ブルク広場には市庁舎をはじめとする中世の建物が面する。設計者である建築家伊東豊雄によって、この環境に溶け込みながら現代を表現し、遺跡が埋蔵されている地中に過大な負荷応力を発生させることの無い軽い建築が構想された。その要求を実現できる素材としてアルミニウム合金が選択された。アルミニウムは工業素材としてわずか100 年程前に利用が始まった最も現代的な建築素材であり、その比強度の大きさは重量の軽い構造を可能とし、基礎に与える影響も少ない。そして構造材表面をそのまま仕上げ面とすることができるという、優れた特性を持っている。

建物はパビリオンであり特定の用途はもたない。門形の断面が連続して極めて単純な直方体をかたちづくる。建物の平面・立面・断面図を図1に示す。地上1階で、平面寸法は幅 6.75m、長さ 16.0m、高さは 3.75m である。建物は人工的に作られた池から立ち上がり、内部は浮橋を渡って通り抜けることができる。

*1 (株)オーク構造設計
(〒150-0031 東京都渋谷区桜丘町29-33 308)

*2 早稲田大学大学院理工学研究科 大学院生

*1 Oak Structural Design Office

*2 Graduate Student, Science and Engineering, Waseda University

Pond (R=0-9000)
water
stabilized sand
plastic seat

Pond (R=0-9000)
water
white gravel t=50
stabilized sand
plastic seat

15272
15242= honeycomb x 90

Side aluminium FB t=15

Aluminium Bridge
aluminium embossed plate t=2
aluminium plate t=5

Floating Bridge (WL+60)
polycarbonate t=2 (non-slip surface)
plastic honeycomb t=25x5
polycarbonate t=5

21600
24800

Wall
aluminium honeycomb D=125 t=3
aluminium panel t=1
polycarbonate t=12

Roof
polycarbonate t=12
aluminium panel t=3
aluminium honeycomb D=125 t=3
roof angle=1:200

Wall
polycarbonate t=12
aluminium panel t=3
aluminium honeycomb D=125 t=3

Floating Bridge
polycarbonate t=5
plastic honeycomb t=25x6
polycarbonate t=2 (non-slip surface)

GL+0
filter

Long Section 1/75

Foundation reinforced concrete t=200

Short Section

polycarbonate roof top = WL+3610
structure top = WL+3551

WL=GL-10 GL+0
WL-426

Burg Elevation 1/
Roof
roof angle=1:200
polycarbonate t=12
aluminium panel t=3
aluminium honeycomb D=125 t=3

Wall
polycarbonate t=12
aluminium panel t=3
aluminium honeycomb D=125 t=3

Floating Bridge
polycarbonate t=5
plastic honeycomb t=25x6
polycarbonate t=2 (non-slip surface)

WL+60
WL=GL-20 GL+0

Provinciehof Elevation 1

主体構造はアルミニウム合金材を使用したハニカム要素とハニカム+サンドイッチパネル要素からなる。パビリオンの平面形は長方形である。構造はカルバート状の形をしている。雪荷重を含む鉛直荷重および風による短辺方向の水平力は壁と屋根が構成する門形のフレームが抵抗する。建物長手方向の風による水平力は壁が負担する。基礎はベタ基礎形式の直接基礎である。

カルバート状の構造を連続して配置された門形フレームと考える。鉛直荷重を受ける門形フレームに生じる曲げモーメントに応じて、強い構造要素と弱い構造要素を配置すると図4の(a)、(b)のようなパターンが生まれる。通常、門形ラーメンの曲げモーメント図を分解してそれぞれに応じた構造要素を連続的に並べると図4(c)のパターンを得る。最終的にはこれを変形したパターンを基本として設計を進めた。

図4 スケッチ

136

連続的に配置された 3 つの異なるパターンの変形状態を分析するために、カルバート形状の構造体であるブルージェ・パビリオンを図 5 に示す 3 パターンの門形フレームに分類し数値解析を行ない、紙模型による確認を行った。パターン 1: 梁端/柱頭をサンドイッチパネルで補強、パターン 2: 補強の無いハニカムのみ、パターン 3: 梁中央/柱脚をサンドイッチパネルで補強である。

これらを比較すると、パターン 1、3 の変形は小さく、パターン 2 の変形は大きいことが明らかである。しかし図 6 のようにパターン 1、パターン 2、パターン 3 の順に並べて連結すると、弱いパターン 2 が介在しても、ハニカム部分でせん断力の伝達がなされ、弱いパターン 2 の変形が抑制されることも明らかになった。

図 5 孤立したパターン

図 6 連結したパターン

図 7 の模型写真において a) は各パターンが孤立した状態を示し、手前側がパターン 2 である。載せている雑誌は平均重量で各々一冊約 780 g である。b) は各パターンを連結した状態である。雑誌は各パターンの上に 3 冊ずつ、計 9 冊載せられている。

a) パターン 1~3 の比較

b) パターン 1~3 の連結
図 7 模型写真

4. 構造設計

4. 1 構造計算のプロセス

1) 計算手法の妥当性

計算を始めるに際し、計算方法の妥当性を検証するために、線材モデルと有限要素モデルによる解析法を比較した。もし線材モデルで解析可能であれば、解析モデルの作成や結果の評価、設計変更への対応が容易になる。しかし、紙等による模型の変形とを用い比較した結果、線材モデルではハニカムの振れ挙動を正確に評価できないことから有限要素モデルを用いることにした。

2) 非線形性の解析

ハニカムの変形がスパンに対して大きいことから、幾何学的非線形解析を行ない変形・応力を確定した。設計過程で実際の大きさのモックアップを製作したところ、載荷後に残留変形が認められた。これらの非線形性はハニカムの振れ挙動によると推測される。

4. 2 ハニカムとサンドイッチパネルの寸法決定

1) ハニカム要素

パビリオンにおけるハニカム要素の板厚と板せいは、建築的には壁や屋根を構成する部材の見付けと奥行きであり、建築表現に大きな影

響を与える。しかしハニカム要素単独の構造はなく、その力学的特性を定式化した文献もない。このためハニカム要素の板厚、板せいによってハニカム構造の変形がどのように変形するかを解析によって調べた。図8にその結果を示す。

さらに変形とスパンとの関係についても解析し、変形はスパンの4乗にほぼ比例することを確認した。

図8 列数1における板厚/板せいによるパラメトリックスタディ

作成したグラフを検討の結果、ハニカム要素の板厚を2.5mm、板せいを125mmに決定した。

2) サンドイッチパネル

従来、航空機の翼にはハニカムをコアとするサンドイッチパネル構造^{7),8)}が用いられている。しかしその場合コアとなるハニカムのサイズと板厚の比は10以上と大きく、せん断流による座屈を生じることが知られている。今回パビリオンに用いるハニカムのサイズと板厚の比は5と小さく、せん断座屈の心配はない。そしてサンドイッチパネル構造要素はパネルがフランジとして働くのみでなく、ハニカム要素の振れを拘束するため、剛性はハニカム要素のみの剛性を大きく超えている。板厚は1mmでも十分であることは明らかであったが、座屈および接合を考慮して設計は2mmとし、また工場製作に際し入手可能なアルミ板材の板厚が3mmであることから、ハニカム要素とサンドイッチパネル要素の板厚はすべて3mmとした。

3) サンドイッチパネルとハニカムとの接合方法

サンドイッチパネルはハニカム要素の両面に貼られる。片面は直接溶接による接合が可能である。もう一面を溶接するにあたり三角形のプレートにハニカム要素に溶接接合する。次に、サンドイッチパネルに孔を明け、三角形プレートと孔周囲を隅肉溶接した。(図9,10) サンドイッチパネルと三角プレートの間に生じているせん断力から、必要なノド厚と溶接長を算出した結果、溶接孔の必要半径は11mmである。

図9 三角プレートとサンドイッチパネルとの接合詳細

図10 接合のための三角プレート

この三角プレートは、ハニカム要素の斜辺と直辺の交差する角度を保持するので、斜辺の振れ変形を拘束して要素全体の剛性を高める働きがある(図11)。

a) 三角プレート無しの変形図

b) 三角プレート有りの変形図

図11 三角プレートの働き

4. 3 部材設計

1) 設計規準: 設計規準は、Euro Code に従う。各規定を以下に列記する。

- ・構造設計法: 終局強度法

(Ultimate strength design defined in ENV 1991 第1条)

- ・荷重条件: ENV1991 第2条3項, 1991 第2条4項
- ・材料強度: ENV 1999 第1条
- ・使用材料の規定はアルミニウム合金 (Code No. 5083-0/H11)

・荷重および条件

：固定荷重：構造体自重＋ガラス重量（DL と表記）

：積載荷重は考慮しない

：風荷重（WL と表記）

$$F_w = q_{ref} \times C_e(Z_e) \times C_d \times C_f \times A_{ref} = 0.656 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{ref} = \rho / (2 \times g) \times V_{ref}^2 = 0.431 \text{ kN/m}^2$$

：積雪荷重： $\mu_i \times C_e \times C_t \times S_k = 0.457 \text{ kN/m}^2$ （SL と表記）

・組合せ荷重：荷重の組合せは、各荷重に以下に示すような係数をかけて定める。

LC1: DL×1.35

LC2: DL×1.0（偏荷重による変形計算用）

LC3: DL×1.0＋SL×1.5

LC4: DL×1.0＋WL×1.5

5. 工場製作と現場施工

ハニカム要素の加工製作について述べる。製作はその大部分を工場で行った。構造全体を3つの部分に分け、さらに屋根と壁とを別々に分ける。合計9個の部分に分割して製作する。

組立を完了し全体の建て入れと通りを修正して最終形を決定した後、パネル相互を現場溶接によって接合した。アルミの溶接はデリケ

d) 溶接

図 12 ハニカムの加工・製作

図 13 サンドイッチパネルの製作

ートさが要求され、精度や溶接環境の悪い現場溶接は難しいとされてきた。製作側はこのため、工場で一貫してこのパビリオンの溶接に従事していた溶接工一人を現場溶接にも起用して行った。

a) アルミ板の折り曲げ

b) ハニカム溶接の準備

c) 溶接ひずみの拘束

a) 現場組立

b) 現場溶接

図 14 現場における組立と溶接

アルミの構造部材の製作は大半が工場で行われ、現場で行われるのは単純な接合のみである。パビリオンはハニカム部分が開口部として残るために、ポリカーボネードで覆っているがそのための作業も軽微です。現場での組立期間はほぼ1.5ヶ月である。内分けとしては、基礎-アルミ取り付け部の調整も含めて、アルミ躯体の組立及び溶接に30日、ポリカーボネードの取り付けに10日である。

5. ハニカム構造の変形について

設計過程において、紙模型あるいはアルミニウム模型によってハニカム構造の実際の変形状態を確認した。その結果FEM有限変形モデルによる解析値を超える変形及び局部に過大な応力が生じ、変形が残留することが明らかになった(図15,16)。

これはハニカム要素の斜め部分の挙動によると推定される。設計段階では、解析と模型における変形量の比較からパビリオンのスパンを原設計の85%程度に減じて対応した。

図15 アルミモックアップによる確認

図16 モックアップ溶接部の剥離

6. 結論

本報告は、アルミニウム合金の応用による新たな構造の報告である。この構造は以下のような意義をもつ。

1) 軟らかく延性をもつアルミニウム合金の優れた特性を生かし、折り曲げた帯板を2枚あわせ、背中合わせになった板の縁をI型溶接して大型のハニカムをつくる。この方法に折り曲げ精度を高め、溶接歪みを低減し、応力集中部に補強溶接を施すなど、製作における工夫を行った。こうして製作された広い面状のハニカムおよびハニカム構造の両面に板を溶接したサンドイッチパネルによる構造は、建築分野におけるアルミニウム合金による新たな構造である。

2) アルミニウムのもつ耐食性そして柔らかなテクスチャを利用し

て、構造体をそのまま仕上げ面とする。構造要素であるハニカム面とサンドイッチパネル面すなわち透過する部分と不透過の部分はそのまま建築の開口あるいは壁となっている。部位が構造或いは建築としての機能境界を消失し、構造が抽象化した新たな空間表現を可能にした。

3) 軽いアルミニウム合金構造によって、埋設している中世の遺跡の保存に配慮し敷地の地中部応力の増加を抑えている。同時に抽象化された建築表現によって、もっとも現代的な建築素材を利用しながら、ヨーロッパ中世の面影を残すブルージュの街並みに融合した、優れた建築を創出した。

謝辞

ベルギー国ブルージュ市が2002年のEUの文化首都として選ばれ、このプロジェクトは企画された。プロジェクトが始まってから実現に向けて、多くの方々の熱望と尽力によりブルージュ・パビリオンは実現した。このパビリオンの実現に尽くした建築家伊東豊雄氏をはじめとする多くの関係者に敬意を表すると共に、構造設計の機会を与えられたことに深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 新谷真人：アルミ構造による空間構造と表現-アルミ構造のこれまでそしてこれから-、シンポジウム最近の建築・土木(橋梁)におけるアルミ構造と接合、(社)軽金属溶接構造協会、pp. 49-58, 2003. 2
- 2) 難波和彦、飯島俊比古：「アルミエコハウス」、新建築住宅特集、2000年1月号
- 3) 伊東豊雄、新谷真人：「桜上水K邸」、JA37、2000年春号
- 4) 新谷真人、岡本憲尚、平田晃久：アルミニウム合金による耐震パネルを用いた住宅の構造設計、日本建築学会技術報告集第11号、2000年12月増刊
- 5) 澤井清輔、小野徹郎、石田和人、橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究(その32)アルミニウム合金十字型断面アンボンド柱の圧縮座屈試験、日本建築学会大会学術講演論文集構造III、pp. 1001-1002, 2000
- 6) 石田和人、小野徹郎、澤井清輔、橋本篤秀：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究(その33)アルミニウム合金十字型断面アンボンド柱の座屈耐力評価、日本建築学会学術講演論文集構造III、pp. 1003-1004, 2000
- 7) 小林繁夫：航空機構造力学、丸善、1992
- 8) J.R. Vinson, R.L. Sierakowski：複合材料の構造力学、日刊工業新聞社、1987
- 9) S.P. Timoshenko：Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 1934

[2003年10月10日原稿受理 2004年2月23日採用決定]