

パナソニックグループ パビリオン「ノモの国」 ファサードの構造設計

Panasonic Group Pavilion “The Land of NOMO” Structure design of Facade

三井 達雄*1、山口 温弘*2

1. はじめに

パナソニックグループパビリオンは、 α 世代の子どもたちの感性を刺激し、世界とのつながりを感じる中で、創造力や可能性を解き放つ体験型パビリオン

「解き放て。こころと からだと じぶんと せかい。」というコンセプトに基づいて計画された。

「ノモの国」という名前には、捉え方によってモノの見え方は変わってくる、いわば、「モノ」は心の写し鏡である、という思いが込められている。

そこで、周囲の自然や人の動きを映し出す「写し鏡」として、ステンレス鏡面仕上げの外壁を建物に採用している。また、その建物を覆うように配置したファサードは、世界とのつながり、つまり、“循環”をイメージしたモチーフが集まって全体を形成するデザインとすることで、循環する世界の一部であることを表現している。加えて子供たちの多様で変化し続ける可能性を、膜のそよぎや光の当たり方によって特定のカタチを持たないデザインにより表現している。

本稿では、このように計画されたパビリオンのうち、ファサードの構造計画について報告する。



写真-1 建物全景（昼景）



写真-2 建物全景（夜景）

*1 MITSUI Tatsuo : (株) 大林組 設計本部 構造設計部

*2 YAMAGUCHI Atsuhiko : (株) 大林組 設計本部 構造設計部

2. 建築計画概要

本ファサードは、「風にたなびくファサード」のコンセプトのもと、建物のファサードを構成する工作物として計画した。敷地の北面が東ゲート広場に、西面が来場者動線となる通路に面していることから、それらに向けて建物の北面・西面にそれぞれ独立したアーチ群からなるファサードを配置した。

このファサードは、前述のようにパナソニックパビリオンのテーマでもある「循環」を表す三次元的に曲げられたユニットフレームを原単位とし、そのユニットを約1400個組み合わせることで全体を形成した有機的なデザインである。それぞれのユニットに風をいなすように膜を張ることで、建物全体にダイナミックな動きを与えている。さらに、オーガンジー素材の膜を採用することで、夜間は照明により染め上げられた幻想的なファサードに表情を変える。

ユニットのフレームには、海沿いという立地の特性上、発錆の懸念からZAM（亜鉛、アルミニウム、マグネシウム）によりめっきされた鋼管を採用し、意匠性に配慮している。また、風をいなすように膜を張り風圧力の軽減を図ることで、鋼管径を最小化し軽快なファサードを実現している。

このファサードは、ユニットを積層して形成されたアーチの集合体として計画した。1つのアーチは、原単位であるユニットフレームを約20段積層することで形成している。アーチには4つの半径があり、ユニットもアーチの半径に合わせた4種類のサイズを用いている。この半径の異なるアーチを平面的に連続させることで、ファサード全体に動きを出しながらも、全体架構として成立する計画としている。

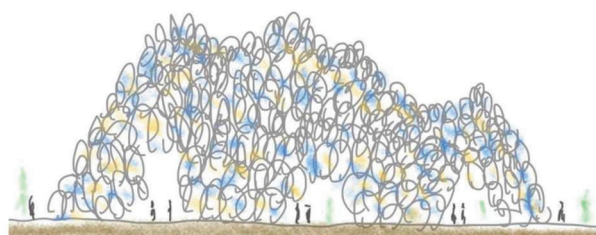


図-1 ファサードの初期スケッチ

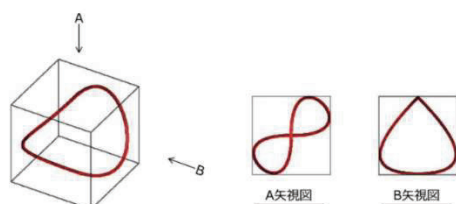


図-2 ユニット形状

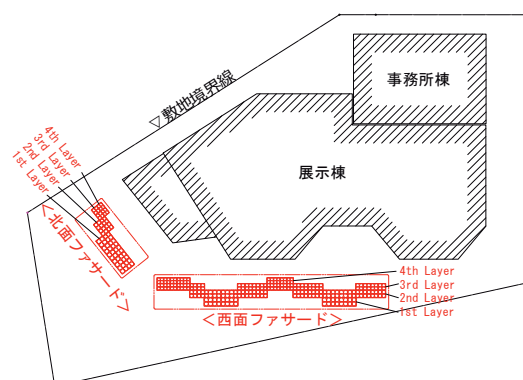


図-3 全体配置図



写真-3 ファサード（北面）

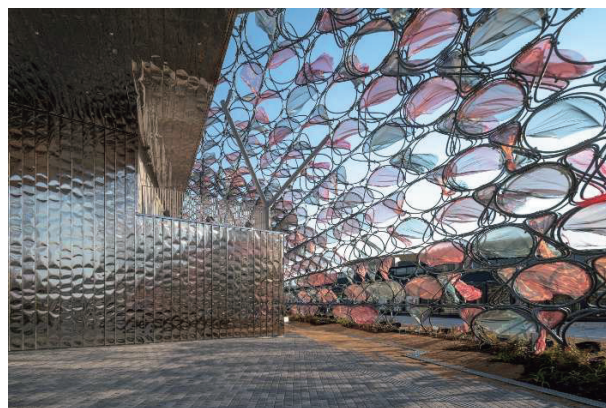


写真-4 鏡面外壁とファサード

3. ファサードの構成

ユニットのフレームには $\phi 38.1 \times 3.2 \sim \phi 48.6 \times 3.2$ の鋼管を用い、3次的に曲げられた2本の鋼管を接合することで1つのユニットを形成している。この1つのユニットだけでは自立せず、4つのユニットを1セットとして積層することで構造的に安定したアーチを実現させた。なお、北面は20段、西面は17段のユニットを積層し、1つのアーチを形成している。このアーチを平面的に連続させることで、アーチの奥行方向の安定性を高める計画とした。

ユニットの基本サイズは、1400mm、1238mm、1095mm、968mmの立方体に内接するサイズの計4種類とした。アーチを平面的に連続させるため、サイズが異なるユニット同士も隣接するユニットと接する形状とする必要が有る。そこで、ユニットの基本サイズをベースとし、鏡映対称のものや、高さは基本サイズのまま幅を隣接するユニット幅に合わせたものなど20種類の形状パターンを用いた。なお、そのそれぞれに鋼管径の違いがあり、またアーチ状に積層することから接合部に設けるボルト孔角度に3パターンの違いを持たせている。そのため、このファサードは合計で約180種類の形状パターンを組み合わせることで構成されている。

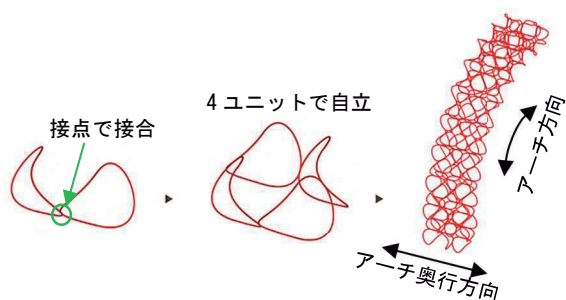


図-4 アーチ概念図

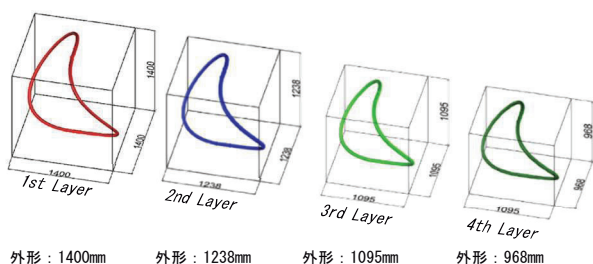


図-5 ユニットサイズ

4. ユニット間の接合部

4.1 接合部概要

ユニット同士の接合部は、「①アーチ方向に積層するユニット間の接合部」、「②アーチ奥行方向に連続するユニット間の接合部」の2種に大別される。本計画では、膜を張ることや万博閉幕後の解体などを考慮し、接合には①、②ともにボルト接合を採用した。以下に、それぞれの接合部の概要を示す。

4.2 アーチ方向に積層するユニット間の接合部

前述の通り、1つのユニットはそれぞれ3次的に曲げられた2本の鋼管を接合することで形作られる。この2本の鋼管の接合箇所にて、アーチ方向に積層するユニットも接合する計画とした。そのため、計4本の鋼管を1カ所で接合する必要がある。そこで、接続する鋼管の内部に心金（鋼棒）を2本の鋼管を跨ぐように配置し、その心金ごとボルト接合することで、4本の鋼管を接合することとした。なお、この心金は接合部の耐力及び剛性も高めており、接合部に生じる大きな曲げモーメントを心金にも負担させることで、フレームの鋼管径を極力小さくすることを可能としている。

積層される鋼管の間には薄い鋼板（以下、緩衝PL）を設けている。この緩衝PLを設置することで積層される鋼管同士の間には適度な距離を設け、鋼管が回転する際にボルトに生じる局所的なせん断力を緩和させている。さらに、緩衝PLの厚さを調整することで、ユニット自体の製作誤差や高さ方向の施工誤差を吸収させている。

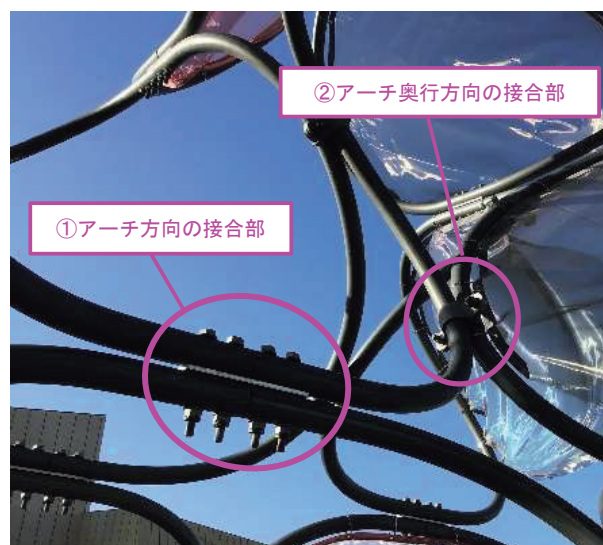


写真-5 ユニット間の接合部

4.3 アーチ奥行方向に連続するユニット間の接合部

アーチ奥行方向に連続するユニット間の接合部は、3次元的に曲げられた鋼管の中間部での接合となるから、曲線部で鋼管を接合する必要がある。曲線部は製作上の精度管理が難しく、また、ユニットが自重などで上下方向に変形すると水平方向にも変形してしまうことから、接合ポイントの精度確保に課題があった。

そこで、鋼管同士をボルトにより接合するのではなく、鋼管を2枚の鋼板で挟み込み、その鋼板をボルト接合とすることで施工時の誤差を吸収しつつ、確実にユニットを連結出来るディテールとした。

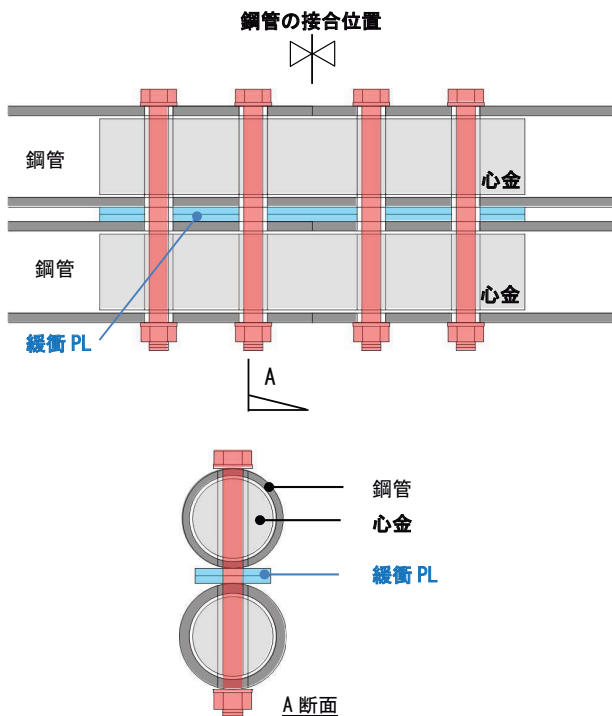


図-6 アーチ方向の接合部

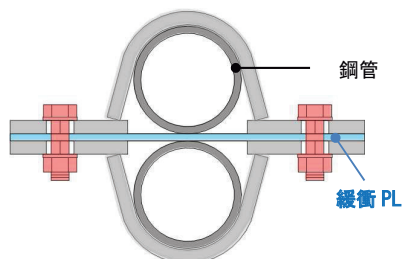


図-7 アーチ奥行方向の接合部

5. 構造性能の検証

5.1 検証概要

ファサードデザインの実現にあたり、前述の各接合部の変形性能を把握し解析に反映することが課題の1つであった。また、この3次元的な形状を解析により評価することが出来るかを検証することも課題であった。

そこで、アーチ方向に積層するユニット間の接合部を対象とした要素試験を行い、接合部の変形性能を確認した。また、1ユニットを対象とした実大ユニットに対する静的加力試験を行い、変形性能を確認した。その結果と解析結果を照合することで、解析結果の妥当性を検証し、ファサード全体の解析を行った。ここで、各実験の概要を述べる。

5.2 接合部の要素試験

アーチ方向に連続するユニット間の接合部に生じる変形を、アーチ方向の力の伝達により生じる曲げ変形、アーチ奥行方向に動くことにより生じるせん断変形、積層されたユニットが逆方向に回転することで生じる捩れ変形の3種類の変形に大別した。そこで、要素試験は、曲げ試験、せん断試験、捩れ試験の3種類の試験とした。各試験の荷重-変形関係を図-8に示す。図には各接合部を模した解析結果も併せて示す。その結果、接合部の各変形を解析により精度よく評価出来ることを確認した。

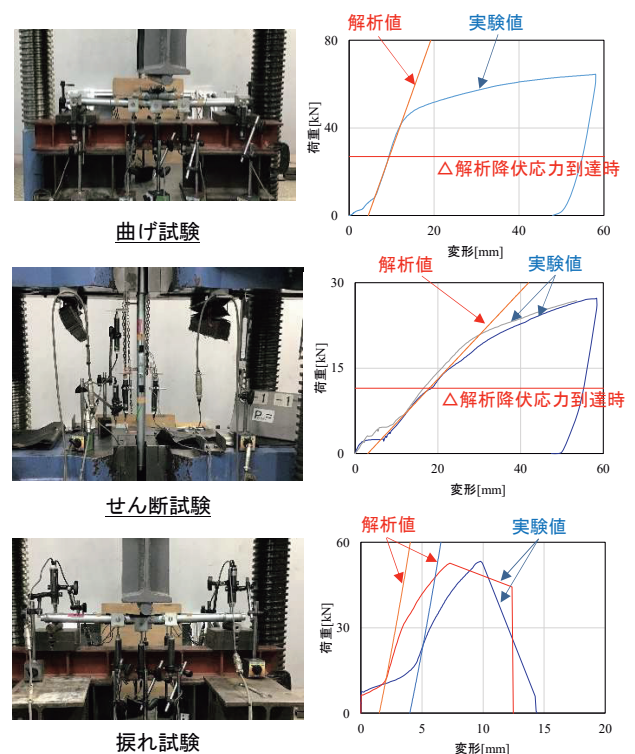
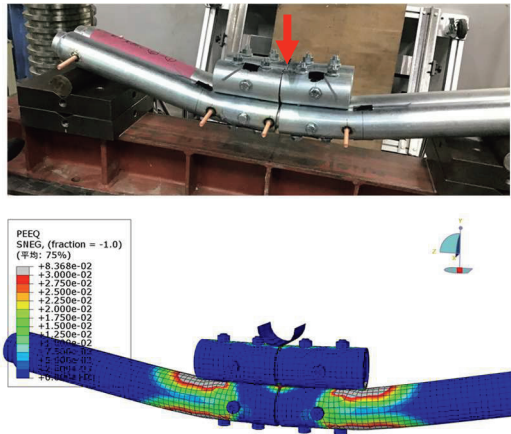
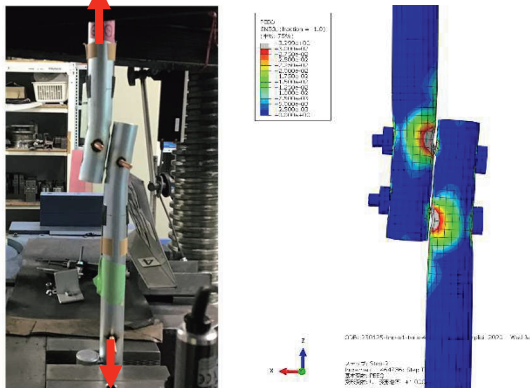


図-8 要素試験結果

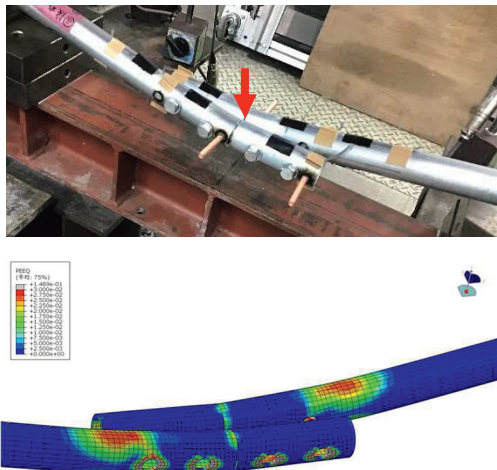
また、接合部に作用する曲げ応力は、鋼管だけでなくボルトや鋼管との接触により鋼管の内部に挿入した心金に伝達される。そこで、要素試験と併せてFEM解析を実施し、要素試験の再現性の確認や、心金を含む接合部周りの応力状態を確認することで、心金により接合部の剛性や耐力を高めることが可能であることを確認した。



FEM解析結果：曲げ試験



FEM解析結果：せん断試験

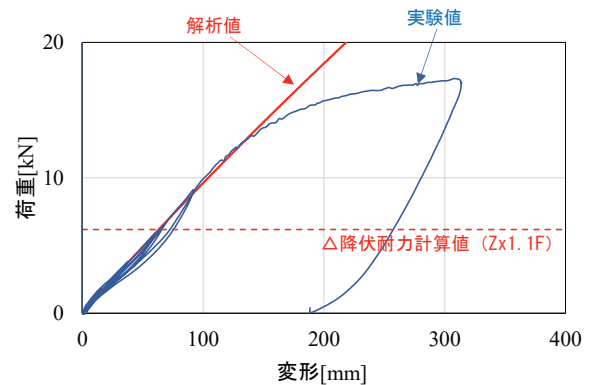


FEM解析結果：捩れ試験

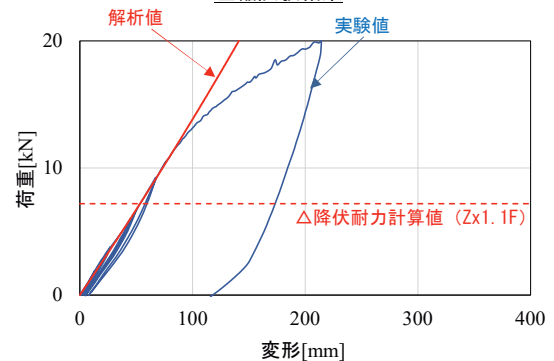
図-9 FEM解析結果

5.3 1ユニットの静的加力試験

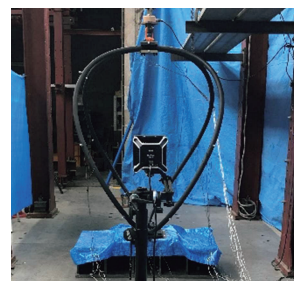
3次元的に曲げられたユニットの変形性能を確認するために、1ユニットの実大静的加力試験を行った。加力方向は、圧縮、引張、水平（2方向）の計4方向とした。なお、実験に用いた試験体は、ユニットを2つ組み合わせた形状としている。ここでは、圧縮及び引張試験の荷重・変形関係を図-10に示す。図には解析結果も併せて示す。その結果、ユニットの変形性能を解析により精度よく評価出来ることを確認した。



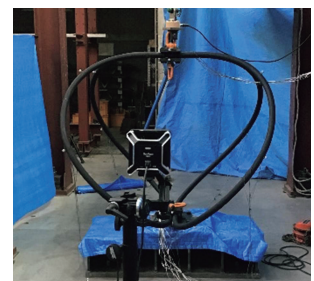
圧縮試験結果



引張試験結果



圧縮試験状況



引張試験状況

図-10 圧縮・引張試験状況および結果

6. 風圧力の検証

6.1 検証概要

本ファサードの特徴として、鋼管と膜により構成されていることから全体の重量は非常に軽いことが挙げられる。一方で、ユニットの約半数に膜を張り、風を受けるデザインとなっていることから、風圧力に対する設計が構造安全性を検証する上で重要となる。そのため、たなびく様に膜を張ることで、どの程度の風を受け流すことが出来ているのかを把握することが、合理的な設計とするために重要であった。そこで、たなびく様に張った膜が受ける風圧力を詳細に把握するために、送風散水実験を行った。なお、雨による膜を透過する風量の変化や、たなびき方の違いによる風圧力の変化も確認するため、散水実験も併せて行った。

また、ファサードを建物に覆いかぶさるように配置していることから、ファサードと建物との間にも風が入りこむ。そこで、風によりファサードに生じる内圧と外圧を把握するために、縮小模型による風洞実験を行った。ここで、送風散水実験、及び風洞実験の概要を後述する。

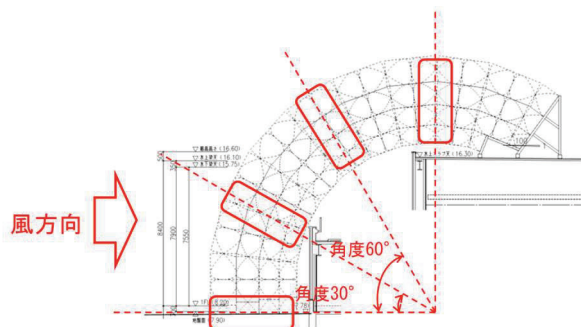


図-11 ユニットの地盤に対する回転角度

表-1 送風散水実験：実験変数一覧

試験No.	設置角度	風向	膜の有無	固定条件	散水有無
1	0	45	有	全周固定	無
2	0	45	無	—	無
3	0	45	有	半固定-A	無
4	30	45	有	全周固定	無
5	30	45	無	—	無
6	30	45	有	半固定-A	無
7	30	45	有	半固定-B	無
8	60	45	有	全周固定	無
9	60	45	無	—	無
10	60	45	有	半固定-B	無
11	60	45	有	半固定-C	無
12	90	45	有	全周固定	無
13	90	45	無	—	無
14	90	45	有	半固定-C	無
15	0	45	有	全周固定	有
16	0	45	有	半固定-A	有

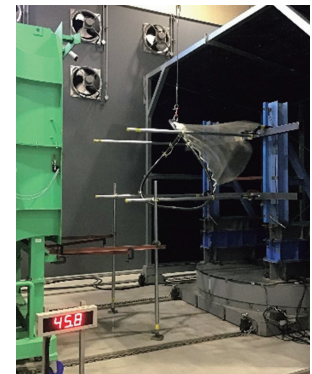
6.2 送風散水実験概要

ユニットには膜の半周程度が固定され、部分的に膜が風にたなびくデザインとしている。さらに、アーチ状に積層していることから、ユニットの地面に対する角度も積層される段に応じて異なっている。また、膜を張らないユニットもある。そこで、膜の有無、膜の留め方（全周を固定する、または半周を固定する。半周を固定する場合については、ユニットに対する固定位置の違いにより3パターン）、ユニットの設置角度、風向を実験変数とし、送風散水実験を行った。なお、実験風速は、膜のたなびき方による風圧力の違いも確認するため、0 m/s～45 m/sとした。

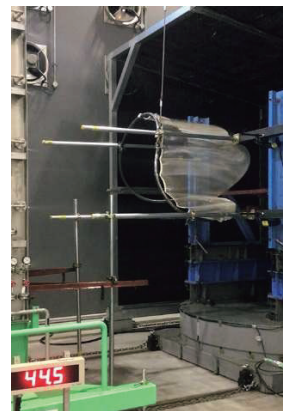
実験結果は、膜をユニットの全周に固定した場合に対する風圧力の低減率（風圧力＝全周固定時の風圧力×低減率）として評価した。その結果、ユニットの角度や風向に応じてばらつきは有るものの、低減率は最大で0.50程度であった。



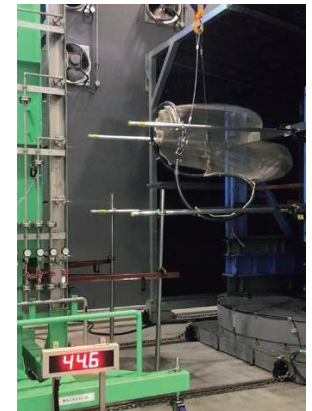
設置角度：0°
風向：45°
固定条件：全周固定



設置角度：0°
風向：45°
固定条件：半固定-A



設置角度：60°
風向：45°
固定条件：半固定-B



設置角度：90°
風向：45°
固定条件：半固定-B

写真-6 実験状況

6.3 風洞実験概要

1つのユニットに膜を全周固定した場合、水平投影面積に対する開口率は約33%となる。ファサードの形状を忠実に再現することは困難であったため、ファサードの外郭線内側のボリューム形状を作成し、それに直径2mm程度の孔を一定間隔で設けることで、ファサードの開口率を再現した。風圧測定点は、アーチの高さ方向分布やアーチ半径の違い、ファサード奥行方向の風圧力などを測定するため、約350点とした。また、風向は5°ピッチの72方向について行った。

なお、このファサードは建物の外部側も建物側も外気に直接解放されている。そこで、外部側と建物側とから作用する風力の差の時系列データを作成し、そのピーク値からピーク風力係数を求めた。

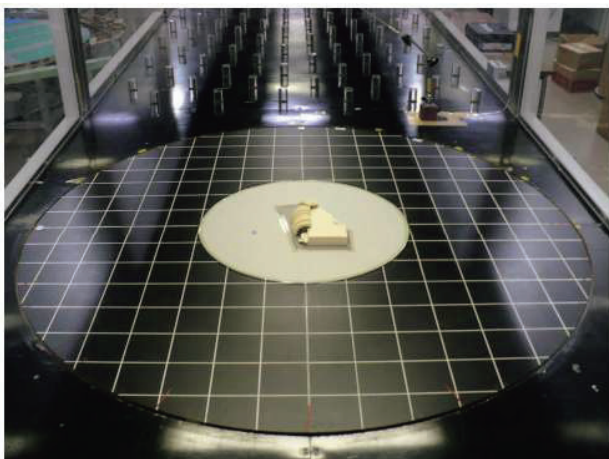


写真-7 風洞実験 (全体)

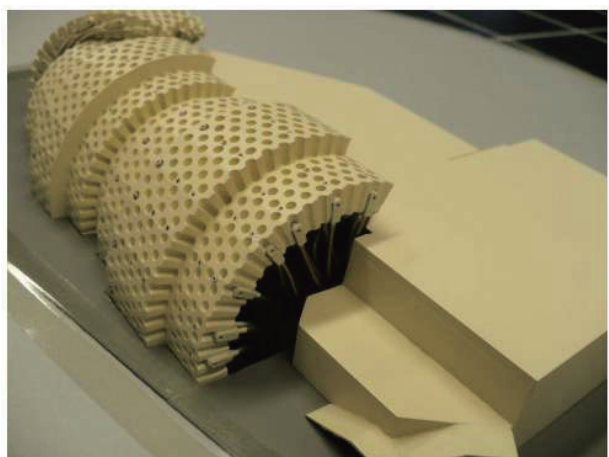


写真-8 風洞実験模型

7. 応力解析概要

7.1 ユニットのモデル化

ユニットは3次的に曲げられていることから、複数の節点によりモデル化を行っている。そこで、節点の分割数が解析結果に与える影響を確認した。ここでは、63分割の場合、604分割の場合の解析結果を示す。

解析の結果、ユニットに生じる最大軸力、最大曲げ応力、最大鉛直変形量はいずれも63分割の方が大きい値となったが、その差は最大で1.1%程度であったことから、ファサード全体の解析は63分割にて行うこととした。

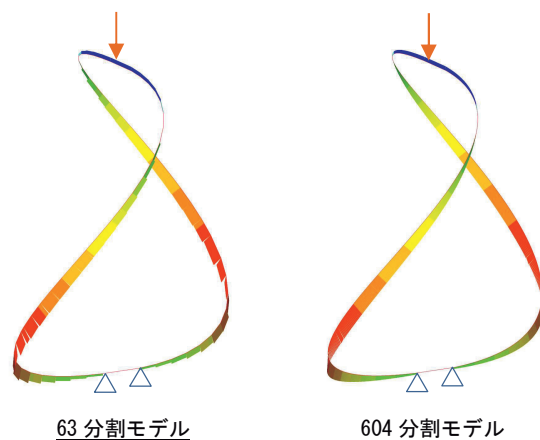


図-12 軸力分布

7.2 接合部のモデル化

アーチ奥行方向に連続するユニット間の接合部は、鋼管芯に設けた節点間に配置したばね要素で評価を行った。図-13に概念図を示す。本接合部における各方向のばね剛性は、ボルトの軸剛性、せん断剛性から導出して評価した。

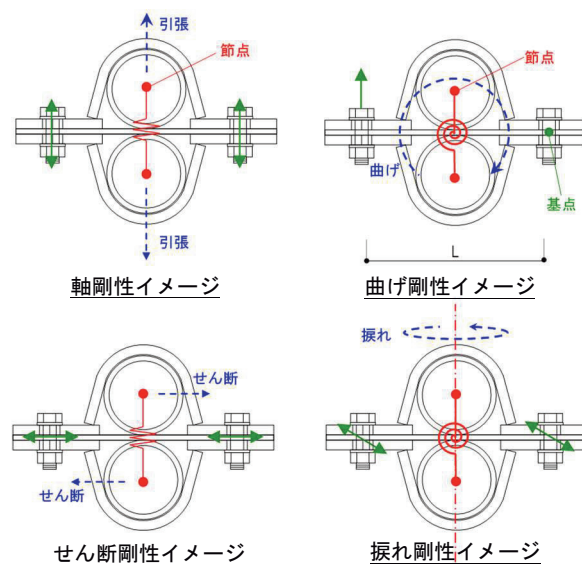


図-13 接合部のモデル概念図 (アーチ奥行方向)

アーチ方向に積層するユニット間の接合部は、心金両端と中央の3ヵ所に設けたばね要素で評価を行った。図-14に概念図を示す。x方向のばね剛性 (K_{Dx}) は、心金両端にモデル化したばねにより評価した。せん断剛性のうち、 K_{Dy} はボルトのせん断剛性にて評価をし、 K_{Dz} は接合部の要素実験により確かめられたせん断剛性により評価した。これは、接合部のせん断変形によりボルトに作用した引張力に起因する変形増分や、ボルト孔近傍の鋼管へのボルトのめり込みによる変形増分をせん断剛性の低下率として評価するためである。同様に、 K_{Rx} も要素実験により得られた回転剛性により評価をした。なお、 K_{Ry} は心金両端にモデル化した軸ばねにより評価することとし、0 Nmm/radとしている。また、 K_{Rz} は、フレーム断面の検討時には、ボルトが鋼管の中央に1列に並ぶことからピンとしたが、鋼管の回転によりボルトに作用する局所的な応力を評価するために、ボルトの検討時には剛として評価した。

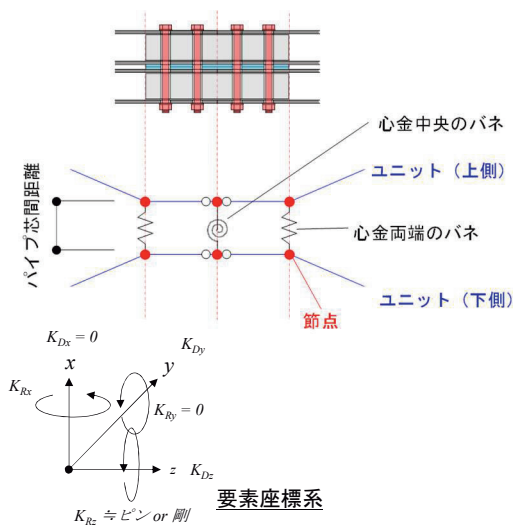


図-14 接合部のモデル概念図（アーチ方向）

7.3 全体解析結果

上述のように各ユニット及びユニット間の接合部をモデル化した全体解析モデルにて、ファサード全体の解析を行った。

解析は、長期荷重、地震力、風圧力について行い安全性を確認した。なお、地震力は、アーチ方向、アーチ奥行方向のそれぞれ正負の4方向、風圧力は、アーチ方向、アーチ奥行方向のそれぞれ正負4方向に加え、吹き上げ力を2ケースの計6方向に対して行った。また、ファサード自体が外部に露出していることから、温度応力解析も行っている。さらに、建物とファサードの基礎を分離し

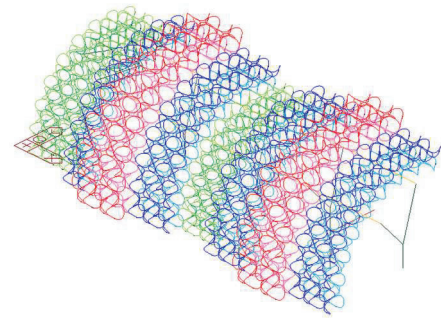


図-15 全体解析モデル（西面ファサード）

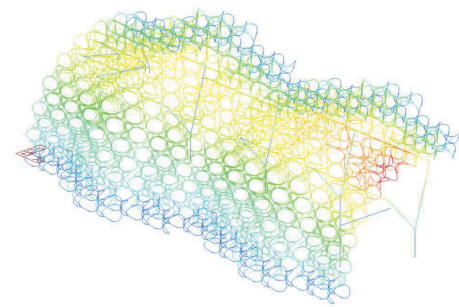


図-16 自重に対する鉛直変位図（西面ファサード）

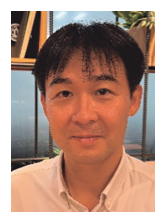
ていることから、不同沈下に対する解析も行い、安全性の確認を行っている。

8. まとめ

2025年日本国際博覧会のパビリオンとして、パビリオンのテーマを表現する有機的なデザインであるファサードに対して、構造デザインを融合し、各種実験により構造性能を検証しながら、構造安全性の検証を行った。

計画当初より、誰もが手探りで計画を進める中、建築主を始め、設計関係者や建築関係者、メーカー担当者、実験関係者など、多くの方々に協力して頂き、様々な意見・知見を結集することで、本ファサードの実現に至ることが出来た。プロジェクトに関わった全ての方に感謝の意を表す。

【執筆者】



*1 三井 達雄
(MITSUI Tatsuo)



*2 山口 温弘
(YAMAGUCHI Atsuhiro)

当施設の建築技術安全審査は、(一財)日本建築総合試験所が実施しました。