

「さまざまな構造的アプローチによる作品群」

(第5回 日本構造デザイン賞 2010 受賞作品／日本構造家倶楽部)

江尻 憲泰
EJIRI Norihiro

建物は意匠設計者、設備設計者、構造設計者の協同作業により設計・監理が行われ、その形が造られる。構造設計者は、材料に対する知識や構造力学を応用しその安全性を確認する役割を担っている。しかしながら、建築に使われる材料や構造方式は建築基準法により限定されているため、通常、それ以外の材料が建築の構造力学的なアプローチにより形作られることはない。

これらの作品群は、建築のスケールではないが、新しい素材を建築構造的なアプローチにより工学的な根拠が与えられ、今後、建築に応用可能な材料・構造方式として利用できる可能性を示したことが評価されての受賞である。また、これらの作品は、建築家隈研吾氏により意匠デザインされ、芸術性の高い作品となっているが、構想の段階より、構造方式、材料強度、接合方法等、建築家と構造家の度重なる協議、工学的な試行錯誤と意匠デザインの試行錯誤によりその形が変化し、最終的な形ができていることが他の芸術作品とは異なった特徴となっている。

1. 「Shanghai Gallery Project」
2. 「Luccon Concrete」
3. 「waterbranch」
4. 「aluminium panel」
5. 「Milano triennale」
6. 「Casal Grande Ceramic Cloud」

1. 「Shanghai Gallery Project」

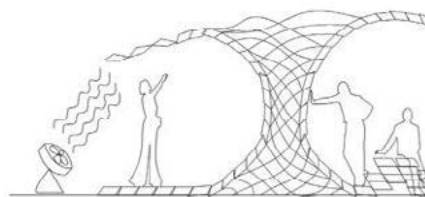


プロジェクト概要

プロジェクト名：「Shanghi Gallery Project」
設計事務所：隈研吾建築都市設計事務所
建設地：中国／上海
建築用途：パビリオン
構造形式：ETFE ユニット積層の組積によるラーメン構造

この構造架構体は空気を閉じ込めた空気膜のブロック（ETFE ユニット）により構成される。そして、そのブロックを積層し一つの架構体を形成した。外力を加えると、密封空気により外力と同等の内圧が生じ、力のつ部から下部に伝達していく。

また、その先端は風により持ち上げることを試みている。



空気膜ブロックの構造概念

■軸方向力の伝達

軸方向力の伝達は、ユニット同士の接地面から行われる。その時、ユニットの内圧は軸力と釣り合うように働く。ユニット内圧の大きさは一定であり、軸方向力と内圧との関係は、右記公式により表わされる。

$$N = A \times \sigma$$

N：軸方向力

A：接地面積

σ ：内圧（＝軸方向応力）

図 曲げ応力の伝達

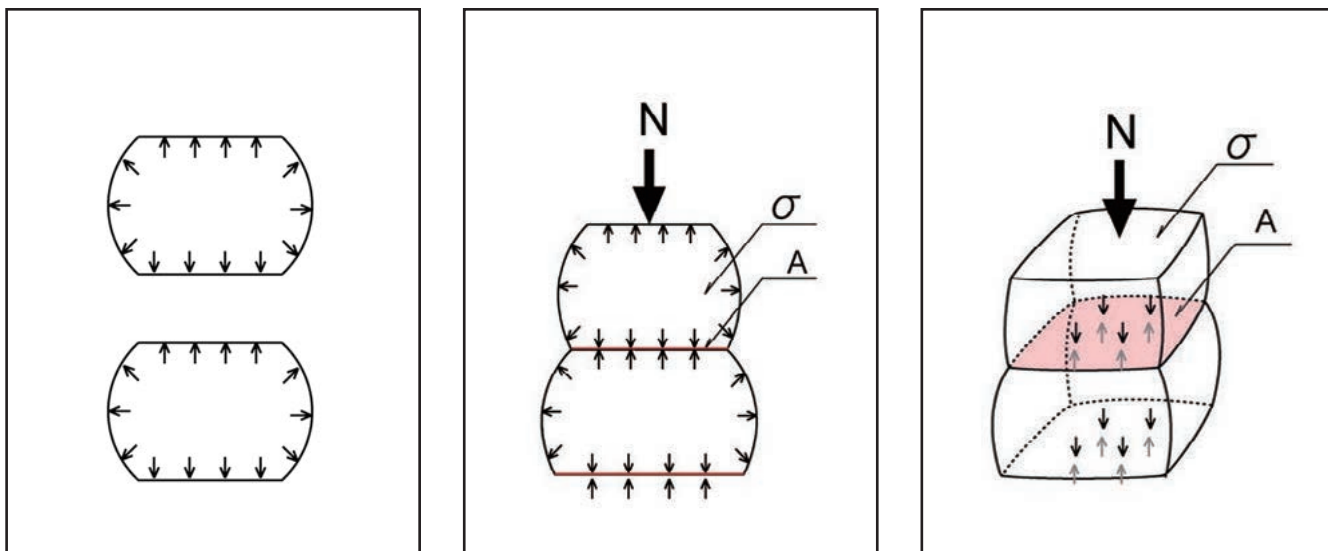


図 曲げ応力の伝達

■曲げ応力の伝達

曲げモーメントは圧縮応力と引張応力から成る。組合わされた2つのユニットに曲げ応力を加えると、圧縮応力側ではそれぞれのユニットの表面が密着し、引張応力側ではそれぞれのユニットの表面が離れようとする。この構造的なシステムを成立させるために、接続バンドを引張側に取り付けている。

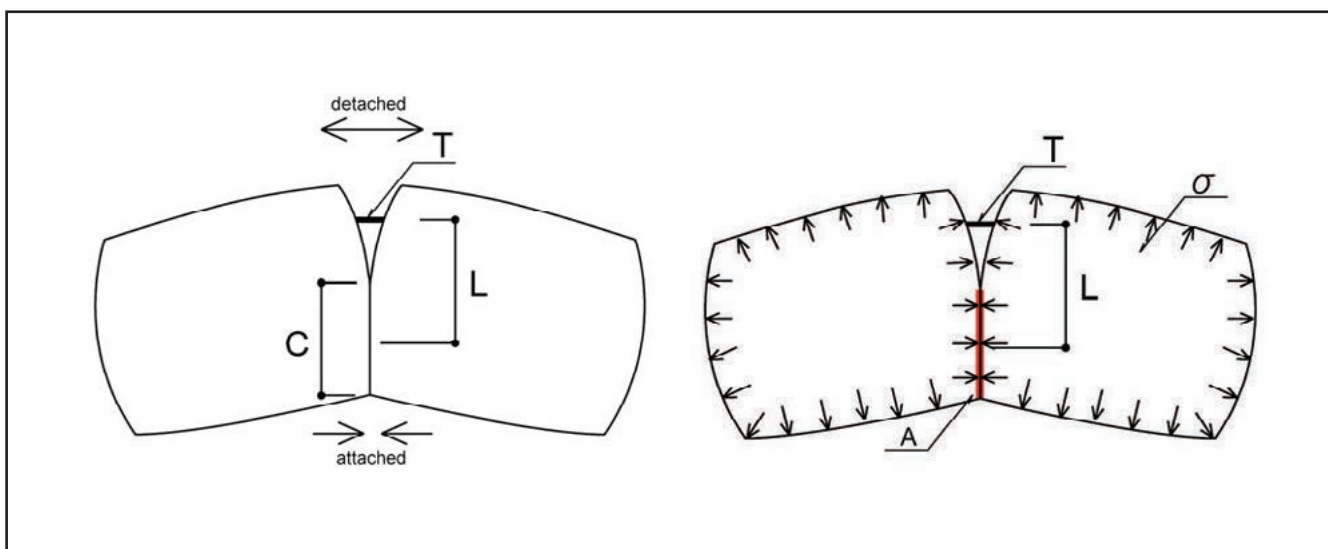


図 曲げ応力の伝達

実験による材料特性の確認

■接合部

ユニット同士の接合にはバンド と ETFE で構成した。そして、ジョイントの耐力について実験をおこなった。

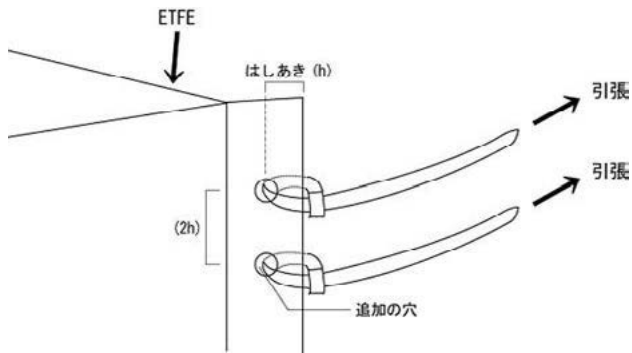


図 ジョイントの耐力試験

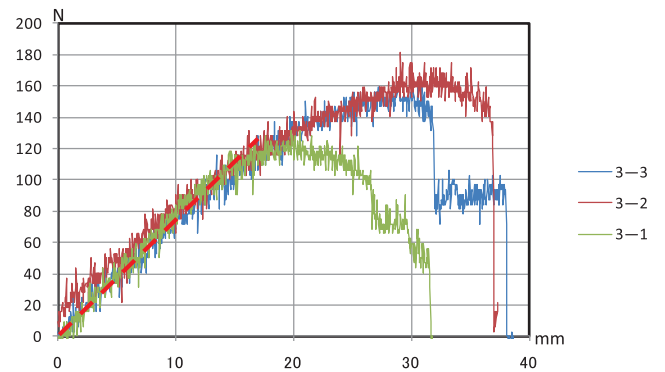


図 ジョイントの耐力試験

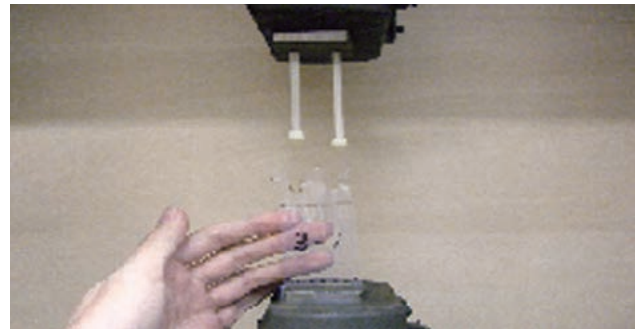


図 ジョイントの耐力試験結果

■扇風機による風圧力

ユニットを風によって空中に浮かべるための条件を実験検討した。扇風機のパワーにより、どの程度の風速が発生するか確認を行なっている。ユニットの重さを考慮すると、必要とされる風量と風速は下記となる。

風速: 3.66 m/s
風量: 1.0 m³/s



図 風速計



図 風力実験

F E M解析による検証

材料試験及び接合部試験から各ユニット、接合部の等価性能を評価した F E M 解析モデルにより、全体架構の変位及び応力状態の検証を行っている。

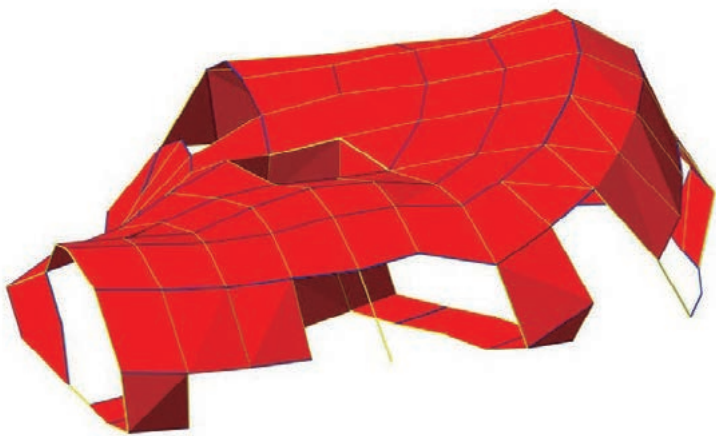


図 F E M解析モデル図

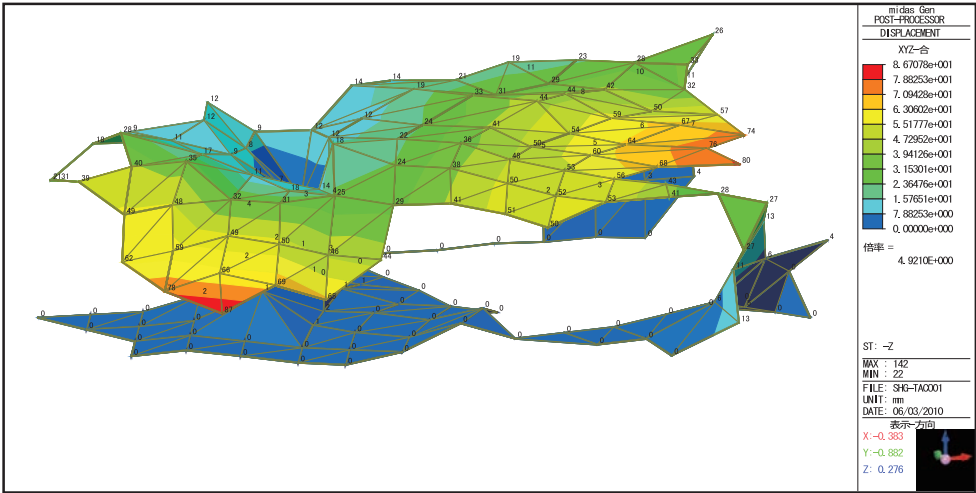


図 F E M解析結果（柱部）

膜構造なので変形が大きく最大 86mm の変形が計測された。

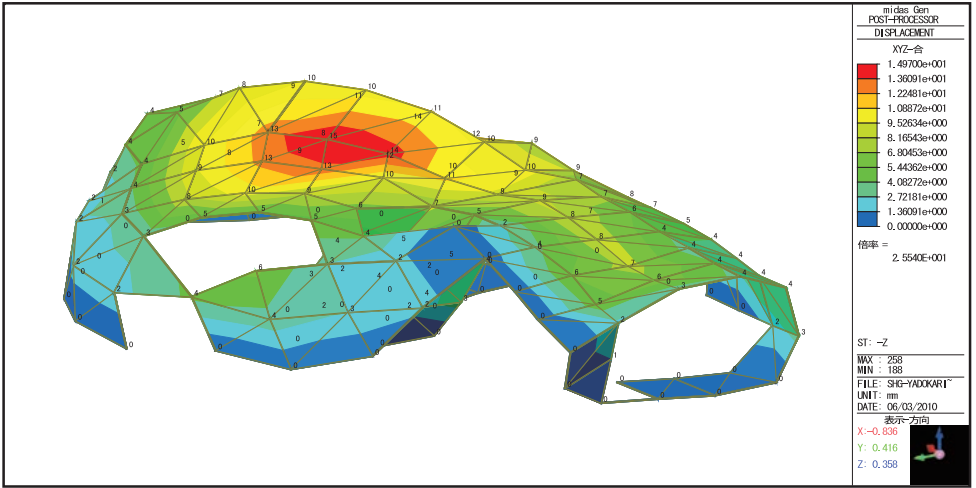
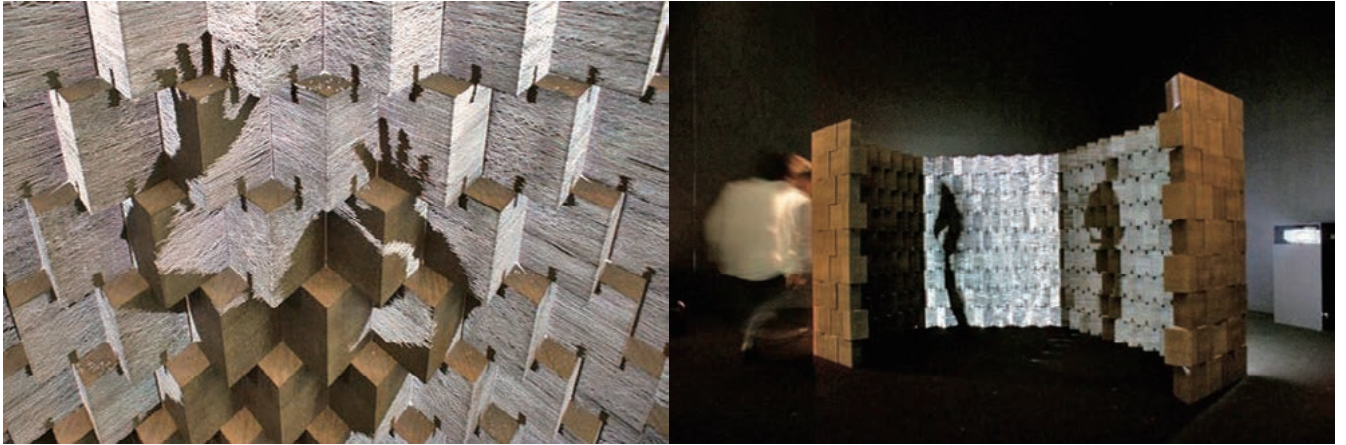


図 F E M解析結果（屋根部）

2. 「Luccon Concrete」



プロジェクト概要

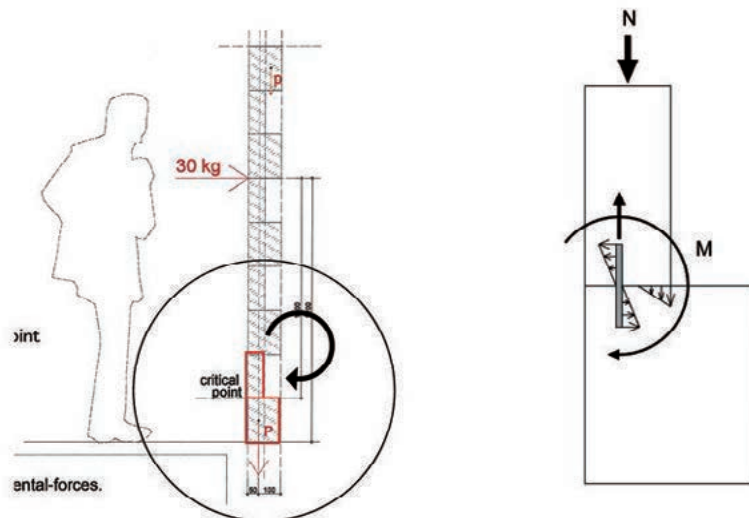
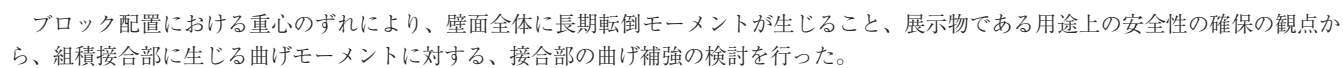
プロジェクト名：「Luccon Concrete」
設計事務所：隈研吾建築都市設計事務所
建設地：イタリア／ミラノ・日本／東京
建築用途：パビリオン
構造形式：組積造（透過コンクリートブロック）

本来、コンクリートは光を通さない素材である。しかし、コンクリートに光ファイバー繊維を組み込むことで、光を通すコンクリートが実現する。このことは、コンクリートという素材の新たな一面の発見でもある。今回のプロジェクトでは、この新しい素材を実際に構造体として、利用できるレベルまで引上げる試みがなされた。「光を透過させる構造体」という新しいテーマに挑戦したプロジェクトである。



三角柱形状のコンクリートブロックを交互に積み上げ、上下のブロック材をドリフトピンにて接合している。

鉛直方向に対しては、ブロックの支圧で応力伝達をおこない、水平方向に対しては、ドリフトピンのダボ効果、引き抜き抵抗とコンクリートの支圧により抵抗している。



実験による材料特性の確認

計画当初ブロック同士の接合部の検討をボルト、接着剤、両面テープなど幾つかの材料により行い、接合部強度、意匠性、施工性などの各方向から接合部仕様の検討を行っている。

サンプル材料を用いて構造接合部の耐力実験を行い各仕様の強度確認を行っている。

最終的には再利用することもあり、ダボによる接合が採用された。

OTHER TESTS FOR JOINT OPTIONS

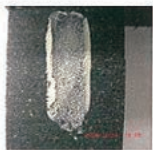
①double side tape(strength is not sufficient)



③epoxy putty(gray color & clear color) strength is sufficient but difficult to remove

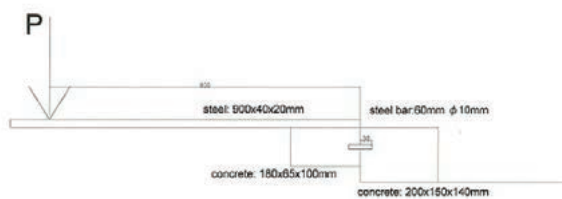


②vinyl acetate(strength is not sufficient)



DOWEL TEST

how to test



test model

maximum 15kg load \rightarrow no problem



joint part



In the test we reach a bending moment 1200kgcm without major damage.
This corresponds with a tension-strength of 300kg.

構造計算による検証

ブロック重心位置の偏心による転倒モーメント及び、人が手をつくことにより生じる水平力に対する構造計算を行い、安全性の確認を行っている。

CALCULATION OF THE STEEL DOWEL'S DIAMETER

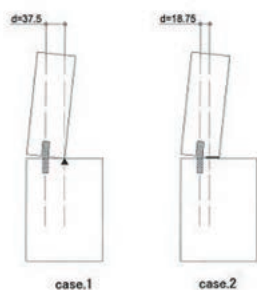
M = 3000 kg·cm moment at critical point
ft = 2400 kg/cm² allowable tension stress in steel

case.1
d = 3.75 cm
Ft = M/d = 800 kg
Atreq = Ft/ft = 0.33 cm²
→ ϕ 10mm = 0.785 cm² is OK

In case.1 0.33cm² is required. Φ 10mm is OK.

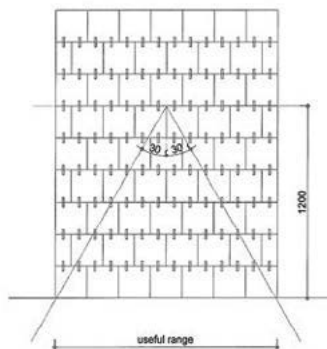
case.2
d = 1.875 cm
Ft = M/d = 1600 kg
Atreq = Ft/ft = 0.67 cm²
→ ϕ 10mm = 0.785 cm² is OK

In case.2 0.67cm² is required. Φ 10mm is OK.



USEFUL RANGE

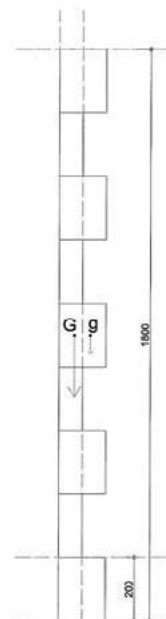
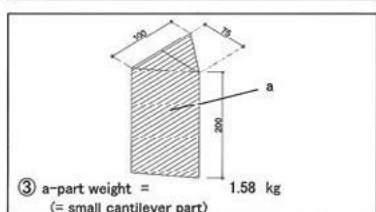
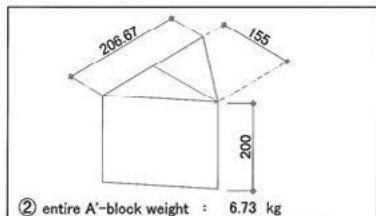
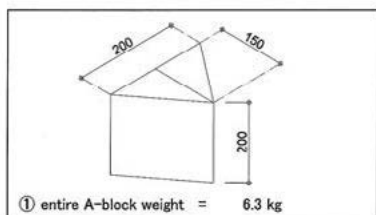
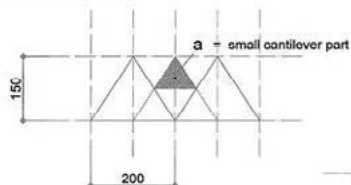
M' = M/5 = 600.0 kg·cm



Because of the steel dowels, the horizontal load is divided over a wider area.

WEIGHT ANALYSIS

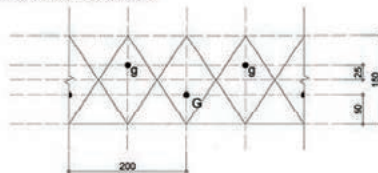
basic block : geometry and weight



concrete density
2100 kg/m³

MOMENTAL FORCES

Ⓐ caused by cantilevered parts



g:center of gravity of a-part
G:center of gravity of entire block

one a-part moment = 1.58x2.5 = 3.94 kg·cm
Σm = 35.44 kg·cm

Ⓑ caused by a person pushing against the wall

P = 30 kg
H = 120 cm
Mp = 3600 kg·cm
Mp = 3000 kg·cm at critical point



The masonry-structure is subject to 2 important momental-forces.
Ⓐ Moment caused by cantilevered parts.
The blocks have a triangular shape. The base of each triangle is supported by the underlying blocks, however the top of each triangle (a-part) is not supported and is actually cantilevered. These cantilevered parts cause a moment in the wall.
Ⓑ Moment caused by a person pushing against the wall.
A person accidentally pushing or falling against the wall causes a horizontal force and hence a moment in the wall.
This calculation-paper will indicate that the pavilion can withstand these forces.

3. 「Water branch」



■プロジェクト概要

プロジェクト名：「Water branch」

設計事務所：隈研吾建築都市設計事務所

建設地：東京

建築用途：パビリオン

構造形式：組積造（山形ラーメン構造）

PE製の水タンク「water branch」を構造体として形成される仮説住宅。タンク内を設備配管ルートとして使用することが可能となり、また空気層によって断熱効果も期待できる。



■構造概要

500mm×100mm×150mm の凹凸のある PE 製のタンクを積層していく組積造。1 辺が 3500mm の正方形形状で、3 辺に壁が配置されており、1 辺は開口となっている。解体を容易なものにするため各接合部については取り外しが可能なもので構成されている。

屋根部分についてはせり出しが大きく軸力のみ伝達が難しいためプラスチック製のバンドによって各モジュールを結束している。屋根と壁の接合部分では圧縮力の伝達を確実にするため、両面テープを用いて各タンクを接着し、屋根端部の浮き上がりを抑制するため水をタンク内に入れている。基礎を展示会場のフロアに固定するのが不可能なため、スラストと浮き上がりの防止を抑える目的として基礎部分と壁の低層部に水をいれることで安定性の向上を図った。

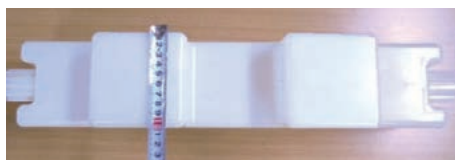
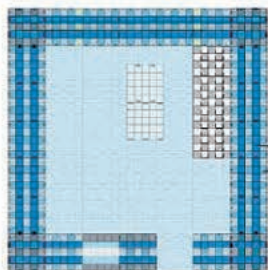
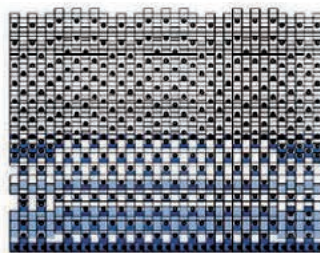
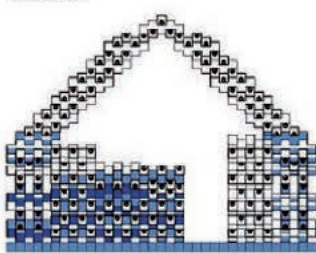


図 モジュール寸法

PLAN



ELEVATION



SECTION

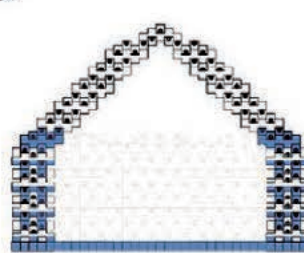


図 平面図、断面図（青色は水注入部を示す）

構造的な架構形式は頂部がピン接合の山形ラーメン構造であり、フレームの折れ点及び柱脚部分の曲げモーメントの伝達及び水平反力（スラスト）の処理が重要となる。折れ点の曲げモーメントの伝達は、プラスチックバンドによりブロック同士を束ねることで、引張側の応力に抵抗し、柱脚については柱部分に水を注入し軸力を増やすことで、接地圧分布に浮き上がりが生じない様にしている。同様に摩擦抵抗力を増やすことでスラストの処理も行っている。

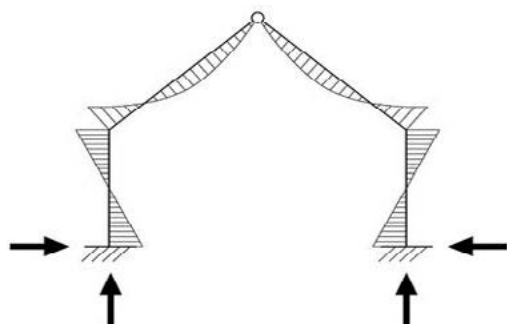


図 応力図

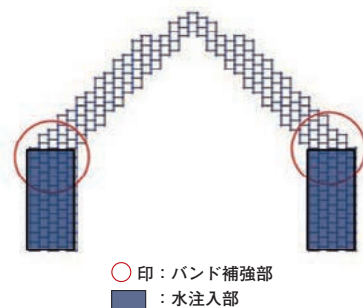


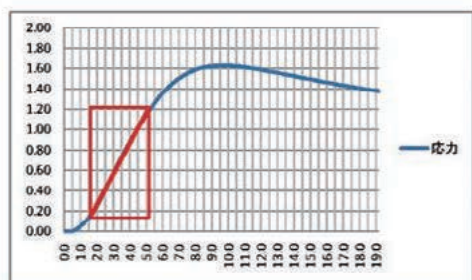
図 屋根架構構成図



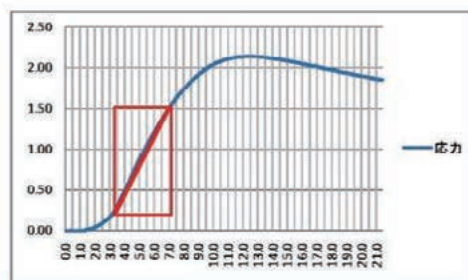
図 バンド補強部

■実験による材料特性の確認

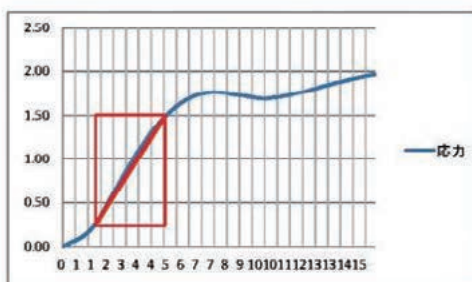
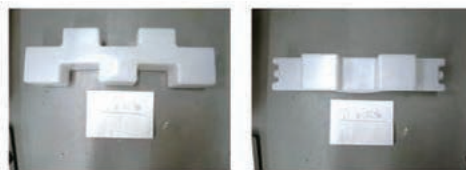
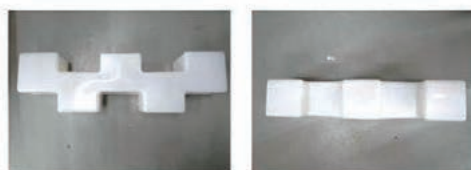
容器の強度試験を行い、容器の耐力、剛性の確認を行った。解析結果の各諸元はFEM解析モデルに反映し、全体架構の応力、変形状態を確認している。



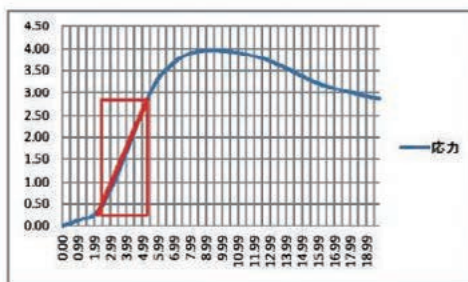
最大点試験力 (kN)	最大点変位 (mm)	ヤング係数 (N/mm ²)
1.63	9.48	92.3



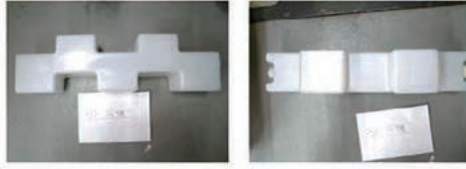
最大点試験力 (kN)	最大点変位 (mm)	ヤング係数 (N/mm ²)
2.14	12.67	119.2



最大点試験力 (kN)	最大点変位 (mm)	ヤング係数 (N/mm ²)
2.27	30.25	108.6



最大点試験力 (kN)	最大点変位 (mm)	ヤング係数 (N/mm ²)
3.97	9.25	157.5

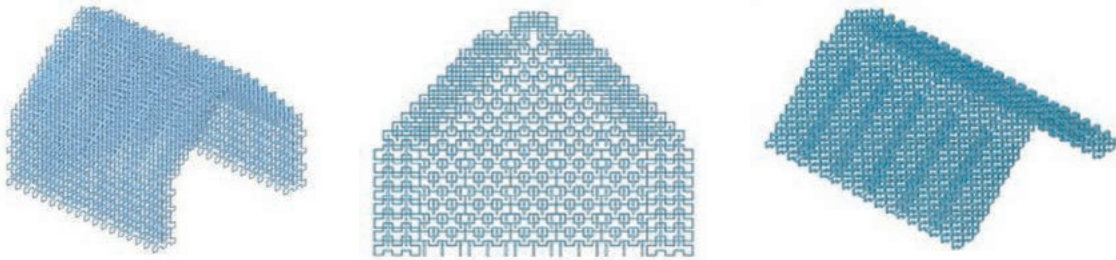


FEM解析による検証

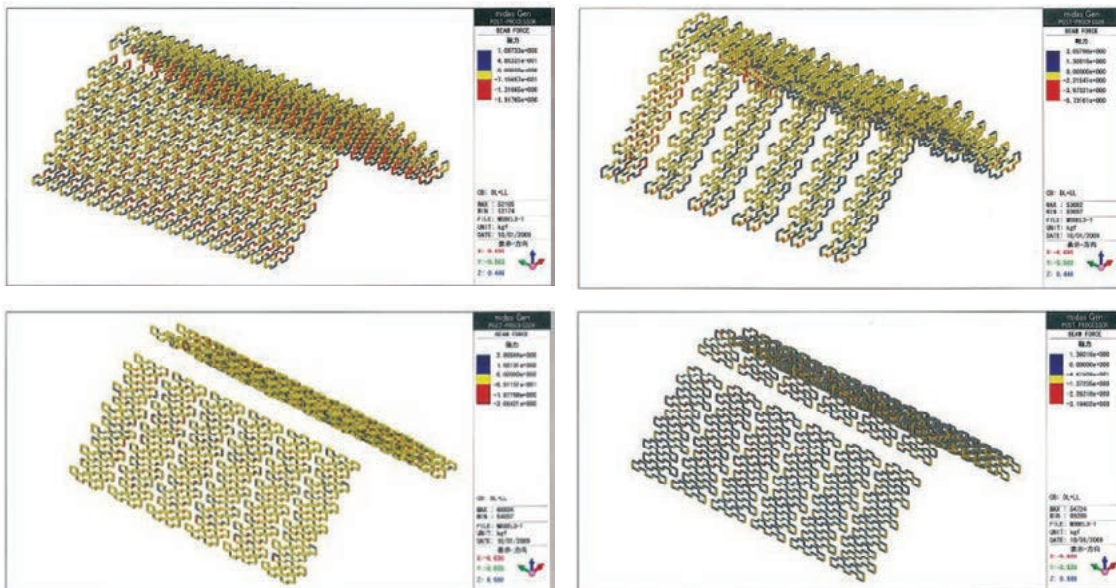
各要素を線材（1 cm× 2 cm）に置換し、物性値は実験より得られたデータを入力する。荷重はタンク自重+水の重量を考慮し、水の有無によって線材の比重を変えて入力している。

簡易的な計算のため、全部材を連結されているものと仮定しモデル化を行った。タンクが接している部分について、引張力が働かないことを確認することで成立するかを判断をしている。引張力が生じる部分についてはバンドで補強し、圧縮側となるようにし、補強が不足する場合には両面テープで補強する。

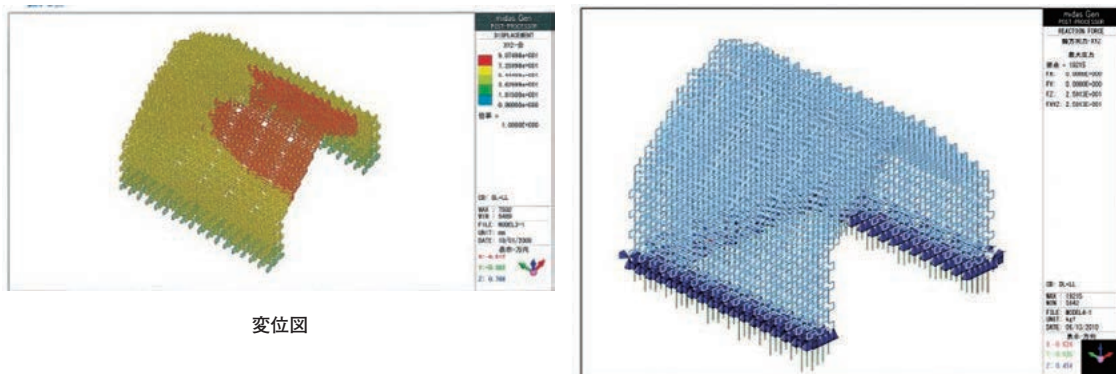
支点反力の確認も行い、展示場所の躯体に影響が無いことも確認した。



入力モデル



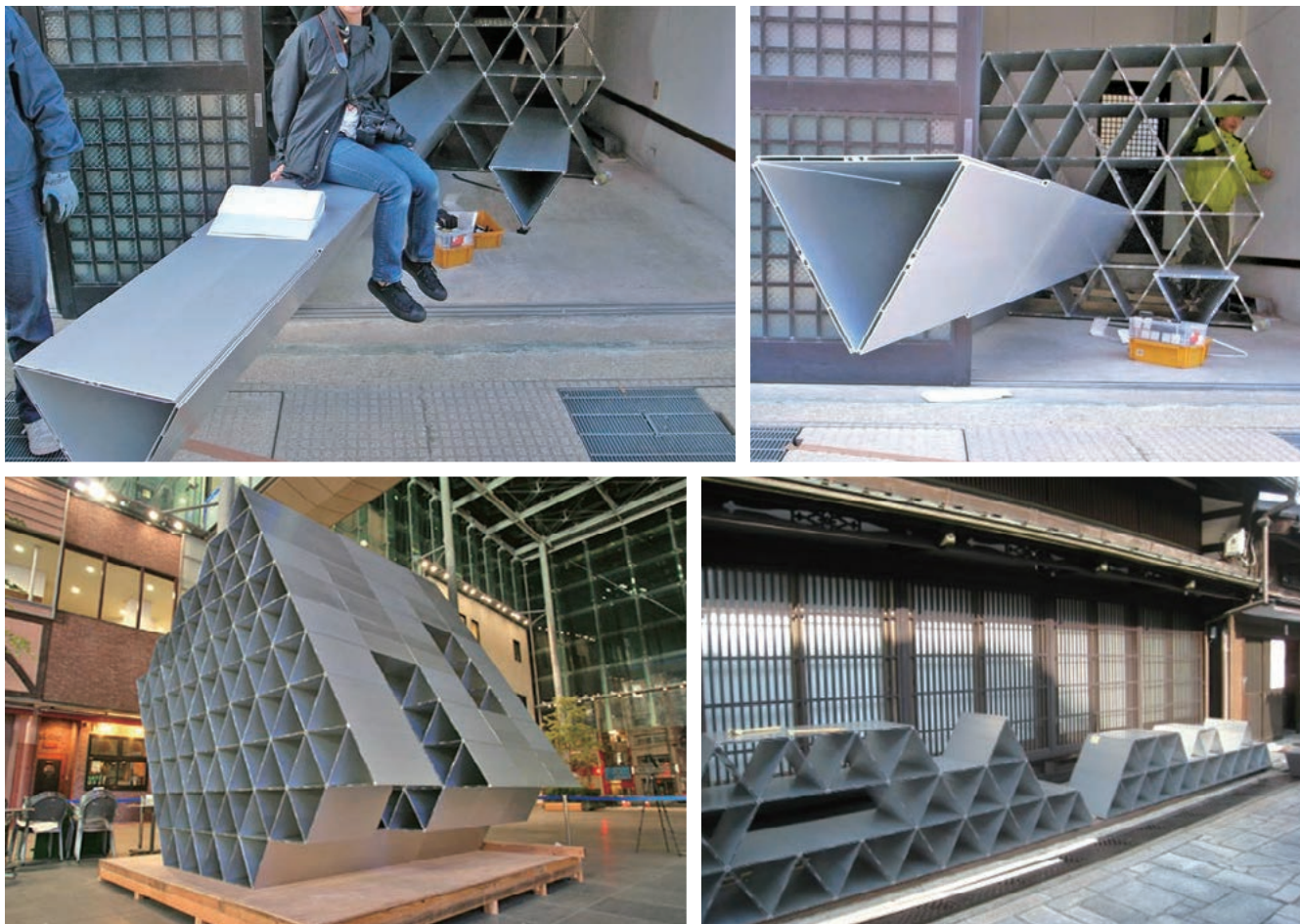
屋根検討図



変位図

支点反力図

4. 「Aluminium panel」



プロジェクト概要

プロジェクト名：「Aluminium panel」

設計事務所：隈研吾建築都市設計事務所

建設地：富山

建築用途：パビリオン・家具・什器

構造形式：パネルトラス構造

薄板アルミパネルユニットをトラス状に組むことにより、アルミ素材を構造体として利用した。アルミは鉄に比べると柔らかい素材であるが、成形がやすくユニット化に適している。このアルミパネルはリブのある分節構造の薄板とした。パネル内のリブは非常に重要な役割を果たす。このプロジェクトを通じてパネルの耐力実験を積み重ねることでアルミの特性を最大限引き出すことに努めた。また、このプロジェクト以前にも石を利用した同様のプロジェクトも行っている。

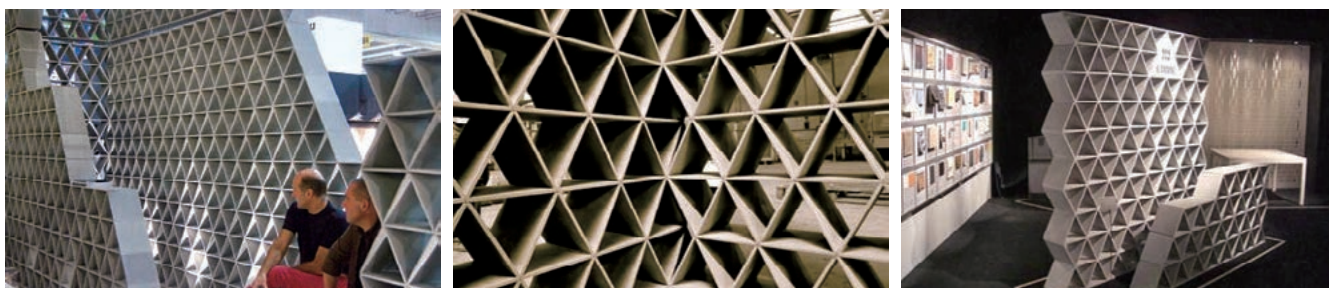
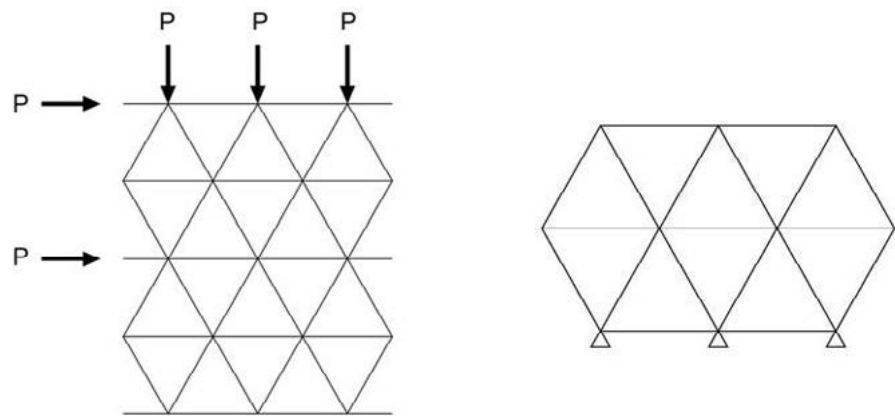


図 ストーンパビリオン（石を使った同様のプロジェクト）

構造概要

■全体架構

アルミパネルを1辺とした三角形によりフレームを構成している。パネル面内方向はさらに剛性が高い為、三角形を形成するユニットを持ち出すことで、アルミ三角形断面の片持ち梁とすることが可能である。



鉛直荷重及び、水平荷重に対し、アルミパネルの面内軸方向抵抗によるトラスフレームにより、応力の伝達を行う

■アルミパネルユニット

曲げに対して	軸力（圧縮力）に対して
面外方向曲げ抵抗はパネルプレートをつなぐリブによる、フィーレンデルトラスとして抵抗を行う。	軸力（圧縮）に対してはリブによる曲げ戻し効果により、パネル材の座屈長さの低減が期待でき、パネル全体（パネル長さ）の座屈モードによる座屈耐力が確保できることと確認した。

実験による材料特性の確認

アルミパネルの材料特性を把握するために、材料実験を行っている。曲げ、圧縮、せん断試験を行い、強度及び等価剛性の確認を行っている。



図 圧縮試験



図 曲げ試験



図 せん断試験

現地における組立作業



図 建て方

解析および検証

アルミパネルのFEM解析モデル解析結果との比較検討により、アルミパネルの曲げ試験及び圧縮試験結果の検証を行っている。

曲げ試験モデルについては、梁要素による応力分布及び等価剛性の確認を行い、座屈解析モデルについては、座屈モードの確認を行い、実験結果との比較検証を行っている。

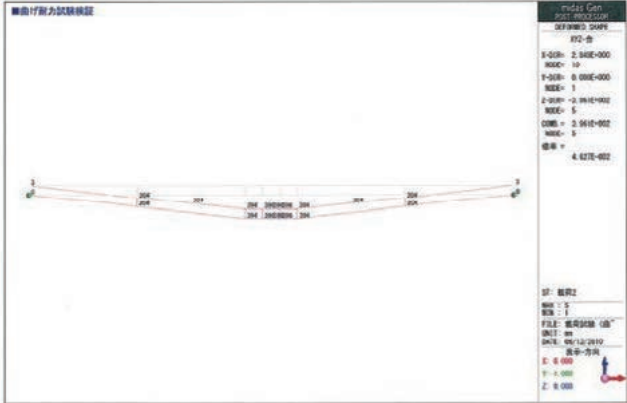
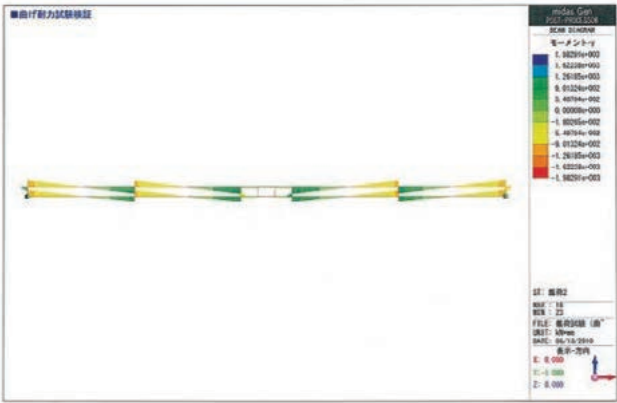


図 曲げ耐力試験に対する検証

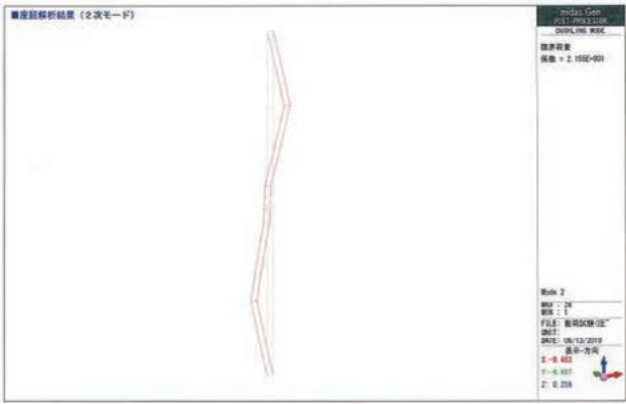
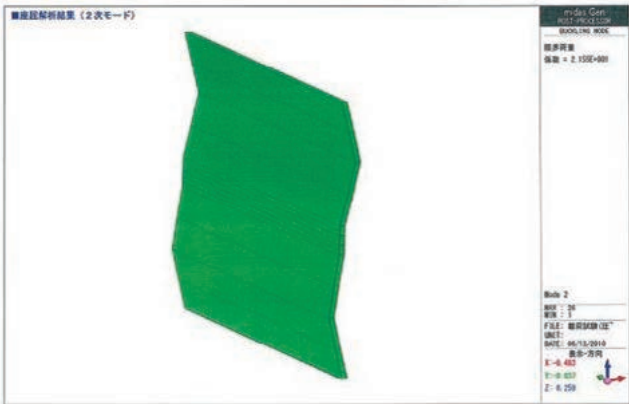
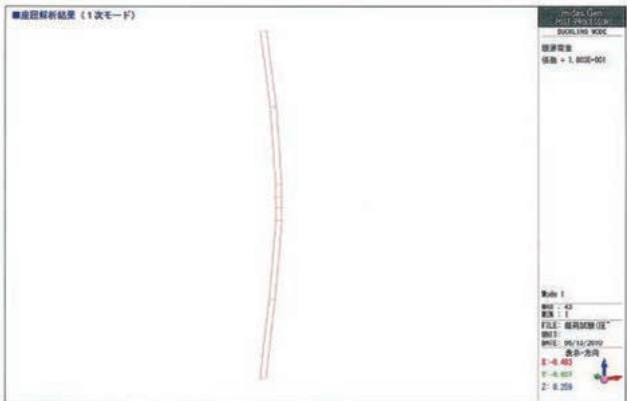
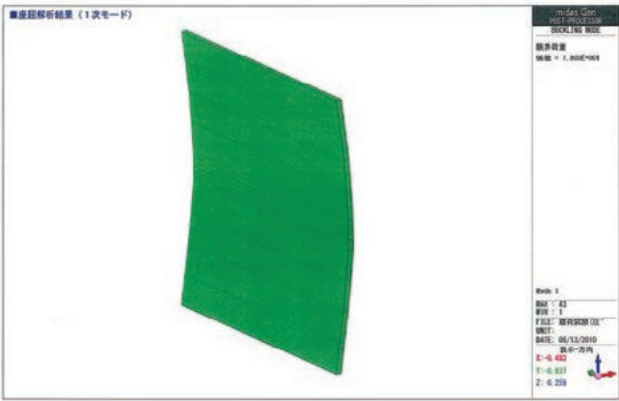


図 座屈解析による座屈耐力の検証

5. 「Milano triennale」



プロジェクト概要

プロジェクト名：「Milano triennale」

設計事務所：隈研吾建築都市設計事務所

建設地：イタリア／ミラノ

建築用途：パビリオン

構造形式：ドーム構造

傘の持つ剛性を利用してドームを構築したプロジェクト。傘の骨はそれ自体では座屈を生じるほど細く軸方向力に対して弱い素材であるが、傘の布地によって拘束されることにより、その問題を回避している。傘は、究極に細い素材を利用した構造体の一つの方向性を示している。

本プロジェクトは災害避難時の緊急避難施設としての提案である。



構造概要

洋傘の骨組みを接合したフレームと、テンション材（膜）を接合しドーム状に組み立てたパビリオンである。

■全体架構：アーチ効果による軸力系架構

洋傘ユニット同士の接合はピン接合であるが、ユニットが傘のアーチフレームと膜材との釣り合いにより、面内、面外方向とも高い剛性を有することから、立体的な組積造（ドーム構造）の様な架構となり、極めて薄い材と細い部材の構成ながら大きな空間を可能にしている。

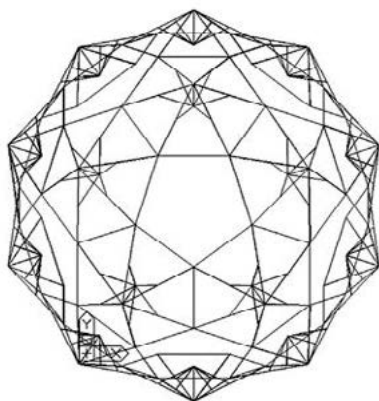


図 骨組アクソメ

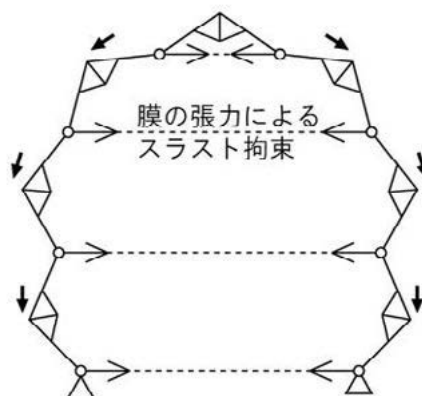
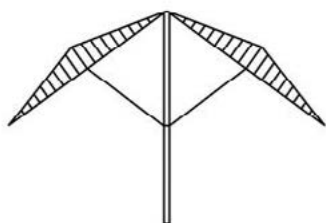


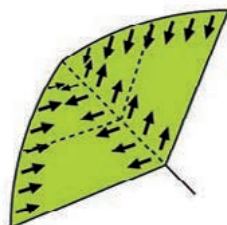
図 構造概要

■ユニット架構：

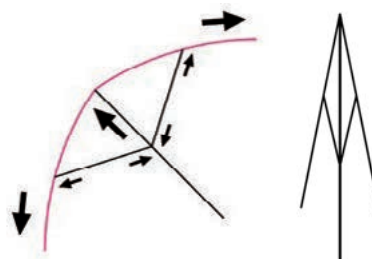
面内方向は膜材の張力により、座屈補剛としている。面外方向は骨組のアーチ効果により座屈方向を限定し、座屈応力に対しては膜材張力により抵抗するため、部材断面に対して剛性の高いユニットが可能となっている。



参考
図 和傘の構造（片持ち梁）



膜材の張力



骨組のアーチ効果（洋傘）

図 洋傘の構造

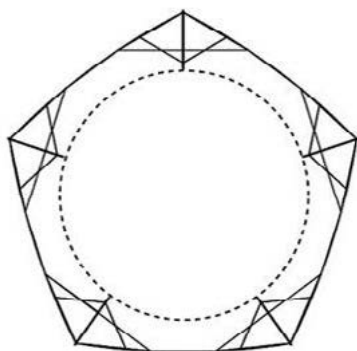


図 平面図

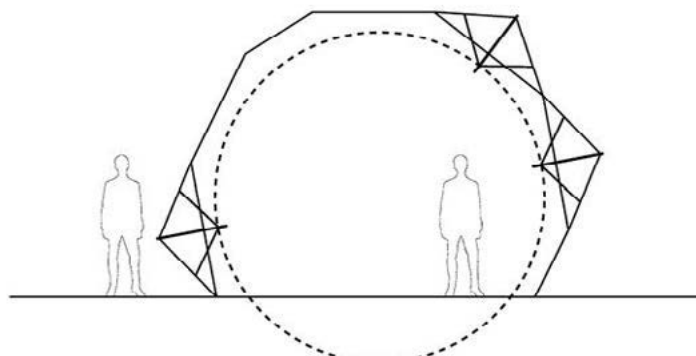


図 断面図

実験による材料特性の確認

構成部材である洋傘の骨組及び接合部の曲げ耐力試験を行い、応力解析モデルに対する各諸元へ反映させることにより、架構及び各部材の安全性検証の精度を高めている。



図 接合部強度試験



図 骨組強度試験

モックアップ組み立て

モックアップの組み立てにより、組み立て手順の検討、確認、接合ディテールのチェック、組み立て精度の確認を行い、本組み立て前に課題点の抽出、把握、改善の検討を行っている。



現地施工



図 現地施工

FEM解析による検証

強度試験結果を参考にフレームの剛性、耐力評価を行い、FEM 解析により架構全体の変位、応力解析を行うことで、安全性の検証を行っている。

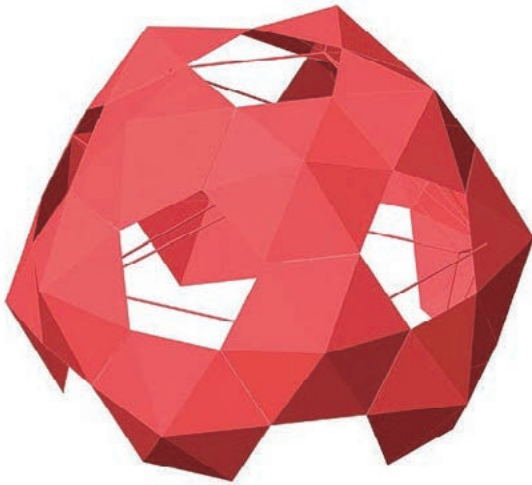


図 解析モデル図



図 解析モデル図（フレームのみ）

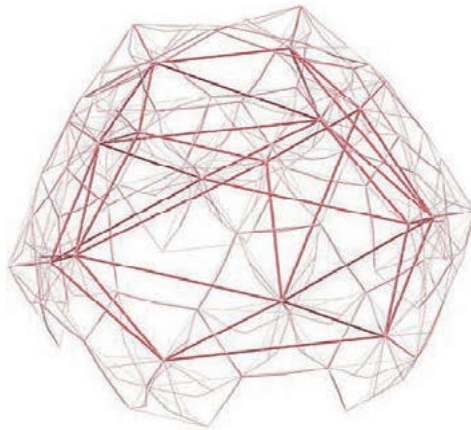


図 解析結果変位図

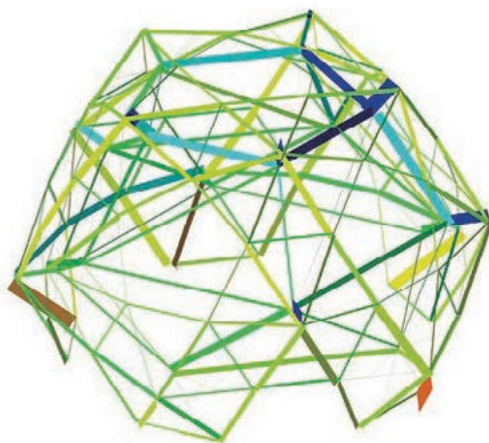
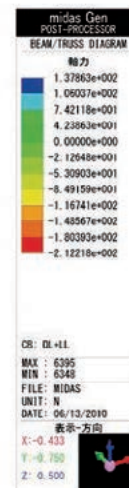


図 解析結果応力図



6. 「Casal Grande Ceramic Cloud」



プロジェクト概要

プロジェクト名：「Casal Grande Ceramic Cloud」

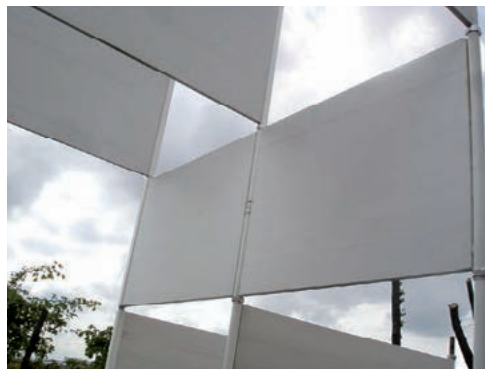
設計事務所：隈研吾建築都市設計事務所

建設地：イタリア / カザルグランデ

建築用途：モニュメント

構造形式：組積造（セラミックタイル）＋ラーメン構造

イタリアタイルメーカーの工場エントランス前に製作された自社製セラミックタイルを使用したモニュメントである。円形ロータリーを周回する道路の中心に設置され、タイルの平面配置角度を調整することにより、様々な角度から異なる見え方ができる様な配置としている。



構造概念

長手方向約 47.6m、短手方向約 2.3m の長方形の平面形状、高さ約 4.8m の規模のモニュメントであり、一枚約 0.6m×0.9 m のセラミックタイルを角度を変えながら 9 層に積層させて構成している。 タイル間の接合部にはステンレスのボルト及びプレートが使われている

INTRODUCTION

Geometry

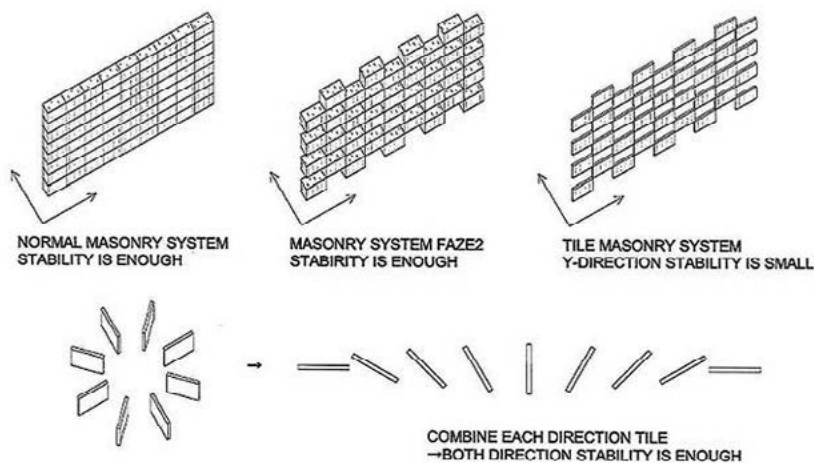


図 平面概念図

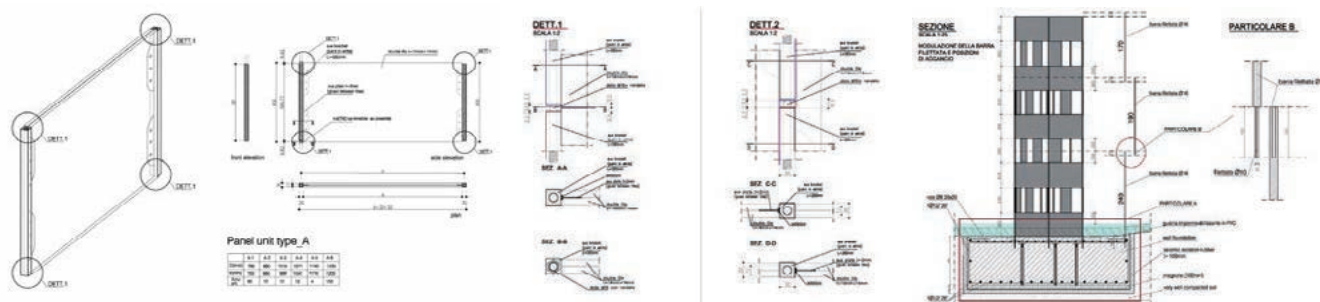
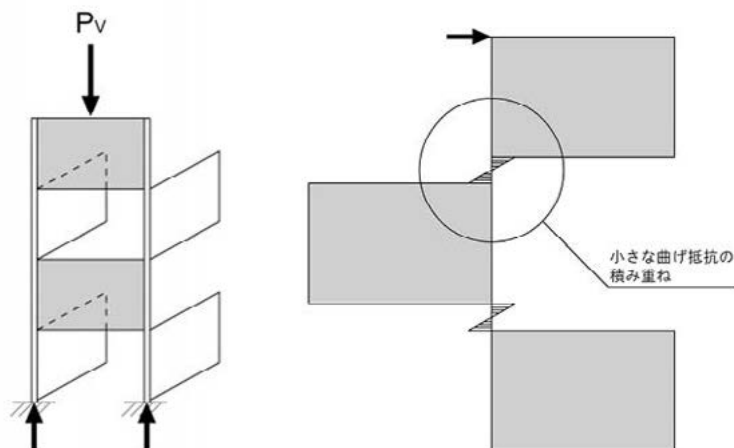


図 接合部概念図

図 断面概念図

短手方向は、タイル端部に鉛直方向に通して配置されているステンレスボルトが鉛直方向及び水平方向の外力に対して主に抵抗する架構であり、セラミックタイルの面内剛性により、ボルトに対する座屈補剛及び全体架構の水平剛性の向上に寄与して。

長手方向はタイルが千鳥配置となるため、タイルの面内剛性によりさらに剛性、耐力とも高い架構となっている。



実験による材料特性の確認

セラミックタイルの材料特性を把握するために、サンプル試料による材料試験を行った。試験体製作に際してタイルの切断、削孔などの加工性の検討も併せ行い、接合ディテール検討の際に参考としている。

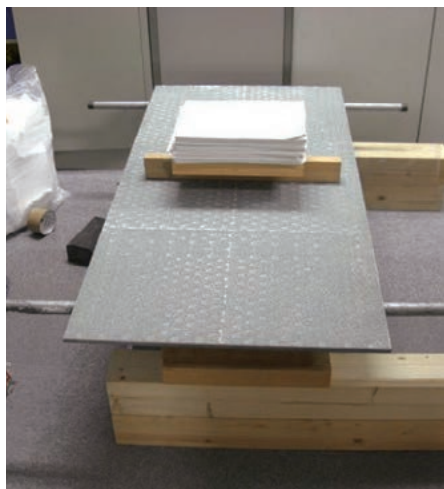


図 材料強度試験

意匠性、施工性を踏まえたディテール検討によりディテール方針が決まった後に、モックアップによる各材料耐力、接合部耐力の確認を行っている。

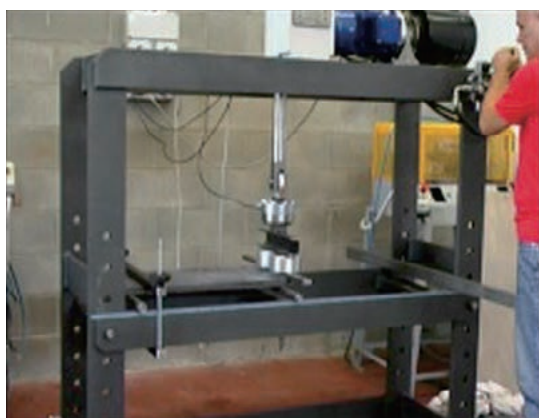
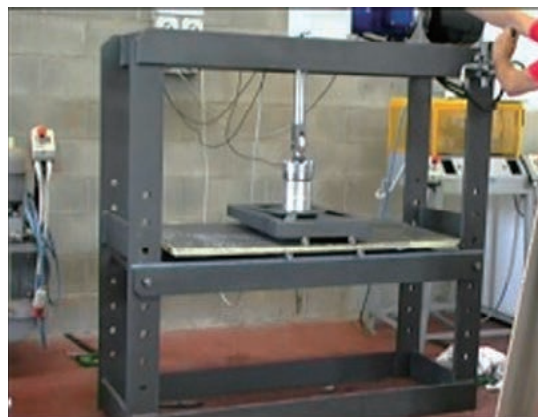


図 モックアップによる強度試験

FEM解析による検証

材料試験によるタイル剛性を評価したFEM解析モデルにより、架構の応力、変位の検討を行っている。

