

ISSN 0910 8270

structure

Journal of Japan Structural Consultants Association

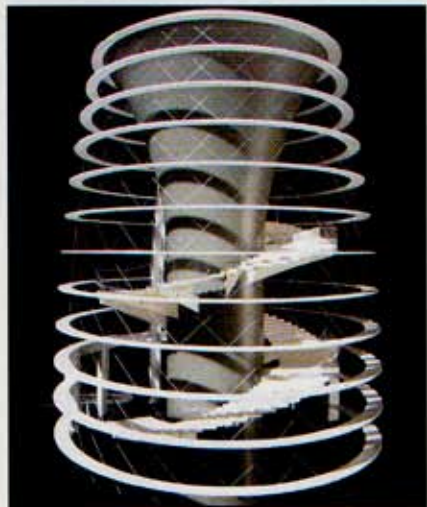
NO.88 2003.10

ガラス Glass Engineering for

と構造 Structural Engineers



第3章-2 M歯科医院診療スペース全景 (32頁)
M Dental Clinic



第3章-1 森アートセンターミュージアム・コーン外観
(上)と構造模型 (27頁)
Museum Cone at the Mori Art Center & Structural Model



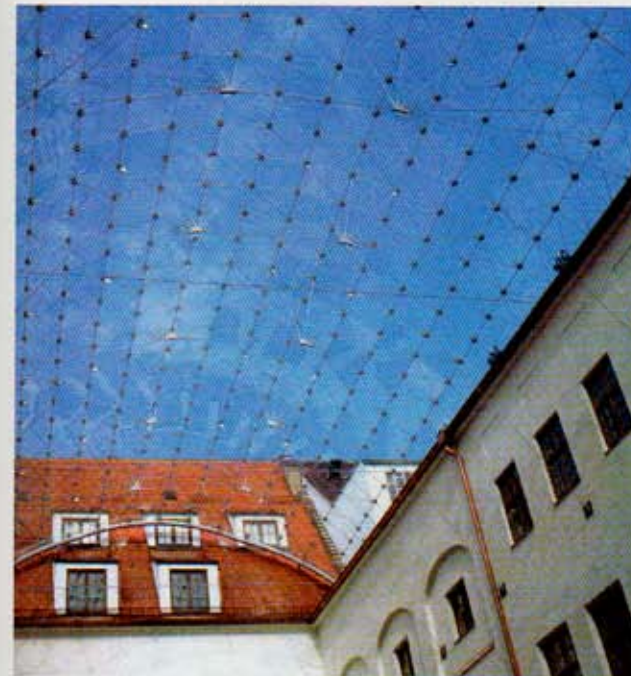
第3章-3 ガラス階段 (35頁) ©Adam Mark
Structural Glass Staircase in Denmark



第3章-3 内観 (36頁) ©Barnard, O'Sullivan
Street Footbridge in Manchester



第3章-3 ガラス張り屋根
Glazed Roof in Glasgow (35頁)



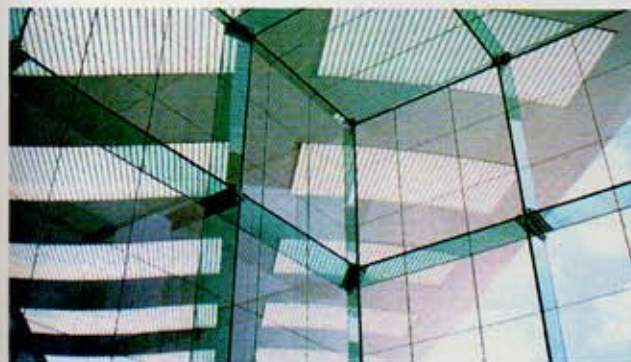
第3章-4 中庭からの見上げ (写真提供Seele) (41頁)
Maximilian Museum



第4章 屋根と柱 (49頁)
Bein Wohnhaus Almere



第4章 ガラスの柱 (49頁)
Saint Germain City Hall



第4章 アラブ都市開発協会 (全体構造) (49頁)
Whole Glass Structure in Saudi Arabia



第4章 オランダのブリッジ (渡り廊下) (49頁)
Glass Corridor Bridge in Holland



第3章-5 "Hoop" (42頁)



第3章-6 紙の資料館ブリッジ (写真/平井広行) (44頁)
Bridge in Paper Art Museum



仁藤 喜徳
Yoshinori Nito
エンジニアーズ・ネットワーク
代表

森アートセンター ミュージアム・コーンの構造デザイン

Structural Design for the Museum Cone at the Mori Art Center

Summary

The Museum Cone is the entrance for the Mori Art Center at Roppongi hills.

The structure consists of single layer of a cable net with 12 of horizontal compression steel plate rings forming a cable net shell. Main compression load imposed by the cables are resolved into the centrally located steel funnel structure (Elevator shaft). 20m tall cable net shell (funnel is 30m)

can maintain its stability with pre-tension force in each cable segment.

The structure is extremely stiff due to its shell effect even under the strong wind forces from the high-rise building behind and seismic event.

The exterior glasses (10+10 laminated tempered glass, ceramic fritted 25% of its glass area) are hung by the stainless fittings from the upper ring and supported laterally by the stainless strut from the lower ring.

1. ミュージアム・コーンについて

ミュージアム・コーンは、今年の4月末にグランドオープンを迎えた六本木ヒルズのシンボルである超高層ビル(森タワー)の最上層部分に位置する展望台、森美術館などで構成される森アートセンターへ人々を導くエントランスとして同ビル足元に建設された。六本木ヒルズの文化的な側面を定義づけるとともに角張った他の商業施設との差異化を図る目的で、楕円錐形状としている。エレガントで求心力があり、集まった人々が創造力を駆り立てることの出来る、建築自体が美術品として美術館の一部になれるようなシンボリック建築の実現を目指した。

森アートセンターに向かう人々は、地下2、1階、地上1、2階のいずれかのフロアから、ミュージアム・コーン内のエレベーターもしくは鉄骨螺旋階段を使って3階のフロアまで上がり、ブリッジを渡って森タワー内に入り、そこから直通のエレベーターに乗って、一気にビル最上層部へと進むプログラムとなっている。

2. ミュージアム・コーンの構造デザイン

ガラス外装を支える主構造は、直径17.5mmの単層ケーブルネットと厚さ22mm、最大径20m×16mの12枚の水平楕円リングをクランプ金物で接合することによって構成される高さ20mのケーブルネットシェルと、ケーブルからの反力と建物重量を支える高さ30mのファネル(エレベーターシャフト)によって構成されている(図1)。地下2階レベルより自立するファネルは柱梁ブレースで構成された鉄骨構造であり、それらは曲面GRCパネルによって覆われている。

ケーブルネット断面は外側に凸であることから、ケーブルがリングとの各接合点を通過するとき内側に屈曲するために、リングの各点を内側水平方向に引っ張る向心力が作用する。それらは圧縮リングの面内方向軸力となって釣り合うことによりバランスされている。圧縮リングはケーブルとの各接合点で面外方向に座屈補剛されている。

温度変化、風、地震荷重が建物に作用した時に、ケーブルの張力が抜けてリングと建物全体が不安定な現象を起こ

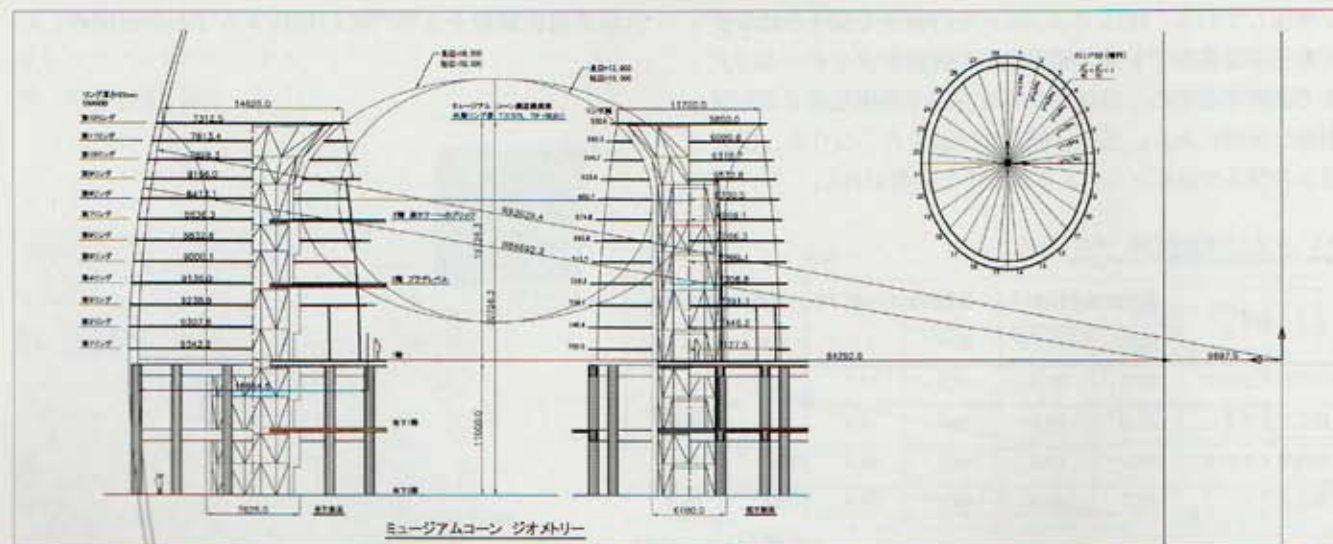


図1 ジオメトリ図
Fig.1 Geometry



写真1 構造模型
Photo 1 Structural model

写真2 建物内観1
Photo 2 Interior view 1



写真3 建物内観2
Photo 3 Interior view 2

さないように初期張力をケーブルに導入した。

ケーブル構造は一般的に変形量が大きくなり、むしろ変形させることによって外力を逃がす設計を行うが、ミュージアム・コーンの場合、初期張力が導入されたケーブルネットシェルの効果により、建物全体が一つの殻として機能することによって、ケーブルが主構造体であるにも拘らず、非常に高い剛性を確保している。鉄骨総重量も軽量化できることから合理的な構造システムを実現できた。

構造デザインとして、斜めケーブルを可能な限り細くし、水平リングを浮遊させることの実現を目指した(写真1)。リングの厚さも可能な限り薄くしたことによって見る角度によって表情が変化する大変ユニークな空間となった(写真2、3)。

設計当初、リングプレートの代わりにトラスを検討していたが、トラスにしてしまうとケーブルとトラスの組み合わせによって、線材から構成される三次元トラスの印象が強くなってしまい空間に馴染まないと感じた。さらにトラスの接合部は補強プレートや溶接などによって、構造的なイメージが強くなってしまふ。それらの問題を一番シンプルに解決するのが鉄板から切り出した水平プレートであった。

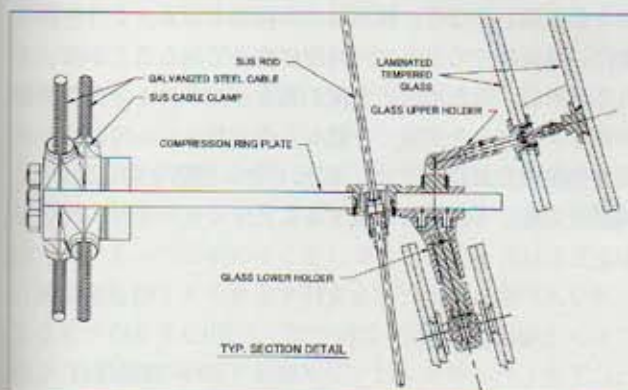


図2 リング断面詳細図
Fig.2 Typical detail section of compression ring

各要素の形状と素材の特性を最大限まで効果的に発揮することによって、構成している各要素の力強さ、軽快さが強調され、それらが接合されることによって機能する合理的な構造の実現を目指した。何か目新しい素材や断面形状を特別に採用するのではなく、引張に強いが圧縮の場合座屈を考慮しなくてはいけない鉄の性質と能力の魅力が伝わるような構造の実現を試みた。

3. 外装ガラスの設計

リング外周の強化合わせガラスは、リングの上に乗っている表現ではなく、金物をリングから持ち出し、ガラスを点支持することによって、リングから切り離し、浮遊しているイメージを目指した。ガラス上端は全てリングの板幅内に納まり、ガラス下端は全てリングのエッジより外に飛び出す納まりとすることで、外装ガラスは断面上でジグザグ形状となり、ファサードに変化をつけている。リングとガラスの両下端のレベルを揃えることによって、外部から見上げたときにリングのエッジの連続性が妨げられないように設計監理を行った(図2)。

外装はレインスクリーンであり、ガラスが重なり合うことによって雨水の浸入を防いでいる。各リング間でのガラスは全て同形状であり、楕円錐状の影響により、各ガラスの傾きとオーバーラップの程度が変化することによって、外装に変化をもたらしている。

建築家は半透明のフロストガラスをイメージしていたが、私はリングを出来る限り強調させたかったので、可能な限り透明なガラスをイメージしていた。様々な検討を重ねた結果、その中間とし、25%の白色ドット柄セラミックを焼き付けたガラスを選択したことによって、昼と夜で全く表情を変化させる大変ユニークな外装となった(写真4、5)。日中は外に対して内の照度が暗くなるために、ガラスとセ

ラブリが強調され、あたかもグリーンガラスシェルに見えるのに対して、夜は内側照明によって、内外の照度の具合が逆転するために、ガラスの透明性と、照明されたリングが強調される。

4. ディテールの設計

ミュージアム・コーンのように鉄骨が全て露出してしまふ場合、ディテールの見せ方によって建物全体の印象を決定してしまうことがあることを自分の失敗や数々のプロジェクトを見てきて感じていた。斜め材にロッドではなくケーブルを採用したのは、このディテールの見せ方のためである。

全部で約250のリングと斜め材との接合点において、建物形状が楕円錐状であることから、各斜め材はリングを通過するときに様々な角度に折り曲げられ、次のリングに向かう必要がある。ロッドはケーブルのように自由に曲げることは出来ないため、各リング間で切断する必要があり、ロッドの端部には三次元の角度変化に対応できるボールベアリングなどの機能が必要である。さらに建設誤差に対応するために、ターンバックルなどの長さ調整機構を設ける必要がある。これらの条件を満たす接合金物を設計すると、どんなに頑張って美しい金物の形状を設計しても、結果は全体とのバランスが非常に悪い巨大な鉄の塊になってしまう。ケーブルは三次元方向に自由に曲げることが出来るので、楕円錐状のジオメトリーにも対応ができ、ケーブルの長さ調整は建物の上下端部のみで行えばよいので、結果的に大変コンパクトな接合金物を実現することができた(図3)。



写真4 昼建物外観
Photo 4 Day time exterior view

ミュージアム・コーンの金物設計で難しかったのは楕円錐状の形状であることから、各位置でケーブル、ガラスなどの接合角度、位置が異なり、その全てに対応できる一つのディテールを開発することであった(写真6、7、8)。

ガラス支持金物に関しては、多くの金物がうさくリングに取り付けられては、機械的なイメージが先行してしまい、リングやガラスを強調させることが出来ないで、一つの金物でオーバーラップしているガラス2枚を支持できるように設計を行った。ジオメトリーの整理と形状の検討を繰り返し行うことで、数量が最少で、必要性能を満足し、形状が最小である金物を実現した。ガラスの重量の支え方に関しては、リングの下端からガラスを吊ることによって金物形状を最小化できた。吊り金物はガラスがオーバーラップしている隙間に落とし込むことによって、存在を曖昧に出来る考えた。両ガラス間の隙間は手を入れるのがやっとの間隔しかなく、楕円錐状の複雑なジオメトリーのために、各位置でのガラスの角度は様々であることから、それらに対応するために、角度の異なる吊りロッドを数種類準備し、それらをグループ化し、微調整をシムで行い、平面の角度変化に関しては、回転できる機構を別に設けて、角度決定後、トルクを導入することでそれらを締め付けて固定した。

ガラスの面外方向だけを支持するガラス下端金物に関しても、上端同様に1つの金物でガラス2枚分を支持できるように工夫した。ガラスはリングのエッジから飛び出しているため、リングからの金物は一枚のガラスを貫通しながら



写真5 夜建物外観
Photo 5 Night time exterior view

面外拘束し、更にもう一枚のガラスも面外支持している。ガラスの面内変形を金物が拘束してしまうと、熱割れ、建物の変形に対する追従性能などに問題が生じるので、それぞれの支持点のガラス板厚内にボールベアリングを内蔵することによって、各点がそれぞれバラバラに変形できるように工夫した。

鉄骨リングにガラスが直接金物を介して取り付けられるため、施工誤差の許容値、金物の調整機構の設計は、施工者、製作者との膨大な打ち合わせと調整が必要であった。

構造デザイナーはこのような露出鉄骨を設計する場合、構造だけでなく建築のディテールに関しても、十分気を配る必要がある。今回も照明の計画で大変もめることとなった。私は当初、各ケーブルクランプ位置にクランプ金物と一体となるような照明器具の設計をしたいと考えていたが、現実には厳しく、クランプ金物の2倍以上の照明設備に加え、緊張感のない配線がリングの上を走らなければならないことが判明した。私が提案し、照明デザイナーさんに検討を依頼したにも拘らず、結果を見た後は方針を180度変更する必要があった。露出鉄骨の場合、照明や空調、スプリンクラーなどの設備の計画にも設計当初から綿密な調整が必要である。このミュージアム・コーンでは、空調や照明は全てファネル内に納めることにより、外装を洗練させることに成功した。

5. 設計監理を終了して

これからのガラス建築は、その透明性を追及するために、



写真6 分解された金物部品
Photo 6 Disassembled fittings



写真7 圧縮リングと金物1
Photo 7 Compression ring and stainless fittings 1



写真8 圧縮リングと金物2
Photo 8 Compression ring and stainless fittings 2

単純に支持構造体、ディテールを最適最小化し、安全、機能、合理性を満足するだけでなく、建築の一部となり、意匠性を兼ね備えた構造の要求が高まっていると感じる。構造設計者は、構造だけでなく、ガラスの建築的、構造的使い方の多様性、可能性への探求、認識が必要とされ、空間と結びついた洗練された構造設計を行う感性が必要になると考える。

ミュージアム・コーンの設計に関しては、ディテールを脇役とし、主役であるジグザグのガラス、二次元楕円のスチールリング、三次元曲線のファネルコンクリートのそれぞれが素材と面を強調することによって、角度によって見え方を変化させるユニークな空間の建築を実現できた。

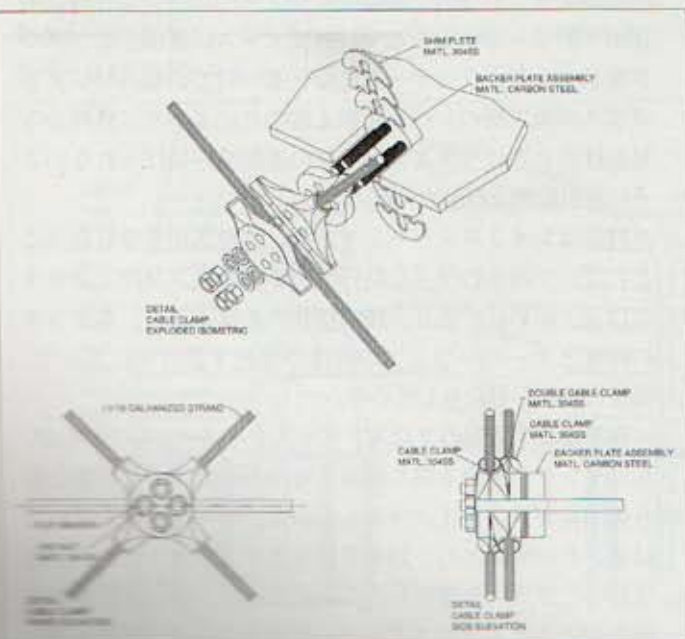


図3 ディテール設計
Fig. 3 Detail design of cable clamp