

セミモノコック構造美観煙突の開発

Development of Mitsubishi Scenery-Matching Stack System

広島製作所 近藤 浩*¹
 技術本部 村瀬 良秀*² 阿比留 久徳*³
 本田 明弘*⁴ 斎藤 千啓*⁵

最近、特に都市近郊の発電所に対して、環境調和の観点から美観重視の傾向が強まっている。このような背景から、内筒を支持する外筒に意匠的要素を持たせた美観煙突を開発した。この美観煙突の外筒は、薄い鋼板パネルと柱、リング部材から構成された、いわゆるセミモノコック構造である。短期荷重に対してはパネルの弾性座屈を許容し、座屈後耐力を活用している。また、内筒と外筒の間にはばねとオイルダンパを設置し、制振構造としたことも特徴の一つである。このような特徴を有する構造を採用することにより、外観的に優れるだけでなく、軽量かつ耐震・耐風性の良好な煙突とすることができた。

Recently, there is request for power plants in urban areas to have a scenery-matching appearance. In consideration of this request, we have developed the Mitsubishi Scenery-Matching Stack System with an outer shell. This stack system has semi-monocoque structure consisting of thin steel panels, columns and ring members. Characteristics of this system are follows. (1) For short period loads, this semi-monocoque structure allows elastic buckling of panels and uses strength after buckling. (2) For wind and earthquakes, we have adopted a vibration prevention structure consisting of springs and dampers located between outer shell and the smoke outlet. With the adoption of these structures, the Mitsubishi Scenery-Matching Stack System not only has scenery-matching appearance but light weight and high stability against wind and earthquakes.

1. はじめに

火力発電所の煙突は、内径4~10mの筒身(煙道)1~4本を有していることが多い。煙突の目的から、通常200m程度の地上高が必要であるため筒身単独で自立することは困難であり、従来は数本の筒身を互いにつなぎ梁でつないで剛性を高めたもの、鉄塔やコンクリート製外筒で筒身を支持するものなどの構造が用いられてきた。

一方、最近では火力発電所の煙突に対しても、環境調和の観点から改善を求める要望や、さらには地域のモニュメント的役割を求める要望が強くなってきた。

しかし、従来の構造では、色彩面や構造面の工夫を施したとしても外観やイメージの改善にはなお不十分な状況であり、機能性や経済性のみでなく、より積極的に環境への調和を図る煙突構造が必要となってきた。

このような背景から、当社は環境調和形の、いわゆる美観煙突を開発することとした。

2. 外観デザインへの取り組み

煙突のデザインは、建設地域景観への配慮、電力会社の事業への取り組み姿勢、発電所の目標とするイメージなどを総合的に勘案したデザインコンセプトを基本に決定される。

これからのコンセプトの傾向は“環境との調和”である。すなわち、煙突といえども環境や人にとって優しい存在でなければならないものとなる。その結果、曲面を使った柔らかい形状や周囲のビルと調和させた平面構成のシンプルな形状などがデザイン面で要求されてくる。

このような要求に対する煙突のデザイン例を図1に示す。この例のように、面を生かすことでデザイン処理上の自由度が高まり、デザインコンセプトにふさわしい煙突が実現可能となってくる。



図1 デザイン例 セミモノコック外筒により自由な外観が得られる。
 Design examples of scenery-matching stack

3. 構造概要

デザインコンセプトを受けて、それにふさわしい煙突を実現するための構造として筒身(内筒)の周囲に従来の支持鉄塔に代る外筒を設け、これに意匠的要素を持たせるという方式が適当と考えられる。このような、いわゆる外筒支持構造は、従来は支持構造骨組に非強度部材の外装板を取付けたものであったが、本煙突では外面のパネルも強度部材として活用することにより本体構造の軽量化を図るものとした。すなわち、並立するH型鋼柱とこれらをつなぐ水平の補強リング(中間リング、支持点リング)とで構成される立体骨組に、支持鉄塔のプレースの役割をなす鋼板

*1 鉄構技術部長

*2 広島研究所主管

*3 広島研究所鉄構・土木研究室長

*4 長崎研究所流体・伝熱研究室

*5 名古屋研究所デザインセンター主務

パネルを付設した、いわゆるセミモノコック構造を採用した。

このセミモノコック構造外筒煙突は、コンクリート製外筒煙突と比べると極めて軽量であることから耐震性に優れ、基礎工事を大幅に軽減できるという利点を有している。一方、重量が軽いため地震よりむしろ風に敏感になり、風による振動への対策が必要となってくる場合が多くなる。この対策としては、煙突の剛性を上げて共振風速を設計風速以上に高めたり、外筒を空力的に有利な形状にすることなどが考えられるが、経済性や美観の面から必ずしも有効とは言い難い。

したがって、別途制振装置あるいは制振構造などの対策が必要であるが、本煙突では内筒と外筒の剛性の差が大きいことから、これを利用した制振構造⁽¹⁾を採用することとした。この制振構造は、内筒と外筒間の相対変位が大きい煙突上層部の支持点にばね及びオイルダンパを設置するものである。また、ばね及びオイルダンパの設置箇所では内筒と外筒の間にストップを設けて、巨大地震に対しては過大な変形の発生を防ぐことによりばね及びオイルダンパを保護すると同時に、自身も塑性変形することにより地震のエネルギー吸収も図っている。

図2に本煙突の構造概要を示す。

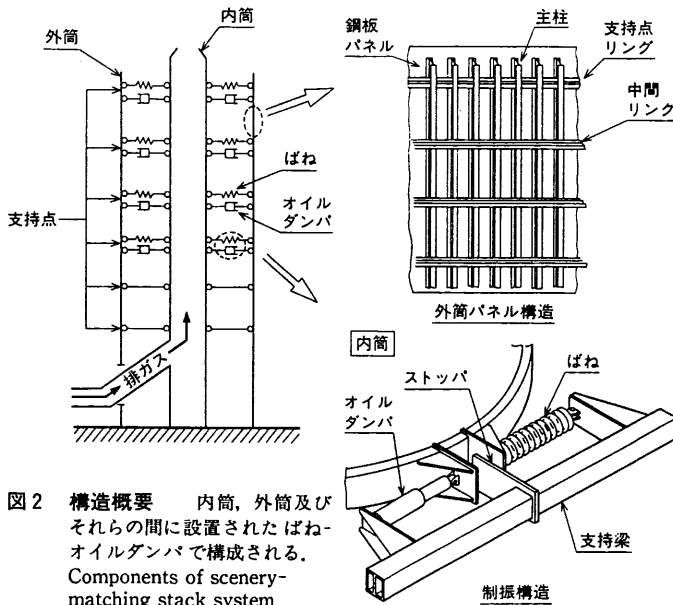


図2 構造概要 内筒、外筒及びそれらの間に設置されたばね・オイルダンパで構成される。Components of scenery-matching stack system

4. 構造設計法

4.1 構造解析

本煙突では柱に挟まれた外筒パネルの幅厚比は200程度の、いわゆる薄板である。このパネルは、主に風や地震によるせん断に抵抗する部材であるが、短期荷重時には弾性座屈を許容する設計がなされる。したがって、全体系構造解析において内筒やエレベータシャフトは通常の線形な梁要素でモデル化できるが、外筒については上記のような設計を反映させ、パネルの座屈に伴う剛性低下を考慮したモデルとする必要がある。

そこで、外筒を多数の層要素に分けて考え、それぞれを剛梁-ばねの組合せでモデル化するものとした。そして、ばねの剛性として、各層要素についてパネルの座屈を考慮した非線形FEM解析により求めた復元力特性を付与した。

このようにして作成した外筒モデルと、内筒やエレベータシャフトを表す梁要素とは、ばね-ダッシュポットでモデル化された

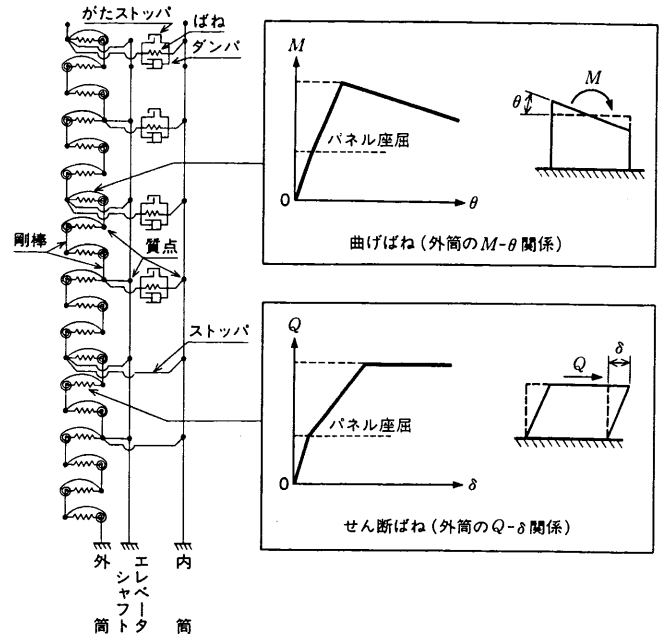


図3 全体系解析モデル 外筒を構成するばねは、パネル座屈に伴う剛性の非線形性を表す。Analytical model of total system

制振構造やがたを有する弾塑性要素でモデル化されたストップなどにより連結される。

全体系解析モデルの概要を図3に示す。このモデルにより、全体系の静的あるいは動的な非線形解析⁽¹⁾⁻⁽³⁾が実施され、各部の設計断面力が算出される。

4.2 外筒の設計

全体系解析より求めた外筒断面力のうち、軸力と曲げは柱が、せん断はパネルが主に受持つものとして設計する。ここで、パネルの座屈の取扱いが特徴的である。すなわち、前にも述べたが、外筒パネルは短期的に弾性座屈を許容する設計がなされる。このような設計が可能であるのは、薄板においては座屈後のかなりの程度の荷重レベルまで十分なせん断耐力が保持され、また、除荷すれば座屈変形がなくなるという特性があるからである。

薄板の座屈後耐力に期待した設計は、日本建築学会の規準⁽⁴⁾にも示されている。これはWagnerの完全張力場理論に基づくものであるが、本煙突では航空機構造設計に用いられているKuhnの不完全張力場理論⁽⁵⁾に基づいた設計法を展開した。

この不完全張力場理論によるパネルの応力解析から、各部の設計に必要な量が求まる。例えば、パネル自身の応力はもちろん、パネルに取付く部材の付加力が求まり、これは柱やリング部材の設計に使用される。さらに、パネルの座屈後の等価せん断剛性も求まるが、これに基づいて前節で述べた全体系解析モデルにおける外筒の非線形剛性が評価される。

なお、パネル自身の設計では、不完全張力場の解析から求める応力に、必要ならば風圧力による板曲げを考慮した応力の条件のみならず、二次設計レベルにおいてもパネルの変形を永久変形として残留させないという条件も満足させるものとしている。

4.3 制振構造の設計

本煙突制振構造の目的は、まず第一に渦励振の低減と空力的不安定振動の防止により、動的な応力を静的レベルにまで低減することである。この目的から、制振構造により付加すべき必要減衰が決定できるが、本煙突外筒は空力的特性の知られていない特殊な形状を呈していることが多いと考えられる。したがって、原則

として風洞実験により必要減衰を定めることにする。

設定された必要減衰を得るための制振構造の諸元（配置、ばね定数、減衰係数、ストッパのクリアランスなど）は4.1節で示した全体系解析モデルを用いて決定する。そして、決定した諸元に基づき、制振構造のもう一つの目的である地震応答の低減効果に関して、全体系解析モデルを用いた地震応答解析⁽¹⁾⁻⁽³⁾を実施して検討、評価するものとする。

制振構造に用いるばね及びダンパは、揚力振動時の振幅に追従できるようなストロークを有するものを選定する。また、特にオイルダンパは、耐久性の面から温度特性、作動油並びにリップ材の材質などを十分考慮して設計を行うものとする。さらに万が一、オイルダンパがある確率で故障した場合や品質のばらつき、温度による特性変化などを考慮しても、必要減衰が確保されるようにばねとオイルダンパの適切な配置を決定する。

5. 検証実験

5.1 外筒耐力実験

前章に述べたように、本煙突では構造解析を実施する際に外筒を層要素を基本に取扱うこととしている。そして、この層要素の復元力特性は、不完全張力場理論に基づき新たに開発した非線形FEM解析を適用して求めている。そこで、解析の妥当性を検証し、層要素の復元力特性を把握するため外筒層モデルの耐力実験を実施した。

供試体として、外筒支持点間の層を考え、これを約1/9に縮小した直径2.6m、高さ4mの溶接鋼製セミモノコック円筒を2体製作した。実験はせん断主体の載荷とせん断と曲げの応力比が実機相当となる積荷の2ケース実施した。

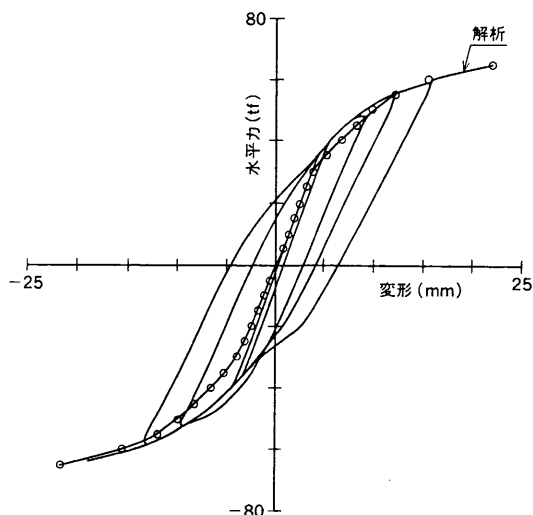


図4 実験結果 解析結果は実験と良好な対応を示している。
Result of buckling test

このうち、せん断主体の載荷の実験結果を図4に示す。同図中に、不完全張力場理論による応力場を仮定したパネル要素を用いた非線形FEM解析の結果も併せて示している。この結果より、解析はせん断座屈後の剛性変化を的確に表しており、実験との対応は良好であると言える。また、セミモノコック外筒のパネルは、座屈後もせん断耐力を良好に保持していることが分かる。これは、パネルの斜張力場作用によるブレース効果が維持されていることを示している。

なお、このような層要素としての特性に加え、パネル単位での座屈特性も明らかにするため、縮尺1/2、大きさ2.7×2.7m、3パネル分を取出した溶接鋼製供試体について、パネルの厚さや曲率をパラメータとした部分パネルの圧縮又はせん断截荷実験も併せて実施し、パネルの座屈応力や座屈後有効幅の評価式の適用性を確認するとともに、パネルの使用限界となる、座屈変形が残留し始める荷重を確認した。

5.2 制振構造実験

本煙突では、内外筒間にダンパを設置して減衰を与える制振構造を採用し、風並びに地震応答の低減を図ることとしている。その効果については、以下に述べる風洞実験と振動台実験の2種類の実験で確認した。

(1) 風洞実験

実験は、当社長崎研究所所有の耐風拡散汎用風洞にて実施した。供試体は、高さ200mの煙突の縮尺1/100の弾性体模型とし、外筒形状はもちろん内、外筒の振動特性を実機と相似にした。さらに、制振構造についてはコイルばねと粘性体と用いて製作した超小型ダンパによりモデル化した。制振時にはこのばねとダンパにより内外筒を連結し、非制振時にはこのうちダンパを解放した。

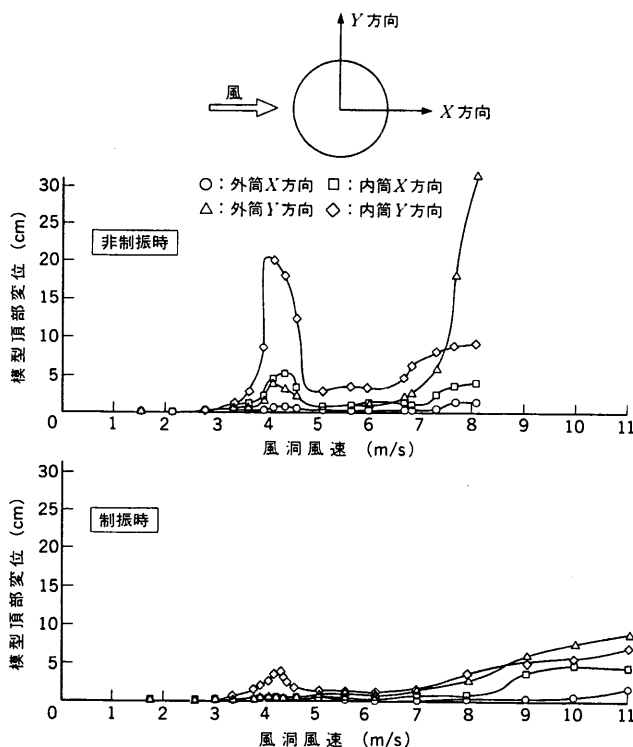


図5 風洞実験結果 制振時と非制振時の模型頂部振幅の比較を示す。
Result of wind-tunnel test

図5に示す制振時と非制振時の応答の比較から、制振構造の効果を確認できる。すなわち、非制振時に顕著な渦励振振動が現れていたものが、制振時には大幅に低減しているのが分かる。また、風方向の応答についても、同様に振幅の低減が認められる。

(2) 振動台実験

実験は、当社広島研究所所有の地震振動台を用いて実施した。供試体は、高さ200mの煙突の縮尺約1/67の模型であり、内、外筒の振動特性を実機と相似にした。制振構造については、風

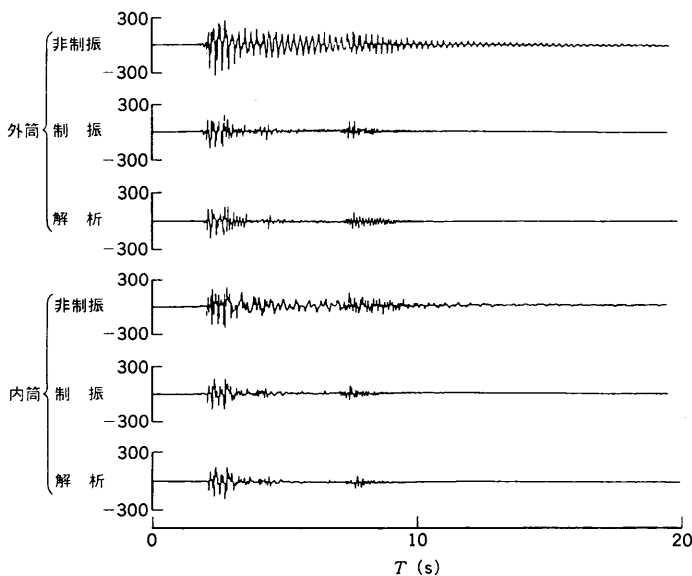


図6 振動台実験結果 制振時と非制振時の地震応答波形の比較を示す。
Result of shaking table test

洞実験用供試体と同様にコイルばねと超小型粘性ダンパによりモデル化し、また、制振と非制振の扱いも風洞実験と同様とした。

地震波加振の結果の一例として、内、外筒の頂部応答を図6に示す。同図中に、4章で述べた全体系解析の結果も併せて示す。制振構造により、内筒、外筒とも応答の低減が確認できる。また、この例では1次モードで約30%の減衰が付加されているが、このような大きな減衰を有する系に対しても解析は実験と良好に対応している。

6. 製作・架設

セミモノコック構造は、従来の外装板方式や補剛板方式に比べ部材数が少ないことや、共通形状のブロックを大量に製作するためジグの共通化などにより製作工数の低減が可能となるなどの利点がある。

また、実物大の部分パネルを試作し、設計上目標とする精度が十分確保できることを確認した。この試作モデルを図7に示す。

一方、現地架設工事においてもセミモノコック構造は、架設ブロックの大型化による架設ピース数の減少、架設ブロックの同形状化による架設効率の向上などの利点がある。

架設工法は、従来から鋼製煙突の架設に適用してきたジャッキアップ工法やタワークレーン工法のみでなく、当社が既に超高層ビル建設向けに開発、実用化した全天候架設工法の適用も可能である。

本工法は、外筒の頂部構造を兼用した全天候フレームを地上において先に建設し、外筒の柱を支持材として順次この全天候フレームをジャッキアップしながら外筒及び内筒を据付けていくものである。全天候フレームには、その周囲と天井に養生シートが張られており、風雨の影響を受けずに作業が可能である。また、全天候フレームには、部材を地上より揚重する垂直搬送機と揚重された部材を配材する水平搬送機が装備されるなどの機械化もなされている。

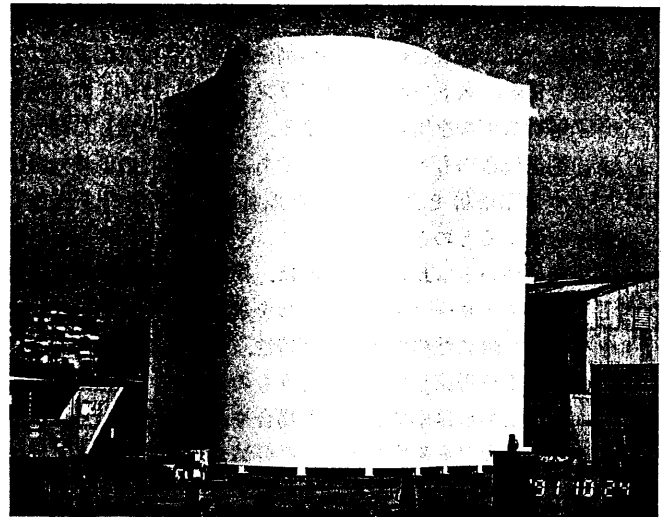


図7 試作モデル 実物大モデルの試作により、製法や製作精度の確認を行った。
Manufacturing and constructing test

全天候架設工法によれば、複数ホイスによる揚重効率向上への寄与が大きい上、さらに稼働率向上が可能となるため、従来工法に比べ20%以上の現地架設工期の短縮が可能であり、かつ、作業環境や安全性の向上にもつながる。

7. あとがき

本煙突ではデザインコンセプトの基本を“環境との調和”に置いており、それにふさわしいデザインを実現するための構造としてセミモノコック構造外筒支持方式を採用した。その結果、軽量で剛性が高い、言換えれば耐震性に優れ、基礎工への負担が軽い煙突となっている。また、制振構造の採用により耐風性の向上を図るとともに、耐震性の一層の向上も図っている。

上記のように、本煙突は従来に例を見ない構造物であることから、数多くの検証実験や解析を実施するとともに、(財)日本建築センターの技術指導(委員長:牧野 稔 東和大学教授)をいただき、安全性、信頼性には万全を期した。今後、デザイン面でのメニューの充実はもちろん、設計、製作、架設、維持管理などのあらゆる面からより一層の改善を行って行く所存である。

最後に、本煙突構造実験の御指導を賜った大阪大学 井上助教、多田助手、大阪工業大学 中島助教に厚く感謝するとともに、技術指導いただいた(財)日本建築センター及び委員の先生方、並びに御助言を賜った電力関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) 阿比留ほか、制振機構適用による建造物の防震、日本建築学会大会学術講演梗概集(1986-8) p.833
- (2) 村瀬ほか、ボイラ鉄骨の耐震設計法に関する研究、三菱重工技報 Vol. 20 No.4 (1983) p.41
- (3) 村瀬ほか、多脚型煙突の耐震設計法に関する研究、三菱重工技報 Vol. 24 No.6 (1987) p.645
- (4) 日本建築学会、薄板鋼構造計算・設計施工規準・同解説(1963) p.69
- (5) Kuhn, P., Stresses in Aircraft and Shell Structures, McGraw-Hill (1956) p.47