システムトラスによる中国大連タワーの構造設計と技術開発

STRUCTURAL DESIGN AND TECHNICAL DEVELOPMENT OF SYSTEM TRUSS FOR THE DALIAN TV TOWER IN CHINA

岩田 衛*, 川合廣樹**, 和田 章***, 矢木 寛****,
原田昭穂****, 白井貴志****

Mamoru IWATA, Hiroki KAWAI, Akira WADA, Hiroshi YAGI,
Akiho HARADA and Takashi SHIRAI

This paper first explains the background for the adoption of System Truss for the Dalian TV Tower in China as well as the determination of design load and allowable stress.

The section on the structural design states the analysis model, member design, self-induced vibration of pipe member, etc. Explained next are the wind tunnel test conducted to determine velocity pressure, and the stability analysis conducted to estimate the ultimate condition of the Tower.

Furthermore, the material and strength characteristics of System Truss components are explained, particularly the production test of large-diameter bolts. Finally, the paper reports on the construction techniques.

Keywords : system truss, tower, structural design, construction technique

システムトラス, タワー, 構造設計, 施工技術

1. 序 論

建築物は土木施設と同様に、建設された場所に固定されて使われるため、建設地の地盤状態、地震活動度、強風、建設地域のもつ技術などの風土を良く知った上で、その構造設計を進めるべきである。過去から使われてきた設計方法、施工方法には、その方法の正しさについて確固たる説明はできなくても、その建設地の風土に適合し、その構造が長い年月、傾くこともなく、地震にも耐え、強風の中にあっても大きく揺れたり、壊れたりすることがなかったという実績のもつ重みがある。同じような場所に同じような建物を作るとき、過去からの経験に基づき少しずつ改良を重ね、新しい挑戦を試み、その適用範囲を広げていくことが、近代科学が確立される以前の技術の発達であったといえる。近代科学が確立されてからは、これらの経験と実績を積み重ね続ける上に、地震、台風などの外力や地盤、水位、気象条件のような設計条件に関する調査研究、それらに対する構造のモデル化や解析、あるいは動的外力に対する応答の解明、構造物の強度や変形能力に関する研究、新しい材料や構法の

開発をすることによって、現在の構造設計法が成り立っている。

しかし、日本の現状を振り返ると、過去の経験や調査研究を反映して作った建築基準法、同施行令、建築学会の各種規準、建築センターの指針に代表される設計環境の固定した標準化が、設計の自由度を狭めているように思われ、このような設計環境の中にいるため、各種の設計条件、構造物の力学的性質等を原点まで戻って見直すことが忘れられているように感じられる。実際の建築物の設計や施工を進める際には、学問だけでは説明のできない設計者の判断や決断が必要である。しかし、上記の基準や国内の多くの建築実績が実務標準を作ってしまう、設計者が各種のデータに基づき判断や決断をすべき部分を侵していると考える。このために、ある程度の実際的な調査や研究の方法が確立されてきたにもかかわらず、設計上に必要な項目について、設計者がプロジェクトごとに自ら再度調べたり、実験を行ったりすることが少なくなっている。また以前に設計された同様の建物の設計方法を、建設地の風土やプロジェクト固有の条件に

* 新日本製鐵株式会社・工博

** 株式会社日建設計・工修

*** 東京工業大学 教授・工博

**** 新日本製鐵株式会社・工修

Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.

Nikken Sekkei, M. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

対して見直すことのないままに、そのまま用い、構造設計を定形的な仕事にしようとする動きが強い。

ここでは、中国遼寧州大連市に、システムトラス¹⁾を用いて建設した鉄骨タワーの設計から施工に至るまでの調査研究と技術開発をまとめて報告する。海外、特に大型の建築物が作られたことのない地域においては、新しい構法による建築物を建設しようとするときに、上述したような経験や実績がなく、現地の構造設計基準も整備されていない。本報告は、構造設計に当たって基本的に考えるべきこと、現在の技術によって判断できること、設計者の判断によって実行すべきことなどについて見直す一つの例になると考える。

本報告では、まず、タワーの計画概要と構造計画を説明し、タワーの構法としてシステムトラスを採用した経緯、および設計荷重と許容応力の設定について述べる。構造設計では、要求条件、解析モデル、設計応力、部材設計、パイプ部材の自励振動、柱脚部の設計に言及する。次に、強風設計の速度圧、風力係数等を設定するために行った風洞実験、およびタワーの終局状態を推定するために行った弾塑性解析による安定解析について述べる。さらに設計に用いたシステムトラス部品の材料と強度の特性に触れ、特に太径ボルトの仕様を決定するための製造実験について述べる。終わりに、システムトラスによるタワーの施工技術を報告する。

2. 計画概要

タワーは、大連市内にそびえる緑山（海拔 175 m）の頂部の鞍を幅 70 m、長さ 150 m にわたって切り崩し整地した敷地に計画、建設された（写真-1）。

タワーは、図-1 に示すように、システムトラスによる塔本体、コアシャフト、ゲインタワー（電波発信塔）から構成され、高さは 192 m である。塔本体の頂部には回転レストランが設置されるので、平面形は円に近い正 12 角形の形状である。タワーの外径は約 24 m である。

3. 構造計画

構造計画に際しては、問題解決のための思考環境を白紙に近い状態からスタートさせなければならない。ここで考えるべき問題の基本は、大連の緑山の山頂が建設地であること、日本の技術の適用方法、観光電波塔、シンボル性、高さ、荷重と許容応力、コスト、施工法などである。

3.1 タワーの形状および構法

タワーの構法としては、古くは組石造や木造もあるが、100 m を超えるものは鉄筋コンクリート造または鉄骨造に限られている。地震のないところにあるカナダの CN タワーやモスクワタワーのような 500 m を超えるタ

写真-1 タワー全景

図-1 タワー概略図

ワーでは、風に対する質量効果の優位性から、鉄筋コンクリート造のものが建設されている。

大連タワーは 200 m 級の鉄骨造のタワーとして計画された。鉄筋コンクリート造では、大連で予想される地震に対し不利であると判断されたからである。鉄骨造のタワーの中で、最近の日本で建設されているような、鉄骨の外側をガラスやメタルで被せた案も検討された。しかし、受風面積を低減して風荷重を減らし、経済設計を

図-2 タワー立面図

図-3 タワー平面図

図ろうとしたこと、また鉄骨の亜鉛メッキによる防錆技術の信頼性が向上したことから、露出鉄骨案とした。このような背景に加えて座屈耐力が優れていることから、図-2, 3に示すようなパイプによる立体トラスが取り上げられた。

3.2 システムトラスの採用

パイプによる立体トラスのタワーとするにあたって、ジョイントの信頼性を検討し、一本ボルトによるシステムトラスを採用することに決定した。それは、建設現場が山頂での作業であり、熟練労働者もほとんどいないことから、現場溶接や多本数の高力ボルトを用いた接合方法に比較して、作業性のよい太径の一本ボルトによる接合方法の方が、現場において、少ない接合箇所の少ない本数を管理すればよいこと、およびボルトの製造本数も少ないため、製造管理も容易であることによる。そこで、大連タワーでは、一本ボルトによるシステムトラスが総合的に信頼性が高いと判断したからである。このために、後で述べるような仕様のもとに、太径ボルトの品質管理および素材の選定にあたって、工場における全数検査を行った。

システムトラスは、先端技術的工業製品であり、コストが部品ごとに明確である。このため、当時の中国のスローガンの一つであった「先進性」に、このシステムトラスが合致したことも、採用された要因としてあげられる。

3.3 荷重と許容応力

構造体の安全性は、設計に用いた荷重の確率的危険性と実際にできあがる構造系の耐力の信頼性の相互関係から決定される。

タワーが受ける外力として、特に風荷重が問題であった。風荷重の設定に際しては、風圧レベルと実効風圧力に対しては信頼性の高い風洞実験を実施し、危険確率を確かなものにし得る。しかし、大連のような観測データが少ない地域の風速については、確かな危険確率が設定できないため、風圧力に対する許容応力の割増に安全を見込まなければならない。

設計基準風速は、3秒間瞬間最大風速の50年再現期待値²⁾として、45 m/sを採用した。大連地区の高さ105 mにある観測所で1949年から1987年までの38年間に観測された3秒間瞬間最大風速は1986年に35 m/sが1度だけ測定され、その他の年はすべて20 m/s以下であった。このことから、設計基準風速を45 m/sと決めたことは、十分安全側であると考えることができる。しかしながら、観測資料の信頼性に疑問が残ること、大連が黄海と渤海に囲まれたところに位置しているとはいえ、長年の間には設計基準風速が50 m/s程度の大型台風が上陸する可能性も皆無ではないこと等の不確定要因が大きいとの判断から、風圧力に対する許容応力の割増を日

本で用いられている長期許容応力度と短期許容応力度の比である1.5倍でなく、1.25倍に押さえ、構造耐力に20%の余力を持たせ、設計基準風速50 m/sにも対処できるようにした。

地震力に対する設計条件は、中国の耐震荷重基準烈度8の地域であることを踏まえて、地上加速度100 galに対して弾性範囲にあり、最大200 galの加速度に対して崩壊しないことであった。ELSENTRON S 1940.5.18とTAFT EW 1952.7.21を用いた地震応答解析の結果、トップヘビーの形状でありながら、重量が小さいために、100 galの地上加速度に対して、タワー構造体に生じる応力は風荷重時の応力に比べ40~50%程度であり、200 galの加速度に対してもタワー構造体は弾性範囲にとどまり、変形量も特に問題とされるほどにはならなかった。日本の超高層ビル構造のように弾塑性状態を考慮した設計でなく、強度設計を行うことが可能であり、地震に対しては十分安全であると判断した。

4. 構造設計

4.1 設計条件

- (1) 風荷重; 45 m/s (設計基準風速, ただし3秒間瞬間最大風速)
- (2) 地震荷重; 中国耐震荷重基準烈度8 (地上加速度200 gal相当)
- (3) 冰雪荷重; 着氷厚5 mm
- (4) タワーの変形制限; 通信機能上からゲインタワー頂部の最大変形角は $\delta/h = \tan 0.5^\circ$
- (5) 地耐力; 200 tf/m²

4.2 解析モデル

システムトラスによる塔本体、コアシャフト、ゲインタワーからなるタワー構造体全体についての立体解析モデルを構築した。節点数1270、部材数2910のモデルに対し、風荷重、鉛直荷重を、節点荷重と部材間荷重として作用させた。

タワー構造体の下部の一般施設部分は、鉄筋コンクリート造で設計した。この部分の実施設計は中国航天部(航空宇宙局)の施設課が担当したので、タワー構造体の直下部分の設計は、柱脚部の応力解析結果に基づき中国の設計基準によって設計した。

4.3 設計応力

設計応力は、日本で行っている設計の考え方をうけ、以下の組み合わせ応力を設定した。

- G: 固定荷重
P: 積載荷重
W: 風荷重
S: 冰雪荷重

- (1) $G+P$
- (2) $G+W$

(3) $G+P+W$

(4) $G+0.5S+0.7P+0.25W$

(1)は長期、その他は短期荷重と考える。(4)に示したすべての荷重が同時に作用する組み合わせにおける荷重係数は次のように考えて決めた。

- (i) 短期荷重に対して、冰雪荷重を50%に低減する。
- (ii) 積載荷重が等分布に広い領域に分布する場合は、70%に低減する。
- (iii) 風荷重は、他の荷重と組み合わせる場合、再現期間を毎年のものと考え、25%に低減する。

発生最大軸力は(2)の場合に生じ、縦弦材で300 tf、斜材で45 tfであった。この場合のベースシアは315 tf、転倒モーメントは24 000 tfmであった。

4.4 部材設計

部材の設計は、日本建築学会の諸規準^{3),4)}および建築基準法、同施行令、日本建築センターの指針⁵⁾に書かれている方法を用いて行った。ただし、鋼材の風荷重時の許容応力度は、中国大連市に対して設定した風荷重の危険確率が大きいと、先にも述べたように短期許容応力度を長期許容応力度の1.25倍とした。塔本体部分のパイプ部材、ノードおよびボルトは、システムトラス部品(図-4)の中から定められた設計手順に基づいて選定した⁶⁾。システムトラスの最大部品は、ノード: U490 (外径490 mm)、パイプ: 406.4 ϕ × 19, ボルト: M95であった。

コアシャフトは、非常にスレンダー(直径と高さの比=1:13)である。6層(15 m)おきに自転車のスポーク状のパイプの引張材で塔本体であるシステムトラスに緊結することにより、コアシャフトにかかる風圧力はすべて外周のシステムトラスに負担させるようにした。なお、コアシャフトの骨組みは、通常のパイプと形鋼によって構成し、高力ボルト接合によった。

ゲインタワーは全長約65 mで、3段で構成され、そ

図-4 システムトラス部品

れぞれ下から、27 m, 17 m, 21 m の長さである。それぞれ正方形の組立材断面で、使用部材はパイプと形鋼によった。

また、防錆に関してはシステムトラス、コアシャフト、ゲインタワーは、550 kg/m²の亜鉛メッキがなされ、耐久性に対して万全を期している。

タワー鉄骨重量は、システムトラスが約 500 ton、コアシャフトとゲインタワーの鉄骨が約 500 ton であり、計 1 000 ton であった。なおシステムトラス部品として、パイプは 114.3 ϕ × 3.5 ~ 406.4 ϕ × 19 (STK 400)、ボルトは M27 ~ M95 (F 9 T 相当)、ノード径は 230 mm ~ 490 mm (SM 490 A 相当) を使用した。

4.5 パイプ部材の自励振動

細長い部材に風があたると、カルマン渦が発生し、風と直交方向に交番の力を受け振動が励起される。

このタワーのシステムトラスの水平材は、風や地震に対してあまり力を受けないので、経済性を考えて形状を保つのに足りる程度の細長い部材 (パイプは 114.3 ϕ × 3.5 ~ 139.8 ϕ × 6.0、ボルトは M27 ~ M33) を使用している。このために、水平材の固有振動数は 7.4 Hz ~ 7.9 Hz であり、15 m/s 程度の風速で自励振動によって高域の両振幅交番応力が発生し、部材あるいはボルトが疲労破壊するおそれがある⁷⁾。この対策として、部材をワイヤー等で固定する、部材の剛性を上げる、各種フィンをパイプ表面につけて気流を乱す、あるいはパイプにモルタル等を充填して減衰性を向上させるなどの方法が考えられる。このタワーでは、美観上の問題もあり、モルタルを充填する方法を採用した。パイプにモルタルを充填すると、質量が増加して、負の空力減衰が減少し、渦励振による不安定現象を回避させることができる。

4.6 柱脚部の設計

垂直材、斜材からのすべての応力は、柱脚部の 12 個のノードに集まる。これらのノードは、数枚のリブプレートを紹介してベースプレートに溶接接合されている。水平力に対して、タワーは巨視的には片持ち梁であり、このタワーのすべての安全性はこの 12 カ所の柱脚部で受け持つことになる。タワーの倒壊に対する危険回避のために、柱脚部の設計にあたって、いわゆるフェイルセーフの考え方を持ち込んだ。すなわち、溶接、アンカーボルト部分のディテールとしての信頼性、材料安全率による安全の確保のほかに、太径ボルトを用い、システムトラスのノードとベースプレートを直接に接合した。このことにより、溶接接合がたとえ破壊しても、溶接接合と同等以上の耐力を有する太径ボルト接合により、ベースプレートとの接合が保たれるという、二重の安全性を与えた。

5. 風洞実験

大連 TV タワーは特殊な形状および構造特性を有することから、耐風設計が重要なポイントとなる。そのための風洞実験を行った。

5.1 実験目的

タワーの設計用風荷重を得るために次の 2 種類の風洞実験を行った。

(1) Pressure Model による静的風圧力の測定

(2) Base Balance Model によるベースモーメントの測定

またタワー周辺の地形を再現し、山頂の風速加速効果についても検討を行った。

5.2 実験用模型

実験用模型 (写真-2) の縮尺は 1/300 とし、速度の縮尺は 1/2 とした。システムトラスの変形モードを直線と仮定することにより、模型は、Base Pivot を持つ剛な模型とし、剛性および慣性モーメントを調節した (図-5)。模型のベースでの回転剛性は 7.94×10^2 Nm/rad であり、これを実際のタワーに換算すると、 8.58×10^{10} Nm/rad となる。これは、実際のタワーにおける設計外力によるタワーの転倒モーメントとタワー頂部の変形角との比から求めた値 8.12×10^{10} Nm/rad に近い値となっている。コアシャフトと展望階は、軽量アクリル成型板とし、コアシャフトは 6 角形を再現し、はく離および風圧力を評価できるようにした。システムトラスは、スチー

写真-2 風洞実験

図—5 実験用モデル

ルワイヤーでモデル化し、空隙率を実際のトラスと合わせ、ゲインタワーは3本のアルミ管でモデル化し、剛性を一致させた。またこの管に円形の成形板を取付け、空力弾性応答を合わせた。丘陵による局所的な風速の上昇を実験に反映させるため、円形で対称形の丘のモデルを用いた。

5.3 実験方法

1) 鉛直方向の平均風速および乱れの強さ

鉛直方向の平均風速および乱れの強さは“Open Country”および“Suburban Exposure”の2種類の地表面粗度で熱線風測計により測定した。測定は丘陵の前方（ベース部の幅の2倍）と上部で行った。丘の動的な粗度を調節するために、丘の表面に砂をまいた。

2) 静的風圧力の測定

図—6 鉛直方向乱れの強さおよび平均風速分布

速度圧の測定は、丘陵の影響を考慮し、2種類の地表面粗度で行った。速度圧は、 0° から 180° を 15° ピッチでそれぞれ 150 分間ずつ測定した。

3) 動的試験

動的試験は、Base Balance Model により、2種類の地表面粗度で、平均傾度風速 $0 \sim 47$ m/s の範囲で 20 の異なる速度で、最大、最小、平均および RMS ベースモーメントの測定を行った。またアンテナ部の速度圧およびタワー部のベースモーメントについて $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で 45° ピッチで測定を行った。

5.4 実験結果

1) 鉛直方向の平均風速および乱れの強さ

Open Country Exposure での丘陵の前方および丘の上での鉛直方向の平均風速および乱れの強さの分布を図—6 に示す。平均風速は丘の上で、かなり上昇し、高さ 50 m でこの上昇は 30 % に達する。丘の上での勾配の急激な変化により、地表面より 10 m までにはく離現象が見られる。図—6 でこの範囲に高い乱れの強さがでていることわかる。10 m 以上では乱れの強さは、高さ方向にはほぼ一定で約 7 % であった。

2) 風力係数

コアシャフト部分の抗力係数は、高さ方向にはほぼ一定の 0.60 であり、展望階では 1.05 であった。

図-7 設計用風荷重

3) ベースモーメント

風速 47 m/s での平均ベースモーメントは 110 MNm であり、最大動的ピークモーメントは 50 MNm であった。この値は風の方向によってはあまり変化しなかった。

4) 丘陵の影響で速度圧は、上昇したが、動的倍率は適度な値であり、全体のガストファクターは 1.45 であった。この理由として有効な空力弾性減衰の効果が考えられる。この低いガストファクターは、平均風速の上昇により風の乱れの上昇が伴わないことによる。

5) タワー下部の速度圧の測定により、タワー下部の風圧力は、システムドラスとコアシャフトでほぼ等しいことがわかった。

6) 渦励振による横方向の励起は見られなかった。

7) 静的および動的風洞実験より大連タワーの設計用風荷重を図-7 のように設定した。

6. 安定解析

部材の設計は弾性解析で行ったが、ここでは、有限変形を考慮した弾塑性解析⁸⁾により、本構造の安定性を検討した。

6.1 解析方法

1) 解析モデル

解析モデルはシステムドラス部分の架構を対象にモデル化した。図-8 に解析モデルの立面図を示す。

2) 荷重

固定荷重は全節点に割り振り、風荷重は図-7 に示す分布におおむね従い、外周部の節点に載荷した。

載荷方法としては、固定荷重を与えた後、風荷重はその分布形状を保つようにしつつ、次第に増加していった。

3) 解析に用いた部材の軸力-軸変形関係

部材の軸力-軸変形関係は、引張側ではパイリニアとし、圧縮側では、有限変位理論を用いて行った部材の弾

図-8 解析モデル

図-9 軸力-軸変形関係

塑性解析より求めた座屈曲線をもとに、区分線形化した関数を用いて近似的に表した。

細長比; $\lambda = 60, 90, 120, 150$ の部材についての軸力-軸変形関係を図-9 に示す。

4) 解析手順

部材の軸力と軸変形の関係に引張降伏と圧縮による座屈現象を考慮したモデルを用い、節点の座標を各ステップごとに移動させる有限変位理論に基づいた。

6.2 解析結果

1) 外力-変位関係

解析結果として、頂部の風荷重方向の外力-変位関係を図-10 に示す。

2) 解析結果の概要

図—10 外力—変位関係

図—11 変形図

(1) 設計荷重レベルでは、当然のことではあるが、全体は弾性状態にある。この状態は、鉛直荷重を載荷した上に、設計用風荷重の約1.6倍まで続く。

(2) 設計用風荷重の約1.7倍を超えところから圧縮材の座屈が始まり、その後引張材も降伏するが、全体の荷重変位関係は低下することなく上昇を続ける。最頂部の変位が1mに達するところまで解析を行ったが(図—11)、その時の水平力は設計用風荷重の2.24倍となっている。

(3) 本構造は部材数が非常に多く、円筒形状であるため、各部材の座屈現象は同時には発生しない。そのため座屈した部材の耐力低下を他の部材が補うことができるため、ここで行った解析の範囲では、全体の荷重-変位関係には下り勾配は生じない。

(4) 外面トラスと内面トラスの間隔が小さいため、円筒形の断面が不安定になるという心配があったが、ここで行った解析によると、個材座屈および降伏現象が先行し、全体的な不安定現象は起きなかった。最終的な状態では円筒形断面が、やや楕円状に変形しているが24mの元の直径に対して直径の変化量は6.5cmと非常に小さい。

7. 材料と強度

7.1 システムトラス部品

1) 材料と許容応力度の考え方

1-1) 材料;

部品の材質を表—1に示す。

1-2) 許容応力度;

許容応力度の基本的な考え方は、日本建築学会の鋼構造設計基準に基づいているが、前述したように、ここで設定した風荷重の危険確率が大きいことを考慮して、短期の許容応力度を長期許容応力度の1.25倍とした。

2) 接合部の設計方針

2-1) 強度のバランス、

ここで用いているシステムトラスの接合^{1),6)}では、接合部の強度をパイプ部材の引張強度や圧縮強度より大きくすることを基本にしている。システムトラス接合部の各部品(ボルト、ノード、エンドコーン)のサイズ体系は、ISOとJIS規格にならったボルトのサイズ体系を基準としている。ノードの許容応力は、各パイプからの軸力の組み合わせによるノードの許容応力の低下を考慮し、各サイズに許容される最大のボルトサイズの約1.6倍である。この最大対応ボルトの破断が生じる前にねじ抜けを生じさせないように、ねじの必要かみあい長さを一般の高力ボルトのナット高さに比べて大きくしている。またエンドコーンの許容応力は、圧縮応力時も考慮し、各サイズに許容される最大のボルトサイズの1.2倍としている。さらに、ボルトの破断が生じる前に、エンドコーンの破壊が生じないようにしている。

2-2) 疲労

接合部の実大実験により、システムトラス接合部の疲労強度は、ボルトの疲労強度に等しいことが分かっている⁹⁾。ボルトの有効断面積に対するS-N線は次式のよう表せる。

$$\log S = -0.300 \log N + 2.58$$

表—1 部品の材質

部 品 名 称	該 当 規 格	仕 様
ノード	JIS G 3106	SM490A 相当
エンドコーン	JIS G 3106	SM490A 相当
パイプ	JIS G 3444	STK400
ボルト	JIS B 1186	F9T 相当 特殊形状ボルト

ここで、 S の単位は kgf/mm^2 、 N は繰返し回数である。この式により、疲労限を 2×10^6 回の繰返しに耐え得る最大応力度振幅と考え、 4.9 kgf/mm^2 とした。繰返し応力度がこの疲労限を超えるボルトに対しては、サイズを大きくした。

7.2 太径ボルト

タワー部分のシステムトラス部材に発生する軸力の最大値は、引張で 300 tf を超えるため、ボルトの最大サイズとして、軸径 95 mm の太径ボルトを使用した。このように極端に大きなサイズのボルトは一般には製造されておらず、日本工業規格 (JIS) においても、JIS B 1180 六角ボルトの機械的性質の強度区分 10.9、12.9 で、ねじの呼び径として、最大 80 mm までの規定にとどまっている。

高軸力が生じるシステムトラスに適用可能な、太径で、かつ高強度であるボルトの製造に際しては、焼入れ、焼戻しの熱処理上の問題を解決しなければならない。このため、太径ボルトの仕様を決定するために、M95 ボルトおよび M200 ボルトによる製造実験を行った¹⁰⁾。

1) 太径ボルトの仕様

ボルトの仕様を表-2 のように定めた。ここで機械的性質を、JIS B 1186 高力六角ボルトの等級 F8T と F10T の中間の F9T 相当としているのは、システムトラスのボルトに必要な強度と靱性の両者のバランスを考慮したためである。

2) 太径ボルトの試験項目

熱処理の成否の確認のため、各種の試験を行った。

試験項目は (1) 機械的性質試験、(2) ねじ部脱炭

表-2 太径ボルトの仕様

呼び径 : D	80mm以上	
ねじ種別等級	メートル細目ねじ、ピッチ 6mm 6g (2級)	
ボルト成形	頭部：熱間鍛造	
ねじ成形	機械切削	
機械的性質 (規格値)	F9T 相当	
	引張強さ	$90 \sim 110 \text{ kg} \cdot \text{f/mm}^2$ (1/4D部)
	降伏点	$75 \text{ kg} \cdot \text{f/mm}^2$ 以上 (1/4D部)
	伸び	15%以上 (1/4D部)
	絞り	43%以上 (1/4D部)
	衝撃値	$8 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{m/cnf}$ (室温) (1/4D部)
	硬さ	HRC 23~35
材 質	JIS G4103 SNCM630 (旧記号SNCM5)	

および浸炭試験、(3) 表面欠陥試験とした。このうち、ボルト断面に対する材質の一樣性の確認は、機械的性質試験の中、断面硬さ分布、降伏点および引張強さを調べるにより行い、加熱時間の増加によるねじ表面の脱炭はマイクロピッカース硬さ試験、および顕微鏡組織試験により調べた。また焼戻し脆化は機械的性質試験の中、シャルピー衝撃試験により調べた。

3) ボルトの試験結果

表-3 にボルト材料 JIS G 4103 ニッケルクロムモリブデン鋼 SNCM 630 の化学成分および機械的性質の結果を示す。表-4 に M200 ボルトの機械的性質試験の結果を示す。これらの結果は、すべて仕様で定めた規格値を満足している。

図-12 と図-13 に M200 ボルト内部の硬さ試験の結果を示す。これらの図より、仕様で定めた規格値を満足しているとともに、安定した硬さ分布であることが分かる。また表面近傍の硬さ試験の結果より、浸炭は生じておらず、脱炭試験の結果より、脱炭層はほとんど 0 mm

表-4 機械的性質試験の結果

試験片	No.	降 伏 点 $\text{kg} \cdot \text{f/cnf}$	引 張 強 さ $\text{kg} \cdot \text{f/cnf}$	伸 び %	絞 り %	硬 さ HRC
規 格 値		≥ 75	$90 \sim 110$	≥ 15	≥ 43	23~35
1/8D部	1	83.9	92.6	22.0	57.4	27.2
	2	85.8	91.9	23.4	58.4	27.8
1/4D部	1	88.4	92.8	22.8	58.6	27.8
	2	92.8	93.3	22.5	57.4	28.3
3/8D部	1	88.7	94.6	23.6	65.0	27.7
	2	88.2	95.1	24.2	63.3	27.9

衝撃値 (2Vシャルピー) 試験温度 室温 約 20°C

試験片採取位置 1/4D部 3本

試験データ ① $16.4 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{m/cnf}$
② $17.1 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{m/cnf}$
③ $16.4 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{m/cnf}$ } 平均値 $16.5 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{m/cnf}$

図-12 内部硬さ試験の結果 (1)

表-3 SNCM 630 の化学成分

項 目	化 学 成 分 (%)										機 械 的 性 質							
	C (×100)	Si (×100)	Mn (×100)	P (×1000)	S (×1000)	Cu (×100)	Ni (×100)	Cr (×100)	Mo (×100)		焼 入 ℃	焼もどし ℃	降 伏 点 $\text{kg} \cdot \text{f/cnf}$	引張強さ $\text{kg} \cdot \text{f/cnf}$	伸 び %	絞 り %	衝撃値 $\text{kg} \cdot \text{f/cnf}$	硬さ H _a
規 格	25~35	15~35	35~60	Max 30	Max 30	Max 30	250~350	250~350	50~70		850~950	550~650	Min 90	Min 110	Min 5	Min 45	Min 8	302~352
結 果	28	25	47	17	10	7	276	301	54		870	570	103	119	19	63	14	352

図一13 内部硬さ試験の結果(2)

であることが分かった。

8. 施工技術

施工に当たって、屋根構造として多く用いるシステムトラスをタワー構造物に対して適用することが課題であった。そのため、ねじれ、傾き等に関する精度の確保およびボルトの締付に関する品質管理を検討した。

8.1 施工計画

1) 建方計画

建方の基本サイクルを下記のように定め、建方を行った。

- (1) コアシャフト鉄骨をシステムトラスより2節(20 m)先行して建て、揚重機を上方へ盛り替えシステムトラスを建てる。
- (2) システムトラスは縦材1本と斜材2本の計3本を地組みしたものを建込み単位とする。
- (3) 1段12組を建て込み後水平材を取り付ける。
- (4) ボルトの締込みは建込みシステムトラスの2段下より後追する。

2) 揚重機計画

揚重機はコアシャフト鉄骨に添って3基配置し、各々平面角120°の範囲を分担する。各揚重設備は、支柱、ブームおよびブーム等の盛り替え用リフターにより構成される。3基の支柱は15 mごとに相互に連結され、またコアシャフト鉄骨にもステーがとられ、揚重時の曲げに耐えられる構造となっている。各揚重機には3台の電動ウィンチと2台の手巻ウィンチが地上面に配置されブームの上げ下げ、荷巻、揚重機盛り替えを行う。

8.2 品質管理

システムトラスを本タワーのように、平面的に閉じており高さ方面にしか逃げのとれない構造物に用いた場合、部材精度や建方順序が建方精度に与える影響は全く

未知であった。

1) 管理項目、管理目標値

完成体の精度確保のため、建方途中におけるシステムトラスに対する管理項目、管理目標値を次のように定めた。

- (1) 円周方向のねじれおよび各段ごとの折れ曲がり：各段ごと 24/20 000 かつ全体 24/99 000

この目標値は、ノード中心部にあけた穴径が24 mmであったため、この穴径を基準にして、ずれを測定することが実用的であったためである。

- (2) 同一段のノードとノード間の相対レベル差：4 mm 以内

2) 管理サイクル

システムトラスの各精度はボルトをスナグタイトで締め込んだ状態で確認する必要がある。図一14に示すようにb段を建方する場合にはa段のボルトを緩める場合があるため、構造体の倒れ、ねじれ、レベルを正確に確認できるのはc段の建方時となり、a段にて生じた目標値を超える誤差の調整はc段またはd段で行うことになる。よって3段を一単位とした管理・調整サイクルを採用した。

3) 建方精度の調整

すべての建方誤差は節点間距離の誤差によって生じる¹⁾。したがって節点間長さの調整により補正することとし、具体的方法として、各縦材および斜材のワッシャに対応したシムプレートを準備しプラス方向への調整ができるようにした。また3段ごとにマイナス調整ができるよう、標準ワッシャより薄手のワッシャを準備した。

4) 建方精度

管理サイクル

筒体レベル

図一14 管理サイクル

図一15 高さレベル

写真—3 建設中のタワー (1)

写真—4 建設中のタワー (2)

倒れ、ねじれについては各段ごとに管理目標値を大きく下回り、非常に精度よく、水平材の建て込み、次段のシステムトラスのボルト取りに支障をきたすことはほとんどなかった。ただし、図—15に示す L-18以上のコアシャフト鉄骨と取合いのある段では、倒れ補正を優先した結果、取合い側の抱束もあり水平材を中心にノード～エンドコーン間に肌隙が生じる確率が増した。なお、倒れ調整、肌隙調整のためにシムプレートを挿入したのは計61ヵ所であったが、これは全体ジョイント数の1.2%と非常に小さな割合である。またコアシャフト鉄骨とのレベル差については(3段15mごとに測定)L-15で最大20mm生じたため、L16～L17の2段にわたり薄手ワッシャにてレベル調整を行った。また完成後のシステムトラス軒部(BL+99m)での倒れは、互いに直

交する4点で各々20, 10, 10, 10mmであった。

5) 工 程

システムトラス、コアシャフト鉄骨およびゲインタワーの建方は、'87.10.15～'88.8.12(内'88.1.7～4.10冬期中断)の209日間であった。うち気象条件による作業不能日を除く実作業日数は161日(77%)、システムトラス建方に要した日数は66.5日(3班作業)であった。写真—3と4は建設中のものである。

8.3 ボルトの締付け管理

システムトラスのボルト締付け管理は、締付け完了時において、ノード～ワッシャ間、エンドコーン～ワッシャ間およびボルト頭部～エンドコーン内面間に肌隙を生じないこと(スナグタイトの状態)を管理規準としている。ボルト肌隙をなくすまで締め、軸力導入は行わなかった。なお、肌隙のチェックはノード～ワッシャ間、エンドコーン～ワッシャ間は目視にて、またボルト頭部～エンドコーン内面間は、エンドコーンに設けられた検査孔より、光学内視鏡にて全数検査を行った。

9. 結 び

定形化された構造設計から脱皮した一つの海外プロジェクトを例に、設計・製作・施工の一連の行為、および、その中で行った技術開発について報告した。

本報告で論述した主な項目は次のとおりである。

1) システムトラスのタワーへの適用

屋根構造として多く用いるシステムトラスを、本格的なタワーに対して適用した。この適用にあたり、設計・加工・施工上の課題として、以下の重点項目の検討を行った。

2) 荷重および許容応力度の設定

荷重に対して不確定要因が残る中国・大連市におけるタワーの設計に必要な荷重の組合せや許容応力度を定めた。

3) 部材設計上の特殊課題の解決

外部むき出しのシステムトラスに対する防錆、および、外部むき出しパイプ部材に対する自励振動を検討し、また、柱脚の設計にはフェールセーフの考えを持ち込んだ。

4) 風洞実験の実施

風洞実験により、丘陵の影響を考慮したタワーの設計用風荷重を決めた。

5) 構造材の安定性の確認

有限変形を考慮した弾塑性解析により、圧縮材の座屈や引張材の降伏を踏まえた、タワーの最終的な状態を確認した。

6) 加工上の検討

JISに規定のないサイズの太径ボルトの仕様を、製造実験に基づき、定めた。

7) 施工上の検討

システムトラスをタワーに適用する施工法の一つを確立した。

謝 辞

大連 TV タワーの意匠設計は、株式会社日建設計の松本晃吉氏と亀井忠夫氏によってなされました。また新日本製鐵株式會社の矢崎光彦氏と黒川輝哉氏には、施工技術の研究をして頂きました。このプロジェクトにかかわった人々は、営業のスタッフ、商社としての三井物産、施主としての大連テレビ局、工事に関係した中国の人々等、100 名を超えます。そのすべての方々に深く感謝致します。

風洞実験を指導して頂いたカナダのウエスタン・オンタリオ大学の風工学研究所教授・A. G. Davenport 博士、および太径ボルトの仕様決定に際して、貴重な御助言を頂いた大阪大学教授・脇山広三博士に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 川合広樹, 岩田 衛, 白井貴志: システムトラス構法計画成立に関する論証, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 390 号, pp. 51~59, 1988 年 8 月

- 2) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1981 年 11 月
- 3) 日本建築学会: 鋼構造設計規準, 1970 年 5 月
- 4) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説, 1990 年 2 月
- 5) 日本建築センター: 構造計算指針・同解説, 1988 年 5 月
- 6) 岩田 衛, 和田 章, 大場高秋, 白井貴志: 部品構成された鋼管立体トラスの接合部の回転性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 391 号, pp. 45~58, 1988 年 9 月
- 7) 大熊武司: 強風による鋼構造物骨組の累積疲労損傷, 配管技術, 日本工業出版, 1989 年 5 月
- 8) 和田 章, 久保田英之: 部材の座屈および破断を考慮したトラス構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 396 号, pp. 109~117, 1989 年 2 月
- 9) 岩田 衛, 和田 章, 白井貴志: 太径ボルトを用いたシステムトラスの疲労実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 422 号, pp. 123~134, 1991 年 4 月
- 10) 脇山広三, 宇留野清, 岩田 衛, 川合廣樹, 白井貴志: 高強度太径ボルト M200 の製造に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp. 927~928, 1988 年 10 月

(1991 年 9 月 10 日原稿受理, 1992 年 2 月 6 日採用決定)