

宇奈月町「平和の像」の構造設計

Structural Design of the "Statue of Peace" at Unazuki Town, Toyama Prefecture

川 井 忠 彦*・椎 名 章 二*・畝 尾 明 利**

Tadahiko KAWAI, Syozi SHIINA, and Akitoshi UNEO

黒部峡谷の入口にある町の高台（標高 565.8 m）に、巨大なブロンズ記念像（高さ 12.7 m 自重約 30 t）が昨秋建立された。付近は名にし負う豪雪地帯であり、厳しい自然環境下における柔かい銅合金の巨大中空像の建設は過去にその例がなく、多くの構造工学上の問題を提起した。なかんずく、その安全性の高い像の内部支持構造の設計が最重点課題であったが、川井研究室で3年前に開発した骨組構造の極限解析用プログラム“FRAME-1”を使用しこの問題を解決した。ここに、その建立に至る経緯の概要を報告する。

1. は じ め に

宇奈月町「平和の像」は、昭和 57 年 10 月富山県宇奈月町大原台に、同町の記念事業の一環として建立されたものである。

宇奈月町は、古くから黒部川電源開発の拠点として知られ、像の建てられた付近は標高 565.8 m で冬は積雪 4 m にも及ぶ厳しい環境に囲まれた地域である。

像の規模は、高さ 12.7 m、重さ約 30 t（像自重約 20 t、内部の骨組重量約 10 t）のブロンズ製铸造像で、高さ約 9 m の台座の上に建てられている。

ブロンズ像は、製作者の故佐々木大樹氏と親交のあった高岡市の铸造所で铸造され、その建設工事は地元の本拠のある佐藤工業が引き受け、同社森末土木部長代理がプロジェクト全体の総まとめを担当した。またブロンズ

像の製作にあたっては、原寸大石膏像の完成直前、89 才で病没された大樹氏に代わり五男佐々木日出男氏が仕事を受け継がれ、同氏の指示に従い製作された。製作にあたっては、原寸大の石膏像を図-1 に示す 25 のブロックに分け、それをさらに 58 の小片に切断して铸造された。像の厚みは部分によってかなりの差があるが、全体を軽量化するため、5~15 mm 程度の薄肉に吹かれている。ブロンズの成分は、Cu 84.3, Zn 11.6, Sn 2.47, Pb 1.6 である。

像の形状は写真-1 に示すように、前かがみで右腕をほぼ前方水平に伸ばした、これまでに建てられた銅像には見られない姿勢をしている。

本記念像は柔かい銅合金で出来ており、しかも複雑な形状と姿勢の巨大中空像であるため、通常のブロンズ像のように外殻だけで自立させたり、簡単な支柱によって像を支持することが困難であることなどから、像内部に特殊な架構を組み、その骨組によって像全体を支持すべきであるという結論となった。この小論はその内部支持骨組の構造設計および検証実験結果について報告するものである。

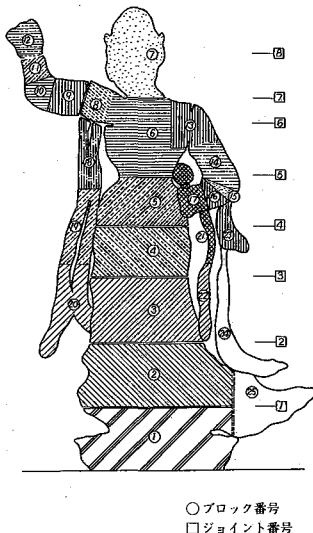


図-1 像铸造ブロック図

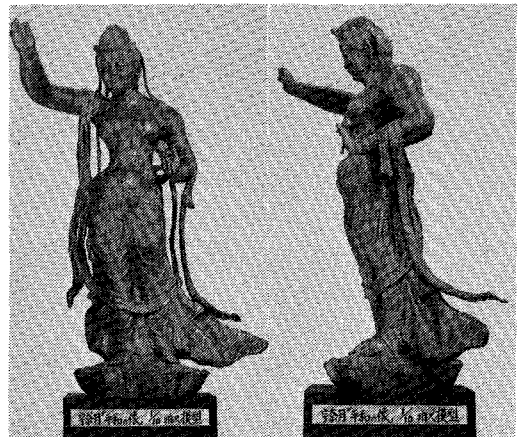


写真-1 宇奈月町「平和の像」正面・側面

* 東京大学生産技術研究所 第2部

** 佐藤工業株式会社

2. 内部骨組構造計画概要

内部骨組構造の設計は、昭和 56 年 8 月初旬に開かれた第 1 回のプロジェクト全体会議の結論に従い、畝尾が 1/10 のプラスチック像模型の内部補強方法を試行錯誤的に研究していった。以下にその研究の経緯と概要について述べる。

(1) H 形鋼による支持方法の検討

当初の計画では、像の支持を従来から行われている像内部に鉛直に H 形鋼を立て、必要に応じて継ぎ材を設け像全体を支持する方法が考えられた。しかし、この方法では

- ① 内部形状が複雑で、足元から頭頂部まで鉛直に H 形鋼が貫通できない。
- ② 前方へ伸ばした片持梁状の右腕の支持が不可能である。
- ③ 本体のブロンズは鋳造精度が不足、かつ薄肉のためブロンズ外殻に強度が期待できない。

などの点が挙げられ、単柱による支持では十分な強度は望めないという結論になった。

そこで、次に数本の支柱を像の形状に合わせて組み、支持する方法が検討された。

(2) 立体トラスによる支持方法の検討

骨組はまず支柱の数を、像内部での作業性や形状の複雑さを考慮して 4 本支柱とし、これを像の形状に合わせて組み立てた蛇行形の立体トラス骨組が考えられた。

この骨組をもとに準備計算をした結果、十分な支持強度を得ることが可能になった。

各部材の接合については、形状が複雑でトラス構成部材の軸方向がすべて異なるため、接合方向が比較的自由に取りやすいボールジョイントと鋼管による方法が取られた。

しかし、構造計算を進めるにしたがって

- ① 強度を得るために、鋼管径が大きくなる。
- ② 部材間の交角が小さくなる。
- ③ ①、②によって、ボールジョイントの球径が大きくなり、構造材の重量が大きくなり過ぎる。
- ④ 特殊な工法によるコスト高、および施行の困難さが避けられない。

などの新たな問題点が生じてきた。

架構の基本案をもとに、鋼管材の接合法や骨組と像本体との接合・支持法などの細部についてさらに検討が加えられ、最終的に次のような内部骨組構造を考えること

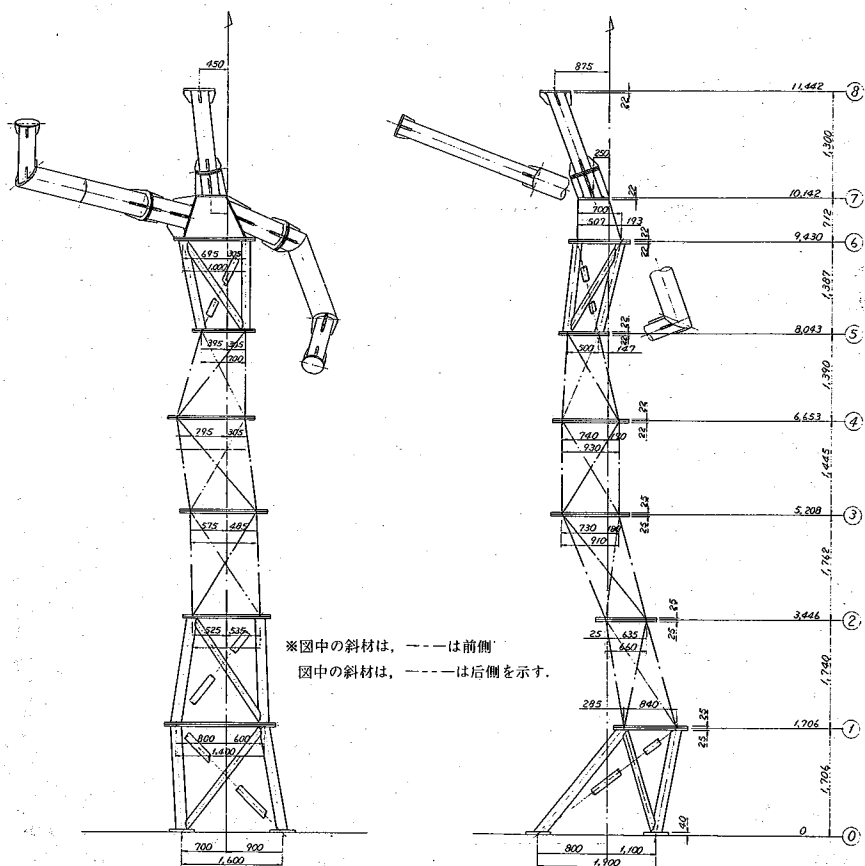


図-2 内部骨組構造

になった。

(3) 剛節骨組構造による支持方法の検討

内部骨組構造案を図-2に示す。

この計画案では、図-1に示した像本体の各ブロックの接合面に合わせて鋼管接合のプレートとを設け、これに4本の支柱を溶接する（通常、鋼管継手に用いられるフランジを大きくし、このフランジ部分より像内部の形状に合わせて支柱の方向を変化させてゆく）。

また、両腕については、像の断面径が1 m以下と小さいため、鋼管径を大きくして単材とした。

腕部と像本体の骨組の接合部は、鋼管どうしの接合では十分な強度が得にくいので、胸部（第7ブロック）をボックス状とし、これと腕骨組を溶接で接合した。

像本体と内部骨組構造との接合・支持方法についてを図-3に示す。

この骨組構造の場合、支柱と斜材との接合に複雑さは残るものの、あらかじめ工場で各ブロックごとに内部骨組を先組し、これを現地で積み重ね、各フランジをボルト接合するという比較的現場作業のしやすい構造となった。

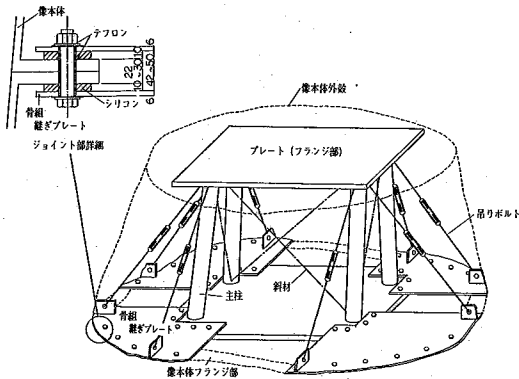


図-3 内部骨組構造詳細図

以下、図-2に示したこの計画案をもとに、本体の構造解析を行い、その耐力についての検討を行った。

3. 本 体 解 析

(1) 解析概要

1) 内部骨組構造の耐力計算

像本体を支持する内部骨組構造の設計は、川井研究室において3年前に開発した骨組構造極限解析用プログラム“FRAME-1”を用いて行われた。このプログラムの理論的基礎、プログラムの仕様については、本誌に掲載されている速報“骨組構造離散化極限解析用プログラム“FRAME-1”の概要”を参照されたい。

2) 材 料 特 性

本体解析にあたって、内部骨組に用いた構造部材の材料特性を表-1に、各部材の使用箇所を図-4に示す。

なお、各プレート部（フランジ部）は解析の都合上、同部材と同等性能の鋼管部材に置換して考える。

3) 荷 重

荷重としては、次の3通りの要素を考慮した。

① 自重（像自重および内部骨組重量）

② 風荷重、地震力（風荷重、地震力のうち大きい方を、長期荷重として考える）

③ 積雪荷重（長期荷重として考える）

自 重

自重は、像本体重量、内部骨組重量、補助部材重量の和とした。

各ブロックごとの重量を表-2に示す。

自重の設定にあたって、第1ブロックはコンクリート充填し拘束されるため、骨組、像本体重量とも下部の台座によって支持されるものとし、本計算においては、第2ブロックから上部について解析を行った。

風 荷 重

風荷重の算定にあたっては、次式を用いた。

表-1 内部骨組部材 材料特性

部 材 種 類	(1) 主柱(1~3層)	(2) 主柱(4~6層)	(3) 斜材(1~6層)	(4) 左 右 腕 部	(5) 頭・首 部 左右腕部先端
材料特性	STK165.2×7.1	STK139.8×6.6	STK101.6×5.7	STK355.6×7.9	STK267.4×6.0
ヤ ン グ 率 E	0.21×10^7	0.21×10^7	0.21×10^7	0.21×10^7	0.21×10^7
ポ ア ソ ン 比 ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
密 度 ρ	0.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}
降 伏 強 度 σ_y	2400	2400	2400	2400	2400
断 面 積 A	35.26	27.62	17.17	86.29	49.27
断面2次モーメント I_{xx}	1100	614	198	13000	4210
〃 I_{yy}	1100	614	198	13000	4210
捩 り 定 数 K	2208	1228	396	26095	8421
塑 性 係 数 Z_{px}	177.6	117.2	52.5	955.2	410.1
〃 Z_{py}	177.6	117.2	52.5	955.2	410.1
〃 Z_{px}	2231.6	1472.7	659.5	12003.9	5152.9
有効せん断係数 α_x	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
〃 α_y	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

$$W = C \cdot q \cdot A$$

W: 風荷重 (kg)

C: 風力係数 1.2

q: 設計用速度圧 $60\sqrt{h}$ (h は、風を受ける面の高さを示す。この値は、最大瞬間風速 62 m/s のものである。)

A: 受風面積 (m²) (受風面積は、受風方向に対しての像本体の見付面積とした。)

受風方向については、図-5 に示すデータをもとに、像の前、後、右、左の方向から受風について考えた。

本報告では、最も厳しい荷重条件となる像後方から風を受けた場合についてのみを記す。

積 雪 荷 重

積雪荷重の算定にあたっては、次式を用いた。

$$S = P \cdot Z_s \cdot E \cdot R \cdot L \cdot A$$

S: 積雪荷重 (kg)

P: 雪の設計用平均単位重量 2.2 (積雪 1 cm 当たり kg/m²)

Z_s: 設計用地上積雪深さ 100 cm

E: 環境係数 1

R: 屋根勾配、形状による係数 1

L: 用途係数 1

A: 積雪面積 (積雪面積は、積雪部分の横断面の見付面積とした。)

積雪箇所は、頭、肩、胸、両腕、天衣とした。

荷 重 支 持

像本体と内部骨組との接合、支持については前述のとおりであるが、各節点への荷重配分は図-6~8 に示したとおりである。

積雪荷重の配分については、積雪が考えられる部位を像本体重量の各ブロックに分け、各ブロックへの増分重量として扱い、支持方法についても像本体の支持と同様とした。

以上により設定して各荷重値を図-9 に示す。

表-2 像ブロック別重量 (kg)

ブロッ	重 量	像本体重量	内部構造重量	その他	小 計
1		1,860			
2		1,880	1,059	136	4,935
3		2,340	1,069	◇	3,545
4		1,920	1,000	◇	3,056
5		1,900	904	◇	2,940
6		1,260	679	◇	2,075
7		1,200	593	◇	1,829
8		1,040	891	◇	2,067
9	頭 部	1,260	110	36	1,406
10	右 腕	900	254	282	1,436
11	左 腕	1,420	244	215	1,879
12	(天衣・左)	1,260			(1,260)
13	(天衣・左)	1,100			(1,100)
14	(天衣・右)	1,000			(1,000)
計		20,340	6,803	1,485	28,628

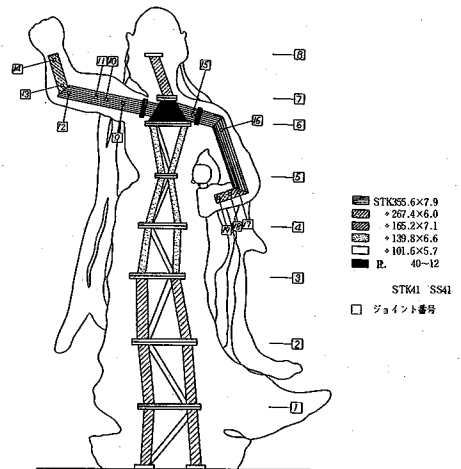


図-4 内部骨組使用部材

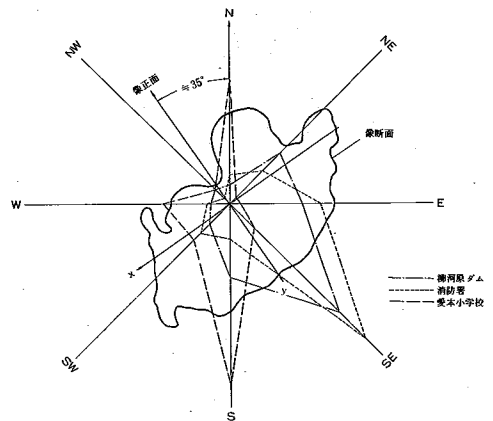


図-5 建立現場の風向分布

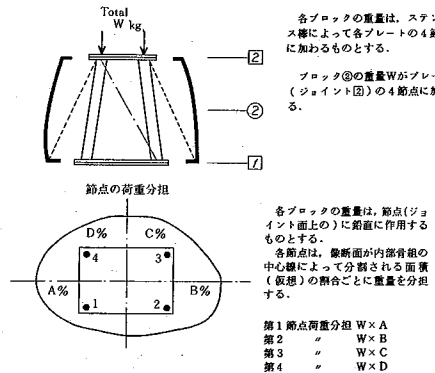


図-6 像本体重量の支持・荷重配分

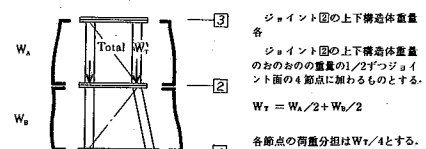


図-7 内部構造の荷重配分

4) 解 析 事 項

解析は、表-3 に示す 8 ケースについて行った。

モデル 8 は、モデル 4 の解析結果をもとに、部材の設計変更を行ったもので、荷重等の変更はない。

解析項目は次のとおりとした。

- ① 塑性ヒンジの発生箇所および発生順序
- ② 各節点の変位量
- ③ 主材および斜材の軸力
- ④ 各節点のモーメント
- ⑤ 柱脚部分の反力

(2) 解 析 結 果

モデル 1～3 の弾性解析によって、内部骨組が設定荷重に対して十分強度を持つことがたしかめられた。

そこで、さらに骨組の最終耐力を知るため、風を変動荷重として、像の四方から風を受けた場合について、モデル 4～7 で解析を行った。

その結果、当初予想したとおり像後方から風を受けた場合が、最も厳しい荷重条件となった。この後方から受風したモデル 4 について細部にわたり検討したところ、第 3 ブロックの左側斜材 (要素番号 47, 48) が、設定風荷重の 1.196 倍で座屈変形を起こす危険性があることがたしかめられた。そこで、この斜材を変更 (STK 101.6×5.7→STK 165.2×7.1) して、再計算したものがモデル 8 である。

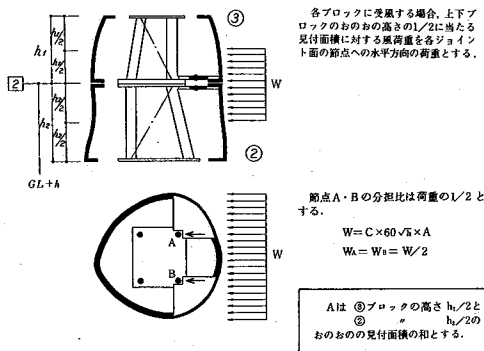


図-8 風荷重の荷重配分

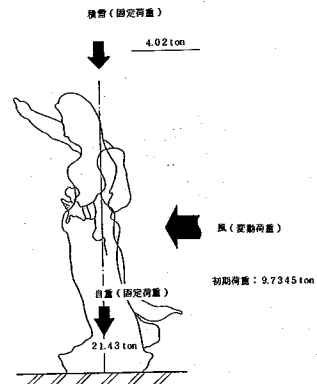


図-9 設定荷重

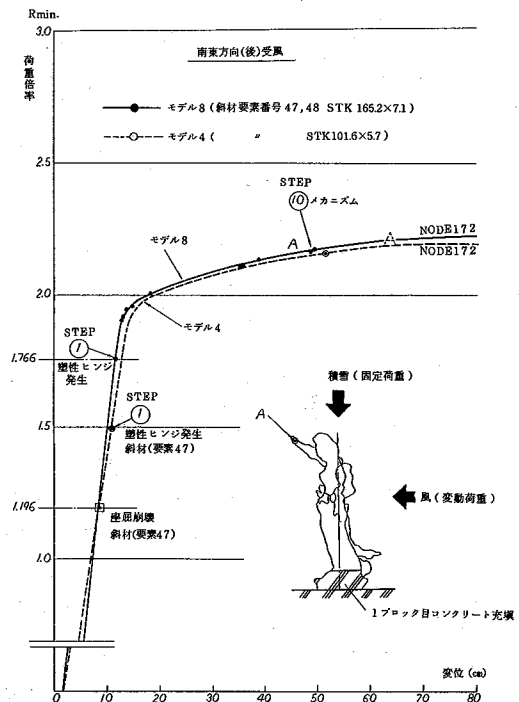


図-10 モデル 4・モデル 8 の変位量-荷重曲線

表-3 解析事項

解析	荷重種類	考 慮 し た 荷 重						
		固 定 荷 重			変 動 荷 重 (風)			
		自重 (像+骨組)	積 雪	風 (後方より受風)	後方より受風	前方より受風	右側面より受風	左側面より受風
弾性解析	モデル 1	○						
	モデル 2	○	○					
	モデル 3	○	○	○				
弾塑性解析	モデル 4	○	○		○			
	モデル 5	○	○			○		
	モデル 6	○	○				○	
	モデル 7	○	○					○
	モデル 8	○	○		○			

モデル4とモデル8の荷重—変位置曲線を図-10に示す。斜材の変更によって、第1塑性ヒンジ発生時の荷重倍率が、1.5から1.766へ増加した。

モデル8に関する解析結果を図-11~14に示す。主材および斜材の軸力分布が、第2ブロックから記されているが、これは自重のところで述べたように、第1ブロックはコンクリートによって拘束され、解析は第2ブロックから行ったためである。

4. モデル実験によるプログラム検証

プログラムおよび本体解析結果の検証を目的として、内部骨組構造模型による、静的荷重実験を行った。

実験にあたり、本体骨組と骨組模型の相似関係を満足させるには多くの問題があり、本体解析値と実験値の直接的検証は不可能と判断した。

このため、あらたに内部骨組模型の静的解析を行い、実験値との比較から、本体解析値と実験値の間接的検証を行った。

(1) 実験方法

実験用の骨組模型は、図-2に示した本体内部骨組構造の約1/8とした。ただし、使用部材は棒鋼とし、腕部についてのみ鋼管とした。

測定項目は、模型背面から水平方向の静的荷重を載荷したときの

- ① 主材および斜材の軸力測定
- ② 胸部変位置測定

とした。

測定位置を図-15に示す。

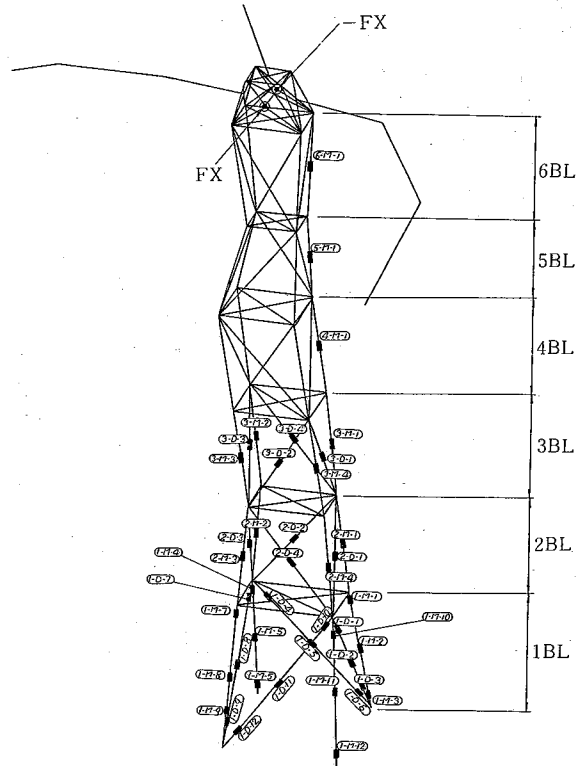
歪ゲージは、測定器の容量や、ゲージ貼付けの難しさ等から、変位や軸力が比較的大きな変化を示すと考えられる。第1~第3ブロックまでの主材、斜材と骨組全体の変位、軸力の流れを知るために、背面左側の主材の計43箇所に取付けた。

変位置測定器の取付け箇所は、胸部前面と右側面の2

箇所とした。

載荷方向は、後方からの風荷重に相当する背面への集中荷重とした。

載荷制御方式は、降伏後の測定精度を確保するため、変位制御方式とした。



部材種別 M—主材
D—斜材

※各測点のゲージは、前後に貼付

図-15 歪測定位置

表-4 模型使用部材 材料特性

材料特性 \ 部材種類	(1) 主 材	(2) 斜 材	(3) 左右腕部先端	(4) 左右腕部
	RB 19 ^o	RB 13 ^o	RB 25 ^o	SGP 25A
ヤ ン グ 率 E	0.21×10^7	0.21×10^7	0.21×10^7	0.21×10^7
ポ ア ソ ン 比 ν	0.3	0.3	0.3	0.3
密 度 ρ	0.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}	0.8×10^{-5}
降 伏 強 度 σ_y	2400	2400	2400	2400
断 面 積 A	2.835	1.327	4.909	3.096
断面2次モーメント I_{zz}	0.6397	0.1402	1.957	3.911
〃 I_{yy}	0.6397	0.1402	1.957	3.911
捩 り 定 数 K	1.279	0.2804	3.835	7.423
塑 性 係 数 Z_{px}	1.143	0.336	2.604	3.047
〃 Z_{py}	1.143	0.336	2.604	3.047
〃 Z_{pz}	1.796	0.575	4.091	4.786
有効せん断係数 α_z	1.0	1.0	1.0	0.85
〃 α_y	1.0	1.0	1.0	0.85

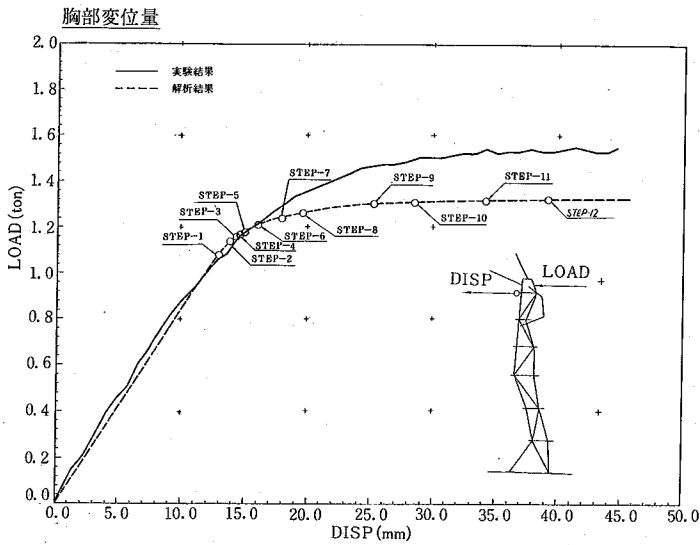


図-16 実験と解析結果との比較 (変位量-荷重曲線)

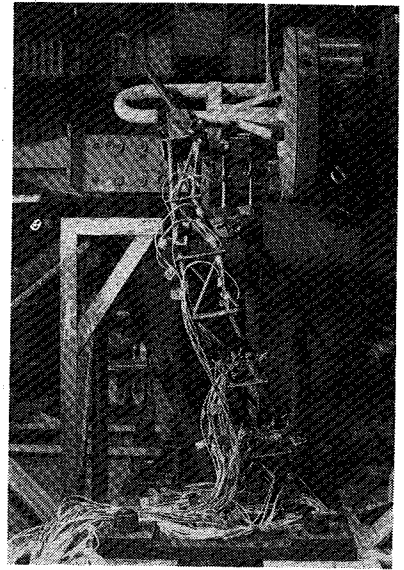
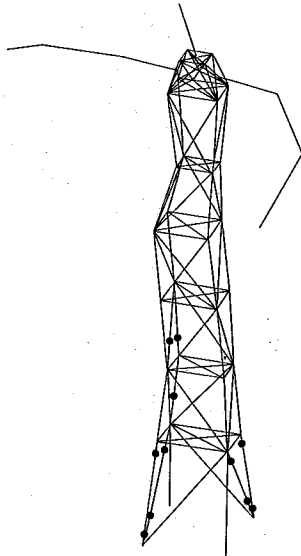


写真-2 模型供試体の载荷試験

実験結果



解析結果

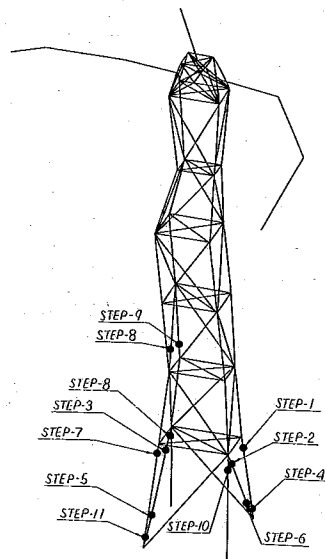


図-17 実験と解析結果との比較 (塑性ヒンジ発生箇所)

変位速度は 0.25 mm/sec とし、最大変位量 50 mm までの強制変位を与えた。

骨組模型および実験の様態を写真-2 に示す。

(2) モデル実験結果の解析

モデル実験結果を“FRAME-1”を用いて解析した。

解析項目は、本体骨組解析と同様である。

解析条件は、表-4 の材料特性をもとに模型自重を算出固定荷重とし、背面からの集中荷重を変動荷重とした。

(3) 実験結果・解析結果の比較

1) 変位量の比較

図-16 に、胸部の荷重-変位量曲線のグラフを示す。実験の変位量は、ふたつの変位測定器の平均値とした。実験値の弾性限界での変位量は、荷重 1.08 t に対して 13.6 mm となっている。降伏後の塑性変形の開始点は明瞭ではないが、1.2 t 前後に認められる。最大耐力は約 1.5 t であった。

解析値の図中の [STEP-N] は、ヒンジの発生順序を

荷重 $P=1.08t$ の時のものである。

主 材

図-18より、第1ブロックを除いて軸力の分布状態、応力の大きさとともに10%以内の差違で近似している。

第1ブロックの左背面の主材軸力に約1.5tの差が認められるが、これは実験時同部材に曲げ応力が発生したことによる結果と推定される。

斜 材

図-19に示すように、軸力の分布状態、応力の大きさとともに、ほとんど差は認められない。

以上のことから、実験で計測されなかった部材(第3ブロック以上)についても、十分な精度の値が得られているものと推定できる。

“FRAME-1”による解析結果と実験結果は、変位量、軸力および塑性シンジの発生位置において、非常によく一致した。

軸力の分布において、第1ブロックで実験値が解析値を1.5t下まわっていたが、これは軸力にのみ着目し、曲げの影響について考慮していない結果で、十分納得することができる。

変位量については、実験値の剛性がわずかではあるが、高く評価されている。これは解析モデルを完全弾塑性体として扱っているためであり、両者の間に差が認められることは、むしろ“FRAME-1”による解析の信頼性を裏付けるものといえる。

5. 考察および結論

巨大ブロンズ中空像で世界的に著名なものは、ニューヨーク市のリバティアイランドにある“自由の女神”像(Statue of Liberty)であろう。自由の女神像はアメリカ独立戦争(1775~1781年)以来のフランスとアメリカの友好関係を記念してフランスからアメリカへ贈られたもので1886年にその献呈式が行われている。像の大きさは松明までの高さは約46m、台座の高さも46mあるから、地上からの高さは約92mという巨大な立像であり、総重量250t、214個のブロックに解体して輸送され、エッフェル塔の建築で有名なギュスターブ・エッフェルが設計した巨大な鉄骨構造によって支持されている。

その規模において宇奈月町「平和の像」は、自由の女神像に高さで1/4、重さで1/8ということになるが、「平和の像」は名だたる豪雪地帯の山頂に建立された点が特筆に値しよう。そのために自重はもちろんのこと酷しい風荷重、雪荷重に耐えて自立し、しかも像の原型を維持し得る内部支持構造の設計が要求された。したがってぜひとも内部支持構造の耐力の限界を適確に評価する必要があった。川井研究室で3年前に開発した立体骨組構造の極限解析用プログラム“FRAME-1”は、この要求に十分答え得るものであったことを確認することができた。

また、小高い山頂の現場で58個のブロックを組み立

て、内部骨組に固定してゆく建設作業には数多くの技術上の問題があった。その大きな問題を二、三列挙すると以下のとおりである。

i) ブロンズ外殻と内部鉄骨骨組構造との接合部設計と電蝕問題への対策

ii) 中空像内部の結露および冬季結氷問題の解決

iii) ブロンズ像の変形監視とその制御方法の確立

第一の問題に関しては、本報告の初めの方で述べたようにブロンズ外殻は材質に問題があり強度は期待できないことが判ったので、ブロンズの自重をできるだけ均等に内部骨組構造の同一レベルの部分に分散させるような補強材とブレースによる接合方式をとった。この場合電蝕問題を、特殊な高分子材料板(テフロン、シリコン)でブロンズ外皮と鉄骨フランジを電気的に絶縁した継手を、本所第4部増子教授の指導により設計した。

第二の問題はブロンズ像の内部は湿気が溜り易く、冬季この水分が結氷して継手やきずのある箇所にも亀裂が発生させる恐れがあるので、空気の流通や内部の保温による湿度対策について検討した。

この問題は、本年3月の雪融け後像外殻の損傷度の調査を待って本格的に検討する予定である。

最後の問題は第5部村井助教授に依頼し建造時に綿密な写真測量を行っており、今後定期的に(1年ごと)写真測量を繰り返して、変形の進行を監視し必要な補修対策を行う計画を立てている。

宇奈月町「平和の像」は、現在最初の厳しい自然の試験を受けつつあるが、その建造物としての芸術的、工学的評価を下すにはなおしばらく時間が必要であると思われる。ともあれ、ほとんど参考データの無い状況下での巨大ブロンズ像の建設は、我が国でも歴史に残る一大プロジェクトであったと考える。しかしそのプロジェクトの終結は、今後数年間の像の変形や損傷の監視を行ってからでないと宣言できないので、いずれその経過報告を行う予定である。

最後に本プロジェクトの遂行に施主の宇奈月町長を初め町議会の方々の熱烈なご支援と、建設工事を担当された佐藤工業北陸支店の森末部長代理(現新潟営業所長)ならびに同新庄工場の構造技術者各位、また同社中央技術研究所加納室長(現土木本部技術部長)を中心とした数名の研究所の方々の献身的ご協力に心から感謝申し上げる。また継手の電蝕問題については本所増子教授に貴重なご助言をいただき、変形監視システムの開発については、村井助教授に一方ならぬお世話になったことを併記して厚く御礼申し上げる次第である。

(1983年1月26日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会編：鋼構造計算規準・同解析
- 2) 日本建築学会編：鋼管構造計算規準・同解析