

大阪ドームの鋳鋼ノード接合部の構造性能試験

萩尾 浩也 木村 耕三
高橋 泰彦

Structural Integrity Test of the Steel Cast Node Joints of Osaka Dome

Hiroya Hagio Kohzo Kimura
Yasuhiko Takahashi

Abstract

Cast steel nodes are used in the junctions of the space truss structure for the roof of the Osaka Dome. This report describes the structural performance examination of the cast steel node junction. The purpose of the experiment is to understand the stress and transformation of the cast steel node junction, to verify the validity of the design by the FEM analysis results for the design load, to confirm the ultimate strength and the destruction mode of the cast steel node junction, and to understand structural safety. As a result of the comparison examination of the experimental result and the FEM analysis, the following were confirmed: ① There was a range of elasticity for both nodes and brackets against sustained loading, a load of 1.5 times, and a load corresponding to an earthquake (level I). ② The elasticity behavior was determined for a load corresponding to an earthquake (level II) for the entire junction, including the node and the bracket. ③ The ultimate strength of the node is more than two times the corresponding earthquake load (level II), and structural safety of the junction was confirmed. ④ Validity of FEM analysis for the design load was also verified.

概 要

大阪ドームの屋根は立体トラス構造で、その接合部には鋳鋼ノードが使われている。本報告は鋳鋼ノード接合部の構造性能試験について述べたものである。本実験の目的は、鋳鋼ノード接合部の応力・変形状態を把握し、設計荷重に対する FEM 解析結果による設計の妥当性を検証すること、鋳鋼ノード接合部の終局耐力および破壊モードを確認し、構造安全性を把握することである。

実験結果、および FEM 解析との比較検討の結果、以下のことが確認された。① 長期荷重とその1.5倍の荷重、レベル I 地震荷重相当に対して、ノードおよびブラケットとも弾性範囲内であった。② レベル II 地震荷重相当に対しても、ノード、ブラケットを含めた接合部全体として弾性挙動をしていた。③ ノードの終局耐力は、レベル II 地震荷重の 2 倍相当以上あり、接合部の構造安全性が確認された。④ 設計荷重に対する FEM 解析の妥当性が確認された。

1. はじめに

大阪ドームの屋根部は図—1 に示すように、ラメラ状の立体トラス構造となっており、各節点には 5～6 本の弦材と 2～3 本の腹材が三次元状に集中している。この節点での部材接合を可能にするために、五角ないし六角形状の鋳鋼ノード¹⁾が使用されているが、形状の複雑さを反映して応力状態が不明解であり、大規模な実験を行うことにした。本実験の目的は、弦材接合用のブラケットを含む鋳鋼ノード接合部の応力・変形状態、設計荷重時の状況、鋳鋼ノード接合部の終局耐力および破壊モードを確認し、構造安全性を把握することである。また、FEM 解析¹⁾による設計の妥当性も検証する。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は J6, J7 の 2 体で、それぞれ鋳鋼ノード接合部（以下、ノードと略す）とそれに取り付くブラケットから構成されている。J6 ノードの形状・寸法を図—2 に示す。J6 試験体は、ドーム本体部に使われている 7 種類のノードの内 6 個を代表させてモディファイしたものである。J6 試験体の形状を図—3 に示す。試験体の大きさは、実物の 1/2 スケールとした。試験体は、ノード近傍の荷重の対称性と FEM 解析によるノード部の応力状態の対称性を確認し、ノードの右半分を試験対象領域とした。試験体のノードおよびブラケットの材料特性は表—1 に

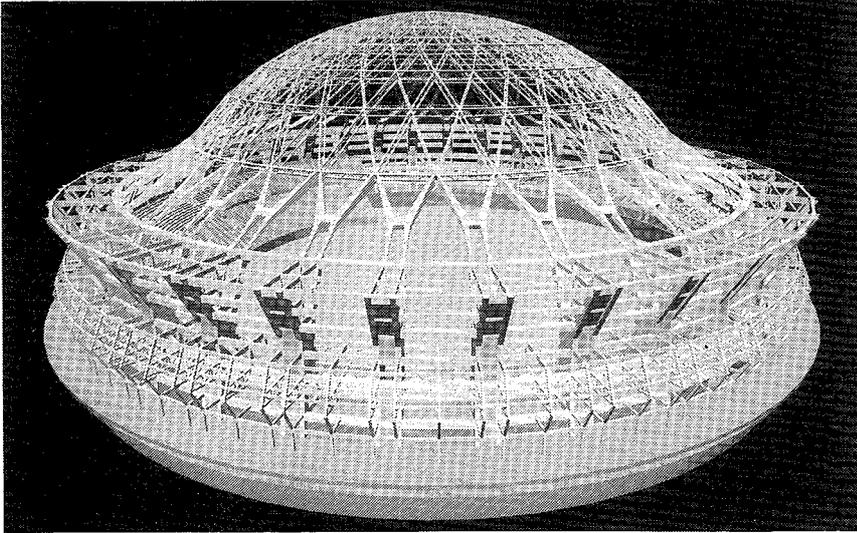


図-1 大阪ドームの全体パース

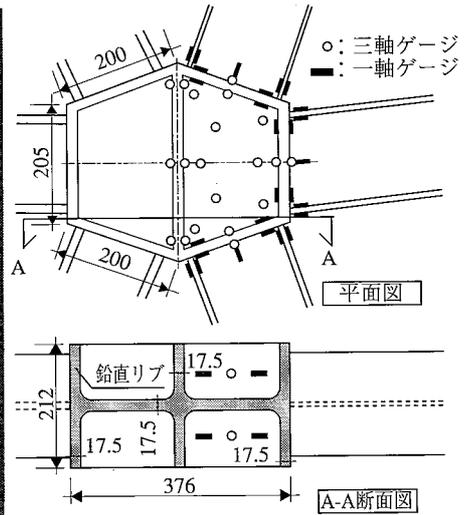


図-2 J6 ノードの形状と概要寸法

示す通りである。

2.2 加力方法

荷重ケースは、図-3に示すように、長期荷重の1.5倍相当、レベルI地震荷重相当(以下、レベルI)、およびレベルII地震荷重相当(以下、レベルII)の3種類である。これらの加力終了後、試験体の破壊またはジャッキの載荷能力の限界まで載荷した。長期荷重時(図-3の白抜矢印)では、3本のブラケットとも圧縮軸力のみで、その他の荷重ケースでは、実構造物でのノードの応力状態を再現させるため、軸力と弦材の偏心に伴うモーメントを考慮したせん断力による載荷を行った(図-3の黒矢印)。加力は自動制御システムで、6台の油圧ジャッキとロードセルを用いて、それぞれの荷重ケースの最大荷重の1/6ずつの漸増載荷した。各荷重ケースでのブラケットの最大荷重と終局耐力は、図-3に示す通りである。なお、3本のブラケットの内、1本でも軸力を保持できなくなった状態を終局状態とし、その時の各ブラケットの荷重を終局耐力とした。

2.3 測定項目

ひずみゲージにより、鉄骨部のひずみを測定した。図-2にひずみゲージの貼付位置を示す。ノードに入る荷重を把握するためにブラケット1~3の端部のウェブとフランジの裏表に一軸ゲージを、ノードの応力状態を把握するために、ノードの鉛直リブと水平リブの裏表に三軸ゲージを貼付けた。

3. 実験結果

3.1 実験経過

J6試験体では、長期荷重時の1.5倍の荷重、およびレベルI荷重に対して、ブラケットおよびノードの測定ひずみは、すべて弾性範囲内であった。レベルII時の最大荷重時にブラケット3のフランジの一部でファイバーの降伏が確認されたが、ノードの測定ひずみは弾性範囲内であった。その後、最終破壊モードを確認するために、加

表-1 鋼材の材料試験結果

鋼材(板厚)	ヤング係数 (10^6 kgf/cm^2)	降伏点 (tf/cm^2)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)	引張強度 (tf/cm^2)
6 mm	2.15	4.08	1900	5.73
7 mm	2.11	3.71	1760	5.58
10 mm	2.16	3.52	1630	5.47
11 mm	2.14	3.34	1560	5.47
14 mm	2.16	3.65	1690	5.56
ノード部分	2.08	3.85	1850	5.37

H形鋼の材質：SM490A 鋳鋼の材質：SCW480

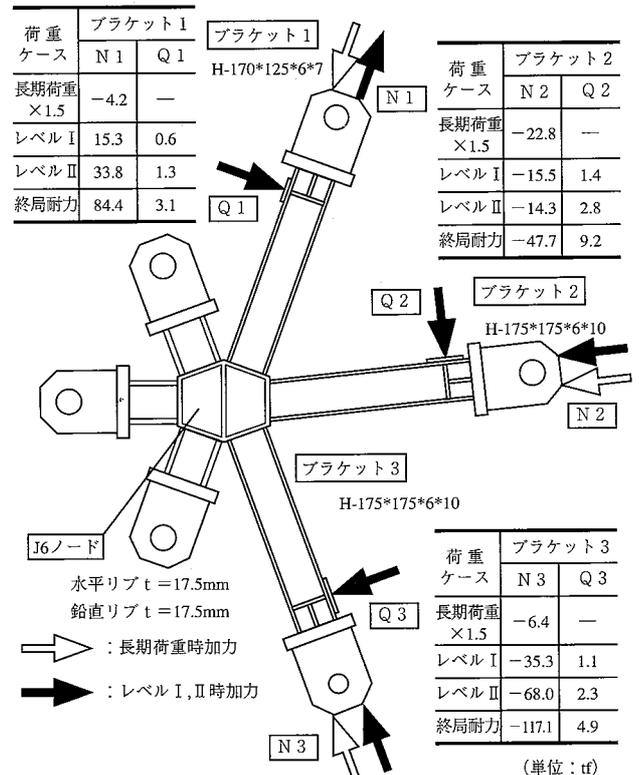


図-3 J6試験体概要と加力図

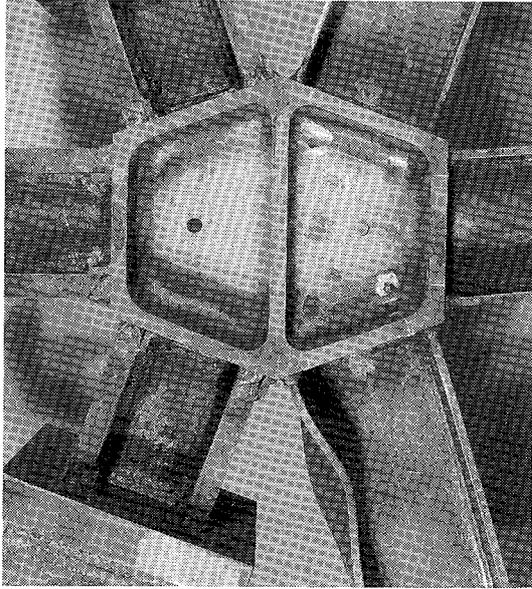


写真-1 J6 試験体の加力終了後の状況

力を続けた結果、ブラケット3の圧縮側フランジが局部座屈を生じ、軸力を保持できなくなり、加力を終了した。最終荷重はレベルIIの2倍を越えていた。そのJ6試験体の最終破壊状況を写真-1に示す。J7試験体においても、長期荷重時、その1.5倍の荷重、およびレベルI、IIの荷重に対して、ほぼ同様の傾向であった。ただ最終加力では、ブラケット2のジャッキの載荷能力の限界に達すると同時に、ブラケット2が面外方向に変形を生じたので、加力を終了した。この時の荷重は、レベルIIの2.33倍であった。これら終局状態時でも、いずれの試験体においてもノードの損傷は確認されなかった。

3.2 ブラケットのひずみ

J6試験体の長期荷重とレベルIIのケースのブラケット3のひずみ分布図をそれぞれ図-4と5に示す。図中の実線が実験値で、点線が荷重より計算したひずみである。各荷重ケースで、ほぼ想定通りの荷重がノードに伝達されていたが、ただ、レベルII時では圧縮側のフランジの局部的な降伏が生じたため、実験値で得られたひずみの値は計算値より大きくなっていった。この局部的な降伏は、ゲージ貼付位置とノードとブラケットの溶接位置が近かったため、溶接による残留ひずみの影響によるものと思われる。J7試験体も同様な傾向であった。

3.3 ノードのひずみ

図-6にJ6試験体の水平リブに貼付けた三軸ゲージから求めたレベルII時の、最大主ひずみと最小主ひずみの一例を示す。この図より解析値は実験値と近似している。全体的に見ると解析値は実験値よりも若干大きめであり、安全側の評価となっている。さらにこの図から、実験結果は直線性を示しており、ノードの水平リブが弾性挙動を示していることが分かる。次に、水平リブに貼り付けた三軸ゲージによる主ひずみの大きさをベクトル

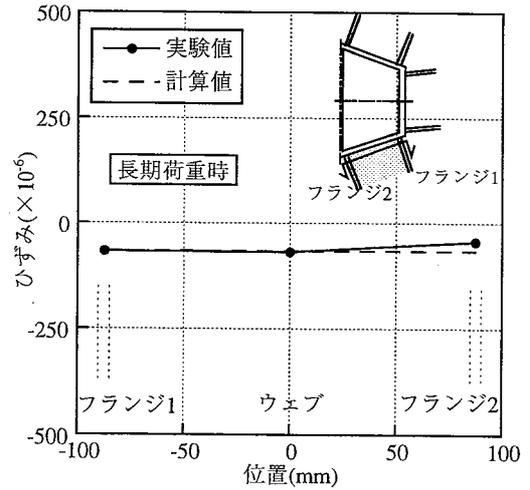


図-4 J6のブラケット3の長期荷重*1.5倍のひずみ

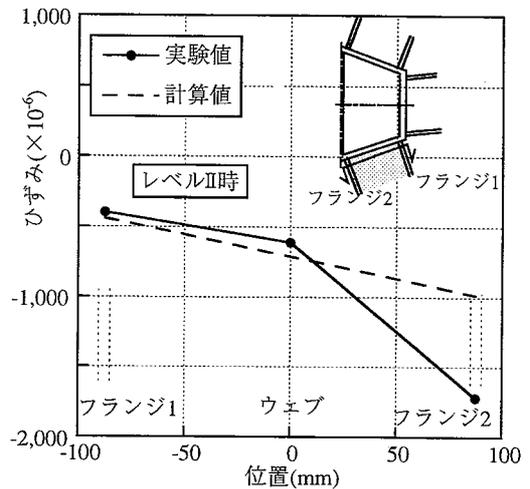


図-5 J6のブラケット3のレベルII時のひずみ

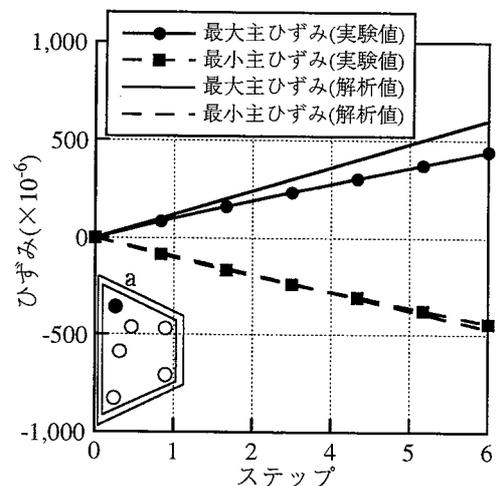


図-6 J6のa点ひずみと加力ステップの関係

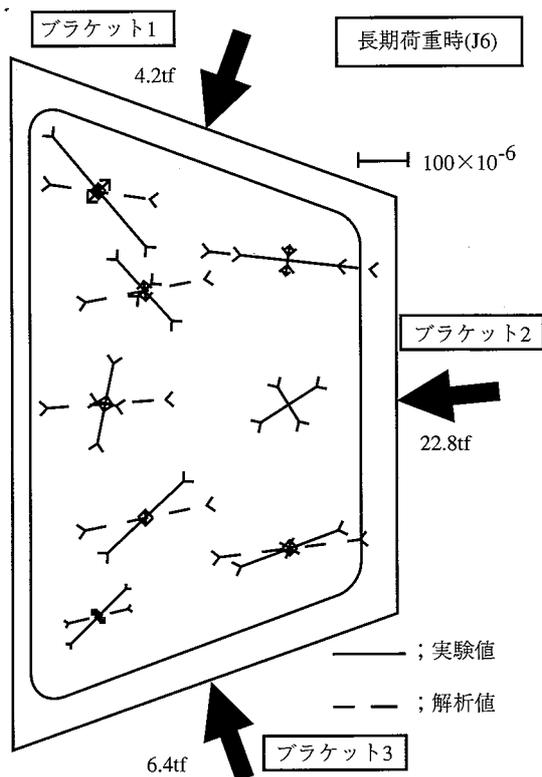


図-7 J6 ノードの長期荷重時の主ひずみ

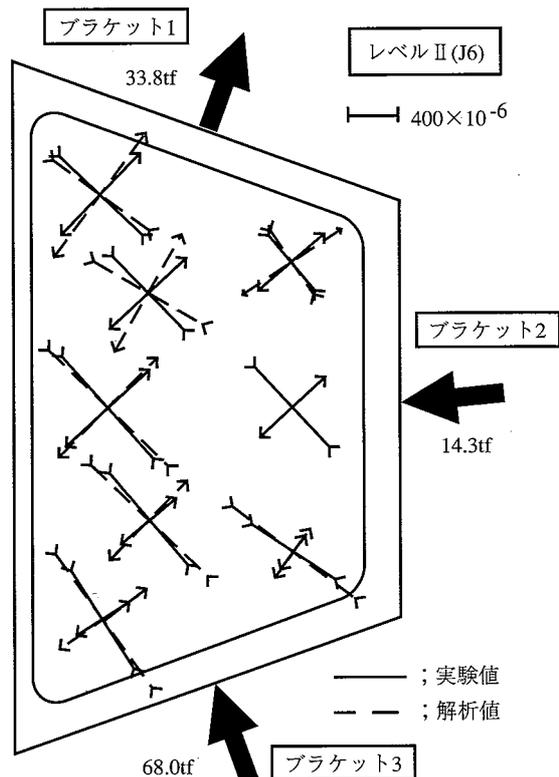


図-8 J6 ノードのレベルII時の主ひずみ

で表示した結果を図-7, 8 に示す。図-7 は長期荷重時, 図-8 はレベルII時の主ひずみ分布図である。全体的に見ると長期荷重時は, ノードにはブラケット1と3の軸力は小さく, ブラケット2の軸力が支配的となっている。J7 試験体ではその傾向が解析値, 実験値とも顕著に現れている。J6 試験体においては解析ではその傾向が出ているが, 実験値では中央付近が多少乱れた結果となっている。これは J6 試験体は J7 試験体と比較してひずみレベルが小さく, 実験値のばらつきによるものと考えられる。図-8 を見ると, 最小主ひずみはブラケット2と3の軸力の合力の方向に解析値も実験値も流れており, 最大主ひずみは引張軸力であるブラケット1の方向とほぼ同じとなっている。J7 試験体では大きさ, 方向とも解析値と実験値が近似している。一方, 鉛直リブのひずみも J6 試験体と J7 試験体とも, 主ひずみの大きさ, 方向とも実験と解析が近似している。

4. まとめ

大阪ドームのドーム部鋳鋼ノード接合部実験の結果, 以下のことが確認された。

① 長期荷重とその1.5倍の荷重, レベルI荷重相当に対して, ノードおよびブラケットとも弾性範囲内であった。

② レベルII荷重相当に対しては, ブラケットの一部で溶接による残留ひずみの影響のために局部的に降伏ひずみを越えるものがあったが, 接合部全体としては, ノード, ブラケットとも弾性挙動をした。

③ 設計荷重を越える荷重に対しては, レベルII荷重の2倍に相当する荷重を越えた所で, ブラケットの局部座屈で最終破壊に至ったが, その時のノードは健全であり, 接合部の構造安全性が確認された。

④ 実験値と解析値の比較検討の結果, 実験と解析による主ひずみの方向性も値も近似しており, 設計荷重に対する FEM 解析の妥当性が実験により確認された。

謝 辞

貴重な助言や資料の提供をいただいた日建設計(株)大阪構造設計事務所原克巳主管, 五十子幸樹氏, ならびに, 試験体製作に協力していただいた大阪ドーム JV 関係各位に, ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原, 鶴飼, 向野, 内田, 五十子: 大阪ドームの構造設計について, (その1~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p.675~684, (1995)