

超高層建築物の施工に使用するタワークレーンの耐震性能に関する研究  
タワークレーンマストのボルト引張接合部の非線形解析

正会員 ○牛尾好孝\*1 同 猿渡智治\*2 同 永野康行\*3

2. 構造-3. 応用力学・構造解析-f. 臨界現象・限界状態の力学

タワークレーン, 高力ボルト引張接合, コンピュータシミュレーション, FEM

1. はじめに

最近のコンピュータ技術の進歩は著しく、それに伴い、建築物の構造設計分野においても、解析ソフトの高度化が進み、構造体や力学的性状について、より実際のものを再現できるようになってきている。

また、より実際の構造体力学性状の把握において、試験体を使った実験に比較して、コンピュータシミュレーションによる解析はその費用効果において非常に優れている。そのため、コンピュータシミュレーション技術を恒久建築物の設計のみならず仮設設計の分野にも生かすことは重要である。

ところで、1995年に発生した兵庫南部地震の多くの建設現場や海外では2002年に台湾の超高層ビル工事で、地震によりタワークレーンが落下する事故が報告されている<sup>[1][2]</sup>。この台湾のクレーン崩壊のケースはマストの現場接合部のボルトの破断から発生している(図2)。

クライミング式のタワークレーンのマストの現場接合部(図1)は、クライミングのため、マストの外面がフラットである必要であるため、接合部設計の条件が厳しく、大径ボルト引張接合(直径30mm超)や偏心引張接合等(図3)が適用されている。また、解体を考慮して初期導入軸力は建築物の高力ボルトに比較して小さく、そのボルトも再利用が許されている。

更に、タワークレーンは仮設構造物(設置期間が短い)であるため、耐震設計基準の荷重条件は恒久建築物と比較すると低い安全率基準が適用され、その研究も少ない。しかしタワークレーンは、地震により崩壊が発生すると致命的な大災害となり、現在の耐震基準及び設計方法について改善が必要と思われる。

以上の背景のもと、将来予想される、東海・東南海・南海地震や内陸直下型地震である首都圏直下型に備え、タワークレーンの耐震性能について、施工性も考慮した最適な構造形式や設計方法の提案が必要

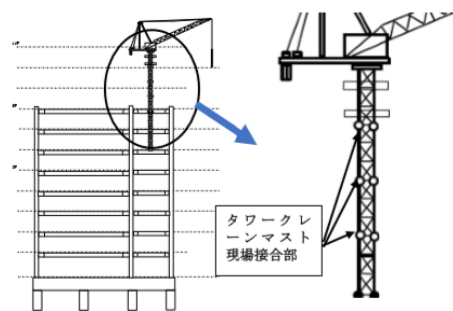


図1 タワークレーンマストと現場接合部

本報告の目的は、タワークレーンマストの現場接合部に適用されている、エンドプレート形式のボルト引張接合(マストがH形鋼)について、スーパーコンピュータを用いた非線形FEM解析を実施し、エンドプレートの厚さと導入軸力が接合部の剛性と耐力に与える影響について調べることである。



図2 タワークレーンマストのボルト接合部から崩壊したタワークレーン



図3 ポスト材が山形鋼の場合の偏心ジョイント

Non-linear Analysis on the end plate connections of tower crane mast structure

USHIO Yoshitaka, SARUWATARI Tomoharu and NAGANO Yasuyuki

## 2. 数値解析

マスト接合部の挙動を詳細に解析する為、有限要素法による数値計算を行った。計算にはLSTC社製の非線形有限要素法ソフトウェアLS-DYNA\_R9.2.0\_Rev.119543（倍精度版）を用いた。計算機は大学保有のLinux クラスタシステムを用いてMPPによる並列計算を行った。

### 2.1 計算モデル

タワークレーンマストの現場接合部を、接合面から上下それぞれ450mmを切出してモデル化を行った。部材はすべてソリッド要素でモデル化し、最小板厚10mmを3分割以上細分化する為、メッシュサイズは一辺2.5mmを基本とした。接合部の形状は、ポスト材をH形鋼（H-305x305x10x15）、大径六角ボルトM45x4、エンドプレートの板厚は30mmの他50mm、70mmのものを作成した。モデルの要素数は約93万～140万要素、節点数は約100万～150万節点となった。

モデルの概略図を図4に示す。

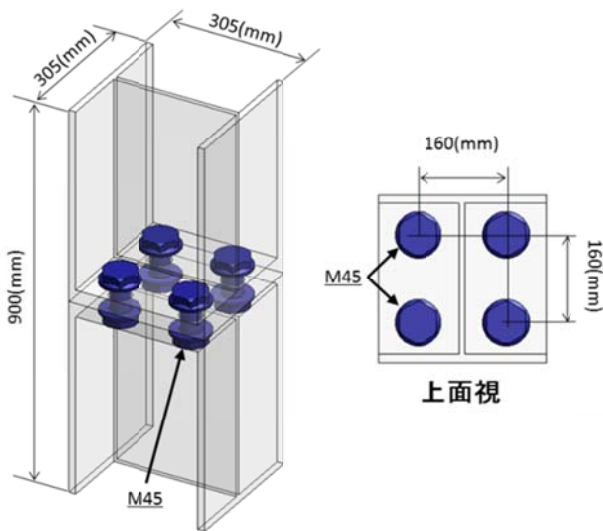


図4 モデル概略図

### 2.2 材料モデル

材料モデルはLS-DYNAに実装されている、移動硬化を考慮した等方弾性体(\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC)<sup>[6][7]</sup>を採用した。材料定数を表1に示す

表1 材料物性値

	ヤング率 (MPa)	質料密度 (ton/mm <sup>3</sup> )	ポアソン 比	降伏応力 (MPa)
マスト部	206000	7.89E-09	0.3	340
ボルト	210000	7.89E-09	0.3	900

### 2.3 荷荷条件

マスト下端部を完全固定し、上端部に対し引張方向に強制変位を+5mm付与した。荷荷状況を図5に示す。

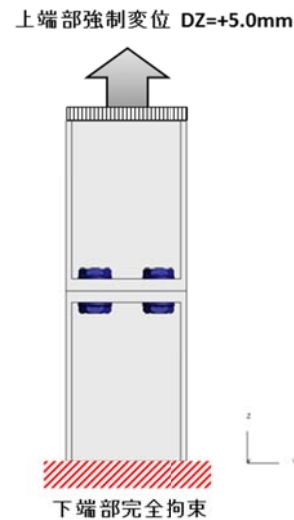


図5 荷荷状況図

### 2.4 計算条件

ボルトの初期軸力有無による検討を行うため、ボルト降伏軸力の75%（建築学会規準）<sup>[3]</sup>に相当する675MPaを初期軸力として付与した。さらにエンドプレートの板厚をパラメータとして計算を行った。計算モデルの一覧を表2に示す。

表2 解析モデル一覧

Model	ボルト軸力 (MPa)	エンドプレート (mm)
Model-1	—	30
Model-2	675	30
Model-3	675	50
Model-4	675	70

### 3. 解析結果

#### 3.1 エンドプレート (EPL) の板厚の影響

高力ボルト引張接合は大きな荷重（ボルト1本あたり）を伝達することができ効率的である。これは必要なボルト本数の減少、工場での穴あけ加工数や施工時のボルト締め付け作業の低減をもたらす経済的である。また、高力ボルトに導入される高い軸力による接触力により接合部の剛性は高い。

高力ボルト引張接合に関する研究は、T継手（スプリットティ形式）の設計方法として、多くの研究者によって検討されてきている<sup>[4][5]</sup>。この接合形式はエンドプレートの力学的特性（剛性、強度）やエンドプレートの剛性やボルトの配置などにより生じてくる反力の影響により複雑な力学的性状を有している。そこで、エンドプレートの剛性（板厚）をパラメータとして接合部の剛性・強度の変化について解析した結果を図6に示す。

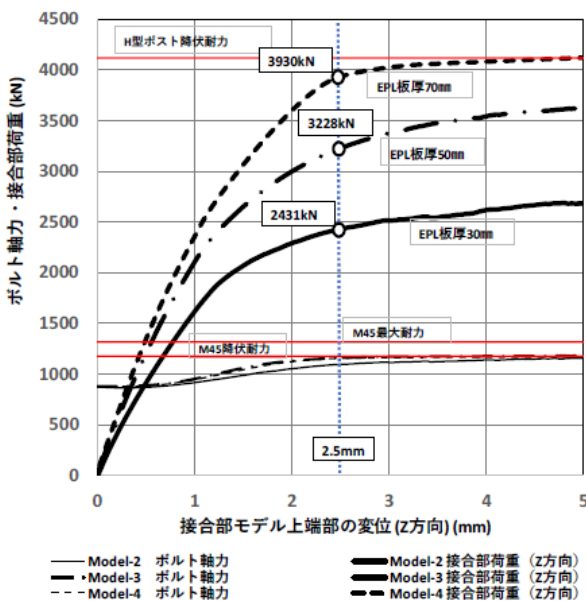
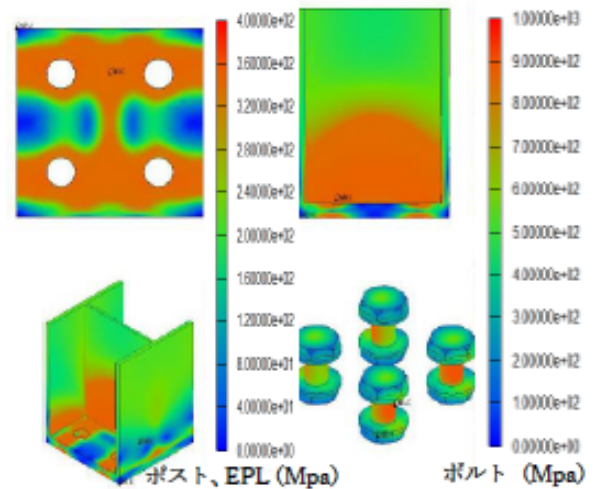


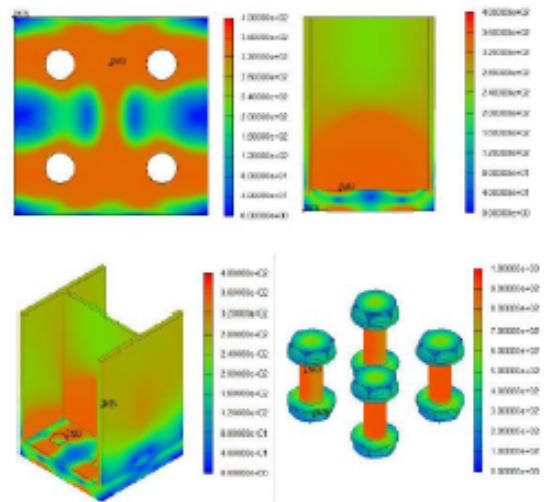
図6 接合部上端変位とボルト軸力・接合部荷重

接合部モデル上端の変形 (Dz) が 2.5 mm の段階での各モデル部品（エンドプレート、H型ポスト及びボルト）の応力分布を図7に示す。図6より Dz=2.5mm で EPL30 mm に比較して EPL50 mm では 33%、EPL70 mm では 62% 強度が増加し、初期剛性も EPL50 mm で 29%、EPL70 mm で 44% 増加している。また、図7では EPL の板厚の変化による各部品の応力集中の状況の相違が明確に示されている。

(1) Model-2 (EPL 板厚 30 mm, ボルト導入軸力有)



(2) Model 3 (EPL 板厚 50 mm, ボルト導入軸力有)



(3) Model-4 (EPL 板厚 70 mm, ボルト導入軸力有)

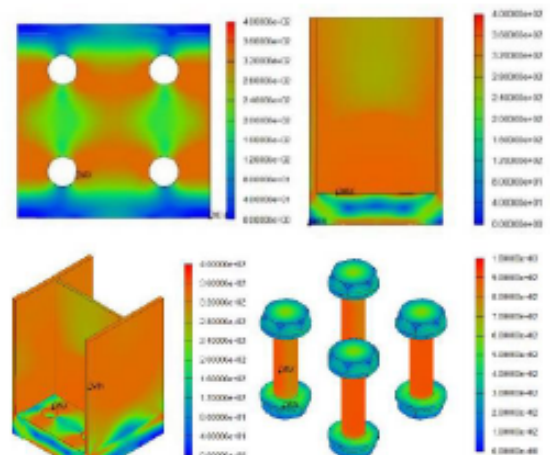


図7 各部品の応力分布（ミーゼス相当応力）

### 3.2 初期導入軸力の影響

高力ボルトの鋼構造接合部設計指針ではボルトへの初期導入軸力は降伏軸力の75% (F10Tの場合)となっている<sup>[3]</sup>。タワークレーンのような設備機械では低めに設定され、再利用の可能な場合もある。

そこで今回の解析ではボルト導入軸力有と無についての解析を行い、接合部上端部の変位とボルト軸力・接合部引張荷重の関係を図8に示す。軸力を導入しないと接合部強度(9%低下)や特に初期剛性(38%低下)が大幅に減少する。

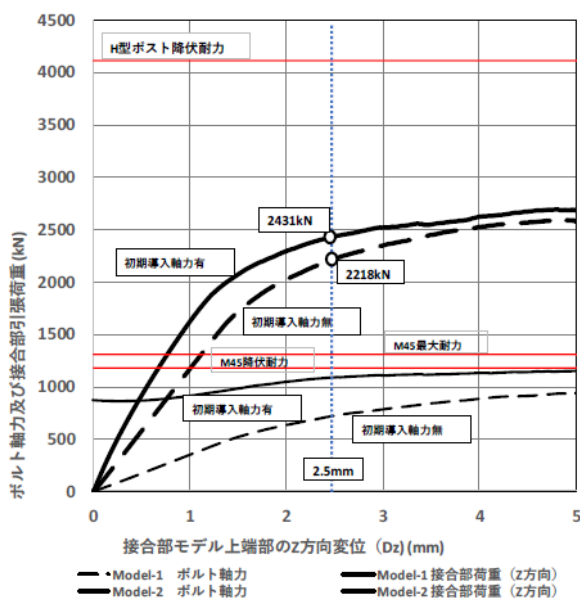


図8 接合部上端変位とボルト軸力・接合部荷重

### 4. おわりに

本報告では、ポスト材がH形鋼の大径高力ボルト(M45)を用いた引張接合部におけるエンドプレートの板厚と導入軸力が、接合部の剛性及び耐力に与える影響について、非線形FEM解析し、その結果を示した。

現在、ポスト材の形状(H形鋼、山形鋼、角形鋼管)、ボルト径などをパラメータとしてタワークレーンマストの高力ボルト引張接合部の力学的特性をFEM非線形解析により得ている。更に、これら得られた力学性状を建設中建物とタワークレーンの連成

モデルに組み込み、弾塑性地震応答解析を行い、建設時のタワークレーンの耐震性能向上のための施工性を考慮した最適な高力ボルト引張接合について提案したい。

### 参考文献

- [1] 岡野将幸、牛尾好孝、白井茉似那、永野康行、鋼構造建築物の施工過程を考慮した地震応答解析 その1、その2及びその3 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 2017
- [2] Y.Ushio, M.Okano, Y.Nagano: The earthquake response of climbing-type tower cranes installed in high-rise buildings in consideration of various situation under construction, Proceedings of 16<sup>th</sup> World conference on Earthquake Engineering, 2017, 12pages
- [3] 鋼構造接合部設計指針、日本建築学会、第3版、2012年3月
- [4] 橋梁用高力ボルト引張り接合設計指針 JSS IV 05-2004
- [5] R.S Nair, P.C.Birkmoe and W.H.Munse, Behavior of Bolts in Tee-Connections Subject to Prying Action, Sep. 1969, Civil Engineering Studies, Structural Research Series No.353, University Illinois
- [6] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I (LS0DYNA R8.0), 株式会社 JSOL, 2016.3
- [7] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME II (LS-DYNA R8.0), 株式会社 JSOL, 2016.3

\*1 兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究所 博士後期課程院生  
 \*2 株式会社 JSOL エンジニアリングビジネス事業部  
 \*3 兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究所 教授・博士(工学)

Graduate Stud. Grad. Sch., Sim. Studies, Univ. of Hyogo  
 JSOL Corporation, Engineering Technology Div.  
 Prof. Grad. Sch. Sim. Studies, Univ. of Hyogo, Dr. Eng