

# 接合形式の異なる鋼門型骨組の静的耐荷挙動に関する 実験的・数値解析検討

Experimental and numerical studies of static load-carrying behavior of steel portal frames with various connection type

室蘭工業大学大学院 ○ 学生員 壺谷 孝史 (Takafumi Tsuboya)  
 室蘭工業大学大学院 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)  
 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

## 1. はじめに

我が国における鋼骨組の柱梁接合形式は、耐震性能を向上させるために柱と梁を溶接して接合（剛接合）する場合が多い。一方、欧米諸国では、地震が少ないことから、従来よりアングル材と高力ボルトを用いて接合するアングル系の接合形式が広く使用されている。この接合形式は、1) 溶接作業が不要であり、経済性・施工性に優れること、2) それらの組み合わせによって剛性や耐力を変化させることが可能であること、等の利点があることより、我が国でも注目され始めている。

このようなアングル系接合に関する実験的・数値解析的研究は、古くから世界各国で実施されている<sup>1)~3)</sup>。著者らも、既往の研究において有限要素法による数値解析を試み、接合部のモデル化を適切に行うことによって、実験結果のモーメント-相対回転角関係を大略再現可能であることを明らかにしている<sup>4)</sup>。しかしながら、これらの実験的・数値解析的研究は部材規模を対象としたものが多く、骨組構造を対象とした研究は少ないため、その挙動特性も十分に明らかにされていない。

このような背景より、本研究では、鋼骨組の静的耐荷挙動を明らかにすることを目的とし、最も単純な構造形式である鋼門型骨組を対象として、3種類の柱梁接合形式を適用した場合の静耐荷実験を実施した。また、有限要素法による三次元弾塑性解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検討した上で、接合形式が骨組の静的耐荷挙動に与える影響について検討を行っ

た。なお、解析には構造解析用汎用プログラム ABAQUS (Ver. 6.11)<sup>5)</sup>を使用した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1には、本研究で対象とした鋼門型骨組（鋼種：SN400B、幅：2.2 m、高さ：1.3 m）の形状寸法を示している。柱材および梁材はそれぞれ H200×200×8×12 および H200×150×6×9 の H 形鋼を使用した。また、柱梁接合部にはパネルゾーンの変形を抑制するために、柱材に板厚 12 mm の補剛材および板厚 6 mm のダブルプレートを溶接している。さらに、梁材中央部には衝撃荷重による局部座屈を抑制するために、板厚 12 mm の補剛材を配置している。なお、骨組は高力ボルトを用いて柱材基部底板を剛基礎に固定している。

表-1 物性値一覧

名称	鋼種	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$	降伏強度 $f_y$ (MPa)	引張強度 $f_u$ (MPa)
flange (column)	SN 400B	200	0.3	302	529
web (column)				341	598
flange (beam)				323	592
web (beam)				354	602
end-plate				301	440
top-/seat-angle				300	527
bolt	F10T			1,019	1,086

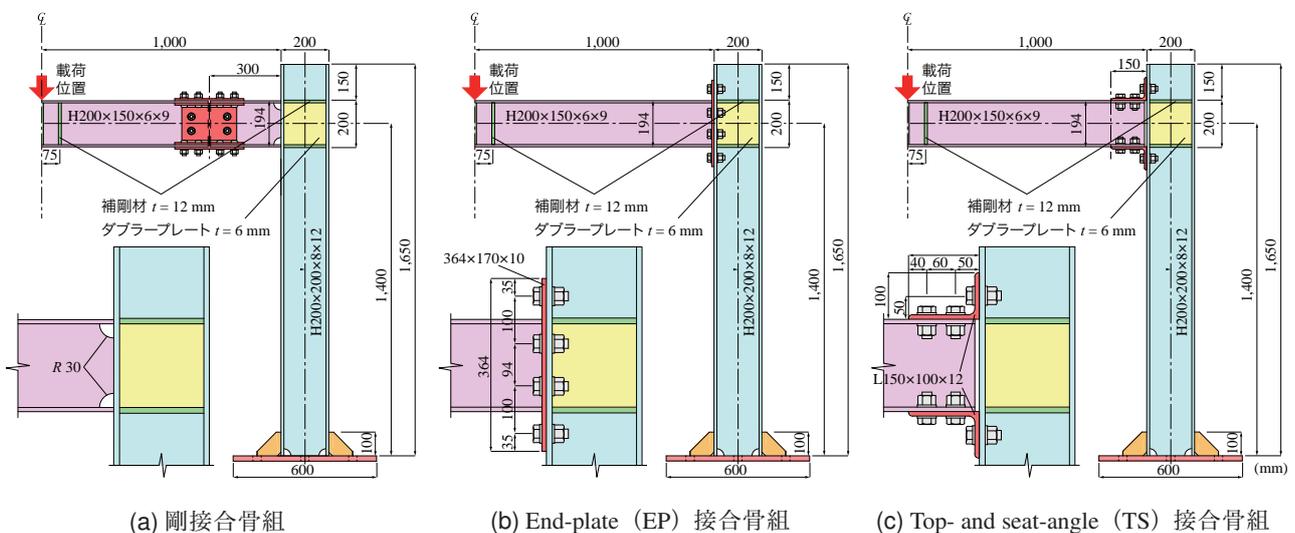


図-1 試験体概要（正面図および柱梁接合部拡大図）

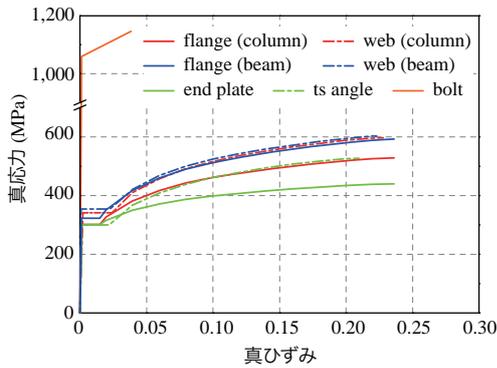


図-2 真応力-真ひずみ関係



写真-1 静載荷実験状況

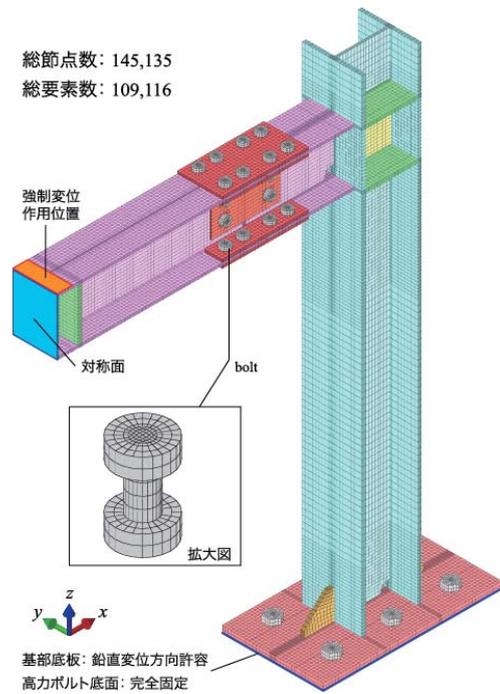
本研究では、鋼骨組の静的耐荷挙動に関する接合部の影響を検討するために、接合形式として (a) 剛接合, (b) End-plate 接合 (以後, EP 接合) および (c) Top- and seat-angle 接合 (以後, TS 接合) の3種類を用いた。EP 接合は  $64 \times 170 \times 10$  の鋼板を梁材端部に溶接接合し、図-1 (b) に示すように高力ボルトを用いて柱材と梁材を接合している。TS 接合は  $L150 \times 100 \times 12$  の不等辺山形鋼を使用し、図-1 (c) に示すように柱材と梁材を高力ボルト接合している。また、両骨組において高力ボルトには F10T (M20) を使用し、導入軸力は鋼構造接合部設計指針<sup>6)</sup>に準拠して 182 kN となるようにトルクレンチを用いて締付けた。なお、鋼材同士が接触する面にはショットブラスト処理を施している。

表-1 および図-2 には、引張試験により得られた使用鋼材の材料物性値および真応力-真ひずみ関係を示している。

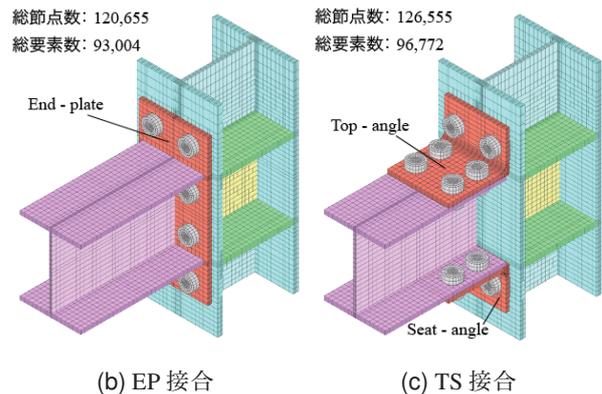
### 2.2 実験方法および測定項目

荷重は梁材中央部に幅 100 mm の鋼厚板を設置して油圧ジャッキ (容量 500 kN) を用いて変位制御方式により載荷している。なお、安全面の配慮から載荷荷重は載荷点変位が約 100 mm に達するまでとしている。写真-1 には実験状況を示している。

本実験の測定項目は、1) 荷重測定用ロードセルによる載荷荷重  $P$ , 2) 非接触型レーザ変位計による柱・梁材の変位 (載荷点変位は  $\delta$ ) および 3) ひずみゲージによる



(a) 剛接合



(b) EP 接合

(c) TS 接合

図-3 要素分割状況

柱・梁材フランジ各点の軸方向ひずみである。

### 3. 数値解析概要

本解析では、骨組のモデル化を可能な限り正確に再現することを前提に、柱材、梁材、鋼板、アングル材および高力ボルトは全て 8 節点固体要素を用いてモデル化することとした。図-3 には、剛接合骨組における全体モデルおよび EP, TS 接合部近傍の要素分割状況を示している。解析モデルは対称性を考慮して 1/2 モデルとした。

高力ボルトは、図-3 (a) に示すようにボルト頭部とナットを一体化してモデル化している。また、1) 柱材および梁材に接触する鋼板およびアングル材、2) ボルト頭部およびナットと各部材間、3) ボルト軸部とボルト孔部には、接触・剥離が考慮可能な接触面を定義している。なお、接触面は剛接触とし、その摩擦係数は 0.4 と仮定した。

境界条件は実験条件と同様に、底板を固定する高力ボルトの底面を完全固定とした。対称切断面には対称性を満足するように境界条件を与えている。また、鋼材の応

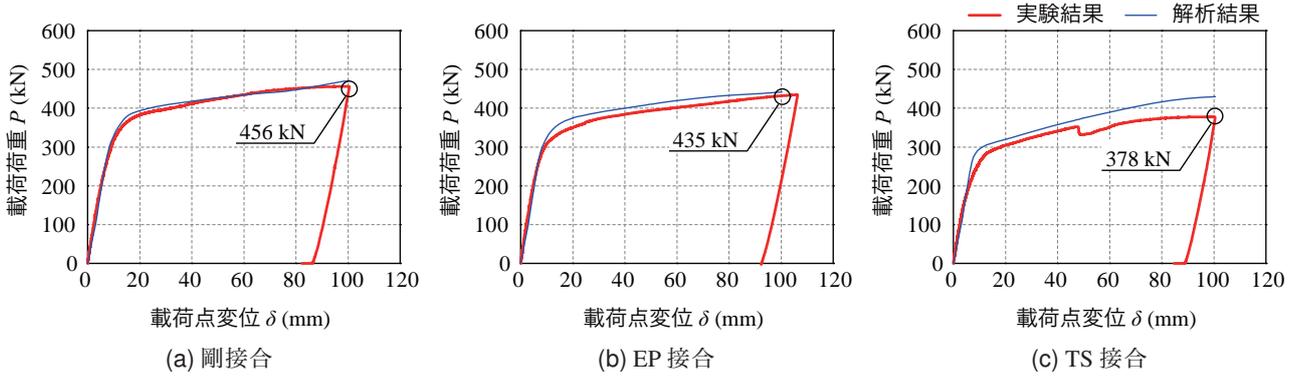


図-4 荷重-変位関係

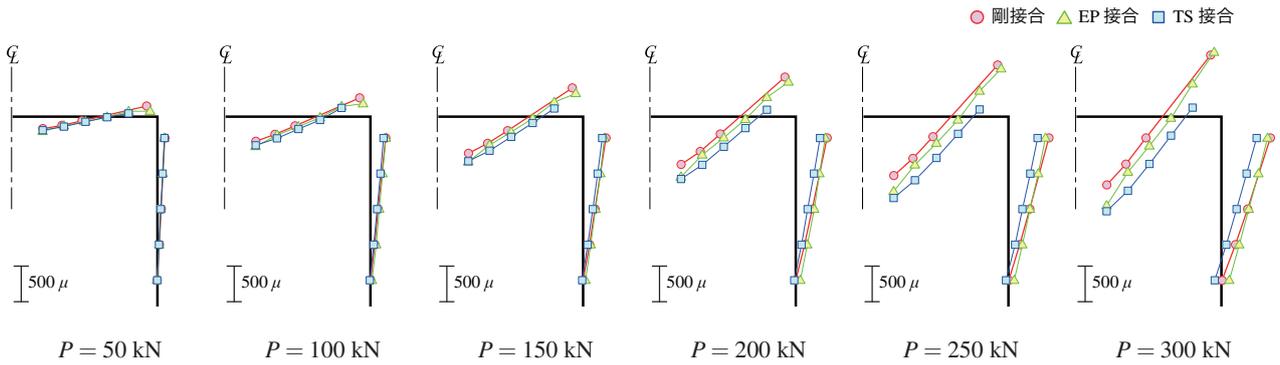


図-5 軸方向ひずみ分布 (接合形式による比較)

力-ひずみ関係は、前述の鋼材引張試験結果(表-1および図-2)を参考にして、マルチリニア型に近似している。なお、鋼材の構成則は等方硬化則を採用し、降伏判定は von Mises の降伏条件式に従うこととした。解析は、実験時の荷重箇所に対応する範囲に強制変位を与えることにより行った。なお、変位増分に関しては、解の収束性や計算の効率化を考慮して、ABAQUS が推奨する自動増分法を採用している。

#### 4. 実験および数値解析結果

##### 4.1 荷重-変位関係

図-4には、各骨組の荷重-変位関係に関する実験結果を数値解析結果と比較して示している。なお、数値解析は実験と同様に荷重点変位が100 mmを達した時点で終了するように設定した。

図より、実験結果に着目すると、荷重初期の勾配は接合形式にかかわらず、いずれの骨組においてもほぼ等しく、その後、荷重点変位  $\delta = 10$  mm 近傍から徐々に剛性勾配が低下していることが分かる。これより、 $\delta = 10$  mm の領域までは、各骨組ともに弾性的な挙動を示しているものと推察される。また、実験終了時( $\delta = 100$  mm)の荷重荷重に着目すると、剛接合の場合には456 kNであるのに対し、EP接合およびTS接合の場合にはそれぞれ435 kN、378 kNとなっており、剛接合とする場合の静的耐力は、EP、TS接合とする場合に対してそれぞれ5%、20%程度大きいことが分かる。この傾向は、接合部の限界曲げ耐力の大きさと対応しているものと判断される。

また、数値解析結果と実験結果を比較すると、接合部

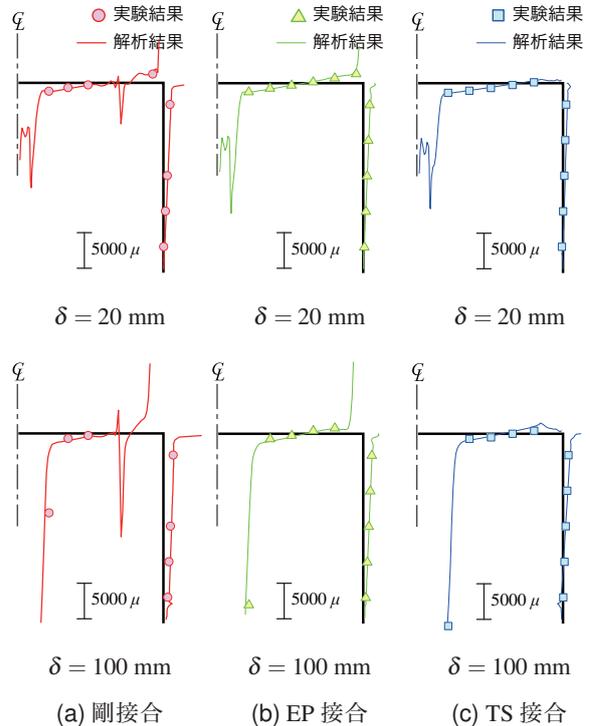


図-6 軸方向ひずみ分布 (実験・解析結果との比較)

形式にかかわらずいずれの骨組に対しても、荷重初期の剛性勾配や部材の塑性化による剛性の低下など、数値解析結果は実験結果をよく再現していることが分かる。

##### 4.2 軸方向ひずみ分布

図-5には、荷重荷重  $P = 50 \sim 300$  kN 時における骨組

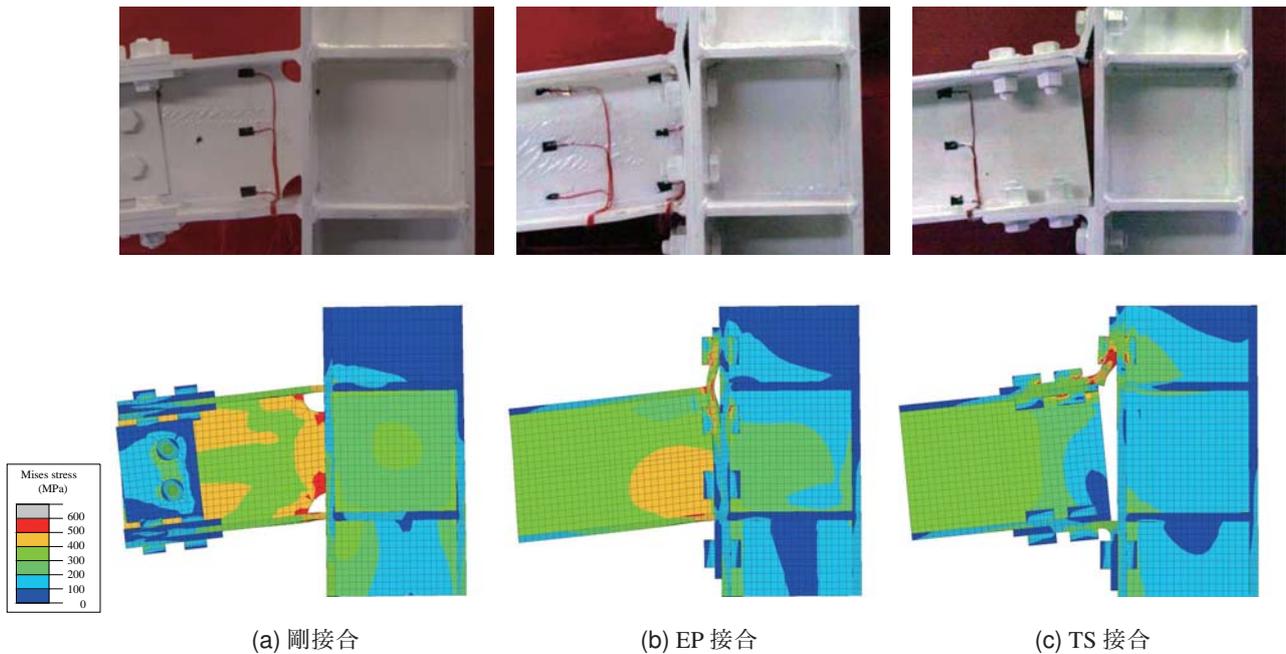


図7 実験終了時における接合部近傍の変形状および Mises 応力分布 (変形倍率: 等倍)

内側フランジの軸方向ひずみ分布を示している。図より、接合形式にかかわらず、荷重点から梁材端部に向かってほぼ線形的にひずみが増加していることが分かる。また、弾性的な挙動を示す  $P = 50, 100 \text{ kN}$  では、各骨組のひずみ分布はほぼ一致している。一方、 $P = 200, 250 \text{ kN}$  における接合部近傍のひずみは、TS 接合、EP 接合、剛接合の順に大きい。これは、TS 接合、EP 接合、剛接合の順に接合部限界曲げ耐力が大きいことを暗に示している。

図6には、荷重点変位  $\delta = 20, 100 \text{ mm}$  時における各骨組の軸方向ひずみ分布について実験結果と数値解析結果を比較して示している。図より、各骨組の数値解析結果は実験結果と同様に荷重点から梁材端部へほぼ線形に増加していることが分かる。また、荷重点近傍に局部的に発生している比較的大きなひずみ分布もよく再現している。

#### 4.3 変形状と Mises 応力分布

図7には、実験終了時における接合部近傍の変形状と数値解析結果から得られた Mises 応力分布を示している。図より、数値解析結果は全体的な変形状や End-plate 上部および Top-angle 部の開口状況等、実験結果を大略よく再現していることが分かる。また、梁材ウェブ部の Mises 応力分布に着目すると、剛接合は  $400 \text{ MPa}$  以上の応力が大部分に発生しているのに対し、EP 接合では接合部近傍の下フランジやウェブ下側だけに留まっており、TS 接合に関しては全く発生していないことが分かる。一方で、EP 接合および TS 接合の場合には、それぞれ上フランジ近傍の End-plate 部および Top-angle 部で塑性化が進行し、大きな応力が発生している。また、柱材のパネルゾーンに関しても、TS 接合、EP 接合、剛接合の順に塑性化が進行している。これより、同一変位時には接合部限界曲げ耐力が小さいほど柱材および梁材の損傷は低減することが分かる。実験結果においても、剛接合および EP 接合の場合には、応力が降伏点に達すると表面の黒皮に微細なひび割れが生じ、塗料が剥離するリューダースラ

インの発生を確認している。

#### 5. まとめ

- 1) 骨組の静的耐力は接合部限界曲げ耐力に対応し、TS 接合骨組、EP 接合骨組、剛接合骨組の順に大きい。
- 2) 接合部近傍の梁材のひずみは、接合部限界曲げ耐力の大きさに対応している。すなわち、剛接合骨組の場合が最も大きく、TS 接合骨組の場合が最も小さい。
- 3) 提案の数値解析手法を用いることにより、各骨組の荷重-変位関係および軸方向ひずみ分布を精度よく再現することが可能である。
- 4) 同一変位時の場合には、接合部限界曲げ耐力が小さいほど柱材および梁材の損傷を低減することができる。一方で接合部材の損傷は大きくなる。

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号 22510170) の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Kim, S.E. and Chen, W.F.: Practical advanced analysis for semi-rigid frame design, *Engineering Journal*, 1996.
- 2) Fu, F., Lam, D. and Ye, J.: Parametric study of semi-rigid composite connections with 3-D finite element approach, *Engineering Structures*, 2007.6
- 3) Zhang, Z.H., Shu, X.P., Yuan, Z.S. and Duan, Q.C.: Research status of design theory and application on beam-column semi-rigid steel structure, *Advanced Materials Research*, 2011.10
- 4) 小室雅人, 岸 徳光, 松岡健一: トップ&シートアングル接合の  $M-\theta$  関係に関する三次元弾塑性解析, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol.11, pp.623-630, 2003.11
- 5) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 6.11, ABAQUS Inc., 2011.
- 6) 鋼構造接合部設計指針, 日本建築学会, 2006.3.