# Top- & seat-angle 接合のてこ作用に及ぼす ゲージ長の影響に関する弾塑性解析

3D elasto-plastic analysis of top- and seat-angle connections for investigating effects of gauge distance on prying action

室蘭工業大学	正 員	小室	雅人	(Masato Komuro)
室蘭工業大学	学生員	佐藤	陽介	(Yosuke Sato)
室蘭工業大学	フェロー	岸	徳光	(Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学	○学生員	鈴木	優哉	(Yuya Suzuki)

## 1. はじめに

欧米諸国で広く用いられているアングル材と高力ボル トを用いる接合形式(アングル系接合)は、1)溶接作業 が不要であることより、経済性・施工性に優れること、 2)高力ボルトとアングル材の組み合わせによって剛性 や耐力を変化させることができること、3)地震時のエネ ルギー吸収効果が期待できること、等の特徴を有してい る.このようなアングル系接合に関する実験的・解析的 研究は、世界各国で数多く実施されている<sup>1)</sup>.

また、アングル系接合では、アングル材の変形に伴い、 アングル材つま先部と高力ボルト間にてこ作用 (prying action)によるてこ反力が発生し、この反力が接合部剛 性や耐力に影響を与えることが知られている<sup>2)</sup>.しかし ながら、てこ作用の詳細な挙動を実験的研究によって、 把握することは難しく、未だ不明な点も多い.一方、有 限要素法による数値解析は、それらの挙動を詳細に把握 する手法として非常に有用である.

このような観点より,本研究ではアングル系接合の てこ作用のメカニズムを明らかにすることを目的とし て, top-& seat-angle 接合に関する弾塑性解析を行った. ここでは,別途実施した静的単調載荷実験結果を数値解 析結果と比較し,その妥当性を検討した上で,接合部の てこ作用に及ぼすゲージ長 gt (アングル材かかと部か ら柱側ボルト中心位置までの距離)の影響について検 討を行った.なお,解析には構造解析用汎用プログラム ABAQUS<sup>3)</sup>を使用している.

# 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試験体の概要を示している。ここでは、アングル材のゲージ長 $g_t \approx g_t = 60$ , 105,150 mm と変化させた全3体について検討を行った。試験体名は、ゲージ長 $g_t$ を用いて表している。柱フランジ表面と梁材端部とのクリアランスは、全ての試

表-1 使用鋼材の力学的特性

		鋼種	弹性係数	ポアソン	降伏応力	引張強さ
			$E_s$ (GPa)	比vs	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
beam	web	SS	205		308	440
	flange		202		288	426
top / seat angle		400	209	0.3	285	480
bolt		F10T	206		1,019	1,086



図ー2 真応カー真ひずみ関係



図-1 試験体概要図



図-3 実験装置および計測方法

験体で同一とし、アングル材板厚と等しい 15 mm とした. なお、ボルト孔のクリアランスは2 mm である. 全ての試験体における梁材および高力ボルトは、それぞれ H400×200×8×13、F10T (M20) と固定し、高力ボルトの導入張力は設計規準<sup>4)</sup>に基づき 182 kNを目標値として、それに対応するトルクをトルクレンチを用いて導入している. アングル材と梁・柱材フランジとの摩擦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力学的特性および真応力-真ひずみ関係を示している.

## 2.2 実験装置および実験方法

図-3には、実験装置および計測方法を示している. 実験は、剛基礎に固定した柱材上に接合部を設置し、梁 材上部に載荷治具を取り付け、スクリュージャッキを用 いて変位制御方式により水平荷重を載荷している.実験 は、高力ボルトの破断あるいは、スクリュージャッキの ストローク限界まで行った.なお、実験装置や測定項目 に関する詳細については、文献 5)を参照されたい.

相対回転角 $\theta_r$ は、図-3に示すように梁端フランジ部 4隅点に固定された反射板(梁端より約10 mm の位置) を用いて、その浮き上がり量( $\delta_1$ , $\delta_2$ )をレーザ式変位 計で計測し、2つのレーザ式変位計の焦点間距離 $d_l$ を用 いて次式で算出している.

$$\theta_r = \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_l} \tag{1}$$

なお,接合部曲げモーメントMは,水平荷重 $P_H$ に載 荷点高さh(=1.5 m)を乗じて次式により算定している.

$$M = P_H \cdot h \tag{2}$$

後述の数値解析結果においても、実験結果と同様の手



図-4 要素分割状況の一例 (G60 試験体)

法に基づき,相対回転角 θ<sub>r</sub> および接合部曲げモーメン ト*M* を評価している.

#### 3. 解析概要

本解析では、試験体のモデル化を可能な限り正確に行うため、梁材、柱材、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している.図-4には、要素分割状況としてG60試験体の例を示している. 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-4に示すようにボルトヘッド部と ナットを一体化してモデル化している.また、1)梁およ び柱材とアングル間、2)ボルトヘッド部およびナットと 各部材間、3)ボルト軸部とボルト孔間には、接触・剥離 が考慮可能な接触面を定義している.また、本解析では 高力ボルトの初期張力として、実験時に高力ボルト軸部 に埋め込まれたひずみゲージから算出された実測値を与 えている.なお、接触面には摩擦を考慮し、アングル材 および梁・柱間の摩擦係数は 0.4 と設定した.

解析における境界条件は、柱底部を完全固定とし、対称切断面には、その面に対する法線方向変位成分を拘 束するように設定した.また、鋼材の応力-ひずみ関係 は、前述の材料試験結果(表-1および図-2)を参考 にして、多直線近似によって与えている.なお、鋼材の 構成則は等方硬化則、降伏条件は von Mises の降伏条件 に従うこととした.解析は、実験時の載荷点に相当する 位置に強制変位を与えることにより行った.なお、解析 には幾何学的非線形を考慮している.

#### 4. 実験解析結果および考察

#### 4.1 モーメントー相対回転角関係

図-5には、各試験体の接合部 $M-\theta_r$ 関係について解析結果と実験結果を比較して示している。図より、いずれの試験体についても、初期剛性および剛性勾配低下時の曲げモーメント値など、本解析結果は実験結果を精度よく再現していることが分かる。また、ボルト破断によって実験を終了した G60、G105 試験体に着目すると、







図-6 top angle の柱側ボルト軸力およびアングル材ー柱フランジ間接触圧の関係

数値解析結果はボルト破断に至るまでの実験結果を精度 よく再現している.これより実験結果を適切に再現でき るものと考えられる.

#### 4.2 top angle 柱側ボルト軸力と接触圧の関係

図ー6には、解析結果から得られる各試験体の top angle の柱側ボルト軸力Tおよびアングル材ー柱フランジ間の接触面における接触圧Cと相対回転角 $\theta_r$ との関係を、 $M - \theta_r$ 関係と併せて示している.また、図中の $P_b$ は実測データに基づくボルト初期導入張力である.なお、ここでは、最大曲げモーメント値までの範囲に着目して検討を行う.

図より、top angle 柱側ボルト軸力(黒線)に着目する と、ボルト最大軸力発生時における回転角 $\theta_{max}$ は、G60 試験体では約40 mrad、G105 試験体では80 mrad、G150 試 験体では120 mrad となっており、ゲージ長 $g_t$ が長くな るとともに、ボルト最大軸力発生時の回転角 $\theta_{max}$ は大 きくなる傾向にあることが分かる.また、ボルト最大軸 力 $T_{max}$ は、G60 試験体では $T_{max}$  = 310 kN、G105,G150 試 験体ではそれぞれ $T_{max}$  = 291 kN、 $T_{max}$  = 275 kN となって おり、ゲージ長が短いほどボルトに発生する軸力が大き くなることが分かる.

次に、ボルト軸力(黒線)と曲げモーメント(赤点線) の関係を見ると、ボルト軸力低下後も曲げモーメントは 増加していることが確認できる.これは、ボルト軸力最 大値時点までは高力ボルトに引張力が作用しているもの の、その後はアングル材の滑りに伴い、ボルト軸部とア ングル材が接触し、支圧接合状態に移行するためと推察 される. また,接触圧(青線)に着目すると、ゲージ長 $g_t$ が短いほど,載荷初期に急激な低下が見られる.これは,載荷初期にボルトに引張軸力が作用することにより,接触 圧が低下するためと考えられる.なお,接触圧と $M - \theta_r$ 曲線を比較すると, $M - \theta_r$ 曲線における弾性範囲までは接触圧が低下し,その後の緩やかな曲げモーメントの増大に伴い,接触圧も緩やかに増加している.これは,アングル材の変形に伴うてこ作用によって,てこ反力が大きくなることに起因している.

以上より,アングル系接合の*M*-*θ*,特性について, トップアングルに作用する曲げ引張力が小さく,アング ル材にすべりが生じるまでは,高力ボルトによる引張接 合成分が卓越しているのに対し,すべり発生後は,ボル ト軸部とアングル材の接触による支圧接合成分が卓越す るものと推察される.

# 4.3 アングル材の変形性状および接触圧分布

図-7には、ボルト軸力が最大となる時点での top angle -柱フランジ面の接触圧分布, top angle 近傍の Mises 応 力分布および実験時変形状況を示している. なお, Mises 応力分布図は、ボルト中央を通る断面で切断したもので ある. 図より、アングル材-柱フランジ面の接触圧分布 図に着目すると、ボルトゲージ長gt にかかわらず, 接触 圧(てこ反力)は柱側ボルト近傍のつま先側において大 きな値を示している.

次に, Mises 応力分布図に着目すると, 各試験体ともア ングルが大きく変形し, 梁フランジ側のボルト孔部まで 分離している様子が確認できる.また, てこ作用によっ てボルト軸部に 1,000 MPa 以上の応力が発生している.



(c) G150 試験体 ( $\theta_r = 120$  mrad)

図ー7 top angle ー柱フランジ面の接触圧分布, Mises 応力分布, 実験時変形状況(ボルト軸力最大時点)

なお、各試験体の応力分布を比較すると、ゲージ長gtが 短い場合ほど、ボルト軸部全体に引張応力が生じる傾向 にあることが分かる.なお、本解析結果における変形状 況と実験状況を比較すると、両者はよく一致している.

## 5. まとめ

- ゲージ長gt にかかわらず,解析結果は実験結果の M-θr 関係を精度よく再現可能である.
- 注側ボルト軸力はアングル材のすべりが生じるまで 増加するものの、すべりの発生とともに減少する.
- 3) すなわち、トップアングルに作用する曲げ引張力が 小さく、アングル材にすべりが生じるまでは、高力 ボルトによる引張接合成分が卓越するのに対し、す べり発生後は、ボルト軸部とアングル材の接触によ る支圧接合成分が卓越するものと考えられる。

# 参考文献

- Calado, L., Matteris, G.D., and Landolfo, R. Experimental responce of top and seat angle semi-rigid steel frame connections, Materials and Structures, 33, 499-510, 2000.
- A.Ahmed, N.Kishi, K.Matsuoka, and M.Komuro: Nonlinear analysis on prying of top- and seat-angle connectios, Journal of Applied Mechanics, 4, 227-236, 2001.8
- ABAQUS/Standard user's manual, Ver.5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.
- 4) 高力ボルト接合設計施工ガイドブック、日本建築学 会、2003
- 5) 佐藤陽介,岸 徳光,小室雅人:繰り返し載荷を受 けるトップ&シートアングル接合の履歴挙動に及 ぼすゲージ長の影響,土木学会北海道支部論文報告 集,第63号 (CD-ROM), 2007.