

# 繰り返し载荷を受けるトップ&シートアングル接合の 履歴挙動に関する数値解析的研究

Numerical analysis on hysteretic  $M - \theta_r$  behavior of top- and seat-angle connections under cyclic loading

室蘭工業大学 正員 小室 雅人 (Masato Komuro)  
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
 室蘭工業大学 ○学生員 佐藤 陽介 (Yosuke Sato)

## 1. はじめに

我が国における鋼骨組構造の柱-梁接合部は、溶接接合を用いる場合が多い。一方、欧米諸国では、地震の発生が少ないこと等により、従来よりアングル材と高力ボルトを利用する接合形式（アングル系接合）が広く利用されている。この接合形式は、溶接接合と比較してその剛性が小さいため、我が国の設計基準では、現在その使用は認められていない。しかしながら、アングル系接合は、1) 溶接作業が不要であることから経済性・施工性に優れること、2) 地震時のエネルギー吸収効果が期待できること、等から溶接接合と比べてメリットが多く、近年我が国でも研究が進められている。

このようなアングル系接合のモーメント-相対回転角 ( $M - \theta_r$ ) 関係に関する実験的研究は、世界各国で数多く実施されている。さらに、近年のコンピュータ性能の向上により、三次元有限要素法による数値解析的研究も数多く行われている。著者らも、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>1),2)</sup>。

しかしながら、これらの解析的研究は単調载荷を対象としたものが多く、繰り返し载荷を対象とする研究は非常に少ない。また、繰り返し载荷を受ける場合には、接合部  $M - \theta_r$  関係が逆S字状の履歴ループとなることが実験的に確認<sup>3)</sup>されているものの、この履歴挙動を精度よく再現可能な汎用性の高い剛性評価モデルは未だ確立されていない。

このような背景より、本研究では、繰り返し载荷を受けるアングル系接合の接合部履歴挙動を適切に表現可能

な接合部剛性評価モデルの確立に向けた基礎資料の収集を目的として、代表的なアングル系接合の1つである top- & seat-angle 接合を対象に、三次元弾塑性有限要素解析を実施した。ここでは、アングル材厚を3種類に変化させた試験体について解析を行い、接合部履歴挙動特性に及ぼすアングル材厚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>4)</sup> を使用している。

## 2. 解析概要

### 2.1 試験体概要

本研究では、アングル材厚が接合部履歴挙動特性に及ぼす影響を検討するため、ボルトの配置、ボルト径、アングル材および梁材寸法を同一とし、アングル材厚のみを 9 mm, 12 mm, 15 mm の3種類に変化させている。梁材は H400×200×13×8 を使い、柱フランジと梁材端部と

表-1 試験体パラメーター一覧

試験体名	アングル材	ボルト径
TS09	L150×100×9	M20
TS12	L150×100×12	M20
TS15	L150×100×15	M20

表-2 使用鋼材の力学的特性<sup>3)</sup>

		鋼種	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン 比 $\nu_s$	降伏応力 $f_y$ (MPa)	引張強さ $f_u$ (MPa)
beam	web	SS 400	210	0.3	385	481
	flange				325	463
top / seat angle					282	449
bolt		F10T	212		1,060	1,098

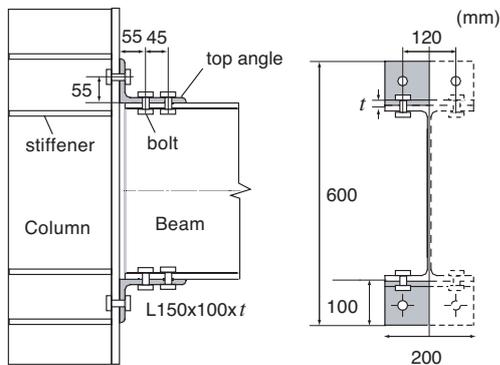


図-1 解析に用いた接合部の形状寸法

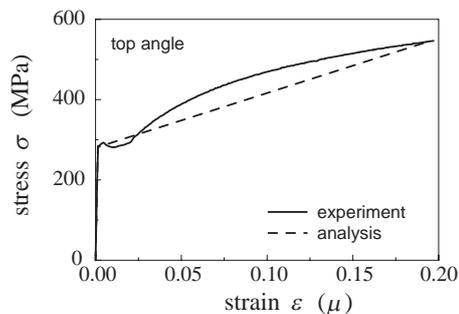


図-2 解析に用いた真応力-真ひずみ関係の一例 (top angle の場合)

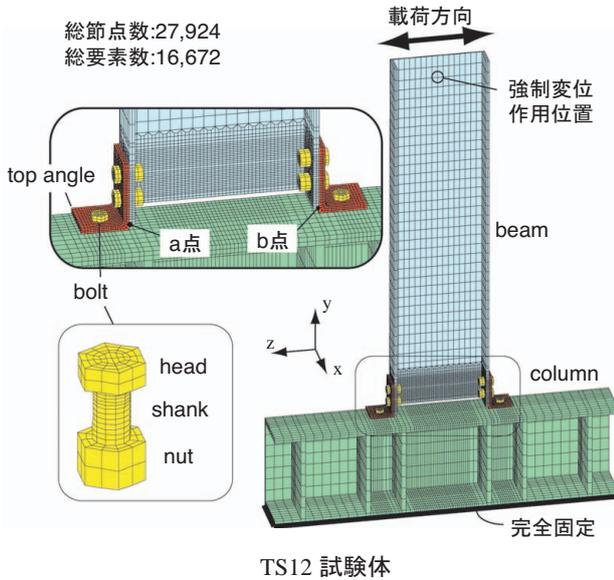


図-3 要素分割状況 (TS12 試験体)

のクリアランスは全ての試験体で12 mmとしている。なお、試験体の寸法は、著者らが行った既往の研究<sup>3)</sup>を参考に設定している。高力ボルトはF10T (M20) とし、ボルトのクリアランスは2 mmである。図-1には、試験体の形状寸法を示している。

表-1には、本解析で用いた試験体名および試験体パラメータを示している。試験体名は、アングル材厚(mm)を用いて示している。また、鋼材の物性値および真応力-真ひずみ関係は、表-2に示す既往の実験結果<sup>3)</sup>を参考に、降伏応力 $f_y$ と引張強さ $f_u$ を直線で結ぶバイリニア型に近似している。図-2には解析に用いた真応力-真ひずみ関係の一例として、top angleの場合について示している。なお、鋼材の構成則に関しては等硬化則を採用し、von Misesの降伏条件に従うこととした。

## 2.2 数値解析モデル

本解析では、試験体のモデル化を可能な限り正確に行うことを前提に、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。なお、解析モデルは対称性を考慮して1/2モデルとしている。図-3には、要素分割状況の一例として、TS12試験体の場合について示している。総要素数および総節点数は、それぞれ16,672、27,924である。

高力ボルトは、図-3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) 梁および柱材とアングル間、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間には、接触・剥離が考慮可能な接触面を定義している。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。

また、本解析では、実状に即して高力ボルトに178 kNの初期張力を導入している。ボルト張力導入方法は、ABAQUS<sup>4)</sup>に規定されている方法に基づき、以下の手順で行った。

- 1) ボルト軸部の任意断面に切断面を定義し、その切断面で仮想的にボルトを2分割する。
- 2) 次に分割された要素の断面にそれぞれ初期張力を導

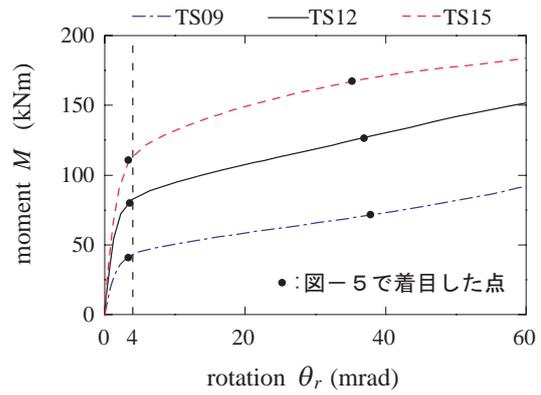


図-4 接合部曲げモーメントと相対回転角の関係

表-3 初期剛性および接合部曲げモーメント

試験体名	解析結果	
	初期剛性 <sup>*1</sup> $R_{ki}$ (MNm/rad)	曲げモーメント <sup>*2</sup> $M_{40}$ (kNm)
TS09	25.2	71.5
TS12	55.9	128.8
TS15	73.0	172.7

<sup>\*1</sup> 初期剛性は $\theta_r \approx 0.2$  mradの時の割線剛性で評価

<sup>\*2</sup>  $M_{40}$ は $\theta_r = 40$  mrad時の曲げモーメント値

入し、断面間の相対変位を含む構造全体の応力、変形状態を求める。

- 3) 構造全体の応力、変形状態を乱さないように、切断面の相対変位を自動調整する。

## 2.3 相対回転角の評価方法

相対回転角 $\theta_r$ の評価に関しては、図-3に示す梁フランジ端部のa、b点の鉛直方向変位を $\delta_1$ 、 $\delta_2$ とし、両者の距離を $d_1$  ( $= 396$  mm)として $\theta_r = (\delta_1 - \delta_2)/d_1$ で評価している。また、接合部曲げモーメント $M$ は、強制変位作用位置の水平荷重 $P_H$ に柱フランジ表面からの高さ $h$  ( $= 1,500$  mm)を乗じて算定している。

## 2.4 境界条件および解析方法

本解析では、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境界条件を設定した。

繰り返し荷重方法は、著者らによる既往の研究<sup>1)</sup>と同様の条件を設定した。すなわち、単調荷重解析の結果を踏まえ、接合部相対回転角 $\theta_r$ が1、2、5、10、15、20、30、40 mrad (振幅は各1回)となるように、変位制御により解析を行った。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<sup>4)</sup>が推奨する自動増分法を採用した。また、解析には幾何学的非線形性を考慮している。

## 3. 解析結果および考察

### 3.1 単調荷重を受ける場合

図-4には、単調荷重時の曲げモーメント( $M$ ) - 相対回転角( $\theta_r$ )関係を示している。また、表-3には、単調荷重時の $M - \theta_r$ 関係から評価される初期剛性 $R_{ki}$ 、および文献5)で規定されている相対回転角の許容下限値(40

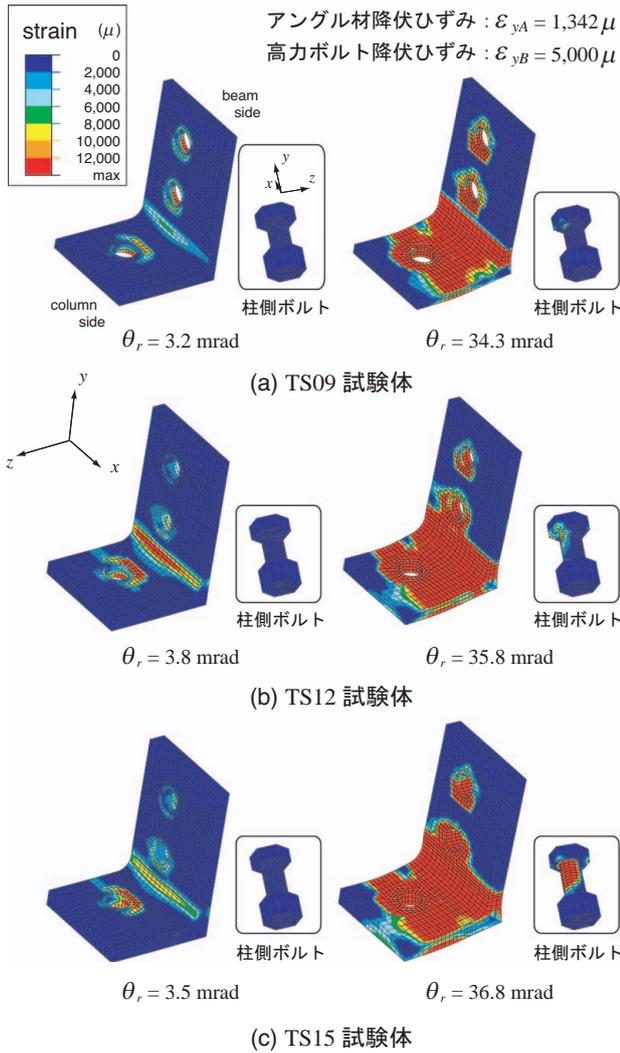


図-5 top angle および柱側ボルトの変形状と相当塑性ひずみ分布

mrad 時) の曲げモーメント  $M_{40}$  を比較して示している。

図-4 および表-3 より、40 mrad 時の曲げモーメント  $M_{40}$  は、アングル材厚が厚いほど大きく、TS15 試験体のそれは、TS09 試験体の約 2.4 倍程度となっている。また、初期剛性  $R_{ki}$  も曲げモーメントと同様に、アングル材厚の増加とともに大きく示されている。これより、アングル材厚が厚いほど、初期剛性および接合部曲げモーメントは大きくなるのが分かる。なお、図-4 に示す  $M-\theta_r$  曲線に着目すると、いずれの試験体においても  $\theta_r \approx 4 \text{ mrad}$  前後で剛性勾配が低減していることが分かる。

図-5 には、各試験体における top angle および柱側ボルトの変形状と相当塑性ひずみ分布を示している。ここでは、剛性勾配が低減し始める  $\theta_r \approx 4 \text{ mrad}$  時と相対回転角  $\theta_r = 40 \text{ mrad}$  時近傍に着目して示している。図より、剛性勾配が低減する 4 mrad 時点では、柱側ボルト孔近傍および梁側下段ボルトとかかと部の間に  $2,000 \mu$  以上のひずみが発生しており、塑性化していることが分かる。一方、柱側ボルトの塑性ひずみは、いずれの試験体においても  $2,000 \mu$  以下となっており、未だ弾性状態で

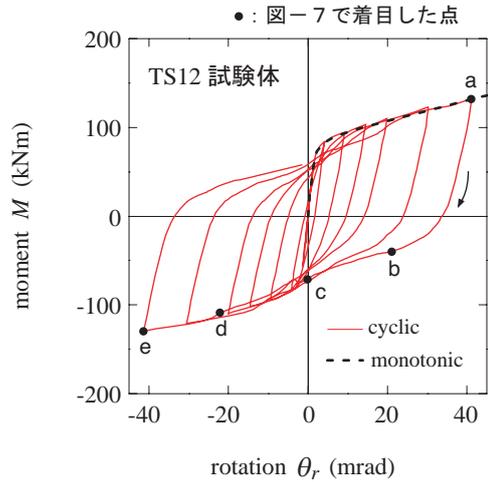


図-6 接合部  $M-\theta_r$  履歴曲線の一つ例 (TS12 試験体)

あることが分かる。

相対回転角 40 mrad 時近傍に着目すると、各試験体とも相当塑性ひずみが  $12,000 \mu$  を超える領域が、梁側かかと部から柱側ボルト孔まで広範囲に広がっていることが分かる。また、柱側ボルトに着目すると、TS09 試験体では、最大ひずみが  $4,000 \mu$  程度であり、ボルトは未だ弾性状態であるのに対し、TS12 試験体の場合には、ボルト頭部近傍に  $6,000 \mu$  程度のひずみが発生しており、一部塑性化が生じている。さらに、TS15 試験体では、ボルト軸部の広い領域に  $12,000 \mu$  以上のひずみが発生しており、ボルト軸部の塑性化が確認できる。これより、アングル材厚が厚いほど、柱側ボルトの塑性化が顕著になる傾向にあることが分かる。

### 3.2 繰り返し载荷を受ける場合

図-6 には、繰り返し载荷時の  $M-\theta_r$  履歴曲線の一つ例として、TS12 試験体の解析結果を示している。また、同図には、単調载荷解析から得られる  $M-\theta_r$  関係も併せて示している。図より、繰り返し载荷時の骨格曲線は、単調载荷時の結果とよく対応している。しかしながら、その経路は、サイクル数の増加と共に、単調载荷時よりも小さいモーメントレベルで剛性勾配が低下する傾向にあり、そのループ形状は逆 S 字状となっている。

図-7 には、top angle と seat angle の変形状および Mises 応力分布について、TS12 試験体を例に示している。ここでは、+8 サイクル目 (+40 mrad) から -8 サイクル目 (-40 mrad) の経路 (図-6, a ~ e) における結果を示している。なお、図はボルト内部の応力状態を分かり易くするために、ボルト中央断面で切断した状態で示している。

図より、top angle に着目すると、+8 サイクル目の  $\theta_r = +40 \text{ mrad}$  (a 点) では、アングル材のてこ作用によって、柱側ボルト軸部に  $1,000 \text{ MPa}$  以上の応力が発生していることが分かる。また、梁フランジ側の柱側ボルト孔部で top angle の浮き上がりが確認できる。次に、-8 サイクルに向かう途中の  $\theta_r = +20 \text{ mrad}$  (b 点) では、柱側ボルト内部の応力が減少している。また、 $\theta_r = 0 \text{ mrad}$  (c 点) では、アングル材つま先部の浮き上がりが確認される。その後、 $\theta_r = -20 \text{ mrad}$  (d 点)、および  $\theta_r = -40 \text{ mrad}$  (e

点)と負方向へ荷重が進むに従い、top angle のかかと部が柱フランジ表面と接触していく様子が確認できる。一方、seat angle に着目すると、+40 mrad から -40 mrad へと負方向へ荷重が進むに従い、seat angle のかかと部が柱フランジ表面から浮き上がり、 $\theta_r = 0$  mrad 付近からアングル材のてこ作用によって、柱側ボルトに応力が伝達されていることが確認できる。なお、seat angle における+40 mrad、および-40 mrad の変形状況は、top angle における-40 mrad、および+40 mrad 時のそれと非常に類似している。

以上より、繰り返し荷重を受ける場合のアングル材とボルト間の応力伝達状況やアングル材の変形状況などを数値解析的に確認した。

#### 4. まとめ

本論文では、繰り返し荷重を受けるアングル系接合の汎用性の高い接合部剛性評価モデルの確立に向けた基礎資料の収集を目的として、top- & seat-angle 接合を対象に三次元弾塑性有限要素解析を実施した。ここでは、特にアングル材厚の影響に着目して検討を行った。本研究により得られた結果を整理すると以下の通りである。

単調荷重を受ける場合の解析結果より、

- 1) アングル材厚が厚いほど、接合部初期剛性および接合部曲げモーメントは大きくなる。
- 2) また、アングル材厚が厚いほど、柱側ボルトに伝達される力も増大し、柱側ボルトの塑性化が顕著になる傾向がある。

繰り返し荷重を受ける場合の解析結果より、

- 3) 既往の実験結果と同様に、接合部  $M-\theta_r$  履歴曲線が逆S字状のループ形状となることを確認した。
- 4) また、アングル材とボルト間の応力伝達状況やアングル材の変形状況を数値解析的に確認した。

今後は、本解析結果を参考に、接合部の各パラメータを変化させる実験的研究を行うことにより、繰り返し荷重を受ける場合の接合部  $M-\theta_r$  関係を適切に評価可能な剛性評価モデルの構築を目指す予定である。

#### 参考文献

- 1) 小室雅人, 岸 徳光, 松岡健一: トップ&シートアングル接合の  $M-\theta_r$  関係に関する三次元弾塑性解析, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 11, pp. 623-630, 2003.11
- 2) Ali AHMED, Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, and Masato KOMURO: Nonlinear Analysis on Prying of Top- and Seat-Angle Connectios, Journal of Applied Mechanics, Vol. 4, pp. 227-236, 2001.8
- 3) 小室雅人, 岸 徳光, 松岡健一: トップ&シートアングル接合の  $M-\theta_r$  関係に関する静荷重実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 10, pp. 57-64, 2002.11
- 4) ABAQUS/Standard user's manual, Ver. 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.
- 5) 高力ボルト接合による靱性型鉄骨架構の構造設計マニュアル, 半剛接鉄骨架構の実用化検討委員会(社)日本鉄鋼連盟, 2003.

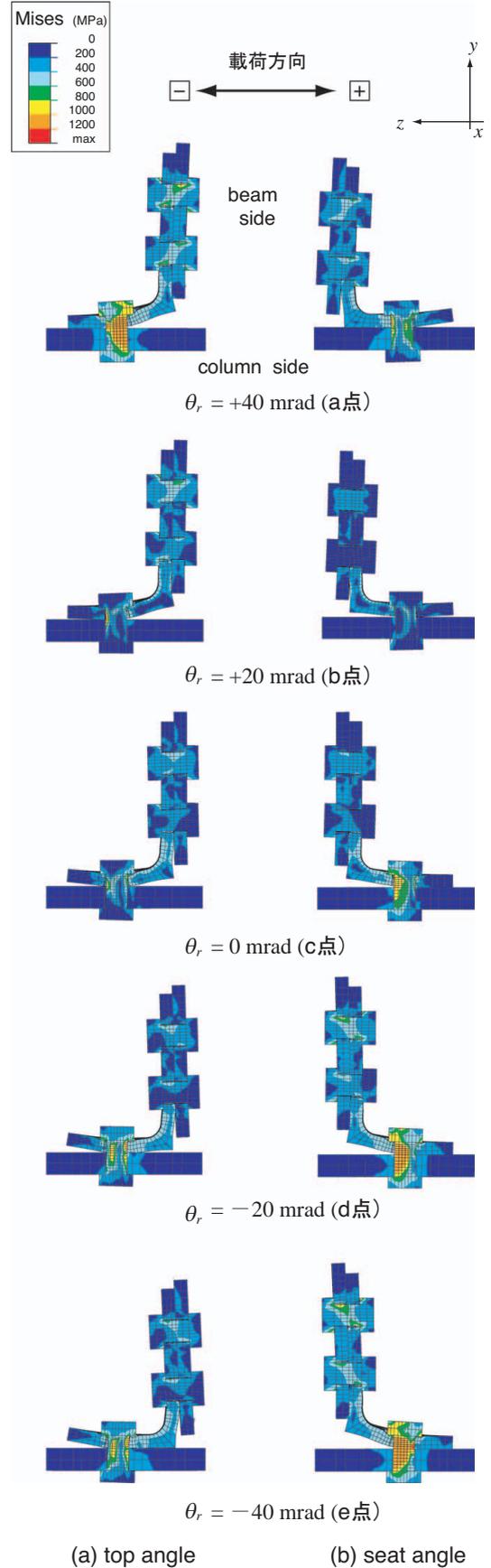


図-7 top angle と seat angle 付近の変形状況および Mises 応力分布 (TS12 試験体)