

繰り返し载荷を受ける Top- & seat-angle 接合の 履歴挙動に関する弾塑性解析

3D elasto-plastic numerical analysis on hysteretic $M-\theta_r$ behavior of top- and seat-angle connections under cyclic loading

室蘭工業大学
室蘭工業大学
札幌市役所
室蘭工業大学大学院

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
正 員 佐藤 陽介 (Yosuke Sato)
○ 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および数値解析の研究は、世界各国で数多く実施されている。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 ($M-\theta_r$) 関係を大略再現可能であることを明らかにしている¹⁾。

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したものは少ない。また、アングル系接合が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²⁾ 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。

このような観点より、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、柱側ボルト配置の異なる三種類の 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、数値解析結果を別途実施した静的繰り返し载荷実験結果と比較し、解析手法の妥当性を検討した上で、接合部履歴挙動特性に及ぼすゲージ長 g_t （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 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。試験体は、アングル材のゲージ長 g_t を $g_t = 60, 105, 150 \text{ mm}$ と変化させた全3体であり、その名称はゲージ長 g_t を用いて表している。全試験体の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。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。アングル材と梁・柱材フランジとの

表-1 使用鋼材の力学的特性

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

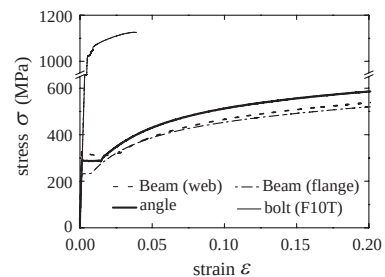


図-2 真応力-真ひずみ関係

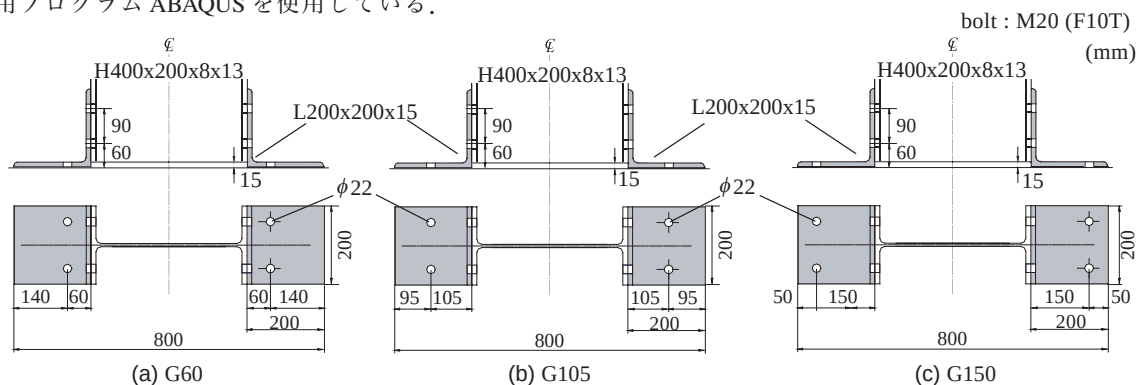


図-1 試験体概要図

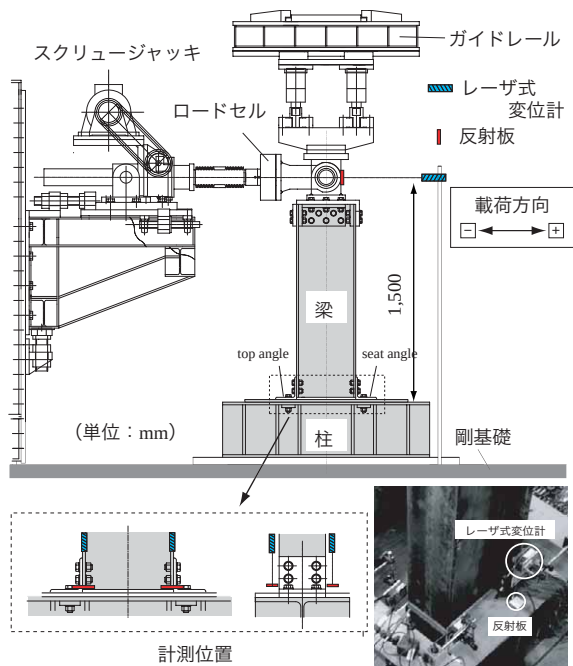


図-3 実験装置および計測方法 (G60 試験体)

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、梁材上部に荷重治具を取り付け、スクリ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。実験における測定項目は、1) 荷重作用点における水平変位 δ_H 、および水平荷重 P_H 、2) 相対回転角 θ_r 算出のための梁端フランジの浮き上がり量（鉛直方向変位）である。

繰り返し載荷時の入力変位は、別途実施した静的単調載荷実験結果を踏まえ相対回転角 θ_r が 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 mrad（振幅は各1回）となるように設定した。なお、実験は高力ボルトの破断、あるいはジャッキのストローク限界まで行った。

相対回転角 θ_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（ δ_1 , δ_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。

$$\theta_r = \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_l} \quad (1)$$

一方、接合部曲げモーメント M は、水平荷重 P_H に荷重点高さ h （=1.5 m）を乗じて算定している。なお、後述の数値解析結果においても、実験結果と同様の手法に基づき、相対回転角 θ_r 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

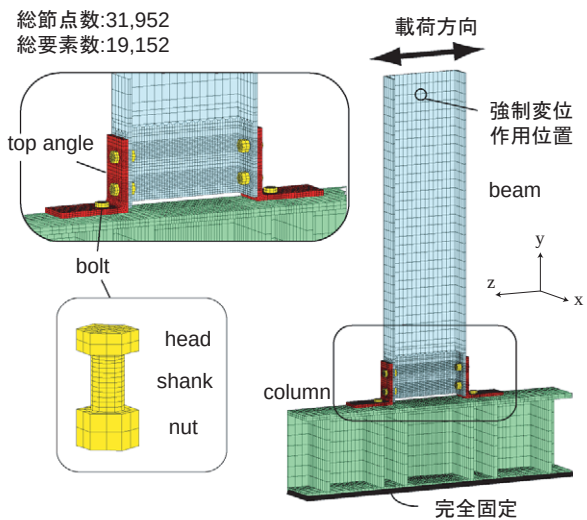


図-4 要素分割状況の一例 (G60 試験体)

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。

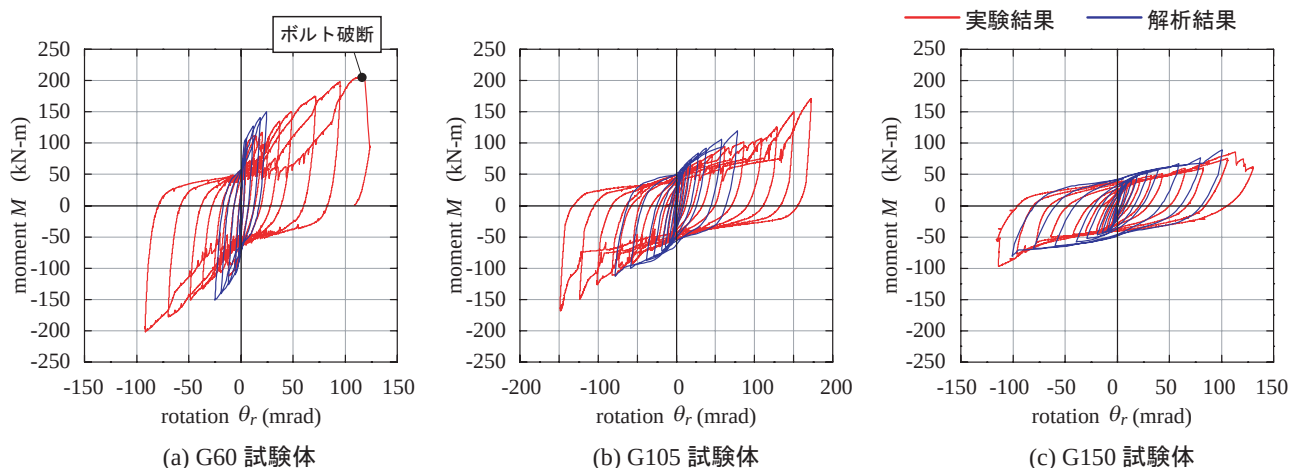
解析における境界条件は、柱底部を完全固定とし、対称切断面には、その面に対する法線方向変位成分を拘束するように設定した。また、鋼材の応力-ひずみ関係は、前述の材料試験結果（表-1および図-2）を参考に、多直線近似によって与えている。なお、鋼材の構成則は等方便化則、降伏条件は von Mises の降伏条件に従うこととした。解析は、実験時の荷重点に相当する位置に強制変位を与えることにより行った。なお、変位増分に関しては、解の収束性や計算の効率化を考慮して、ABAQUSが推奨する自動増分法を採用した。また、解析には幾何学的非線形を考慮している。

4. 実験解析結果および考察

4.1 モーメント-相対回転角関係

図-5には、各試験体の接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線について解析結果と実験結果を比較して示している。なお、解析結果は解の収束が得られた範囲までを示している。

まず、ゲージ長が短いG60試験体の実験結果に着目する。(a)図より、実験結果を見ると、サイクル数の増加とともに、除荷から再載荷の過程において、曲げモーメント値が0付近を越えると剛性が緩やかに減少し、その後再び増加する逆S字型の履歴ループ形状を示していることが分かる。また、解析結果においても実験結果と同様に逆S字型のループ形状を呈していることが確認される。しかしながら、実験および解析結果における各サイクルの最大振幅時の曲げモーメントを比較すると、後者は前者よりも大きく示されていることが分かる。これ

図-5 接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線

は後述するように、ゲージ長が短い場合にはサイクルの増大とともに、実験ではアングル材のすべりが顕著に現れ、ボルト近傍での変形状態が複雑になるのに対し、解析ではこれらの現象を適切に再現できないことが一つの要因であるものと考えられる。

次に、(b)図に示す G105 試験体に着目する。図より、実験結果において、相対回転角 θ_r の小さい範囲では、紡錘型の履歴ループ形状を呈しているものの、サイクル数の増加に伴い、 $\theta_r \geq 50$ mrad 以降では剛性が急激に増加する履歴ループとなっている。また、解析結果を見ると、G60 試験体と同様に相対回転角 θ_r が大きい領域では、実験結果よりも曲げモーメントを過大に評価する傾向にあるものの、 θ_r の小さい時点では実験結果とよく一致していることが分かる。さらに、サイクル数の増加に伴う剛性の急激な増加の傾向は、解析結果でも確認できることより、本解析結果は実験結果を比較的良好に再現しているものと考えられる。

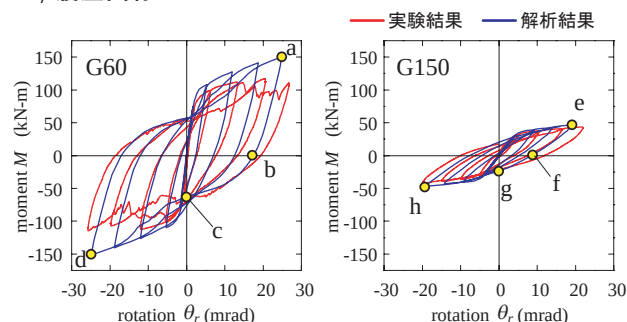
一方、ゲージ長の長い G150 試験体の実験・解析結果に着目すると、G105 試験体のような急激に剛性が増加する傾向は見られず、紡錘型の履歴ループ形状となっていることが分かる。また、解析結果は実験結果の最大振幅時モーメントも含めた $M-\theta_r$ 履歴曲線の特徴をよく再現しているものと考えられる。

これより、G60 試験体においてモーメント値に若干の差異はあるものの、本数値解析結果は実験結果の接合部 $M-\theta_r$ 履歴ループ形状を定性的には再現できているものと考えられる。

4.2 6 サイクル目までのモーメント-相対回転角関係

図-6 には、相対回転角 θ_r が ± 20 mrad 程度 (6 サイクル目) までの G60 および G150 試験体の接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線を示している。図より、ゲージ長が長い G150 試験体では、実験および解析結果ともにその履歴ループ形状は紡錘型の安定した形状となっている。

一方、ゲージ長の短い G60 試験体に着目すると、実験結果では 5 サイクル目以降にアングル材のすべりに起因する曲げモーメントの大きな変動が確認できるのに対し、解析結果では実験結果のような曲げモーメントの変動は見られず、緩やかに曲げモーメントが増加している。これは、実験におけるアングル材・部材間のすべり

図-6 接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線 ($\theta_r = \pm 20$ mrad)

現象や、それに伴うボルト孔近傍での局所変形に関して、数値解析ではこれらの現象を十分に再現できないためと考えられる。また、このように局所的に非常に強い非線形性を示す場合には、数値解析において解の収束が難しいものと推察される。このような傾向は G105 試験体の 10 サイクル目以降でも確認されている。なお、このように強い非線形性を示す実験結果を適切に再現するためには、解析モデルの要素分割状況や解析手法などについて更なる検討が必要であるものと考えられる。

4.3 変形状態および Mises 応力分布

図-7 には、解析結果の G60, G150 試験体の 6 サイクル目 (± 20 mrad) の経路 (図-6, a~h 点) における top angle と seat angle 近傍の変形状態、Mises 応力分布および正・負方向最大振幅時 (a, d, e, h 点) における top angle の変形状況について示している。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。

(a) 図より、逆 S 字型の履歴ループ形状を示す G60 試験体の場合に着目すると、正方向最大振幅時 (a 点) において、アングル材の変形に伴ってこ作用によって top angle 側のボルト軸部に 1,000 MPa 以上の応力が発生し、ボルトに塑性変形が生じていることが分かる。また、梁側のアングル材かかと部と下段高力ボルト間に 400 MPa を超える応力が作用しており、アングル材が降伏している。さらに、繰り返し载荷の影響により seat angle つま先部が浮き上がっている様子が確認できる。

次に除荷から再载荷の過程を見ると、モーメント零程度時点 (b 点) では、ボルト軸部の応力が減少し、それに伴い剛性勾配も緩やかに減少している。 $\theta_r = 0$ mrad (c

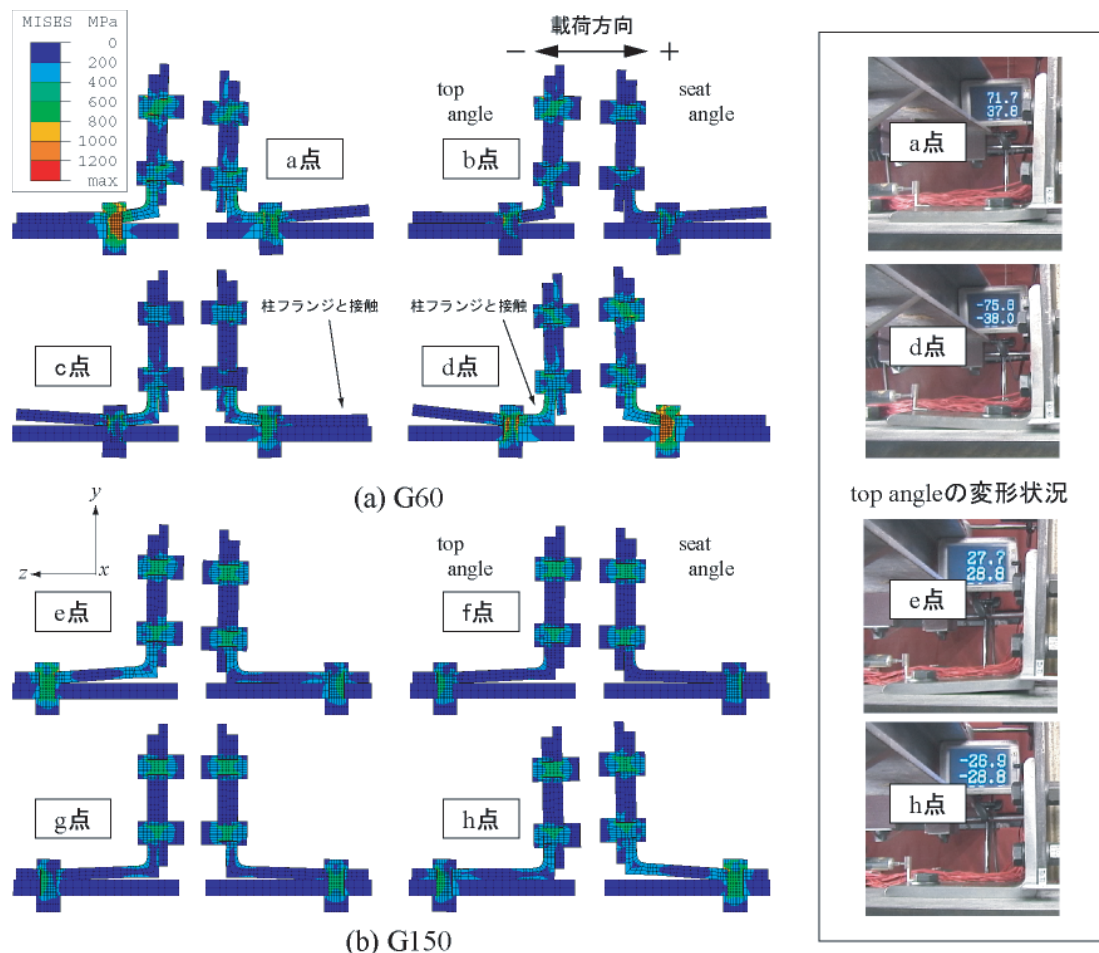


図-7 top angle と seat angle 近傍の変形状状, Mises 応力分布および実験時における top angle の変形状況

点)では, seat angle のつま先部が柱フランジと接触し, それに伴い剛性が再び増加する様子がうかがえる. さらに, 負方向最大振幅時 (d 点)では, てこ作用によって seat angle 側のボルトに 1,000 MPa 以上の応力が生じていることが確認できる. また, top angle 側に着目すると, アングル材かかと部と柱フランジ面が接触することによって, 塑性変形したアングル材が浮き上がり, ボルト軸部に応力が発生している様子が確認できる. さらに, top angle 梁側かかと部が梁フランジ表面から離れている.

一方, 紡錘型の履歴ループ形状を示す G150 試験体の場合に着目すると, 除荷再載荷の過程 (図-6, e~h 点)において, いずれの点においてもアングル材かかと部の浮き上がりが見られるものの, 両アングル材のつま先部は柱フランジ面に接触した状態となっている. また, ボルト軸部には, 1,000 MPa 以上の応力の発生は見られず, 弾性範囲内であることが分かる.

また, 各試験体の正・負方向最大振幅時における top angle の変形状況について実験結果と解析結果を比較すると, G60 試験体では正方向最大振幅時のアングル材かかと部の浮き上がりや負方向最大振幅時におけるつま先部の浮き上がり状況などをほぼ再現していることが分かる. また, G150 試験体に関しても, G60 試験体と同様, 解析結果は実験結果をほぼ再現していることが確認される.

以上より, 接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線における逆 S 字型の

履歴ループ形状は, アングル材および柱側高力ボルトの塑性変形と密接な関係があること, また, その剛性勾配の増加は, 曲げ引張側のアングル材つま先部と柱フランジの接触によって生じるてこ作用 (塑性変形したボルトヘッド部とアングル材が再び接触すること) に起因するものと考えられる.

5. まとめ

- 1) ゲージ長が短い場合にはモーメント値に若干の差異はあるものの, 数値解析結果は実験結果の接合部 $M-\theta_r$ 履歴ループ形状を定性的に再現可能である.
- 2) 繰り返し载荷を受けるアングル材および高力ボルトの変形状況や発生応力分布を数値解析的に確認した.
- 3) 接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線における逆 S 字型の履歴ループ形状は, アングル材および柱側高力ボルトの塑性変形と密接な関係があり, その剛性勾配の増加は, 曲げ引張側のアングル材つま先部と柱フランジの接触によって生じるてこ作用に起因するものと考えられる.

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, 11, 623-630, 2003.11
- 2) 小室雅人, 岸 徳光, 松岡健一: トップ&シートアングル接合の $M-\theta_r$ 関係に関する静载荷実験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol.10, pp. 57-64, 2002