

繰り返し载荷を受けるアングル系接合の履歴挙動に関する弾塑性解析

(株)復建技術コンサルタント 正 会 員 ○鈴木 優哉 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光
室蘭工業大学 正 会 員 小室 雅人 札幌市役所 正 会 員 佐藤 陽介

1. はじめに

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を目的として、柱側ボルト配置の異なる top- & seat-angle 接合を対象に、2種類の硬化則を適用した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 ($M-\theta_r$ 特性) に及ぼすゲージ長 (柱側の高力ボルトゲージ位置) 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

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のみを 60, 105, 150 mm と変化させた全3体であり、その名称はゲージ長を用いて表している。高力ボルトは、全て F10T (M20) を用いた。実験は、図-2 に示すように、剛基礎に固定した柱材上に接合部を設置し、梁材上部に载荷治具を取り付け、スクリージャッキを用いて変位制御方式により载荷した。入力変位は、単調载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。

3. 数値解析概要

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-2 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、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、各部材間には、接触・剥離が考慮可能な接触面を定義した。接触面には摩擦を考慮し、

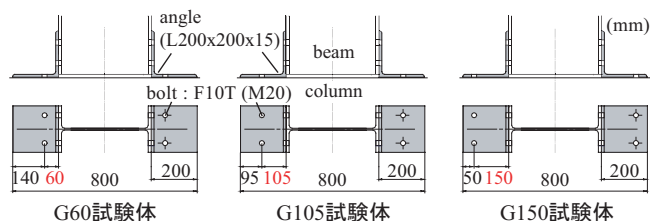


図-1 試験体概要図

アングル材および梁・柱間の摩擦係数は 0.4 と設定した。

鋼材の応力-ひずみ関係は、材料試験結果を参考にし、パイリニア型に近似している。鋼材の構成則は、等方硬化則および移動硬化則を適用した場合について検討を行った。また、境界条件は、柱底部を完全固定とし、対称切断面には、連続性を満たすように設定した。解析は、実験時の载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、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。

4. 実験解析結果および考察

図-3 には、各試験体の接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線に関する解析結果と実験結果を比較して示している。なお、実験解析結果は、G60 試験体において解の収束が得られた ± 20 mrad 程度 (6 サイクル目) の範囲までを示している。

図より、ゲージ長が短い G60 試験体の解析結果に着目すると、実験結果と同様に、除荷から再载荷の過程において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呈していることが分かる。しかしながら、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、解析結果は実験結果よりも大きく示されている。これは、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、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強い非線形性を示す場

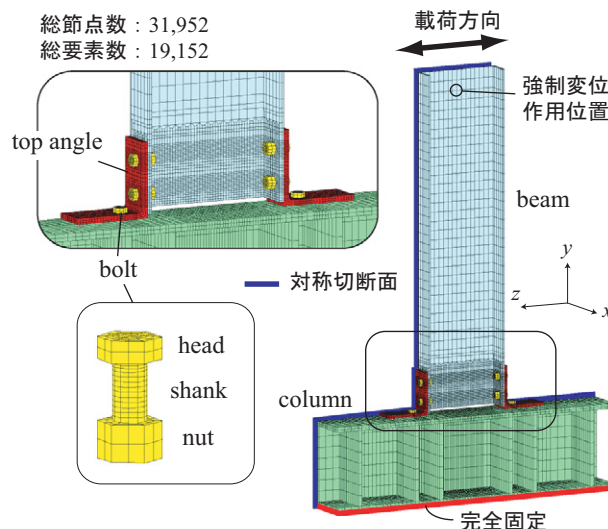


図-2 要素分割状況の一例 (G60 試験体)

キーワード：アングル系接合、繰り返し载荷、 $M-\theta_r$ 特性、有限要素法、三次元弾塑性解析

連絡先：〒050-8585 室蘭市水元町 27-1 室蘭工業大学 建設システム工学科 TEL 0143-46-5230 FAX 0143-46-5227

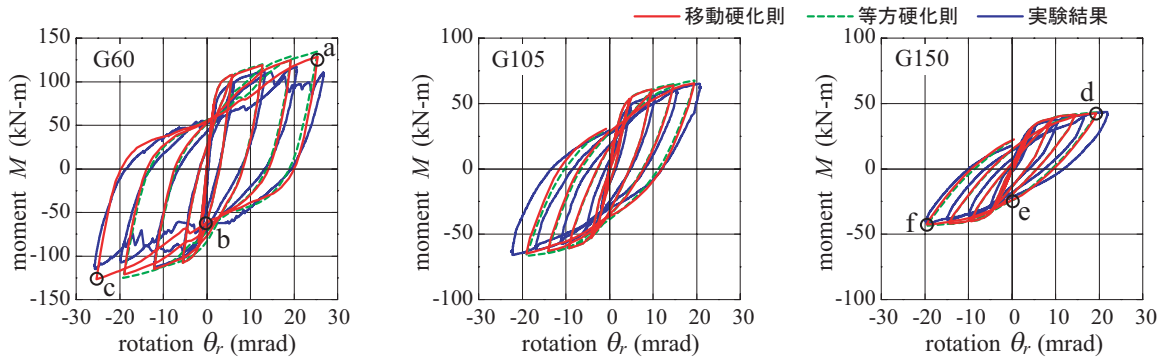


図-3 接合部曲げモーメント-相対回転角関係

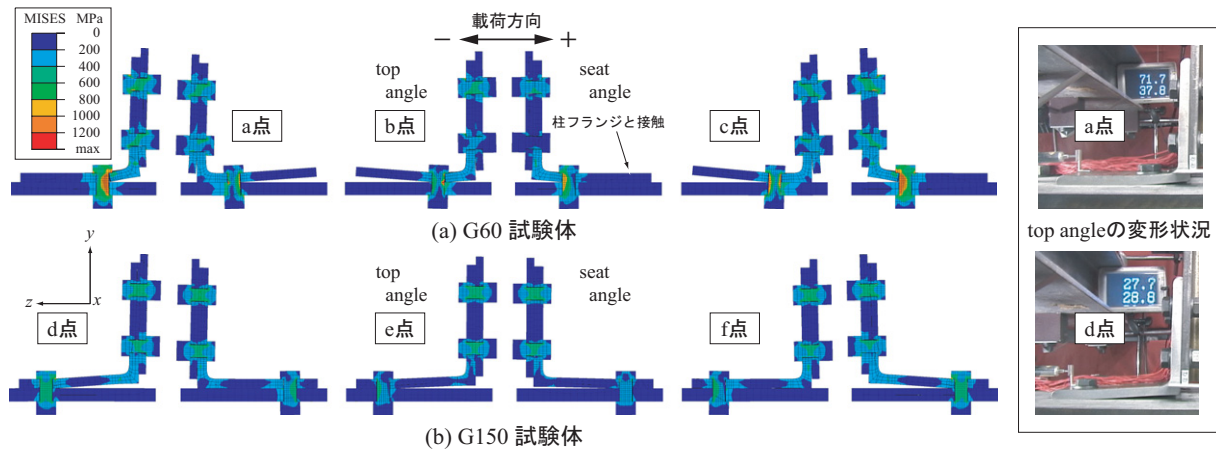


図-4 top angle と seat angle 近傍の変形状状, Mises 応力分布および実験時における top angle の変形状況

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。一方、G105, G150 試験体の解析結果に着目すると、紡錘型の履歴ループ形状を示しており、実験結果の $M-\theta_r$ 特性をよく再現しているものと考えられる。

また、構成則の差異による影響を検討すると、塑性化が進行した5サイクル目以降においては、移動硬化則を用いる場合が等方硬化則を用いる場合よりも、曲げモーメント値が若干小さな値を示し、かつ実験結果に近い値を示していることが分かる。

以上より、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、数値解析結果は移動硬化則を適用することにより実験結果の $M-\theta_r$ 履歴ループ形状を定性的には再現可能であると考えられる。

図-4 には、移動硬化則を用いた場合の6サイクル目の経路（図-3, a～f点）におけるアングル材近傍の変形状状とその Mises 応力分布および a, d 点における top angle の変形状況について示している。

(a) 図より、逆 S 字型の履歴ループ形状を示す G60 試験体の場合に注目すると、正方向最大振幅時 (a 点) において、アングル材の変形に伴うてこ作用によって top angle 側のボルト軸部に 1,000 MPa 以上の応力が発生し、ボルトが塑性変形していることが分かる。また、seat angle つま先部が浮き上がっている様子が確認できる。次に負方

向への荷重過程を見ると、 $\theta_r = 0$ mrad (b 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、c 点では、曲げ引張を受ける 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。

一方、紡錘型の履歴ループ形状を示す G150 試験体の場合に注目すると、いずれの点においても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おり、ボルト軸部に発生する応力も小さい。

また、各試験体の正方向最大振幅時 (a, d 点) 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、アングル材かかと部の浮き上がり状況など、解析結果は実験結果をほぼ再現していることが分かる。

以上より、接合部 $M-\theta_r$ 曲線における逆 S 字型の履歴ループ形状は、アングル材つま先部のてこ作用と、それに伴うボルトの塑性変形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、数値解析結果は移動硬化則を用いることで実験結果の履歴形状を再現可能である。
- (2) 接合部 $M-\theta_r$ 曲線における逆 S 字型の履歴ループ形状は、アングル材つま先部のてこ作用と、それに伴うボルトの塑性変形に起因するものと考えられる。