

繰り返し荷重を受ける top & seat-angle 系接合の履歴挙動に関する解析的研究

Numerical study on hysteretic $M - \theta_r$ behavior of top- & 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 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)

1. はじめに

我が国における鋼骨組構造の柱-梁接合部は、剛接合に近づけるために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、一般に溶接接合と比較して接合部剛性が小さいことから骨組の変形量が増大する傾向にある反面、1) 経済性・施工性に優れること、2) 剛性や最大耐力をコントロールできること、3) 地震時のエネルギー吸収効果が期待できること、等から近年我が国でも再び注目されている。

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。一方、近年のコンピュータ性能の飛躍的な向上や汎用構造解析プログラムの普及によって、3次元有限要素法を用いた数値解析的な研究が行われている^{1)~4)}。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⁴⁾。しかしながら、これらの知見は、全て変位を一方に増加させる単調荷重状態について得られたものであり、地震時の挙動特性を評価する上で重要となる繰り返し荷重状態に関する検討は十分に行われていない。

このような観点より、本研究では、繰り返し荷重を受ける top- and seat-angle 系接合の $M - \theta_r$ 特性を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として、web angle の長さが異なる3種類の試験体を対象に3次元弾塑性有限要素解析を実施した。ここでは、モーメント-相対回転角関係の他、アングル材のひずみ分布等について、別途実施した静的繰り返し荷重実験結果⁵⁾と比較することにより、その妥当性を検討している。なお、解析には構造解析用汎用プログラム ABAQUS⁶⁾を使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究では、web angle の有無およびその長さの異なる3種類の接合部について数値解析を実施している。図1には各試験体の概略図を示している。梁材、top/seat angle および web angle の形状寸法は、それぞれ H400×200×13×8, L150×100×12 および L90×90×7 と固定し、web angle 長のみを変化させている。また、使用した高力ボルトは F10T (M20) であり、導入張力を 178 kN とし、それに対応する 480 N-m のトルクをトルクレンチを用いて導入している。なお、ボルトのクリアランスは 2 mm である。試験体名は、web angle 長 (cm) を用いて示している。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

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 | web | SS 400 | 210 | 0.3 | 385 | |
| | flange | | | | 463 | |
| top / seat angle | | | | | 282 | 449 |
| web angle | | 209 | | | 315 | 469 |
| bolt | F10T | 212 | | | 1,060 | 1,098 |

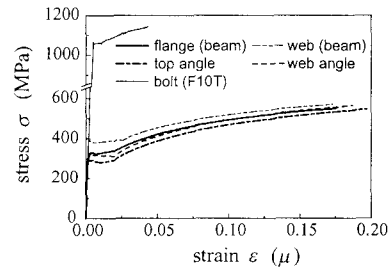


図2 真応力-真ひずみ関係

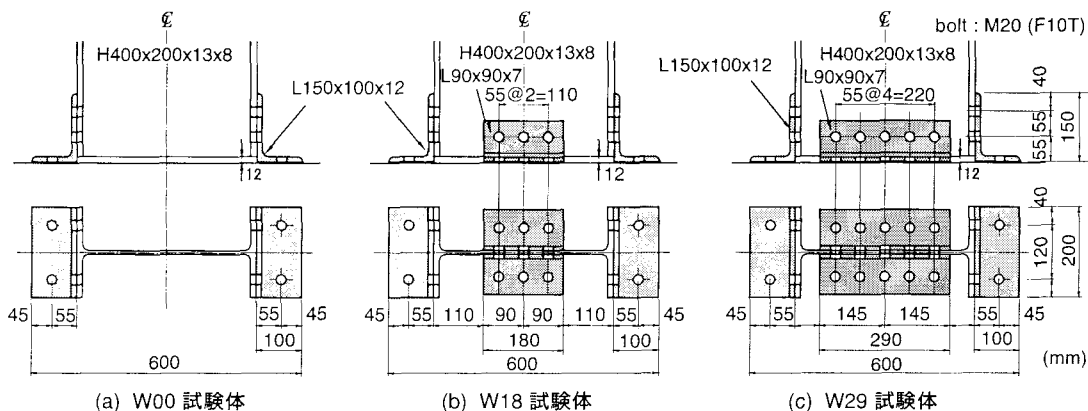


図1 接合部の概略、形状寸法および試験体名

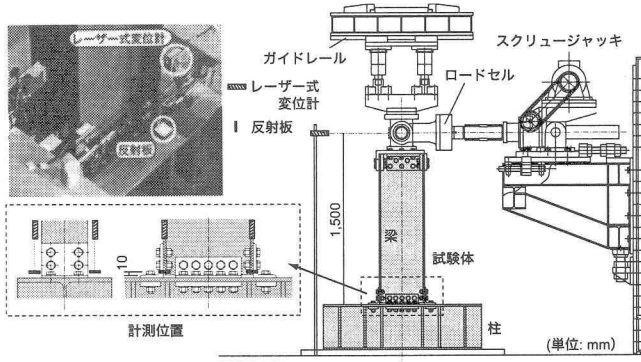


図3 実験装置および計測方法

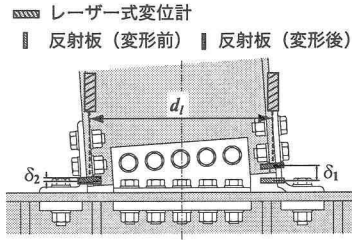


図4 相対回転角の評価方法

その真応力-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。本実験では、柱材の変形を拘束しアンクル材の変形に基づいた接合部だけの挙動特性の把握を目的に、柱材を模擬した補剛されたH形鋼上（以後、柱部）に接合部を設置している。

実験は、電動スクリージャッキを用いて、柱部から1.5 mの高さの位置に水平荷重を与えることにより行っている。水平荷重載荷点部にはスイベルを設置し回転を拘束しないようにしている。また、荷重方向に対する直角方向へのずれは、ガイドレールを用いることにより拘束することとした。測定項目は、荷重載荷点の水平変位および水平荷重、接合部相対回転角 θ_r を評価するための梁端フランジの浮き上がり量（鉛直方向変位）、アンクル材に発生するひずみ成分である。なお、変位測定にはレーザー式変位計を使用している。

実験は、別途実施した単調荷重実験結果⁵⁾を踏まえ、相対回転角 θ_r が1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 mradとなるように変位振幅（振幅は各1回）を設定している。なお、荷重は変位制御方式で載荷し、計測はアンプ内蔵のデジタルレコーダを用いて連続的に一括収録している。

2.3 相対回転角の評価方法

本実験では、相対回転角 θ_r を可能な限り正確に評価することを目的に、図3に示すように梁端フランジ部の4隅点（梁端より約10 mmの位置）に反射板をネジで固定し、レーザー式変位計を用いてそれらの鉛直方向変位を測定している。

相対回転角 θ_r は、図4に示すように両フランジにおける変位測点間距離を d_1 、それぞれの鉛直方向変位を δ_1 、 δ_2 とすると、次式で計算される。

$$\theta_r = \frac{\delta_1 - \delta_2}{d_1} \quad (1)$$

なお、図3からも明らかのように4隅点の鉛直方向変位

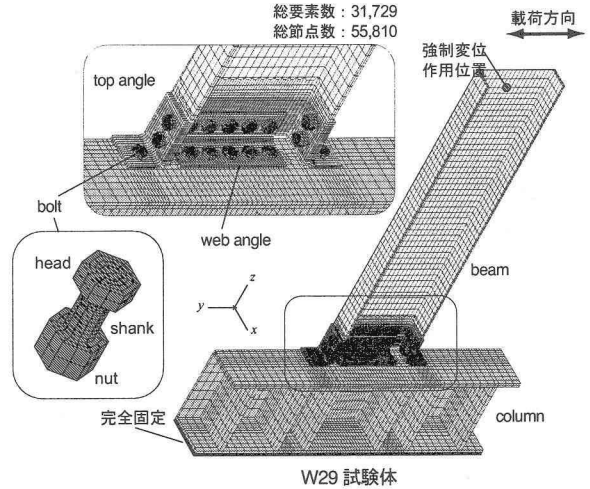


図5 要素分割状況（W29 試験体）

を測定していることから、2つの相対回転角が算出可能となる。本研究では、相対回転角 θ_r としてこれらの平均値を用いることとした。また、接合部曲げモーメント M は、水平荷重 P_H に載荷点までの高さ h を乗じて次式により算定している。

$$M = P_H \cdot h \quad (2)$$

なお、後述の数値解析においても、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. 数値解析仮定

3.1 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、アンクル材および高力ボルトを全て固体要素を用いてモデル化することとした。図5には要素分割状況の一例としてW29試験体の場合について示している。解析モデルは対称性を考慮して構造全体の1/2とした。総要素数および総節点数は、試験体によって異なり、それぞれ20,658～31,729、36,119～55,810である。

3.2 境界条件、物性モデルおよび解析方法

解析では、実験条件と同様に図5に示すように、柱の定着側フランジ部を完全固定とし、対称切断面には連続性が満足するように境界条件を設定した。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、降伏応力と最大応力点を直線で結ぶバイリニア型に近似している。ここでは、鋼材の構成則による接合部挙動特性への影響を検討するために、等方硬化則および移動硬化則の2種類について解析を行い、実験結果との比較、検討を行っている。また、降伏条件はvon Misesの降伏条件に従うこととした。

解析は、実験条件と同様に載荷点に相当する位置を変位制御させることにより実施している。なお、本数値解析では相対回転角 θ_r が ± 40 mradとなる8サイクル目までを対象としている。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⁶⁾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。

3.3 高力ボルトのモデル化と接触面の定義

図6には、top angleにおける要素分割と初期張力導入後における高力ボルトのMises応力分布を示している。高力

ボルトは、図5あるいは図6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、図6に示すように、1) 梁および柱材とアンクル材間、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。なお、高力ボルトには、実験条件と同様に178 kNの初期張力を導入した。図より、張力導入時のボルト内部の応力状態やアンクル材に応力が伝達されている様子が確認できる。

4. 解析結果および考察

4.1 モーメント-相対回転角関係

図7には、各試験体の $M-\theta_r$ 履歴曲線とその包絡線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、各サイクルの最大振幅時における曲げモーメントについて

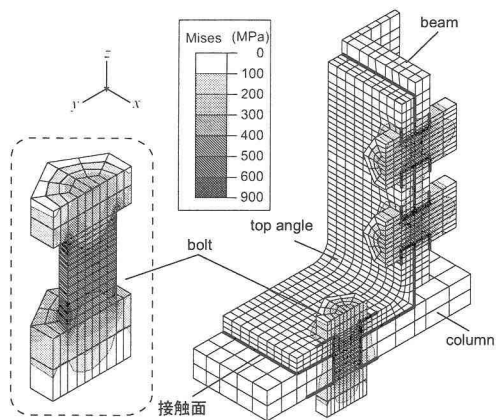


図6 top angle の要素分割状況と初期張力導入後における Mises 応力分布

解析結果と実験結果を比較すると、web angle の有無およびその大きさにかかわらず、両者は概ね一致していることが分かる。一方、除荷から再載荷に至る分布性状に着目すると、解析結果の除荷勾配は実験結果と一致しているものの、その後の分布性状に関しては、解析結果が実験結果よりも小さなモーメントレベルで剛性勾配が低下しており、履歴ループの形状を適切に再現するまでには至っていないことが分かる。

また、鋼材の構成則の差異による影響について比較すると、(b) 図に示す包絡線分布より、相対回転角 θ_r の小さい領域では、両者とも実験結果とほぼ等しい分布特性を示しているものの、塑性化が進行した $\theta_r \geq 20$ mrad の領域においては、等硬化則を用いる場合が移動硬化則を用いる場合よりも若干大きな値を示し、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、以後の考察は等硬化則を用いる場合の結果について実験結果との比較検討を行うこととする。

4.2 ひずみ-相対回転角関係

図8には、W00 試験体を対象に top angle に貼付した2枚のひずみゲージ出力とサイクル数の関係について、解析結果と実験結果を比較して示している。なお、図の横軸は top angle が曲げ引張を受ける場合のサイクル数で整理している。また、解析結果のひずみ値は、実際にひずみゲージが貼付された位置に近接する要素の節点ひずみを補間して算出している。

図より、実験結果はサイクル数の増大とともに、梁側では引張ひずみが、柱側では圧縮ひずみが発生していることが分かる。特に梁側のひずみは+2サイクル目以降、ほぼ線形的に増大している。一方、解析結果は実験結果に見ら

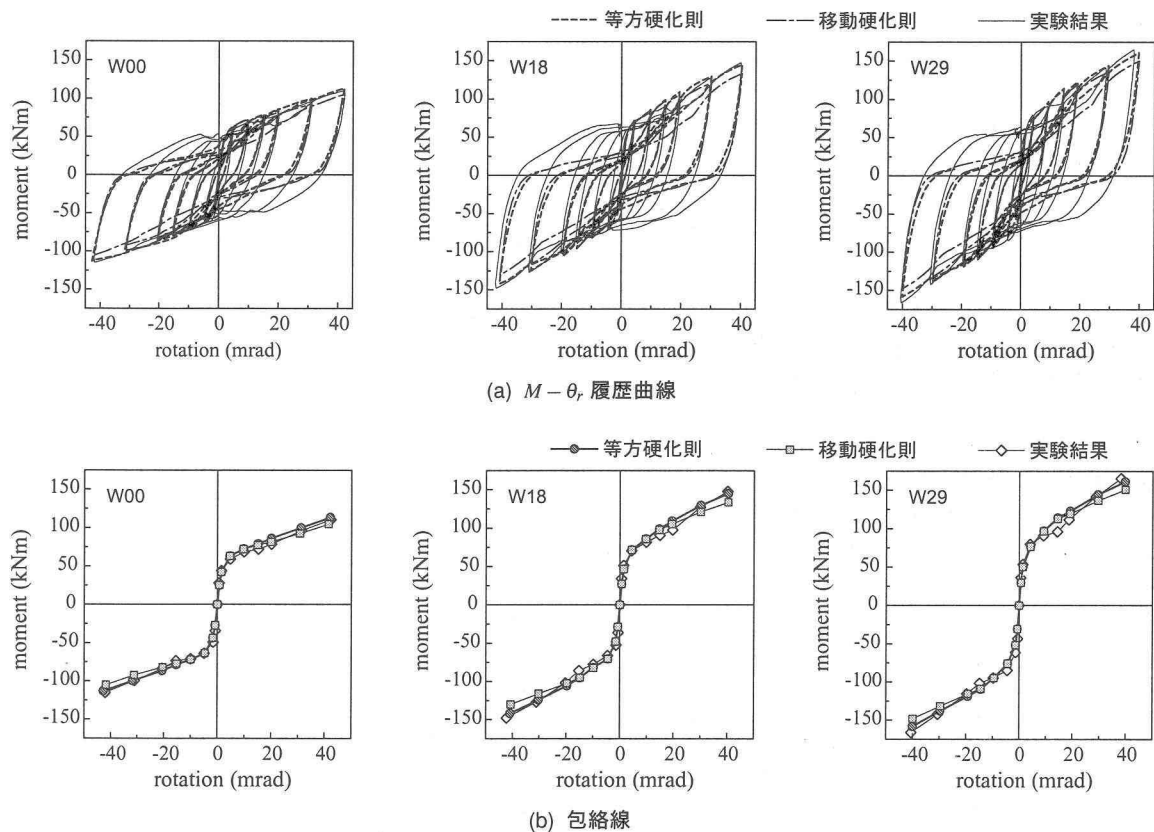


図7 接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線の比較

れる梁側の引張りひずみや柱側の圧縮ひずみ分布と対応してしており、定性的には実験結果をほぼ再現可能であることが分かる。

図9には、W00試験体におけるtop angleの変形状況と相当塑性ひずみ分布について代表的なサイクルの結果を示している。図より、top angleの塑性化は、梁側の下段ボルトとかかと部間の領域から始まり、サイクル数の増大とともにその領域が徐々に拡大し、柱側のボルト孔近傍まで広がっていく様子が見えてくる。

4.3 top angleの変形状況

図10には、top angleの変形状況の一例として、W29試験体の正負8サイクル目における解析結果を実験結果と比較して示している。図より、曲げ引張時におけるtop angleのかかと部の浮き上がり状況（a図）や、曲げ圧縮時にお

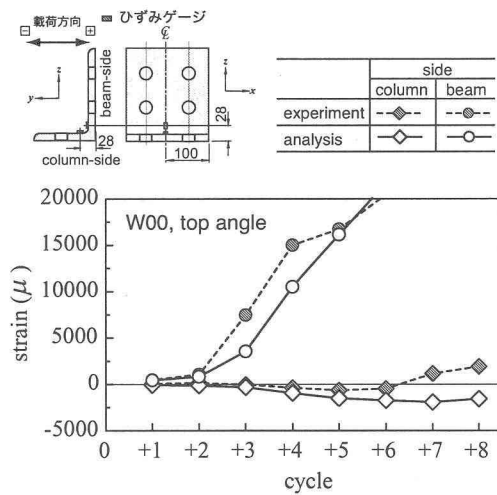


図8 各サイクルにおけるtop angleのひずみ分布 (W00試験体)

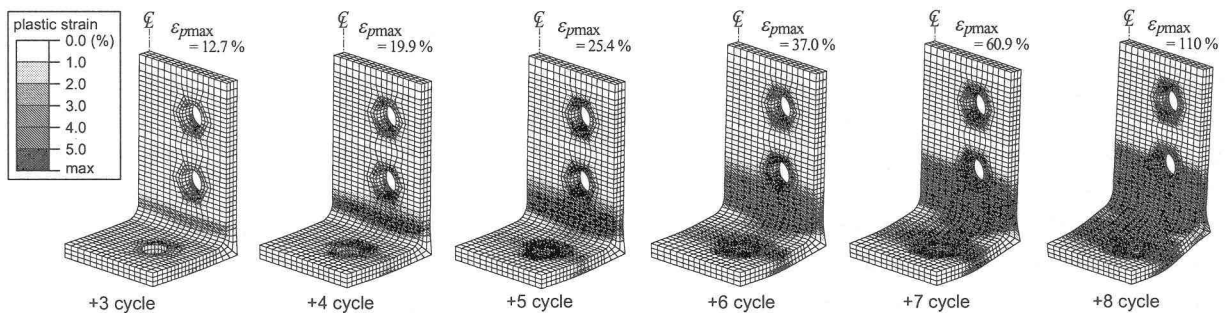


図9 top angleの変形状況と相当塑性ひずみ分布 (W00試験体)

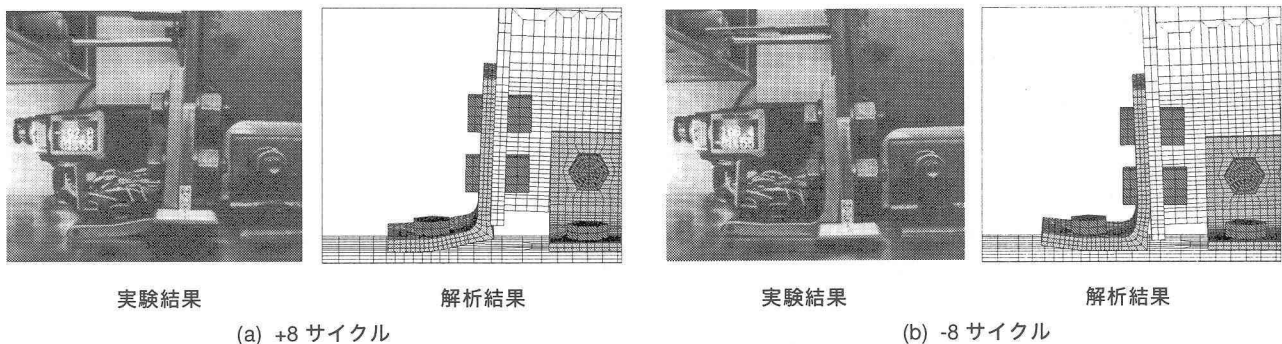


図10 top angleの変形状態に関する解析結果と実験結果の比較 (W29試験体)

る柱側つま先部の浮き上がり状況（b図）など、解析結果は実験結果の変形状態をほぼ再現していることが分かる。

5. まとめ

- 1) 弾塑性有限要素法による数値解析結果は、高力ボルトの初期張力を考慮し、梁および柱材とアングル材間に接触面を定義することによって、web angleの有無やその大きさにかかわらず、実験結果のモーメント-相対回転角関係に関する包絡線を概ね再現可能である。
- 2) アングル材のひずみ分布に関しては、実験結果を定性的に概ね再現可能である。
- 3) また、繰り返し荷重を受ける場合の接合部の変形状態をほぼ適切に再現できることが明らかになった。

参考文献

- 1) Kishi, N., Ahmed, A., Yabuki, N., and Chen, W.F.: Nonlinear finite element analysis of top- and seat-angle with double web-angle connections., *International Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 12, No. 2, pp. 201-214, 2001.
- 2) Citipitioglu, A.M., Haj-Ali, R.M., and White, D.W.: Refined 3D finite element modeling of partially restrained connections including skip, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp. 995-1013, 2002.
- 3) 李 英姫, 所 真弘, 小野徹郎: アングル材を用いた柱梁半剛接合部の繰返し曲げ性状, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 10, pp. 65-72, 2002.11.
- 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-θ, 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.
- 5) 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-θ, 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.
- 6) ABAQUS/Standard user's manual, Ver. 5.8, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998.