

繰り返し荷を受ける top & seat-angle 系接合の履歴挙動に関する実験的研究

Experimental study on hysteretic $M-\theta$ 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-梁接合部には、地震時における接合部の剛性低下を防ぐ目的で溶接接合が広く利用されている。しかしながら、近年の巨大地震において溶接部近傍に亀裂あるいは破断が発生し、さらに脆性的な破壊が生じる場合のあることが確認されている。

一方、欧米各国では、溶接接合の他に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）が広く普及している。この接合形式は、接合部剛性が溶接接合等の剛結接合に比べて小さいことより、骨組全体の変形量が増大する傾向にあること等の欠点を有している。しかしながら、①現場での溶接作業が不要であることから、品質管理の問題が少なく、施工性・経済性に優れた接合方法であること、②アングル材寸法やボルト径およびその配置により、接合部剛性や最大耐力を容易に変化させることができること、③大きな履歴減衰が期待できることから、地震時のエネルギー吸収能力に優れていること、等が明らかになっている。

本研究は、このようなアングル系接合の履歴挙動特性を実験的に把握することを目的として、top- and seat-angle 接合を対象として2種類の静荷重実験（単調および繰り返し荷重実験）を実施した。ここでは、特に繰り返し荷重を受ける場合の接合部履歴挙動に着目し、web angle の有無およびその大きさが、それらにおよぼす影響について検討を行っている。なお、単調荷重実験結果の詳細については、文献1)を参照されたい。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究では、web angle の有無が接合部 $M-\theta$ 関係におよぼす影響について検討を行うため、3種類の接合部について実験を実施している。図-1に各試験体の概要図を示して

いる。梁材、top angle（または 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 kNm 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。試験体名の第1項目は、web angle 長を、第2項目は荷重方法（-m：単調荷重、-c：繰り返し荷重）を示している。図-2および表-1には、引張試験により得られた使用鋼材の真応力-真ひずみ関係およびその力学的特性を示している。

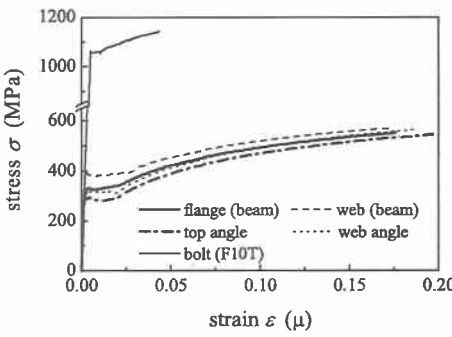


図-2 真応力-真ひずみ関係

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	481
	flange				325	463
	top / seat angle				282	449
	web angle				315	469
bolt		F10T	212		1,060	1,098

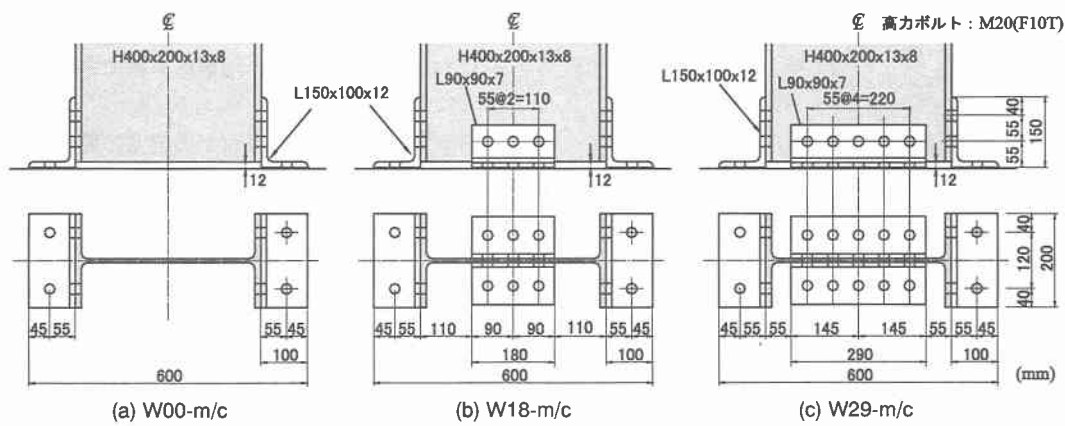
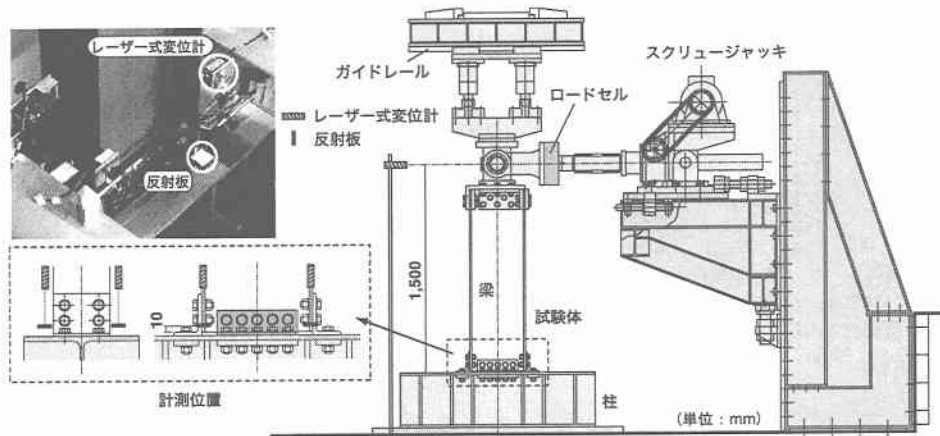
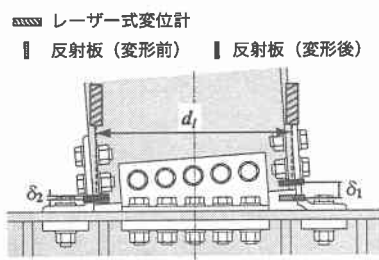


図-1 接合部の概要、形状寸法および試験体名



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

2.2 実験装置および実験方法

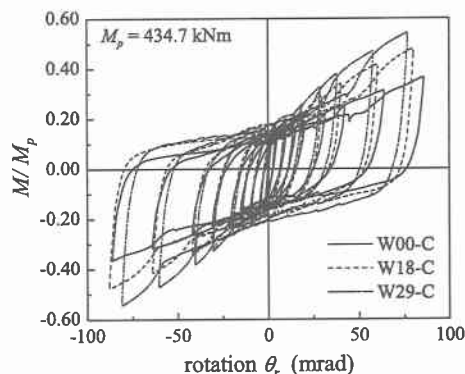
本研究では、柱材の変形を拘束しアンゲル材の変形に基づいた接合部のみの挙動特性の把握を目的に、柱材を模擬した補剛された H 形鋼上（単に柱部）に接合部を設置することとした。図－3 には、実験装置および計測方法を示している。実験は、電動スクリージャッキを用いて、柱部から 1.5 m の高さの位置に水平荷重を与えることにより行っている。水平荷重載荷点にはスイベルを設置し回転を拘束しないようにしている。また、載荷方向と直角方向への変位は、ガイドレールを用いることにより拘束することとした。

実験における測定項目は、荷重載荷点における水平変位および水平荷重、接合部の相対回転角 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）の他、アンゲル材に発生するひずみ成分である。なお、各点の変位測定にはレーザー式変位計を使用している。

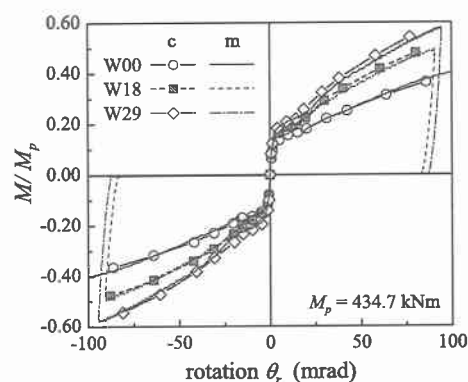
単調載荷実験では、ボルト破断が生じた W00-m 試験体を除き、安全性を考慮して水平変位が 145 mm 程度に達した時点で終了している。また、繰り返し載荷実験では、単調載荷実験結果を踏まえ、相対回転角 θ_r が 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80 mrad となるように変位振幅（振幅は各 1 回）を設定している。なお、水平荷重は変位制御方式で載荷しており、計測はアンプ内蔵のデジタルレコーダを用いて一括収録している。

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梁端フランジ部各点の鉛直方向変位を測定している。



(a) $M - \theta_r$ 履歴曲線



(b) 包絡線

図－5 接合部 $M - \theta_r$ 履歴曲線の比較

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定点間距離を d_l 、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。

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

なお、本実験では、図－3 から明らかなように 4 隅点の鉛直方向変位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。なお、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。

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

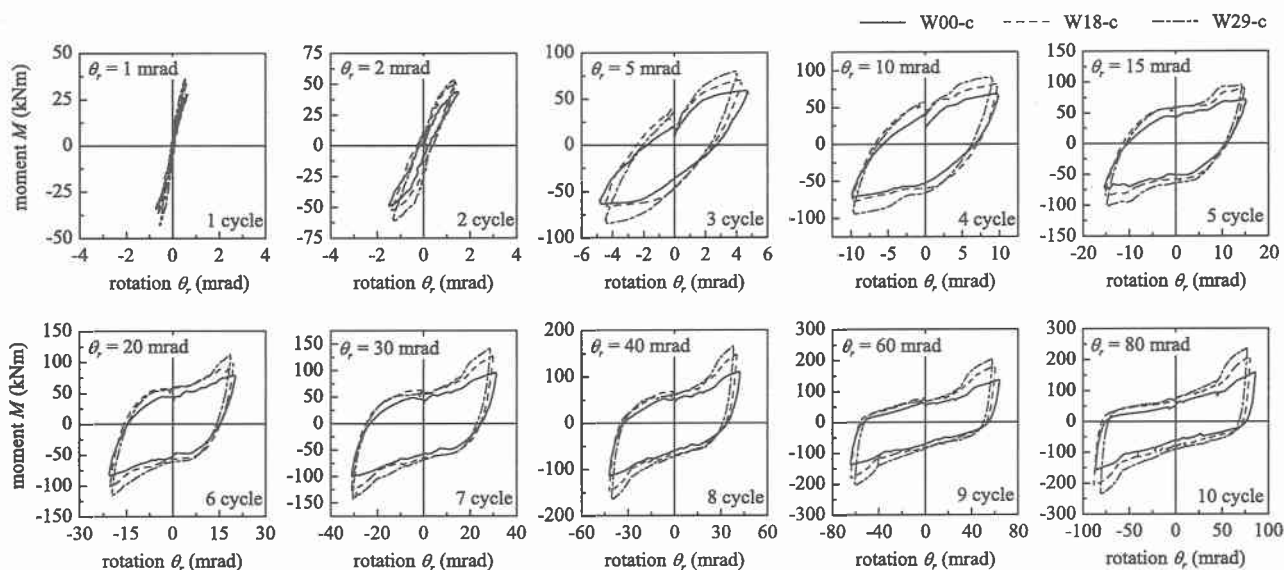


図-6 各サイクルにおける接合部 $M-\theta_r$ 履歴曲線の比較

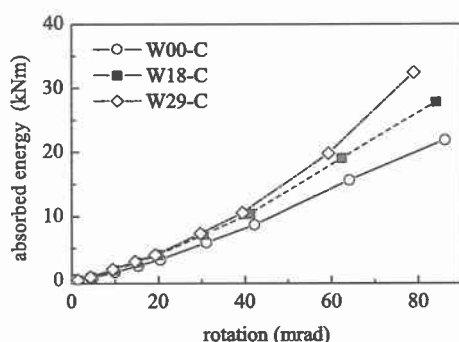


図-7 エネルギー吸収量の比較

3. 実験結果および考察

図-5には、繰り返し載荷実験より得られる各試験体の $M-\theta_r$ 履歴曲線とその包絡線を比較して示している。図の縦軸は、接合部曲げモーメント M を梁材の全塑性曲げモーメント M_p を用いて無次元化している。なお、(b) 図の包絡線には、単調載荷実験結果も併せて示している。図より、web angle の寸法が大きいほど曲げ耐力も増加している。また、いずれの場合も履歴曲線の包絡線は、単調載荷実験結果とほぼ一致していることがわかる。

図-6には、各試験体における接合部 $M-\theta_r$ 曲線を1サイクル毎に比較して示している。図より、1サイクル目 ($\theta_r \approx 1$ mrad) の場合には、ほぼ線形な分布となっており、弾性的な挙動を示している。また、変位振幅の増大とともに非線形な履歴曲線となり、4サイクル目 ($\theta_r \approx 10$ mrad) の正載荷時において、接合部剛性が一時的に横ばいとなり、その後再び接合部剛性が上昇する現象、いわゆる pinching 現象が確認できる。この現象の大きな要因は、アングル材と梁側フランジ間のすべりに起因しているものと考えられる。すなわち、すべりによって接合部剛性の上昇が一時的に小さくなり、ボルト孔のクリアランス分のすべりが生じた後、ボルトがボルト孔に接触し支圧状態となり接合部剛性が再び上昇するためと考えられる。また、この現象は変位振幅（サイクル数）の増大とともに顕著となり、逆S字状の複雑な分布特性を示している。なお、pinching による接合部剛性の上昇傾向は、web angle 寸法が大きいほど強

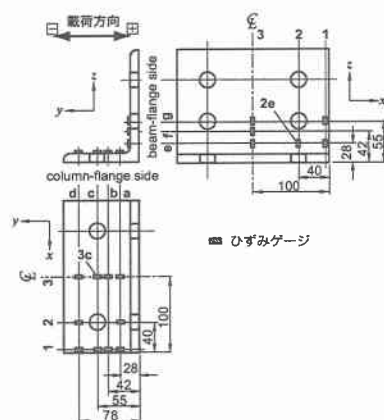


図-8 ひずみゲージの貼付位置およびその名称

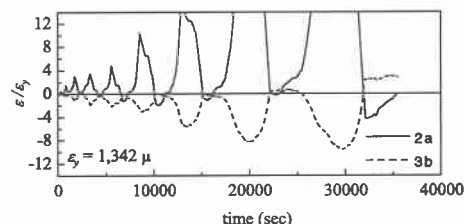


図-9 ひずみの時系列分布の一例 (top angle, W29-c)

くなることわかる。

これより、地震等の繰り返し荷重を受ける半剛結鋼骨組の挙動特性を精度良く解析するためには、これらの現象を適切に表現できる構成則モデルの構築が重要であるものと考えられる。

図-7には、図-6に示した各サイクルの履歴ループ面積から算出されるエネルギー吸収量と相対回転角の関係を示している。なお、横軸の相対回転角は、各サイクルにおける正負の相対回転角の平均値である。図より、各試験体におけるエネルギー吸収量は、いずれの場合も相対回転角（変位振幅）の増大とともに、ほぼ線形的に増加していることがわかる。また、web angle 寸法が大きいほどエネルギー吸収量が多い。なお、W29-c 試験体における最終サ

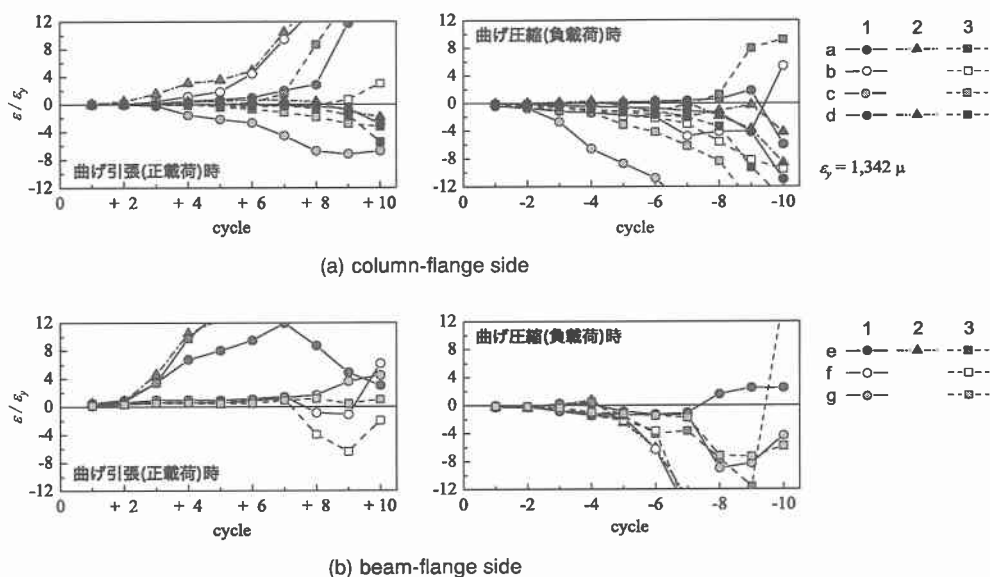


図-10 各サイクルにおけるひずみの比較 (top angle, W29-c)

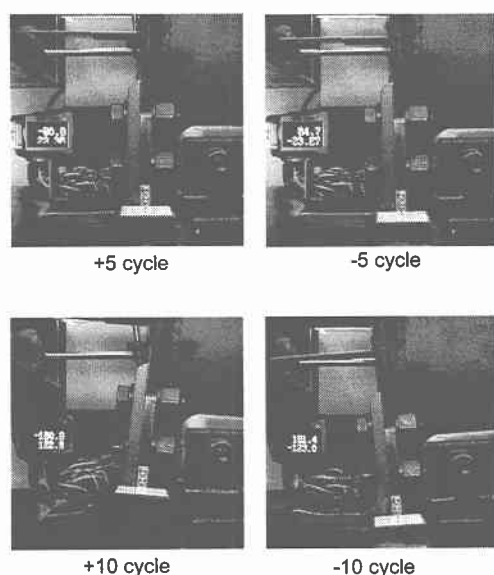


写真-1 アングル材の変形状況の一例 (top angle, W00-c)

サイクルのエネルギー吸収量は約 32 kNm であり、W00-c 試験体の約 1.5 倍となっている。

図-8, 9 には、それぞれ top angle に貼付したひずみゲージ位置およびその名称、代表的なひずみゲージ出力の時系列分布を示している。また、図-10 には、図-9 のひずみゲージ時系列分布から得られる各サイクルの極大あるいは極小ひずみとサイクル数の関係を示している。なお、ここでは W29-c 試験体の結果について示している。図-10(a) より、柱フランジ側のひずみ分布に着目すると、梁フランジ側のボルト軸上に貼付された 2a が 3 サイクル目で引張側のひずみが発生している。また、4 サイクル目では、1b で引張側の、1c で圧縮側のひずみが発生している。これより、曲げ引張時の柱フランジ側のアングル材は、ボルト軸近傍から梁フランジ側の部分に大きな引張力が作用するのに対し、ボルト軸近傍部ではボルトによる拘束効果によって圧縮力が作用していることがわかる。また、曲げ圧縮時

のひずみ分布を見ると、サイクル数（変位振幅）の増大とともに c 列のひずみが圧縮側に大きく推移している。

次に (b) 図の梁フランジ側のひずみ分布について検討する。図より、曲げ引張時の場合には、(a) 図に示す柱フランジ側のひずみ分布と同様に、3 サイクル目で e 列のひずみが引張側に増大していることがわかる。しかしながら、f, g 列では、7 サイクル目まで大きなひずみは発生していない。一方、曲げ圧縮時では、4 サイクル目以降に f 列および 2e で大きな圧縮ひずみが発生している。これより、梁フランジ側のアングル材においても、ボルト軸からアングル材のかかと部までの領域が大きく塑性化することがわかる。

写真-1 には、アングル材の変形状況の一例として、W29-c 試験体の top angle について示したものである。図より、+5 サイクルでは、アングル材の浮き上がりが生じていることがわかる。また、最終サイクルである 10 サイクル時には、アングル材が大きく塑性変形し、接合部が終局に近い状態となっていることが確認できる。

4. まとめ

本論文では、アングル系接合の履歴挙動特性を検討するために、top- and seat-angle 接合を対象に静載荷実験を実施した。本研究の範囲で得られた結果を整理すると、

- 1) top angle 寸法が大きいほど、曲げ耐力およびエネルギー吸収量が增大する。
- 2) 繰り返し載荷の場合には、pinching 現象が確認されることから、接合部履歴挙動を適切に表現するためには、これらの現象を考慮した構成則モデルの構築が重要である。
- 3) top angle に貼付したひずみ分布より、繰り返し載荷を受ける top angle は、ボルト軸からアングル材かかと部までの領域が大きく塑性化することが明らかになった。

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 $M-\theta$ 関係に関する静載荷実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 10, pp. 57-64, 2002.11.