

# ロボット上向溶接を適用した鉄骨ノンスカラップ梁端接合部の構造性能

## Structural Properties of Robot Welded Beams without a Weld Access Hole

日向大樹 久保田 淳 澤本佳和 瀧 正哉<sup>1)</sup>  
加藤敬史<sup>1)</sup> 佐藤恵治<sup>1)</sup> 藤本信夫<sup>2)</sup>

### 要 約

近年、可搬型溶接ロボットを用いた上向溶接技術を開発し、併せてその溶接品質も確保できるようになったため、現場接合部においてもノンスカラップ梁の適用が可能となってきた。ただし、CFT柱にノンスカラップ梁を取り付けた架構の構造性能に関しては既往知見が少ないのが現状である。一方、超高層鉄骨造建物ではCFT柱と変形性能に優れる梁端拡幅を設けた高性能仕口梁の組み合わせが一般的であるが、梁製作の生産性には課題がある。そこで、高性能仕口梁に代わる工法として、柱梁接合部内に孔あき鋼板を設けることで変形性能の向上を図り、梁端拡幅のないノンスカラップ梁の新たな補強工法（以降、ジベル補強）を考案した。本報では、CFT柱とノンスカラップ梁架構の構造性能確認実験を実施した結果とジベル補強の効果について報告する。

### 目 次

- I. はじめに
- II. 実験計画
- III. 実験結果
- IV. 考 察
- V. まとめ

#### I. はじめに

これまでの研究により<sup>例えば 1, 2)</sup>、鉄骨造建物の梁端スカラップをなくすことによって、架構の耐力や変形性能などの構造特性が向上することが知られている。このようなノンスカラップ梁架構の適用に際しては、柱または柱梁接合部と梁端が一体となった部材を工場製作し、現場では梁端溶接を行わないのが一般的である。現場溶接でノンスカラップ梁を実現するためには、上向溶接により梁下フランジを柱に接合する方法が挙げられるが、人による溶接での品質確保が難しいことが課題である。これに対し、近年の技術開発により、溶接ロボットを用いた上向溶接による溶接品質の確保が可能となった。ただし、CFT柱にノンスカラップ梁を取り付けた架構の構造性能に関する研究は少ないのが現状である。CFT柱

は鉄骨柱に比べて柱部材の幅厚比が大きい傾向にあることに加え、ダイアフラムにコンクリート充填用の開口があるためダイアフラムの剛性が低く、大地震時には梁端接合部における柱の面外変形が大きくなることで、梁の構造性能にも影響することが懸念される。一方、超高層鉄骨造建物ではCFT柱と変形性能に優れる梁端拡幅を設けた高性能仕口梁の組み合わせが一般的であるが、梁製作の生産性には課題がある。そこで、高性能仕口梁に代わる工法として、柱梁接合部内に孔あき鋼板を設けてウェブの応力伝達効率を上げ、さらに柱の面外変形を抑えることで梁の変形性能を向上させる新たな補強工法を考案した。

本研究では、可搬型溶接ロボットによる上向溶接を用い、CFT柱に梁端拡幅のないノンスカラップ梁を接合した架構の基本的な構造性能を把握するため、部分骨組試験体による正負交番漸増繰り返し載荷（以降、漸増載荷）および定振幅繰り返し載荷（定振幅載荷）による実験を実施した。さらに、ジベル補強の有無をパラメータとした実験結果の比較を行い、その効果を確認した。

#### II. 実験計画

- 1) 建築設計本部 Architectural Design Division
- 2) 建築管理本部 Building Construction Management Division

**キーワード** : 上向溶接, 溶接ロボット, 孔あき鋼板補強

**Keywords** : upward welding, welding robot, perforbond leisten

Table 1 試験体一覧  
(List of Specimens)

試験体名称	ウェブ接合形式	ジベル補強	载荷履歴
NS-B	ボルト	なし	漸増
NS-B-2			定振幅:小
NS-B-4			定振幅:大
NS-W	溶接	なし	漸増
NS-W-2			定振幅:小
NS-W-4			定振幅:大
NS-W+PF	溶接	あり	漸増
NS-W+PF-2			定振幅:小
NS-W+PF-4			定振幅:大

Table 2 材料の機械的性質  
(Material Properties)

使用部位	材質	载荷履歴	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	シャルピー 衝撃値 0°C (J)
梁フランジ (PL-19)	SN490B	漸増	392	530	27.9	114.1
		定振幅	379	516	27.3	226.9
梁ウェブ (PL-12)	SN490B	漸増	396	542	24.5	40.3
		定振幅	376	539	24.6	231.5
柱・シアール (PL-16)	SN490B	漸増	381	539	25.9	-
		定振幅	388	512	28.3	-
ダイアフラム (PL-25)	SN490B	漸増	364	522	29.9	-
		定振幅	393	533	28.6	-

1. 試験体

試験体一覧を Table 1 に、鋼材の機械的性質を Table 2 に、試験体寸法と载荷条件を Fig.1 に、接合部詳細を Fig.2 に示す。試験体は、溶接組立箱形断面柱にコンクリートを充填した CFT 柱に、溶接組立 H 形断面梁を接合した部分骨組試験体であり、上向溶接部分の性能を確認するために上下梁フランジとも外開先の上向き溶接のディテールとした。試験体は十字形架構で製作したが、梁を片側ずつ加力することでト字形の試験体として実験を実施した。試験体は梁端降伏先行となるように設計した。実験はウェブボルト接合タイプの NS-B、ウェブ溶接接合タイプの NS-W に加え、ウェブ溶接接合タイプにジベル補強を施した NS-W+PF 試験体の 3 タイプについて、それぞれ漸増载荷、振幅の異なる 2 水準の定振幅载荷（計 9 体）を行った。軸力は 1000kN で一定とし、制御変位には梁部材変位を用いた。载荷サイクルは梁部材変位を全塑性変位  $\delta_p$  で除した塑性率  $\mu$  を目標値とし、初めに  $\mu = \pm 0.5$  の弾性载荷を 1 サイクル行った。漸増载荷では、 $\mu = 2$  増加するごとにそれぞれ 2 サイクル、定振幅载荷では  $\mu = 2$  または  $\mu = 4$  を目標変位とした。なお、実験時は梁の全塑性耐力を計算弾性剛性で除した全塑性変位  $\delta_p$  から算出した塑性率  $\mu$  を目標変位としたが、本報では柱面外変形を含む実験剛性を用いて算出した塑性率  $\mu$  で評価を行ったため、ピーク変形時の塑性率が目標値に対してやや小さくなっている。

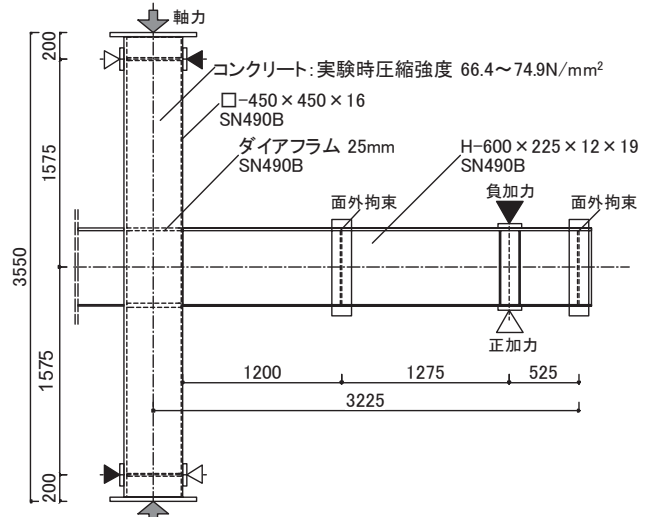


Fig.1 試験体寸法と载荷条件  
(Drawing of Specimen)

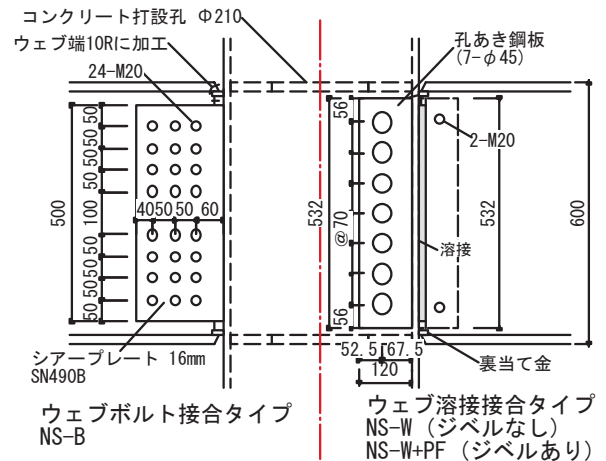


Fig.2 接合部詳細  
(Detail of Column-beam Joint)



(a) 上向溶接 (b) 立向溶接

Photo 1 ロボット溶接作業状況  
(Robot Welding)

2. ロボット溶接

ロボット溶接作業の様子を Photo 1 に示す。ウェブボルト接合タイプの試験体は、ウェブとシアプレートを高力ボルトで全数本締めした後、下フランジを溶接ロボットで上向溶

接し、試験体を上下反転して再度フランジの上向溶接を行った。ウェブ溶接接合タイプの試験体は、ウェブの仮止め用高力ボルトを本締めして、ウェブの中央から下半分をロボットにより立向上進溶接した。その後、下フランジを溶接ロボットで上向溶接し、試験体を上下反転して同様の手順で溶接作業を行った。上向溶接や立向溶接の溶接ワイヤはいずれも550N/mm<sup>2</sup>級ワイヤを採用し、漸増载荷用試験体の上向溶接はソリッドワイヤ、ウェブ立向溶接および定振幅载荷用試験体の上向溶接にはフラックス入りワイヤを使用した。なお、漸増载荷用試験体では鋼製エンドタブをそのまま残したが、定振幅载荷用試験体ではJASS6に準拠して5mm残しのR形状に切断した。

### III. 実験結果

#### 1. 漸増载荷実験

漸増载荷実験における全塑性変位  $\delta_p$ 、最大塑性率  $\mu_{max}$  および累積塑性変形倍率  $\eta$  の一覧を Table 3 に、梁端荷重を計算全塑性耐力  $Q_p$  で除した基準化せん断力と梁変位を全塑性

Table 3 漸増载荷実験結果一覧  
(Test Results of Incremental Cyclic Loading)

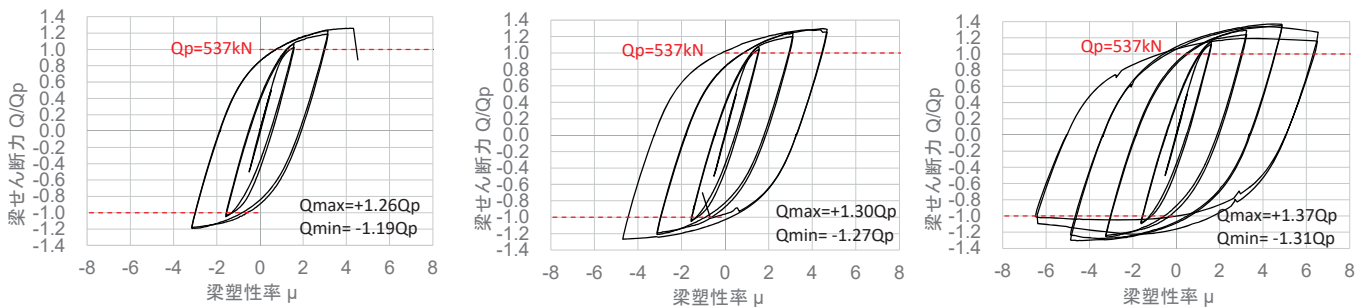
試験体名称	全塑性変位 $\delta_p$ (mm)		最大塑性率 $\mu_{max}$	累積塑性変形倍率 $\eta$
	計算	実験		
NS-B	16.4	20.8	4.5	23.6
NS-W		21.0	4.7	34.8
NS-W+PF		20.2	6.5	61.3

変位実験値で除した梁塑性率  $\mu$  の関係および最終破壊状況の梁端写真を Fig. 3 に示す。ウェブボルト接合タイプである NS-B 試験体は  $\mu \approx \pm 3$  ピーク変形付近で梁端フランジの溶接始末端（以降、梁フランジ端）からき裂が発生し、シャーププレート上下端の溶接接合部にも白いスジが見られた。その後、 $\mu = +4$  を超えたところで下フランジが破断し実験を終了した。フランジ破断の起点は溶接熱影響部であった。ウェブ溶接接合タイプである NS-W 試験体は、 $\mu \approx \pm 3$  ピーク変形までにフランジ端からき裂が入り、 $\mu \approx 5$  ピーク変形でウェブ溶接部端にもき裂が確認された。 $\mu \approx -5$  ピーク変形に向かう第 2 サイクル途中で上フランジが破断し実験を終了した。NS-B 試験体と同じく、フランジ破断の起点は溶接熱影響部であった。ウェブ溶接接合でジベル補強を施した NS-W+PF 試験体は、 $\mu \approx 3$  ピーク変形でフランジ端にき裂を確認したが、その後のき裂の進展はほとんど見られず、 $\mu \approx \pm 5$  ピーク変形で圧縮側フランジおよびウェブに局部座屈が生じたことで、大変形

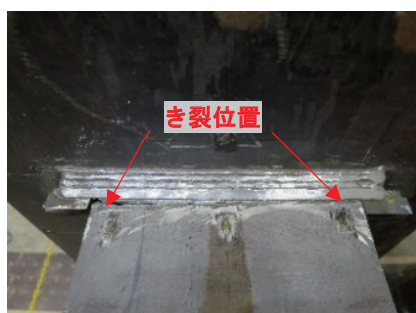
Table 4 定振幅载荷実験結果  
(Test results of Amplitude Cyclic Loading)

試験体名称	全塑性変位 $\delta_p$ (mm)		繰り返し回数 N (回)	
	計算	実験	終局	破断
NS-B-2	16.8	21.6	40	56
NS-B-4		21.5	9	10
NS-W-2		21.4	49	68
NS-W-4		22.2	10	11
NS-W+PF-2		21.2	81	115
NS-W+PF-4		21.2	13	19

※繰り返し回数(終局)は最大耐力の90%時



(a) NS-B(ウェブボルト)下フランジ



(b) NS-W(ウェブ溶接)上フランジ



(c) NS-W+PF (ウェブ溶接+ジベル補強)

Fig.3 漸増载荷実験結果  
(Test Results of Incremental Cyclic Loading)

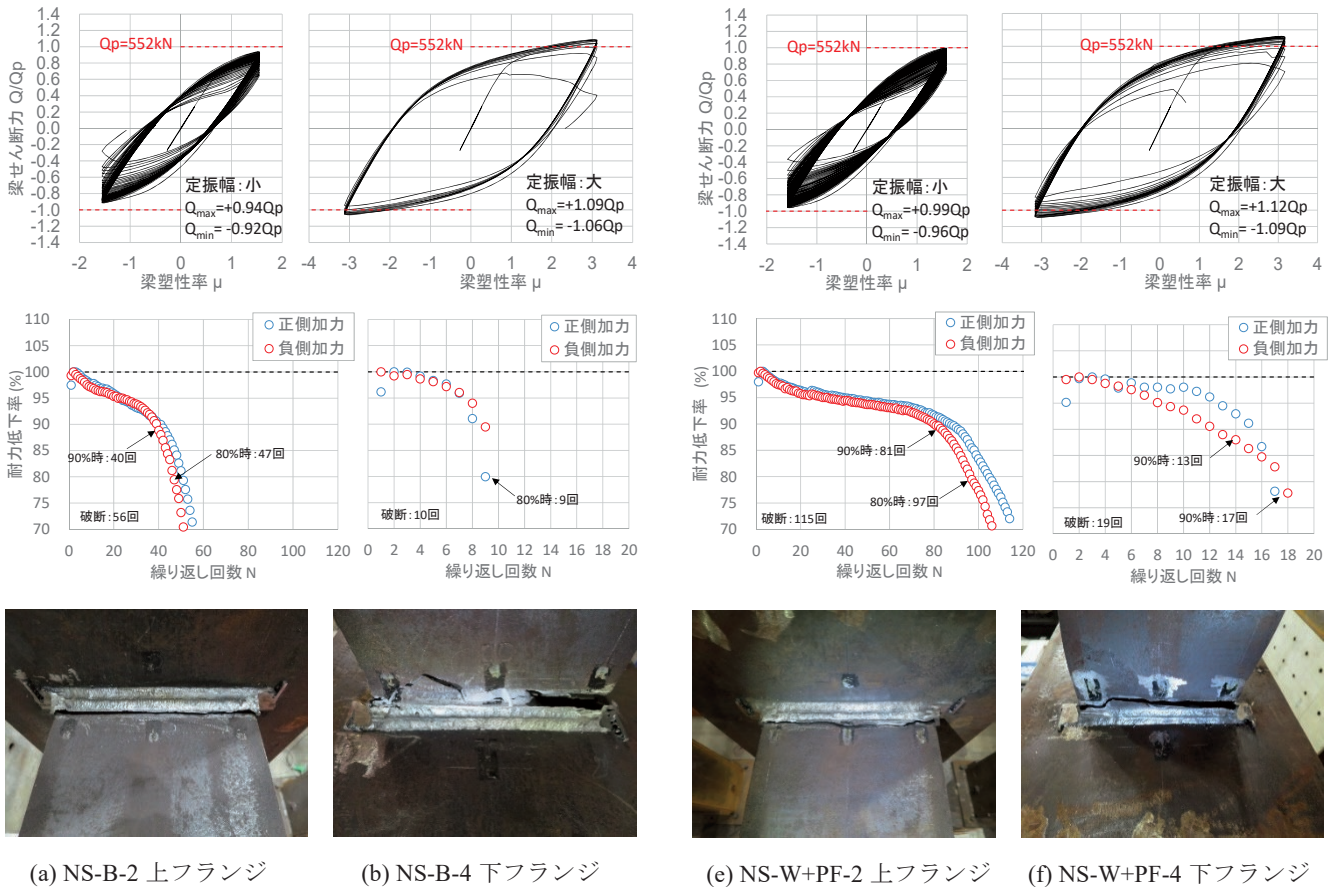
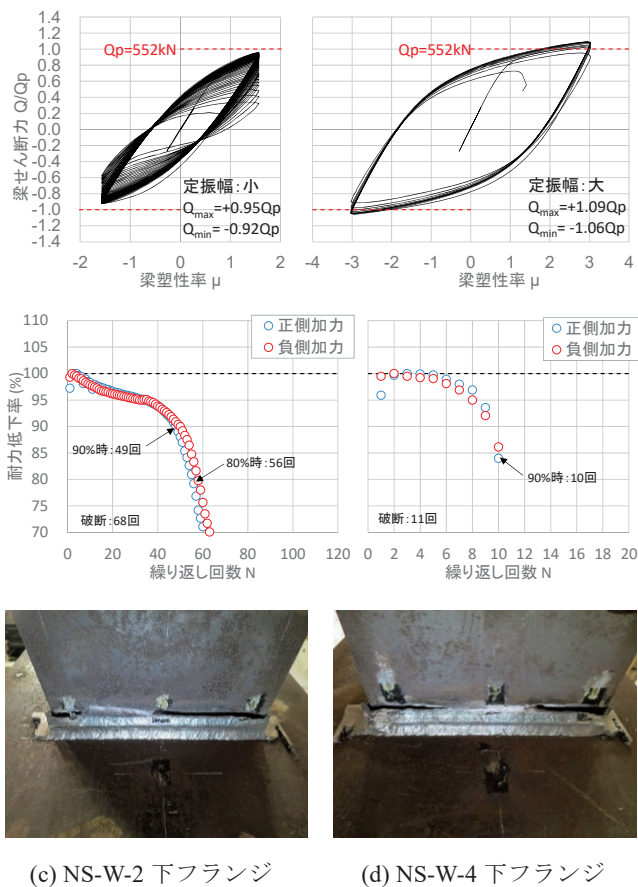


Fig.4 定振幅荷重実験結果  
(Test Results of Amplitude Cyclic Loading)

まで安定した履歴ループを描いた。 $\mu \approx -6$  の第 2 サイクルピーク変形時の荷重が負側最大耐力の 8 割を下回ったため、実験を終了した。ジベル補強の有無をパラメータとした NS-W 試験体と NS-W+PF 試験体の比較から、ジベル補強によって、最大耐力で 1.06 倍、最大塑性率で 1.40 倍、累積塑性変形倍率で 1.76 倍の性能向上効果が確認された。

## 2. 定振幅荷重実験

定振幅荷重実験における全塑性変位  $\delta_p$ 、終局時および破断時の繰り返し回数  $N$  の一覧を Table 4 に、梁端荷重を計算全塑性耐力  $Q_p$  で除した基準化せん断力と梁変位を全塑性変位実験値で除した梁塑性率  $\mu$  の関係、実験最大耐力に対する各サイクルピーク変形時荷重の低下率の推移および試験体の最終破壊状況を Fig. 4 に示す。振幅の大きさとウェブ接合タイプに関わらず、いずれの試験体も 6 サイクル目までに最大耐力を発揮した後、梁フランジ端の溶接熱影響部にき裂が生じた。さらに、繰り返し回数の増加とともに徐々にそのき裂が進展してフランジ破断に至った。ウェブボルト接合タイプで小振幅の NS-B-2 試験体は、ピーク変形時の荷重が最大の 90% となった 40 サイクルでシャーププレート上下端部にもき裂が確認された。大振幅の NS-B-4 試験体では、圧縮側フランジにわずかに局部座屈の傾向が見られたが、主にフラン



ジの溶接熱影響部に生じたき裂の進展によって耐力が低下した。ウェブ溶接接合タイプにジベル補強を施した小振幅のNS-W+PF-2 試験体は、ピーク変形時の荷重が最大の 85%となった 91 サイクル目で、大振幅の NS-W+PF-4 試験体は 9 サイクル目に梁端フランジ部に局部座屈が確認されたが、局部座屈の進展よりもき裂の伸展が大きく、最終的にフランジが破断した。各試験体の最終破壊状況を見ると、破断の起点は梁フランジ端の溶接熱影響部にあるが、破断線は梁母材に及んでいる試験体も見られた。

フランジ破断までの繰り返し回数を比較すると、ウェブ溶接接合タイプはボルト接合タイプよりも小振幅で 1.21 倍、大振幅で 1.10 倍の高い性能を示した。また、ウェブ溶接接合タイプをジベル補強した場合には、ジベル補強していないものと比べて小振幅で 1.69 倍、大振幅で 1.73 倍となった。このことから、ジベル補強によって梁の変形性能が大幅に改善されることが確認された。

#### IV. 考察

##### 1. 疲労特性

定振幅実験の結果から得られた塑性率  $\mu$  - 破断寿命  $N_f$  関係を、鉄骨造を対象に提案された既往の疲労性能曲線式<sup>3)</sup>と比較したものを Fig. 5 に示す。これまで示したウェブボルト接合タイプおよびウェブ溶接接合タイプの実験結果は既往のスカラップ無の疲労性能曲線設計式に、ウェブ溶接接合タイプでジベル補強を設けた結果は既往の高性能仕口設計式に近い値を示した。このことから、CFT 柱と梁端拡幅のないノンスラップ梁を組み合わせた本架構は、既往の鉄骨柱とノンスラップ梁を組み合わせた架構における疲労特性と同等の性能を有していること、ジベル補強を設けた場合には、梁端拡幅などを設けた高性能仕口に近い性能を有していることが言える。

##### 2. ジベル補強有無による比較

漸増载荷実験でウェブの降伏が顕著となった  $\mu \approx 3$  ピーク時における梁端から 200mm, 400mm 位置のウェブひずみ分布の比較を Fig. 6 に示す。ただし、ウェブボルト接合タイプの試験体についてはシャーププレートの影響を考慮して、梁端から 250mm, 400mm の位置の計測値で比較を行った。いずれの位置においてもウェブ溶接接合タイプの方がボルト接合タイプよりもひずみが大きく、ジベル補強した試験体では、さらに大きなひずみが確認できる。これより、ジベル補強によってウェブのより大きな曲げ応力負担が可能となることが分かる。

漸増载荷実験の  $\mu \approx 3$  ピーク時における柱面外変位の比較を計測位置とともに Fig. 7 に示す。柱角部と柱フランジの幅中央近傍で計測した変位の差を比較すると、ジベル補強していない試験体では、各位置で柱フランジが大きく面外変形

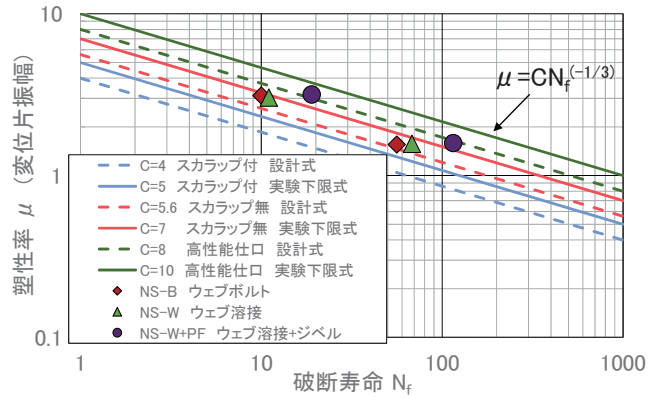
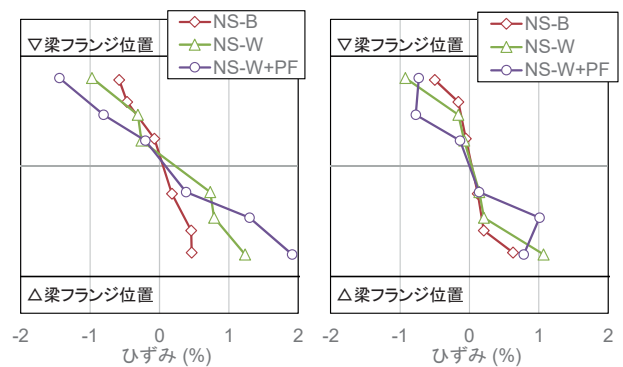
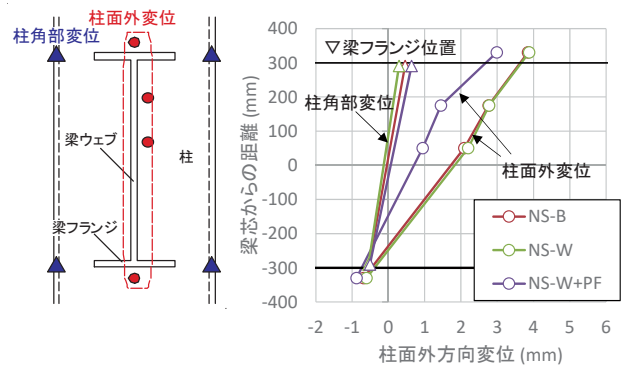


Fig.5 疲労性能曲線の比較  
(Comparison of Fatigue Capacity Curve)



梁端から 200,250mm 位置 梁端から 400mm 位置  
Fig.6 ウェブひずみ分布の比較 ( $\mu \approx 3$  ピーク時)  
(Comparison of Web Strain Distribution)



変位計測位置 変形分布  
Fig.7 柱面外変形分布の比較 ( $\mu \approx 3$  ピーク時)  
(Comparison of Out-of-plane Displacement Distribution)

しているが、ジベル補強することで、その値が 1/2 程度に小さくなったことが確認できる。

ウェブひずみ分布、柱面外変形の両比較から、本ジベル補強は柱梁接合部内のコンクリートに応力を伝達して抵抗力を発揮し、ウェブの負担応力を増加させることに加えて柱の面外変形を抑え、ジベル補強のないものに比べて構造性能を向上させることが確認された。柱フランジ面外変形が大きい

場合、梁端フランジ幅中央に比べ、梁フランジ幅両端の負担応力が大きくなりやすいと考えられる。これは梁フランジ端からのき裂発生および破断の一因となる。これに対し、ジベル補強をすることで、柱フランジ面外方向の変形が抑えられ、梁フランジ端の応力集中が緩和されたため、破断までの繰返し回数が増加したものと推察される。

## V. まとめ

本報では、CFT柱とロボット上向溶接を適用した梁端拡幅のないノンスカラップ梁の架構について、基本的な構造性能を把握するため、部分骨組試験体による正負交番漸増繰返し载荷および定振幅繰返し载荷実験を実施した。さらに、ジベル補強の有無をパラメータとした実験結果の比較を行い、その効果を確認した。得られた知見を以下に示す。

- ・本実験の範囲において、本架構はウェブの接合方法に関わらず、既往の鉄骨柱とノンスカラップ梁を組み合わせた架構と同等の構造性能を有していることが確認された。
- ・漸増载荷実験の結果から、ジベル補強によって、最大耐力で1.06倍、最大塑性率で1.40倍、累積塑性変形倍率で1.76倍の性能向上効果が確認された。
- ・定振幅载荷実験の結果から、ウェブ溶接接合タイプはボルト接合タイプよりも小振幅で1.21倍、大振幅で1.10倍の繰返し変形性能を示した。また、ウェブ溶接接合タイプをジベル補強した場合には、ジベル補強していないものと

比べて小振幅で1.69倍、大振幅で1.73倍の性能を示した。疲労性能曲線と比較すると、ジベル補強によって、破断までの疲労特性が梁端拡幅などを設けた高性能仕口梁に近い性能となることが確認された。

- ・柱梁接合部内に設けたジベル補強はCFT柱内のコンクリートに定着され、柱フランジの面外方向力に対して抵抗力を発揮した。その結果、柱フランジの面外変形が抑制されてウェブの応力負担が増大したことで、梁の最大耐力が向上した。また、柱の面外変形が小さく抑えられたことで梁フランジの幅方向端の応力集中が緩和され、変形性能が向上したものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 吹田啓一郎ほか; ノンスカラップ工法とRBS工法による柱梁接合部の塑性変形能力 改良型溶接柱梁接合部の実大実験-その1-, 日本建築学会構造系論文集, 第526号, 1999.12, pp.177-184.
- 2) 中込忠男ほか; ノンスカラップ工法における梁端ディテールが柱梁溶接接合部の変形能力に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第546号, 2001.8, pp.121-128.
- 3) 鹿島建設ほか; 平成24年度建築基準整備促進事業 27-2 「長周期地震動に対する鉄骨造建築物の安全性検証方法に関する検討」 調査報告書, 2013.3.

## Structural Properties of Robot Welded Beams without a Weld Access Hole

*Daiki Hinata, Jun Kubota, Yoshikazu Sawamoto, Masaya Taki<sup>1)</sup>, Takashi Kato<sup>1)</sup>, Yoshiharu Sato<sup>1)</sup> and Nobuo Fujimoto<sup>2)</sup>*

It has become possible to secure welding quality for upward welding by using a portable welding robot, and non-weld access hole (i.e. NWAH) beams can be built on site. However, little data is available on the structural properties of NWAH beams attached to CFT columns, and there is a concern that the out-of-plane deformation of CFT columns might be larger than that of steel columns. Therefore, in order to improve the structural performance, we developed a new reinforcement method in which perforbond leisten are provided inside the beam-column joints. This paper reports that NWAH beams attached to CFT columns have the same structural properties as NWAH beams with steel column frame, and that the maximum strength and deformation capacity have been improved by the new perforbond leisten reinforcement.