

鋳鋼製外ダイアフラム ハイブレード工法®の開発

Development of “HIBLADE process®” with External
Stiffener Rings Using Cast Steel

中野建蔵* Kenzo Nakano
北野隆司* Takashi Kitano
吉永克寧** Katsuneishi Yoshinaga
越智健之*** Kenshi Ochi

1995年1月に発生した兵庫県南部地震において、鉄骨造建築物の柱はり接合部に発生した溶接部の破断などの多くの被害は、主として柱はり接合部の設計・施工に起因するものであり、建築業界ではその改善が急務とされてきた。このような背景を受けて、当社は従来工法の問題点に着目し、耐震性と施工性の向上を目指した鋳鋼製外ダイアフラムを用いた柱はり接合法（以下、ハイブレード工法®という）の開発を進めてきた。

本報では、柱はり接合部におけるハイブレード形状の最適化とその構造性能を実物大の構造実験により明らかにすることができたので報告する。

In the 1995 earthquake that shook Kobe, many of the welds connecting steel building frames sustained brittle fractures. The structural design and the way the beam-to-column connections had been fabricated were the cause of these fractures. Consequently, improvements were required in structural engineering, architecture, construction and fabrication. As a part of these improvements, we conducted research and development on cast steel rings (HIBLADE) that improved earthquake resistance and the fabrication procedure. Our tests revealed that HIBLADE provided optimal results in beam-to-column connections, and this paper presents our findings on the performance of these new structures.

① 緒 言

1995年に発生した兵庫県南部地震では鉄骨造建築物に多くの被害をもたらした¹⁾。被害の内容は、柱に角形鋼管を用い、はりにH形鋼を用いた純ラ－メン構造の鉄骨造建築物の柱脚および柱はり接合部が大半を占めている。さらに柱はり接合部に損傷を受けた建物の7割が倒壊または大破しており接合部が構造上重要な部位であることを裏付けている。ここで図1(a)に示す接合部の柱側を損傷したものはほとんど倒壊または大破しているが、逆に図1(b)に示すはり側に損傷を受けたものは倒壊が少ない。このことは柱が崩壊する前にはりが損傷を受ける方が地震エネルギー吸収の点から有利であり、逆に柱側の破壊が先行することが建物にとって致命的であることを証明している。また、図2に示す接合部断面に溶接が集中しており素材が熱影響で脆（ぜい）化して、応力の大きい仕口部分で破壊が起きたことが報告されている。これらを受け、建築業界では柱はり接合部の耐震性能の向上が重要な課題となった。

その中で、筆者らも下記に示す基本的な考えに基づいて新しい接合部の開発を目指した。

柱の塑性変形力が大きい接合形式である柱貫通タイプとする。

接合部の脆性破壊の発生を少なくするために、柱とダイアフラムの溶接量を低減する。

本報告においては、上記考え方に基づき開発した鋳鋼製外ダイアフラム形式の「ハイブレード工法®」について、その概要と力学性状を報告する。

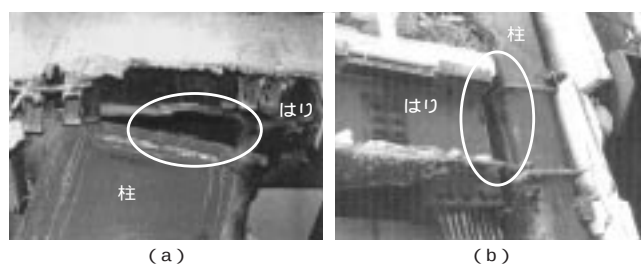


図1 従来工法の破壊状況

Fig.1 Subversive situation of traditional Process.

② 工法の概要

開発したハイブレード工法の概要と特長を示す。

2.1 構成

ハイブレード工法は、図3に示すように角形鋼管柱に鋳鋼製の外ダイアフラム（以下ハイブレードという）を挿入し、柱とハイブレードとは部分溶込み溶接をする。

* 日立金属株式会社 若松工場

** 株式会社 永井製作所

*** 熊本大学助教授 工学博士

* Wakamatsu Works, Hitachi Metals, Ltd.

** Nagai Steel Works, Ltd.

*** Kumamoto University

柱鋼管製造上の残留ひずみの多い柱角部分の溶接をしない。また、はりとはハイブレードとは高力ボルト接合もしくは溶接接合する。

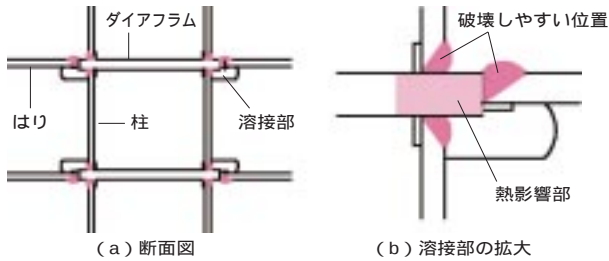


図2 従来工法の接合部

Fig. 2 Connections of traditional process.

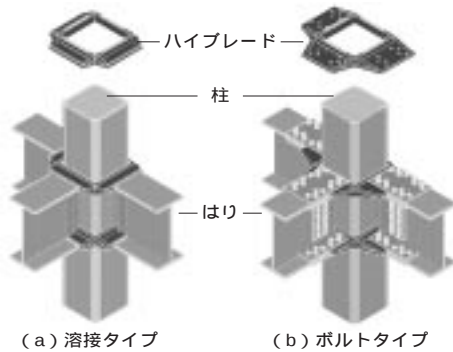


図3 ハイブレード工法の構成

Fig. 3 Construction of HIBLADE process.

2.2 特長

この工法の特長をまとめると以下のように多くの利点が増えられる。

- (1) 外ダイアフラム形式としているため、柱の切断が不要となり柱の加工工数を低減できる。
- (2) 通しダイアフラムに比べ、部分溶込み溶接の採用で柱とハイブレードの溶接量が減るため溶接工数を低減できる。
- (3) 剛性の高いハイブレードの採用で冷間成形角形鋼管の弱点である柱の角部分の溶接を不要にできる(図4)。
- (4) ボルトタイプはそではりが不要となるため輸送効率が向上し、輸送費を低減できる。
- (5) リング部の幅が小さいため通しダイアフラムと同様の収まりが可能である。



図4 柱とハイブレードの溶接

Fig. 4 Weld of column and HIBLADE.

本工法は、柱サイズ $\square 300 \sim \square 550$ の範囲を標準化し、2000年5月31日付けで大臣認定(建設省東住指発372号)を取得した。またハイブレードの形状は図5に示すように中柱、側柱、隅柱に対応したものとはりせいの違う場

合に適用できる合計5種類を標準形状としている。なお、ハイブレードの材質はSN490Bと同等のものである。

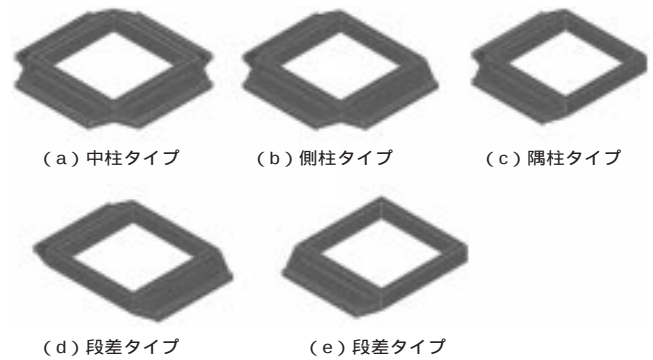


図5 ハイブレードの各種形状

Fig. 5 Shape of HIBLADE.

3 接合部の力学性状

この鋳鋼製外ダイアフラム形式の柱はり接合部の基本的な性状を把握するためにまず「せん断形単純モデル実験」²⁾を行った。この結果より有効なハイブレードの形状を決定し、耐力評価式を提案した。次に、耐震性能を確認するため、「十字形架構実験」²⁾を行ったので、それらの概要と結果を以下に示す。

3.1 せん断形単純モデル実験

試験体は、図6に示すように径の2.5倍の長さ1,000mmの鋼管とハイブレードおよびH形鋼のはりフランジに相当する鋼板で柱はり接合部をモデル化した。ハイブレードのフランジとはりフランジに相当する鋼板は突き合わせ溶接で接合し、エンドプレートで固定して引張り力を加えた。ハイブレードと鋼管の溶接において、隅肉溶接試験体の脚長は鋼管厚とし、部分溶込み試験体の開先深さは12mmとした。また、鋼管の外径は400mm、リング幅30mmはすべての試験体共通とした。

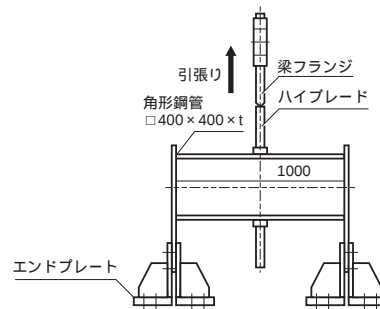


図6 せん断形単純モデル試験体

Fig. 6 Examination sample of shear simple tests.

ハイブレードの形状は図7に示すタイプA(リングにフランジ部を設けた形状)、タイプB(フランジにテーパを設けた形状)、タイプC(テーパをリング最末端まで延長、鉛直リブを設けた形状)の3種類とした。実験変数は、表1に示すようにタイプ、鋼管厚、フランジ幅、リング高、はりフランジ偏心量、角部溶接の有無、溶接方法で、合計13体の試験体を用いた(シリーズ1)。これらの実験結果より、タイプCが剛性・耐力とも優位であるわかった。この結果に基づき、タイプCを中心とした実験を計画した。実験変数は表2に示すように鋼管

厚および鋼管材質，はりフランジ偏心量，フランジの偏心，充填（てん）コンクリートの有無の9体とした（シリーズ2）。なお，溶接方法はすべて隅肉溶接とし，柱角部の溶接はない。

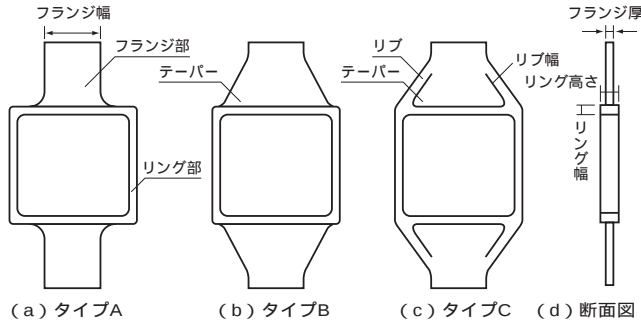


図5 ハイブレードの各種形状

Fig. 5 Shape of HIBLADE.

表1 せん断単純モデル実験の実験変数（シリーズ1）

Table 1 Experimental parameter of simple shear tests (Series 1)

試験体名	タイプ	鋼管厚 (mm)	フランジ 幅 (mm)	リング 高 (mm)	偏心量 (mm)	角部溶 接有無	溶接 方法
R0907N	A	9	200	70	0	無	隅肉
R12207N		12					
R16207N		16					
R12205N		12	200	50	100	有	
R12209N				90			
R12307N				300			70
R12217N				200			
R12207NW		0	無				
R12207NP	B			300	隅肉		
R12207T		C	200			部分	
R12307T							
R12207T1							
R12207T2							

表2 せん断単純モデル実験の実験変数（シリーズ2）

Table 2 Experimental parameter of simple shear tests (Series 2)

試験体名	タイプ	鋼管厚 (mm)	フランジ幅 (mm)	リング高さ (mm)	偏心量 (mm)	角部溶接有無	溶接方法
BR09307T1	C	9	300	70	0	無	隅肉
BR12307T1		12					
BR16307T1		16					
PM12307T1		12	300	70	50	有	部分
PH12307T1							
BR12327T1							
BR12307T1L							
CF12307T1							
BR12307T1							

注）偏心量：柱芯とはり芯とのずれ量

シリーズ1の実験結果として図8に荷重 - 変形の関係を示す。試験体R12207Nを基準として比較すると柱板厚とリング高さを増すことで降伏耐力および最大耐力は上昇するが，フランジ幅の変化やテーパの有無の影響の方が大きい。特にテーパと鉛直リブを取り付けたタイプCが剛性および耐力とも高いことからハイブレードの標準形状として採用することとした。

シリーズ2の実験結果を図9に示す。試験体BR12307T1を基準として比較すると柱板厚で局部変形

耐力が変化するため，柱板厚が増すことで耐力が上昇することを確認できた。

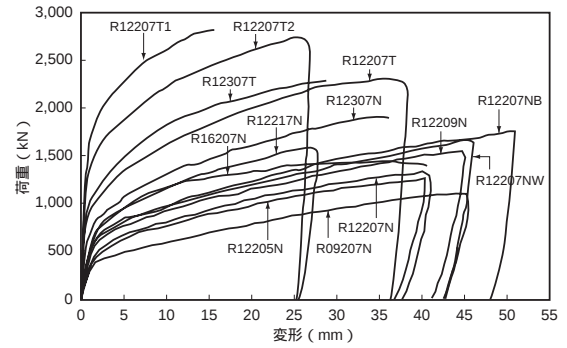


図8 荷重 - 変形の関係（シリーズ1）

Fig. 8 Relationship between load and displacement (Series 1)

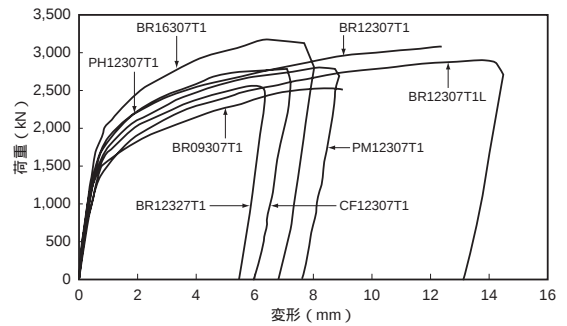


図9 荷重 - 変形の関係（シリーズ2）

Fig. 9 Relationship between load and displacement (Series 2)

3.2 耐力評価式

接合部を設計する際，ハイブレードを用いた場合の設計用耐力が必要となる。そのため，実験結果に基づきハイブレードを用いた接合部の耐力評価式を考察する。接合部の耐力は柱前面の局部変形耐力 nPy とリング側面の耐力 rPy を累加して評価できると仮定した。

外ダイアフラム形式や無補強の実験に基づいた解析的な研究から，柱前面の局部変形耐力は降伏線理論で説明ができる。ここでは柱フランジ面の面外耐力 nPy を文献³⁾の解析方法にしたがって（1）式より求めた。しかし，テーパ部をリング外径にまでに広げさらに剛性を高めるためにリブを付けているため，柱前面の局部変形耐力が小さく，降伏線理論の耐力まで上昇していないことから低減係数を設けて，低減係数は，0.6とした。

$$nPy = \frac{2cM_p(D - t_p) \left\{ 4x + 2t_p + h_r \right\}}{x^2} + \frac{2cM_p \left\{ x - \frac{(D - t_p - Br)(D - t_p)}{4x} \right\}^2 \cdot h_r \cdot \sigma_y}{cM_p(D - t_p)} \quad \dots (1)$$

ただし，上式の x は次式の解である。

$$4cM_p^2 \cdot h_r \cdot \sigma_y \cdot x^4 - 8cM_p^3 \{ (D - t_p)^2 \cdot x - cM_p^2 (D - t_p)^2 \} \cdot 4cM_p \{ 2t_p + h_r \} + \frac{(D - t_p - Br)^2 \cdot h_r \cdot \sigma_y}{4} = 0$$

$$cM_p = \frac{t_p^2 \cdot \sigma_y}{4}$$

リング側面の耐力は，側面リング部の引張り耐力となり（2）式より求めた。

$$rPy = 2Ar\sigma_y \quad \dots (2)$$

ここで，降伏耐力評価式は，slope factor法による実験結果に基づいて（3）式とした。

$$rPy = 0.85 \times (0.6nPy + rPy) \quad \dots (3)$$

図10にせん断形単純モデル実験（2回目）の実験値 eP_y と計算値 sP_y を比較する。両者ともほぼ実験値と計算値は一致しており（3）式にて接合部の降伏耐力を評価できる。

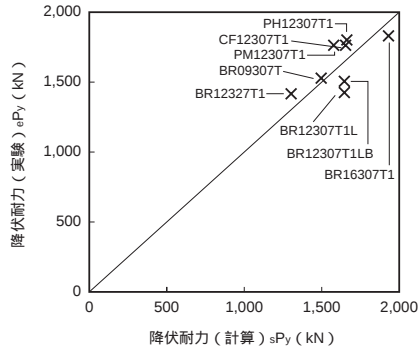


図10 降伏耐力の実験値と計算値の比較

Fig.10 Comparison between experiment and calculation of yield strength.

3.3 十字形架構実験

実際のラ - メン架構に組み込まれた場合の耐震性能を確認するため、十字形の部分架構実験を実施した。実験装置と試験体を図11に示す。試験体は、柱が□400の冷間成形角形鋼管（BCR295）で、柱板厚12mm（X1）および16mm（X2），はりH488×300×11×18（SM490A）の2体とした。両試験体ともハイブレードの形状はリングの高さ70mm，幅30mmでテーパと鉛直リブのあるものとした。柱とハイブレードの溶接は部分溶込みであり，柱角部の溶接は行っていない。

実験結果により得られた，図12にX2の曲げモーメント - 回転角の関係を示す。柱板厚が異なる2体の試験体とも，荷重当初はパネル部の変形のみ顕著であり，荷重変形関係は等方硬化のような履歴となり，その後柱前面の溶接部に亀裂が生じ，移動硬化の履歴を示した。ひずみゲージからリング側面の塑性化が観察されたが，この

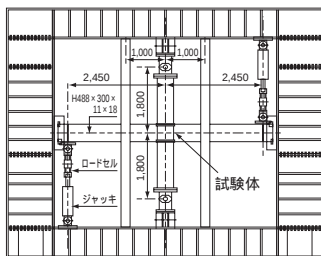


図11 ハイブレードの試験体形状

Fig.11 Examination shape of HIBLADE.

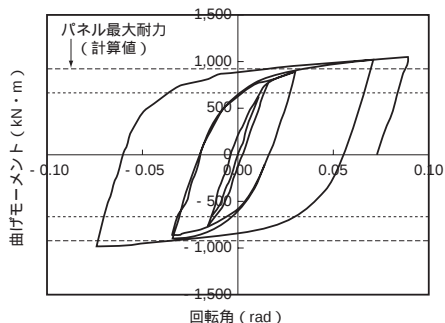


図12 X2試験体の曲げモーメント - 回転角の関係

Fig.12 Relationship between bending moment - rotation angle.

部分も極端な応力集中はなく，破断ひずみまで至らない。X1の試験体は回転角0.05rad程度（約1/20）で固定治具の不具合を生じたため載荷を終了し，X2試験体では回転角0.08rad程度（約1/12.5）の載荷可能な範囲まで測定を行った。両試験体とも大変形まで不安定な現象は生じてなく，架構自体の変形能力は良好である。この実験結果より，ハイブレードを用いた接合部は前述の耐力式を用いて計算した耐力を上回っており，実用上の問題がないことを確認した。

4 結 言

耐震性と施工性を向上させる角形鋼管柱とH形鋼はりの接合法としてハイブレード工法を開発した。

本研究の結果としてハイブレードの最適形状を提案し，設計評価式の妥当性を検証した。また，十字形の架構実験により耐震性能も確認できた。

今後の課題は，市場ニーズの大きいCFT構造(柱管内にコンクリート充填した構造)への適用させることである。本工法は外ダイアフラム形式のため，コンクリートの充填に適している。したがって現在これらのニーズにも対応できるよう開発を進めている。

参考文献

- 1) JSSC：鋼構造の柱梁接合部の設計・施工 - 兵庫県南部地震の被害を踏えて - ，JSSCテクニカルレポート - トNo36，1996.8
- 2) 中野，北野，越智，黒羽他：鋳鋼製外ダイアフラムを用いた柱梁接合部の実験的研究（その1～4）日本建築学会大会学術講演梗概集，1999年～2000年
- 3) 森田他：箱形断面柱 - H形断面はり接合部のダイアフラム補強に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第383号，昭和63年6月



中野建蔵

Kenzo Nakano

日立金属株式会社 若松工場



北野隆司

Takashi Kitano

日立金属株式会社 若松工場



吉永克寧

Katsuneishi Yoshinaga

株式会社 永井製作所



越智健之

Kenshi Ochi

熊本大学助教授 工学博士