

論文 バンドプレートに着目した鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の構造性能に関する研究

倉富 洋^{*1}・堺 純一^{*2}・田中 照久^{*1}・瀬上 大貴^{*3}

要旨: 十字鉄骨とコンクリートのみで構成される鋼・コンクリート合成柱材の柱梁接合部の開発を目的として、外ダイアフラムとバンドプレートを用いた柱梁接合部の部分モデル試験体を製作し、引張試験を実施した。実験変数には、外ダイアフラム幅とバンドプレートの有無を選定し、梁フランジの応力を柱材へ伝達可能かどうかを調べた。その結果、バンドプレートを取り付けた方が外ダイアフラムの必要幅を小さくすることができ、円滑に応力を伝達できることを示した。また、梁フランジの引張力を、外ダイアフラム、バンドプレートおよび柱ウェブで伝達できるものと想定し、外ダイアフラムの必要幅を計算できる算定式を提案した。

キーワード: 鋼・コンクリート合成柱材, 十字鉄骨, 外ダイアフラム, バンドプレート, 引張試験

1. 序

多様化する鋼・コンクリート合成部材において、著者らは十字鉄骨とコンクリートのみで構成された高耐震性能を有する鋼・コンクリート（以下、SCと略記）合成柱材の構造性能について検討している。実験および解析的な研究を通し、本SC柱材が高軸力下でも優れた変形性能を示すことを明らかにした¹⁾²⁾。また文献3)では、外ダイアフラムと内スチフナを使用した柱梁接合部ディテールを提案し、部分モデルの引張試験を実施した。その結果、梁フランジの応力を本SC柱材に伝達するに当たり、バンドプレートを設けることで外ダイアフラムの必要幅を小さくでき、条件によっては必ずしも内スチフナが必要ではないことを明らかにした。なお、本柱梁接合部は、梁フランジ幅が柱フランジ幅より大きくなることを想定して外ダイアフラムを設けるディテールとしている。

柱梁接合部内における内スチフナの存在は、上述したように応力伝達に影響を与えるが、施工時におけるコンクリートの充填性の低下や、鉄骨製作時の手間等も懸念される事項である。そこで本研究では、より簡素化された柱梁接合部の開発を意図して、内スチフナを省略し、外ダイアフラムとバンドプレートで構成された接合部の構造性能について検討する。具体的には、文献3)と同様に引張試験を実施し、バンドプレートの有無と外ダイアフラム幅の違いが、柱梁接合部の応力伝達に及ぼす影響について調べる。また、文献3)で示した外ダイアフラムの必要幅を算定する設計式にはバンドプレートの効果が考慮されておらず、応力伝達に寄与するであろう柱ウェブの変数も含まれていない。本研究では、文献3)の実験結果を踏まえ、外ダイアフラム幅を算定するために必要な設計式を提案し、その妥当性について確認する。

2. 実験計画

2.1 外ダイアフラムの必要幅の算定

既往の研究では、バンドプレートが応力伝達に寄与する効果が未知数であったため、梁フランジの応力は外ダイアフラムと内スチフナのみで伝達されるものとして算定式を提案した。しかしながら、文献3)の実験より、バンドプレートが応力伝達に重要な役割を果たすことがわかった。また、柱ウェブに貼付したひずみゲージを分析すると、条件によって値は異なるが、内スチフナが無くても梁フランジの応力が柱ウェブに直接流れることで概ね1000μから2000μ程度のひずみが計測されていた。これらの結果を受け、本研究ではバンドプレートや柱ウェブも応力を負担できるものとして、図-1に示すような力の伝達を想定した。梁フランジの引張力 P は、外ダイアフラム P_d 、バンドプレート P_b 、柱ウェブ P_w によって伝達されると考えると、力の釣り合いより式(1)が成り立つものと仮定した。

$$P = \sqrt{2}P_d + \sqrt{2}P_b + P_w \quad (1)$$

また、各部位が降伏耐力を発揮するときの値は、式(2)から式(5)で計算される。柱ウェブが負担できる応力は、柱フランジと柱ウェブ間の溶接強さを最大と仮定した。

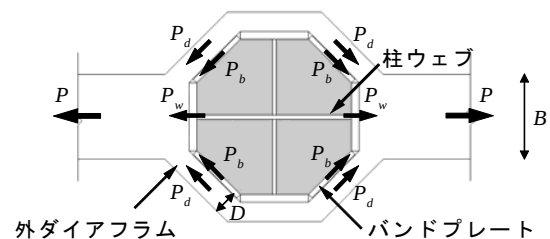


図-1 接合部の応力伝達

*1 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 福岡大学大学院 工学研究科博士課程前期

$$P = B \cdot t_f \cdot \sigma_y \quad (2)$$

$$P_d = D \cdot t_f \cdot \sigma_y \quad (3)$$

$$P_b = H \cdot t_b \cdot \sigma_y \quad (4)$$

$$P_w = 2 \cdot 0.7 S \cdot L \cdot \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

ここで、 B ：梁フランジ幅、 t ：梁フランジおよび外ダイアフラムの板厚、 σ_y ：梁フランジおよび外ダイアフラムの降伏応力度、 D ：外ダイアフラムの必要幅、 H ：バンドプレート高さ、 t_b ：バンドプレート板厚、 σ_y ：バンドブ

レート降伏応力度、 S ：溶接サイズ、 L ：柱ウェブの有効溶接長さ（=100mmと仮定）、 σ_y ：ウェブ降伏応力度である。柱ウェブの有効溶接長さは既往の実験結果³⁾より梁フランジからダイアフラムおよびバンドプレートが負担する力を差し引くことで柱ウェブが負担する力を算出し、その結果から100mmと仮定した。梁フランジの降伏耐力発揮時に外ダイアフラムが降伏するための必要幅 D は、梁フランジと外ダイアフラムを同厚とした場合、式(6)で算出される。

$$D = \frac{P - P_w - \sqrt{2} P_b}{\sqrt{2} t_f \sigma_y} \quad (6)$$

外ダイアフラム幅 d が上記 D を満足していれば、梁フランジが外ダイアフラムより先行して降伏する。

2.2 試験体

図-2に試験体詳細図を示す。文献3)と同様、鉄骨梁はフランジのみ再現し、梁フランジと外ダイアフラムは一枚の鋼板より製作した。柱フランジとは完全溶け込み溶接で溶接接合している。また、バンドプレートは高さ50mm、板厚6mmの鋼板で統一し、柱フランジに開先を取らずに溶け込ませることで溶接にて取り付けた。外ダイアフラムとバンドプレートは隅肉溶接としている。柱

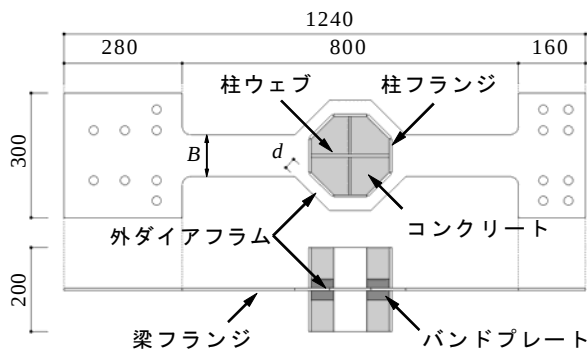


図-2 試験体詳細図

表-1 試験体一覧

試験体名 ^{*1}	梁フランジ寸法	外ダイアフラム幅 ^{*2}	バンドプレート	コンクリート強度 (N/mm ²)
B100-d15B	PL-100x6	$d=15\text{mm}$, $D=0\text{mm}$ (0mm)	有り	33.5
B100-d15N		$d=15\text{mm}$, $D=27.8\text{mm}$ (17.1mm)	無し	
B100-d30N		$d=30\text{mm}$, $D=27.8\text{mm}$ (17.1mm)		
B120-d15B	PL-120x9	$d=15\text{mm}$, $D=22.9\text{mm}$ (23.6mm)	有り	
B120-d20B		$d=20\text{mm}$, $D=22.9\text{mm}$ (23.6mm)		
B120-d30B		$d=30\text{mm}$, $D=22.9\text{mm}$ (23.6mm)		
B120-d40B		$d=40\text{mm}$, $D=22.9\text{mm}$ (23.6mm)		
B120-d30N		$d=30\text{mm}$, $D=56.3\text{mm}$ (53.1mm)	無し	
B120-d40N		$d=40\text{mm}$, $D=56.3\text{mm}$ (53.1mm)		

^{*1} 試験体名凡例：B100-d15Bの場合、B100は梁フランジ幅(100mm)、d15は外ダイアフラム幅(15mm)、Bはバンドプレートの有無(B：有、N：無)を、それぞれ示す

^{*2} d ：外ダイアフラム幅、 D ：式(6)で計算した外ダイアフラムの必要幅、括弧内は表-2の材料強度を用いて計算した数値

表-2 使用鋼材の機械的性質

使用箇所	鋼種	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)	$E\text{Ing.}$ (%)	Y.R.	ε_y (μ)
$c t_w$	SS400	4.5	332	450	2.12×10^5	37.0	0.78	1566
$b t_f$, b_{pl}		6.0	265	428	2.05×10^5	39.5	0.75	1293
$b t_f$, $c t_f$		9.0	299	485	2.03×10^5	38.9	0.64	1473

$c t_w$ ：柱ウェブ、 $c t_f$ ：柱フランジ、 $b t_f$ ：梁フランジ、 b_{pl} ：バンドプレート

t ：板厚、 σ_y ：降伏点強度、 σ_u ：引張強度、 E ：ヤング係数、 $E\text{Ing.}$ ：伸び率、Y.R.：降伏比、 ε_y ：降伏ひずみ

の十字鉄骨は、クロスH-200x80x4.5x9を用い、呼び強度30N/mm²の普通コンクリートを縦打ちで打設した。

試験体一覧を表-1に示す。実験変数は梁フランジの幅および板厚、外ダイアフラムの幅、バンドプレートの有無である。表中に式(6)で計算した外ダイアフラムの必要幅 D の値を示す。外ダイアフラム幅 d は、この D の値を参考にして選定した。なお、 D の値は梁フランジのサイズとバンドプレートの有無により変動し、各部位の降伏応力度 σ_y は270N/mm²で統一して設計した。括弧内は表-2に示した引張試験から得られた鋼材の材料強度を用いて計算した数値である。B100シリーズでは、試験体B100-d15Nが外ダイアフラムの必要幅 D を満足していないため、外ダイアフラムが先行して降伏すると予想される試験体である。試験体B120-d30NおよびB120-d40Nはどちらも外ダイアフラムの必要幅 D を満たさず、バンドプレートが無いことによって挙動にどのような影響を与えるかを比較する試験体である。

2.3 荷重方法

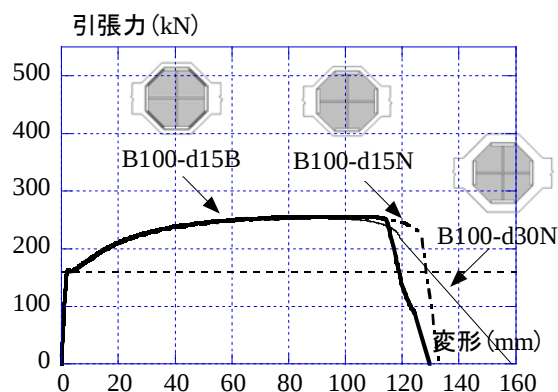
荷重装置を図-3に示す。加力側の支端は水平方向に移動できるようになっており、反対側は固定端としている。500kN水平ジャッキを用いて図中矢印の方向に加力し、試験体に引張力を作用させた。ひずみは、外ダイアフラム、バンドプレート、柱ウェブにひずみゲージを貼付し、各位置のひずみを計測した。変位は試験体全長800mm区間の軸方向変位を計測した。

3. 実験結果

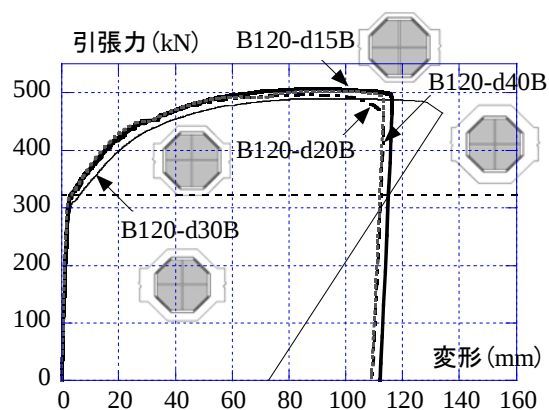
3.1 荷重－変形関係

実験で得られた荷重－変形関係を図-4に示す。図中の破線は計算から得られた梁フランジの降伏耐力を表す。また、表-3に主要な実験値を、写真-1に実験終了時の破壊状況を、それぞれ示す。同表中の初期剛性は、変形1.0mm時の割線剛性であり、降伏耐力は梁フランジに貼付したひずみの平均値が降伏ひずみに達したときの荷重である。

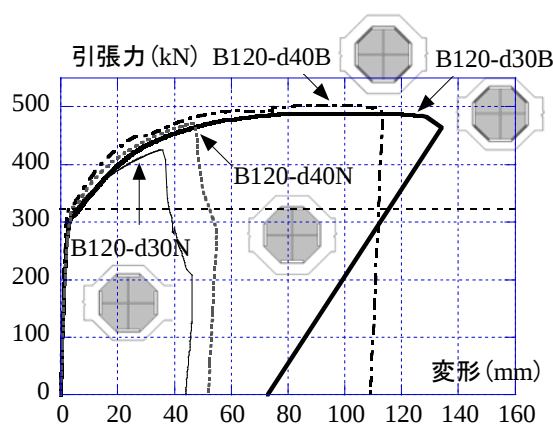
図-4(a)は梁幅100mmのB100シリーズの試験体を比較したものである。いずれの試験体も荷重－変形関係に



(a) B100試験体の比較



(b) B120試験体の外ダイアフラム幅の比較



(c) B120試験体のバンドプレート有無による比較

図-4 荷重－変形関係

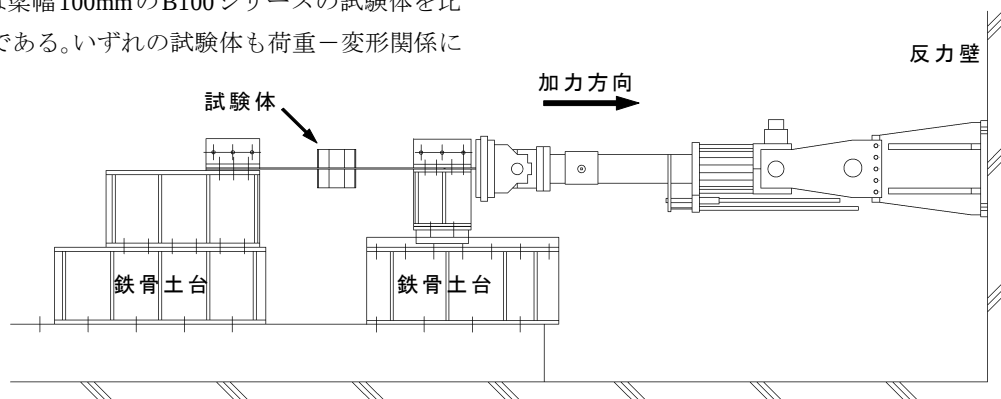


図-3 荷重装置

差異は見られず、最終破壊形式は梁フランジの破断であった。試験体B100-d15Nは外ダイアフラムの必要幅を満足していないが、試験体B100-d30Nと同様の挙動を示した。荷重－変形関係上では違いはないが、後述するひずみ挙動では違いが見られたため、そちらで詳述する。

同図(b)は、梁幅120mmでバンドプレートを設け、外ダイアフラムの幅を変化させた試験体の比較である。こちらも荷重－変形関係に大きな違いは見られなかった。試験体B120-d15Bおよび試験体B120-d20Bは外ダイアフラムの必要幅を満たしていないにも拘らず、いずれの試験体も変形能力に富んだ挙動を示している。

同図(c)は、梁幅120mmでバンドプレートの有無を比較したものである。バンドプレートのない試験体B120-d30Nおよび試験体B120-d40Nは外ダイアフラムの必要幅を満たしていないためか、バンドプレートのついた試験体よりも変形性能が劣る結果となっていることがわかる。また、破壊形式はバンドプレートがついた試験体では梁フランジの破断であったのに対し（写真－1(a)参照）、バンドプレートのない試験体は、外ダイアフラムの破断あるいは柱ウェブと柱フランジ間の溶接部破断であった（写真－1(b), (c)参照）。このことより、外ダイアフラムの必要幅を満足していなければ、梁で破壊せず変形性能に劣る挙動を示す傾向にあるものと推察できる。

3.2 ひずみ挙動

図－5に試験体に貼付したひずみゲージ貼付図を示す。梁フランジはF、柱ウェブはW、外ダイアフラムはD、バ

ンドプレートはBでそれぞれ表記している。なお、W5～W12は三試験体（B120-d15B、B120-d30B、B120-d30N）にのみ貼付している。また、図－6に外ダイアフラムの、図－7に柱ウェブの、図－8にバンドプレートのひずみ挙動を、それぞれ示す。なお、図－6および図－8のひずみ挙動は、いずれのひずみゲージも同様な傾向を示したことから、最も大きく計測されたひずみゲージをグラフ化している。また、同図中における試験体名後の括弧内には図－5で示したひずみゲージ貼付位置を示す。

表－4に梁降伏時における各部位のひずみゲージの値を示す。ここでは、梁フランジに貼付した4枚（F1～F4）のひずみの平均値が降伏ひずみに達したときを梁の降伏とした。同表中の「値」は、梁フランジのゲージが降伏ひずみに達した直後に、部位ごとで計測されたひずみの平均値である。また、「位置」は、平均した中でも最も大きな数値が計測されたゲージ貼付位置を表している。なお、梁フランジ降伏時に各部位の降伏している箇所を網掛けで区別している。

まず、B100シリーズの試験体B100-d15Bでは、梁フランジ降伏時において柱ウェブ、外ダイアフラム、バンドプレートは何れも弾性範囲であることがわかる。一方、バンドプレートを無くした試験体B100-d15NおよびB100-d30Nの外ダイアフラムは降伏ひずみにこそ達していないものの、大きめのひずみが計測されており、バンドプレートの有無による影響が見て取れる。また、図－6(a)より、試験体B100-d15Nは変形20mm付近から急激



(a) 試験体B120-d30B



(b) 試験体B120-d30N



(c) 試験体B120-d40N

写真－1 実験終了時の試験体

表－3 主要な実験結果

試験体名	初期剛性 K (kN/mm)	降伏耐力 P_y (kN)	降伏耐力時の変形 δ_y (mm)	最大耐力 P_y (kN)	最大耐力時の変形 δ_{max} (mm)	耐力比 P_{max}/P_y
B100-d15B	107	150	1.63	256.7	97.6	1.71
B100-d15N	107	165	4.96	254.6	96.0	1.54
B100-d30N	111	164	4.49	252.4	90.1	1.54
B120-d15B	172	282	2.04	506.7	93.2	1.80
B120-d20B	171	299	2.07	496.6	86.3	1.66
B120-d30B	160	304	3.28	489.3	94.5	1.61
B120-d40B	189	299	2.04	503.5	94.1	1.68
B120-d30N	153	318	4.32	425.4	35.1	1.34
B120-d40N	134	307	3.24	471.9	47.1	1.54

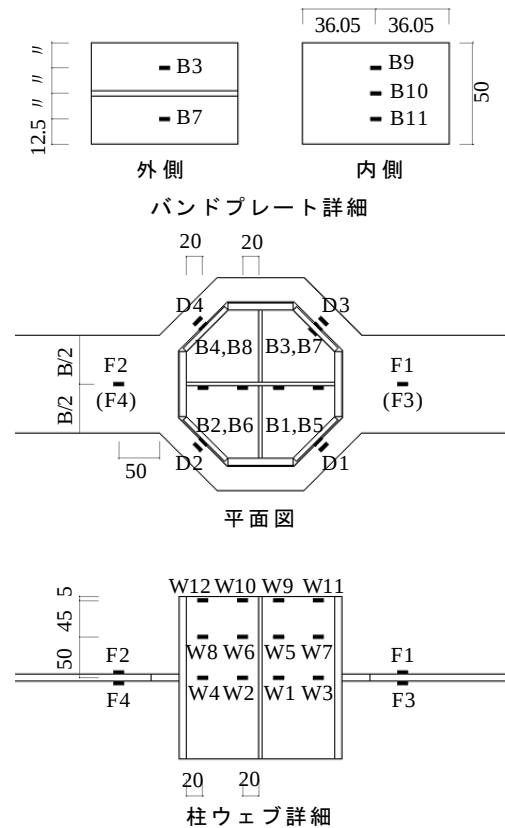
にひずみが増加していることがわかる。他二試験体は降伏後もほぼ横ばいで推移していることを考慮すると、外ダイアフラムに過度な損傷を与えないようにするためには、外ダイアフラムの必要幅を満足しておくことが重要であるものと考えられる。

B120シリーズでは、何れの試験体も柱ウェブが降伏ひずみに達しており、バンドプレートが無い試験体ほど大きなひずみが計測される傾向にある。バンドプレート有りの試験体に着目すると、四試験体とも外ダイアフラムは降伏ひずみに達していない。しかしながら、図－6(b)および図－8に着目すると、外ダイアフラムの必要幅(D=22.9mm)を境界にして、試験体B120-d15BとB120-d20Bは変形20mmを超えたあたりからひずみの急激な増大が確認された。また、バンドプレートを無くした試験体B120-d30NおよびB120-d40Nでは、何れの試験体も柱ウェブおよび外ダイアフラムに発生したひずみは大きく計測されており、バンドプレートの有無による違いが明確に現れた。試験体B120-d40Nでは外ダイアフラムの降伏も確認された。このことより、バンドプレートをつけない場合は、外ダイアフラムの必要幅を満足しておかないと、外ダイアフラムの降伏あるいは変形の増大とともに外ダイアフラムに過大なひずみが発生する恐れがあることがわかる。

以上より、式(6)で計算した外ダイアフラムの必要幅を満足していない試験体ほど、変形の増大に伴い大きなひずみが発生するようになり、また、外ダイアフラムも降伏ひずみに達するか、それに近い値が計測された。試験体B100シリーズおよびB120シリーズの結果を考慮すると、外ダイアフラムの必要幅を計算する式(6)は概ね妥当であるものと考えられる。本接合部では梁降伏先行を想定しており、梁フランジを先行して降伏させることで接合部の損傷は可能な限り抑えることを意図している。

図－7に試験体B120-d15B, B120-d30B, B120-d30Nにおける柱ウェブのひずみ挙動を示す。図中には反力側の

柱ウェブに貼付したゲージを示している。バンドプレート有りの二試験体では、梁フランジ近傍のW4で最も大きなひずみが発生しており、表－4中に示したように梁降伏時において最も大きな値を示していたゲージ位置もW3或いはW4であった。同図(a), (b)より、柱芯付近のW2とW6はほぼ同程度の値となっていることがわかるが、W8, W10と梁芯から遠ざかるほどひずみの値は小さくなる。このことより、柱ウェブに発生するひずみは一様ではなく、梁フランジとの溶接部を起点に放射状に分布しているものと考えられる。試験体B120-d30Nでは、バンドプレートが負担するはずの応力を柱ウェブで受け持つようになることから、W2, W6, W8ともに大きなひずみ



図－5 ひずみゲージ貼付位置

表－4 梁降伏時の各部位のひずみ

試験体名	梁フランジ		柱ウェブ		外ダイアフラム		バンドプレート	
	値(μ)	位置	値(μ)	位置	値(μ)	位置	値(μ)	位置
B100-d15B	1305	F3	1108	W3	377	D4	477	B11
B100-d15N	1296	F4	1122	W4	1190	D2	—	—
B100-d30N	1308	F1	2164	W3	1208	D2	—	—
B120-d15B	1481	F2	2135	W4	870	D3	1043	B9
B120-d20B	1524	F1	2308	W4	852	D3	967	B7
B120-d30B	1481	F1	2004	W4	824	D1	699	B1
B120-d40B	1501	F2	1612	W3	787	D3	736	B3
B120-d30N	1476	F1	2647	W3	1110	D3	—	—
B120-d40N	1504	F3	2539	W3	1766	D3	—	—
降伏ひずみ	B100: 1293, B120: 1473		1566		B100: 1293, B120: 1473		1293	

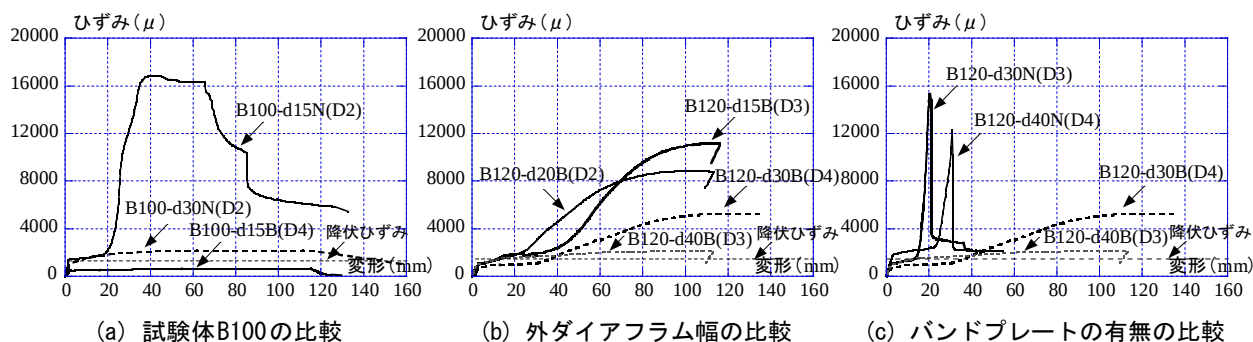


図-6 外ダイアフラムのひずみ挙動

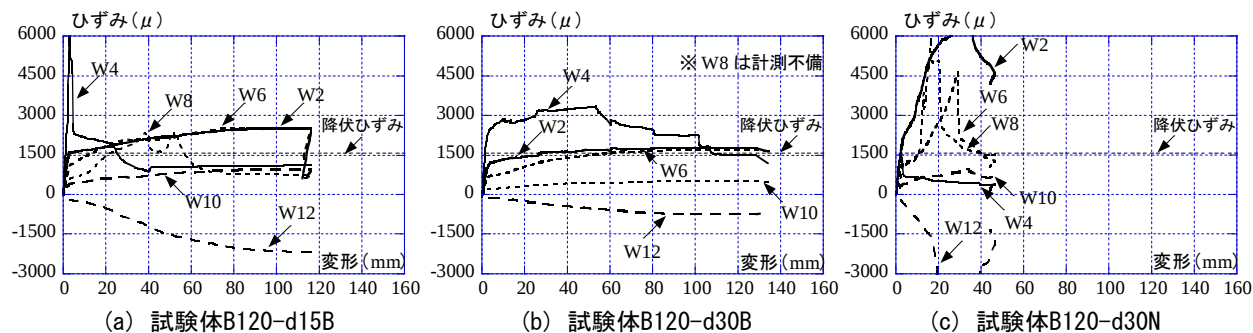


図-7 柱ウェブのひずみ挙動

が発生するようになる。式(6)では柱ウェブの力が伝達できる区間を100mmとして計算しており、W4に続いてW8も比較的早期に降伏ひずみに達していることから概ね妥当であるものと判断できるが、この区間に関してはより詳細な検討が必要であるものと考えられる。

4. 結論

バンドプレートに着目した鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁から構成される柱梁接合部の構造性能に関して引張試験を行なった結果、以下のことを明らかとした。

- 1) バンドプレートをつけることにより、式(6)で計算した外ダイアフラムの必要幅を満足しなくても、荷重-変形関係上は変形性能に富んだ挙動を示す。
- 2) 外ダイアフラムの必要幅を満足することにより、外ダイアフラムよりも梁フランジが先行して降伏するとともに、変形の増大に伴って外ダイアフラムおよびバンドプレートに発生するひずみの増大を抑制できる。
- 3) 荷重-変形関係およびひずみ挙動を考察すると、梁フランジを柱へ伝達するための外ダイアフラムの必要幅を計算する式(6)の計算式は、妥当であると云える。

謝辞

本研究は平成28年度科学研究費助成事業・基盤研究(c) (課題番号 15K06314, 研究代表: 堺純一) の助成を受けた。また、試験体の製作および載荷実験にあたり、福岡大学教育技術職員の石橋宏一郎氏および、八波映梨氏、本村拓椰氏、鉄田修平氏をはじめとする同大学堺研究室

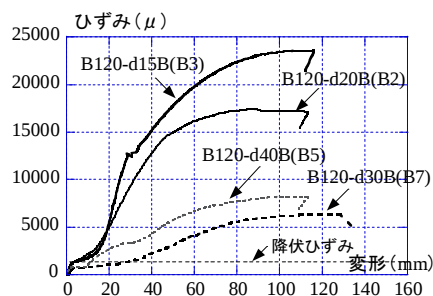


図-8 バンドプレートのひずみ挙動

の卒研生にお世話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 川原健輔, 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.60B, pp.65-71, 2014.3
- 2) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 川原健輔, 八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する解析的研究, コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1039-1044, 2014.7
- 3) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河野公晴, 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材と鉄骨梁フランジ間の応力伝達に関する研究, コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1183-1188, 2016.7