論文 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実験的研究

倉富 洋*1・堺 純一*2・田中 照久*3・河野 公晴*4

要旨:鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成される混合構造骨組における柱梁接合部の応力伝達について 検討するため,引張試験を実施した。本研究では柱鉄骨フランジ幅より梁鉄骨フランジ幅が大きい場合の接合 部を対象として,梁端応力を柱へ伝達させるために必要なダイアフラム幅と,内スチフナの形状およびバンド プレートが応力伝達へ及ぼす影響について検討した。その結果,バンドプレートを設けることで必要ダイアフ ラム幅を小さくできることを示すとともに,内スチフナの形状は三角スチフナよりL字形スチフナとした方が 梁フランジ応力を柱にスムーズに伝達できることを明らかとした。

キーワード:鋼・コンクリート合成柱材, 十字鉄骨, 内スチフナ, バンドプレート, 柱梁接合部

1. 序

著者らは、鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと略記) 部材の特徴である高耐震性能の更なる向上と、施工の簡 素化を目指した鋼・コンクリート(以下SCと略記)合成 柱材の開発を目的として、十字形鉄骨とコンクリートで 構成される八角形断面を有するSC柱材の弾塑性挙動に 関する研究を行なっている^{1), 2)}。地震時応力を想定した 曲げせん断実験を行ない、本SC柱材がSRC柱材に劣ら ない構造性能を示すことを明らかとした。

本研究の目的は,柱部材単独の構造性能を明らかとし た次なるステップとして,本SC柱材の柱梁接合部ディ テールを検討することにある。ここでは,本SC柱材と鉄 骨梁で構成された混合構造骨組を想定し,図-1(a)に示 すような外ダイアフラムと内スチフナを用いた柱梁接合 部を考案した。柱鉄骨フランジ幅が梁鉄骨フランジ幅よ り大きければ,従来の柱梁鉄骨造の溶接接合法で接合部 を構成できるが,本SC柱材の断面設計の自由度を考慮す ると,柱鉄骨フランジ幅が梁鉄骨幅より小さくなる状況 も想定される。このような場合,梁が負担する応力を確 実に柱部材へ伝達させるには,外ダイアフラムを用いる ことが合理的であるものと考えられる。一方で,製作工 程を考えると,外ダイアフラムを取り付けることが手間 となる恐れもあるため,鉄骨梁端を絞り,カバープレー トで補強する接合部タイプ(図-1(b)参照)も併せて検 討した。本研究では,梁フランジの応力を本SC柱材に伝 達させるために必要な外ダイアフラム幅と内スチフナの 形状寸法を明らかとするため,本柱梁接合部を模した試 験体を製作し,引張試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1および図-2に試験体詳細図を示す。鉄骨梁は フランジのみを再現した。本研究では二種類の接合部 ディテール(ダイアフラムタイプとカバープレートタイ プ)について検討する。ダイアフラムタイプでは,梁フ ランジと外ダイアフラムは一枚の鋼板から切り出されて おり,柱鉄骨フランジとは完全溶け込み溶接にて溶接接 合した。なお,本タイプの柱鉄骨寸法はCH-200x80x4.5x9 である。一方で,カバープレートタイプでは,鉄骨梁端 を絞り加工したフランジを柱鉄骨フランジに完全溶け込



*4 福岡大学大学院 工学研究科博士課程前期

み溶接にて接合した。更に、補強のために、絞り加工し た梁端部分には厚さ6mmのカバープレートを隅肉溶接し ている。なお、本タイプの柱鉄骨寸法はCH-200x80x6x9 である。内スチフナは、ダイアフラムタイプは板厚6mm の鋼板を、カバープレートタイプは板厚12mmの鋼板を、 バンドプレートは何れの試験体も幅50mm、板厚6mmの 鋼板を隅肉溶接で所定の箇所に取り付けた。

試験体一覧を表-1に示す。製作した試験体は、ダイ アフラムタイプ8体、カバープレートタイプ6体の計14 体である。実験変数は、外ダイアフラムの幅*d*、絞り長



図-2 試験体詳細図

さ*l*, 内スチフナの形状および有無, バンドプレートの有 無とした。内スチフナの存在は柱梁接合部において応力 伝達に寄与するものと考えられるが, コンクリート充填 の妨げになり得ることも懸念される。そのため, 本実験 では形状を三角形とL字型の二種類実施するとともに, 無しとした場合に外ダイアフラムに沿ったバンドプレー トのみでも応力伝達上問題ないかを確認する。外ダイア フラム幅*d*と絞り長さの算出は次節にて詳述する。鋼材 の機械的性質を**表**-2に示す。コンクリートは呼び強度 30N/mm², 最大骨材径13mmで縦打ちで打設した。





接合形式

D: ダイアフラムタイプ, C: カバープレートタイプ

試験体名	鉄骨寸法	接合形式	バンド プレート	内スチフナ	コンクリート強度 (N/mm ²)	
D14-BT		外ダイアフラム	有り	三角	31.4	
D14-BL		(d = 14 mm, D = 28 mm)		L字	31.6	
D28-B	柱:CH-200x80x4.5x9 梁:PL-6x100	外ダイアフラム (<i>d</i> =28mm, <i>D</i> =28mm)		無し	31.1	
D28-BT				<u>– д</u>	31.6	
D28-NT			無し	二月	30.9	
D28-NL				L字	31.2	
D50-B		外ダイアフラム (<i>d</i> =50mm, <i>D</i> =70mm)	有り	4mm 1	31.2	
D70-N		外ダイアフラム (<i>d</i> =70mm, <i>D</i> =70mm)	無し	一一冊し	30.9	
C95-BT	柱:CH-200x80x6x9 梁:PL-6x120	カバープレート 長さ95mm 絞り長さ1=95mm	有り	<u>– д</u>	31.2	
C95-NT			無し	二月	30.9	
C95-NL				L字	31.6	
C180-BT			有り	<u>– д</u>	31.2	
C180-NT		カバーブレート 長さ95mm 絞り長さ/=180mm	無し	二円	30.9	
C180-NL				L字	31.6	

表-1 試験体一覧

※d:外ダイアフラム幅,D:式(4)で計算した必要ダイアフラム幅,バンドプレートは高さ50mmで統一

使用箇所	鋼種	t (mm)	$\sigma_y (\text{N/mm}^2)$	$\sigma_u (\text{N/mm}^2)$	$E (\text{N/mm}^2)$	Elng. (%)	<i>Y.R</i> .
<i>c t w</i>	- SS400	4.5	345	448	2.08x10 ⁵	36.0	0.78
$_{b}t_{f}$, $_{i}s$, b_{pl}		6.0	326	433	2.09x10 ⁵	39.2	0.75
$_{c}t_{f}$		9.0	268	424	2.13x10 ⁵	39.5	0.64
_i S		12.0	279	443	2.08x10 ⁵	40.5	0.63

表-2 鋼材の機械的性質

 $_{c}t_{w}$: 柱ウェブ, $_{c}t_{f}$: 柱フランジ, $_{b}t_{f}$: 梁フランジ, $_{i}s$: 内スチフナ, b_{pl} : バンドプレート

t:板厚, σ_v:降伏点, σ_u:引張強さ, E:ヤング係数, Elng.: 伸び率, Y.R.:降伏比

2.2 設計概要

必要な外ダイアフラム幅Dを決定するに当たり,図-3に示すような力の伝達を想定した。即ち,梁フランジの引張力Pを内スチフナ(P₁)に負担させ,残りの引張力 を外ダイアフラム(P₃)に負担させるものである。ここで は、バンドプレートの効果が予測できないため、バンド プレートの影響は考慮していない。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に必要な外ダ イアフラムの幅Dは、梁フランジと外ダイアフラムおよ び内スチフナを同厚とした場合、式(4)にて算出される。

$$P_1 = \frac{s}{B}P \tag{1}$$

$$P_2 = \frac{B-s}{2B}P\tag{2}$$

$$P_3 = \sqrt{2}P_2 \tag{3}$$

$$D = \frac{B-s}{\sqrt{2}} \tag{4}$$

ここで, P_1 :スチフナの負担する引張力, P_2 :外ダイア フラムの負担する引張力(材長方向), P_3 :外ダイアフラ ムの負担する引張力(45度方向),s:内スチフナの幅 (=60mm),B:梁フランジ幅である。このDを満足して いれば外ダイアフラムより先行して梁が降伏する。

カバープレートの寸法は,絞り切った梁端部における 断面積と絞り前の梁フランジの断面積が同じになるよう に決定した。絞り長さ95mmとした試験体C95シリーズ では,絞り部分全域にカバープレートがあるため絞り前 の梁フランジで降伏する。一方で,絞り長さ180mmとし た試験体C180シリーズでは,長さ95mmのカバープレー トが溶接されていない絞り部の領域に危険断面を設け, そこで降伏するように設計した。

2.3 載荷方法

載荷装置を図-4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、ダイアフ ラム、バンドプレート,柱ウェブにそれぞれ4枚ずつ、梁 フランジに6枚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

図-5に各試験体の荷重-変形関係を示す。同図(a)~ (d)はダイアフラムタイプの試験体を、同図(e),(f)には カバープレートタイプの試験体を示す。図中には材料強 度を用いて計算した梁フランジの降伏耐力を破線で示し ている。また,**表-3**に主要な実験値を示す。

図-5(a)は外ダイアフラム幅14mmにおける内スチフ ナ形状の違いを比較したものである。これらの試験体は 必要ダイアフラム幅D=28mmより小さい外ダイアフラム 幅であるが,バンドプレートを設けることにより,梁の 応力を伝達させることができ,かつ他試験体と比較して も変形能力に富んだ挙動を示している。最終的に梁フラ ンジ母材で破断したL字スチフナを設けたD14-BLの方 が破断までの伸び能力は大きいが,後述する試験体にお ける内スチフナ形状の比較を行なうと,一概にL字形と した方が変形性能が向上するという傾向は見られない。

同図(b)は主に内スチフナの有無を比較したグラフで ある。D28-BはD28-BTと同様の挙動を示した。試験体 D28-Bは本来であれば外ダイアフラム幅はD=70mm必要 であるが,バンドプレートを設けることで半分以下の外 ダイアフラム幅としても応力伝達が可能である。また, D14-BTとD28-BTもほぼ同様の挙動を示しており,梁の 応力を内スチフナとバンドプレートを介して効率よく伝 達させることで,外ダイアフラム幅を小さく抑えられる ようになる。

同図(c)には,バンドプレートの有無を比較したグラフ を示している。D28-NTとD28-BTの挙動に大きな差は 見られないことから,バンドプレートが無い場合でも必 要ダイアフラム幅Dであれば梁端の強度を発揮させるこ とが可能である。また,上述したように内スチフナ形状 が三角形でもL字形でも挙動に差は見られない。

D70-Nの挙動より、バンドプレートや内スチフナを設 けずとも式(4)で示した計算に則れば、外ダイアフラムで 破断させることなく、梁端降伏の靱性に富んだ挙動を示 すことができる(図-5(d)参照)。ダイアフラムタイプの 試験体の破壊性状は、試験体D50-Bを除いて、写真-1(a) に示すように全て梁フランジの破断であったが、D50-B



のみ梁端と外ダイアフラムの境界面で破断した(写真-1(b)参照)。この試験体のみ他の試験体と性状が異なっているのは、鋼材が異なる可能性も含めて不明である。

同図(e)は、カバープレートタイプの絞り長さ95mmの グラフである。こちらも傾向としてはダイアフラムタイ プ試験体と同様であり、荷重変形関係においてバンドプ レートの有無およびスチフナ形状の違いによる影響は見 られなかった。破断位置は、絞り加工のされていない梁 フランジ部であり、カバープレートを付けたことによる 効果が明確に現れたものと考えられる。

絞り長さを180mmと長くした試験体の荷重-変形関係 を同図(f)に示す。C180-BT, C180-NT, C180-NLの三試



験体とも挙動に大きな違いは見られない。しかしなが ら、C95シリーズと比較すると、変形能力は0.5倍以下で あり早期に破断した。破断部分は、写真-1(c)に示すよ うに絞り部におけるカバープレートが溶接されていない 区間であり、想定通りの箇所で破断した。

また表-3より,初期剛性はダイアフラムタイプおよ びカバープレートタイプに共通して,バンドプレート有 り,内スチフナはL字形の方が僅かながら大きな値を示 す傾向が見られた。

3.2 歪挙動

図-6にひずみ-変形関係を示す。柱ウェブ,外ダイ アフラム,バンドプレートともに,各試験体で最も大き





く計測されたゲージの値を示している。

同図(a)より, D28-BとD28-BTを比較すると, 内スチ フナを設けることにより,柱ウェブにより力が流れるよ うになり ((a-1)参照), バンドプレートに生じるひずみ は小さくなっていることがわかる((a-3)参照)。しかし ながら,外ダイアフラムが負担する力は,内スチフナの 有り無しは影響しないようである ((a-2)参照)。 次いで, バンドプレートの有無と内スチフナ形状の組合わせ (D28-BT, D28-NT, D28-NL) を比較する。まず三角スチ フナを用いたD28-NTでは,柱ウェブと外ダイアフラム に大きな力が流れるようになり、どちらも2000µを超え ていることがわかる。これは、梁端応力が外ダイアフラ ムと内スチフナを介して柱ウェブに伝達されたためだと 考えられる。しかしながら、ここで内スチフナの形状に 着目すると、L字形の内スチフナを取り付けたD28-NLで は柱ウェブに発生したひずみは4試験体の中で最も小さ く、また外ダイアフラムのひずみは試験体D28-B、D28-



(a) D14-BT



(b) D50-B 写真-1 実験後の試験体



BTと大きくは変わらない。荷重-変形関係においては これらの試験体に大きな差は見られなかったが, 歪挙動 においては大きな違いが見て取れた。内スチフナ形状に よる歪挙動の違いは,紙面の都合上示していないが, D14-BTとD14-BLでも同様の傾向が見られ,L字形とし た方が柱や外ダイアフラムに与える損傷を小さくでき る。内スチフナ形状の違いが柱梁接合部の応力伝達に及 ぼす影響は今後も実験データを蓄積して更なる検討が必 要であると考えられる。

図ー6(b)に、Cシリーズの柱ウェブの歪挙動を示す。こちらも前述したD28シリーズと同様な傾向が見られた。 即ち、L字形スチフナを設けることで柱ウェブのひずみが小さくなる一方で、三角スチフナの場合では柱ウェブ に大きなひずみが生じており、引張降伏している。

3.3 考察

梁フランジの引張応力を伝えるために必要な外ダイア フラム幅は式(4)で計算されるが,バンドプレートを取



(c) C180-NL



図-6 ひずみ-変形関係

試験体名	初期剛性K	最大耐力P _{max}	最大耐力時の変形 δ_{max}	降伏耐力P _y	耐力比	d	D	d/D	
	(kN/mm)	(kN)	(mm)	(kN)	P_{max}/P_y	(mm)	(mm)		
D14-BT	119.6	246	68.0	203	1.21	14	28	0.5	
D14-BL	133.9	246	79.0	203	1.21	14		0.5	
D28-B	108.9	247	66.8	204	1.21		70	0.4	
D28-BT	127.2	248	63.5	204	1.22	28	28	1.0	
D28-NT	108.7	246	63.2	203	1.21			1.0	
D28-NL	115.6	246	64.2	203	1.21			1.0	
D50-B	116.7	262	65.5	201	1.30	50 70		0.7	
D70-N	105.2	247	55.4	203	1.22	70	70	1.0	
C95-BT	134.9	308	78.6	253	1.22	\searrow			
C95-NT	118.9	306	74.5	253	1.21				
C95-NL	136.6	310	81.7	255	1.22				
C180-BT	133.1	269	42.6	221	1.22				
C180-NT	126.9	266	42.4	221	1.20				
C180-NL	129.2	270	41.9	221	1.22	1			

表-3 主要な実験値

※初期剛性は変形1.0mm時点における割線剛性, d はダイアフラム幅, D は式(4) で計算した必要ダイアフラム幅

り付けることにより、大幅に低減できる。D70-NとD28-Bで挙動に大差がなかったことから、バンドプレートも 内スチフナと同様に応力伝達に大きく寄与できるものと 考えられる。本実験結果から云えば、D28-BとD28-NLが 荷重-変形関係および外ダイアフラムの歪挙動に相違な かったことを考慮すると、バンドプレートはL字形スチ フナとほぼ同等の応力伝達性能を有しているものと考え られる。柱梁接合部ではコンクリートの充填性の低下が 懸念されるが,内スチフナを取り付けずバンドプレート で補えるとすれば,その充填性は大きく改善されるもの と見込まれる。内スチフナの形状をL字形とすれば、安 定した応力伝達が期待できるが,三角形とした場合は, 柱ウェブや外ダイアフラムに大きな歪が生じる傾向にあ るため、バンドプレートと併用させる必要がある。また、 外ダイアフラムを無くしたカバープレートタイプC95で は、応力伝達要素を設けていれば、ダイアフラムタイプ と同程度の変形能力を示した。危険断面を設けたC180は 変形性能が劣る結果となったが,危険断面を設けること の是非は繰返し曲げせん断実験を実施するなど詳細な検 討が必要である。

4. 結論

+字鉄骨とコンクリートで構成された鋼・コンクリー ト合成柱材と鉄骨梁から構成される混合構造骨組の柱梁 接合部の応力伝達性状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。

 バンドプレートや内スチフナを設けることで、梁の応 力を柱へ伝達させるための必要ダイアフラム幅を低減 させることが可能である。また、本実験結果において 云えば、バンドプレートはL字形の内スチフナとほぼ 同程度の応力伝達能力を有している。

- 2)内スチフナの形状において、荷重-変形関係上では三 角形とL字形で相違は見られないが、柱ウェブや外ダ イアフラムに発生するひずみを分析すると、L字形ス チフナの方が梁フランジ応力を柱にスムーズに伝達し ている。
- 3)ダイアフラムを設けないカバープレートタイプでも内 スチフナやバンドプレートを適切に設けることにより 梁端応力を柱へ伝達させることは可能である。バンド プレートの有効幅は今後詳細に検討する必要がある。

謝辞

本研究は平成27年度科学研究費助成事業・基盤研究(c) (課題番号24560706,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,鍋島一英氏, 渕上大貴氏,中原大介氏をはじめとする同大学堺研究室 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, 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
- 2) 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