

平成 21 年 6 月 11 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19360248
 研究課題名（和文） 有孔フランジ工法を用いた現場型柱梁溶接接合部の変形能力に関する研究
 研究課題名（英文） Study on deformation capacity of site welding beam-to-column joints with the method of drilled flange
 研究代表者
 中込 忠男（NAKAGOMI TADAO）
 信州大学・工学部・教授
 研究者番号：60111671

研究成果の概要：鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力を向上させる有孔フランジ工法に関する実大破壊実験及び 3 次元有限要素法解析から、有孔フランジ工法における応力比 の値を 1.07 以上、孔位置 a を梁幅 B の 0.75 倍以上に設計すると変形能力が効果的に向上することが明らかとなった。また、降伏比の値を問わず同様の設計方法で十分な変形能力を得ることができると明らかとなった。以上の結果より有孔フランジ工法の設計式を提案した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2008 年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
年度			
総計	16,000,000	4,800,000	20,800,000

研究分野：鋼構造

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料，鋼構造，耐震構造，破壊力学，溶接工学

1．研究開始当初の背景

1995 年の兵庫県南部地震において鉄骨建築構造物の柱梁溶接接合部に脆性破壊が散見され、脆性破壊の防止が重要視されている。

柱梁溶接接合部は溶接施工を行う為に梁ウェブにスカラップを設けるが、スカラップは幾何学的不連続の影響からスカラップ底に応力集中が発生する。また、溶接部は冶金的不連続部であるため熱影響部の靱性劣化は避けられず、さらに梁フランジの端部は歪集中し梁端溶接始末端部からの破壊が問題とされている。柱梁溶接接合部の脆性破壊は様々な要因が重畳しているが、柱梁溶接接合部の変形能力は接合部ディテールの影響が大きく、ノンスカラップ工法を用いることで変形能力が飛躍的に上昇することが報告されている。

柱梁溶接接合部は工場溶接接合と現場溶

接接合の 2 種類に大別される。現場溶接接合については工場溶接接合に比べコストの低減が期待できることから、使用が増えている。

工場溶接型は鉄骨加工場にて溶接接合を行う為、クレーン等で部材を反転させることが比較的容易で、ノンスカラップ工法の適用が可能である。しかし現場溶接接合は現場で梁とダイアフラムを溶接するため、下フランジは開先が上向きとなり、ノンスカラップ工法の適用が困難である。そのため、スカラップ底からの脆性破断が危惧される。そこで、現場型柱梁溶接接合部の変形能力を十分に確保できる改善策を確立することは急務である。

2．研究の目的

本研究は現場型柱梁溶接接合部の変形能力を向上させ、且つ施工が容易で、加工費も

あまり掛からない有孔フランジ工法の設計方法を提案することを最終目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実大柱梁溶接部破壊実験

本研究では有孔フランジ工法の設計法を確立するために、実大柱梁溶接部破壊実験を行い、応力比による変形能力の違い、降伏比が異なる鋼材を用いた場合の変形能力の違い、孔位置による変形能力の違いについて検討した。

応力比による変形能力の違い

図1に試験体設置状況を示す。試験体は、柱梁溶接部をモデル化した実大ト形試験体とする。梁部材には圧延H形鋼 RH-612×202×13×23(SM490A)、柱部材には冷間成形角形鋼管 -400×400×25(BCP325)を用いて通しダイヤフラム形式とした。ダイヤフラムは PL-450×450×28(SM490A)を使用し、通常下側梁フランジの開先は内開先、上側開先は外開先となるが、実験のため上下フランジ共に内開先とし、梁フランジと芯合わせで溶接接合した。溶接は完全溶け込み溶接を下向き姿勢で行い、溶接始終端部にはスチールタブを用い、スカラップは『建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事』で推奨されている R=10mm の返しがついている複合円型スカラップとした。

$$\sigma_h = \frac{M_h}{Z_{ph}} \quad \dots (1) \quad \sigma_f = \frac{M_f}{Z_{pf}} \quad \dots (2)$$

$$M_h = P \times (L - a) \quad \dots (3) \quad M_f = P \times L \quad \dots (4)$$

$$\text{応力比 } \gamma = \frac{\sigma_h}{\sigma_f} = \frac{Z_{pf} \times (L - a)}{Z_{ph} \times L} \quad \dots (5)$$

h : 孔欠損(梁端から最も近い孔)を有する断面の応力

f : スカラップ欠損を考慮した梁端部の応力

Z_{ph} : 孔欠損(梁端から最も近い孔)を有する断面の塑性断面係数

Z_{pf} : スカラップ欠損を考慮した梁端部の塑性断面係数

L : 柱表面から加力点までの距離 (=2850mm)

a : 柱表面から孔欠損(梁端から最も近い孔)を有する断面までの距離 (以下、孔欠損を有する断面を孔部と称す)

有孔フランジ工法を用いた柱梁溶接部の変形能力の優劣は梁端部に対して孔部にどれだけ応力を負担させるかという応力比が大きく影響している。図2及び下式(1)~(5)に応力比の算出方法を示す。

表1に実験パラメータを示す。筆者らは文献「孔空きフランジ方式を用いた現場溶接部の変形能力に関する実験的研究」¹⁾により応力比 =1.06 以下ではスカラップ底から破断に至ったが応力比 =1.07 以上で孔部から破断に移行し、工場型ノンスカラップ以上の十分な変形能力を有したことを報告している。本検討では梁断面が異なっても文献¹⁾と同様の結果になるかの比較検討を行うた

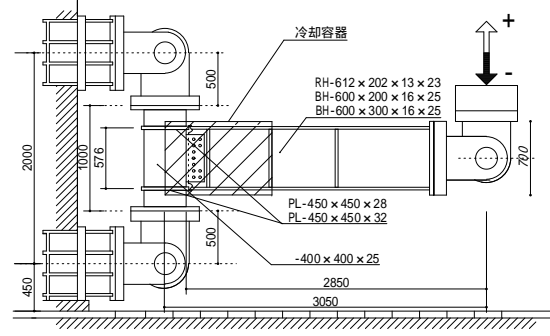


図1 試験体設置状況

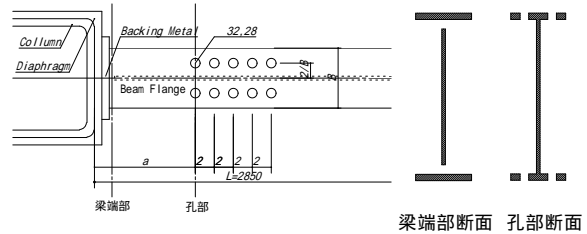


図2 応力比の算出方法

表1 実験パラメータ

試験体名	Z_{pf} (mm)	Z_{ph} (cm^3)	a (mm)	c	p (mm)	cPp (kN)
GOA0	-	-	-	-	-	-
G5A387	32	3636	387	1.05	17.10	428
G7A340			340	1.07		
G9A293			293	1.09		

Z_{pf} : 孔径 Z_{ph} : スカラップ欠損を考慮した梁端部の塑性断面係数

Z_{ph} : 孔部の塑性断面係数 a : 柱表面から孔部中心までの距離

c : 応力比 p : 梁端部における全塑性曲げ耐力時の変形量

cPp : 梁端部における全塑性時の荷重

表2 引張試験結果(0)

試験体	Y.P. (N/mm^2)	T.S. (N/mm^2)	Y.R. (%)	EL. (%)
梁フランジ	345	537	64	36
フィレット部	340	549	62	36
ダイヤフラム	345	548	63	37
溶接金属	408	535	76	34

Y.P.: 降伏点 T.S.: 引張強さ Y.R.: 降伏比 EL.: 伸び

表3 シャルピー衝撃試験結果

試験片	$\sqrt{T_E}$ (J)	$\sqrt{E_0}$ (J)	$\sqrt{E_{shelf}}$ (J)	$\sqrt{T_S}$ (J)	$\sqrt{B_0}$ (%)	
梁フランジ	母材	-68	251	279	-66	6
	フィレット	25	61	243	20	79
	HAZ	-121	220	277	-92	20
ダイヤフラム	母材	15	62	263	9	68
	HAZ	-9	166	307	-24	31
溶接金属	5	72	169	11	61	

$\sqrt{T_E}$: エネルギー遷移温度 $\sqrt{E_0}$: 0 吸収エネルギー

$\sqrt{E_{shelf}}$: 上部棚吸収エネルギー $\sqrt{T_S}$: 破面遷移温度

$\sqrt{B_0}$: 脆性破面率

表4 実験パラメータ

試験体名	梁材の材質	梁端ディテール	応力比 γ	孔位置 a (mm)	孔径 (mm)	孔数
MG	SM490A	有孔フランジ工法	-	-	-	-
MGA340			1.07	340	32	3
SG	SS400	有孔フランジ工法	-	-	-	-
SGA340			1.07	340	32	5

め、応力比 $\gamma = 1.07$ を基準とし、2%ずつ変化させ、 $\gamma = 1.05, 1.07, 1.09$ の3種類とした。また、孔のピッチ、大きさ、数は3試験体とも統一した。また、比較試験体として有孔フランジ工法を用いていない試験体を1体用意した。なお、本研究において便宜上、無孔の試験体は応力比 $\gamma = 1.00$ と仮定する。

試験体は柱上下端をピン支持とし、載荷はアクチュエータを用いた。載荷振幅は、梁端部における全塑性耐力時の変形量（計算値） c_p を基準として、0.5、1、2 と漸増させ正負交番繰り返し載荷を試験体が破断するまで行った。

なお梁端部（図1中の斜線部分）をドライアイス・エタノールを用いて、0 で30分冷却した後に変位制御により載荷を行なった。なお載荷中も設定温度を保持した。

破壊起点となりうる、母材（フィレット部、孔部、ダイアフラム部）溶接部（溶接金属、溶接熱影響部）について引張試験、シャルピー衝撃試験を行なった。表2、表3に試験結果を示す。

降伏比が異なる鋼材を用いた場合の変形能力の違い

筆者らは文献「梁材の降伏比が柱梁溶接接合部の変形能力に与える影響に関する実験的研究」²⁾により降伏比が高くなるのに従い変形能力が低くなることを報告している。

しかし有孔フランジ工法は既往の研究では梁材の材質を統一して行われているため降伏比がほぼ同程度である。そこで本検討では梁材の材質を SM490A と SS400 とし、降伏比が異なる場合の変形能力について比較検討する。表4に実験パラメータを示す。

試験体形状は と同形状にし、新たに梁材に SM490A、SS400 を使い、梁材 SS400 の試験体にはダイアフラムに SN400B を用いて試験体を作製した。また、 と同様の素材試験結果を表5、6に示す。

孔位置による変形能力の違い

筆者らは応力比 γ の増加に伴い変形能力が高くなることを文献¹⁾で報告しているが、同一応力比 γ であっても孔位置と孔径の様々な組み合わせが生じることから、孔位置を柱に近づけた場合に変形能力に及ぼす影響を検討する。表7に実験パラメータを示す。

で用いた試験体 MGA340 の他に、新たに梁材に組立 H 形鋼 BH-600 × 300 × 16 × 25(SM490A)、ダイアフラムに PL-450 × 450 × 32(SM490A)を使用し、有孔フランジ工法を用いた試験体2体と、比較試験体として梁材に BH-600 × 200 × 16 × 25(SM490A)、有孔フランジ工法を用いた試験体と共通のダイアフラムを使用して現場溶接型試験体を1体作製した。柱部材、スカルップ形状等は と同形

表5 引張試験結果(0)

試験片採取位置	Y.P.(N/mm ²)	T.S.(N/mm ²)	Y.R.(%)	E.L.(%)	
SM490A	梁フランジ	350	550	64	31
	フィレット部	344	541	64	30
	ダイアフラム	381	574	66	28
SS400	梁フランジ	285	480	59	33
	フィレット部	278	469	59	34
SN400B	ダイアフラム	264	443	60	35
	溶接金属	454	569	80	27

表6 シャルピー衝撃試験結果

試験片採取位置	$\sqrt{T_E}$ ()	$\sqrt{E_0}$ (J)	$\sqrt{E_{shear}}$ (J)	$\sqrt{T_S}$ ()	$\sqrt{B_0}$ (%)	
SM490A	梁フランジ	母材	-68	251	279	-66
		HAZ	-9	188	337	-10
	ダイアフラム	母材	21	60	173	31
SS400	梁フランジ	母材	56	43	239	52
		フィレット	69	14	172	75
	HAZ	-31	150	210	3	
SN400B	ダイアフラム	母材	4	127	275	16
	溶接金属	-19	124	141	25	

表7 実験パラメータ

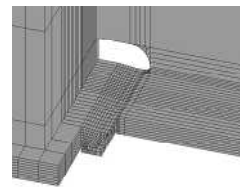
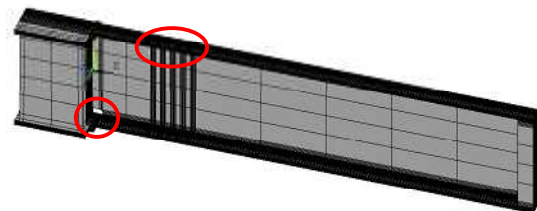
試験体名	フランジ幅B (mm)	応力比 γ	孔位置a (mm)	孔径 Φ (mm)	孔列
MG	200	-	-	-	-
MGA170	300	1.07	170	32	3
MGA100			100	28	
MGA340	202	-	340	32	-

表8 シャルピー衝撃試験結果

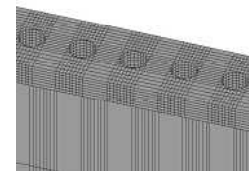
試験片採取位置	$\sqrt{T_E}$ ()	$\sqrt{E_0}$ (J)	$\sqrt{E_{shear}}$ (J)	$\sqrt{T_S}$ ()	$\sqrt{B_0}$ (%)	
SM490A	梁フランジ	母材	14	73	200	26
		HAZ	-9	142	233	-7
	ダイアフラム	母材	-9	96	159	22
		HAZ	-23	150	197	-7
溶接金属	-19	143	219	2		

表9 引張試験結果(0)

試験体	Y.P.(N/mm ²)	T.S.(N/mm ²)	Y.R.(%)	E.L.(%)	
SM490A	梁フランジ	353	552	64	28
	ダイアフラム	346	540	64	29
溶接金属	451	591	76	24	



接合部詳細



断面欠損部詳細

図3 解析モデル

状である。また で梁材に SM490A を用いて作製した有孔フランジ工法試験体も含め検討を行った。また、 と同様の素材試験結果を表8、9に示す。

(2)3次元弾塑性有限要素法解析

任意の梁断面における応力比 γ とスカル

ップ底に生じる応力の関係性を検討する為、3次元弾塑性有限要素法解析を行い、梁せいが異なる場合、梁フランジ幅が異なる場合、同一応力比における孔位置の影響を検討した。図3に要素分割した解析モデルを示す。解析モデルは3次元モデルとし対称性を考慮し、梁フランジ幅方向に関して1/2モデルとした。ダイアフラムと梁フランジは芯合わせで接合し、ルート間隔を7mm、開先角度35°とし、上下梁フランジとも内開先とした。スカラップ形状は、スカラップ高さを35mmとし、R25とR10を付け合せ梁フランジに梁ウェブが鈍角に進入する形状で複合円型スカラップとした。

解析は、汎用非線形構造解析プログラムANSYS9.0により梁端部に強制変位を与え、行った。降伏条件はvon Misesの降伏条件、塑性域には等方硬化則を用い、要素は8節点のソリッド要素を用いた。解析に用いた素材特性は引張試験から得られた公称応力-公称歪を真応力-真歪に置き換えたものを梁部材、溶接金属部、ダイアフラム材の入力データとして用いた。なお、柱はダイアフラムの値を用い、HAZ部は考慮していない。ヤング係数は $E=2.06 \times 10^5 (N/mm^2)$ 、ポアソン比は $\nu=0.3$ とした。

4. 研究成果

(1)実大柱梁溶接部破壊実験

既往の研究にて繰り返し载荷のスケルトン曲線と単調载荷は概ね等価であり地震荷重のようなランダムな外力を受ける鋼部材の変形能力を評価する上で適切な指標となりうる事が報告されている。本研究では変形能力の指標としてスケルトン曲線から算出する累積塑性変形倍率 s_p を使用する。図4に試験体の荷重P-変形関係の例、図5にスケルトン曲線算出方法、式(6)に累積塑性変形倍率 s_p 算出式を示す。

応力比による変形能力の違い

図6に累積塑性変形倍率 s_p -応力比 γ 関係を示し、図中の直線は最小二乗法による近似直線である。また図6に白抜きで文献¹⁾の結果も合わせて示す。応力比 $\gamma=1.07$ の試験体G7A340は破断面の観察からスチールタブと梁フランジのスリット部から延性亀裂が生じ、溶接金属中の欠陥につながり、早期破断に至ったと考えられることから図中は括弧で示す。なお、本実験と文献¹⁾は供試鋼材の機械的性質が異なることから別の近似直線で示した。本実験においても有孔の試験体は無孔試験体に比べ累積塑性変形倍率は高くなった。文献¹⁾で検討している梁せい400mmの試験体とほぼ同傾向を示し、応力比が大きいほど累積塑性変形倍率も大きくなる傾向となった。また応力比 $\gamma=1.05$ 以上で、孔を空

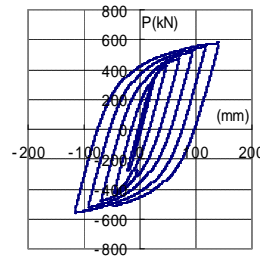


図4 荷重P-変形関係(G9A293)

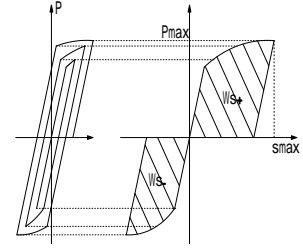


図5 スケルトン曲線算出方法

$$s_p = W_s / (c P_p \times c_p) \quad \dots (6)$$

W_s : スケルトン曲線による吸収エネルギー

P_p : 梁端部における全塑性時の荷重

c_p : 梁端部における全塑性曲げ耐力時の変形量

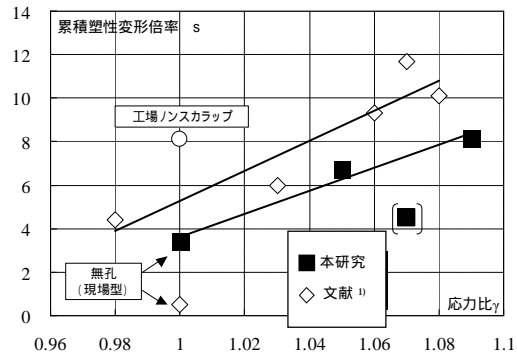


図6 累積塑性変形倍率 s_p 応力比 γ 関係

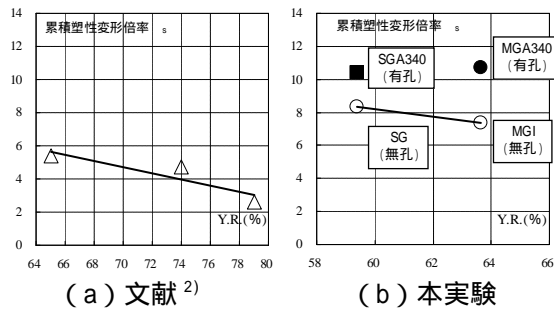


図7 累積塑性変形倍率 s_p 降伏比Y.R.関係

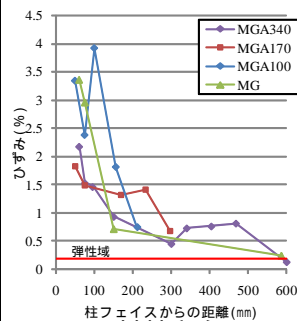


図8 材軸方向の歪分布

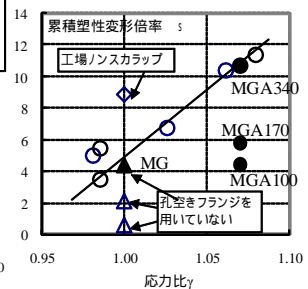


図9 累積塑性変形倍率 s_p 応力比 γ 関係

けない場合と比較して2倍以上向上している。

降伏比が異なる鋼材を用いた場合の変形能力の違い

図7(a)に文献²⁾における無孔試験体の累積塑性変形倍率 σ_s -降伏比Y.R.関係、図7(b)に本実験の試験体における累積塑性変形倍率 σ_s -降伏比Y.R.関係を示す。無孔試験体では文献²⁾と同様に降伏比が高くなるのに従い、変形能力が低くなった。しかし有孔フランジ工法を用いると降伏比が異なってもどちらとも累積塑性変形倍率 $\sigma_s = 10$ を超える高い変形能力を示した。

よって有孔フランジ工法は降伏比の異なる鋼材を用いても同様の設計方法で十分な変形能力を得ることができる。

孔位置による変形能力の違い

図8に3. ρ 時の歪分布の比較を示す。比較試験体MG及びMGA100試験体は梁端部($a < 200\text{mm}$)に歪の集中が大きい。一方MGA170試験体は梁端部から離れた箇所も積極的に変形し、梁端部の歪が小さくなっている事が見てとれる。またMGA340試験体は柱フェイスから400~600mmの領域においても変形歪が生じており孔部でエネルギーが吸収されていると考えられる。図9に累積塑性変形倍率 σ_s -応力比 σ_s/σ_s 関係を文献¹⁾のデータと併せて示す。同図中の既往のデータは白抜きで示す。文献¹⁾のデータより応力比が大きくなるにつれて累積塑性変形倍率 σ_s は向上する傾向にあり、正の相関がみられる。孔位置 a が大きいMGA340試験体は近似直線と良い対応をし、孔位置 a が小さいMGA100、MGA170試験体は低い変形能力を示した。

よって同一応力比 σ_s/σ_s を用いた孔空きフランジ工法においても、孔位置 a の値が小さい場合は変形能力の向上が小さくなる。

(2)3次元弾塑性有限要素法解析

梁せいが異なる場合

梁せいを400mm、612mm、800mmの3種類とし、梁フランジ幅200mm、孔径32mm、梁長さ2850mm、梁せい612mmは孔の数を5個とし、他の梁せいは孔の数を3個とし解析を行った。ただし、梁せい612mmのパラメータは梁幅202mmであるが本研究においては梁幅200mmと同じものとみなした。図10に σ_s/σ_s - σ_s/σ_s 関係を示す。なお、 σ_s/σ_s は有孔フランジ工法を用いた試験体のスカラップ底応力、 σ_s/σ_s は無孔試験体のスカラップ底応力を表す。梁せい612mmについては孔の数が多く低減率が低い傾向を示しているため、他の梁せいについて考察を行なうこととする。梁せいが異なる場合において応力比 σ_s/σ_s が同じであれば σ_s/σ_s はほぼ同じであり、スカラップ底の応力は無孔に対してほぼ同じ割

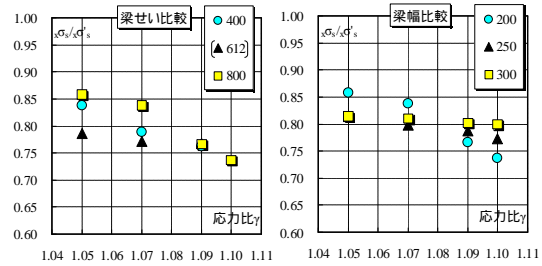


図10 σ_s/σ_s - σ_s/σ_s 関係 (梁幅一定)

図11 σ_s/σ_s - σ_s/σ_s 関係 (梁せい一定)

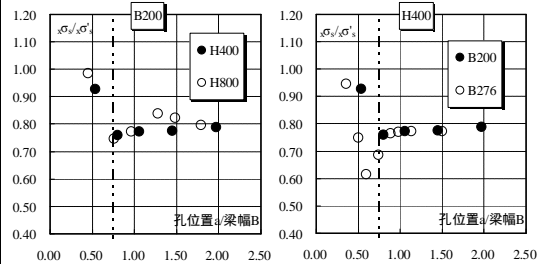


図12 σ_s/σ_s - (a/B) 関係 (梁幅一定)

図13 σ_s/σ_s - (a/B) 関係 (梁せい一定)

合で小さくなった。

梁フランジ幅が異なる場合

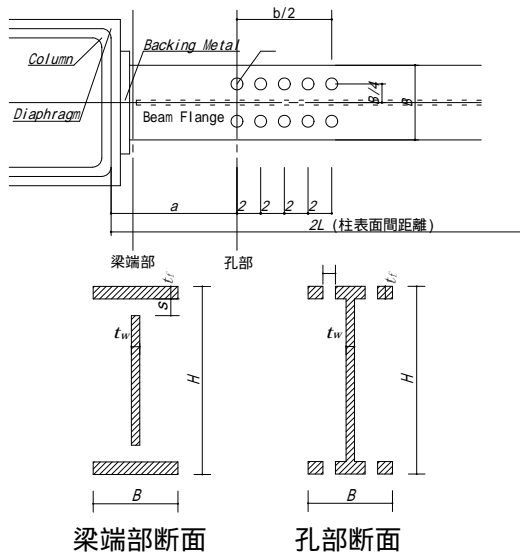
梁フランジ幅を200mm、250mm、300mmの3種類とし、孔径は断面欠損率が一定となるように32、40、48とし、梁せい800mm、梁長さ2850mm、孔の数は全て同じとし解析を行った。図11に σ_s/σ_s - σ_s/σ_s 関係を示す。梁幅が広いほど応力比 σ_s/σ_s を大きくすることによる σ_s/σ_s の低下はわずかとなり、梁幅が狭いほど応力比 σ_s/σ_s を大きくすることによる σ_s/σ_s の低下が大きくなる傾向を示すことが分かる。梁幅が広い場合には、応力比が比較的小さくても、十分なスカラップ底の応力の低減が得られることが考えられる。

同一応力比 σ_s/σ_s における孔位置の影響

応力比 σ_s/σ_s が同じ場合に孔の位置が及ぼす影響を検討する。応力比 σ_s/σ_s を1.07、孔の数3個を一定とし、図12に梁フランジ幅が200mmで梁せいが異なる場合の σ_s/σ_s - (a/B) 関係を、図13に梁せいが400mmで梁幅が異なる場合を示す。図12、図13より、孔位置が柱に近すぎる場合、 σ_s/σ_s は1.00程度になり、有孔のスカラップ底の応力と無孔のスカラップ底の応力は変わらない。孔位置を梁幅の0.75倍以上離れた場合、 σ_s/σ_s はほぼ一定となり、応力比 σ_s/σ_s が同じであればスカラップ底の応力は無孔に対して同じ割合で小さくなる。

(3)まとめ

本研究にて得られた結果を元に、有孔フランジ工法的设计式を示す。



STEP1 寸法 a の決定

$$a = \alpha B$$

$$\alpha > 0.75$$

a : 柱表面から第一孔までの距離 (mm)

B : フランジ幅

STEP2 梁端部、孔部の塑性断面係数の算定

$$Z_{ph} = \frac{Z_{pf} \times (L - a)}{\times L}$$

Z_{pf} : スカラップ欠損を考慮した梁端部の塑性断面係数(mm³)

Z_{ph} : 梁端部から最も近い孔を有する断面の塑性断面係数(mm³)

: 応力比 (=1.07)

(=1.07 にできない際は =1.05 ~ 1.07 でも良い)

L : 柱表面間距離の 1/2(mm)

t_f : フランジ厚

t_w : ウェブ厚

H : 梁せい

s : スカラップ高さ

STEP3 孔径 の算出

$$\text{孔部の断面積 } A_{fh} = \frac{Z_{ph} - Z_w}{2 \times gf}$$

$$\text{孔径} = \frac{B - \frac{A_{fh}}{t_f}}{2}$$

A_{fh} : 孔部のフランジ断面積(mm²)

Z_{ph} : 孔部の塑性断面係数(mm³)

Z_w : ウェブの塑性断面係数(mm³)

gf : 対象軸から上または下のフランジ断面の図心までの距離(mm)

STEP4 孔の個数の決定

孔ピッチは孔径の2倍とし、各列の孔の個数は2個とする。

$$b = (0.65 \text{ to } 0.85)H$$

b/2 : 第一孔から最終孔列までの中心間距離

$$\text{孔の列数 } n = \frac{b}{4} + 1$$

: 孔径

n : 孔の列数

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

宮脇正尚, 中込忠男, 崎野良比呂, 服部和徳, 戸堀一真, 孔空きフランジ方式を用いた現場型柱梁溶接接合部の变形能力に関する研究 その2 部材断面の違いが变形能力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻第640号, 1155-1162, 2009.6, 査読有

[学会発表](計2件)

川端洋介, 中込忠男, 服部和徳, 崎野良比呂, 戸堀一真, 神戸渡, 村山敬司, 現場溶接型柱梁溶接接合の变形能力に関する実験的研究 その1 孔空きフランジ工法における孔位置の影響, 日本建築学会学術講演会, 2009.8.26, 仙台

服部和徳, 中込忠男, 戸堀一真, 崎野良比呂, 孔空きフランジ工法による現場型柱梁溶接接合部に関する研究 その1 実験概要, 平成20年度秋季溶接学会全国大会, 2008.10.28, 小倉

戸堀一真, 中込忠男, 服部和徳, 崎野良比呂, 孔空きフランジ工法による現場型柱梁溶接接合部に関する研究 その2 実験結果と考察, 平成20年度秋季溶接学会全国大会, 2008.10.28, 小倉

6 . 研究組織

(1)研究代表者

中込 忠男 (NAKAGOMI TADAO)

信州大学・工学部・教授

研究者番号 : 60111671

(2)研究分担者

(3)連携研究者