

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04082

研究課題名(和文) ノンスカラップ工法による現場型柱梁溶接接合部の変形能力向上に関する破壊力学的研究

研究課題名(英文) Fracture mechanics study on improvement of deformation capacity of on-site type beam-to-column welded joint by non-scallop method

研究代表者

中込 忠男 (NAKAGOMI, Tadao)

信州大学・工学部・研究員

研究者番号：60111671

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：建築鉄骨柱梁溶接接合部が現場溶接される場合は工場溶接に比べて大地震時での変形能力が劣ることが指摘されている。そこで、様々な現場溶接の梁端ディテールの提案を行った。それに加えてBH梁のSAW部の破壊靱性値及び未溶着長さが変形能力にどのように影響するかを検討した。それらは実大柱梁溶接接合部の破壊実験を実施することで検討した。それによって提案したディテールが十分な変形能力があることを確認すると同時にSAW部の靱性値の下限値と未溶着長さの上限値の提案を行った。それらのことは有限要素法弾塑性解析及び、破壊力学を用いた耐震安全性の評価方法として結実した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本建築学会全国大会に発表し、多くの人と議論を行う。それらを総合して学術誌である日本建築学会構造系論文集に投稿し、内容について広く公開する。次に日本建築学会鉄骨工事運営委員会や溶接小委員会において検討し、建築工事標準仕様書・同解説「JASS6」に掲載する。それによって日本における建築鉄骨の施工要領に記述されることになる。それらを通して建築鉄骨の現場溶接を用いた柱梁溶接接合部の変形能力を向上させ、耐震安全性に寄与するものとなる。

研究成果の概要(英文)：It is said that deformation capacity of field welding beam to column joints is inferior to factory welding when a huge earthquake occurs. Therefore, several improved beam-end details on a field welding was proposed. In addition, the influence to deformation capacity of build-up H shaped beam which has different toughness of SAW and width of non-welded part was investigated by using full size field welding beam to column joints specimens. Thereby, it was confirmed that proposed details have enough deformation capacity. Simultaneously, the lower-limit of toughness of SAW and upper width of non-welded part were proposed. They were established as an evaluation method of earthquake-proof safety confirmed by fracture mechanics using FEM.

研究分野：鋼構造

キーワード：建築構造・材料 鋼構造 耐震構造 破壊力学 溶接構造 現場溶接

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

鉄骨建築物の柱梁溶接接合部は、工場溶接形式と現場溶接形式に大別される。現場溶接接合形式は、スカラップ周辺に応力集中が発生し変形能力の低下が危惧されているが、既往の研究で変形能力を向上させるための様々な梁端ディテールが考案されている。また、サブマージアーク溶接(以下 SAW 部)で施工された溶接組立 H 形断面梁(以下ビルト H 梁)について SAW 部の靱性値や未溶着部が原因となり早期に破断することが報告されている。

### 2. 研究の目的

本研究では現場溶接型柱梁接合部の様々な梁端ディテール、SAW 部の靱性値、及び未溶着長さが梁の変形能力に与える影響を、実大試験体を用いて明らかにすることを目的とする。また、有限要素法解析によって、梁フランジ脆性破壊のメカニズムを明らかにする。

### 3. 研究の方法

梁端ディテール、SAW 部の靱性及び未溶着部長さをパラメータとして、鋼構造柱梁溶接接合部の実大ト形試験体の载荷実験を行う。梁の荷重変形関係からスケルトンカーブを作成し、そこから算出される累積塑性変形倍率と耐力上昇率から各試験体の性能を比較した。

### 4. 研究成果

試験体は、図 1 に示すように全試験共通して柱梁溶接接合部をモデル化した実大ト形試験体である。柱部材には角形鋼管柱  $\square 400 \times 400 \times 25$  (BCP325) を、梁部材にはビルト H 梁 BH-600 $\times$ 250 $\times$ 16 $\times$ 28 (SN490B) 及びロール H 梁-600 $\times$ 250 $\times$ 16 $\times$ 28 (SN490B) を使用した。

実験は H27、H28、H29 年度にわたって行われた。まず H27 及び H28 年度の実験について説明を行っていく。また、考察についてはスケルトン曲線を用いて柱梁溶接接合部の変形能力を評価した。スケルトン曲線による吸収エネルギー  $W_s$  から算出した累積塑性変形倍率  $\eta_s$  を変形能力の評価指標として用いた。また、全塑性耐力  $eP_p$  に対する最大耐力  $eP_{max}$  の比として耐力上昇率  $\alpha$  を算出した。

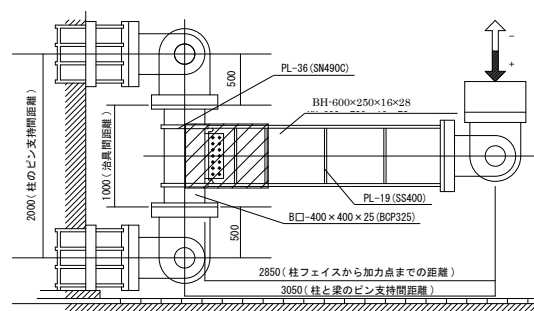


図 1 試験体及び加力方法

#### (1) H27 及び H28 年度実大ト形実験

H27 年度の実験パラメータを表 1、ディテール図を図 2 に示す。また、H28 年度の実験パラメータを表 2 に、ディテール図を図 3 に示す。H27 年度はビルト H 梁、H28 年度はロール H 梁を使用している。

H27 年度のディテールについて、BS 試験体は  $r=35\text{mm}$  のスカラップ底に  $r=10\text{mm}$  の複合円を設けた形状とすることでスカラップ底の応力集中を緩和するディテールである。BS\_P50 試験体と BS\_P65 試験体はスカラップと同形状に加工した鋼片をスカラップ部に挿入し、鋼片と梁フランジ及びウェブを隅肉溶接により接合する擬似ノンスカラップ工法とした試験体である。BS\_P50 は、鋼片の大きさを  $40 \times 30 \times 40\text{mm}$  とし、柱梁溶接ビード上まで隅肉溶接を施すことで地震時等に破壊の起点となりうるスカラップ底の応力集中の緩和を目的とした。BS\_P65 試験体は  $40 \times 37 \times 65\text{mm}$  の鋼片を挿入した。BM\_F 及び BM\_L 試験体は高さ  $13\text{mm}$ 、 $r=6.5\text{mm}$  のミニスカラップを設け、充填溶接することでミニスカラップ部を埋める擬似ノンスカラップ工法とした。また、ミニスカラップディテールは溶接欠陥が生じやすくなる恐れがある。そこで本研究では、フランジ突合せ溶接部の溶接欠陥を想定してフラックスを開先内に挿入し、人工的な溶接欠陥を設けた。また、ミニスカラップを埋め戻す充填溶接からウェブ溶接までを連続的に行い、柱とウェブの隙間を埋める BM\_L\_W 試験体を用意した。

H28 年度のディテールについて、RS 及び RS\_W 試験体は在来工法であり、それぞれウェブ接合形式がボルト接合と溶接接合部となっている。RS\_P80 及び RS\_P80\_W 試験体は鋼片挿入であり、在来工法と同じでウェブ接合形式がボルト接合と溶接接合部となっている。RS\_F5 及び RS\_F13 試験体はフィレット残しディテールでそれぞれフィレット高さが  $5\text{mm}$ 、 $13\text{mm}$  となっている。

H27 年度の実験結果を表 3 に、H28 年度の実験結果を表 4 に示す。この結果より、柱まで溶接した BM\_L\_W 試験体を除いた改良スカラップ工法の中ではフィレット残しディテールが最も変形能力が高い結果となった。反対に、在来工法はビルト H 梁、またはロール H 梁にかかわらず変形能力が低く、早期の脆性破壊となった。H28 年度のフィレットディテールについて、フィレット高さによる変形能力に差は生じなかった。鋼片挿入ディテールは、スカラップ底に挿入する鋼片寸法を大きくして疑似的なノンスカラップ工法にすることで変形能力が向上した。

表 1 H27 年度実験パラメータ

試験体	ウェーブ接続形式	ディテール	SAW 部靱性値 目標値(実験値)	未溶着長さ
BS	ボルト	在来工法	25(36J)	1.5mm
BS_P50		鋼片挿入		
BS_P65		ミニスカ ラップ		
BM_F				
BM_L				
BM_L_W	溶接			

表 2 H28 年度実験パラメータ

試験体	ウェーブ接続形式	ディテール	SAW 部靱性値 目標値(実験値)	未溶着長さ
RS	ボルト	在来工法	139	0mm
RS_W	溶接			
RS_P80	ボルト	鋼片挿入		
RS_P80_W	溶接			
RS_F5	ボルト	フィレット 残し		
RS_F13	ボルト			

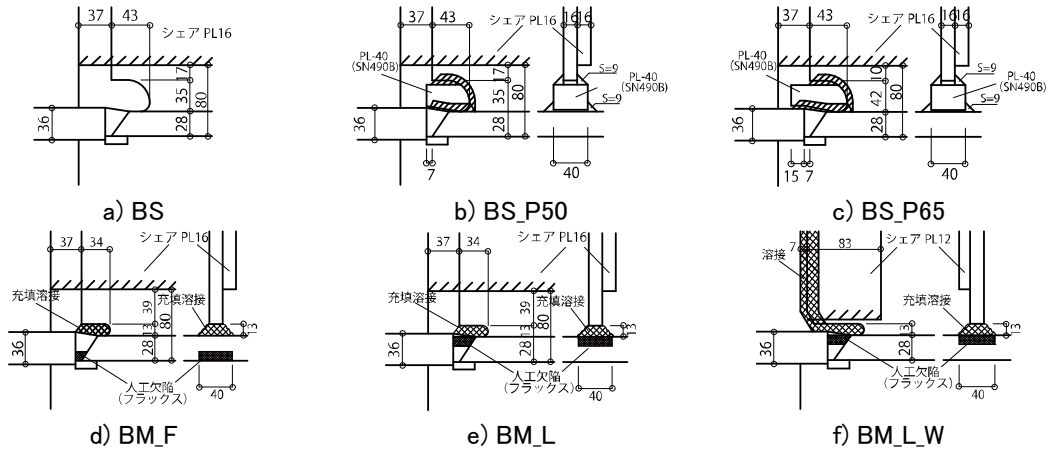


図 2 H27 年度スカラップディテール詳細図

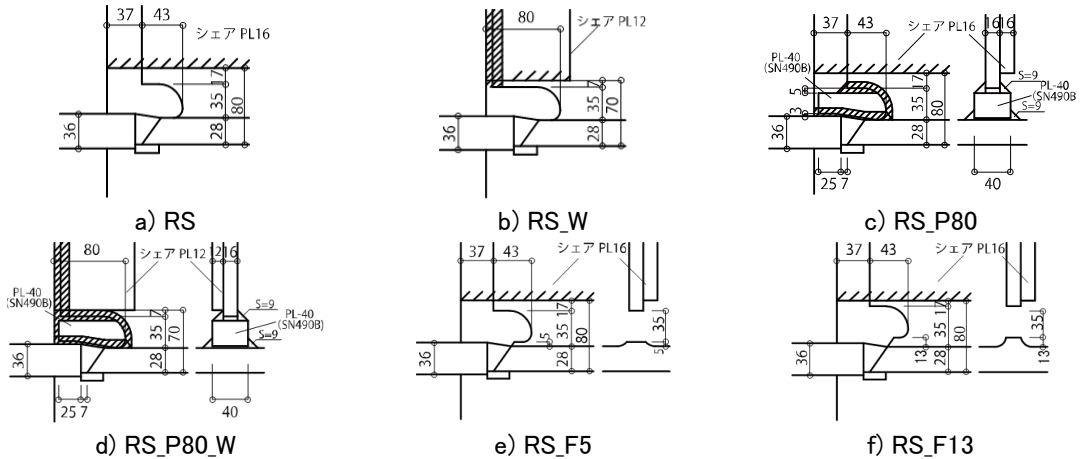


図 3 H28 年度スカラップディテール詳細図

表 3 H27 年度実験結果

試験体	加力方向	$\alpha$	$\eta_s$	サイクル
BS	+	1.30	4.1	6_1
	-	1.31	4.6	
BS_P50	+	1.26	2.6	4_2
	-	1.32	3.7	
BS_P65	+	1.40	6.4	6_2
	-	1.44	8.3	
BM_F	+	1.42	6.7	6_1
	-	1.34	4.6	
BM_L	+	1.30	3.4	4_2
	-	1.32	3.9	
BM_L_W	+	1.48	8.2	8_1
	-	1.47	8.5	

表 4 H28 年度実験結果

試験体	加力方向	$\alpha$	$\eta_s$	サイクル
RS	+	1.08	1.5	4_1
	-	0.97	0.7	
RS_W	+	1.10	1.5	4_1
	-	0.98	0.6	
RS_P80	+	1.34	7.1	6_2
	-	1.37	8.3	
RS_P80_W	+	1.12	1.4	4_1
	-	1.02	0.6	
RS_F5	+	1.33	7.8	6_2
	-	1.34	8.1	
RS_F13	+	1.33	7.6	6_2
	-	1.32	7.7	

(2) H29 年度第一回、及び第二回実大ト形実験

次に H29 年度第一回実験のパラメータを表 4 に、ディテール図を図 4 に示す。また、H29 年度第二回実験のパラメータを表 6 に、ディテール図を図 5 に示す。試験体については第一回と第二回共通して H27 年度と同様なビルト H 梁を使用している。第一回はビルト H 梁の SAW 部における破壊靱性値が低い場合や未溶着部が存在する場合、現場溶接型柱梁溶接接合部の変形能力にどのような影響を与えるか調査をすることを目的とする。パラメータとしては SAW 部の靱性値を 20J 程度の低靱性(L)と 60J 程度の高靱性(H)の 2 種類を用意し、未溶着長さは 4mm とした。ディテールとしては在来工法の他に鋼片挿入、ミニスカラップ埋戻し及びフィレット残し 5mm ディテールを用意した。また、第二回の実験について、この年の実験は H28 年度に引き続いて

様々な梁端ディテールや SAW 部の靱性値、及び未溶着長さを調べ、ビルト H 梁が十分な変形能力を発揮するような梁端ディテールに対するパラメータの関係を把握するため、疑似ノンスカラップ工法を用いた実大柱梁溶接接合部実験を行った。パラメータとしては SAW 部を高靱性 (60J 程度) とし、未溶着長さは H28 年度と比較してほぼ未溶着長さが存在しないよう 0.5mm 以下とした。ディテールは工場ノンスカラップ工法、在来工法、フィレット残し 5mm、9mm、鋼片挿入及びミニスカラップディテールを用意した。鋼片挿入ディテールについて、隅肉溶接の影響を調査するため、本研究では鋼片下部の隅肉溶接をスカラップ底から柱までではなく梁端の突合せ溶接部までとし、ミニスカラップディテールはミニスカラップ部の埋戻しを行わず実験を行った。

表 6 に第一回の実験結果を、表 7 に第二回の実験結果を示し、第一回及び第二回の実験結果から考察を行う。スカラップ底を起点として脆性破壊した在来工法について、SAW 部が 20J の場合、未溶着長さが 4mm だと変形能力はかなり低く、早期脆性破壊の危険性が極めて高い結果となった。SAW 部が 60J の場合、未溶着長さが 4mm と 0mm で比較した結果、変形能力に差は見られなかった。しかし、靱性値が 60J という高い値、かつ未溶着長さが 0mm の場合においても変形能力は低く、スカラップ底での脆性破壊となっており、早期脆性破壊の可能性が高い。これより在来工法ディテールを使用することは危険性が高く、改良ディテールにすることを推奨する。また、フィレット残しについて、SAW 部が 20J の場合と 60J の場合で変形能力に差は見られなかった。未溶着長さが 4mm の場合、スカラップ底から破断して  $\eta_s=6.6$ 、未溶着長さが 0mm の場合はエンドタブを起点として破断して  $\eta_s=7.3$  となり、破壊起点がスカラップ底からエンド

表 5 H29 年度第一回実験パラメータ

試験体	梁端ディテール	SAW 部靱性値 目標値(実験値)	未溶着 長さ(mm)
L_BS	在来	20 (31)	4.9
H_BS		60 (76)	3.5
L_BS_P	鋼片挿入	20 (23)	4.3
H_BS_P		60 (80)	4
L_BM	ミニスカラップ埋戻し	20 (28)	5.9
H_BM		60 (76)	5
L_BF_5	フィレット残し	20 (18)	3.4
H_BF_5		60 (67)	5.5

表 6 H29 年度第二回実験パラメータ

試験体	梁端ディテール	SAW 部 靱性値	未溶着 長さ(mm)
BN	工場ノンスカラップ	60J	0.5mm 以下
1-BS	在来工法	60J	
2-BS		69J	
1-BF_5	現場溶接 フィレット 5mm	60J	
2-BF_5		69J	
BF_9	フィレット 9mm	60J	
BS_P	鋼片挿入	60J	
BM	ミニスカラップ	60J	

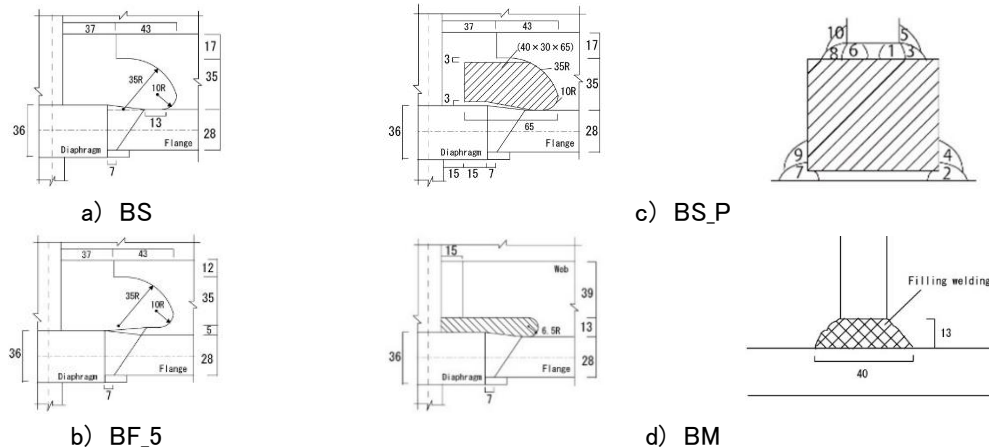


図 4 H29 年度第一回実験スカラップディテール詳細図

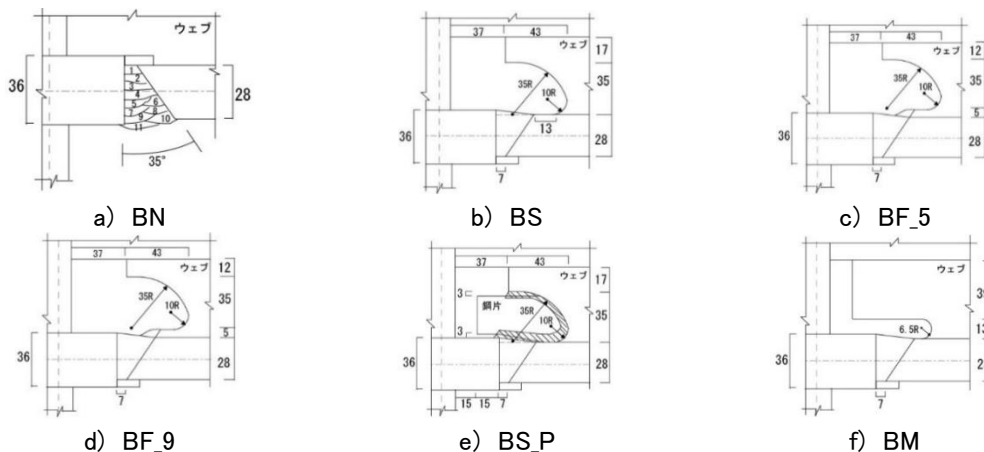


図 5 H29 年度第二回実験スカラップディテール詳細図

表 7 H29 年度第一回実験結果

試験体	加力方向	$\alpha$	$\eta_s$	サイクル
L_BS	+	1.09	1.9	4_2
	-	1.13	3.1	
H_BS	+	1.23	5.9	6_1
	-	1.15	4.7	
L_BF_5	+	1.24	4.8	6_2
	-	1.27	6.6	
H_BF_5	+	1.27	5.9	6_2
	-	1.27	6.3	
L_BS_P	+	1.26	5.3	6_2
	-	1.29	6.6	
H_BS_P	+	1.31	5.8	8_1
	-	1.32	6.4	
L_BM	+	1.25	5.1	6_2
	-	1.28	6.4	
H_BM	+	1.28	5.9	6_2
	-	1.29	6.6	

表 8 H29 年度第二回実験結果

試験体	加力方向	$\alpha$	$\eta_s$	サイクル
BN	+	1.38	9.9	8_2
	-	1.43	12.4	
1-BS	+	1.23	5.0	6_1
	-	1.25	6.8	
2-BS	+	1.22	4.6	6_1
	-	1.16	3.6	
1-BF_5	+	1.28	6.8	8_1
	-	1.29	7.3	
2-BF_5	+	1.29	7.1	8_1
	-	1.29	7.2	
BF_9	+	1.27	5.9	6_2
	-	1.27	7.4	
BS_P	+	1.23	5.0	6_1
	-	1.24	6.1	
BM	+	1.23	5.2	6_1
	-	1.25	6.8	

タブとなったことで、フィレット残しディテールは未溶着長さの影響を受けることが判明した。これより未溶着長さ、靱性値及び施工性を考慮した結果現場溶接接合形式の中ではフィレット残しディテールが最も優れたディテールという結果となった。

(3) 実験結果のまとめ

以上の実験結果から、梁端部ディテールの改良、SAW 部の靱性の向上、未溶着長さの短縮により、現場溶接型柱梁溶接接合部の変形性能が向上することが明らかになった。また、施工効率や、コストを考慮すると、フィレット残しディテールが最も優れた改良梁端ディテールであると考えられる。

(4) H29 年度に実施した柱梁溶接接合部の有限要素法解析

スカラップ底の応力集中と、破断に至るメカニズムを明らかにするために、L\_BS 試験体について有限要素法解析を実施した。

解析には汎用有限要素法解析ソフト ANSYS(16.0)を用いる。図 6 に解析モデルを示す。要素タイプは 8 節点ソリッド要素を用いる。スカラップ付近には、ウェブ、フランジの SAW 部の未溶着部を再現するために、厚さ 0.25mm 幅 5mm のスリットを設ける。スカラップ付近は応力状態を詳しく調べるために、最小要素サイズを 0.5mm と細かくしている。全体の節点数は 125967 となっている。柱上下端をピン支持とし、梁自由端に Z 軸方向単調変位荷重を加える。構面外方向の変形を拘束するため、梁端からスパンのおよそ 1/4 と自由端部を Y 軸方向拘束とする。解析に入力する材料の応力歪み関係の多直線近似を図 7 に示す。

図 8 に梁端ディテールの要素分割を示す。本報では、スカラップ付近の応力状態をより正確に把握するため、材料試験済みの母材部（フランジ）とウェブフランジ溶接部の SAW 部と、フランジとダイヤフラムの突合せ溶接部）の 3 種類を用いて、解析モデルの材料特性として入力する。図中では、濃灰の部分に母材部、灰色の部分に SAW 部、白色の部分に突合せ溶接部としている。

図 9 に実験で得られたスケルトンカーブと、解析で得られた荷重変位関係を示す。初期剛性は実験のほうがやや小さくなっているが、手計算の全塑性耐力は解析が正しいため、部分的な降伏が起きていること、また、残留応力の影響があると考えられる。しかし、二次勾配以降、実験と解析はおおむね一致していることから、解析モデルは妥当であるといえる。

図 10 にスカラップ部の破断変位時第一主応力コンター図を示す。図は赤に近いほど応力集中している。また、切り欠き丸棒の実験と解析で明らかとなっている母材部、SAW 部、突合せ溶接部の破壊限界応力  $p\sigma_c$ (表\*.3.1)と、今回解析で得られたスカラップ底付近応力集中箇所の最大第一主応力  $\sigma_c$ を比較すると、母材部の  $p\sigma_c$ と母材部で生じている  $\sigma_c$ が、その差 4.7%高いと精度で近い値となっている。

図 11 に破断変位時のスカラップ部相当歪み( $\epsilon_{eqv}$ )を示す。L\_BS では、未溶着部を再現したスリットの縁（母材部）で最大となる。また、相当塑性歪みの最大値は 63.3(%)であり、母材の一樣伸びである 17.8(%)を大きく超えている。このことから、梁端フランジの破断時には、相当塑性歪みが集中しているスカラップ底周辺では延性亀裂が発生していると考えられ、これは実験後の未溶着部付近に延性亀裂が見られることから、妥当な結果であるといえる。

解析結果より、L\_BS 試験体に関して、スカラップ底を起点とする H 形断面梁のフランジ破断は以下の様にして発生したと考えられる。SAW 部未溶着部の縁に歪みが集中し、延性亀裂が発生。第一主応力の大きいスカラップ底付近の亀裂先端が破壊限界応力  $p\sigma_c$ に達して、フランジ母材が脆性破壊した。

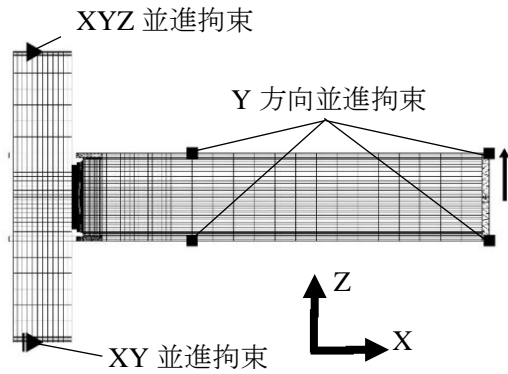


図 6 解析モデル

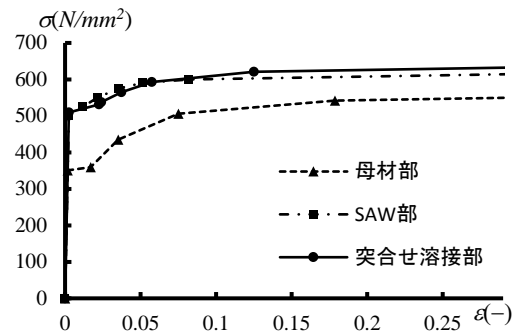


図 7 応力歪み関係 (多直線近似)

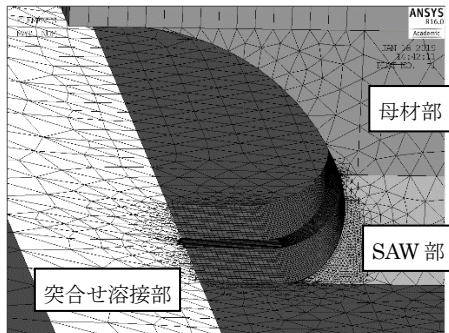


図 8 L\_BS スカラップ底付近要素分割

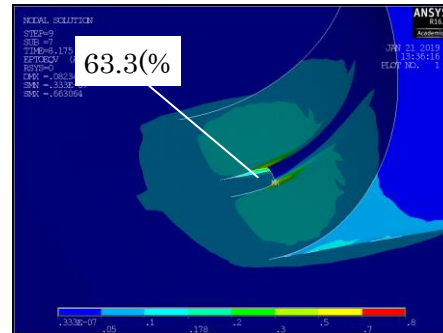


図 11 相当塑性歪みコンター図

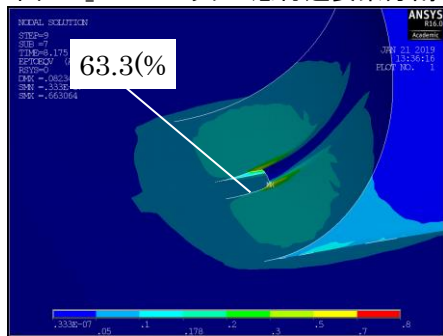


図 11 相当塑性歪みコンター図

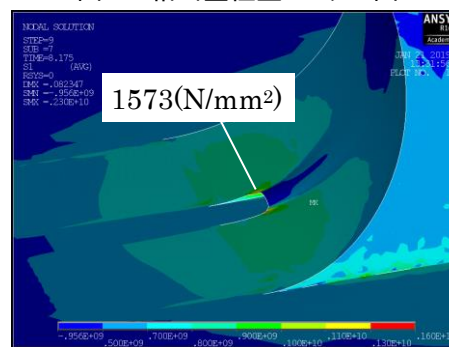


図 10 L\_BS 第一主応力コンター図

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

①中込忠男, 金子洋文, 堤成一郎, 金崎信太郎, 岸耕左:現場溶接において肉盛溶接を施したスカラップディテールが破壊及び変形能力に与える影響に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 100 号 pp29~41, 2018. 12

②中込忠男, 金子洋文, 堤成一郎, 増田開, 巻島淳, 堀場亮佑:現場溶接型梁端仕口ディテールが先組みビルト H 梁を用いた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 739 号, pp. 1497~1506, 2017. 9

〔学会発表〕 (計 4 件)

①金子洋文, 中込忠男, 新保誠司, 堤成一郎, 的場耕, 河本龍一, 岸耕左, 山本美乃涼, ビルト H 梁を用いた現場溶接型柱梁溶接接合部の変形能力に関する実験的研究 その 4 試験体概要: 日本建築学会学術講演会, 2018. 9

②岸耕左, 中込忠男, 河本龍一, 金子洋文, 的場耕, 堀場亮佑, 金崎信太郎, ビルト H 梁を用いた現場溶接型柱梁溶接接合部の変形能力に関する実験的研究 その 1 梁端ディテールと素材試験: 日本建築学会学術講演会, 2017. 9

③的場耕, 中込忠男, 曾田五月也, 金子洋文, 堤成一郎, 巻島淳, 増田開, 藤田哲也, 板谷俊臣, 笠原基弘 その 4 ロール H 能力仕口ディテールと施工方法: 日本建築学会学術講演会, 2016. 8

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 金子洋文 ローマ字氏名: (KANEKO, Hirofumi)

所属研究機関名: 信州大学 部局名: 学術院工学系 職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 30426580