欠陥を有する柱梁溶接接合部の変形能力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DEFORMATION CAPACITY OF WELDED BEAM-TO-COLUMN CONNECTION WITH WELD DEFECTS

中込忠男^{*1}, 服部和徳^{*2}, 市川祐一^{*3}, 的場 耕^{*4}, 岩田 衛^{*5}Tadao NAKAGOMI, Kazunori HATTORI, Yuichi ICHIKAWA,
Kou MATOBA and Mamoru IWATA

The welding defect of the welding connection in steel structure causes the brittle fracture. Especially because the beam-to-column connection is a part by which the biggest stress is received, this defect gives fatal damage to the steel structure frame. In this research, the full scale experiment in the beam-to-column connection was done, and fracture behavior and the deformation capacity by which the welding defect was made a starting point were examined. The influence which the welding defect produces on the deformation capacity of the beam-to-column connection is large and decreases the possession performance. Moreover, it is possible to become an effective index to evaluate the deformation capacity that the crack characteristic size is shown by the penetration crack by WES-2805.

Keywords: *beam-to-column welded connection, welding defect, crack size, fracture behavior, deformation capacity*
柱梁溶接接合部, 溶接欠陥, 亀裂寸法, 破壊性状, 変形能力

1. 序

鋼部材における脆性破壊現象は破壊起点となる亀裂の存在が重要な破壊因子となり得るが、この亀裂には部材の塑性変形に伴い発生する延性亀裂以外にも、溶接施工により生じる欠陥が考えられる。

そのため、溶接欠陥が継手性能に及ぼす影響を把握した上で対策を講じることが耐震設計上重要となる。

また、鋼構造物において溶接接合は随所に用いられるがその部位によって要求性能は異なる。特に柱梁接合部は地震時に最も大きな応力を受ける部位であるため、接合部ディテール、溶接欠陥等の影響を受け、架構全体の変形能力が著しく低下することが懸念される。

溶接施工において生じる溶接欠陥としては、スラグ巻き込みやブローホールといった溶着金属中の欠陥の他、溶接始末端初層付近における溶け込み不良や融合不良が想定される。超音波探傷検査においても欠陥指示長さの最小値が設定され、板厚 $t/4$ 以下の溶接欠陥は合否判定の対象外となっている。^{1)~3)}

藤本、泉は欠陥を有する T 継手突合せ溶接部の単純引張試験及び定ひずみ振幅低サイクル疲労試験を行い、溶接継手の中央部における欠陥よりも両端部における欠陥の影響が大きいくことを示している^{4)~6)}。溶接施工においてエンドタブに代替タブを用いた場合、形状

の不連続は無くなり鋼製タブと梁フランジとのスリット部のような応力集中部は低減するが、溶接始末端部のダイアフラム側熱影響部に溶接欠陥が生じやすく、溶接始末端部に欠陥が存在した場合、この部分が起点となる可能性がある。しかし、溶接欠陥の位置及び形状が柱梁溶接接合部の変形能力に与える影響について検討した研究は少ない⁷⁾。

本研究は溶接欠陥を有する柱梁溶接接合部の実大実験を行い、溶接欠陥を起点とした破断による柱梁溶接接合部の破壊性状を把握し、溶接欠陥の形状及び寸法と柱梁溶接接合部の変形能力との関係について検討を行うことを目的とする。

2. 実験概要

2.1 実験パラメータ

実験パラメータは梁フランジ板幅方向 $1d$ と梁フランジ板厚方向 hd の溶接欠陥寸法であり、超音波探傷検査においてエコー高さによる領域は予測できないが、板幅方向の欠陥寸法は日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説」³⁾に基づく欠陥評価長さの境界値を基準とし、大きく分けて3つの欠陥長さ目標値を設定した。板厚方向の欠陥寸法はほぼ1パス分に相当する5mmを基準としたが、比較のために梁フランジ板厚方向に溶接欠陥が貫通して

*1 信州大学工学部社会開発工学科 教授・工博

*2 信州大学工学部社会開発工学科 大学院生

*3 信州大学工学部社会開発工学科 助手・博士(工学)

*4 信州大学工学系研究科 大学院生・修士(工学)

*5 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu Univ.

Research Assoc., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kanagawa Univ., Dr. Eng.

いる試験体を2体製作した。試験体一覧を表1に示す。

前述のように本研究において扱う溶接欠陥は溶け込み不良や融合不良といった未溶着欠陥とし、溶接欠陥位置は溶接始末端部のダイアフラム側初層付近とした。溶接欠陥製作位置を図1に示す。溶接欠陥は、初層の溶接時にアークのねらいを意図的に外すことで作製した溶接欠陥（以下、欠陥aと称す。）とあらかじめ鋼板を挿入することによってメタルタッチ部分を設けた溶接欠陥（以下、欠陥bと称す。）の2種類である。溶接欠陥は試験体1体につき上下フランジの両幅端部、計4箇所に設けた。

2.2 試験体

試験体形状及び接合部詳細を図2に示す。試験体は柱梁接合部をモデル化したT字形部分架構であり、全試験体とも梁部材に圧延H形鋼（SM490A RH-400×200×13×21）、柱部材に熱間成形角形鋼管（STKR □-400×400×25）を用いて、通しダイアフラム（SN490B PL-450×450×28）形式で溶接接合して製作した。接合方法は工場溶接接合とし、接合ディテールはノンスカラップ工法を用いた。また、梁端部において破壊を生じさせるために試験体に用いた柱部材及びパネルゾーンは梁部材に比べて十分な強度を持たせた。

梁フランジの溶接は溶接ワイヤーYGW-11（1.2φ）を用いて、CO₂ガスシールドアーク半自動溶接により下向き溶接とした。入熱は全試験体とも30kJ以下であるが、パス間温度管理は250℃管理のものと連続管理のものと2種類である。溶接条件を表2に示す。また、エンドタブは代替タブとし、L形フラックスタブを用いた。L形フラックスと取り付け位置図を図3に示す。欠陥bは梁フランジ端部に挿入し、ダイアフラム側端部と溶接金属とが溶着しないよう施工した。裏当て金には1/2カット、フィレット密着型を用い、断続すみ肉溶接により組み立てた。

2.3 素材試験結果

本研究においては開先内のダイアフラム側に溶接欠陥が存在し、かつ、エンドタブに代替タブを用いておりダイアフラム母材熱影響部も破壊起点となることが想定される。そのため、梁フランジ母材と熱影響部及び溶着金属（DEPO）の他、ダイアフラム母材と熱影響部についてシャルピー衝撃試験を行った。試験片は試験体と同様な溶接条件で製作された溶接部から採取し、梁フランジ母材熱影響部の試験片は梁フランジ表層から、ダイアフラム母材熱影響部の試験片は溶接欠陥位置を想定し初層部分からそれぞれ採取した。ノッチは全てサイドノッチとした。試験片形状及び採取位置を図4に示す。梁材の機械的性質を表3、化学成分を表4に、シャルピー衝撃試験（JIS Z 2202 試験片）結果を表5及び図5に示す。遷移温度評価は最小自乗近似を用いて（1）、（2）式により曲線の回帰を行った。

表5及び図5のシャルピー衝撃試験結果から、梁フランジ母材及びダイアフラム母材ともに、溶接条件に関わらず熱影響部の方が靱性が高いことがわかる。

DEPOの吸収エネルギーは0℃において上部棚とほぼ等しく、0℃吸収エネルギーは梁フランジ熱影響部、DEPO、ダイアフラム熱影響部の順に高くなっている。

また、溶接条件の影響については入熱とパス間温度管理の両因子が関わってくるが、本研究の場合はパス間温度のみ異なり、梁フランジ母材熱影響部に関しては0℃吸収エネルギー、脆性破面率に若干の相違が見られる程度となっている。一方、ダイアフラム母材熱

表1 試験体一覧

試験体	欠陥製作方法	欠陥寸法目録値			溶接条件
		ld(mm)	hd(mm)	$s \ \alpha$	
FaS1	欠陥a*1	7	5	0.02	30kJ/250℃
FaM1		15		0.04	
FaM2					
FaM3		40		0.10	
FaL1	欠陥b*2	15	21	0.04	30kJ/連続
FbM1		5		0.05	
FbM2		40		0.10	
FbL1		10		0.10	
FbLL1		40		0.20	
F01		無し			
F0G1	補修				30kJ/連続

ld: フランジ板幅方向の欠陥寸法 hd: フランジ板厚方向の欠陥寸法 s_{α} : 欠陥断面率

*1: 溶接技能者による意図的な未溶着欠陥 *2: 鋼板挿入による未溶着欠陥

*1欠陥は上下フランジ両幅端部に製作 *2 鋼板は厚さ(=3mm、梁フランジ)と同材質

図1 溶接欠陥製作位置

図2 試験体形状及び接合部詳細 (Unit: mm)

図3 フラックスタブ形状及び取り付け位置

影響部に関してはほとんど差はみられない。

本研究ではダイアフラム側初層付近に位置する溶接欠陥を想定しているため、ダイアフラム熱影響部の試験片は初層から採取した。パス間温度は開先から10mm離れた梁フランジ中央部において計測し、3パス目まではパス間温度が目標の温度に達しず連続溶接と同

表 6 実験結果一覧

試験体	終局 時期	M_m (kN・m)		θ_m (rad)		θ_s (rad)		W_s (kN・m)		W (kN・m)	α		η_s		$\varepsilon \eta_s$		$\varepsilon \eta$	破壊 形式
		+	-	+	-	+	-	+	-		+	-	+	-	+	-		
FaS1	-7(2)	1138	-1256	0.0488	-0.0485	0.0796	-0.0708	66	60	722	1.47	-1.62	10.1	9.0	10.8	9.7	236	HAZ _D
FaM1	+7(1)	1114	-1195	0.0419	-0.0420	0.0649	-0.0608	51	48	545	1.44	-1.54	8.2	7.7	8.3	7.8	178	HAZ _D
FaM2	+5(2)	1053	-1143	0.0352	-0.0351	0.0474	-0.0481	32	34	277	1.36	-1.47	6.0	6.1	5.2	5.5	90	HAZ _D
FaM3	+7(2)	1133	-1243	0.0488	-0.0489	0.0766	-0.0724	63	61	695	1.46	-1.60	9.7	9.2	10.3	10.0	227	HAZ _D
FaL1	+5(1)	1043	-1080	0.0333	-0.0284	0.0448	-0.0391	29	24	204	1.35	-1.39	5.7	5.0	4.8	4.0	67	HAZ _D
FbM1	-8(1)	1170	-1264	0.0553	-0.0488	0.0889	-0.0715	77	61	904	1.51	-1.63	11.3	9.1	12.7	9.9	296	HAZ _B
FbM2	+7(2)	1137	-1243	0.0477	-0.0492	0.0743	-0.0748	61	64	673	1.47	-1.60	9.4	9.5	10.1	10.5	220	HAZ _B
Fbm1	-6(1)	1096	-1150	0.0421	-0.0352	0.0591	-0.0517	44	38	401	1.41	-1.48	7.5	6.6	7.3	6.1	131	etc
FbL1	-7(2)	1145	-1229	0.0486	-0.0487	0.0763	-0.0705	63	59	757	1.48	-1.58	9.7	8.9	10.3	9.6	248	HAZ _D
FbLl	-4(1)	1004	-1071	0.0283	-0.0280	0.0362	-0.0379	21	23	122	1.29	-1.38	4.6	4.8	3.4	3.8	40	HAZ _D
FbLLl	-4(2)	1025	-1078	0.0286	-0.0283	0.0385	-0.0380	23	23	175	1.32	-1.39	4.9	4.8	3.8	3.8	57	HAZ _D
F01	-7(2)	1132	-1223	0.0488	-0.0488	0.0794	-0.0712	66	59	734	1.46	-1.58	10.1	9.0	10.8	9.7	240	HAZ _B
F0G1	-7(2)	1145	-1223	0.0488	-0.0486	0.0783	-0.0696	66	58	744	1.48	-1.58	9.9	8.8	10.7	9.5	243	etc

θ_s : skelton曲線における最大回転角 W_s : skelton曲線における塑性吸収エネルギー W : 全履歴吸収エネルギー α : 耐力上昇率 ($\alpha = M_m(\max)/M_p$)

η_s : skelton最大回転角による塑性変形倍率 ($\eta_s = \theta_s/\theta_p$) $\varepsilon \eta_s$: skelton曲線における無次元化履歴吸収エネルギー ($\varepsilon \eta_s = W_s/W_p$) $\varepsilon \eta$: 無次元化履歴吸収エネルギー ($\varepsilon \eta = W/W_p$)

*1: 終局時期の-7(2)は702回目載荷を表す *2: 表中の太字は破断側 +/- *3: 網掛けの試験体は溶接欠陥を起点とし破断 ($M_p=775\text{kN}\cdot\text{m}$ $\theta_p=0.00788\text{rad}$ $W_p=3.1\text{kN}\cdot\text{m}$)

図 9 無次元化梁端曲げモーメント-梁端回転角関係

図 10 General-Yield法による算出方法

3. 実験結果

3.1 実験結果概要

実験結果一覧を表 6 に示し、無次元化梁端曲げモーメント M_m/M_p - 梁端回転角 θ_m 関係を図 8 に示す。General-Yield 法による M_p' の算出法を図 10 に、skelton 曲線及び W_p 、 W_s の模式図を図 11 に示す。によって求めた梁部材の全塑性モーメント実験値 M_p' は試験体間で大きな差は無く、計算値よりも平均で 6% 上回る程度であったため、無次元化する際に用いる弾性限界吸収エネルギー W_p には溶接欠陥の有無に関わらず、梁全断面有効とした場合の計算値 M_p 、 θ_p を用いた。弾性剛性の実験値 K_e' に関しては試験体間で大きな差はなかったものの、計算値よりも実験値の平均が 24% 下回ったため、skelton 曲線における塑性吸収エネルギー W_s 及び無次元化履歴吸収エネルギー $\varepsilon \eta_s$ の算出に用いる弾性剛性には試験体それぞれの実験値を用

図 11 skelton 曲線及び W_p 、 W_s

いた。図 9 をみるとどの試験体も、安定した履歴を描いていることがわかる。破壊性状については次項で述べるが、どの試験体も座屈は生じず、延性亀裂も顕著な進展がみられず急激に耐力が低下した。なお、図 9 中の▲は梁フランジの破断時を示している。

3.2 破面観察結果

図 12 破面写真

* 網掛け部は、本実験で作製した溶接欠陥

図 13 破面観察結果

試験体の梁フランジ側破断面の目視による破面観察を行い、溶接欠陥寸法を計測した。欠陥を起点として破断に至った試験体の破面観察結果を図 12、13 に示す。梁フランジの破断状況は以下の 3 種類であった。

HAZ_a：梁フランジ側溶接止端部から発生した延性亀裂が進展し、欠陥 a または欠陥 b に達し、延性亀裂の近傍において脆性亀裂に転化し破断に至った。脆性亀裂は梁フランジ母材に伝播した試験体が多くみられた。ただし破断面には現れていないものの、ダイアフラム側初層部分に欠陥の存在が確認された試験体もみられた。

HAZ_b：ダイアフラム側初層部分に設けた溶接欠陥から延性亀裂が発生・成長した後、脆性亀裂に転化しダイアフラム母材もしくは溶着金属中を伝播した。

etc：F0G1 と Fbm1 は他の試験体と同様に溶接止端部に延性亀裂が発生・進展したが、本実験で意図した以外の欠陥である溶接金属中の銀点を起点として脆性亀裂した。

4. 考察

4.1 超音波探傷検査

通常、鋼構造溶接部の欠陥に対しては非破壊検査として超音波探傷検査(UT 検査)が行なわれる。本実験の試験体も日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説」に従い UT 検査を行った。表 7 に UT 検査結果及び破面観察結果による溶接欠陥寸法を示す。UT 検査の可否は欠陥評価長さの境界値とエコー高さによる領域を用いて判定する。本実験においては梁フランジ厚が $t=21\text{mm}$

であるためエコー高さによる領域が II の場合、欠陥評価長さの境界値 $L=31.5\text{mm}(3 \cdot \sqrt{t})$ 、領域が III 及び IV の場合は欠陥評価長さの境界値 $ML=21\text{mm}(t)$ が、領域が V の場合は欠陥評価長さの境界値 $M=15.75\text{mm}(3 \cdot \sqrt{t/4})$ がそれぞれの合否ラインとなる。

欠陥以外を起点として破断した試験体については言及できないが、UT 検査による欠陥指示長さと破面観察による欠陥寸法実測値は、UT 検査結果の方が平均で 10mm 程小さい値となっている。また、UT 検査結果が不合格となった試験体は 4 体で、全て溶接欠陥を起点として破断した。

4.2 亀裂特性寸法

構造物において一般に問題となる溶接欠陥は 3 次元の板厚非貫通(表面もしくは埋没)亀裂が多いが、日本溶接協会 WES-2805 による亀裂特性寸法は応力拡大係数 K 値の等価則を用いて板厚非貫通亀裂を 2 次元の板厚貫通亀裂に置き換えることにより様々な溶接欠陥を同等に評価することを試みている⁸⁾。

本研究では亀裂特性寸法を用いて溶接欠陥と梁部材の変形能力との関連性について考察を行った。亀裂特性寸法の算出に用いる溶接欠陥寸法には、計画値と多少前後するが破面観察結果によって得られた実測値を用いることとした。溶接欠陥を標準化する際は欠陥(亀裂先端)と板材の自由表面との距離(開口もしくは貫通しているかどうか)が問題となる。本実験の溶接欠陥位置は図 2 に示すように実験計画において意図した初層部分に存在しており、裏当て金の組立溶接が断続組立溶接であることから、試験体の溶接欠陥を半楕円