

梁の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響

—その2 現場溶接形式の溶接部強度を因子とした載荷実験—

正会員 ○上田 遼*1 同 田中 剛*2 同 吹田 啓一郎*3

同 佐藤 勇介*1 同 山根 正寛*4 同 中澤 好道*4

2. 構造—10. 鉄骨構造

現場溶接形式, 溶接欠陥, 溶接部強度, 実大載荷実験, 塑性変形能力

1. はじめに

固形エンドタブを用いた溶接施工では, 溶接初層の始末端位置に溶込み不良などの欠陥が生じ易い。溶接部初層における欠陥が, 工場溶接形式では上下フランジとも外開先となるため, フランジ内面側に入る。一方, 現場溶接形式では下フランジの開先形状は内開先となるため, 溶接部初層の欠陥はフランジ外面側に入り, 破壊に対して敏感に働く¹⁾。

前報²⁾では, 開先形状, 溶接欠陥の長さ, 溶接欠陥の位置による影響を調べた。本報では, 溶接部強度を因子として現場溶接形式の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に与える影響を検討するために実大載荷実験を行ったので, その結果を報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体形状および寸法を図1に示す。試験体は通しダイアフラム形式で角形鋼管柱とH形断面梁を溶接接合したT字形試験体である。柱は冷間ロール成形角形鋼管 (□-350x350x16 (BCR295)), 梁はH形鋼 (RH-500x200x10x16 (SN490B)), 通しダイアフラムはPL-19 (SN490B) である。本実験では, 梁端フランジ溶接部で破壊を生じさせることを目的としているため, 梁端部に補剛スチフナを配して, 梁フランジおよび梁ウェブの局部座屈を防いでいる。

試験体一覧を表1に示す。同表中には, 前報²⁾の試験体も併せて示す。実験因子は, 溶接部強度および欠陥長さであり, 溶接ワイヤ欄の括弧内はパス間温度を示す。溶接部ディテールは図2に示すように開先形状を現場溶接形式で用いる内開先としている。図3に示すように溶接初層の始末端部にダイアフラムに接して鋼片 (5mm × 5mm) を設置した上で溶接することにより, 人工的な溶込み不良を設け

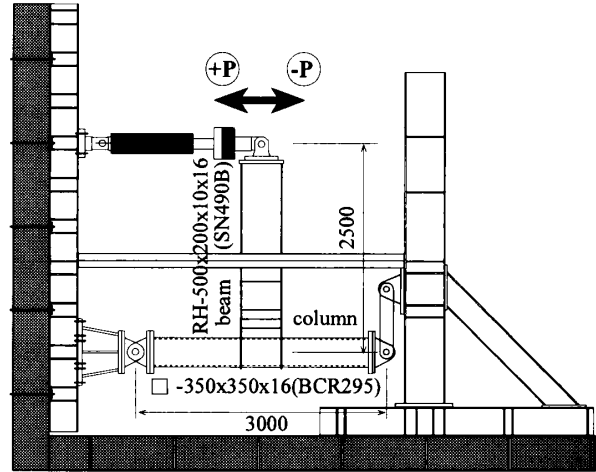


図1 試験体および載荷装置

表1 試験体一覧

試験体	溶接ワイヤ	欠陥高さ	欠陥長さ	欠陥位置
F-N/S		無し	無し	無し
F-E-5/S	YGW18 (250°C)	5mm	5mm	端部
F-E-10/S			10mm	
F-E-15/S			15mm	
F-E-15/S			15mm	
F-N	YGW11 (450°C)	5mm	無し	無し
F-E-5			5mm	
F-E-10			10mm	
F-E-15			15mm	

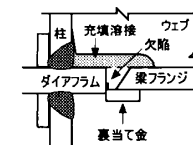


図2 溶接部ディテール

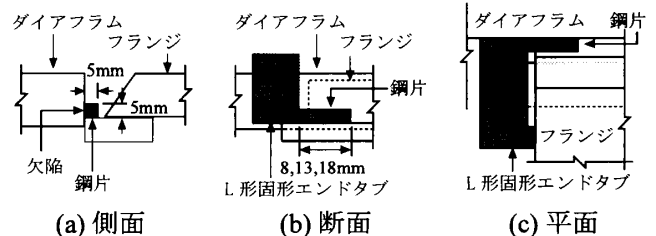


図3 溶接欠陥

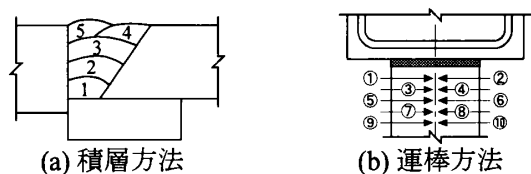


図4 溶接方法

Effects of Weld Defect of Beam-to-Column Weld Connections on Plastic Deformation Capacity

-Part 2 Tests on Effects of Weld Strength-

UETA R., TANAKA T., SUITA K., SATO Y., YAMANE M. and NAKAZAWA Y.

た。前報²⁾では、溶接ワイヤにYGW11を用いて、無欠陥1体および端部欠陥3体(欠陥長さ:5mm, 10mm, 15mm)の計4体の実験結果を報告した。本報では、溶接ワイヤにYGW18を用いて前報と同様の試験体4体を製作し、前報²⁾との比較を行う。開先形状は上下のフランジで同一とし、端部欠陥は各フランジ両端部計4ヶ所に挿入した。

梁フランジとダイアフラムの完全溶込み溶接は、半自動CO₂ガスシールドアーク溶接(YGW11, YGW18)により行い、溶接始末端部の処理にはL形固形エンドタブを用い、溶接ディテールはノンスカラップ工法とした。積層方法は、図4(a)に示すように4層5パスである。内開先であるため、図4(b)に示すようにいずれのパスでも梁フランジ端部から中央に向けて溶接を行い、中央部で溶接線を継いで

いる。全試験体を通して電圧は約33V、電流はYGW11では270A~330A、YGW18では250A~300Aの条件で行った。パス間温度は、YGW11では溶接金属の強度が母材強度に比べて同程度となることを意図し、450℃で管理し、YGW18では溶接金属の強度が母材強度を上回るように、250℃で管理した。鋼材の機械的性質を表2に示す。梁フランジ、ダイアフラムおよび溶接金属の応力と歪の関係を図5に示す。溶接金属をYGW11からYGW18に変えることによって、降伏点は1.20倍になり、引張強さは1.09倍になった。また、0℃におけるシャルピー吸収エネルギー vE_0 は、YGW11の32Jに対して、YGW18では174Jであった。溶接金属の引張強さとダイアフラムおよび梁フランジの引張強さの比は、YGW11ではそれぞれ1.03および1.04であり、YGW18では

表 2 機械的性質

部位	鋼種	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	YR (%)	ϵ_u (%)	vE_0 (J)	vT_s (℃)
梁フランジ	SN490B	335	525	64	16.2	155	9.3
梁ウェブ	SN490B	375	535	70	16.8	-	-
角形鋼管	BCR295	360	480	75	18.2	-	-
ダイアフラム	SN490B	350	533	66	20.1	129	6.9
溶接金属	YGW11	412	547	75	>18.6	32	19.1
	YGW18	493	594	83	30.5	174	-30.4

σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強さ, YR: 降伏比, ϵ_u : 一様伸び
 vE_0 : 0℃でのシャルピー吸収エネルギー, vT_s : 破面遷移温度

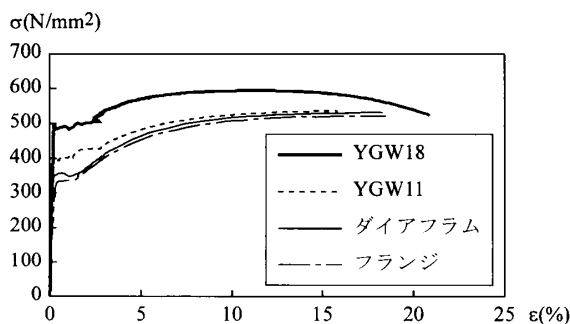


図 5 応力 - 歪関係

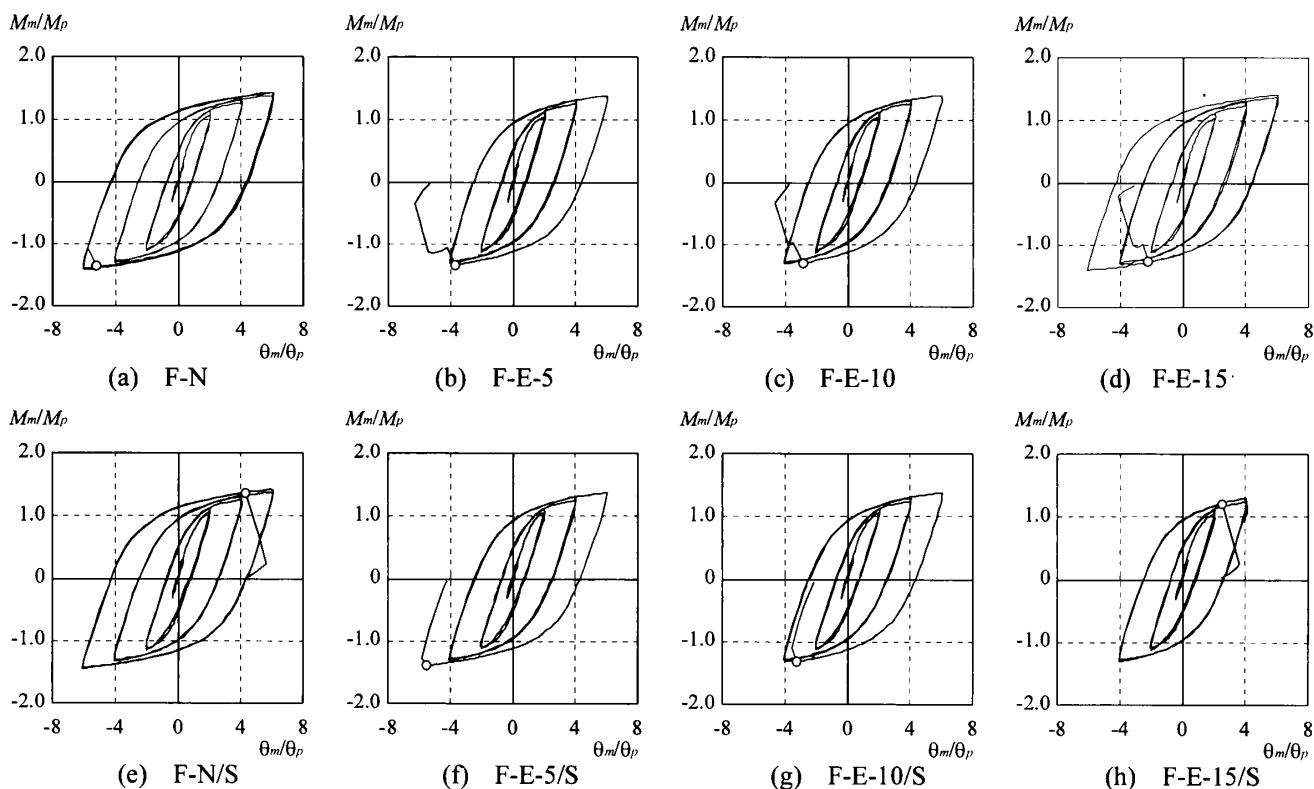


図 6 荷重 - 変形関係

それぞれ1.11および1.13である。

2.2 荷重方法

荷重は、図1に示すように柱の一端をピン治具に、他端をローラ治具に接合し、梁先端に取り付けた油圧ジャッキにより行う。荷重は正負交番漸増繰返し荷重とし、変位振幅は梁の全塑性モーメント M_p に対する弾性相対回転角 θ_p を基準に $\pm 2\theta_p$ および $\pm 4\theta_p$ の変位振幅で各2回ずつ行い、その後、 $\pm 6\theta_p$ の変位振幅で破壊が生じるまで繰り返す。

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

図6に M_p および θ_p で無次元化した梁端モーメント M_m と回転角 θ_m の関係を示す。表3に実験結果一覧を示す。同表中の備考に示すように、 $\Sigma\theta_{pi}$ は梁の累積塑性回転角、 η は累積塑性変形倍率、 θ_s は骨格曲線より求めた最大塑性回転角、 η_s は塑性変形倍率である。

3.2 破壊状況

今回行った各試験体の実験経過を以下に示す。

(1) F-N/S (YGW18, 無欠陥)

実験開始時の気温は5°Cである。60_p (+1) サイクル時に、ダイアフラム側溶接止端およびルート部に亀裂が発生した(写真1(a))。60_p (+2) サイクル時に、ダイアフラム側溶接止端に発生した亀裂が板厚を貫通し、板幅方向にも進展した。その後、60_p (+3) サイクル時に亀裂がダイアフラム内に進展し、間もなくダイアフラム側で破壊した(写真1(b), (c))。実験終了後に破面を観察したところ、溶接端部に高さ5.8mm、長さ10.7mmの溶込み不良の存在を確認した。

(2) F-E-5/S (YGW18, 5mm欠陥)

実験開始時の気温は11°Cである。40_p (-1) サイクル時に、欠陥先端から亀裂が発生した。40_p (-2) サイクル時には、この亀裂が板厚方向に進展し、60_p



(a) 亀裂発生



(b) 破断の状況
写真1 F-N/S



(c) 破断の状況



(a) 破断の状況
写真2 F-E-5/S



(a) 亀裂発生



(b) 破断の状況
写真3 F-E-10/S



(a) 板厚貫通



(b) 破断の状況
写真4 F-E-15/S

表3 実験結果一覧

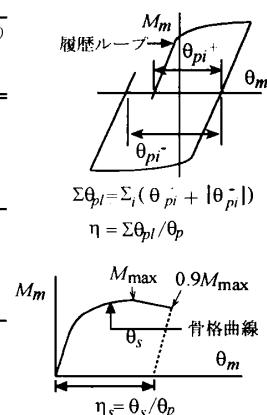
試験体	欠陥実測 ¹⁾ 寸法(mm) 高さ×長さ	破断 ²⁾ 時期	$\Sigma\theta_{pi}$ (rad)	η	θ_s (rad)		η_s		M_{max}/M_p		破断 ³⁾ モード
					(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	
F-N/S	5.8 × 10.7	60 _p (+3)	0.43	63	0.060	-0.065	8.8	-9.5	1.42	-1.44	D
F-E-5/S	7.3 × 12.2	60 _p (-1)	0.26	38	0.052	-0.057	7.6	-8.3	1.38	-1.39	D
F-E-10/S	8.4 × 17.7	60 _p (-1)	0.25	36	0.053	-0.042	7.8	-6.2	1.38	-1.32	D
F-E-15/S	7.5 × 16.3	60 _p (+1)	0.19	28	0.037	-0.045	5.5	-6.6	1.30	-1.31	D
F-N	—	60 _p (-7)	0.97	143	0.064	-0.069	7.8	-8.6	1.43	-1.41	D
F-E-5	5.1 × 9.4	60 _p (-1)	0.26	38	0.053	-0.046	6.2	-5.3	1.38	-1.33	D
F-E-10	3.5 × 13.1	60 _p (-1)	0.25	37	0.054	-0.043	6.3	-4.8	1.39	-1.30	D
F-E-15	5.1 × 17.5	60 _p (-2)	0.37	54	0.065	-0.064	7.9	-7.8	1.41	-1.40	D

1) 端部欠陥については破断の起点となった側の実測寸法の高さと長さを示す。

2) 破断時のサイクルを示す。60_p(-7)は、60_pの変位振幅の7サイクル目負側で破壊したことを示す。

3) Dはダイアフラム側からの亀裂による破壊を示す。

備考：塑性変形能力の定義



(-1) サイクルのピークに達する直前にダイアフラム側で破壊した (写真2 (a))。

(3) F-E-10/S (YGW18, 10mm 欠陥)

実験開始時の気温は12℃である。40_p (-1) サイクル時に、欠陥先端から亀裂が発生し (写真3 (a))、ピーク時には板厚を貫通した。60_p (-1) サイクル時には亀裂がダイアフラム内に進展し、板厚方向の絞れを確認した後、ダイアフラム側で破壊した (写真3 (b))。

(4) F-E-15/S (YGW18, 15mm 欠陥)

実験開始時の気温は3℃である。20_p (+2) サイクル時に、欠陥先端から亀裂が発生し、40_p (+2) サイクル時には板厚を貫通した (写真4 (a))。その後、60_p (+1) サイクル時にダイアフラム側で破壊した (写真4 (b))。

4. 塑性変形能力

各試験体の累積塑性変形倍率 η を図7に示す。

溶接部強度の低いYGW11シリーズおよび溶接部強度の高いYGW18シリーズの双方において、欠陥先端の亀裂発生時期およびその後の亀裂進展に差は無く、端部欠陥を設けた試験体の塑性変形能力は小さい。

溶接部強度の低いYGW11シリーズでは、欠陥有りの試験体 (F-E-5, F-E-10, F-E-15) の η は、無欠陥試験体 (F-N) の η の26%~38%に大きく低下している。

溶接部強度の高いYGW18シリーズでは、無欠陥試験体 F-N/S の溶接端部に溶込み不良があったため、F-N/S の η はF-N の η の44%となった。

同じ欠陥長さの試験体で、溶接部強度の異なる試験体同士を比較すると、いずれの試験体においても溶接部強度を上げたことに伴う η の上昇が見られない。したがって、端部欠陥が存在する場合、溶接部強度を上げることにより梁の塑性変形能力を向上させることができないことが分かる。

各試験体について、縦軸に η をとり横軸に欠陥断面率 α をとって図8に示す。欠陥断面率は、破壊の起点となった側の欠陥断面積 (欠陥の実測高さ × 実

測長さ) を片側フランジ断面積で除した値である。同図には、文献1) および文献2) の結果も併せて示す。現場溶接形式では、溶接部強度によらず、欠陥断面率が2%程度であっても η が大きく低下する。

5. まとめ

- (1) 端部欠陥が存在する場合、溶接部強度を上げることで塑性変形能力が向上した試験体はなく、溶接部強度の増加に伴う変形能力の改善効果は期待できない。
- (2) 現場溶接形式の初層の端部欠陥は、塑性変形能力を著しく低下させる。したがって、現場溶接の下フランジは、欠陥に対して敏感なディテールであると言える。

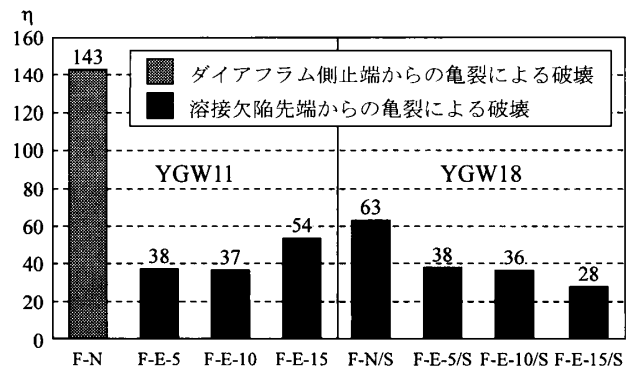


図7 累積塑性変形倍率

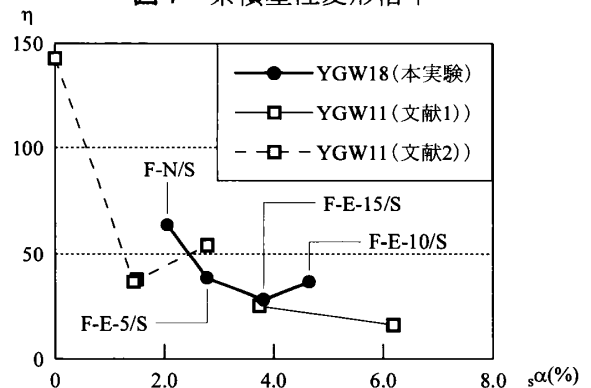


図8 累積塑性変形倍率 - 欠陥率関係

【謝辞】

本研究は科学研究費・基盤研究 (C) (課題ID: 11008167) の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 田中剛, 田淵基嗣, : 梁端フランジ溶接部の溶接欠陥位置が梁の塑性変形能力に及ぼす影響, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.103-110, 2008.11
- 2) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 津嘉田敬章, 山根正寛, 中澤好道: 梁の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その1 開先形状および欠陥位置を因子とした載荷実験—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第51号, pp.265-268, 2011.6

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・修士課程
 *2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士 (工)
 *3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士 (工)
 *4 ヤマネ鉄工建設 (株)

Graduate Student, Dept. of Architecture, Kobe Univ.
 Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.
 Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.
 Yamane Corporation