

# 梁端部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響

## －（その2）内部欠陥の長さを変数とした場合－

吉村 鉄也\* 横山 幸夫\*\*

鉄骨造柱梁溶接接合部において、溶接始末端にL型固形エンドタブを使用する場合の問題点は、溶接工程における端面のアンダーカットとアークスタート部の溶込不良が主にあげられる。本研究は、この溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響を検討するものであり、アンダーカット、内部欠陥の大きさおよび溶接部、ダイアフラムの強度を主なパラメータとしている。その中で、本報では内部欠陥長さについて報告する。

キーワード：静的載荷実験、柱梁溶接接合部、溶接欠陥、塑性変形能力、脆性破壊

### まえがき

前報<sup>1)</sup>においては、**1mm**のアンダーカットと長さ**20mm**の内部欠陥の影響について報告した。その中で、**20mm**の内部欠陥は梁の塑性変形能力を低下させたとしている。これを受けて、本報では内部欠陥の長さを**5～20mm**の範囲で変化させ、内部欠陥の長さの違いによって、破壊性状、歪性状にどのような影響を与えるのかを、載荷実験および数値解析により検討する。

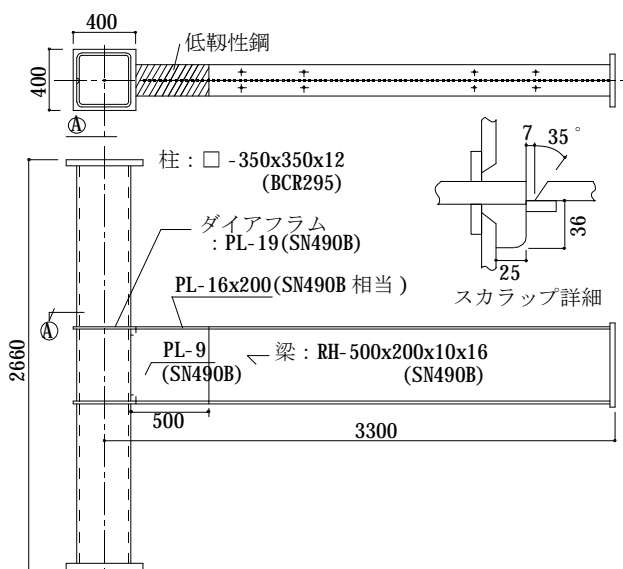


図-1 試験体の形状および寸法

### 1. 実験計画

#### (1) 試験体

試験体の形状および寸法を図-1に、また試験体一覧を表-1に示す。試験体はT字形で、柱は冷間ロール成形角形鋼管(□-350×350×12 : BCR295)、梁は溶接組立H形断面(H-500×200×9×16)である。梁フランジには文献<sup>2)</sup>で使用されているPL-25の低靱性鋼(SN490B相当)を切削して、PL-16に加工したものを使用している。スカラップには改良形スカラップを用い、スカラップ底からの破壊が生じないようにした。

実験変数は内部欠陥の長さ(L=5,10,15,20mm)である。なお、欠陥長さが**20mm**の場合については溶接金属の強度も実験変数とし、試験体数は合計**5**体とした。

内部欠陥の再現方法としては、図-2に示すように溶接始末端部の溶接ビード内に厚さ**1mm**、高さ**5mm**で、長さ**5,10,15,20mm**のアルミナ片を設置することにより、不溶着部を設けた。

表-1 試験体一覧

試験体名	人工欠陥	溶接材料
BT-C-W2	欠陥長さ L=5mm	YGW-11
BT-C-W3	欠陥長さ L=10mm	
BT-C-W4	欠陥長さ L=15mm	
BT-C-W5	欠陥長さ L=20mm	
BT-C-W6	欠陥長さ L=20mm	
		YGW-18

(2) 溶接条件

梁フランジとダイアフラムとの溶接方法を図-3に示す。フランジ幅中央の開先面より10mmの位置に熱電対を取付け、パス間温度の測定を行いながら、炭酸ガスシールド半自動アーク溶接にて溶接を行った。試験体 BT-C-W2~W5 では、破壊に対して溶接欠陥の影響が敏感に表れるように、溶接金属の強度を梁フランジ母材の強度より低くするため、溶接ワイヤに JIS Z3312 YGW11 (1.2φ) を使用して、1層目から4層目までを連続に溶接し、スラグ処理した後、最終層の溶接を行った(5層5パス)。試験体 BT-C-W6 では、溶接金属の強度が梁フランジ母材強度を十分に上回ることを意図して、溶接ワイヤに JIS Z3312 YGW18 (1.2φ) を使用し、パス間温度を250℃で管理しながら、5層5パスの溶接を行った。図-4に各試験体の温度履歴を示す。

(3) 使用鋼材および溶接金属の機械的性質

表-2に鋼材および溶接金属の機械的性質を示す。梁フランジ、梁ウェブ、ダイアフラムおよび柱の引張試験片は5号(JIS Z 2201)、溶接金属の引張試験片は14号(JIS Z 2201)である。梁フランジ、ダイアフラムおよび溶接金属のシャルピー衝撃試験片はVノッチ(JIS Z 2202)である。図-5に溶接金属の試験片採取位置を、図-6に遷移曲線、図-7に応力度-歪度関係を示す。試験体 BT-C-W2~W5 の溶接部の引張強さは、梁フランジに対し

て約60N/mm<sup>2</sup>、ダイアフラムに対して約30N/mm<sup>2</sup>下回り、試験体 BT-C-W6 のそれは、フランジに対して約45N/mm<sup>2</sup>、ダイアフラムに対して約74N/mm<sup>2</sup>上回るものとなっている。

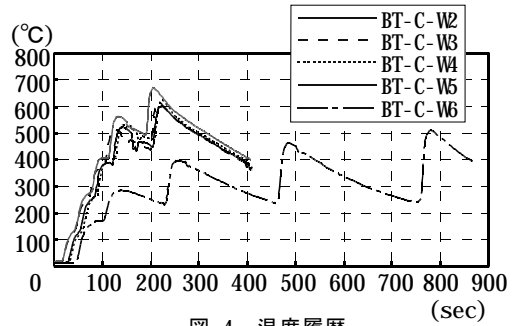


図-4 温度履歴

表-2 使用鋼材および溶接金属の機械的性質

採取部位	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	YR (%)	$\epsilon_u$ (%)	vEo (J)
梁フランジ	337	569	59	17.0	30
梁ウェブ	402	564	71	16.6	—
ダイアフラム	358	540	66	18.4	110
柱	424	509	83	14.5	—
溶接金属(YGW-11)	336	510	66	16.4	90
溶接金属(YGW-18)	479	614	78	15.2	140

$\sigma_y$ : 降伏点  $\sigma_u$ : 引張強さ YR: 降伏比  $\epsilon_u$ : 一様伸び  
vEo: 0℃でのシャルピー吸収エネルギー

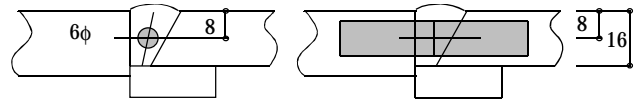


図-5 試験片採取位置

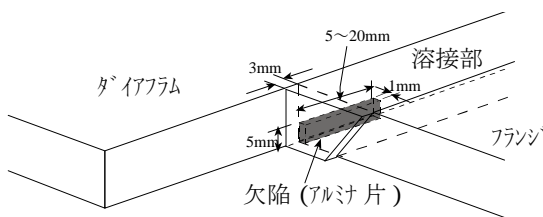
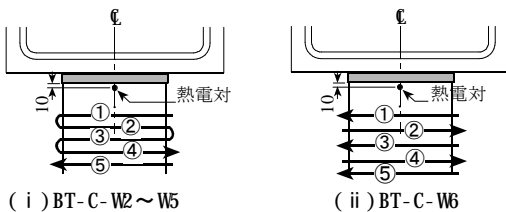
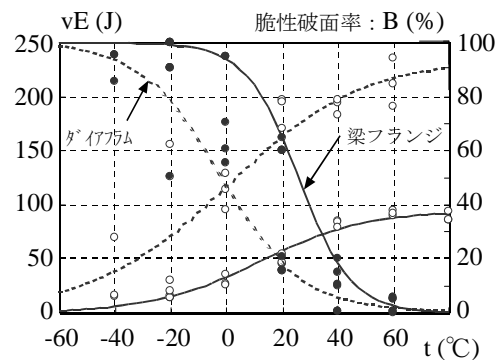


図-2 内部欠陥

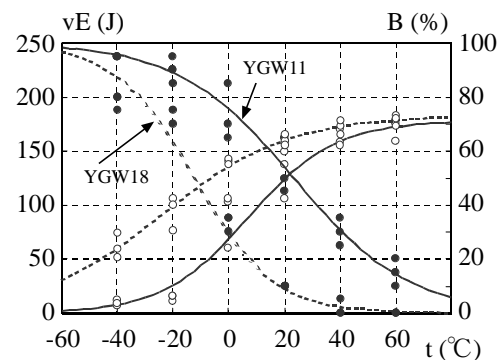


電流: 300~320A  
電圧: 34~36V  
入熱量: 15kJ/cm(1,2層)  
19kJ/cm(3層)  
22kJ/cm(4層)  
27kJ/cm(5層)

図-3 溶接方法



(a) 梁フランジおよびダイアフラム



(b) 溶接金属  
図-6 遷移曲線

(4) 荷重方法

荷重は、**図-8**に示すように試験体を設置し、柱の一端をピン治具に、他端をローラー治具に、梁先端に荷重用油圧ジャッキを緊結して行う。なお、柱面から **0.9m** と **2.4m** の位置に横座屈止めを設ける。荷重プログラムは正負漸増交番繰返し荷重とし、変形振幅は梁全断面の全塑性モーメント **Mp** に対応する弾性相対回転角 **θp** を基準に **2θp**, **4θp**, **6θp** の各サイクルを **2** 回ずつ行う。

2. 実験結果

(1) 荷重-変形関係

表-3 に実験結果一覧を示す。同表中の  $\Sigma\theta_{pi}$  は**図**

-9 に定義する正側 ( $\Sigma\theta_{pi}+$ ) および負側 ( $\Sigma\theta_{pi}-$ ) の梁の累積塑性回転角である。**図-10** に各試験体の梁端モーメント **Mm**-梁端変形角 **θm** 関係を示す。図中の縦軸および横軸は、**Mp** および **θp** で無次元化している。なお、比較のため前報<sup>1)</sup>にて報告した **BT-C** についても示す。

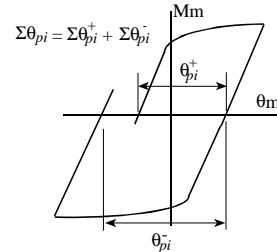


図-9 累積塑性回転角 ( $\Sigma\theta_{pi}$ ) の定義

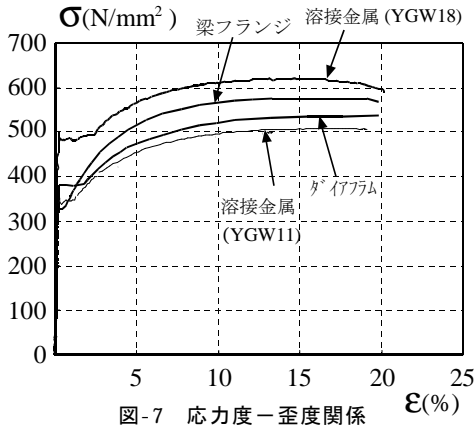


図-7 応力度-歪度関係

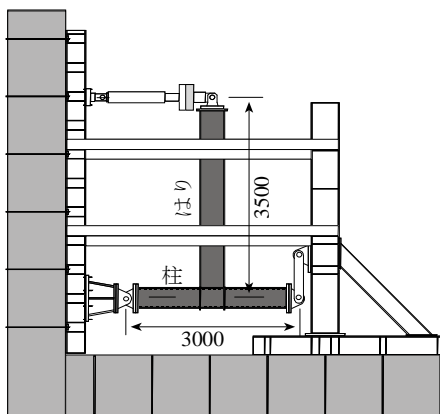


図-8 荷重装置

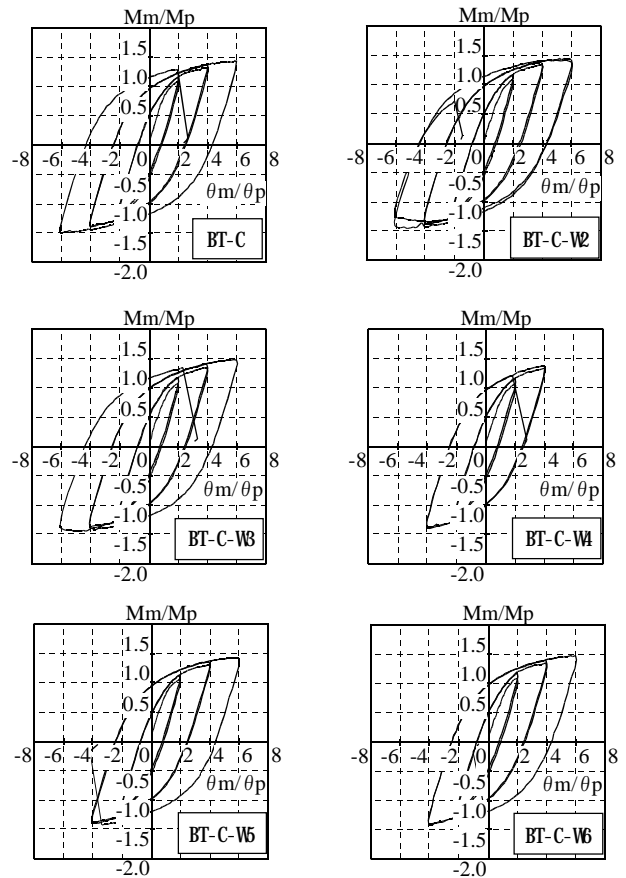


図-10 荷重-変形関係

表-3 実験結果一覧

試験体名	人工欠陥	破壊時期 <sup>*1</sup>	$\Sigma\theta_{pi}$ <sup>*2</sup>	破壊状況
BT-C	無し	6θp(+2)	0.41	梁ウェブ局部座屈の後、溶接部銀点から溶接金属が脆性破壊
BT-C-W2	L=5mm	6θp(+3)	0.53	梁フランジ、ウェブの局部座屈により終局状態が決定した。その後の荷重にてクレータおよびダイアフラム側入隅部の延性亀裂から溶接金属が脆性破壊
BT-C-W3	L=10mm	6θp(+2)	0.40	梁フランジ、ウェブ局部座屈の後、ダイアフラム側入隅部の延性亀裂からダイアフラムが脆性破壊
BT-C-W4	L=15mm	6θp(+1)	0.25	クレーターおよびダイアフラム側入隅部の延性亀裂から溶接金属が脆性破壊
BT-C-W5	L=20mm	6θp(-1)	0.33	ダイアフラム側入隅部の延性亀裂からボンド部および溶接金属が脆性破壊
BT-C-W6	L=20mm	6θp(-1)	0.31	ダイアフラム側入隅部の延性亀裂からボンド部およびダイアフラムが脆性破壊

\*1 破壊時期の ( ) 内は、サイクル数を表す

\*2  $\Sigma\theta_{pi}$  : 累積塑性回転角

(2) 破壊状況

各試験体の実験経過を以下に示す。

①BT-C-W2 (写真-1) : 実験開始時の気温は 5℃である。20p(+2)サイクルでクレーター部に延性亀裂を確認し、40p(+1)サイクルでダイアフラム側入隅部に延性亀裂を確認した。60p(+1)サイクルでダイアフラム側入隅部の亀裂がダイアフラム側に進展し、60p(-2)サイクルのピーク時で梁フランジおよび梁ウェブの顕著な局部座屈により荷重が最大荷重の 90%まで低下した。その後、60p(+3)サイクルでダイアフラム側入隅部とクレーター部の延性亀裂が繋がる点を起点として、溶接部が脆性破壊した。

②BT-C-W3 (写真-2) : 実験開始時の気温は 8℃である。20p(+1)サイクルでクレーター部に延性

亀裂を確認し、ダイアフラム側入隅部にも延性亀裂を確認した。60p(-1)サイクルで梁フランジおよびウェブの座屈が観察された。60p(+2)サイクルでダイアフラム側入隅部の亀裂がダイアフラム側に進展した後、60p(+2)サイクルでこの亀裂を起点として、ダイアフラムが脆性破壊した。

③BT-C-W4 (写真-3) : 実験開始時の気温は 11℃である。20p(+1)サイクルでクレーター部に延性亀裂を確認し、40p(+2)サイクルでダイアフラム側入隅部にも亀裂が生じた。その後、60p(+1)サイクルでクレーター部と入隅部の亀裂が繋がる点を起点として、溶接部が脆性破壊した。

④BT-C-W5 (写真-4) : 実験開始時の気温は 12℃である。20p(-2)サイクルでダイアフラム側入隅部の板厚中央に、40p(-1)サイクルで表面位置に



写真-1(a)

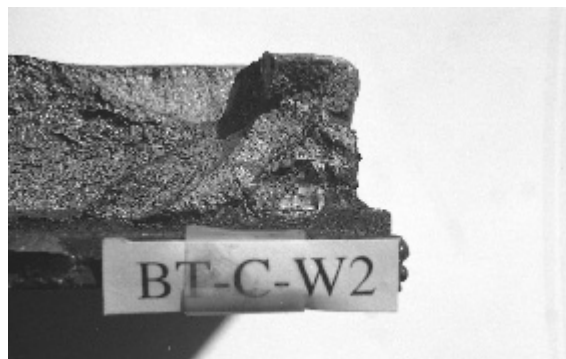


写真-1(b)



写真-2(a)



写真-2(b)

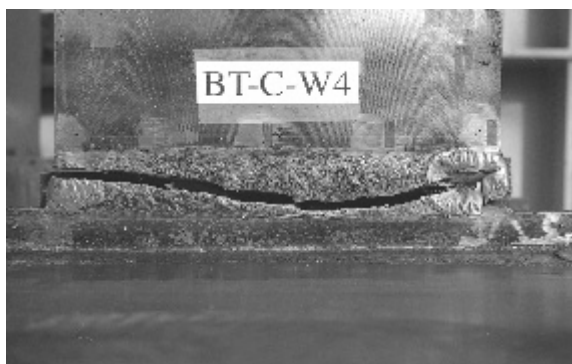


写真-3(a)

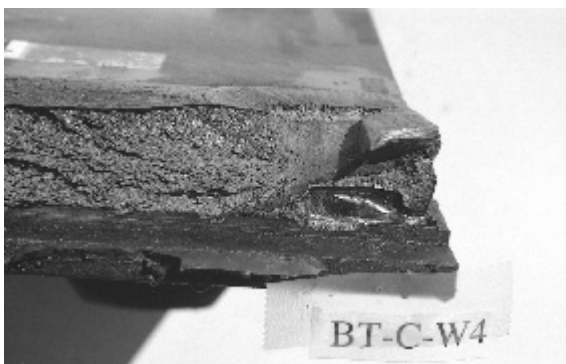


写真-3(b)

延性亀裂を確認した。**40p(-2)**サイクルで両者の亀裂が繋がり、**60p(-1)**サイクルでこの亀裂が起点となり、ダイアフラム側ボンド部に沿って溶接部が脆性破壊した。

⑤**BT-C-W6 (写真-5)** : 実験開始時の気温は  $7^{\circ}\text{C}$  である。**20p(-2)**サイクルでダイアフラム側入隅部の板厚中央位置に、**60p(+1)**サイクルで表面位置に亀裂が生じて、両者が繋がり、さらにダイアフラム側へ進展した。その後、**60p(-1)**サイクルでその亀裂を起点として、ダイアフラム側ボンド部に沿って、ダイアフラムが脆性破壊した。

### 3. 弾塑性有限要素解析

#### (1) 解析方法

溶接欠陥の長さが溶接部の歪性状に与える影響を調べるために、有限要素数値解析を行う。数値



写真-4(a)



写真-4(b)

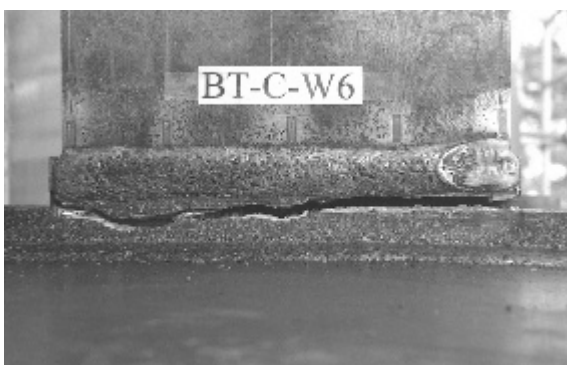


写真-5(a)

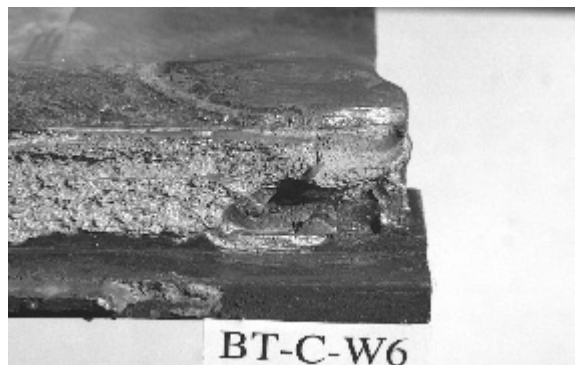


写真-5(b)

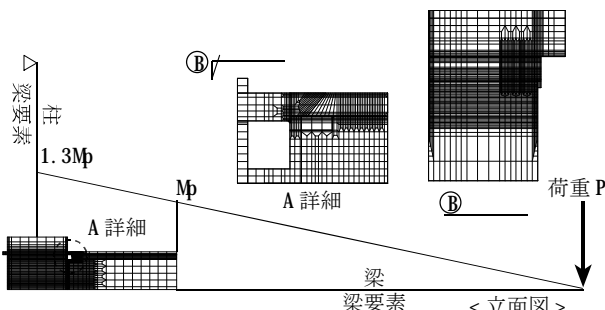


図-11 解析モデル

解析には、汎用非線形構造解析プログラム **ABAQUS** を用いる。以下に解析仮定を示す。

- ①降伏条件には **von Mises** の降伏条件を用いる。
- ②塑性域における構成方程式は連合流れ則に基づき、硬化則には等方硬化則を用いる。
- ③応力度と歪度の関係には溶接部の引張試験結果を多直線近似したものを用いる。

図-11に解析モデルを示す。解析モデルは対称性を考慮し、**1/4**モデルとする。柱梁接合部近傍ではソリッド要素を用い、その他の部分では梁要素を用いる。ソリッド要素の最小要素寸法は歪集中点である溶接欠陥および溶接端部近傍で  $1 \times 1 \times 1\text{mm}$  である。図-12に結果の抽出位置を示す。

#### (2) 応力分布

図-13に **BT-C-W2~W5** の  $\theta_m/\theta_p=4$  時における相当応力の分布を示す。上が梁フランジ外表面、

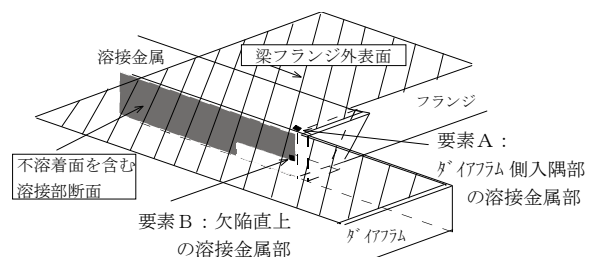


図-12 抽出位置

下が不溶着面を含む溶接部断面である。梁フランジ外表面のフランジ側入隅部およびダイアフラム側入隅部に応力集中が見られ、欠陥長さが長くなるにつれてダイアフラム側入隅部の応力の高い領域が広がっている。不溶着面を含む溶接部断面では溶接欠陥周囲および端部に応力の高い部分が集中している。

(3) 歪性状

図-14 に BT-C および BT-C-W2～W6 のダイアフラム側入隅部要素 A および欠陥直上要素 B の軸方向歪と塑性率の関係を示す。要素 A では、溶接金属の強度が高い BT-C-W6 の歪が小さくなっているが、欠陥長さはこの位置の歪に影響を与えていない。要素 B では欠陥がある場合は無い場合と比べて 2 倍以上歪が大きくなり、欠陥を有する試験体間では欠陥長さが長くなるほど歪が大きくなっている。また、同じ欠陥長さ 20mm の比較では、溶接金属の強度が高い BT-C-W6 の方が BT-C-W5 と比べて歪が小さい。

4. まとめ

- ①欠陥長さ  $L=5\text{mm}$  では、梁の局部座屈により終局耐力が決定した。
- ②欠陥長さが長くなるにしたがい、溶接部の破断時期が早くなる傾向にある。
- ③欠陥長さ  $L=20\text{mm}$  の場合、亀裂発生および進展はダイアフラム側に生じたため、溶接金属の強度の違いが、直接的には梁の塑性回転能力に影響を与えなかった。

あとがき

本研究は、神戸大学と駒井鉄工との共同研究として行われたものであり、神戸大学大学院自然科学研究科田淵基嗣教授および神戸大学工学部建設学科田中剛助教授には様々なご指導をいただきました。また実験、解析の実施においては神戸大学工学部建設学科難波尚助手、大学院生安井一浩氏の協力を得ました。さらに本研究を行うに際し、AW 検定協議会（東日本）の援助を受けました。関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

なお、本文の一部は鋼構造年次論文報告集<sup>3)</sup>において報告しています。

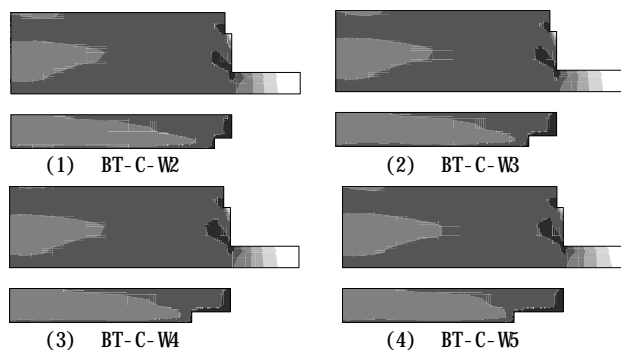


図-13 相当応力の分布

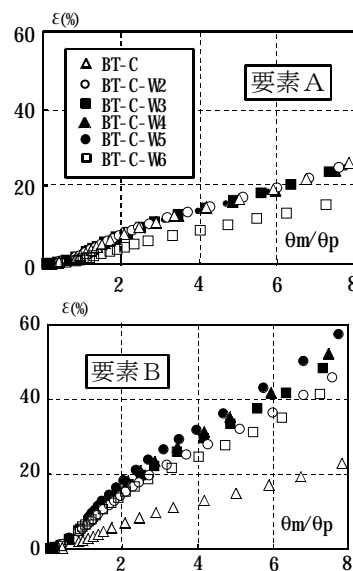


図-14 内部欠陥による歪の変化

参考文献

- 1) 吉村鉄也・横山幸夫・伊藤裕彦：梁端部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響（その1），駒井技報，Vol.21，pp.16-22，2002.5.
- 2) 石井 匠・菊川春三・森田耕次・高梨晃一：通しダイアフラム形式・柱梁接合部の破断状況に関する実験的研究，鋼構造論文集，Vol.6，No.24，pp.87-102，1999.12.
- 3) 吉村鉄也・田淵基嗣・田中 剛・安井一浩：鉄骨造柱梁溶接接合部の構造特性に与える溶接欠陥の影響，鋼構造年次論文報告集，Vol.10，pp.21-26，2002.11.