

博 士 論 文

梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす
梁端フランジ溶接部の溶接欠陥の影響

2025 年 1 月

神戸大学大学院工学研究科

上田 遼

目次

第 1 章	序論	
1.1	研究の背景	1
1.2	既往の研究	2
1.2.1	梁端部の溶接欠陥に関する研究	2
1.2.2	断面の寸法比に関する研究	2
1.2.3	フェーズドアレイ探傷法に関する研究	3
1.3	研究方針と本論文の構成	4
	参考文献	5
第 2 章	実大載荷実験	
2.1	はじめに	6
2.2	実大載荷実験 I	6
2.2.1	実験方法	6
2.2.2	実験結果	18
2.3	実大載荷実験 II	52
2.3.1	実験方法	52
2.3.2	実験結果	65
2.4	まとめ	99
	参考文献	99
第 3 章	有限要素数値解析	
3.1	はじめに	100
3.2	解析方法	100
3.2.1	解析モデル	100
3.2.1	解析条件	102
3.3	解析結果	104
3.3.1	荷重変形関係	104
3.3.2	亀裂開口変位	106
3.3.3	相当塑性歪	107
3.3.4	COD と累積塑性変形倍率の関係	109
3.3.5	欠陥寸法の許容値	110
3.3.6	限界 COD の基準化	113
3.4	まとめ	115
	参考文献	115

第 4 章	許容欠陥寸法に影響を与える因子	
4.1	はじめに	116
4.2	溶接部強度	116
4.2.1	解析条件	116
4.2.2	解析結果	117
4.3	接合部係数	121
4.3.1	解析条件	121
4.3.2	解析結果	122
4.4	まとめ	125
	参考文献	125
第 5 章	結論	
5.1	まとめ	126
	論文リスト	128
	謝辞	

第 1 章 序論

1.1 研究背景と研究目的

我が国の鋼構造建築物で幅広く採用される柱梁接合形式として、通しダイアフラム補剛による角形鋼管柱と H 形断面梁で構成される接合形式がある。本形式では、梁フランジと通しダイアフラム間を完全溶込み溶接にて接合する。耐震構造では、溶接部を含めた梁端部では大地震時に塑性ヒンジを形成する場合があります、設計時に塑性変形を許容している。つまりこの梁端溶接部には、十分な塑性変形能力とエネルギー吸収能力を発揮するために必要な耐力と破壊靱性が求められる。

一方、これらの溶接接合部には溶接施工時に溶接内部に欠陥が生じる可能性があり、梁端溶接接合部における溶接欠陥の発生は梁の塑性変形能力の低下を招くことが報告されている^{1.1)~1.9)}。特に梁端部は梁フランジから通しダイアフラムへの急激な断面変化に伴う歪集中が生じる場所であると同時に、溶接初層の溶接始末端部でのアークスタート位置特有の不安定なアークに伴う溶込み不良などの溶接欠陥が生じ易い位置でもある。溶接始末端部の処理に固形エンドタブを用いた溶接施工では、溶接始末端部に発生した溶接欠陥がエンドタブ内のみに留まらずに梁フランジの幅内にまで渡って発生する可能性がある。また、柱梁溶接接合部の溶接形式には、工場溶接形式と現場溶接形式がある。工場溶接形式では上下フランジとも外開先となるため、溶接部初層における欠陥の位置が、フランジの内面側に入るのに対して、現場溶接形式では下フランジの開先形状が内開先となるため、溶接部初層の欠陥はフランジの外面側に入る。梁断面の最外縁側に欠陥が存在する内開先の溶接部初層の欠陥は外開先の場合に比べて、破壊に対して敏感に働くことが指摘されている^{1.5)~1.7)}。

上記のような溶接欠陥の発生は鋼構造建築において避けられない課題であり、いかに優秀な溶接施工者や精巧なロボットが溶接をしても欠陥が完全に無くなる訳ではない。そこで、大地震時に過酷な歪状態が想定される梁端溶接始末端部に発生する溶接欠陥を適切に評価して、どの程度の欠陥であれば許容できるかを規定する必要がある。そのために利用されるのが「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準（日本建築学会）」^{1.10)}（以下、UT 規準）である。

UT 規準における超音波探傷試験での欠陥像の評価と合否判定基準が定められた背景として文献^{1.11)~1.12)}における研究が挙げられる。ここでは人工的に設けた溶接欠陥のある試験体に様々な超音波探傷試験を行い、欠陥の種類や寸法の評価および欠陥の種類や寸法が溶接部の力学的性状に及ぼす影響に関して調査が行われた。しかしながら、この文献^{1.11)~1.12)}では、溶接欠陥を溶接断面の比較的内部に 1ヶ所または複数ヶ所想定した突合わせ継手の静的単調載荷実験結果をもとに強度と変形能力の統計を取ったものである。その欠陥部特有の応力状態や歪状態を考慮したものではない。UT 規準の付則 2 において、固形エンドタブを用いる場合の工場溶接形式と現場溶接形式では欠陥評価長さの境界値が異なり、現場溶接形式の下フランジには厳しい境界値が定められているものの、こちらも必ずしも十分な実験資料によるものではない。特に母材板厚方向にあたる欠陥高さに着目した研究事例は少ない。

一方、梁断面寸法が塑性変形能力に及ぼす影響について、板厚、せいなどの寸法が大きいほど、脆性破断時の有効断面の応力が低くなることが報告されている^{1.13)}。また、ノンスラップ形式について大断面では塑性変形能力が低下することが報告されている^{1.14)}。

そこで本研究では、2 種類の溶接形式（工場溶接形式、現場溶接形式）および梁断面を約 1.6 倍した梁断面の異なる 2 種類の試験体（中型断面、大型断面）を対象として、欠陥寸法のうち主に欠陥高さを因子とした実大載荷実験を行い、欠陥が梁の塑性変形能力および亀裂の進展状況に及ぼす影響について比較検討する。人工的に溶接欠陥を設けた場所には、従来の超音波探傷検査法（以下、UT 法）に追加して、欠陥高さの検出性が高く^{1.15)~1.16)}、近年建設業界でも注目されつつあるフェーズドアレイ超音波探傷検査法（以下、PAUT 法）による検査も併せて実施する。加えて有限要素数値解析を行い、許容欠陥寸法について考察する。

1.2 既往の研究

1.2.1 梁端部の溶接欠陥に関する研究

梁端部の溶接欠陥を対象とした最近の研究では、文献^{1.3)~1.9)}などが挙げられる。

文献^{1.4),1.6)}では、田渕・田中らは、固形エンドタブ特有の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に与える影響について調べている。エンドタブの種類（固形エンドタブ、鋼製エンドタブ）、溶接材料（YGW11, 18）、欠陥長さ（5, 10, 15, 20mm）、開先形状（外開先、内開先）、ダイアフラムの材種などを因子に載荷実験および解析を行い、各因子の影響について考察している。ここでは、欠陥部から破壊する場合、欠陥長さが長いほど塑性変形能力は低下すること、破壊形式と各部の強度比の間には明瞭な関係が見られないこと、破壊形式によらず溶接部強度が低いほうが塑性変形能力は低い傾向があること、現場溶接形式における溶接欠陥は破壊に対して敏感に働くことを指摘している。

文献^{1.7)~1.9)}では、筆者らは欠陥長さ、開先形状（外開先、内開先）、欠陥の梁幅内の位置（幅端部、幅中央部）、溶接金属強度（YGW11, 18）およびエンドタブ形式（L形固形エンドタブ、鋼製エンドタブ、改良型固形エンドタブ）を実験因子として実大載荷実験を行い、各試験体の梁の塑性変形能力について考察している。ここでは、溶接始末端部に発生する溶接欠陥は梁の塑性変形能力に明確な影響を及ぼし、その部材が本来保有している塑性変形能力を大きく低下させること、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ことを指摘している。

文献^{1.3)}では、中込らは工場溶接形式の梁フランジ溶接始末端の欠陥長さ（5,10,15,40mm）および欠陥高さ（5,10,21mm）を実験因子として実大載荷実験を行い、溶接欠陥を WES2805^{1.17)}による等価貫通亀裂寸法で整理して梁の塑性変形能力との関係を検討している。ここでは、溶接欠陥の大きさや分布状況が異なる場合でも、WES2805による等価な亀裂に置き換える亀裂特性寸法は柱梁溶接部の変形能力を評価する上で有効な指標となりうること、等価亀裂長さが10mmを超えると溶接欠陥が部材の変形能力を低下させることを指摘している。

1.2.2 断面の寸法比に関する研究

断面の寸法比に関する検討を対象とした最近の研究では、文献^{1.13)~1.14)}などが挙げられる。

文献^{1.13)}では、1:2:4の寸法比が異なる試験片に切り欠き深さも実験因子として三点曲げ試験を実施して寸法比の影響について検討している。梁断面寸法が塑性変形能力に及ぼす影響について、CTODを用いた統一的な評価は難しいこと、板厚およびせいなどの寸法が大きいほど脆性破断時の有効断面の応力が低くなることを指摘している。

文献^{1.14)}では、梁断面寸法（梁せい 500mm と梁せい 800mm）とスカラップの有無が破断時期に及ぼす影響について検討している。梁断面寸法、スカラップの有無に加えて載荷振幅を因子として載荷実験および解析を行って検討している。ここでは、スカラップの有無による影響よりは小さいものの、ノンスカラップ形式では梁断面寸法が大きいほど破断が早くなることを指摘している。

1.2.3 フェーズドアレイ探傷法に関する研究

フェーズドアレイ探傷法に関する最近の研究では、文献^{1.15)~1.16)}などが挙げられる。

文献^{1.15)}では、UT法では単一の振動素子で超音波を送受信するのに対して、PAUT法は複数の振動素子を用いることで欠陥の検出性が高いこと、UT法では検出が困難な欠陥高さについても検出性が高いことが指摘されている。

文献^{1.16)}では、検査方法の確立などを目指して検討を行っている。その2では、溶接部に人工欠陥を設けてUT法とPA法による探傷の比較を実施して、すべてのケースにおいて探触子が70°単一のUT法よりも40°～70°の複数の探触子を持つPA法の方が指示長さを安全側に大きく測定でき、欠陥の形状をより正確に捉えられるため、欠陥検出を目的としたPA法の使用は十分に可能であることが指摘されている。他には、PA法が従来のUT法と比較して溶接内部の傷がよく見えること、検査結果の記録性や再現性があり優れていること、普及するには検査機器が高価な問題があること、検査法の確立が必要なことなどが指摘されている。

1.3 研究方針と本論文の構成

梁端フランジ溶接部の溶接欠陥を対象とした研究は複数報告されているものの、溶接欠陥高さについての研究事例は少ない。またそのほとんどが溶接欠陥を起点とした破断に至るまでの変形能力の評価に着目しているが、溶接欠陥を起点とした破壊には、脆性破断を伴い亀裂の進展する場所によっても実験結果にばらつきが生じやすい。さらに、梁端部の破断までの変形能力には断面寸法比の影響があることが指摘されているが、梁端フランジ溶接部の溶接欠陥と梁断面の寸法比を組合せた研究事例は極めて少ない。

そこで本論文では、溶接欠陥寸法の欠陥高さに特に着目して、欠陥寸法、開先形状および梁断面寸法を因子とした実大載荷実験および有限要素数値解析を実施して、梁端フランジ溶接部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす影響について調べる。さらに、不安定な脆性破壊を伴う破断までではなく、安定した延性亀裂による溶接部の板厚貫通亀裂が発生するまでに注目して、塑性変形能力の評価を行う。加えて、梁フランジ溶接部に人工的に溶接欠陥を設けた試験体に対して、PAUT 法による検査を行い、欠陥高さの検出可否についても調べる。

以上を踏まえて、本論文の構成は次の通りとする。

第1章では、研究背景と研究目的を述べ、本研究に関連のある既往の文献についてまとめる。そして、これらをもとに本研究の研究方法について述べる。

第2章では、開先形状、溶接欠陥寸法および試験体寸法比を因子とした実大 T 字形試験体による一定振幅繰返し載荷実験である実大載荷実験Ⅰおよび実大載荷実験Ⅱを実施する。実験Ⅰでは、梁せい 500mm の試験体を使用する。開先形状は、工場溶接を想定した外開先と現場溶接を想定した内開先で上下フランジとも同一形状としている。なお、溶接始末端部の処理には L 形固形エンドタブを使用している。欠陥寸法は、無欠陥、欠陥あり（フランジ幅内欠陥長さ（mm）×欠陥高さ（mm）：5×5, 5×10, 5×15, 5×19, 15×5）の6体を1シリーズとして計12体製作した。亀裂の進展状況を各サイクルで記録し、溶接欠陥が亀裂の進展に与える影響について調べる。実験Ⅱでは、実験Ⅰの試験体寸法を約 1.6 倍した梁せい 800mm の試験体を使用する。開先形状は、実験Ⅰと同様とし、欠陥寸法も約 1.6 倍して寸法比による塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす影響について調べる。

第3章では、第2章で実大載荷実験を行った試験体に供した解析モデルを作成し、有限要素数値解析を行う。溶接欠陥近傍の歪性状および亀裂開口変位（以下、COD）、溶接部に発生する延性亀裂がフランジ板厚方向に貫通するまでの累積塑性変形倍率に着目して、溶接欠陥寸法による違いを考察した。さらに、塑性変形能力の下限値を設定し^{1.18)}、その下限値を下回らない許容溶接欠陥長さと高さの組合せを示した。実験Ⅱの解析モデルについては、COD を寸法比の 1.6 で除して基準化して評価した。

第4章では、許容欠陥寸法に影響を与える因子の候補として、溶接部強度および接合部係数に着目して有限要素数値解析を行い、その影響について考察する。

第5章では、第1章～第4章についてまとめ、本論文で得られた知見を示す。

参考文献

- 1.1) 藤本盛久, 中込忠男, 泉満: 欠陥を有する溶接部の変形能力に関する研究 その3 単純引張試験における欠陥寸法および板幅の影響と非線形破壊力学的考察, 日本建築学会論文報告集, 第328号, pp.71-82, 1983
- 1.2) 鈴木孝彦, 石井匠, 森田耕次, 高梨晃一: 欠陥を有する柱梁溶接接合部の破断性状に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第6巻第23号, pp.149-164, 1999
- 1.3) 中込忠男, 服部和徳, 市川祐一, 的場耕, 岩田衛: 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, 日本建築学会構造系論文集, 第67巻, 第556号, pp.145-150, 2002
- 1.4) 吉村鉄也, 田渕基嗣, 田中剛, 安井一浩: 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1~9, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001.9~2008.9
- 1.5) 高柳翔太, 中込忠男, 服部和徳, 崎野良比呂他3名: 欠陥を有する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・2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.667-670, 2009
- 1.6) 田中剛, 田渕基嗣: 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
- 1.7) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 津嘉田敬章, 山根正寛: 場溶接形式の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, 第19巻, pp.171-178, 2011
- 1.8) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 佐藤勇介, 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ーその3 溶接部強度を因子とした載荷実験ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.81-82, 2012
- 1.9) 上田遼, 田中剛, 佐藤勇介, 萩野毅, 大村修太朗: 改良型固形エンドタブを用いて現場溶接接合された梁の変形能力, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, 第20巻, pp.109-116, 2012
- 1.10) 日本建築学会: 鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説, 2018
- 1.11) 加藤勉, 古沢平夫, 森田耕次: 超音波斜角探傷法による溶接欠陥の評価 (I), 日本建築学会論文報告集, 第241号, pp.33-41, 1976.3
- 1.12) 加藤勉, 古沢平夫, 森田耕次: 超音波斜角探傷法による溶接欠陥の評価 (II), 日本建築学会論文報告集, 第244号, pp.21-31, 1976.6
- 1.13) 大家直也, 川畑友弥, 吉敷祥一, 中込忠男: 柱梁接合部の脆性破断評価における縮小試験体使用の課題, 日本建築学会構造系論文集, 第87巻, 第791号, pp.9-19, 2022
- 1.14) 高塚康平, 吹田啓一郎, 田中剛, 梅田敏弘: 梁断面寸法と接合詳細が変形能力に及ぼす影響ー塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力 その4ー, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第696号, pp.315-321, 2014
- 1.15) 廣重隆明, 中島洋士, 古城豊光, 白坂武彦, 榎本克美, 西澤秀樹, 笠原基弘, 山本優一郎: フェーズドアレイを用いたレ形裏当て金付マグ溶接における欠陥評価に関する研究 その1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1165-1170, 2023
- 1.16) 加藤哲夫, 吉岡晋吾: フェーズドアレイ超音波探傷法による溶接部の検査法の確立の研究 (その1~4), 鉄構技術, pp.26-29, 2020.8, pp.34-37, 2021.9, pp.32-35, 2022.8, pp.22-25, 2023.10
- 1.17) 日本溶接協会; WES-2805「溶接継手の脆性破壊発生および疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法」, 1997.3
- 1.18) 日本鋼構造協会: 長周期地震動に対する鉄骨造梁端接合部の安全性検証方法, 2016

第 2 章 実大載荷実験

2.1 はじめに

通しダイアフラム補剛による角形鋼管柱と H 形断面梁で構成される柱梁接合部では、梁フランジと通しダイアフラム間を完全溶込み溶接にて接合する。本溶接部では、溶接始末端部に L 形固形エンドタブを使用して溶接する場合があります。L 形固形エンドタブ特有の溶接欠陥（溶込み不良）が溶接始末端部に生じる可能性がある。梁端溶接接合部における溶接欠陥の発生は梁の塑性変形能力の低下を招くことが報告されている^{2.1)~2.7)}。

さらに、梁断面寸法が塑性変形能力に及ぼす影響について、板厚、せいなどの寸法が大きいほど、脆性破断時の有効断面の応力が低くなることが報告されている^{2.8)}。また、ノンスラップ形式について大断面になるほど塑性変形能力が低下することが報告されている^{2.9)}。

よって本論文では、梁せい 500mm の梁に対して、開先形状（工場溶接形式、現場溶接形式）および欠陥寸法（欠陥高さ、欠陥長さ）を実験因子とした実大載荷実験 I（以下、実験 I）を実施する。さらに、実験 I の試験体寸法を約 1.6 倍した梁せい 800mm の梁に対して同様に開先形状（工場溶接形式、現場溶接形式）および欠陥寸法（欠陥高さ、欠陥長さ）を実験因子とした実大載荷実験 II（以下、実験 II）を実施して、溶接欠陥が梁の塑性変形能力および亀裂進展に与える影響を分析する。

2.2 実大載荷実験 I

2.2.1 実験方法

1) 試験体形状

試験体の形状および寸法を図 2.1 に示す。試験体は角形鋼管柱に H 形断面梁を通しダイアフラム形式により溶接接合した 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-22x400x400（SN490C）を用いている。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の発生を抑制している。

試験体一覧を表 2.1 に示す。実験因子は、開先形状、欠陥長さおよび欠陥高さである。開先形状は図 2.2 および図 2.3 に示す通り、工場溶接を想定した外開先および現場溶接を想定した内開先の 2 種類であり、上下フランジとも同一の開先形状としている。欠陥寸法は無欠陥、端部欠陥あり（欠陥長さ[mm]×欠陥高さ[mm]：5×5，5×10，5×15，5×19，15×5）の 6 体を 1 シリーズとして計 12 体を製作した。なお、フランジ厚 16mm に対して通しダイアフラムは板厚心合せで 2 サイズアップの PL-22 を使用しており、溶接初層部からダイアフラムの天端までは 19mm となり、欠陥高さ 19mm は貫通欠陥に相当する。

1 試験体あたり 4 ヶ所（フランジ端溶接部の始末端部かつ上下フランジ）に溶接欠陥を設けた。溶接欠陥は、図 2.4 に示すように 5mm 厚の鋼片（図中に灰色で示す）をあらかじめダイアフラムとフランジ間の溶接部に設置した状態で本溶接を行うことで、ダイアフラムと鋼片のメタルタッチ部に溶込み不良を人工的に作成した。同図に示すように、エンドタブに鋼片が接するように設置しており、試験体名の欠陥長さはフランジ幅内における鋼片長さとしている。欠陥寸法は設置する鋼片の寸法を変更することで調整した。

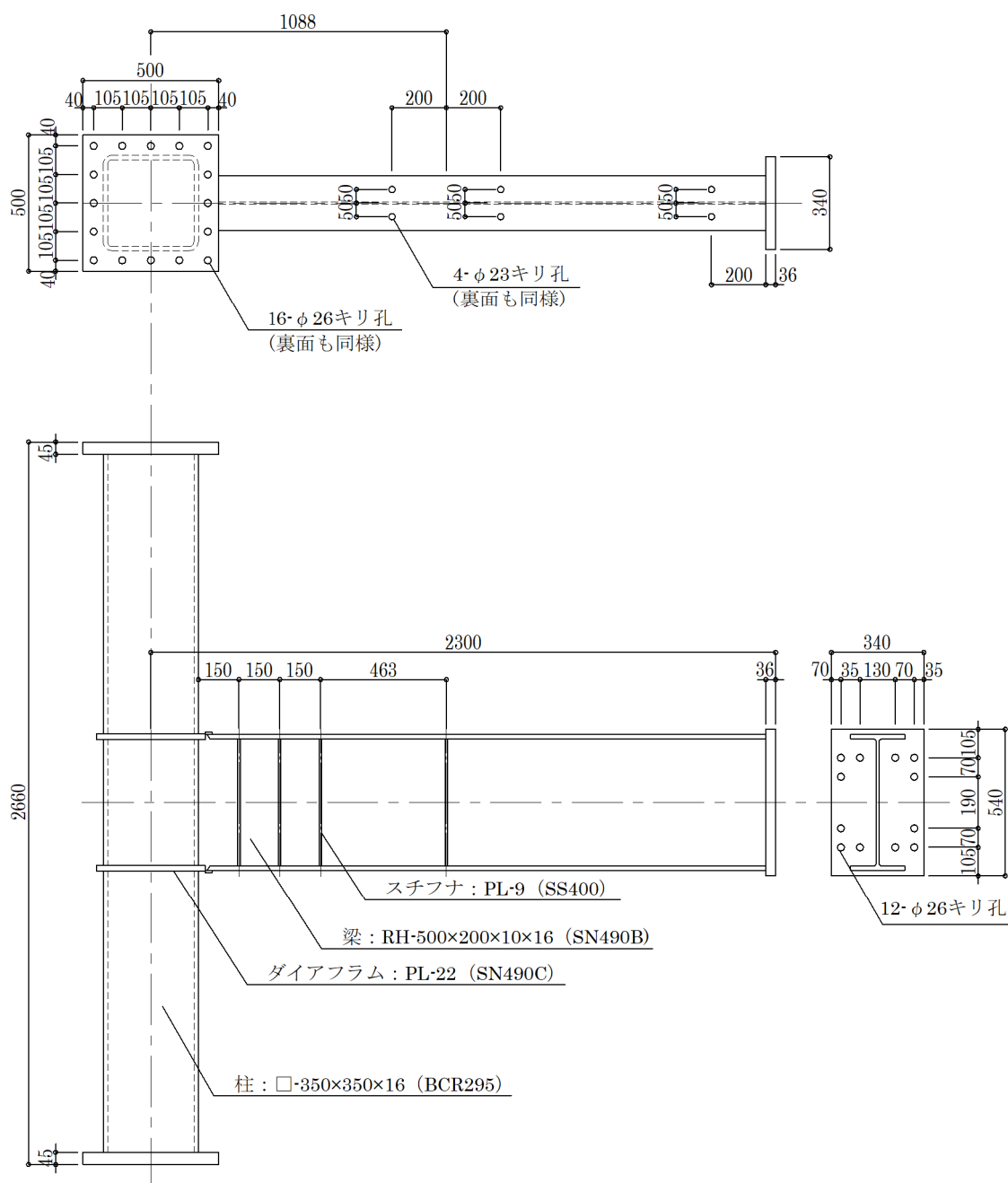


図 2.1 試験体図

表 2.1 試験体一覧

シリーズ	試験体名	開先形状	欠陥長さ	欠陥高さ
SH	SH-0-0	外開先	無し	無し
	SH-5-5		5mm	5mm
	SH-5-10		5mm	10mm
	SH-5-15		5mm	15mm
	SH-5-19		5mm	19mm(貫通)
	SH-15-5		15mm	5mm
FH	FH-0-0	内開先	無し	無し
	FH-5-5		5mm	5mm
	FH-5-10		5mm	10mm
	FH-5-15		5mm	15mm
	FH-5-19		5mm	19mm(貫通)
	FH-15-5		15mm	5mm

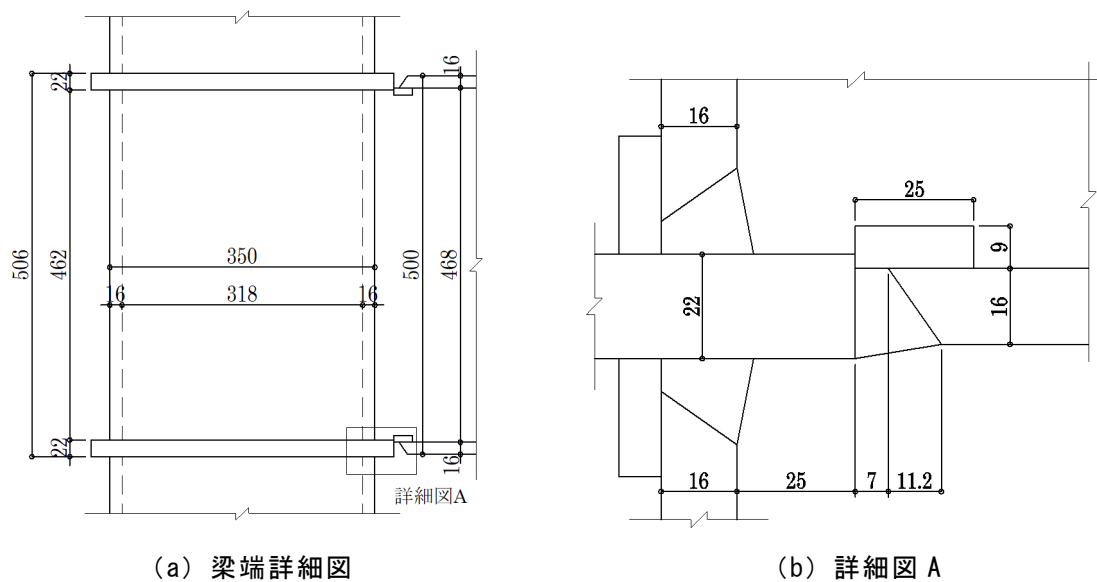


図 2.2 試験体詳細図（外開先）

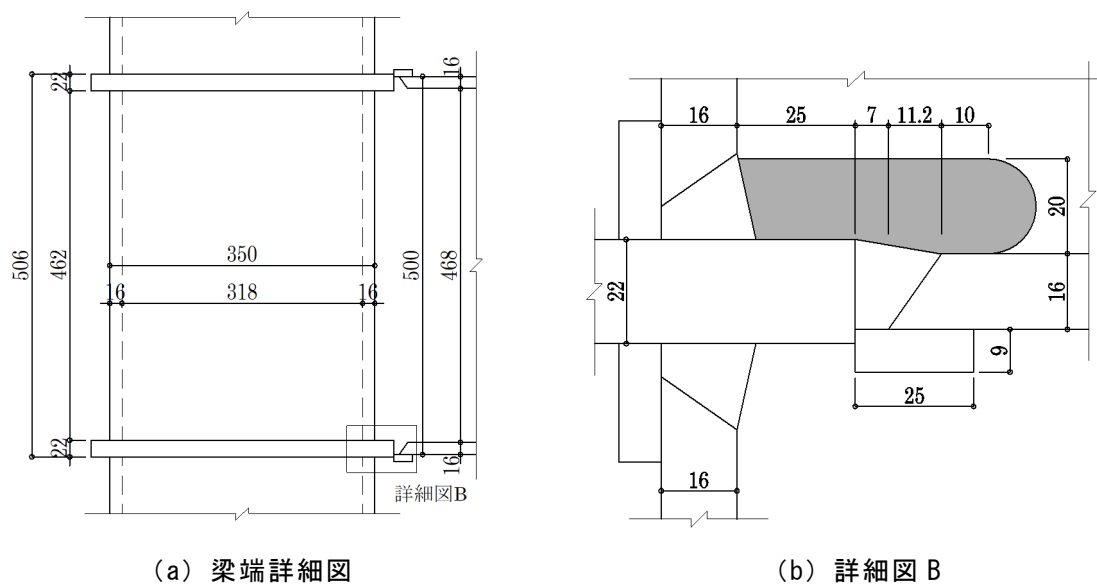


図 2.3 試験体詳細図（内開先）

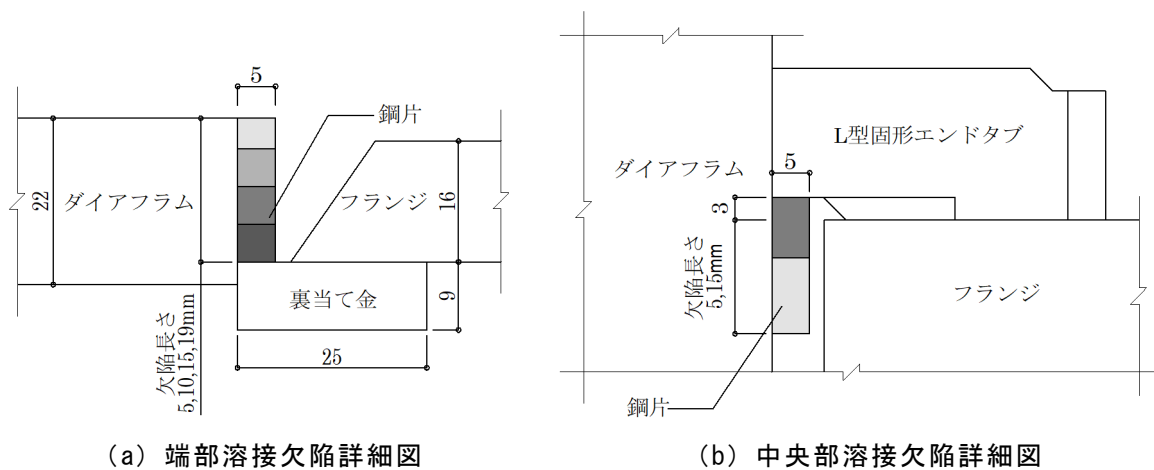


図 2.4 鋼片挿入部詳細図

2) 溶接条件

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, 1.2φ) により行った。溶接始末端部の処理には L 形固形エンドタブを用いた。本実験では、梁フランジ溶接部に作成した溶接欠陥を起点とした破壊を対象とするため、いずれの試験体もノンスカラップ形式とした。外開先の試験体では、分割式の裏当て金を使用してノンスカラップ形式とした。一般に内開先の場合にはノンスカラップ工法は採用されないが、高さ 20mm のミニスカラップを設けて梁フランジ接合部を完全溶込み溶接し、その後ミニスカラップを充填溶接することでノンスカラップ形式とした。裏当て金の組立て溶接は、組立て溶接による応力伝達が生じないように、外開先および内開先ともに開先内で行い、本溶接時に再溶融させた。

溶接部の積層方法は、図 2.5 に示すように 4 層 5 パスである。外開先については図 2.6 (a) に示すように最終層の 2 パスを梁フランジ端部から中央に向けて行い、クレーター処理を溶接線の中央部にて行った。内開先については、図 2.6 (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行い、中央で溶接線を継いでいる。これらは、フランジ幅端部の溶接端部にクレーターを配置しないことでクレーターを起点とした破壊を生じさせないためである。溶接入熱量の上限値は 40kJ/cm とした。また、パス間温度の管理値は、溶接金属の強度が低くなることを意図して 450℃ とした。

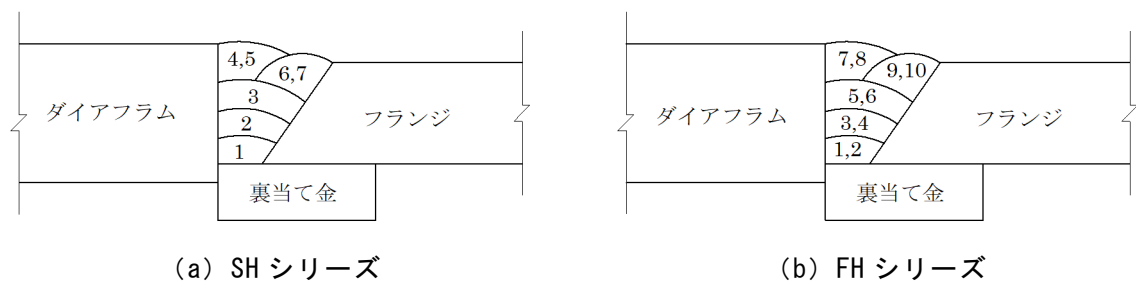


図 2.5 溶接積層図

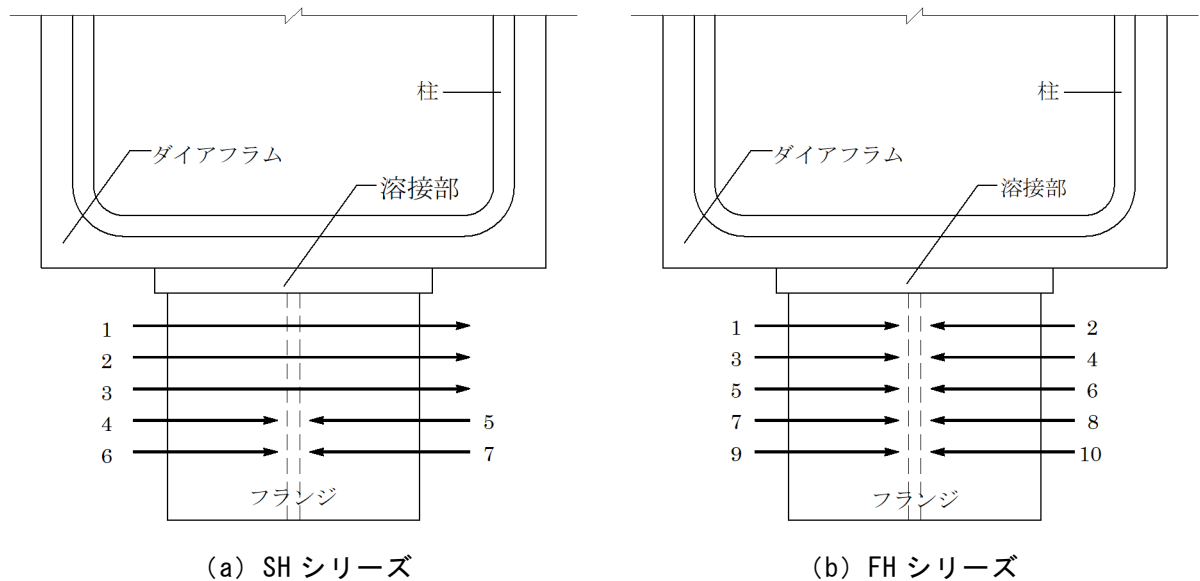


図 2.6 溶接運棒手順図

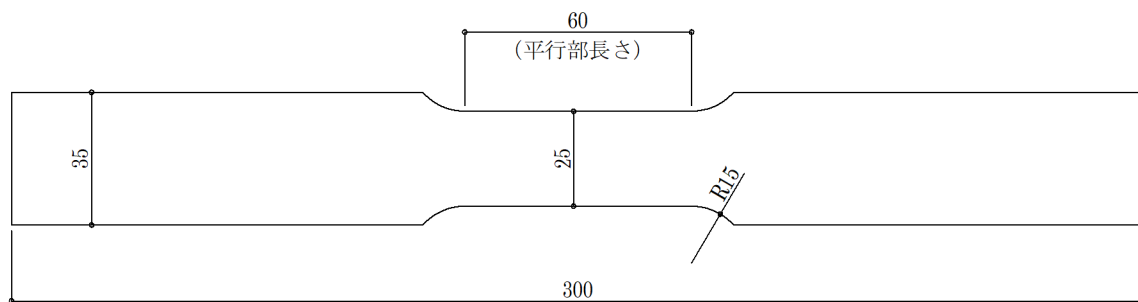
3) 機械的性質

引張試験

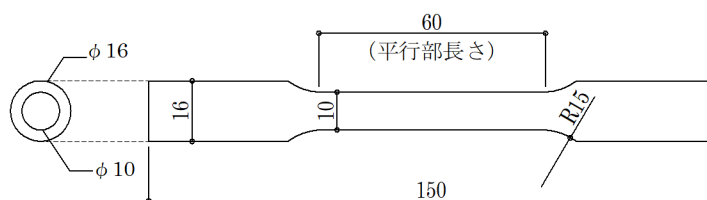
梁，柱，ダイアフラムおよび溶接金属から引張試験片を採取して，引張試験を実施した．各試験片形状を図 2.7 に，試験片採取位置を図 2.8 に示す．梁，柱およびダイアフラムの試験片形状は JIS5 号試験片，溶接金属は溶接部の中央より採取した直径 10mm の JIS14A 号引張試験片により行った．梁は圧延方向，柱は材軸方向，溶接金属は溶接線方向に試験片を採取した．

試験結果一覧を表 2.2 に示す．材料試験より得られた板厚，降伏応力 σ_y [N/mm²]，引張強さ σ_u [N/mm²]，一様伸び ϵ_u [%]，破断伸び EL [%] および降伏比 YR [%] の実測値と平均値を示す．降伏応力は降伏棚の有無に関わらず，0.2% オフセット耐力により定義した．表内で※印付きの試験体においては，試験時に不具合が生じたため，参考値として記載している．

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，いずれも 1.10 であり，溶接金属の引張強さはダイアフラムおよび梁フランジの引張強さを上回る．各部位の公称応力－公称歪関係を図 2.9 に示す．



(a) JIS Z 2241 の 5 号試験片



(b) JIS Z 3111 の A0 号試験片

図 2.7 試験片形状（引張試験）

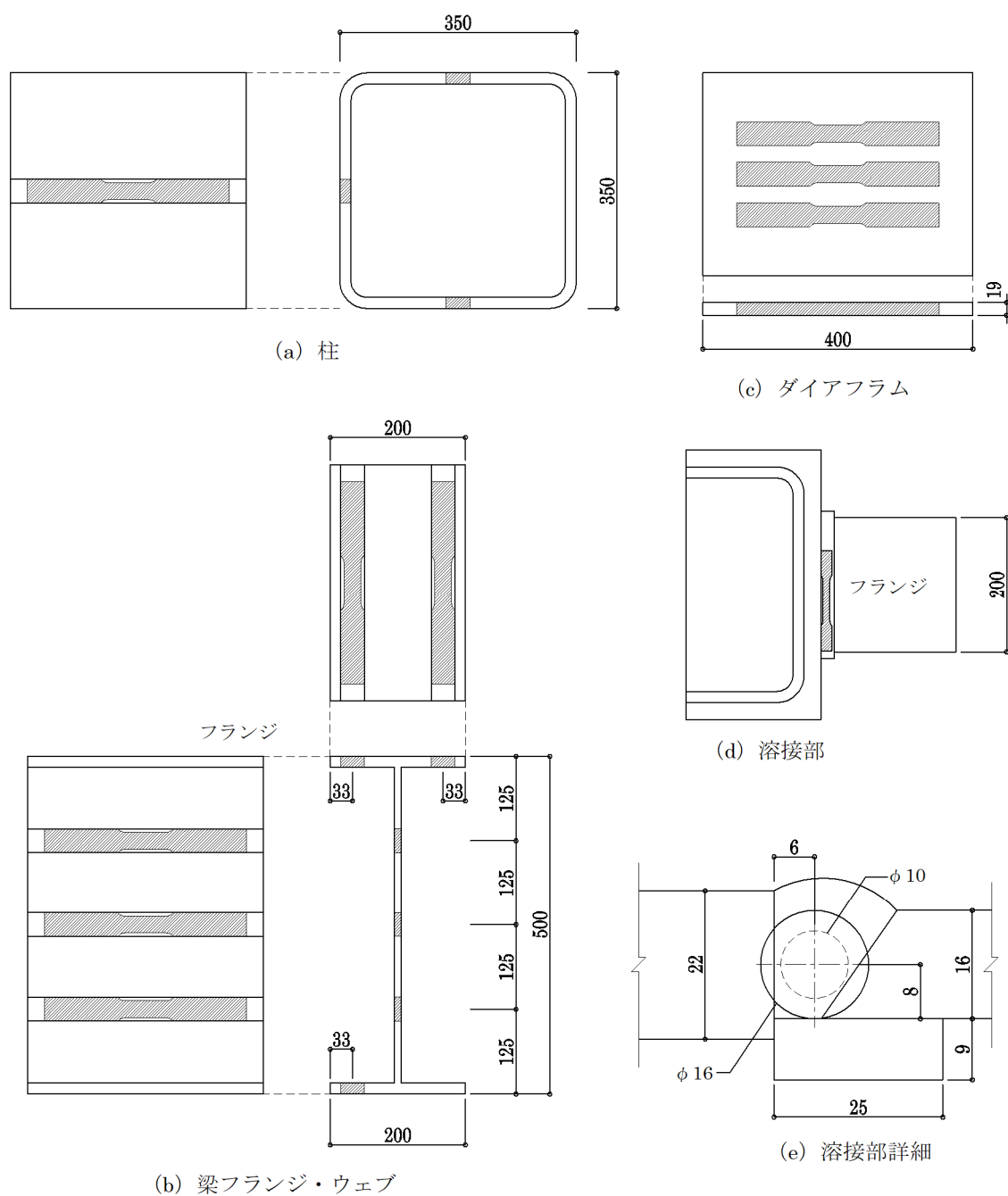
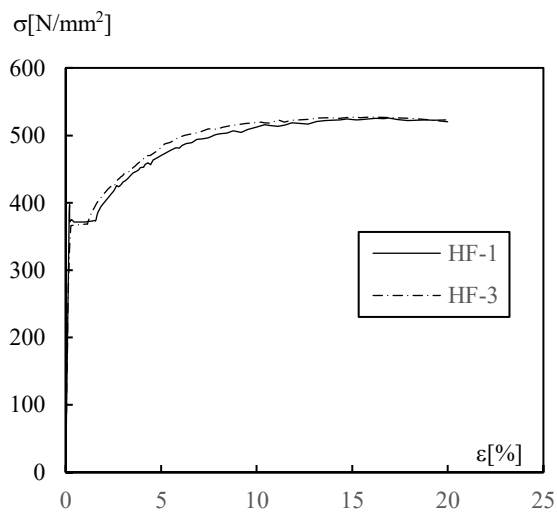


図 2.8 引張試験片採取位置

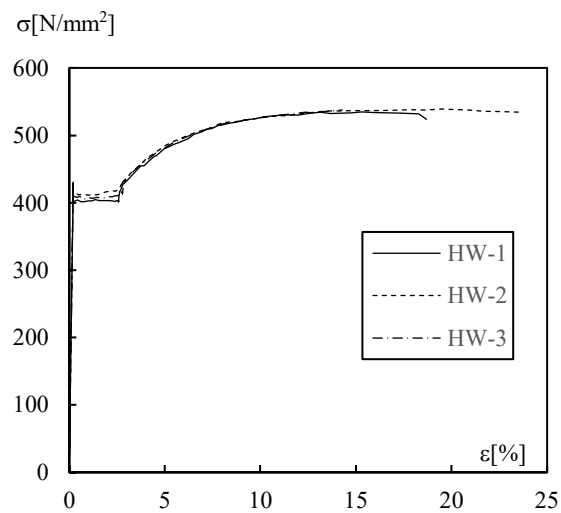
表 2.2 引張試験結果一覧

試験片 名称	部位	鋼種	板厚 [mm]	降伏応力 σ_y [N/mm ²]	引張強さ σ_u [N/mm ²]	一様伸び ε_u [%]	破断伸び EL [%]	降伏比 YR [%]
HF-1	梁フランジ	SN490B	16.3	373	526	16.9	45.3	70.9
HF-2※			16.2	391	528	11.6	46.1	74.0
HF-3			16.2	366	528	15.9	44.7	69.4
平均			16.2	370	527	16.4	45.0	70.2
HW-1	梁ウェブ	SN490B	10.1	404	535	15.3	39.3	75.4
HW-2			10.0	413	539	19.5	40.6	76.6
HW-3			10.0	408	540	—	39.4	75.5
平均			10.0	408	538	17.4	39.8	75.9
C-1	柱	BCR295	16.0	390	432	14.4	48.2	90.4
C-2			16.0	341	422	14.4	44.9	80.7
C-3			16.1	346	422	16.4	46.4	82.0
平均			16.0	359	425	15.1	46.5	84.4
D-1	ダイアフラム	SN490C	22.3	381	528	—	49.0	72.1
D-2			22.2	380	528	—	49.6	72.1
D-3			22.2	382	527	—	48.8	72.4
平均			22.2	381	528	—	49.1	72.2
w-1	溶接部	YGW11	—	474	580	13.3	34.0	81.8
w-2※			—	458	534	-	33.7	85.7
平均			—	474	580	13.3	34.0	81.8

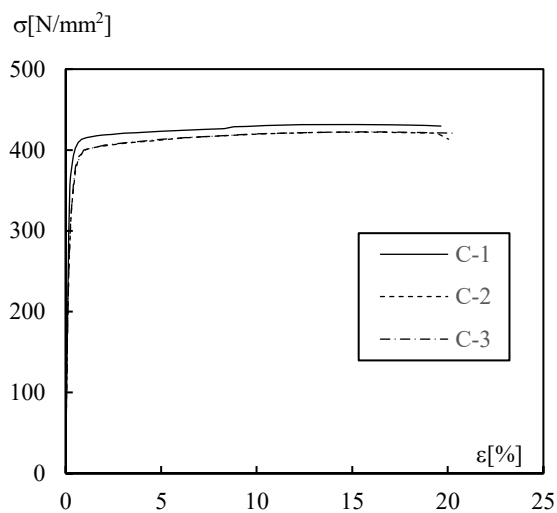
※:参考値(試験中に計測機に不具合あり)



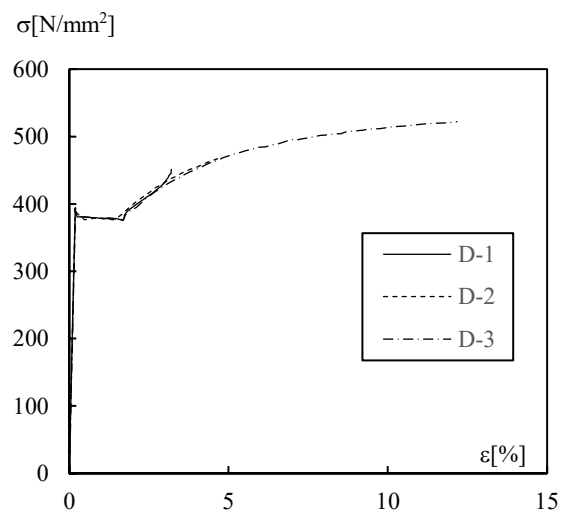
(a) 梁フランジ



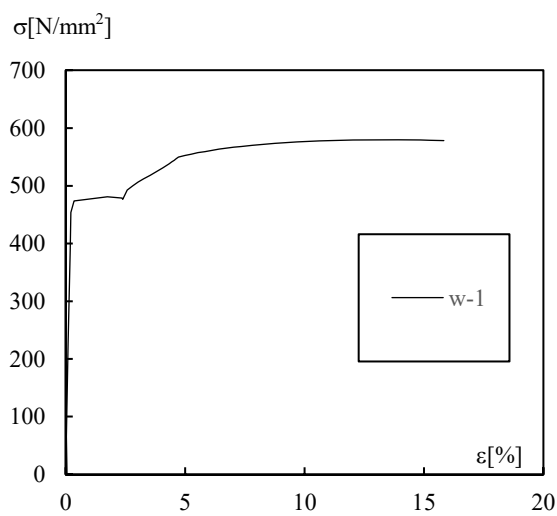
(b) 梁ウェブ



(c) 柱



(d) ダイアフラム



(e) 溶接部

図 2.9 公称応力－公称歪関係

シャルピー衝撃試験結果

梁フランジ、ダイアフラム、溶接金属からシャルピー試験片を採取し、シャルピー衝撃試験を実施した。試験片はノッチ深さ 2mm の V ノッチ標準試験片とし、図 2.10 に示す。試験片の採取位置を図 2.11 に示す。いずれの試験片もサイドノッチとしており、試験片を 3 体ずつ採取し、0℃で試験を行った。シャルピー衝撃試験の結果を表 2.3 に示す。

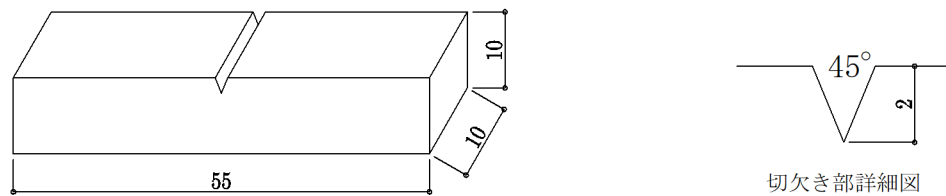


図 2.10 試験片形状（シャルピー衝撃試験）

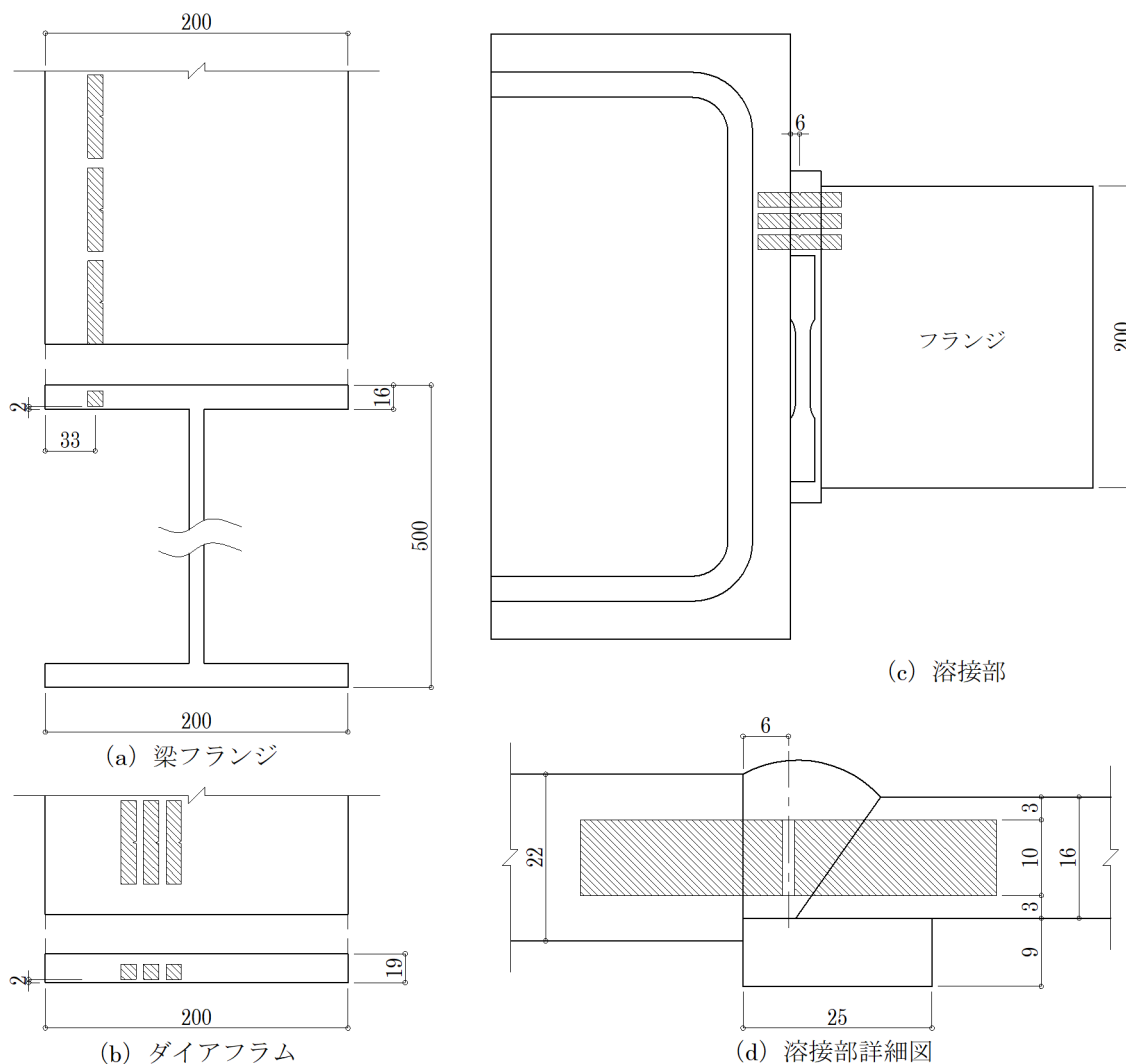


図 2.11 シャルピー衝撃試験片の採取位置

表 2.3 シャルピー衝撃試験結果

部位	鋼種	vEo [J]	脆性破面率 [%]
梁フランジ	SN490B	138	57
ダイアフラム	SN490C	200	5
溶接部	YGW11	69	61

4) 超音波探傷試験の結果

全ての試験体において載荷実験前に UT 法および PAUT 法による超音波探傷試験を実施し、作成した溶接欠陥の寸法測定を行った。UT 法は斜角探傷法とし、探触子は 5M10×10A70 および 5M5×10A65 を用いた。PAUT 法の探触子には、5MHz・16 素子のものを用いた。試験結果を表 2.4 に示す。表中探傷位置の BU は上フランジ、BL は下フランジを示す。上フランジは正載荷圧縮側フランジ、下フランジは正載荷引張側フランジである。また、探傷位置の左右は開先加工面を表面としてブラケット側から見た方向とした。同一の探触子で複数のデータがある場合には、その箇所での最大領域および最大評価長さを採用した。後述する実験時の破断位置に関連する探傷位置を色付きとした。この試験結果は、後述する欠陥実寸法との比較に用いる。

表 2.4 超音波探傷試験結果一覧

試験体名	探傷位置		エコー高さ領域と欠陥評価長さ [mm]		PAUTでの欠陥高さ (h) と欠陥指示長さ (l) [mm]	
			5M10×10A70	5M5×10A65	高さ (h)	長さ (l)
SH-0-0	BU	左端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	
		右端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	
	BL	左端部	III, 17	II, 10	< 2	17
		右端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	
SH-5-5	BU	左端部	II, 21	II, 10	3.5	10
		右端部	II, 10	II, 10	3.4	10
	BL	左端部	III, 13	II, 14	3.8	10
		右端部	III, 11	III, 12	3.8	12
SH-5-10	BU	左端部	II, 14	III, 10	11.0	10
		右端部	II, 15	III, 10	9.6	10
	BL	左端部	IV, 13	II, 10	10.9	25
		右端部	IV, 15	III, 11	9.9	10
SH-5-15	BU	左端部	III, 10	III, 10	14.6	10
		右端部	IV, 13	III, 10	15.2	10
	BL	左端部	IV, 18	IV, 12	14.9	10
		右端部	II, 11	II, 10	12.1	23
SH-5-19	BU	左端部	IV, 21	IV, 16	19.0	10
		右端部	III, 13	III, 10	17.5	10
	BL	左端部	IV, 15	III, 11	13.0	10
		右端部	IV, 11	III, 10	測定不可	10
SH-15-5	BU	左端部	III, 23	II, 20	4.9	18
		右端部	V, 33	IV, 21	5.3	17
	BL	左端部	IV, 29	IV, 19	5.5	15
		右端部	V, 22	IV, 22	5.7	17
FH-0-0	BU	左端部	II, 12	II, 11	< 2	10
		右端部	II, 10	II, 10	欠陥エコー無し	
	BL	左端部	II, 10	II, 10	< 2	10
		右端部	I, —	II, 10	< 2	10
FH-5-5※	BU	左端部	III, 14	III, 13	7.4	12
		右端部	IV, 11	IV, 11	5.2	10
	BL	左端部	IV, 12	III, 11	4.6	11
		右端部	III, 11	III, 12	4.2	10
FH-5-10	BU	左端部	V, 11	IV, 11	11.8	11
		右端部	III, 13	III, 13	10.0	11
	BL	左端部	III, 25	IV, 11	10.8	12
		右端部	IV, 19	III, 15	11.6	13
FH-5-15	BU	左端部	IV, 12	IV, 13	16.0	12
		右端部	V, 11	IV, 11	13.9	16
	BL	左端部	III, 13	IV, 16	16.0	15
		右端部	IV, 10	III, 10	15.9	10
FH-5-19	BU	左端部	III, 12	IV, 14	17.7	13
		右端部	IV, 12	III, 11	17.1	10
	BL	左端部	V, 13	IV, 10	17.2	10
		右端部	V, 13	IV, 14	17.5	10
FH-15-5	BU	左端部	IV, 19	III, 18	6.3	18
		右端部	III, 18	III, 19	6.0	18
	BL	左端部	V, 21	V, 21	5.7	18
		右端部	III, 19	III, 17	5.9	18

■塗り：載荷実験時にダイアフラム側で破断の起点となった位置

■塗り：載荷実験時にフランジ側で破断の起点となった位置

※：FH-5-5は破断の起点ではないが、ダイアフラム側で最も進展した位置を■塗りで示す

5) 載荷方法

載荷装置を図 2.12 に示す．梁が鉛直，柱が水平の向きで試験体を設置した．柱の一端をピン治具，他端をローラ治具に緊結し，梁先端に取付けた載荷用オイルジャッキにより載荷した．また，梁の面外変形を拘束するために横座屈止めを 2 段設置した．載荷振幅は，一定振幅の正負交番繰返し載荷とし，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 $\pm 3\theta_p$ で破断が生じるまで継続した．載荷プログラムを図 2.13 に示す．

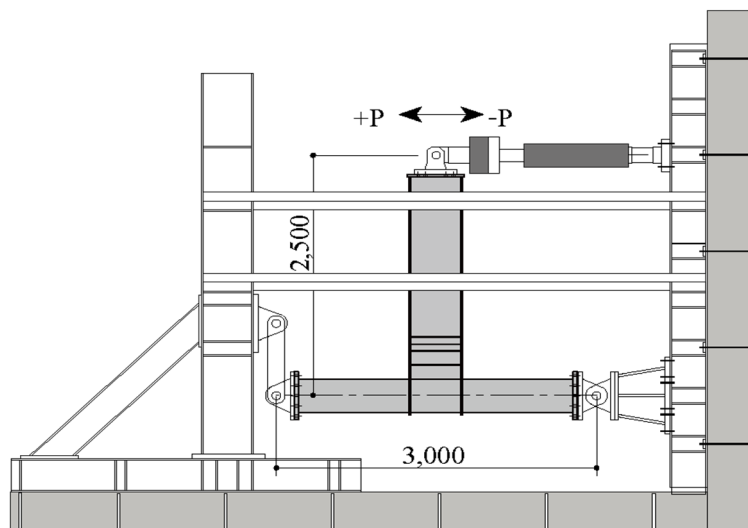


図 2.12 載荷装置

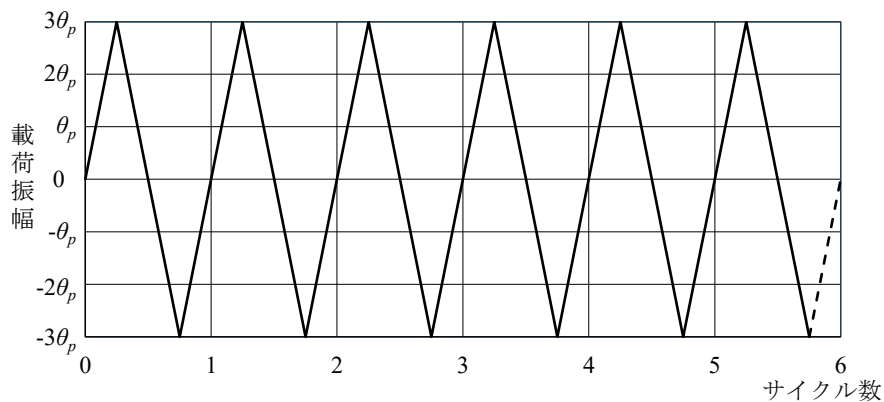


図 2.13 載荷プログラム

6) 測定方法

変位計測位置

載荷時の変位計設置位置を図 2.14 に示す.

D1 : ジャッキ芯の水平変位

D2, D3 : ダイアフラムの水平変位

D4, D5 : ダイアフラムの鉛直変位

D6 : ローラ治具側ベースプレートの鉛直変位

D7 : ピン治具側ベースプレートの鉛直変位

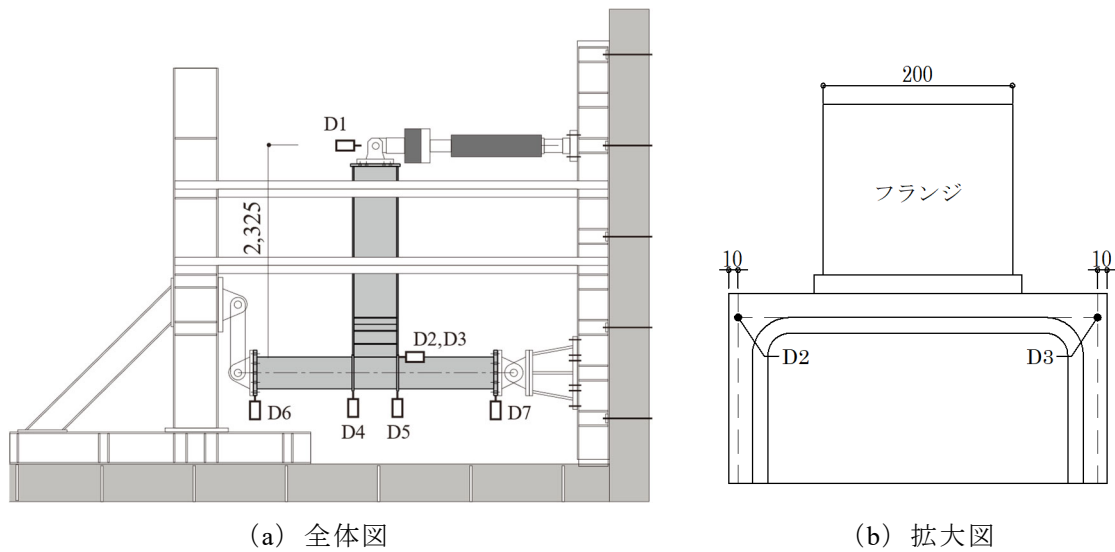


図 2.14 変位計設置位置

これらの変位計を用いて、次式により梁の相対回転角 θ_m を求めて制御した.

$$\theta_m = \frac{D1 + \frac{D2 + D3}{2}}{2325} - \frac{D4 - D5}{H}$$

H : 通しダイアフラムの板厚中心間距離 (484mm)

2.2.2 実験結果

1) 用語の定義

実験I, IIの結果を記載するにあたって用語の定義を以下に示す.

- 白い線：銀白色の線が見えているが、まだ亀裂と判断できない状態
- 浮き：鋼片の挿入などにより、溶込みが不十分で浮いている状態
表内では「浮き」もしくは「浮」と表記
- 亀裂：銀色の細い筋が生じ、その筋にへこみができて黒い影ができた状態
表内では「亀裂」もしくは「亀」と表記
- 板厚貫通：亀裂が梁フランジ側ボンド部もしくはダイアフラム側ボンド部を
板厚方向に貫通した状態
- 閉：一度発生した亀裂が閉じて観察出来ない状態
- 耐力 10%減：耐力が最大耐力の 90%を下回った状態
- 最終破断：載荷中に著しく耐力が低下し、梁フランジもしくはダイアフラムの
大半が破断した状態
- 終局：耐力 10%減、または最終破断に至った時点
- F：梁フランジ
- D：ダイアフラム
- 初層：板厚方向の溶接部初層側
- 中層：板厚方向の溶接部中層部で板厚方向の中央部
- 表層：板厚方向の溶接部表層側
- 幅方向：H 鋼のフランジ幅方向
- サイクル数 N：荷重が 0 の状態から、正載荷、除荷、負載荷、除荷を経て再び荷重が
0 に戻った時点を 1 サイクルとして、試験体が任意の状態に至るまで
に重ねたサイクルの数
- n サイクル正載荷時は+n サイクル、負載荷時は-n サイクルと表記
- 累積塑性変形倍率 η ：塑性変形角の累積値を弾性変形角で除し、無次元化したもの
図解したものを図 2.15 に示す

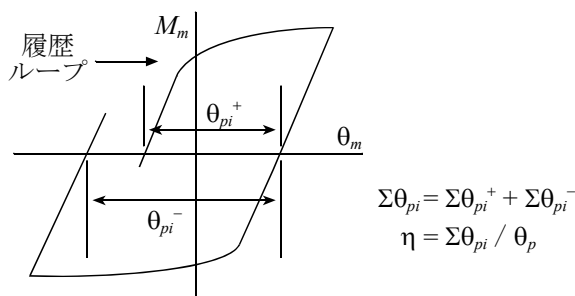


図 2.15 累積塑性変形倍率の定義

2) 実験結果概要

実験結果一覧を表 2.5 に示す。欠陥実測寸法，サイクル数，累積塑性変形倍率は原則として破断起点の位置の記録を示すが，初亀裂と板厚貫通に関しては破断起点以外で最も早期に発生した位置の記録も示す。欠陥実測寸法は，鋼片を挿入したダイアフラム側から破断していないものについては，PAUT 法による結果を参考値として括弧書きで示す。初期裂，板厚貫通，耐力 10%減時の η は変形ピーク時で，破断時のものは最終破断発生直前時点にて算出した。

無欠陥の試験体および FH-5-5 では，フランジ側の溶接止端部に発生した延性亀裂が進展して，フランジ側から破断した。その他の欠陥を有する試験体では，ダイアフラム側の鋼片挿入部から発生した延性亀裂が進展して，ダイアフラム側から破断した。

表 2.5 実験結果一覧

シリーズ	試験体	欠陥実測寸法(mm) 長さ×高さ	破断 起点	サイクル数						累積塑性変形倍率					
				ダイアフラム側		フランジ側		耐力 10% 減	破断	ダイアフラム側		フランジ側		耐力 10% 減	破断
				初 亀裂	板厚 貫通	初 亀裂	板厚 貫通			初 亀裂	板厚 貫通	初 亀裂	板厚 貫通		
SH	SH-0-0	無欠陥	F	+6	—	-8	-13	-22	-24	31.8	—	46.6	76.5	131	141
	SH-5-5	9.5×5.0	D	+6	+12	+5	—	+21	+23	31.2	66.4	25.4	—	120	131
	SH-5-10	8.0×9.5	D	+3	+5	-4	—	+19	+22	13.7	25.5	22.5	—	109	127
	SH-5-15	9.0×17.0	D	+3	+5	+5	—	+19	+23	13.7	25.3	25.3	—	106	133
	SH-5-19	8.0×18.0	D	+2	+2	—	—	-15	+20	7.75	7.75	—	—	87	117
	SH-15-5	18.5×6.0	D	+4	+6	-3	—	+11	+15	19.5	31.2	16.6	—	61	86
FH	FH-0-0	無欠陥	F	+11	—	-5	-14	—	-20	63.5	—	29.6	85.0	—	122
	FH-5-5	(11.0×8.0)	F	+3	+10	-3	-15	-20	-22	14.2	57.5	17.2	91.8	123	137
	FH-5-10	8.5×9.5	D	+2	+7	-6	—	+17	+19	8.07	38.9	35.8	—	101	114
	FH-5-15	(15.0×16.0)	D	+2	+4	—	—	—	+13	8.18	20.7	—	—	—	76
	FH-5-19	11.0×17.5	D	-2	-2	—	—	-11	-13	11.3	11.3	—	—	67	78
	FH-15-5	18.0×4.5	D	+2	+7	+5	—	—	+16	8.31	39.7	27.1	—	—	96

3) 荷重変形関係

SHシリーズとFHシリーズの実験で得られた梁端モーメント M_m と変形角 θ_m の関係を全塑性モーメント M_p および M_p 時の弾性相対変形角 θ_p で無次元化して図 2.16 に示す. いずれの試験体も安定した紡錘形の履歴ループを描いている. 载荷を繰返すことで, 梁端フランジ溶接部のフランジ側止端部もしくはダイアフラム側止端部に発生した亀裂が進展することでピーク時の荷重が低下し, 多くの試験体で最終サイクル時に脆性的な破断が生じ, 顕著な荷重低下が見られた.

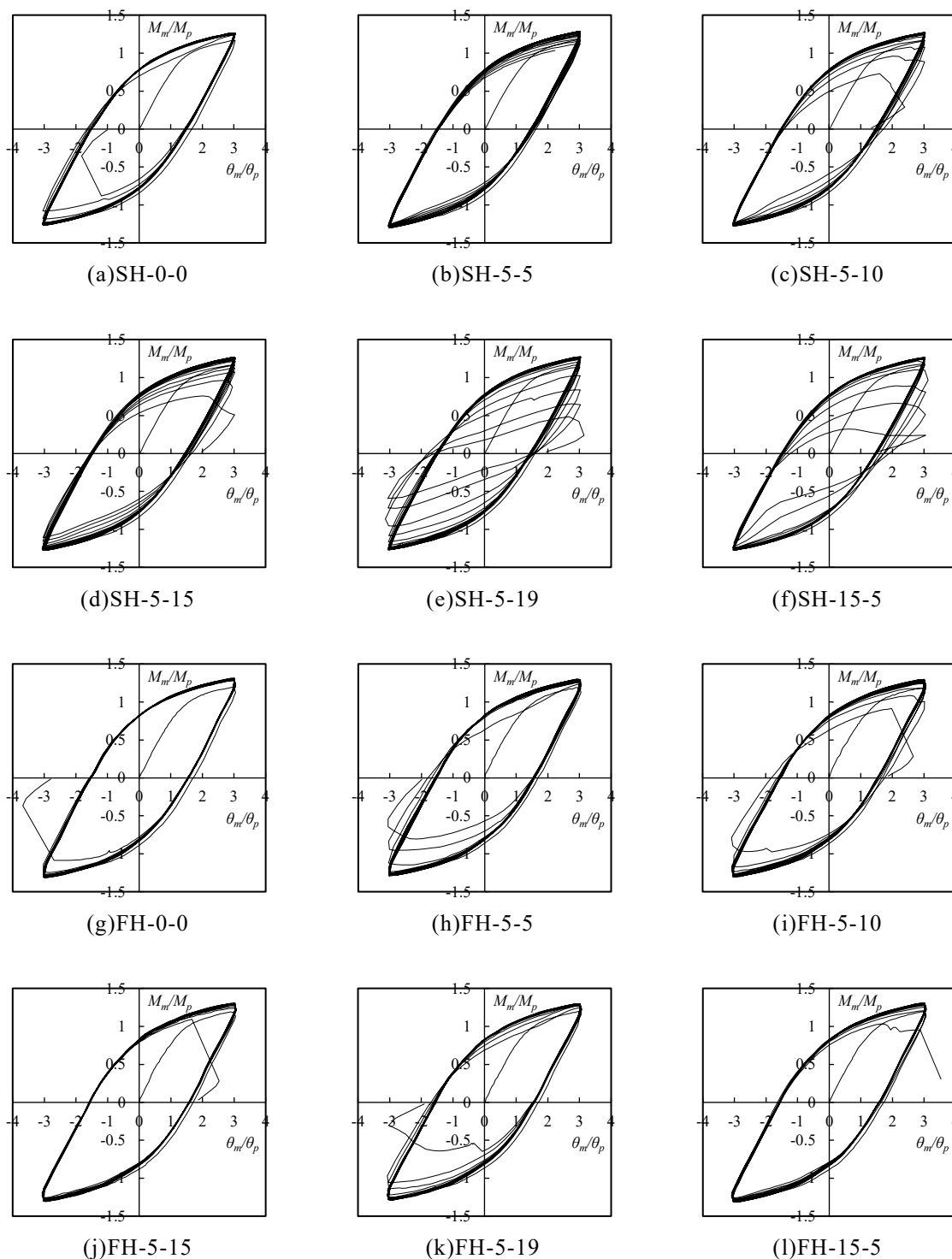


図 2.16 梁端モーメントー変形角関係

4) 各試験体の実験結果

各試験体の実験結果についてまとめる．実験中にサイクル毎に目視で亀裂の確認を行い，定規で亀裂長さを計測して記録したものを表にまとめた．実験経過記録表中の「↓」とは，前のサイクルの状態が継続していることを表している．載荷方向と記録部位の名称を図 2.17 に示す．各試験体の実験経過記録，写真をそれぞれ表 2.6～表 2.17，写真 2.1～写真 2.13 に示す．

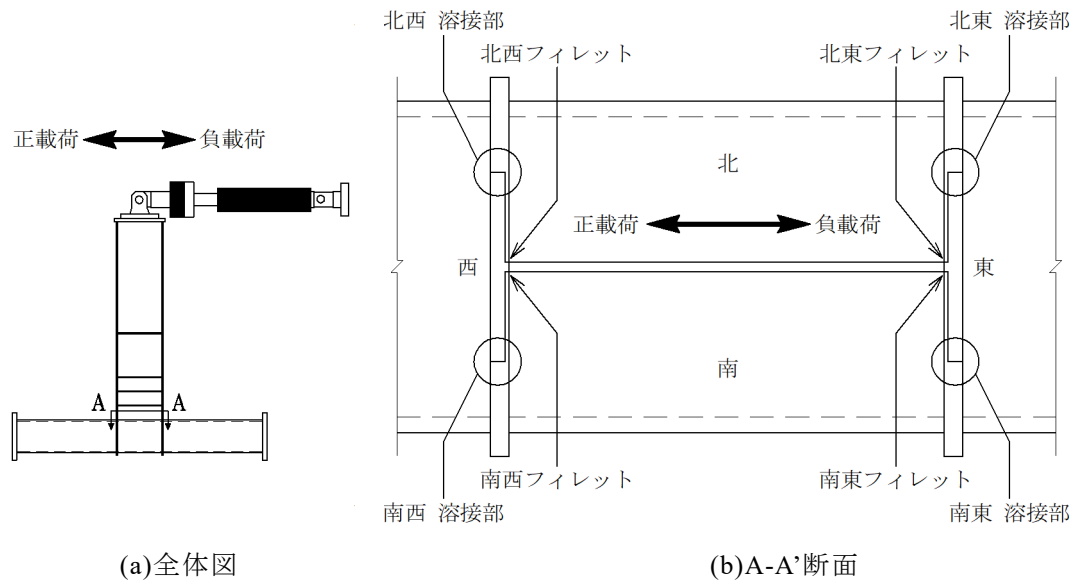


図 2.17 載荷方向と記録部位の名称

SH-0-0

ダイアフラム側の亀裂で最も進展したのは、北東ダイアフラムであり、+6 サイクル目に幅方向に亀裂が発生し、+9 サイクル目には板厚方向に亀裂が発生したが、ほとんど進展することにはなかった。正載荷側では南北フランジで、負載荷側は南フランジで亀裂の進展が順調に観察できた。

破断位置は負載荷側の南西フランジで、-3 サイクル目に白い線が発生し、-8 サイクル目に亀裂が発生した。-11 サイクル目には幅方向へも亀裂が進展した。-13 サイクル目に板厚方向に貫通し、幅方向の亀裂とつながった。さらに載荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前のサイクルの-23 サイクル目に 115mm に達した後に、-24 サイクル目で破断した。なお、-22 サイクル目にピーク時荷重が 10%低下した。

表 2.6 実験経過記録 (SH-0-0)

東側フランジ (正載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1													
+2								白い線					
+3								↓					
+4								↓					
+5								↓					
+6										亀裂2			
+7	白い線							亀裂4		↓			
+8	↓						亀裂2	↓	0.1	↓		0.2	
+9	↓	亀裂1					↓	↓	0.3	↓	亀裂3	0.3	
+10	↓	↓					↓	↓	0.35	↓	↓	↓	
+11	↓	↓					3	↓		4	↓	↓	
+12	↓	↓					13	5.5	0.5	↓	↓	↓	
+13	↓	3.5	0.35				↓	↓	↓	↓	↓	↓	
+14	亀裂16	↓	0.55				↓	↓	0.6	↓	↓	0.45	
+15	↓	↓	↓				↓	↓	↓	↓	↓	↓	
+16	↓	↓	↓				16	↓	0.65	↓	4.5	0.5	
+17	↓	↓	0.7				↓	↓	0.75	↓	↓	↓	
+18	↓	↓	0.9				↓	↓	0.9	↓	↓	↓	
+19	↓	↓	1				20	↓	1.1	↓	↓	↓	
+20	19	↓	↓				↓	7.5	↓	↓	↓	↓	
+21	↓	7	1.1				↓	↓	↓	↓	↓	↓	
+22	↓	↓	↓				24	↓	↓	↓	↓	↓	
+23	↓	↓	↓				↓	↓	↓	↓	↓	↓	
+24	↓	↓	1.2				↓	10	1.3	↓	↓	↓	

西側フランジ (負載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1													
-2													
-3		白い線											
-4		↓											
-5		↓											
-6		↓											
-7		↓											
-8		亀裂1.5	0.1										
-9		4	0.2										
-10		14	0.3										
-11	亀裂6	15	↓					亀裂1.5					
-12	↓	↓	↓					↓					
-13	↓	貫通	↓					4					
-14	↓	↓	↓					↓					
-15	↓	↓	0.65					↓					
-16	↓	↓	0.7					↓					
-17	↓	↓	↓					↓					
-18	24	↓	↓					↓					
-19	30	↓	1.1					↓					
-20	↓	↓	1.2					↓					
-21	46	↓	3.0					↓					
-22	75	↓	6.0					↓					※1
-23	115	↓	11.0					↓					
-24	破断							↓					

※1: 変形ピーク時の荷重が、最大耐力から10%以上減少



(a)－8 サイクル<亀裂発生>
南西溶接部



(b)－13 サイクル<板厚貫通>
南西溶接部



(c)－22 サイクル<耐力 10%減>
南西溶接部



(d)－22 サイクル<耐力 10%減>
南西溶接部



(e)－23 サイクル<破断前のピーク>
南西溶接部



(f)－23 サイクル<幅方向亀裂 115mm>
南西溶接部



(g)－24 サイクル<破断>
南西溶接部



(h)－24 サイクル<破断>
西面溶接部

写真 2.1 実験経過状況 (SH-0-0)

SH-5-5

-4 サイクル目に北西ダイアフラムの板厚方向に初亀裂が発生したが、板厚貫通は-18 サイクル目までかかり、破断には至らなかった。南東フランジおよび南西フランジでは、幅方向に亀裂が 25mm 程度進展したが、開口変位は 1mm 未満から拡大せず、破断には至らなかった。また、破断起点位置以外の 3 ヶ所全てのダイアフラム側溶接部においても亀裂は板厚方向に貫通するまで進展したが、開口変位は 1mm 未満で大きな進展は無く、破断には至らなかった。

破断位置は正載荷側の北東ダイアフラムで、+3 サイクル目から鋼片部分の浮きが確認できた。その後、+6 サイクル目に亀裂が発生した。なお、この初亀裂は初層側の浮き部分から進展したものではなく、ダイアフラム板厚中央付近で観察できたため、() で表記した。また+7 サイクル目には幅方向への亀裂が発生した。その後浮き部分からの亀裂も発生し、+12 サイクル目で板厚方向の亀裂が貫通し、幅方向の亀裂とつながった。その後、幅方向へ亀裂が進展し、破断前サイクルの+22 サイクル目に 78mm に達したのち+23 サイクル目で破断した。なお、+21 サイクル目にピーク荷重が 10%低下した。

表 2.7 実験経過記録 (SH-5-5)

東側フランジ（正載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1													
+2													
+3		白い線			浮き13			白い線			浮き6.5		
+4		↓			13.5						7		
+5		亀裂3.5			↓						↓		
+6		↓			亀裂3.5						亀裂(6)		
+7		↓	0.1		↓	0.3				亀裂1.5	↓	0.4	
+8	亀裂1.5	↓	↓		↓	↓	亀裂4		0.1	6	↓	↓	
+9	↓	7	0.25		4.5	↓	↓			9	↓	0.6	
+10	5		↓		5.5	0.5	9			10	4.5(7)	0.75	
+11	↓		↓			↓	↓			↓		1.0	
+12	↓		↓		亀裂2.5	貫通	12			↓	貫通	↓	
+13	11.5		↓		5					↓		↓	
+14	↓		↓		↓	↓				13.5	↓	1.65	※1
+15	25		0.5		6	↓				↓	↓	2.0	
+16					↓					25	↓	3.0	
+17					↓					31	↓	4.5	
+18					↓					37	↓	6.0	
+19					↓					45	↓	7.0	
+20					↓					53	↓	8.3	
+21					↓					65	↓	9.5	※2
+22					↓					78	↓	10.5	
+23										破断			

※1: 亀裂音発生

※2: 変形ピーク時の荷重が、最大耐力から10%以上減少

西側フランジ（負載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1													
-2					浮き10						浮12.5		
-3					↓			白い線			↓		
-4		白い線			↓						亀裂2	0.2	
-5		亀裂1			↓			↓				↓	
-6	亀裂4	↓	0.2		↓			亀裂2.5			2.8	0.3	
-7	↓	4	0.3		↓			↓			↓	↓	
-8		↓	0.4		↓			↓			↓	↓	
-9	12	↓	↓		亀裂1.5			9			↓	↓	
-10		↓	0.5		3	0.3					3.5	0.5	
-11	24	↓	↓		↓	0.75					↓	↓	
-12	↓	↓	↓		6.5	↓					4.5	↓	
-13	↓	↓	0.65		7	↓					↓	0.6	
-14	↓	↓	0.7		8.5	0.8					↓		
-15	↓	8	0.8		↓	0.9					↓		
-16	↓	↓	↓		貫通	↓					↓		
-17		↓	↓		亀裂2.5	1.0					↓		
-18	28	↓	1.0		4	↓					貫通		
-19		↓	↓		↓						↓		
-20		↓	↓		↓		亀裂9				↓		
-21		9.5	↓		↓	↓				亀裂3	↓		
-22			1.1		6	↓					↓		



(a)+6 サイクル<亀裂発生>
北東溶接部



(b)+12 サイクル<板厚貫通>
北東溶接部



(c)+21 サイクル<耐力 10%減>
北東溶接部



(d)+21 サイクル<耐力 10%減>
北東溶接部



(e)+22 サイクル<破断前のピーク>
北東溶接部



(f)+22 サイクル<幅方向亀裂 78mm>
北東溶接部



(g)+23 サイクル<破断>
東面溶接部



(h)+23 サイクル<破断>
北東溶接部

写真 2.2 実験経過状況 (SH-5-5)

SH-5-10

正載荷，負載荷ともに1サイクル目から鋼片部分に浮きを観察した．正載荷側では南側ダイアフラムで+3サイクル目に，負載荷では南側ダイアフラムで-2サイクル目に亀裂が発生した．その後，+5，-6サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通し，幅方向へ進展した．北東ダイアフラムの板厚方向において，初層側の浮き部分からではなく表層から亀裂が確認できたため，()で表記した．なお，各フランジでは数mmの亀裂は発生するものの，大きな進展は確認していない．

破断位置は正載荷側の南東ダイアフラムで，+1サイクル目から鋼片部分に浮きを確認した．+3サイクル目には亀裂が発生し，+5サイクル目で亀裂が板厚方向に貫通した．+6サイクル目には幅方向へ亀裂が進展し，破断直前のサイクルの+21サイクル目に亀裂長さは108mmに達した後に+22サイクル目で破断した．なお，+19サイクル目でピーク荷重は10%低下した．

表 2.8 実験経過記録 (SH-5-10)

東側フランジ (正載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き10						浮き9		
+2					13.5						10		
+3					亀裂2.5	0.5					↓		
+4					3.5	0.75					↓		
+5					貫通	↓					亀(2.75)		
+6					亀裂1.5	↓					1(2.75)		
+7				4	↓	0.8					1.75(5)	0.3	
+8				5	↓	↓				亀裂2.5	↓	0.5	
+9				6	↓	↓					↓		
+10				8	↓	1.0					貫通		
+11				10	↓	1.35					↓		
+12				13	↓	1.7					↓		※1
+13				15	↓	2.0					↓		
+14				20	↓	2.3					↓		
+15				27	↓	2.7	亀裂6				↓		
+16				31	↓	3.1					↓		
+17				35	↓	4.0					↓		
+18				42	↓	5.5					↓		
+19				54	↓	8.0					↓		※2
+20				94	↓	11.5					↓		
+21				108	↓	14.0					↓		
+22				破断									

※1：亀裂音発生

※2：変形ピーク時の荷重が，最大耐力から10%以上減少

西側フランジ (負載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き12.5								
-2					亀裂2	0.5							
-3					3.5	↓							
-4		亀裂2			↓	0.75		白い線					
-5	亀裂2		0.1		5	↓		亀裂2					
-6	↓		↓		貫通	0.8		↓					
-7	2.5		0.2		↓	0.9	亀裂0.8	↓					
-8				亀裂3	↓	1.0		↓					
-9				6	↓	1.2		↓					
-10				8	↓	1.4		↓					
-11				9	↓	1.5		↓					
-12				13	↓	1.65		↓					
-13				↓	↓	1.7		↓					
-14				15	↓	2.0		7					
-15				17	↓	↓							
-16				19	↓	2.1							
-17				20	↓	2.5							
-18				24	↓	↓							
-19				26	↓	2.7							
-20				27	↓	3.0							



(a)+3 サイクル<亀裂発生>
南東溶接部



(b)+5 サイクル<板厚貫通>
南東溶接部



(c)+19 サイクル<耐力 10%減>
南東溶接部



(d)-●サイクル<耐力 10%減>
南東溶接部



(e)+21 サイクル<破断前のピーク>
南東溶接部



(f)+21 サイクル<幅方向亀裂 108mm>
南東溶接部



(g)+22 サイクル<破断>
南東溶接部



(h)+22 サイクル<破断>
南東溶接部

写真 2.3 実験経過状況 (SH-5-10)

SH-5-15

正載荷，負載荷ともに1サイクル目から鋼片部分に浮きを観察し，2,3サイクル目に亀裂が発生した．その後，5,6サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通し，幅方向へと進展した．正載荷，負載荷ともに大きく亀裂進展し，亀裂長さは60mmを超えた．一方，各フランジでは数mmの亀裂は発生するものの，大きな進展は確認していない．

破断位置は正載荷側の南東ダイアフラムで，+1サイクル目から鋼片部分の浮きを確認した．+3サイクル目に板厚方向に亀裂が発生し，+5サイクル目で亀裂が板厚方向に貫通した．+6サイクル目から幅方向へ亀裂が進展し，破断直前のサイクルの+22サイクル目には101mmに達した後に+23サイクル目で破断した．なお，+19サイクル目でピーク荷重は10%低下した．

表 2.9 実験経過記録 (SH-5-15)

東側フランジ（正載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き14.5						浮き15		
+2					16						亀裂1.5		
+3					亀裂2						2		
+4					↓	0.7						0.5	
+5		亀裂2			貫通	1.0					4	0.75	
+6				亀裂5.5	↓	1.25				亀裂3	貫通	1.0	
+7				8.5	↓	1.3				↓	↓	↓	
+8				14	↓	1.4				↓	↓	↓	
+9				15	↓	1.5				4	↓	↓	
+10				↓	↓	1.8				↓	↓	↓	
+11				↓	↓	↓				6	↓	1.2	
+12	亀裂12			↓	↓	↓				↓	↓	1.3	
+13	↓			17	↓	2.0				7	↓	↓	
+14	↓			↓	↓	2.5	亀裂10			↓	↓	↓	
+15	↓			↓	↓	2.8				↓	↓	↓	
+16	22			↓	↓	3.0				9	↓	↓	
+17				23	↓	4.0					↓	↓	
+18				32	↓	5.0					↓	↓	
+19				49	↓	7.0					↓	↓	※1
+20				64	↓	9.0					↓	↓	
+21				80	↓	11.0					↓	↓	※2
+22				101	↓	↓					↓	↓	
+23				破断									

※1：変形ピーク時の荷重が，最大耐力から10%以上減少

※2：クレーター部に大きな亀裂発生

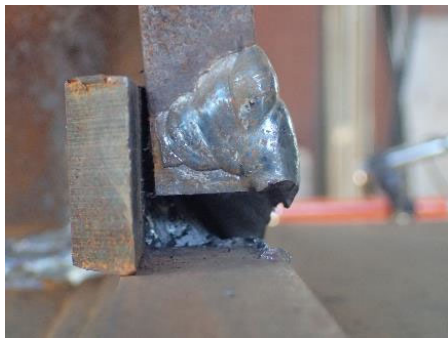
西側フランジ（負荷荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き15						浮き15		
-2					亀裂3.5						亀裂2		
-3				亀裂3	貫通	0.75					↓		0.5
-4				3.5	↓	1.0				亀裂5.5	3		0.8
-5				4	↓	1.2				↓	貫通		1.0
-6				8	↓	1.3				8	↓		1.2
-7				9.5	↓	↓				10.5	↓		
-8				↓	↓	1.5				12.5	↓		1.3
-9				12	↓	↓				14	↓		↓
-10				13.5	↓	↓				↓	↓		↓
-11				15	↓	1.7	亀裂17	亀裂3		14.5	↓		↓
-12				17	↓	2.0	↓			↓	↓		↓
-13				↓	↓	↓	24			17	↓		1.4
-14				20	↓	2.3				↓	↓		1.5
-15				↓	↓	2.5				↓	↓		↓
-16				↓	↓	↓				↓	↓		↓
-17				24	↓	3.0				↓	↓		↓
-18				27	↓	3.5				↓	↓		↓
-19				34	↓	4.5				↓	↓		↓
-20				43	↓	5.5				↓	↓		↓
-21				58	↓	6.0				↓	↓		↓
-22				65	↓	6.5				↓	↓		↓



(a)+3 サイクル<亀裂発生>
南東溶接部



(b)+5 サイクル<板厚貫通>
南東溶接部



(c)+19 サイクル<耐力 10%減>
南東溶接部



(d)+19 サイクル<耐力 10%減>
東面溶接部



(e)+21 サイクル<※2 クレーター亀裂>
東面溶接部



(f)+23 サイクル<破断>
東面溶接部

写真 2.4 実験経過状況 (SH-5-15)

SH-5-19

正載荷，負載荷ともに1サイクル目から鋼片部分に浮きを観察した．2サイクル目に亀裂が発生し，同時にその亀裂が板厚方向に貫通した．正負両側で幅方向へ亀裂が大きく進展し，亀裂長さは140mm程度に達した．この時のピーク荷重は最大耐力の半分以下となった．また，4ヶ所ある全てのフランジにおいて亀裂は観察できなかった．

破断位置は正載荷側の北東ダイアフラムで，+1サイクル目に鋼片部分の浮きを確認した．+2サイクル目に亀裂が発生すると同時に亀裂が板厚方向に貫通した．+2サイクル目から幅方向へ亀裂が進展し，破断直前のサイクルの+19サイクル目には148mmに達した後に+20サイクル目で全幅に渡って破断した．なお，破断とは反対側の-15サイクル目でピーク荷重は10%低下した．

表 2.10 実験経過記録 (SH-5-19)

東側フランジ (正載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き17					浮き17			
+2					↓					亀裂2.5	貫通	1.0	
+3					亀裂1	0.5				3	↓	1.2	
+4					2	↓				12	↓	↓	
+5					亀裂3	貫通				↓	↓	1.3	
+6					6	↓				↓	↓	↓	
+7					15	↓				↓	↓	1.6	
+8					16	↓				14	↓	1.7	
+9					↓	1.2				16	↓	1.9	
+10					↓					↓	↓	2.0	
+11					↓					18.5	↓	2.3	
+12					↓					↓	↓	2.6	
+13					↓					25	↓	3.0	
+14					↓					30	↓	4.1	
+15					↓					44	↓	6.0	
+16					↓					64	↓	8.0	
+17					↓					105	↓	11.0	
+18					↓					117	↓	15.0	
+19					↓					148	↓	16.0	
+20					↓					破断			

西側フランジ (負載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き18					亀裂6	貫通	1.0	
-2					亀裂8	貫通				12	↓	1.2	
-3					13	↓				16	↓	1.3	
-4					15	↓				↓	↓	↓	
-5					↓	↓				17.5	↓	1.4	
-6					↓	↓				↓	↓	↓	
-7					16	↓				20	↓	1.5	
-8					↓	↓				↓	↓	↓	
-9					17	↓				↓	↓	↓	
-10					19	↓				21	↓	1.9	
-11					↓	↓					↓		
-12					22	↓					↓		
-13					30	↓					↓		
-14					37	↓					↓		
-15					54	↓					↓		※1
-16					85	↓					↓		
-17					104	↓					↓		
-18					125	↓					↓		
-19					141	↓					↓		

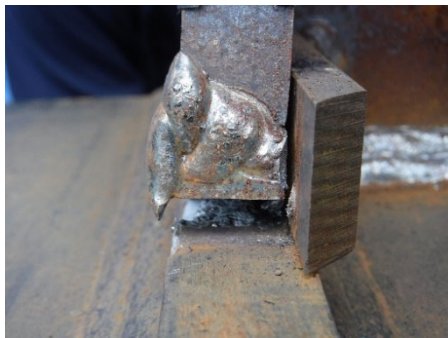
※1：変形ピーク時の荷重が，最大耐力から10%以上減少



(a)+1 サイクル<鋼片部浮き>
北東溶接部



(b)+2 サイクル<板厚貫通>
北東溶接部



(c)-15 サイクル<耐力 10%減>
南西溶接部



(d)-15 サイクル<耐力 10%減>
南西溶接部



(e)+19 サイクル<幅方向亀裂 148mm>
東面溶接部



(f)-19 サイクル<幅方向亀裂 141mm>
西面溶接部



(g)+20 サイクル<破断>
北東フィレット部



(h)+20 サイクル<破断>
東面溶接部

写真 2.5 実験経過状況 (SH-5-19)

SH-15-5

正載荷，負載荷ともに1~4サイクル目に浮きを観察した．正載荷側の南東ダイアフラムの板厚方向において，初層側の浮き部分からではなく表層部から亀裂を確認したため，この亀裂を（）で表記した．破断位置以外では，10サイクル前後で亀裂が板厚方向に貫通したが，その後，幅方向への進展は数 mm 程度で停止した．

破断位置は正載荷側の北東ダイアフラムで，+2 サイクル目に鋼片部分に浮きを確認した．+4 サイクル目に亀裂が発生し，+6 サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通した．幅方向へ亀裂が進展し，破断直前のサイクルの+10 サイクル目で 147mm に達した後に+15 サイクル目で全幅に渡って破断した．なお，+11 サイクル目にピーク荷重は 10%低下した．

表 2.11 実験経過記録 (SH-15-5)

東側フランジ（正載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1													
+2											浮き10.5		
+3											↓		
+4		亀裂3		亀裂2	浮き10 亀裂(6)						亀裂4.5	0.6	
+5				↓	↓						7	0.75	
+6				↓	↓					亀裂5	貫通	1.25	
+7				↓	3(6)					10	↓	2.5	
+8				5						20	↓	3.0	
+9										26	↓	3.5	
+10										34	↓	5.0	
+11										47	↓	7.5	※1
+12										97	↓	11	
+13										130	↓	14	
+14	亀裂25									147	↓	16	
+15										破断			

※1：変形ピーク時の荷重が，最大耐力から10%以上減少

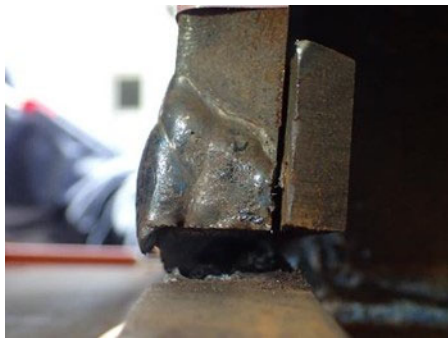
西側フランジ（負載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き6						浮き7		
-2					↓						↓		
-3		亀裂3			↓						11		
-4	亀裂2				亀裂1						亀裂4		
-5	↓				↓						↓		
-6	↓		0.3		3	0.3		亀裂4			↓		
-7	↓		0.5		5	↓					6	0.3	
-8	4		↓		8	↓					11	0.5	
-9	7		↓		10	0.5					貫通	1.0	
-10	↓		↓		↓	0.75					↓	↓	
-11	↓		0.7		↓	↓					↓	3.5	
-12	24				↓	↓					↓		
-13					貫通	1.5					↓		
-14					亀裂6	↓					↓		



(a)+4 サイクル<亀裂発生>
北東溶接部



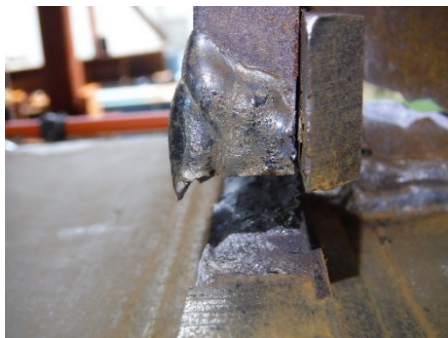
(b)+6 サイクル<板厚貫通>
北東溶接部



(c)+11 サイクル<耐力 10%減>
北東溶接部



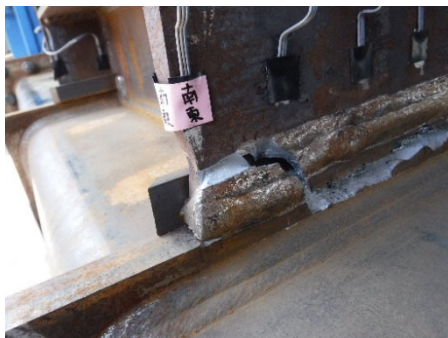
(d)+11 サイクル<耐力 10%減>
北東溶接部



(e)+14 サイクル<破断前のピーク>
北東溶接部



(f)+14 サイクル<幅方向亀裂 147mm>
北東溶接部



(g)+15 サイクル<破断>
南東溶接部



(h)+15 サイクル<破断>
東面溶接部

写真 2.6 実験経過状況 (SH-15-5)

FH-0-0

正載荷北側を除いた、3ヶ所の各フランジでは3サイクル目に白い線が発生し、4、5サイクル目に亀裂が発生した。正載荷南側フランジの板厚方向において、表層だけでなく板厚中心付近からも亀裂が確認したので、この亀裂を（）で表記した。正載荷北側フランジでは、10サイクル目に亀裂が発生したが、その後、大きな進展は確認していない。一方、ダイアフラム側は正載荷南側において+11サイクル目に亀裂が発生し、その後、最大亀裂長さ6mmまで進展したが、開口は計測できないほど微小であった。

破断位置は負載荷側の南西フランジで-3サイクル目に白い線が発生した。-5サイクル目には亀裂が発生し、-9サイクル目にはフィレット部に亀裂が発生した。-10サイクル目に板厚中央付近から亀裂が確認でき、この亀裂を（）で表記した。この中央亀裂と端部亀裂が繋がり、-14サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通し、幅方向へ亀裂が進展した。同時にフィレット部の亀裂の進展が進み、-18サイクル目にはこの亀裂が板厚方向に貫通した。幅方向へ亀裂が進展し、破断直前のサイクルの-19サイクル目に25mmを記録したのち-20サイクル目で全幅に渡って破断した。

表 2.12 実験経過記録 (FH-0-0)

東側フランジ (正載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1													
+2													
+3		白い線											
+4		亀裂6(2)						白い線					
+5		↓						↓					
+6		7.5(7)						↓					
+7		↓	0.1					↓					
+8		↓	↓					↓					
+9		↓	0.2					↓					
+10	亀裂2	↓	↓					亀裂2.5					
+11	↓	↓	0.4	亀裂3									
+12	4	↓	0.5	↓									
+13	↓	↓	↓	5									
+14	↓	貫通	0.65	↓			亀裂1						
+15	↓	↓	0.75	↓									
+16	7	↓	1.0	↓									
+17		↓	1.1	↓									
+18		↓	1.2	6									
+19		↓	1.5										
+20		↓	↓										

西側フランジ (負載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1													
-2													
-3		白い線						白い線					
-4		↓						↓					
-5		亀裂2.5						亀裂2					
-6		↓	0.1					↓					
-7		3	↓					4					
-8		7	↓					5.5					
-9		↓	0.2					7					※1
-10		(5.5)	0.3										
-11		↓	↓										
-12		↓	0.5							亀裂2.5			
-13		↓	0.7										
-14	亀裂2.5	貫通	1.0										
-15	↓	↓	↓										
-16	↓	↓	1.2										
-17	↓	↓	1.8										
-18	7	↓	2.5										※2
-19	25	↓	3.0										
-20	破断												

※1：フィレット部に亀裂発生

※2：フィレット部の亀裂貫通



(a)－5 サイクル<亀裂発生>
南西溶接部



(b)－14 サイクル<板厚貫通>
南西溶接部



(c)－13 サイクル<フィレット部亀裂>
北西フィレット部



(d)－18 サイクル<フィレット部亀裂貫通>
北西フィレット部



(e)－19 サイクル<破断前のピーク>
南西溶接部



(f)－19 サイクル<幅方向亀裂 25mm>
南西溶接部



(g)－20 サイクル<破断>
南西溶接部



(h)－20 サイクル<破断>
西面溶接部

写真 2.7 実験経過状況 (FH-0-0)

FH-5-5

正載荷，負載荷ともに1，2サイクル目に鋼片の浮きを確認し，3，4サイクル目にダイアフラム側で亀裂が発生した．そのまま板厚方向および幅方向へ亀裂は進展し，正載荷南側以外の3ヶ所では板厚方向への貫通までは至らなかった．正載荷南側では+11サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通し，幅方向へ最大25.5mmまで亀裂が進展するものの破断には至らなかった．

破断位置は負載荷側の南西フランジで，-3サイクル目に亀裂が発生した．この板厚方向の亀裂進展において，表層部だけでなく板厚中心付近からも亀裂が確認できたので，この亀裂を()で表記した．-11サイクル目には幅方向へ亀裂が進展し，-15サイクル目には，亀裂が板厚方向に貫通した．その後，幅方向へ亀裂が進展し，破断直前のサイクルの-21サイクル目に90mmに達した後に-22サイクル目で破断した．なお，-21サイクル目にピーク荷重は10%低下した．

表 2.13 実験経過記録 (FH-5-5)

東側フランジ (正載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き5								
+2					↓						浮き5		
+3					亀裂1	0.2					↓		
+4					1.8	0.3		白い線			亀裂1.5	0.1	
+5					3	0.5					↓	↓	
+6					5(3)	0.7					↓	↓	
+7					8.5	1.0					3	↓	
+8					9.5	1.1					↓	↓	
+9					10	1.2					4.5	0.2	
+10					貫通	1.3					↓	↓	
+11					亀裂1	↓					6	0.3	
+12					↓	↓					8.5		
+13					↓	↓							
+14					4	↓							
+15					↓	↓							
+16					7	↓							
+17					12	↓							
+18					14	↓							
+19					15	↓							
+20					19	↓							
+21					24	↓							
+22					25.5	↓							

西側フランジ (負載荷時に引張を受ける側)													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1											浮き		
-2											↓		
-3		亀裂1			亀裂1						亀裂1		
-4		↓			↓			白い線			↓		
-5		↓			↓			↓			2	0.2	
-6		2			↓			亀裂4			↓	↓	
-7		2(4)			↓			4(2.5)			↓	↓	
-8		7	0.3		↓			↓			↓	↓	
-9		↓	0.4		↓			↓			↓	↓	※1
-10		↓			↓	0.2		5			↓	↓	
-11	亀裂1	↓	↓		↓	↓					↓	↓	
-12	↓	↓	↓		↓	↓					3.5	↓	※2
-13	↓	8(7)	↓		3	0.5					↓	↓	
-14	↓	↓	↓		↓	↓					5	↓	
-15	↓	貫通	0.5		↓	↓					↓	↓	
-16	2	↓	↓		↓	↓					10	0.5	
-17	3	↓	↓		↓	↓							
-18	3.5	↓	↓		↓	↓							
-19	4	↓	1.5		↓	↓							
-20	35	↓	8.0		↓	↓							※3
-21	90	↓	11.0		↓	↓							
-22	破断												

※1：フィレット部に亀裂発生

※2：フィレット部の亀裂進展

※3：変形ピーク時の荷重が，最大耐力から10%以上減少



(a)－3 サイクル<亀裂発生>
南西溶接部



(b)－15 サイクル<板厚貫通>
南西溶接部

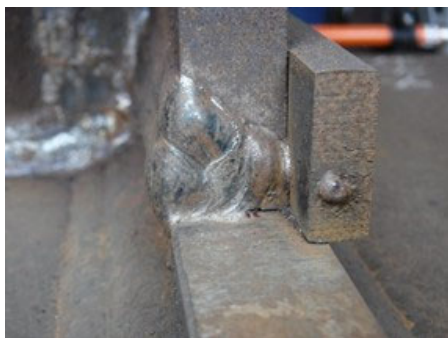


(c)－20 サイクル<耐力 10%減>
南西溶接部



(d)－22 サイクル<破断>
南西溶接部

写真 2.8 実験経過状況 (FH-5-5 のフランジ側の亀裂進展)



(a)+3 サイクル<亀裂発生>
南東溶接部



(b)+10 サイクル<板厚貫通>
南東溶接部



(c)+11 サイクル<D 側幅方向に進展>
南東溶接部



(d)+22 サイクル<幅方向亀裂 25.5mm>
南東溶接部

写真 2.9 実験経過状況 (FH-5-5 のダイヤフラム側の亀裂進展)

FH-5-10

鋼片挿入部の4ヶ所において、正載荷、負載荷ともに1サイクル目に鋼片の浮きを確認し、2, 3サイクル目には欠陥部分からダイアフラム側へ亀裂が発生した。正載荷、負載荷ともに南側では亀裂が板厚方向に貫通した後、幅方向へ大きく亀裂が進展したが、北側では貫通後の亀裂進展はあまりなく、大きく進展していない。

破断位置は正載荷側の南東ダイアフラムで、+2サイクル目に亀裂が発生した。その後、+7サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通し、幅方向へ亀裂が進展した。破断直前のサイクルの+18サイクル目に85mmに達したのち、+19サイクル目で破断した。なお、-17サイクル目にピーク荷重は10%低下した。

表 2.14 実験経過記録 (FH-5-10)

東側フランジ（正載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き						浮き		
+2					亀裂1	0.3					↓		
+3					1.8	0.7					亀裂0.5		
+4					4	1.0					↓		
+5					7	1.2					↓		
+6					8	↓					2	0.5	
+7					貫通	1.4					↓	↓	
+8					亀裂2	↓					↓	↓	※1
+9					6	↓					↓	↓	
+10					10	↓					↓	↓	※2
+11					15	↓					5	1.0	
+12					↓	↓					↓		
+13					19	↓					7		
+14					22	↓							
+15					25	↓							
+16					29	↓							
+17					47	↓							※3
+18					85	↓							※4
+19					破断								

※1：南側フィレット部に亀裂発生

※2：北側フィレット部に亀裂発生

※3：破断音発生 変形ピーク時の荷重が、最大耐力から10%以上減少

※4：破断音発生

西側フランジ（負載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き						浮き		
-2		白い線			亀裂1						亀裂1		
-3		↓			↓	0.6					↓		
-4		↓			1.4	0.8					↓		
-5		↓			↓	1.0					↓		
-6		亀裂3			1.5	1.2					1.4	1.0	
-7					3	1.4					↓		
-8					6.5	1.5					貫通		
-9					7	↓					↓		
-10					亀裂1.5	貫通	1.8				↓		
-11					4	↓	2.0				白い線	↓	
-12					↓	↓	↓				↓		
-13					7	↓	2.2				↓		
-14					13	↓	2.5				↓		
-15					20	↓	3.0				↓		
-16					27	↓	4.5				↓		
-17					43	↓	7.5				↓		
-18					↓	↓	↓				↓		



(a)+2 サイクル<亀裂発生>
南東溶接部



(b)+7 サイクル<板厚貫通>
南東溶接部



(c)+17 サイクル<耐力 10%減>
南東溶接部



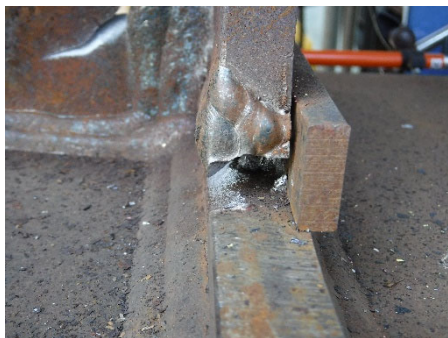
(d)+17 サイクル<耐力 10%減>
南東溶接部



(e)+18 サイクル<破断前のピーク>
南東フィレット部



(f)+18 サイクル<幅方向亀裂 85mm>
南東溶接部



(g)+19 サイクル<破断>
南東溶接部



(h)+19 サイクル<破断>
南東溶接部

写真 2.10 実験経過状況 (FH-5-10)

FH-5-15

鋼片挿入部の4ヶ所において、正載荷、負載荷ともに1サイクル目に鋼片の浮きを確認し、2サイクル目には欠陥部分からダイアフラム側へ亀裂が発生した。正載荷、負載荷ともに南側では亀裂が板厚方向に貫通した後、幅方向へ大きく亀裂が進展したが、北側では貫通後の進展はあまりなく、大きく進展していない。

破断位置は正載荷側の南東ダイアフラムで+2サイクル目に亀裂が発生した。その後、+4サイクル目で亀裂が板厚方向に貫通し、破断直前のサイクルの+12サイクル目で幅方向へ34mm亀裂が進展した。最終的には+13サイクル目にフィレット部を起点としてフランジが全幅に渡って破断した。

表 2.15 実験経過記録 (FH-5-15)

東側フランジ（正載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き						浮き		
+2					亀裂1	0.2					亀裂1	0.1	
+3					3	0.5					2	0.5	
+4				亀裂4.5	貫通	1.0					3		※1
+5				7	↓	1.2					3.5		
+6				11	↓	1.3					4.5		
+7				12.5	↓	1.5					貫通		
+8				13.5	↓	2.0					↓		
+9				↓	↓	2.3					↓		
+10				18.5	↓	2.7					↓		
+11				23	↓	3.5					↓		
+12				34	↓	4.5					↓		
+13				破断							↓		

※1：南側フィレット部に亀裂発生

西側フランジ（負載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き						浮き		
-2					亀裂1.5	0.5					亀裂1.5	貫通	0.5
-3					3	1.0					3.5	↓	↓
-4					貫通	1.2					9	↓	↓
-5					亀裂3.5	↓					12	↓	↓
-6					5	↓	1.5				13	↓	↓
-7					9	↓	↓				↓	↓	
-8					10.5	↓	1.8				↓	↓	1.2
-9					12.5	↓	2.0				↓	↓	
-10					14	↓	2.5				↓	↓	
-11					17.5	↓	3.0				↓	↓	※2
-12					24	↓	4.0				↓	↓	

※2：南側フィレット部に亀裂発生



(a)+2 サイクル<亀裂発生>
南東溶接部



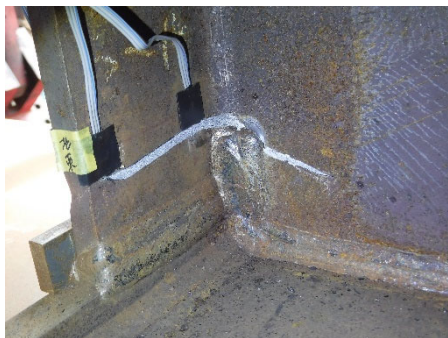
(b)+4 サイクル<板厚貫通>
南東溶接部



(c)+12 サイクル<破断前のピーク>
南東溶接部



(d)+12 サイクル<幅方向亀裂 34mm>
南東溶接部



(e)+13 サイクル<破断>
北東フィレット部



(f)+13 サイクル<破断>
南東フィレット部



(g)+13 サイクル<破断>
東面溶接部



(h)+13 サイクル<破断>
南東溶接部

写真 2.11 実験経過状況 (FH-5-15)

FH-5-19

正載荷，負載荷ともに1サイクル目に鋼片の浮きを確認し，2サイクル目に南側では余盛部分に亀裂が発生して板厚方向に貫通した．その後，幅方向へ大きく亀裂が進展した．北側についても，亀裂発生および板厚方向へ貫通したが，大きくは進展していない．

最終破断は負載荷側の南西ダイアフラムで，-2サイクル目に亀裂が発生し，同時に板厚方向に貫通した．その後，幅方向へ亀裂が進展して破断直前のサイクルの-12サイクル目に83mmに達した後に，-13サイクル目で破断した．また，破断時のサイクルにおいて変形0付近で破断音とともに荷重が低下したが，破断が全断面に渡らなかったため，そのまま押し切って全断面破断させた．なお，-11サイクル目にピーク荷重は10%低下した．

表 2.16 実験経過記録 (FH-5-19)

東側フランジ（正載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き						浮き		
+2				亀裂3	貫通						↓		
+3				5.5	↓	0.8					亀裂1		
+4				8	↓	1.0					2		
+5				9	↓	↓					3		
+6				11	↓	1.5					↓		
+7				13	↓	1.8				亀裂3	貫通	0.5	
+8				14	↓	↓				6	↓	↓	
+9				16	↓	↓				↓	↓	↓	
+10					↓	↓				↓	↓	↓	
+11					↓	2.0				8	↓	0.75	
+12					↓	↓				↓	↓		
+13					↓	↓				10	↓		

西側フランジ（負載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き						亀裂		
-2				亀裂5	貫通	0.25						0.5	
-3				↓	↓	↓				亀裂3			
-4				8	↓	1.0				7.5			
-5				11	↓	1.5				9			
-6				12.5	↓	1.8				10			
-7				15	↓	2.0				11			
-8				18	↓	2.2				12			
-9				25	↓	3.0							
-10				33	↓	5.0							
-11				62	↓	8.0							※1
-12				83	↓	12.0							
-13				破断									

※1：変形ピーク時の荷重が，最大耐力から10%以上減少



(a)－1 サイクル<鋼片部浮き>
南西溶接部



(b)－2 サイクル<板厚貫通>
南西溶接部



(c)－11 サイクル<耐力 10%減>
南西溶接部



(d)－11 サイクル<耐力 10%減>
南西溶接部



(e)－13 サイクル<破断前のピーク>
南西フィレット部



(f)－12 サイクル<幅方向亀裂 83mm>
南西溶接部



(g)－13 サイクル<破断>
南西溶接部



(h)－13 サイクル<破断>
北西溶接部

写真 2.12 実験経過状況 (FH-5-19)

FH-15-5

鋼片挿入部の4ヶ所において、正載荷、負載荷ともに1サイクル目に鋼片の浮きを確認し、2サイクル目には欠陥部分からダイアフラム側への亀裂が発生した。正載荷南側では、亀裂が板厚方向に貫通した後、幅方向に大きく進展したが、その他の位置では進展はあまり見られなかった。正載荷北側で板厚方向に10mm、負載荷南側で板厚方向に3mmの進展で留まり、亀裂が板厚方向の貫通までは至らなかった。また、負載荷側ではフィレット部に亀裂が大きく発生した。

破断位置は正載荷側の南東ダイアフラムで、+2サイクル目に亀裂が発生した。その後、+7サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通し、幅方向へ亀裂が進展して破断直前のサイクルの+15サイクル目で42mmに達した後に、+16サイクル目で破断した。また、破断時のサイクルにて破断音とともに荷重が低下したが、破断面が全断面に渡っていなかったため、そのまま押し切って全断面に渡って破断させた。

表 2.17 実験経過記録 (FH-15-5)

東側フランジ（正載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
+1					浮き						浮き		
+2					亀裂2						亀裂1.5		
+3					2.5	0.25					2.5	0.25	
+4					4	0.5					3	↓	
+5		亀裂2			5.5	0.75					4	0.5	
+6		4			8	1.0					5		
+7					貫通	↓					↓		
+8					↓	1.25					10		
+9				亀裂3	↓	1.75							
+10				8	↓	2.0							
+11				13	↓	2.5							
+12				21	↓	3.5							
+13				30	↓	4.0							
+14				40	↓	5.1							
+15				42	↓	8.0							
+16				破断									

西側フランジ（負載荷時に引張を受ける側）													
N	南側フランジ			南側ダイアフラム			北側フランジ			北側ダイアフラム			備考
	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	幅方向 [mm]	板厚方向 [mm]	開口変位 [mm]	
-1					浮き						浮き		
-2					亀裂0.5						亀裂1		
-3					1						2.5		
-4					↓						4.5	0.5	
-5		亀裂3			2	0.5					↓	↓	
-6					↓						5	↓	
-7					↓						6	↓	
-8					3						↓	↓	※1
-9	亀裂1										6.5	0.75	
-10											7		
-11											7.5		
-12											11.5		※2
-13											貫通		※3
-14										亀裂1	↓		
-15										1.5	↓		

※1：北側フィレット部に亀裂発生

※2：南側フィレット部に亀裂発生

※3：フィレット部の亀裂貫通



(a)+2 サイクル<亀裂発生>
南東溶接部



(b)+7 サイクル<板厚貫通>
南東溶接部



(c)+15 サイクル<破断前のピーク>
南東溶接部



(d)+15 サイクル<幅方向亀裂 42mm>
南東溶接部



(e)+16 サイクル<破断>
北東溶接部



(f)+16 サイクル<破断>
南東溶接部



(g)+16 サイクル<破断>
東面溶接部



(h)+16 サイクル<破断>
南東フィレット部

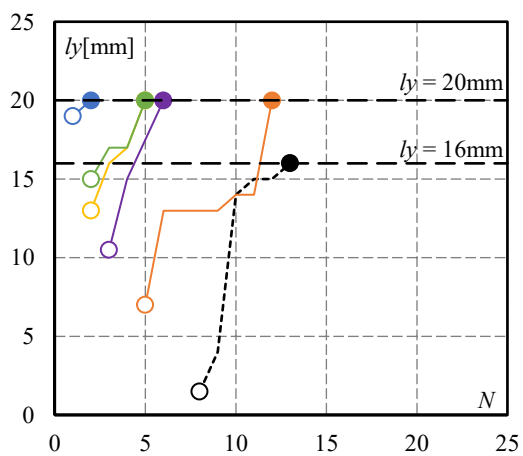
写真 2.13 実験経過状況 (FH-15-5)

5) 亀裂進展状況

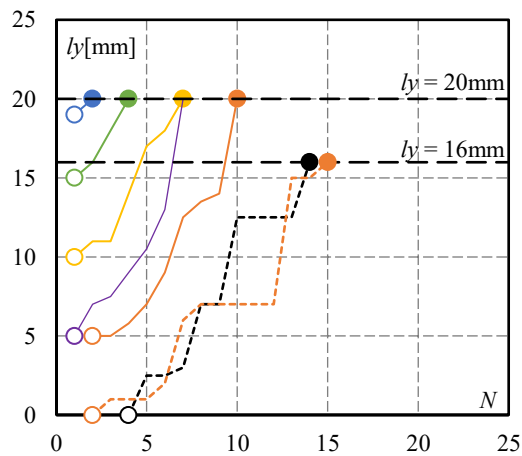
フランジ端部の溶接部に対して、サイクル毎に目視で亀裂を確認し、定規で亀裂長さを計測した。各試験体の亀裂進展状況を図 2.18 に、亀裂寸法の計測位置を図 2.19 に示す。図中の l_x および l_y は、それぞれ、最終層側のフランジの幅方向の亀裂長さおよびフランジ幅両端部における溶接始末端部でのフランジの板厚方向の亀裂長さ（欠陥高さを含む値）を表し、 N はサイクル数を表す。 l_y のグラフ内の○（白抜き）は亀裂発生時を示し、●（塗り潰し）は亀裂の板厚貫通時を示す。板厚貫通時の l_y は、無欠陥の場合ではフランジ厚 16mm とし、欠陥有りの場合ではダイアフラムまでの高さ 19mm に余盛 1mm を加えた 20mm とする。なお、図中の値は、4 か所ある溶接始末端のうち、破壊を支配した亀裂に関するものである。ただし、欠陥を有する試験体の中で欠陥より破壊していない FH-5-5 については、欠陥を作成しているダイアフラム側の亀裂で最も進展した位置の結果も併せて示している。また、破断した試験体の l_x については、破断から 1 サイクル前までの記録を示す。

フランジの板厚方向の亀裂進展に関しては、ダイアフラム側およびフランジ側でそれぞれ同じ側に発生した試験体の挙動は概ね同様の傾向である。ただし、SH-5-5 は、同じダイアフラム側から亀裂進展した試験体と挙動が若干異なる。これは、フランジでも亀裂が進展し、応力伝達が阻害されたことが一因であると考えられる。板厚貫通するまでに要するサイクル数は欠陥高さが大きいほど早く、欠陥高さ 10mm 以上の高さ方向に大きい欠陥を有する試験体では、無欠陥試験体の半分以下のサイクル数となっている。また、欠陥長さの影響よりも欠陥高さの影響が大きい。

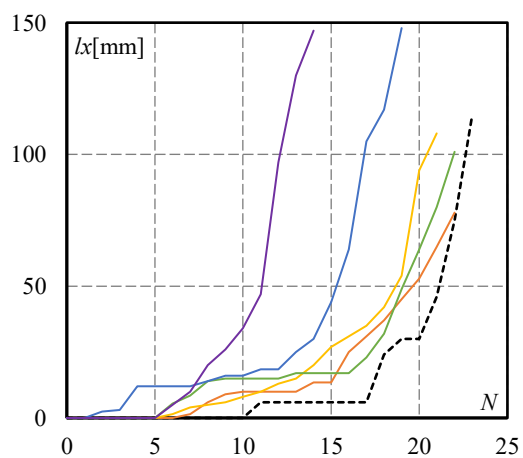
フランジの幅方向の亀裂進展に関しては、SH シリーズでは 100mm 程度、FH シリーズでは 30~70mm 程度延性的に進展し、破断時における欠陥寸法を要因とした大幅なサイクル数の低下は見られない。これは、本実験の材料の破壊靱性が高いことに起因していると考えられる。ダイアフラムにおいてはシャルピー吸収エネルギー E_0 が 200J と特に大きい。ダイアフラム内の延性亀裂が十分に進展し、脆性破断が生じにくい状況であったと考えられる。



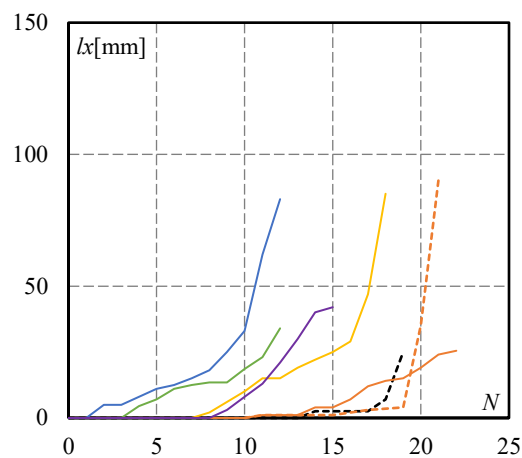
(a)SH シリーズ (フランジの板厚方向)



(b)FH シリーズ (フランジの板厚方向)



(c)SH シリーズ (フランジの幅方向)



(d)FH シリーズ (フランジの幅方向)

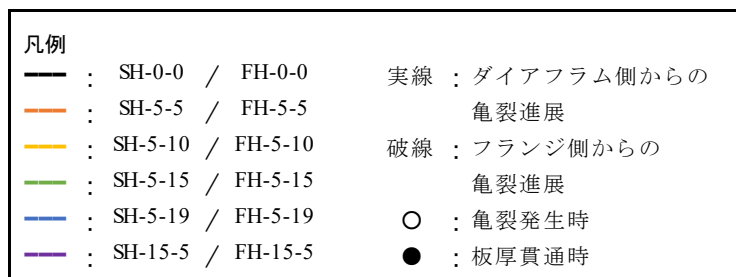
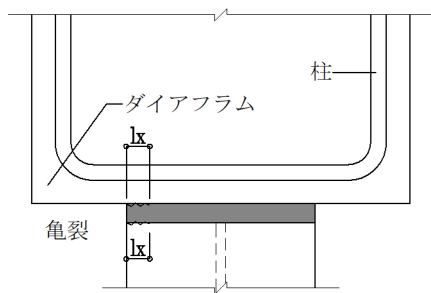
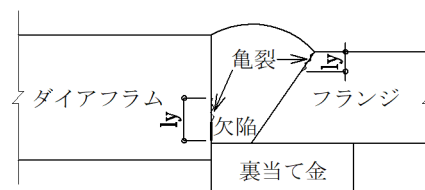


図 2.18 亀裂進展状況



(a)フランジの幅方向



(b)フランジの板厚方向

図 2.19 亀裂寸法計測位置

6) 塑性変形能力

各試験体の累積塑性変形倍率 η を図 2.20 に示す。各試験体の棒グラフは、亀裂発生、板厚貫通および終局に至るまでで分割して示している。いずれの試験体でも破断の起点となった位置の記録（無欠陥試験体と FH-5-5 はフランジ側、その他の欠陥を有する試験体はダイアフラム側）を示しているが、FH-5-5 のみ破断起点では無いダイアフラム側での板厚貫通時点の η についても併せて追記する。

亀裂発生および板厚貫通に注目すると、両シリーズともに、高さ 15mm 以上の欠陥を有する試験体の η は、無欠陥試験体の η の 1/3 以下となっている。高さ 5mm で長さ 15mm の欠陥を有する試験体については、無欠陥試験体の約半分となっている。SH シリーズと FH シリーズを比較する。一般に現場溶接形式の欠陥は、工場溶接形式の欠陥に比べて塑性変形能力を低下させることが知られている^{2.5)~2.7)}。本実験では、亀裂発生時については FH シリーズの η の方が小さいが、板厚貫通時には必ずしも FH シリーズの η の方が小さい結果とはなっていない。

板厚貫通から終局までの η に注目すると、欠陥寸法による相関は見られず、両シリーズとも概ね FH シリーズの方が SH シリーズよりも小さい。高さ 15mm で長さ 5mm の欠陥を有する試験体の η については、FH シリーズ > SH シリーズとなっているが、これは後述する実欠陥寸法の違いが要因であると考えられる。

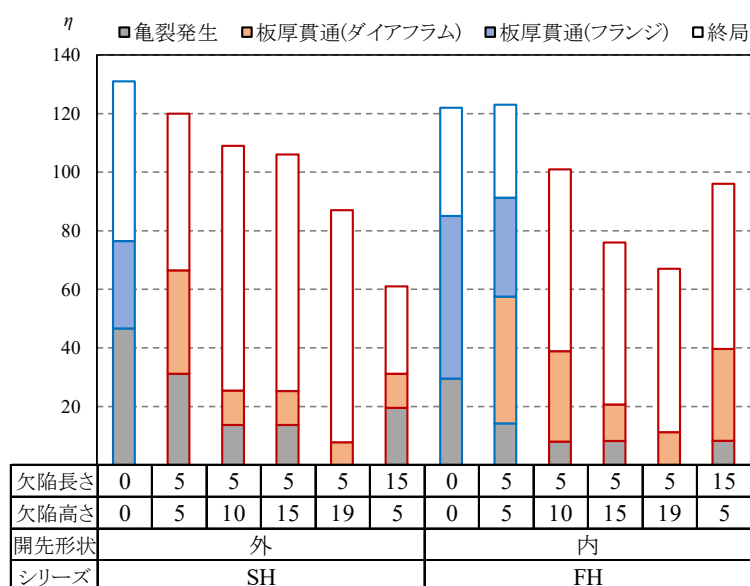


図 2.20 累積塑性変形倍率

7) 欠陥寸法の実測値

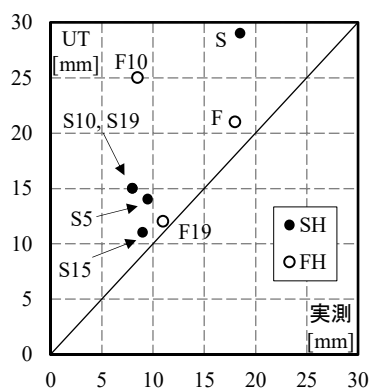
実験後の試験体の破断面を観察することで、欠陥長さおよび欠陥高さの実測寸法を計測した。各試験体の欠陥寸法の実測値と事前に実施した UT 法および PAUT 法による欠陥寸法を表 2.18 に示す。FH-5-5 と FH-5-15 については、最終破断状況から作成した欠陥を観察出来なかったため実測寸法を掲載していない。

UT 法および PAUT 法による計測結果と実測寸法の比較を図 2.21 に示す。欠陥長さの評価については、図 2.21 (a), (b)より UT 法および PAUT 法ともに検査結果が実欠陥寸法よりも全体的に大きめに評価しているものの、欠陥の実寸法を概ね良好にとらえていることがわかる。図 2.21 (c)の PAUT 法の検査により、UT 法の検査では測定が困難な欠陥高さを良好に測定できることが分かる。

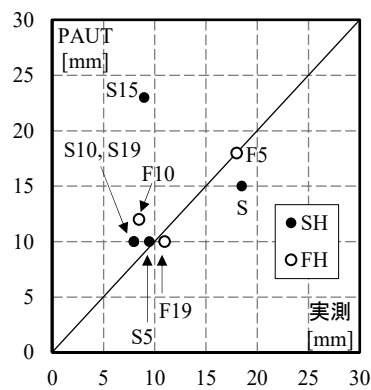
各試験体の破断面における欠陥部の写真を写真 2.14～写真 2.21 に示す。

表 2.18 欠陥寸法

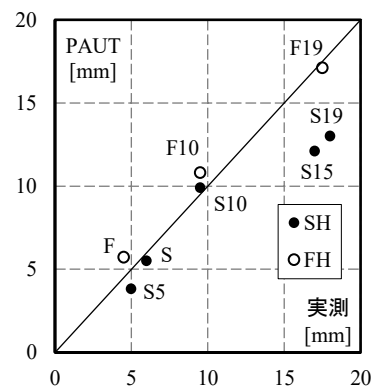
シリーズ	試験体名	略称	実測寸法		PAUT法		UT法
			長さ[mm]	高さ[mm]	長さ[mm]	高さ[mm]	長さ[mm]
SH	SH-5-5	S5	9.5	5.0	10.0	3.8	14.0
	SH-5-10	S10	8.0	9.5	10.0	9.9	15.0
	SH-5-15	S15	9.0	17.0	23.0	12.1	11.0
	SH-5-19	S19	8.0	18.0	10.0	13.0	15.0
	SH-15-5	S	18.5	6.0	15.0	5.5	29.0
FH	FH-5-5	F5	—	—	10.0	5.2	11.0
	FH-5-10	F10	8.5	9.5	12.0	10.8	25.0
	FH-5-15	F15	—	—	15.0	16.0	16.0
	FH-5-19	F19	11.0	17.5	10.0	17.1	12.0
	FH-15-5	F	18.0	4.5	18.0	5.7	21.0



(a)欠陥長さの比較
(UT 法と実測)



(b)欠陥長さの比較
(PAUT 法と実測)



(c)欠陥高さの比較
(欠陥長さ)

図 2.21 UT, PAUT 検査と実測寸法の比較

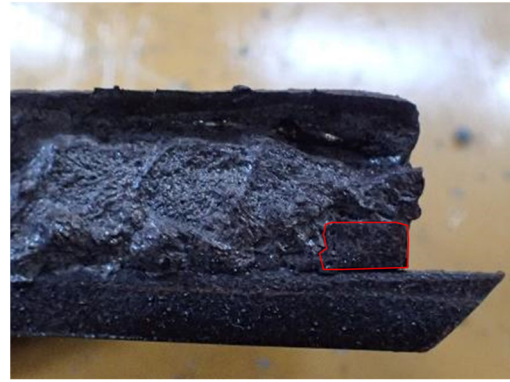
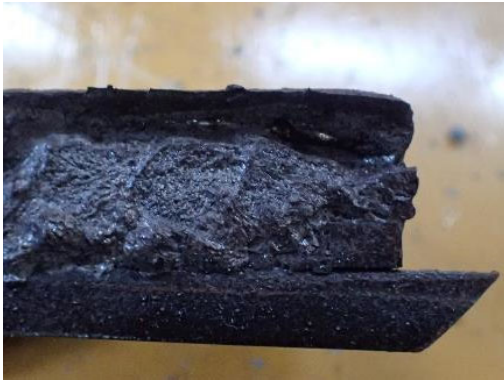


写真 2. 14 SH-5-5 (北東ダイアフラム)



写真 2. 15 SH-5-10 (南東ダイアフラム)



写真 2. 16 SH-5-15 (南東ダイアフラム)



写真 2. 17 SH-5-19 (北東ダイアフラム)

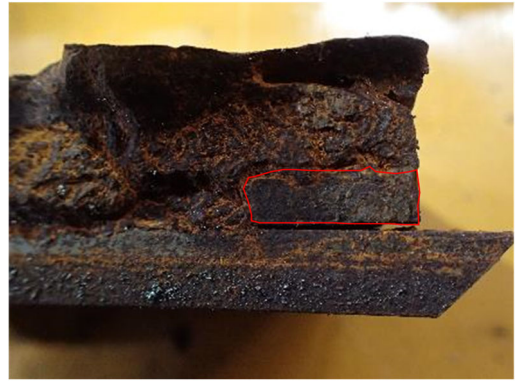


写真 2. 18 SH-15-5 (北東ダイヤフラム)



写真 2. 19 FH-5-10 (南東ダイヤフラム)



写真 2. 20 FH-5-19 (南西ダイヤフラム)



写真 2. 21 FH-15-5 (南東ダイヤフラム)

2.3 実大載荷実験Ⅱ

2.3.1 実験方法

1) 試験体形状

試験体の形状および寸法を図 2.22 に示す。試験体は角形鋼管柱に H 形断面梁を通しダイアフラム形式により溶接接合した T 字形試験体である。柱は冷間ロール成形角形鋼管（□-550x550x25（BCP325）），梁は H 形鋼（RH-800x300x16x28（SN490B）），通しダイアフラムは PL-36x610x610（SN490C）を用いている。実験Ⅰの約 1.6 倍の寸法比とした。

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の発生を抑制している。

試験体一覧を表 2.19 に示す。実験因子は、開先形状、欠陥長さおよび欠陥高さである。開先形状は図 2.23 および図 2.24 に示す通り、工場溶接を想定した外開先および現場溶接を想定した内開先の 2 種類であり、上下フランジとも同一の開先形状としている。

欠陥寸法についても実験Ⅰの約 1.6 倍とした。無欠陥、端部欠陥あり（欠陥長さ[mm]×欠陥高さ[mm]：8×8，8×16，8×24，8×31，24×8）の 6 体を 1 シリーズとして計 12 体を製作した。なお、フランジ厚 28mm に対して通しダイアフラムは板厚心合せで 2 サイズアップの PL-36 を使用しており、溶接初層部からダイアフラムの天端までは 32mm となり、欠陥高さ 31mm は貫通欠陥に相当する。

1 試験体あたり 4 ヶ所（フランジ端溶接部の始末端部かつ上下フランジ）に溶接欠陥を設けた。溶接欠陥は、図 2.25 に示すように 5mm 厚の鋼片（図中に灰色で示す）をあらかじめダイアフラムとフランジ間の溶接部に設置した状態で本溶接を行うことで、ダイアフラムと鋼片のメタルタッチ部に溶込み不良を人工的に作成した。同図に示すように、エンドタブに鋼片が接するように設置しており、試験体名の欠陥長さはフランジ幅内における鋼片長さとしている。欠陥寸法は設置する鋼片の寸法を変更することで調整した。

表 2.19 試験体一覧

シリーズ	試験体名	開先形状	欠陥長さ	欠陥高さ
L-SH	L-SH-0-0	外開先	無し	無し
	L-SH-8-8		8mm	8mm
	L-SH-8-16		8mm	16mm
	L-SH-8-24		8mm	24mm
	L-SH-8-31		8mm	31mm(貫通)
	L-SH-24-8		24mm	8mm
L-FH	L-FH-0-0	内開先	無し	無し
	L-FH-8-8		8mm	8mm
	L-FH-8-16		8mm	16mm
	L-FH-8-24		8mm	24mm
	L-FH-8-31		8mm	31mm(貫通)
	L-FH-24-8		24mm	8mm

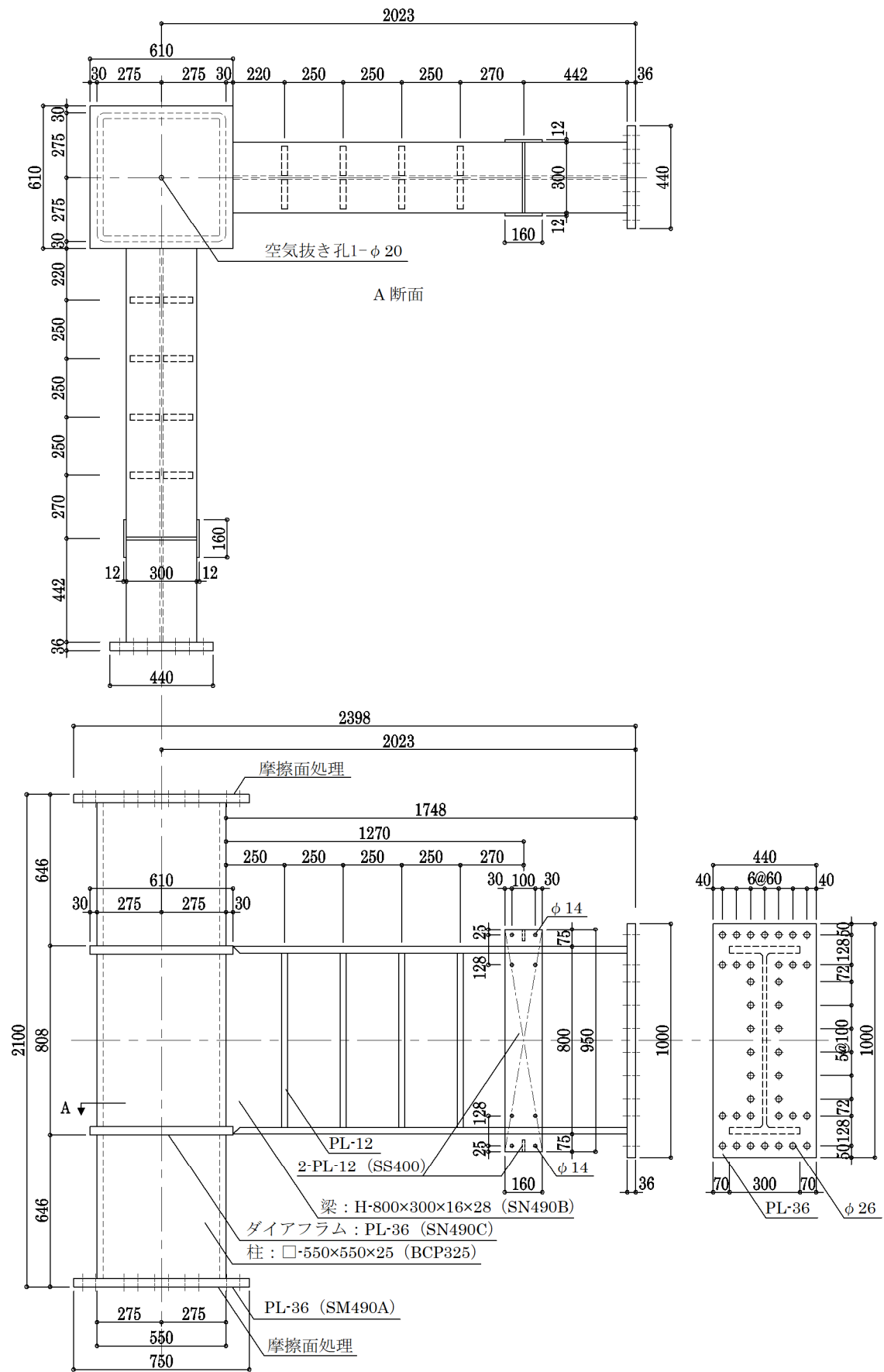


図 2.22 試験体図

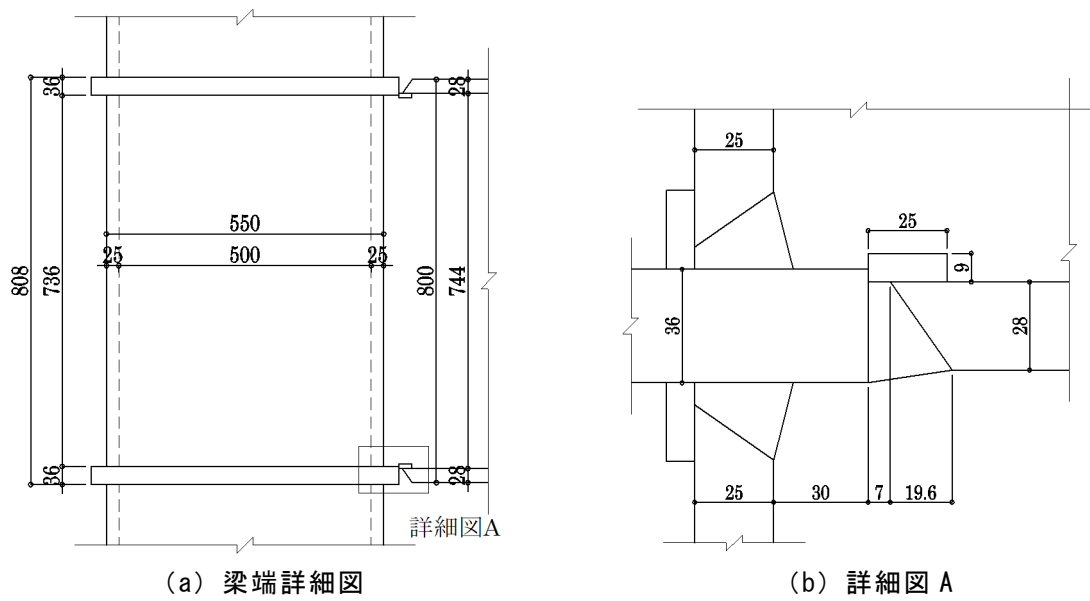


図 2.23 試験体詳細図（外開先）

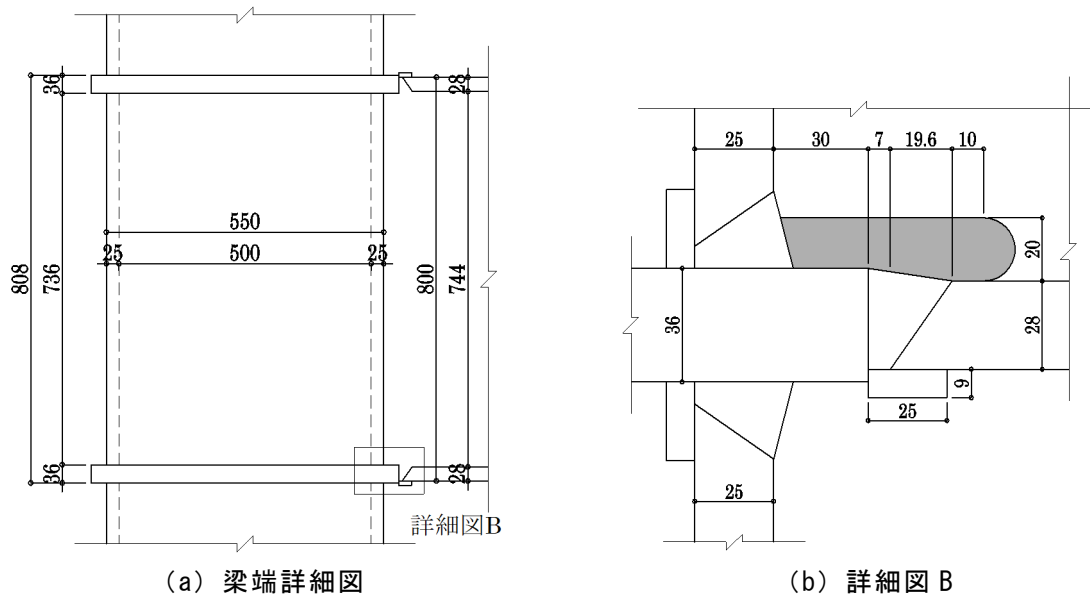


図 2.24 試験体詳細図（内開先）

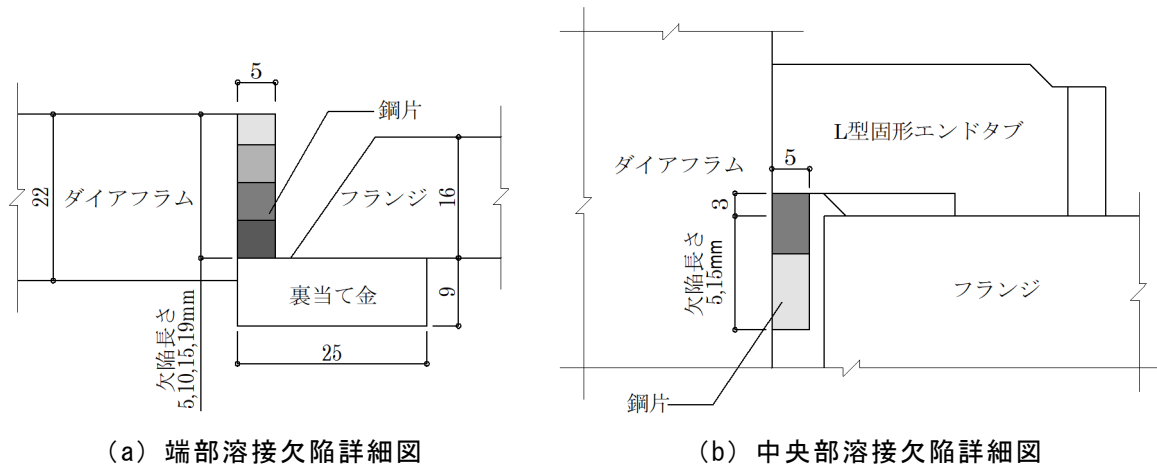


図 2.25 鋼片挿入部詳細図

2) 溶接条件

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, 1.2φ) により行った。溶接始末端部の処理には L 形固形エンドタブを用いた。本実験では、梁フランジ溶接部に作成した溶接欠陥を起点とした破壊を対象とするため、いずれの試験体もノンスカラップ形式とした。外開先の試験体では、分割式の裏当て金を使用してノンスカラップ形式とした。一般に内開先の場合にはノンスカラップ工法は採用されないが、高さ 20mm のミニスカラップを設けて梁フランジ接合部を完全溶込み溶接し、その後ミニスカラップを充填溶接することでノンスカラップ形式とした。裏当て金の組立て溶接は、組立て溶接による応力伝達が生じないように、外開先および内開先ともに開先内で行い、本溶接時に再溶融させた。

溶接部の積層方法は、図 2.26 に示すように 7 層 10 パスである。外開先については図 2.27(a) に示すように最終層の 2 パスを梁フランジ端部から中央に向けて行い、クレーター処理を溶接線の中央部にて行った。内開先については、図 2.27 (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行い、中央で溶接線を継いでいる。これらは、フランジ幅端部の溶接端部にクレーターを配置しないことでクレーターを起点とした破壊を生じさせないためである。溶接入熱量の上限値は 40kJ/cm とした。また、パス間温度の管理値は、溶接金属の強度が低くなることを意図して 450℃ とした。

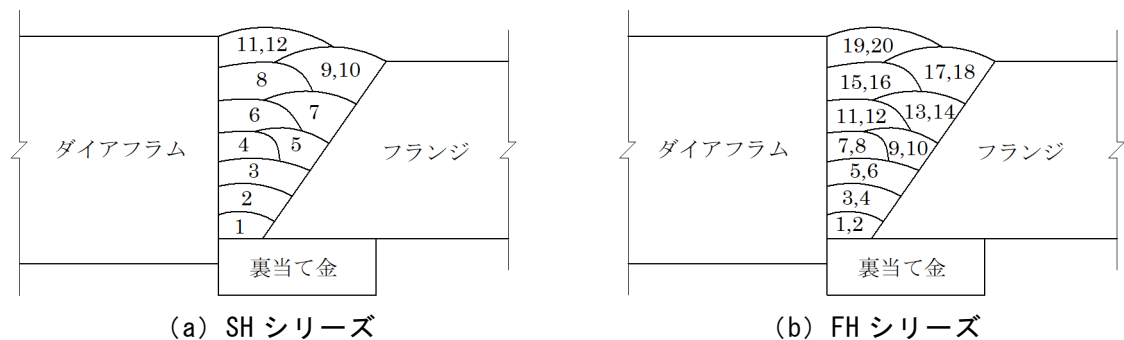


図 2.26 溶接積層図

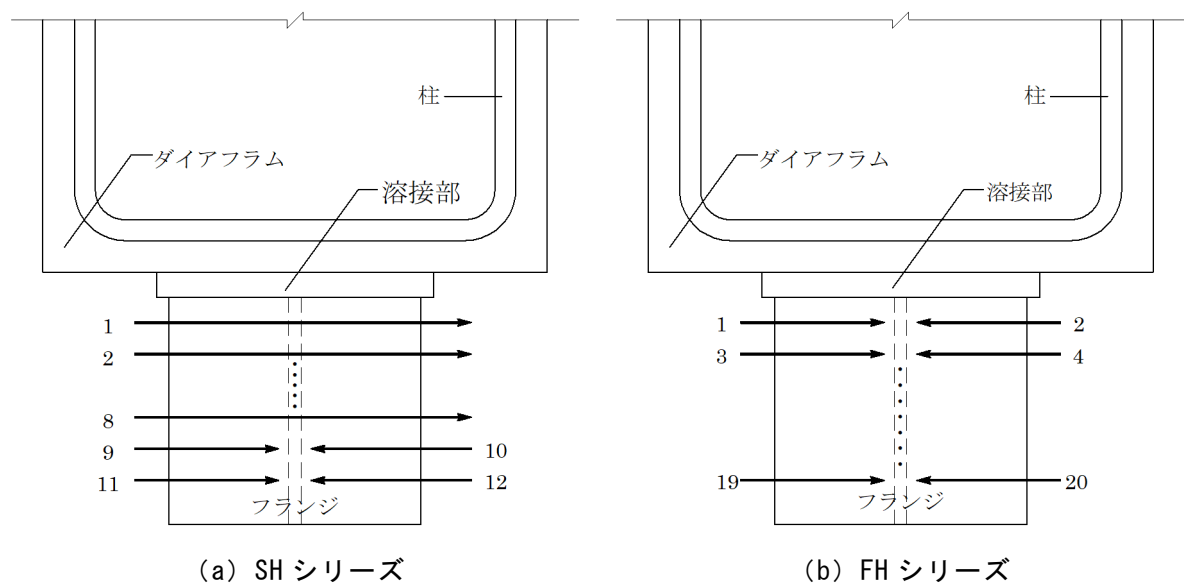


図 2.27 溶接運棒手順図

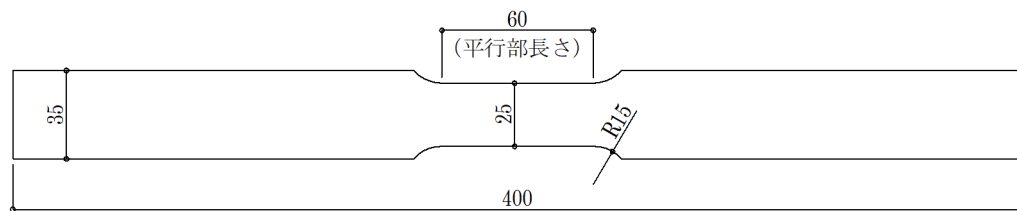
3) 機械的性質

引張試験

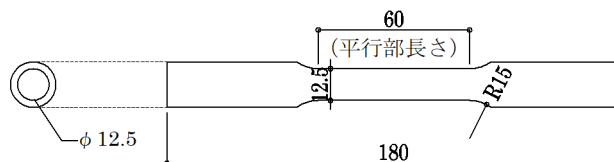
梁，柱，ダイアフラムおよび溶接金属から引張試験片を採取して，引張試験を実施した．各試験片形状を図 2.28 に，試験片採取位置を図 2.29 に示す．梁，柱およびダイアフラムの試験片形状は JIS5 号試験片，溶接金属は溶接部の中央より採取した直径 12.5mm の JIS10 号引張試験片により行った．梁は圧延方向，柱は材軸方向，溶接金属は溶接線方向に試験片を採取した．

試験結果一覧を表 2.20 に示す．材料試験より得られた板厚，降伏応力 σ_y [N/mm²]，引張強さ σ_u [N/mm²]，一様伸び ϵ_u [%]，破断伸び EL [%] および降伏比 YR [%] の実測値と平均値を示す．降伏応力は降伏棚の有無に関わらず，0.2% オフセット耐力により定義した．

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，1.02 および 1.05 であり，溶接金属の引張強さはダイアフラムおよび梁フランジの引張強さを上回る．各部位の公称応力－公称歪関係を図 2.30 に示す．



(a) JIS Z 2241 の 5 号試験片



(b) JIS Z 3111 の A1 号試験片

図 2.28 試験片形状（引張試験）

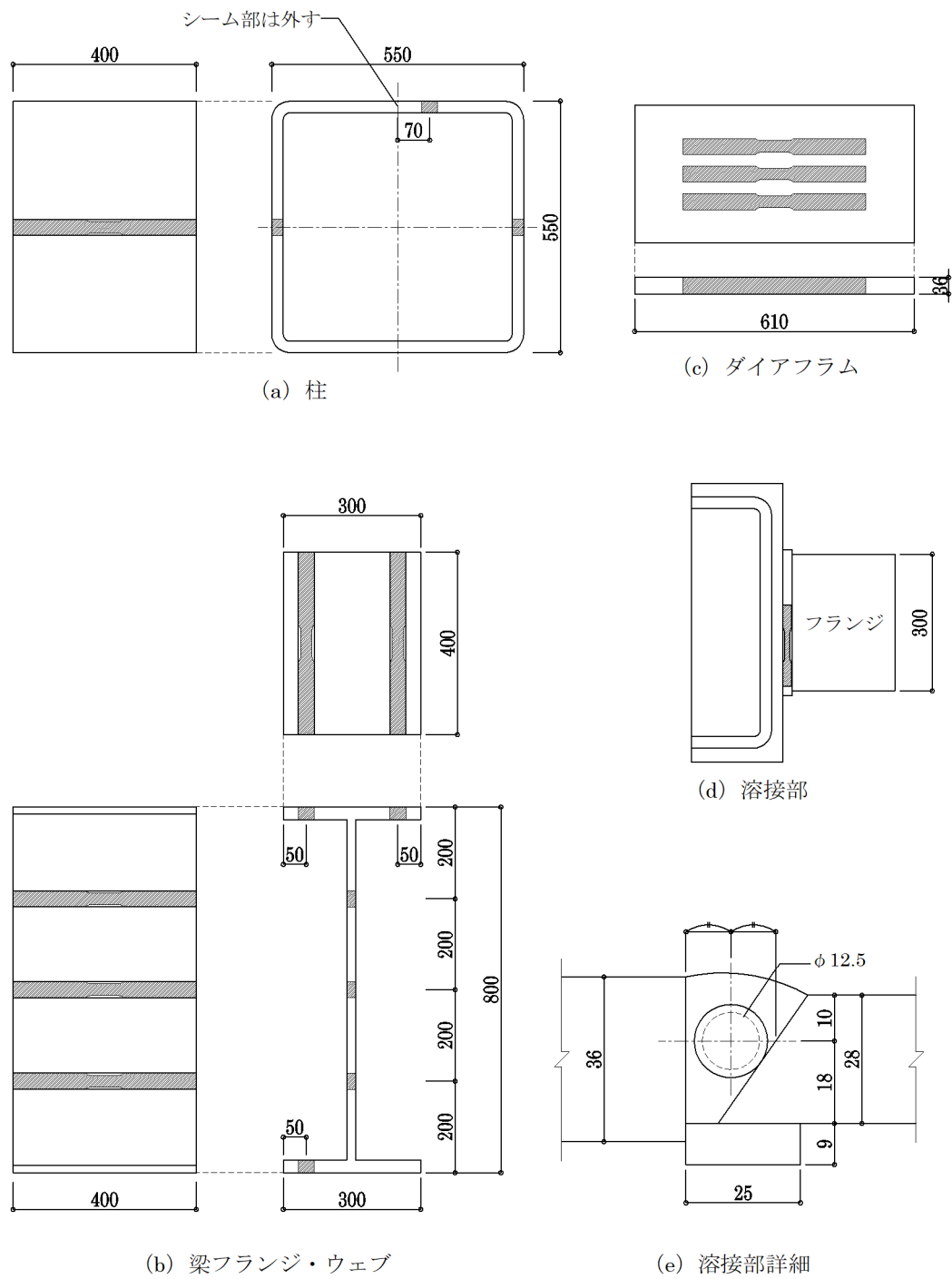
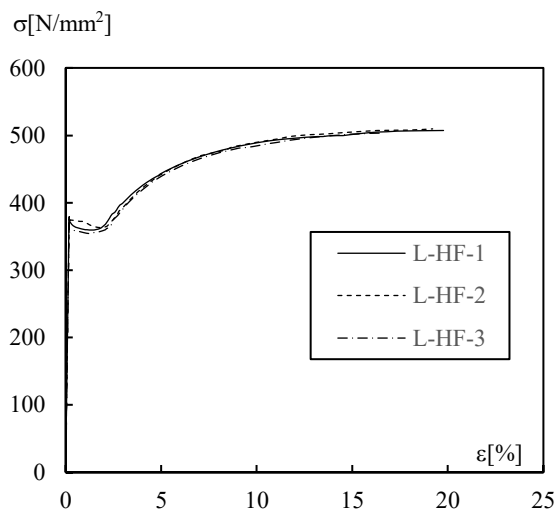


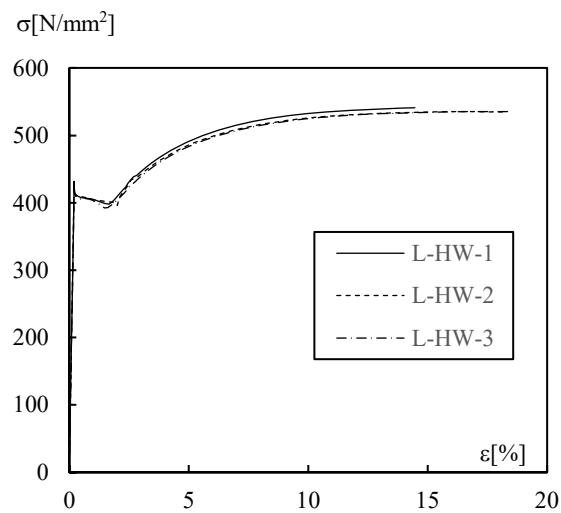
図 2.29 引張試験片採取位置

表 2. 20 引張試験結果一覧

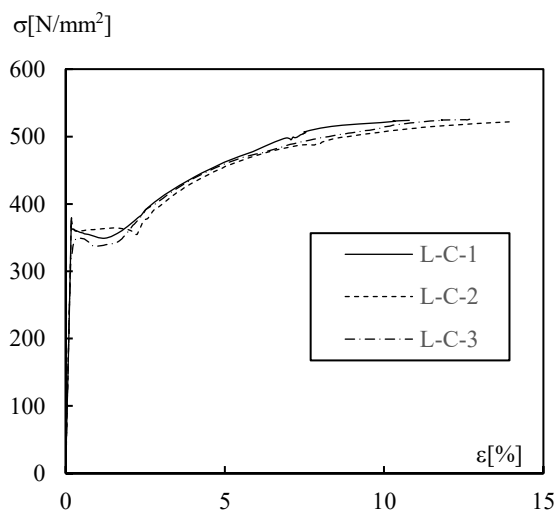
試験片 名称	部位	鋼種	板厚 [mm]	降伏応力 σ_y [N/mm ²]	引張強さ σ_u [N/mm ²]	一様伸び ε_u [%]	破断伸び EL [%]	降伏比 YR [%]
L-HF-1	梁フランジ	SN490B	28.6	366	507	19.8	54.3	72.2
L-HF-2			28.9	374	510	19.2	53.2	73.3
L-HF-3			29.0	359	504	16.6	54.6	71.3
平均			28.9	366	507	18.5	54.0	72.3
L-HW-1	梁ウェブ	SN490B	16.5	409	541	14.5	41.0	75.6
L-HW-2			16.6	410	536	17.0	39.8	76.5
L-HW-3			16.6	407	535	18.5	43.3	75.9
平均			16.6	408	537	16.7	41.4	76.0
L-C-1	柱	BCP325	25.1	359	524	10.8	54.4	68.6
L-C-2			25.1	359	522	14.1	52.8	68.8
L-C-3			25.1	349	526	12.8	53.5	66.3
平均			25.1	356	524	12.6	53.6	67.9
L-D-1	ダイアフラム	SN490C	36.8	333	526	10.5	47.3	63.4
L-D-2			36.7	359	516	18.2	55.7	69.6
L-D-3			36.7	364	518	17.4	54.7	70.3
平均			36.7	352	520	15.4	52.6	67.8
L-w-1	溶接部	YGW11	-	456	544	12.3	-	83.8
L-w-2			-	449	516	4.6	27.0	87.1
平均			-	452	530	8.5	27.0	85.4



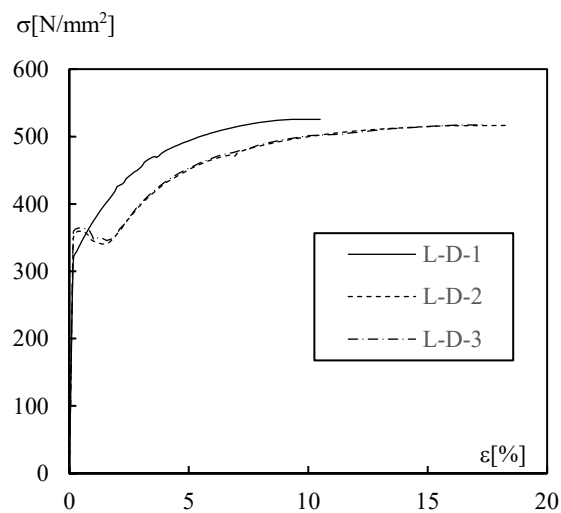
(a) 梁フランジ



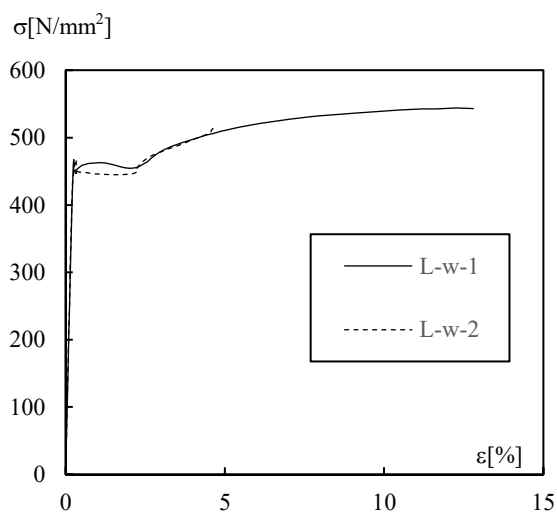
(b) 梁ウェブ



(c) 柱



(d) ダイアフラム



(e) 溶接部

図 2.30 公称応力－公称歪関係

シャルピー衝撃試験結果

梁フランジ、ダイアフラム、溶接金属からシャルピー試験片を採取し、シャルピー衝撃試験を実施した。試験片はノッチ深さ 2mm の V ノッチ標準試験片とし、図 2.31 に示す。試験片の採取位置を図 2.32 に示す。いずれの試験片もサイドノッチとしており、試験片を 3 体ずつ採取し、0℃で試験を行った。シャルピー衝撃試験の結果を表 2.21 に示す。

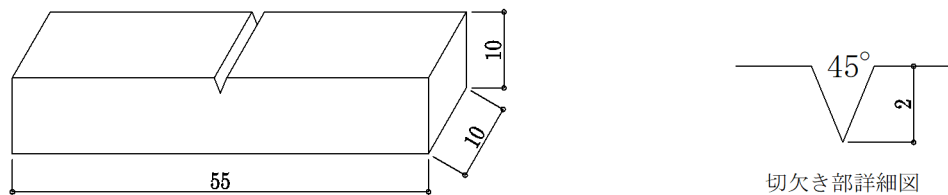


図 2.31 試験片形状（シャルピー衝撃試験）

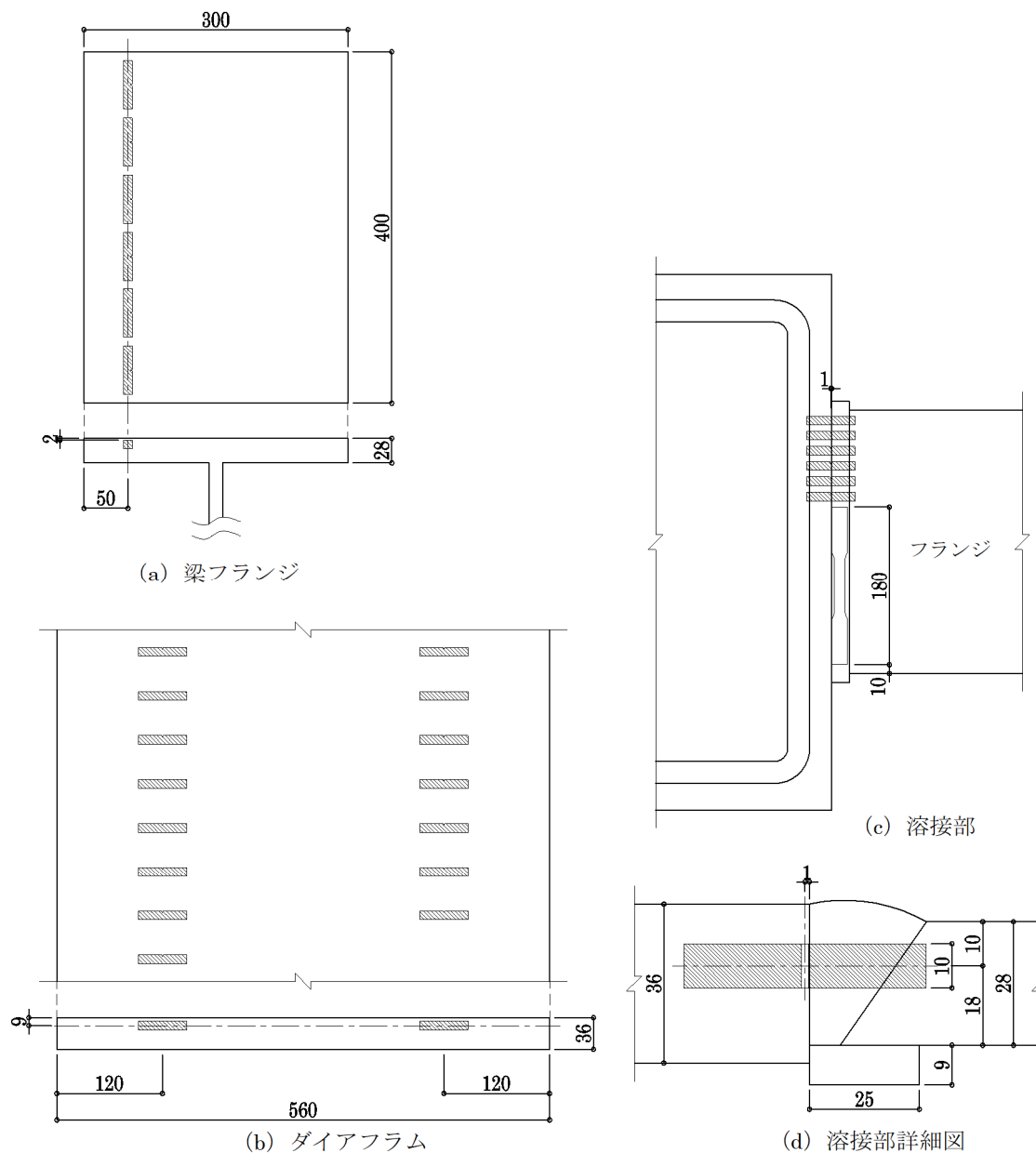


図 2.32 シャルピー衝撃試験片の採取位置

表 2.21 シャルピー衝撃試験結果

部位 鋼種	温度 [°C]	吸収エネルギー [J]		脆性破面率 [%]	
		個々値	平均値	個々値	平均値
ダイアフラム SN490C	40	242	236	4.0	8.5
		230		17.1	
		235		4.4	
	20	207	206	17.3	19.6
		194		23.3	
		218		18.1	
	0	207	198	30.2	32.9
		191		35.3	
		196		33.3	
	-20	185	176	43.1	45.1
		156		52.7	
		186		39.6	
	-40	116	112	64.9	71.4
		105		75.8	
		114		73.4	
梁フランジ SN490B	20	206	216	2.2	1.4
		214		1.1	
		229		1.0	
	0	183	192	18.4	13.8
		216		1.8	
		175		21.1	
溶接部 ^{※1} YGW11	20	215	234	23.1	16.8
		233		9.0	
		254		18.4	
	0	175	178	36.7	35.8
		155		32.3	
		203		38.3	
	-20	259	277	26.8	19.6
		301		15.5	
		269		16.6	
	-40	244	250	26.1	22.7
		251		17.6	
		255		24.4	
溶接部 ^{※2} YGW11	20	234	247	42.2	44.2
		260		43.9	
		246		46.6	
	0	241	245	34.8	37.3
		228		35.6	
		267		41.6	
	-20	284	283	27.7	29.6
		291		30.5	
		274		30.5	
	-40	274	277	33.0	29.5
		277		27.4	
		279		28.1	

※1：下記以外に使用

※2：L-FH-0-0, L-FH-8-8に使用

4) 超音波探傷試験の結果

全ての試験体において載荷実験前に UT 法および PAUT 法による超音波探傷試験を実施し、作成した溶接欠陥の寸法測定を行った。UT 法は斜角探傷法とし、探触子は 5M10×10A70 および 5M5×10A65 を用いた。PAUT 法の探触子には、5MHz・16 素子のものを用いた。試験結果を表 2.22 に示す。表中探傷位置の BU は上フランジ、BL は下フランジを示す。上フランジは正載荷引張側フランジ、下フランジは正載荷圧縮側フランジである。また、探傷位置の左右は開先加工面を表面としてブラケット側から見た方向とした。同一の探触子で複数のデータがある場合には、その箇所での最大領域および最大評価長さを採用した。後述する実験時の破断位置に関連する探傷位置を色付きとした。この試験結果は、後述する欠陥実寸法との比較に用いる。

表 2.22 超音波探傷試験結果一覧

試験体名	探傷位置		エコー高さ領域と欠陥評価長さ [mm]		PAUT での 欠陥高さ(h) [mm]
			5M10×10A70	5M5×10A65	高さ (h)
L-SH-0-0	BU	左端部	III, 15	III, 11	7.8
		右端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し
	BL	左端部	II, —	II, —	<2
		右端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し
L-SH-8-8※	BU	左端部	IV, 20	III, 12	9.6
		右端部	V, 15	IV, 12	9.0
	BL	左端部	V, 24	IV, 13	8.8
		右端部	V, 15	IV, 12	9.0
L-SH-8-16	BU	左端部	II, 15	II, 12	17.0
		右端部	IV, 19	IV, 13	19.3
	BL	左端部	V, 21	II, 11	13.7
		右端部	V, 14	IV, 13	16.4
L-SH-8-24	BU	左端部	IV, 12	III, 12	17.5
		右端部	V, 15	IV, 15	16.3
	BL	左端部	V, 22	III, 18	16.0
		右端部	IV, 13	IV, 14	18.9
L-SH-8-31	BU	左端部	V, 26	IV, 13	31.7
		右端部	V, 17	IV, 15	22.9
	BL	左端部	IV, 18	IV, 14	30.5
		右端部	V, 17	IV, 12	18.5
L-SH-24-8	BU	左端部	V, 33	IV, 29	7.5
		右端部	V, 35	V, 25	5.8
	BL	左端部	IV, 28	IV, 25	9.6
		右端部	V, 30	V, 29	3.3
L-FH-0-0	BU	左端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	融合不良あり
		右端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し
	BL	左端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し
		右端部	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し	欠陥エコー無し
L-FH-8-8	BU	左端部	IV, 12	III, 12	9.4
		右端部	II, 18	III, 19	9.3
	BL	左端部	IV, 16	III, 16	8.3
		右端部	V, 15	IV, 15	8.0
L-FH-8-16	BU	左端部	III, 25	III, 20	14.7
		右端部	III, 21	II, 16	16.3
	BL	左端部	II, 13	II, 16	16.4
		右端部	III, 28	II, 17	16.6
L-FH-8-24	BU	左端部	III, 13	II, 13	端部エコー検出せず
		右端部	II, 12	II, 21	24.4
	BL	左端部	III, 19	III, 16	14.0(直射法での測定値)
		右端部	III, 14	III, 13	24.8
L-FH-8-31	BU	左端部	III, 15	III, 23	32.3
		右端部	IV, 15	III, 13	33.9
	BL	左端部	III, 12	III, 12	31.8
		右端部	II, 12	II, 12	30.2
L-FH-24-8	BU	左端部	IV, 35	IV, 28	8.8
		右端部	V, 33	IV, 33	7.6
	BL	左端部	V, 33	IV, 33	9.1
		右端部	V, 33	IV, 33	8.8

■塗り：載荷実験時にダイアフラム側で破断の起点となった位置

■塗り：載荷実験時にフランジ側で破断の起点となった位置

※：L-SH-8-8は破断の起点ではないが、ダイアフラム側で最も進展した位置を■塗りで示す

5) 載荷方法

載荷装置を図 2.33 載荷装置

に示す．梁が鉛直，柱が水平の向きで試験体を設置した．柱の両端をピン冶具に緊結し，梁先端に取付けた載荷用オイルジャッキにより載荷した．また，梁の面外変形を拘束するために横座屈止めを2段設置した．載荷振幅は，一定振幅の正負交番繰返し載荷とし，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 $\pm 3\theta_p$ で破断が生じるまで継続した．載荷プログラムを図 2.34 に示す．

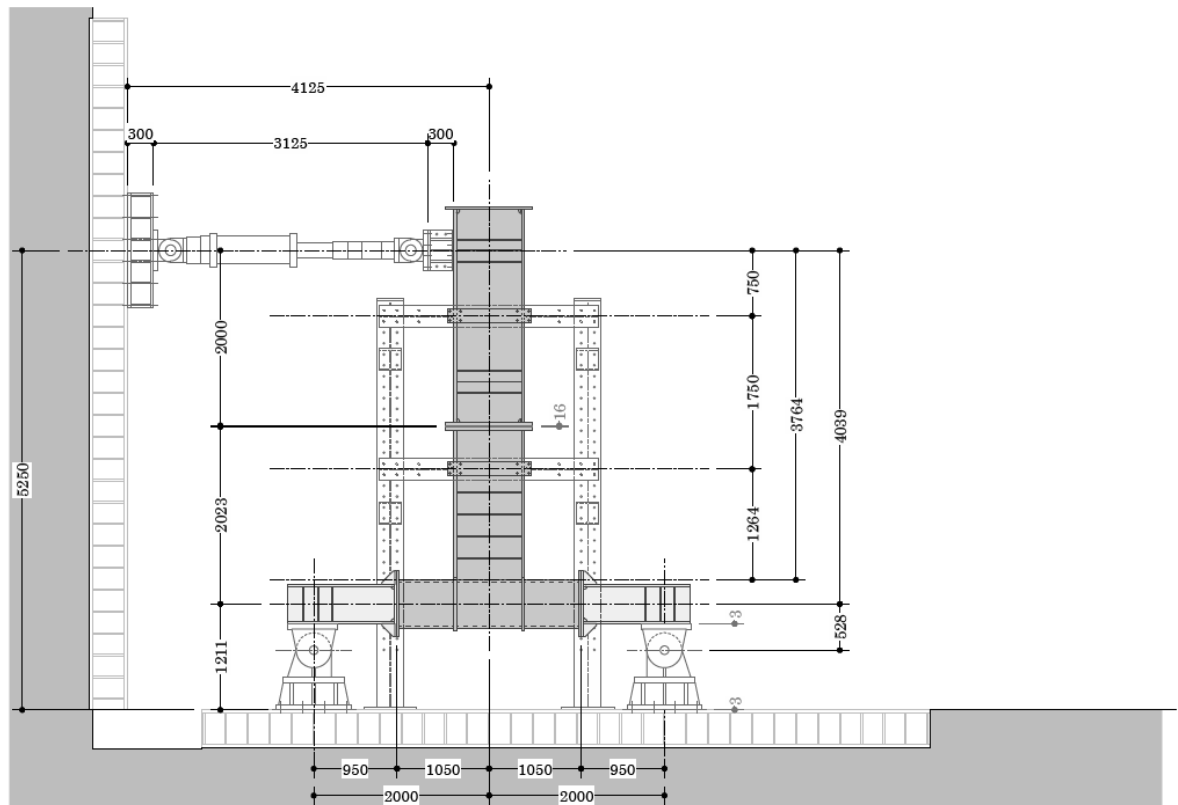


図 2.33 載荷装置

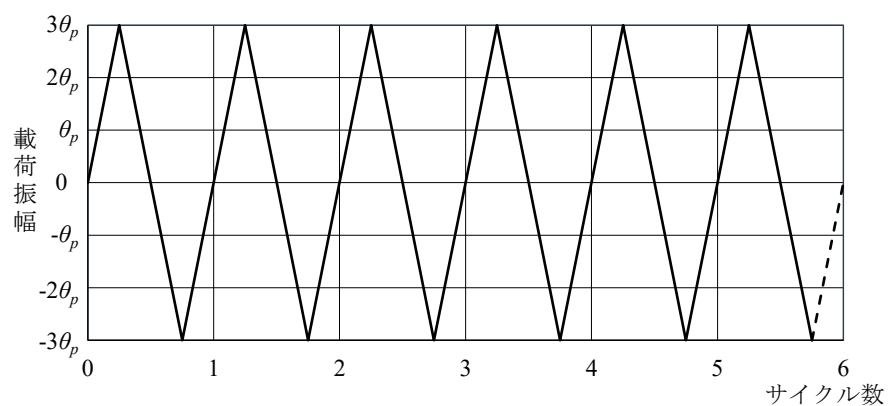


図 2.34 載荷プログラム

6) 測定方法

変位計測位置

載荷時の変位計設置位置を図 2.35 に示す.

u1 : ジャッキ芯の水平変位

ud1, ud2, ud3, ud4 : ダイアフラムの水平変位

vd1, vd2, vd3, vd4 : ダイアフラムの鉛直変位

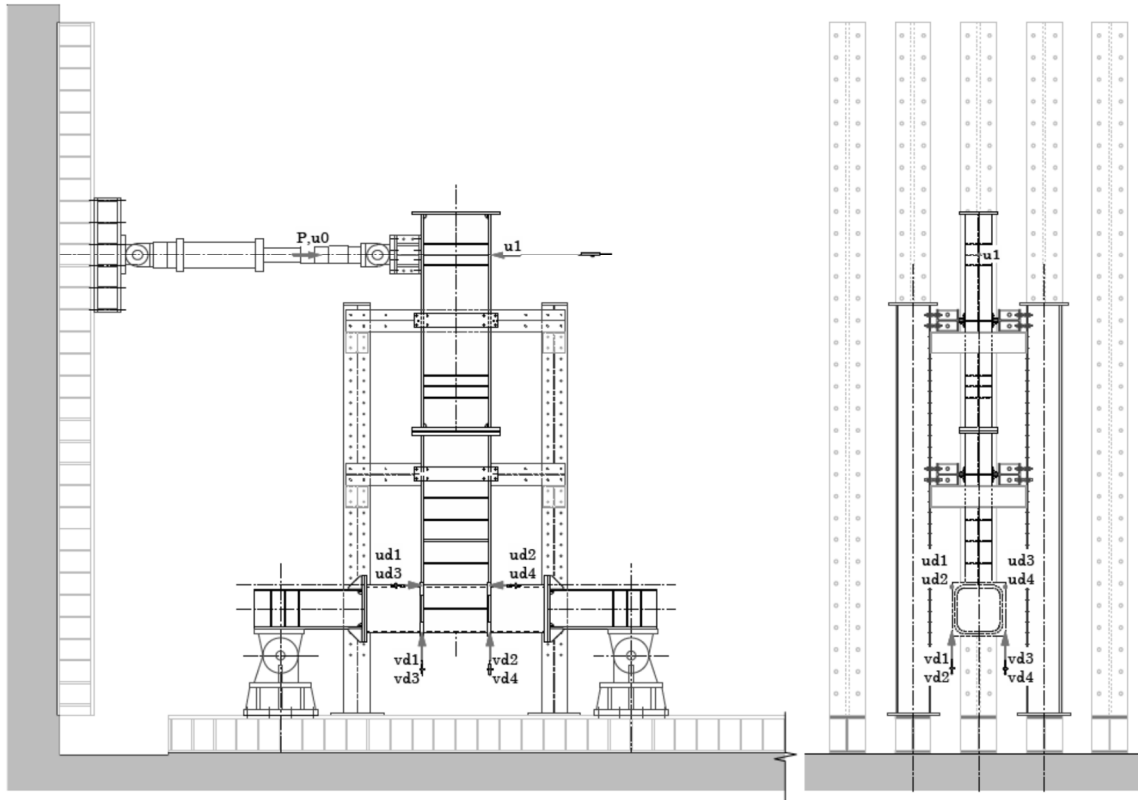


図 2.35 変位計設置位置

これらの変位計を用いて、次式により梁の相対回転角 θ_m を求めて制御した.

$$\begin{aligned}
 {}_b\theta &= \theta_{all} - \theta_j \\
 \theta_{all} &= \frac{u_1 - u'_d}{{}_b l} \\
 \theta_j &= \frac{(v_{d2} - v_{d1}) + (v_{d4} - v_{d3})}{2 {}_b d} \\
 u'_d &= \frac{u_{d1} + u_{d2} + u_{d3} + u_{d4}}{4}
 \end{aligned}$$

${}_b l$: ジャッキ芯から柱フェイスまでの距離 (3764mm)

${}_b d$: 通しダイアフラムの板厚中心間距離 (484mm)

2.3.2 実験結果

1) 用語の定義

2.2.2 にて定義済のため省略する。

2) 実験結果概要

実験結果一覧を表 2.23 に示す。欠陥実測寸法，サイクル数，累積塑性変形倍率は原則として破断起点の位置の記録を示すが，初亀裂と板厚貫通に関しては破断起点以外で最も早期に発生した位置の記録も示す。欠陥実測寸法は，鋼片を挿入したダイアフラム側から破断していないものについては，PAUT 法による結果を参考値として括弧書きで示す。初期裂，板厚貫通時の η は変形ピーク時で，破断時のものは最終破断発生直前時点にて算出した。

無欠陥の試験体および L-SH-8-8 では，フランジ側の溶接止端部に発生した延性亀裂が進展して，フランジ側から破断した。その他の欠陥を有する試験体では，ダイアフラム側の鋼片挿入部から発生した延性亀裂が進展して，ダイアフラム側から破断した。

表 2.23 実験結果一覧

シリーズ	試験体	欠陥実測寸法(mm) 長さ×高さ	破断起点	サイクル数					累積塑性変形倍率				
				ダイアフラム側		フランジ側		破断	ダイアフラム側		フランジ側		破断
				初亀裂	板厚貫通	初亀裂	板厚貫通		初亀裂	板厚貫通	初亀裂	板厚貫通	
L-SH	L-SH-0-0	無欠陥	F	+7	—	-2	-17	-22	41	—	12	109	141
	L-SH-8-8	(15.0×9.0)	F	+3	+7	+3	+13	+19	15	41	15	80	118
	L-SH-8-16	10.0×16.0	D	+2	+5	+3	—	+9	9	28	15	—	52
	L-SH-8-24	10.0×24.0	D	+2	+2	—	—	+2	8	8	—	—	8
	L-SH-8-31	10.0×27.0	D	+2	+2	—	—	+4	8	8	—	—	21
	L-SH-24-8	28.0×9.0	D	-2	-5	-2	—	-11	12	31	12	—	69
L-FH	L-FH-0-0	無欠陥	F	+7	—	+7	+14	+21	49	—	42	88.0	133
	L-FH-8-8	11.0×8.0	D	+2	+8	-5	—	+16	9	48	32	—	100
	L-FH-8-16	12.0×16.0	D	+2	+5	+6	—	+10	9	29	35	—	60
	L-FH-8-24	13.0×25.0	D	-1	-1	—	—	-8	5	5	—	—	51
	L-FH-8-31	11.0×31.0	D	+1	+1	—	—	+1	1	1	—	—	1
	L-FH-24-8	27.0×9.0	D	+3	+7	-4	—	+12	15	41	25	—	73

■ 塗り:破断起点のもの

3) 荷重変形関係

L-SHシリーズとL-FHシリーズの実験で得られた梁端モーメント M_m と変形角 θ_m の関係を全塑性モーメント M_p および M_p 時の弾性相対変形角 θ_p で無次元化して図 2.36 に示す．欠陥高さの大きな L-SH-8-24 および L-FH-8-31 では初サイクル目で破断している．その他の試験体では安定した紡錘形の履歴ループを描いている．載荷を繰返すことで，梁端フランジ溶接部のフランジ側止端部もしくはダイアフラム側止端部に発生した亀裂が進展することでピーク時の荷重が低下し，いずれの試験体でも最終サイクル時に脆性的な破断が生じ，急激な荷重低下が見られた．

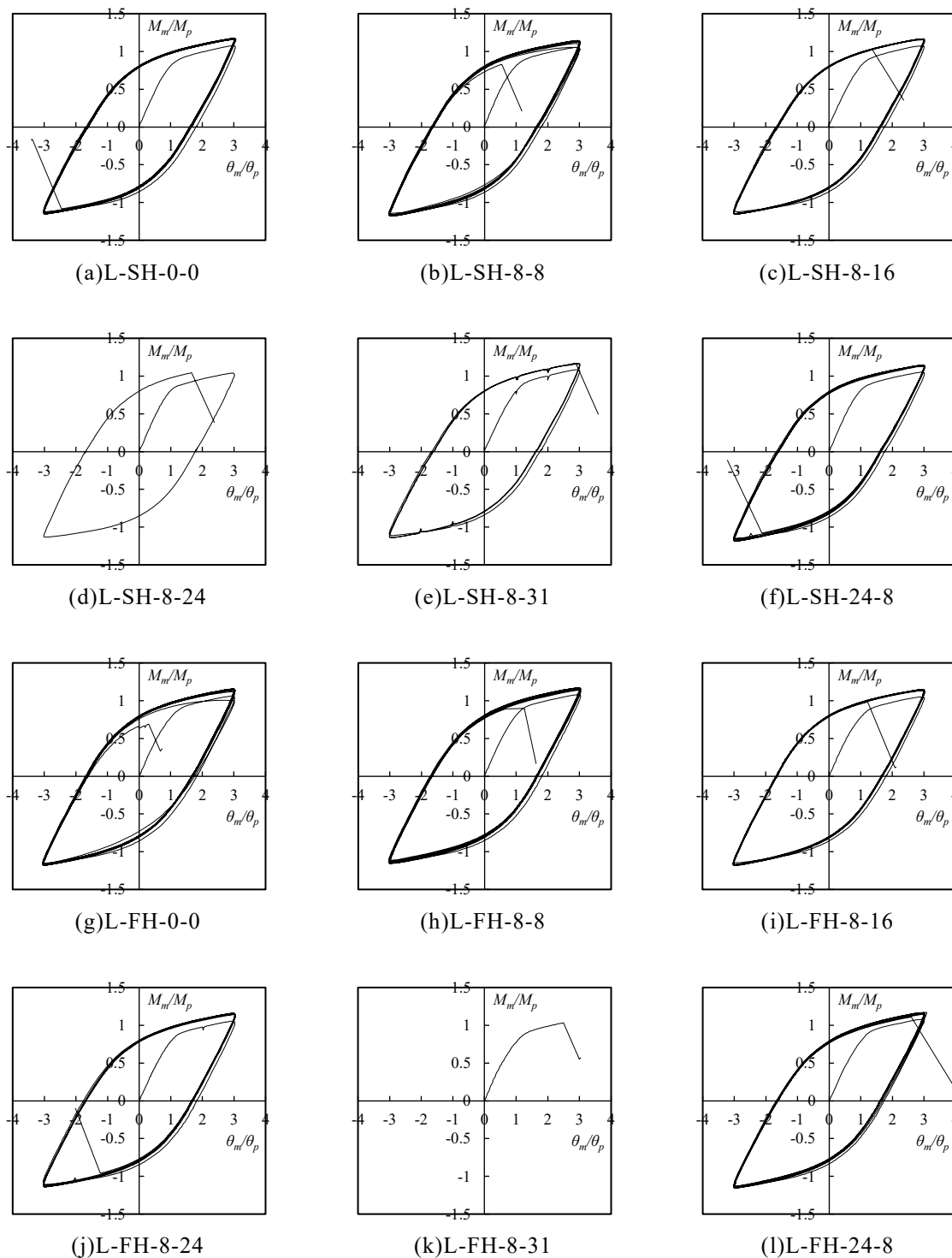
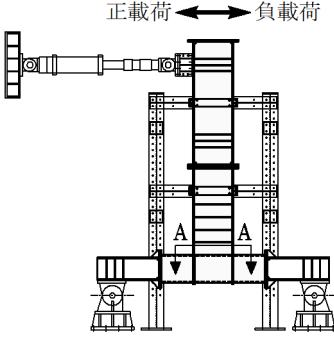
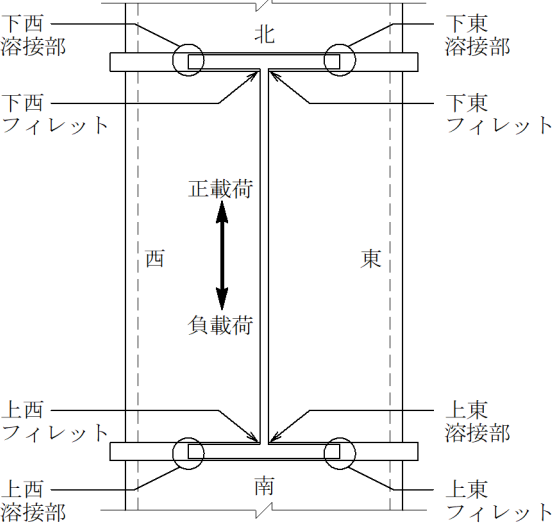
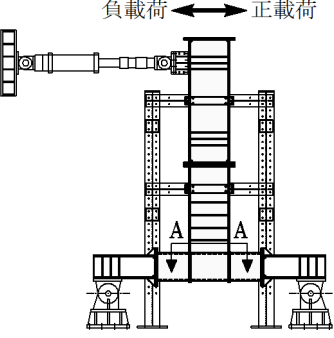
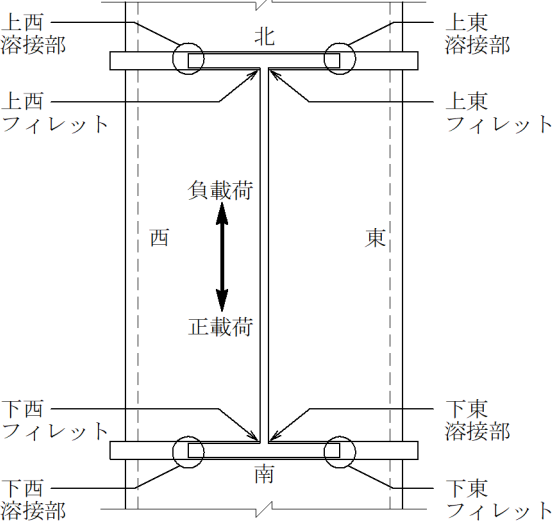


図 2.36 梁端モーメントー変形角関係

4) 各試験体の実験結果

各試験体の実験結果についてまとめる．実験中にサイクル毎に目視で亀裂の確認を行い，定規で亀裂長さを計測して記録したものを表にまとめた．実験経過記録表中の「↓」とは，前のサイクルの状態が継続していることを表している．載荷方向と記録部位の名称を表 2.24 に示す．各試験体の実験経過記録，写真をそれぞれ表 2.25～表 2.36，写真 2.22～写真 2.34 に示す．

表 2.24 載荷方向と記録部位の名称

全体図	A-A 断面図	対象試験体
		L-SH-0-0 L-SH-8-16 L-SH-8-31 L-FH-8-8 L-FH-8-24 L-FH-24-8
		L-SH-8-8 L-SH-8-24 L-SH-24-8 L-FH-0-0 L-FH-8-16 L-FH-8-31

L-SH-0-0

ダイアフラム側の亀裂で最も進展したものは、上フランジの東側であり、+7 サイクル目に板厚方向に亀裂が発生したが、貫通には至らなかった。

破断位置は下フランジの東フランジ側の溶接部であり、-1 サイクル目に白い線が発生し、-2 サイクル目に板厚方向に亀裂が発生した。-4 サイクル目には幅方向への亀裂が発生し、サイクル毎に亀裂が進展して-17 サイクル目には板厚方向に貫通して幅方向亀裂と繋がった。さらに載荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の-21 サイクル目には55mmに達した後に、-22 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.25 実験経過記録 (L-SH-0-0)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]						
+1										白い線							
+2		白い線								亀2							
+3		亀1		0.25						3		0.4					
+4		5		0.5						5		0.6					
+5	亀2	↓		0.55						9.5		0.65					
+6	4	↓		0.6		浮			亀1.5	↓		0.7		白い線			
+7	↓	11		0.65		中央亀裂12			↓	↓		0.75		亀2			
+8	↓	↓		0.75		↓			3	12		0.85		↓			
+9	↓	↓		↓		↓			↓	↓		0.9		↓			
+10	↓	↓		1.1		↓			4	14		↓		↓			
+11	7	↓		↓		19			5	↓		1.1		↓			
+12	12	16.5		↓		21			7	↓	亀6	1.2		↓			
+13	14.5	↓		↓		↓			↓	17	8	↓	亀2.5	↓			
+14	↓	↓		↓		↓			↓	↓	↓	↓	↓	↓			
+15	↓	↓		↓		↓			9	19	9	1.3	↓	5			
+16	↓	↓		↓		↓			↓	↓	↓	↓	↓	↓			
+17	25	↓		↓		23			↓	貫通		1.5	↓	9.5			
+18	32	↓		↓		↓			10	↓		↓	↓	↓			
+19	37	↓		1.2		↓			↓	↓		2.1	↓	11.5			
+20	↓	↓		↓		26			↓	↓		2.5	↓	↓			
+21	↓	↓		↓		↓			12	↓		↓	↓	↓			
+22	49	↓		1.4		↓			25	↓		↓	↓	↓			

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1		白い線															
-2		亀8								白い線							
-3		10.5		0.55						↓							
-4	亀裂	↓		0.6						亀2	0.25						
-5	↓	↓		0.7						5.5	0.4						
-6	↓	↓		0.75		白い線			亀1	↓	0.5			浮き	浮き		
-7	↓	11		0.8		浮き	浮き		6	↓	0.55						
-8	↓	↓		0.85					↓	↓	0.65						
-9	↓	12.5		↓					↓	↓	↓						
-10	4	↓		0.95		10			↓	↓	0.7						
-11	7	↓	亀裂	1.2		↓			↓	↓	0.85						
-12	7.5	↓	3.5	1.3		↓			7.5	↓	1.1						
-13	11.5	↓	↓	↓		↓	3		↓	↓	1.2						
-14	↓	↓	↓	↓		↓	↓		↓	↓	↓						
-15	18	↓	↓	↓		↓	↓		↓	7.5	↓						
-16	↓	19	↓	↓		↓	↓		↓	↓	↓						
-17	↓	貫通		1.6		↓	↓		11	11	↓						
-18	25	↓		↓		↓	↓		↓	16.5	↓						
-19	30	↓		1.9		↓	↓		↓	↓	↓						
-20	38	↓		2.0		↓	↓		↓	↓	1.3						
-21	55	↓		3.0		↓	↓		↓	↓	↓						
-22	破断																



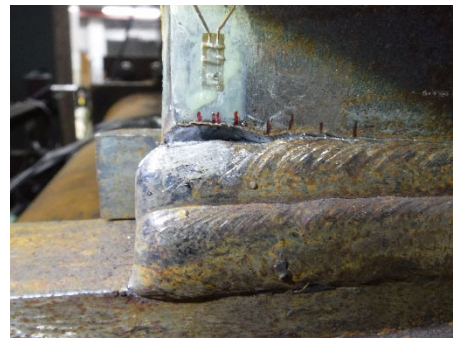
(a)－2 サイクル<亀裂発生>
(東フランジ側)



(b)－17 サイクル<板厚貫通>
(東フランジ側)



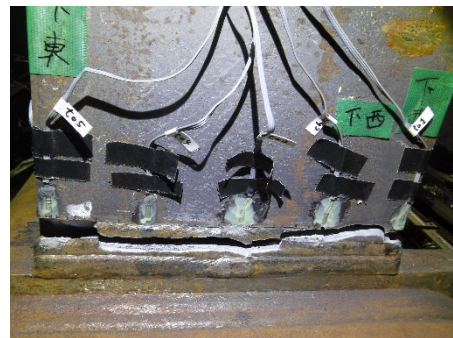
(c)－21 サイクル<破断前のピーク>
(東フランジ側)



(d)－21 サイクル<破断前のピーク>
(東フランジ側)



(e)－22 サイクル<破断>
(東フランジ側)



(f)－22 サイクル<破断>
(フランジ側)



(g)－22 サイクル<破断>
(東フランジ側)



(h)－22 サイクル<破断>
(西フランジ側)

写真 2.22 実験経過状況 (L-SH-0-0 の下フランジ)

L-SH-8-8

ダイアフラム側の亀裂で最も進展したものは、上フランジの西側である。±1 サイクル目には、鋼片挿入部の 4 ヶ所で鋼片の浮きを確認した。上フランジの西側で+3 サイクル目に板厚方向に亀裂が発生し、+7 サイクル目には板厚方向に亀裂が貫通したものの、フランジ側にも亀裂が発生したため、上フランジの西側からは破断には至っていない。

破断位置は上フランジの東フランジ側の溶接部で、+3 サイクル目に亀裂が発生した。+5 サイクル目には幅方向へ亀裂が発生し、+13 サイクル目には板厚方向に貫通した。さらに載荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の+18 サイクル目には 85mm に達した後に、+19 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.26 実験経過記録 (L-SH-8-8)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1		白い線					浮9			白い線					浮8		
+2		↓					↓			↓					13		
+3		亀4.5					↓	1.0	亀裂	亀4					浮19.5 亀裂		
+4		8		0.4			10.5	↓	4	9		0.25			1.5	1.0	
+5	亀4	10		1.1			↓	↓	7	10		0.4			3.5	1.5	
+6	6.5	10.5		1.6			↓	↓	↓	↓		0.45			11	↓	
+7	8+5	↓		1.8			↓	↓	11.5	↓		0.5		貫通		↓	
+8	18	↓		2.0			12	↓	↓	↓		0.55	亀1.5	↓		↓	
+9	20	12.5		2.2			↓	↓	16	↓		↓	↓	↓	↓	↓	
+10	↓	13.5	2.5※1	↓			↓	↓	↓	↓		0.45	↓	↓	↓	↓	※1
+11	22	15	6※2	↓			↓	↓	↓	↓		0.5	3.5	↓		2.0	※2
+12	25	18.5	↓	2.5			↓	↓	↓	↓		0.55	7	↓		↓	
+13	↓	貫通		3.0			↓	↓	↓	↓		0.5	9.5	↓		↓	
+14	27	↓		↓			↓	↓	↓	↓		↓	12.5	↓		2.5	
+15	29	↓		4.0			↓	↓	↓	↓		0.4	14.5	↓		↓	
+16	36	↓		5.0			↓	↓	↓	↓		0.3	16.5	↓		↓	
+17	45	↓		8.0			↓	↓	23	↓		0.2	18.5	↓		1.5	
+18	85	↓		↓			↓	↓	↓	↓		↓	19.5	↓		↓	
+19	破断																

※1: 板厚中間部から亀裂発生

※2: 初層からの亀裂と繋がる

下フランジ（負荷荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向	板厚方向		開口 変位	幅 方向	板厚方向		開口 変位	幅 方向	板厚方向		開口 変位	幅 方向	板厚方向		開口 変位	
		表層	初層			表層	初層			表層	初層			表層	初層		
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
-1							浮11			白い線						浮5.5	
-2		白い線					13			↓						8	
-3		↓					亀2		亀2	亀8		0.35			↓		
-4		亀3※1				白い線	3	1.0	3.5	9		0.4			↓		
-5		5※2		0.45		↓	↓	↓	4.5	↓		0.5			↓	1	
-6		↓		↓		↓	↓	↓	↓	↓		0.55			↓	↓	
-7		↓		↓		↓	6.5	↓	↓	↓		↓			↓	↓	
-8	亀7※1	7		0.55		↓	15	↓	5	↓		↓			↓	↓	
-9	17※1	↓		↓		↓	↓	↓	↓	11		↓			↓	↓	
-10	↓	↓		0.6		亀3.5	↓	↓	16	↓	3	0.75			↓	↓	
-11	↓	↓		↓		↓	↓	↓	↓	↓		↓			↓	↓	
-12	23※1	↓		0.75	亀1.5	↓	↓	↓	↓	15	↓	0.9			↓	↓	
-13	↓	8		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↓			↓	↓	
-14	↓	↓		0.8	↓	貫通		↓	27	↓	↓	1.2			↓	↓	
-15	31	↓		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		↓			↓	↓	
-16	↓	↓	中層	0.95	↓	↓	↓	1.5	↓	↓	8.5	1.3	亀3	亀4.5	↓	↓	
-17	↓	8.5	亀4	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	
-18	↓	↓	6	↓	↓	↓	↓	↓	↓	貫通		1.6	↓	↓	↓	↓	

※1: 板厚中間部から亀裂発生

※2: 初層・表層からの亀裂と繋がる



(a)+3 サイクル<亀裂発生>
(東フランジ側)



(b)+13 サイクル<板厚貫通>
(東フランジ側)



(c)+18 サイクル<破断前のピーク>
(東フランジ側)



(d)+18 サイクル<破断前のピーク>
(東フランジ側)



(e)+18 サイクル<破断前のピーク>
(東フランジ側)



(f)+19 サイクル<破断>
(フランジ側)

写真 2.23 実験経過状況 (L-SH-8-8 の上フランジのフランジ側の亀裂進展)



(g)+3 サイクル<亀裂発生>
上フランジ (西ダイアフラム側)



(h)+7 サイクル<板厚貫通>
上フランジ (西ダイアフラム側)

写真 2.24 実験経過状況 (L-SH-8-8 の上フランジのダイアフラム側の亀裂進展)

L-SH-8-16

ダイアフラム側では、±1 サイクル目に鋼片挿入部の 4 ヶ所で鋼片の浮きを確認した。1～3 サイクル目に亀裂が発生し、5 サイクル目には亀裂が板厚方向に貫通し、幅方向へ進展した。

フランジ側では 2～3 サイクル目に亀裂が発生したものの、板厚方向への貫通には至らず幅方向でも最大 8mm の進展に留まる。

破断位置は上フランジの東ダイアフラム側の溶接部で、+2 サイクル目に亀裂が発生した。+5 サイクル目には亀裂が板厚方向に貫通するとともに幅方向にも亀裂が進展した。さらに載荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の+8 サイクル目には 15mm に達した後に、+9 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.27 実験経過記録 (L-SH-8-16)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1							浮19								浮14.5		
+2		白い線					亀5.5	1.0		白い線					17		
+3	白い線	亀5		0.2			8	1.5		亀7		0.35			亀2	1	
+4	↓	↓		↓		亀2	10	2.0	亀2	↓		0.4			↓	↓	
+5	↓	↓		0.3	2.5	貫通		↓	↓	9		0.45		亀裂 4.5※1	3.5	↓	※1
+6	↓	↓		↓	7.5	↓		2.5	6	↓		↓		↓	↓	↓	
+7	↓	↓		↓	12.5	↓		2.75	8	↓		0.5		5.5※1	↓	↓	※1
+8	↓	↓		↓	15	↓		3.0	↓	↓		↓		※2	10.5	↓	※2
+9					破断												

※1：板厚中間部から亀裂発生

※2：初層・表層からの亀裂と繋がる

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1							浮12 亀裂	1							浮17 亀3	1	
-2		白い線			白い線		1	↓		白い線					4	↓	
-3		亀裂 5※1			↓		2	↓		亀裂 4.5※1					5	1.5	※1
-4		↓			↓	亀3.5	↓	↓		↓			亀2	亀4	10	2	
-5		↓			亀裂	↓	4	↓		7.5※2			6	貫通		↓	※2
-6	亀3	↓		0.25	↓	↓	↓	↓		↓		0.15	8		↓	↓	
-7	↓	↓		↓	↓	↓	8.5	1.5		↓		↓	11		↓	2.5	
-8	8	↓		↓	↓	↓	15	↓		↓		↓	13.5		↓	↓	

※1：板厚中間部から亀裂発生

※2：初層・表層からの亀裂と繋がる



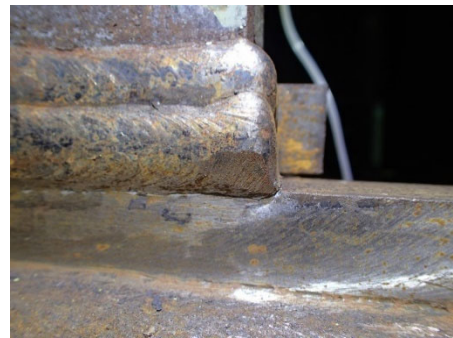
(a)+1 サイクル<浮き発生>
(東ダイアフラム側)



(b)+2 サイクル<亀裂発生>
(東ダイアフラム側)



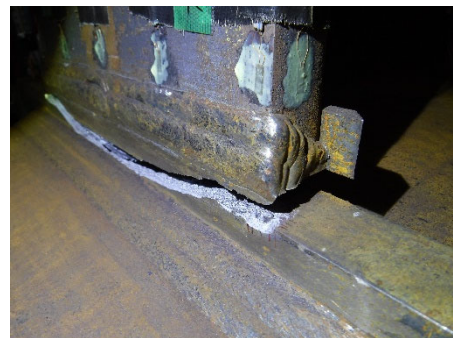
(c)+5 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



(d)+5 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



(e)+9 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)



(f)+9 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(g)+9 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)

写真 2.25 実験経過状況 (L-SH-8-16 の上フランジ)

L-SH-8-24

ダイアフラム側では、±1 サイクル目に鋼片挿入部の 4 ヶ所で鋼片の浮きを確認した。 -1 サイクル目には、ダイアフラム側の板厚方向および幅方向に亀裂が発生した。

破断位置は上フランジのダイアフラム側の溶接部で、+2 サイクル目に破断した。脆性破面は、幅方向に東側で 47mm、西側で 95mm 進展して、ダイアフラムと柱の溶接部付近まで進展した。

表 2.28 実験経過記録 (L-SH-8-24)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層	初層			表層	初層			表層	初層			表層	初層		
		[mm]	[mm]			[mm]	[mm]			[mm]	[mm]			[mm]	[mm]		
+1							浮19	1							浮23	1	
+2					47	破断							95	破断			※1

※1：破断時

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1						亀2	浮23 亀2.5	1.75		白い線			亀2		浮22 亀1.5	1.5	



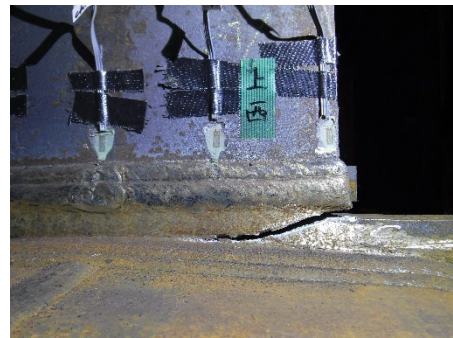
(a)+1 サイクル<浮き発生>
(東ダイアフラム側)



(b)+1 サイクル<浮き発生>
(西ダイアフラム側)



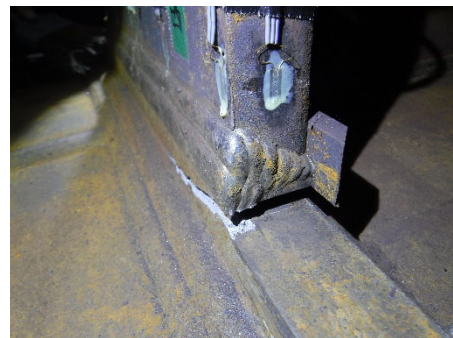
(c)+2 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(d)+2 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)



(e)+2 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(f)+2 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)



(g)+2 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)

写真 2.26 実験経過状況 (L-SH-8-24 の上フランジ)

L-SH-8-31

L-SH-8-24 が 2 サイクル目に破断したため、 θ_p ごとに载荷を止めて観察を行った。

2 サイクル目までにダイアフラム側の鋼片挿入部の 4 ヶ所で亀裂が板厚方向に貫通し、幅方向にも亀裂が発生した。载荷を繰返すことで、亀裂が進展し破断に至った。

破断位置は上フランジの東ダイアフラム側の溶接部で、+2 サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通して幅方向にも進展した。さらに载荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の+3 サイクル目には 26mm に達した後に、+4 サイクル目に破断した。

表 2.29 実験経過記録 (L-SH-8-31)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1 10p							浮き 29								浮き 25		
+1 20p							↓	0.5							30.5	0.5	
+1 30p							↓	1.25					亀裂 13	貫通		1.25	
+2 10p					亀裂 13	貫通		0.5					16	↓		0.5	※1
+2 20p					25	↓		2.0					19	↓		1.0	
+2 30p					26	↓		3.0					↓	↓		1.25	
+3 10p					↓	↓		1.5					↓	↓		0.75	
+3 20p					↓	↓		2.5					↓	↓		1.25	
+3 30p					↓	↓		3.5					↓	↓		1.5	
+4					破断												

※1：破断音発生

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向	板厚方向		開口 変位	幅 方向	板厚方向		開口 変位	幅 方向	板厚方向		開口 変位	幅 方向	板厚方向		開口 変位	
		表層	初層			表層	初層			表層	初層			表層	初層		
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
-1 10p							浮き 30	1.0						亀裂 4.5	貫通	0.5	
-1 20p					亀裂 14	貫通		1.75						↓	↓	1.0	
-1 30p					16	↓		2.0						11	↓	1.5	
-2 10p					↓	↓		1.5						15	↓	0.75	
-2 20p					↓	↓		2.0						16	↓	1.25	
-2 30p					17	↓		2.5						↓	↓	1.75	
-3 10p					↓	↓		1.75						↓	↓	1.0	
-3 20p					↓	↓		2.0						↓	↓	1.75	
-3 30p					19	↓		2.75						↓	↓	2.0	



(a)+1 サイクル<鋼片部浮き>
(東ダイアフラム側)



(b)+2 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



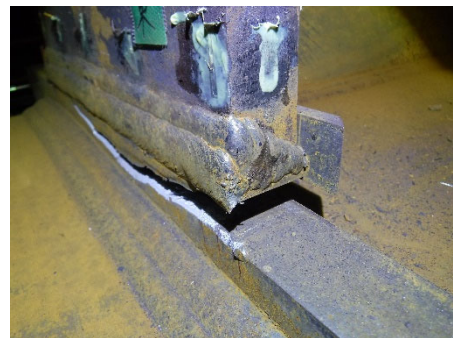
(c)+4 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)



(d)+4 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(e)+4 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)



(f)+4 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)

写真 2.27 実験経過状況 (L-SH-8-31 の上フランジ)

L-SH-24-8

ダイアフラム側では、±1 サイクル目に鋼片挿入部の 4 ヶ所で鋼片の浮きを確認した。ダイアフラム側の亀裂発生は早いものの、フランジ側にも亀裂は発生したことで、ダイアフラム側の亀裂進展が緩やかとなった。

破断位置は下フランジの東ダイアフラム側の溶接部で、-2 サイクル目に亀裂が発生した。-5 サイクル目には亀裂が板厚方向に貫通し、-8 サイクル目には亀裂が幅方向に進展した。さらに載荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の-10 サイクル目には 39mm に達した後に、-11 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.30 実験経過記録 (L-SH-24-8)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイヤフラム				西側フランジ				西側ダイヤフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1							浮4								浮14		
+2							↓			白い線					浮16 亀裂	1.0	
+3		亀2					7	1.5※1		↓					6	↓	
+4	亀6	↓					8	↓	3	亀7		0.3			10	↓	
+5	↓	3.5		0.6			↓	↓	9	9		0.4			13	1.5	
+6	9	7		0.7			↓	↓	16	↓		0.45			14	1.75	
+7	↓	9		0.8			↓	↓	↓	↓		0.5			↓	2.0	
+8	↓	↓		↓			↓	↓	26	↓		0.55			↓	↓	
+9	↓	↓		↓			↓	↓	↓	↓		↓			↓	↓	
+10	17	↓		0.85			↓	↓	37	↓		↓			↓	2.5	
+11	19	↓		↓			↓	↓	49	↓		↓	亀3	貫通		↓	

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイヤフラム				西側フランジ				西側ダイヤフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1		白い線					浮13			白い線					浮き	浮5.5	
-2		↓					亀3.5	1.0	亀2	亀6					8	7	
-3	亀6	亀裂					7	1.5	5	8		0.4			↓	亀1	
-4	↓	5				亀5	11	↓	↓	10		0.45			↓	2	
-5	↓	↓		0.35		貫通		2.0	↓	↓	白い線	↓			↓	2.5	0.5
-6	↓	↓		↓		↓		↓	10	↓		↓			亀2	↓	↓
-7	↓	↓		↓		↓		↓	14	↓	↓	↓			↓	3.5	↓
-8	↓	↓		↓	亀7	↓		3.0	↓	11	↓	↓			↓	↓	↓
-9	↓	↓		↓	20	↓		5.0	↓	↓	↓	↓			↓	↓	↓
-10	↓	↓		↓	39	↓		7.0	↓	↓	↓	↓			↓	↓	↓
-11					破断												

※1：東側ダイアフラムに絞り発生



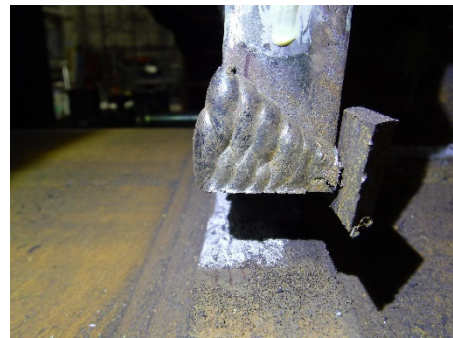
(a)-1 サイクル<浮き発生>
(東ダイアフラム側)



(b)-2 サイクル<亀裂発生>
(東ダイアフラム側)



(c)-5 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



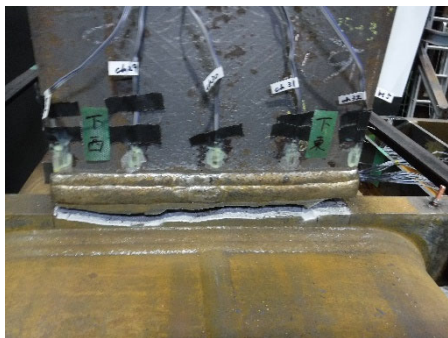
(d)-11 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(e)-11 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)



(f)-11 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(g)-11 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)

写真 2.28 実験経過状況 (L-SH-24-8 の下フランジ)

L-FH-0-0

ダイアフラム側では、+7～-11 サイクル目に亀裂が発生した。最も亀裂が進展した上フランジの西ダイアフラム側の溶接部で板厚方向に 30mm の亀裂が進展したものの板厚貫通までは至っていない。

破断位置は上フランジの東フランジ側の溶接部で、+7 サイクル目に亀裂が発生した。+13 サイクル目には亀裂が幅方向にも進展し、+14 サイクル目には亀裂が板厚方向に貫通した。さらに载荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の+20 サイクル目には 112mm に達した後に、+21 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.31 実験経過記録 (L-FH-0-0)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]						
+1		白い線															
+2		↓								白い線							
+3		↓								↓	白い線						
+4		↓								↓	亀2						
+5		↓								亀4	↓						
+6		↓								↓	8.5	表層					
+7		亀1								↓	↓	0.35		亀11※1		※1	
+8		↓				亀9				↓	↓	↓		↓			
+9		6	亀4			↓				↓	13	↓		12			
+10		↓	↓			14				↓	↓	↓		13			
+11		↓	↓		亀3	↓				↓	↓	0.4		14			
+12		↓	↓			17				↓	↓	↓		18※2		※2	
+13	亀1	↓	20	0.45	↓	↓				↓	↓	0.45	亀1	↓			
+14	6	貫通	1.8		↓	↓				↓	↓	↓	↓	22			
+15	9			2.0	↓	↓				↓	↓	↓	↓	↓			
+16	15	↓		2.5	↓	↓				4.5	↓	↓	↓	25			
+17	19	↓		↓	↓	↓				↓	↓	↓	↓	↓			
+18	20	↓		3.5	↓	↓				↓	↓	0.4	↓	30			
+19	50	↓		7.0	↓	↓				↓	↓	0.25	↓	↓			
+20	112	↓		16.0	↓	↓				↓	↓	0.2	↓	↓			
+21	破断																

※1：板厚中間部から亀裂発生

※2：初層・表層からの亀裂と繋がる

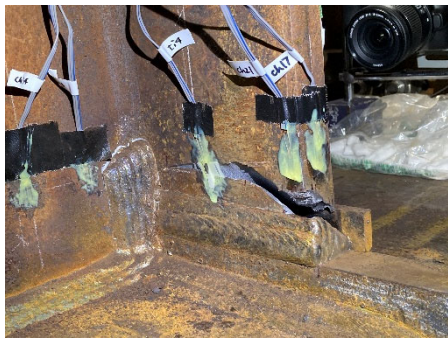
下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1		白い線								白い線							
-2		↓								↓	白い線						
-3		↓								↓	亀4						
-4		↓								↓		表層					
-5		↓								亀8	10	0.3					
-6		↓								↓	14	↓					
-7		亀6		0.2		白い線				↓	18	0.35		白い線			
-8		↓	亀6	↓		亀2				↓	↓	↓		↓			
-9		9.5	↓	0.25		↓			亀2.5	9.5	↓	0.4		↓			
-10		↓	↓	↓		↓			↓	貫通	↓	↓		↓			
-11		↓	↓	0.3		↓			3.5	↓	↓	0.45		亀10			
-12		12	↓	↓		↓				↓	↓	↓		↓			
-13		↓	↓	↓		↓				↓	↓	0.55		↓			
-14		↓	11	0.35		↓				↓	↓	↓		↓			
-15		↓	↓	↓		↓				↓	↓	↓		13			
-16		↓	↓	↓		10				8	↓	0.6		18			
-17	亀1	↓	↓	↓		13				9	↓	↓		↓			
-18	↓	14	↓	↓		19				↓	↓	0.7		↓			
-19	↓	↓	↓	↓		↓				12	↓	1.3		↓			
-20	↓	↓	↓	↓		↓				16	↓	3.0		21			



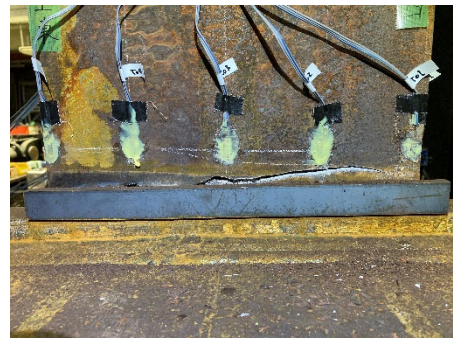
(a)+7 サイクル<亀裂発生>
(東フランジ側)



(b)+14 サイクル<板厚貫通>
(東フランジ側)



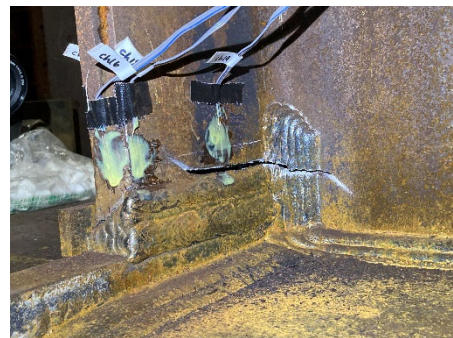
(c)+20 サイクル<破断前のピーク>
(東フランジ側)



(d)+21 サイクル<破断>
(フランジ側)



(e)+21 サイクル<破断>
(東フランジ側)



(f)+21 サイクル<破断>
(西フランジ側)

写真 2.29 実験経過状況 (L-FH-0-0)

L-FH-8-8

フランジ側では、下フランジ側で板厚方向に亀裂が3～4mm発生したものの大きくは進展していない。

ダイアフラム側では、±1 サイクル目に鋼片挿入部の4ヶ所で鋼片の浮きを確認した。4ヶ所全ての溶接部で2～3 サイクル目に板厚方向に亀裂が発生し、-6～+13 サイクル目に3ヶ所の溶接部では板厚貫通した。

破断位置は上フランジの西ダイアフラム側の溶接部で、+2 サイクル目に亀裂が発生した。+8 サイクル目には亀裂が板厚方向に貫通するとともに幅方向にも進展した。さらに载荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の+15 サイクル目には39mmに達した後に、+16 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.32 実験経過記録 (L-FH-8-8)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1							浮9								浮9		
+2							10								亀4		
+3							亀1	1.0		白い線					9	1.0	
+4							3	↓		↓					12	↓	
+5		白い線					6	1.5		↓					15	1.5	
+6		↓					↓	↓		↓					19	↓	
+7		↓					7	↓		↓					21	2.0	
+8		↓					10	↓		↓			亀2	貫通		2.5	
+9		↓					20	2.0		↓			6			↓	
+10		↓					21	↓		↓			12	↓		3.0	
+11		↓					↓	↓		↓			16	↓		3.5	※1
+12		↓				亀4	↓	2.5		↓			21	↓		4.0	
+13		↓				8	貫通	↓		↓			26	↓		5.0	※2
+14		↓				10	↓	↓		↓			33	↓		5.5	
+15		↓				13	↓	↓		↓			39	↓		7.0	
+16													破断				

※1：西側フィレット部亀裂発生

※2：東側フィレット部亀裂発生

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1		白い線					浮8.5								浮8		
-2		↓				浮き	亀2.5								亀2.5		
-3		↓					4.5	1.0		白い線					4	2	
-4		↓					8.5	1.5		↓					6	2.5	
-5		亀3		0.25		亀9	10.5	↓		亀4		0.2			8	↓	
-6		↓		↓		貫通		↓		↓		↓			↓	↓	
-7		↓		↓	亀3	↓		2.0		↓		↓			13	↓	
-8		↓		↓	5	↓		2.5		↓		↓			14	↓	
-9		↓		0.2	7	↓		↓		↓		0.15			16	↓	
-10		↓		↓	12	↓		3.0		↓		↓			17	↓	
-11		↓		↓	15	↓		↓		↓		↓			18	↓	
-12		↓		↓	20	↓		4.0		↓		↓			20	↓	
-13		↓		↓	29	↓		5.5		↓		↓			↓	↓	※1,2
-14		↓		↓	39	↓		7.0		↓		↓			↓	↓	
-15	閉				49	↓		8.5	閉						↓	↓	

※1：西側フィレット部亀裂発生

※2：東側フィレット部亀裂発生



(a)+1 サイクル<浮き発生>
(西ダイアフラム側)



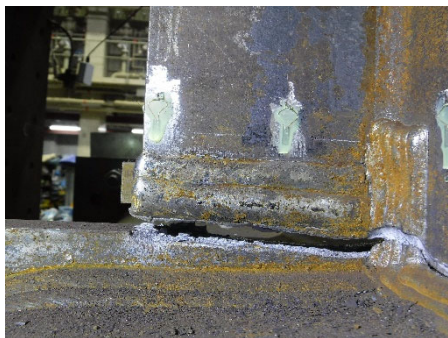
(b)+2 サイクル<亀裂発生>
(西ダイアフラム側)



(c)+8 サイクル<板厚貫通>
(西ダイアフラム側)



(d)+16 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)



(e)+16 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(f)+16 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)



(g)+16 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(h)+16 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)

写真 2.30 実験経過状況 (L-FH-8-8 の上フランジ)

L-FH-8-16

フランジ側では、上フランジの東側のみで板厚方向に亀裂が発生したものの、板厚方向の亀裂長さは5mmで大きくは進展していない。

ダイアフラム側では、±1サイクル目に鋼片挿入部の4ヶ所で鋼片の浮きを確認した。4ヶ所全ての溶接部で2サイクル目に板厚方向に亀裂が発生し、4～6サイクル目に4ヶ所全ての溶接部で板厚貫通した。

破断位置は上フランジの東ダイアフラム側の溶接部で、+2サイクル目に亀裂が発生した。+5サイクル目には亀裂が板厚方向に貫通するとともに幅方向にも進展した。さらに载荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の+9サイクル目には29mmに達した後に、+10サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.33 実験経過記録 (L-FH-8-16)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1							浮14								浮13		
+2						白い線	亀5	0.5							亀9	1.0	
+3		白い線				亀2	9	1.5		白い線					12	1.5	
+4		↓				3.5	13	2.0		↓					14	↓	
+5		↓				亀2	貫通	↓		↓					15	↓	
+6		↓				7	↓	2.5		亀5			亀2	貫通		↓	
+7		↓				14	↓	3.0		↓			5	↓	2.0	※3	
+8		↓				20	↓	4.0	閉				9	↓	↓		
+9		↓				29	↓	5.5					12	↓	↓		
+10					破断												

※1：東側ダイアフラムに絞り発生

※2：西側ダイアフラムに絞り発生

※3：西側フィレット部亀裂発生

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1							浮17									初層	
-2		白い線					亀4	1.0						亀2	亀1	1.0	
-3		↓				亀8	6	1.5						8	4	1.5	
-4		↓				貫通		↓					亀1	貫通		↓	
-5		↓			亀3		↓	↓					2		↓	2.0	
-6		↓			5		↓	↓					4		↓	↓	
-7		↓			7		↓	↓					10.5		↓	2.5	
-8		↓			9		↓	↓					16		↓	3.0	
-9		↓			↓		↓	2.0					24		↓	↓	



(a)+1 サイクル<浮き発生>
(東ダイアフラム側)



(b)+2 サイクル<亀裂発生>
(東ダイアフラム側)



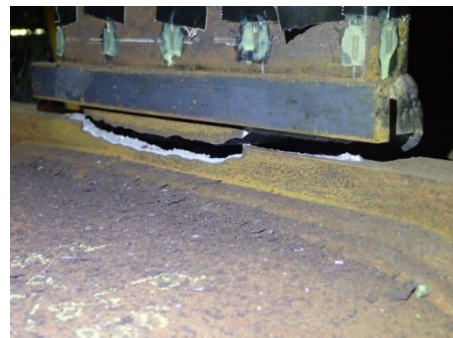
(c)+5 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



(d)+5 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



(e)+10 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(f)+10 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)

写真 2.31 実験経過状況 (L-FH-8-16 の上フランジ)

L-FH-8-24

フランジ側では、亀裂は確認していない。

ダイアフラム側では、±1 サイクル目に鋼片挿入部の 4 ヶ所で鋼片の浮きおよび亀裂を確認した。4 サイクル目までに 4 ヶ所全ての溶接部で亀裂が板厚方向に貫通した。

破断位置は下フランジの東ダイアフラム側の溶接部で、-1 サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通した。-2 サイクル目には亀裂が幅方向にも進展し始めた。さらに载荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の-7 サイクル目には 36mm に達した後に、-8 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.34 実験経過記録 (L-FH-8-24)

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1							浮23 亀0.5	0.5							浮24 亀5	0.5	
+2							↓	1.5							6	1.5	
+3						亀2	2	↓					亀7	貫通		2.0	
+4					亀1.5	貫通		2.0					13	↓		3.0	
+5					5	↓		↓					16	↓		↓	※1
+6					9	↓		↓					18	↓		3.5	
+7					↓	↓		↓					27	↓		4.5	
+8					↓	↓		↓					39	↓		6.0	

※1：西側フィレット部亀裂発生

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイヤフラム				西側フランジ				西側ダイヤフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1						貫通		1.5						亀1.5	浮22 亀7	1.5	※2 ※3
-2					亀11	↓		2.0					亀1.5	貫通		2.0	
-3					15	↓		3.0					4	↓		↓	
-4					20	↓		↓					8	↓		↓	
-5					24	↓		4.0					9	↓		↓	
-6					29	↓		5.0					10	↓		↓	
-7					36	↓		6.5					13	↓		↓	
-8					破断												

※2：東側ダイアフラムに絞り発生

※3：西側ダイアフラムに絞り発生



(a)-1 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



(b)-1 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



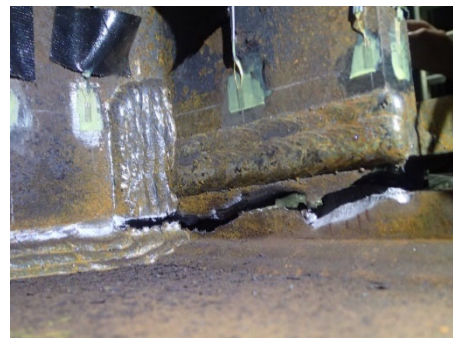
(c)-2 サイクル<幅方向亀裂>
(東ダイアフラム側)



(d)-2 サイクル<幅方向亀裂>
(東ダイアフラム側)



(e)-8 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)



(f)-8 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)

写真 2. 32 実験経過状況 (L-FH-8-24 の下フランジ)

破断位置は上フランジのダイアフラム側の溶接部で，1 サイクル目载荷中に破断した．脆性破面は，幅方向に東側で 15mm，西側で 91mm 進展して，ダイアフラムと柱の溶接部付近まで進展した．

表 2. 35 実験経過記録（L-FH-8-31）

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層	初層			表層	初層			表層	初層			表層	初層		
		[mm]	[mm]			[mm]	[mm]			[mm]	[mm]			[mm]	[mm]		
+1					亀15	破断		2					亀91	破断		8.5	※1

※1：1サイクル目のピークに達する前に破断（記録は破断時のもの）



(a)+1 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(b)+1 サイクル<破断>
(東ダイアフラム側)



(c)+1 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)



(d)+1 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)

写真 2. 33 実験経過状況 (L-FH-8-31)

L-FH-24-8

フランジ側では、4～5 サイクル目に 3 ヶ所の溶接部で板厚方向に亀裂が発生したものの、大きくは進展していない。ダイアフラム側での亀裂が進展するにつれて、フランジ側の亀裂は閉じて確認できなくなった。

ダイアフラム側では、±1 サイクル目に鋼片挿入部の 4 ヶ所で鋼片の浮きを確認した。3 サイクル目までに 4 ヶ所全ての溶接部で亀裂が発生し、7～8 サイクル目に 4 ヶ所全ての溶接部で亀裂が板厚方向に貫通した。

破断位置は上フランジのダイアフラム側の溶接部（東西両側）で、+1 サイクル目に東側で、+2 サイクル目に西側で亀裂が板厚方向に発生した。+7 サイクル目に亀裂が板厚方向に貫通し、+8 サイクル目には亀裂が幅方向にも進展し始めた。さらに载荷を繰返すことで幅方向の亀裂が進展し、破断前の+11 サイクル目には 25mm に達した後に、+12 サイクル目に全幅に渡り破断した。

表 2.36 実験経過記録（L-FH-24-8）

上フランジ（正載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
+1							浮7	0.5							浮8	0.5	
+2		白い線					亀1	1.0		白い線					9	1.0	
+3		↓					3	1.5		↓					亀5	↓	
+4		↓					8	↓		↓				亀2	7	↓	
+5	亀4	亀6		0.25			16	2.0		亀3				3	8	1.5	
+6	↓	↓		↓			19	2.5		↓				↓	14	↓	
+7	↓	↓		0.2			貫通	3.0		↓				貫通		2.0	※1
+8	↓	↓		0.1	亀7		↓	3.5	閉				亀3		↓	2.5	
+9	閉				10		↓	4.0					8		↓	3.0	
+10					20		↓	4.5					17		↓	4.0	
+11					25		↓	5.0					25		↓	↓	
+12					破断								破断				

※1：西側フィレット部亀裂発生

下フランジ（負載荷時に引張を受ける側）																	
N	東側フランジ				東側ダイアフラム				西側フランジ				西側ダイアフラム				備考
	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	幅 方向 [mm]	板厚方向		開口 変位 [mm]	
		表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]			表層 [mm]	初層 [mm]		
-1							浮9	1.0							浮8	0.5	
-2		白い線					亀3	1.5							亀1	1.0	
-3		↓					5	↓						亀1.5	3	1.5	
-4		亀7		0.25			8	↓						4	8	↓	
-5		↓	亀5	0.35		亀2	9	↓					亀2	7	↓	↓	
-6		↓	10	0.25		3	19	2.0		白い線			↓	13	9	2.0	
-7		↓	↓	↓		↓	↓	2.5		↓			↓	貫通		↓	
-8		↓	↓	↓			貫通	3.0		↓			↓	↓		↓	
-9		↓	↓	↓		亀3	↓	↓		↓			↓	↓		2.5	
-10		閉				8	↓	3.5		↓			5	↓	↓	3.0	
-11		↓				13	↓	4.0		↓			↓	↓		↓	※2

※2：東側フィレット部亀裂発生



(a)+2 サイクル<亀裂発生>
(東ダイアフラム側)



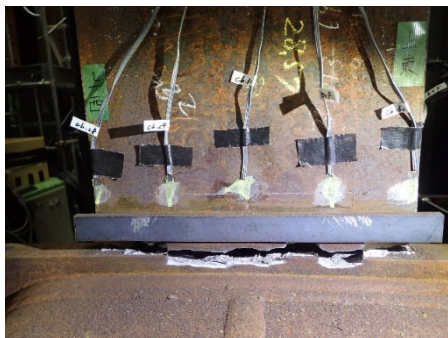
(b)+3 サイクル<亀裂発生>
(西ダイアフラム側)



(c)+7 サイクル<板厚貫通>
(東ダイアフラム側)



(d)+7 サイクル<板厚貫通>
(西ダイアフラム側)



(e)+12 サイクル<破断>
(ダイアフラム側)



(f)+12 サイクル<破断>
(西ダイアフラム側)

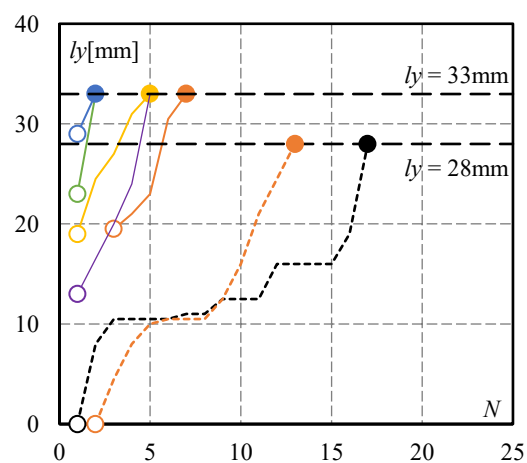
写真 2.34 実験経過状況 (L-FH-24-8)

5) 亀裂進展状況

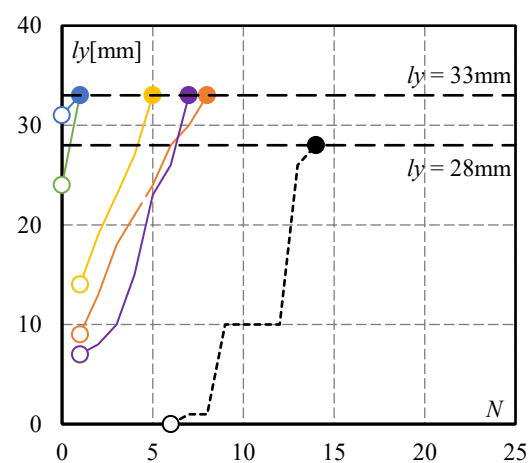
フランジ端部の溶接部に対して、サイクル毎に目視で亀裂を確認し、定規で亀裂長さを計測した。各試験体の亀裂進展状況を図 2.37 に、亀裂寸法の計測位置を図 2.38 に示す。図中の l_x および l_y は、それぞれ、最終層側のフランジの幅方向の亀裂長さおよびフランジ幅両端部における溶接始末端部でのフランジの板厚方向の亀裂長さ（欠陥高さを含む値）を表し、 N はサイクル数を表す。 l_y のグラフ内の○（白抜き）は亀裂発生時を示し、●（塗り潰し）は亀裂の板厚貫通時を示す。板厚貫通時の l_y は、無欠陥の場合ではフランジ厚 16mm とし、欠陥有りの場合ではダイアフラムまでの高さ 32mm に余盛 1mm を加えた 33mm とする。なお、図中の値は、4 か所ある溶接始末端のうち、破壊を支配した亀裂に関するものである。ただし、欠陥を有する試験体の中で欠陥より破壊していない L-SH-8-8 については、欠陥を作成しているダイアフラム側の亀裂で最も進展した位置の結果も併せて示している。また、破断した試験体の l_x については、破断から 1 サイクル前までの記録を示す。

フランジの板厚方向の亀裂進展に関しては、ダイアフラム側およびフランジ側でそれぞれ同じ側に発生した試験体の挙動は概ね同様の傾向である。板厚貫通するまでに要するサイクル数は欠陥高さが大きいほど早く、欠陥高さ 16mm 以上の高さ方向に大きい欠陥を有する試験体では、無欠陥試験体の半分以下のサイクル数となっている。また、欠陥長さの影響よりも欠陥高さの影響が大きい。

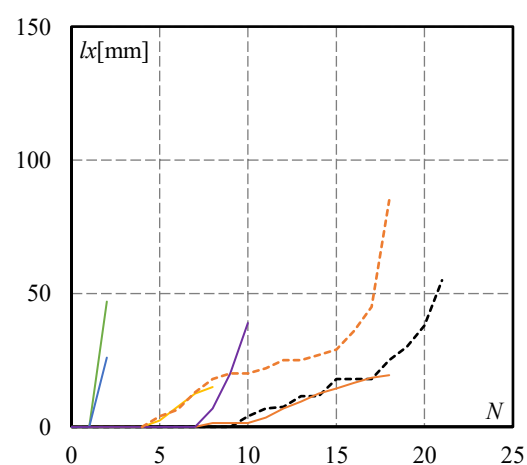
フランジの幅方向の亀裂進展に関しては、L-SH シリーズの L-SH-0-0 では 55mm、L-SH-8-8 では 85mm 延性亀裂が進展した後に破断に至る。さらに大きな欠陥を有する試験体では、延性亀裂の進展は 40mm 以下で破断に至る。一方、L-FH シリーズの L-FH-0-0 では 112mm 延性亀裂が進展した後に破断に至る。欠陥を有する試験体では、延性亀裂の進展は 40mm 以下で破断に至る。



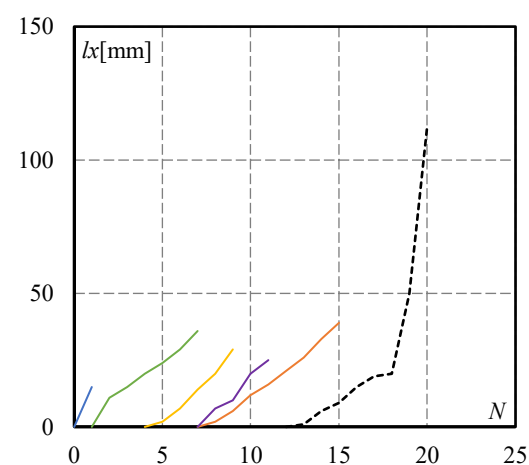
(a)L-SH シリーズ (フランジの板厚方向)



(b)L-FH シリーズ (フランジの板厚方向)



(c)L-SH シリーズ (フランジの幅方向)



(d)L-FH シリーズ (フランジの幅方向)

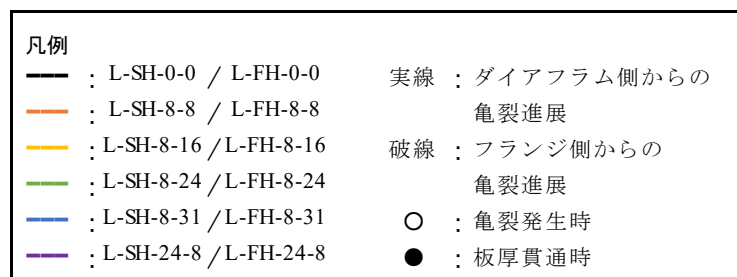
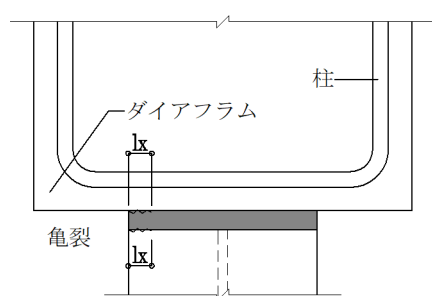
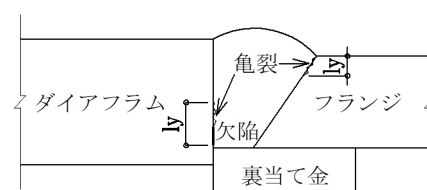


図 2.37 亀裂進展状況



(a)フランジの幅方向



(b)フランジの板厚方向

図 2.38 亀裂寸法計測位置

6) 塑性変形能力

各試験体の累積塑性変形倍率 η を図 2.39 に示す。各試験体の棒グラフは、亀裂発生、板厚貫通および終局に至るまでで分割して示している。いずれの試験体でも破断の起点となった位置の記録（無欠陥試験体と L-SH-8-8 はフランジ側、その他の欠陥を有する試験体はダイアフラム側）を示しているが、L-SH-8-8 のみ破断起点では無いダイアフラム側での板厚貫通時点の η についても併せて追記する。

亀裂発生および板厚貫通に注目すると、無欠陥の試験体に比べて、欠陥を有する試験体では亀裂の板厚貫通および最終破断の η は低下している。概ね欠陥高さ・長さが大きいほど η が低下する傾向がある。特に、欠陥高さが 16mm 以上の試験体では η が大きく低下し、無欠陥試験体の η の 1/2 以下となっている。

開先形状の違いによる比較を行う。無欠陥の試験体および欠陥高さ 8mm の試験体では、L-SH シリーズに比べて L-FH シリーズの η は減少している。破壊形式について比較すると、無欠陥および L-SH-8-8 ではフランジ側より破断しており、L-FH-8-8 では欠陥部分のダイアフラム側から破断している。一般に現場溶接形式の欠陥は、工場溶接形式の欠陥に比べて塑性変形能力を低下させることが知られており^{5)~7)}、本実験でも欠陥寸法の小さい欠陥高さ 8mm の試験体ではこの傾向と一致している。欠陥高さ 16mm および欠陥長さ 24mm の試験体では、L-FH シリーズと L-SH シリーズの η は同程度である。欠陥高さ 24mm および 31mm の試験体では、開先形状の違いによる影響よりも欠陥の大きさが破壊に与える影響が支配的で、開先形状による違いが現れなかったものとする。なお、破断時期が極めて早い L-SH-8-24 および L-FH-8-31 については、破断前に板厚貫通が確認できずに、破断している。

延性亀裂の進展は安定した現象であり、脆性破断は不安定でばらつきが大きい現象である。本論文では、安定して亀裂が進展する板厚貫通時までの塑性変形能力を対象として検討する。即ち、溶接部の破壊靱性が不十分な場合や、板厚貫通前に脆性破断するような場合は対象外とする。

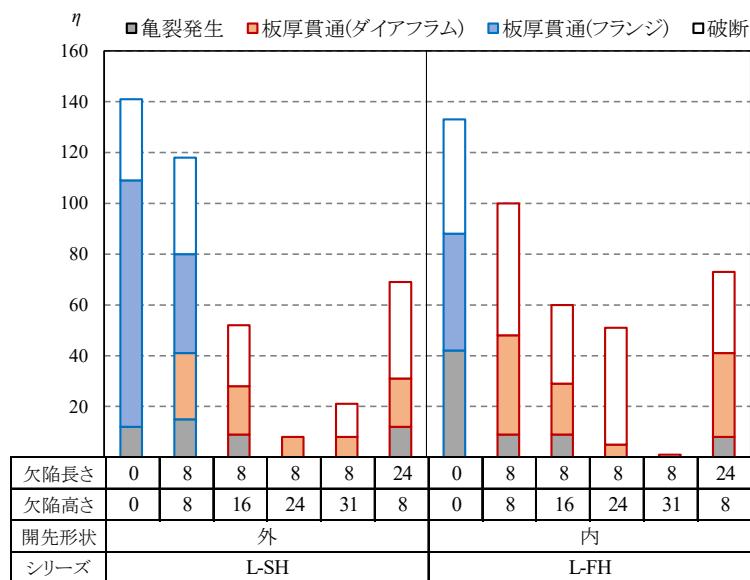


図 2.39 累積塑性変形倍率

さらに、板厚貫通までの累積塑性変形倍率 η_d 、板厚貫通から破断までの累積塑性変形倍率 η_{u-d} について断面シリーズ間の比較を行い図 2.40 に示す。同一開先形状の中型断面シリーズと大型断面シリーズの対応する 2 体の試験体を各プロットで示す。例えば、中型断面シリーズの 5-10 の結果を横軸にとり、大型断面シリーズの 8-16 の結果を縦軸にとったプロットで示す。図中には η_d (中型) = η_d (大型) および η_{u-d} (中型) = η_{u-d} (大型) の直線を示している。中型 = 大型の直線上に分布する場合には、中型断面シリーズと大型断面シリーズの差が無く、寸法効果の影響が無いことを示す。中型 > 大型となる直線の右下に分布して直線から離れるほど寸法効果の影響が懸念されることを示す。大型断面で早期に脆性破断が生じた欠陥高さが大きい試験体（欠陥高さ：中型/大型 = 15/24, 19/31 で図 2.40 中の破線に囲まれたプロット）を除いて比較すると、 η_d は最も差が大きい場合でも η_d (FH-5-10) = 39, η_d (L-FH-8-16) = 29 より大型 / 中型 $\approx 75\%$ に留まり、 η_{u-d} では最も差が大きい場合で η_{u-d} (SH-5-10) = 83, η_{u-d} (L-SH-8-16) = 24 より大型 / 中型 $\approx 29\%$ まで低下している。 η_d についてはシリーズ間の差は小さく、寸法効果の影響がほとんど見られない。一方、 η_{u-d} については、全体的にグラフの右下にプロットされており、板厚貫通から破断までは脆性破壊を伴うものであり、寸法効果の影響が表れている。なお、外開先の 15-5/24-8 および内開先の無欠陥については、 η_{u-d} が大型断面シリーズの方が大きい。終局までの累積塑性変形倍率 η を比較すると、多くの試験体は η (中型) > η (大型) であるが、この 2 組の試験体および外開先の無欠陥の 3 組については、 η (大型) > η (中型) であり、実験結果のばらつきによるものと考えられる。

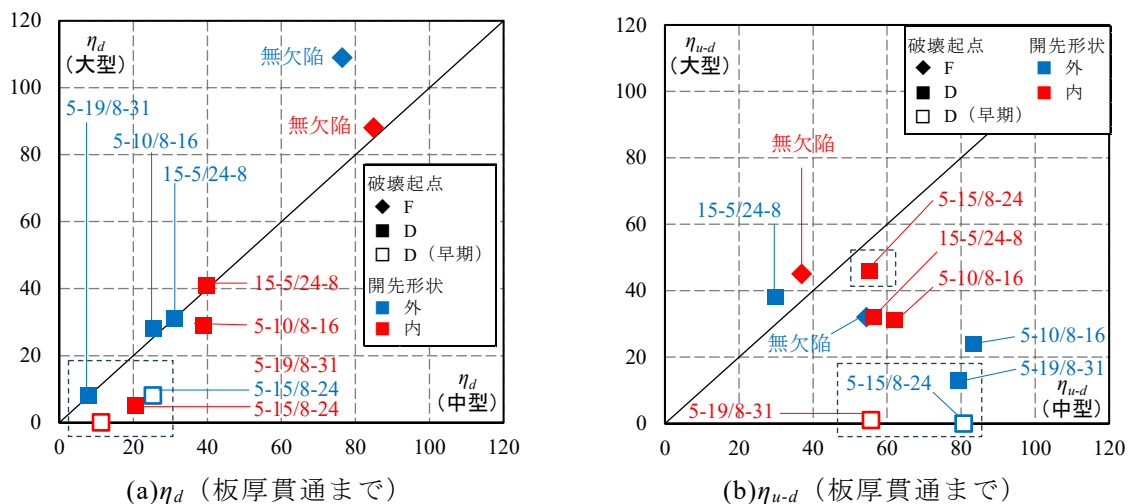


図 2.40 断面シリーズ間の累積塑性変形倍率の比較

7) 欠陥寸法の実測値

実験後の試験体の破断面を観察することで、欠陥長さおよび欠陥高さの実測寸法を計測した。各試験体の欠陥寸法の実測値と事前に実施した UT 法および PAUT 法による欠陥寸法を表 2.37 に示す。L-SH-8-8 については、最終破断状況から作成した欠陥を観察出来なかったため実測寸法を掲載していない。

UT 法および PAUT 法による計測結果と実測寸法の比較を図 2.41 に示す。欠陥長さの評価については、図 2.41 (a)より UT 法および PAUT 法ともに検査結果が実欠陥寸法よりも全体的に大きめに評価しているものの、欠陥の実寸法を概ね良好に評価している。図 2.41 (b)の PAUT 法の検査により、UT 法の検査では測定が困難な欠陥高さを良好に測定できることが分かる。

各試験体の破断面における欠陥部の写真を写真 2.35～写真 2.43 に示す。

表 2.37 欠陥寸法

シリーズ	試験体名	略称	実測寸法		PAUT法	UT法
			長さ[mm]	高さ[mm]	高さ[mm]	長さ[mm]
L-SH	L-SH-8-8	LS8	—	—	9.0	15.0
	L-SH-8-16	LS16	10.0	16.0	17.0	15.0
	L-SH-8-24	LS24	10.0	24.0	17.5	12.0
	L-SH-8-31	LS31	10.0	27.0	31.7	26.0
	L-SH-24-8	LS	28.0	9.0	9.6	28.0
L-FH	L-FH-8-8	LF8	11.0	8.0	9.4	12.0
	L-FH-8-16	LF16	12.0	16.0	14.7	25.0
	L-FH-8-24	LF24	13.0	25.0	14.0	19.0
	L-FH-8-31	LF31	11.0	31.0	33.9	15.0
	L-FH-24-8	LF	27.0	9.0	8.8	35.0

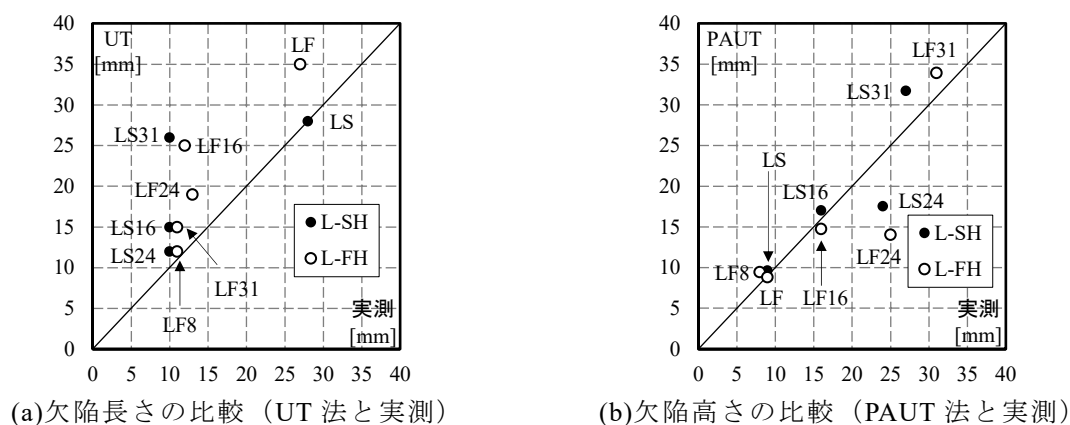


図 2.41 UT, PAUT 検査と実測寸法の比較

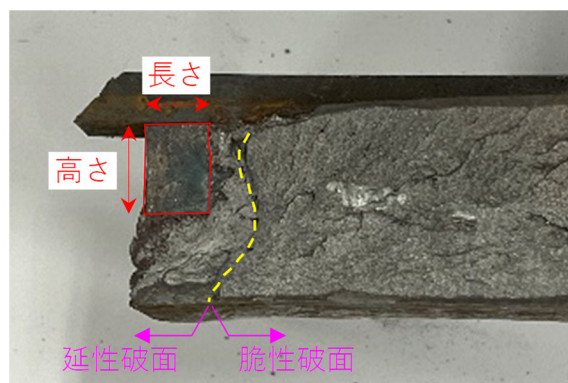


写真 2.35 L-SH-8-16（上東ダイアフラム）

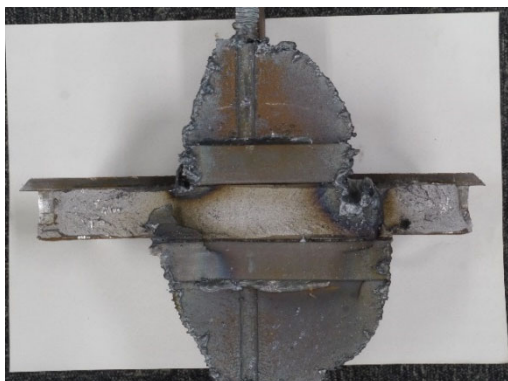


写真 2.36 L-SH-8-24 (上西ダイアフラム)

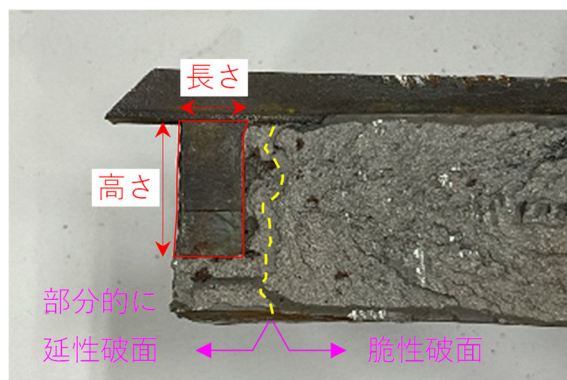


写真 2.37 L-SH-8-31 (上東ダイアフラム)

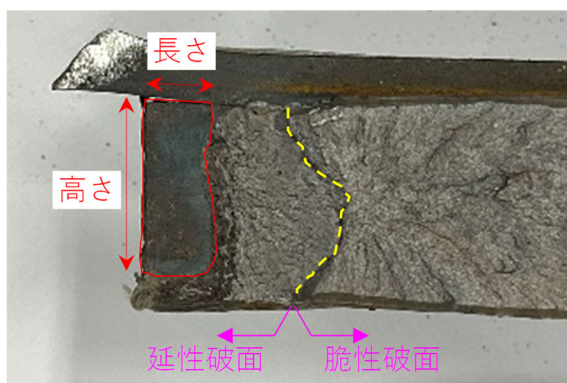


写真 2.38 L-SH-24-8 (下東ダイアフラム)

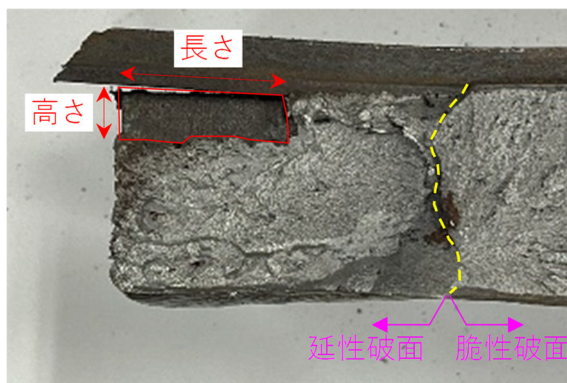
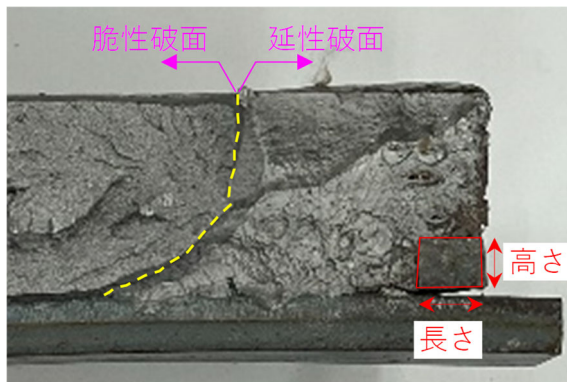


写真 2.39 L-FH-8-8 (上西ダイアフラム)



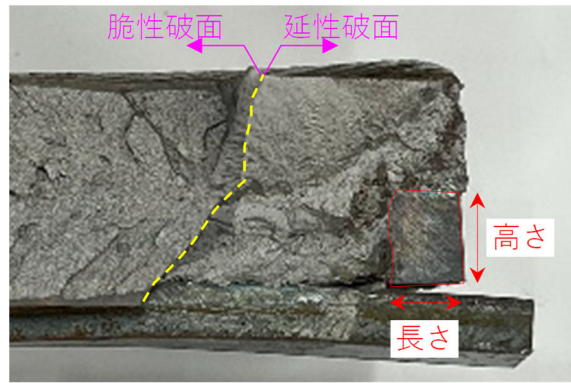


写真 2. 40 L-FH-8-16 (上東ダイアフラム)

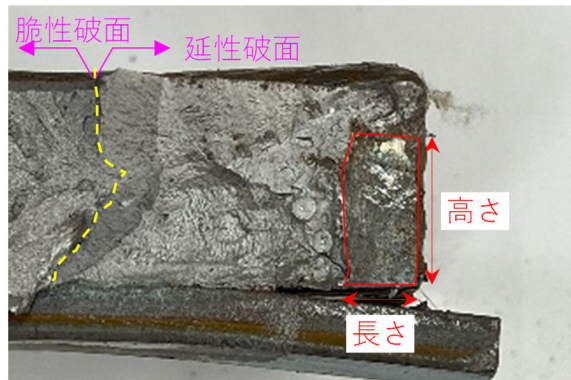


写真 2. 41 L-FH-8-24 (下東ダイアフラム)

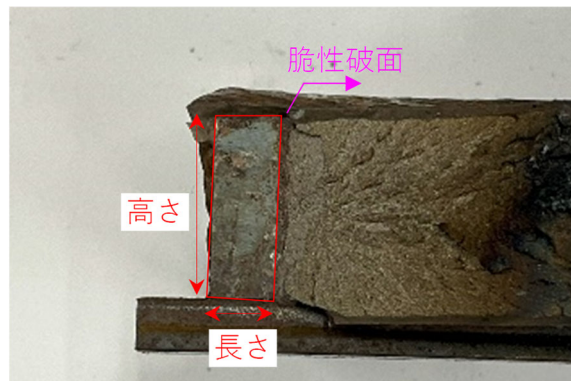


写真 2. 42 L-FH-8-31 (上西ダイアフラム)

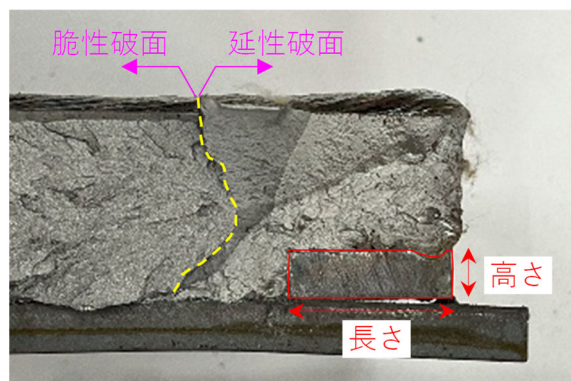


写真 2. 43 L-FH-24-8 (上西ダイアフラム)

2.4 まとめ

柱梁接合部において、梁端溶接部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に与える影響を調べるために、開先形状（工場溶接形式、現場溶接形式）、欠陥寸法（欠陥高さ、欠陥長さ）および寸法比（中型断面、大型断面）を因子として、計 24 体の実大載荷実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) フェーズドアレイ超音波探傷検査法により、通常の超音波探傷検査法では測定が困難な欠陥高さを良好に測定できる。
- (2) 溶接欠陥寸法が高さ方向に大きい場合、初亀裂および亀裂の板厚貫通が早期に発生した。
- (3) 溶接欠陥は亀裂発生から板厚を貫通するまでの延性亀裂の進展に大きい影響を与え、その影響は欠陥長さよりも欠陥高さによる影響が大きい。
- (4) 早期に脆性破断が生じた欠陥高さが大きい試験体（欠陥高さ：中型/大型＝15/24，19/31）を除いて、断面シリーズ間で比較した。大型断面シリーズの延性亀裂による板厚貫通までの η_d は 75% までの低下に留まり、板厚貫通時点まででは寸法効果の影響は小さい。一方、脆性破壊を伴うこともある板厚貫通から破断までの η_{u-d} は 29% まで低下しており、板厚貫通から破断までには寸法効果の影響が大きい。

参考文献

- 2.1) 藤本盛久，中込忠男，泉満：欠陥を有する溶接部の変形能力に関する研究その 3 単純引張試験における欠陥寸法および板幅の影響と非線形破壊力学的考察，日本建築学会論文報告集，第 328 号，pp.71-82，1983
- 2.2) 鈴木孝彦，石井匠，森田耕次，高梨晃一：欠陥を有する柱梁溶接接合部の破断性状に関する実験的研究，鋼構造論文集，第 6 巻第 23 号，pp.149-164，1999
- 2.3) 中込忠男，服部和徳，市川祐一，的場耕，岩田衛：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，日本建築学会構造系論文集，第 67 巻，第 556 号，pp.145-150，2002
- 2.4) 吉村鉄也，田渕基嗣，田中剛，安井一浩：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 3・4，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.673-676，2002.8
- 2.5) 高柳翔太，中込忠男，服部和徳，崎野良比呂他 3 名：欠陥を有する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・2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.667-670，2009
- 2.6) 田中剛，田渕基嗣：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
- 2.7) 上田遼，田中剛，吹田啓一郎，津嘉田敬章，山根正寛：場溶接形式の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響，日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集，第 19 巻，pp.171-178，2011
- 2.8) 大家直也，川畑友弥，吉敷祥一，中込忠男：柱梁接合部の脆性破断評価における縮小試験体使用の課題，日本建築学会構造系論文集，第 87 巻，第 791 号，pp.9-19，2022
- 2.9) 高塚康平，吹田啓一郎，田中剛，梅田敏弘：梁断面寸法と接合詳細が変形能力に及ぼす影響－塑性歪履歴を受ける鋼構造柱梁溶接接合部の変形能力その 4－，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 696 号，pp.315-321，2014

第3章 有限要素数値解析

3.1 はじめに

本章では、2章で実施した実大載荷実験の試験体をモデル化して、有限要素数値解析を行う。開先形状と欠陥寸法が亀裂開口変位（以下、COD）に及ぼす影響を分析した。部材の塑性変形能力の要求値を文献^{3.1)}に基づき定義する。その要求値を満足するための欠陥寸法の境界値について検討する。さらに、寸法比の異なる実験Ⅰと実験Ⅱを総合的に評価するために、実験ⅡのCODを寸法比の1.6で除して、中型断面に基準化して評価して、欠陥寸法の境界値について検討する。

3.2 解析方法

3.2.1 解析モデル

2章の実大載荷実験に供した試験体の内、欠陥を有する20体の試験体に基づき有限要素モデルを作成する。作成した解析モデル一覧を表3.1に示す。欠陥の高さおよび長さについては、破断の起因となった部分の欠陥寸法の実測値を二捨三入して0.5mm刻みでモデル化している。ただし、破面から実測値を計測できなかった試験体については、PAUT法およびUT法の計測結果から同様に0.5mm刻みで欠陥寸法を定めている。また、FH-5-5およびL-SH-8-8は、実験時にフランジ側から破断しているが、ダイアフラム側で板厚貫通が生じた位置の欠陥寸法を採用している。

作成した中型断面シリーズの有限要素モデルの全体図を図3.1に示す。解析モデルは、柱梁接合部近傍にはソリッド要素を用い、その他の柱部材および梁部材には線材要素を用いた1/2モデルである。溶接部の詳細図を図3.2(a), (b)に示す。溶接始末端部のメッシュサイズは、1.0mm×1.0mm×1.0mm程度とした。

端部欠陥を対象として、開先形状と欠陥位置の関係が欠陥の亀裂開口変位CODに及ぼす影響を検討するために、図3.2(c)～(f)に示すように溶込み不良をスリットにより表現した。スリットの幅は0.1mmとした。

表 3.1 解析モデル一覧

モデル名	梁断面	開先形状	欠陥長さ [mm]	欠陥高さ [mm]	モデル名	梁断面	開先形状	欠陥長さ [mm]	欠陥高さ [mm]
SH-5-5	H-500x200 x10x16 (中型)	外開先	9.5	5.0	L-SH-8-8	H-800x300 x16x28 (大型)	外開先	20.0※1	9.5※1
SH-5-10			8.0	9.5	L-SH-8-16			10.0	16.0
SH-5-15			9.0	17.0	L-SH-8-24			10.0	24.0
SH-5-19			8.0	18.0	L-SH-8-31			10.0	27.0
SH-15-5			18.5	6.0	L-SH-24-8			28.0	9.0
FH-5-5		内開先	11.0※1	4.5※1	L-FH-8-8		内開先	11.0	8.0
FH-5-10			8.5	9.5	L-FH-8-16			12.0	16.0
FH-5-15			15.0※1	16.0※1	L-FH-8-24			13.0	25.0
FH-5-19			11.0	17.5	L-FH-8-31			11.0	31.0
FH-15-5			18.0	4.5	L-FH-24-8			27.0	9.0

※1：PAUT法もしくはUT法による

■塗：欠陥部が破断起点ではない

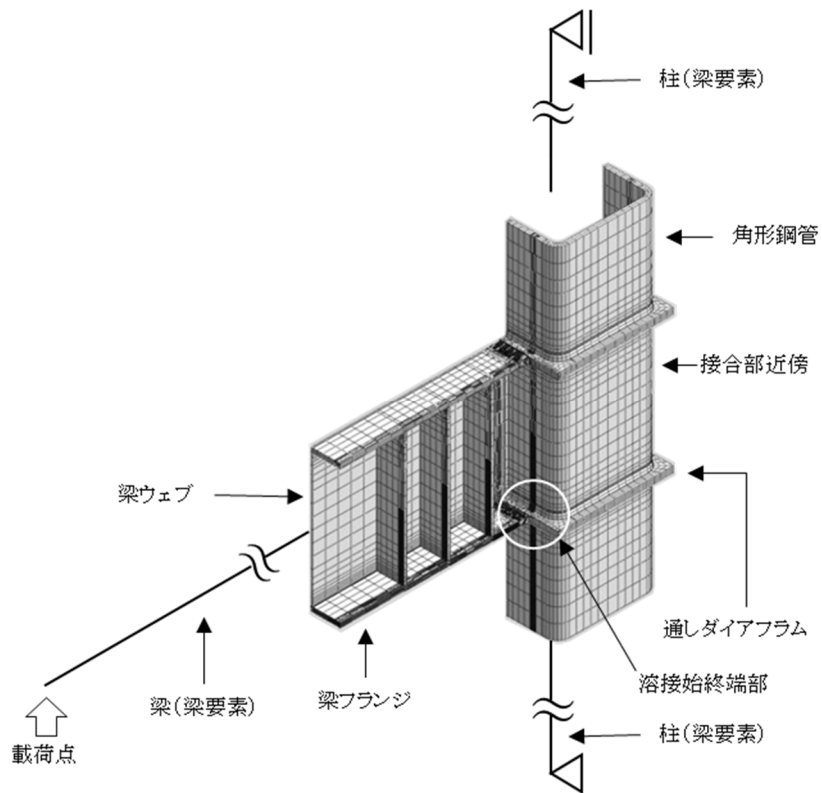
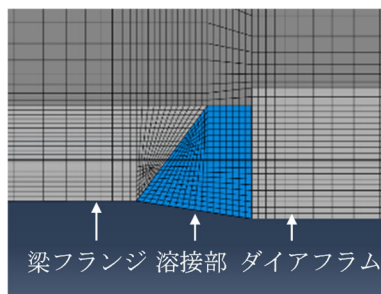
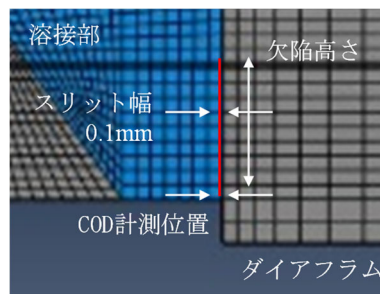


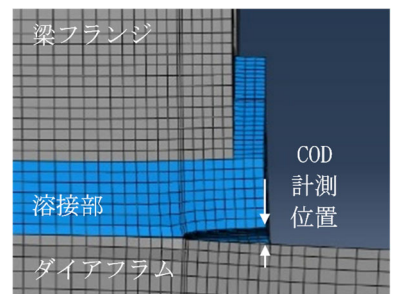
図 3.1 解析モデル（中型断面シリーズの全体図）



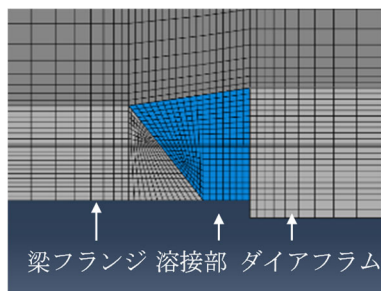
(a)SH シリーズの下フランジ



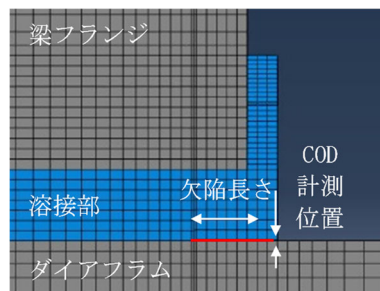
(c)側面より（変形前）



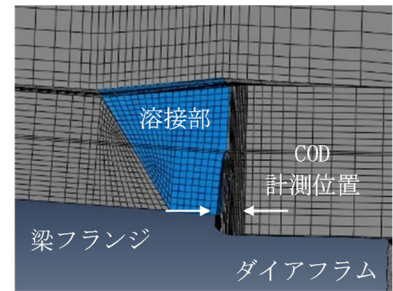
(e)溶接初層部側より（変形前）



(b)FH シリーズの下フランジ



(d)側面より（変形後）

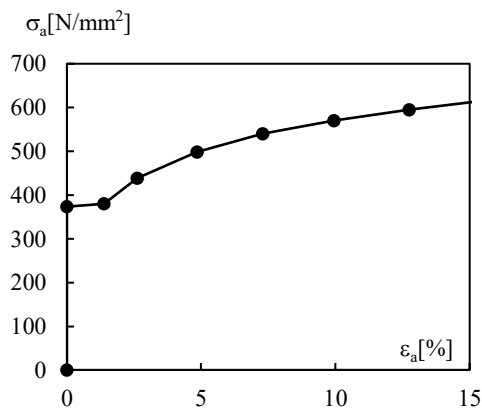


(f)溶接初層部側より（変形後）

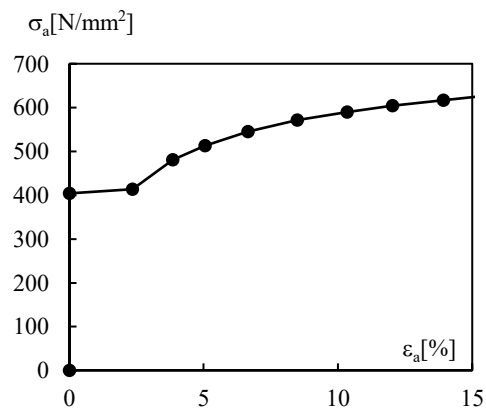
図 3.2 解析モデル（中型断面シリーズの溶接部詳細図）

3.2.2 解析条件

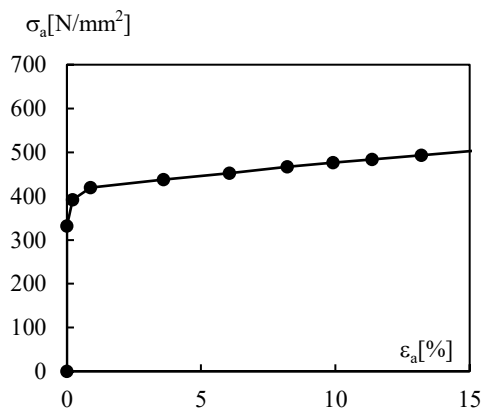
解析には汎用非線形構造解析プログラム ABAQUS (Version2019) および MidasFEANX (v350) を使用しており、両者の解析結果が一致していることを確認している。载荷は一方向単調载荷とし、塑性域における構成方程式は、vonMises の降伏条件、連合流れ則および等方硬化則に従うものとした。材料特性には、引張試験より得られた公称応力-公称歪関係を真応力-真歪関係に換算した後、多直線近似したものを用いた。なお、熱影響部については特にモデル化していない。解析に使用した各材料の真応力-真歪の塑性成分を図 3.3～図 3.4 に示す。



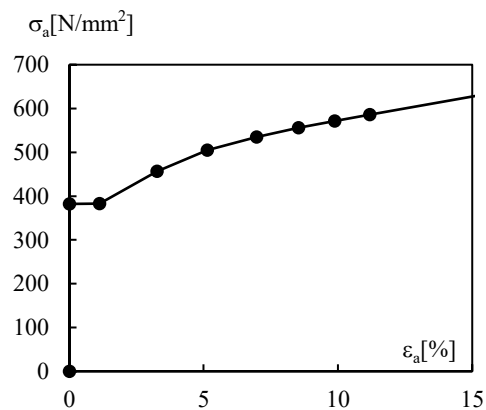
(a) 梁フランジ



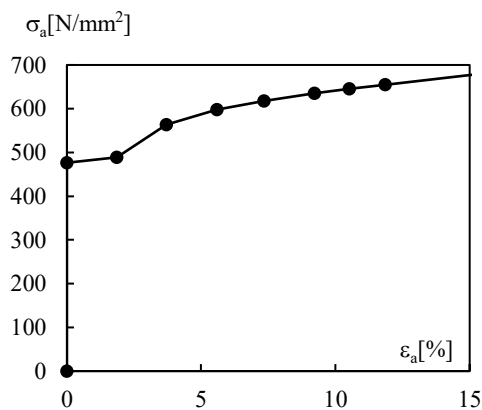
(b) 梁ウェブ



(c) 柱

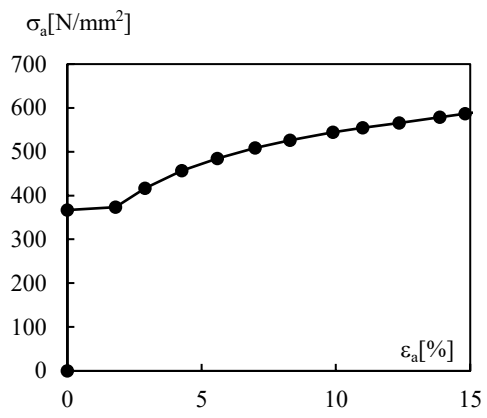


(d) ダイアフラム

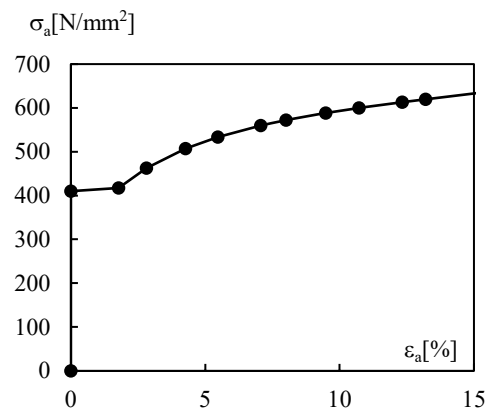


(e) 溶接部

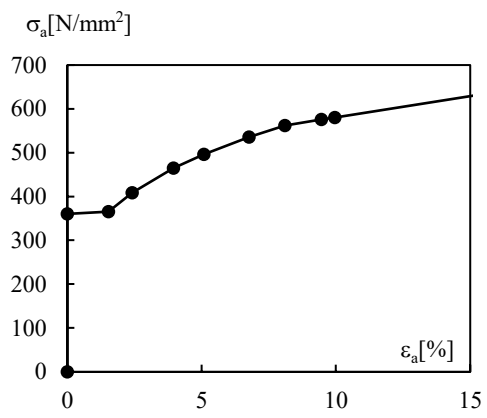
図 3.3 真応力-真歪関係 (中型断面シリーズ)



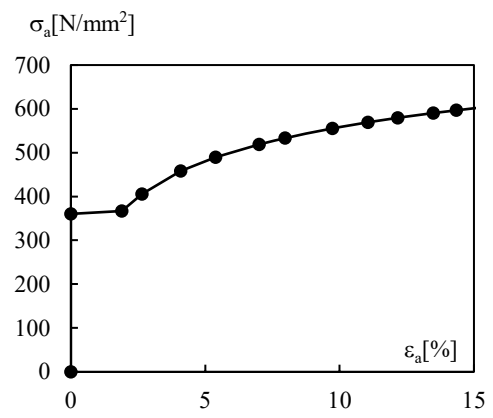
(a)梁フランジ



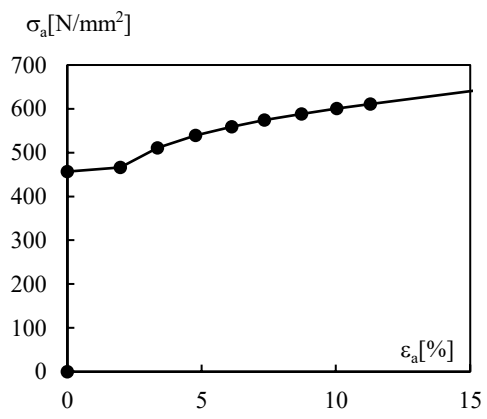
(b)梁ウェブ



(c)柱



(d)ダイアフラム



(e)溶接部

図 3.4 真応力-真歪関係 (大型断面シリーズ)

3.3 解析結果

3.3.1 荷重変形関係

実大載荷実験より得られた荷重変形関係の+1 サイクル目と有限要素数値解析より得られた荷重変形関係を比較する。グラフは梁端モーメント M_m と変形角 θ_m の関係を全塑性モーメント M_p および M_p 時の弾性相対変形角 θ_p で無次元化して示す。各試験体に対応する解析結果との比較を図 3.5～図 3.8 に示す。いずれのモデルにおいても実験結果を概ね評価できている。

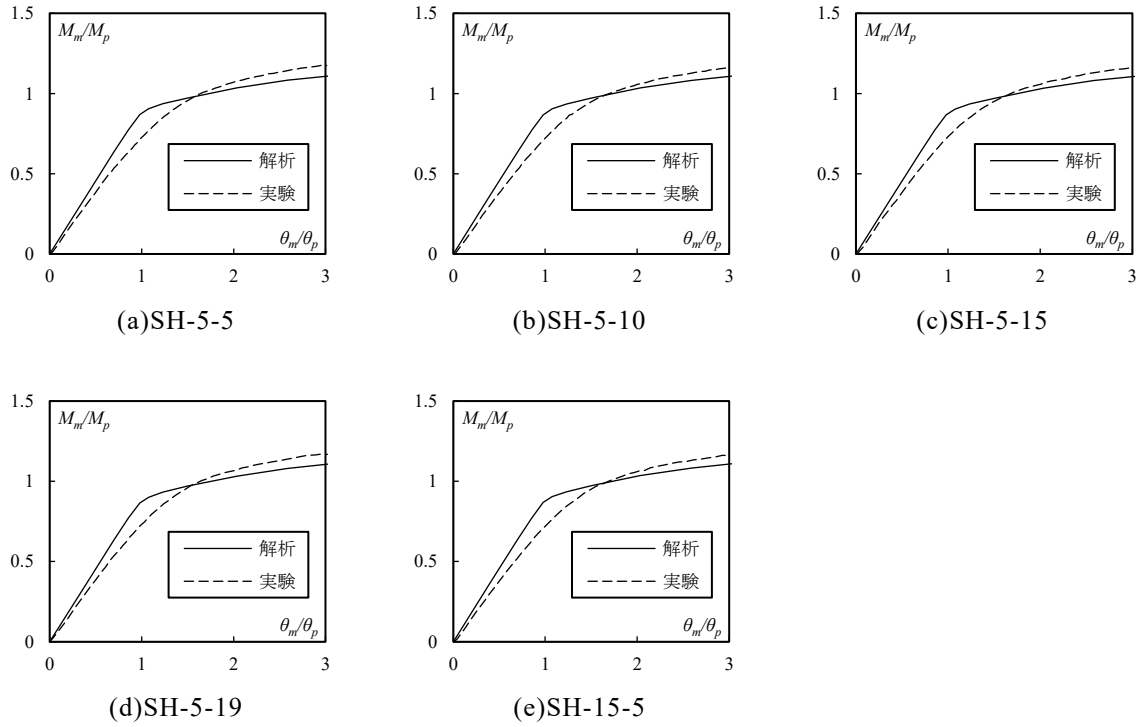


図 3.5 荷重変形関係 (SH シリーズ)

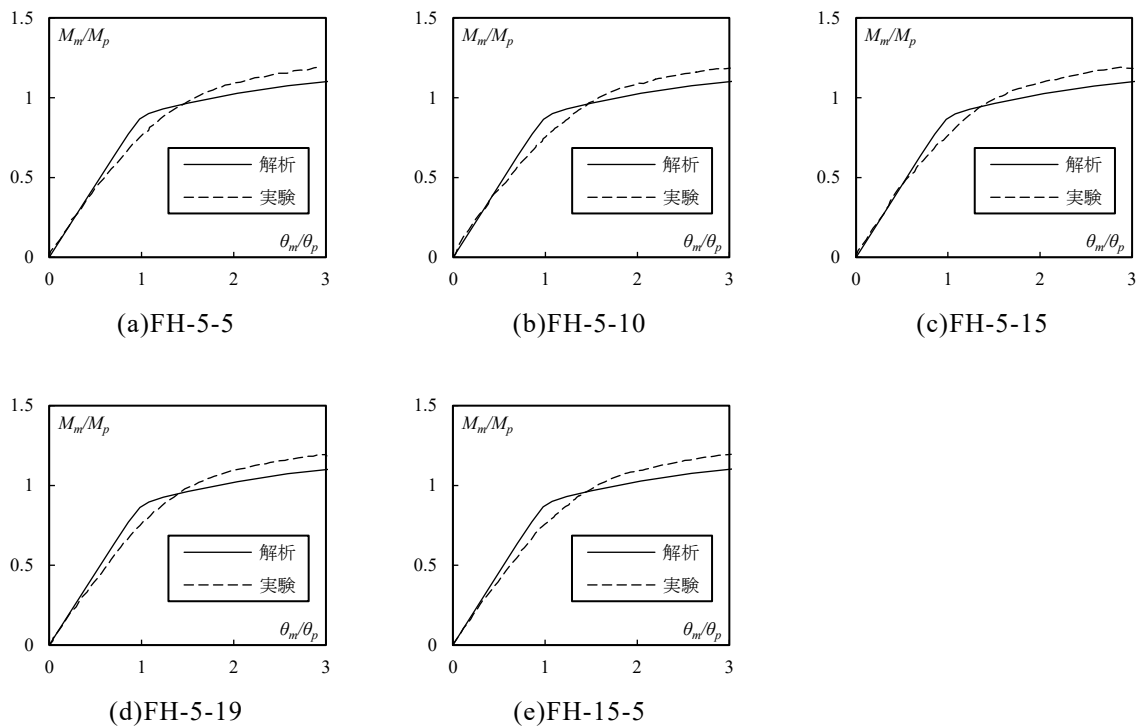
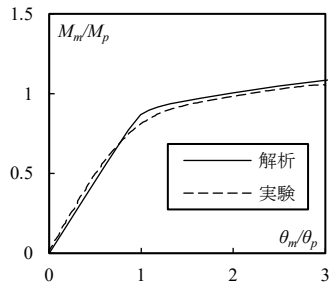
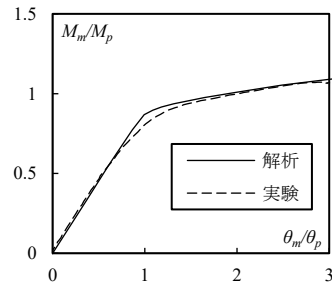


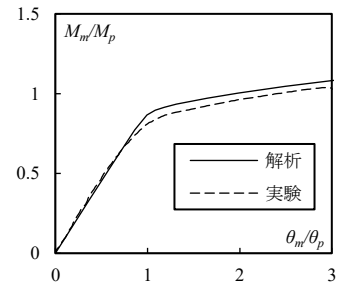
図 3.6 荷重変形関係 (FH シリーズ)



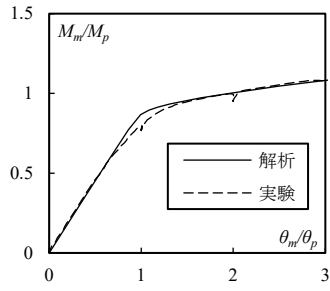
(a)L-SH-8-8



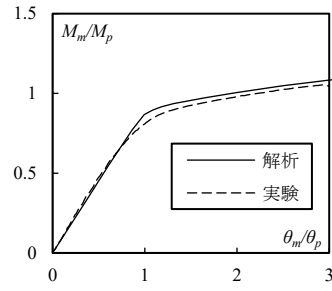
(b)L-SH-8-16



(c)L-SH-8-24

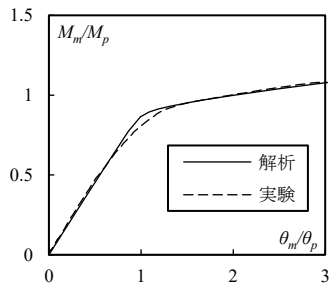


(d)L-SH-8-31

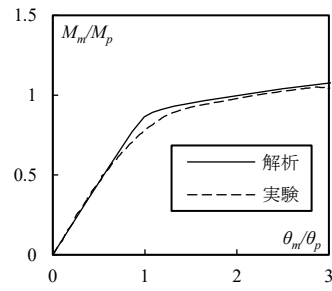


(e)L-SH-24-8

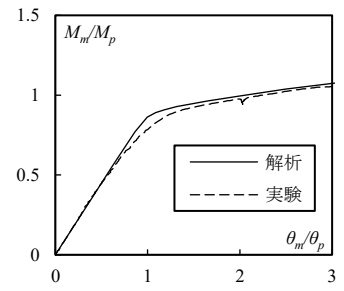
図 3.7 荷重変形関係 (L-SH シリーズ)



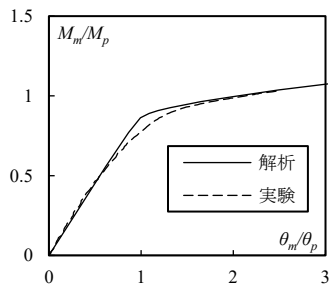
(a)L-FH-8-8



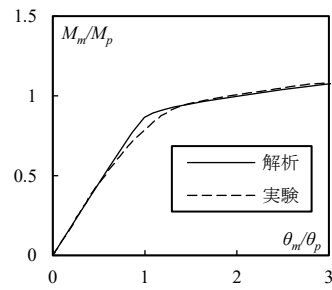
(b)L-FH-8-16



(c)L-FH-8-24



(d)L-FH-8-31



(e)L-FH-24-8

図 3.8 荷重変形関係 (L-FH シリーズ)

3.3.2 亀裂開口変位

溶接部初層側にモデル化しているスリット部の開口変位を亀裂開口変位（以下 COD）として各モデルで算出して比較検討する．COD の算出位置は，図 3.2 (c)，(d)に示す通り，溶接部初層の溶接始末端部である．COD と梁変形角 θ_m/θ_p の関係を図 3.9 に示す．

実欠陥寸法は計画欠陥寸法からばらつきがあるため，計画欠陥寸法の大小が逆転する場合がある．そのため，COD の大小関係が必ずしも計画欠陥寸法の大小関係と対応していないが，概ね欠陥高さおよび長さが大きいほど COD は大きくなる傾向がある．また，欠陥寸法が同程度の場合では，外開先に比べて内開先の方が COD は大きくなる．

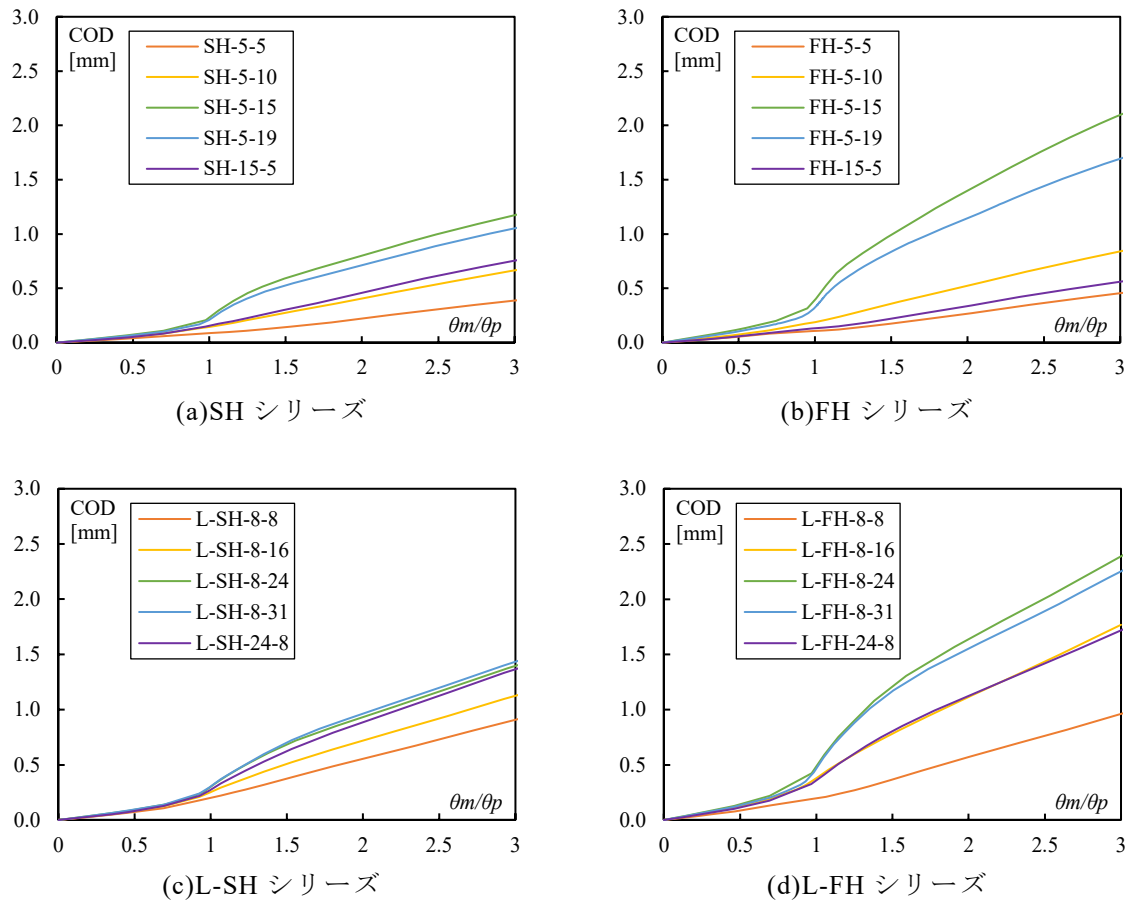


図 3.9 COD-梁変形関係

3.3.3 相当塑性歪

スリット頂部の要素の相当塑性歪 ε_{eq} を各モデルから算出して比較検討する． ε_{eq} の算出位置を図 3.10 に示す． ε_{eq} と梁変形角 θ_m/θ_p の関係を図 3.11 に示す． ε_{eq} においても COD と同様に，欠陥高さおよび長さが大きいほど ε_{eq} が大きくなる傾向がある．

各モデルにおいて， $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の ε_{eq} と COD の関係を図 3.12 に示す．同図より，COD が大きくなると ε_{eq} も大きくなる傾向があることから，両者には正の相関がある．スリット頂部の相当塑性歪の大きさは，亀裂進展を示唆するものである．以上より，COD は亀裂進展と相関性があると考えられ，以降は COD を用いて欠陥の評価を行う．

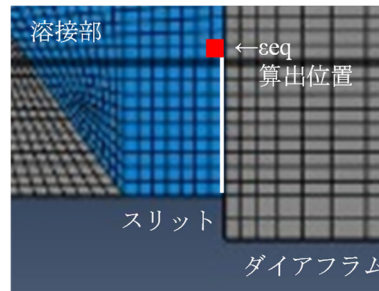


図 3.10 ε_{eq} 算出位置

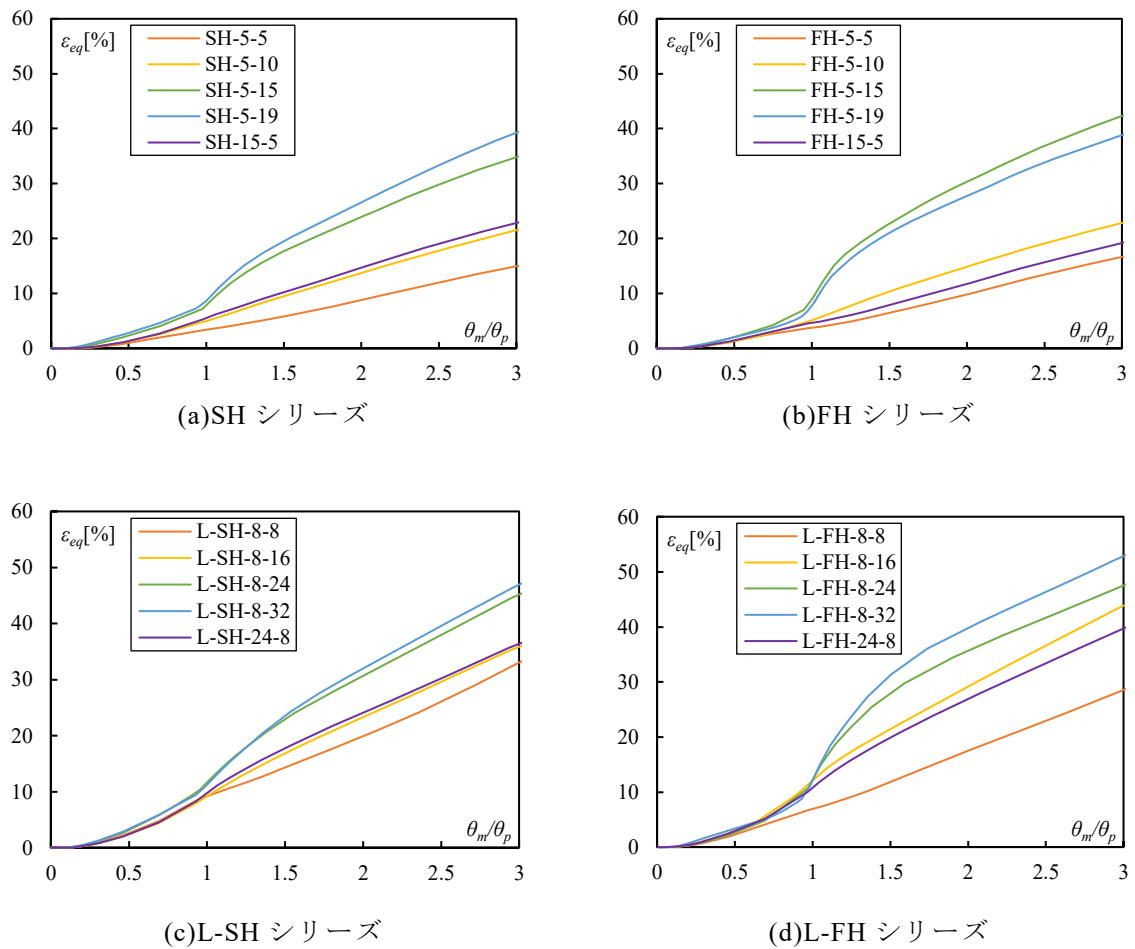


図 3.11 ε_{eq} -梁変形関係

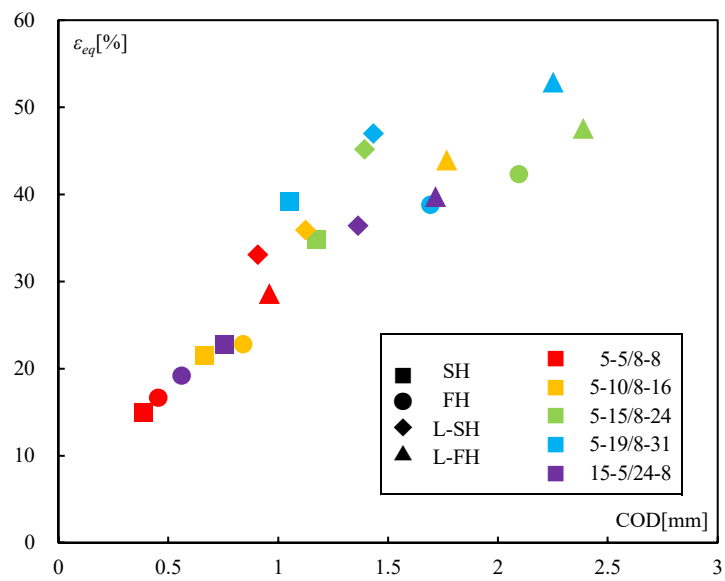


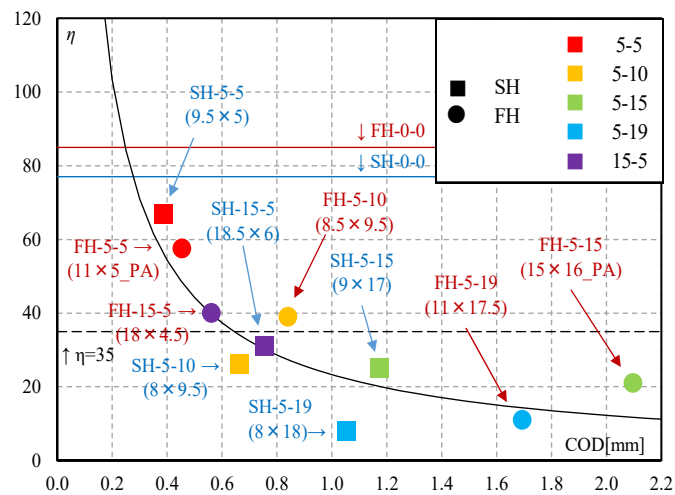
図 3.12 ε_{eq} -COD 関係

3.3.4 COD と累積塑性変形倍率の関係

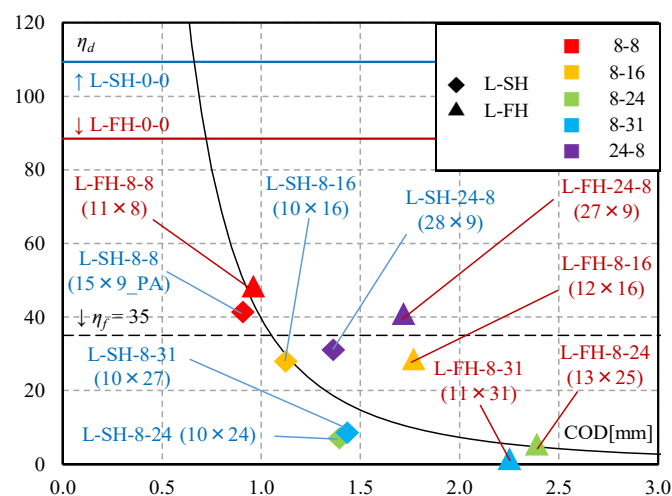
2章の実大載荷実験より、亀裂が板厚を貫通するまでは安定した延性亀裂の進展によることがわかっている。また、3.3.3より、CODは亀裂の進展には相関性があることがわかっている。そこで、実験時の最大変形角 $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD を抽出し、板厚貫通までの累積塑性変形倍率 η_d (実験値) と変形角 $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD (解析値) の関係を図 3.13 に示す。

各モデル名の下に記載している数値は、実測値に基づきモデル化した欠陥寸法（長さ、高さの順）を示す。各プロット点より算出した近似曲線を黒実線で示す。無欠陥のモデルについては、COD を算出できないため、板厚貫通時の η_d を水平線で示す。

両シリーズとも、欠陥高さが大きくなるほど、 η_d は小さく、COD は大きくなる傾向がある。同じ計画欠陥寸法の外開先と内開先の試験体（同色どうしのマーク）を比較すると、概ね内開先の試験体の COD が大きくなる。さらに L-FH-24-8 ($\eta_d=41$, COD=1.72mm) と L-FH-8-24 ($\eta_d=5$, COD=2.39mm) を比較すると、 η_d の大小関係は L-FH-24-8 > L-FH-8-24 で、COD の大小関係はその逆となる。この傾向は、他のシリーズでも同様であり、欠陥高さの方が塑性変形能力に与える影響が大きいことがわかる。



(a) 中型断面シリーズ



(b) 大型断面シリーズ

図 3.13 η_d -COD 関係

3.3.5 欠陥寸法の許容値

欠陥寸法と COD の関係をさらに調べるために、実験に供した試験体以外の欠陥寸法の解析モデルについても追加で解析を行う。中型断面シリーズでは、欠陥長さは 1, 3, 5, 10, 15, 20mm の 6 ケースとし、欠陥高さは 1, 3, 5, 10, 15, 19mm の 6 ケースとした。大型断面シリーズでは、欠陥長さは 5, 8, 16, 24, 32mm の 5 ケースとし、欠陥高さは 3, 5, 8, 16, 24mm の 5 ケースとした。解析モデル名称は、実験の試験体名称と同様に開先形状、欠陥長さ、欠陥高さの順に表記した。

COD と梁変形角 θ_m/θ_p の関係について、代表的なものを図 3.14 に示す。中型および大型の両シリーズにおいて、同一梁変形角 θ_m/θ_p 時の COD の大きさを比較すると、欠陥長さおよび高さが大きいほど、欠陥長さおよび欠陥高さが同じ場合には外開先に比べて内開先の方が COD は大きくなる。

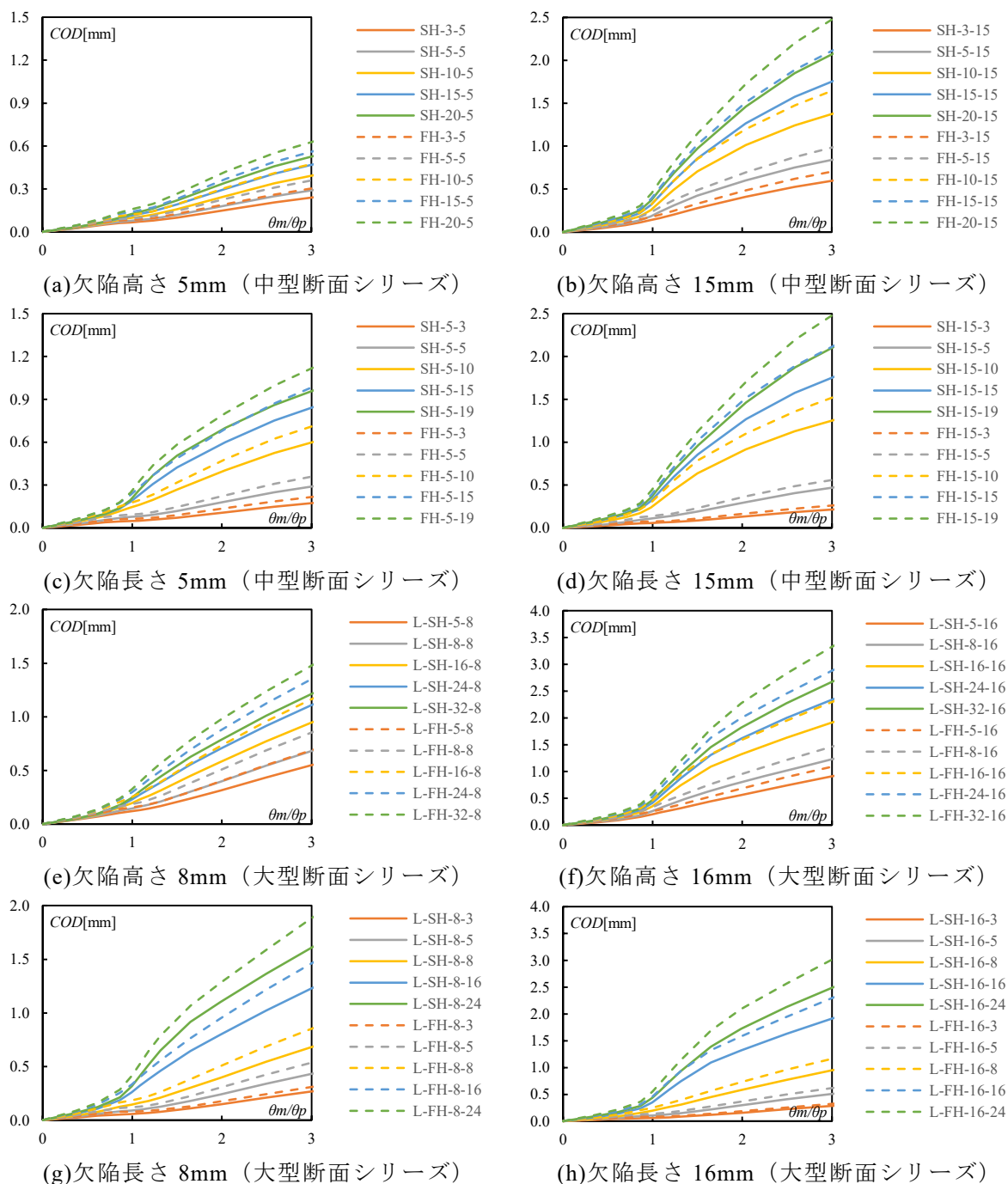


図 3.14 COD—梁変形関係

欠陥の限界長さを設定するにあたって、部材の塑性変形能力の要求値を定義する必要がある。文献^{3.1)}において、長周期地震動による多数回繰返し塑性変形を梁端接合部が受けた場合の延性破断に関する耐震安全性を評価するために、塑性域での一定振幅多数回繰返し加力実験のデータが収集され、破断までのサイクル数 N_f と梁の塑性率 μ の関係が分析されている。そこでは、まず N_f の実験結果の概ね下限となるように実験下限式が提案され、そして振幅の変動など変形能力の変動を考慮した設計式が提案されている。本実験と同様のノンスラップ形式の設計式を以下に示す。

$$\mu = \frac{0.0072}{\theta_p} \cdot C \cdot N_f^{-\beta}$$

- μ : 梁端接合部の塑性率
- N_f : 破断までのサイクル数[回]
- θ : 梁部材の全塑性曲げ耐力時の弾性変形角[rad]
- C : 実験係数=5.6 (スラップ無の設計式)
- β : 実験係数=1/3

実験時の最大変形角である梁変形角 $\theta_m/\theta_p=3$ つまり塑性率 $\mu=3$ の時の破断までのサイクル数 N_f は5.83回となる。このサイクル数より、本試験体の η_f を算出すると $\eta_f \div 35$ となる。図3.13に $\eta_f=35$ を破線で示す。 η_d とCOD関係を近似曲線にて評価した場合、 $\eta_f=35$ と近似曲線の交点は中型断面シリーズでCOD=0.64mm、大型断面シリーズでCOD=1.05mmとなる。図中の設計式による破断寿命 $\eta_f=35$ を下回るサイクル数で亀裂の板厚貫通が生じた場合、すなわち中型断面シリーズでCOD>0.64mmの範囲では、材料の靱性が低いと延性亀裂から脆性破断へ転化する可能性がある。

亀裂が板厚を貫通するサイクル数が、破断寿命の設計式を十分上回る評価ができる基準値として、中型断面シリーズの0.64mmに対して、余裕を持って、CODの値0.5mm（以下、限界COD）を提案する。CODの値が0.5mm以下になる欠陥寸法の範囲では、繰返し変形による延性亀裂が板厚貫通まで進展した後に、破断寿命を迎えると考えられる。

一方、大型断面シリーズについても限界CODを定義する。2章で示したように、板厚貫通までの η_d については、延性亀裂の進展に伴うものなので寸法効果の影響がほとんど見られない。従って、大型断面シリーズでは、寸法比1.6倍を乗じた限界COD=0.80mmとして検討する。

CODと欠陥長さの関係について中型断面シリーズでは欠陥高さ1～19mm、大型断面シリーズでは欠陥高さ3～24mmの範囲について図3.15に示す。作成した解析モデルより算出した結果についてはグラフ内で●にて示す。その他の結果は、解析結果より線形補間により算出したものである。同一欠陥長さで欠陥高さの影響に着目する場合と同一欠陥高さで欠陥長さの影響に着目する場合を比較すると、欠陥高さの変化に伴うCODの変化の方が著しくCODに与える影響は欠陥高さの方が大きいことがわかる。同図中に、限界CODを赤線で示す。限界CODと各グラフの交点より各シリーズそれぞれの限界COD時の欠陥長さとし高さの値が求まる。

各シリーズの限界COD時の欠陥長さとし欠陥高さの関係を図3.16に示す。なお、大型断面シリーズでは欠陥高さ24mm以上の実験(L-SH-8-24およびL-FH-8-31)にて、延性亀裂による板厚貫通が生じる前における早期の脆性破断が生じていることから、欠陥高さ16～24mmの間から同様の早期破断が生じる可能性があると考え、欠陥高さ16mm以上は破線で示す。欠陥長さとし欠陥高さによりプロットした点が各曲線の原点側に位置するときは、溶接欠陥に伴う早期破断は生じないと考えられる。それぞれの断面シリーズ内で比較すると、内開先シリーズの溶接欠陥の影響が大きいいため、外開先シリーズの方が欠陥寸法の境界値が小さくなる。断面シリーズ間で比較すると、大型断面シリーズの方が境界値の絶対値は大きくなる。

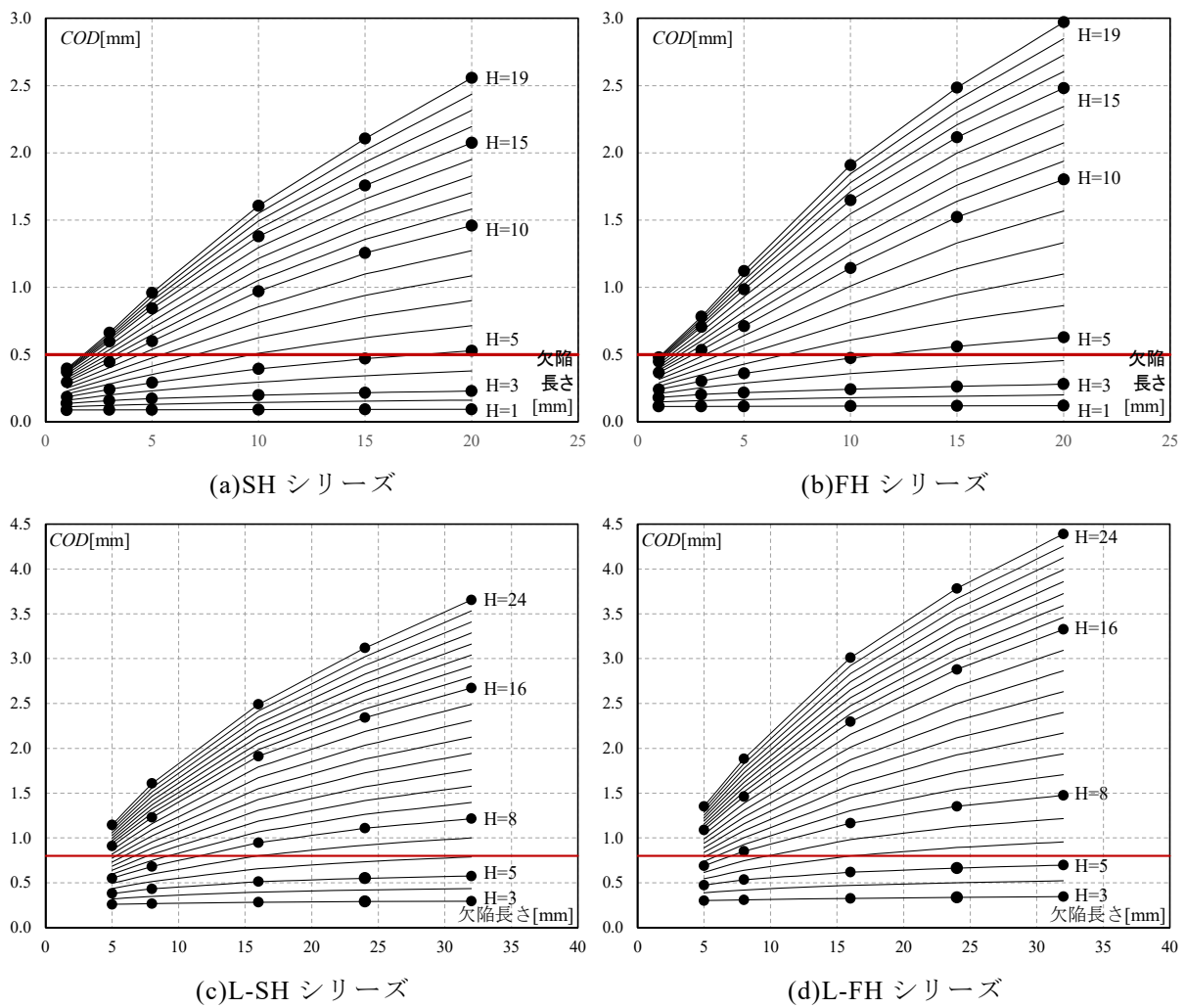


図 3.15 COD－欠陥長さ関係

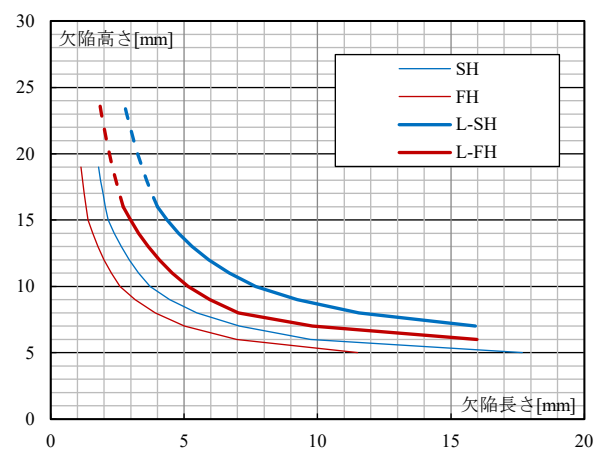


図 3.16 限界 COD 時の欠陥高さ－欠陥長さ関係

3.3.6 限界 COD の基準化

図 3.13 の η_d -COD 関係について，中型断面シリーズと大型断面シリーズをまとめて図 3.17 に示す．大型断面シリーズの COD の値は，中型断面シリーズの値よりも大きくなるため，図中の◇および△のシンボルは，□および○のシンボルよりも右側に位置することになる．断面寸法の差を排除して比較するために，大型断面シリーズの COD を寸法比 1.6 で除して中型断面シリーズに基準化する．中型断面シリーズに基準化した COD を基準 COD と定義する（以下， $\overline{\text{COD}}$ ）．横軸を $\overline{\text{COD}}$ で表示して図 3.18 に示す． $\overline{\text{COD}}$ を用いると $\overline{\text{COD}}$ の小さい範囲（ $\overline{\text{COD}} \leq 0.80\text{mm}$ ），すなわち欠陥寸法の小さい範囲では η_d と $\overline{\text{COD}}$ の関係に断面シリーズ間の差が小さくなる．

図 3.13 と同様に $\eta_f=35$ を図 3.18 に破線で示す．前述した大型断面シリーズの限界 COD = 0.80mm は，基準化すると $\overline{\text{COD}}=0.50\text{mm}$ となる．同図より，限界 $\overline{\text{COD}}=0.50\text{mm}$ と設定して欠陥寸法の許容値を設定することにより $\eta_f=35$ を確保することができる．

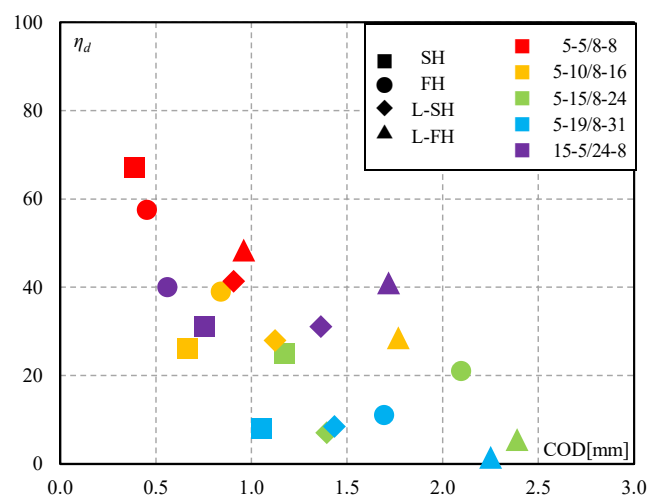


図 3.17 η_d -COD 関係

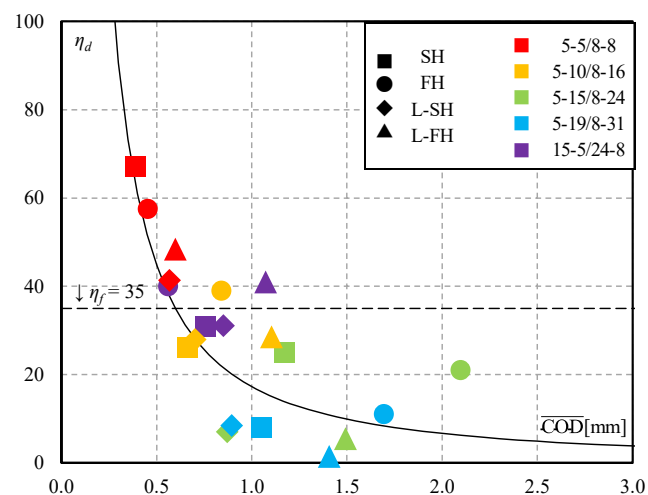


図 3.18 η_d - $\overline{\text{COD}}$ 関係

図 3.16 と同様の手順で求めた限界 $\overline{COD}$ 時の基準欠陥高さ（以下， $\overline{H_d}$ ）と基準欠陥長さ（以下， $\overline{L_d}$ ）の関係を図 3.19 に示す． $\overline{H_d}$ および $\overline{L_d}$ は，それぞれ欠陥高さおよび欠陥長さを中型断面シリーズに基準化したものを示す．すなわち，大型断面シリーズについては，欠陥高さおよび欠陥長さを 1.6 で除したものである．

SH シリーズと L-SH シリーズ，FH シリーズと L-FH シリーズを比較（同色どうしの比較）すると，基準化することで断面寸法の異なるシリーズ間での差が小さくなるものの，いずれの開先形状でも大型断面シリーズの方が原点寄りとなる．この一因として，使用している材料の違いや厳密な寸法比などによることが挙げられる．そこで，材料を中型断面シリーズに統一して解析を行った結果を図 3.20 に示す．同一の材料試験結果を用いることで，図 3.19 と比較して，さらに断面シリーズ間の差が小さくなることがわかる．

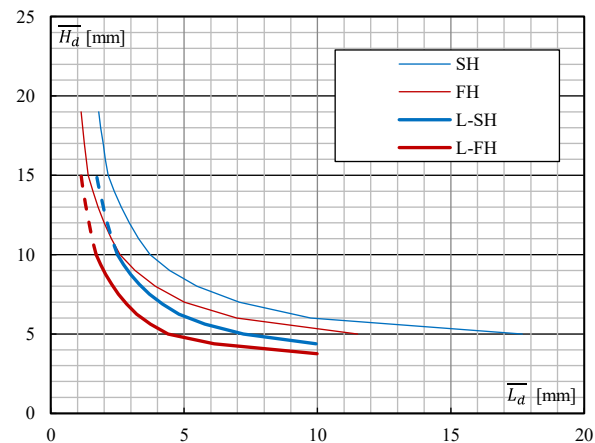


図 3.19 限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d}$ － $\overline{L_d}$ 関係

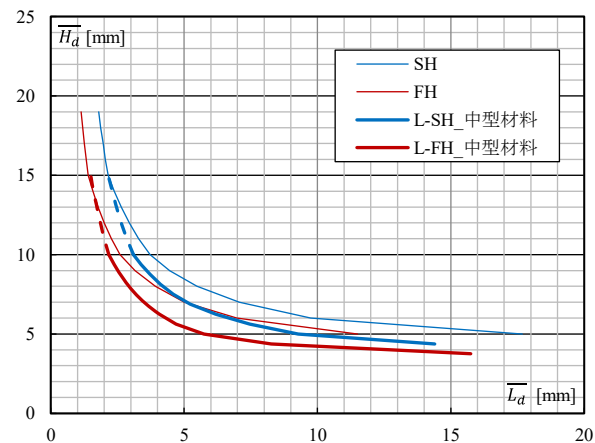


図 3.20 限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d}$ － $\overline{L_d}$ 関係（中型断面シリーズの材料使用）

3.4 まとめ

実大載荷実験を行った試験体をモデル化して有限要素数値解析を実施した．溶接欠陥の限界寸法を定めるために，載荷実験を行った試験体以外にもモデルを作成して有限要素数値解析を実施した．本章では，以下の知見を得た．

- (1) 欠陥高さおよび長さの寸法が大きいほど COD は大きい．
- (2) 欠陥寸法が同一の場合，外開先の COD に比べて内開先の COD は大きくなる．
- (3) スリット頂部の相当塑性歪 ε_{eq} と COD の関係には，正の相関があり，COD は亀裂進展と相関性があると考えられる．
- (4) 実験結果より得られた η_d と解析結果より得られた COD との関係を近似曲線で表した．塑性変形能力の要求値を設定して中型断面シリーズの限界 COD=0.50mm，大型断面シリーズの限界 COD=0.80mm を提案し，限界 COD の欠陥長さと欠陥高さの関係を示した．
- (5) 限界 COD 時の欠陥長さと欠陥高さの組合せを示した．欠陥の境界値は，FH<SH<L-FH<L-SH の順となる．
- (6) 大型断面シリーズの結果を中型断面シリーズで基準化して限界 COD 時の $\overline{H_d}-\overline{L_d}$ 関係を示した．基準化することで，断面シリーズ間の差は小さくなる．

参考文献

- 3.1) 日本鋼構造協会：長周期地震動に対する鉄骨造梁端接合部の安全性検証方法，2016

第4章 許容欠陥寸法に影響を与える因子

4.1 はじめに

本章では，3章で実施した有限要素数値解析による限界欠陥長さおよび限界欠陥高さの評価について新たな解析因子である溶接部強度および接合部係数を追加して検討を行う．

4.2 溶接部強度

4.2.1 解析条件

欠陥寸法は，3.3.5と同様とし，欠陥寸法の組合せを表4.1に示した．

文献^{4.1)}に使用したYGW18の溶接部の材料データを使用して溶接部強度を変化させた解析を実施する（以下，YGW18シリーズ）．溶接部の引張試験結果を2章の実大載荷実験に使用した材料データと併せて表4.2に示す．解析に使用するYGW18の真応力－真歪の塑性成分を図4.1に示す．

表 4.1 欠陥寸法の組合せ

	中型断面シリーズ	大型断面シリーズ
欠陥長さ	1, 3, 5, 10, 15, 20	5, 8, 16, 24, 32
欠陥高さ	1, 3, 5, 10, 15, 19	3, 5, 8, 16, 24

表 4.2 溶接部の引張試験結果

試験片 名称	部位	鋼種	板厚 [mm]	降伏応力 σ_y [N/mm ²]	引張強さ σ_u [N/mm ²]	一様伸び ϵ_u [%]	破断伸び EL [%]	降伏比 YR [%]
w/s-1	溶接部	YGW18	—	485	594	—	29.6	81.6
w/s-2			—	510	591	—	28.9	86.3
w/s-3			—	513	598	—	33.0	85.8
平均			—	503	594	—	30.5	84.6
w-1	溶接部	YGW11	—	474	580	13.3	34.0	81.8
w-2※			—	458	534	-	33.7	85.7
平均			—	474	580	13.3	34.0	81.8
L-w-1	溶接部	YGW11	—	456	544	12.3	-	83.8
L-w-2			—	449	516	4.6	27.0	87.1
平均			—	452	530	8.5	27.0	85.4

※:参考値(試験中に計測機に不具合あり)

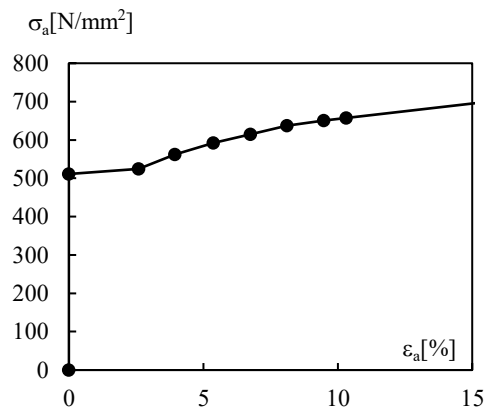


図 4.1 真応力－真歪関係（YGW18）

4.2.2 解析結果

3章の解析モデルと YGW18 シリーズの解析結果を比較する。

1) 荷重変形関係

荷重変形関係について比較する。グラフは梁端モーメント M_m と変形角 θ_m の関係を全塑性モーメント M_p および M_p 時の弾性相対変形角 θ_p で無次元化して示す。代表モデルの比較結果を図 4.2～図 4.3 に示す。溶接部強度の変化による荷重変形関係の変化はほとんど確認できず、シリーズ間の荷重変形関係は概ね一致する。

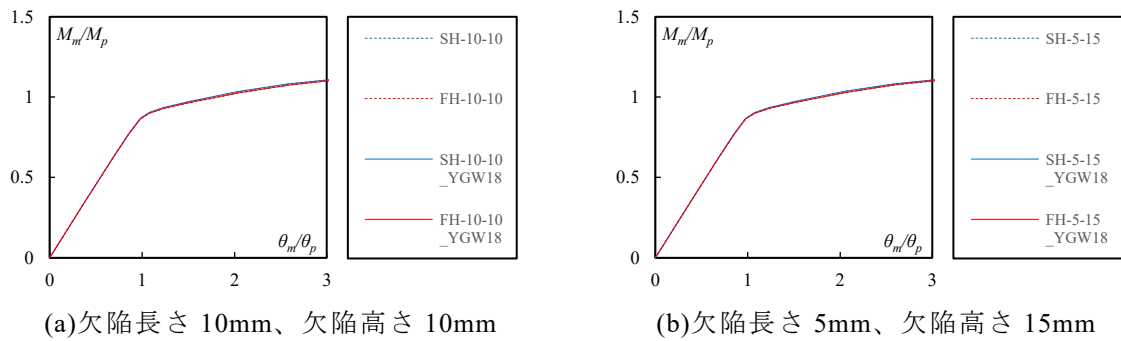


図 4.2 荷重変形関係（中型断面の YGW18 シリーズとの比較）

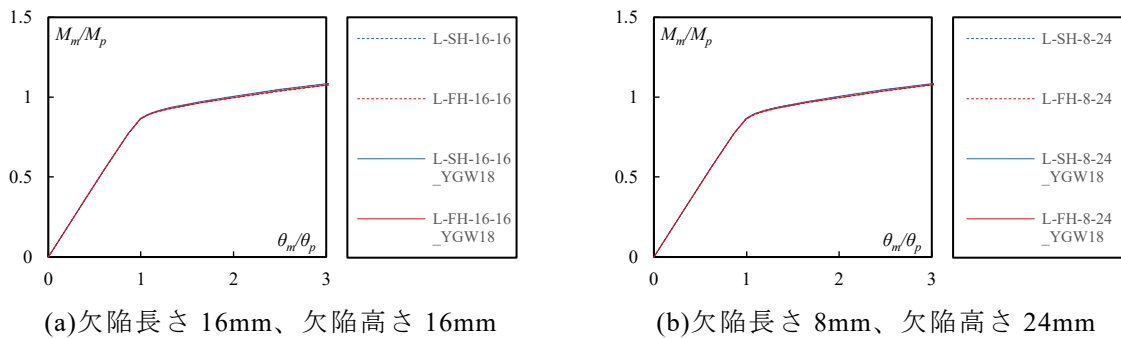


図 4.3 荷重変形関係（大型断面の YGW18 シリーズとの比較）

2) 亀裂開口変位

亀裂開口変位と梁変形関係について比較する．梁変形は変形角 θ_m を全塑性モーメント M_p 時の弾性相対変形角 θ_p で無次元化して示す．中型断面外開先の欠陥長さ 5mm および欠陥高さ 5mm の結果を代表で図 4.4 に示す．溶接部強度を上昇させたことで同一梁変形時の COD の値が若干低下している．文献^{4.1)}では，破断時の性能に着目して比較を行っており，破断時の累積塑性変形倍率の比較では，溶接部強度上昇に伴う改善は見られていない．ところが，板厚貫通時点で改めて実験結果を整理すると，本解析結果と実験結果は整合性がある．なお，解析結果については，内開先および大型断面の場合にも溶接部強度を上昇させることで同様の傾向を示す．

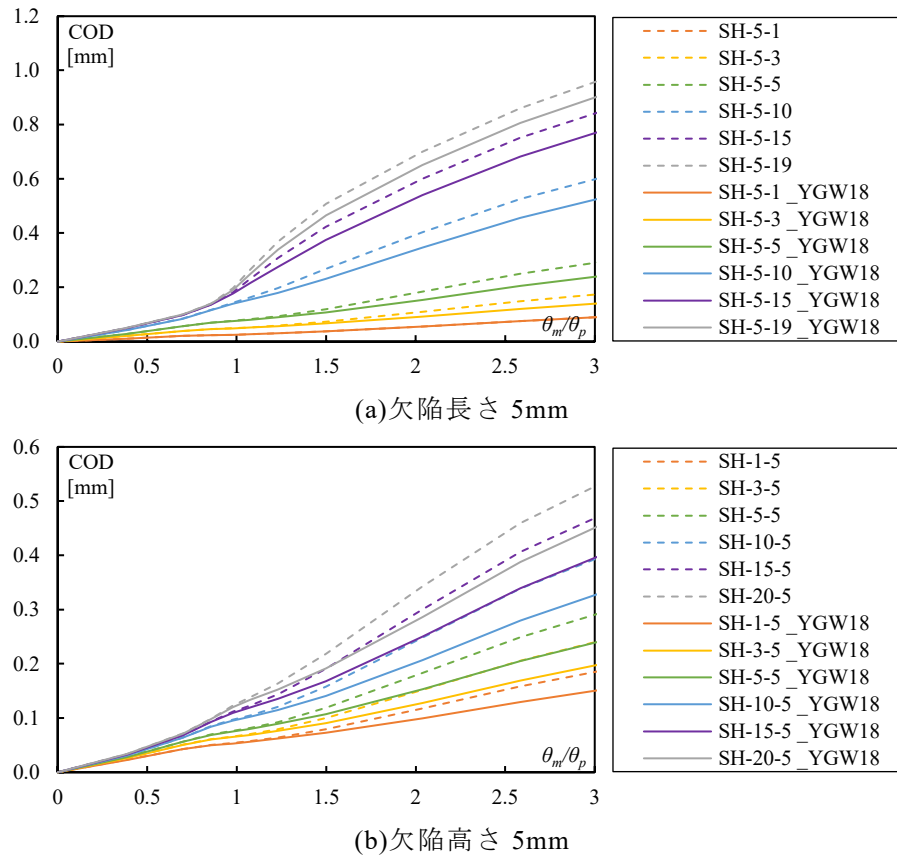


図 4.4 COD—梁変形関係（中型断面の外開先）

$\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD についてまとめたものを表 4.3 および表 4.4 に示す. 同一欠陥長さの COD について, 限界 COD 付近の値 (中型断面シリーズでは 0.5mm, 大型断面シリーズでは 0.8mm) を色塗で示す. 表 4.3 および表 4.4 を用いて, 溶接部強度を YGW18 に変更することでの COD の変化率を表 4.5 に示す. 溶接部強度を YGW18 に変更することで, 同一梁変形時の COD は低下している. 表下部には表 4.4 で色塗とした限界 COD 付近の値の平均値の結果を示している. 平均値に着目すると, 中型断面シリーズで 0.85~0.91, 大型断面シリーズで 0.74~0.82 である. これは, 限界 COD 時の $\overline{H_d}$ および $\overline{L_d}$ の制限が緩和されることを示唆している.

表 4.3 $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD

(a) 中型断面シリーズ

		欠陥長さ(SH) [mm]					欠陥長さ(FH) [mm]				
		5	10	16	24	32	5	10	16	24	32
欠陥高さ	3	0.14	0.17	0.20	0.22	0.23	0.18	0.22	0.24	0.26	0.28
	5	0.18	0.29	0.39	0.47	0.53	0.24	0.36	0.47	0.56	0.63
	10	0.29	0.60	0.97	1.25	1.45	0.36	0.71	1.14	1.52	1.80
	15	0.37	0.84	1.38	1.75	2.07	0.45	0.98	1.64	2.11	2.48

(b) 大型断面シリーズ

		欠陥長さ(L-SH) [mm]					欠陥長さ(L-FH) [mm]				
		5	10	16	24	32	5	10	16	24	32
欠陥高さ	5	0.38	0.43	0.51	0.55	0.58	0.47	0.54	0.62	0.66	0.70
	8	0.55	0.68	0.95	1.11	1.21	0.69	0.85	1.17	1.35	1.48
	16	0.91	1.23	1.91	2.34	2.67	1.09	1.46	2.30	2.88	3.33
	24	1.15	1.61	2.49	3.12	3.65	1.35	1.88	3.01	3.78	4.39

表 4.4 $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD (YGW18)

(a) 中型断面シリーズ (YGW18)

		欠陥長さ(SH_YGW18) [mm]					欠陥長さ(FH_YGW18) [mm]				
		5	10	16	24	32	5	10	16	24	32
欠陥高さ	3	0.11	0.14	0.16	0.18	0.19	0.15	0.19	0.21	0.23	0.24
	5	0.15	0.24	0.33	0.40	0.45	0.21	0.30	0.40	0.49	0.55
	10	0.25	0.52	0.88	1.19	1.40	0.32	0.63	1.05	1.44	1.74
	15	0.32	0.77	1.33	1.71	2.03	0.40	0.91	1.59	2.07	2.44

(b) 大型断面シリーズ (YGW18)

		欠陥長さ(L-SH_YGW18) [mm]					欠陥長さ(L-FH_YGW18) [mm]				
		5	10	16	24	32	5	10	16	24	32
欠陥高さ	5	0.25	0.29	0.36	0.39	0.41	0.34	0.39	0.46	0.50	0.53
	8	0.39	0.49	0.71	0.85	0.95	0.51	0.64	0.91	1.08	1.21
	16	0.71	1.00	1.70	2.17	2.50	0.88	1.21	2.05	2.68	3.14
	24	0.95	1.40	2.35	3.00	3.55	1.14	1.65	2.85	3.64	4.27

表 4.5 YGW18 シリーズの $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD 変化率

(a) 中型断面シリーズ

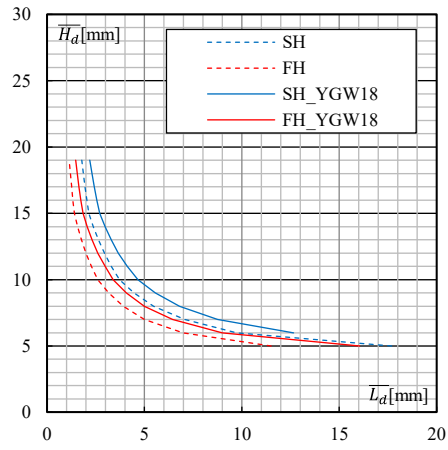
		欠陥長さ(SH) [mm]					欠陥長さ(FH) [mm]				
		1	5	10	15	20	1	5	10	15	20
欠陥高さ	3	0.79	0.81	0.82	0.82	0.83	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86
	5	0.81	0.82	0.83	0.84	0.86	0.86	0.85	0.85	0.87	0.88
	10	0.84	0.87	0.91	0.95	0.96	0.87	0.89	0.92	0.95	0.97
	15	0.86	0.91	0.97	0.98	0.98	0.89	0.93	0.97	0.98	0.99
平均 (色塗のみ)		0.86	0.85	0.87	0.90	0.91	0.89	0.87	0.89	0.91	0.87

(b) 大型断面シリーズ

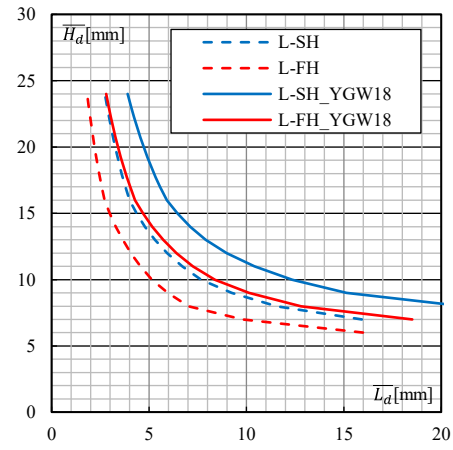
		欠陥長さ(L-SH) [mm]					欠陥長さ(L-FH) [mm]				
		5	8	16	24	32	5	8	16	24	32
欠陥高さ	5	0.67	0.67	0.69	0.70	0.71	0.71	0.72	0.75	0.75	0.76
	8	0.70	0.72	0.75	0.77	0.78	0.74	0.75	0.78	0.80	0.82
	16	0.78	0.81	0.89	0.93	0.94	0.80	0.82	0.89	0.93	0.94
	24	0.83	0.87	0.94	0.96	0.97	0.84	0.87	0.94	0.96	0.97
平均 (色塗のみ)		0.81	0.76	0.82	0.74	0.74	0.77	0.79	0.76	0.78	0.79

3) 限界 $\overline{COD}$ 時の許容欠陥寸法

限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d}-\overline{L_d}$ 関係を図 4.5 に示す. いずれのシリーズにおいても, 溶接部強度を YGW18 に変更することで, $\overline{H_d}-\overline{L_d}$ 関係はグラフ内の右上に移動する. すなわち, 欠陥許容値を緩和できることを示している.



(a) 中型断面シリーズ



(b) 大型断面シリーズ

図 4.5 限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d}-\overline{L_d}$ 関係

4.3 接合部係数

4.3.1 解析条件

欠陥寸法は，3.3.5 と同様とし，欠陥寸法の組合せを表 4.6 に示した．

柱梁接合部における接合部係数を変化させることを意図して，パネルゾーンの柱の板厚を変化させる．梁の取付く側およびその対面の柱の板厚を 6mm としたモデル（以下，SKPL6 シリーズ）を作成し解析を実施した．接合部係数の比較を表 4.7 に示す．

表 4.6 欠陥寸法の組合せ

	中型断面シリーズ	大型断面シリーズ
欠陥長さ	1, 3, 5, 10, 15, 20	5, 8, 16, 24, 32
欠陥高さ	1, 3, 5, 10, 15, 19	3, 5, 8, 16, 24

表 4.7 接合部係数の比較

梁断面	シリーズ	m	jM_{fu} [kNm]	jM_{wu} [kNm]	$\frac{jM_u}{bM_p}$
H-500x200x10x16	SH,FH	0.837	816	187	1.24
H-800x300x16x28	L-SH,L-FH	0.815	3290	736	1.21
H-500x200x10x16	SKPL6	0.300	816	66.9	1.09
H-800x300x16x28	SKPL6	0.180	3290	164	1.04

4.3.2 解析結果

3章の解析モデルと SKPL6 シリーズの解析結果を比較する。

1) 荷重変形関係

荷重変形関係について比較する。グラフは梁端モーメント M_m と変形角 θ_m の関係を全塑性モーメント M_p および M_p 時の弾性相対変形角 θ_p で無次元化して示す。代表モデルの比較結果を図 4.6～図 4.7 に示す。梁が取付く側の柱の板厚を変更したことで、梁ウェブの寄与率が低下して、塑性化後の梁の耐力が若干低下している。

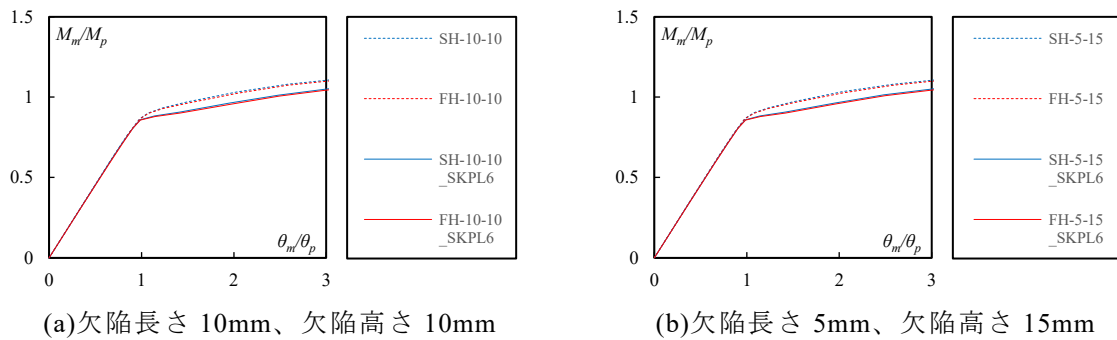


図 4.6 荷重変形関係（中型断面の SKPL6 シリーズとの比較）

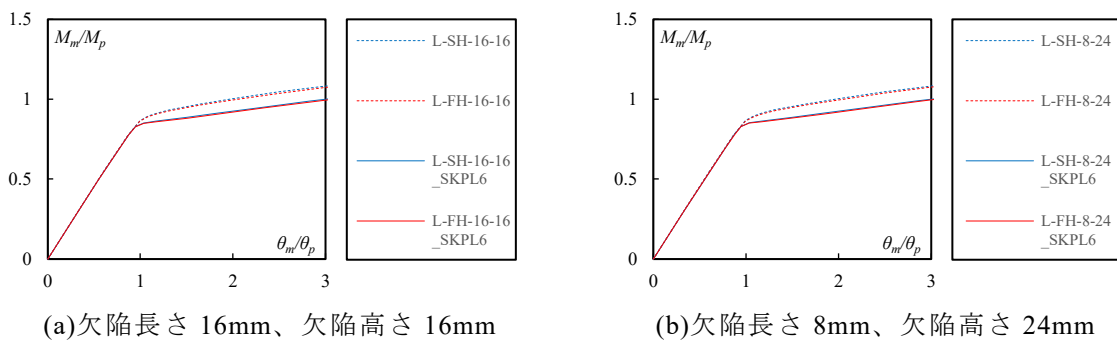


図 4.7 荷重変形関係（大型断面の SKPL6 シリーズとの比較）

2) 亀裂開口変位

亀裂開口変位と梁変形関係について比較する．梁変形は変形角 θ_m を全塑性モーメント M_p 時の弾性相対変形角 θ_p で無次元化して示す．中型断面外開先の欠陥長さ 5mm および欠陥高さ 5mm の結果を代表で図 4.8 に示す．パネル部の柱板厚を薄くして接合部係数を減少させたことで，同一梁変形時の COD の値が若干増加している．これは，梁におけるウェブの寄与率が低下したことでフランジ側の応力が上昇したことに伴って COD も増加したと考えられる．なお，解析結果については，内開先および大型断面の場合にも接合部係数を減少させることで同様の傾向を示す．

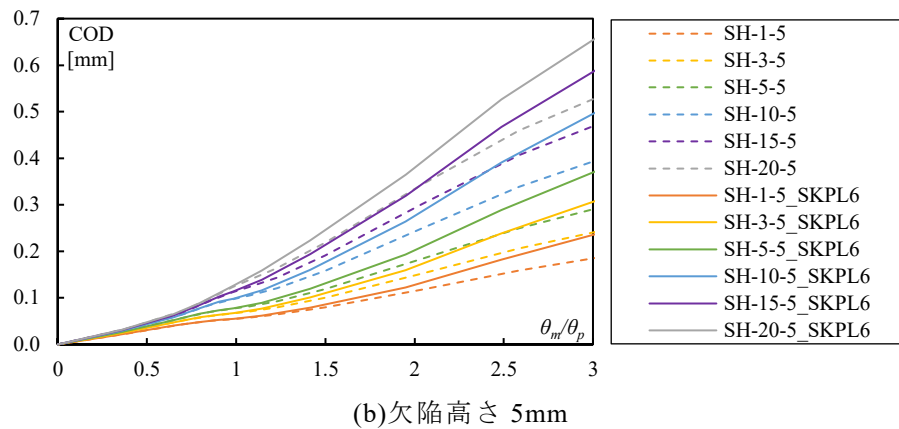
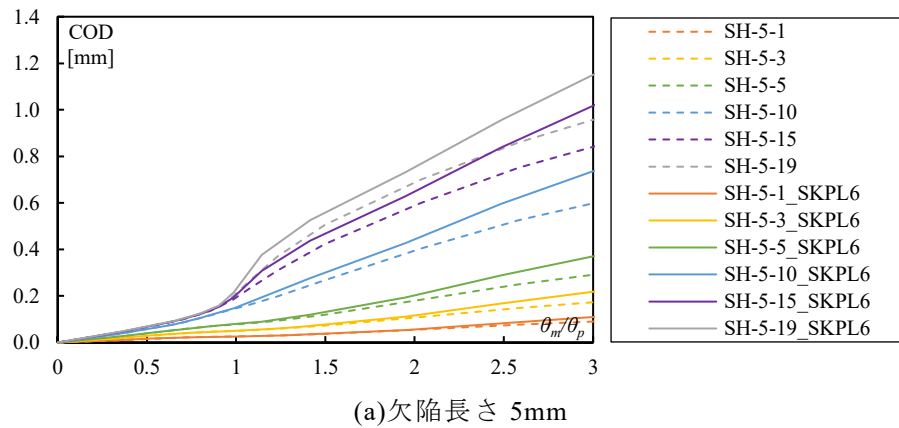


図 4.8 COD—梁変形関係（中型断面の外開先）

$\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD についてまとめたものを表 4.8 に示す. 同一欠陥長さの COD について, 限界 COD 付近の値 (中型断面シリーズでは 0.5mm, 大型断面シリーズでは 0.8mm) を色塗で示す. 表 4.3 および表 4.8 を用いて, 接合部係数を低下させたことでの COD の変化率を表 4.9 に示す. 接合部係数を低下させたことで, 同一梁変形時の COD は増加している. 表下部には表 4.8 にて色塗とした限界 COD 付近の値の平均値の結果を示している. 平均値に着目すると, 中型断面シリーズで 1.22~1.25, 大型断面シリーズで 1.21~1.26 である. これは, 限界 COD 時の $\bar{H}_d$ および $\bar{L}_d$ の制限が厳しくなることを示唆している.

表 4.8 $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD

(a) 中型断面シリーズ (SKPL6)												(b) 大型断面シリーズ (SKPL6)											
		欠陥長さ (SH SKPL6) [mm]					欠陥長さ (FH SKPL6) [mm]							欠陥長さ (L-SH SKPL6) [mm]					欠陥長さ (L-FH SKPL6) [mm]				
		5	10	16	24	32	5	10	16	24	32			5	10	16	24	32	5	10	16	24	32
欠陥高さ	3	0.17	0.22	0.25	0.27	0.29	0.23	0.28	0.31	0.33	0.35	欠陥高さ	5	0.46	0.52	0.62	0.67	0.70	0.61	0.68	0.77	0.82	0.85
	5	0.24	0.37	0.50	0.59	0.65	0.30	0.45	0.58	0.68	0.75		8	0.68	0.84	1.16	1.35	1.48	0.85	1.04	1.38	1.59	1.72
	10	0.37	0.74	1.18	1.52	1.77	0.45	0.86	1.36	1.78	2.09		16	1.09	1.47	2.28	2.80	3.21	1.32	1.74	2.65	3.29	3.78
	15	0.46	1.02	1.66	2.12	2.51	0.55	1.18	1.92	2.45	2.86		24	1.36	1.90	2.96	3.72	4.38	1.62	2.21	3.45	4.30	4.99

表 4.9 SKPL6 シリーズの $\theta_m/\theta_p=3.0$ 時の COD 変化率

(a) 中型断面シリーズ												(b) 大型断面シリーズ											
		欠陥長さ (SH) [mm]					欠陥長さ (FH) [mm]							欠陥長さ (L-SH) [mm]					欠陥長さ (L-FH) [mm]				
		1	5	10	15	20	1	5	10	15	20			5	8	16	24	32	5	8	16	24	32
欠陥高さ	3	1.26	1.26	1.25	1.25	1.25	1.29	1.27	1.26	1.25	1.24	欠陥高さ	5	1.20	1.21	1.21	1.21	1.21	1.28	1.26	1.24	1.23	1.22
	5	1.27	1.27	1.26	1.25	1.24	1.26	1.24	1.23	1.21	1.20		8	1.23	1.23	1.22	1.22	1.22	1.24	1.22	1.19	1.17	1.16
	10	1.25	1.23	1.21	1.21	1.21	1.24	1.21	1.19	1.17	1.16		16	1.20	1.20	1.19	1.19	1.20	1.21	1.19	1.15	1.14	1.14
	15	1.24	1.21	1.21	1.21	1.21	1.23	1.20	1.17	1.16	1.16		24	1.19	1.18	1.19	1.19	1.20	1.19	1.17	1.14	1.14	1.14
平均 (色塗のみ)		1.24	1.25	1.24	1.25	1.25	1.24	1.23	1.24	1.23	1.22	平均 (色塗のみ)		1.22	1.22	1.21	1.21	1.22	1.26	1.24	1.22	1.23	1.22

3) 限界 COD 時の許容欠陥寸法

限界 COD 時の $\bar{H}_d$ - $\bar{L}_d$ 関係を図 4.9 に示す. いずれのシリーズにおいても, 接合部係数を低下させることで, $\bar{H}_d$ - $\bar{L}_d$ 関係はグラフ内の左下に移動する. すなわち, 欠陥許容値が厳しくなる.

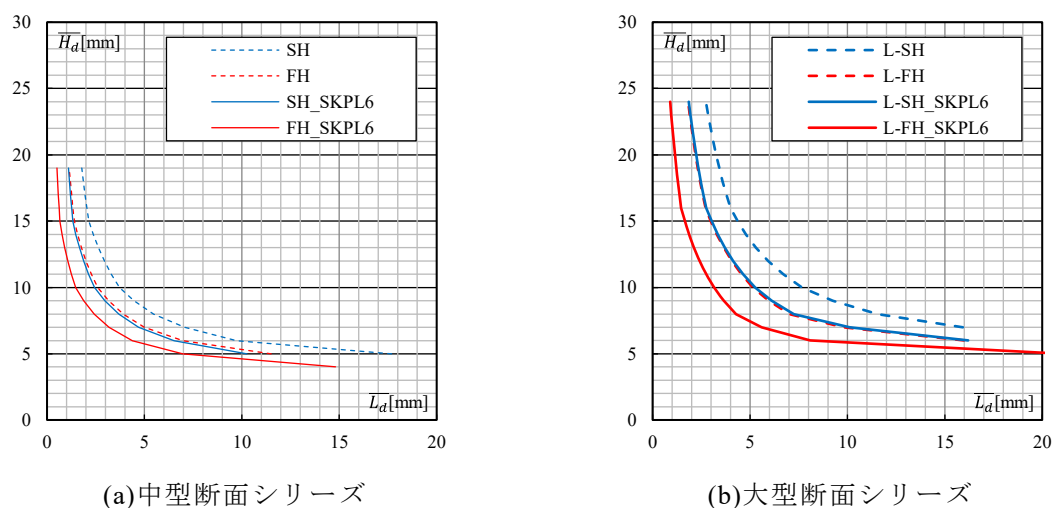


図 4.9 限界 COD 時の $\bar{H}_d$ - $\bar{L}_d$ 関係

4.4 まとめ

COD に影響を与える可能性のある因子として、溶接部強度および接合部係数を新たな因子として有限要素数値解析を実施して考察を行った。本章では、以下の知見を得た。

- (1) 溶接部を YGW11 から YGW18 に変更して溶接部強度を上昇させたことで、同一梁変形時の COD は減少した。溶接部強度を上昇させた場合に、限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d} - \overline{L_d}$ 関係より欠陥許容値が緩和される。
- (2) パネル部の鋼管厚を薄くして接合部係数を減少させたことで、同一梁変形時の COD は増加した。接合部係数が低下した場合に、限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d} - \overline{L_d}$ 関係より欠陥許容値が厳しくなる。

参考文献

- 4.1) 上田遼，田中剛，吹田啓一郎，佐藤勇介，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 3 溶接部強度を因子とした載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.81-82，2012.9

第 5 章 結論

5.1 まとめ

本論文では、溶接欠陥寸法、開先形状および梁断面寸法を因子として、溶接欠陥が梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす影響について、実大載荷実験および有限要素数値解析を実施して分析し、溶接欠陥の許容寸法を提案した。さらに、許容欠陥寸法に影響を与える因子として、溶接部強度および接合部係数について考察した。以下に、第 2 章～第 4 章で得られた知見をまとめる。

第 2 章では、開先形状、溶接欠陥寸法および試験体寸法比を因子とした実大 T 字形試験体による一定振幅繰返し載荷実験である実験 I および実験 II を実施して、溶接欠陥が梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす影響について分析して、以下の知見を得た。

- (1) フェーズドアレイ超音波探傷検査法により、通常の超音波探傷検査法では測定が困難な欠陥高さを良好に測定できる。
- (2) 溶接欠陥寸法が高さ方向に大きい場合、初亀裂および亀裂の板厚貫通が早期に発生した。
- (3) 溶接欠陥は亀裂発生から板厚を貫通するまでの延性亀裂の進展に大きい影響を与え、その影響は欠陥長さよりも欠陥高さによる影響が大きい。
- (4) 実験結果のばらつきが大きくなる欠陥高さの大きい 2 種類の試験体を除いて、断面シリーズ間で比較した。大型断面シリーズの延性亀裂による板厚貫通までの η_d の低下は最大 25% に留まり、板厚貫通時点まででは寸法効果の影響は小さい。一方、脆性破壊を伴うこともある板厚貫通から破断までの η_{u-d} の低下は最大 71% に上り、板厚貫通から破断までには寸法効果の影響が大きい。

第 3 章では、実大載荷実験に供した試験体をモデル化して有限要素数値解析を実施した。溶接欠陥寸法の違いによって、溶接欠陥近傍の歪性状、亀裂開口変位 (COD) および溶接部に発生する延性亀裂がフランジ板厚方向に貫通するまでの累積塑性変形倍率 (η_d) について整理して、COD- η_d 関係を算出した。塑性変形能力の要求値を定めて、それを確保するための COD の上限値 (限界 COD) を定めた。欠陥寸法を詳細に設定した解析モデルを追加して、COD と欠陥寸法の間関係を分析し、限界 COD 時の欠陥長さと欠陥高さの間関係を算出して、欠陥の許容値とした。さらに梁断面寸法の異なる大型断面シリーズについては、中型断面シリーズとの寸法比である 1.6 で COD を除すことで基準化して扱い、基準化した欠陥の許容値を算出し、以下の知見を得た。

- (1) 欠陥高さおよび長さの寸法が大きいほど COD は大きい。
- (2) 欠陥寸法が同一の場合、外開先の COD に比べて内開先の COD は大きくなる。
- (3) スリット頂部の相当塑性歪 ε_{eq} と COD の関係には、正の相関があり、COD は亀裂進展と相関性があると考えられる。
- (4) 実験結果より得られた η_d と解析結果より得られた COD との間関係を近似曲線で表した。塑性変形能力の要求値を設定して中型断面シリーズの限界 COD=0.50mm、大型断面シリーズの限界 COD=0.80mm を提案し、限界 COD の欠陥長さと欠陥高さの間関係を示した。
- (5) 限界 COD 時の欠陥長さと欠陥高さの組合せを示した。欠陥の境界値は、FH<SH<L-FH<L-SH の順となる。
- (6) 大型断面シリーズの結果を中型断面シリーズで基準化して限界 COD 時の $\overline{H_d}-\overline{L_d}$ 関係を示した。断面シリーズ間で比較すると、断面寸法の影響は基準化により排除できる。

第4章では、CODに影響を与える可能性のある因子として、溶接部強度および接合部係数を新たな因子として有限要素数値解析を実施して考察を行い、以下の知見を得た。

- (1) 溶接部を YGW11 から YGW18 に変更して溶接部強度を上昇させたことで、同一梁変形時の COD は減少した。溶接部強度を上昇させた場合に、限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d}-\overline{L_d}$ 関係より欠陥許容値が緩和される。
- (2) パネル部の鋼管厚を薄くして接合部係数を減少させたことで、同一梁変形時の COD は増加した。接合部係数が低下した場合に、限界 $\overline{COD}$ 時の $\overline{H_d}-\overline{L_d}$ 関係より欠陥許容値が厳しくなる。

学術論文（査読）

- 1) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 津嘉田敬章, 山根正寛: 場溶接形式の溶接欠陥が梁の塑性変形能力に及ぼす影響, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, 第 19 巻, pp.171-178, 2011
- 2) 上田遼, 田中剛, 佐藤勇介, 萩野毅, 大村修太朗: 改良型固形エンドタブを用いて現場溶接接合された梁の変形能力, 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, pp.109-116, 2012
- 3) Yusuke SATO, Tsuyoshi TANAKA, Ryo UETA, Tsuyoshi HAGINO and Shutaro OMURA : Test on Plastic Deformation Capacity of Beams with Weld Defects, Proceedings of 10th PSSC (Pacific Structural Steel Conference), pp.79-84, 2013.10
- 4) 上田遼, 田中剛, 山本涼, 畔上進, 塚大空哉: 溶接欠陥を有する H 形断面梁の塑性変形能力 (その 1): 開先形状が変形能力および亀裂進展に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 89 巻, 第 823 号, pp.908-916, 2024

学会口頭発表

- 1) 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・構造系, pp.265-268, 2011.5
- 2) 田中剛, 上田遼, 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.1033-1034, 2011.7
- 3) 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 2 破壊状況および塑性変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.1035-1036, 2011.7
- 4) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 佐藤勇介, 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 2 現場溶接形式の溶接部強度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 52 号・構造系, pp.437-440, 2012.5
- 5) 佐藤勇介, 田中剛, 上田遼, 萩野毅, 大村修太朗: 改良型固形エンドタブを用いて角形鋼管柱に溶接接合された梁の塑性変形能力: その 1 エンドタブ形式および欠陥の有無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 52 号・構造系, pp.441-444, 2012.5
- 6) 上田遼, 田中剛, 吹田啓一郎, 佐藤勇介, 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 3 溶接部強度を因子とした載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.81-82, 2012.9
- 7) 大村修太朗, 田中剛, 佐藤勇介, 上田遼, 萩野毅: 改良型固形エンドタブを用いて角形鋼管柱に現場溶接接合された梁の塑性変形能力: その 1 エンドタブ形式および欠陥の有無を因子とした載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.83-84, 2012.9
- 8) 佐藤勇介, 田中剛, 上田遼, 萩野毅, 大村修太朗: 改良型固形エンドタブを用いて角形鋼管柱に現場溶接接合された梁の塑性変形能力: その 2 塑性変形能力および有限要素数値解析による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.85-86, 2012.9
- 9) 佐藤勇介, 田中剛, 上田遼, 萩野毅, 大村修太朗: 改良型固形エンドタブを用いて角形鋼管柱に溶接接合された梁の塑性変形能力: その 2 欠陥長さおよび開先形状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 53 号・構造系, pp.373-376, 2013.5

- 10) 上田遼, 田中剛, 佐藤勇介, 中澤好道, 鎌倉和彦, 佐々木靖文: 柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響: その 1 冷間プレス成形角形鋼管柱の載荷実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 53 号・構造系, pp.377-380, 2013.5
- 11) 大村修太郎, 田中剛, 佐藤勇介, 上田遼, 萩野毅: 改良型固形エンドタブを用いて角形鋼管柱に現場溶接接合された梁の塑性変形能力: その 3 欠陥長さおよび開先形状を因子とした載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1169-1170, 2013.8
- 12) 佐藤勇介, 田中剛, 上田遼, 萩野毅, 大村修太郎: 改良型固形エンドタブを用いて角形鋼管柱に現場溶接接合された梁の塑性変形能力: その 4 破壊状況および塑性変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1171-1172, 2013.8
- 13) 鎌倉和彦, 田中剛, 上田遼, 佐藤勇介, 中澤好道, 佐々木靖文: 角形鋼管柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響: その 1 欠陥位置および載荷方向を因子とした載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1183-1184, 2013.8
- 14) 上田遼, 田中剛, 佐藤勇介, 中澤好道, 鎌倉和彦, 佐々木靖文: 角形鋼管柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響: その 2 破壊状況および塑性変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1185-1186, 2013.8
- 15) 高倉正幸, 田中剛, 浅田勇人, 上田遼, 中澤好道, 鎌倉和彦: 柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響—その 2 欠陥高さを因子とした載荷実験および C T O D による欠陥評価—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 55 号・構造系, pp.457-460, 2015.6
- 16) 高倉正幸, 田中剛, 浅田勇人, 上田遼, 中澤好道, 鎌倉和彦: 角形鋼管柱の塑性変形能力に及ぼす溶接欠陥の影響: その 4 C T O D による欠陥評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1047-1048, 2015.9
- 17) 前田涼太, 田中剛, 上田遼, 山本涼, 畔上進, 的場耕, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響—その 1 工場溶接形式における欠陥高さ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 62 号・構造系, pp.357-360, 2022.6
- 18) 山本涼, 田中剛, 上田遼, 前田涼太, 畔上進, 的場耕, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 1: 工場溶接形式; 欠陥高さを因子とした載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1047-1048, 2022.7
- 19) 前田涼太, 田中剛, 上田遼, 山本涼, 畔上進, 的場耕, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 2: 工場溶接形式; 亀裂進展状況および塑性変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1049-1050, 2022.7
- 20) 山本涼, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響—その 2 現場溶接形式における欠陥高さ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 63 号・構造系, pp.145-148, 2023.6
- 21) 田原侑季, 高塚康平, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉: 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響—その 3 大型断面・工場溶接形式における欠陥高さ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 63 号・構造系, pp.149-152, 2023.6
- 22) 上田遼, 田中剛, 山本涼, 畔上進, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 3: 現場溶接形式; 欠陥高さを因子とした載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1047-1048, 2023.7
- 23) 山本涼, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 4: 現場溶接形式; 亀裂進展状況および塑性変形能力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1049-1050, 2023.7
- 24) 高塚康平, 田原侑季, 田中剛, 上田遼, 畔上進, 塚大空哉: H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 5: 梁断面寸法を因子とした載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1051-1052, 2023.7

- 25) 田原侑季，高塚康平，田中剛，上田遼，畔上進，塚大空哉：H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 6：梁断面寸法を因子とした場合の亀裂進展状況および変形能力，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.1053-1054，2023.7
- 26) 田原侑季，高塚康平，田中剛，上田遼，西澤淳，塚大空哉：梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響－その 4 大型断面・現場溶接形式における欠陥高さ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 64 号・構造系，pp.321-324，2024.6
- 27) 松本優大，田中剛，上田遼，山本涼，西澤淳，塚大空哉：梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響－その 5 中型断面对象とした有限要素数値解析－，日本建築学会近畿支部研究報告集，第 64 号・構造系，pp.325-328，2024.6
- 28) 上田遼，高塚康平，田原侑季，田中剛，西澤淳，塚大空哉：H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 7：大型断面梁；開先の向きを因子とした載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.1047-1048，2024.7
- 29) 田原侑季，高塚康平，田中剛，上田遼，西澤淳，塚大空哉：H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 8：大型断面梁；開先の向きを因子とした場合の亀裂進展状況および変形能力，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.1049-1050，2024.7
- 30) 松本優大，田中剛，上田遼，西澤淳，塚大空哉：H 形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響その 9：中型断面梁；欠陥高さを因子とした有限要素数値解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.1051-1052，2024.7

謝辞

神戸大学工学部建築学科4回生より本研究に携わって以来、神戸大学大学院教授 田中剛 先生には、博士課程後期課程への社会人としての入学と本研究の継続を進めて頂き、2021年10月より研究を再始動いたしました。今日に至るまで終始変わらず丁寧に御指導・御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、神戸大学大学院教授 藤永隆 先生ならびに宇都宮大学大学院准教授 中野達也 先生には、非常に適格な助言およびご指導を頂きました。ここに深くお礼申し上げます。

京都大学大学院助教 高塚康平 先生には、共同研究者として多くの助言を頂くだけでなく、熱心にご指導を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究は、日本学術振興会の科学研究費・基盤研究(B)(No.20H02297)による助成を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

株式会社角藤 畔上進 氏、西澤淳 氏をはじめとした関係者の方々には、試験体製作において多大なご協力を頂き深く感謝申し上げます。

ジャスト株式会社 古舘岳実 氏には、試験体の溶接部検査において多大なご協力を頂き深く感謝申し上げます。

本研究の実験・解析等の研究を進めるにあたって、神戸大学大学院博士前期課程 前田涼太 氏(現：関西電力株式会社)、同 山本涼 氏(現：株式会社神戸製鋼所)、同 松本優大 氏、京都大学大学院博士前期課程 聲高・高塚研 田原侑季 氏と共同で行ったものであります。惜しめない御協力に厚く御礼申し上げます。また、実験を実施するにあたり、終始多大な御協力を賜りました重松征男 氏、京都大学 藤平剛久 氏、神戸大学の鋼構造研究室および京都大学の聲高・高塚研究室の皆様には厚く感謝いたします。

最後に株式会社奥村組 建築設計部 部長 杉野勝啓 氏、同 構造設計 部長 武田彰文 氏ならびに構造課の皆様には、業務との両立において手厚くサポートして頂き、お礼の言葉もございません。心から感謝いたします。

2025年1月20日
神戸大学大学院工学研究科
上田遼

神戸大学博士論文「梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす梁端フランジ溶接部の溶接欠陥の影響」全 131 頁

提出日 2025 年 1 月 20 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 上田 遼

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。