# 溶接割れ・溶接変形研究部会 報告書

STEEL

Japan Steel Bridge Engineering Association TECHNICAL REPORT /No.083 平成30年7月



鋼橋技術研究会 溶接割れ・溶接変形研究部会 報告書

# 鋼橋技術研究会 溶接割れ・溶接変形研究部会 会員名簿

役 職	氏 名	所属
部 会 長	舘石 和雄	名古屋大学
幹 事	穴見 健吾	芝浦工業大学
11	田井 政行	琉球大学
庶務幹事	田村修一	宮地エンジニアリング 株式会社
部 会 員	内村 直弘	株式会社 駒井ハルテック
11	亀崎 令	川田工業 株式会社
11	花岡 康夫	高田機工 株式会社
11	廣瀬 茂幸	三井造船鉄構エンジニアリング 株式会社
11	源 寛輝	株式会社 富貴沢建設コンサルタンツ
11	吉村 征宣	株式会社 IHI インフラシステム
		※所属については H29.12 時点
旧部会員	小笠原 隆幸	宮地エンジニアリング 株式会社
11	鷹羽 新二	高田機工 株式会社

# 溶接割れ・溶接変形に関する調査研究 目次

§1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1−1. 研究の背景・目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1-2. 研究の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
§2. 溶接変形・割れ試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2-1.FEMによる試験パラメータの検討······1	1
2−2. 試験体 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
2-3. 試験方法 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2
2−3−1. 試験フロー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
2-3-2. 溶接作業及び溶接条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
2-3-3. 加熱矯止作業 ····································	9
2-3-4. / 各接到化模量 ····································	0
2-4. 試験結果 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3
2-4-1. 溶接割れ試験結果····································	3
2-4-2. 変形計測結果 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3
2−4−3. 加熱矯正計測結果 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	4
§3. 溶接変形のシミュレーション······3	6
3-1.はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
3−2. 解析対象 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	6
3-3. 有限要素解析による溶接変形解析 ····································	9
3-3-1.解析モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
3−4. 溶接変形解析結果 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2
3−4−1. 解析パラメータの感度解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
3-4-2.拘束の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	.3
3-4-3. 解析結果と実験結果の比較 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	.3
付録 溶接変形計測結果 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	7

§1 はじめに

#### 1-1. 研究の背景・目的

鋼橋の接合方法において,溶接は最も基本的かつ重要な接合方法であり,この溶接接合部に要求さ れる性能や品質を確保することが,設計で要求される部材の耐荷性や耐久性を確保し,鋼橋の健全性 を確保するために重要である.溶接接合部において,溶接入熱による材質の劣化や溶接欠陥,溶接残 留応力や溶接変形が部材の耐荷性・耐久性に影響を与える要因となり得るが,本研究ではこれらの影 響因子の中で溶接割れと溶接変形に着目して以下の検討を行った.

#### 【溶接割れに関する検討】

溶接入熱による材質の変化や溶接欠陥を防止するための施工管理項目は,道路橋示方書などの技術 基準類に規定されている.その中でも低温割れは,溶接部が300度以下に冷却されてから生じる割れ であり,溶接金属に発生するものと,熱影響部(HAZ)に発生するものとがある<sup>1-1)</sup>.熱影響部に発生 する低温割れにはルート部や止端部から発生するものがあり,溶接金属に発生するものには,ルート 部や溶接ビードの谷間に見られる縦割れや,溶接ビード直角方向の横割れなどが挙げられる<sup>1-2)</sup>.すみ 肉溶接に発生する低温割れの模式図を図1-1に示す<sup>1-2)</sup>.この低温割れに関しては,溶接が普及し始め て間もないころから盛んに研究が行われてきた.これらの研究成果より鋼材の化学成分,溶接材料の 拡散性水素量,継手の拘束度の3つが大きな要因とされ,これらの研究成果が,溶接材料,溶接サイ ズや溶接長,入熱量,予熱などの施工管理項目に反映されている.しかし,これらの研究当時と比較 して,製鋼方法や溶接材料・溶接技術は著しい発展を遂げており,新設橋の製作時に危惧される低温 割れの発生頻度は以前と異なっている可能性がある.

このような背景のもと,鋼橋技術研究会施工部会(部会長名古屋大学舘石教授:平成23年~26年: 鋼橋技術研究会報告書 No.077<sup>1-3)</sup>)において行った「溶接割れに関する調査研究」では,橋梁製作工場 への溶接割れの実態調査を行っている.そこでは,図1-2にまとめているように,例えば

○ 部材交差部ディテールの溶接ビードの近接部の割れ

○ 部材交差部における完全溶込み溶接継手部(十字継手部)の鋼材介在物に起因する割れ

○ 排水升の全周溶接部や,ソールプレートのせん断キー用の孔(ボス孔)のシール溶接部の割れ など,現在の工場製作部材においても低温割れが生じる場合があることを確認している.更に,現在 の鋼材および撤去橋梁(1896年,1903年,1961年建設の3橋梁)より採取した古材を用いて,日本 海事協会により定められるすみ肉溶接割れ試験により,低温割れの発生条件について,鋼材の化学成 分,拡散性水素量および試験体の板厚構成によって異なる拘束度を対象に検討を行っている.試験鋼 材を含めた割れ試験の概要を表 1-1 および図 1-3 に示す.また,溶接割れ試験で得られた低温割れ(溶 接ルート部からのヒールクラックおよび立板組立溶接部の溶接ルート部から発生し溶接金属内に進展 した割れ)を図 1-4 に示す.検討の結果,図 1-5,図 1-6 に示すように,CENでの評価が適切である ことを示しているが,低温割れの発生条件に対する,拘束度や拡散性水素量の関連性については明瞭 にすることはできていない.

一方で、実構造物における溶接割れの発生には、前述したように、鋼材の化学組成、溶接材料の拡 散性水素量、継手の拘束度やその他溶接条件が複雑に影響しているものと考えられ、一般的に行われ る溶接割れ試験の検討のみでは実構造物に発生する溶接割れの解明には必ずしも十分ではないと考え られる.例えば、溶接割れの実態調査で得られた割れ発生事例では、前述したように、溶接部の近接 や完全溶込み溶接の適用など、溶接時の拘束度が大きいと考えられる部位での事例報告が多い.溶接 割れは、溶融した溶接部が冷却時に周囲から拘束されることにより生じる引張(残留)応力により発 生するため、その発生する引張応力の大きさに影響を及ぼす拘束度は低温割れの発生に大きな影響を 及ぼすことになる.一般的に、拘束の度合いを示す指標である拘束度Kに関しては、突合せ溶接継手の 一次元拘束を基本として確立された「溶接継手のルート間隔を単位長さ短くさせるのに要する単位溶 接長あたりの力の大きさ」と定義され、T型の溶接継手に対しても水平板とそれに溶接される立板のル ート間隔短縮について適用されている.この拘束度Kに関してもこれまで多くの研究が行われてきてお り、実鋼橋に採用される様々な溶接継手の拘束度に関しても、これまでに幾つかの計測・解析事例が 公表されている<sup>14~1-7</sup>.しかし、前述した近年の鋼橋製作における低温割れ発生事例に見られた部材交 差部の近接した溶接部の止端部に見られる低温割れに関して、その拘束度を評価する手法は明らかに されていない.また当該部位では溶接部の近接によって生じる熱影響による材質変化の問題や回し溶 接部の溶接手法によっては短い溶接長となる場合もあることの影響も考えられる.そのため、鋼橋製 作で発生している溶接割れの現象の解明には、その溶接ディテールを再現したモデルにより割れ発生 条件の検討を行うことが重要であると考えられる.

そこで、本研究では、橋梁製作工場における溶接割れの実態調査において、溶接割れの発生が複数 報告された鋼橋の実構造ディテール(横桁 – 縦桁交差部ディテールの溶接ビードの近接部の割れ)を 模擬した中型試験体を用い、実橋梁製作における溶接条件・溶接順序に従った溶接試験を行い、実構 造における溶接割れの再現、およびその原因の解明を目標として検討を行った。

#### 【溶接変形に関する検討】

溶接により溶接接合部には溶接残留応力や溶接変形が不可避に生じる.このような溶接残留応力や 溶接変形も,鋼部材の耐荷性や耐久性に大きな影響を及ぼす.例えば溶接変形については,初期不整 による座屈耐荷力の低下や,部材の偏心に起因した二次応力の発生による疲労耐久性の低下などの影 響が考えられる.また,鋼橋製作上(架設精度)に対する悪影響も挙げられる.そのため,溶接によ り生じる,もしくは溶接後に残存する残留変形を推定することは重要であり,また残留変形を低減で きる溶接施工条件を選定するために有効な手段と考えられる.

一方,溶接変形については,溶接後にプレス矯正や加熱矯正といった手法により矯正される.加熱 矯正では,加熱温度の最高温度などが定められているものの,一般に施工技術者の経験に基づいた条 件・方法により施工が行われているのが現状であり,加熱矯正技術の伝承および革新に向けても加熱 矯正時の残留変形や残留応力の変化をシミュレートする技術が重要である.

溶接により生じる残留応力や残留変形の推定手法の研究は古くから行われている.近年では熱弾塑 性有限要素解析が行われていることが多いが,熱源移動を考慮した溶接順序の再現や,より複雑な材 料の非線形現象を再現するといった,より実際の溶接現象を再現できる解析技術が開発されており, ある程度の精度で溶接残留応力を推定することが可能となっていると考えられる.しかし,一般的に 溶接残留応力よりも推定が困難とされる溶接残留変形等の熱変形量については,どの程度の精度で実 現象を再現できるのかは明らかではない.そこで本研究では,鋼橋の実構造ディテールを模擬した中 型試験体を用いて,溶接時に生じる溶接変形量,および加熱矯正時の変形量の変化を実測により把握 した.また,平板に付加板を両面すみ肉溶接により取り付けた時の,溶接時に生じる溶接変形量を数 値解析によりシミュレートすることを目標とした検討を行った.

2

#### 1-2. 研究の概要

本研究では、鋼橋技術研究会施工部会「溶接割れに関する調査研究」(平成23年~26年:鋼橋技術 研究会報告書 No.077)において行った橋梁製作工場への溶接割れの実態調査において、複数の低温割 れの発生が報告された鋼鈑桁橋横桁-縦桁取合ディテール(縦桁フランジのコネクションプレートの 横桁ウェブへの接合部)を対象として検討を行うこととした.類似のディテールとして、水平補剛材 端部と垂直補剛材の隣接部や主桁-横構の取合い部において垂直補剛材を跨ぐような形で設置された ガセットプレートなどがある.後者においては、疲労損傷が多く報告されており、また2000年に発生 した米国 HOAN 橋の主桁の脆性破壊のように、溶接割れから重大な損傷を招く恐れのあるディテール と言え、本研究の対象としたものである.

図 1-7 に本研究の検討フローを示す. 図 1-8 に本研究で対象とする横桁ウェブと縦桁取合ディテー ル(コネクションプレート)および,溶接割れが報告された事例における構造詳細をまとめる.本研 究では,まず,対象とした取合ディテールの板厚構成やコネクションプレートと垂直補剛材との間隔 (ギャップ量)などの調査および FEM 解析を行い,ギャップ量,板厚構成,鋼種をパラメータとし た溶接割れ試験および溶接変形シミュレーションに用いる中型試験体の設計を行った.

次に、鋼橋の実施工順序に従い、ウェブとフランジの溶接、垂直補剛材の取付け、コネクションプ レートの取付けの順に溶接を行い、コネクションプレート溶接前後の溶接変形の測定およびコネクシ ョンプレート溶接後の溶接割れの発生の有無の調査を行った.なお、一体の試験体についてはコネク ションプレートの取付け後に加熱矯正を行い、その際の変形量の変化測定も併せて行っている.

一方で,現在の熱弾塑性有限要素解析技術を用いた数値シミュレーションにより,溶接変形をどの 程度の精度で推定できるのかについて検討することを目的に,平板に付加板をすみ肉溶接した試験体 を製作し,溶接角変形量の実測および数値シミュレーションを試み比較を行った.



図 1-2 鋼橋技術研究会報告書 No.077 で行った溶接割れアンケートのまとめ

							試験領	e件				
	120222			1	使用鋼材			-	网络拉拉拉		20740	100-100
試験工程	試験	試験体形状	下板(	着目材)	<del>†</del> )	¢.	立板	1	前原付村		FOR 13K 598 -596	
	3 3		製造年代	板厚 (mm)	鐵材強度 (N/mm <sup>2</sup> )	板厚 (mm)	鋼材強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材料種別	材料強度 (N/mm <sup>2</sup> )	乾燥 状態	温度	湿度
	1-E1	2								乾燥	高温	
	2-E2	1	tooght dath						[	吸湿	高温	
	3-E3		1896年 古村	31						乾燥	低温	
	4-E4			54 - A	220					吸湿	低温	
試験工程1	5-S1	タイプ1			-00	-		11517176	202	乾燥	高温	- Medera
2011年 7月	6-52	組立溶接有	10010 1111	227	400	12	400 (A)	19/13/16/92	430	吸湿	高温	間徑
	7-S3	5	1961年 百州	10						乾燥	低温	
	8-S4				99.20				1	吸湿	低温	
	9-T1	Į i	100945	40	A-65					吸湿	高温	
	10-T2	ļ	1903-4 1141	40		ė.				吸湿	高温	
試験工程2	11-E6	41-70	19054 ±11	91	400	10	400(4)			2	9	
	12-E7	23.7.4	10204 [14]	51	400	14	400 (M)	体计作系	430	吸湿	標準	高湿
2012年 5月	13-W1	タイプ3	2008年 高P <sub>CM</sub>	27	490(W)	12	490(Y)					
	14-T3	タイナウ	1903年 士材	40	400	19	400(4)					
試験工程3	15-T4	2124	1909-11141	70	400	1000	TOULA	低水表系	490	1112 JUL	查理	主资
2012年 8月	16-₩2	4173	2008年 高P~	27	490 (W)	12	490 (Y)	New York Streets	400	12X (60)	南温	त्वि (क्र
N. 523	17-₩3	- 1603.1601 <del>1</del>			189 (87	1996						
	18-E8			<u> </u>				体计仆系	430			
	19-E9	1	1896年 古材	31	400	12	400(A)	低水毒系	430	吸湿		
	20-E10							Reaving and site	490			
試験工程4	21-K1		5	20 )	2		*	体计位系	430		1. (2012) (24)	r a constant
Ana Arras II	22-K2	和立溶接無	2.8				1		490	吸湿	高温	高湿
2012年11月	23-K3		2011年 高Pca	34	490(Y)	12	490(Y)	低水麦系	430		2	
	24-K4	i.						NUMBER OF STREET	490	乾燥		
	25-K5								590	吸湿		
	26-S5	6	1961年 古材	10	400	12	400 (A)	化计仆系	430	吸湿	8	

表 1-1 鋼橋技術研究会報告書 No.077 で用いられた試験鋼材



図 1-3 鋼橋技術研究会報告書 No.077 で用いられた溶接割れ試験体



ヒールクラック



図 1-4 鋼橋技術研究会報告書 No.077 の溶接割れ試験にて観察された溶接割れの例







図 1-6 鋼橋技術研究会報告書 No.077 の溶接割れ試験結果の拘束度に着目した整理



図 1-7 本研究の流れ



	鋼橋技術研究会	鋼橋技術研究会
	報告書 No.077(1)	報告書 No.077(2)
横桁ウェブ板厚	14 mm	9mm
横桁補剛材板厚	9 mm	9mm
縦桁コネクションプレート板厚	12 mm	18 mm
横桁ウェブと補剛材の溶接	すみ肉 6 mm	すみ肉 6 mm
横桁ウェブと	完全溶込み溶接	完全溶込み溶接
コネクションプレートの溶接		
ギャップ量	70 mm	不明
コネクションプレート形状	横桁垂直補剛材を跨ぐ形式	分離型
割れ発生位置	縦桁仕ロ フルベネ溶接 使析補刷材 すみ肉溶液	横桁補剛材 すみ肉溶液 縦桁仕ロ フルペネ溶接

図 1-8 対象ディテールに発生した溶接割れとディテール詳細

参考文献

1-1)日本鋼構造協会:わかりやすい溶接の設計と施工,技法堂出版株式会社

1-2)(社)日本溶接協会 HP: JWES 接合・溶接技術 Q&A1000,

URL: <u>http://www-it.jwes.or.jp/qa/details.jsp?pg\_no=0040010100</u>

1-3)鋼橋技術研究会施工部会:鋼橋技術研究会報告書 No.077, 2014.

- 1-4)奥村敏恵,堀川浩甫,井上啓一:溶接継手の構造拘束について,土木学会第24回年次学術講演会 講演集,I-114, pp.315-316, 1969.
- 1-5)小西一郎, 佐伯章美, 近藤淳, 牛尾正之: 鋼床版の現場つき合せ溶接による拘束応力について, 土木学会第24回年次学術講演会講演集, I-115, pp.317-320, 1969.

1-6) 明石重雄,夏目光尋:溶接割れと継手の拘束度について,横河橋梁技報,No.2, pp.39-46, 1972.

1-7) 井藤昭夫,渡辺昇: すみ肉溶接継手の拘束度に関する実験的研究,土木学会論文集,第362 号 I
-4, pp.233-238, 1985.10.

#### §2 溶接変形・割れ試験

本研究では、図 2-1 に示すように実橋梁の製作時に溶接割れが報告されている、横桁ウェブと縦桁 取り合いコネクションプレートの回し溶接部近傍に着目し、溶接割れ発生条件について検討を行った. 検討にあたっては、FEM により試験パラメータの検討を行ったのちに、溶接割れ試験を行った.



(a) 横桁ウェブと縦桁取り合いコネクションプレートのディテール



(b) 溶接割れ発生状況例図 2-1 試験対象ディテールと溶接割れ発生状況例

# 2-1. FEM による試験パラメータの検討

横桁ウェブと縦桁取り合いコネクションプレートの回し溶接部近傍に発生する溶接割れに関して, 影響を及ぼすパラメータを検討するために,3次元弾塑性解析を実施し,溶接に伴う残留応力の比較 を行った.

試験体の基本形状を図 2-2 に示す.実施工の板厚構成に近い,板厚 9mm の鋼板をウェブ,上下フラ ンジ,垂直補剛材とし,板厚 18mm の鋼板をコネクションプレートとしている.この基本形状につい て,対称性を考慮して 1/4 モデルを作成し,パラメータの検討を行った.解析モデル例を図 2-3 に, パラメータの一覧を表 2-1 に示す.パラメータは垂直補剛材とコネクションプレートのギャップ量及 び桁高さとしている.なお,解析モデルは8節点ソリッド要素によりモデル化を行った.

材料特性は,降伏応力 355MPa,ポアソン比 0.3 の完全弾塑性体とし,各物理特性及び機械的性質の 温度依存性には図 2-4 に示すものを用いた.表 2-2 に示す溶接条件を,解析モデル中の横桁ウェブと コネクションプレートの完全溶け込み溶接部領域を入熱領域として1秒間一様入熱を行った.なお, 外気温は 20 度としている.

解析結果より得られた残留応力のコンター図及び x 方向の残留応力を図 2-5 に示す. 図に示すよう に, Model-A では, 完全溶け込み溶接としたコネクションプレート接合部のウェブ側の溶接近傍で大 きな残留応力が生じていることがわかる. また, 桁高さを変化させた Model-C においても同様の傾向 が見られた. 一方, ギャップ距離間を狭くした Model-B では, 残留応力が大きい範囲が広がっている ことがわかる. 垂直補剛材からの距離と残留応力の関係に着目すると, Model-A と Model-C では, 最 大 400MPa 程度の引張残留応力が生じているが, Model-B では 450MPa 程度生じる結果が得られたこ とがわかる.

以上の結果より、コネクションプレート回し溶接部近傍の拘束度に関して、桁高が及ぼす影響はほ どんどないといえる.一方、垂直補剛材とコネクションプレートのギャップ量の影響が大きいことが 確認されたため、これを試験パラメータとすることとした.



図 2-2 試験体の基本形状



図 2-3 解析モデル (Model-A) 素 2-1 解析モデルパラメータ

解析モデル名	パラメータ
Model-A	桁高:1000mm, ギャップ 55mm
Model-B	桁高:1000mm, ギャップ 40mm
Model-C	桁高 : 500mm,ギャップ 55mm



(a) 物理特性



(b) 機械的性質

図 2-4	物理特性及	び機械的性質の	の温度依存性
-------	-------	---------	--------

	57.14	571 4	Heat	Heat								
Current	voltage	Velocity	input	flux								
[A]	[V]	[cm/min]	[J/mm]	[W/mm <sup>3</sup> ]								
260	25	27	3466.7	31.5								

#	2 2	毎万十二 ) テ	田い、	キージャキセノ	タ 14-
77	/-/	田生不圧し	HU	1 1477	<del>x</del> =14-
1			/ 1.1 *		



図 2-5 解析結果

# 2-2. 試験体

垂直補剛材とコネクションプレートのギャップ量を主なパラメータとした溶接割れ試験を3回実施 し、溶接割れ発生条件について検討を行った.各試験の試験体概要を以下に示す.

(1) 試験工程1

試験体形状を図 2-6 に, 試験に用いた鋼板の化学成分及び機械的性質を表 2-3 及び表 2-4 にそれぞれ 示す.ウェブ,上下フランジ,垂直補剛材には板厚 9mm の鋼板を,コネクションプレートには板厚 22mm の鋼板を用いた.

前述の FEM 解析結果より, 垂直補剛材とコネクションプレートとの間隔が溶接割れに対して支配 的なパラメータであると考えられたため, 試験パラメータは, 垂直補剛材とコネクションプレートの ギャップ量とし, それぞれ 35mm (Case1), 70mm (Case2), 120mm (Case3)としている. 写真 2-1 に試験体 を示す. なお, Case3 の試験体に対して, 加熱矯正試験を行った.



図 2-6 試験体形状(試験工程 1)

表 2-3 化学成分 (試験工程 1)

±7++	细話	板厚						化学属	成分 (%	)				
אניום געיום	」	(mm)	C	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Мо	Cr	В	Ceq	Pcm
ウェブ,フランジ, 垂直補剛材	SM400A	9	0.16	0.15	0.51	0.017	0.007	0.01	0.01	0.01	0.02	0.0001	0.26	0.19
コネクションプレート	SM400A	22	0.18	0.18	0.53	0.015	0.005	0.01	0.02	0	0.02	0.0001	0.28	0.21

表 2-4 機械的性質(試験工程 1)

部材	鋼種	降伏点(MPa)	引張強度(MPa)	伸び(%)
ウェブ, フランジ, 垂直補剛材	SM400A	300	440	33
コネクションプレート	SM400A	272	436	32



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3 写真 2-1 試験体(試験工程 1)

(2) 試験工程 2

試験工程1で作成した Case1 及び Case2 の試験体に対して、コネクションプレートの取り付けを行い、溶接割れの有無の確認を行った. 図 2-7 に試験体形状を、表 2-5 及び表 2-6 に試験に用いた鋼板の 化学成分及び機械的性質をそれぞれ示す. 試験パラメータは試験工程1と同様に垂直補剛材とコネク ションプレートのギャップ量であり、20mm (Case4)、25mm (Case5)、28.5mm (Case6)とした. また、コネ クションプレートの形状として、垂直補剛材を跨ぐ形に変更し、ギャップ量を35mmとした場合(Case7) についても検討を行った. 写真 2-2 に試験体を示す.





図 2-7 試験体形状 (試験工程 2)

ギャップ量:G

35

表 2-5 化学成分 (試験工程 2)

口口		(mm)	C	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Мо	Cr	В	Ceq	Pcm
コネクションプレート	SM400A	13	0.17	0.18	0.50	0.025	0.004	0.01	0.02	0	0.04	0.0001	0.27	0.20

表 2-6 機械的性質(試験工程 2)

部材	鋼種	降伏点(MPa)	引張強度(MPa)	伸び(%)
コネクションプレート	SM400A	310	452	28



(a) Case4 及び Case5



(b) Case6 及び Case7 写真 2-2 試験体(試験工程 2)

(3) 試験工程3

試験工程3では、鋼種や材質の影響に着目し、SM490YA(Case8-10)及びSM490AW(Case11-13) を用いて施工試験を行った. コネクションプレートと垂直補剛材のギャップは、両試験体ともに20,35, 70mm である. 図 2-8 に試験体形状を、表 2-7 及び表 2-8 に試験に用いた鋼板の化学成分及び機械的性 質をそれぞれ示す. なお、本試験では溶接割れのみに着目し、施工の簡略化を図るために、上下フラ ンジを省略し、垂直補剛材とコネクションプレートを片側にのみ取り付けている. その際、溶接変形 を拘束するため、ウェブ端部を固定して施工を行った. 写真 2-3 に試験体を示す.

# 組立寸法図



ĊL







図 2-8 試験体形状(試験工程 3)

表 2-7 化学成分(試験工程 3)

±7 ++	细话	板厚	板厚 化学成分 (%)											
2741		(mm)	C	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Мо	Cr	В	Ceq	Pcm
ちょう 垂直雄剛な	SM490YA	0	0.16	0.20	1 / 2	0.020	0.005	5 -	-		-			-
リエノ、亜固補剛的	(Case8-10)	9	0.10	0.29	0.29 1.43	0.020	0.003			-		-	-	
コネクションプレート	SM490YA	12	0.16	0.27	1 /1	0.009	0.002	0.02	0.02	0.01	0.04	0	0.42	0.24
コネッションフレート	(Case8-10)	12	0.10	0.10 0.27	0.27 1.41	0.009	0.003	0.02	0.02	0.01		0		
ちょう 垂直雄剛な	SM490AW	0	0.00	0.17	0.17 1.30	0.012	0.002		0.00		0.49	0		
ウエク、亜固備剛的	(Case11-13)	9	0.08	0.17		0.012	0.002	0.40	0.09 0		0.48	0	0.40	J.40 0.20
コネクションプレート	SM490AW	12	0.1	0.21	0.06	0.012	0.002	0.27	0.10	0.01	0.49	0	0.27	0.20
コネッションノレート	(Case11-13)	12	2 0.1 0.21		0.90	0.012	0.003	0.37 0.10		0.01	0.48	0	0.37	0.20

表 2-8 機械的性質(試験工程 3)

部材	鋼種	降伏点(MPa)	引張強度(MPa)	伸び(%)
ウェブ, 垂直補剛材	SM490YA (Case8-10)	444	566	22
コネクションプレート	SM490YA (Case8-10)	408	543	23
ウェブ, 垂直補剛材	SM490AW (Case11-13)	437	536	26
コネクションプレート	SM490AW (Case11-13)	426	538	20



(a) Case8-10



(b) Case11-13 写真 2-3 試験体(試験工程 3)

# 2-3. 試験方法

### 2-3-1. 試験フロー

各試験工程での流れを図 2-9 に示す. 試験工程1では,溶接ステップごとに後述する溶接変形計測 を行い,溶接割れ試験を行った.また,溶接後の試験体を用いて,加熱矯正試験を行った.試験工程 2 では,試験工程1で使用した Case1 及び Case2 の試験体に,ギャップ量やコネクションプレート形 状をパラメータとしてコネクションプレートの溶接を行い,溶接割れ試験を行った.試験工程3では, 材料や鋼種をパラメータとした溶接割れ試験を実施した.なお,試験工程2及び3では,溶接割れに のみ着目したため,溶接変形計測は行っていない.溶接条件については,入熱量の確認を行い,溶接 割れについては外観観察により確認を行った.



### 2-3-2. 溶接作業及び溶接条件

各試験工程の溶接作業順序を図2-10に示す.試験工程1では,事前に各部材の組み立て溶接を行い, 上下フランジ,垂直補剛材,コネクションプレートの順に溶接を行った.溶接作業は炭酸ガスシール ドアーク半自動溶接により行った.また,コネクションプレートの開先は写真2-4に示すように,45 度レ開先(2mm残し)とし,完全溶け込み溶接により溶接を行った.試験工程2では,試験工程1の試 験体にコネクションプレートを同様の方法で溶接により接合を行った.試験工程3では,溶接変形を 拘束するために,ウェブのエッジ部を固定し,垂直補剛材,コネクションプレートの順で溶接作業を 行った.なお,全ての溶接は下向きで作業を行った.溶接作業状況を写真2-5に示す.

溶接割れ試験での溶接条件の測定結果を表 2-9 に示す.溶接時の入熱量は溶接時間と溶接長より算 出した.なお,試験工程1,2,3 はそれぞれ 2015 年7月,2016 年3月,2017 年2月に全て同一の橋梁 製作工場にて行った.



(a) 試験工程1の溶接順序



(b) 試験工程2の溶接順序



(c) 試験工程3の溶接順序図 2-10 溶接順序



写真 2-4 開先形状



(a) 試験工程1の作業状況



(b) 試験工程2の作業状況



(c) 試験工程3の作業状況写真2-5 溶接作業状況

			雨达	њг	沟拉旺潮	1パス当たりの	1パス当たりの	1パス当たりの	次拉 パフ 米ケ
試験体	溶接線	表/裏	電流	電圧	浴按距離	溶接時間	溶接速度	入熱量	浴按八人致
			(A)	(v)	(mm)	(秒)	(mm/min)	(J/mm)	(凹)
	(	表	280	30	186	43	260	1,938	6
	(I)	裏	280	30	186	37	302	1,669	7
	(	表	280	30	186	44	254	1,984	6
CASE 1	2	裏	280	30	186	37	302	1,669	7
CASE-1	3	表	280	30	186	42	266	1,895	6
	9	裏	280	30	186	39	286	1,762	7
		表	280	30	186	43	260	1,938	6
	Ð	裏	280	30	186	38	294	1,714	7
		表	240	36	186	24	465	1,115	6
	•	裏	240	36	186	-	-	-	7
	$\bigcirc$	表	240	36	186	24	465	1,115	6
CASE-2		裏	240	36	186	-	-	-	7
0,02 2	3	表	240	36	186	-	-	-	6
	~	裏	240	36	186	-	-	-	7
	(4)	表	240	36	186	-	-	-	6
		裏	240	36	186	-	-	-	7
	(1)	表	260	32	186	62	180	2,773	6
		裏	270	32	186	25	446	1,162	7
	(2)	表	260	32	186	59	189	2,641	6
CASE- 3	)	長	270	32	186	26	429	1,208	7
	(3)	表	240	36	186	-	-	-	6
	)	長	240	36	186	-	-	-	7
	4	表	240	36	186	-	-	-	6
	J	表	240	36	186	-	-	-	/
	1	表	253	33	186	3/	302	1,659	6
	Ŀ	表	234	32	186	32	349	1,287	/
	2		216	32	186	43	260	1,595	5
CASE-4	<u> </u>	表	233	32	186	33	338	1,324	6
	3	五	223	33	186	-	-	- 1 205	5
		表	223	33	180	32	349	1,205	0 F
	(4)	一一五	233	<u>3</u> 2	100	-	-	- 1 442	С С
		表主	233	3Z 22	100	30 25	310	1,443	6
	<ul><li>④</li><li>①</li></ul>	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	233	22 22	100	<u>ວວ</u> ວາ	240	1,402	6
		表	243	22	190	22	339	1,379	6
	2	重	233	22	186	22	330	1 262	6
CASE-5		 	217	22	186	34	378	1,302	6
	3	 重	217	32	186	34	328	1 387	6
		表	237	<u>י</u> ב גר	186	20	520	781	6
	4	 	227	32	186	20	310	1 344	7
		表	217	רא גצ	186	27	413	1 208	,
	1		232	22	186	27	300	1 181	5
		表	248	33	186	20	360	1.364	ے ج
	2		248	33	186	26	429	1.145	5
CASE-6	~	表	244	33	186	-	-	-	5
	3	重	244	33	186	31	360	1.342	5
		表	242	33	186	-	-	-	5
	(4)		242	33	186	22	507	945	5

表 2-9 溶接条件

--は未計測を示す.

=+=+=+++++++++++++++++++++++++++++++++	次拉纳	=/亩	電流	電圧	溶接距離	1パス当たりの	1パス当たりの	1パス当たりの	溶接パス数
<b>武尚火1</b> 半	/台]女称	衣/表	(A)	(V)	(mm)	溶接時間	溶接速度	入熱量	(回)
		表	224	31	186	32	349	1,194	5
	Ū	裏	248	33	186	27	413	1,189	5
	$\bigcirc$	表	220	31	186	34	328	1,248	5
CASE-7	۷	裏	268	35	186	28	399	1,411	5
CASE-7	3	表	248	33	186	-	-	_	5
		裏	248	33	186	28	399	1,231	5
		表	240	33	186	-	-	-	5
	4	裏	240	33	186	28	399	1,191	5
		表	220	29	180	43	251	1,525	3
	Ū	裏	225	30	180	29	372	1,089	4
CASE- 0	2	表	233	29	180	44	245	1,655	3
		裏	233	30	180	42	257	1,632	4
		表	230	29	180	47	230	1,740	3
CASE-9	Ū	裏	215	31	180	42	257	1,556	4
	0	表	220	29	180	49	220	1,740	3
	۷	裏	215	30	180	25	432	896	4
		表	237	29	180	45	240	1,718	3
	(1)	裏	218	31	180	43	251	1,615	4
CASE-10	0	表	227	29	180	45	240	1,646	3
	2	裏	220	31	180	43	251	1,630	4
		表	247	31	180	42	257	1,788	3
	Ū	裏	270	32	180	42	257	2,017	4
CASE-11	Ô	表	240	31	180	39	277	1,612	3
	2	裏	273	33	180	39	277	1,951	4
		表	247	33	180	38	284	1,722	3
	Ū	裏	265	32	180	42	257	1,980	4
CASE-12	0	表	240	33	180	42	257	1,849	3
	Q	裏	265	32	180	45	240	2,120	4
		表	267	33	180	43	251	2,106	3
	U	裏	265	32	180	49	220	2,313	4
CASE-13	0	表	260	33	180	43	251	2,051	3
	(2)	裏	270	32	180	40	270	1,920	4

表 2-9 溶接条件

ーは未計測を示す.

# 2-3-3. 加熱矯正作業

試験工程1において, Case3の試験体に対して,加熱矯正作業を行った.作業状況を写真2-6に示 す.本試験では,溶接変形が顕著であったウェブエッジ部から100mm位置を100mm間隔で加熱矯正 を行うこととし,加熱時間は作業者に任せて実施した.なお,加熱中は,写真2-7に示すように,表 面温度計により背面の鋼材温度の計測を行った.加熱位置と順序を図2-11に,加熱時の背面の鋼材温 度と加熱時間を表2-10に示す.



写真 2-6 加熱矯正状況



写真 2-7 温度計測状況



図 2-11 加熱位置と順序

表 2-10 加熱矯正時間

加熱箇所	1	2	3	4	5	6	7
加熱温度(℃)	675	600	710	733	705	670	747
加熱時間(秒)	12.0	12.0	12.2	12.6	11.8	12.8	12.4

# 2-3-4. 溶接割れ検査

溶接割れの有無の検証のために,溶接部近傍の外観検査を行った.磁粉探傷試験による外観検査状況を写真 2-8 に示す.



写真 2-8 磁粉探傷試験による溶接割れ検査状況

# 2-3-5. 溶接変形計測及び加熱矯正変形計測

試験工程1では、コネクションプレート溶接前後の溶接変形形状の計測を行った.計測には画像計 測を用いた.これは図 2-12 に示すように計測対象物の周りで円を描くように 360 度方向から写真撮影 を行った後に、これを「Autodesk 123D Catch」に取り込み、3D モデルを作成し、モデル上で形状計測 を行う手法である.撮影状況と作成した 3D モデル例を図 2-13 に示す.

加熱矯正時においては、画像計測に加えて、写真 2-9 に示すテーパーゲージを用いた変形量計測も

併せて行った. なお,本手法の計測精度を検証するために,加熱矯正試験前の Case3 試験体に対して 光学レベルでの形状計測を実施し,比較を行った.



図 2-12 Autodesk 123D Catch による計測概要



(a) 計測状況



(b) 3D モデル例 図 2-13 計測状況及び作成した 3D モデル例



```
写真 2-9 加熱矯正変形量の計測状況
```

#### 2-4. 試験結果

#### 2-4-1. 溶接割れ試験結果

コネクションプレート溶接部近傍で行った溶接割れ試験結果の一例を写真 2-10 に示す. 磁粉探傷試 験を行った結果,いずれの試験工程においても溶接割れの発生は確認されず,本試験目的であった横 桁ウェブと縦桁取り合いコネクションプレートの回し溶接部近傍の溶接割れ発生条件について明らか にすることはできなかった. 図 2-1 に示す溶接割れ発生事例では,垂直補剛材とコネクションプレー トのギャップ量が 25mm 程度と,本試験条件よりも大きなギャップ量で溶接割れが生じており,ギャ ップ量以外にも溶接割れの発生に影響を及ぼしているものと考えられる.

本試験では、このギャップ量に加え、コネクションプレート形状(Case7)、材質・鋼材強度(炭素 当量 C<sub>eq</sub>:0.26-0.42%相当、Case8-13)をパラメータとしたが溶接割れが発生しなかった.それゆえ、溶 接割れの発生はこれらのパラメータや入熱量などの構造的条件及び溶接条件の要素が合致した際に生 じる極めて複雑な条件の下に生じるといえ、溶接割れ発生条件を検討するためには、より詳細な条件 下での検証が必要であると考えられる.



写真 2-10 磁粉探傷試験による溶接割れ検査結果例

#### 2-4-2. 変形計測結果

加熱矯正試験前に光学レベル及び画像計測により計測を行った Case3 の試験体の変形形状計測結果 を図 2-13 に示す. 図より両者は同様の傾向を示しており, その差異もわずかであることがわかる. こ れより, 画像計測を用いることで, 変形形状を計測可能であるといえる.

コネクションプレート溶接後の Case3 試験体形状を図 2-14 に示す. 図に示すように, コネクション プレートの溶接に伴い, 拘束がないウェブエッジ部において面外方向に変形が生じていることがわか る. その他の溶接形状については, 付録に示す.



図 2-13 光学レベルと画像計測による変形形状計測結果の比較



図 2-14 コネクションプレート溶接前後の試験体形状の比較(Case3)

# 2-4-3. 加熱矯正計測結果

試験体形状は、画像計測では加熱矯正前,No.1 点加熱後,No.7 加熱後の3回,テーパーゲージでは 加熱矯正前と加熱矯正として行った7ヵ所の加熱後の合計8回計測を行った.加熱矯正前後の試験体 形状計測結果を図2-15 に示す.画像計測結果より,面外に変形していた側より行った加熱矯正により, 面外変形量が減少していることがわかる.テーパーゲージによる計測についても,各加熱矯正後に面 外変形が減少しており,同様の傾向が見られた.なお,ウェブエッジ部を拘束せずに加熱矯正を行っ たため,ウェブはフラットにならず残留変位が生じる結果となった.



計測箇所



(a) 画像計測による計測結果





図 2-15 加熱矯正による面外変形形状の変化

#### §3 溶接変形のシミュレーション

#### 3-1. はじめに

昨今の汎用有限要素解析ソフトの発展は目覚ましく,従来には考えられなかったような複雑な現象 に対しても,解析的な検討が試みられるようになっている.溶接変形もそのうちの一つである.溶接 変形を再現するためには,溶接熱源の移動を考慮した溶接熱サイクル,それによる鋼材の冶金的特性, 機械的特性の温度依存性などを考慮しなければならない.これらを考慮した解析は,溶接のシミュレ ーションに特化した少数の専用ソフトウェアでは可能であるが,一般的に普及しているとはいいがた い状況にある.しかし,最近の汎用有限要素解析ソフトにはこれらを比較的簡単に再現することがで きる機能が実装されている.これらを利用すれば,溶接変形を定量的に,解析的に検討することがで きる可能性がある.

溶接変形は、部材の架設精度へ影響を及ぼすとともに、力学的にも座屈耐荷力の低下、2 次応力の 発生による疲労強度の低下などの原因となる.また、大きな溶接変形は美観を損なう.これらのこと から、鋼橋製作会社は、溶接変形を基準値以下に抑えることはもちろん、できるだけそれを小さくす る努力を重ねている.

溶接変形の矯正には時間とコストを必要とすることから,できるだけその負担を減らすことが望ま しい.そのためには,溶接によってどの程度の変形が生じるのかを把握し,製作の段階からできるだ け溶接変形が小さくなる板組や溶接順序を採用するのが一つの解決策となる.しかし,溶接変形の大 きさの推定法に関しては,各社の経験的なノウハウに委ねられている部分が多く,十分に明らかにさ れているのとはいいがたい.

そこで,汎用有限要素解析ソフトに備わっている機能を用いて,熱弾塑性解析によって溶接変形を 再現することを試みる.これにより,現在の解析手法でどの程度の精度で溶接変形が再現できるかや, 精度を向上させるために着目すべきパラメータについて明らかにする.

#### 3-2. 解析対象

解析対象は平板に付加板を両面すみ肉溶接により取り付けたモデルとした.解析結果との比較を行 うため、実際に溶接試験体を製作し、その溶接変形を計測した.図 3-1 に試験体の形状と寸法を、表 3-1 にミルシートに記載されている鋼材の機械的・化学的特性を示す.溶接は炭酸ガスアーク溶接で あり、その溶接条件を表 3-2 に示す.溶接は板を平置きした状態で実施した.板の拘束は行っていな い.



図 3-1 溶接試験体

表 3-1 供試鋼材の機械的性質・化学成分

板厚	鋼種	Ē	別張試験	険					化学	成分				
mm		Y.P.	T.S.	El	C	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	V	Mo
		N/r	nm <sup>2</sup>	%		x100		x1(	000		x100		x10	000
8	SM400A	352	456	29	11	16	105	13	3	1	1	1	2	4
16	SM400A	347	455	32	12	20	108	13	2	1	1	1	1	4

# 表 3-2 溶接条件

溶接棒	電流(A)	電圧(V)	速度(m/min)	入熱量(J/mm)	入熱パラメータ(J/mm <sup>3</sup> )
MX-Z200	250	28	0.35	1200	18.8

この溶接継手に対して,溶接前後の角変形量を計測し,その差分から溶接による角変形を求めた. 計測手法は 2-3-5 に示した画像計測である. 試験体に対して周囲 16 方向,高さ4 方向から 70 枚の画 像を撮影し,それにより3 次元モデルを作成し,計測を行った.図 3-2 に作成した3 次元モデルを示 す.



図 3-2 試験体の3次元モデル

作成した 3 次元モデルの妥当性を検証するため, 試験 体を側面から撮影した写真と 3 次元モデルの側面におい て, 図 3-3 のように主板両端を結ぶ線分に対する鉛直変 位を計測した. 鉛直変位の計測結果を図 3-4 に示す. 側 面写真より計測した鉛直変位と 3D モデルより計測した 鉛直変位は概ね一致しており, 作成した 3 次元モデルの 妥当性が確認できる.





図 3-4 鉛直変位の計測結果

溶接角変形量の計測位置は、図 3-5 のように溶接線と直角方向の 100mm ピッチで設定した.作成した 3 次元モデルを計測位置の断面で切断し、鉛直変位より溶接角変形量 θ を算出した.角変形量 θ の 定義は同図中のとおりである.計測結果を図 3-6 に示す.計測は 3 体の試験体に対して行ったが、3 体 の計測結果は概ね一致していることから、以降、それぞれの計測線での平均値を参照データとして用 いることとする.



図 3-5 計測線と角変形量の定義



図 3-6 角変形量の計測結果

# 3-3. 有限要素解析による溶接変形解析

# 3-3-1. 解析モデル

本解析では ABAQUS ver6.14 を使用する.

前節で示した解析対象を基に,図 3-7 に示すような解析 モデルを作成した.使用した要素は8節点固体要素であ る.溶接の熱源移動を再現するために,実際の溶接手順 に従って,図中のパス1,パス2の順で溶接を再現する こととする.

(1) 入力条件(熱流束)の算定

解析モデルに入熱を行う方法として、ここでは熱流束 を与える手法を用いる.熱流束とは、単位時間に単位面 積を横切る熱量と定義され、単位は W/m<sup>2</sup> などである.



溶接入熱に関しては、溶接速度をv(mm/s)、電圧をE(V)、電流をI(A)とすると、溶接線単位長さ あたりの熱量は、

$$H = \frac{EI}{v} \qquad (W \cdot s/mm = J/mm) \tag{3.1}$$

であり、熱が加えられる領域の断面積をA(mm2)とすると、溶接線単位体積あたりの熱量は、

$$p = \frac{EI}{v} \frac{1}{A} \qquad (J/mm^3) \tag{3.2}$$

ABAQUS ではこれを単位時間あたりの仕事に直した「物体熱流束」で条件を与えることになっているため、実際に設定する熱流束の値は、

$$q = \eta \frac{EI}{v} \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{t} \qquad (W/mm^3)$$
(3.3)

となる.ここで、 $\eta$ :熱効率、t:要素への入熱時間 [s]である.

熱効率とは、アークから母材へ供給された熱エネルギーと、アークへの電気的な供給エネルギーの 比であり、実際に供給されたエネルギーの何割が溶接に費やされたかを表す.この値を直接定めるこ とは難しいため、周辺の温度分布の実測値などによって間接的に推定することとする.

(2) 材料特性の設定

材料特性は温度によって大きく変化するものが多いため,溶接変形の解析においては,その影響を 考慮して材料特性を設定する必要がある.各種材料特性の温度依存性に関しては古くから様々な文献 に値が示されているが,ここでは文献 3-1), 3-2)を参考にして,弾性係数,降伏応力,密度,比熱, 熱伝導率,熱伝達係数について,図 3-8 に示すような温度依存性を設定した.

なお、ABAQUSでは、熱伝達係数以外の材料特性についてはこの時点で指定するが、熱伝達係数は後の「相互作用の設定」において指定することとなっている.



図 3-8 各種定数の温度依存性

(3) 要素特性の割り当て

作成したモデルに含まれる要素に対して,適切な要素特性を与える.これは通常の有限要素解析と 変わるところはない.

(4) 境界条件の設定

通常の手順と同じように、力学的境界条件を設定する.ここでは、図 3-7 に示したように、1 パス 側の主板中央を全方向に拘束し、2 パス側の主板中央を溶接線方向に拘束した.

(5) 要素集合の作成

一回に入熱する要素ごとに要素集合を作成しておく.後に要素の出現と入熱を繰り返すが,一つの ステップで出現,入熱する要素群を一つの集合としてまとめ,登録しておく. (6) 初期条件の設定

外気温を設定する. ここでは25℃と設定した.

(7) 解析ステップの設定

ABAQUS には解析の途中で要素を有効化, 無効化 する機能が備えられている.これを用いると, 図 3-9 に示すように, ある解析ステップで溶接部に対応す る要素を出現させ, その要素に入熱を行うという処 理が可能となる.これを繰返すことにより, 簡易的, 離散的にではあるが, 連続的な熱源移動を再現する ことができる.以下に, その手順を示す.

初期ステップの設定を行う.時間幅は1秒(何で もよい),最大インクリメント数は100,インクリメ ントあたりの最大許容温度変化量は 100℃とした. 以降,初期ステップの名前を S0 とする.

続いて、要素を出現させる段階の数だけ、解析ス

テップを作成する.本解析では溶接部の要素を100回に分けて出現させるため,解析ステップも100 個必要となる.時間幅は溶接速度と出現する要素の幅より算出する.溶接速度を ν(mm/s),要素の幅 を w(mm)とすると,設定する時間幅は w/v(s)となる.最大インクリメント数は100,インクリメント あたりの最大許容温度変化量は1000℃とした.以下,各ステップの名前をS1,S2...とする.

最後に、冷却ステップを作成する.冷却ステップは時間幅を十分大きくとり、一つ設定すればよい. ここでは時間幅を 1000、最大インクリメント数を 1000、インクリメントあたりの最大許容温度変化量 を 100 と設定した.冷却ステップの名前を C とする.

#### (8) 解析ステップごとの有効要素集合の設定

解析ステップごとに要素の有効, 無効を設定する.

まず,解析ステップ S0 (初期ステップ) を呼び出し,「相 互作用の編集」の「モデルチェンジ」(図 3-10 参照) にて要素 集合(溶接部の要素群)をすべて「このステップで無効」に設 定する.この際,無効化する要素は,先に設定した要素集合 を使用して指定すると良い.これにより,初期ステップにお いて,溶接部の要素が見かけ上消去されることになる.

名前:	Int-1
タイプ:	モデルチェンジ
ステップ	: delete (Coupled temp-displacement)
定義: 🧕	領域 🔘 リスタート
領域タイ	プ: 要素
領域: Pa	irt600-mesh-1-1.bead 除
領域要素	の有効状態:
0 2	のステップで無効 🔘 このステップで再有効
🗌 ひずま	ありで要素を再有効化 (可能であれば)
-	

図 3-10ABAQUS の設定画面の例

次に,解析ステップ S1, S2, ・・・を順次呼び出し,「モデルチェンジ」にて,そのステップで出現さ せる要素集合を指定して「このステップで再有効化」を設定する.この設定を全ての解析ステップに対 して繰り返す.

(9) 相互作用の設定

熱伝達係数を設定する. ABAQUS では,熱伝達係数を関数で指定できるようになっているので,図 3-8 に示した関数を用意しておき,それを指定する.また,表面ふく射を設定する.ふく射率は0.3 と





した.熱伝達およびふく射の対象となる表面としては、全表面を選択する.

(10) 熱荷重の設定

解析ステップ S1, S2, ・・・を順次呼び出し, それぞれのステップごとに入熱を行う要素集合を指定し,物体熱流束の値を設定する. この設定を全ての解析ステップに対して繰り返す.

(11) 解析の実行

出力する変数のリクエストなどを行った後,解析を実行する.

#### 3-4. 溶接変形解析結果

図 3-5 に示すように測線を設定し、それぞれの測線における角変形量を図に着目して解析結果を示す.

#### 3-4-1. 解析パラメータの感度解析

前述のように,溶接変形解析には様々なパラメータが必要となるが,その値をはっきりと定めるこ とができないものも多い.そこで,主なパラメータが溶接変形の解析結果に与える影響について把握 することを目的として,感度解析を行った.

図 3-11 は熱効率を 65,72.5,75,80%に変化させた場合の,角変形量の差を示したものである.熱効率 を増加させると角変形も大きくなるが,熱効率が 72.5%以上では,結果に大きな違いが見られないこ とがわかる.

図 3-12 に熱伝達係数および熱伝導率を変化させた場合の解析結果の差を示す.熱効率は 75%で一 定とし,図 3-8 に示す熱伝導率を用いた場合(凡例:75%),図 3-8 に示す熱伝導率を温度によらず一 律に 20%減少させた場合(凡例:75%+熱伝導率),熱伝達係数を 2.5W/mm<sup>2</sup>/℃と一定(温度依存性なし) (凡例:75%+熱伝達係数 2.5) にした場合の解析結果の比較を示している.熱伝導率,熱伝達係数と

も、ここで変化させた範囲では、溶接変形の解析結果にほとんど影響を与えないといえる.



図 3-11 熱効率の影響



#### 3-4-2. 拘束の影響

試験体の溶接は、主板を拘束せずに実施したが、仮に試験体の主板が拘束された場合、溶接変形に どの程度の影響が生じるかを解析的に検討した.図 3-13 に示すように試験体の両端において鉛直方向 変位を固定して、前と同様の解析を行った結果を図 3-14 に示す.熱効率は 80%とした.拘束した場 合には、角変形が大幅に小さくなっていることがわかる.定量的な評価は困難であるが、拘束がある 場合には溶接変形が小さくなるという定性的な傾向は、この解析においても再現可能であるといえる.



#### 3-4-3. 解析結果と実験結果の比較

最後に,解析結果と実験結果との比較を行う.実験においては,主板の拘束はしていないため,拘 束なしの解析結果と比較する.

#### (1) 温度履歴

試験体の裏面における温度履歴を比較する. 試験体の裏面の図 3-15 に示す位置に設置した熱電対に

よる温度計測結果と,熱効率を 60~80%に変化させた場合の解析結果との比較を図 3-16 に示す. 横軸 は経過時間を,縦軸は温度を表しており,1 パス目の結果のみを示している. 図より,熱効率の増加 に伴って温度は高くなる傾向にあり,最高温度は熱効率が 70%のときに,冷却速度は 80%のときに実 験値と一致していることがわかる.



(2) 角変形量

角変形量の実験値と解析値の比較を図 3-17 に示す.解析における熱効率は 80%とした.解析結果は 実験結果と比較して 5 割ほど大きな溶接変形となっている.この差は,熱効率などを変化させても吸 収できるような差ではなく,ここで与えた物性値等による解析では,解析の精度は必ずしも十分では ないといえる.



図 3-17 実験結果と解析結果の比較



実際の溶接継手と解析モデルとの違いの一つに、溶け込みの存在がある.解析において溶込みは考 慮せず、溶接ビードが形成された三角形領域にのみ、要素の生成と入熱を行った.しかし、試験体を 切断して観察した溶接部の写真を図 3-18 に示すが、実際にはわずかながら溶込みが存在する.そこで、 その影響を検討するために、図 3-19 の赤枠で示すように、溶込み領域を考慮した解析モデルを用いて 解析を行った.このモデルにおいては、溶接ビードの三角形領域に加え、図に示す母材部分の要素も 出現、入熱を繰り返すことにより解析を実施した.なお、写真からわかるように、本来溶込み形状は 曲線を描いているが、ここでは簡単のため、入熱領域は実際の溶込み領域とほぼ同じ面積の長方形で 模擬している.

再度,実験結果と解析結果の比較を図 3-20 に示す.溶込みを考慮しない場合と比較して,解析値は 小さくなっており,わずかな入熱領域の変化でも解析結果が敏感に変化することがわかる.しかし, 依然として実験値との差は大きく,本解析で考慮した材料特性や解析手法では,実際の溶接変形を精 度よく再現するには至らなかった.

今後の課題としては、温度依存性も含めた材料パラメータの高精度化、適切な溶込み領域の設定法 の構築などが挙げられる.



図 3-20 実験結果と解析結果の比較

参考文献

3-1)上田幸雄,村松由樹, TRC 試験及び RRC 試験の力学的特性と相関性,溶接学会論文集 2 巻 1 号 (1984), pp97-104.

3-2)上田幸雄,金 裕哲,柄谷和輝,山北晃久,厚板補修溶接部の力学的特性-3 次元溶接残留応力・ 残留塑性ひずみ分布の翌朝とそれらの生成機構-,溶接学会論文集 4 巻 3 号 (1986), pp533-539.

# 付録 溶接変形計測結果

ここでは、試験工程1で実施した溶接変形計測結果を示す.溶接変形計測は図 A-1 に示すように、 フランジ溶接後,垂直補剛材溶接後,コネクションプレート溶接後の3回実施した.計測結果を図 A-2 から図 A-4 に示す.



図 A-1 溶接変形計測実施概要と計測結果比較位置



図 A-2 溶接変形計測結果(Casel)







-600





(c) y=0mm 位置図 A-3 溶接変形計測結果(Case2)



図 A-4 溶接変形計測結果(Case3)

# 溶接割れ·溶接変形研究部会報告書 (No.083)

- 編 集 鋼橋技術研究会 溶接割れ·溶接変形研究部会
- 発 行 平成30年7月
- 発 行 所 鋼橋技術研究会 〒965-0832 福島県会津若松市天神町25-3 有限会社ハートランド内 TEL.0242-36-5260

※当該資料の内容を複写したり他の媒体へ転載するような場合は、 必ず鋼橋技術研究会の許可を得てください。

編集協力 株式会社 アズ・クリエイト