

起伏ゲートの製作方法と溶接変形に関する研究

A Study of Welding Deform and Manufacturing of Bottom Hinge Flap Gate

村上浩司* 村瀬安彦** 村田正***

MURAKAMI Koji MURASE Yasuhiko MURATA Tadashi

溶接構造物の品質（出来形）は、溶接変形を考慮した製作手順の検討と溶接変形量の予測が基本であり最も重要な要因である。類似の構造物を多量に製作する場合は、その溶接変形量を定量的に把握することが可能であるが、年々構造が複雑化する製品の溶接変形量をこれまでの経験から予測することは困難である。溶接変形量を的確に予測することができれば製作工数の低減と製作期間短縮も可能となる。そこで、溶接変形量を定量的に推定する方法として有限要素法に着目した。具体的にはモデルワークでの溶接変形測定値に合致するFEM解析条件を求め、その条件を実構造に展開し、解析条件の妥当性を検証した。

大枠の結論として、溶接変形量をFEM解析結果から想定できることを確認した。

1. はじめに

昨今の社会環境において品質を確保しながら製作原価を低減させることが、今まで以上に重要な使命になりつつある。溶接構造物の品質を確保するためには、溶接変形を小さくすることを念頭に、製作手順を検討し選定することが基本である。また、製作手順が正しくても溶接変形量を的確に予測できなければ品質を確保できない。

特に過去に製作経験のない、または経験の少ない構造物の場合、製作手順と溶接変形量の相違によっては倍以上の製作期間と工数を費やすことになる。

それらの課題を解決する手法として「モデルワークの製作による品質及び原価の検証」を行い、この結果を基に製作手順を確立し実構造に展開する方式が考えられる。また、モデルワークを製作せずに「電算機上で製作手順を考慮したモデル化を行い、有限要素法による品質と原価の検証」を行う方式もある。

本研究では、過去に製作工数事件数が少なく溶接変形量を経験的に想定することが難しい起伏ゲートを対象にモデルワーク製作による品質及び原価の検証を行い、実構造物の製作へ展開し、同時に製作手順のノウハウを得ようとしたものである。

また、溶接構造物の溶接変形量を、有限要素法を利用して汎用的に求めようとした研究である。具体的には、

モデルワークでの溶接変形測定値に合致するFEM解析条件を求め、その条件を実構造に展開し、解析条件の妥当性を検証するものである。

2. 実構造形及びモデルワーク

本構造は、トルク軸で回転する構造であるため、通り精度が重要である。しかし、トルク軸に偏った溶接が行われるため面外の縦曲り変形が予測される。またトルク軸は鋼管であり扉体に取り付いた状態から溶接変形を矯正することは困難である。

そこで、本構造を研究対象とし、実構造における溶接変形量を想定することとした。実構造および実験用に製作したモデルワークを図1、図2に示す。なお、モデルワークは実験結果の信頼性を考慮し、部材及び溶接記号ともに実構造とほぼ同じ形状、サイズとした。

< 諸元 >

鋼製起伏ゲート

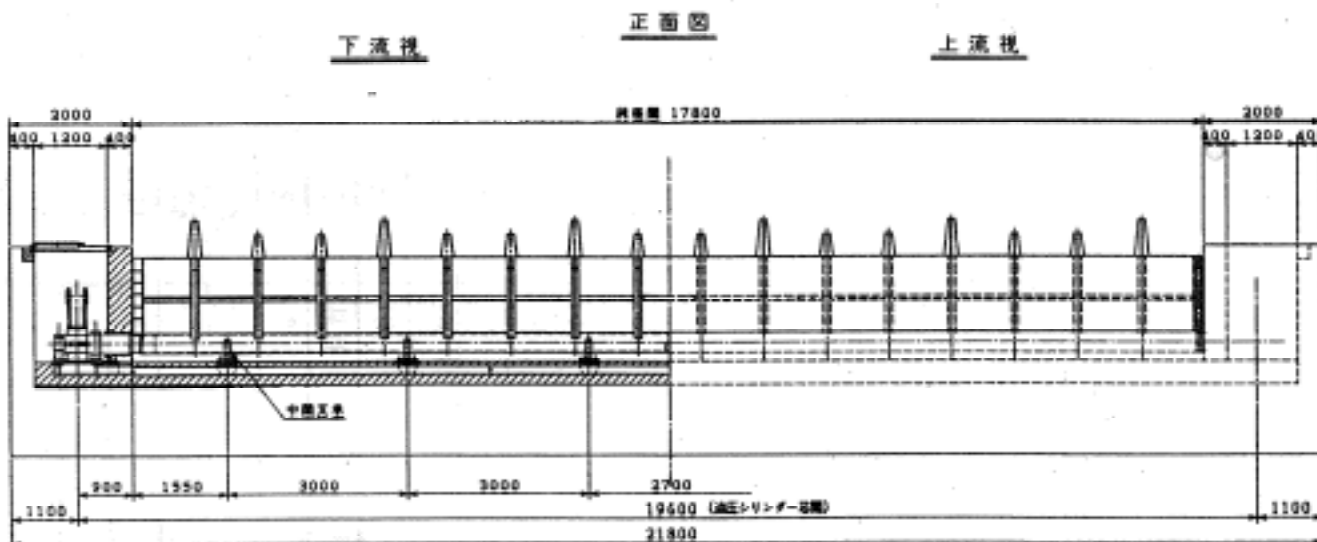
純径間：17.800m

扉高：1.240m

水密方式：全面3方水密

開閉方式：両端油圧シリンダ駆動方式

起伏角度：70°



側面図

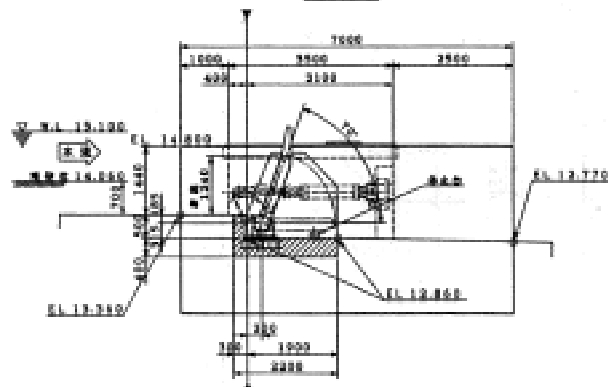
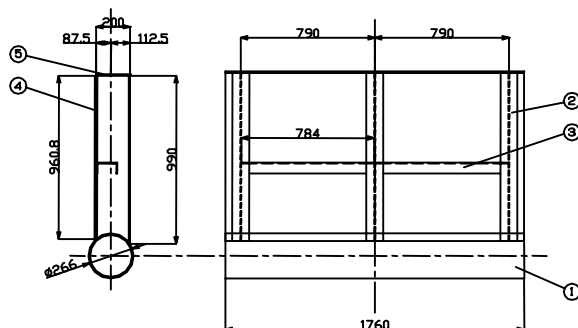


図1 実構造形状



- 1 : Pipe 266 × 9.3t × 1760(SUS304)-1
- 2 : I 200 × 100 × 990(SS400)-3
- 3 : CH 125 × 65 × 784(SS400)-2
- 4 : PL 9t × 960.8 × 1760(SUS304)-1
- 5 : PL 9t × 200 × 1760(SUS304)-1

図2 モデルワーク形状

3. 溶接変形

3.1 対象とする溶接変形

溶接変形を分類すると、溶接熱サイクル中の変形である過渡変形と冷却した状態の残留変形に大別される。過渡変形は溶接応力・変形や溶接割れなどの発生機構を詳しく調査するとき問題になる。単に溶接変形という場合は、一般的に後者の残留変形を意味する。

残留変形は、変形の発生状態によって図3に示すように「面内の収縮と曲がり変形」そして「面外の曲がりと座屈およびねじり形式の変形」に分類される。

本研究では、残留変形を念頭に構造を考慮し「面内の縦収縮」と「面外の縦曲がり変形」を検討対象とする。

3.2 溶接変形の因子

溶接変形は、次式に示すように溶接熱、継手の拘束及

び材料に関する3大因子によって支配される。

$$\text{溶接変形} = F(\text{溶接熱}, \text{拘束}, \text{材料}) \dots (1)$$

の溶接熱に関する要因には溶接法、溶接入熱、開先寸法形状など、の拘束に関するものには母材の寸法形状、外的拘束、溶接順序などがある。また、の材料に関する要因には材質、降伏応力、力学的溶融温度や相変態特性などが挙げられる。このように溶接変形は多くの要因の影響を受けるために、各種要因の影響を総合的に評価できるパラメータが導出される。

本研究では、溶接変形の要因をパラメータ化するのではなく、モデルワークの実変形量にFEM解析値を整合させるための「解析条件」を求め、この条件の中に全ての要因を包括させる方式である。

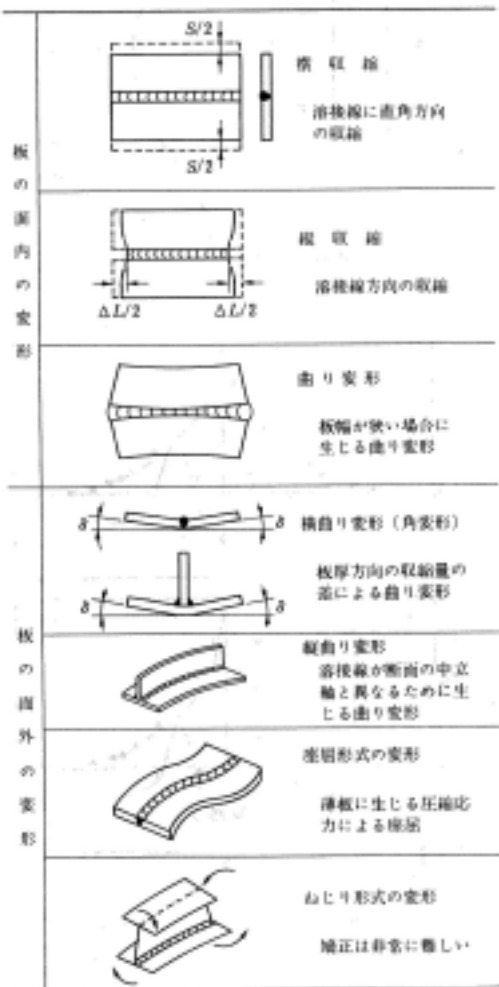


図3 溶接変形の種類

4. モデルワークによる溶接変形量の測定

4.1 施工順序

水門製作は、大別すると製缶・溶接・機械加工の3工程に分類される。構造や要求される精度によっては各工程を何度も横持ちすることになり工数が掛かる。

そこで、横持ちを最小限にし、効率良く製作できる作業手順として図4の製作フローとした。なお、溶接変形量の推定が困難な一体組立後の溶接工程に着目し、モデルワークにて確認することとした。

4.2 溶接変形量の測定方法

(1) 計測方法

溶接による収縮量・変形は微量であること、鋼製テープでは読取り誤差など人為的誤差が大きいことなどを考慮して、三次元計測器を用いて計測を行うこととした。

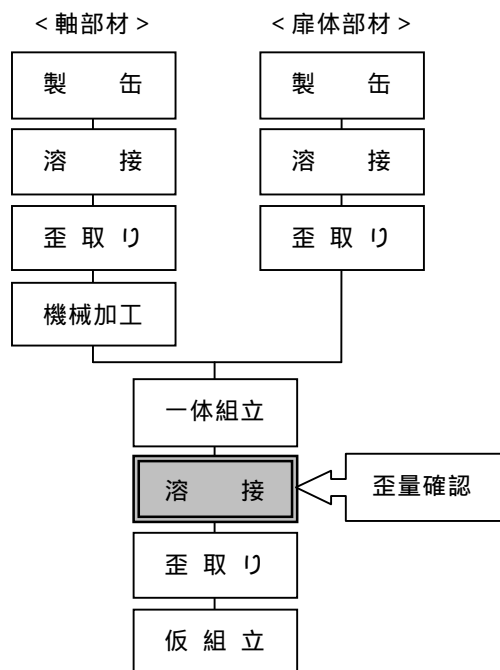


図4 製作フロー

(2) 計測ポイント

図5のとおりA1～C5の交点を計測ポイント(15点)とし、溶接前・溶接後の変位量を計測した。なお、溶接作業は、フレームとパイプおよびスキムプレートとパイプの溶接など複数回行うため、どの溶接により変位量が変化するかを確認すべく、溶接作業毎に計測した。

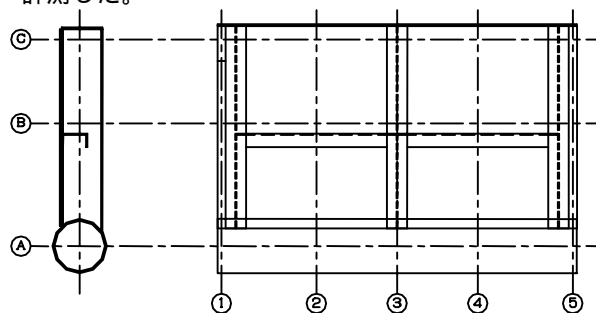


図5 計測ポイント



写真1 モデルワーク三次元計測状況

4.3 溶接変形量の測定結果

モデルワークの計測結果を表1,表2に示す。表中から以下のことが推察できる。

- (1) 収縮量：溶接線方向で0.7mm(0.398mm/m)、溶接線直角方向で1.8mmの収縮変位が生じる。
- (2) トルク軸のそり：1.4mm(0.795mm/m)の変位を生じている。実ワークに換算すると6.92mm程度のそりとなり、この値は許容範囲内である。
- (3) トルク軸の通り：0.5mm(0.284mm/m)の変位を生じている。実ワークに換算すると2.47mm程度の通りとなり許容値内である。

この結果より、実構造物においては、次のことを実施することとした。

- (1) 収縮量は実験結果を反映して製作する。
- (2) そり・通りは、部材の密着度および溶接入熱を出来るだけ小さくして施工し変形量が小さくなるよう留意して施工する。

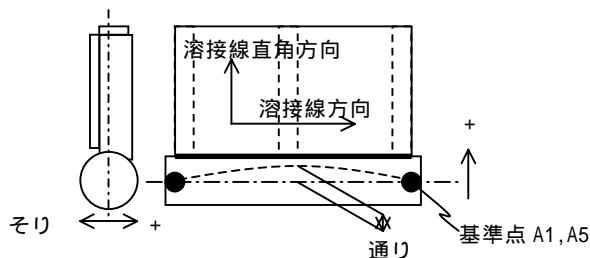


図6 変位の方向

表1 収縮量分析結果

溶接線方向	ポイント		初期値	溶接後				誤差(溶接後 - 初期値)			
	溶接前		溶接前	I形鋼溶接後	スリソ裏溶接後	スリソ表溶接後	冷めた状態	I形鋼溶接後	スリソ裏溶接後	スリソ表溶接後	冷めた状態
溶接線方向	C1	C5	1720.9	1720.8	1721	1721.3	1720.8	-0.1	0.1	0.4	-0.1
	B1	B5	1720.7	1720.8	1721	1721.1	1720.6	0.1	0.3	0.4	-0.1
	A1	A5	1720.2	1720.7	1720.7	1720	1719.5	0.5	0.5	-0.2	-0.7
							平均	0.17	0.30	0.20	-0.30

溶接線直角方向	ポイント		初期値	溶接後				誤差(溶接後 - 初期値)				
	溶接前		溶接前	I形鋼溶接後	スリソ裏溶接後	スリソ表溶接後	冷めた状態	I形鋼溶接後	スリソ裏溶接後	スリソ表溶接後	冷めた状態	
溶接線直角方向	A1	B1	568.4	568.7	568.4	566.6	566.3	0.3	0	-1.8	-2.1	
	A2	B2	568.9	569.2	568.8	567.3	567.2	0.3	-0.1	-1.6	-1.7	
	A3	B3	568.9	569.3	569.1	567.6	567.2	0.4	0.2	-1.3	-1.7	
	A4	B4	568.4	568.8	568.3	566.8	566.5	0.4	-0.1	-1.6	-1.9	
	A5	B5	569.8	570	570	567.8	567.8	0.2	0.2	-2	-2.0	
							平均	0.32	0.04	-1.66	-1.88	
溶接線直角方向	B1	C1	400.3	400.1	400.3	400.3	400.2	-0.2	0	0	-0.1	
	B2	C2	399.5	399.6	399.8	399.7	399.6	0.1	0.3	0.2	0.1	
	B3	C3	398.9	398.8	399.1	398.9	398.8	-0.1	0.2	0	-0.1	
	B4	C4	399.2	399.2	399.2	399.3	399.2	0	0	0.1	0.0	
	B5	C5	398.6	398.7	398.6	398.8	398.7	0.1	0	0.2	0.1	
								平均	-0.02	0.10	0.10	0.00

表2 そり・通り分析結果

そり	ポイント	初期値		I形鋼溶接		スリソPLウラ溶接		スリソPL表溶接		冷めた状態		誤差(溶接後 - 初期値)			
		元データ	変換	元データ	変換	元データ	変換	元データ	変換	元データ	変換	I形鋼溶接	スリソPLウラ溶	スリソPL表溶接	冷めた状態
Y	A1	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	A2	-0.1	-0.1	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	0.9	0.9	0.9	0.9	-0.3	-0.4	1.0	1.0
	A3	0.1	0.1	-0.5	-0.5	-0.3	-0.3	1.6	1.6	1.4	1.4	-0.6	-0.4	1.5	1.3
	A4	0.4	0.4	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	1.8	1.8	1.8	1.8	-0.6	-0.5	1.4	1.4
	A5	0.0	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B1	40.1	0.0	39.2	0	39.1	0	37.3	0	36.6	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B2	40.1	0.0	39.8	0.6	39.5	0.4	37.6	0.3	37.5	0.9	0.6	0.4	0.3	0.9
	B3	40.5	0.4	40.1	0.9	39.4	0.3	38	0.7	37.5	0.9	0.5	-0.1	0.3	0.5
	B4	41.2	1.1	40.7	1.5	40.3	1.2	38.3	1	38.2	1.6	0.4	0.1	-0.1	0.5
	B5	41.3	1.2	41	1.8	40.8	1.7	38.1	0.8	38.3	1.7	0.6	0.5	-0.4	0.5
	C1	40.0	0.0	39.4	0	39.3	0	33.8	0	33.3	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	C2	42.7	2.7	40.3	0.9	39.9	0.6	34.7	0.9	34.4	1.1	-1.8	-2.1	-1.8	-1.6
	C3	40.7	0.7	40.3	0.9	40.1	0.8	35.1	1.3	34.7	1.4	0.2	0.1	0.6	0.7
	C4	41.6	1.6	41.5	2.1	41	1.7	35.7	1.9	35.5	2.2	0.5	0.1	0.3	0.6
	C5	42.5	2.5	42.7	3.3	42.4	3.1	36.4	2.6	35.9	2.6	0.8	0.6	0.1	0.1

通り	ポイント	初期値		I形鋼溶接		スリソPLウラ溶接		スリソPL表溶接		冷めた状態		誤差(溶接後 - 初期値)			
		元データ	変換	元データ	変換	元データ	変換	元データ	変換	元データ	変換	I形鋼溶接	スリソPLウラ溶	スリソPL表溶接	冷めた状態
Z	A1	-2226.4	0	-2226.2	0	-2226.4	0	-2227.7	0	-2015.4	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	A2	-2226.3	0.1	-2226.3	-0.1	-2226.3	0.1	-2227.7	0	-2015.6	-0.2	-0.2	0.0	-0.1	-0.3
	A3	-2226.2	0.2	-2226.2	0	-2226.5	-0.1	-2227.9	-0.2	-2015.4	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.2
	A4	-2225.6	0.8	-2225.7	0.5	-2225.6	0.8	-2227.2	0.5	-2014.8	0.6	-0.3	0.0	-0.3	-0.2
	A5	-2226.4	0	-2226.2	0	-2226.4	0	-2227.7	0	-2015.4	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B1	-1659.4	0	-1658.9	0	-1658.8	0	-1662.3	0	-1450.3	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	B2	-1658.8	0.6	-1658.5	0.4	-1658.5	0.3	-1661.6	0.7	-1449.6	0.7	-0.2	-0.3	0.1	0.1
	B3	-1658.7	0.7	-1658.3	0.6	-1658.5	0.3	-1661.5	0.8	-1449.3	1	-0.1	-0.4	0.1	0.3
	B4	-1658.7	0.7	-1658.4	0.5	-1658.7	0.1	-1661.6	0.7	-1449.5	0.8	-0.2	-0.6	0.0	0.1
	B5	-1659.1	0.3	-1657.7	1.2	-1657.9	0.9	-1661.2	1.1	-1448.9	1.4	0.9	0.6	0.8	1.1
	C1	-1259.1	0	-1258.8	0	-1259.0	0	-1262.0	0	-1050.1	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	C2	-1259.3	-0.2	-1258.9	-0.1	-1259.1	-0.1	-1261.9	0.1	-1050	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
	C3	-1259.8	-0.7	-1259.5	-0.7	-1259.7	-0.7	-1262.6	-0.6	-1050.5	-0.4	0.0	0.0	0.1	0.3
	C4	-1259.5	-0.4	-1259.2	-0.4	-1259.5	-0.5	-1262.3	-0.3	-1050.3	-0.2	0.0	-0.1	0.1	0.2
	C5	-1259.5	-0.4	-1259	-0.2	-1259.3	-0.3	-1262.4	-0.4	-1050.2	-0.1	0.2	0.1	0.0	0.3

5. 有限要素法による熱応力解析

5.1 モデルワークによる解析

FEM解析対象モデルを図7に示す。解析は、溶接箇所マイナスの温度を载荷し、温度変化による収縮量を溶接変形と想定し、解析ファクタとしては「载荷温度と载荷幅」などを選定した。

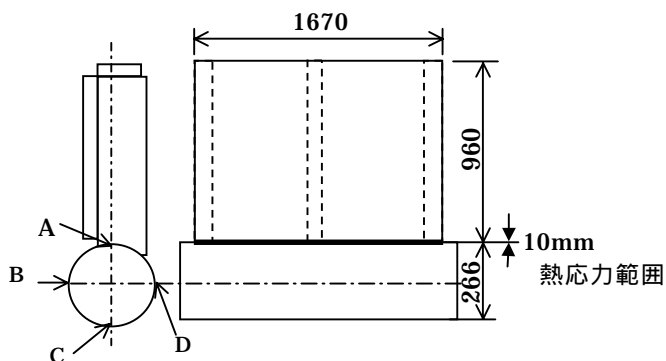


図7 解析対象モデル

モデルワークによる実変形量と、解析結果が最も類似となる解析条件とその値（解析値と実測値の比較）を表3、表4に示す。要素分割図及び溶接変形図を図8に示す。表4より、解析結果とモデルワークのそり、通りの差異は0.4mm以下である。

表3 解析条件

温度载荷幅（図7参照）	10 mm
弾性係数	$2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
ポアソン比	0.3
線膨張係数	鋼 0.000012 SUS 0.000017

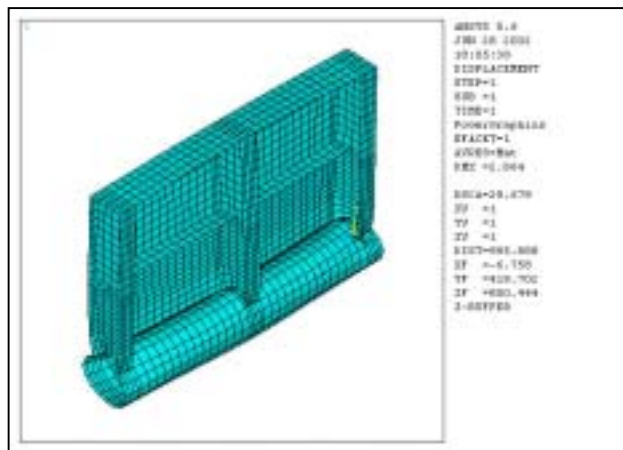


図8 要素分割図及び溶接変形図（モデルワーク）

表4 実測値と解析結果の比較（モデルワーク）

		収縮量 mm/m	そり mm	通り mm
解析結果	A	2.30	1.60	0.40
	B	1.92	0.60	0.14
	C	0.23	1.30	1.30
	D	0.07	0.45	0
	平均値	1.38	1.0	0.45
モデルワーク		0.7	1.4	0.5
差異		+0.68	-0.4	-0.05

5.2 実構造物での解析

モデルワークと同じ解析条件を用い、実構造物で解析した結果を表5に示す。要素分割図及び溶接変形図を図9に示す。

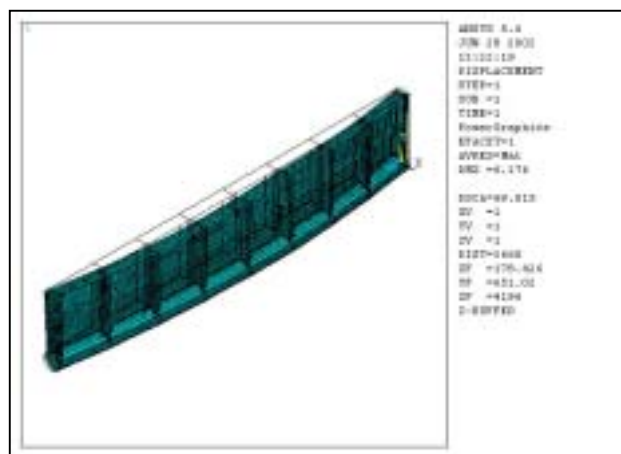


図9 要素分割図及び溶接変形図（実構造物）

表5 実構造物の解析結果

		収縮量 mm/m	そり mm	通り mm
解析結果	A	3.23	6.34	1.30
	B	2.55	6.41	1.00
	C	1.46	6.10	0.83
	D	0.63	5.83	1.00
	平均値	1.97	6.17	1.03

5.3 実構造物の製作と溶接変形量の測定

解析結果から、変形量は許容値内であること、矯正可能範囲の変形であることが想定できた。よって、実構造物の製作に際しては、実験結果およびFEM解析結果を勘案し、モデルワーク製作と同様の方法で製作を行った。なお、実構造物でも同様に三次元計測を行い、溶接変形量を計測し、FEM解析結果と比較を行った(表6)。

表6より、実測結果と解析結果の差異は2mm以内であり、品質(出来形)も良好であった。

表6 実構造物とFEM解析の結果比較

	収縮量 mm/m	そり mm	通り mm
実測結果	1.13	4.2	2.1
解析結果	1.97	6.17	1.03
差異	+0.84	+1.97	-1.07

有限要素法に関する本研究結果は一つの構造物から想定した結論であるが、溶接変形に関する多様なファクタをFEM解析条件に包括するという簡素化手法であり、容易に他の構造物に適用できるメリットが大きいと考える。

今後は、この方式を多様な構造形に利用し、より簡素化し汎用的な手法として確立していきたいと考える。

参考文献

- 1) 溶接学会編:溶接・接合便覧,丸善(株),P.13~41, 1995年

6. まとめ

本研究は、起伏ゲートの扉体の製作時における品質確保と原価低減を目的にモデルワークを製作し、製作手順を確立すると同時に、構造物の溶接変形量を有限要素法により汎用的に求めようとしたものである。研究結果から概ね次のような結論が得られよう。

6.1 モデルワークから実構造の溶接変形量の推定

溶接線方向の縦収縮及び面外方向の曲がり(トルク軸に対するそりと通り)について、実構造物の溶接変形量をモデルワークから十分推定できる結果を得た。

6.2 有限要素法による溶接変形量の推定

モデルワークで求めたFEM解析条件を実構造に適用し、解析値と実測定値を検証した結果、差異が2mm以内に収まった。溶接変形の多様なファクタを考慮すれば有効な範囲であることを確認した。

6.3 起伏ゲートの製作手順の確立

モデルワークと実構造での製作を通じて、今回の製作手順が品質と原価の面で非常に効果があることを確認した。この製作手順を類似の構造形の作業標準にすると同時に、製造部のノウハウとする。