

土 木 研 究 所 資 料

ダム用ゲートにおける ステンレス鋼の特性調査

平成4年3月

建設省土木研究所
機械施工部機械研究室

Copyright © (1992) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ダム用ゲートにおける ステンレス鋼の特性調査

機械研究室 室 長 杉 山 篤
室 長 長 健 次^{*1}
主任研究員 村 松 敏 光^{*2}
竹 田 英 之
米 村 克 己
部外研究員 靄 見 篤^{*3}

^{*1} 現 中国技術事務所

^{*2} 現 中部地方建設局

^{*3} 部外研究員

(三菱重工業株式会社)

要 旨

本調査は、ダム用ゲートに対するステンレス鋼の特性の把握を目的として実施したものである。

今日、供給されている鋼種の物理的性質及び機械的特性を調査し、その適用について検討した。また、溶接ゲート構造体の溶接継手部の強度試験、溶接に伴う鋭敏化度の定量評価を行った。これらの調査、検討、試験結果をまとめたものである。

キーワード：SUS304，ステンレス鋼，溶接，ダム用ゲート

まえがき

我が国の公共施設等は、戦後着実に整備され建設省が設置している堰・水門は昭和 58 年現在で約 8,500 門に達し、扉体総面積は約 100 万㎡にもなる。これら構造物の耐用年数は設計上の概念からいうとダム及び堰等に設置される放流設備の主要な鋼構造部分の寿命は、一般に 50 年以上といわれている。しかし、この前提条件として最も適切な時期に的確な塗装の塗替え等の機能保全対策等を行っていく必要がある。

時代の進展に伴い、これら設備への新技術・新材料の適用検討が行われてきている。ゲート構造体の一部にステンレス鋼を使用した例は既にいくつかの実績があり、その使用目的は、ステンレス鋼の特性である耐食性と耐磨耗性を活用して長期間無塗装で稼働できることにある。しかし、ダム用ゲートに対する実績は殆どなく、ステンレス鋼材の特性についての個々の技術文献及び資料等はあるものの、構造体に展開するための各種資料については乏しい。

本調査は、ダム用ゲートにステンレス鋼を適用することを目的として昭和 63 年度及び平成元年度に実施したものであり、本報告はダム用ゲートにステンレス鋼を適用するにあたって基礎技術の解明として設計・製作技術における課題の抽出を行い、検討による解明と溶接継手部の強度試験による検証を行った。

平成 4 年 3 月

機械研究室	室 長	杉 山 篤
	室 長	長 健 次 * 1
	主任研究員	村 松 敏 光 * 2
		竹 田 英 之
		米 村 克 己
	部外研究員	鷲 見 篤 * 3

* 1 現 中国地方建設局中国技術事務所長

* 2 現 中部地方建設局道路部機械課長

* 3 現 三菱重工業株式会社

目 次

まえがき

1. 調査試験の目的	1
2. 調査	2
2.1 調査概要	2
2.2 各種ステンレス鋼の特性	2
2.2.1 ステンレス鋼の特性	2
2.2.2 物理的性質	2
2.2.3 機械的性質	4
2.2.4 溶接施工性	6
2.2.5 ステンレス鋼の腐食	7
(1) 全面腐食	7
(2) 孔食	8
(3) すき間腐食	8
(4) 粒界腐食	9
(5) 応力腐食割れ	10
(6) 異種金属接触腐食	11
2.3 各種条件下におけるステンレス鋼の耐食性	11
2.3.1 水中における耐食性	11
(1) 淡水中	11
(2) 酸性河川中	12
(3) 海水中	12
2.3.2 異種金属接触腐食	15
2.3.3 コンクリート埋設部の耐食性	17
2.4 設計上の課題	18
2.4.1 構造材料としての課題	18
(1) 使用材料	18
(2) 許容応力	25
(3) たわみの許容値	25
(4) 余裕厚	27
(5) 最小板厚	27
2.4.2 構造設計面での課題	28
(1) プレートガードの設計	28
(2) 圧縮部材の設計	28

(3) 継手部の設計	29
(4) 水密部の設計	30
(5) 製作・据付への配慮	31
(6) コンクリート埋設部	31
a. 放流管	31
b. 基礎材	31
c. 戸当り金物	32
d. 点検設備アンカ、整流板ジベル	32
2. 5 製作上の課題	33
2. 5. 1 溶接方法	33
(1) 溶接方法	33
(2) 溶接材料	35
2. 5. 2 溶接上の注意事項	36
(1) 溶接技術面	36
(2) 施工管理面	38
2. 5. 3 熱影響部の鋭敏化緩和の方法	38
2. 5. 4 検査方法について	39
(1) 溶接部の欠陥	39
(2) 熱影響部の鋭敏化	40
2. 5. 5 残留応力とその除去	40
2. 6 据付上の課題	42
2. 6. 1 一般事項	42
2. 6. 2 現場加工後の不働態化処理	42
2. 7 メンテナンス	43
2. 7. 1 ステンレス鋼を用いた既設設備	43
2. 7. 2 オールステンレス製ゲート	44
2. 8 施工例の現地調査	44
2. 8. 1 調査概要	44
2. 8. 2 調査内容	45
2. 8. 3 調査結果	45
2. 8. 4 考 察	52
2. 8. 5 ま と め	53
2. 8. 6 総合判断	54
3. 試験	55
3. 1 試験概要	55

3. 2 ステンレス鋼の溶接欠陥に関する試験	55
3. 2. 1 丸棒形溶接割れ試験	55
3. 2. 2 溶接欠陥調査試験	59
3. 2. 3 溶接作業環境試験	63
3. 3 ステンレス鋼の溶接鋭敏化に関する試験	66
3. 3. 1 限界溶接入熱量に関する試験	66
3. 3. 2 熱間歪み取りに関する試験	72
3. 4 溶接歪み取り防止に関する試験	74
3. 4. 1 開先形状の違いによる溶接歪みの比較調査	74
3. 4. 2 拘束した状態での溶接歪みに関する比較	78
3. 4. 3 すみ肉溶接における歪み発生量の比較	79
3. 5 ダム構造物のモックアップ確認試験	84
3. 5. 1 脚柱部のモックアップ試験	84
3. 5. 2 トラニオン溶接継手部のモックアップ試験	89
3. 5. 3 予備ゲート部のモックアップ試験	96
3. 6 ステンレス鋼の溶接継手部の機械的性質の試験	102
3. 6. 1 静的強度試験	102
3. 6. 2 疲労強度試験	104
3. 6. 3 突合せ溶接継手部の余盛り形状と疲労強度に関する考察	109
3. 7 表面処理に関する試験	114
4. ステンレス鋼構造物に関する設計・製作・据付・保守管理上の留意事項	119
4. 1 設計に関する事項	119
4. 1. 1 使用材料	119
4. 1. 2 ステンレス鋼の許容応力	121
4. 1. 3 溶接部の継手効率	123
4. 1. 4 許容応力度の補正	124
4. 1. 5 たわみの許容値	125
4. 1. 6 余裕厚	125
4. 1. 7 構造部材の設計	126
4. 1. 8 附属施設の設計	127
4. 2 製作に関する事項	128
4. 2. 1 切断	128
(1) 切断方法	128
(2) 切断面の処理	128
(3) 切断時の養生	129

4. 2. 2 曲げ	129
(1) 曲げ加工度	129
(2) 曲げ加工時の養生	129
(3) スプリングバック	130
4. 2. 3 切削加工	132
4. 2. 4 組立て	132
(1) 組立て	132
(2) 組立ピース	132
4. 2. 5 溶接	133
(1) 溶接法及び溶接施工試験	133
(2) 溶接材料	137
(3) 溶接工の資格	139
(4) 溶接技術者	140
(5) 溶接開先	141
(6) 溶接条件	141
(7) 溶接外観	142
(8) 溶接順序、溶接歪み	143
(9) 異材継手の溶接	143
(10) 溶接環境	143
(11) 歪み取り	144
(12) ピース類除去法	144
(13) 溶接スパッタ、切断火花付着部処理	145
(14) 表面傷の処理	145
(15) 後熱処理	145
(16) 表面処理	146
(17) 検査	146
4. 3 据付に関する事項	147
4. 3. 1 工具及び治具材料	147
4. 3. 2 据付作業	148
4. 3. 3 製品の保管	148
4. 3. 4 安全設備等	148
4. 4 保守管理に関する事項	149
4. 4. 1 一般的注意事項	149
4. 4. 2 点検上のポイント	149
4. 4. 3 補修上の注意	150

5. まとめ	152
6. 今後の課題	152
あとがき	156
参考文献	157

1. 調査試験の目的

本報告書は、関東地方建設局宮ヶ瀬ダム工事事務所の依頼により、昭和 63 年度及び平成元年度に土木研究所が行った「ステンレス鋼の力学的特性に関する調査試験」の内容について、まとめたものである。

調査は、昭和 63 年にダム用ゲートに使用されるステンレス鋼について現在供給されている鋼種の物理的・機械的性質について技術文献及び資料の調査・整理を行い、また、ゲート構造体を対象とした溶接施工並びに各種環境下における腐食状態について調査した。次に、ゲート構造体の設計上の課題において使用材料、設計仕様について検討を行った。

平成元年度は、ダム用ゲートに使用するステンレス鋼の溶接施工法等の検討を図るため、以下に示した項目について試験を実施し、その結果を含めて施工上の留意事項についてまとめた。

- (1) 溶接欠陥に関する調査
- (2) 溶接鋭敏化に関する調査
- (3) 溶接歪みに関する調査
- (4) 溶接継手部の機械的性質に関する調査
- (5) ステンレス鋼の表面処理に関する調査

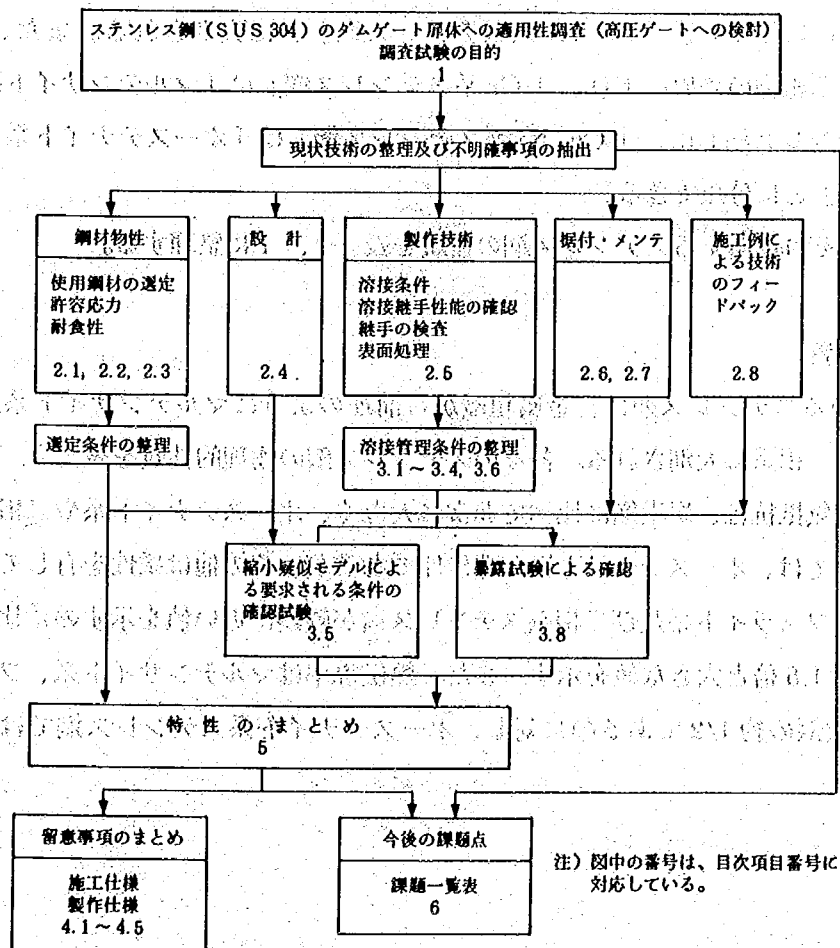


図-1. 1 調査フロー

2. 調 査

2. 1 調査概要

本調査は、ダム用ゲートに使用するステンレス鋼について現在供給されている鋼種を、マルテンサイト系（Cr系）、フェライト系、オーステナイト系（Cr-Ni系）に分類の上、その特性として物理的性質及び機械的性質を調査し、また、ゲート構造体を対象とした溶接施工並びに各種環境条件下における腐食発生について調査したものである。

2. 2 各種ステンレス鋼の特性

2. 2. 1 ステンレス鋼の特性

ステンレス鋼の定義は様々であるが、一般的に「ステンレス鋼とは、クロム含有量が材料表面に不動態化被膜を生成するのに必要な12%付近の最小値よりも多く、工業材料としての有用性が急速に失われる約30%を越えない鉄基合金であり、耐食、耐酸、耐酸化、耐熱性、耐低温性等の用途に供されるもの」と規定することができる。

ステンレス鋼は1910年ごろに開発され、その優れた耐久性、耐食性の持ち味はいうまでもなく、高・低温材料として使用範囲は拡大の一途をたどっており、現在では各種の需要に応じた多種のステンレス鋼が製造されるに至っている。ステンレス鋼は、合金組織からNiを含有せずCrのみを含有する「Cr系ステンレス鋼」と、NiとCrを含有する「Cr-Ni系ステンレス鋼」とに大別される。また、これらは各々の持っている顕微鏡的金属組織の差異により、「Cr系ステンレス鋼」は「マルテンサイト系ステンレス鋼」と「フェライト系ステンレス鋼」に、「Cr-Ni系ステンレス鋼」は「オーステナイト系ステンレス鋼」と「二相系ステンレス鋼」とに分類できる。

以上の分類と、それぞれに属するステンレス鋼の種類を表-2.1に整理する。

2. 2. 2 物理的性質

一般に使用されているステンレス鋼は、金属組織から前述のようにマルテンサイト系、フェライト系、オーステナイト系及び二相系に大別される。各々のステンレス鋼の物理的性質を表-2.2に示す。

ステンレス鋼の比電気抵抗は、炭素鋼に比べて非常に大きく、オーステナイト系や二相系では5倍以上にも達する。磁性については、オーステナイト系が非磁性であるが、その他は磁性を有している。線膨張係数はマルテンサイト系、フェライト系及び二相系ステンレス鋼が軟鋼に近い値を示すのに比べ、オーステナイト系ステンレス鋼では1.5倍と大きな値を示す。また、熱伝導率はマルテンサイト系、フェライト系及び二相系ステンレス鋼は軟鋼の約1/2であるのに対し、オーステナイト系ステンレス鋼では1/3と極めて小さい。

表-2. 1 ステンレス鋼の種類

分類		JIS 改正規格記号	JIS 旧記号	鋼種組成	備考
Cr系 (Ni添加なし)	マル テン サイト 系	SUS403	SUS50	13Cr-0.1C-低Si	焼入硬化性あり
		SUS410	SUS51	13Cr-0.1C	
		SUS410S	—	13Cr-低C	
		SUS410J1	SUS37	13Cr-0.5Mo-0.15C	
		SUS416	SUS54	13Cr-0.1C-高S	
		SUS420J1	SUS52	13Cr-0.2C	
		SUS420J2	SUS53	13Cr-0.4C	
		SUS420F	—	13Cr-0.4C-高S	
		SUS431	SUS44	16Cr-2Ni-0.15C	
		SUS440A	—	18Cr-0.5Mo-0.7C	
		SUS440B	—	18Cr-0.5Mo-0.85C	
		SUS440C	SUS57	18Cr-0.5Mo-1C	
		SUS440F	—	18Cr-0.5Mo-1C-高S	
	フェ ライト 系	SUS405	SUS38	13Cr-0.2A ℓ -0.0406C	焼入硬化性なし
		SUS429	—	16Cr-0.1C	
		SUS430	SUS24	18Cr-0.1C	
		SUS430F	—	18Cr-0.1C-高S	
		SUS434	—	18Cr-1Mo-0.1C	
Ni-Cr系 (Ni添加あり)	オ ー ス テ ナ イト 系	SUS201	—	17Cr-4.5Ni-6Mn-N	焼入硬化性なし
		SUS202	—	18Cr-5Ni-8Mn-N	
		SUS301	SUS39	18Cr-7Ni-0.1C	
		SUS302	SUS40	18Cr-8Ni-0.1C	
		SUS303	SUS60	18Cr-8Ni-高S	
		SUS303Se	—	18Cr-8Ni-Se	
		SUS304	SUS27	18Cr-8Ni	
		SUS304L	SUS28	18Cr-8Ni-極低C	
		SUS305	SUS62	18Cr-13Ni-高C	
		SUS305J1	SUS63	18Cr-13Ni	
		SUS308	—	18Cr-10Ni	
		SUS309S	SUS41	22Cr-12Ni-0.06C	
		SUS309S	SUS41	22Cr-12Ni-0.06C	
		SUS310S	SUS42	25Cr-20Ni-0.06C	
		SUS316	SUS32	18Cr-12Ni-2.5Mo-0.06C	
		SUS316L	SUS33	18Cr-12Ni-2.5Mo-極低C	
		SUS316J1	SUS35	18Cr-12Ni-2Mo-2Cu-0.16C	
		SUS316J1L	SUS36	18Cr-12Ni-2Mo-2Cu-極低C	
		SUS317	SUS64	18Cr-12Ni-3.5Mo-0.06C	
		SUS317L	SUS65	18Cr-12Ni-3.5Mo-極低C	
		SUS321	SUS29	18Cr-8Ni-Ti-0.06C	
		SUS347	SUS43	18Cr-9Ni-Nb-0.06C	
		SUS384	—	16Cr-18Ni	
		SUS385	—	12Cr-15Ni	
		SUSXM7	—	18Cr-9Ni-3.5Cu	
		SUSXM15J1	—	18Cr-13Ni-4Si	
	二 相 系	SUS329J1	—	25Cr-5Ni-2Mo-0.06C	焼入硬化性なし
	析 出 系 硬	SUS630	SUS80	17Cr-4Ni-4Cu-Nb-0.05C	—
		SUS631	—	17Cr-7Ni-1A ℓ -0.07C	
		SUS631J1	—	17Cr-8Ni-1A ℓ -0.07C	

表-2.2 代表的ステンレス鋼の物理的性質

種 類	鋼 種	物 理 的 性 質											
	J I S	密 度 (g/cm ³)	比 電 気 抵 抗 (μΩ・cm)	磁 性	比 熱 (cal/g/°C) (0~100°C)	平 均 線 膨 張 係 数 (10 ⁻⁶ /°C)					熱 伝 導 率 10 ⁻³ (cal/ cm・sec・°C)		縦 弾 性 係 数 ×10 ⁻³ (kgf/mm ²)
						0~ 100	0~ 316	0~ 538	0~ 649	0~ 816	100	500	
炭鋼素		7.86	15	有	0.12	11.4	11.5	-	-	-	11.2	-	21.0
サ イ テ ン 系	SUS410	7.75	57	有	0.11	9.9	10.1	11.5	11.7	-	5.95	6.86	20.4
	SUS403	7.75	57	有	0.11	9.9	10.1	11.5	11.7	-	5.95	6.86	20.4
	SUS420J2	7.75	55	有	0.11	-	-	-	-	-	5.95	-	20.4
フ イ テ ラ 系	SUS405	7.75	60	有	0.11	-	-	-	-	-	6.45	-	20.4
	SUS430	7.70	60	有	0.11	10.4	11.0	11.3	11.9	12.4	6.24	6.28	20.4
オ ー ス テ ナ イ ト 系	SUS301	7.93	72	無	0.12	16.9	17.1	18.2	18.7	-	3.89	5.13	19.7
	SUS302	7.93	72	無	0.12	17.3	17.8	18.4	18.7	-	3.89	5.13	19.7
	SUS304	7.93	72	無	0.12	17.3	17.8	18.4	18.7	-	3.89	5.13	19.7
	SUS321	7.93	72	無	0.12	16.7	17.1	18.5	19.3	20.2	3.81	5.29	19.7
	SUS347	7.98	73	無	0.12	16.7	17.1	18.5	19.1	20.0	3.81	5.29	19.7
	SUS316	7.98	74	無	0.12	16.0	16.2	17.5	18.5	20.0	3.89	5.13	19.7
	SUS309S	7.98	78	無	0.12	14.9	16.7	17.3	18.0	-	3.89	4.46	20.4
	SUS310S	7.98	78	無	0.12	14.4	16.2	16.9	17.5	-	3.89	4.46	20.4
	二 相 系	SUS329J1	7.80	83	有	0.11	12.2					5.00	
SUS329J2L		7.80		有	0.11						4.00		20.0

2.2.3 機械的性質

常温における機械的性質の例を表-2.3に示す。

表-2.3 代表的ステンレス鋼の機械的性質

種類	鋼種	状態	引張試験			硬さ試験 (H.B.)
			引張力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	
サリ イト テ ン 系	SUS 403	焼なまし	21以上	45以上	20以上	201以下
	SUS 410		21以上	45以上	20以上	201以下
	SUS 420J1		23以上	53以上	18以上	223以下
	SUS 420J2		23以上	55以上	18以上	235以下
フイ テ ラ 系	SUS 405	焼なまし	18以上	42以上	20以上	183以下
	SUS 430		21以上	46以上	22以上	183以下
オ ー ス テ ナ イ ト 系	SUS 301	固溶化熱処理	21以上	53以上	40以上	187以下
	SUS 302		21以上	53以上	40以上	187以下
	SUS 304		21以上	53以上	40以上	187以下
	SUS 304L		18以上	49以上	40以上	187以下
	SUS 304N2		35以上	70以上	35以上	248以下
	SUS 309S		21以上	53以上	40以上	187以下
	SUS 310S		21以上	53以上	40以上	187以下
	SUS 316		21以上	53以上	40以上	187以下
	SUS 316L		18以上	49以上	40以上	187以下
	SUS 321		21以上	53以上	40以上	187以下
	SUS 347		21以上	53以上	40以上	187以下
二 相 系	SUS 329J1	固溶化熱処理	40以上	60以上	18以上	277以下
	SUS 329J2L		46以上	63以上	18以上	302以下

マルテンサイト系ステンレス鋼は焼入硬化が可能で、その成分（特にC含有量）及び熱処理条件の選定により、広範囲の機械的性質が得られる。また、マルテンサイト系ステンレス鋼は焼戻し状態で使用するのであるが、焼戻し条件により機械的性質は大きく変化する。一例として12Cr鋼の機械的性質に及ぼす焼戻し温度の影響を図-2.1に示す。

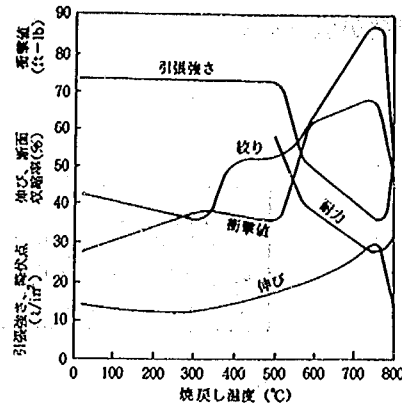


図-2.1 12Cr鋼の焼戻し温度と機械的性質の関係 (C:0.07%, Cr:11.7%)

この図は SUS410 や SUS430 など比較的低炭素のものであるが、550℃付近を境に大きく機械的性質が変化している。この焼戻し温度は炭素含有量により変化するので、鋼種により適切な焼戻し温度を選定する必要がある。フェライト系ステンレスは軟鋼と比較的類似の機械的性質を示す。この鋼種については、衝撃抵抗が極めて低いのが欠点であるが、CやNなどの含有量を減少させることにより、靱性を改善することができる。オーステナイト系ステンレス鋼は、一般に伸び、絞り、衝撃値が優れているが、他に比べ降伏比（耐力／引張強さでオーステナイト系の場合 40～50%）が低い。この改善策としては、冷間加工を施すか、適当な元素を添加する方法が考えられる。前者は、準安定なオーステナイト組織が冷間加工によっていわゆる擬マルテンサイトに変化するため、特にNi、Crが低いほどこの現象が強く、SUS301、201は加工硬化系鋼の代表的なものである。後者の場合、添加元素としてはNが有効であり、耐食性、靱性を殆ど劣化させずに強度を高めることができる。一例として、オーステナイト系ステンレス鋼の代表的な鋼種である SUS304（耐力 21kgf/mm² 以上）に 0.15～0.30%のNを添加した SUS304N2（耐力 35kgf/mm²）が挙げられる。

二相系ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼に比べ、耐力、引張強さが大きく、伸びが小さく、硬さが大きいのが特徴である。

以上は、常温における静的な機械的性質であるが、次に疲労に対する強度について述べる。材料が変動する荷重を繰返し受けると、静的破壊限をはるかに下回る応力で破壊する。この現象を“疲れ現象”といい、この時の破壊限を疲労強度という。ステンレス鋼においても軟鋼と同様に、疲労強度は引張強さに最もよく比例している。すなわち、引張強さが高くなれば疲労強度は高くなる。その他、疲労強度に与える影響としては、以下の3点が挙げられる。

① 成分の影響：侵入型元素の含有量が多いほど疲労強度は高くなる。

特に高温疲労強度の上昇は著しい。

② 冷間加工の影響：靱性が著しく低下しない範囲で冷間加工を行うと、静的強度の上昇に伴い疲労強度も高くなる。

③ 応力集中の影響：材料に切り欠き、溶接部の余盛り、介在物が存在すると、応力集中及び不均一な応力分布を生じ、疲労強度が低下する。

疲労強度の一例を図-2.2に示す。

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
○	0.078	0.53	1.85	0.022	0.012	10.21	19.30
●	0.056	0.39	1.57	0.006	0.018	9.89	18.51
×	0.025	0.36	1.57	0.005	0.020	11.73	17.39

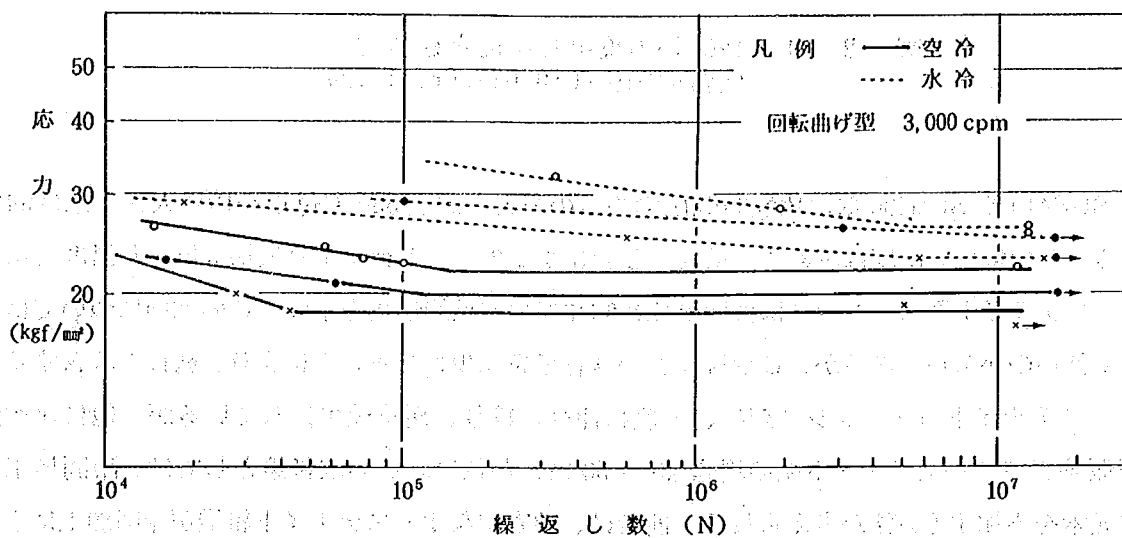


図-2.2 SUS304のS-N曲線

図-2.2はオーステナイト系ステンレス鋼の代表的な鋼種であるSUS304のS-N曲線である。疲労強度は水冷したもので、 25kgf/mm^2 前後、空冷したもので 20kgf/mm^2 前後の値を示しており、静的な引張強度に対し50%以下に低下している。

この種の疲労強度については、ミルメーカを中心に数多くの実験が行われており、各種鋼材の疲労強度は把握されている。

2.2.4 溶接施工性 溶接は、鋼材の接合に不可欠な作業であり、溶接の質は鋼材の性能に大きく影響する。次に各種ステンレス鋼の溶接特性について述べる。

マルテンサイト系ステンレス鋼は、急冷による硬化性が大きく、溶接熱影響が硬いマルテンサイト組織になり、冷却後に割れを生じる場合がある。この硬化性は炭素含有量の高い鋼ほど著しい。また、マルテンサイト系ステンレス鋼は、溶接時のアーク雰囲気により、溶接金属中に溶接吸収された水素により遅れ割れが

生じることがある。以上、マルテンサイト系ステンレス鋼の溶接施工性はあまりよくないので、慎重な対策をした後、溶接を行う必要がある。

フェライト系ステンレス鋼は、焼入れ硬化性がないため熱影響は殆ど硬化しないが、変態しないため融点近くまで加熱された部分が粗粒化して、延性、靱性が乏しくなる。従って、融点近くの高温にさらされる時間をできるだけ短くし、粗粒化領域を小さくする必要がある。

オーステナイト系ステンレス鋼は、前述の二種に比べると溶接施工性は格段に優れているため、各種の溶接が広く行われており、良好な溶接部の強度は母材と同等以上であることが確認されている。しかし、溶接金属の高温割れ、熱影響におけるクロム炭化物の粒界析出などには、注意を払う必要がある。

以上、各種ステンレス鋼の溶接施工性について述べたが、現在では溶接技術の進歩により、上述の問題点を踏まえた施工を行ってれば、溶接性については特に問題ないものと考ええる。

2. 2. 5 ステンレス鋼の腐食

ステンレス鋼がさびにくいのは、鋼全体がさびにくいのではなく、その表面にできる「不働態化被膜」と呼ばれる酸化被膜（すなわち一種の錆のうすい膜）が安定なためである。一般に環境の酸化性が高くなれば、金属は腐食しやすくなるが、金属によっては酸化性がある程度以上高くなると、かえって腐食しなくなることがある。この時、その金属は不働態（passivity）になったという。不働態になりやすいかどうかは金属によるが、実際に不働態になるかどうかは環境によって変化する。つまり、環境によって性質が変わるため、使用材料や使用方法を誤るとステンレス鋼であっても耐食性を期待できないので注意しなければならない。図-2. 3にステンレス鋼の腐食現象の形態別分類を示す。ステンレス鋼で一般に問題となるのは湿食である。

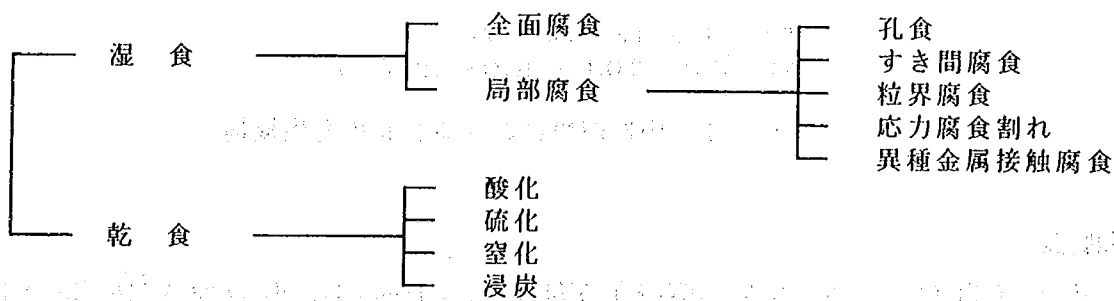


図-2. 3 ステンレス鋼の腐食現象の形態分類

(1) 全面腐食

表面がほぼ均等に腐食されるものを全面腐食と呼んでいる。フェライト系、マルテンサイト系ステンレス鋼は、硝酸のような酸化性の酸に対して不働態が保たれる。しかし、硫酸のような非酸化性の酸には不働態が破壊され、腐食する。オーステナイト系ステンレス鋼は、硫酸に対しても比較的よい耐食性を示す。

（18Cr-8Niステンレス鋼に比べ、Niの含有量を増加しMoやCuを添加したステンレス鋼の方が耐食性に優れる。）

(2) 孔食

金属表面に比較的安定な酸化被膜が存在して全面腐食が抑制されている場合、部分的に不働態化被膜が破壊され、腐食が特定の場所に集中し孔状に成長するものを孔食と呼ぶ。孔食は、一般にハロゲンイオン（ Cl^- 、 F^- など）が存在する環境で起こりやすい。また、異物の接触によっても発生する。更に金属全体の偏析、析出及び表面の粗い加工などにより、欠陥部の多い酸化被膜が形成されることも原因となる。図-2. 4に孔食の発生機構を示す。

海水などの塩化物を多量に含む環境では、孔の内部で溶出した金属（金属塩）の加水分解によってPHが低下して酸性溶液となるので、腐食はさらに進むこととなる。ステンレス鋼のように不働態によって耐食性を保つ材料では、ごく僅かな部分に起こった孔食が全体の破壊を引き起こす恐れもある。

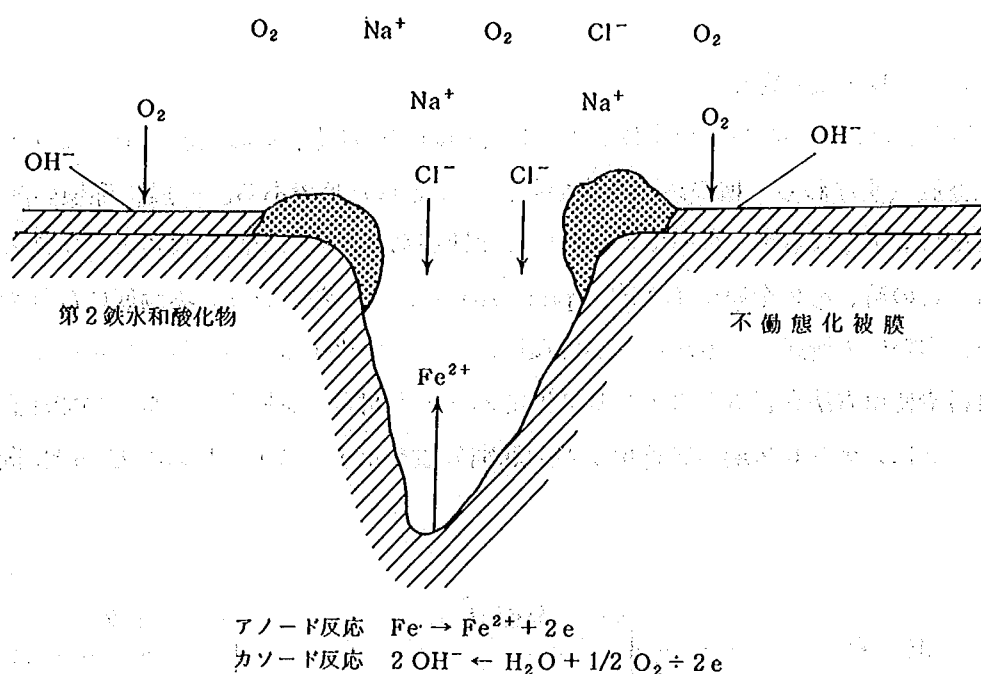


図-2. 4 中性環境における孔食の発生機構

(3) すき間腐食

構造物の継手や異物（スパッタ、フジツボなど）が付着した金属面では、小さなすき間が形成される。すき間では、腐食に関与する溶存酸素、各種イオンなどの化学種の移動が抑制されるために、すき間とすき間外の上に濃淡電池が形成され、その電位差が駆動力となって濃度の希薄なすき間部がアノードとなり腐食が進行する。ステンレス鋼のように強固な酸化被膜を作る材料でも、すき間内では酸素の供給が乏しいため、欠陥部の多い酸化被膜しか生成されず、激しい局部腐食が発生する。18Cr-8Ni ステンレス鋼にMoを添加した鋼種や二相系ステンレス鋼などは耐すき間腐食性に優れる。図-2. 5は、海水中に浸漬したステンレス鋼のすき間腐食の機構を示したものであり、腐食部では孔食と同じような現象が起こる。（すき間腐食も孔食と同様に、ハロゲンイオン〔 Cl^- 、 F^- 等〕が存在する環境で起こりやすい。）

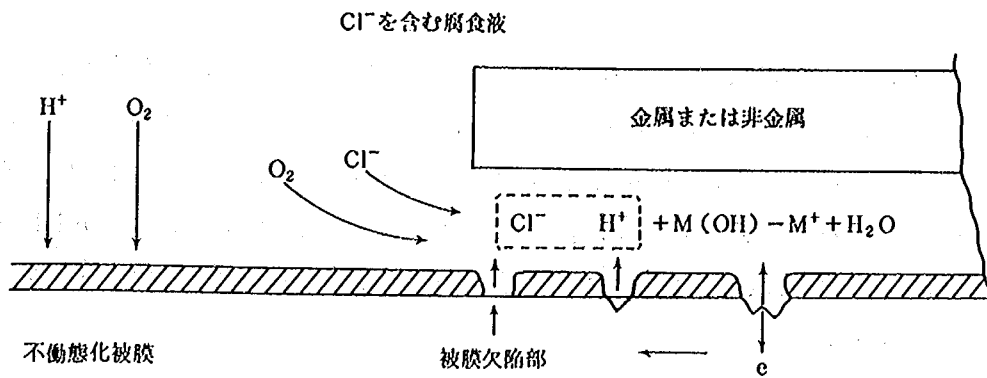
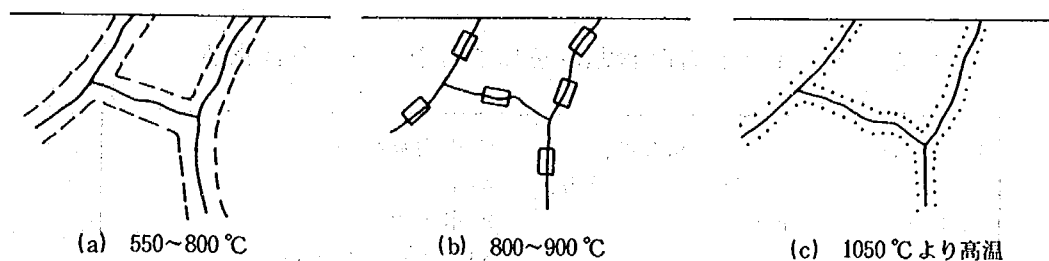


図-2. 5 海水中におけるオーステナイト系ステンレス鋼のすき間腐食

(4) 粒界腐食

オーステナイト系ステンレス鋼を $550 \sim 800^\circ\text{C}$ に加熱すると、鋼種によっては炭素がクロム炭化物 (Cr_{23}C_6) として結晶粒界部が選択的に腐食される。このような腐食を粒界腐食と呼ぶ。

18Cr-8Ni ステンレス鋼 (0.08% C) は、 650°C 付近に加熱した場合に最も粒界腐食を起こしやすく、また、加熱時間が長いほど粒界腐食を起こしやすくなる。図-2. 6 にステンレス鋼の加熱温度と結晶粒界近傍におけるクロム炭化物の変化を模式的に示した。



説 明

- (a) 合金のクロムと炭素が反応してクロムカーバイドを生成するため、その周辺のクロム濃度が欠乏し、この部分が腐食されやすくなる。(鋭敏化)
- (b) $800 \sim 900^\circ\text{C}$ に加熱するとクロムカーバイドは偏析する。
- (c) 更に高温状態に加熱すると、カーバイドは溶解する。(溶体化)

図-2. 6 ステンレス鋼の加熱温度と結晶粒界の変化の模式図

この粒界腐食を防止するには、炭素量 0.03% 以下のステンレス鋼または Ti、Nb を添加したステンレス鋼を使用する方法がある。また、溶接後 $1010 \sim 1120^\circ\text{C}$ で加熱し、析出炭化物を再固溶させ急冷する。さらに、溶接中は、継手の表面に銅板などの当て金をしたり、水冷を行い炭化物の析出を最小限にする。予熱が好ましくないことはもちろんである。

(5) 応力腐食割れ

オーステナイト系ステンレス鋼は、引張応力と腐食環境の相互作用によって割れが発生する。これを応力腐食割れという。これは、ミクロ的な孔食が進行し、そこに引張力が加わり、機械的破壊が起こって割れが生成されるもので、腐食速度及び変形速度がごく小さい場合（0.1～0.01%以下）に発生するとされている。但し70℃～80℃以下の温度域での発生は殆どない。従って、常温で応力腐食割れが生じる可能性は低いと考えられる。割れの形態としては、結晶粒界割れと粒内（貫粒）割れがある。図-2.7にステンレス鋼の応力腐食割れ機構を示す。

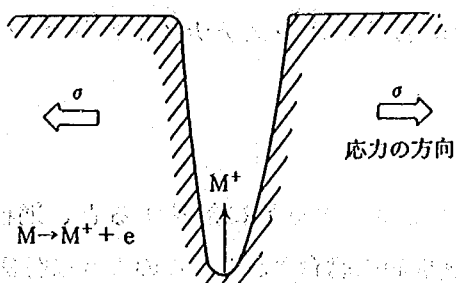


図-2.7 ステンレス鋼の応力腐食割れ機構

表-2.4にステンレス鋼の応力腐食割れを特に起こしやすい腐食環境を示す。

表-2.4 応力腐食割れを起こしやすい腐食性物質

Fe-Cr-Ni ステンレス鋼 (オーステナイト系)	SUS304 ～310S	塩化物水溶液 海水 海水+川水 NaCl+H ₂ O ₂ 水溶液 ジクロールエタン 粗NaHCO ₃ +NH ₃ +NaCl水溶液 湿ったマグネシアの絶縁物 NaCO ₃ +0.1%NaCl水溶液 濃縮ボイラ水 粗ソーダ及びサルフェート バルブ製造液 明ばん水溶液 H ₂ S水溶液, H ₂ SO ₃ 水溶液 水蒸気(500°F) NaOH水溶液 NaOH+硫化物水溶液 H ₂ SO ₄ +CuSO ₄ 水溶液 H ₂ SO ₄ +塩化物水溶液 H ₂ S+O ₃ メラミンメチル水溶液
----------------------------------	-----------------	--

(6) 異種金属接触腐食

電解質液中で異種金属が接触すると、それぞれが示す電極電位によって巨視的な電池を形成する。このような状況では卑な電位を示す金属がアノードとなって腐食し、貴な金属側はカソードとなって水素を発生する。また、腐食の度合いは、単独で溶液に浸漬した場合より増大する。但し、一般の実用材料は純金属ではなく、多くの元素が添加された合金である上、その表面に形成される酸化被膜が環境によって変化するため、その電極電位は必ずしも一定していない。特にオーステナイト系ステンレス鋼では、酸化被膜形成の有無によって電位が大幅に変動するので、他の金属と併用する場合には注意する必要がある。表-2.5は海水中における電位測定例を示したものである。

表-2.5 実用金属材料の電位

単位 (V)

材 質	電 位	材 質	電 位	材 質	電 位
亜鉛	-1.03	ステンレス鋼, ニロスト (四種)	-0.48	ニッケル	-0.20
アルミニウム	-0.74	ステンレス鋼, ニロスト (一種)	-0.46	316ステンレス鋼 (活性)	-0.18
2%Ni鍍鉄	-0.68	ドーピン青銅	-0.40	インロネル600	-0.17
鍍鉄	-0.61	黄銅	-0.63	410ステンレス鋼 (不動態)	-1.15
炭素鋼	-0.61	銅	-0.36	銀	-0.13
コルテン鋼 (活性)	-0.57	アドミラルティ黄銅	-0.29	304ステンレス鋼 (不動態)	-0.084
ステンレス鋼, ニロスト (二種)	-0.54	90・10Cu・Ni+0.66Fe	-0.28	ハステロイC	-0.079
430ステンレス鋼 (活性)	-0.53	70・30Cu・Ni+0.66Fe	-0.27	モネル	-0.075
410ステンレス鋼 (活性)	-0.52	70・30Cu・Ni+0.37Fe	-0.25	316ステンレス鋼 (不動態)	-0.05
ステンレス鋼, ニロスト (三種)	-0.49	430ステンレス鋼 (不動態)	-0.22	—	—

出典：(海水中, 25°C, 流速13ft/s(4.0m/s), 飽和甘こう (汞) 電極基準の値 INCO社 Kure Beachでの

実験結果による)

2.3 各種条件下におけるステンレス鋼の耐食性

2.3.1 水中における耐食性

(1) 淡水中

ステンレス鋼の優れた耐食性は、表面にできる不動態化被膜が腐食を防止するためである。淡水中では不動態化被膜は安定し、破壊される可能性は低い。(全面腐食は生じないと考えられる。) ステンレス鋼特有の局部腐食(孔食、すき間腐食、粒界腐食、応力腐食割れ、接触腐食)の発生は、鋼種によって多少差異がある。「2.2.5 ステンレス鋼の腐食」でも述べたようにオーステナイト系ステンレス鋼は淡水中では殆ど腐食しないが、マルテンサイト系ステンレス鋼は耐食性が劣るため、淡水中であつても腐食する場合もあると考えられる。

(2) 酸性河川中

酸性河川中で特に問題となるのは、ステンレス鋼の場合、孔食、粒界腐食である。オーステナイト系のステンレス鋼は他のステンレス鋼に比べて耐食性に優れる。その代表的な材質である SUS304 (18Cr-8Ni) は、硫酸酸化性下では不働態化被膜が破壊され、腐食する場合が多い。従って孔食、粒界腐食に対する配慮が必要である。孔食、粒界腐食に対しては低炭素材または Mo、Si の添加された材料が耐食性に優れる。SUS316 は、Mo12.00 ~ 3.00 %、Si1.00 % 以下が添加されており、孔食に対して耐食性があると考えられる。また、SUS316 L は炭素量が 0.03 % と低いので、粒界腐食に対して耐食性があると考えられる。

河川環境へのステンレス鋼の適用を目的として、東北地方の 4 河川 (玉川 [秋田県]、駒入川 [青森県]、浅瀬石川 [青森県]、白川 [山形県]) において、腐食及び防食効果の実証試験が 1981 年 11 月から 1985 年 6 月までの約 4 年間にわたり実施された。

ステンレス鋼の耐食性に対して、顕著な影響を示す水質因子 (PH、塩素イオン濃度) の観点から試験を実施した河川は次の二つに大別される。一つは PH3.5 ~ 4.4、塩素イオン濃度 11 ~ 74ppm の酸性河川 (玉川、駒入川)、他は PH6.1 ~ 7.3、塩素イオン濃度 2.9 ~ 11ppm の中性河川 (浅瀬石川、白川) である。このような環境における普通鋼 (SS400) の腐食速度は、酸性河川で 0.1 ~ 0.2mm/year、中性河川で 0.05 ~ 0.06mm/year 程度であり水質依存性が示された。一方、ステンレス鋼の腐食速度は、SUS304 (18Cr) では 0 ~ 0.0021mm/year、SUS329J1 (25Cr) では 0 ~ 0.0001mm/year と極めて軽微であり、実用的に腐食量は殆ど無視できる程度のものであることが確認された。しかし、SUS403 は 0.0055 ~ 0.02mm/year と前者と比較してやや大きい腐食速度を示した。ステンレス鋼特有のすき間腐食は、SUS403 ブッシュ下のすき間部の全てに生じており、工作上の問題点を提起している。また、不働動態が全面的に破壊され全面腐食が生じる PH と塩素イオン濃度は、SUS304 で PH1.5、塩素イオン濃度 3 ppm が測定されている。

前述のとおり、実際の酸性河川及び中性河川における試験結果では SUS403 にすき間腐食が発生し、SUS304 にはすき間腐食は生じなかった。Cr の含有量の増加によって、耐すき間腐食性を向上できるので、13 % Cr ではすき間腐食に対する抵抗性は不十分であり、18 % Cr で概ね十分な耐食性が得られたといえる。

以上の結果から、PH 値が 2 ~ 12 の範囲で 30 °C 以下の常温において、100ppm 以下の塩素イオン濃度では、SUS304 はほぼ完全な耐食性を有することがわかる。

(3) 海水中

海水の腐食性も、本質的には海水中に溶解されている酸素濃度に支配されている。ただ、海水中には食塩 (NaCl)、塩化カルシウム (CaCl_2)、塩化マグネシウム (MgCl_2)、硫酸ナトリウム (Na_2SO_4) などの多くの塩類が溶解しているので電気伝導度がよく、腐食電池の電解質としての作用が強いため、異種金属接触腐食などの選択腐食が発生しやすい特徴がある。また、海水中に最も多量に含まれている塩素イオン (Cl^-) は、材料表面の安定な酸化被膜を破壊するとともに、局部腐食部の内部に濃縮しやすく、これに伴って海水が酸性側へ移行するので、淡水中では見られないような激しい孔食やすき間腐食が発生する。水

滴の付着と乾燥が繰返される海水飛沫帯の腐食作用には、水滴や水膜中への酸素の溶解以外に、溶解塩類の析出に伴う湿潤環境の構成が加わる。すなわち、溶解塩類は水分の蒸発に従って飽和濃度に達して結晶として析出するが、これらの結晶は吸湿しやすく、常に大気中の水分を吸収して湿潤な環境をつくる。このため、結晶表面の薄い水膜中には高濃度の酸素が溶解し、強い腐食性の環境が構成される。表-2.6は、各種の塩の飽和溶液の水蒸気圧とそれに対応する相対湿度の関係を示したものである。例えば、飽和食塩水に対する飽和蒸気圧は、20℃において13.63 mm Hg (185.4kgf/m²)であり、これは純水の78%にすぎない。言い換えれば、相対湿度が78%となれば食塩は濡れてくることになる。同じ海水中に含まれている塩化カルシウム (CaCl₂) は35%の相対湿度で濡れるので、海水や海塩粒子が付着する環境は乾燥することがないと考えても差し支えない。

表-2.6 各種塩飽和溶液の水蒸気圧と対応する相対湿度

塩の種類		飽和溶液の水蒸気圧 mmHg (×133Pa)	相対湿度 %
塩化亜鉛	ZnCl ₂	1.75	10
塩化カルシウム	CaCl ₂	6.15	35
硝酸アンモン	NH ₄ NO ₃	11.74	67
硝酸ナトリウム	NaNO ₃	13.53	77
塩化ナトリウム (食塩)	NaCl	13.63	78
塩化アンモニウム	NH ₄ Cl	13.92	79
硫酸ナトリウム (芒硝)	Na ₂ SO ₄	14.20	81
塩化カリウム	KCl	15.04	86

さらに、塩化物水溶液中における SUS304 の 563 日間の浸漬試験結果を、応力腐食割れ (C)、孔食 (P)、僅かに腐食生物が見られるが進行性のない初期腐食 (S)、全く影響されない (O) に分類して、塩素イオン濃度—温度図にまとめたものを図-2.8~図-2.10に示す。これは塩化ナトリウム水溶液中での試験結果であるが、応力腐食割れ (SSC) は PH 7 の中性においては 80℃以下の温度では起こらず (図-2.9)、PH 2 の酸性でも 60℃以下では起こらないことがわかる (図-2.8)。PH12 のアルカリ性では、SCC 発生の下限温度は中性の水よりも高くなる (図-2.10)。孔食は SCC よりも低い温度で起こるが、PH 7 で常温では 1000ppm 以上の Cl⁻イオンの存在を必要とし、80℃では 100ppm で発生する (図-2.9)。PH 2 の酸性になると、Cl⁻イオン濃度 100ppm では 50℃以上の温度で起こるようになる (図-2.8)。すき間腐食は孔食より低い塩素イオン濃度、低い温度で生じるものであり、実用上最も配慮すべき腐食現象である。しかし、この腐食はすき間部で塩素イオンの濃縮によって生じるため、実験室的な標準状態を得にくいものである。従って、ステンレス鋼といえども海水中では腐食する可能性が高い。

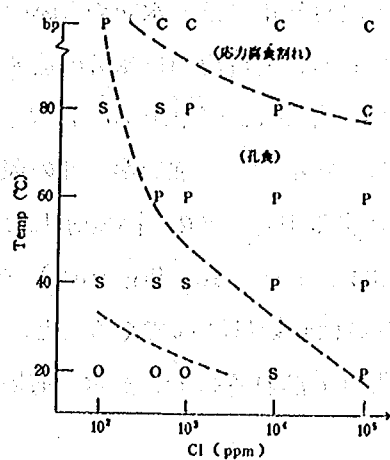


図-2. 8 塩化ナトリウム水溶液中の腐食形態に及ぼす塩素イオン濃度と温度の影響
(PHの初期値：2)

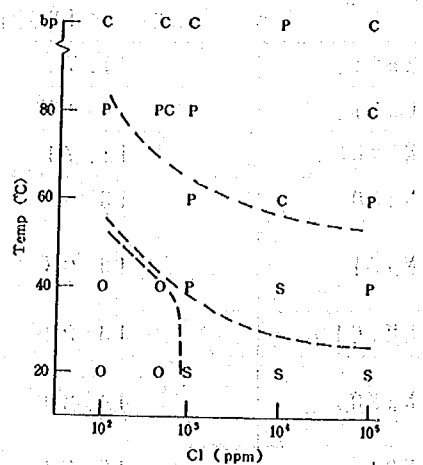


図-2. 9 塩化ナトリウム水溶液中の腐食形態に及ぼす塩素イオン濃度と温度の影響
(PHの初期値：7)

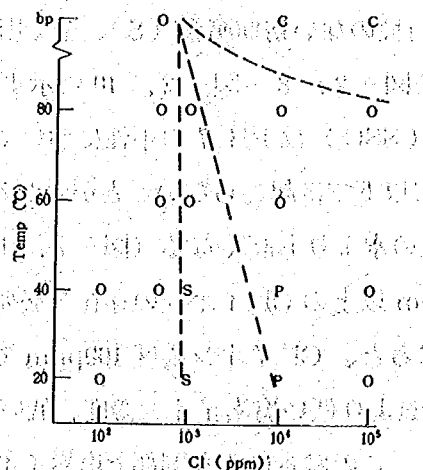


図-2. 10 塩化ナトリウム水溶液中の腐食形態に及ぼす塩化イオン濃度と温度の影響
(PHの初期値：12)

2. 3. 2 異種金属接触腐食

前にも述べたように、海水やイオンを含む水（電解液）中での異種金属の組合せにおいてしばしば起こる現象で、この場合、自然電位の上位に近い金属（卑電位側）は陽極となり腐食の促進を受ける。（但し、異種金属どうしにある程度自然電位の差がないと腐食しない。腐食が発生する電位差は種々の条件により異なるが、0.05 V以下ならば通常は無視できる。）陽極腐食の速度は、一般に、陽極面積に対して陰極面積の比が大きくなるほど速くなる傾向にある。材質の異なるステンレス鋼を接触させた場合の腐食の事例として、次のものがある。

○ SUS304 と SUS420J2

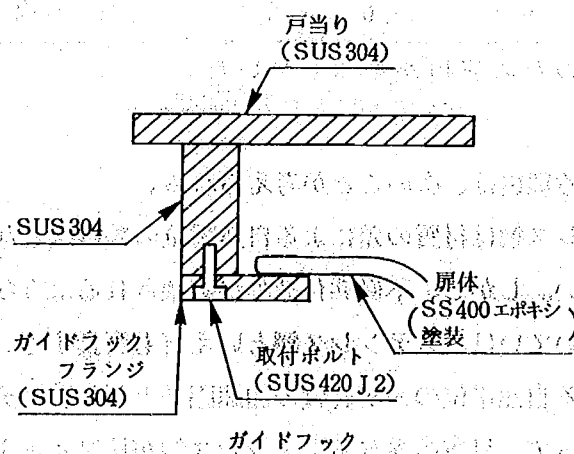
- (1) 表面取水ゲートガイドブック取付ボルトの腐食（図－2. 11 参照）
- (2) 海水導入管、バタフライ弁の腐食（図－2. 12 参照）

○ SUS316 と SUS304

- (3) 海水ポンプ、リーマボルトの腐食

(1) 表面取水ゲートガイドブック取付ボルトの腐食

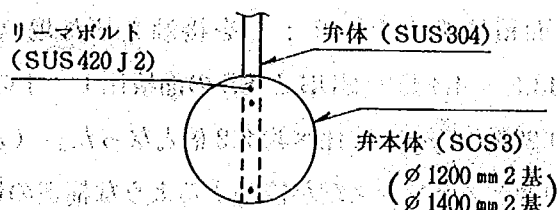
ボルト頭部及び首下部に激しい腐食。頭部の欠損。水質は淡水。腐食部に SO_4^{2-} 濃縮（PH 4）。



図－2. 11 表面取水ゲートガイドブック取付ボルトの腐食

(2) 海水導入管バタフライ弁の腐食

弁本体と弁棒を固定しているリーマボルト（ノックピン）の海水に接している頭部が激しく腐食し、ナットは脱落し、ボルトと原寸φ40mmがφ30mm程度に減肉していた。弁本体の材質はSCS13、弁棒はSUS304で構成され、リーマボルトの材質はSUS420J2を使用。



図－2. 12 海水導入管、バタフライ弁の腐食

(3) 海水ポンプリーマボルトの腐食

SUS316 の継手と SUS304 のボルトを接触状態で使用していたため、SUS304 のボルトが激しい腐食を受けた。（表面海綿状を呈し、軸方向に腐食が進行している。）

環境：海水中で使用（常温）

玉川における 2 年間（1981～1983）の試験では「SUS304 + SUS410 系、SUS316 + SUS410 系、SUS304 + SS400（塗装）の、どの組合せのテストピースについても、異種金属の接合による電位差腐食は認められなかった」と報告されている。

表-2. 7 に調査実験地点の水質状況を示す。

表-2. 7 調査実験地点の水質状況

採取日 年 月 日	導電率 ($\mu\text{V}/\text{cm}$)	PH	化 学 成 分 (ppm)					
			Ca	Mg	Fe	Al	Cl ⁻	SO
56.11.28	396.5	3.5	21.0	3.0	1.85	13.4	65	56
*57. 6. 2	135.0	4.2	1.1	1.2	0.40	0.05以下	12	32
57.10. 2	530.0	3.7	1.5	3.9	2.34	17.0	101	84
58.10.25	371.5	5.1	20.0	3.1	1.40	14.0	77	65

* 前日（昭和57.6.1）雨のため河川が増水していた。

腐食の事例と試験結果が異なる理由は、次のことが考えられる。

完全に不働態化されたステンレス鋼は材質の差による自然電位の差は殆どなく、材質の異なるステンレス鋼どうしの接触腐食は起こらない。しかし、不働態化被膜が破壊されるような腐食環境下（孔食、すき間腐食が発生するような環境）においては、ステンレス鋼といえども腐食する。また、ひとたび腐食が起こればステンレス鋼の材質の差による自然電位の差が腐食の加速因子となり、ステンレス鋼単独腐食より腐食速度が速くなる可能性がある。従って、材質の異なるステンレス鋼が接触するような構造の場合、材料や組合せよりは、むしろ使用環境に注意を要する。

普通鋼とステンレス鋼が接触する場合は、自然電位差が大きいため接触腐食が起こりやすい。東北 4 河川における 4 年間の試験（前述したもの）の結果は次の通りである。中性河川（PH6.1～7.0）で SUS と SS の面積比 1 : 1～2 : 1 を接触させた場合、SS の腐食量は 0.068～0.071mm/year、酸性河川（PH3.5～4.4）で SUS と SS の面積比 1 : 1 の場合は、0.063mm/year であり SS 単独（無塗装）の場合の 0.29mm/year に比べ約 2.2 倍となった。（表-2. 8 参照）

普通鋼とステンレス鋼が接触するような構造の場合、腐食環境における使用は極力避けるべきである。また、やむを得ず使用する場合は、普通鋼だけではなくステンレス鋼にも塗装を併用するかあるいは電気防食を併用するなどの必要がある。

表-2. 8 接触腐食試験 (SS400とSUS304) による浸食度経年変化

単位(mm/year)

面積比 期 間 (年) 場 所			SS400:SUS304 1:1			SS400:SUS304 1:2			SS400:SUS304 2:1			SS400単独		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
玉 川			0.73	0.63	—	0.75	0.51	—	0.53	0.34	—	0.05	0.29	0.22
浅 瀬 石 川			0.10	0.08	0.07	0.09	0.07	0.07	0.09	0.06	0.06	0.11	0.06	0.06
駒 込 川			0.16	0.12	0.11	0.21	—	0.16	0.13	0.11	0.11	0.08	0.05	0.05
(注1) 白 川	間 隔	25mm	0.17	0.14	0.12	0.18	0.15	0.13	—	—	—	0.14	0.13	0.10
		50mm	0.17	0.13	0.11	0.17	0.14	0.12	—	—	—			
		100mm	0.16	0.13	0.11	0.16	0.15	0.12	—	—	—			

(注1) 白川のみ間隔距離を変えて試験を実施

2. 3. 3 コンクリート埋設部の耐食性

一般に、普通鋼、ステンレス鋼ともに耐アルカリ性を有している。新しいコンクリートの中のPHは14～12程度であり、普通鋼及びステンレス鋼に対して防錆効果がある。しかし、やがて風化等により中性化し、鉄筋等が防錆効果を失う場合がある。ステンレス鋼をコンクリート埋設した場合、コンクリート中の主要水和物(ケイ酸カルシウムや水酸化カルシウム等)に対しては、耐食性があると考えられる。しかし、ステンレス鋼とコンクリートが剝離しその間に浸透水が浸透した場合、すき間腐食が起こる可能性がある。(但し、コンクリート中の環境がアルカリ性を保っていれば問題はない。またコンクリートの老化が進み中性化した後についても、溶存酸素が少ないため腐食は発生しないと考えられる。)

前述の玉川における2年間の浸漬試験結果は、次の通りである。SUS304 (SS400) のクラッド鋼とSUS410系 (SS400) の合成材のコンクリート埋設部は、河川水の液浸透によると思われる錆の発生が認められた。しかし、コンクリートが普通鋼の表面から剝離して河川水が浸透したとしても、アルカリ環境であるため腐食する可能性は低い。(経年変化によるアルカリ環境の中和の問題が残される。) 表-2. 9に、2年間浸漬後のコンクリート埋設部のテストピースの裏面材 (SS400) の錆発生率を示す。

ダムコンクリート中の鉄筋とステンレス鋼との電位差による腐食は、現在のところは未解明のようである。一般には両者の距離がある程度離れていれば問題はないとされているが、これはダム本体側の問題として検討が必要であろう。

表-2. 9 コンクリート埋込み試験用テストピースの裏面材の錆発生率

単位(%)

供 試 材	試 験 期 間			
	6 ヶ 月		1 ヶ 年	2 ヶ 年
SUS304 (SS400) ク ラ ッ ド 鋼 材	No. 1	0	1.5	2.9
	No. 2	0	1.5	11.4
SUS410系(SS400) 合 成 材	No. 1	0	31.4	80.0
	No. 2	0	28.6	80.0

2. 4 設計上の課題

ここでは文献及び実績調査結果を踏まえてステンレス材をダムゲート設備に適用する際の設計上の問題点を取り扱った。

2. 4. 1 構造材料としての課題

(1) 使用材料

① 使用されるステンレス鋼の種類

ステンレス材は、部品としては従来からゲート設備に使用されていた。最近では塗装が不要であるという利点があるためゲート本体などにも使用されるようになり、ダム取水ゲートや防潮ゲートではオールステンレスゲートも製作されている。

ダムゲートをオールステンレス化する際の材質選定に先立ち、ゲート設備におけるステンレス材の使用実績をまとめてみる。表-2. 10にゲート設備におけるステンレス鋼の使用実績を示す。

ゲート設備では耐食性、溶接施工性及び経済性に優れるオーステナイト系ステンレス鋼のSUS304が基本になっており、各部分が要求される強度、硬度及び耐食性によっては、経済性を考慮した上で他鋼種が適宜選択されている。例えば、マルテンサイト系ステンレス鋼は、焼入れ硬化するという特性を生かし、強度及び硬度が要求される軸種や主ローラレールに使用されている。

以下では表-2. 10に示すような使用実績を踏まえてオールステンレス製ダム用ゲートを製作する際の材質選定について検討する。

扉本体のオールステンレス化は、ダム取水ゲートや防潮ゲートの一部で実施されているにすぎない。材質については、一般的に耐食性を考慮し、淡水中または空中ではオーステナイト系ステンレス鋼のSUS304、海水中や酸性水中では、SUS304より耐食性に優れるSUS316がよいとされているが、実際の施工例を見ると経済性を考慮し、防潮ゲートや酸性河川のダムゲートでもSUS304が使用されている例がある。このようなオールステンレス製ゲートは、現在のところ実施例が少なく、また、竣工してからあまり年月も経過していない(調査範囲内では竣工後6年が最長)ため、ここで材質選定の妥当性について言及することはできない。但し、本検討の一環として調査した樋門(SUS304製防潮ゲート、昭和55年据付、58年竣工)の潮位影響部以上を調査した限りにおいて、若干の発錆は見られるものの板厚減少や孔食など機能上問題となるような発錆はなかったことを考慮すれば、少なくとも今回検討対象としている淡水のダム用

表-2. 10 ゲート設備におけるステンレス鋼の使用実績

鋼 種		性 質	使 用 部 分
マル テン サイト 系	SUS403	・ 焼入れ硬化性あり。	・ 主ローラ ・ シーブ軸 ・ スピンドル
	SUS410系	・ SUS403と同じ。(板材)	・ 主ローラレール ・ (主ローラ)
	SUS420系	・ 焼入れ硬化性が大で、BH500 まで硬化可能。	・ 主ローラレール ・ ピストンシステム ・ (主ローラ) ・ シーブ軸 ・ キャタピラローラ
オ ー ス テ ナ イ ト 系	SUS304	・ 耐食性良好	・ スキンプレート ・ 水密ゴム押え板 ・ 水密ゴムボルト、ナット ・ 水密ゴム当り面 ・ 各種ローラレール ・ 没水部カバープレート 一般に淡水中又は空気中で使用され るが防潮ゲート、酸性河川等での使 用例もある。
	SUS304L	・ 溶接、応力除去による粒界腐 食に対し優れている。 (炭素含有量小) ・ 耐食性はSUS304と同じ。	・ 熱間加工を行う箇所に用いる。
	SUS304N2系	・ 耐食性は良好 ・ 耐力、硬度に優れている。	・ 主ローラレール ・ ローラ軸 ・ シーブ軸
	SUS316	・ 海水及び化学的腐食環境 (酸等)にさらされたとき、 優れた耐食性を示す。 ・ 孔食に対する抵抗大。	・ SUS304と同様で、海水中又は酸性 水中に使用されるとき。
二 相 系	SUS329J1	・ 局部腐食に対する抵抗大。 ・ 耐力、硬度に優れる。	・ 主ローラレール
析化 出系 硬	SUS630	・ 析出硬化型で、耐食性強度 (焼入れ硬化性)ともに優れ る。	・ キャタピラローラ ・ (主ローラ) ・ 主ローラレール

ゲートの主要部材については、SUS304 を使用して問題ないと考えられる。

放流管についても同様であり、特に熱間曲げ加工が必要な箇所については、低炭素の SUS304L を用いて熱影響による鋭敏化を防止する必要があるが、通常は SUS304 でよいと考えられる。また、強度上 SUS304 で不足する場合は SUS304 に N を添加し、高強度とした SUS304N2 の使用が考えられる。戸当り金物本体についても同様である。但し、主ローラレールについては高硬度が要求されるため、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304N2 系、二相系ステンレス鋼の SUS329J1 系、SUS329J2L 系の使用が望ましい。特に SUS304N2 系の中には、圧延工程で高硬度を確保した材質もあり、耐衝撃性、溶接性、加工性等に優れているため、ローラレール材として優れている。

マルテンサイト系の SUS410 系は前述の二種より高硬度が期待できるため、従来から多くの実施例があるが、耐食性の面で問題を残すためオールステンレス製ゲートでの使用は避ける方が望ましい。

主ローラは、ローラレールに近い硬度が要求される。従来は大荷物を受ける主ローラについては、焼入れ硬化性のあるマルテンサイト系の SUS403 等を使用し、取水ゲートや小規模なゲートなどローラ作用荷重が小さい場合については、SUS304 やステンレス鋳鋼品の SCS 2、SCS 3、SCS13 等が用いられていた。オールステンレス製ダムゲートを対象とした場合、サイドローラなど作用荷重が小さい場合は従来の考え方でよいが、予備ゲート主ローラなど大型ローラにマルテンサイト系ステンレス鋼を用いることは、前述の主ローラレールと同様耐食性の点から望ましくない。従ってオーステナイト系または二相系ステンレス鋼の中で比較的硬度の高い SUS304N2、SUS329J1、SUS329J2L 等を使用していくべきであろう。但し、大型ローラは寸法上の制限から鋼板や丸棒鋼からの製作は困難であり、鍛鋼品として製造する必要がある。この場合、SUS304N2 系のうちローラレールに用いるような高硬度を有する材料は、前述のように圧延工程で硬度が得られるものであるから、鍛鋼品とした場合は圧延板ほどの硬度は得られない。

ローラ軸は高強度が必要であるから、SUS304N2 等の比較的高い耐力を有する材質を選定していく必要がある。

シーブは、従来は SUS13 などステンレス鋳鋼品で製造されているが、特に問題はないと考える。また、シーブ軸はローラ軸に準じて考えるのが妥当であるが、常時空中にあるものについてはマルテンサイト系の SUS403 などの使用を考えてもよいであろう。

ローラ、シーブ、トラニオンなどの回転支承部の軸受は、オイルレスブシュの使用が望ましい。但し、副ゲート主ローラ軸受については流水遮断を行うために、水圧荷重が大きい場合は自動調心コロ軸受を使用し、ローラ抵抗を小さくする必要がある場合がある。ステンレス鋼製の自動調心コロ軸受は、海外の水門における実績はあるが、硬度上の問題から SUS440C を使用するため耐食性は劣る。また、特殊品であるため製作費、納期等に問題が残る。従って通常はベアリング鋼を使用し、オイルシートを設けて給油を行うことで耐食性の向上を図る方法が妥当であろう。

以上、オールステンレス製ダムゲートの設備の使用材質について検討してきた。以上をまとめると次のようになる。

スキンプレート、主桁等：淡水中の使用を前提とすれば SUS304 で問題ないと考えられる。強度上 SUS304 で不足する場合は SUS304N2 の使用が考えられる。

主ローラ：小荷重用ローラは SUS304、SUS304N2 やステンレス鋼鋳鋼品（SCS13）などの使用が考えられる。大型ローラは二相系ステンレス鋼（SUS329J1、SUS329J2L）の鍛鋼品が妥当である。

シーブ：従来通りステンレス鋼鋳鋼品（SCS13 など）が妥当である。

軸（ローラ軸、シーブ軸、トラニオンピンなど）：SUS304 で強度不足の場合は SUS304N2 などの使用が考えられる。常時空中にある部分については、マルテンサイト系の SUS403 等の使用も考えられる。

軸受：基本的にはオイルレスベアリングを用いる。但し、予備ゲート主ローラ軸受のように、回転抵抗を特に小さくする必要がある箇所については、自動調心コロ軸受を使用しなければならない場合もある。

この場合の材質は、あえてステンレス化しても耐食性の劣る材質となるため、普通ベアリング鋼の使用が経済性等を考慮すれば妥当であろう。

戸当り金物：SUS304 で強度不足の場合は SUS304N2 などの使用が考えられる。

ローラレール：高硬度が必要であり、かつ耐食性が要求されるため SUS304N2 系、SUS329J1、SUS329J2L などを使用する必要がある。このうち、SUS304N2 系鋼材は圧延工程において高硬度を確保した鋼種を用いるため、発注に際しては硬度指定を行う必要がある。マルテンサイト系の SUS410 系は高硬度が確保できるが、耐食性を考慮すれば避けることが望ましい。

その他の各部材質：上記同様、SUS304 を基本と強度、硬度が不足する場合は他の鋼種を選定すればよい。ただし、マルテンサイト系ステンレス鋼は耐食性が劣るため、常時空中を除けば使用しないのが望ましい。

以上、オールステンレス製ダムゲートにおける使用材質について述べた。淡水環境での材質選定にあたってはこれらの点に留意すべきであると考ええる。

② 機械的性質

前項で述べたように、オールステンレス製ゲートの材料としてはオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 を標準とし、SUS304N2、二相系ステンレス鋼の SUS329J1 などが考えられる。また、常時空中で使用される部品としては、マルテンサイト系の SUS403 などが考えられる。

a. 静的強度

上記のステンレス鋼の静的強度については既に 2. 2. 3 項の“機械的性質”で述べた。これらの材料を用いて溶接構造物を製作する場合の溶接継手強度についても、鋼構造物設備だけでなく、原子力設備など多くの実施例を通じてその強度は確認されている。SUS304 鋼材の溶接材料は、JIS 値を表-2. 11 に示すが、母材よりも合金元素を若干高めに含有させ、引張強さを母材より 3 kgf/mm^2 高めになるように設計されている。

次に、市販溶接材料の全溶着金属と継手強度の実値を、それぞれ表-2. 12、表-2. 13 に示すが、いずれも母材及び溶接材料の規格値を満足している（表-2. 11）。

溶接継手の曲げ試験についても表-2. 13 に示す様に継手引張試験時に行っているが、いずれも満足する結果が得られている。

表-2.11 SUS304鋼及び溶接材料のJIS値

記 号	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	耐 力 (kgf/mm ²)	引 張 強 さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)
SUS304 (母材)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	18.00 ~ 20.00	8.00 ~ 10.50	≥21	≥53	≥40
D308 (被覆 アーク)	≤0.08	≤0.90	≤2.50	18.0 ~ 21.0	9.0 ~ 11.0	—	≥56	≥35
YF308 (炭酸ガ スアーク)	≤0.08	≤1.00	0.50 ~ 2.50	18.0 ~ 21.0	9.0 ~ 11.0	—	≥56	≥35

注) 1. D308及びYF308の機械的性質は、溶着金属のものを示す。

2. サブマージアークはJISなし。

表-2.12 SUS304鋼用溶接材料の全溶着金属引張強さ

メーカ 名	溶 接 法	引 張 試 験		
		0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸 び (%)
神戸 製鋼	被覆アーク	40	58	50
	炭酸ガスアーク	40	58	41
	サブマージアーク	—	59	41
日 鉄 溶 接 工 業	被覆アーク	—	62	47
	炭酸ガスアーク	42	60	42
	サブマージアーク	—	58	45
住 金 溶 接 工 業	被覆アーク	—	59	49
	炭酸ガスアーク	39	60	42
	サブマージアーク	39	59	34
日 本 ウ ェ ル ロ ッ ド	被覆アーク	40	61	45
	炭酸ガスアーク	—	—	—
	サブマージアーク	42	59	43

注) 表中の数値は各メーカの実験値の一例であって、この数値で引張強度の優劣を判断することはできない。

表-2. 13 SUS304 鋼溶接継手引張強さ (例)

溶 接 法	板 厚 (mm)	開 先 種 類	継 手 引 張 強 さ (kgf/mm ²)		
			1	2	3
被 覆 ア ー ク	10	V	64 ^{・0}	63 ^{・2}	—
	19	X	61 ^{・6}	61 ^{・9}	—
炭 酸 ガ ス ア ー ク	30	X	67 ^{・8}	67 ^{・0}	—
	19	X	56 ^{・7}	—	—
サ ブ マ ー ジ ア ー ク	15	Y	67 ^{・3}	—	—
	70	H	58 ^{・5}	59 ^{・2}	—
	100	H	62 ^{・5}	66 ^{・3}	67 ^{・1}

溶接継手の優れた曲げ特性は、母材及び溶着金属の伸び特性が非常に優れていることによるものである。また、低温衝撃特性についてもオーステナイト系ステンレスは面心立方晶系であることから、超低温においても不安定破壊（脆性破壊）を生ずることはない。このことより、水素（-282.8℃）、酸素（-183℃）の低温液化形溶接構造容器として使用されている。また、脆性破壊が生じないとの理由で極低温容器の溶接継手及び母材の低温衝撃試験は法規的にも要求されていない。上述により SUS304 材をゲート、堰に使用した場合、脆性破壊の恐れはないと考えられる。

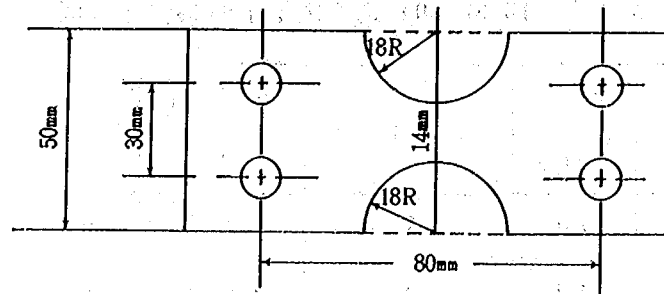
以上述べたように、溶接継手の機械的性質は公知のデータで把握することができる。従って、実施にあたっては最大板厚における継手強度を確認する程度で十分であると思われる。

b. 疲労強度

母材の疲労強度についても、ミルメーカを中心に各種条件下における数多くの疲労試験が行われており、疲労強度が静的強度を下回することは周知のこととなっている。母材の疲労特性の一例として、SUS304 の S-N 曲線は既に図-2. 2 に示した。他の例として、二相系ステンレス鋼の S-N 曲線を図-2. 13 に示す。また、溶接継手部の疲労強度についても各種実験が行われており、溶接ビードを削除し応力集中が生じないような条件では、継手部の疲労強度は母材強度と変わらないことが確認されている。図-2. 14 にその一例を示す。

本図は、SUS304（板厚 8 mm）に歪み振幅を与えた時の破壊までの繰返し载荷回数を示す。疲労試験は母材、溶接継手（両面仕上げ）及び溶接継手（裏面ビード）の 3 種類に行われており、母材と両面仕上げをした溶接継手の疲労強度が変わらないことが確認されている。溶接部にビードを残した場合は、応力集中の影響で疲労強度は低下する。この低下率は溶接ビードの形状に影響されるが、およそ母材強度の 60～70% と考えられる。

以上、ステンレス鋼母材及び溶接継手部の疲労特性について述べてきた。母材についてはミルメーカを中



疲労試験片形状 厚さ：4.0mm

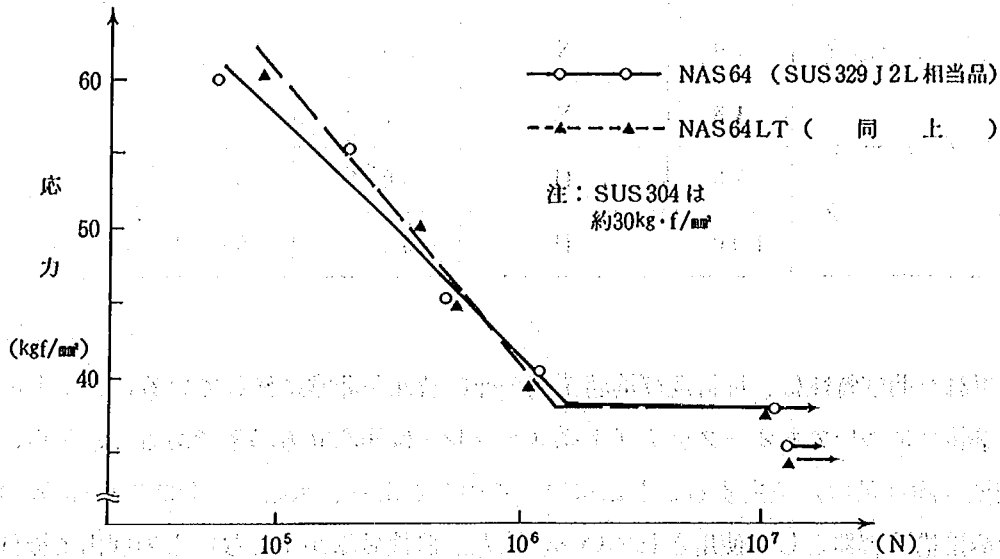


図-2.13 二相系ステンレス鋼のS-N曲線

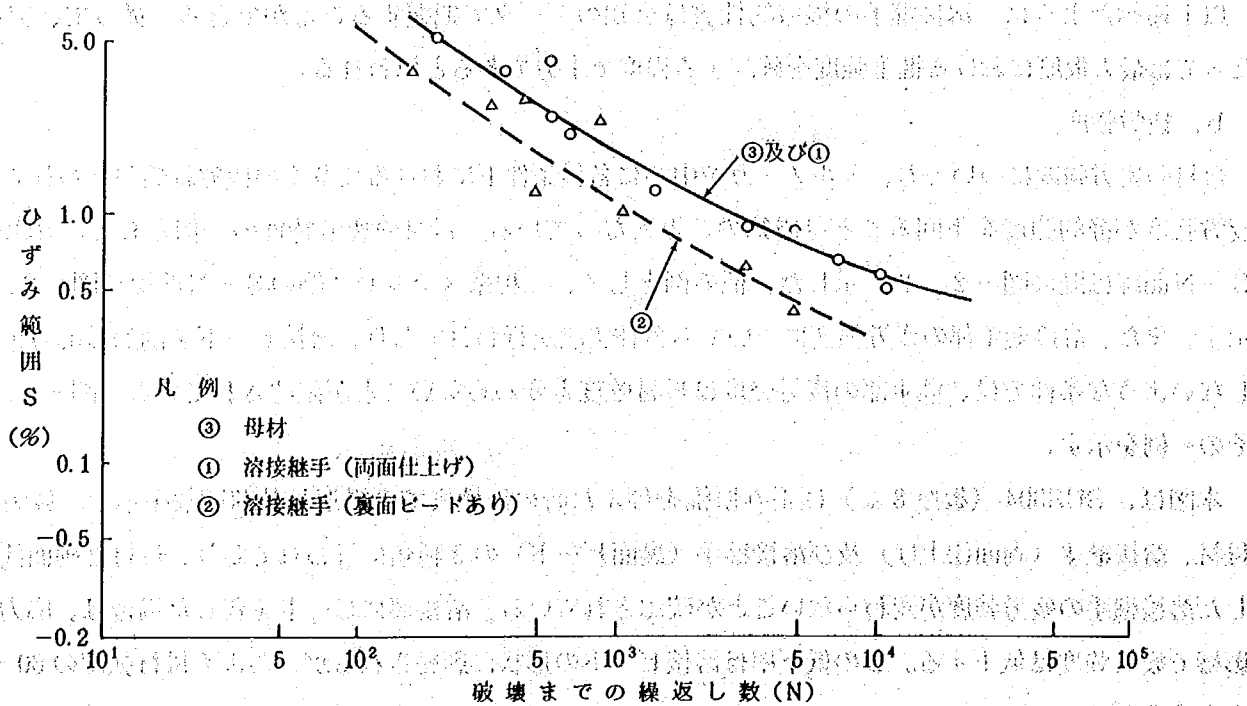


図-2.14 SUS304溶接継手部のS-N曲線

心に疲労実験が行われており、その疲労強度は十分確認されている。また、溶接継手についても、溶接ビードがない場合の疲労強度は、母材強度と変わらないことが確認できている。ただし、実際のゲートにおける溶接継手にはビードが存在し、ビード形状により疲労強度が変化するため、最もビード形状がよくない手溶接継手部の疲労特性を確認し、軟鋼と比較しておくことは有効であると考ええる。

(2) 許容応力

本項では開閉装置関係を除いた部分の扉体、戸当り、放流管などの許容応力について述べる。軟鋼製ゲート設備の場合、軟鋼の降伏点の $\frac{1}{2}$ を引張許容応力度とし、曲げ部材や圧縮部材の許容応力については座屈等を考慮し、各々引張許容応力度から提言している。また、せん断許容応力度については、せん断歪みエネルギー破壊説に基づき、許容引張応力度の約 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ としている。但し、ゲートの重要度や使用頻度に応じて上記の値を割増し、割引きしている。また、放流管は軟鋼の降伏点の $\frac{1}{1.8}$ を許容引張応力度としている。(但し、放流管については、水門扉と一体の構造物としてその機能が発揮され、安全性が議論されるべきであるとの観点から水門扉と同じ安全率とするよう改正される方向にある。)

ステンレス鋼を使用した場合、古い設計例(調査範囲では昭和54年)ではステンレス鋼とSS400との引張強度を比較し、その比をSS400の許容引張応力に乗じることにより、ステンレス鋼の許容引張応力度を定めていた例があるが、現在は耐力ベースの考え方で統一されている。耐力ベースの考え方とは、ステンレス鋼の耐力が軟鋼の降伏応力に相当するとし、耐力の $\frac{1}{2}$ を許容引張応力度とする方法であり、この考え方は「河川用ゲート設計指針(案)鋼製ゲート編:建設省河川局治水課、建設経済局建設機械課監修」や「選択取水設備設計要領(案)同解説:建設省河川局開発課監修」(表-2、14参照)にも示されている。SUS304を例にとると、前者の考え方では許容引張応力度は $1,500\text{kgf/cm}^2$ 、後者では $1,050\text{kgf/cm}^2$ となり、後者の方が安全側の考え方になっている。高圧ゲートの許容応力度は、振動の発生その他不測の応力の増加を配慮し、通常のゲートの87.5%としている。ステンレス鋼の高圧ゲートの設計に際しても、ステンレス鋼の疲労特性が軟鋼のそれと殆ど変わらないと考えられており、上記の考え方に従ってもよいものと考ええる。但し、前項でも触れたが、実施に先立ち実際のゲート設備で行われているような溶接ビード付きの継手部の疲労特性について軟鋼とステンレス鋼とを比較し確認することは有意義であると考ええる。

(3) たわみの許容値

現在、ダムゲートの水圧及びこれと同方向の荷重に対する扉体のたわみは、水密性を考慮し、径間に対して表-2、15に示す値以下としている。

ステンレス鋼の線膨張係数は軟鋼に比べて約1.5倍大きいため、ラジアルタイプのクレストゲートのように直接日射の影響を受ける場合には、底部水密ゴムに脚の温度伸縮に伴う変形が生じ、問題となる可能性がある。しかし、直接日射を受けないゲートでは日射による熱影響は小さく、あらかじめ扉体の熱変形量を水密ゴム圧着量に加味しておけば、現在の設計で対応可能である。従って、水圧等による扉体の曲げによるたわみの許容値は現状の通りで問題なく、ラジアルゲートの場合は温度変化による脚の伸縮を考慮して、水密ゴム圧着量を定めていくことで問題ないと考ええる。また、構造面で扉体が直接日射にさらされないような措置も必要であろう。

表-2. 14 ステンレス鋼材の許容応力度

(単位 kgf/cm²)

種 類	鋼 種	S U S 304	S U S 403
1. 軸方向引張応力度 (純断面積につき)		1,050	2,000
2. 軸方向圧縮 (総断面積につき)		$\frac{\ell}{r} \leq 19$: 1,050	$\frac{\ell}{r} \leq 14$: 2,000
		$19 < \frac{\ell}{r} \leq 96$: $1,050 - 6.0 \left(\frac{\ell}{r} - 19 \right)$	$14 < \frac{\ell}{r} \leq 71$: $2,000 - 15.4 \left(\frac{\ell}{r} - 14 \right)$
	圧縮部材 ℓ : 部材の座屈部 (cm) r : 部材の総断面の 断面二次半径 (cm)	$96 < \frac{\ell}{r}$: $\frac{10,000,000}{7,100 \left(\frac{\ell}{r} \right)^2}$	$71 < \frac{\ell}{r}$: $\frac{10,000,000}{3,900 \left(\frac{\ell}{r} \right)^2}$
	圧縮添接材	1,050	2,000
3. 曲げ応力度 桁の引張 (総断面積につき) 桁の圧縮 (総断面積につき)		1,050	2,000
	A_v : 腹板の総断面 積 (cm ²) A_c : 圧縮フランジ の総断面積 (cm ²)	$\frac{A_v}{A_c} \leq 2$ の場合は $\frac{\ell}{b} \leq 4.8$: 1,050	$\frac{A_v}{A_c} \leq 2$ の場合は $\frac{\ell}{b} \leq 3.5$: 1,050
	ℓ : 圧縮フランジ の固定点間距 離 (cm) b : 圧縮フランジ 幅 (cm)	$\frac{\ell}{b} \leq 4.8$: $1,050 - 18 \left(\frac{\ell}{b} - 4.8 \right)$	$\frac{\ell}{b} \leq 3.5$: $2,000 - 46 \left(\frac{\ell}{b} - 3.5 \right)$
	$K = \sqrt{3 + \frac{A_v}{2A_c}}$	$\frac{A_v}{A_c} > 2$ の場合は $\frac{\ell}{b} \leq \frac{10}{K}$: 1,050	$\frac{A_v}{A_c} > 2$ の場合は $\frac{\ell}{b} \leq \frac{7}{K}$: 7,000
	スキンプレート等で直接 固定された場合	$\frac{\ell}{b} \leq \frac{10}{K}$: $1,050 - 9 \left(K \frac{\ell}{b} - 9.6 \right)$	$\frac{\ell}{b} \leq \frac{7}{K}$: $2,000 - 23 \left(K \frac{\ell}{b} - 9.6 \right)$
		1,050	2,000
4. せん断応力 (総断面積につき)		600	1,150

表-2. 15 たわみの許容値

形 式	た わ み の 許 容 値
一 般 水 門 扉	1/800
高 圧 水 門 扉	1/2000
ゲ ム シェル構造ローラゲート	1/800 (水平、鉛直、合成方向)
選 択 取 水 ゲ ー ト	1/800
修 理 用 ゲ ー ト	1/600

(4) 余裕厚

余裕厚には、腐食に対する余裕厚と摩耗に対する余裕厚とがある。ステンレス鋼における腐食に対する余裕厚は、現在考慮していない。これについては今回調査した樋門（SUS304 製防潮ゲート、昭和 55 年据付、昭和 58 年竣工）の調査結果より板厚減少を伴うような腐食は発生していなかったことから判断しても妥当であろう。使用環境に応じた材料を使用する限りにおいては、ステンレス鋼に対して、腐食に対する余裕厚を設ける必要はないと判断する。また、摩耗に対する余裕厚は、使用環境により大きく異なるため特に定められていない。図-2. 15 に示すように、ステンレス材は摩耗に対しては軟鋼よりはるかに強く、従来から耐摩耗材の 1 種としても使用されている。このような特性を理解した上で、使用環境に応じた余裕厚を設定していく必要がある。

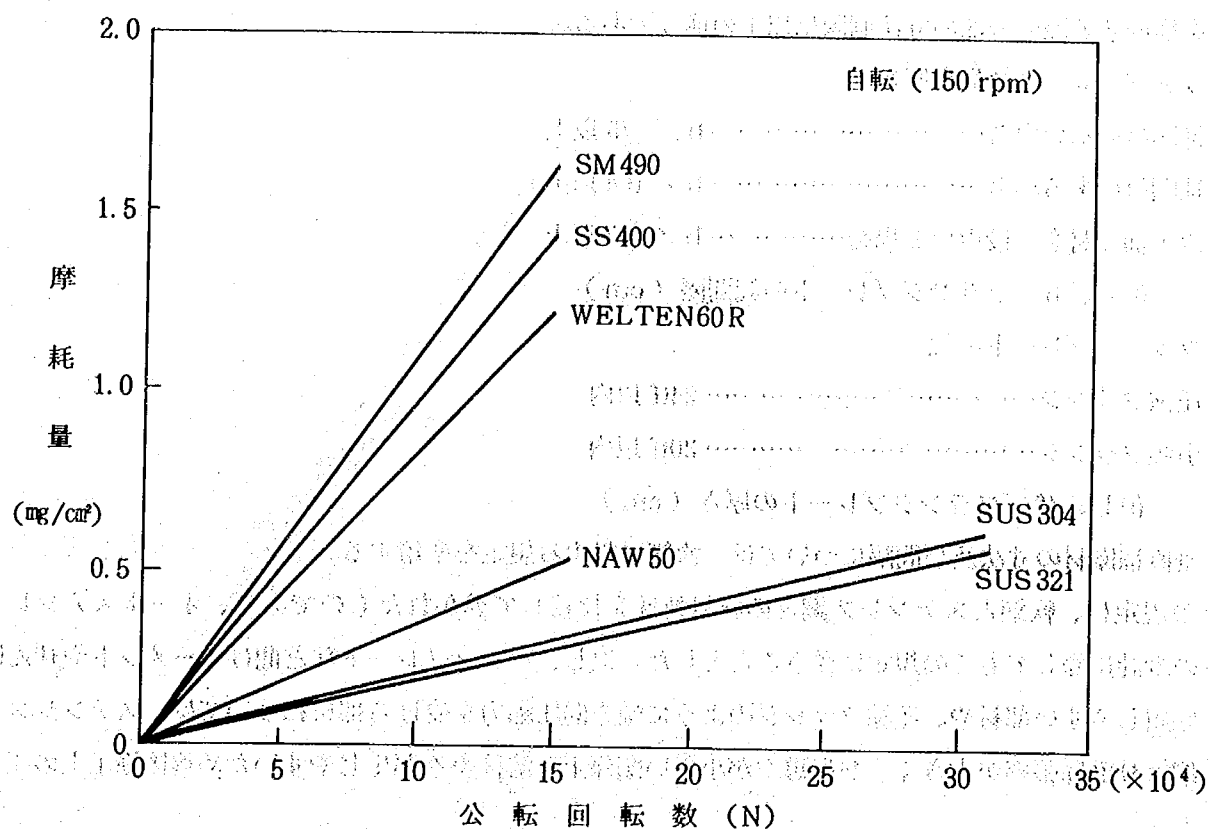


図-2. 15 各種鋼材の摩耗強度

(5) 最小板厚

ゲート設備に使用する鋼材については、設計計算上必要とされる板厚や余裕厚の検討とは別に、溶接時の局所的な歪みによる部材の座屈、変形、製作、運搬及び据付中の取扱いに対する全体の剛性を考慮し、最小板厚を定めている。ステンレス鋼を使用した場合、軟鋼と比較すると熱膨張係数が約 1.5 倍大きく、熱伝導率が約 $\frac{1}{3}$ と小さいため、溶接に伴う歪みは生じやすい。しかし、溶接入熱量の管理や溶接手順の工夫等によりこの歪みは小さくできるため、最小板厚については摩耗厚みを含み、現状通りゲートについては公称 8 mm 以上、放流管については 6 mm 以上とすることが妥当であろう。

2. 4. 2 構造設計面での課題

(1) プレートガーダの設計

プレートガーダの各部の寸法は、つり合いのとれたものとする必要がある。ウェブプレートは、その厚さが薄いと曲げモーメントやせん断力に対し座屈する恐れがある。また、フランジプレートや垂直補剛材は、その寸法が適当でないとウェブプレートと協働しない。プレートガーダを構成する各部材寸法の制限に関しては、国内外の主な基準に規定されており、それぞれの値についてはほぼ同一であることから、軟鋼については従来から最も簡単で安全と思われる寸法が採用されている。ステンレス鋼によるプレートガーダの設計基準についても、最近になって「選択取水設備設計要領（案）：建設省河川局開発課監修」にウェブプレート厚さの制限値が示されており、取水設備以外のゲート設備に対しても、ステンレス材（SUS304）のプレートガーダの設計基準が示される方向で検討が行われている。SUS304でプレートガーダを構成する際の各部の寸法制限は以下の通りである。

④ ウェブプレートの最小厚さ

補剛材のない場合…………… $b/75$ 以上

補剛材のある場合…………… $b/164$ 以上

水平補剛材を一段用いる場合…………… $b/277$ 以上

但し、 b ：フランジプレートの純間隔（cm）

⑤ フランジプレートの幅

圧縮フランジ…………… $24tf$ 以内

引張フランジ…………… $30tf$ 以内

但し、 tf ：フランジプレートの厚さ（cm）

⑥ 垂直補剛材の寸法及び間隔については、軟鋼に対する規定を準用する。

以上の規定は、軟鋼とステンレス鋼との材料特性を比較して導かれたものであり、オールステンレス製ゲートの設計に際してもこの規定に従うこととした。但し、ウェブプレートなど曲げモーメントやせん断力に対し座屈しやすい部材や、圧縮フランジのように軸方向圧縮力を受ける部材については、ステンレス鋼の方が軟鋼より熱膨張率が大きく、熱伝導率が小さい関係上、溶接歪みが生じやすいため溶接施工上の工夫が必要である。

(2) 圧縮部材の設計

ラジアルゲートの脚柱のような圧縮力を受ける部材は、部材断面積が十分であっても、それを構成する板があまり薄いと局部的な座屈を生じる恐れがある。そこで、従来から軟鋼に対してはプレートガーダと同様に、ウェブプレートの最小板厚が示されている。ステンレス鋼で圧縮部材を構成した場合のこの種の規定については、最近「河川ゲート設計指針（案）鋼製ゲート編：建設省河川局治水課建設経済局建設機械課監修」の〔解説〕に参考値として次式が示されており、ダムゲート設備に対してもこの値を標準値として適用する方向で検討が行われている。

$tw \geq b/45$

tw ：圧縮力を受けるウェブプレートの厚さ（cm）

b : 上、下フランジの純間隔 (cm)

上記の標準値は、ステンレス鋼の材料定数を用いて軟鋼と同様の算出法で求めたものであり、オールステンレス製ゲート設計に際してもこの値に従うこととした。但し、前述のプレートガーダの場合と同様、ステンレス鋼の方が軟鋼より溶接時の局部歪みが生じやすいため、これを極力小さくするような溶接施工上の注意が必要である。

(3) 継手部の設計

軟鋼製ゲート設備の継手部としては、従来、一般に溶接接合、リベット接合、リーマボルト接合などが用いられており、高力ボルト接合は原則として使用されていない。溶接接合は、接合する母材に適合した溶接棒の選定及び溶接施工法に問題がなければ、一般に最も優れた接合方法であり、継手部の静的な機械的性質はステンレス鋼に対しても、母材と同等以上であることが確認されており、また、疲労特性についても母材と同等の強度を有することが確認されている。

工場製作時の継手はほぼ溶接によって行っているが、現場における溶接継手は、従来気象条件などの外的要因、溶接姿勢の難しさ、仮組みなどの精度不良による欠陥、さらに溶接による残留応力や歪みなどの問題があり、高圧ゲートの主桁や脚などには用いられないことが多かった。しかし、最近では溶接技術の向上により、設計水頭が 70 m 近い高圧ゲートの現場継手も溶接で行われるほど広汎な範囲で利用されている。

リベット接合は、設計、製作、準備、段取りなどスピードに欠ける面はあるが、適正や欠陥の判定が容易であること、母材に対する変形や緩みに対する必要がないなどの利点があるため、ダム用ゲート主要部材の現場接合には従来から数多く採用されてきた。しかし、最近は経験のあるリベット技能者が少なくなった、溶接技術の進歩などの影響で次第に実績は少なくなっている。オールステンレス製ダムゲートを対象とした場合、リベットとして要求される高強度を有し、かつ耐食性に優れているステンレス鋼が一般に使用されていないため、リベット接合は、不適当であると考えられる。高力ボルト接合は高トルクで接合部分を締め付け、接合部材間の摩擦によって応力を伝達させるものであり、橋梁など一般構造物では広く採用されている。しかし、ゲート設備の場合は、使用環境が水中あるいは水面近傍であるため、継手部の腐食により接合部材間の摩擦力が確保できなくなる可能性がある、放流に伴う振動により継手部がずれる恐れがある等の理由により原則的に使用しないことになっている。オールステンレス製ゲートを対象としても、高力ボルト継手部は母材と添接板、添接板とボルト、ナットとの間にすき間が存在する構造となっており、すき間腐食等の局部的な発錆を生じる恐れが残っているため、ゲート設備の継手としては不適当であると考えられる。また、高力ボルトとして使用できるステンレス鋼も一般化されていない。以上により、オールステンレス製ゲートの継手構造としては溶接継手が適当であると考えられる。

溶接継手部の継手効率については、前述のように「ステンレス鋼溶接継手部の機械的特性は母材と同等以上であり、疲労強度についても母材と同等の強度を有する」ことを考慮すれば、施工が完全な場合は継手効率の最高値は 100 % を採用してよいと判断される。従って、設計に用いる溶接継手効率としては軟鋼と同様、従来の値 (表 2.16 参照) を用いて問題ないと考えられる。但し、継手部の構造的な工夫として、ステンレス鋼のすき間腐食を避ける観点から、重ね合せ継手を避け、突合せ継手にするなどの配慮が必要であろう。

表-2.16 溶接継手効率(1)

区 分		工 場 溶 接	現 場 溶 接
突 合 せ 溶 接 継 手	放 射 線 検 査 を 行 う と き	0.95(1.0)	0.90(0.95)
	放 射 線 検 査 を 行 わ な い と き	0.85	0.80
す み 肉 溶 接 継 手		0.95	0.90

[備考]

- ① 但し、放射線検査は突合せ継手の5%以上の長さについて、実施するものとする。
- ② ()内は、溶接線全長にわたって放射線検査を行う場合の値である。
- ③ 放流管において溶接継手が集中し、残留応力の影響が大きい場合で焼なましを行わない場合は、表-2.16の代わりに表-2.17を用いる。

表-2.17 溶接継手効率(2)

区 分		工 場 溶 接	現 場 溶 接
突 合 せ 溶 接 継 手	放 射 線 検 査 を 行 う と き	0.90(0.95)	0.85(0.90)
	放 射 線 検 査 を 行 わ な い と き	0.80	0.75

溶接時の留意点としては、ステンレス鋼は軟鋼に比べれば溶接に伴う変形量が大きいことは既に述べた通りである。加工時に発生する溶接歪みは、部材の形状、開先形状、溶接条件、溶接手順、拘束条件により異なるため、これらの要因を考慮した溶接実験を行い、発生歪み量及び防止策について検討を加えていく必要がある。

(4) 水密部の設計

ダムゲート水密部の構造は、ゲートの種類、水位条件及び操作条件により各種開発され実用化されている。ゲート設備をステンレス化した場合の、ステンレスの熱膨張率、熱伝導率を考慮して水密部の構造に関して特に検討しなければならない点としては、

- 現在の水密部構造で扉体の溶接歪みに対応できるか
 - 現在の水密部構造で日射等に伴う扉体の変形に対応できるか
 - ゴム押え板やボルト部などに、すき間腐食の可能性はないか
- 等が挙げられる。溶接歪みの問題は、前項でも触れたように各種条件を考慮した溶接実験を行い、その量を確認した上で施工を行えば対応可能と考える。日射等による扉体変形は、クレストゲートのように直接日射の影響を受ける構造物では問題となる可能性がある。ゴンジッドゲートやオリフィスゲートなどは日射に直接さらされる可能性は小さく、かつゲート半径もクレストゲートほど大きくないため、特に問題はないと考

える。

(5) 製作・据付への配慮

ステンレス鋼は、熱膨張率が大きく熱伝導率が小さいという材料特性上、溶接に伴う変形量が軟鋼に比べて大きい。桁のフランジなどは、溶接前にあらかじめ逆歪みを与えておけばある程度対応可能であるが、スキンプレートや放流管の管胴板などではいわゆる“やせ馬現象”が発生し、線状加熱などで対応していかなくてはならない。この場合に、過度の加熱を行うと熱影響が鋭敏化し、粒界腐食割れを生じる原因となる。このようにステンレス鋼の場合は、溶接構造物の寸法精度が軟鋼より悪くなる傾向がある。

構造物の溶接歪み特性は、あらかじめ実験等で確認し歪み防止策に努めなければならないが、材料特性の悪化を防止する観点から、ステンレス鋼構造物の寸法検査基準を軟鋼とは別に検討する必要があると思われる。また、現場溶接継手位置などは溶接歪みを考慮して決定しなければならない。例えば、ラジアルゲートでは脚の途中に現場溶接継手を設けると、局部歪みにより脚の座屈を招く原因ともなるため、寸法的に可能であれば脚と主桁との接合部で溶接するのが望ましい。

ステンレス鋼ゲートでは、製作、据付時に溶接スパッタ等の異物の付着があった場合には、これをグラインダ等で除去しなければならない。また、据付時のもらい錆等も除去、研磨する必要がある。従って、構造物の設計にあたっては桁配置や桁形状等を考慮し、グラインダ処理等が不可能な箇所が生じることを極力避ける構造にする必要がある。

(6) コンクリート埋設部

今回のステンレス化の検討では、ダムゲートを可能な限りステンレス化するという観点からコンクリート埋設部もステンレス化することを前提として考えている。ダムゲート設備のうち、コンクリート埋設部としては放流管、ラジアルゲート基礎材、戸当り金物、点検設備や整流板のアンカ、ジベルなどが挙げられる。

a. 放流管

放流管をステンレス化した場合の問題としては、放流管とダム堤体コンクリートとのすき間におけるすき間腐食、ダム堤体コンクリート中の鉄筋との電位差に伴う腐食などが考えられる。これらについては2.4項で述べる。

b. 基礎材

高圧ラジアルゲートの基礎材として一般的に使用されている形式は、(i)直接支持式、(ii)支圧ガーダ式、(iii)支圧テンションガーダ方式、(iv)PCアンカ式がある。これらのうち、直接支持式と支圧ガーダ式はゲート下流のコンクリート部に直接荷重を作用させるものであり、アンカ材の伸び等を考慮する必要はなく、ステンレス化しても問題はない。支圧板テンションガーダ方式は、テンションビームの伸び量がステンレス鋼では軟鋼より若干大きいため、これを水密ゴムの圧着代に反映する必要はある。しかし、温度変化に伴う伸びについては、コンクリート中の温度変化は小さいと考えられるため、考慮しなくてよいと思われる。コンクリートとの付着性については、ステンレス鋼は軟鋼より若干劣るという実験データがあるが、テンションビームはコンクリートと絶縁し付着させない構造とするため考慮する必要はない。従って、支圧板テンションビーム方式の基礎材のステンレス化には、可能であると考えられる。

PCアンカ式は、扉体からの荷重を基礎材を介して、PC鋼材のプレストレス導入力でコンクリート応力

に置き換えるものである。

PC 鋼材の許容応力度は、PC 鋼材と基礎材との接合部が大気中に露出することが多く、腐食の恐れが大きいため、「プレキャストコンクリート標準示方書（土木学会）」より低く設定している。また、緊張部で空中に露出する部分は、PC 鋼材が支圧板を介してステンレス鋼と接触することになり電食を生じる可能性もあるため、PC 鋼材と基礎材とを電気絶縁する方が安全である。両者の結合部分には大きな支圧応力が作用するため、硬度、強度を考慮し、絶縁材料を検討する必要がある。

c. 戸当り金物

戸当り金物のうち予備ゲート軽構造部埋設戸当りは、ダム水位が低下した場合かなりの長さにわたって日射にさらされる場合がある。露出部のステンレス鋼材が日射にさらされ温度が上昇すると、ステンレス鋼と周辺コンクリートとの熱膨張率に差が生ずるため相互に応力が作用し、場合によってはコンクリートに亀裂が入る可能性があると考えられる。この問題についての確認は難しいが、コンクリートの内部応力や温度分布などは、数値シミュレーションや模型実験により推定できるであろう。戸当りの金物のうち、没水部や主ゲートとなどコンジット内部については、温度変化がそれほどないため問題となる可能性はないと考える。

d. 点検設備アンカ、整流板ジベル

この種のアンカは、作用力を埋設金物とコンクリートの付着力で堤体に伝達していく構造とジベルのように埋設鋼材の先端に設けた支圧板より支圧応力として伝達していく構造とがある。後者は埋設部をステンレス化しても特に問題はないが、前者はステンレス鋼とコンクリートとの付着応力を確認しておく必要がある。これについては、図-2.16に示すような装置を用いた鋼棒引抜き試験の結果、SUS304の付着応力はSS400より15%程度低下することが実験で確認されている。（表-2.18参照）。

この結果を加味して埋設アンカを設計することもできるが、アンカ先端にフックや支圧板を設けて、作用力をコンクリート部に支圧応力として伝達させる構造を採用する方が、付着力を期待するより確実性が高いと考えられる。

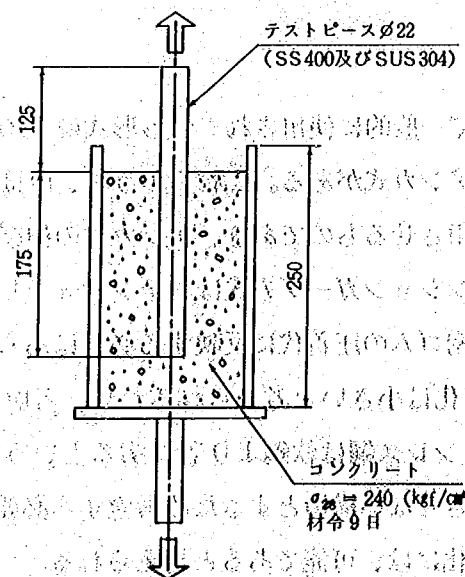


図-2.16 鋼棒付着力実験装置

表－ 2. 18 ステンレス鋼棒付着試験結果

SS400	テストピースNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
	T (kgf)	2740	2900	2020	3667	2760	3060	2960	2800	3040	2600	2854
	σ_b (kgf/cm ²)	22.7	24.0	16.7	30.3	22.8	25.3	24.5	23.1	25.1	21.5	23.6
SUS304	テストピースNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
	T (kgf)	2840	2400	2440	2440	2200	2180	3080	1860	2860	2480	2478
	σ_b (kgf/cm ²)	23.5	19.8	20.2	20.2	18.2	18.0	25.5	15.4	23.6	20.5	20.5

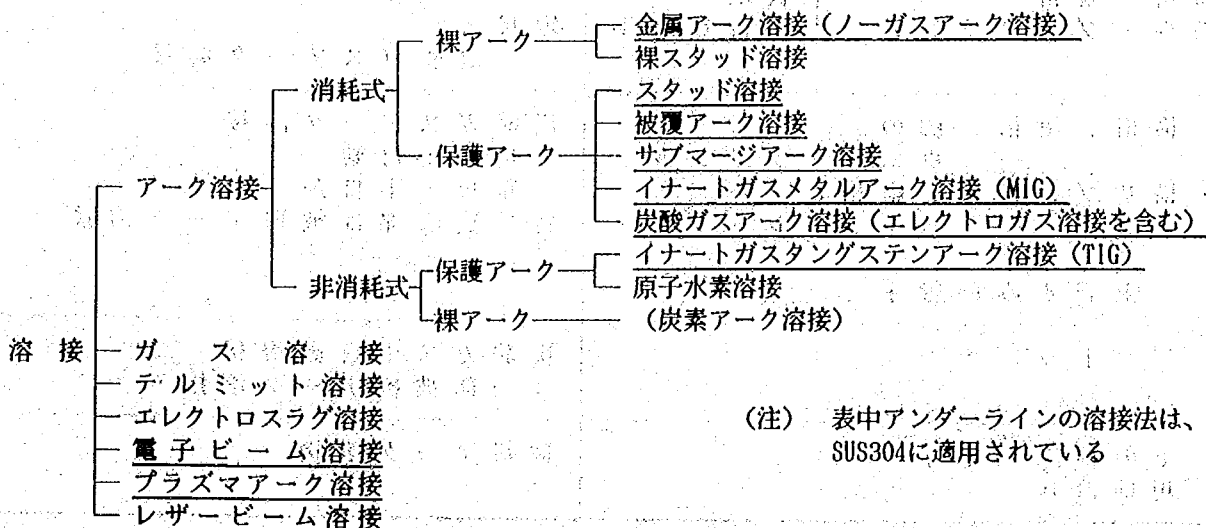
(注) テストピースの付着面積 $A_0=120.95\text{cm}^2$

2. 5 製作上の課題

2. 5. 1 溶接方法

(1) 溶接方法

一般に炭素鋼に適用している溶接方法は、殆どオーステナイト系ステンレス鋼にも適用できる。図－ 2. 17 に SUS304 に適用できる溶接方法を示す。このうち水門製作に適していると思われる溶接方法は、被覆アーク溶接（手動）、サブマージアーク溶接（自動）及び炭酸ガスアーク溶接（半自動、自動）の 3 種類である。



(注) 表中アンダーラインの溶接法は、SUS304に適用されている

図－ 2. 17 溶接方法

これらの溶接法の特徴を表-2.19に示す。

表-2.19 溶接方法比較

溶 接 法	長 所	短 所
被覆アーク溶接	・全姿勢の溶接ができる。 ・溶接作業の段取が簡単。 ・アーク部で風速10mm/sec ならば溶接可能。	・溶接品質が溶接工の技量に 左右される。 ・溶接入熱量が比較的低いので 鋭敏化の恐れはないが、 その分溶接能率が低い。
サブマージアーク溶接 (自動溶接)	・溶接品質が安定している。 ・アーク部で風速10mm/sec 以下ならば溶接可能。 ・溶接能率がよい。	・下向き溶接に限定される。 ・鋭敏化しない溶接条件と管 理が必要。
炭酸ガス溶接 (半自動溶接 自動溶接)	・全姿勢溶接ができる。 ・自動化が可能である。 ・溶込みが深く、特に自動溶 接は品質安定。 ・溶接能率がよい。	・風に弱いため、屋外作業は 防風対策が必要。 ・上向き溶接には特殊溶接電 源が必要。 ・鋭敏化しない溶接条件と管 理が必要。

溶接方法は、具体的に溶接継手形状や工作法の決定後に各溶接方法の特徴を考慮し、継手ごとに溶接施工方法と合わせて具体的に決定する。現時点において使用されている部材継手に対する適用溶接方法を大別すると表-2.20のようになる。

表-2.20 継手別溶接方法

継 手	適 用 溶 接 法
スキンプレート 横桁・縦桁 脚ウェブ／フランジ  板継 突合せ継手	長尺 サブマージアーク溶接 短尺 炭酸ガスアーク溶接
・横桁、縦桁、脚の ウェブ×フランジ ・横リブ、横桁、縦桁と スキンプレート 上記すみ肉継手	炭酸ガスアーク溶接 長尺：自動 短尺：半自動 特に狭隘部は被覆アーク溶接
脚×トラニオン	炭酸ガス半自動溶接 (一部被覆アーク溶接)
その他工場継手 現地溶接	被覆アーク溶接

(2) 溶接材料

SUS304 向けの溶接材料は、表-2. 21 に示すように SUS304 (表-2. 22) より Mn、Cr、Ni の含有量が 0.5 ~ 1 % 程度高い 308 系を用いる。SUS304 と炭素鋼との異材継手の場合には、溶接金属の合金成分 (Cr、Ni) が炭素鋼に希釈され低下するので、308 系では溶接金属が図-2. 18 に示すシェフラの組織図のマルテンサイト生成域に入り、割れ発生の恐れが生ずる。従って、この場合には炭素鋼に希釈された溶接金属が、シェフラの組織図で安全域内になるよう Ni、Cr の合金成分が 308 系溶接材料によりさらに約 3 % 程度高い 309 系溶接材料を用いる。

表-2. 21 溶着金属の化学成分及び機械的性質

種類	化 学 成 分 (%)									引 張 試 験		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	その他	引 張 強 度 kgf/mm ² (N/mm ²) 以上	伸び%	熱処理
D308	0.08以下	0.90以下	2.50以下	0.040以下	0.030以下	9.0~11.0	18.0~21.0	—	—	56 (549)	35	
D308L	0.04以下	0.90以下	2.50以下	0.040以下	0.030以下	9.0~12.0	18.0~21.0	—	—	52 (510)	35	
D309	0.15以下	0.90以下	2.50以下	0.040以下	0.030以下	12.0~14.0	22.0~25.0	—	—	56 (549)	30	
D309L	0.04以下	0.90以下	2.50以下	0.040以下	0.030以下	12.0~16.0	22.0~25.0	—	—	52 (510)	30	

表-2. 22 ステンレス鋼の化学成分

種類の記号	化 学 成 分 (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	その他
SUS 304	0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.040以下	0.030以下	8.00~10.00	18.00~20.00	—	—	—
SUS 304L	0.020以下	1.00以下	2.00以下	0.040以下	0.030以下	9.00~13.00	18.00~20.00	—	—	—

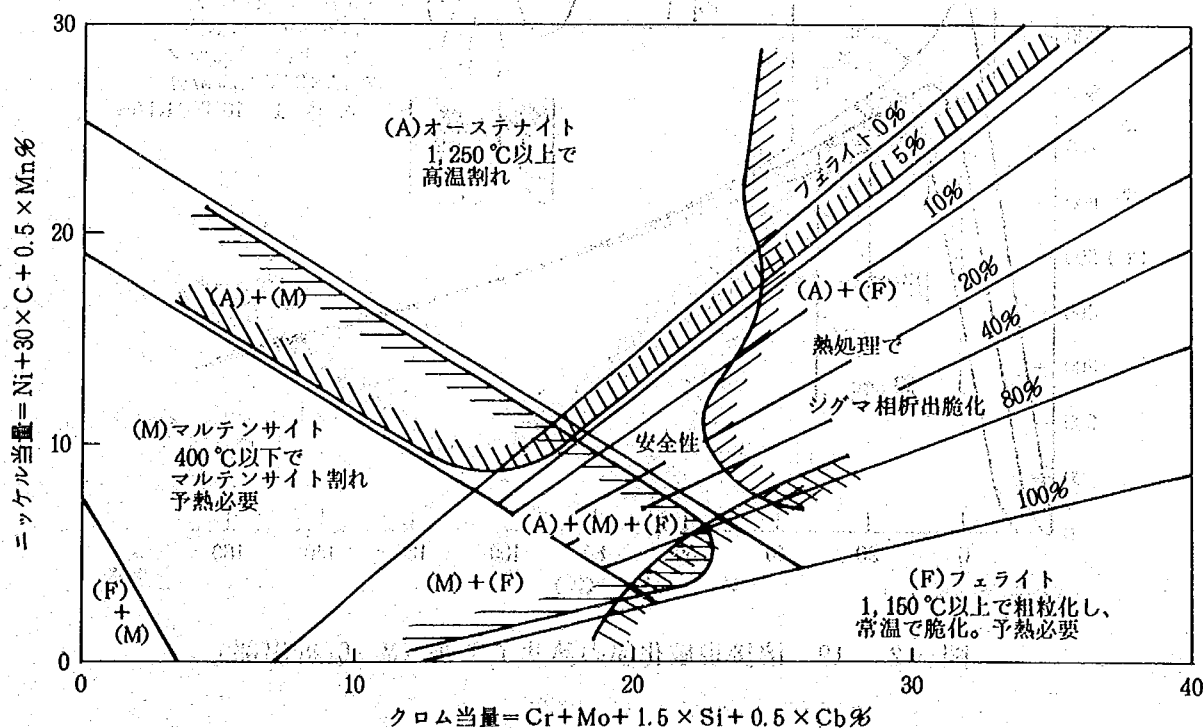


図-2. 18 シェフラの組織図

2. 5. 2 溶接上の注意事項

溶接上の注意事項は、まず溶接施工基準及び要領書を作成することであり、このための“溶接技術面”とこの基準通り施工するための“施工管理面”に分けられる。

(1) 溶接技術面

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接が炭素鋼の溶接に比べて大きく異なる点は、防錆と溶接歪みに関する事項である。これらを中心にして以下、注意事項をまとめた。

① 溶接条件

溶接ビード形状、内部欠陥の防止及び要求される継手強度を確保を満足することは勿論であるが、さらに溶接熱影響部が鋭敏化しない溶接条件を選定することが必要である。溶接入熱量が高すぎると冷却速度が遅くなり、溶接熱影響部にクロムカーバイトの析出が生じ、これに伴うクロム欠乏層（鋭敏化層）が生成される。ここで、溶接入熱量とは、

単位溶接長さ当たりの溶接部に加えられる熱エネルギー量で、

$$\text{溶接入熱量 } Q(\text{J/cm}) = \frac{\text{溶接電流}(\text{A}) \times \text{アーク電圧}(\text{V})}{\text{溶接速度}} \times 60$$

で表される。

このクロム欠乏層はクロム不在のため、浸透性錆の発生を防止する緻密組織の酸化クロム層（不動態化被膜）が生成されなくなり、孔食、粒界腐食の原因となる。

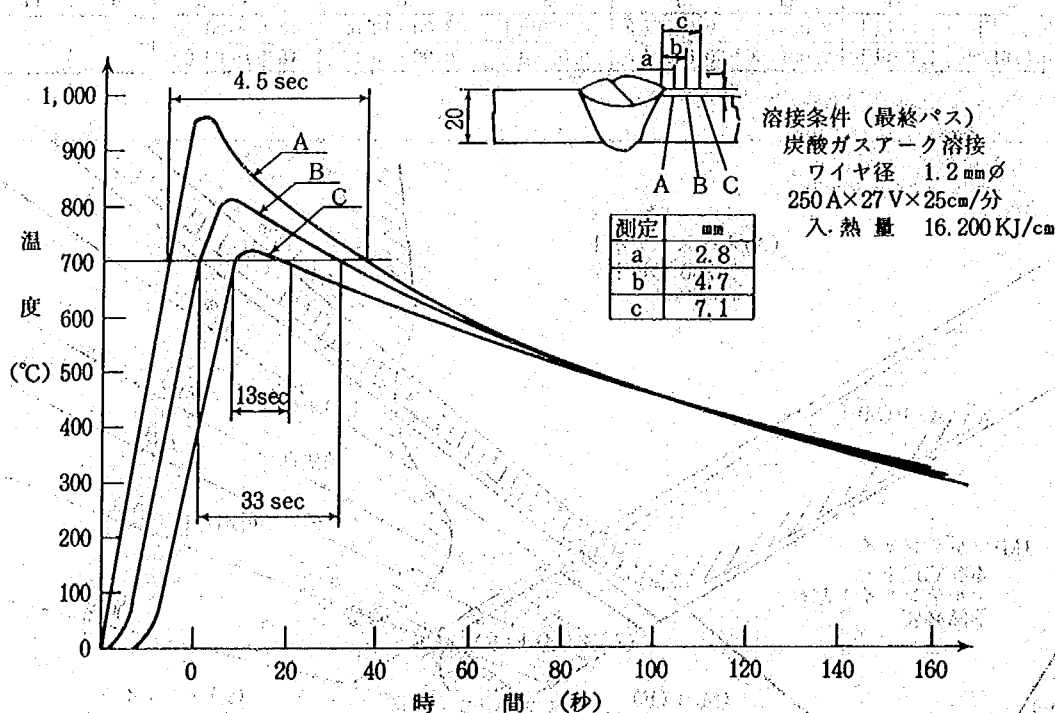


図-2, 19 溶接鋭敏化部の熱サイクル ($M_{23}C_6$ 析出部)

鋭敏化を形成しない溶接条件は公知の資料によりほぼ確認されているが、鋭敏化が懸念される溶接条件については、下記手順にて検証しておくことが安全である。まず、鋭敏化が問題となる溶接熱影響部の溶接熱サイクルを測定する。測定例を図-2. 19（炭酸ガスアーク溶接）に示す。

これらの図から鋭敏化温度における滞留時間を求め、図-2. 20に示す SUS304 鋼の T-T-S 線図にインプットし、鋭敏化範囲に入っていないことを確認する。上記の例の炭酸ガスアーク溶接（入熱量 16kJ/cm ）では、鋭敏化はされていない。但し、同一入熱量であっても板厚、部材の大きさによって溶接サイクルは異なるので注意が必要である。

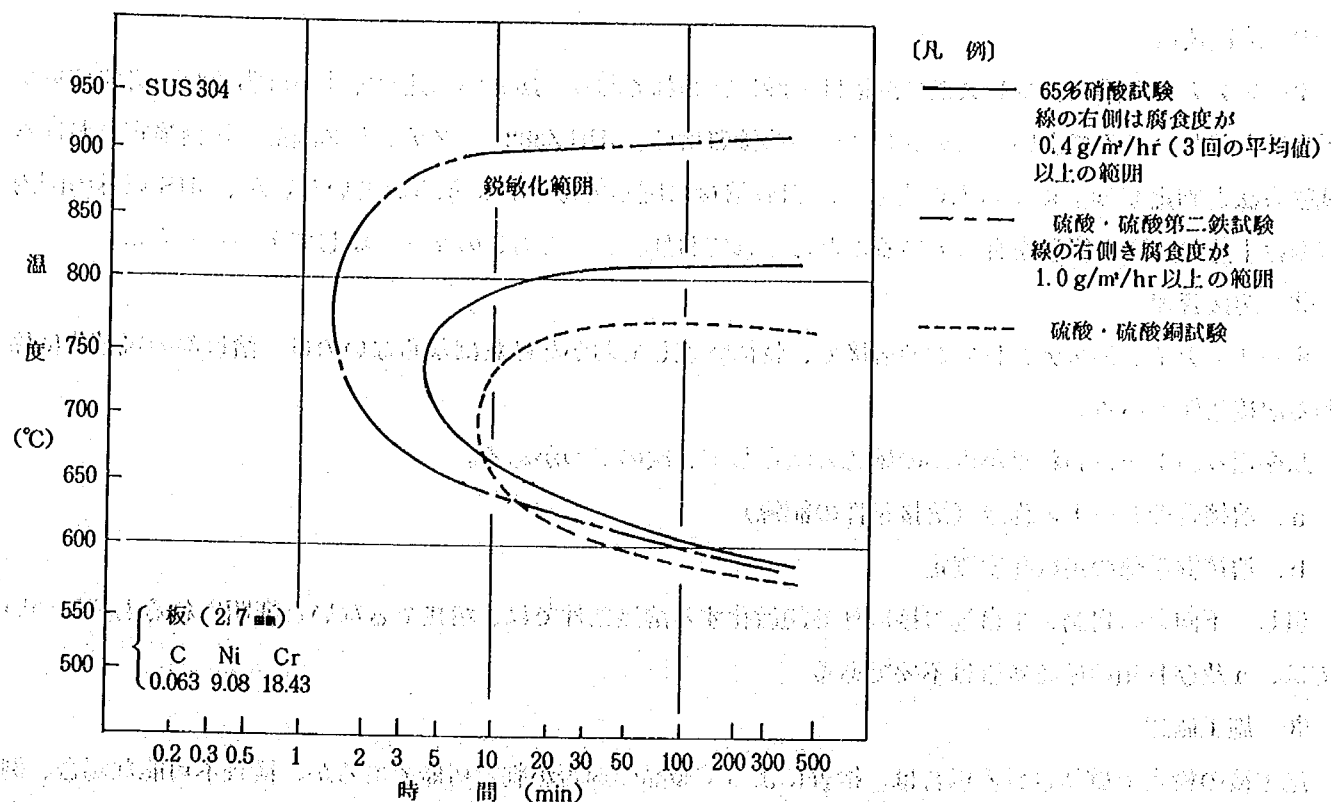


図-2. 20 SUS304の粒界腐食範囲(T-T-S図)

② 表面傷、溶接スパッタ

グラインダ等による鋼材表面傷、溶接スパッタは不動態被膜を破壊し、さらに、その傷内に塩素イオン (Cl^-) 等の腐食成分が濃縮しやすくなり、腐食発生の原因となる恐れがある。従って、下記項目について資料または試験によって確認し、基準化しておくことが必要であると考えられる。

③ 余盛り形状

溶接余盛り止端部は熱影響を受けており、また、その形状から腐食溶液の濃縮が生じやすい。従って、下向き溶接以外で、特に余盛り角度が大でビード波が著しいようなビード形状の場合には、止端部の平滑化仕上げが必要でこの基準化もしておくこととよい。また、洗浄効果のある構造部と腐食溶液が濃縮しやすい構造部とで、仕上げ基準に濃淡をつけておくことも実践的である。

④ 溶接歪み防止

オーステナイト系ステンレスは炭素鋼に比較して熱膨張係数が約 1.5 倍、熱伝導率が $\frac{1}{3}$ 、しかも縦弾性係数が若干ではあるが低いので、溶接熱による変形が大きい。

一方、発生した歪みの除去は炭素鋼のように簡単ではない。また、ガス切断が適用できないので、現場合せ切りや開先修正も簡単に行うことができない。従って、狭い開先化、拘束、あるいは溶接順序等によって、歪みの少ない溶接施工法の確立が必要である。また、継手ごとの溶接収縮量をあらかじめ把握し、継手別の部材伸ばし量を工作基準に反映しておくことが必要である。

(2) 施工管理面

① 溶接技量

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接は一般に行われており、炭素鋼に比べて能率は劣るが、必要技量レベルは大差ないとみてよい。ステンレス鋼の溶接資格は、JIS Z3821「ステンレス鋼溶接技術検定における試験方法と判定基準」によるものとする。自動溶接に関しては JIS に示されていないが、JIS 以外の国内基準は十分な知識と経験を有していることとされており、ここでもこの基準に準じてよいと考える。

② 溶接管理

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接で、特に管理しておかなければならないのは、溶接部の鋭敏化に係わる溶接条件である。

基準通り施工が行われたか否かの確認方法として、次の二つがある。

a. 溶接管理シートの作成（溶接条件の記録）

b. 溶接継手部の鋭敏化度測定

但し、下向きの自動、半自動溶接以外で鋭敏化する溶接条件では、溶接できないと証明されるものについては、a 及び b 項の確認処置は不要である。

③ 施工確認

施工後の検査で確認される場合は、検査によって製品の適否が判定可能であるが、検査不可能な場合、例えば溶接条件のような場合は特に作業員一人一人のモラルに負うことが大である。従って、モラルと責任体制を明確にするため、作業員及び監督者により記名又は捺印制度が有効である。この制度の例を次頁以降に添付するが、これにグラインダ仕上げ処理、スパッタ処理の確認を追加しておけば、施工管理はより充実される。

2. 5. 3 熱影響部の鋭敏化緩和方

オーステナイト系ステンレス鋼の鋭敏化は、溶接、熱間歪み取り等のため、鋭敏化温度領域内でステンレス鋼を保持することにより鋼材中のクロムと炭素が結合し、クロムカーバイドを結晶粒界に析出するために生ずる。この関係は前に示した SUS304 鋼の T-T-S 線図（図-2、20 参照）で示される。従って、溶接入熱量を制限し、溶接部の冷却温度を高めることによってクロムカーバイドの析出を阻止することが、最も有効な手段である。クロムカーバイドの析出を阻止する溶接入熱量として、実験では 5 mm 板厚で 15kJ/cm 以下、20mm 厚で 33kJ/cm 以下であるとの結果を得ている。従って、上記実験結果を目安とし

て溶接条件を選定すれば、実害となる鋭敏化と防止できると思われる。特に、板表面層近傍の仕上げ層溶接は、熱量を小さくして行うことが重要である。

次に、鋭敏化してしまった溶接継手の救済策としては、鋭敏化した熱影響部をティグ溶接で処理し、急冷熱サイクルを与えてやる方法が、実験結果から有効的であるとの提案がなされている。この他に、溶接部の裏面または近傍に冷し金または吸熱剤を密着させ溶接部を急冷させる緩和法もあるが、大型厚板構造物では補完的な対策にすぎないと思われる。

2. 5. 4 検査方法について

(1) 溶接部の欠陥

溶接部の欠陥に係わる検査としては、一般的検査、外観的検査及び内部検査に分けられる。

① 一般的検査

a. 材料検査：使用する溶接材料及び適用が基準書通りであることを検査する。また、使用前に基準書通りの乾燥がなされているかについて確認する。

b. 作業環境：雨天下で作業していないか、特に炭酸ガスアーク溶接の場合、強風下で溶接していないかを確認する。

c. 溶接作業者：溶接作業者の資格、技量レベル等について確認する。

d. 溶接条件：特に下向き突合せ溶接は大入熱溶接ができるので、鋭敏化から規制される溶接入熱量範囲内で施工しているかを確認する。

② 外観検査

a. 溶接開先検査：溶接開先形状は適正か、水分、油脂等有害物は除去、清掃されているかを確認する。

b. 仮付溶接：仮付溶接は組立精度を保持できるか、スラグ除去がなされ、割れ等の欠陥はないかを確認する。

c. 本溶接：アングカット、オーバーラップ、余盛り形状は継手の機械的性質のみでなく腐食要因でもあるので基準化し、これに基づき目視または寸法検査を行う。

d. 寸法検査：オーステナイト系ステンレス鋼は炭素鋼材に比べて溶接歪み量が大きく、かつその修正が炭素鋼ほど容易ではない。従って、正規寸法通り仕上がっているかについて常に全工程で確認・修正する体制が必要であり、各工程ごとの寸法検査は重要である。

e. 表面欠陥検査：通常炭素鋼に適用されている検査法のうち、磁気探傷検査はオーステナイト系ステンレス鋼が非磁性体であるので適用できない。従って、微細な表面割れやピット等表面欠陥を探傷する方法は浸透探傷検査が適用される。この探傷法の原理は探傷面に赤色の浸透液を塗布、表面傷があれば傷内に浸透する。十分浸透した後、表面を洗浄液で拭き取り、現像液を吹き付けて傷内の浸透液を吸い出して欠陥を検出する。表面傷がなければ、浸透液は洗浄液で拭き取られ欠陥模様を呈しない。

浸透探傷検査法の試験方法及び等級分類要領は、JIS Z2343「浸透探傷試験方法及び欠陥指示模様の等級分類」に規定されている。

③ 内部欠陥検査：内部欠陥検査法としては、放射線透過検査法と超音波探傷検査法とがあるが、後者の検査法は後述するように、オーステナイト系合金に適用する場合には検出限界があり、適用にあたってはこの限界を解明し、あらかじめ判定のトラブル対策を確立しておく必要がある。

a. 放射線透過検査法：放射線透過検査は探傷部に X 線又は γ 線を放射し、探傷部材反対面にセットした写真フィルムに探傷内部の欠陥を投影写真して、欠陥の有無、大きさを検出する方法である。

ステンレス鋼は炭素鋼に比べて放射線の透過度が劣るので、撮影時間が長くなる等の問題はあるが、基本的には炭素鋼と同様に適用可能である。

適用する JIS は、JIS Z3106「ステンレス鋼の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類法」である。

b. 超音波探傷検査：超音波探傷検査は、メガヘルツ級周波数の超音波を探傷部に入射させ、欠陥部からの反射エコーの位置、強弱をオシロスコープのブラウン管に投影させて欠陥の位置と大きさを探知する。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部の場合には、溶接金属の結晶粒界及び融合部で入射波が乱反射され、欠陥エコーと判別が困難となる問題がある。現在、この解決への研究も進められているが、現状ではブローホール、小さいスラグ巻込み等の球状欠陥は判別が難しく、平面状欠陥が識別できる程度である。また、適用に際しては欠陥の標準試験片を作成し、これと探傷部の反射エコーを比較しながら欠陥判別を行う必要がある。以上のような状況であるので、ステンレス鋼に対する超音波探傷法は JIS に制定されていない。

以上述べたように、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手に対する非破壊検査法は、外部欠陥探傷法として浸透探傷検査、内部欠陥探傷法として放射線透過試験法を適用し、超音波探傷法を適用するならば補助的手段に留める。

(2) 熱影響部の鋭敏化

溶接熱影響部の鋭敏化は、溶接条件設定時に試験片にて事前に確認しておき、鋭敏化しない条件を施工標準として基準化しておくべきである。この確認方法としては、現在、原子力関係で実用化され、JIS G 0580「ステンレス鋼の電気化学的再活性化率の測定方法」に基づくポータブル型鋭敏化度測定装置である EPR テスタ（DOS テスタの名称で販売されている）で確認することは可能である。

2.5.5 残留応力とその除去

① 静的強度による応力除去の必要性

オーステナイト系ステンレスは伸び性質が優れていることから、残留応力が静的強度に及ぼす影響は殆ど無視できるとされている。すなわち、残留応力が存在していても、残留応力と外力との和が耐力を超えた部分から順に微小変形し、応力が解放されるからである。これは伸び特性の優れている材料、降伏点を有する材料が有している“材料の自己救済”といわれているものである。

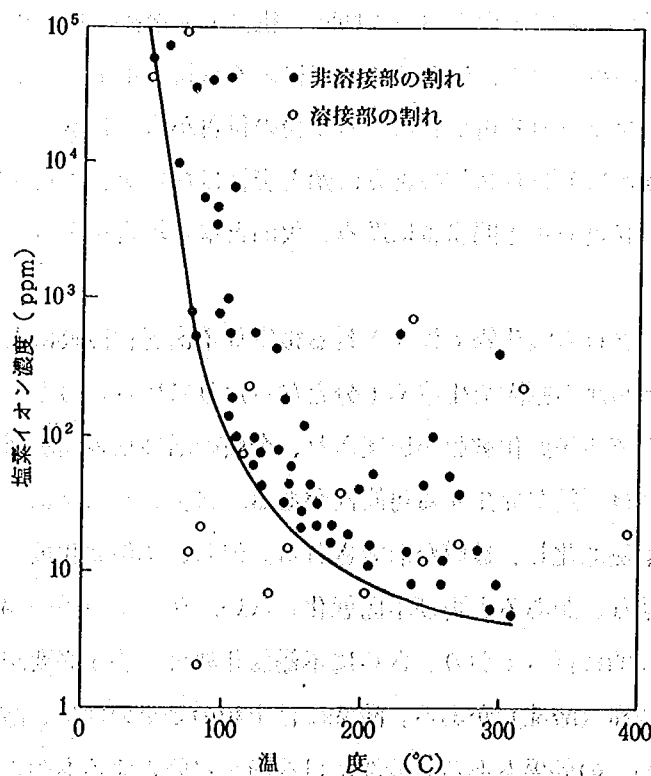
② 低温靱性に対する応力除去の必要性

脆性破壊は伸びを伴わない破壊なので、前項の変形による応力解放は期待できない。従って、炭素鋼の場合は残留応力の約 60 % を破壊力学の計算値に反映させているが、オーステナイト系ステンレス鋼の場合には低温靱性が優れており、かつ使用温度における不安定破壊は考えられないので、脆性破壊に対する残留応力の影響は考慮する必要がない。

③ 応力腐食割れに対する必要性

前項までに述べたように、オーステナイト系ステンレス鋼の残留応力除去の目的は機械的性質改善のためでなく、応力腐食割れ防止が主目的である。しかし、応力腐食割れは図-2、21 に示すように塩素イオンと高温環境が必要であり、特に 75℃ 以上の温度が支配的であるとされている。また、塩素イオンの代わりに NaOH、KOH 溶液も割れの原因となるが、いずれにしても高温環境が必要である。

従って、水門施設のように常温で使用し、かつ淡水の場合には応力腐食割れの恐れはないと考えられる。逆に、水門施設のように厚板の大型構造物を応力除去焼なまし（SUS304 鋼は 900℃ 加熱）すれば、形状保持が実際上不可能であり、かつ鋭敏化され粒界腐食の原因となるので、かえって望ましいことではないと思われる。



18-8 オーステナイト・ステンレス鋼の熱交換器および冷却管の応力腐食割れに及ぼすプロセス流体温度と冷却水中の塩素イオン温度の影響（曲線は非溶接部の応力腐食割れの起きる下限）

図-2、21 応力腐食割れに及ぼすCl⁻と温度との関係

2. 6 据付上の課題

2. 6. 1 一般事項

水門扉の組立てに際しては、各部寸法が設計寸法通りに組立てられないと、完成後の開閉や水密性が不完全となりやすい。特に水門扉の機能、美観等の優劣はこの据付段階で決定されるといっても過言ではない。扉体、戸当り、放流管、開閉器は一般に製作工場において仮組立てを行い、各部寸法を調節し、また、変形を修正し設計通りとし、寸法実測表を作成し、合マークを付けた後、解体荷造りをして現場に送られる。水門設置場所は、一般に輸送条件の悪い所にあるものが多く、輸送、荷受け時の変形、破損を防止するような輸送配慮が必要である。輸送ブロックは輸送条件やダムサイトでの据付重機の容量を考慮して、できる限り大ブロックにして送ることが望ましい。現場では工場仮組立ての寸法実測表や所定の据付容量に従って順序よく組立てることになる。ステンレス鋼固有の据付上の技術的問題点としては、前項の製作上の問題点で述べたように、溶接、検査及び残留応力と応力除去の3点が挙げられるのみであり、工場製作と同一の施工管理を行うことで新たな技術的問題点はないように思われる。

2. 6. 2 現場加工後の不働態化処理

(1) もらい錆

ステンレス製構造物は加工～組立て工程において切断、組立て、溶接、切削及び研磨などにより、表面が傷ついたり汚れたりする。この汚れの中にはグラインダによる鉄粉の飛来、炭素鋼製工具、治具との接触、炭素鋼用グラインダやワイヤブラシの共用などによる鉄粉の付着が含まれる。この鉄粉が腐食すると「もらい錆」となる。もらい錆自体はステンレス鋼の腐食に殆ど影響はないが、腐食環境下（例えば海水中や海塩粒子が付着する場合）では、孔食やすき間腐食に進み、欠陥となる場合がある。

(2) 不働態化処理

ステンレス鋼の耐食性は、クロム酸化物で構成される緻密な不働態化被膜により表面が保護されるためであり、この不働態化被膜が何らかの原因で生成不十分となったり破壊されると、ステンレス鋼でありながら耐食性は低下する。外的要因で不働態化被膜が破壊され、金属の活性な表面が露出し、汚染により十分な酸素との接触を阻害される場合は、錆が発生する可能性がある。ステンレス鋼は、通常大気中では不働態化被膜が一度破壊されても再び不働態化し、被膜が形成される。但し、不働態化被膜破壊後の金属表面に、汚れや鉄粉の付着によるもらい錆などがあると再び不働態化しない。ゲート設備の場合、上記のような汚れやもらい錆を取り除くことを積極的に行っており、さらに不働態化処理を施す必要がある。汚れやもらい錆を取り除く方法として、化学的洗浄（酸洗）がある。酸洗には上記の効果の他に、溶接による焼けを取り除き表面を清潔にするといった美観上の効果もある。酸洗には洗浄を目的とするものと、不働態化処理を目的とするものの2種類がある。しかし、酸洗方法は特別な処理設備が必要なため、専門工場では処理できるが、据付現場では環境上の問題から処理が困難な場合もある。ステンレス鋼を用いた構造製品の表面処理、即ち汚れの洗浄化とその面の不働態化を簡便に処理できる方法（電解研磨法の一つ）が開発された。この方法は、安全で無害な薬品を用いており、電極装置により、いかなる場所でも容易に処理できる方法である。

2. 7 メンテナンス

普通鋼材を使用したゲート設備の主なメンテナンスは、次のものが挙げられる。

1. 定期運転による各機器のチェック（消耗品の補充及び交換）
2. 定期的な腐食調査と補修（付着物、堆積物の除去を含む）
3. 定期的な塗装替え（腐食防止）

オールステンレス鋼を使用したゲート設備のメンテナンスは、上記3項のうち「3」については行わなくてよいが、「1」及び「2」については普通鋼材と同様のメンテナンスが必要である。

2. 7. 1 ステンレス鋼を用いた既設設備

既設のゲート設備で、部分的ではあるがステンレス鋼を用いた設備があり、それらのメンテナンス上発生した問題について以下に述べる。

(1) ジェットフローゲート（JFG）と放流管の継目付近の腐食

JFGと放流管の継目付近（JFG側はSUS、放流管側はSS）で放流管側に局所的な腐食が発生した。原因はSUSとSSの接触腐食であると考えられる。対応策として溶接補修し、塗装をSSだけではなく、SS付近のSUSにも施した。

(2) 高圧ラジアルゲート、スキンプレート継目の腐食

高圧ラジアルゲート、スキンプレート表面（ステンレスクラッド鋼使用）の工場溶接継目に発錆した。原因は、工場溶接時、表面の溶接が不完全（ピンホール）であったため、長年の浸水によりSUSとSSとの間に電位差腐食による錆が発生した。本設備は製作時期がステンレスクラッド鋼を使い始めた初期の製品であり、その当時は現在のようなステンレスクラッド鋼の溶接施工方法が確立していなかった。従って現在では上記のような問題は発生しない。

(3) 高圧ゲート放流管内の腐食

① 20年前より、いくつかの設備で発生している問題である。上流側予備ゲート戸当り（SUS）と下流側高圧ゲート（SUS）との間にはさまれたSSの放流管のSUS使用部に近い部分に孔食が発生した。原因は放流管（面積大）との電位差腐食である。SSとSUSの面積比が大きいため、腐食は深く進行する。現在では塗装を完全にする以外解決策はないが、湿度100%下の塗装替えでは完全塗装が難しく、部分的に補修している根本的な解決策には至っていない。

② 放流管のSUS部とSS部の継目の塗装切れ目から、水が浸透、腐食が発生した。原因はSUSとSSの境界を塗装の切れ目としたためである。よってSUS部分も塗装（境界から50mm程度）し、浸水を防止した。

(4) 高圧ラジアルゲート水密ゴム押え板用座金（BsP）の割れ

座金（BsP）と押え板（SUS）座（SS又はSUS）との複合電位差腐食により座金が腐食し、割れに至った。

2. 7. 2 オールステンレス製ゲート

2. 7. 1 項で挙げたメンテナンス上の問題は、オールステンレス製ゲートとすることで発錆しないと考えられる。但し、これは設計、製作、据付においてステンレス鋼の特性を考慮した使い方をした場合という条件付きである。

(1) 設計段階の問題

ステンレス鋼を扉体、戸当り、放流管の部材全てに使用することで、再塗装、補修塗りの配慮が必要である。また、ローラレール、主ローラは、ステンレス鋼の中でもマルテンサイト系を使用する場合がある。

(高強度を要求される部材のため。)しかし、マルテンサイト系はオーステナイト系に比べ耐食性が劣るため、オーステナイト系を使用する場合より、使用環境が限定される。従って、設計計画段階において十分な環境(水質)調査を行い、使用材質を決定する必要がある。さらに、ステンレス鋼特有の発錆形態である孔食、すき間腐食の起こりにくい構造とする設計上の配慮も必要である。

(2) 製作据付段階の問題

(1)でも述べたように、ステンレス鋼は溶接時の歪みと伸びが普通鋼より大きい。従って、普通鋼とは別にステンレス鋼独自の施工管理規準が必要である。また、製作中、据付中には、鉄粉の付着、スパッタ、汚れなどが避けられない。それらが原因で、もらい錆、孔食、すき間腐食が発生する可能性がある。これら腐食発生の原因を除去するには、クライングやバフ等で研磨した後、酸洗や電解研磨などで不働態化処理することが必要である。

(3) 併用段階の問題

再塗装、補修塗りは必要ないが、錆が100%発生しないとはいえない。従って、オールステンレスとしても、孔食発生の有無の確認や腐食の原因となる付着物、堆積物の除去等の、定期的な点検作業が必要である。(ステンレス鋼特有の腐食である孔食は、普通鋼の全面腐食と比べ物にならないほど短時間に進行し、漏水の原因となり、場合によっては破壊にも至る。従って、たとえ小さく浅い腐食といえども、発見した場合は早急な補修が必要である。)

2. 8 施工例の現地調査

2. 8. 1 調査概要

調査を行った樋門は、河口付近に昭和49年から58年度にわたり建設した、流域内排水及び防潮を目的とした樋門である。本ゲート設備は、中央水門、観音扉、招き扉、通舟用の閘門扉及び非常用門扉から構成されており、扉体には全てステンレス鋼材が使用されている。今回の調査対象である中央水門は一期工事で製作され、昭和55年に現地据付が行われている。本ゲートは二段式のシェル構造ローラゲートであり、上下段扉は両端部でピン結合されている。主要材質はオーステナイト系ステンレスのSUS304であり、シープ及びローラは形状的な理由からSUS304と同程度のNi、Crを含有するSCS13(ステンレス鋼鑄鋼品)が使用されている。但し、シープ軸については強度上の理由から、マルテンサイト系のSUS403が使用されている。また、ボルト類については異材質を使用することにより締付けに伴う焼付けを防止している。具体的にはボルト、ナットの組合せではナットを、また埋込みボルトではボルトにSUS403を使用している。

2. 8. 2 調査内容

調査は、以下に示す 5 項目について行った。

(1) 外観目視調査

錆の発生状況、錆の程度、海中生物の付着状況等につき、海側及び河側から全般的な目視調査を行う。また、目視調査の結果、孔食が存在すれば触針式ディプスゲージにより孔食の深さを、ノギスにより孔食径を測定する。

(2) 板厚測定

中央水門のスキンプレート及び背面板の数点につき超音波板厚計を用いて測定する。

(3) 錆発生率の測定

スキンプレート部を写真撮影し、その発錆率を（社）日本鋼構造協会のさび評価点に準拠し錆発生率の評価を行う。

(4) 熱影響部の鋭敏化

JIS G0580「ステンレス鋼の電気化学的再活性率の測定方法」により熱影響部の鋭敏化度を測定する。測定装置は IHI 社製鋭敏化度測定器（S-56 型）DOS テスターを使用した。

(5) 水質調査

中央水門の上流側（河側）と下流側（海側）の水を採取し JIS K0101 に従って化学分析を行い、塩素イオン濃度、PH、電気伝導率を測定する。なお、水の採取は潮位の影響を考慮し満潮時と干潮時に各々行うものとする。

2. 8. 3 調査結果

(1) 外観目視調査

① 全体的な発錆状況

海水環境で使用されている SUS304 製防潮ゲートとしては、全体的な発錆状況は軽微であった。扉体には全体的に斑紋状の薄い錆が発生しており、特に海側潮位干潮部では、他に比べ赤っぽくなっているのが確認できたが、この部分の錆はサンドペーパー等で研磨すれば除去できる程度のものであった。河側は海側に比べ、扉体構造が複雑であり、発錆状況も海側より進んでいた。特に上下段扉連結部から下段扉シェル上面板付近は、扉体構造的に雨水による洗浄効果が期待し難いこと、耐食性が劣るステンレス鋼が部分的に使用されていること等の理由により、明らかな発錆状況が確認できた。

② 中央水門海側の状況

a. 全般

海側はスキンプレート面で、構造的に単純であったため雨水などの洗浄効果もあり、ステンレス鋼表面に斑紋状の薄い錆が発生している程度であった。潮位干満部は空中部に比べ発錆の程度が高く、赤っぽく見えるが錆自体は薄いものであった。また、海中生物の付着状況から判断して通常は没水していると考えられる部分は、殆ど発錆はなかった。

b. 海水生物の付着

海中生物（フジツボやカキなど）は上下段扉連結部位置より下のコンクリートピアには一面に付着していた。この影響で扉体の両端部には生物付着がみられたが、扉体中央付近には殆ど付着していなかった。但し、桁の溶接部の背面など加熱を受けている部分については、選択的に生物付着が生じていた。海中生物をスクレーパで除去したところ、付着部の外周に沿って赤い発錆がみられるが、その内部には発錆はなく孔食等も生じていなかった。

c. 構造・材質的な問題

海側はスキンプレート面であり構造的な問題は少ない。上下段扉連結部の水密ゴム押え板とボルトのすき間にも発錆はなかった。但し、ゲート端部の防塵ゴム取付板と水密ゴム取付板との重ね合せ部には若干の発錆が見られた。

海側は、中央水門下流側に軟鋼製の予備ゲート用戸溝があるため、ステンレス鋼と軟鋼との耐食性比較ができた。軟鋼製戸溝部は塗装は殆ど剝げ落ち、コブ状の錆が生じていたのに比べ、ステンレス鋼の耐食性が確認できた。スキンプレート溶接は全て工場における自動溶接であり綺麗なビード形状であったが、鉛直ビードはビードの両縁、水平ビードは上縁に沿って発錆している箇所が認められた。

d. 施工・美観上の問題

ステンレス製ゲートは塗装を行わないため、鋼板の取り扱い跡が美観上の問題として生じてくる。ミルメーカからの鋼板出荷時の傷手入れ跡、加工時のグライнда研磨跡や、扉体組立て用吊りピース切除跡、線状加熱などの歪み取り跡などが美観上目立った。グライнда処理は処理表面状態が粗いと発錆原因となるようである。また、溶接時のスパッタ飛散らしき跡が1ヶ所あったが、凸部になっているため選択的に腐食していた。

③ 中央水門河側の状況

a. 全般

河側はゲート構造的に凹凸があり、また耐食性についてはオーステナイト系のSUS304より劣るマルテンサイト系ステンレス鋼のSUS403が使用されている箇所もあるため、そのような部分の発錆の程度は海側より進んでいる。特に上段扉シェル下面板から下段扉シェル上面板にかけては構造上雨水による洗浄が期待できず、熱影響部を中心に発錆が多く、また上下段扉連絡部水密ゴム取付けナットにSUS403を使用しているため、ナットの発錆が原因と思われるもらい錆がみられた。

b. 構造・材質的な問題

構造的には、前述のように雨水による洗浄効果が期待できない箇所に発錆が多い。また、横桁ブランジ下端のように水分が溜る箇所も錆が多い。すき間腐食として上段扉シーブ部のワイヤロープ外れ止め丸鋼用ダブリングと本体とのすき間部を観察したが、常時空中部でもあり発錆はなかった。また、側部ゴム取付け板上部にゴミが堆積していたため、塩素イオン濃縮による発錆を予想し、これを除去して観察したが錆は認められなかった。材質についてはマルテンサイト系ステンレス鋼SUS403を使用している箇所に発錆がある。上段扉シーブ軸のように常時空中部分は部分的な発錆にとどまっているが、上・下段扉間水密ゴム止めナットは下段扉上面板のもらい錆の供給源となっている。

c. 施工・美観上の問題

海側と同様、グラインダの研磨跡などが美観上の問題として生じている。また、上段扉主桁ボックス下面にあった引っかき傷のような凹部も、そこだけが発錆していた。

下段扉上面板付近の発錆部状況について詳細に調査したところ、

①発錆は熱影響に多い

②溶接ビード部ではビード上縁沿いに濃い発錆がみられる

③溶接ビード部をサンドペーパーで研磨したところビード形状に、凹凸がある部分に濃い発錆がみられる等が観察された。

(2) 板厚測定

板厚測定は、川鉄計量器(株)製の超音波厚さ計 TI-7 S 型 (測定誤差 $\pm 0.1\text{mm}$) を用い、オーステナイト系ステンレス鋼製の標準片を使用して測定器の調査を行った後、図-2.22 に示した箇所について板厚測定を行った。測定結果を設計板厚を比較したものを表-2.23 に示す。

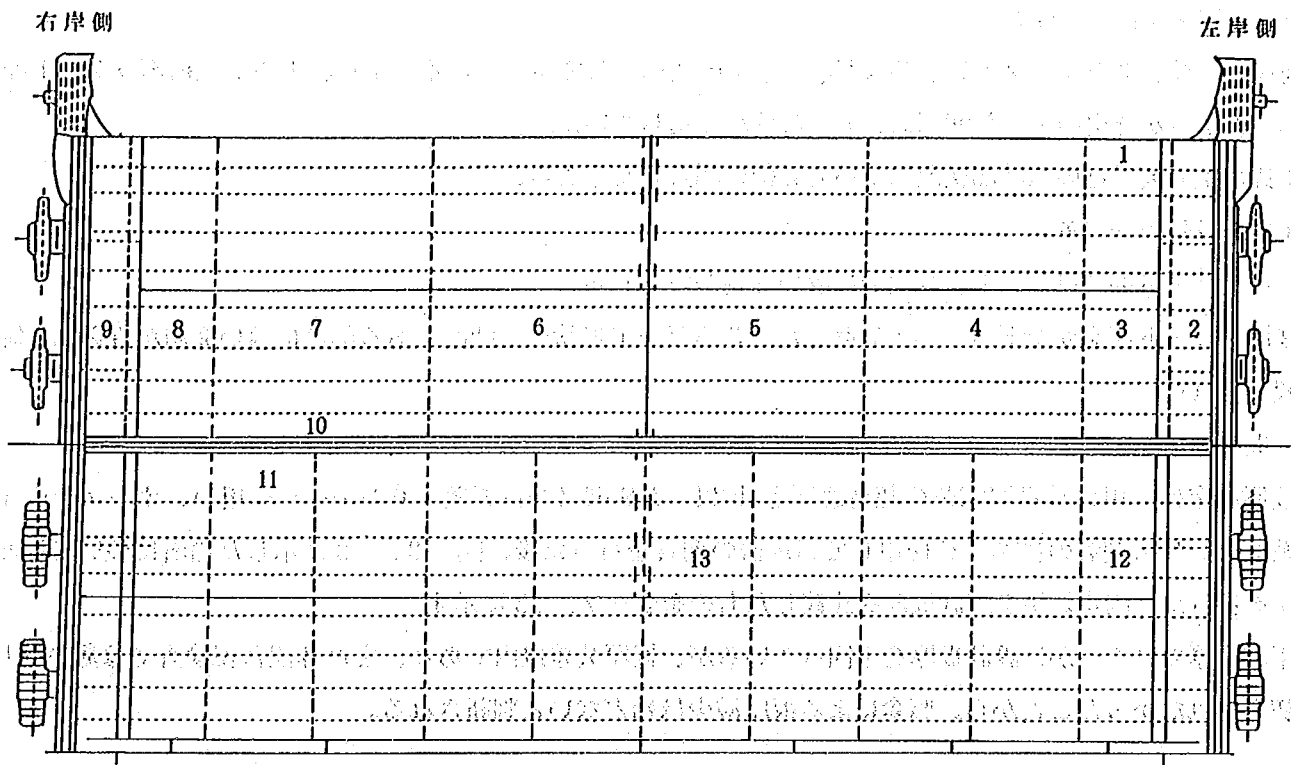
平均板厚のいくつかは設計板厚を下回っているが、板厚公差以内であり、また外観目視検査では薄い錆しか認められなかったことから、腐食による板厚減少は殆どないと判断される。

表-2.23 板厚測定結果

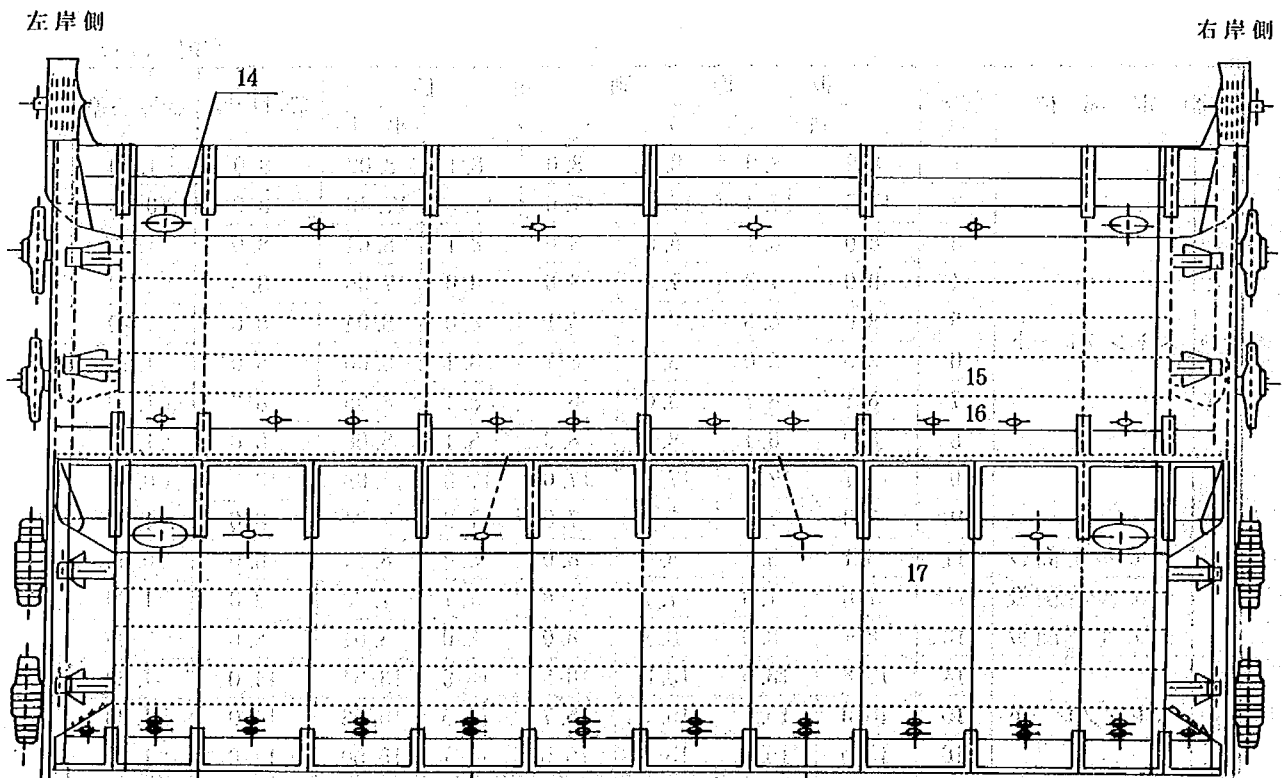
(単位: mm)

測定部位		測定位置番号	板 厚 測 定 値					設計板厚	板厚公差	
			測 定 デ ー タ							平 均
上 段 扉	スキンプレート	1	8.0	8.0	8.0	8.0	8.1	8.02	8.0	±1.20
		2	17.5	17.4	17.4	17.5	17.5	17.46	18.0	±0.08
		3	8.0	8.1	8.0	8.0	8.1	8.04	8.0	±1.20
		4	8.0	7.9	7.9	8.0	8.0	7.96	8.0	±1.20
		5	8.0	8.0	8.1	8.1	8.0	8.04	8.0	±1.20
		6	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.06	8.0	±1.20
		7	8.1	8.1	8.0	8.1	8.1	8.08	8.0	±1.20
		8	8.0	8.1	8.1	8.0	8.1	8.06	8.0	±1.20
		9	17.7	17.7	17.6	17.6	17.8	17.68	18.0	±0.80
		10	7.8	7.8	7.9	7.9	7.8	7.84	8.0	±1.20
下 段 扉	シェル上面板	11	8.1	8.1	8.0	8.0	8.0	8.04	8.0	±0.65
	シェル背面板	12	7.8	7.8	7.7	7.8	7.7	7.76	8.0	±1.20
	シェル下面板	13	8.1	8.0	8.1	8.0	8.0	8.04	8.0	±0.65
	スキンプレート	14	13.8	13.9	13.8	13.8	13.9	13.84	14.0	±1.20
15		15.3	15.7	15.7	15.7	15.5	15.58	14.0	±1.20	
16		15.5	15.5	15.3	15.5	15.7	15.50	14.0	±1.20	
	シェル背面板	17	15.6	15.5	15.5	15.5	15.6	15.54	16.0	±1.30

但し、板厚公差については工場溶接継手位置より板の圧延幅を想定し JIS G4304 表20 (記号 A) を適用した。



正面图 (海側)



背面图 (河側)

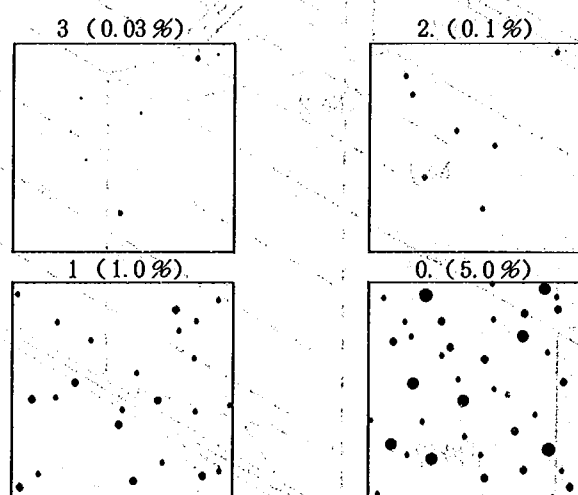
图-2.22 板厚測定箇所

(3) 錆発生率の測定

スキンプレート部を写真撮影し、その時発錆率を（社）日本鋼構造協会のさび評価点（表－2. 24、図－2. 23）に準拠してみた結果を表－2. 25に示す。海側では、常時空中部が3程度、潮位干満部分が2程度であり、河側では常時空中部が2程度であった。海側に比べて河側がやや発錆率が高くなっているのがわかった。

表－2. 24 さび評価点

評価点 (PN)	発 生 状 態	
	発生面積	外 観 状 態
3	0 ～0.03 %	異常なし。 誰が見ても外観的にはさびが認められないか、さびらしきものがあっても無視し得る程度のもの。
2	0.03～0.3 %	僅かにさびが見られる。 さびが観察される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると思われる状態。
1	0.3 ～5.0 %	明らかにさびが見られる。 誰が見ても発錆部分が多く、何んらかの処置をほどこななければならない状態。
	>5.0 %	見かけ上ほぼ全面にわたってさびが見られる。早急に塗料を塗り直さなければならない状態。



この限度見本は、基本的にASTMD610/SSPC-Vis 2に準拠したが、現場での評価を容易にするため、本調査指針用としてASTM写真をアレンジして調整し、評価値を示したものである。

図－2. 23 さび標準図（ASTMD610/SSPC-Vis2引用）

表－2. 25 さび評価点法によるスキンプレートの発錆率

位 置	海 側	河 側
常 時 空 中 部	3	2
潮 位 干 満 部	2	—

(4) 熱影響部の鋭敏化

下段扉シェル上面付近の表-2. 26、図-2. 24に示す箇所を鋭敏化測定対象部位とし、測定箇所をサンドペーパーで鏡面仕上げした後、DOS テスターを用いて鋭敏化度を測定した。結果を表-2. 27に示す。

表-2. 26 鋭敏化測定箇所

No.	測定箇所	備考
No. 1	ジェル上面板	熱影響を受けていない部分
No. 2	上面板溶接継手近傍	溶接ビード端から15mm
No. 3	縦桁フランジ	隅肉溶接裏側
No. 4	上部水平桁フランジ	溶接ビード端から20mm

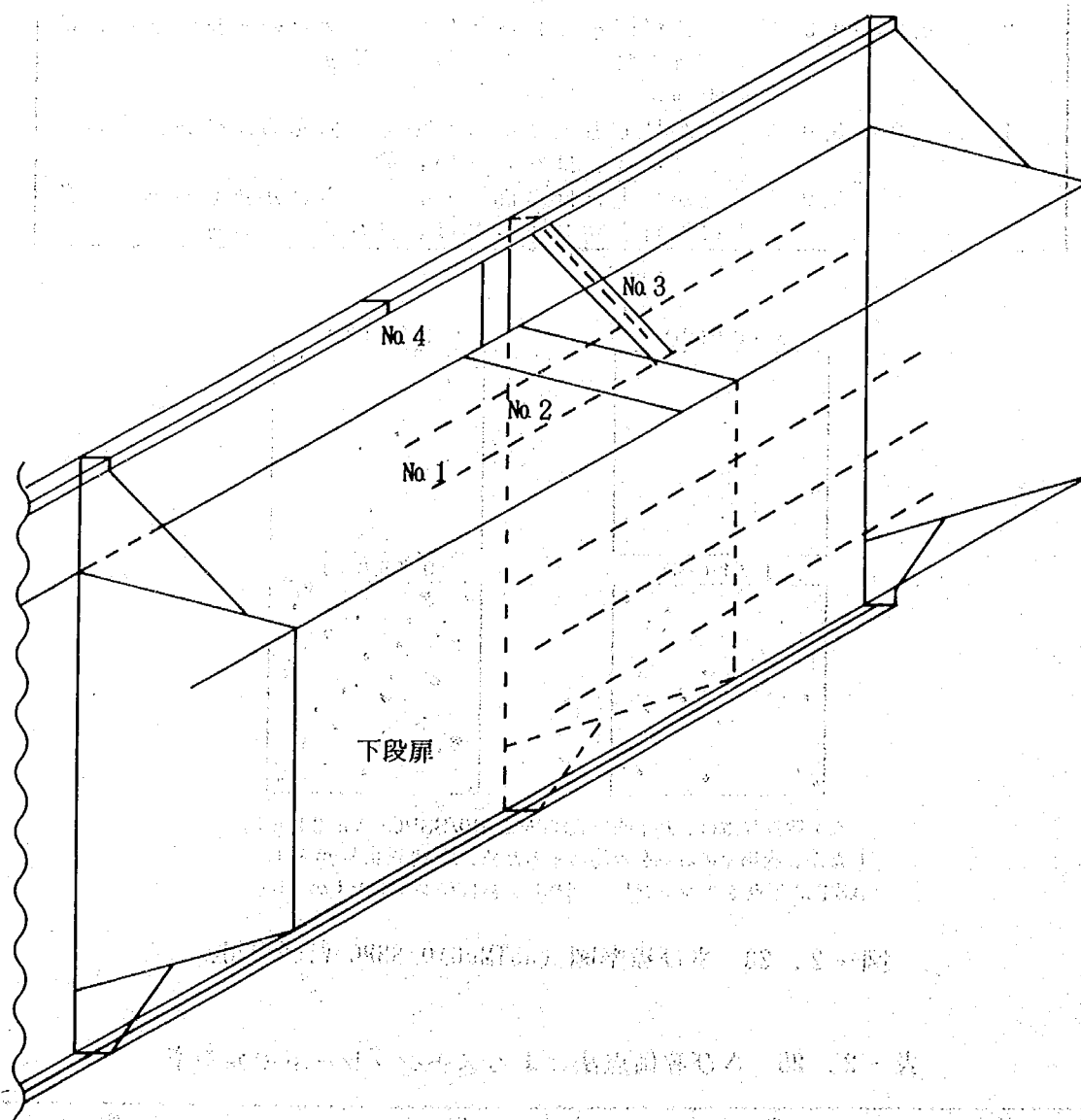


図-2. 24 鋭敏化度測定箇所

表-2. 27 鋭敏化測定結果

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
温 度 T (°C)	18	18	14	14
自 然 電 位 EC(V)	- 0.429	- 0.385	- 0.409	- 0.350
アノード分極極大電流値 IA(mA)	+44.46	+22.90	+35.82	+40.94
不働態保持電流値 Io(mA)	+ 0.16	+ 0.02	+ 0.02	+ 0.04
I _o / I _A	0.003	0.000	0.000	0.000
逆掃引極大電流値 IR(mA)	+ 0.14	+ 0.02	+ 0.06	+ 0.04
鋭 敏 化 度 IR(IA)	0.3%	0%	0.1%	0%

SUS304 の場合、鋭敏化され粒界腐食が発生するには鋭敏化度が5%以上とされているが、今回の測定結果では粒界腐食が生じるほど鋭敏化されている箇所はなかった。但し、No.2 及びNo.4 については溶接ビード端から各々15mm、20mm 離れた箇所を測定しているため、溶接による熱影響の鋭敏化に関しては今回の測定結果からは判断できない。

(5) 水質調査

今回の測定で採取した水の化学分析結果を表-2. 28に、また、代表的な河川水及び海水の化学分析結果を表-2. 29、表-2. 30に示す。

表-2. 28 水の化学分析結果

分析項目	1 月 20 日 8 : 50		1 月 20 日 14 : 00		分 析 方 法
	水 温 1 5 °C		水 温 1 4 °C		
	河 側	海 側	河 側	海 側	
C ℓ ⁻ (mg / ℓ)	25	1210	22	990	JIS K0101 32.2
p H (17 °C)	6.9	7.2	6.8	7.1	JIS K0101 11
電 気 伝 導 率 (μ s / cm)	194	3820	116	3090	JIS K0101 12

ただし、1月20日8:50はほぼ満潮時、1月20日14:00はほぼ干潮時である。

表-2.29 東京、大阪の河川の水質

分 析 項 目	東 村 山 系 (中 村 南)	長 沢 系 (大 森)	江 戸 川 系 (荒 川)	淀 川 系 (新 町)	琵琶湖系 (彦 根)
C l ⁻ (p p m)	18.6	79.2	22.0	11.5	8.2
p H	6.4	6.2	6.7	6.6	7.0
電 気 伝 導 率 (μ s / c m)	194	406	253	131	133

表-2.30 海水の水質

分 析 項 目	海	水
C l ⁻ (p p m)	18000	~ 22000
p H	7.5	~ 8.5
電 気 伝 導 率 (μ s / c m)		~ 40000

河側は表-2.29に示された河川水の水質に近いことがわかるが、海側は海水の代表的な値に比べるとCl⁻濃度及び電気伝導率の値が相当低く、樋門の下流は海水と河川水が混合した汽水であると判断される。今回の分析は一例であり、河川側及び海側とも季節や潮位、時間により変動することが予想される。

2.8.4 考察

全体的な印象として、竣工後6年を経たSUS304製ゲートとしては発錆は少ない。扉体全般にわたって錆の発生状況を観察した結果、河側の上下段扉連結部に集中的に発錆していた。これは、この部分が扉体構造的に雨水による洗浄効果が期待し難いためと考えられる。スキンプレートが塩素イオンの影響を受けやすい海側に配置されているながらも、平坦な鉛直面であるため雨水洗浄効果により錆表面が比較的綺麗な状態であったことと比較すると対照的であった。ステンレス鋼製ゲートに対しては定期的な水洗いが発錆防止上有効であると考えられる。

河側の上下段扉連結部を詳細に観察したところ、

①水密ゴム取付け用ナットが発錆源と考えられるもらい錆

②溶接や歪み取りなどの加熱部に比較的濃い錆

がみられた。前者は、ナットの材質がマルテンサイト系のSUS403であることが原因である。本件は同材

種使用時のボルト・ナットの焼き付きを防止する目的でナット側に硬度の高い SUS403 が使用されたものと考えられるが、このような部品の締付けトルクはそれほど大きくないためボルトと同じ SUS304 を使用しても差し支えはないと考えられる。

後者の原因としては、

- a. 加熱を受けたステンレス面の表面粗度が粗くなり付着物が付きやすくなるためさびやすい
- b. 加熱部が鋭敏化しており腐食が発生しやすい状態であった

等が考えられる。

- a. について

加熱を受けたステンレス面の表面粗度が粗くなるのは、海側スキンプレートにおける海中生物付着状況からも判断できる。また、表面粗度が粗いとさびやすいということは粗いグライнда研磨跡の発錆強度が他より高いことから判断できる。

- b. について

すみ肉溶接部背面や突合せ溶接ビード脇の発錆部の鋭敏化度を測定した結果、粒界腐食が発生するほど鋭敏化している箇所はなかった。但し、溶接ビード脇については測定箇所が溶接熱影響部を外れていたため今回の測定値から鋭敏化を結論づけることはできないと考える。

今回の実態調査では、ステンレス鋼製ゲートが無塗装であるため、鋼板の製造、加工時の取扱い跡が美観上問題となるということが印象的であった。表面を目の細かいグライндаで研磨しバフ仕上げ等を行えば美観上は理想的であるが、加工費の大幅な増加を招くし、また、ショットブラスト等で鋼材表面に一様に凹凸を付ける無光沢仕上げを行った場合は鋼表面が粗くなるため、発錆を招く可能性がある。この問題については、経済性、美観等を考慮して検討した上で施工要領に反映していく必要があると考える。

2. 8. 5 まとめ

竣工後 6 年経過した SUS304 製防潮ゲートである樋門中央水門の実態調査を行った。その結果、全体的な発錆は予想以上に少なく、板厚減少や問題となるような孔食の発生も認められなかった。今回の調査範囲（常時没水部を除く）の設備については、機能上健全な状態にあると判断できる。但し、設備の安全性については、扉体メンテナンス時などに常時没水部を含めた調査を行った上で結論づける必要がある。また、熱影響部の鋭敏化についても詳細な調査が必要である。今回の目視観察については、雨水による扉体の洗浄が発錆に有効であることがわかった。この結果はステンレス鋼製ゲートの設計、管理に反映していく必要がある。材質については、マルテンサイト系ステンレス鋼使用部に発錆がみられ、また、これが原因と考えられるもらい錆も生じているため、ステンレス鋼製ゲートにおいては耐食性の観点からマルテンサイト系ステンレス鋼の使用は常時空中部を除き、避けるべきと考えられる。さらに、ステンレス鋼製ゲートは無塗装がゆえに鋼板の取扱い跡がそのまま残り、美観上の問題として新たに生じてくることがわかった。これは、経済性、美観性を考慮し、今後検討していくべき問題と考える。

以上、樋門中央水門の実態調査について述べてきた。今回の実態調査はステンレス鋼製ゲートの検討に非常に有効であると考えられる。

2. 8. 6 総合判断

今回の調査により、常時水中部についても孔食等は特に機能上問題がないことが明らかとなった。昨年の空中部調査及び今回の水中部調査を総合的に判断した結果を以下に示す。

(1) 構造

雨水による自然洗浄効果の有無により、同じような溶接構造部でも発錆状況に明らかな差があった。雨水による自然洗浄効果が期待できるような形状選定をすることにより発錆を抑制することができる。

(2) 使用材質

発錆しやすいマルテンサイト系ステンレス鋼を使用すれば、周辺のオーステナイト系ステンレス鋼ももらい錆により発錆する。オールステンレス鋼製ゲートではマルテンサイト系ステンレス鋼といえど、もらい錆の供給源となる。

(3) 生物付着

フジツボ、カキ等の生物付着による隙間腐食はなかった。汽水環境に7年程度放置した結果、問題が生じていなかったことよりダム等の淡水環境（酸性水は除く）でも生物付着によるステンレス鋼の損傷はないと推定できる。

(4) 水底土砂の影響

常時水底土砂に没した箇所も腐食していなかった。本河川のように上流や周辺から工業排水が供給されていない箇所では水底土砂によるステンレス鋼の損傷はないと推定できる。

(5) 美観

ステンレス鋼製ゲートは無塗装であるため、鋼板出荷時の傷処理跡、加工時のグラインダ跡、溶接ビード、据付ピース切除等が残る。美観を特に考慮する必要がある場所では、何らかの表面処理を施すことが望ましい。

(6) 周辺設備

管理橋や周辺の手摺等が普通鋼を使用していた場合、これらの腐食がステンレス鋼に対するもらい錆の供給源となる。ステンレス鋼製ゲートにおいては、周辺設備の材質選定、防食対策にも考慮することが望ましい。

以上、汽水環境で使用された SUS304 製ゲートの腐食状況調査結果につき述べた。汽水及び海水環境で使用される場合のステンレス鋼種選定については、慎重に結論づける必要があるが、淡水中での使用に対しては本調査結果より、SUS304 で十分な耐食性を有すると判断できる。

3. 試 験

3. 1 試験概要

本試験は、第2項で行った調査結果より不明確な事項をピックアップし、それぞれについて試験を行い明確化を目指したものである。

試験項目を以下に示す。

- (1) ステンレス鋼の溶接欠陥に関する特性試験
- (2) ステンレス鋼の溶接鋭敏化に関する試験
- (3) 溶接歪み防止に関する試験
- (4) モックアップによる溶接状況の確認試験
- (5) ステンレス鋼の溶接継手部の機械的性質試験
- (6) オーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）の表面処理方法に関する試験
- (7) 暴露試験

3. 2 ステンレス鋼の溶接欠陥に関する試験

3. 2. 1 丸棒形溶接割れ試験

共試溶接材料の高温割れ比較試験を行い、耐割れ性の優れた溶接材料の選定を行った。

(1) 共試鋼材

SUS304（JIS G 4303）丸棒φ50mm

(2) 溶接法及び共試溶接材料

ダム用ゲートの製作施工上、適用が考えられる3種類の溶接法に対し、ステンレス鋼用溶接材料の代表的な製造メーカ3社を選び各溶接法及び溶接材料を表-3.1に示す。

表-3.1 溶接法及び溶接材料

	(株) 神 戸 製 鉄 所	日 本 ウ ェ ル デ ィ ング ロ ー ド (株)	日 本 油 脂 (株)
被覆アーク溶接	NC-38	WEL-308	RNY-308
炭酸ガスアーク溶接	DW-308	WEL/PCW-308LT	GFW-308
サブマージ アーク溶接	*ワイヤ US-308 308 *フラックス PFS-1	*ワイヤ WEL SUB-308 *フラックス WEL SUB F-8	*ワイヤ UW-308 *フラックス TUF-300

(3) 試験方法、試験材形状及び寸法

試験方法は JIS Z 3152 「丸棒形溶接割れ試験方法」により実施した。但し、サブマージアーク溶接は試験ビード長を JIS で規定された長さでは実験できないので 2 倍とした。

試験材形状及び寸法を図-3. 1 に示す。

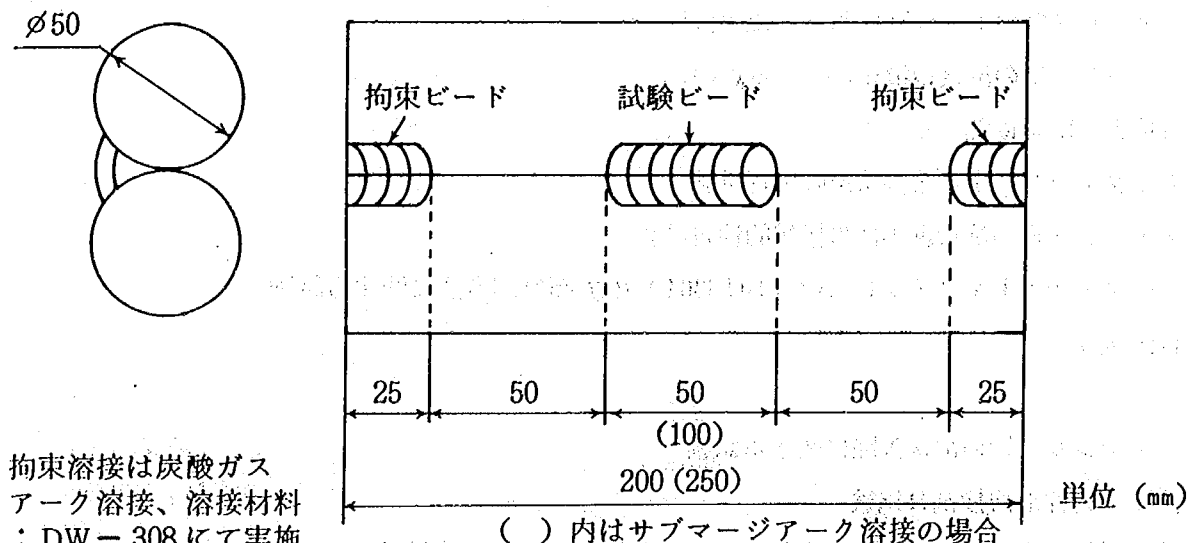


図-3. 1 丸棒形溶接割れ試験 (JIS Z 3152)

(4) 試験材及び試験回数

溶接法 3 種 × 溶接材料 3 種 × 溶接法 1 種 × 繰返し 3 回 = 27 組

(5) 溶接装置及び溶接条件

① 溶接装置

- i. 被覆アーク溶接 : 交流アーク溶接機
(MEL-ARC 500 : 三菱電機製)
- ii. 炭酸ガスアーク溶接 : 炭酸ガスアーク溶接機
(PANA-AUTO 500D : 松下電器製)
- iii. サブマージアーク溶接 : サブマージアーク溶接機
(オートメルト SW24 : ダイヘン製)

② 溶接条件

溶接条件を表-3. 2 に示す。

(6) 検査方法

割れの検査は、JIS Z 2343 「浸透探傷試験方法及び欠陥指示模様の等級分類」で試験ビードの表面及び断面について行った。

断面検査位置を図-3. 2 に示す。

表-3.2 溶接条件

溶 接 法	溶 接 材 料		溶 接 姿 勢	溶 接 条 件		
	メーカ	銘 柄		電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/分)
被 アーク 溶 接	(株)神戸製鉄所	NC-38 (φ4.0)	下 向 き	150	26	—
	日本ウェルディングロッド(株)	WEL 308 (φ4.0)				
	日本油脂(株)	RNY 308 (φ4.0)				
炭 酸 ガスアーク 溶 接	(株)神戸製鉄所	DW-308 (φ1.2)	下 向 き	200	32	—
	日本ウェルディングロッド(株)	WEL FCW 308LT (φ1.2)				
	日本油脂(株)	GPW 308 (φ1.2)				
サ ブ マ ー ジ ア ー ク 溶 接	(株)神戸製鉄所	ワイヤ US-308 × (φ4.0) フラックス PFS-1	下 向 き	490	32	40
	日本ウェルディングロッド(株)	ワイヤ WEL SUB 308 × (φ4.0) フラックス WEL SUB F-8				
	日本油脂(株)	ワイヤ UW 308 × (φ4.0) フラックス TUF 300				

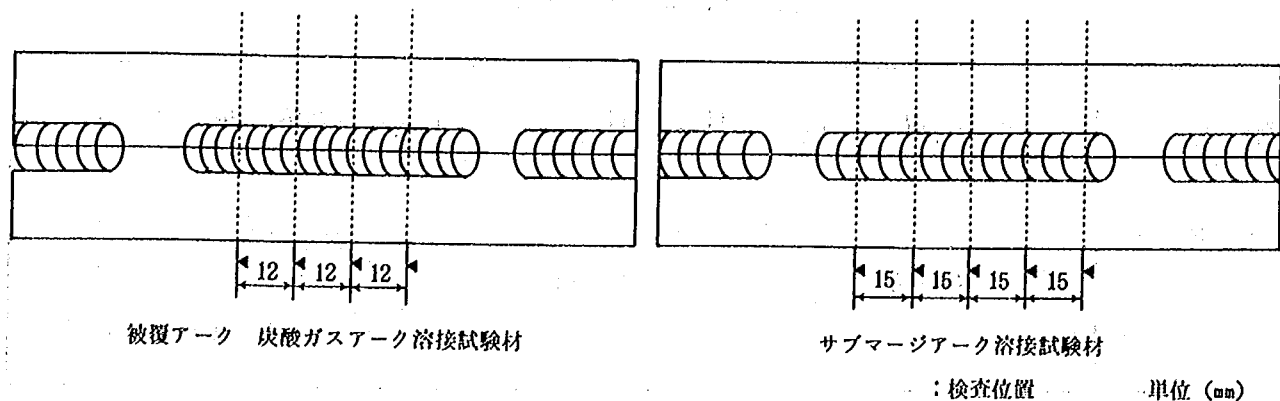


図-3.2 断面検査位置

(7) 試験結果

各溶接方法に供した溶接材料全てにおいて、割れは認められず良好であった。試験結果を表-3.3に示す。

表-3.3 丸棒形溶接割れ試験結果

溶 接 法	溶 接 材 料		溶 接 条 件			＊ 割 れ 率 (%)						試験片 記 号
	メーカ	銘 柄	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/分)	T P ・ 1		T P ・ 2		T P ・ 3		
						表面	断面	表面	断面	表面	断面	
被 覆 ア ー ク 溶 接	(株)神戸製鉄所	NC-38 (φ4.0)	150	26	—	0	0	0	0	0	0	H-A-2 3
	日本ウェルディングロッド(株)	WEL 308 (φ4.0)				0	0	0	0	0	0	H-B-2 3
	日本油脂(株)	RNY 308 (φ4.0)				0	0	0	0	0	0	H-C-2 3
炭 酸 ガスアーク 溶 接	(株)神戸製鉄所	DW-308 (φ1.2)	200	32	—	0	0	0	0	0	0	C-A-2 3
	日本ウェルディングロッド(株)	WEL FCW 308LT (φ1.2)				0	0	0	0	0	0	C-B-2 3
	日本油脂(株)	GFW 308 (φ1.2)				0	0	0	0	0	0	C-C-2 3
サブマージ ア ー ク 溶 接	(株)神戸製鉄所	ワイ US-308 × フラックス (φ4.0)	490	32	40	0	0	0	0	0	0	S-A-2 3
	日本ウェルディングロッド(株)	ワイ WEL SUB 308 × (φ4.0) フラックス WEL SUB F-8				0	0	0	0	0	0	S-B-2 3
	日本油脂(株)	ワイ UW 308 × (φ4.0) フラックス TUF 300				0	0	0	0	0	0	S-C-2 3

備考 ＊割れの検査は、浸透探傷試験による。断面の数量は、被覆アーク、炭酸ガスアーク溶接が各4断面、サブマージアーク溶接が各5面実施。

3. 2. 2 溶接欠陥調査試験

供試材料の溶接作業について比較試験を行い、さらにその溶接継手の内部欠陥発生状況について、放射線透過試験を行い、比較検討を行った。

(1) 供試鋼材

SUS304 (JIS G 4304) 板厚 20mm

(2) 溶接法及び溶接材料

溶接法及び溶接材料を表-3.4に示す。

表-3.4 溶接法及び溶接材料

	(株) 神 戸 製 鋼 所	日 本 ウ ェ ル デ ィ ン グ ロ ッ ド (株)	日 本 油 脂 (株)
被 覆 アーク 溶 接	NC-38	WEL-308	RNY-308
炭 酸 ガ ス アーク 溶 接	DW-308	WEL FCW 308LT	GPW 308
サ ブ マー ジ アーク 溶 接	*ワイヤ US-308 *フラックス PFS-1	*ワイヤ WEL SUB-308 *フラックス WEL SUB F-8	*ワイヤ UW-308 *フラックス TUF-300
裏 当 て 材	被 覆 アーク 溶 接 用	SU-374	住 金 溶 接 工 業 (株)
	炭 酸 ガ ス アーク 溶 接 用		
	サ ブ マー ジ アーク 溶 接 用	SU-372	

(3) 試験材形状及び寸法

試験材形状及び寸法を図-3.3に示す。

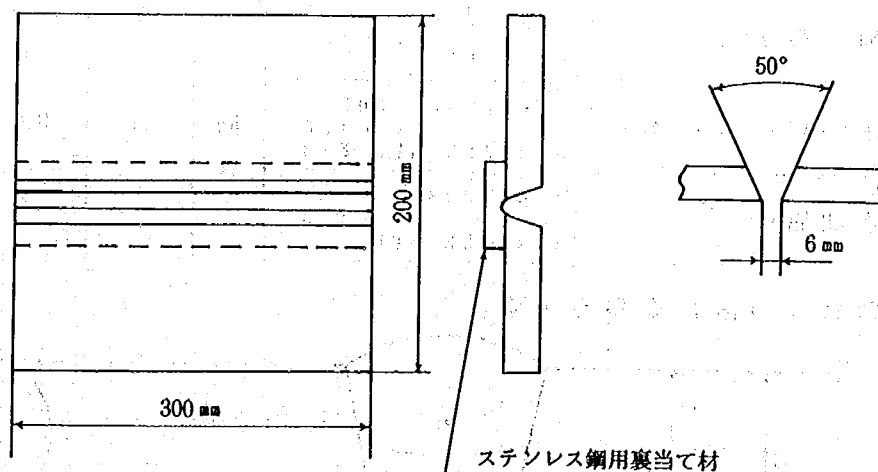


図-3.3 試験材形状及び寸法

(4) 試験材及び試験回数

溶接法 3種 × 溶接材料 3種 × 繰返し 2回 = 18組

(5) 溶接装置及び溶接条件

① 溶接装置

- i. 被覆アーク溶接 : 交流アーク溶接機
(MEL-ARC 500 : 三菱電機製)
- ii. 炭酸ガスアーク溶接 : 炭酸ガスアーク溶接機
(PANA-AUTO 500D : 松下電器製)
- iii. サブマージアーク溶接 : サブマージアーク溶接機
(オートメルト SW24 : ダイヘン製)

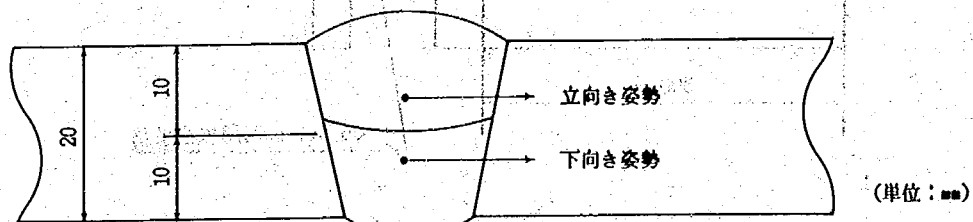
② 溶接条件

溶接条件を表-3.5に示す。

表-3.5 溶接条件

溶 接 法	溶 接 材 料		溶 接 姿 勢	溶 接 条 件		
	メーカ	銘 柄		電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/分)
被 覆 ア ー ク 溶 接	(株)神戸製鋼所	NC-38 (φ4.0)	下向き ↑ 下向き	150	26	—
	日本ウェルディングロッド(株)	WEL 308 (φ4.0)				
	日本油脂(株)	RNY 308 (φ4.0)		120	26	—
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接	(株)神戸製鋼所	DW-308 (φ1.2)	下向き ↑ 下向き	200	32	—
	日本ウェルディングロッド(株)	WEL FCW 308LT (φ1.2)				
	日本油脂(株)	GFW 308 (φ1.2)		120	30	—
サ ブ マ ー ジ ア ー ク 溶 接	(株)神戸製鋼所	ワイヤ US-308 (φ4.0) × フラックス PFS-1	下向き	490	32	40
	日本ウェルディングロッド(株)	ワイヤ WEL SUB 308 (φ4.0) × フラックス WEL SUB F-8				
	日本油脂(株)	ワイヤ UW 308 (φ4.0) × フラックス TUF 300				

備考
* 同一試験材での溶接姿勢を示す。



(6) 検査方法

① 溶接作業性の観察項目を表-3. 6に示す。

② 溶接継手の内部欠陥発生状況の検査を JIS Z 3106「ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類法」で行った。

表-3. 6 溶接作業性の観察項目

監 査 項 目 (目 視 に よ る)	被覆アーク溶接、 炭酸ガスアーク溶接	サブマージアーク溶接	備 考
1)アークの発生：アークスタート及び再アーク性を観察	○	○	○印： 観察項目
2)アークの状態：アークの持続性と集中性を観察 (サブマージアーク溶接の場合は、電流、電圧メーターの振れを観察)	○	○	
3)溶接状態：溶接棒端の保護筒の形状、片溶け、保護筒の欠け落ち、棒の溶け具合 及び溶融池の状態を観察 (サブマージアーク溶接の場合は、ビードの広がり、波の状態を観察)	○	○	
4)スラグの状態：スラグの流動状況とスラグ除去の難易を観察	○	—	
5)スパッタ：発生するスパッタの大小、量の多少、除去の難易を観察	○	○	
6)ガス、ヒューム発生状態：溶接中に発生する不快なガス及びヒュームの多少を観察	○	○	
7)溶融池の吹きあげ：サブマージアーク溶接において溶接中、溶融池からのガスの 吹きあげの多少を観察	—	○	
8)ビードの平滑性：ビード断面の高低、ビード裏面の高低を観察	○	○	

(7) 試験結果

試験結果を表-3. 7に示す。

①被覆アーク溶接では、NC-38（神戸製鋼所製）のものがよく、WEL-308（日本ウェルディングロッド製）及び RNY-308（日本油脂製）のものは、スラグの剝離性がやや悪く、スパッタ及びヒュームの発生量がやや多かった。

② 炭酸ガスアーク溶接では、DW-308（神戸製鋼性）のものが、アークの安定性、溶解状態、スパッタでやや優れており、WEL・FCW-308LT（日本ウェルディングロッド製）は、スパッタの発生量がやや多く、GFW-308（日本油脂製）のものは、スラグの剝離性がやや悪く、スパッタの発生量もやや多かった。

③ サブマージアーク溶接では、3銘柄とも良好であった。

④ 放射線透過試験では、各溶接法ごとの溶接材料の比較では、特に差はみられなかった。

従って、これ以降の試験には神戸製鋼所製の溶接材料を使用した。

但し、溶接作業性の比較については、観察者（溶接作業者）の好みや感覚により差が生じるので、多くの観察者の意見を聞く必要がある。今回は1人の観察者の評価である。

表-3. 7 溶接欠陥調査試験結果

溶接方法	溶 接 材 料		溶 接 条 件			アークの発生	アークの状態	溶融状態	スラグ状態	スパッタ	ガス、ヒューム発生状態	溶融池の吹きあげ	ビードの平滑性	放射線透過試験		試験片記号
	※ メーカー	銘 柄	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/分)									TP・1	TP・2	
被覆アーク溶接	神 鋼	NC-38 (φ4.0)	下向き 150	26	—	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	△	⊗	1種1級	1種1級	H-A- ¹ ₂
	日本ウェル	WEL 308 (φ4.0)	立向き	26	—	⊗	⊗	⊗	△	△	△	△	⊗	1種2級	1級	H-B- ¹ ₂
	日 油	RNY 308 (φ4.0)	120	26	—	⊗	⊗	⊗	△	△	△	△	⊗	1種1級	1級	H-C- ¹ ₂
炭酸ガスアーク溶接	神 鋼	DW-308 (φ1.2)	下向き 200	32	—	⊗	○	○	⊗	○	⊗	△	⊗	1級	1級	C-A- ¹ ₂
	日本ウェル	WEL FCW 308LT (φ1.2)	立向き	30	—	⊗	⊗	⊗	⊗	△	⊗	△	⊗	1級	1級	C-B- ¹ ₂
	日 油	GFW 308 (φ1.2)	120	30	—	⊗	⊗	⊗	△	△	⊗	△	⊗	1級	1級	C-C- ¹ ₂
サマージアーク溶接	神 鋼	ワイ US-308 × フラックス (φ4.0)	下向き 480	30	30	⊗	⊗	⊗	⊗	△	⊗	⊗	⊗	1級	1級	S-A- ¹ ₂
	日本ウェル	ワイ WEL SUB 308 × フラックス WEL SUB F-8 (φ4.0)	~	~	~	⊗	⊗	⊗	⊗	△	⊗	⊗	⊗	1級	1級	S-B- ¹ ₂
	日 油	ワイ UW 308 × フラックス TUF 300 (φ4.0)	500	34	40	⊗	⊗	⊗	⊗	△	⊗	⊗	⊗	1級	1級	S-C- ¹ ₂

備考 ※神鋼 (株)神戸製鋼所

日本ウェル (株)日本ウェルディングワイド

日油 (株)日本油脂

凡例) ⊗ : 非常に優れている

⊗ : 普通

△ : 少し劣る

放射線透過実験 : JIS Z3106 による。

◎ : 優れている

× : 劣る

○ : 少し優れている

— : できない

3. 2. 3 溶接作業環境試験

溶接時（アーク近傍）の風速がブローホール発生に及ぼす影響について調査・実験を行った。

(1) 供試鋼材

SUS304（JIS G 4304）板厚 20mm

(2) 溶接法及び溶接材料

溶接法及び溶接材料を表－3. 8に示す。

表－3. 8 溶接法及び溶接材料

溶 接 法	溶 接 材 料	メ ー カ
被 覆 ア ー ク 溶 接	NC-38 (φ4.0)	(株) 神 戸 製 鉄 所
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接	DW-308 (φ1.2)	

(3) 風速条件

アーク近傍の風速条件を表－3. 9に示すが、比較的耐風性のよい被覆アーク溶接は、風速を 0 m/s ～ 10m/s とし、風の影響を受けやすい炭酸ガスアーク溶接は、0 m/s ～ 5 m/s とした。

表－3. 9 アーク近傍の風速条件

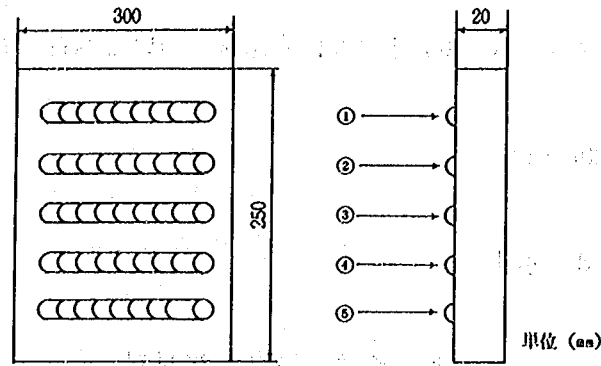
単 位 (m/sec)

試 験 ビ ー ト	被 覆 ア ー ク 溶 接	炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接
①	無 風	無 風
②	2	1
③	5	2
④	8	3
⑤	10	5

(4) 試験材形状・寸法及び実験要領

試験材形状・寸法を図－3. 4、実験要領を図－3. 5に示す。

- ・試験ビードはビードオンプレート
- ・○中数字は表－3. 9の風速条件に対応



- ・試験ビードはビードオンプレート
- ・○中数字は表2-1-9の風速条件に対応

図-3.4 試験材形状寸法

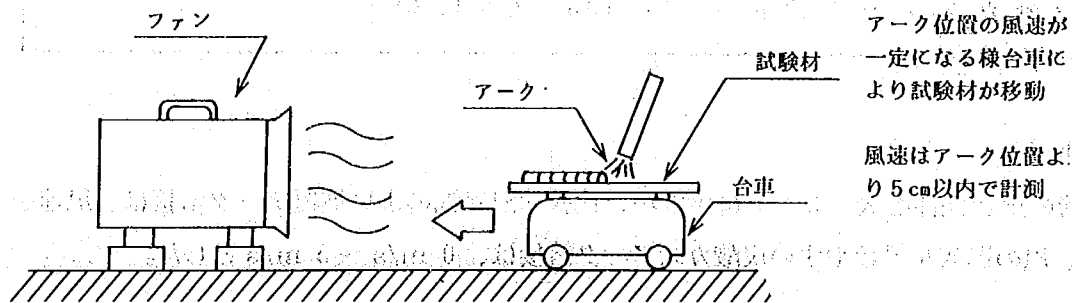


図-3.5 実験要領

(5) 試験材及び試験回数

溶接法 溶接材料 繰返し
2種 × 1種 × 2回 = 4組

(6) 溶接装置及び溶接条件

溶接装置及び溶接条件を表-3.10に示す。

表-3.10 溶接装置及び溶接条件

溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 条 件		備 考
		電 流 (A)	電 圧 (V)	
被覆アーク溶接	交流アーク溶接機 (MBL-ARC 500 : 三菱電機製)	145	26	
炭酸ガスアーク溶接	炭酸ガスアーク溶接機 (PANA-AUTO 500D : 松下電器製)	220	30	ワイヤ 突出し長さ : 20mm ノズル径 : φ20 シールドガス流量 : 25 ℓ/min

(7) 検査方法

欠陥発生状況の確認は、JIS Z 3106「ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」で行った。

(8) 試験結果

試験結果を表-3.11に示す。

表-3.11 溶接時の作業環境試験結果

溶 接 方 法	溶 接 条 件		風 速 条 件	放 射 線 透 過 試 験 結 果	
	電 流 (A)	電 圧 (V)		T P ・ 1	T P ・ 2
被 覆 ア ー ク 溶 接	145	26	無 風	1 級	1 級
			2 m / s	1 級	1 級
			5 m / s	1 級	1 級
			8 m / s	1 級	1 級
			10 m / s	1 級	1 級
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接	220	30	無 風	1 級	1 級
			1 m / s	1 級	1 級
			2 m / s	1 級	1 級
			3 m / s	2 種 4 級 (パイピング発生) (ブローホール発生)	1 種 1 級 (ブローホール発生)
			5 m / s	1 種 1 級 (ブローホール発生)	1 種 1 級 (ブローホール発生)
備 考					
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接					
ワイヤ突出し長さ : 20mm、 シールドガス流動 : 25 ℓ / min					
ノズル径 : φ 20、 シールドガス : CO ₂ 100 %					

① 被覆アーク溶接では、風速 10m/s の条件でもブローホールの発生は認められなかった。但し、ビードの波形は風速の増加に伴い、不整形となった。

② 炭酸ガスアーク溶接では、風速 2 m/s の条件までは、ブローホールの発生は認められなかったが、3 m/s 以上の風速条件では、ブローホール等の欠陥が発生した。なお、風速の増加に伴い、スラグの剝離性も悪くなった。

3. 3 ステンレス鋼 (SUS304) の溶接鋭敏化に関する試験

3. 3. 1 限界溶接入熱量に関する試験

各々の溶接法について溶接入熱量と熱影響部の鋭敏化度との関係を調査し、限界溶接入熱量の調査を行った。

(1) 供試鋼材

SUS304 (JIS G 4304) 板厚 12mm

(2) 溶接法及び溶接材料

溶接法及び溶接材料を表-3. 12 に示す。

表-3. 12 溶接法及び溶接材料

溶 接 法	溶 接 材 料	メーカ
被 覆 ア ー ク 溶 接	NC-38 (4.0φ)	(株) 神 戸 製 鋼 所
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接	DW-308 (1.2φ)	
サブマージアーク溶接	・ワイヤ US-308 ・フラックス PFS-1 (4.0φ)	
ティグ溶接	TGS-308 (1.2φ)	

(3) 溶接入熱量

溶接法別供試入熱量を表-3. 13 に示す。

表-3. 13 溶接入熱量

溶 接 法	溶 接 入 熱 量 (kJ/cm)						備 考
	10	20	30	35	40	50	
被 覆 ア ー ク	○	○	○	○	-	-	○ 印 : 供試入熱量 溶接
炭 酸 ガ ス ア ー ク	-	○	○	-	○	○	
サブマージアーク	-	○	○	○	-	○	
ティグ	○	○	○	○	-	-	

(4) 試験材の形状・寸法及び試験要領

試験材の形状及び寸法を図-3.6に示す。

溶接はビードオンプレートで行い、各ビードとも溶接初期温度は室温とし図-3.7に示す位置にて溶接熱サイクルを測定した。

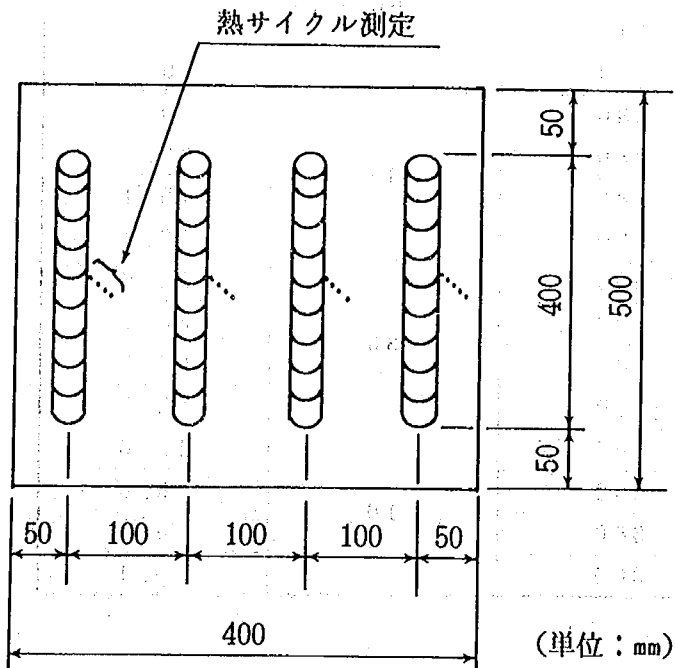


図-3.6 試験材の形状及び寸法

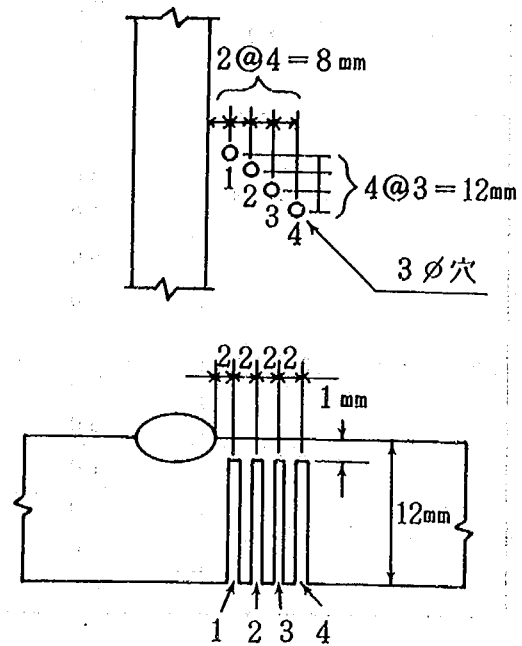


図-3.7 熱サイクル測定位置

(5) 試験材及び試験回数

各溶接法ごとに1組で1溶接入熱量で1回。

(6) 溶接装置及び溶接条件

① 溶接装置及び溶接条件

- i. 被覆アーク溶接 : 交流アーク溶接機
(MEL-ARC 500 : 三菱電機製)
- ii. 炭酸ガスアーク溶接 : 炭酸ガスアーク溶接機
(PANA-AUTO 500D : 松下電器製)
- iii. サブマージアーク溶接 : サブマージアーク溶接機
(オートメルト SW24 : ダイヘン製)
- iv. ティグ溶接 : ティグ溶接機
(TIL-2 T : 神戸製鋼所製)

② 溶接条件

溶接条件を表-3.14に示す。

表-3.14 溶接条件

溶接条件 溶接法	溶 接 条 件			
	溶 接 入 熱 量 (kJ/cm)	電 流 (A)	電 圧 (V)	速 度 (cm/min)
被覆アーク溶接	10	140	26	21.8
	20	140		10.9
	30	140		7.3
	33	140		6.7
炭酸ガスアーク溶接	20	280	36	30.2
	30	280		20.2
	40	280		15.1
	50	280		12.1
サブマージアーク溶接	20	500	36	54.0
	30	500		36.0
	35	600		37.0
	50	600		25.9
デューグ溶接	10	200	10	12.0
	20	200		6.0
	30	300		61.0
	35	300		5.1

(7) 鋭敏化度測定

溶接熱サイクル測定近傍の顕微鏡検査により最鋭敏化部を240倍に拡大し鋭敏化度を測定した。

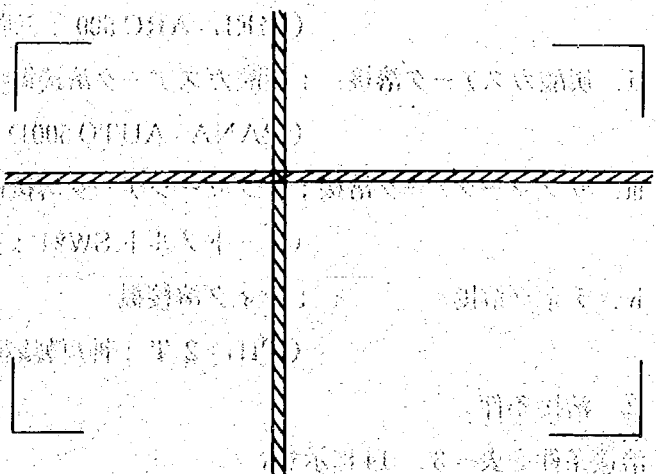
鋭敏化度は次式に従って求めた。

$$\text{鋭敏化度}(\%) = \frac{\text{単位面積(斜線部)内の鋭敏化している面積}}{\text{単位面積(図-3.8斜線部)}} \times 100 \quad \dots\dots\dots \text{式}(2-2-1)$$

〈単位面積の取り方〉

縦・横軸とも幅1mmで測定位置は最も

鋭敏化されている箇所を測定した。



(8) 試験結果

- ① 被覆アーク溶接では、入熱量が 35kJ/cm でも鋭敏化度が 3.4% で鋭敏化度の許容量 (5%) 内であった。
- ② 炭酸ガスアーク溶接では、入熱量が 30kJ/cm の場合、鋭敏化度が 0.2% であるが入熱量が 40kJ/cm の場合、鋭敏化度が 11.7% と、鋭敏化度の許容値外であった。
- ③ サブマージアーク溶接では入熱量が 35kJ/cm の場合は鋭敏化度が 4.7% と鋭敏化度の許容値内であるが、入熱量が 50kJ/cm では鋭敏化率が 14.1% と鋭敏化度の許容値外であった。
- ④ ティグ溶接では、入熱量が 20kJ/cm の場合は、鋭敏化度が 2.1% であるが、入熱量が 30kJ/cm では、鋭敏化度が 10.8% と鋭敏化度の許容値外であった。
- ⑤ いずれの溶接法においても入熱量が多いほど鋭敏化度は増加し、鋭敏化域が、溶接金属部から離れる傾向にあった。
- ⑥ 異なる溶接法でも入熱量が同じであれば溶接速度が遅い場合と速い場合とでは、遅い方が鋭敏化度が増加する傾向にあった。

試験結果を表-3. 15 に、溶接法別溶接入熱量と鋭敏化率の関係を図-3. 9 に示す。

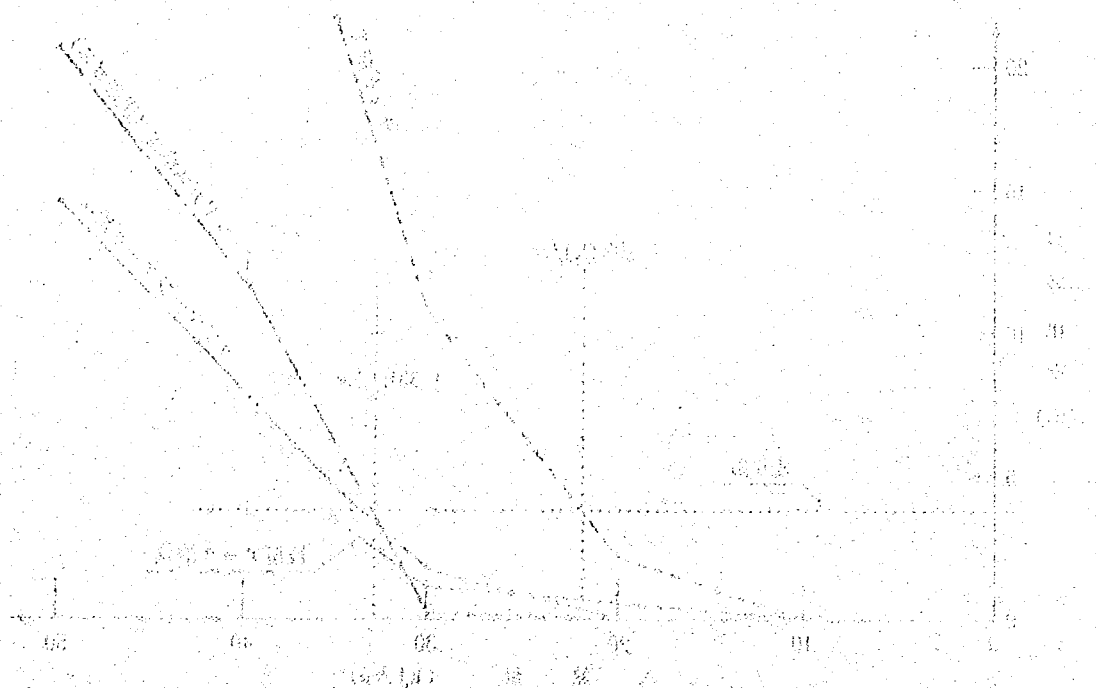


図-3.9 溶接法別溶接入熱量と鋭敏化率の関係

表-3.15 限界溶接入熱量試験調査結果

溶接法		容 積 入 熱 量 (kJ/cm)					
		10	20	30	35	40	50
被覆アーク溶接	溶接条件	cm/min 140A×26V×21.8	cm/min 140A×26V×10.9	cm/min 140A×26V×7.3	cm/min 140A×26V×6.7		
	鋭敏化 測定位置	D.M+2mm	D.M+2.5mm	D.M+2.5mm	D.M+2.5mm		
	鋭敏化度 (%)	0	0.4	1.2	3.4		
炭酸ガスアーク 溶接 (自動)	溶接条件		cm/min 280A×36V×30.2	cm/min 280A×36V×20.2		cm/min 280A×36V×15.1	cm/min 280A×36V×12.1
	鋭敏化 測定位置		D.M+2mm	D.M+2mm		D.M+4.5mm	D.M+6mm
	鋭敏化度 (%)		0	0.2		11.7	20.5
サブマージ アーク溶接	溶接条件		cm/min 500A×36V×54.0	cm/min 500A×36V×36.0	cm/min 600A×36V×37.0		cm/min 600A×36V×25.9
	鋭敏化 測定位置		D.M+2.5mm	D.M+2mm	D.M+2.5mm		D.M+3mm
	鋭敏化度 (%)		0	1.9	4.7		14.1
ティグ溶接 (自動)	溶接条件	cm/min 200A×10V×12.0	cm/min 200A×10V×6.0	cm/min 300A×10V×6.0	cm/min 300A×10V×5.1		
	鋭敏化 測定位置	D.M+2mm	D.M+2.5mm	D.M+5mm	D.M+6mm		
	鋭敏化度 (%)	0.1	2.1	10.8	21.6		

鋭敏化測定位置：

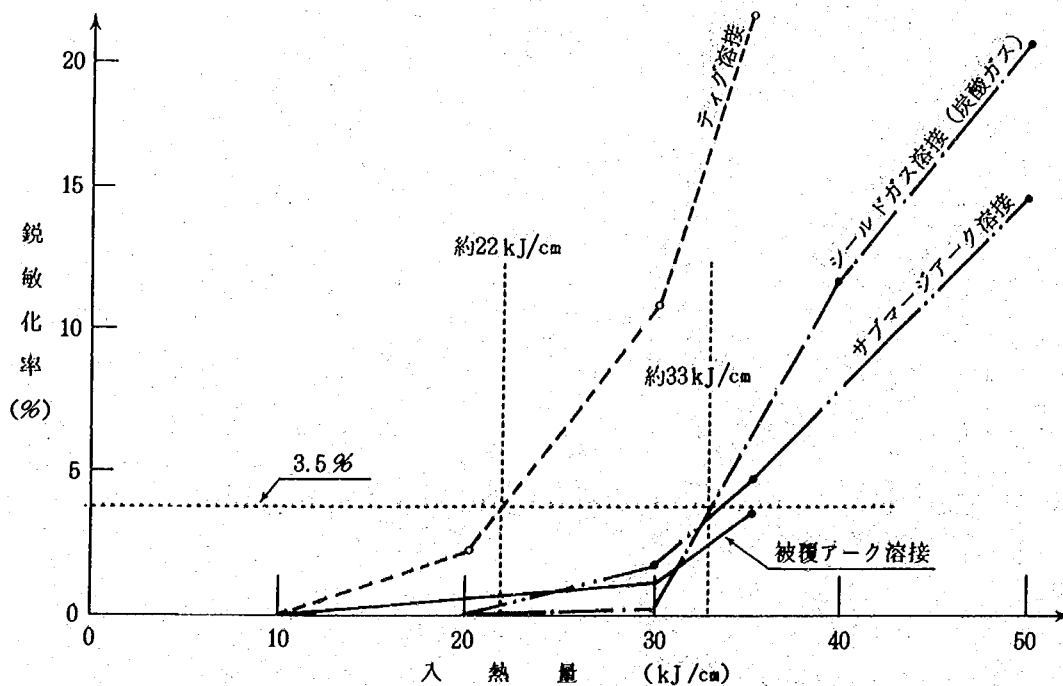
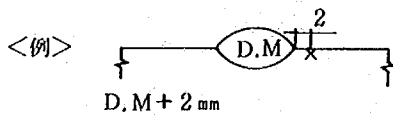
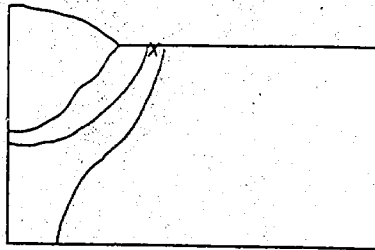
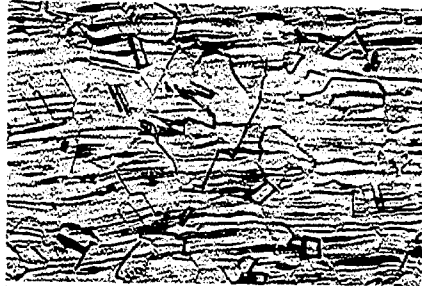
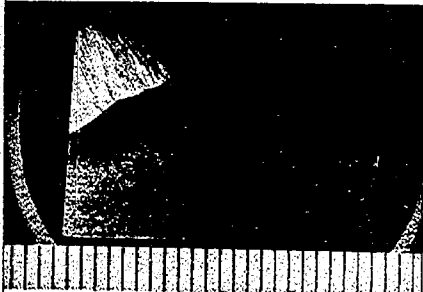
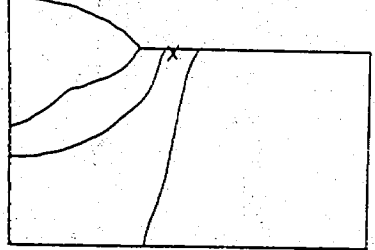
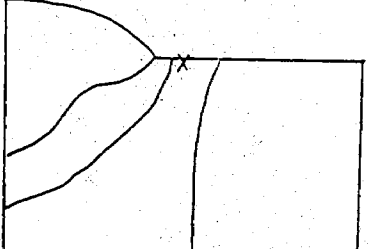
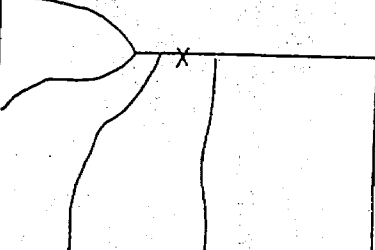


図-3.9 溶接法別溶接入熱量と鋭敏化の関係

写真-3. 1 試験材の断面マクロ組織及びミクロ組織（溶接方法：サブマージアーク）

入熱量	断面マクロ組織	X:ミクロ組織観察位置	ミクロ組織写真 (×240倍)	鋭敏化度
20 kJ/cm				0%
30 kJ/cm				1.9%
40 kJ/cm				4.7%
50 kJ/cm				14.1%

3. 3. 2 熱間歪み取りに関する試験

ガスバーナ加熱による熱間歪み取りの可否について調査した。

(1) 供試材

SUS304 (JIS G 4304) 板厚 12mm

(2) 熱間歪み取り条件

熱間歪み取り条件を表-3. 16 に示す。

表-3. 16 熱間歪み取り

加 熱 法	ガスバーナによる線状加熱
冷 却 方 法	空冷及び冷水の2条件
最 高 加 熱 温 度	600℃, 700℃ 及び 900℃
熱サイクル測定位置	加熱中心の2点

(3) 試験材の形状、寸法及び試験要領

試験材の形状及び寸法を図-3. 10 に、熱サイクル測定位置を図-3. 11 に示す。

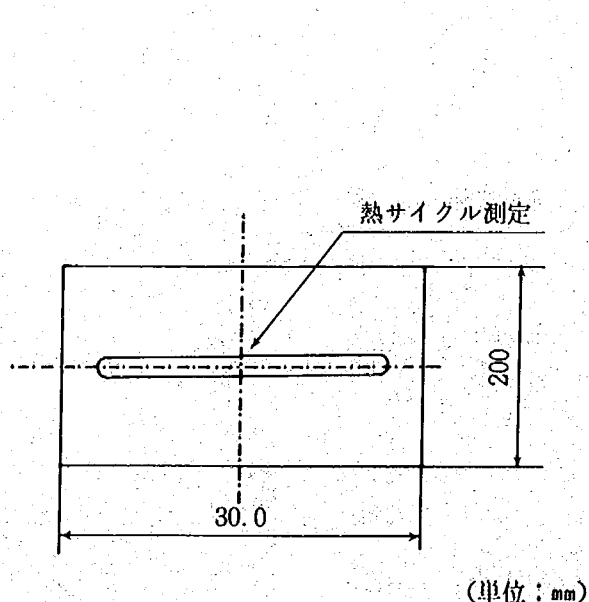


図-3. 10 試験材の形状及び寸法

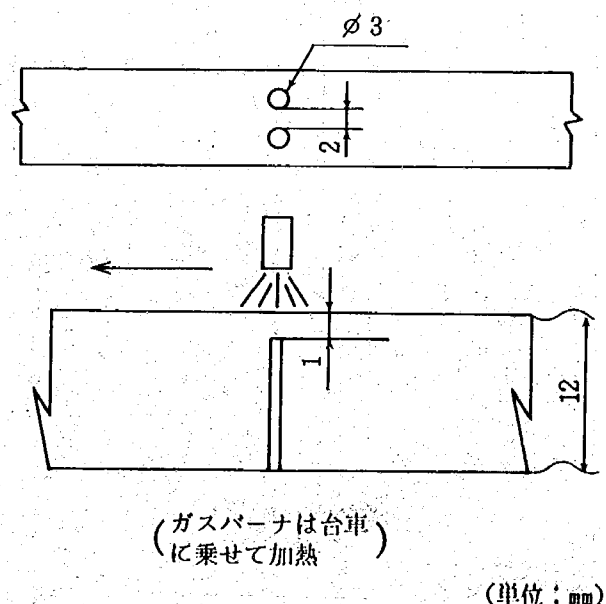


図-3. 11 熱サイクル測定位置

(4) 熱間歪み取り条件組合せ

熱間歪み取り条件組合せを表－3. 17に示す。

表－3. 17 熱間歪み取り条件組合せ

	最 高 加 熱 温 度			保 持 時 間	備 考
	600℃	700℃	800℃		
空 冷	○	○	○	な し	○ 印 : 実 施
水 却	○	○	○		
空 冷	—	○	—	1 分 間	

(5) 鋭敏化度測定

歪み取り熱サイクル測定近傍の顕微鏡検査により最鋭敏化部を240倍に拡大し、鋭敏化度を測定した。

鋭敏化度は式(2-2-1)に従って求めた。

(6) 試験結果

① 冷却方法が空冷で、最高加熱温度が630℃(10s※) 738℃(20s※)及び923℃(60s※)の場合、鋭敏化度は3.1%、2.3%及び3.0%といずれも鋭敏化度の許容値(5%)内であった。

② 冷却方法が水冷で最高加熱温度が640℃(7s※) 796℃(14s※)及び937℃(27s※)の場合、鋭敏化度は0.2%、0%及び0%といずれも鋭敏化度の許容値内であった。

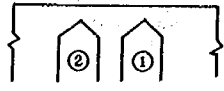
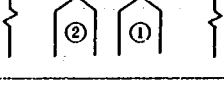
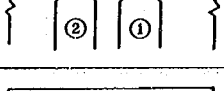
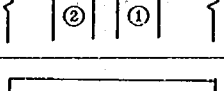
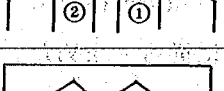
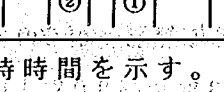
③ 冷却方法が空冷で、最高加熱温度が725℃(128s※)の場合、鋭敏化度は12.6%と鋭敏化度の許容値外であった。

④ 最高加熱温度が約600～900℃においても600℃以上の保持時間が短ければ、鋭敏化されにくい傾向にあった。

(※印：600℃以上の保持時間を示す。 単位：秒)

試験結果を表－3. 18に示す。

表-3. 18 熱間歪み取りに関する試験調査結果

T P 記号	目標加 熱温度 (℃)	冷却 方法	最 高 計 測 ※ 1 温 度 (℃)		鋭 敏 化 定	
					測定位置※ 2	鋭敏化度 (%)
A-1	600	空 冷	①	630(10sec)		3.1
			②	545(-)		
A-2	700	空 冷	①	738(20sec)		2.3
			②	720(19sec)		
A-3	900	空 冷	①	923(60sec)		3.0
			②	830(54sec)		
B-1	600	水 冷	①	640(7sec)		0.2
			②	612(5sec)		
B-2	700	水 冷	①	796(14sec)		0.0
			②	736(13sec)		
B-3	900	水 冷	①	937(27sec)		0.0
			②	870(25sec)		
A	700	空 冷	①	725(128sec)		12.6
			②	695(112sec)		

※ 1. () 内数字は、600℃以上の保持時間を示す。(単位：秒)

※ 2. ×印：測定位置を示す。

3. 4 溶接歪み取り防止に関する試験

3. 4. 1 開先形状の違いによる溶接歪みの比較調査

一般開先(開先角度 60°で狭開先の溶接金属量の 40 %増し)と狭開先(開先角度 20°)を拘束なしで溶接した時の溶接歪み量の調査を行った。

(1) 供試材

SUS304 (JIS G 4304) 板厚 40mm

(2) 溶接法、溶接装置及び溶接材料

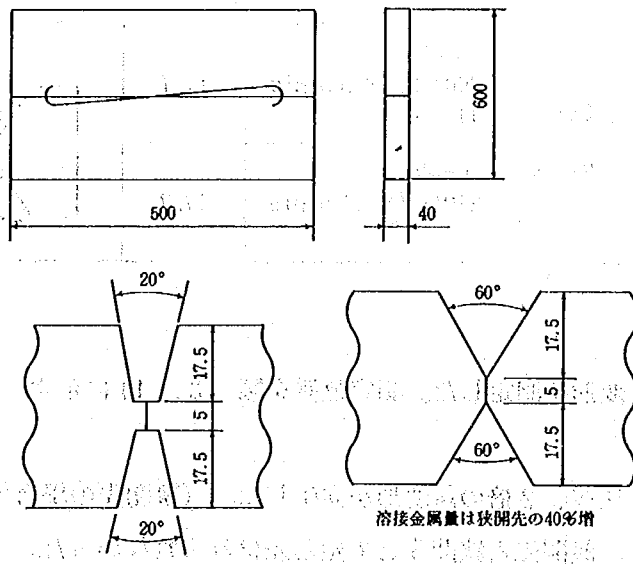
溶接法、溶接装置及び溶接材料を表-3. 19に示す。

表－3. 19 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 材 料
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接	炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接 機 (PANA-AUTO 500B 松 下 電 器 製)	DW-308 (φ 1.2) (神 戸 製 鋼 所 製)

(3) 試験材の形状・寸法及び開先形状

試験材の形状・寸法及び開先形状を図－3. 12に示す。



図－3. 12 試験材の形状、寸法及び開先形状

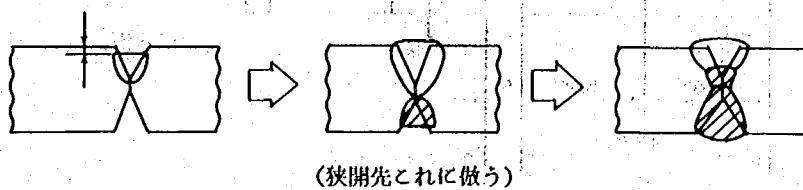
(4) 試験材数

溶接法 開先形状 組
1 × 2 = 2

(5) 溶接条件

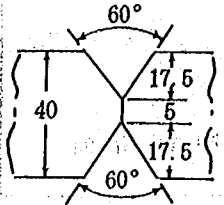
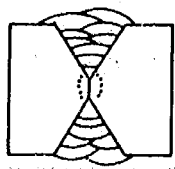
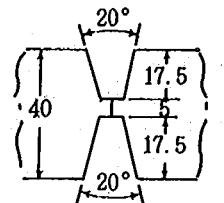
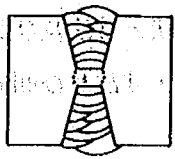
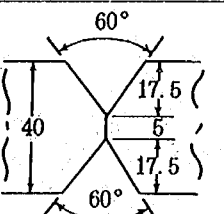
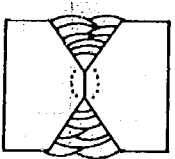
溶接順序を図－3. 13に示す。

溶接条件を表－3. 20に示す。



図－3. 13 溶接順序

表-3.20 溶接条件

継手図	溶接姿勢	溶接法	溶接条件	入熱量 (kJ/cm)	積層図	備考
	下向き	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①~③ 200A-31V-21cm/min	17.7		拘束なし
			④~⑪ 210A-31V-21cm/min	18.6		
	下向き	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①~④ 220A-30V-21cm/min	18.9		拘束なし
			⑤~⑬ 230A-31V-23cm/min	18.6		
	下向き	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①~③ 200A-31V-21cm/min	17.7		拘束なし
			④~⑫ 210A-30V-22cm/min	17.2		

(6) 溶接歪み測定位置

溶接歪みは横収縮縦収縮及び角変形を測定した。測定位置を図-3.14に示す。

(7) 試験結果

- ① 一般開先の場合、狭開先に比べ、2倍の角変形が発生した。(狭開先の場合でも2度発生)
- ② 横収縮量及び縦収縮量は、一般開先と狭開先とで殆ど差はみられなかった。

歪み測定結果と角変形量を図-3.15、3.16に示す。

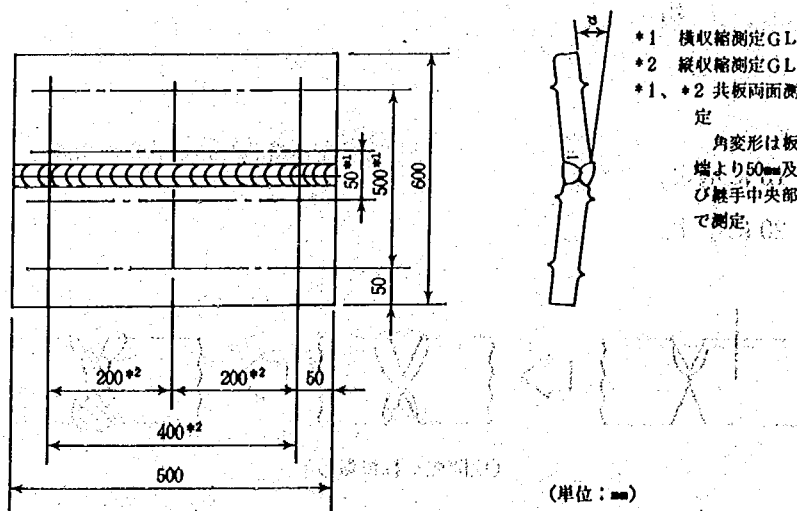


図-3.14 溶接歪測定位置

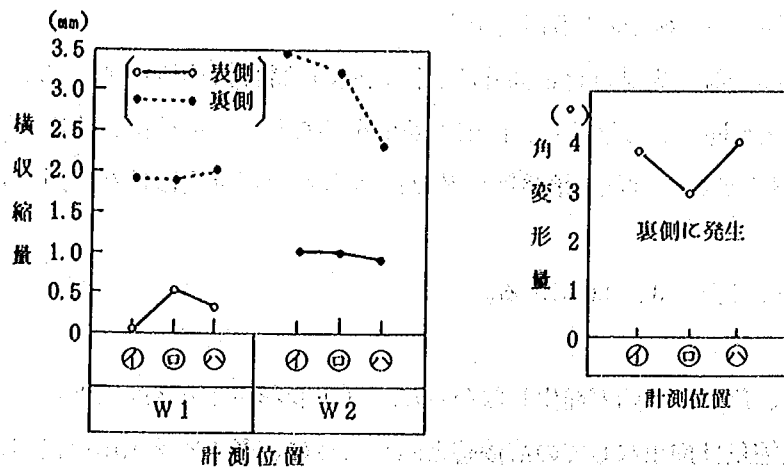


図-3.15 変形量 (一般開先)

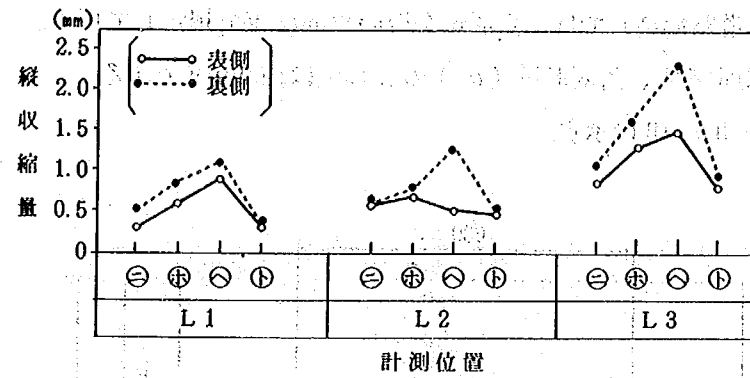
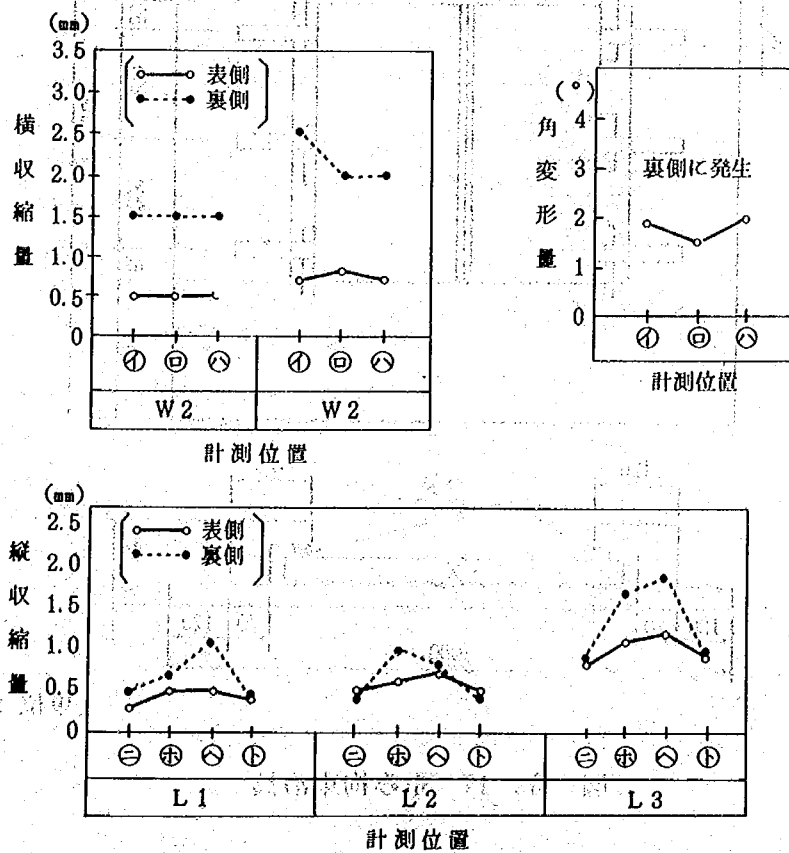


図-3.16 変形量 (狭間先)



3. 4. 2 拘束した状態での溶接歪みに関する比較

3. 4. 1 項（前項）の一般開先試験材と同寸法、同鋼種の試験材を用い、図-3. 17のごとく、拘束治具を用いて、試験材両端を拘束して溶接し、拘束の効果进行调查した。溶接法、溶接装置及び溶接材料は表-3. 19に同じ。試験材の形状、寸法、溶接順序及び溶接歪み測定位置は各々、図-3. 12～3. 14と同じ。

試験材は1組、溶接条件は表-3. 20による。

(1) 試験結果

- ① 拘束の効果があり、角変形は殆ど発生しなかった。（角変形量：0.3度以下）
- ② 横収縮量及び縦収縮量は拘束なしでの溶接時と同じように、各々約2 mm 発生した。

道路橋示方書（（社）日本道路協会）では、変形量を板の平面度等で規定している。この規定のウェブ材の平面度をこの試験材に適用すると、角変形量（ α° ）の許容値は約0.9度である。

試験結果と角変形量を図-3. 18に示す。

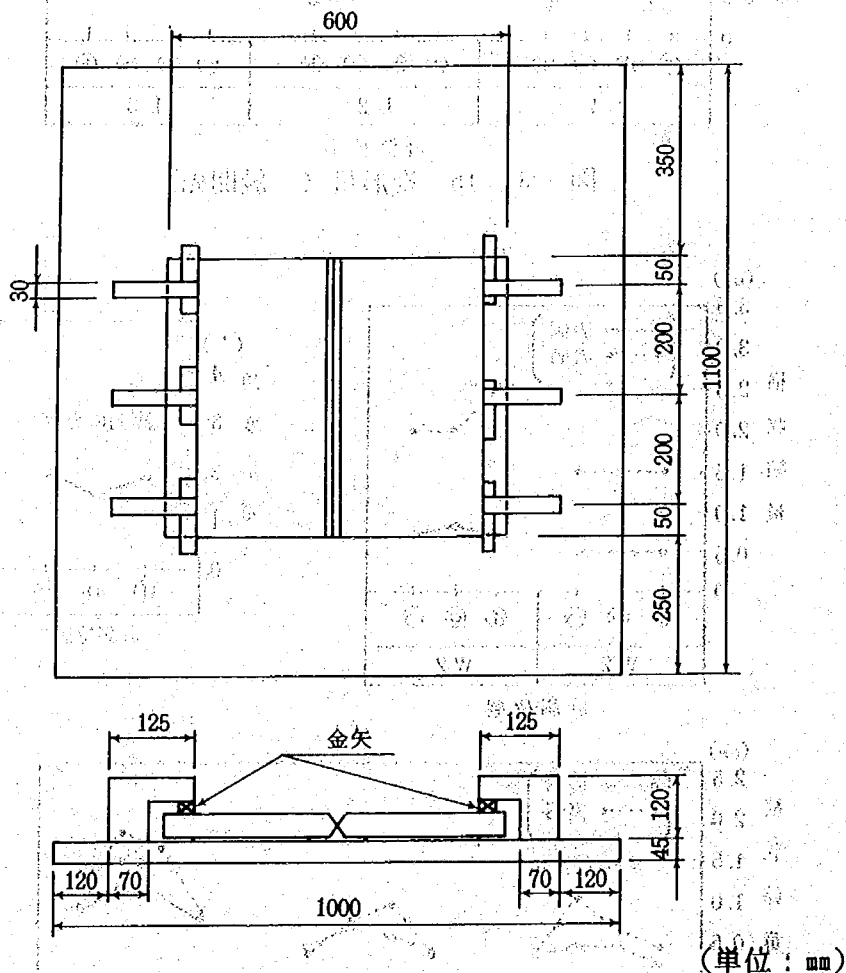


図-3. 17 歪み拘束治具

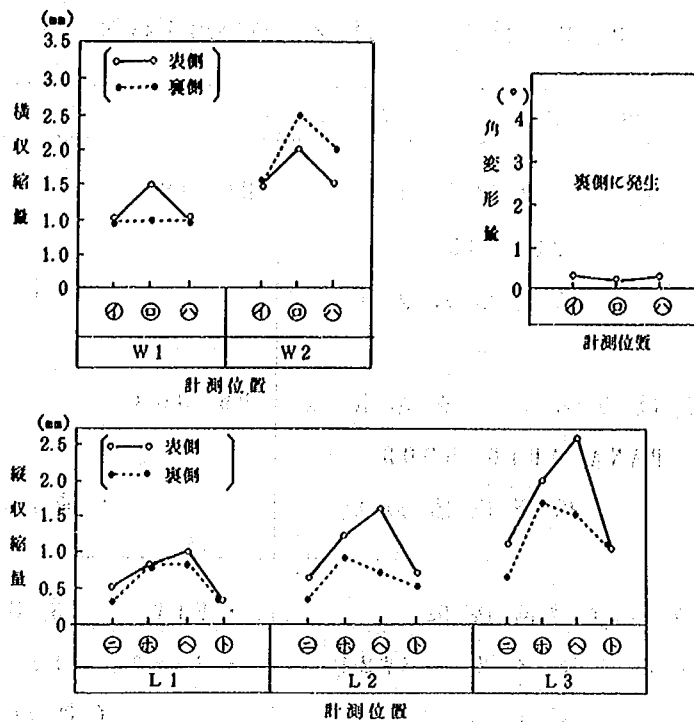


図- 3. 18 各変形量 (拘束、一般開先)

3. 4. 3 すみ肉溶接における歪み発生量の比較

モックアップテストの桁材及びダイヤフラムを利用して、すみ肉溶接による溶接角変形量を各種の溶接方法で拘束の有無の条件で調査を行った。

(1) 供試鋼材

SUS304 (JIS G 4304) 板厚 16mm、20mm、40mm

(2) 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶接法、溶接装置及び溶接材料を表- 3. 21 に示す。

(3) 試験材の形状及び寸法

試験材の形状及び寸法を図- 3. 19 に示す。

(4) 溶接法毎の試験材組数

ダイヤフラムモデル試験材…………… 4 組

被覆アーク溶接…………… 1 組

炭酸ガスアーク…………… 2 組

(内 1 組は歪み拘束で溶接)

サブマージアーク…………… 1 組

桁モデル試験材…………… 6 組

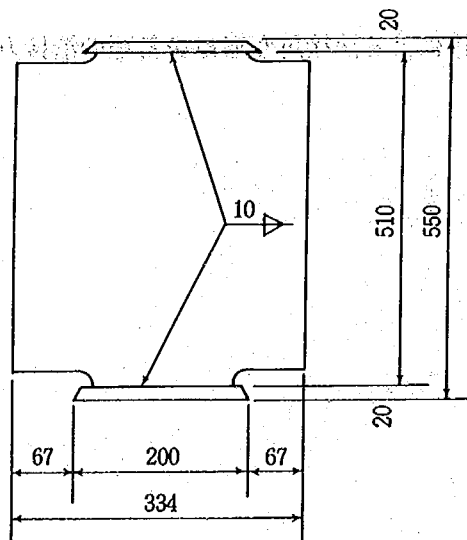
被覆アーク溶接…………… 3 組

炭酸ガスアーク…………… 3 組

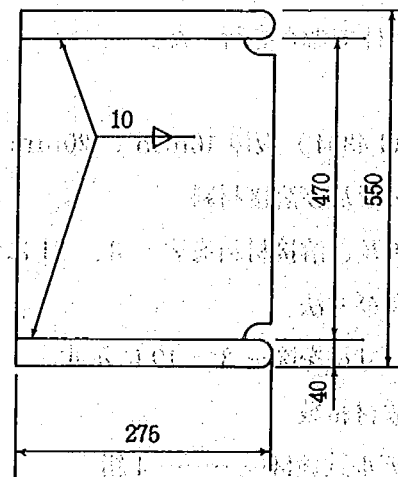
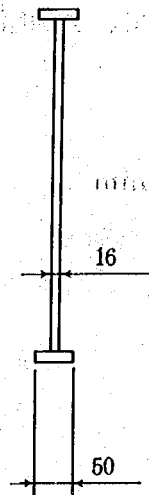
(各々 2 組は歪み拘束で溶接)

表-3. 21 溶接法、溶接装置及び溶接材料

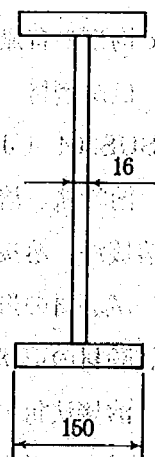
溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 材 料
被 覆 アーク 溶 接	交 流 アーク溶 接 機 (MBL-ARC 500 三 菱 電 機 製)	NC-38 ($\phi 4.0$) (神 戸 製 鋼 所 製)
炭 酸 ガス アーク 溶 接	炭 酸 ガス アーク溶 接 機 (PANA-AUTO 500D 松 下 電 器 製)	DW-308 ($\phi 1.2$) (神 戸 製 鋼 所 製)
サブマージ アーク 溶 接	サブマージアーク溶 接 機 (オートメルトSW24 ダイヘン製)	・ワイヤ US-308 ($\phi 4.0$) ・フラックス PPS-1 (神 戸 製 鋼 所 製)



ダイヤモンドモデル試験材 (4組)



桁モデル試験材 (6組)



(単位: mm)

図-3. 19 すみ肉継手角度変形測定試験材 (単位: mm)

(5) 拘束治具

拘束治具を図-3.20に示す。

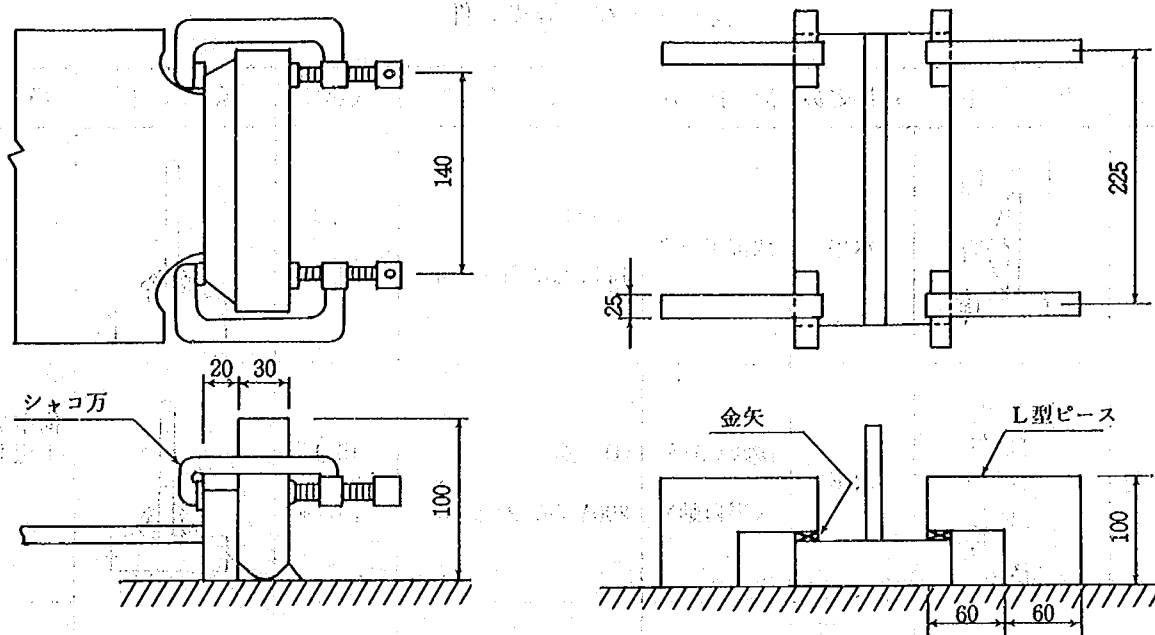


図-3.20 拘束治具

(6) 溶接歪み測定位置

溶接歪みの測定は、角変形を測定した。

測定位置を図-3.21に示す。

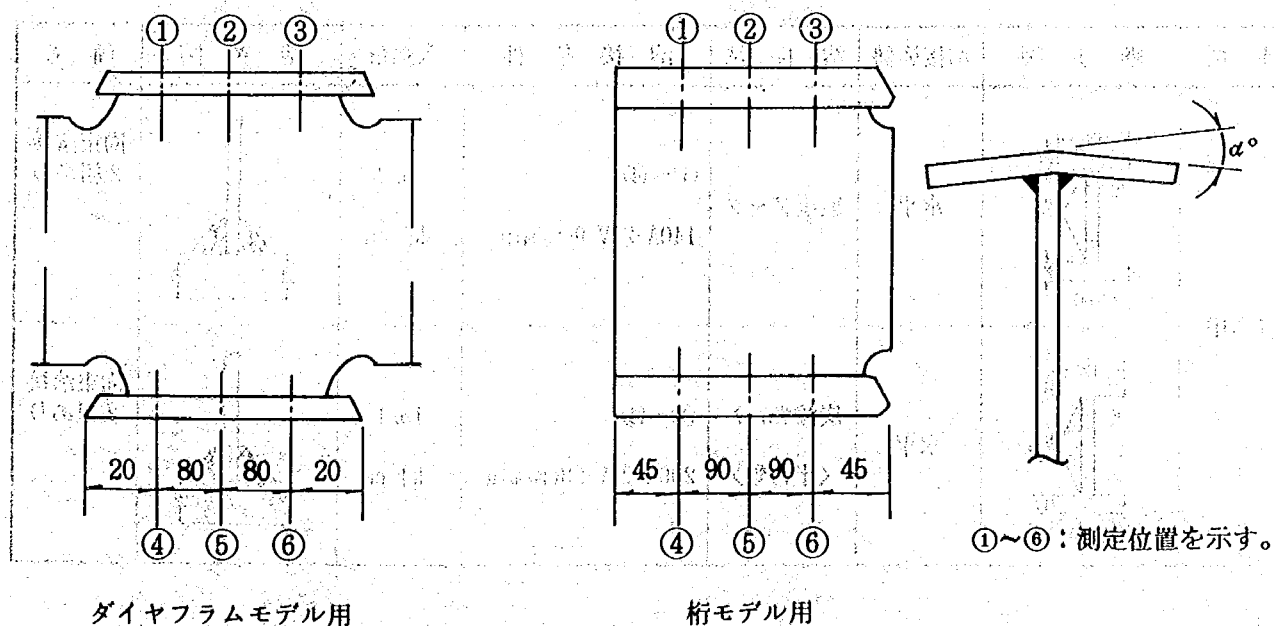


図-3.21 角変形測定位置

(7) 溶接条件

溶接条件を表-3.22及び3.23に示す。

表-3.22 溶接条件

種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
ダイヤフラム モデル用		水平	被覆アーク	①～④ 140A-25V-9cm/min	23.3 kJ/cm		
		水平	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①～④ 200A-29V-23cm/min	15.1 kJ/cm		拘束溶 1組あり
		水平	ガスアーク	① 450A-35V-30cm/min	31.5 kJ/cm		拘束なし

表-3.23 溶接条件

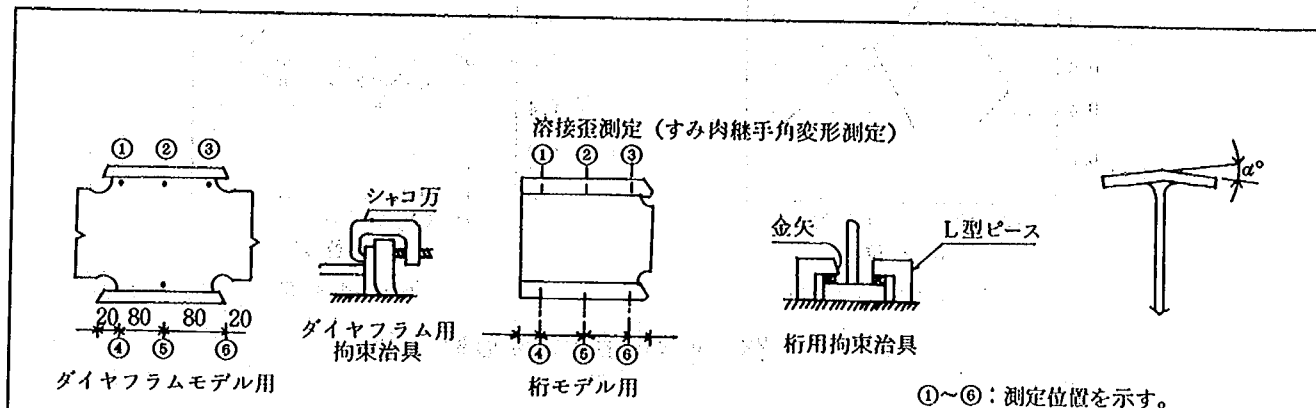
種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
桁モデル用		水平	被覆アーク	①～④ 140A-25V-9cm/min	23.3 kJ/cm		拘束溶接 2組あり
		水平	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①～④ 200A-29V-23cm/min	15.1 kJ/cm		拘束溶接 2組あり

(8) 試験結果

- ① 同溶接法でも拘束なしの場合、拘束ありの約2倍の角変形が発生した。
- ② 拘束しているにもかかわらず、約0.6度の角変形が生じた。これは、溶接作業等を重視し、拘束用のピース等を小さくしすぎたためと試験材が小さく拘束が完全に効かなかったものと思われる。

試験結果を表-3、24に、変形量を図-3、22に示す。

表-3、24 すみ肉溶接歪み測定結果



溶接部位	溶接方法	測定位置 角変形量 (α°) 拘束の有無	1			2			3			4			5			6		
			溶接前	溶接後	変形量	溶接前	溶接後	変形量	溶接前	溶接後	変形量	溶接前	溶接後	変形量	溶接前	溶接後	変形量	溶接前	溶接後	変形量
ダイヤフラムモデル用	被覆アーク	無	0.1	0.6	0.5	0.1	0.9	0.8	0.1	1.0	0.9	0.1	0.7	0.6	0.1	0.8	0.7	0.1	0.9	0.8
	炭酸ガスアーク	無	0.1	0.9	0.8	0.1	1.0	0.9	0.1	1.2	1.1	0.1	1.2	1.1	0.1	1.2	1.1	0.1	1.3	1.2
	炭酸ガスアーク	有	0	0.5	0.5	0	0.3	0.3	0	0.3	0.3	0	0.7	0.7	0	0.5	0.5	0	0.3	0.3
	サブマージアーク	無	0.1	1.2	1.1	0.1	1.6	1.5	0.1	1.1	1.0	0.1	1.3	1.3	0.1	1.1	1.0	0.1	1.1	1.0
桁モデル用	被覆アーク	無	0	1.3	1.3	0	1.5	1.5	0	1.2	1.2	0	1.3	1.3	0	1.3	1.3	0	1.4	1.4
	被覆アーク	有	0	0.6	0.6	0	0.7	0.7	0	0.6	0.6	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.6	0.6
	被覆アーク	有	0	0.9	0.9	0	0.9	0.9	0	0.9	0.9	0	0.9	0.9	0	0.8	0.8	0	0.6	0.6
	炭酸ガスアーク	無	0	1.2	1.2	0	1.2	1.2	0	1.3	1.3	0	1.3	1.3	0	1.3	1.3	0	1.2	1.2
	炭酸ガスアーク	有	0	0.7	0.7	0	0.7	0.7	0	0.4	0.4	0	0.7	0.7	0	0.7	0.7	0	0.7	0.7
	炭酸ガスアーク	有	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.6	0.6	0	0.6	0.6	0	0.6	0.6

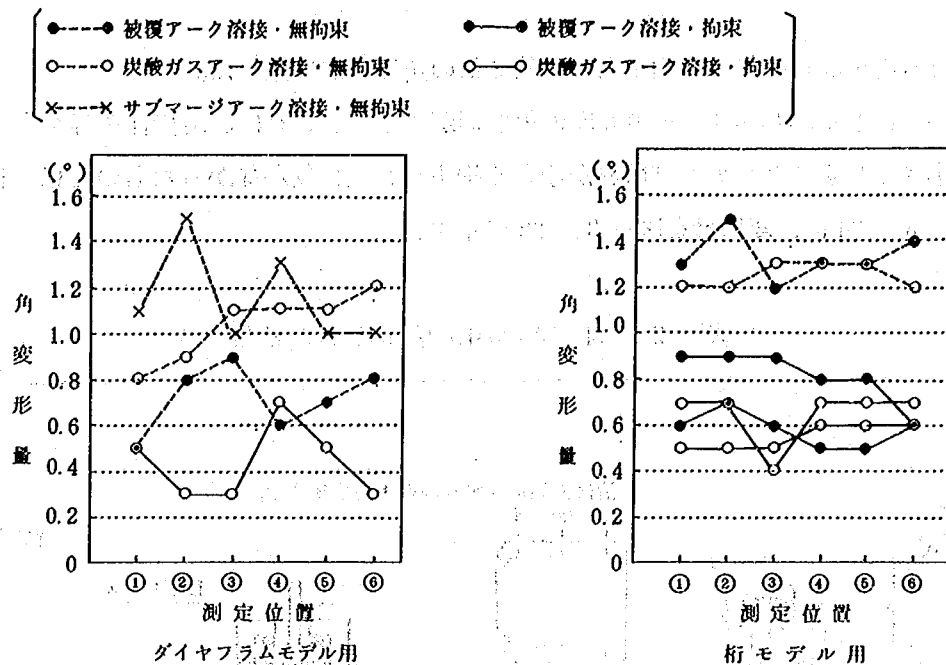


図-3.22 すみ肉溶接、変形量

3.5 ダム構造物のモックアップ確認試験

ダム用ゲートの代表的な構造部分を抜き出し、そのモックアップテストを通して、溶接法、条件及び歪み防止等の確認並びに溶接歪み発生状況を把握した。

3.5.1 脚柱部のモックアップ確認試験

モデル主ゲートの脚注二股部の模型を製作した。

(1) 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶接法、溶接装置及び溶接材料を表-3.25に示す。

(3) 試験項目

- ① 突合せ継手部の放射線透過試験
- ② 突合せ、すみ肉溶接継手各1ヶ所の顕微鏡による鋭敏化測定試験
- ③ 溶接歪み測定試験

表-3.25 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 材 料
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接	炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接 機 (PANA-AUTO 500D 松下電器製)	DW-308 (φ1.2) (神戸製鋼所製)

(4) 試験体の形状、寸法及び溶接歪み測定位置

試験体の形状、寸法及び溶接歪み測定位置を図-3. 23に示す。

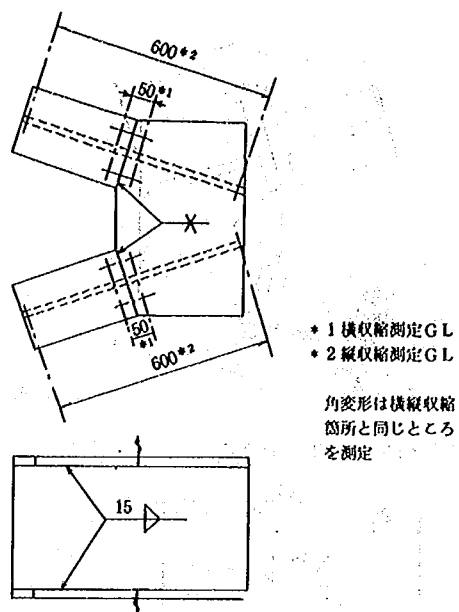


図-3. 23 脚柱モックアップテスト試験体

(5) 鋭敏化測定箇所

鋭敏化測定箇所を図-3. 24に示す。

溶接熱影響の顕微鏡検査により、最鋭敏化部を240倍に拡大し、鋭敏化を求めた。

(3. 3に示す方法)

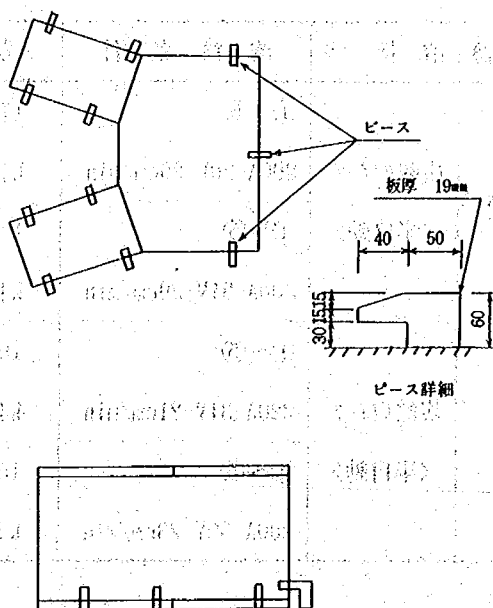


図-3. 24 鋭敏化測定箇所

(6) 溶接歪み防止治具

溶接歪み防止用ピース取付位置を図-3. 25に示す。

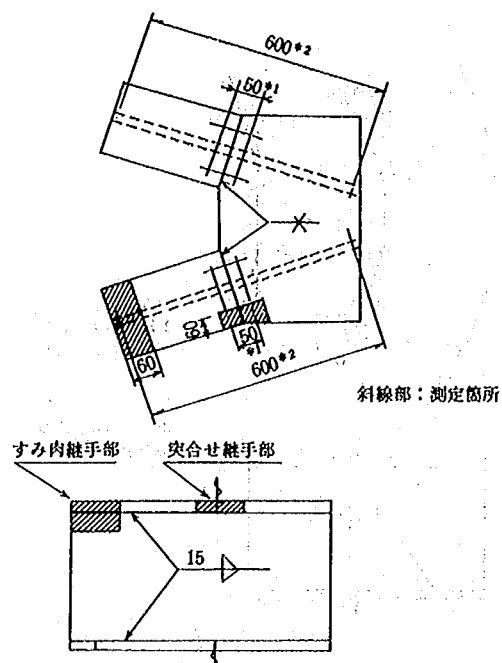
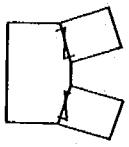
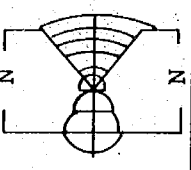
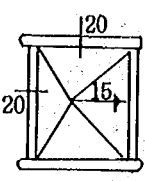
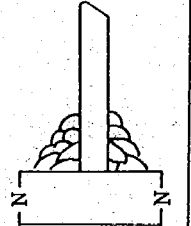


図-3. 25 溶接歪み防止用ピース取付位置

(7) 溶接条件

溶接条件を表-3. 26に示す。

表-3. 26 溶接条件

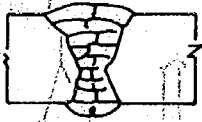
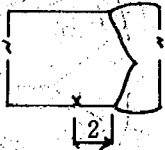
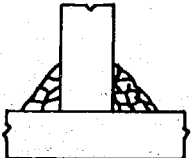
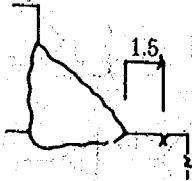
種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
脚 柱 モックアップ テ ス ト	 <2組>	下向き	炭酸ガス7-7 <半自動>	①~⑤ 200A-29V-20cm/min	17.4 kJ/cm		
				①~⑤ 200A-31V-20cm/min	18.6 kJ/cm		
		水平	炭酸ガス7-7 <半自動>	①~⑤ 220A-31V-21cm/min	19.5 kJ/cm		
				①~⑤ 200A-30V-23cm/min	15.7 kJ/cm		

(8) 試験結果

- ① 突合せ部のX線透過試験は全て無欠陥の1級（JIS Z 3106 による）で良好であった。
- ② 突合せ及びすみ肉溶接継手の鋭敏化測定試験は、各継手とも鋭敏化されていなかった。（鋭敏化度 0 %）
- ③ 横収縮量及び縦収縮量は上側も下側も同じように各々約 1.5mm 発生した。
- ④ 角変形は上側、下側とも 0.5 度以下であった。

試験結果を表-3. 27 に、各継手の断面マクロ及びミクロ組織を写真-3. 1（P. 71）、溶接歪み測定結果を表-3. 28 に、各変形量を図-3. 26 に示す。

表-3. 27 脚柱モックアップ試験体による確認調査結果

		X線 フィルム記号	JIS Z3106による判定結果	
			欠陥の種類	等級
突合せ X線透過試験		MK-1-1	なし	1級
		MK-1-2	なし	1級
		MK-2-1	なし	1級
		MK-2-2	なし	1級
	部 位	施 工 条 件	鋭 敏 化 測 定	
			X : 測定位置	鋭敏化度 (%)
鋭敏化測定試験	突合せ	 1~5パス 200A-29V-20cm/min 17.4kJ/cm 6~9パス 200A-31V-20cm/min 18.6kJ/cm		0
	すみ肉	 1~5パス 220A-31V-21cm/min 19.5kJ/cm 6パス 200A-30V-23cm/min 15.7kJ/cm		0

備考：鋭敏化測定値は、鋭敏化ゾーンにおける最高値を示す。

表-3.28 脚柱溶接歪み測定結果

①~④: 測定位置を示す。

上側	W (mm)				ℓ (mm)		α (°)			
	①	②	③	④	⑤	⑥	①	②	③	④
A 溶接前	51.9	51.3	51.3	51.5	601.0	601.0	0	0	0	0
B 溶接後	50.5	49.3	49.9	50.0	599.6	599.5	0.2	0.3	0.1	0.1
A-B 変形量	1.4	2.0	1.4	1.5	1.5	1.5	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1
下側	W (mm)				ℓ (mm)		α (°)			
	①	②	③	④	⑤	⑥	①	②	③	④
A 溶接前	51.1	51.2	50.4	51.5	600.9	601.0	0	0	0	0
B 溶接後	49.6	49.4	48.9	49.8	599.5	599.3	0.5	0.3	0.2	0.3
A-B 変形量	1.5	1.8	1.5	1.7	1.4	1.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3

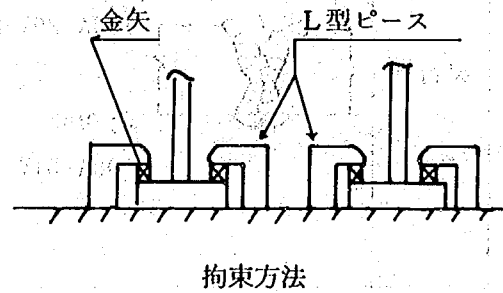
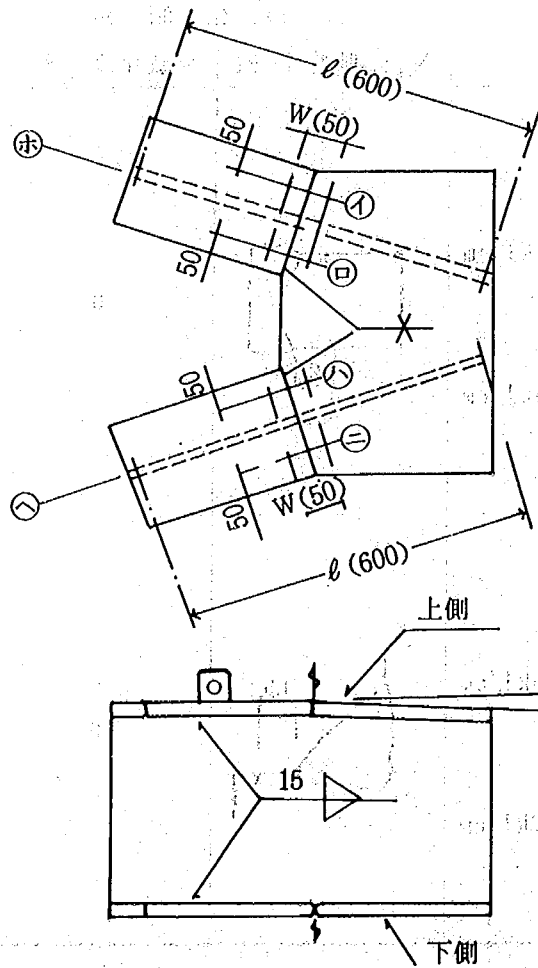


図-3.26 脚柱モックアップ試験体、変形量図

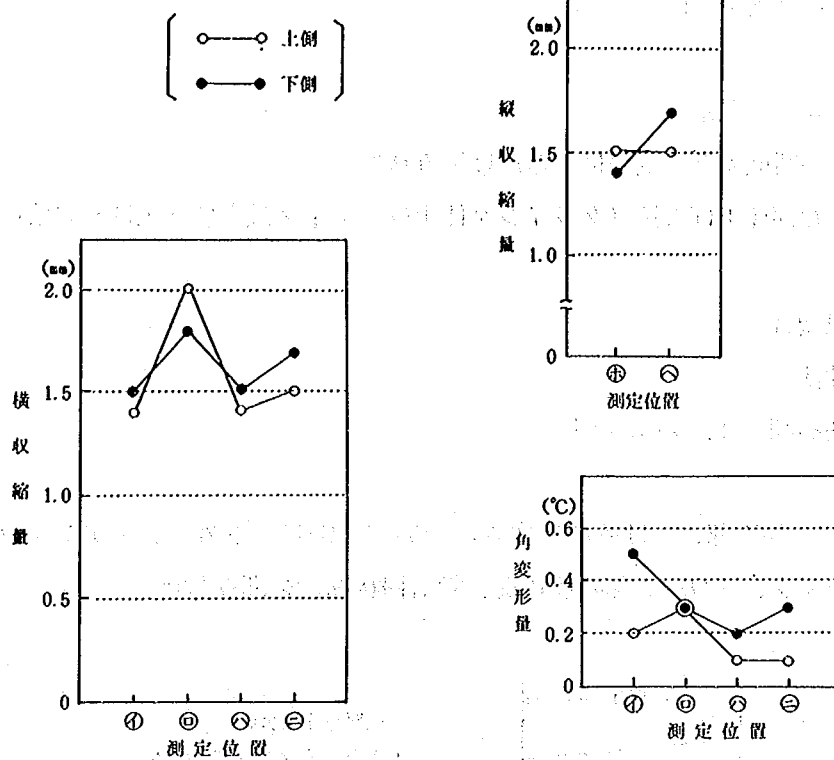


図- 3. 26 脚柱モックアップ試験体、変形量図

3. 5. 2 トラニオン溶接継手部のモックアップ試験 モデル主ゲートのトラニオン部の模型を製作した。

(1) 供試鋼材

SUS304 (JIS G 4304) 板厚 20mm

(2) 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶接法、溶接装置及び溶接材料を表- 3. 29 に示す。

表- 3. 29 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 材 料
炭酸ガスアーク溶接	炭酸ガスアーク溶接機 (PANA-AUTO 500D 松下電器製)	DW-308 (φ 1.2) (神戸製鋼所製品)
ティグ溶接	直流ティグ溶接機 (松下電器製)	TGS-308 (φ 1.2) (神戸製鋼所製品)

(3) 本試験体による調査及び測定項目

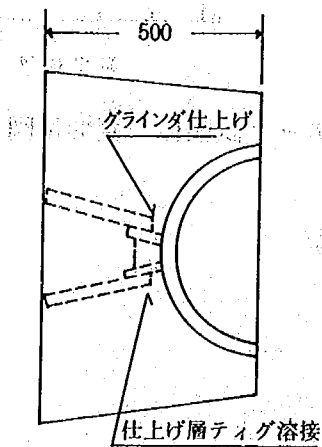
- ① 狭隘部作業性調査
- ② 顕微鏡検査による鋭敏化測定
- ③ 裏当付きレ形継手の断面マクロ試験による溶け込み状態
- ④ 同上継手の溶接止端部仕上げ方法（グラインダ仕上げとティグ最上層仕上げ）の溶接性及び仕上げ面比較
- ⑤ 溶接歪み発生状況調査

(4) 試験体の形状及び寸法

試験体の形状及び寸法を図-3. 27に示す。

(5) 狭隘部作業性調査

ウェブ、フランジ内面の狭隘部における溶接作業について、①ビード外観、②アングカット、③オーバーラップ、④アークストライク、⑤コーナ部処理状況、⑥清掃状況、を調査した。



- 板厚は全て20mm
- トラニオンバブは20mmを
曲げ加工で製作

溶接順序

- ① ウェブメトラニオン
- ② フランジメトラニオン

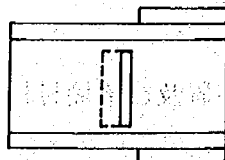


図-3. 27 トラニオン継手溶接試験体

(6) 鋭敏化測定及び断面マクロ試験

裏当付きレ型継手の断面マクロ試験箇所において、溶接熱影響部の顕微鏡検査により、最鋭敏化部を240倍に拡大し、鋭敏化度を求めた。

断面マクロ試験片採取位置を図-3.28に示す。

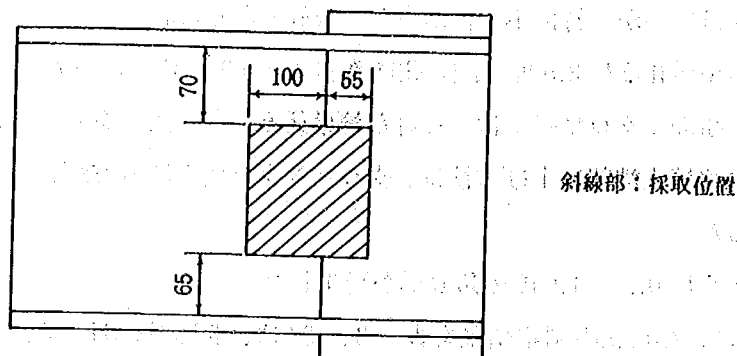


図-3.28 断面マクロ試験片採取位置

(7) 裏当付きレ型継手の溶接止端部仕上げ方法（グラインダ仕上げとティグ最上層仕上げ）の溶接及び、仕上げ面比較。

①開先部の清掃度、②溶接作業製（トーチの扱い等）、③グラインダ仕上げの難易度、④仕上げ面可否について比較した。

(8) 溶接歪み測定位置

溶接歪み測定位置を図-3.29に示す。

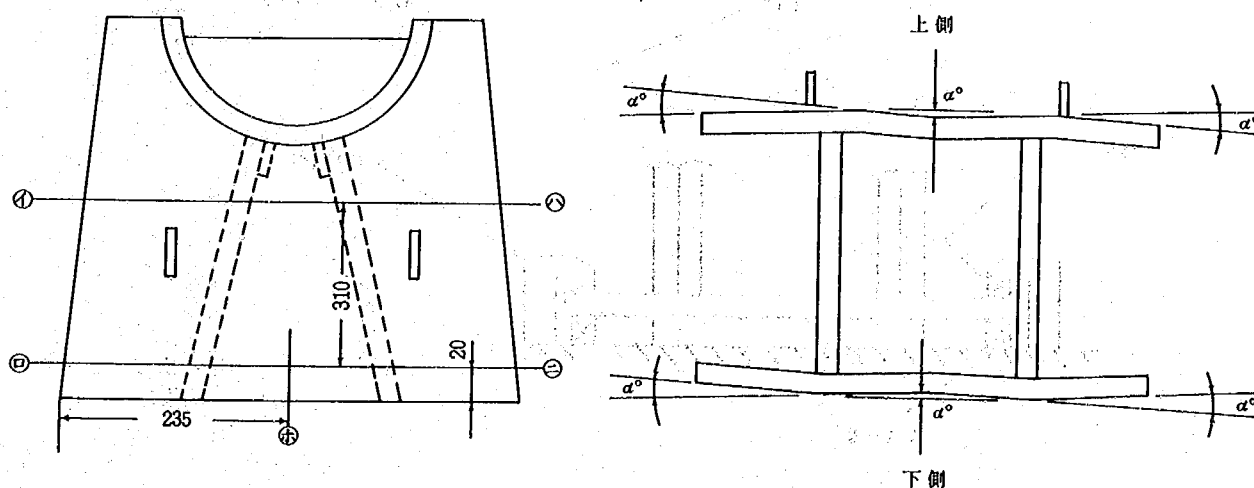


図-3.29 溶接歪み測定位置

(9) 溶接歪み防止治具

溶接歪み防止治具を図- 3. 30 に示す。

(10) 溶接条件

溶接条件を表- 3. 30 及び 3. 31 に示す。

(11) 試験結果

- ① 狭隘部の溶接作業性は悪いが、特に不良箇所もなく良好であった。
- ② 裏当付きレ型継手の鋭敏化度は 3.5 % と鋭敏化度許容値 (5 %) 内であった。
- ③ 裏当付きレ型継手の断面マクロ試験では、良好な溶け込みを有し無欠陥であった。
- ④ 裏当付きレ型継手の溶接止端部仕上げ方法は、グラインダで仕上げる方が、ティグ溶接による最上層仕上げより良好であった。
- ⑤ 上側も下側も同じように 0.6 ~ 1.6 度の角変形が発生した。

試験結果を表- 3. 32 に、溶接歪み測定結果を表- 3. 33 に、変形量を図- 3. 31 に示す。

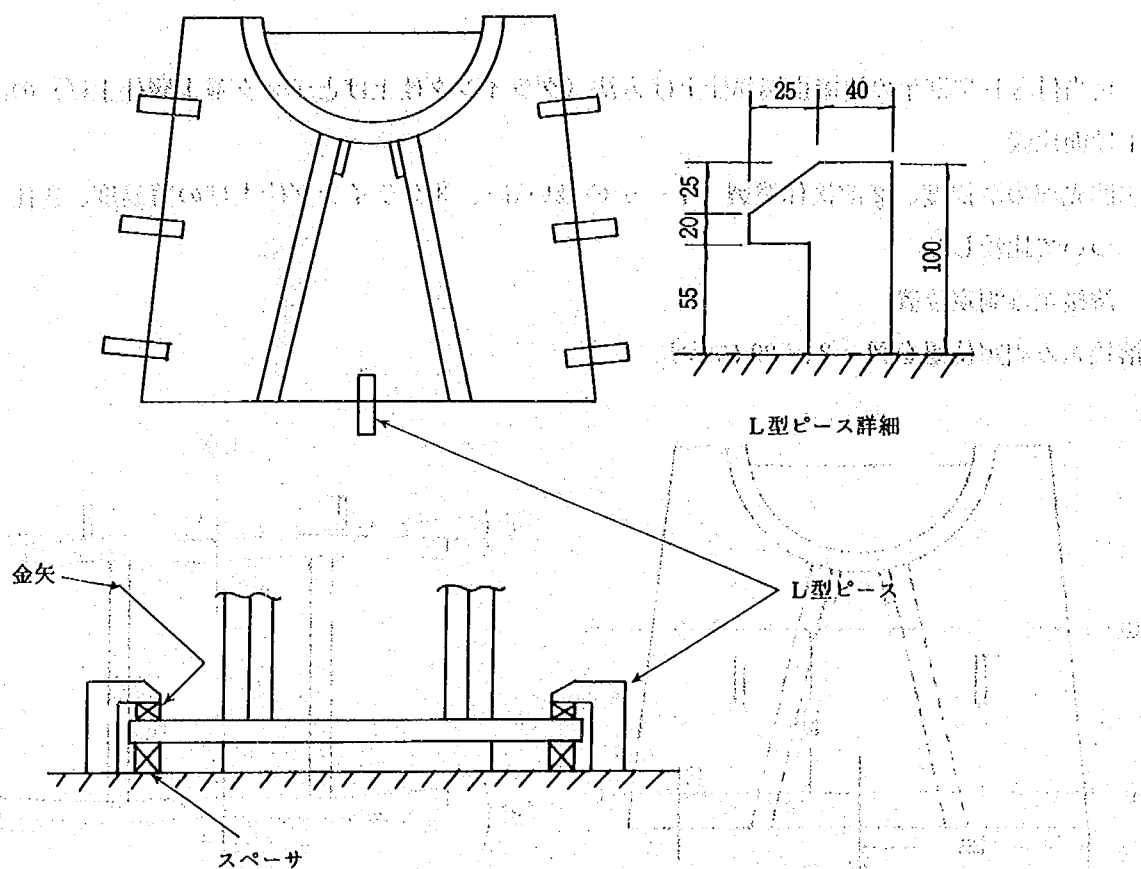


図- 3. 30 溶接歪み防止治具

表-3.30 溶接条件

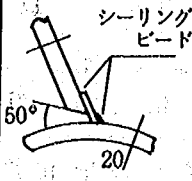
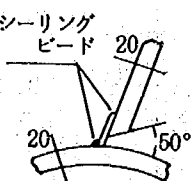
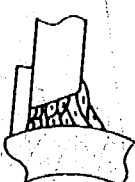
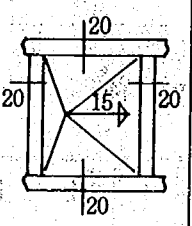
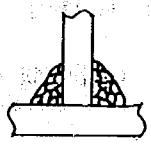
種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
ト ラ ニ オ ン 継 手 溶 接 試 験 体		立向き	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①~④ 150A-23V-9cm/min	23.0 kJ/cm		
				⑤~⑧ 160A-24V-7cm/min	32.9 kJ/cm		
				⑨~⑪ 160A-24V-6cm/min	38.4 kJ/cm		
		立向き	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①~④ 150A-23V-9cm/min	23.0 kJ/cm		
				⑤~⑧ 160A-24V-7cm/min	32.9 kJ/cm		
			ティグアーク	⑩⑪ 120A-10V-6cm/min	12.0 kJ/cm		
		水平	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①~⑤ 200A-30V-21cm/min	17.1 kJ/cm		
				⑥ 200A-29V-23cm/min	15.1 kJ/cm		

表-3.31 溶接条件

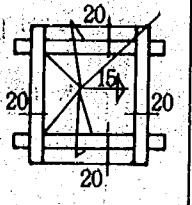
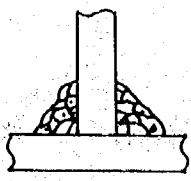
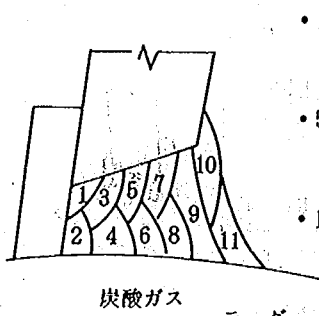
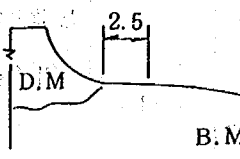
種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
ト ラ ニ オ ン 継 手 溶 接 試 験 体		水平	炭酸ガスアーク 〈半自動〉	①~⑤ 200A-30V-21cm/min	17.1 kJ/cm		
				⑥ 200A-29V-23cm/min	15.1 kJ/cm		

表-3.32 トラニオン継手溶接試験体による確認調査結果

	ビード 外 観	アング カッ	オーバ ラップ	アーク ストライク	コーナ部 処 理 状 況	清 掃 状 況	総 合 判 定
狭 隘 部 作 業 性 調 査	良	なし	なし	なし	良	良	良
	施 工 条 件				鋭 敏 化 測 定		
					X : 測 定 位 置	鋭 敏 化 度 (%)	
鋭 測 敏 定 化 試 験	 ・1~4パス 150A・23V・9cm/min 23kJ/cm ・5~6パス 160A・24V・7cm/min 32.9kJ/cm ・1~4パス 120A・10V・6cm/min 12kJ/cm 炭酸ガス ティグ					3.5	
	溶 け 込 み 状				欠 陥 の 有 無		
裏 当 付 き レ 形 継 手 断 面 マ ク ロ 試 験	良好				無欠陥		
	施 工 方 法	開 先 部 の 清 掃 度	溶 接 作 業 性	グ ラ イ ン グ 仕 上 げ	仕 上 げ 面 比 較		
接 裏 止 当 端 付 部 き 仕 レ 上 形 げ 継 方 手 法 溶	炭 酸 ガ ス アーク 溶 接 + グ ラ イ ン グ 仕 上 げ	・ 軽くワイヤ ブラシ で 磨 く 程 度 で 可	・ 良好 特 に 問 題 な し	・ コーナ部の 処 理 が や や 困 難	・ 良		
	炭 酸 ガ ス アーク 溶 接 + 最 終 層 ティグ 溶 接	・ ヒュームによ る 付 着 物 等 完 全 除 去 必 要 (ティグ 溶 接 時)	・ コーナ部 (エンド部) の 作 業 性 や や 難		・ やや良 ビード 表面 に やや 凹凸 あり		

備考：鋭敏化測定値は、鋭敏化ゾーンにおける最高値を示す。

表-3.33 トラニオン溶接歪み測定結果

	上 側 α (°)					下 側 α (°)				
	イ	ロ	ハ	ニ	ホ	イ	ロ	ハ	ニ	ホ
A 溶接前	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1
B 溶接後	1.0	1.6	1.1	1.5	0.6	0.9	1.9	1.0	1.8	0.9
A ~ B 変 形 量	0.9	1.4	1.0	1.3	0.5	0.7	1.6	0.9	1.7	0.8

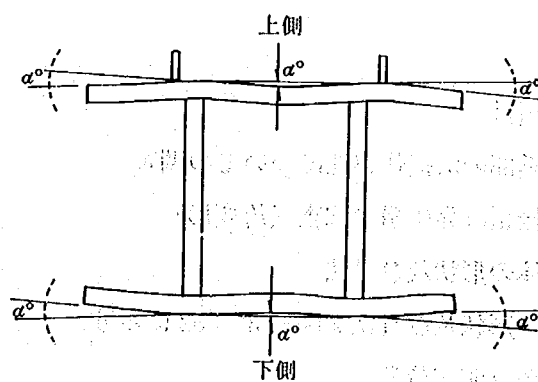
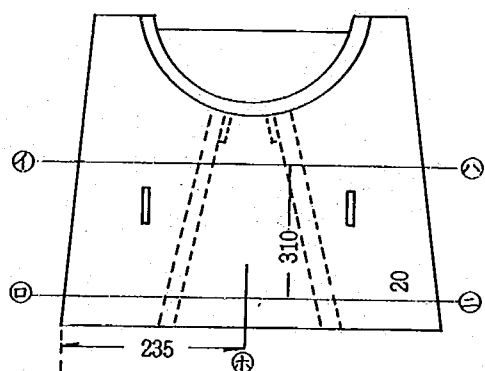
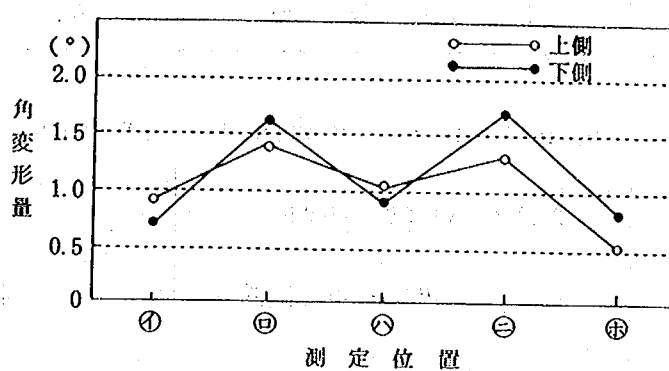


図-3.31 トラニオン、変形量図

3. 5. 3 予備ゲート部のモックアップ試験

本試験は3. 4. 3項のダイヤフラムモデル及び桁モデル試験材を用い、予備ゲートのモックアップ試験体を製作した。

(1) 供試材

SUS304 (JIS G 4304) 板厚 16mm、20mm、40mm

(2) 溶接方法、溶接装置及び溶接材料

溶接法、溶接装置及び溶接材料を表- 3. 34 に示す。

表- 3. 34 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 材 料
炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接	炭 酸 ガ ス ア ー ク 溶 接 機 (P A N A - A U T O 5 0 0 D 松 下 電 器 製)	D W - 3 0 8 (ϕ 1 . 2) (神 戸 製 鋼 所 製)

(3) 調査項目

- ① 狭隘部の溶接作業性についての調査
- ② 溶接歪み発生量の調査 (角変形)

(4) 試験体の形状及び寸法

試験体の形状及び寸法を図- 3. 32 に示す。

(5) 溶接歪み測定位置

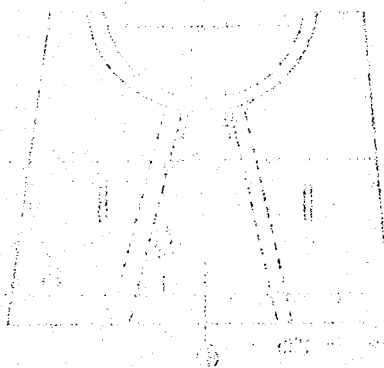
溶接歪み測定位置を図- 3. 33 に示す。

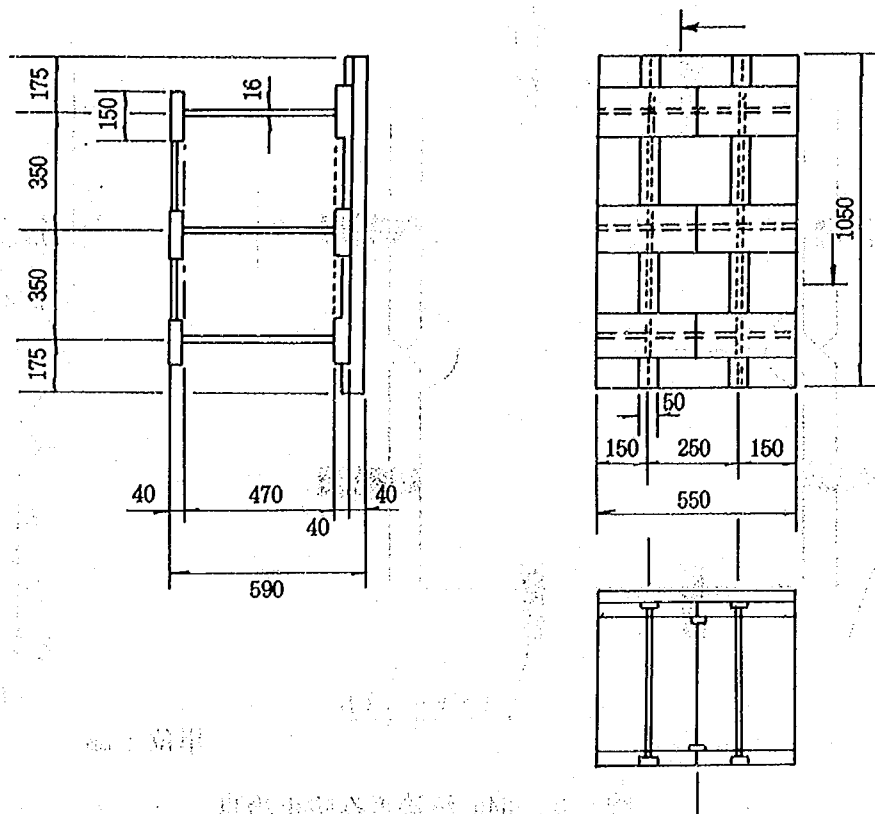
(6) 溶接歪み防止治具

溶接歪み防止治具を図- 3. 34 a ~ 3. 34 d に示す。

(7) 溶接条件

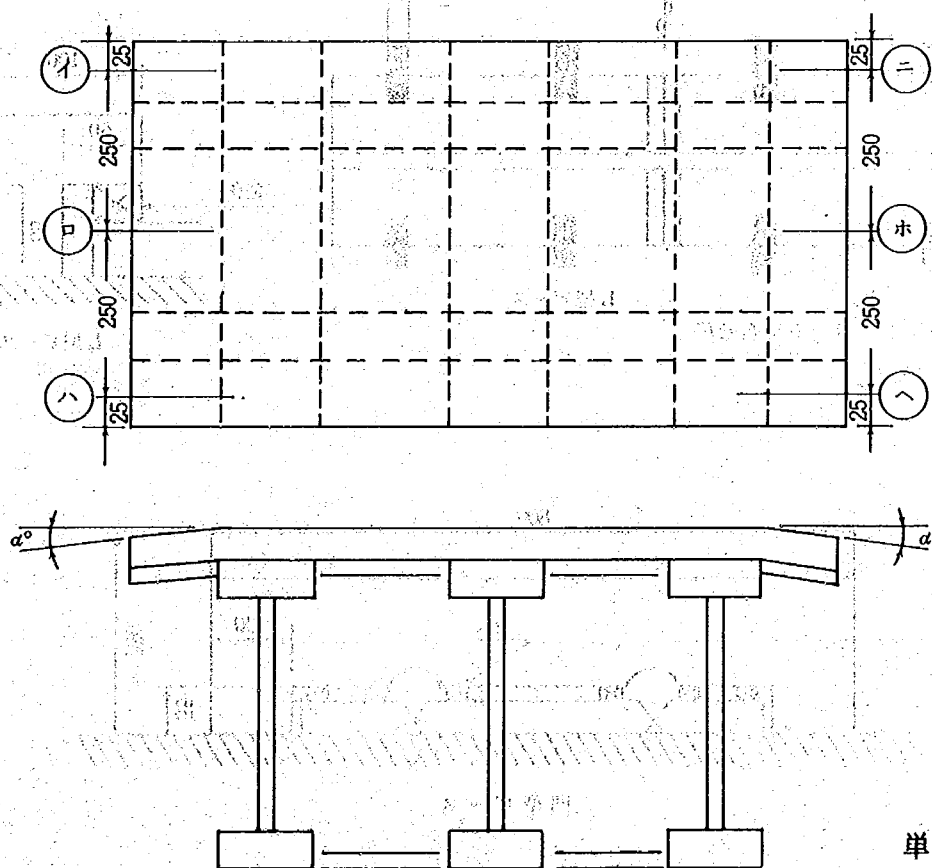
溶接条件を表- 3. 35 に示す。





単位：mm

図-3.32 予備ゲートモックアップ試験体



単位：mm

図-3.33 溶接歪み測定位置

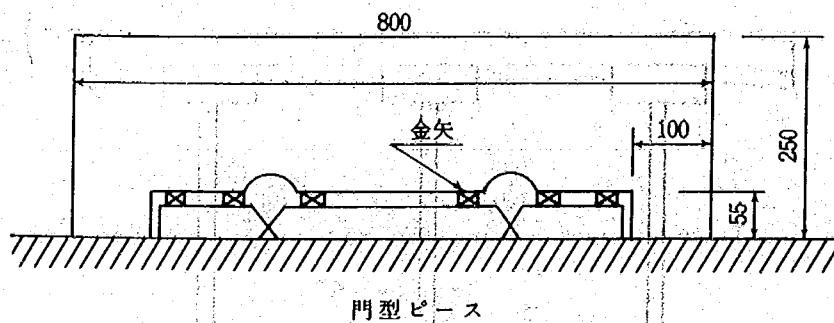
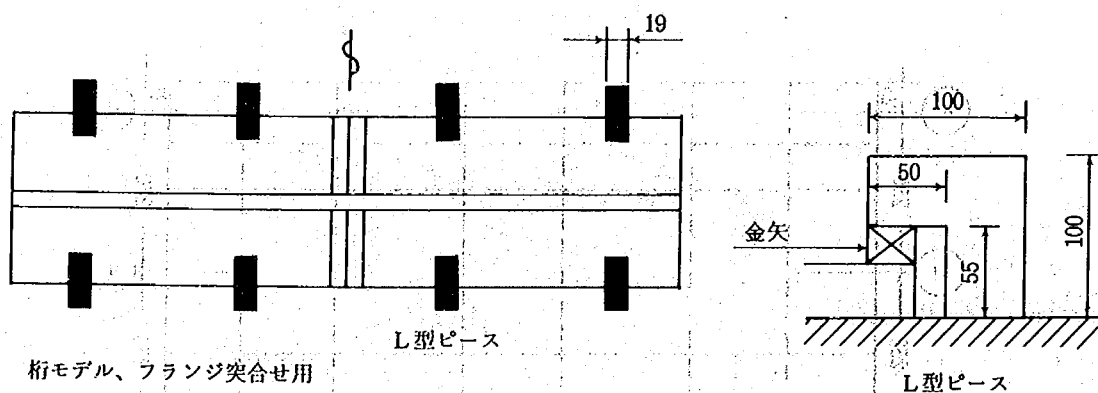
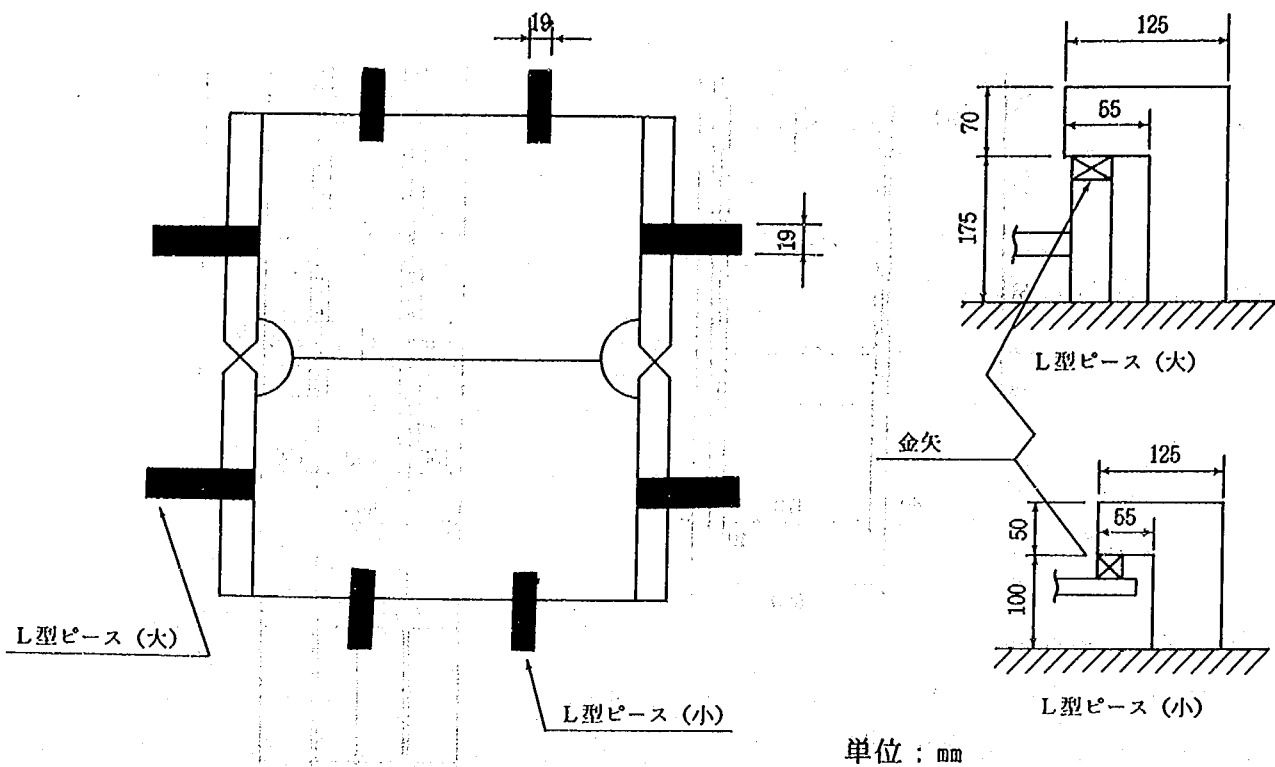
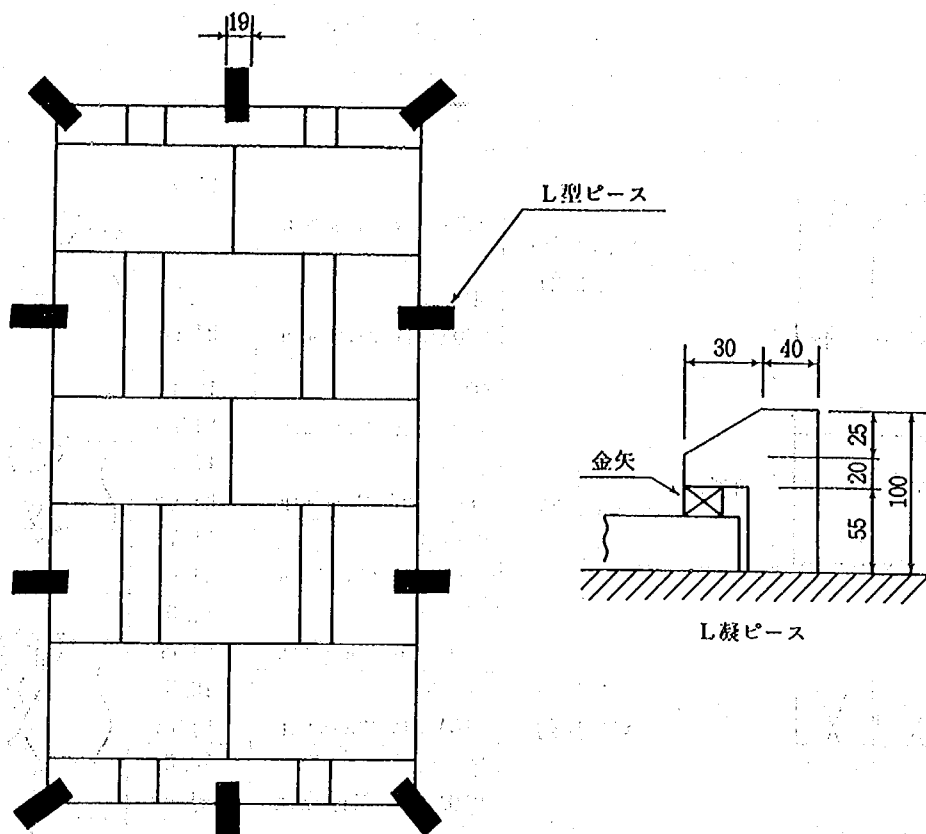


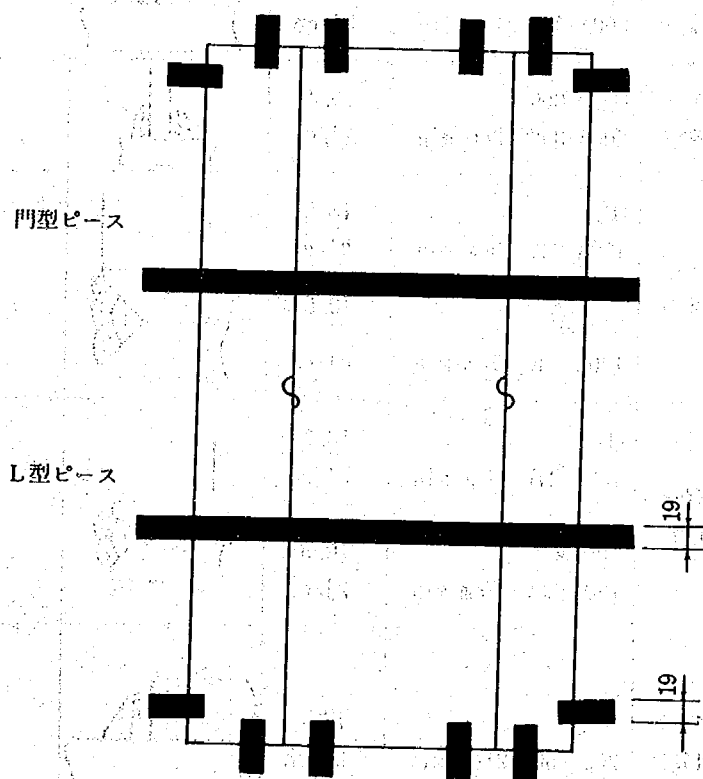
図-3. 34b 溶接歪み防止治具



予備ゲート、総組用

単位：mm

図-3. 34c 溶接歪み防止治具



ベースプレート突合せ用

単位：mm

図-3. 34d 溶接歪み防止治具

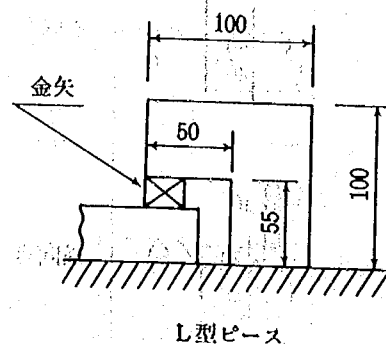
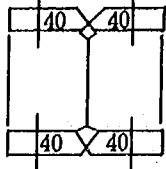
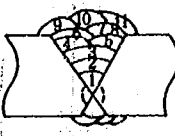
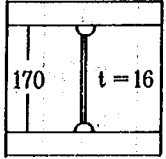
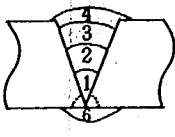
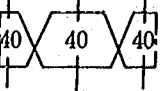
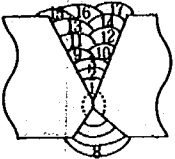
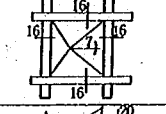
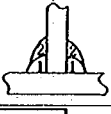
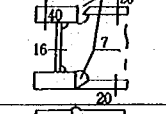
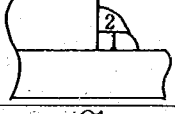
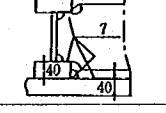
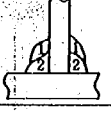
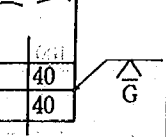
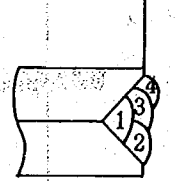
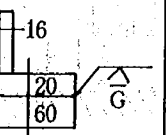
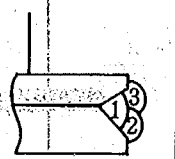
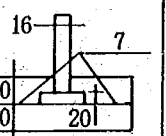
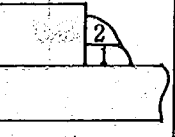


表-3.35 溶接条件

種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
予備ゲート モックアップ 試験体		下向き	炭酸ガスアーク <半自動>	①~③ 200A-29V-24cm/min	14.5 kJ/cm		3組溶接
				④~⑤ 200A-31V-21cm/min	17.7 kJ/cm		
		下向き	炭酸ガスアーク <半自動>	① 200A-29V-23cm/min	15.1 kJ/cm		
				②~④ 200A-30V-21cm/min	17.1 kJ/cm		
				⑤~⑥ 200A-30V-23cm/min	15.7 kJ/cm		
		下向き	炭酸ガスアーク <半自動>	①~③ 210A-29V-23cm/min	15.9 kJ/cm		拘束溶接
				⑨~⑪ 210A-31V-20cm/min	19.5 kJ/cm		
				④~⑧ 210A-30V-21cm/min	18.0 kJ/cm		
		水平	炭酸ガスアーク <半自動>	①② 210A-30V-22cm/min	17.2 kJ/cm		
		下向き	炭酸ガスアーク <半自動>	①~⑥ 200A-30V-21cm/min	17.1 kJ/cm		
		水平	炭酸ガスアーク <半自動>	①② 000 200A-30V-22cm/min	16.4 kJ/cm		
		横向き	炭酸ガスアーク <半自動>	① 150A-24V-16cm/min	13.5 kJ/cm		
				②~④ 130A-23V-17cm/min	10.6 kJ/cm		
		横向き	炭酸ガスアーク <半自動>	① 150A-24V-16cm/min	13.5 kJ/cm		
				②~④ 130A-23V-17cm/min	10.6 kJ/cm		
		水平	炭酸ガスアーク <半自動>	①② 200A-30V-21cm/min	17.1 kJ/cm		

(8) 調査結果

- ① 狭隘部の作業でも、溶接不良箇所がなく、良好であった。
- ② ベースプレートに角変形が1.0～1.9度発生し、特にコーナ部に多く発生した。

これは、溶接作業性を重視し、拘束用ピースを小さくしすぎたためである。

溶接歪み測定結果を表-3.36に、変形量を図-3.35に示す。

表-3.36 予備ゲート、溶接歪み測定結果

		α (°)					
		①	㊦	㊨	㊩	㊪	㊫
A	溶接前	0.4	0.3	0.5	0.6	0.4	0.6
B	溶接後	2.3	1.6	2.1	1.9	1.4	2.0
A - B 変形量		1.9	1.3	1.6	1.3	1.0	1.4

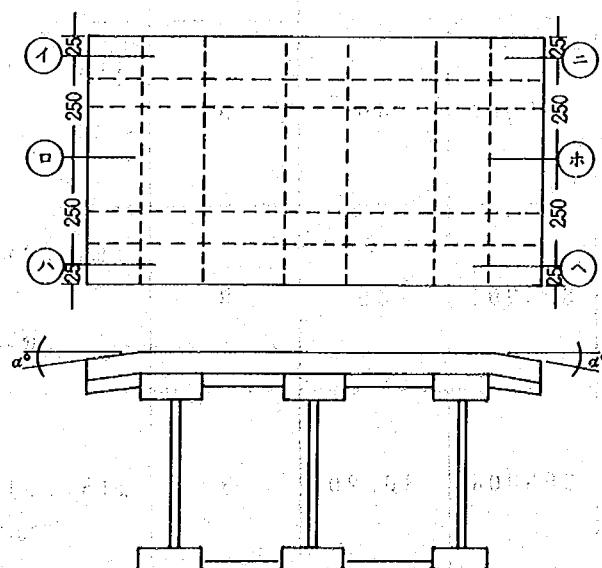
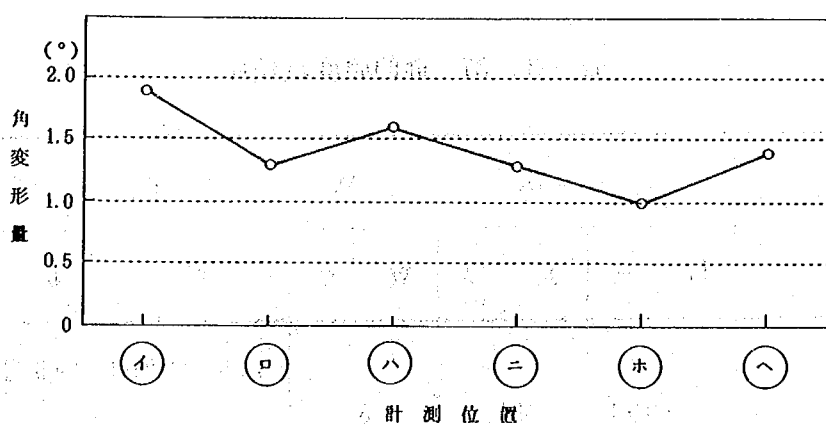


図-3.35 予備ゲート、変形量図

3. 6 ステンレス鋼 (SUS304) の溶接継手部の機械的性質の試験

ステンレス鋼の溶接継手部の機械的性質について試験を行った。試験内容は以下のとおりである。

(1) 静的強度試験

- ・引張強度試験 (母材及び突合せ溶接部)
- ・側曲げ試験 (突合せ溶接部の側曲げ試験)
- ・すみ肉せん断試験
- ・溶接部のマクロ組織試験

(2) 疲労強度試験

- ・部分片振り及び部分両振り疲労試験

3. 6. 1 静的強度試験

(1) 供試体

静的強度試験に用いた試験片の材質、形状を表-3. 37に示す。静的強度試験に用いた突合せ継手の溶接ビードは母材と平滑になるまで切削仕上げを行ったものである。

表-3. 37 静的強度試験片

試 験	試 験 片				備 考
	材 質	板 厚 mm	数 量	形 状	
引 張 強 度 試 験	SUS304	40	3	JIS Z2201 14B号 (W=30mm)	母 材
	SUS304	40	3	JIS Z3121 1号 (W=25mm)	突 合 せ 溶 接 部
側 曲 げ 試 験	SUS304	40	3	JIS Z3122 3号 (W=30mm)	突 合 せ 溶 接 部
す み 肉 せ ん 断 試 験	SUS304	40, 20	3	JIS Z3132 2号	脚 長 9mm

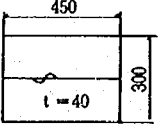
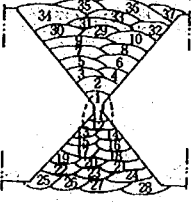
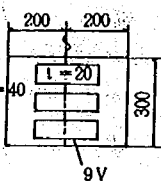
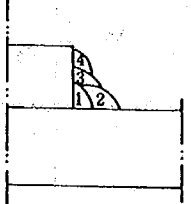
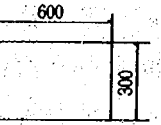
(2) 溶接法及び溶接条件

表-3. 37 に示した引張強度試験（継手）、側曲げ試験、すみ肉せん断試験、溶接部のマクロ組織試験の継手部の溶接法、溶接装置及び溶接材料を表-3. 38 に、また溶接条件を表-3. 39 に示す。

表-3. 38 溶接法、溶接装置及び溶接材料

溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 材 料
被覆アーク溶接	交流アーク溶接機 (MBL-ARC 500 三菱電機)	NC-38 $\phi 4$ (神戸製鋼所製品)

表-3. 39 静的試験継手部の溶接条件

種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
静的強度 試験		下向き	被覆アーク	①～④ 160A-26V-9cm/min	27.8 kJ/cm		①～⑩まで 溶接、反転 後、全部仕 上げ完了後、 表側残り溶 接仕上げ
				⑤～⑩ ②⑨～③⑦ 170A-26V-8cm/min	33.2 kJ/cm		
				⑪～⑲ 170A-25V-8cm/min	31.9 kJ/cm		
		水平	被覆アーク	①～④ 150A-26V-9cm/min	—		
		母材	—	—	—	—	

(3) 試験方法

試験方法を表-3. 40に示す。

表-3. 40 静的強度試験方法

試 験	方 法	測 定 項 目	備 考
引 張 強 度 試 験	JIS Z2241 による	母材：引張強さ 耐破断伸び 継手：引張強さ	
側 曲 げ 試 験	JIS Z3122 による (試験用治具はA3型)	曲げた後の鋼表面の観察	
すみ肉せん断試験	JIS Z2241 による	引 張 強 さ	試験片の引張強さか溶接部のせん断強さを求める。
溶接部のマクロ組織試験	鋼表面の機械仕上げした後、王水等により腐食	鋼表面の観察	

3. 6. 2 疲労強度試験

(1) 供試体

疲労強度試験に用いた試験片の材質、形状を表-3. 41に示す。疲労試験に用いた突合せ継手の溶接ビードは形状係数の影響を考慮しステンレス鋼に対し、3種類とした。

表-3. 41 疲労強度試験片

試 験	試 験 片				備 考
	材 質	板 厚 mm	数量 (*)	形 状	
疲労強度試験	SUS304	12	10	JIS Z3103 仕上げ突合せ溶接継手試験片 W=24mm	母 材
			10		被覆アーク溶接 (ビード部仕上げ)
			10		被覆アーク溶接 (ビード付き)
			10		被覆アーク溶接 + 表層のみティグ溶接 (ビード付き)
	SS400	12	10		被覆アーク溶接 ビード付き

試験片の数量は10を上限とし、10個以下でS-N 曲線を描くに十分と判断できた場合は試験を打ち切った。

(2) 溶接法及び溶接条件

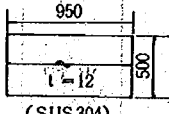
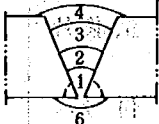
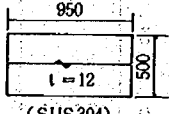
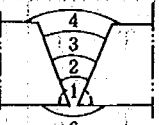
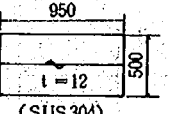
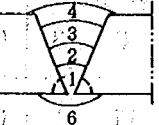
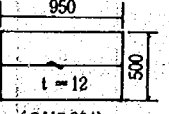
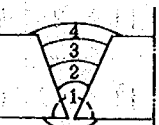
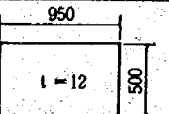
疲労強度試験の継手部の溶接法を表-3.41に、溶接装置及び溶接材料を表-3.42に、また溶接条件を表-3.43に示す。

表-3.42 溶接法、溶接装置及び溶接材料

母材材質	溶 接 法	溶 接 装 置	溶 接 材 料
SUS304	被覆アーク溶接	交流アーク溶接機 (MEL-ARC 500 三菱電機製)	NC-38 $\phi 3.2$ 及び $\phi 4.0$ (*) (神戸製鋼所製)
	ティグアーク溶接	直接ティグ溶接機 (松下電器製)	TGS-308 $\phi 2.0$ (神戸製鋼所製)
SS400	被覆アーク溶接	交流アーク溶接機 (MEL-ARC 500 三菱電機製)	LB-47 $\phi 3.2$ 及び $\phi 4.0$ (*) (神戸製鋼所製)

(*) 1層目は $\phi 3.2$ ，その他は $\phi 4.0$

表-3.43 疲労強度試験継手部の溶接条件

種 類	継 手 図	溶接姿勢	溶 接 法	溶 接 条 件	入熱量	積 層 図	備 考
疲労強度 試験	 (SUS304)	下向き	被覆アーク	① 120A-24V-9cm/min	19.2 kJ/cm		ビード部 仕上げ
				②~④ 145A-26V-8cm/min	28.2 kJ/cm		
	 (SUS304)	下向き	被覆アーク	① 120A-24V-9cm/min	19.2 kJ/cm		ビード そのまま
				②~④ 145A-26V-8cm/min	28.2 kJ/cm		
	 (SUS304)	下向き	被覆アーク	① 125A-24V-9cm/min	20.0 kJ/cm		ビード そのまま
				②~④ 150A-26V-8cm/min	29.3 kJ/cm		
	 (SUS304)	下向き	被覆アーク	① 120A-24V-9cm/min	19.2 kJ/cm		ビード そのまま 仕上げ
			ティグアーク	④ 110A-10V-5cm/min	13.2 kJ/cm		
	 (SUS304)	母材	—	—	—	—	

(3) 試験方法

試験片に、ステンレス鋼（SUS304）を高圧ゲートに適用した場合の許容引張力度にほぼ等しい静的引張応力（ $\sigma_t = 900\text{kgf/cm}^2$ ）を作用させた後に、引張、圧縮による応力振幅を加え疲労強度試験を行った。

応力振幅の載荷回数は 2×10^6 回程度を上限とした。載荷サイクルは試験片が発熱しないように、各応力振幅により変化させた。具体的には試験片が手で触られる温度領域とするため、載荷サイクルを 1～15Hz とした。

(4) 試験結果

① 静的強度試験

○引張強度試験

SUS304 の引張強度試験結果を表-3.44 に示す。

各母材試験片の測定値は JIS を十分満足しており、また、突合せ継手部の強度は母材強度を 7 % 程度上回っている。

○側曲げ試験

側曲げ試験の結果、180° 曲げた後の鋼表面には欠陥はなく、十分な延性を示した。

表-3.44 静的引張試験結果

試験片		引張強度 (kgf/cm ²)			0.2%耐力 (kgf/cm ²)			伸び (%)		
材質	試験片 付号		平均	JIS 値		平均	JIS 値		平均	JIS 値
SUS304 母材	T-1	6040	6060	5300	2660	2790	2100	59.5	60.2	40 以上
	T-2	6060		以上	2870		以上	60.0		
	T-3	6080			2840			61.0		
SUS304 突合せ 継手	JT-1	6530	6493					—		—
	JT-2	6510						—		
	JT-3	6440						—		

○すみ肉せん断試験

すみ肉せん断試験結果を表－ 3. 45 に示す。

○溶接部のマクロ組織試験

鋼表面はステンレス鋼の場合は王水（硝酸 25 %、塩酸 75 %）、軟鋼の場合はナイトル（硝酸 5 %、アルコール 95 %）により腐食させた。ステンレス鋼は軟鋼に比べると熱伝導率が小さいため、溶接時の母材への溶け込み範囲が狭いが、溶接欠陥はなかった。ステンレス鋼のビード形状を観察すると表層をティグ溶接したものは被覆アーク溶接のみで仕上げたものと比べるとビードが小さく、鋼表面が滑らかに仕上がっていることがわかる。せん断試験後の試験片の断面をみると、せん断はすみ肉溶接部のど厚に相当する箇所で生じていることから、溶接材料が十分母材に溶け込んでおり、最もせん断面積が小さい位置で切断されていることがわかる。

表－ 3. 45 すみ肉せん断試験結果

試 験 片		せん断強さ (kgf/cm ²)	平均値 τ_a (kgf/cm ²)	$\sigma_{BT}/\sqrt{3}$ (kgf/cm ²)	$\sigma_{BJ}/\sqrt{3}$ (kgf/cm ²)	$\sigma_{BJIS}/\sqrt{3}$ (kgf/cm ²)
材 質	試験片 付 号					
SUS304	1	3680	3650	3499	3749	3060
	2	3490				
	3	3780				

σ_{BT} : 母材引張試験の引張強さ
 σ_{BJ} : 継手部引張試験の引張強さ
 σ_{BJIS} : JIS規格による母材の引張強さ

② 疲労強度試験

疲労強度試験結果を図－ 3. 36 に示す。これより、ステンレス鋼の母材と突合せ溶接継手（ビードなし）を比較すると、溶接継手部の疲労強度は母材と同等と考えられる。ビードをつけたままの継手部の疲労強度は、応力集中の影響を受けるためビードなしの継手部強度を下回る。その低下の程度はビード形状に左右され、鋼表面が滑らかであるティグ溶接を併用したものは低下量が少なかった。

軟鋼（SS 材）の疲労強度は今回の試験の中では最も小さかったが、これは継手形状の影響によるものと考えられる。

図－ 3. 36 よりステンレス鋼（SUS304）の溶接継手は、ビードつきの状態であっても（静的引張応力 900kgf/cm²）±（応力振幅 900kgf/cm²）程度の疲労強度を有することがわかった。一般に、ダムゲート等で振動に伴って部材に発生する応力は静的な荷重における応力の 10 %程度であるといわれていることと比較すれば、ステンレス鋼の溶接継手は疲労に対して十分安全であるといえる。

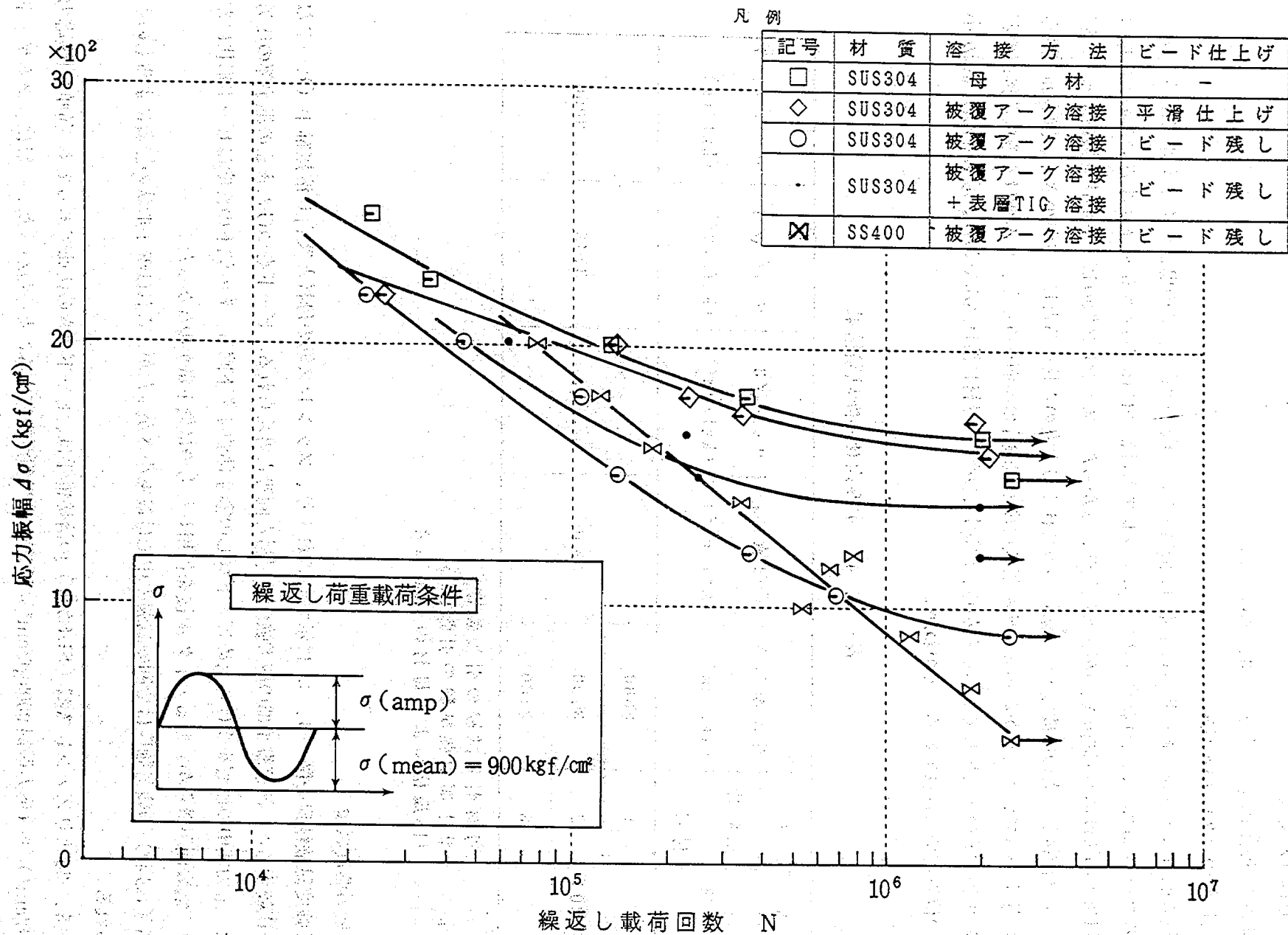


図-3.36 疲労強度試験結果

3. 6. 3 突合せ溶接継手部の余盛り形状と疲労強度に関する考察

図-3. 36に示すステンレス鋼 (SUS304) の疲労強度試験では、溶接ビードを母材と平滑になるまで仕上げた突合せ溶接継手 (被覆アーク溶接) は、母材とほぼ同等の疲労強度が得られたが、ビードを残した試験片はビード部の応力集中の影響により疲労強度が大きく変化した。そこで各継手の応力集中係数を求め、疲労強度試験結果を整理してみた。

(1) 応力集中係数について

余盛り形状の主因子は、図-3. 37に示すとおりである。

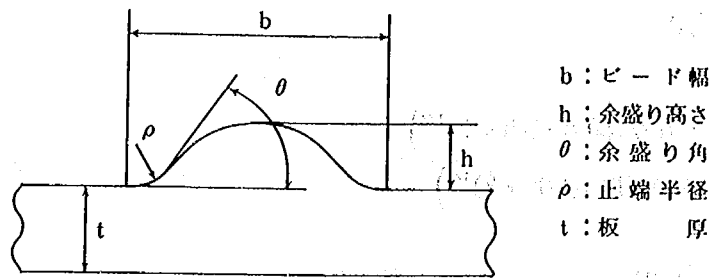


図-3. 37 余盛り形状の主因子

寺崎、秋山ら (注1) は各方面での実験結果を整理し、これらの主因子の平均値及び偏差を求めた。結果を表-3. 46に示す。また、応力集中率を求めるのに体積力法が有効であることを確認した上で、応力集中率を求めるための簡易式を提示している。また、G.P.TURMOV (注2) も同様のパラメータを用いて簡易式を導き、光弾力性モデル実験と比較検討して、簡易式が精密解に対して10%の誤差以内であることを報告している。

表-3. 46 各種溶接条件による余盛り形状の平均値と偏差

W. P.	$\rho \pm$ (mm)	$\theta \pm S$ (deg)	$h \pm$ (mm)	$b \pm s$ (mm)
EBW1	0.52 ± 0.14	49.2 ± 5.8	1.53 ± 0.17	4.2 ± 0.4
EBW2	0.83 ± 0.15	23.2 ± 3.9	0.94 ± 0.13	5.5 ± 0.7
EBW3	0.94 ± 0.31	29.7 ± 14.7	1.01 ± 0.55	4.2 ± 1.7
CO2W	0.64 ± 0.15	23.3 ± 5.0	2.42 ± 0.52	22.0 ± 1.5
SAW	0.67 ± 0.76	45.0 ± 11.2	—	—
SMAW1	2.26 ± 2.67	—	2.51 ± 0.69	—
SMAW2	2.08 ± 0.86	31.9 ± 10.9	3.72 ± 0.54	—

EBW : 電子ビーム溶接

SAW : サブマージアーク溶接

CO2W : 炭酸ガスアーク溶接

SMAW : 被覆アーク溶接

(注1) 寺崎俊夫、秋山哲也、横島直彦(他)：余盛り形状と応力集中係数、溶接学会誌第51巻 第9号 1982

(注2) G.P.TURMOV : Determining the coefficient of concentration of stresses in welding joints, Avtom, Svarka, 1976, No.10, pp14-16

寺崎、秋山らが示した簡易式を(1)式に示す。

$$Kt_1 - 1 = 0.68 (b/t)^{0.2} \cdot A \cdot Q^{0.3} \dots\dots\dots (1)式$$

ここに Kt_1 : 応力集中率

b : ビード幅

h : 余盛り高さ

t : 板厚

$$A = \frac{1 - \exp(-0.9 \times \pi \theta / 180 \times (t/h + 2)^{1/2})}{1 - \exp(-0.45 \times \pi \times (t/h + 2)^{1/2})}$$

$$Q = \frac{h}{p \times (5.6(h/t) + 0.8)}$$

但し、適当範囲は

余盛り形状：V開先やレ開先の余盛り

$$0.1 \geq h/p \geq 80$$

$$0.15 \leq b/t \leq 2.3$$

$$0.05 \leq h/t \leq 0.25$$

G.P.TURMOVが示した簡易式を(2)式に示す。

$$Kt_1 - 1 = 1.1 (h/t) ((b/t) + 1) (h/p)^{0.5} \dots\dots\dots (2)式$$

(2) 疲労強度試験結果の整理

前述のうち、(1)式はV型開先やレ型開先に適用した式であるが、今回の疲労強度試験の溶接開先(X型)にも適用できるものとする。

① 余盛り形状の主因子

余盛り形状の主因子のうち、板厚 t 、ビード幅 b 、余盛り高さ h については、継手部断面写真より計測するものとする。但し、止端半径 p は写真より判断できないため表-3. 47の平均値(2.17mm)を使用する。

各継手の断面写真を写真-3. 2～写真-3. 5に示す。

② 応力集中係数

表-3. 47に示した主因子の値をもとに(1)式により、応力集中率を求めた結果を表-3. 48に示す。

また、(2)式により応力集中率を求めた結果を表-3. 49に示す。



写真-3. 2 ステンレス鋼マクロ組織試験
(被覆アーク溶接継手ビード仕上げ)

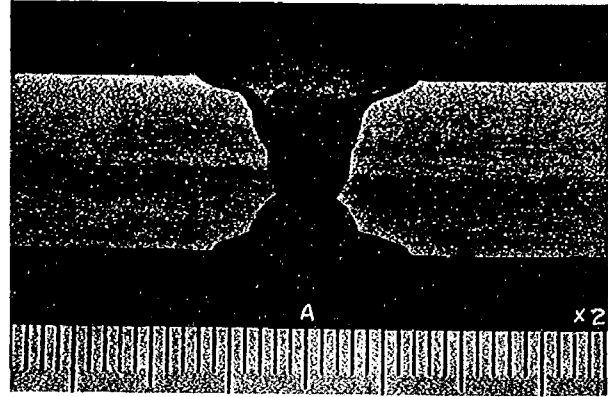


写真-3. 3 ステンレス鋼マクロ組織試験
(被覆アーク溶接継手ビードあり)



写真-3. 4 ステンレス鋼マクロ組織試験
(被覆アーク溶接+表層TIG溶接継手部ビードあり)

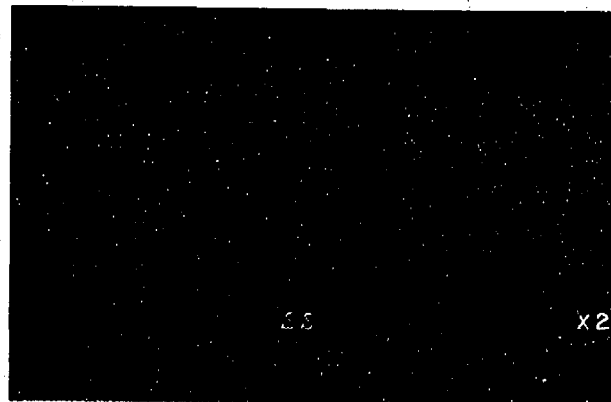


写真3. 5 軟鋼(SS400) マクロ組織試験
(被覆アーク溶接継手部ビードあり)

表-3. 47 疲労強度試験片の余盛り形状主因子

No	鋼材の 種類	溶 接 方 法	板 厚 t (mm)	ビード幅 b (mm)	余盛り高さ h (mm)	余盛り高さ θ (°)	止端半径 p (mm)
1	SUS304	被覆アーク溶接	11.69	13.45	3.41	29.5	2.17
2	SUS304	被覆アーク溶接 +表層TIG溶接	11.84	12.50	1.16	8.0	2.17
3	SS400	被覆アーク溶接	10.07	12.75	5.33	39.0	2.17

表-3. 48 疲労強度試験片の応力集中係数(1) (寺崎、秋山ら)

No	t	b	h	θ	ρ	A	Q	Kt_1
1	11.69	13.45	3.41	30.0	2.17	0.686	0.646	1.42
2	11.84	12.50	1.16	8.0	2.17	0.358	0.396	1.19
3	10.07	12.75	5.33	40.0	2.17	0.747	0.653	1.47

表-3. 49 疲労強度試験片の応力集中係数(2) (G. P. TURMOV)

No	t	b	h	θ	ρ	Kt_2
1	11.69	13.45	3.41	30.0	2.17	1.93
2	11.84	12.50	1.16	8.0	2.17	1.17
3	10.07	12.75	5.33	40.0	2.17	3.38

③ 疲労強度試験結果の検討

図-3. 36に示す疲労強度試験結果より各継手部の疲労強度は表-3. 50のとおりであった。

表-3. 50の()内の数値は計算値と実験値の比を示す。

寺崎、秋山らの(1)式ではSS400における計算値と実験値との整合性がよくないが、G.P.TURMOVの式によると今回行った全てのケースにおいて計算値と実験値との誤差は5%以内であった。

表-3. 50 各種継手の疲労強度

鋼材の種類	溶接方法	ビード仕上げ	疲労強度 (kgf/cm ²)	σ 。母材) Kt ₁	σ 。母材) Kt ₂
SUS304	母材	_____	1650	1650(1.00)	1650(1.00)
SUS304	被覆アーク溶接	平滑仕上げ	1600	1650(1.03)	1650(1.03)
SUS304	被覆アーク溶接	ビード残し	900	1162(1.29)	855(0.95)
SUS304	被覆アーク溶接 + 表層ティグ溶接	ビード残し	1400	1387(0.99)	1410(1.01)
SS400	被覆アーク溶接	ビード残し	500	1122(2.24)	488(0.98)

(*) 疲労強度は、疲労限界における応力振幅を示す。

(3) まとめ

突合せ溶接継手部の応力集中係数を寺崎、秋山の式とG.P.TURMOVの式により求め、疲労試験結果に適用した。その結果、

- ① 寺崎、秋山の式は余盛りの大きいSS400試験片には適用できない。
- ② G.P.TURMOVの式は全ての試験片に対して5%以内の誤差で適用できた。従って、母材の疲労強度、ビード形状がわかれば、精度よく継手部の疲労強度がG.P.TURMOVの式を用いて推定できるものと考えられる。

3. 7 表面処理に関する試験

3. 3 及び 3. 5 項で製作した試験体を用いて各種の表面処理を行い、比較調査した。

(1) 供試体の種類

- ① 予備ゲートモックアップ試験体
- ② 脚柱モックアップ試験体
- ③ トラニオン継手溶接試験体
- ④ 熱間歪み取りに関する試験体
- ⑤ 限界溶接入熱量調査試験体

(2) 処理法

① 各モックアップ試験体（試験体の光沢調査）

i. 処理法

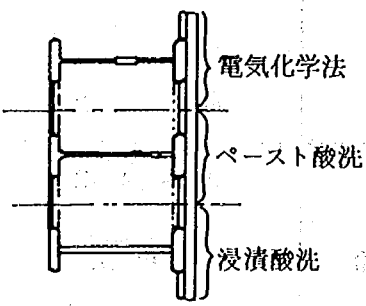
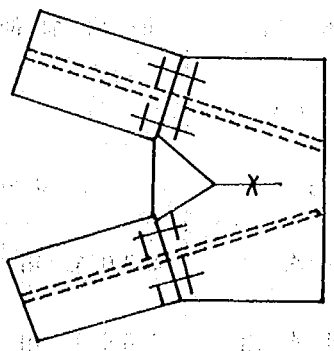
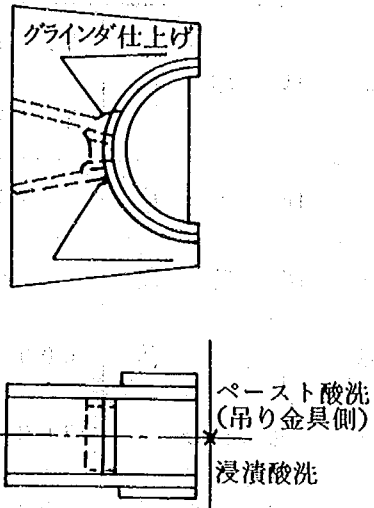
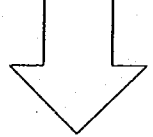
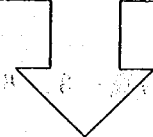
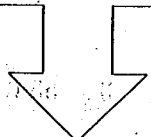
処理法を表-3. 51 に示す。

ii. 各モックアップ試験体と処理法の組合せを表-3. 52 に示す。

表-3. 51 処理法

	浸 漬	ペ ー ス ト	電 気 化 学 法	
	酸 洗 法	酸 洗 法	溶 接 焼 取	不 働 態 処 理
形 式	_____	_____	ステンブライド	ワド-グイ EL
薬 品 組 成	7.25wt% HNO_3 1.48wt% HF	HNO_3 , HF 増粘剤, 他	無機中性塩	無機中性塩
処 理 温 度	40 ~ 45 °C	常 温	常 温	常 温
処 理 時 間	60 分	120 分	0.5 分 / dm^2	0.5 分 / dm^2
洗 淨	水 道 水 (流水)	水 道 水 (流水)	水 道 水 (流水)	水 道 水 (流水)
目 的	洗 淨	洗 淨	洗 淨	不 働 態 化

表-3. 52 各モックアップ試験体と処理法の組合せ

予 備 ゲ ー ト モックアップ試験体	脚 柱 モックアップ試験体	ト ラ ニ オ ン 継 手 常 設 試 験 体
		
全 面 プ ラ ス ト	プ ラ ス ト な し	プ ラ ス ト な し
 ・ 電気化学法 ・ ペースト酸洗法 ・ 浸漬酸洗法	 ・ 電気化学法	 ・ ペースト酸洗法 ・ 浸漬酸洗法

備考：電気化学法 → 洗浄 + 不働態化

ペースト酸洗法 → 洗浄

浸漬酸洗法 → 洗浄

(3) 熱間歪み取りに関する試験体（熱間歪み取り焼け跡除去法＜洗浄度＞調査）

処理法を表-3. 53 に示す。

表-3. 53 処理法

	浸 透 酸 洗 法	ペ ー ス ト 酸 洗 法	電 気 化 学 法
薬 品 組 成	7.25wt% HNO_3 1.48wt% HF	HNO_3 , HF 増 粘 剤 他	無 機 中 性 塩 (ステップライト)
処 理 温 度	40 ~ 50 °C	常 温	常 温
処 理 時 間	60 分	120 分	3 ~ 4 分
試 験 体 (加 熱 及 び 冷 却 条 件)	600 °C 用 水 冷 700 °C 用 水 冷 900 °C 用 水 冷	600 °C 用 水 冷 700 °C 用 水 冷 900 °C 用 水 冷	600 °C 用 空 冷 700 °C 用 空 冷 900 °C 用 空 冷

(4) 限界入熱量調査試験体及び予備ゲートモックアップ試験体

ブラストによる溶接焼け跡除去法を調査した。

処理条件を表-3. 54 に示す。

(5) 試験結果

試験結果を表-3. 55 に、表面状態の写真を写真-3. 6 に示す。

表-3. 54 処理条件

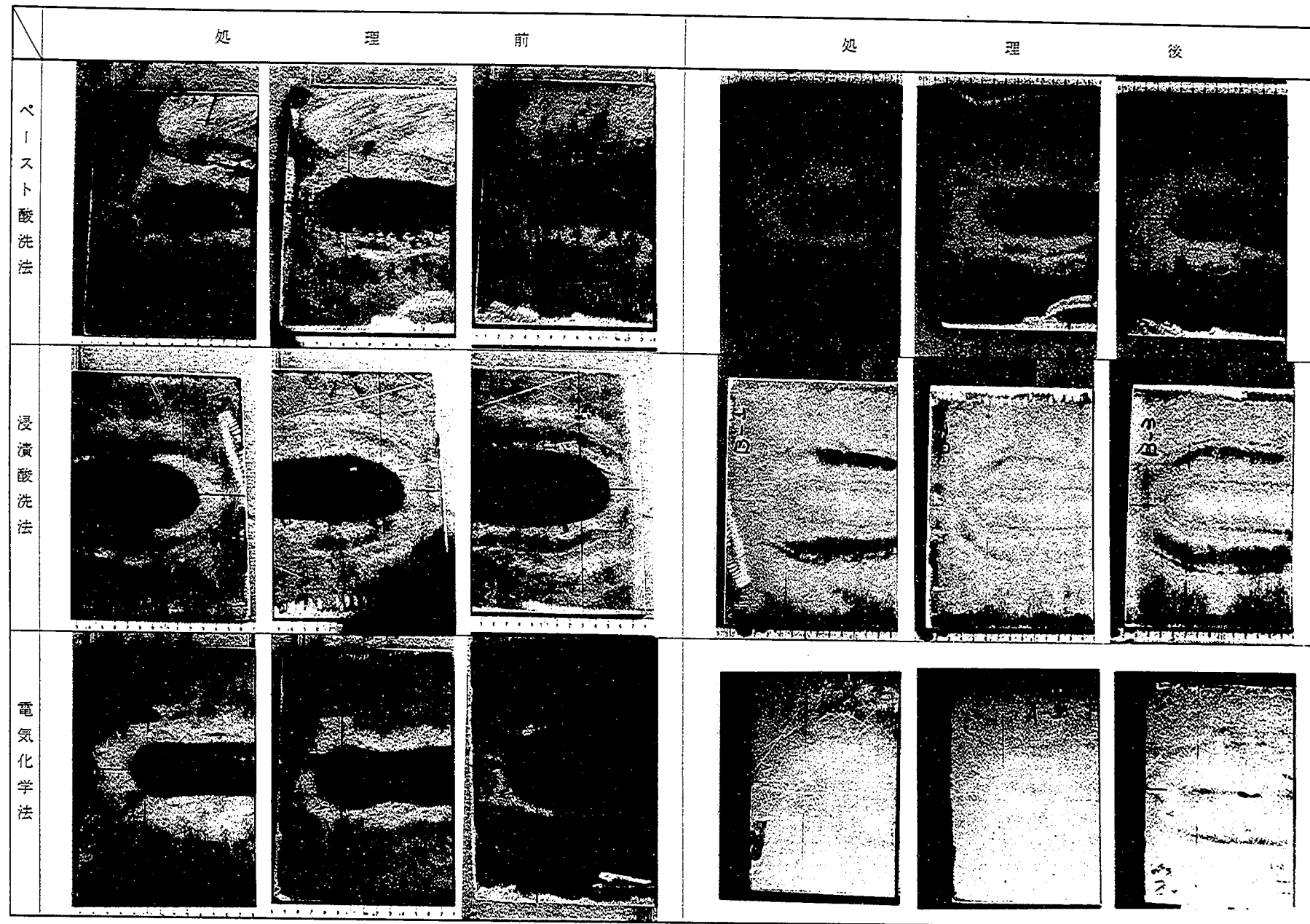
	ブ ラ ス ト 法
シ ョ ッ ト の 材 質	け い 砂
シ ョ ッ ト の 粒 度	4 号
表 面 粗 度	30 ~ 40 μ

表-3.55 表面処理調査結果

	表 面 状 態			一 般 事 項				ま と め 及 び 評 価
	各モックアップ試験体	熱間歪み取りに関する試験体	限界溶接入熱量調査試験体	安全性	公害性	処理工数*	整 備	
ブラスト	1. 予備ゲート ・マジック、溶接焼け及び切断焼けが完全に除去され、グラインダ掛け部も見分けがつかない。 ・均一な鈍い銀色となる。 ・表面が粗くなる。	_____	・溶接焼け跡完全除去。 ・表面が粗くなる。	人体に無害 防塵対策の必要あり	な し	0.5H/m ²	大型設備必要あり	・表面全体を均一にする方法では最良である。 ・不動態化の面からみるとブラストにより表面は加工硬化し、その度合が大きければ耐食性が損なわれる問題及びアンカパターンの表面粗度が耐食性を損ねるという問題が残される。
浸漬酸洗法	1. 予備ゲート（ブラスト後実施） ・母材部と溶接部とがはっきり区分され、部材部が銀白色、溶接部が鈍い銀色になる。 2. トラニオン×脚柱 ・マジックが不完全除去となる。（汚れはなし） ・グラインダ掛け部の区別は、明確であるが光沢がなくなり、銀白色となる。	・600℃、700℃ 900℃用とも完全除去できず一部残る	_____	人体に無害	あ り 廃液処理量 50ℓ/m ²	0.8H/m ² （浸漬時間 60分）	大型設備必要あり （現地 不可）	・表面全体を均一にする方法としては、やや不適である。
ペースト酸洗法	1. 予備ゲート（ブラスト後実施） ・ブラスト時の鈍い銀色で殆ど変化なし。 2. トラニオン×脚柱 ・マジックが不完全除去となる。（汚れはなし） ・グラインダ掛け部の区別は、明確であるが処理前より光沢は鈍る。	・600℃、700℃ 900℃用とも焼け跡除去できず	_____	人体に無害	あ り 廃液処理量 80ℓ/m ²	1.0H/m ² （ペースト 塗布放置時間120分）	必要なし	・表面全体を均一にする方法としては、やや不適である。
電気化学法（ステンライト）	1. 予備ゲート（ブラスト後実施） ・ブラスト時の鈍い銀色で殆ど変化なし。 2. 脚柱 ・マジックが不完全除去となる。（汚れはなし） ・グラインダ掛け部の区別は明確であり、処理前と殆ど同じ。	・600℃、700℃ 用の焼け跡は完全除去 ・900℃用の焼け跡、完全除去できず一部残る。	_____	人体に無害	な し	1.0H/m ²	可般敷 小型設備 （現地可）	・表面全体を均一にする方法としては、やや不適である。 ・操作性、安全性等の面では最良である。

※フラットプレートでの単位面積当りの処理時間を示す。

写真-3. 6 熱間歪み取りに関する試験体の表面処理状況



4. ステンレス鋼構造物に関する設計・製作・据付及び保守管理上の留意事項

4. 1 設計に関する事項

4. 1. 1 使用材料

オールステンレス鋼製ゲート設備の水門扉、放流管に使用するステンレス鋼材は、原則として表－4. 1に挙げる種類のものとする。

表－4. 1 ステンレス材料の種類と用途

一 般 名 称	種 類	主 なる 材 料 記 号	主 なる 使 用 箇 所
熱間圧延 ステンレス 鋼板	JIS G 4304	(オーステナイト系) SUS304、SUS304L、SUS304N2 SUS316、SUS316L	扉体、戸当り、 放流管
熱間圧延 ステンレス 鋼板	JIS G 4304	(オーステナイト系) SUS304、SUS304N2、SUS316 SUS316L (二相系) SUS329J1、SUS329J2L	戸当りレール
熱間圧延 ステンレス 鋼板	JIS G 4304	(オーステナイト系) SUS304、SUS316	ローラ
ステンレス 鋼棒	JIS G 4303	(オーステナイト系) SUS304、SUS316、SUS304N2	シーブ軸、 ローラ軸
ステンレス 鋼棒	JIS G 4303	(マルテンサイト系) SUS403、SUS410	常時空中の シーブ軸
ステンレス 鋼棒	JIS G 4303	(オーステナイト系) SUS304	アンカ
ステンレス 鋼鋳鋼品	JIS G 5121	SCS13、SCS14、SCS2、SCS3	ローラ、シーブ
ステンレス 鋼鋳鋼品		(二相系) SUS329J1、SUS329J2L	ローラ
ステンレス ロープ		(オーステナイト系) SUS304、SUS316	ワイヤロープ

【解説】

現在、水門扉、放流管に使用するステンレス鋼は、耐食性、経済性を考慮しオーステナイト系ステンレス鋼が使用されており、また、オーステナイト・フェライト二相系ステンレス鋼も強度や硬度が要求される軸類や戸当りレール等に使用されている。

実施例をみると、マルテンサイト系ステンレス鋼の発錆が原因とみられるオーステナイト系ステンレス鋼のもらい錆が発生しているケースがあったため、オーステナイト系ステンレス鋼製ゲート整備の材質選定にあたっては、耐食性の劣るマルテンサイト系ステンレス鋼は常時空中部に限って使用するものとした。

扉体や戸当り金物等の主要溶接構造部材には、原則的にオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 を使用するものとした。但し、海岸付近で塩素イオン濃度が高い場合や、酸性河川等の水質環境にさらされるような環境でも経済性を考慮し SUS304 が使用されている例もあるが、一般的には SUS304 より耐孔食性に優れる SUS316 等の使用が有効とされている。

戸当りレールは耐食性と高硬度が要求されるため、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304N2 系、オーステナイト・フェライト二相系ステンレス鋼の SUS329J1 や SUS329J2L 等から選択するものとした。特に、SUS304N2 系は圧延過程で高硬度を確保でき、耐衝撃性、溶接性、加工性等に優れている。マルテンサイト系ステンレス鋼の SUS410 系は、これらより高硬度が期待できるため従来の普通鋼製ゲートでは多くの実施例がみられた。しかし、SUS401 系は SUS304 系等と比べると耐食性が劣り、オールステンレス鋼製ゲートでの使用は他へのもらい錆の供給源となることも考えられるため、原則的に避けるものとした。

シーブや小荷重用ローラは、SUS304 と同等の耐食性を有するステンレス鋼製品を使用するものとした。また、小荷重用ローラは鋼板や鋼棒より切り出すことによって製作可能である。

大荷重用ローラは高硬度が要求されるため、ステンレス鋼製品の SCS2、SCS3、または、オーステナイト・フェライト二相系ステンレス鋼（SUS329J1 や SUS329J2）の鍛鋼品が妥当である。

ローラ軸、シーブ軸は SUS304、SUS316 のステンレス鋼棒からの切り出しを基本とし、強度が特に要求される箇所については SUS304N2 系を使用する方がよいと思われる。

軸受は、基本的にオイルレスベアリングを使用するものとする。但し、予備ゲート主ローラ軸受は流水遮断を考慮してローラ抵抗を小さくする必要がある場合があるため、自動調心コロ軸受を用いてよい。ステンレス鋼製のコロ軸受は硬度上の問題から、SUS440C 等の耐食性に劣る材料を使用する必要があり、また特殊品であるため製作費、納期等に問題が残る。従って、普通ベアリング鋼を用い、オイルシールを取付けて給油を行うことが妥当と考えられる。

ワイヤロープは、普通鋼を用いた場合、ステンレス鋼製のシーブとの接触部で異種金属接触腐食を生じる。この腐食はグリス塗布等の防食対策では防止することはできず、素線切れ等の事例もみられることからステンレス鋼製とする必要がある。

4. 1. 2 ステンレス鋼の許容応力

扉体、戸当り金物、固定材、放流管に用いるステンレス鋼の許容応力度は、以下の値を適用するものとする。

(1) 許容軸方向引張応力度

日本工業規格に示された耐力値に対して、2.0の安全率を有するものとする。但し、ステンレス鋼鋳鋼品は引張強さに対して安全率を6とする。

(2) 許容軸方向圧縮応力度（局部座屈を考慮しない場合）

次の基準耐荷力に対して、2.0の安全率を有するものとする。

$$\bar{\sigma} = 1.0 \quad (\lambda \leq 0.2)$$

$$\bar{\sigma} = 1.109 - 0.545\lambda \quad (0.2 < \lambda \leq 1.0)$$

$$\bar{\sigma} = 1.0 / (0.773 + \lambda^2) \quad (1.0 < \lambda)$$

$$\text{ここに、} \bar{\sigma} = \sigma_{cr} / \sigma_y \quad \lambda = 1 / \pi \sqrt{\sigma_y / E} \cdot (1/r)$$

σ_{cr} : 限界座屈応力度

σ_y : 耐力

E : 縦弾性係数

〔許容曲げ圧縮応力度〕

次の基本耐荷力に対して、2.0の安全率を有するものとする。

$$\bar{\sigma} = 1.0 \quad (\alpha \leq 0.2)$$

$$\bar{\sigma} = 1.1 - 0.412 \cdot (\alpha - 0.2) \quad (0.2 < \alpha)$$

$$\text{ここに、} \bar{\sigma} = \sigma_{cr} / \sigma_y \quad \alpha = (2/\pi) \cdot K \cdot \sqrt{\sigma_y / E} \cdot (1/b)$$

σ_{cr} : 限界座屈応力度

σ_y : 耐力

E : ヤング率

$$K = 2$$

$$(A_w / A_c \leq 2)$$

$$= \sqrt{3 + A_w / 2A_c}$$

$$(2 < A_w / A_c)$$

α : 座屈のパラメータ

A_w : 腹板の総面積 (cm²)

A_c : 圧縮フランジの総断面積 (cm²)

〔許容せん断応力度〕

耐力の $1/\sqrt{3}$ に対して、2.0の安全率を有するものとする。

〔許容支圧応力度〕

許容軸方向引張応力度の150%とする。

【解説】

許容応力度は、使用するステンレス鋼材の耐力を設計基本強度として決定した。ステンレス鋼は普通鋼のように明確な降伏点が生じないため、0.2%の永久歪みが生じるときの応力度を耐力とし、普通鋼の降伏点に相当するものとして扱っている。0.2%の永久歪みが生じるときの応力度を耐力と定義した根拠は明らか

でないが、現在では一般的に採用されているものである。

ステンレス鋼は製造技術の向上により、殆どマイナス公差でミルメーカーから出荷されている。その際の厚さの許容差は、JIS G4304によると、板厚 8 mm から 40mm 程度の場合 $\pm 1.6\text{mm}$ まで許され、板厚 8 mm の場合には許容差は、公称板厚に対して最大 20 % に達する。

しかし、「ステンレス鋼 (SUS304) の溶接継手部の機械的性質の調査試験」で行ったステンレス鋼の静的強度試験結果では平均耐力は 27.9kgf/mm^2 となっており、JIS 値 (21kgf/mm^2) を 30 % 以上も上回っているため、構造物として設計する場合には、板厚公差は耐力公差と相殺できるものと考えられる。

ステンレス鋼は普通鋼と比べると熱伝導率が小さく、線膨張係数が大きいため溶接熱等による変形は普通鋼より大きくなる。しかし、この問題は適切な施工管理により普通鋼と同等に制限できるため、許容軸方向圧縮応力度及び許容曲げ圧縮応力度については普通鋼と同様の考え方を適用した。

許容せん断応力度及び許容支圧応力度についても、普通鋼と同様の考え方を適用した。

ステンレス鋼鋼品については、従来は扉体、戸当り金物については普通鋼と同様に扱い、放流管については材料の均質性に問題があり、また、検査も困難であるとして安全率を高めていた。本文では、安全側の考え方に立脚し後者の値を採用した。

許容支圧応力度は、面接触における道路橋示方書の値を採用した。

また、普通鋼では板厚が 40mm を越えた場合は、板厚方向の強度変化を考慮して許容応力を 40mm 以下の場合より割引いているが、ステンレス鋼では固溶化熱処理する際に組織が再結晶し材質が板厚方向にも均一化する (図 - 4. 1 参照) ため、一般的に各ミルメーカーとも、強度は全厚保証を行っている。従って、ここでは厚板の許容応力割引きは考慮しないものとした。

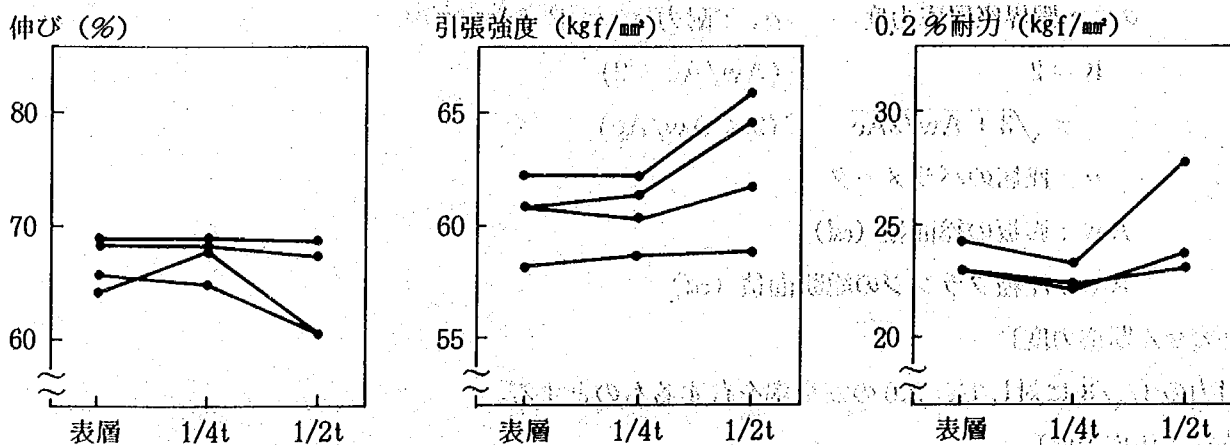


図 - 4. 1 SUS304鋼厚板板厚方向の機械的特性分布

4. 1. 3 溶接部の継手効率

溶接による継手箇所については、表-4.2に示す継手効率を鋼材の許容応力に乗じた値を許容応力とする。

表-4.2 溶接の継手効率(1)

区 分		工場溶接	現場溶接
突合せ溶接	放射線検査を行う	0.95(1.00)	0.90(0.95)
	放射線検査を行わない	0.85	0.80
すみ肉溶接		0.95	0.90

注：()内の数字は、溶接線全長について放射線検査を行う場合の値を示す。

なお、放流管分岐部のように溶接継手が集中し、残留応力の影響が大きい箇所で応力除去焼なましを行わない場合については上表の代わりに下表を用いる。

表-4.3 溶接の継手効率(2)

区 分		工場溶接	現場溶接
突合せ溶接	放射線検査を行う	0.90(0.95)	0.85(0.90)
	放射線検査を行わない	0.80	0.75

注：()内の数字は、溶接線全長について放射線検査を行う場合の値を示す。

【解説】

ステンレス鋼の溶接は長年にわたり各方面で実施されており、溶接部強度は母材を上回ること及び伸び性能も低下しないこと等が確認されているため、溶接部の継手効率については現行の基準の値を採用した。

今回行ったステンレス鋼溶接継手部の静的強度試験においても突合せ溶接部の引張強度は平均 $64.9\text{kgf}/\text{mm}^2$ であり母材強度 (平均 $60.6\text{kgf}/\text{mm}^2$) 及び JIS 値 ($53\text{kgf}/\text{mm}^2$) を上回っていた。また、せん断強度も平均 $36.5\text{kgf}/\text{mm}^2$ と母材強度の $1/\sqrt{3}$ を上回っていた。さらに、突合せ溶接部の側曲げ試験結果も良好であり、靱性の低下もみられなかった。

4. 1. 4 許容応力度の補正

鋼材の許容応力度は原則として(2)項の値とするが、水門扉設備の重要性、経済性、技術的難易性を考慮し、下表の補正係数を乗じて許容応力度の補正を行うものとする。

表-4. 4 許容応力度の補正

		補 正 係 数	
		地 震 時 以 外	地 震 時
ダム	一 般 水 門 扉	1	1.5
	高 圧 水 門 扉 (主 、 副)	0.875	1.313
	修 理 用 ゲ ー ト 試 験 湛 水 ゲ ー ト 仮 排 水 路 閉 塞 ゲ ー ト	1.125	1.668
堰 等	一 般 水 門 扉	1	1.5
	修 理 用 ゲ ー ト	1.5	1.8

【解説】

現行基準では、高圧水門扉の許容応力度は、振動の発生、その他の不測の応力増加を考慮して通常の水門扉の87.5%とし、また、修理用ゲート等については使用期間が短期間であること等を考慮し112.5%としている。

また、地震時の取扱いについては、最大震度を受けることはまれであり、かつ地震継続時間も極めて短時間であるので許容応力度を常時の50%増（但し、材料降伏点の90%を超えない）としている。

ステンレス鋼に対する現行基準の適用性を判断するために、ステンレス鋼を高圧水門扉の主要部材に使用することを想定して疲労強度試験を行った。

試験は高圧水門扉の許容応力度に相当する900kgf/cm²の引張応力を作用させた後、応力振幅を加えた。試験結果より応力集中が生じる被覆アーク溶接のビードつき供試体でも疲労限界は1000kgf/cm²程度であり、高圧水門扉の振動応力が静的応力の1割程度であることを考慮すれば現行基準における許容応力の補正值で問題ないと考えられる。

4. 1. 5 たわみの許容値

水圧及びこれと同方向の荷重に対する扉体のたわみは、径間に対して下表の値以下でなければならない。

表－ 4. 5 たわみの許容値

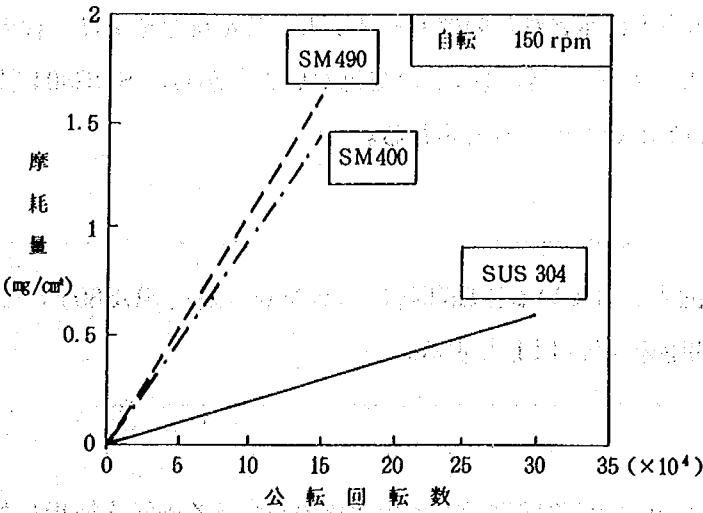
	形 式	た わ み の 許 容 値
ゴ ム 水 密	一 般 水 門	1 / 8 0 0
	高 圧 水 門 扉	1 / 2 0 0 0
	シ ェ ル 構 造	1 / 8 0 0 (水 平 、 鉛 直)
	ロ ー ラ ゲ ー ト	1 / 6 0 0 (合 成)
金 属 水 密	低 圧 水 門 扉	1 / 1 0 0 0
	高 圧 水 門 扉	1 / 1 0 0 0 0

【解説】

水圧等による扉体の曲げによるたわみは、構造物として必要な剛性、水密性、動的安定性及び操作時の安全性等の機能低下要因となる。この種のたわみの許容値についてはステンレス鋼特有の問題ではないため、従来の値を採用した。但し、ステンレス鋼は普通鋼に比べ線膨張係数が約 1.5 倍であるため、日射等の温度変化の影響を受けやすい。従って、据付時からの温度変化による部材の伸び、日射等による扉体の反り等については不具合が生じないように留意する必要がある。

4. 1. 6 余裕厚

腐食に対する余裕厚は考慮しないものとする。摩耗に対する余裕厚は、流砂等の影響を配慮する必要がある場合は、必要な余裕厚を見込むものとする。



図－ 4. 2 金属のひっかけ摩耗

【解説】

腐食に対する余裕厚として考慮すべき錆は全面錆である。汽水環境で施工後9年経過した施工例を調査した限りでは板厚減少は見られなかった。適切な材料選定を行えば、腐食に対する余裕厚は考慮する必要はないと考えられる。摩耗についてもステンレス鋼は耐摩耗性に優れている（図-4.2参照）ため通常的环境下では考慮しなくてよいと考えられる。

4. 1. 7 構造部材の設計

1) プレートガーダの設計

腹部の最小厚さは、下表の値とする。

表-4.6 プレートガーダ腹板の最小厚さ

	SUS 304
垂直補鋼材のない場合	$b/75$ 以上
垂直補鋼材のある場合	$b/164$ 以上
水平補鋼材を一段用いる場合	$b/277$ 以上

b : フランジプレート純間隔 (cm)

【解説】

プレートガーダの各部寸法は、つり合いのとれたものであることが必要である。腹板は、厚さが薄いと曲げモーメントやせん断力によって座屈する恐れがあるため上記のように最小板厚を規定した。

上記の値は、道路橋示方書に示された曲げモーメントとせん断力を受ける板の座屈照査式に基づき導かれた結果であり、鋼種によって異なる性質のものではないことから、SUS304以外のステンレス鋼に対しても、この考え方に基いてよいものと考えられる。

2) 圧縮部材の設計

板の両端が十分に拘束されている圧縮部材にステンレス鋼（SUS304）を用いた場合の腹板厚さ t_w は、フランジ純間隔の $1/45$ 以上とする。

【解説】

圧縮部材の腹板厚さについては道路橋示方書の圧縮力を受ける両縁支持板に対する考え方を基本としている。

道路橋示方書では、幅厚比の大きい部材では低い応力度で面外たわみや硬度の低下が生じやすいとして、この領域での基準耐荷力をオイラー座屈強度の1/2として、最小腹板厚さを規定している。

水門扉設備に普通鋼を用いた際の現行基準は、道路橋示方書に示された算出法で更に安全率を高めた値を採用している。

ステンレス鋼を用いた場合も、適切な施工管理を行うことにより溶接歪みを普通鋼と同等に制限できるため普通鋼と同様の安全率を採用した。

3) 桁の構造

桁はもらい錆や孔食等を防止するため、水や泥等が残留、堆積しない構造とする必要がある。

海岸付近等に接地される水門扉のように海塩粒子が付着しやすい場所では、雨水による水洗いが期待できる形状が望ましい。

【解説】

ステンレス鋼であっても、飛来した鉄粉等が付着すればもらい錆が生じるし、また泥等の堆積により、孔食等が発生する可能性もある。従って、水平桁には適切な水抜孔を設けたり、また桁の形状を工夫する等により、鉄粉や泥等が桁上に残留しにくい構造とする必要がある。

また、付着した鉄粉や海塩粒子は雨水等により洗い流されるため、これを有効に利用する構造、形状とすることにより清掃効果が期待できる。

4. 1. 8 付属施設的设计

1) スクリーン

スクリーンは予想される塵芥量等を考慮して、定められた荷重に耐え得るようその構造を決めなければならない。

【解説】

1. 許容応力

スクリーンバーの許容応力については、横座屈を考慮した許容応力を検討するものとする。

$$\sigma_{ba} = 0.6 \cdot \sigma_{0.2} \cdot \left(1.23 - 0.0153 \frac{\ell}{t} \right)$$

ここに、 σ_{ba} : 横座屈を考慮した許容応力

$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力

ℓ : バーの支持間隔 (cm)

t : バーの板厚 (cm)

但し、 σ_{ba} の値は $\sigma_{0.2}$ の 1/2 を超えないものとする。

2) 構造

スクリーンは、取水塔または受桁から取り外せるようパネル式の構造としておくことが重要である。

【解説】

スクリーンパネルの構造様式は、スクリーンバーに通しボルトを貫通させ、スペーサによりバー間隔を保持する方法が一般的である。この方法は溶接が不要なため仕上がり精度及び経済性に優れている反面、すき間構造部が多数できるため、すき間腐食等が発生しやすい構造である。しかし、現有のステンレス鋼製スクリーンで、特にこの種の問題が生じていないことを考慮すれば、淡水中のスクリーンは通しボルトにより組立てる方法でよいと考えられる。

海水等水質の影響を受ける設備に設けられるスクリーンは溶接構造とし、すき間をなくするのが望ましい。

一方、グレーチングのように電気圧接する製造方法も考えられる。しかし、圧接では部分的に溶着しない部分にすき間が存在すること、圧接する施設の容量上の問題から適用できるバーの板厚に限界があること等の問題があり、実施にあたっては十分検討を行うことが望ましい。

4. 2 製作に関する事項

4. 2. 1 切断

(1) 切断方法

切断はプラズマアーク切断または機械的切断で行うことを原則とする。

【解説】

ステンレス鋼の切断には、プラズマアーク切断、機械的切断法が一般的に採用されており、施工条件も確立されているので、安定した切断品質が得られる。

これ以外の切断法として、アークエア切断及びパウダ切断法があるが、この方法で切断した場合は、切断面をグラインダにて平滑に仕上げを行う等、プラズマアーク切断と同等以上の切断品質が得られることを確認することが必要である。

(2) 切断面の処理

プラズマアーク切断面は機械切削またはグラインダにて、酸化被膜の除去仕上げを行うこと。

【解説】

切断面は酸化被膜が形成され、ドロスが付着し、冶金的、機械的性質を劣化させる。また溶接開先面の場合には溶接金属中に融合し、機械的性質に影響を及ぼすので酸化被膜及びドロスは除去しておくことが必要である。

(3) 切断時の養生

プラズマアーク切断によるスパッタが飛散する範囲にステンレス鋼がある場合は、不燃性布などでスパッタが付着しないよう養生し切断すること。

【解説】

表面に酸化被膜に覆われた切断スパッタが付着すると腐食の発生源となる。特に、炭素鋼のスパッタは耐食性を有していないので発錆し、この錆がもらい錆を起こすことにより、その近傍のステンレス鋼に錆を誘発させる。

4. 2. 2 曲げ

(1) 曲げ加工度

オーステナイト系ステンレス鋼の曲げ加工は冷間曲げを原則とする。この場合内曲げ半径は、強度部材については板厚の 10 倍以上とし、非強度部材については 3 倍以上とする。

【解説】

オーステナイト系ステンレス鋼では、熱間曲げにおいて加工中に高い温度を保持すると、炭化物の析出を招き、耐食性が劣化する。

従って、原則として行わないこととした。もし行った場合には、1,100℃加熱急冷による固溶化熱処理を行い、耐食性を回復しておく必要がある。

一方、オーステナイト系ステンレス鋼は降伏比が低く、伸びも JIS 規格で 40 % 以上と塑性域が広いので、冷間加工性が優れている。

しかし、厚板への曲げ加工も考慮して、曲げ半径は板厚の 10 倍以上とした。

このときの冷間加工度は約 10 % であり、フェライト析出量は 2 % 以下で、一般の溶接金属の 5 % 以内である。(図-4. 3 参照)

一方、機械的性質は、硬さがロックウェルで 55 程度で、ほぼ JIS 値と同等であり、伸びは 25 ~ 30 % と軟鋼、50 キロ級 HT より高い値(図-4. 4 参照)を示している。

(2) 曲げ加工時の養生

曲げ加工を行う場合、表面傷発生防止のため、ローラまたはプレス治具及びステンレス鋼面の異物は清浄除去をし、保護シートの使用など傷発生防止のための処置を行うこと。

【解説】

ステンレス鋼表面に傷をつけると錆の発生を誘因する。特に鉄粉など異物が付着したままで曲げ加工を行うと表面に噛込み、錆発生原因となるので完全に除去しておくことが必要である。

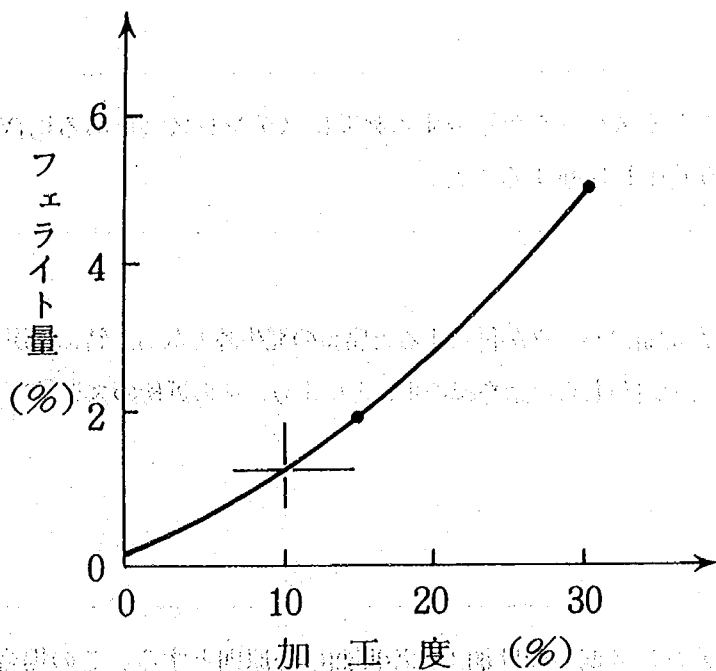


図-4.3 加工度とフェライト析出量との関係

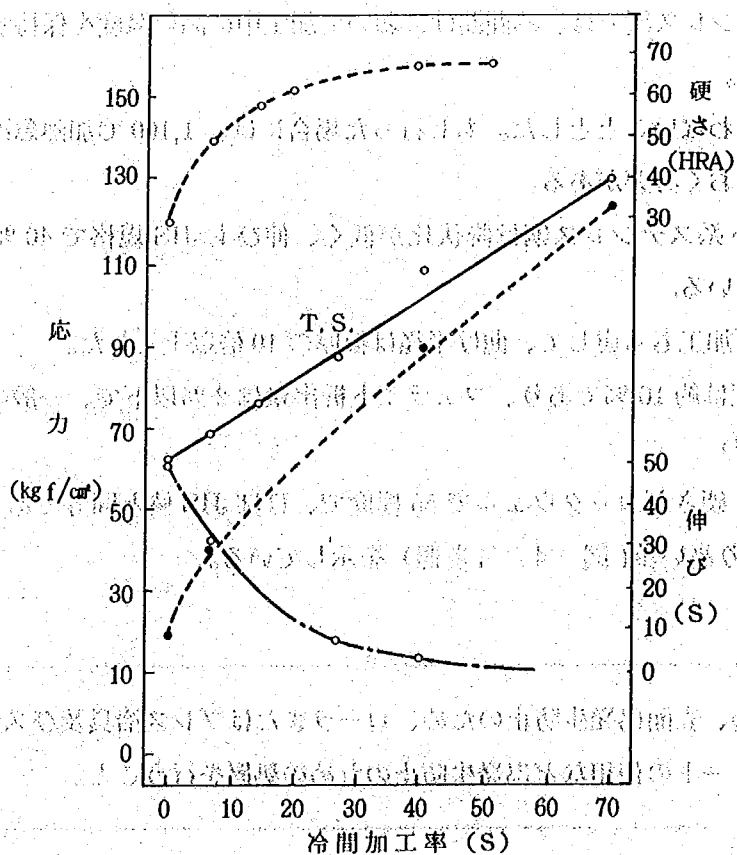


図-4.4 SUS304機械的性質に及ぼす冷間加工の影響

(3) スプリングバック

オーステナイト系ステンレス鋼は曲げ加工のスプリングバック量が普通鋼に比べて大きい。
従って、これを考慮した曲げ加工を行うことが必要である。

【解説】

スプリングバック量は縦弾性係数に反比例し、引張強さに関係する曲げモーメント及び板の長さに比例する。

すなわち、スプリングバック量は、次式で与えられる。

$$\Delta\theta = \frac{M}{EI} \cdot L$$

ここに M：均一曲げモーメント

E：縦弾性係数

I：断面二次モーメント

L：板の長さ

オーステナイト系ステンレス鋼は普通鋼に比べて縦弾性係数が小さく、引張強さは大きい。ためスプリングバック量も普通鋼に比べて大きいので上式を参考にし、 $\Delta\theta$ 分だけ余分に曲げておかねばならない。

4. 2. 3 切削加工

オーステナイト系ステンレス鋼は、普通鋼に比べて被削性が悪いので、適正な切削工具、切削機材及び切削法を用い、正しい寸法精度でビビりのない切削面が得られるように加工すること。

【解説】

オーステナイト系ステンレス鋼は、降伏比が低く延び性能が優れており、非常に粘り材料なのに加え熱伝導率が低く刃先温度が上昇しやすいので、炭素鋼などに比べ切削性は非常に悪い。

このため、剛性が高く、切削力に余裕のある加工機を用い、深削り、低速切削などの採用が必要である。また放熱性のよい刃先形状、すなわちシャンク角を大きめにするなど、切削工具採用での配慮が必要である。

4. 2. 4 組立て

(1) 組立て

組立てでは、それ自体の精度を確保して行うことは勿論であるが、溶接による歪み発生防止をも考慮して行わなければならない。すなわち、溶接収縮量を見越した伸び工法を採用するとともに組立て治具、ピ

ース、ストロングバック等の使用及び適正な仮付、急所止溶接を行い、組立精度の確保とともに、溶接歪みが少なくなるような組立てを行う。

【解説】

オーステナイト系ステンレス鋼は普通鋼に比べて、熱膨張係数が1.5倍、熱伝導率が $\frac{1}{3}$ と低く、このため溶接による変形量が大きい。

一方、発生した歪みは普通鋼のように矯正できず、また、ガス切断が適用できないので、現地切合せや開先修正も簡単に行うことができない。従って、溶接後の正規寸法が確保できるよう組立施工が必要である。

(2) 組立てピース

組立てピース、ストロングバック、吊り金具等構造物に溶接されるものの材質は、母材と同系のステンレス鋼製を用いること。

【解説】

ピース、治具類に炭素鋼を使用した場合、もらい錆の問題、除去、切断の際の炭素鋼スパッタの飛散、付着の問題等が生じる。従って、ピース、治具類は同質材とした。

4. 2. 5 溶接

(1) 溶接法及び溶接施工試験

溶接法は次の4種類とし、これ以外の溶接法を採用する場合には、あらかじめ施工法試験を行い十分な性能であることを確認する。

- 1) 被覆アーク溶接法
- 2) サブマージアーク溶接法
- 3) シールドガスアーク溶接法
- 4) ティグ溶接法

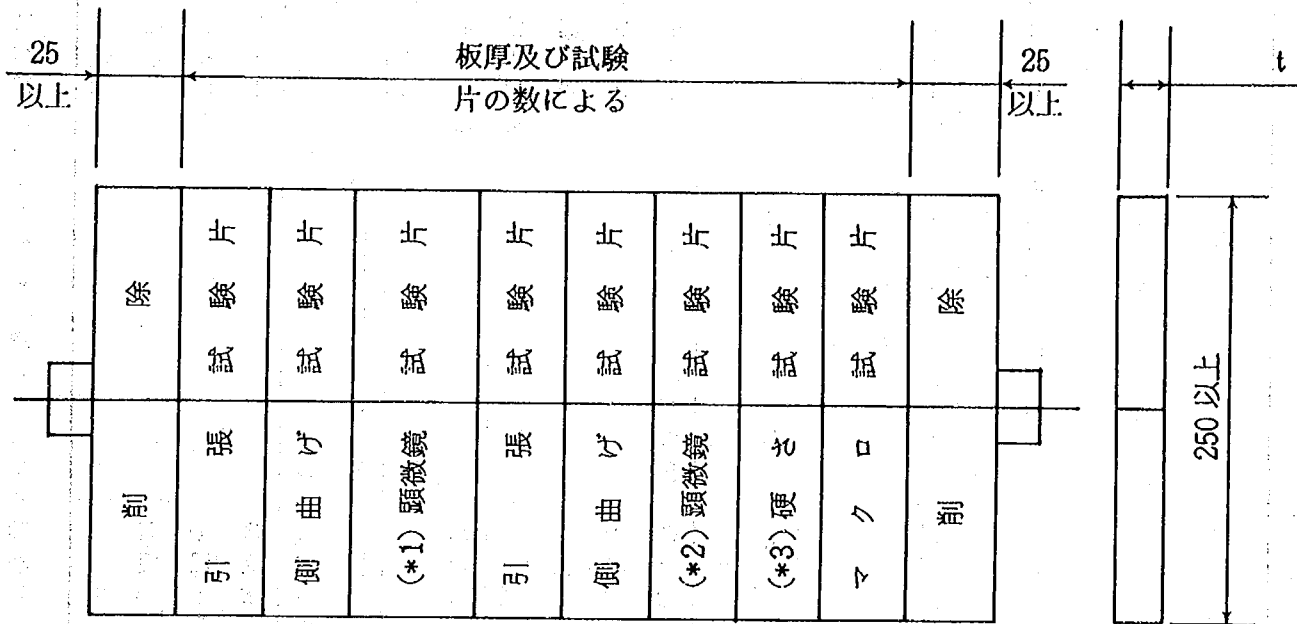
【解説】

本文に示した4種類の溶接法は通常広く適用されている方法で、その継手性能は多くの経験により確認されている。従って、既にこれらの溶接法に十分な経験を有している場合は採用してよいこととし、経験のない場合及び本文4種類以外の溶接法を採用する場合のみ、表-4. 7に示す施工法試験を行い、性能確認を行うこととする。

突合せ溶接継手の衝撃試験をオーステナイト系の場合、省略できることにした理由は、図-4. 9に示すように、水門関係構造物の使用温度範囲では不安定破壊を生ずるような定温靱性値を示すことはないからである。

例えば、LNG貯蔵（－96℃）に関する国内法規でもオーステナイト系ステンレス鋼製の場合には溶接継手部の衝撃試験は要求していない。

一方、水門関係構造物にオーステナイト系ステンレス鋼を使用する目的は主に耐食性にあるので、これに関連ある溶接部の鋭敏化試験を行うこととした。



(*1) オーステナイト系溶接金属は行わない。

(*2) オーステナイト系ステンレス鋼以外は行わない。

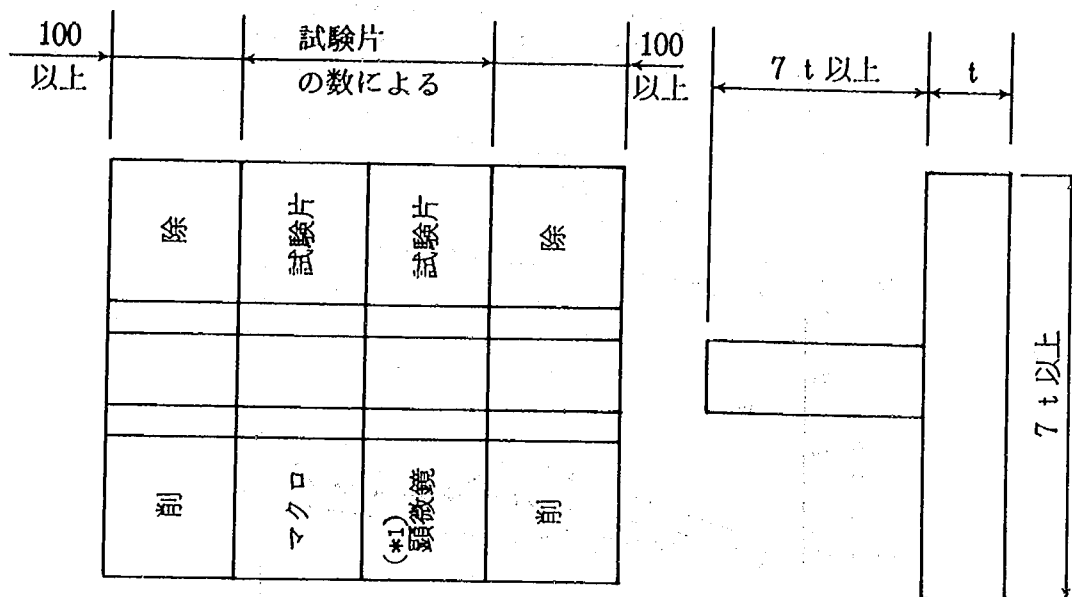
(*3) 硬さが要求される溶接継手以外は行わない。

図－4. 5 突合せ溶接試験材の形状及び試験片採取要領

表-4.7 溶接施工試験

試験の種類	試験項目	試験材の形状及び試験片採集	試験片	試験片の回数	試験方法	判定基準	備考
突合せ溶接	引張試験	図5-1-1	JIS Z 3121 1号	2	JIS Z 2241	引張強さが母材の規格値以上	異材継手の場合は低側母材の規格値以上
	側曲げ試験		JIS Z 3122 3号	2	JIS Z 3122	原則として、亀裂が生じてはならない。(*)	19mm未満裏曲げ 19mm以上側曲げ
	衝撃試験		JIS Z 2202 4号	3	JIS Z 2242	溶接金属で衝撃値が、母材の規格値以上 (3個の平均)	オーステナイト系溶接金属は省略
	マクロ試験		—	1	JIS G 0553	欠陥があってはならない。	—
	顕微鏡組織試験		—	1	熱影響部の鋭敏化部を200倍顕微鏡組織	鋭敏化度5%以下	オーステナイト系ステンレス鋼について行う予め熱影響部を検鏡に最も鋭敏化された箇所で判定
	硬さ試験		図5-1-3	1	JIS Z 2242		硬さが要求される戸当りなどの溶接継手のみ行う
すみ肉溶接	マクロ試験	図5-1-2	—	1	JIS G 0553	欠陥があってはならない。	—
	顕微鏡組織試験		図5-1-4	1	熱影響部の鋭敏化部を200倍顕微鏡組織		オーステナイト系ステンレス鋼について行う予め熱影響部を検鏡に最も鋭敏化された箇所で判定

(*) ただし、発生原因がブローホール、スラグ巻き込みであることが確認され、かつ亀裂が3mm以下の場合は合格とする。



(*1) オーステナイト系ステンレス鋼以外は行わない。

図-4. 6 すみ肉溶接試験材の形状及び試験片採取要領

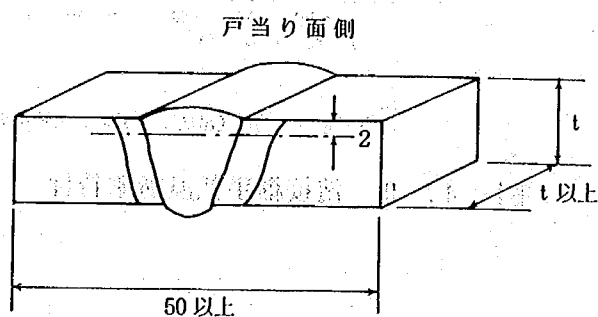


図-4. 7 硬さ測定試験片の形状及び測定箇所

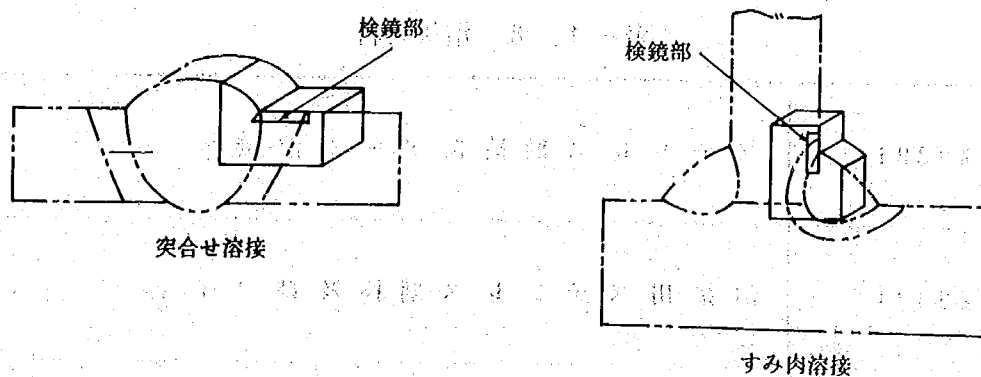
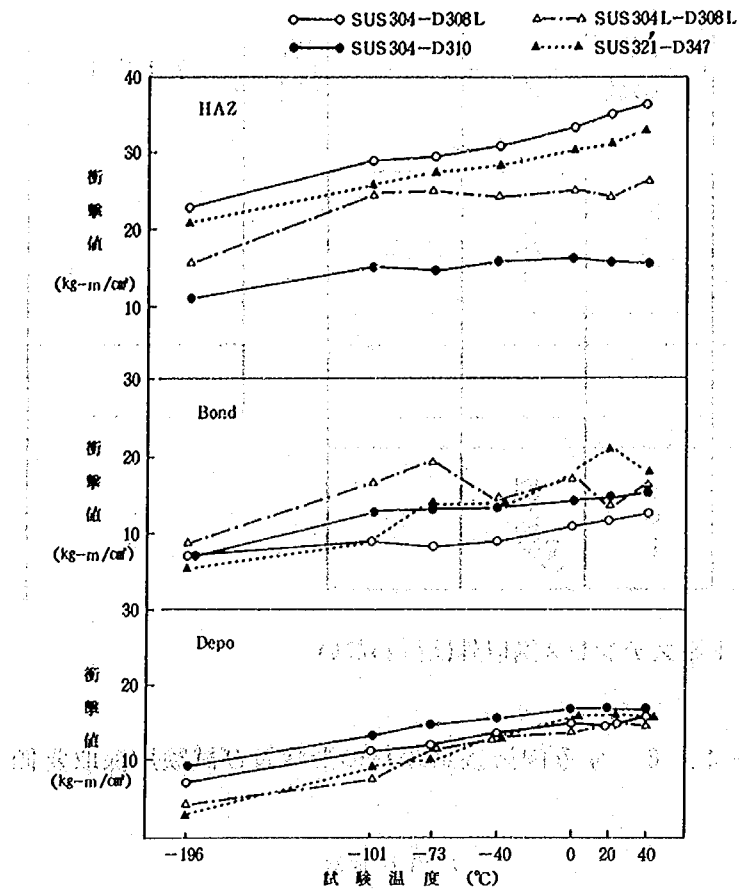


図-4. 8 顕微鏡組織試験片及び検鏡部



(出典：ステンレス協会資料)

図-4.9 溶接継手低温衝撃特性

(2) 溶接材料

溶接材料は表-4.8に示すJISに規定されたものを用いること。

表-4.8 溶接材料

JIS Z3221	ステンレス鋼被覆アーク溶接棒
JIS Z3321	溶接用ステンレス鋼棒及びワイヤ
JIS Z3323	ステンレス鋼アーク溶接フラックス入りワイヤ

【解説】

1) 水門ゲートに適用されるステンレス鋼は表-4. 9に示すように、マルテンサイト系（13Cr 鋼系等）、フェライト系（16Cr 鋼系等）、オーステナイト系（18Cr-8Ni 鋼系等）及び二相合金系（25Cr-5Ni-2Mo 鋼系等）があり、その溶接性を示す。

マルテンサイト系及びフェライト系ステンレス鋼は溶接部が急冷されることによって硬化し、割れ発生の恐れがあるのに対し、オーステナイト系ステンレス鋼は急冷による割れ発生の恐れはないが、逆に冷却速度が遅すぎると、溶接熱影響部粒界にクロム炭化物の析出を招き、鋭敏化による耐食性の劣化を生ずる。このように、ステンレス鋼はその系により、相反する溶接性を備えているので、溶接する場合溶接材料の選定と施工について注意しなければならない。

2) 以上のように、ステンレス系溶接金属は、その成分中ニッケル当量とクロム当量によって、全く異なった性質を呈する。

従って、溶け込み量によって母材成分の希釈を受けた溶接金属が割れや脆化などの欠陥発生がなく、かつ要求する機械的性質を満足する成分となるよう溶接材料を選定しなければならない。例えば、SUS304 どうし、または SUS304 と軟鋼との溶接を行う場合、母材に希釈された溶接金属の成分がフェライトを含む組織となって、高温割れを防止しているが、フェライトの量が増すと、耐食性と靱性の低下を招くので、溶接金属中のフェライト量は、3～10%を目標として溶接材料の選定するのがよい。また、マルテンサイト系及び二相合金系の溶接材料も耐割れ性を重視する場合には、オーステナイト系溶接材料を用いることがある。

表-4. 10 にステンレス鋼と溶接材料の一般的な組合せを示す。

表-4. 9 各種ステンレス鋼の溶接性

分 類	溶 接 性
マルテンサイト系	焼入れ硬化性を有するため、溶接熱影響部は粗粒化すると共にマルテンサイト組織となり脆化し、延性が低く適正な溶接施工を行わないと割れ発生の恐れがあり、溶接性は悪い。 予熱、後熱が必要である。
フェライト系	Ni当量及びCr当量の差により、溶接部の組織が異なるが、SUS 405(13Cr-0.2Al系)やSUS 430(17Cr系)は粒界にマルテンサイトを析出するため硬化し、耐割れ性を損ねる。 予熱、後熱が必要である。
オーステナイト系	・溶接部はオーステナイト組織であるため、溶接性に優れている。但し、高い溶接入熱量で溶接し、450℃～850℃における冷却速度が遅くなるとCr炭化物が粒界に析出し、脱Cr層を生ずるので、耐食性が劣化する。予熱、後熱も同様に冷却速度が遅いので行わない。 ・熱膨張係数が一般鋼の1.5倍、熱伝導率は約1/3であるので、溶接歪みが大きい。歪み防止対策が必要。
二 相 合 金 系	溶接性は、マルテンサイト系、フェライト系に比べてよいが、延性、靱性がオーステナイト系に比べて低く、特に合金系溶接材料を用いる場合には低温割れに注意する。

表－４．１０ ステンレス鋼と溶接材料の組合せ

分 類	母 材	溶 接 材 料		予 熱 ・ 後 熱
		被 覆 ア ー ク	シールドガスアーク	
オーステナイト 系	SUS 304	D 308	YF 308 C	予 熱 後 熱 不 要
	SUS 304 L	D 308 L	YF 308 LC	
	SUS 304 N2	D 308(特)* ¹ D 309	YF 309 C	
	SUS 316	D 316	YF 316 C	
	SUS 316 L	D 316 L	YF 316 LC	
マルテンサイト 系	SUS 403	D 410	YF 410 C	410 系 予 熱 220～ 400℃ 後 熱 750℃ 309、310 系は、 100～ 200℃ 予 熱
		D 309	YF 309	
	SUS 410	D 310		
二 相 合 金 系	SUS 329 J1	D 329 J1	309 系* ²	—
ス テ ン レ ス × 軟 鋼	SUS	D 309	YF 309	マルテンサイト 系は、予 熱、後熱、二相合 金系は 100～ 200℃ 予 熱

注 *¹ D 308(特) は D 308にチツソ及びニオブを添加したSUS 304N2

溶接棒、JIS 化はされていない。

*² JIS 化はされていない。

(3) 溶接工の資格

溶接の品質は溶接工の技量によるところが大きい。特にステンレス鋼の場合には溶接継手性能のみでなく、耐食性、溶接歪みなどにも影響を及ぼすので、JIS Z3821「ステンレス鋼溶接技術検定における試験方法及び判定基準」のいずれかの資格を有し、かつ表－４．１１に示した溶接工の資格を有するものとする。

表－ 4. 11 溶接工の資格

溶 接 方 法	資 格
被覆アーク溶接	溶接する技術の板厚、及び溶接姿勢に対応したJIS Z 3801「溶接技術検定における試験方法及び判定基準」、またはこれと同等以上の認定試験に合格した者
半自動溶接	溶接する継手の板厚及び溶接姿勢に対応したJIS Z 3841「半自動溶接技術検定における試験方法及び判定基準」、またはこれと同等以上の認定試験に合格した者
サブマージアーク溶接	サブマージアーク溶接については現在、技術検定の国家資格がないが、被覆アーク溶接は溶接の基本であるからオペレータは少なくともA-2Fの試験、またはこれと同等以上の認定試験に合格した者であることが望ましい。

【解説】

ステンレス鋼の溶接を行う者は、ステンレス鋼の取扱いに関する知識を有していないと、大入熱溶接による鋭敏化、アークストライク、スパッタ、ハンマ傷を母材につけて耐食性を損ねたり、不適正な溶接方法により過大な歪みを発生させたりする恐れがある。従って、JIS Z3821に規定されるステンレス溶接に関する学科試験に合格していることを必要条件とし、これに加え表－ 4. 11に示した溶接資格を有することとした。もちろん従事する工事の溶接継手に対応する JIS Z3821 規定の資格を有する者は表中の同等以上の資格者と解される。

注：JIS Z3801(1979)・・・溶接技術検定における試験方法及び判定基準

JIS Z3821(1989)・・・ステンレス鋼溶接技術検定における試験方法及び判定基準

JIS Z3841(1989)・・・半自動溶接技術検定における試験方法及び判定基準

(4) 溶接技術者

溶接の品質は溶接工の技量と共に、特にステンレス鋼の場合には、適正な溶接施工要領の確立、施工管理が十分に行える知識と経験を有する溶接技術者のもとに工事を完遂しなければならない。

【解説】

溶接技術者とは、WES8103「構造物の溶接施工及び管理に関する技術者の資格認定基準」に定められた1級溶接技術管理者（施工管理は2級溶接技術管理者以上）または同等以上のステンレス鋼の溶接に関する知識と経験を有する者とする。

(5) 溶接開先

- ① 溶接開先精度は表－4. 12による。但し、溶接施工試験によって、確認された場合には確認された範囲を許容する。

表－4. 12 材片の組合せ精度

	項 目	組 合 せ 精 度
グループ溶接	ル ー ト 間 隔 の 誤 差	規定値 $\pm 2.0\text{mm} (\pm 1.0)$
	板厚方向の 材片の偏心	水 門 扉 ・ 放 流 管
		その他の鉄構構造物
	裏当て金を用いる場合の密着度	0.5mm以下
	開 先 角 度	規定値 $\pm 10^\circ (\pm 5^\circ)$
すみ肉溶接	材 片 の 密 着 度	1.0mm以下

* 但し、上記で求めた差が1mmに満たない場合、もしくは3mmを超過する場合には、各々1mm、または3mm以下とする。
() 内はサブマージアーク溶接に適用する。

- ② 溶接開先部の水分、油脂及び鉄分等不純物は溶接前に除去すること。

【解説】

ステンレス鋼の場合には、特に溶接金属中に鉄粉や炭化物が混入すると、耐食性を劣化させる。従って、溶接用ブラシ等もステンレス製を用いることが必要である。

(6)溶接条件

溶接条件は、溶接溶け込み不足、割れなどの内部欠陥、外観が綺麗で欠陥のない条件を選定することと共に、オーステナイト系ステンレス鋼を溶接する場合には表－4. 13に示す溶接入熱量以下を条件を参考とするとよい。

表－4. 13 溶接入熱量

溶 接 法	許 容 入 熱 量 (J/cm)
被 覆 ア ー ク 溶 接	33,000
サ ブ マ ー ジ ア ー ク 溶 接	33,000
シ ー ル ド ガ ス ア ー ク 溶 接	33,000
テ ィ グ 溶 接	22,000

溶 接 入 熱 量 算 出 式

$$\text{入 熱 量} = \frac{I \cdot V}{v} \times 60 \quad (\text{J/cm})$$

I : 溶 接 電 流 (A)

v : 溶 接 速 度 (cm/mm)

V : ア ー ク 電 圧 (V)

【解説】

図-3. 9 (P 70) に溶接法別の溶接入熱量と鋭敏化率との関係を示す。鋭敏化率の許容値を 5 % (*) とし、構造物の大きさ、板厚による冷却速度及び溶接姿勢、溶接速度等による鋭敏化率を 3.5 % 以下になる溶接入熱量を許容値とすると、ティグ溶接は約 22,000J/cm、被覆アーク、サブマージアーク及びシールドガスアーク溶接は約 33,000J/cm となり、これを溶接入熱限界値とした。

ステンレス鋼の鋭敏化と腐食との関係

ステンレス鋼は、腐食性環境下において粒界腐食感受性を示すことがあり、このような場合、材料が鋭敏化されていると呼んでいる。鋭敏化の原因は結晶粒界に炭化物が析出し、そのため粒界近傍のクロム濃度が減少し、耐食性が劣化するためである。鋭敏化の程度を測定する方法の一つとして、電気化学的再活性化法 (Electrochemical Potentiokinetic Reactivation method の頭文字をとって、E P R 法と呼ばれる) が用いられる。E P R 法における鋭敏化の程度の評価方法は、再活性化率 (Reactivation ratio) で示される。E P R 測定結果と粒界腐食及び粒界型応力腐食割れ感受性との相関性についていくつかの試験及び事例がある。その結果によると、実際に粒界腐食及び粒界型応力腐食割れが進行するのは鋭敏化率が 5 % 以上の場合である。(図-4. 10 参照)

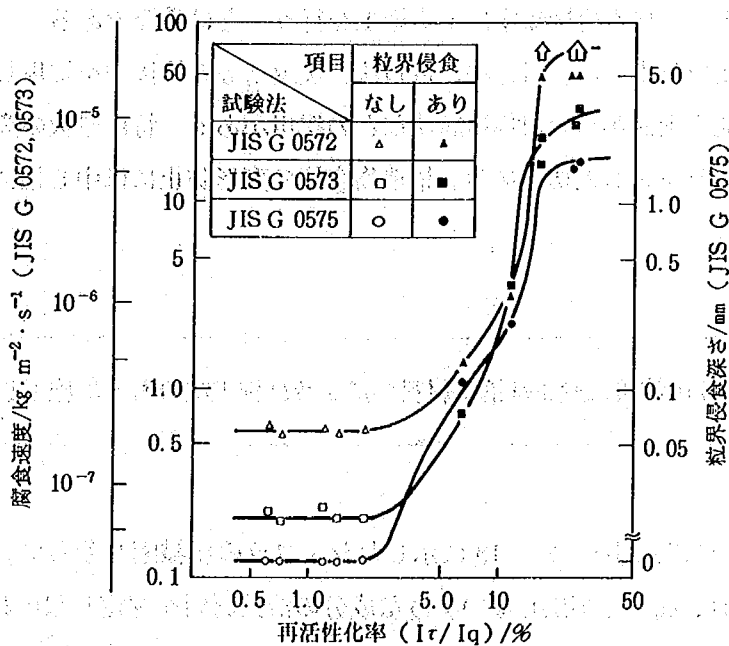


図-4. 10 SUS403における再活性化率-腐食速度の関係

(7) 溶接外観

溶接ビード外観において、著しいアングカット、ビード波があってはならない。またオーバーラップ、ビードの割れがあってはならない。

【解説】

著しいアンダカット、ビード波等溶接外観不良は継手強度に影響を及ぼすのみでなく、欠陥部に腐食性物質の滞留、濃縮を招き耐食性を損ねる。従って、アンダカット、ビードの割れはすき間腐食等の原因ともなるので、あってはならないとした。

(8) 溶接順序、溶接歪み

溶接施工にあたっては、溶接残留応力を少なくすると共に、溶接歪みが少なくなるような溶接順序で溶接しなければならない。

【解説】

ステンレス鋼の溶接を行う場合、できるだけ加熱のチャンスを減らすことが必要である。このため考慮すべき重要項目に溶接歪み防止がある。

オーステナイト系ステンレス鋼の場合には、炭素に比べて熱膨張係数が1.5倍、熱伝導率が $\frac{1}{3}$ であり、溶接変形が大きい。また、マルテンサイト系、フェライト系ステンレス鋼の場合には、硬く、延性がないので、角変形が生じた場合プレス矯正で割れを生ずる恐れがある。従って、溶接変形量を見越した伸ばし工法の採用と共に、変形量が少なくなる溶接順序による施工を行うことは重要である。

溶接回転変形及び収縮変形防止には、対称法、飛石法、後退法等の溶接法を採用し、角変形防止には、ストロングバックの使用や開先両面からの対称積層法などの採用がある。特に厚板の突合せ継手のような場合には、表・裏開先形状のバランスも大切である。構造物全体の変形防止には中心軸に対称に両側から同時溶接することが有効である。

(9) 異材継手の溶接

ステンレス鋼との異材継手の溶接は適正な溶接材料の選定及び施工法のもとに施工しなければならない。

【解説】

溶接材料の選定にあたっては、図-2.18に示したシェフラの組織図を参考にし、母材成分の希釈を考慮した溶接金属成分が割れ、脆化等が生じないような成分の溶接材料を選定しなければならない。

例えば、Ni、Crを含まない炭素鋼とステンレス鋼を溶接する場合には炭素鋼によるNi、Crの希釈を考慮して、Ni、Crの高い溶接材料の選択が必要である。

特に異材継手で注意しなければならないことは、オーステナイト系ステンレス鋼または溶接金属をフェライト系溶接材料で溶接すると、溶接金属がマルテンサイト化し、割れが発生するので手直し溶接を含めて注意しなければならない。

(10) 溶接環境

降雨、降雪下においては、屋根オーニングシール等の適正なる処置を行い、溶接部へ水分がかからな

いことが確認された場合以外は溶接を行ってはならない。また、シールドガス溶接では防風を十分に行いアーク近傍の風速が3m/secを越すとガスシールドが破けるので溶接欠陥発生の原因となる。

【解説】

溶接時の環境温度についてはオーステナイト系ステンレス鋼は炭素鋼に比べて割れ感受性が鈍感であるので特に規定しなかった。むしろ夏期において鋼材温度が50度を越える時期で、冷却速度が遅くなるような場合には、鋭敏化されやすい方向となるので、溶接入熱量、パス間温度を下げる等の処置が必要である。

次に溶接（切断）スパッタ対策であるが、特にオーステナイト系ステンレス鋼にスパッタが付着すると耐食性を損ねるので、スパッタ付着防止のための耐火性オーニングやスパッタ付着防止剤の使用が必要である。

(1) 歪み取り

オーステナイト系ステンレス鋼の場合は可能な限りプレス歪み取りで行うこと。これが不可能な場合には850℃～930℃間加熱水冷歪み取りとする。

マルテンサイト系ステンレス鋼の場合には、硬く延性がないので歪みの生じない溶接を行うことが原則であるが、やむを得ぬ場合のみ100℃～200℃予熱でプレス歪み取りを行う。熱間歪み取りは行わない。

【解説】

オーステナイト系ステンレス鋼は、図-2、20でも示したように、550℃～900℃の高温で長時間保持するとCr炭化物の粒界析出に伴う脱Cr層が形成され、この部の耐食性が失われ鋭敏化される。

従って、高温に長時間保持される空冷歪み取りは鋭敏化を招きやすく望ましくない。高温保持時間が少なくとも1分以内になるような水冷歪み取りで行わなければならない。

マルテンサイト系ステンレス鋼の場合には、熱処理による感受性が高いので要求されている機械的性質を失う恐れがあり熱間歪み取りは望ましくない。

また、プレス歪み取りの場合でも硬度が高く、延性が低いので100℃～200℃の予熱を施して、歪み取りを行わないと脆性破壊を生ずる。この場合でも歪み取り後、浸透探傷検査によって割れが生じていないことを確認しておく必要がある。

なお、歪み取りは以上の点に十分注意して行えば大きな不都合とはならないが、表面に焼けや傷を生じて、十分な表面処理を行うことが必要になる。

このため歪み取りを少なくなるような設計、施工が求められる。

(2) ピース類除去法

吊り金具、組立てピース類を除去する場合には、ピース類の根本から10mm以上離れたところを切断し、アークエヤガウジングで2～3mm残して平ガウジングを行い、残りを#120より細かいメッ

シュのグラインダで母材まで平滑に仕上げる。

このとき、飛散する切断火花を直接母材表面に当たらないようブリキ板や防護シートで養生することが必要である。

【解説】

ピース類をあまり母材に近いところで熱切断すると、母材に傷つけたり、好ましくない熱サイクルを与えたりするので望ましくない。グラインダは途中は粗でもよいが仕上げは耐食性を確保するため#120より細粒のものをいい、できる限りグラインダの仕上げ傷が少ない方がよい。また、ピース類を残すことによって、外観上、強度上及び耐食性の面で問題がないような場合には残しておくことも方法である。

(13) 溶接スパッタ、切断火花付着部の処理

溶接スパッタ、切断火花が母材に付着した場合には、#120より細粒のグラインダで平滑に除去しておかねばならない。

【解説】

溶接スパッタ、切断火花は熔融状態で空气中を飛来してきたものである。また、これが付着したままであると、付着部表面は粒状の凹凸となり、耐食性を劣化し、錆の発生源となって周囲の錆を誘発する。

特に炭素鋼のスパッタ、火花の場合にはこの傾向が著しいので、完全な除去が必要である。

(14) 表面傷の処理

表面傷の深さが0.5mm以下の場合には、グラインダで平滑に修正する。0.5mmを超える場合には、肉盛りを行いグラインダで平滑に仕上げする。グラインダは#120より細粒のものを使用すること。

【解説】

表面傷は切欠きによる機械的強度に影響を及ぼすと共に、腐食性物質の滞留、濃縮の原因となり発錆の原因となるので除去、補修が必要である。

(15) 後熱処理

オーステナイト系ステンレス鋼の場合は後熱処理を行わない。

【解説】

オーステナイト系ステンレス鋼は後熱処理を行うことによって、図-2、20のT-T'S線図に示すように、鋭敏化され耐食性を劣化させる。

一方、機械的強度の面から考察してみると、このステンレス鋼は降伏比(σ_s/σ_g)が低く延性が大いなので、溶接部に局部的残留応力が存在しても外力との和が耐力を越えたところから漸次歪みに置換され

て、残留応力解放がなされ、破壊には至らない。従って後熱処理は行わないこととした。

なお、マルテンサイト系ステンレス鋼を戸当りレール材として用いる場合の溶接は主な溶接が残留応力の低いすみ肉溶接であり、また図-4.11に示すように200～400℃の予熱を行うことにより更に残留応力が軽減されるので、後熱処理を省略できることとした。

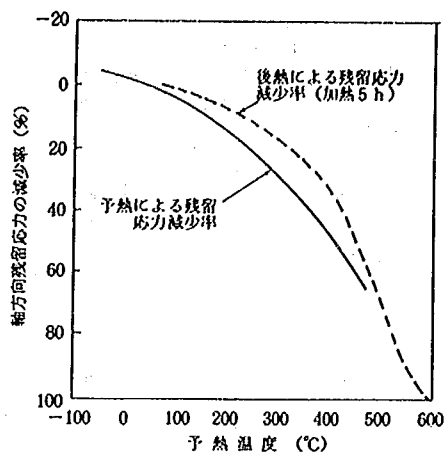


図-4.11 予熱温度と残留応力

(16) 表面処理

ステンレス面は原則として全面不働態化処理を行うこととする。

特に溶接熱影響部、グラインダ仕上げ部は充分に不働態化処理を行わなければならない。なお、表面処理後、施工中のもらい錆の防止策を講ずるものとする。

【解説】

溶接熱影響部、グラインダ仕上げ部、引っかけ傷跡等は母材受入のときの不働態化被膜がしているので、不働態化処理が必要である。不働態化処理方法としては、①硝酸-弗水素酸液に浸漬する方法、②二液混合塗布法③電気的不働態化法などがあるが、①は不働態化後の酸の処理が必要であり、かつ浸漬法なので大型構造物には槽設備が大型であるため実用的ではない。従って、不働態化液の後処理が不要である②の二液混合塗布法あるいは③の電気的不働態化法がむしろ実用的である。しかし、②及び③の方法ではグラインダ仕上げ先輝面はあまり変化なく、素材表面とは外観差をなくすことはできない。このため、あらかじめ全面サンドブラストを施工し、外観差を低くしてから②または③の不働態化を行うことも考えられるが、サンドブラストにより表面に凹凸が生じ、耐食性を損ねるという可能性は残される。

なおブラスト処理を行った場合、グリッドの付着を完全に取り除きもらい錆の防止を図ること。表面処理後、施工中のもらい錆防止策は、クリアペイントを塗布する方法や剝離ペイントを用いる等の方法がある。

(17) 検査

溶接開先は溶接施工前に肌付き、開先形状、清掃状況の検査を行う。溶接中においては、裏掘り、ス

ラグ清掃状況溶接条件等の検査を行う。溶接後は割れ、アングカッ、脚長、余盛り高さ、ビード波の粗さ等外観検査を行う。内部欠陥の非破壊検査は放射線透過試験で行い、水門扉主要構造部突合せ継手5%以上の長さについて行う。判定基準は表－4. 14による。

表－4. 14 放射線透過検査の判定基準

母材の板厚 欠陥の種類	放 流 管 及 び 常 時 は 接 水 し て い る 水 門 扉		常 時 は 接 水 し て い な い 水 門 扉
	50mm以下	50mmを越える もの	
第 1 種 の 欠 陥	2 級	1 級	2 級
第 2 種 の 欠 陥	2 級	1 級	2 級
第 3 種 の 欠 陥	全 合 格		
第 4 種 の 欠 陥	2 級	1 級	2 級
第 1 種 及 び 第 2 種 第 4 種 の 混 在 す る 欠 陥	2 級	2 級	3 級

(注) 第 1 種、第 2 種 及 び 第 4 種 の 存 在 す る 欠 陥 の 場 合、その 試 験
視 野 内 の 第 2 種 の 欠 陥 は、欠 陥 の 種 類 「第 2 種 の 欠 陥」に 示
す 等 量 と 同 じ ま た は、そ れ 以 上 で な け れ ば な ら な い。

【解説】

オーステナイト系ステンレス鋼の超音波探傷は、現在適用研究が進められているが、超音波の減衰及び粒界からの乱反射などの面から、特に厚板への適用はまだ実用化に至ってはいない。従って、内部欠陥の探傷はJIS Z3106「ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類法」により行う。

4. 3. 据付に関する事項

4. 3. 1 工具及び治具材料

据付に使用する工具及び材料は次の物を使用する。

表－4. 15 据付に使用する工具及び材料は、次の物を使用する。

据 付 用 等 工 具	・ レバーブロック、ターンバックル等は、塗装または、メッキを施してあるものを使用することが望ましい。 ・ 据付ける過程におけるレベル出し、調整ライナ材は、ステンレス材料を使用する。
製 品 本 体 に 取 付 け る 据 付 用 ピ ー ス	・ 取合いピース、取合せピース、金矢ピース、引張用ピース等は、ステンレス材を使用する。
製 品 の 保 持 に 使 用 す る 材 料	・ 製品の転倒防止に使用する材料は、直接製品に接する部分については、ステンレス材またはアルミニウムを使用する。

【解説】

- 1) 雨水等で、工具がさびることにより、製品ステンレス表面にもらい錆が付着したり、鉄粉が付着することを防止するため、塗装または、メッキを施した物を使用することにした。

なお、ネジ部等どうしても、この処理が講じられない部分についてはビニル等で、保護処理をするものとする。

- 2) 製品以外のピースを現地にて取付ける必要性が発生した場合は、ステンレス材を使用し、取付けにあたっては、工場製作の使用に準じて行わなければならない。

4. 3. 2 据付作業

据付作業にあたっては、切断、組立て、溶接及び検査等工場製作の仕様に準じて正確、丁寧に据付けらるものとする。

【解説】

現地据付作業においては、工場のように建て、屋内で作業を行うことは不可能であるので、常に自然の状況変化に即応することが重要な問題となる。よって特に溶接作業においては、雨対策、風対策等実施して工事を進めなくてはならない。

4. 3. 3 製品の保管

押え板、ボルト等小物部材及び部品等の保管は、原則として屋内（倉庫内）保管とする。やむを得ない場合は、オーニングシート掛にて保管する。

製品ブロック部材等に取付いているローラ部、シーブボックス部給油管部等の狭隘箇所については、ビニル、シート等で保護する。

製品ブロック部材を、鋼製架台及び木材上に仮置きする場合は、ブロックとの間に塩化ビニル材料やゴムシート等を挿入する。

【解説】

鉄粉及び異物等、ステンレス鋼に有害な物質を除去するのに困難な狭隘箇所については、事前に防護措置をしなくてはならない。また、製品に無用な錆、傷等の発生を防止しなくてはならない。

4. 3. 4 安全設備等

安全対策として、使用する足場板、手摺、固縛用番線、ボルト、ナット等は、アルミ材料、塗装した材料、ステンレス材料、ビニルで保護した材料を使用すると共に、製品との間には、ステンレス材料、

ゴムシート等を挿入する。また、作業者が製品の上を歩行する安全通路や作業通路には、ゴムマット、シート等の保護材料を敷設する。

【解説】

ステンレスの表面の保護不備により、無用な錆、傷等の発生を防止しなくてはならない。

4. 4 保守管理に関する事項

4. 4. 1 一般的注意事項

保守管理は塗装替えを除き、普通鋼材を用いたゲートと同様とする。

【解説】

(1) オールステンレス鋼製ゲート設備は、塗装に関する保守管理が必要なくなるが開閉装置、操作機器、回転部摺動部等の可動部の保守管理は普通鋼材を用いたゲートと同様である。

回転部とは、ローラ、シーブ、ラジアルゲートのトラニオン部などが挙げられる。ステンレス鋼材を使用した場合、回転部は無給油タイプとなる場合が多い。しかし、ゴミ、泥、砂が影響し、回転部の小さなすき間に錆が発生する可能性があるため点検ポイントとして考慮すべきである。

(2) タップ穴式のボルト接合部は、ボルト締付けの際にかじり付き（焼け付き）が起こり使用不能となる場合があるためボルトの取り外し締付け時には、予備のボルトや潤滑剤を準備することが望ましい。

4. 4. 2 点検上のポイント

ステンレス鋼材特有の腐食を考慮した設備の保守・管理が必要である。

【解説】

(1) ステンレス鋼材も腐食する場合があるため次の点に注意して点検する必要がある。

① 平坦箇所の孔食

ゴミ、ホコリ、ヘドロ及び水中生物などの付着堆積物に注意して点検すること。

孔食の発生する可能性がある場所として次の項目が挙げられる。

- ・扉体の上面板
- ・フジツボ等が付着しているスキムプレート面
- ・ガータゲートの主桁ウェブ上側
- ・水抜孔、スカラップ部で、泥、砂、枯葉などが堆積している部分

(2) 常時水中にあるようなものに対して、同構造の引き上げ可能なものを近傍の同環境において、これを定期的に点検することにより、類堆する方法も良好である。

② 部材の重ね合せ部のすき間腐食

原則的に連続溶接で施工すべきものではあるが、部材と部材の間に浸水しないようになっているかどうか点検すること。また、構造上溶接が困難な箇所や破損などによりすき間が生じやすい箇所についても点検すること。すき間腐食が発生する可能性のある場所は次の項目が挙げられる。

○ 水密ゴム取付部

A. ボルト、ナット、取付部のすき間

B. 水密ゴム押え板、水密ゴム、水密ゴム取付座金の間のすき間

水密ゴム取り替え時には液状パッキンを従来のもの（普通鋼製水門）より多く塗布することによりすき間腐食は防止できる。

○ カバープレート取付部（ボルト止方式）の骨組（主桁、補桁のフランジ）とカバープレートとのすき間

○ ローラ、シーブの軸取付用キープレートの部分

○ 取り外し式戸当りレールのアンカパットとレールの結合部分

③ 異種材料との接触部の異種金属接触腐食

原則的にオールステンレスゲートの場合、不働態化した金属どうしでは、異種金属接触腐食が生じるような材料の組合せはあり得ないが、竣工当時に比べて水質が変化するなどで腐食環境が変わる場合があるためあらかじめチェックポイントを設けて定期的に点検すること。異種金属接触腐食の発生する可能性のある部材の組合せとしては次の項目が挙げられる。

○ ワイヤロープとロープシーブの折曲げ接触部（どちらもステンレス製ではあるが、鋳鋼とロープでは金属組織が異なる。また、ワイヤロープをステンレス以外を用いた場合は腐食の可能性が高い。）

○ ローラと戸当りレールローラ踏面（ローラゲート）

○ 水密板と摺動板（メタル水密のスライドゲート）

○ 水密ゴム押え板と取付用ボルトナット

○ 各所ボルト取付部と座金（ステンレス以外のB s P座金等）

○ ローラ部に用いたばね鋼

2) 塵埃の堆積により生じるステンレスの錆（もらい錆、すき間腐食）を防止するためにステンレス鋼材表面は常に洗浄にしておかなければならない。そのため設置環境によっては、適当な間隔で定期的に洗浄できるような設備が望ましい。

4. 4. 3 補修上の注意

ステンレス鋼材の腐食を考慮した設備の補修が必要である。

【解説】

① もらい錆、汚れが生じた箇所にグラインダ仕上げ、バフ仕上げを行う場合は、必ず新しいディスクまたはステンレス専用のものを使用すること。一般鋼材で用いたものは使用しないこと。

- ② 補修時にブラスト処理を行った場合、グリッドの付着を完全に取り除くこと。（もらい錆の防止のため）
- ③ 研磨、研削加工面は活性化状態（働態化）の金属面となるため、腐食しやすくなる。そのため電解研磨処理などの不働態化処理を行うこと。
- ④ 溶接補修部の表面は塵埃のたまりにくいものとする。（作業環境によっては研磨、研削加工を行うこと）
- ⑤ ステンレス鋼材（特にマルテンサイト系）の現場での切断は困難なため、補修のための切断は避けることが望ましい。
- ⑥ ステンレス鋼材は、その種類によって金属組織（組成）が異なるため、補修にあたっては本体の材質を詳しく調査し、適合性のある補修材料を選択しなければならない。
- ⑦ 溶接補修部はスラグの巻き込みや残留フラックスによる異種金属接触腐食が発生する可能性があるため点検すること。
- ⑧ ステンレス鋼材の表面は、機械加工の時期やその方法により、光沢に差ができる。そのため、特に周囲の環境など影響を与える場所にゲートを設置する場合は、美観を考慮し、上塗り仕上げ色のみを塗布する方法もある。そのため部分的な補修塗りを行う場合もある。

5. まとめ

本調査試験を通じて以下の成果が得られた。

ダム用ゲートは、大型、厚板溶接の重構造体であり、製作工場及び現地据付における溶接継手部に発生する鋭敏化現象など、ゲート形成までの各加工段階においていくつかの腐食原因の可能性が存在する。これらに対策を採ることでオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）の特性を損なうことなく製作することができるものである。

本調査で実施した事項は、厚板・重構造体の溶接工法の選択にあたって考えられる一連の確認試験となるもので、その内容は溶接の欠陥に関する試験、溶接鋭敏化、歪みに関する試験、溶接鋭敏化、歪み防止、溶接の実際的な確認試験の他に溶接継手部の機械的性質調査を行い、この中から使用する溶接棒、溶接入熱量、溶接工法、鋭敏化対策等を抽出して検討を行い、留意事項についてまとめた。これらはステンレス鋼を使用するにあたり、その特性を活かすために必要な事項であると考ええる。内容的には多くの制約が課せられると感じられる部分もあると思うが、一般構造用鋼材による製作の場合でも、ほぼ同様の施工管理項目が官民の両方で設けられ、各々の責任において実施している。今後のゲート設計にあたり、ステンレス鋼を採用した新しい設計仕様の展開が期待できるものと思われる。なお、長期的な使用環境における腐食の進行や、各種表面処理の効果が構造体として明確にされていない事項は従来材に比べて十分とはいえない。従って、今後もダムや堰等に維持管理の軽減や防食を目的とした水門へのステンレス鋼利用に対する長期的かつ計画的な試験・研究が望まれる。

6. 今後の課題

表-6. 1は、ダムと堰における構造物にステンレス鋼及びステンレスクラッド鋼を利用する際における検討の必要性があると思われる課題項目を拾い出し、キーワードごとに整理し、一覧表にしたものである。

ステンレス鋼は、普通鋼材と比べれば実績面や諸性質面などで差異があり、これらの分野における長期的視野での研究と実績に基づいた調査研究を行っていく必要がある。

表-6. 1 ステンレス鋼及びステンレスクラッド鋼の基本課題一覧表

本表に整理した内容は、原則的にダム並びに堰における構造物を対象としている。但し、本テーマに関わる調査検討自体まだ緒についたばかりであり、調査の全体構成を組立てていく上で対象材料の適用範囲・可能性・実績等が整理されていない前提のもとでの作業のため、雑多な項目が入り交った状態である。従って、本表作成に際しては、可能な限り検討対象部分、内容、目的を明確にし、その詳細内容については、別紙において説明するものとする。また、各課題キーワードに対するアプローチ方法についても別紙において説明していくものとする。

アイテム	設 計	施 工	据 付	管 理 (補 修)
I. 材 料				
① 環 境 (水 質) 【扉 体】 【戸当りの接水部】 【 】	母材の選定 H2近畿 (淀川) ・ステル化箇所の明確化 (扉体、戸当り、放流管 等を機種別に要検討)			
II. 強 度				
①母 材 (0.2%耐力) 【扉体本体】 【 】	△0.2%耐力で設計する なら変形を見越した 設計をする →理論的裏付けが必要 ◎クラッド鋼は特有 板厚日 (clad:母材) 理論解析・実験的研究			
②溶接部の — 基本性能 【扉体本体】 【 】 — 継続効率	・引張、曲げ強度 溶接継手効率 土研 (~H4.1) ・溶接部の信頼性 ・非破壊検査	溶接材料選定 ・溶接機選定 (方法) 補 修 東北調査中 (クラッド H3) ・溶接欠陥の補修 (リペア溶接の検討) ・開先形状、開先汚れ ・溶接環境管理 ・クラッド鋼の開先形 状※ ・歪み防止と残留応力 ・溶接部の冶金学的性質 ・塗装と溶接割れ	・現場における溶接 ・現場検査不可能部分 の検査方法の対応	・不具合発生時の補修 ・孔食の補修 (海水)
③ボルト結合 (付属部分における) 【ボルト】 【軸受け】 【 】	△異種金属接触腐食 ・疲 労 ・応力腐食割れ ・転造、切削材の製 作法、熱処理 (硬度) ・軸・ナットの材質組 合せ (焼き付け防止)		・ボルトの軸力管理方 法	・検査事項

凡例 1. [] : 調査中、 [] : 調査済み

凡例 2. ◎: 重要、○: 必要、△: 普通、×: 不要

凡例 3. ※: クラッド鋼特有のキーワードである。

(注釈) 表中の機関名は、調査を計画・実施部署を示す。

(表-6. 1の続き)

アイテム	設 計	施 工	据 付	管 理 (補 修)
④切 断 【扉体本体】 【 〃 】	_____	×プラズマ切断	・現場における切断	・不具合発生時の対応
⑤曲 げ 【 〃 】 【扉体本体】	・限界（防食） △瘦せ馬現象※ （技術的研究）	△表面処理 （実験的研究）	_____	_____
⑥切 削 【全 般】 【 〃 】	・方法（防食）	・方法（防食） ・切削熱による変形 （切削条件・方法）	_____	_____
⑦焼 鈍 し 【扉体本体】 【 〃 】	・残留応力の影響 ・SUS304L, SUS316L 材 採用の可否 ・低温焼なましの検討	・残留応力の影響 ・高圧スライフト等では SUS304L を低温・長時 間で焼なましている。 その有効性が不明確。	_____	_____
⑧施工整備 【扉体本体】 【 〃 】	_____	・加工記録 ・加工環境 ・自動化設備	・養 生	_____
⑨メッキ 【軸 類】 【 〃 】	・油圧シリンダの加工 方法（技術） ・材質に応じた材料厚 ・油圧シリンダの材質 選定	_____	_____	_____
⑩施 工 者 【全 般】 【 〃 】	_____	・体制（溶接工、実績） ↓ 要検討	・体制（溶接工、実績）	_____
Ⅲ 防 食				
⑪加工 ——— 熱 ——— 機 械 ——— 処 理 ——— 環 境	_____	溶接入熱量基準 （鋭敏化度） 土研 ・クラッド鋼の溶接入熱 量※（特に薄板） ・加工基準 ・焼なまし ・表面処理 （酸洗、電解研磨） ・もらい錆防止手法	・現場溶接 ・現場加工 ・表面処理要領 （酸洗、電解研磨）	_____ _____ ・管理方法、項目 _____

凡例1. : 調査中、 : 調査済み

凡例2. ◎ : 重要、○ : 必要、△ : 普通、× : 不要

凡例3. ※ : クラッド鋼特有のキーワードである。

（注釈）表中の機関名は、調査を計画・実施部署を示す。

(表-6. 1の続き)

アイテム	設 計	施 工	据 付	管 理 (補 修)
②構 造 接 触 └─┬─┘ 隙 間 【扉体本体】 【 】	・構造・形状設計 (ケーススタディ)	施 工 ・ 据 付 ・ 管 理 面		
③管 理 【全 般】	_____	_____	_____	・据付完了後のもらい 錆 (関係業者に対す る施工、品質管理体 制等)

凡例1. : 調査中、 : 調査済み

凡例2. ◎: 重要、○: 必要、△: 普通、×: 不要

凡例3. ※: クラッド鋼特有のキーワードである。

(注釈) 表中の機関名は、調査を計画・実施部署を示す。

あとがき

本報告書は、関東地方建設局宮ヶ瀬ダム工事事務所の調査依頼によりダム用ゲートへのステンレス鋼の適用性について調査した結果をまとめたものである。

ダム等の水門にステンレス鋼を部分的に利用している施工は見られるが、構造物の大部分を各分野の専門家の皆様にご意見をお伺いいたしまして現状におけるステンレス鋼に関する検討課題をそのキーワードを列挙することにより今後の課題として提言している。

読者の皆様からのご意見は、お問い合わせ先へお送りください。

〒100-8501 東京都千代田区千代田 1-1-1 国土交通省

建設省 水資源部 水門課 水門設計課 水門設計課 水門設計課

〒100-8501 東京都千代田区千代田 1-1-1 国土交通省

建設省 水資源部 水門課 水門設計課 水門設計課 水門設計課

参考文献

心除ち

- 1) ステンレス鋼便覧 (1981) 日本機械学会編
- 2) 日本工業規格 (JIS) 5050 1981
- 3) 機械工学便覧 日本機械学会編 (1981) 5050 1981
- 4) 梅村文夫、川本輝明：電気化学的再活性化法 (EPR 法) による鋭敏化度の評価 (1983) 日本金属学会会報第 22 巻第 10 号 1983 「技術資料」別冊
- 5) 梅村文夫、松倉伸二、中村英之、川本輝明：ステンレス鋼の常温大気中応力腐食割れに関する暴露試験結果と実験室検討、防食技術、36 1987
- 6) 梅村文夫：ステンレス鋼の健全性 (鋭敏化) を診断する新技術 — EPR 法 —、防錆管理 Vol.28 No.1 1984
- 7) 河崎正、篠他軍治：日本金属学会誌第 9 号

ダム用ゲートにおける
ステンレス鋼の特性調査

I S S N 0386-5878

土研資料 第3093号

平成4年3月 (1992)

杉山 篤, 長 健次, 村松 敏光
竹田 英之, 米村 克己, 齋見 篤

要 旨 本調査は、ダム用ゲートに対するステンレス鋼の特性の把握を目的として実施したものである。

今日、供給されている鋼種の物理的性質及び機械的特性を調査し、その適用について検討した。また、溶接ゲート構造体の溶接継手部の強度試験、溶接に伴う鋭敏化度の定量評価を行った。これらの調査、検討、試験結果をまとめたものである。

キーワード：SUS304, ステンレス鋼, 溶接, ダム用ゲート

郵便はがき

郵便切手を
はって下さ

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所

機械施工部機械研究室 行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 58

No. 58

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3093号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印