

ステンレス新材料の河川・ダム施設用途における溶接性及び耐食性

岡田修幸・富山禎仁・西崎 到

1. はじめに

河川・ダム施設は多目的に河川水を利用・制御するための重要な施設である。これらの施設の鋼構造物は、運用上、メンテナンスを限られた期間で行うことが求められる等制約条件が多い。そのため、メンテナンス負荷の軽減を目的として、耐食材料が多く使用されている。SUS304やSUS316Lに代表されるステンレス鋼はこうした要求のもと採用されている。近年、自然災害の激甚化に対応し、河川・ダム施設の大形化及び高強度化が求められており、耐食性に加え強度の要求水準も高まっている。このような中、リーン系二相ステンレス鋼と呼ばれる新しいステンレス鋼の開発が進み、SUS821L1、SUS323Lの2鋼種が新たにJISに登録された^{1),2)}。SUS821L1はSUS304、SUS323LはSUS316Lとそれぞれ耐食性が同等であることに加えて高強度であり、河川・ダム施設への適用が期待されている。その一方で、ステンレス鋼溶接部では局所的な熱影響を受けた部分(HAZ: Heat Affected Zone)が母材とは異なる特性を示すことがあるが、リーン系二相ステンレス鋼のダム・河川施設用途における溶接部挙動の詳細は明確ではなかった。本報では、河川・ダム施設への適用の観点から、リーン系二相ステンレス鋼の溶接性^{*}及び溶接部の耐食性を調査した結果を報告する。

2. ステンレス鋼の概要

2.1 ステンレス鋼とは

ステンレス鋼は、JISにおいてCrを10.5%以上含む合金鋼と定義されている³⁾。またCrの他にも耐食性、強度、加工性等用途に応じた特性を得るため、NiやMo等を添加した鋼種が多数開発されている。ステンレス鋼の耐食性は、不動態皮膜と呼ばれる厚さ数nmのCrの酸化皮膜で覆われることにより発揮される。不動態皮膜はひっかき等に

より破壊されても、酸素が供給されれば短時間で再び形成される。この現象は再不動態化と呼ばれ、ステンレス鋼のメンテナンス負荷が小さいことにつながっている。

2.2 ステンレス新材料の特徴

構造材料として用いられるステンレス鋼は、主にオーステナイト系と二相系(オーステナイト・フェライト系)に分類される。代表鋼種の成分及び力学的性質を表-1に示す。オーステナイト系の代表であるSUS304、SUS316Lは高価かつ価格変動の大きいNi、Moの添加量が多く、近年著しい価格高騰を起こした。二相系のSUS329J4Lは耐食性及び強度に優れるものの、Ni、Moが添加され高価であり、要求性能の厳しい用途に限定して使用されている。リーン系二相ステンレス鋼はこれらの高価な合金元素を節減した鋼種であり、価格安定性に優れている。さらに0.2%耐力による比較ではSUS821L1、SUS323LはSUS304、SUS316Lの約2倍の強度が規格化されている。このため、高強度を活かした薄肉化により、鋼材使用量低減に加え軽量化による付帯設備や据付費も含めたコストダウンが期待されている⁴⁾。

表-1 各種ステンレス鋼の主要成分と力学的性質

分類	鋼種	主要成分 (mass%)	0.2%耐力 (N/mm ²)
リーン系二相ステンレス鋼	SUS821L1	21Cr-2Ni-0.17N	≥400
	SUS323L	23Cr-4Ni-0.15N	≥400
二相ステンレス鋼	SUS329J4L	25Cr-7Ni-3Mo-0.15N	≥450
オーステナイト系ステンレス鋼	SUS304	18Cr-8Ni	≥205
	SUS316L	18Cr-12Ni-2.5Mo	≥175

2.3 リーン系二相ステンレス鋼の耐食性

河川水中に存在するCl⁻には不動態皮膜を局所的に破壊する作用があり、孔食やすき間腐食のような局部腐食を生じさせることがある。こうした環境でのステンレス鋼の耐食性比較にはPREN(Pitting Resistance Equivalent Number)と呼ばれる指標が用いられることが多い⁵⁾。この指標は、一般に下記式(1)に示すように合金成分の添加量によって整理される。

Weldability and Corrosion Resistance of New Stainless Steel in River and Dam Facilities

^{*}土木用語解説：溶接性

$$PREN = Cr\% + 3.3Mo\% + 16N\% \text{-----式 (1)}$$

SUS821L1、SUS323LもPRENにより耐食性を整理でき、SUS821L1はSUS304、SUS323LはSUS316Lと同じ耐食性区分に分類されている⁶⁾。

2.4 ステンレス新材料の適用に関する課題

先述の通り、ステンレス鋼のHAZは母材とは異なる特性を示すことがある。従来のステンレス鋼に関する検討結果はすでに土木研究所資料にまとめられていることから⁷⁾、今回は新たにリーン系二相ステンレス鋼について室内試験及び屋外暴露試験により検討した⁸⁾。

3. ステンレス新材料の評価

3.1 溶接性及び溶接部の耐食性に関する室内試験

河川・ダム施設への適用を想定した条件で溶接継手を作製し、特性について評価した。今回は、これらの施設で広く使われているSUS304と同じ耐食性区分のSUS821L1について評価した。

3.1.1 溶接条件

供試材は40mm厚のSUS821L1を用いた。溶接方法は一般に用いられるFCAW(Flux Cored Arc Welding)とし、溶接材料はTS2209を用いた。図-1に示すように開先形状はX開先、溶接姿勢は下向と立向の2種類とし突合せ溶接を行った。入熱量は下向13~26kJ/cm、立向27~47kJ/cmとした。

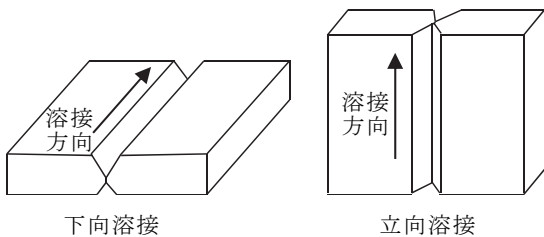


図-1 開先形状及び溶接姿勢

3.1.2 室内試験方法及びその結果

(1) ビード形状・組織観察

図-2にSUS821L1溶接継手ビード外観の一例を示す。下向・立向のいずれにおいてもビード形状は良好であった。また、マクロ・ミクロ組織観察においても異常な組織は認められなかった。



図-2 SUS821L1下向溶接継手ビード外観

(2) 引張試験(JIS Z 2241)

一般に二相ステンレス鋼は高強度であり40mm厚での評価は困難なため、板厚中央から14A号試験片を採取し試験を実施した。溶接部の引張試験の結果と、参考としてSUS821L1とSUS304の母材引張強さの規格値を表-2に示す。破断位置はいずれも母材部であった。また引張強さは規格値を満足し、SUS304を上回った。

表-2 SUS821L1 溶接部引張試験結果

溶接姿勢または母材規格値	引張強さ(N/mm ²)	破断位置
821L1 下向	725	母材
821L1 立向	741	母材
821L1 母材規格値	≥ 600	—
304 母材規格値	≥ 515	—

(3) シャルピー衝撃試験(JIS Z 3128)

溶接部の靱性評価のため、シャルピー衝撃試験を行った。ステンレス鋼についてはJISに靱性の規定がないため、河川・ダム施設に一般に使用されるSM400Bの規格値(0℃で27J以上)と比較した。ノッチ位置は溶接金属部及びHAZとした。鋼材の吸収エネルギーは温度が低いほど低下する傾向があるため、試験温度はより苛酷な-10℃とした。試験結果を表-3に示す。SUS821L1の吸収エネルギーは、より低温側の-10℃でも上記の基準を満足している。

表-3 SUS821L1 シャルピー衝撃試験結果

溶接姿勢	ノッチ位置	試験温度(℃)	吸収エネルギー(J)
下向	溶接金属	-10	48
	HAZ	-10	61
立向	溶接金属	-10	48
	HAZ	-10	39

(4) ビッカース硬さ試験(JIS Z 2244)

溶接部力学的特性の総合的な確認のため、断面の表面から2mmと板厚中央の2ラインにおいて、表面2mmでは溶接線から±30mm、板厚中央では±20mmの範囲でビッカース硬さを計測した。試験力は9.8N、測定ピッチは1mmとした。母材部の硬さは200~250HV程度であった。表面2mmでは溶接金属部は母材部よりも25HV程度硬化する傾向が認められる。また、HAZは25HV程度軟化する傾向が認められ、その幅は5~7mm程度である。一方、板厚中央では、溶接金属部は表面2mmよりも若干硬化の程度が大きい傾向が認められた。また、HAZの軟化部の幅は表面側に

比べて小さく、3mm程度であった。硬さは位置によって種々変化するものの、異常な軟化や硬化は認められなかった。

(5) 側曲げ試験(JIS Z 3122)

溶接欠陥の確認のため、継手全厚を用いて幅40mm、厚さ10mmの試験片を作製し側曲げ試験を行った。試験条件は曲げ半径20mm(R=2t)の180°曲げとした。下向・立向溶接とも欠陥は認められなかった。

(6) 耐食性試験

溶接部の耐食性評価のため、定電位保持試験を行った。本試験は孔食が進展しうる塩化物環境に試験片を保持し、腐食進展性を評価することを目的としている。比較としてSUS304(母材)とTS308(溶接材料)を用いて下向溶接継手を作製した。試験片はビード全幅とボンドラインから10mm程度が含まれるよう切り出した。溶液は3.5% NaCl溶液、温度は室温、時間は24hrとした。保持電位は+250mV vs. SCE(Saturated calomel electrode)とした。

定電位保持試験中の電流の変化を図-3に示す。本試験では電流が小さいほど孔食が進展しにくいことを示しており、SUS821L1の電流はSUS304のそれよりも小さく本試験環境でSUS821L1の方がSUS304より孔食が進展しにくいといえる。孔食発生は両鋼種ともHAZで顕著であった。SUS304ではボンドラインから5~6mm離れた位置にも孔食があり、SUS821L1よりも広い範囲で発生していた。孔食の程度はSUS304が最も顕著であり、次いでSUS821L1-立向、同一下向であった。本試験により、SUS821L1溶接部の耐食性は溶接姿勢によらずSUS304より高いことが確認された。

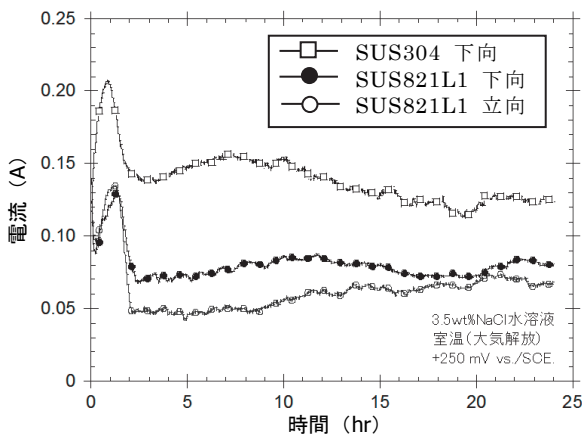


図-3 定電位保持試験中の電流変化

3.2 溶接部の耐食性に関する屋外暴露試験

室内における試験に加えて、実環境におけるリン系二相ステンレス鋼の耐食性を長期的に確認し、最適な適用方法を検討するため10年間の長期暴露試験を開始した。本報では1年目の結果について述べる。

3.2.1 暴露場所

暴露試験は江戸川水門下流側の河川護岸で実施した。試験片の設置状況を図-4に示す。試験場は感潮域に位置しており、干満等により水質が変化する。特に腐食に及ぼす影響が大きいとみられるCl⁻濃度について河川表層で測定したところ、干潮時で300ppm、満潮時で1700ppmであった。

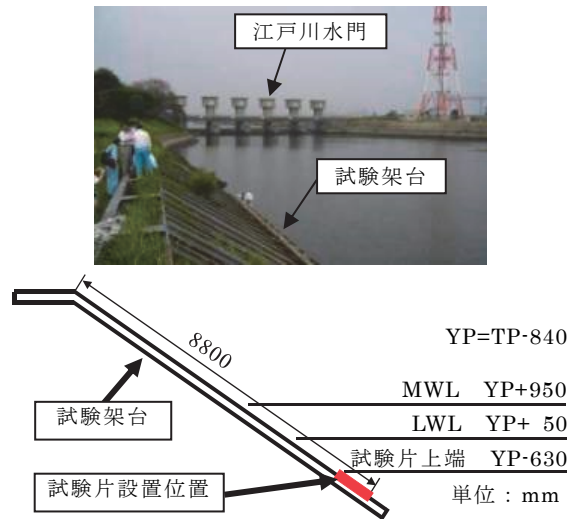


図-4 暴露試験片設置状況

3.2.2 試験片

供試材はSUS821L1、SUS323LとSUS304、SUS316Lを選定し、FCAW溶接により下向突合せ継手を製作した。試験片は平板とし、表面に溶接金属が15mm程度露出するよう継手から切り出した。表面は#600湿式研磨仕上げとした。一般に、ステンレス鋼の腐食は自由表面よりもすき間構造下の方が発生しやすい。そこで溶接部にすき間が形成されるよう、試験片を挟み込むようにして樹脂製すき間治具をボルト・ナットにより取り付けした。暴露試験片模式図を図-5に示す。

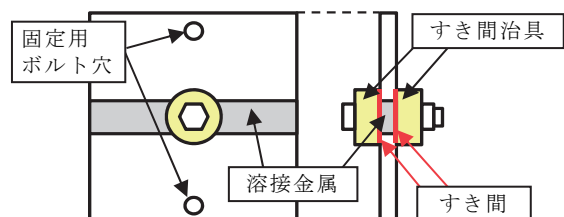


図-5 暴露試験片模式図

3.2.3 腐食状況

1年間暴露した試験片は、いずれも全面が藻と貝で覆われていた。これらの付着物を除去したSUS821L1及びSUS304試験片の外観を図-6に示す。すき間治具と接触していない部分においては、いずれの鋼種についても母材部、溶接部とも腐食はみられなかった。また、樹脂製すき間治具下においてもすき間腐食はみられなかった。試験片固定用ボルト穴周囲に腐食による変色がみられたが、腐食の程度はごく軽微であった。

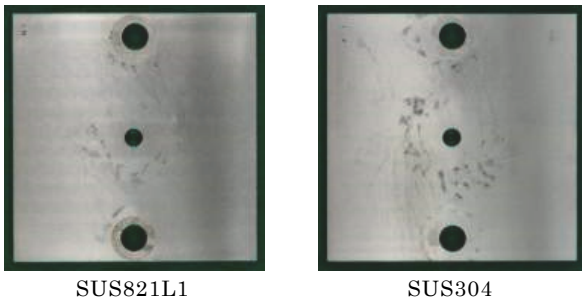


図-6 暴露試験片外観（付着物除去後）

4. まとめ

本報では新しいステンレス鋼であるリーン系二相ステンレス鋼について、河川・ダム施設への適用を想定した溶接性及び耐食性確認試験の結果について、室内試験と屋外での暴露試験に分けて述べた。室内試験では、リーン系二相ステンレス鋼の溶接部が、これまで広く用いられてきたオーステナイト系ステンレス鋼と同等以上の特性を有することが確認された。屋外での暴露試験では、リーン系二相ステンレス鋼の溶接部は、オーステナイト系ステンレス鋼と同様にすき間形成樹脂によるすき間腐食が生じていないことが確認された。これらの検討結果は、近年広まりつつあるリーン系二相ステンレスの河川・ダム施設への適用⁹⁾の進展に貢献できるものと考えられる。

今後は、今回開始した暴露試験をはじめとする耐食性の継続調査により、リーン系二相ステンレス鋼が長期間腐食環境におかれた際の腐食挙動を明確にし、河川・ダム施設への適用方法をさらに最適なものとしていく計画である。また、様々な環境下における耐久性に関する知見を蓄積し、他の用途へのリーン系二相ステンレス鋼の適用可能性を探索していくことが望まれる。

謝 辞

本研究の暴露試験の実施にあたり、国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所江戸川河口出張所のご協力をいただいた。また、本研究の実施にあたり河川・ダム施設の防食技術研究会ステンレス材料分科会の委員各位よりご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) JIS G 4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯、2015
- 2) JIS G 4305 冷間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯、2015
- 3) JIS G 0203 鉄鋼用語(製品及び品質)、p.19、2009
- 4) 遠藤義彦、和泉康平：水力発電設備ゲートへの二相ステンレス鋼の適用、電力土木、第385号、pp.14～18、2016
- 5) ステンレス協会：ステンレス鋼便覧 第3版、p.622、1995
- 6) 日本鋼構造協会：ステンレス鋼土木構造物の設計・施工指針(案)、pp.42～43、2015
- 7) 明嵐政司、守屋 進、池田八郎、阿部新治：ダム施設における鋼構造物の防食に関する調査報告書(その1)、土木研究所資料第3558号、1998
- 8) 西崎 到、富山禎仁、岡田修幸：リーン系二相ステンレス鋼の溶接性および溶接部の耐食性に関する実験的研究、土木研究所資料第4349号、2017
- 9) 敦賀康裕、河合廣治、森川賢一、高橋貞仁、松山晃、新谷昌之：二瀬ダム選択取水設備新設工事、IHIインフラ技報、第5号、pp.90～99、2016

岡田修幸



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
交流研究員
Nobuyuki OKADA

富山禎仁



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
主任研究員、博(工)
Dr. Tomonori TOMIYAMA

西崎 到



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ
上席研究員、博(工)
Dr. Itaru NISHIZAKI