

鋳鋼製水車部品の溶接補修方法および適用基準の確立

石井 順*
Jun Ishii

水力発電用水車部品の延命化を図る手段として、非破壊検査においては欠陥検出能力向上のため新しい技術の開発が行われており、さらに余寿命評価解析ではその解析結果の信頼性向上を目指した残存寿命評価システムが開発されるなど、より精度の高い余寿命を評価できるようになってきた。

関西電力株式会社殿と当社は、このように評価された余寿命に対し、更新に比べて費用および工期等の点から比較的容易な溶接補修を施工して延命化を図ることを目的として、該当部品の主な素材である鋳鋼に関する溶接施工方法の確立について共同研究を実施した。その材料特性や溶接施工方法、補修を適用する判断基準などの成果について報告する。

キーワード：水力発電、水車、ケーシング、ステーバーン、鋳鋼、アーク溶接、溶接補修、低温割れ、予熱、後熱、炭素当量、溶接割れ感受性組成

1. はじめに

水力発電所には、運転開始後 50 年を越える発電設備が数多く存在し、長期間の使用による劣化や欠陥の発生が各所で確認されている。この欠陥の検出は超音波探傷検査（UT）などによる非破壊検査により実施し、その欠陥の位置および大きさなど把握している。さらに、その欠陥について残存寿命評価システムを用いた余寿命診断を行い、精度の高い更新時期の選定が可能になりつつある。

しかし、発電設備、特に水車ケーシングおよびステーバーンは、設備更新に際して大規模な工事となるため、最適な設備更新時期の見極めと共に、

補修による延命化が望まれている。高経年水車部品の多くは造型が容易な鋳物で製作されており、一般的に鋳物の溶接技術は圧延材の溶接技術と異なる部分が多い。そこで今回、関西電力（株）殿との共同研究により、残存寿命が短いと判定された高経年の鋳鋼製水車ケーシング・ステーバーンの延命化に対する手法として、溶接補修技術を評価した。

2. 鋳鋼製水車部品経年材に対する溶接

2.1 水車部品経年材の現状

昭和初期に製造された鋳鋼製水車部品は、当時の製作、検査技術により製造されているため、現在の JIS 規格とは異なり、不純物や欠陥を含むも

* 研究開発事業部 生産技術部 次長

のが多く、溶接性が劣ると考えられる。しかしながら、これまで高経年の鋳鋼製水車部品に対す溶接補修が実施されていないため、それに対する明確な知見がないのが現状である。

2.2 鋳鋼の溶接性について

鋳鋼は溶接性を考慮せずに製作されている傾向があるため、溶接性を始め機械的性質を重視して製作された圧延鋼と同等の化学成分であっても溶接性が劣ると考えられる。すなわち、鋳鋼は鑄造組織であるため結晶粒が大きく、炭素量が多いものは溶接の際に熱影響部が硬化し、低温割れが発生しやすい。また、溶接の予熱温度は、母材の化学成分により異なり、炭素量の増加とともに高くする必要がある。そのため鋳鋼の溶接方法、溶接材料、溶接条件の選定に当たっては、以上の点を十分に考慮する必要がある。

3. 鋳鋼製水車部品経年材への溶接補修の適用性評価

3.1 溶接施工方法の選定

溶接施工方法は、各施工法の長所および短所を調査し、さらに比較的機材準備が容易であるなど現地における施工を考慮して、被覆アーク溶接 (SMAW) とガスシールドアーク溶接 (MAG 溶接、GMAW) の 2 種類を選定した。本試験にて使用したそれぞれの溶接電源を図 1 に示す。

3.2 溶接材料の選定

溶接材料は、溶接の対象としている部材と同一成分の溶接材料を選定することが原則である。また、低温割れを防止するために、極力水素を減らした低水素系溶接材料、さらには極低水素系の溶接材料を選定するのが望ましいと考えられる。

そこで、本試験に使用した溶接材料は、被覆アーク溶接用は高張力鋼用低水素系溶接材料 (JIS



(a)被覆アーク溶接機

(b)MAG 溶接機

図 1 使用溶接電源

Z3212 D5016) と極低水素系溶接材料 (JIS Z3212 D5016) の 2 種類を選定、比較した。また、使用した MAG 溶接用の溶接材料は、高張力鋼用 MAG 溶接ソリッドワイヤ (JIS Z3312 YGW16)、CO₂ 溶接フラックス入りワイヤ (JIS Z3313 YFW-C50DM) の 2 種類を選定、比較した。

3.3 実機鋳鋼材の成分調査

鋳鋼の溶接補修において、補修対象である高経年の老朽化した水車ケーシングおよびステーパーンの成分分析は不可欠であり、また、溶接補修適用判断基準を確立するためにも、実機成分に即した試験体を製作して溶接試験を実施する必要がある。

そこで、昭和初期に建設された K3 発電所 1 号機、M 発電所 1 号機、K 発電所 1 号機の 3 ユニットの成分分析を実施した。成分分析に当たっては、対象部材表面の塗料および汚れなどをグラインダーなどで除去した後、ドリルなどにより切粉を採取し、これを持ち帰り分析を行った。表 1 に成分分析結果を示す。

これら成分分析の結果より、溶接時の割れ感受性を示す割れ感受性組成 (P_{CM}) は 0.4% 以下であることと、不純物であるリン (P) および硫黄 (S) が現在の JIS 規格をオーバーしているものが存在

表 1 実機発電所サンプル材成分分析結果 (wt%)

発電所名	採取場所	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	V	P _{CM}
K3発電所	ステーベンNo.1	0.045	0.31	0.60	0.043	0.029	0.10	0.16	0.056	0.01	0.002	0.10
	ステーベンNo.2	0.046	0.32	0.60	0.059	0.057	0.10	0.15	0.056	0.01	0.002	0.10
	ステーベンNo.3	0.058	0.29	0.59	0.032	0.023	0.10	0.15	0.055	0.01	0.002	0.11
	入口弁	0.055	0.51	0.72	0.012	0.036	0.055	0.075	0.090	0.02	0.003	0.12
	入口鉄管側	0.13	0.49	0.76	0.012	0.01	0.047	0.07	0.086	0.02	0.003	0.19
M発電所	ステーベンNo.1	0.26	0.37	0.61	0.012	0.016	0.11	0.26	0.091	0.03	0.003	0.32
K発電所	ステーベンNo.1	0.28	0.42	0.95	0.031	0.041	0.040	0.11	0.037	0.01	0.002	0.35

(炭素鋼鑄鋼JIS規格値:C≤0.4、P≤0.04、S≤0.04)

することが確認された。なお、P_{CM} は以下式 1 で表される。

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

……………式 1

元々、鑄鋼の規格では炭素 (C)、P および S しか規定されていないが、成分分析結果がこの規格を逸脱しているものは P と S である。これらが溶接金属中へ溶け込むと、溶接金属の硬度を高めて延性およびじん性を阻害して割れを発生しやすくさせることが知られている。特に P は低融点化合物を生成しやすく、溶接金属の凝固中に結晶粒界に濃縮して生成するため、粒界割れが生じやすくなる。このような不純物の混入の原因として、製造年代の古いものでは、鑄造時の湯流れ向上のため、P や S を多く添加することがあり、また不純物となるこれら成分の除去、精錬技術が当時はまだ確立されていなかったためではないかと考えられる。また、P_{CM} は式 1 から分かるように C 量に大きく依存し、C 量が高ければ P_{CM} も高くなり、より溶接割れを発生しやすいことを示している。したがって、P_{CM} の高い材料を溶接する場合には予熱温度を高くして割れを防止するのが一般的であるが、作業性などの点からなるべく予熱温度を上げずに割れを防止する施工法が必要であると考えられる。

3.4 新規製作材による溶接補修の適用性試験

3.4.1 試験目的および内容

実機の成分分析結果に基づき P_{CM} を基準に成分の異なる試験体を 5 種類製作し、割れ発生防止予熱温度を選定するため y 型割れ試験片 (JIS Z3158) を採取し、試験を行った。その試験結果から、母材成分および予熱温度による溶接補修適用基準を確立することにした。

3.4.2 試験体の製作

溶接割れ感受性組成 (P_{CM}) をパラメータとして、一般的な炭素鋼の値から実機成分分析で明らかになった高めの値までを網羅するように、P_{CM} が 0.1% ずつ異なる、0.1、0.2、0.3、0.4% を目標とする 4 種類の鑄鋼製試験体を製作した。さらに、これらのうち一般的な炭素鋼に多い P_{CM} が 0.2% のものについては、P および S をそれぞれ 0.1% 含有させた試験体も製作し、不純物が溶接性に与える影響を調査した。

3.4.3 試験結果

y 型割れ試験の結果を表 2 に示す。表 3 には試験体 No.3 に対する被覆アーク溶接の試験結果の一例を示す。

割れ防止に大きな影響を及ぼす予熱は、予熱なし、50℃、100℃とし、それ以上は周辺機材への影響、変形、さらには狭隘部での溶接環境などを

表 2 y 型割れ試験結果

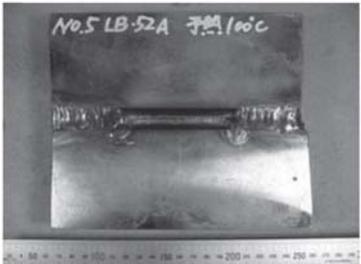
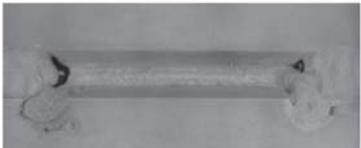
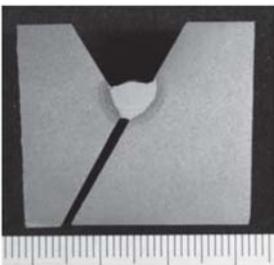
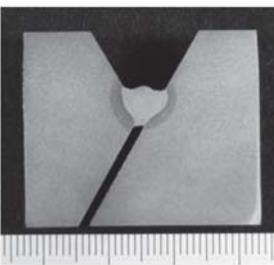
試験体	P _{CM} 値	予熱温度	溶接方法および溶接材料			
			SMAW		GMAW	
			①	②	③	④
No.1	0.11	なし	○	○	○	○
		50℃	○	○	○	○
No.2	0.20	なし	○	○	○	○
		50℃	○	○	○	○
No.3	0.29	なし	○	○	○	○
No.4	0.43	なし	×	×	×	×
		50℃	×	×	×	×
		100℃	×	○	×	×
No.5	0.19 (P _S :0.1%)	なし	—	○	—	—

○：割れなし ×：割れあり —：未試験

溶接材料：

①=低水素系溶接棒、②=極低水素系溶接棒、③=ソリッドワイヤ、④=フラックス入りワイヤ

表 3 y 型割れ試験状況（一例）

溶接方法	被覆アーク溶接	
予熱温度	100℃	
溶接材料	①	②
外観		
ビードPT		
断面マクロ		
割れ	あり	なし

考慮し対象外とした。表2に示したように、被覆アーク溶接用の極低水素系溶接材料が最適な溶接方法であることが確認できた。本溶接材料を用いた場合、 P_{CM} が0.3%程度までは予熱なしでも割れが発生することなく溶接可能であり、 P_{CM} が0.4%程度になると100℃以上の予熱が必要であることがわかった。さらに、 P_{CM} が0.2%程度である場合、不純物の影響により溶接性が大きく変わらないことを試験体 No.5 より確認することができた。

3.4.4 鋳鋼製水車部品の溶接補修適用基準

本試験の結果より、鋳鋼製水車部品の補修溶接する場合の溶接補修適用基準を以下に示すとおりとした。

- 溶接方法 : 被覆アーク溶接
- 溶接材料 : JIS Z3212 D5016、AWS A5.1 E7016、極低水素系溶接材料
- 予熱温度 : 100℃以上
- 溶接補修対象 : 鋳鋼製水車部品 (ただし、 $P_{CM} \leq 0.4\%$ のみ)

予熱温度について、 $P_{CM} \leq 0.3\%$ では予熱なしでも施工可能であることを確認したが、補修対象が水車のケーシングおよびステーベンであることから、残存する水分を確実に除去するために100℃以上とした。

3.5 鋳鋼製経年材に対する溶接試験

上記の評価結果に基づき、入手した鋳鋼製水車のステーベン経年材 (経年70年以上、 P_{CM} 値0.3%相当) に対して、3.4.4項に示した施工条件にて溶接試験を実施した。

その結果、溶接性に問題はなく、硬さ試験、引張試験でも問題のないことを確認した。図2に溶接試験結果を、図3に硬さ試験結果をそれぞれ示す。

4. まとめ

鋳鋼製高経年の老朽化した水車ケーシングおよびステーベンの溶接施工方法、溶接補修適用基準を確立した。今後は、この手法に基づいて鋳鋼

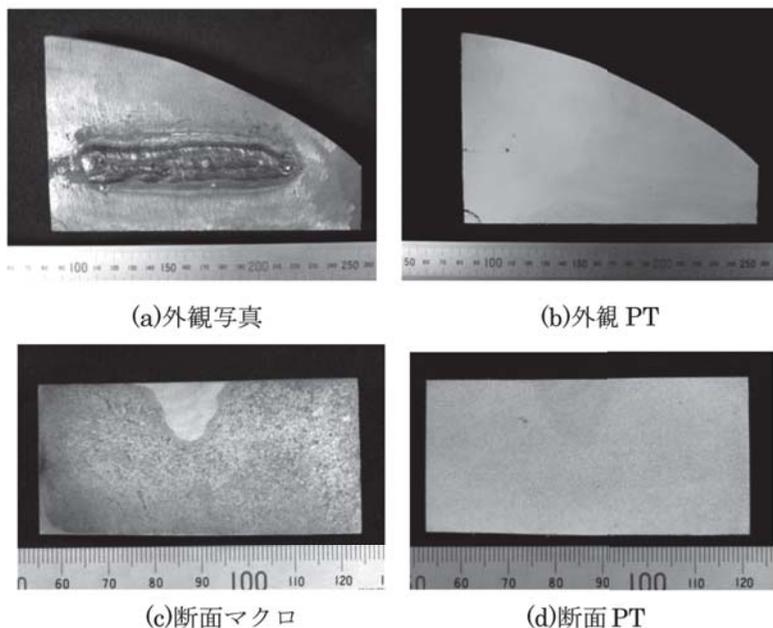


図2 高経年鋳鋼材の水車ステーベンに対する溶接試験

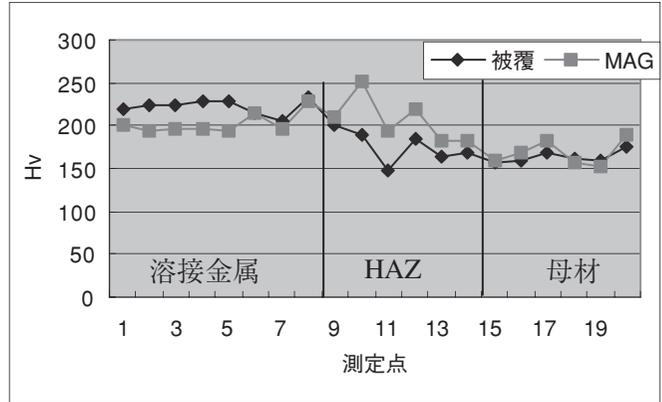
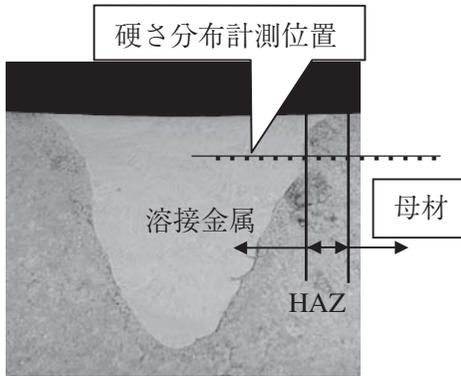


図3 硬さ試験結果

製水車ケーシングの補修を行い、残存寿命の延命化を図ると共に、長期にわたる信頼度の維持と価格競争力の両立を図る。

5. 謝辞

本試験は関西電力(株)殿との共同研究により遂行しましたが、溶接試験のため製造および運用開始後50年以上経過した貴重な高経年材料をご提供いただき、また成分分析には実機水車部品からのサンプル採取など多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 仁熊、副島、「現代溶接技術大系 25 鋳鋼・鋳鉄溶接のかんどころ」、産報出版
- (2) 柴田、田村、「新版 鋳物の溶接」、(株)産報
- (3) 溶接学会、「溶接・接合技術」、産報出版
- (4) 接合・溶接技術 Q&A1000 編集委員会、「接合・溶接技術 Q&A 1000」、産業技術サービスセンター
- (5) 溶接学会編、「溶接・接合便覧」、丸善(株)



研究開発事業部 生産技術部
次長

石井 順

TEL. 045-759-2120
FAX. 045-759-2155