

東京電力 正会員 東出 昇

### 1. まえがき

水圧鉄管の保守は一般に各種の基準、要項にもとづき発電所ごとに保守運用細目を定め、点検調査を行ない、その結果によつて必要に応じ、補修、取替を行なつてゐる。西窪発電所の水圧鉄管は酸性水と流砂により腐食の進行があるため、末端部の一部にステンレス板の内張を行なうこととした。水車ケーシングにステンレス板を内張した例はあるが水圧鉄管に内張した例は少なく、溶接性、施工性など未知の点が多いので工事に先立ち、実物大の水圧鉄管を作成し工場において各種の試験を行なつて仕様を定め工事を実施した。以下工場での試験を中心に報告する。

### 2. 腐食摩耗の形態

この水圧鉄管の腐食は、酸性水、流砂に加えて、キャビテーション、流体摩耗など物理化学的要因の重畳したものと考えられるが、現地の状況からつぎの各項と推定される。

(1) 酸性水によるイオン反応。西窪発電所取水水量  $1091 \text{ m}^3/\text{s}$  のうち  $257 \text{ m}^3/\text{s}$  が酸性河川水であり、上流発電所がピーク運転発電所であるため、上流発電所運転時で  $\text{PH}4.3$ 、停止時で  $\text{PH}3.5$  程度の酸性を有し、主たる酸性分は硫酸アルミである。これが多いと加水分解により水素イオンを増加させ、すなわち  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 6\text{H}^+ + 3\text{SO}_4$  となり  $0.77\text{V}$  以上の電位差が生じると陽極では  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$  の電離反応が起り、この電子が陽極で水素イオンと結びつき水素ガスとなる、 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H} \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$ 。この反応は陽極において水素ガスが拡散し続けている間、または鉄分子の電離する電位差がある間は続くものと考えられ、鉄分子が減少する。

(2) 流砂による摩耗と局部電池による腐食。流砂によつて管胴数部、周継手、伸縮継手および主弁付近など流線の乱れやすい箇所局部的に洗掘が起り、さびや塗膜がはがされる。この部分と他のさびや塗膜のある所との間に局部電池が形成され、腐食が進行する。すなわち、これには、酸素の供給量の差による酸素濃淡電池と、水素イオン濃度の差による水素濃淡電池があり、各々の場合腐食反応はつぎのようになる。イ 酸素濃淡電池：酸素の供給の少ない凹部 陽極  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$ 、酸素の供給の多い部分 陰極  $2\text{e}^- + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{OH})^-$ 、ロ、水素イオン濃淡電池：水素イオンの比較的小さい凹部 陽極  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$ 、水素イオンの比較的大きい部分 陰極  $2\text{e}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{H} \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$  となる。

### 3 工場での試験

内張りの適正な板厚、板割加工、プラグ溶接の必要性、溶接設計、施工順序および既設管に与える影響などについて、施工例が少ないことから種々の問題発生が予想されたため工場で実物大の試験管を作成し、各種の試験を行なつて実際に即した問題点の摘出と解明を行なつた。

3-1 材質 ステンレス鋼は耐食性より、むしろ高硬度、高強度あるいは高温での使用を目的としたマルテンサイト系ステンレス鋼、主に高温での耐酸化性を目的としたフェライト系ステンレス鋼、および耐食性はもちろんのこと機械的性質と溶接性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼に分類されるが今回の使用目的および工法から、オーステナイト系ステンレス鋼を使用することとした。

オーステナイト系ステンレス鋼には一般的に SUS304 があるが、電弧溶接の場合 SUS304 は、炭素含有量が比較的高いため、溶接によりその熱影響部にクローム炭化物の粒界析出が発生し、耐食性を減すると共に機械的性質を著しく劣化させるおそれがある。このため、SUS304、SUS304L および SUS316L の3種を選定し、溶接部について JIS-G 0571 10% 硝酸エッチ試験、JIS-G 0572 硫酸、硫酸オキシ鉄腐食試験、JIS-G 0575 硫酸、硫酸銅腐食試験を行なつて比較検討した結果、SUS304 には溶接二層部耐食性の劣化が認められ、SUS304L、SUS316L の熱影響部にはカーバ이트の析出が認められなかった。また普通 SUS304 は割れが発生しやすいとのことであつたが、腐食試験の結果では3種共、割れは認められなかった。試験では SUS304L と SUS316L との優劣は判然としなかったが、最終的にはクローム炭化物の析出が極めて少なく、非酸化性の酸に対する抵抗にも強いモリブデンを含有した極低炭素型オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を使用することとした。

3-2 溶接棒 板厚(3-3 項参照)から溶接は2層盛としたため溶接部としては、1層目、異材溶接、2層目は共金溶接という種類の違つた溶接棒の選定が必要となつた。

イ、1層目異材溶接：異材溶接の場合の溶着金属は、既設管(SM58Q)からの炭素の移入および SM58Q の影響を受けてステンレス鋼中のニッケル、クロームなどの稀釈が起り、機械的性質および耐食性が劣化することが考えられるので、両材の化学的成分やその溶け込みに応じた溶接棒の選定が必要となる。またニッケル量の多い完全オーステナイト鋼の溶着金属は、溶着金属中に高温割れが発生しやすい傾向にあるので、これを防止するためクローム量の増加またはモリブデンなどの添加により、オーステナイト中に数%程度のフェライトの混入するよう溶着金属を得る溶接棒を選定する必要がある。以上の観点になつて母材(SM58Q)と内張材(SUS316L)との異材溶接に使用する溶接棒として、JIS-D 309、JIS-D 309Mo および WEL 309MoL を選定し、母材および溶着金属の化学成分と金属組織から、シエラーの組織図\* について検討した。その結果、母材 SM58Q と SUS316L を溶接棒 WEL 309MoL で溶接する場合、相当量の稀釈を受けてもオーステナイト+フェライトの領域に入り溶着金属の高温割れに対し安全範囲にあることが判明した。また、JIS-D 309Mo および WEL 309MoL はモリブデンを含有しており、非酸化性

表-1 母材および溶接棒の化学成分 (単位%)

| 母材および溶接棒    | C     | Si   | Mn   | P    | S    | Ni              | Cr              | Mo            |
|-------------|-------|------|------|------|------|-----------------|-----------------|---------------|
| SM58Q       | 0.18  | 0.55 | 1.50 | 0.04 | 0.04 | —               | —               | —             |
| SUS304      | 0.08  | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 8.00<br>~10.50  | 18.00<br>~20.00 | —             |
| SUS304L     | 0.03  | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 9.00<br>~13.00  | 18.00<br>~20.00 | —             |
| SUS316L     | 0.03  | 1.00 | 2.00 | 0.04 | 0.03 | 12.00<br>~14.00 | 16.00<br>~18.00 | 2.00<br>~3.00 |
| JIS-D 309   | 0.06  | 0.38 | 1.87 | —    | —    | 13.28           | 24.57           | —             |
| JIS-D 309Mo | 0.06  | 0.42 | 1.96 | —    | —    | 13.18           | 24.07           | 2.33          |
| WEL 309MoL  | 0.038 | 0.46 | 2.00 | —    | —    | 12.67           | 23.72           | 2.45          |
| JIS-D 308   | 0.05  | 0.38 | 1.70 | —    | —    | 9.52            | 19.42           | —             |
| JIS-D 316L  | 0.033 | 0.37 | 1.69 | —    | —    | 13.94           | 19.50           | 2.32          |
| WEL 316ULC  | 0.016 | 0.38 | 2.05 | —    | —    | 13.44           | 18.21           | 2.39          |

の酸に対する耐食性および乳食に対する抵抗性が優れているので、2層目の溶着金属へのモリブデンの移入を考慮した場合好適であり、なお炭化物の粒界析出を  
\* A.L.Schaeffler "Constitution diagram for Stainless Steel Weld metal," Metal progress, Vol. 56, (1949) No.5.

できるだけ少なくおさえるためには、炭素量の最も少ない WEL 309MoL が良いと考えられる。

ロ 2層目共金溶接：2層目の溶接棒は溶着金属が直接腐食環境にさらされるため、内張材であるステンレス鋼と同等以上の機械的性質および化学成分を有している必要がある。また2層盛であつた溶接姿勢の大半が直向、上向となるため、溶接条件としては最低と考えられる。このため、溶接棒として、共金であるステンレス溶接棒 JIS-D 308、JIS-D 316L および WEL 316ULC を選定して検討した。(母材および溶接棒の化学成分を表-1 に示す)。すなわち、今母材 SM58Q (C = 0.18%) を1層目の溶接棒 JIS-D 309 (C = 0.06%) で溶接した場合、溶着金属の炭素含有量は溶接による稀釈度を30%とすると、 $0.18 \times 30/100 + 0.06 \times 70/100 = 0.096\%$  となる。つぎに2層目の溶接棒 JIS-D 316L (C = 0.033%) で1層目の上に溶接した場合、この溶着金属の炭素含有量

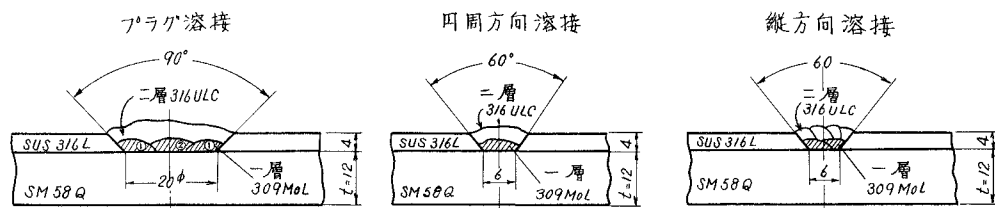
は、 $0.096 \times 30/100 + 0.033 \times 70/100 = 0.052\%$ 程度と考えられる。同様の計算を他の用材、成分についても計算すると、表-2のようになる。表-2から2層目溶接棒としては、WEL316ULCを用いる場合が、他に比して著しい耐食性がある事が判明する。

### 3-3 溶接および加工

(1) 板厚および溶接棒径 内張材としてのステンレス鋼の板厚は一般に2~5mm程度と考えられるが、水圧鉄管内面内張材としては、管内径を小さくしたくないこと、また溶着金属をできるだけ少なくしたいこと、などの理由から極力薄いことが望ましい。しかし、反面、少なくとも2層盛以上の仕上げが必要となること、また溶接ビードは平滑に仕上げなければならないことから厚目であることが望まれる。このため、2層盛を目途に3mmおよび4mmを選定し、試験管を利用して、開先形状、ルートギャップ、溶接棒径および溶接電流をいろいろ変化させ、種々の試験を行なった。1層目の溶着金属を出来るだけ低く仕上げるためには運棒法もさることながら、溶接棒径も当然細いものが必要となるが、φ2mm棒では溶接する場合、既設管の板厚が1.2mmと溶接棒径に比して厚く、通常の適正電流で溶接すると母材が良く溶け込まないうちに溶接棒のみ溶けてしまい、母材への溶け込み不足が生じ、かつ溶着金属は高く盛上がってしまう。逆に既設管側が溶け込む程度に電流を上げてやると内張材が溶け過ぎて、肩ダレ、アンダーカットなどの欠陥が生じ、立向、上向姿勢の場合は溶着金属が流れ落ち同時に溶接棒が赤熱し、フラックスがボタ落ちしてしまう。φ2.6mm溶接棒の場合、上記欠陥は是正されるが、1層目の溶着金属の高さはどうしても2~3mmとなる。以上のことからステンレス板厚は4mm、溶接棒径は2.6mmを使用することとした。なお2層目は施工性を考慮して溶接棒径は2.6~3.2mmとした。

(2) 開先形状およびルートギャップ 通常ステンレス薄板は開先をとらないが、プラグ溶接および線溶接において板厚、溶接棒径とも関連させて種々の形状で実験した結果、図-1に示すように線溶接は片面30°開先、ルートギャップ6mm、プラグ溶接は片面45°開先、φ20mm口径が最も良い結果を得た。なお旧管への熱影響を考慮して75~100°Cの予熱を行なうこととした。

図-1 開先形状  
円周方向溶接



(3) 板割加工 内張材の板割は既設管との密着性、溶接による既設管および内張材の歪、施工性などの要素から決めることとなるが、耐食上一応弱点になると考えられる溶接部はできるだけ少ないことが好ましいので、可能なかぎり大きくすることとした。すなわち板厚3mmおよび4mm、板割4割、3割、2割および1枚板、プラグピッチetc 150mm、200mm、300mmについて実験を行ない、歪測定および水圧試験(3-4項)の結果も併せて検討し、円周1個所継ぎ手(1枚板)とした。一方管軸方向の長さも、既設管の溶接線との重複を避け得ることおよび施工箇所は末端漸縮管であり、ドレーンバルブ、静圧測定孔があること、また搬入方法も考慮して1mとした。

(4) プラグ溶接 プラグ溶接は、当初溶接部のヘアークラックからの浸透水による逆圧に抵抗させるための配列を考えたが、実験の過程でSUS316Lおよび良質な溶接棒の採用によつて溶接部のヘアークラックは完全に防止できるとの確信を得たためその必要はなくなつた。しかし線溶接、特に管軸方向線溶接の施工時に溶接収縮

表-2 2層溶着金属の化学成分(単位%)

| 母材と溶接の組合せ                      | C      | Ni    | Cr    | Mo   |
|--------------------------------|--------|-------|-------|------|
| SM58Q × JIS-D309 × JIS-D308    | 0.0638 | 10.71 | 18.75 | —    |
| SM58Q × JIS-D309Mo × JIS-D316L | 0.0519 | 12.53 | 18.70 | 2.11 |
| SM58Q × WEL309MoL × WEL316ULC  | 0.0351 | 12.07 | 17.73 | 2.19 |

によつて既設管と内張材との間隙が増大すること、また仮付時に密着した内張材も本溶接時にどうしても変形するため本溶接施工時にも変形防止の治具が必要となるが、狭い鉄管内部では肌付治具に限界があることなどから、内張材と既設管を密着させるための手段としてプラグ溶接を取入れることとした。このためプラグの配列については線溶接近傍に細かく、板中央部は比較的大きなピッチで配列することとした。

(5) 施工順序 プラグ溶接、円周方向溶接、管軸方向溶接の順序を変えて試験し変形量を観察した。この結果、プラグ溶接を最初に行なうことが、どの順序に比しても最も仕上りが良く、また管軸方向と円周方向溶接より先に行なうと、内張材角部の変形が少なかつた。このことから施工は、プラグ溶接、管軸方向溶接、円周方向溶接の順とした。また個々の溶接順序は、既設管への影響を考慮し、上向対称および飛石法併用によつて熱影響を散らす工法とした。

3-4 検査および諸試験 試験管において、非破壊検査として、X線透過、カラーチェック、超音波探傷を、破壊検査として、水圧試験、試験片によるプラグの強度試験、溶接部の硬度分布、化学分析、顕微鏡組織観察および前述(3-1)の腐食試験を行なつた。この結果現場工事では、外観検査に加えて、X線検査およびカラーチェックを行なうこととした。水圧試験は既設管と内張材との間に水圧をかける方法で内張材の変形を観察しながら破壊まで圧力を上げた。変形は既設管と内張材の間隙の大きい箇所から生じ、順次圧力を上げると溶接二重部または溶接欠陥部より破壊し、圧力は $10\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ 前後であつた。試験片によるプラグ溶接の切断荷重は $4\sim 6\text{t}$ で、受圧面積を考慮すると水圧試験の結果とはほぼ一致した。

## 4 現場工事

工場試験の結果から定めた主な工事仕様を整理するとつぎのとおりである。

|             |                                                                               |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 内張材の材質および板厚 | SUS316L 厚さ 4mm                                                                |
| 溶接棒の種類および棒径 | 異材溶接 WEL309MoL $\phi 2.6\text{mm}$ 共金溶接 WEL316ULC $\phi 2.6\sim 3.2\text{mm}$ |
| 板 割         | 円周方向 1枚板 管軸方向長さ 1m前後                                                          |
| プラグ口径および配列  | 口径 20mm ピッチ 線溶接近傍は100mm離して300mm、その他300~600mm                                  |
| 開先形状        | 線溶接 片面30°開先、ルートギャップ 6mm、プラグ溶接 45°開先                                           |
| 溶接順序        | プラグ溶接 管軸方向溶接 円周方向溶接の順序、個々の溶接は上向対称法飛石法の併用                                      |

現場工事は先ず既設管の内面塗膜をケレン清掃し、孔食箇所を肉盛のうえ既設溶接ビードも含め素地と平滑にグラインダー仕上げを行なつた。つぎに予め計測した板割に合わせて既設管上にケガキ線を引き、工場でロールした内張材をケガキ線に従つて所定の順序で仮付し、全枚仮付後プラグ溶接より順次1層目の溶接を行なつた。全箇所1層溶接を終了後、1層目の溶接状況および仕上り高さをチェックし、許容高より高いものについてはグラインダーで切削するとともに不備箇所のカット盛、開先整備などを行なつた。つづいて2層目以降の溶接を行なつた後、グラインダーで平滑仕上げを行なつた。最後に大きなアンダーカットは溶接盛を行ない、微細なものはグラインダーで仕上げた。内張材の変形および既設管との間隙は、既設管がコンクリート埋設で大部分拘束されていることなどにより変形の程度は試験管より少なく、全体に思つたよりきれいに仕上がつた。

## 5 あとがき

以上施工例の数少ない水圧鉄管の内張工事例について工場試験の内容を主に述べた。この工事の成否は、今後の経過によるが同種の工事を行なう場合の参考となれば幸いである。なおこの工事例は試験も含め(株)大原鉄工所が施工し、日本ステンレス(株)の協力のもとに行なわれた。ここに謝意を表する。

参考文献：渡辺正紀、向井喜彦、ステンレス鋼の溶接、日刊工業新聞社、昭和46年