

Effects of Chloride Concentration on Sea Salt External Stress Corrosion Cracking of SUS304 Steel

Hiroki YADA, Mohammad Syafiq Bin Mohd Nor, Kazuyuki TUKIMORI, and Shuji HATTORI

1 緒 言

原子力発電プラントの配管材料として、多く用いられているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 は、海塩粒子あるいはこれを含んだ雨水等により、大気露出面や保温材下での配管の外表面応力腐食割れ (ESCC; External Stress Corrosion Cracking) が発生することから、プラントでは付着塩化物量に対して一定の管理目標値を定めている。しかし、これらは経験的に定められた管理目標値であり、海塩粒子によって誘発される応力腐食割れ (海塩 ESCC) は湿度の影響について報告⁽¹⁾されているが、その他の因子についてはあまり検討されていない。本研究では、SUS304 鋼を対象に、付着塩化物量、試験時間、熱処理時間、応力を変化させて海塩 ESCC に及ぼす各因子の影響について実験的に検討した。

2 試験材料および試験方法

2.1 試験材料 試験材料には厚さ 2mm の SUS304 冷間圧延板を用いた。Table.1 に試験材料の化学成分、Table.2 に熱処理条件及び機械的性質を示す。試験片は JIS G 0576⁽²⁾に記載されている U 字曲げ試験片と同様の形状である。また、鋭敏化の影響を調べるために、酒井ら⁽³⁾による鋭敏化熱処理時間と鋭敏化度の関係図 (Fig.1) を参考に、650℃での熱処理時間を変化させた試験片も用いた。

2.2 試験方法 試験片は JIS⁽²⁾に規定されている「U 字曲げ試験片」と U 字曲げ試験片を平板状に戻し、固定した「平板試験片」を使用した。U 字曲げ試験片は、付着塩化物量、鋭敏化度、及び試験時間をパラメータとした試験に用いた。U 字曲げ試験片の形状を Fig.2 に示す。U 字曲げ試験片の頂部に発生する引張応力は約 500MPa である。平板試験片は U 字曲げ加工の際の曲げ角度を変化させることで応力をパラメータとした試験に用い、曲げ角度と残留応力の関係については FEM 解析と X 線残留応力測定により評価した。試験液として用いた人工海水の組成を Table.3 に示す。1 スポット当たりの見かけの付着塩化物量は原液で約 24,000mg/m² となる。試験時の温度及び湿度条件は、庄司らの報告⁽¹⁾及び予備試験の結果から SCC の発生しやすい条件として相対湿度 30%RH、試験温度 90℃とし、恒温恒湿槽に一定期間静置した。

3 試験結果および考察

3.1 割れの評価方法 試験終了後、試験片の脚間隔を 14mm に狭めて割れを開き、試験片表面の割れ状況を光学顕微鏡により観察し、次式により評価した。

割れ発生率 $R_{\text{crack}} (\%) = b/a \times 100$

平均割れ数 $N_{\text{mean}} = c/b$

最大割れ長さの平均 $L_{\text{mean}} = d/b$

a: 試験した塩化物スポットの数, b: 割れが発生した塩化物スポットの数, c: 割れの数と総和, d: 各塩化物スポットにおける最大割れ長さの和

R_{crack} , N_{mean} は割れの発生頻度, L_{mean} は割れの進展速度を示す指標であり、値が大きいほど割れ感受性が高い。

3.2 付着塩化物量及び鋭敏化の影響 付着塩化物量及び熱処理時間を変化させ、試験温度 90℃、試験湿度 30%RH、試験時間 2 週間の条件で試験を行った。一例として付着塩化物量 24,000mg/m²、熱処理 8 時間の条件での試験後のき裂発生状況を Fig.3 に示す。試験結果をまとめたグラフを Fig.4 に示す。付着塩化物量の減少と共に割れは減少し、付着塩化物量 800mg/m² 以下では割れは発生しなくなる。Fig.5 は Fig.4 のデータを横軸に熱処

Table.1 Chemical composition of SUS304.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.04	0.52	0.91	0.031	0.004	8.11	18.23

Table.2 Mechanical properties of SUS304.

Heat treatment	Longitudinal elastic modulus GPa	Proof stress MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Hardness Hv
1150℃water-cooled	196	317	674	53	180

Table.3 Composition of synthetic seawater (g/l).

NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BO ₃	SrCl ₂	NaF
24.534	5.204	4.094	1.535	0.6945	0.201	0.1005	0.027	0.0253	0.003

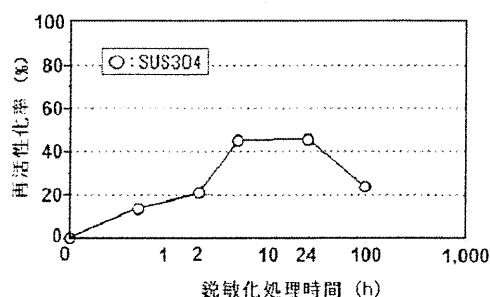
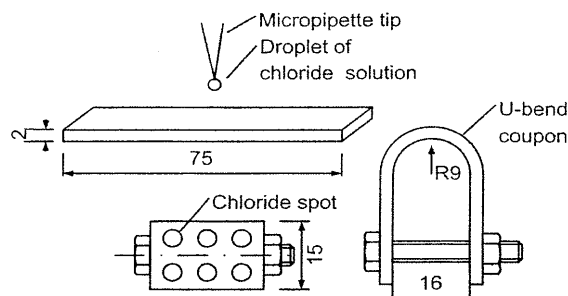
Fig.1 Relationship between heat treatment time and degree of sensitization from EPR test. ⁽³⁾

Fig.2 Horseshoe shape specimen.

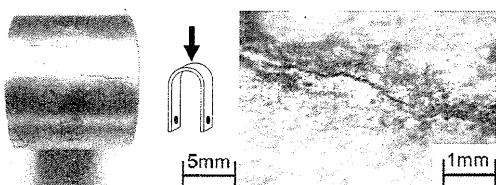


Fig.3 Surface cracks of Test specimen.

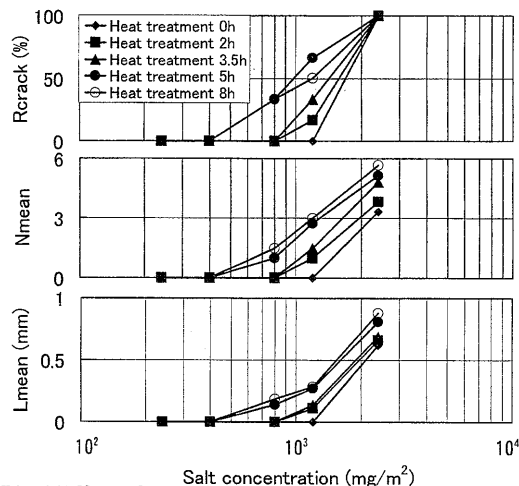


Fig.4 Effect of sea salt concentration on the sea salt ESCC.

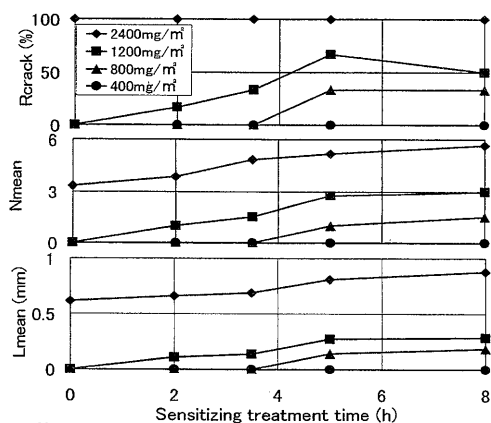


Fig.5 Effect of sensitizing treatment time on the sea salt ESCC.

理時間を取り整理したものである。熱処理時間の増加に従い R_{crack} , N_{mean} 及び L_{mean} の値が増加しているが、5時間、8時間ではあまり変化が見られない。これは SUS304 においては熱処理時間が5時間で鋭敏化度がピークに達し、24時間までは鋭敏化度がほぼ一定になるという酒井ら⁽³⁾のデータと同様の傾向を示している。

3.3 試験時間の影響 Fig.6 は試験時間を2週間、12週間、24週間と変化させた場合の試験結果である。試験期間が長くなるにつれ、より低い付着塩化物量でも割れが発生する。試験温度 90℃、試験湿度 30%RH の条件において、24週間までの試験であれば 70mg/m² では割れは発生しない。

3.4 応力の影響 平板試験片を用いて、U字型試験片と同様に海塩を滴下して海塩 ESCC 試験を行った。試験温度 90℃、試験湿度 30%RH、試験時間 1週間での試験結果を Fig.7 に示す。試験に用いた試験片の曲げ角度は 30°、90°、180° であり、応力はそれぞれ 400MPa、490MPa、570MPa となる。なお、先の U 字曲げ試験片の曲げ角度が 180° に対応する。 R_{crack} , N_{mean} に着目すると

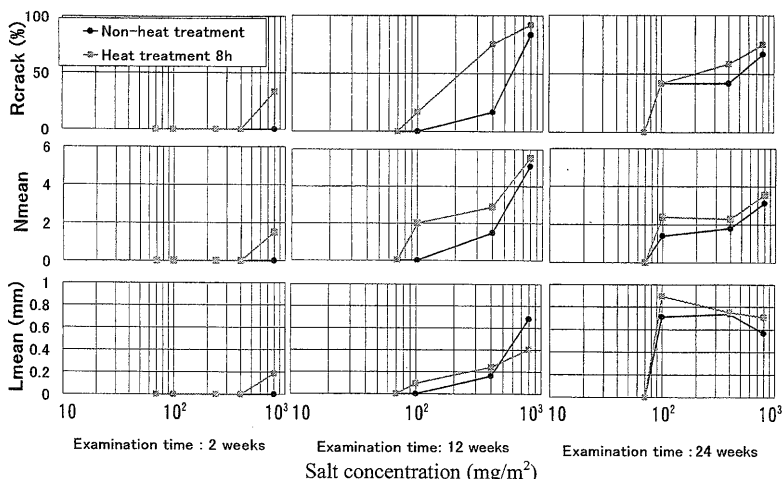


Fig.6 Effect of test time on the sea salt ESCC.

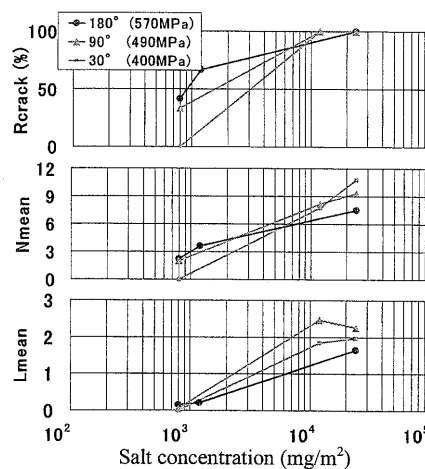


Fig.7 Effect of tensile residual stress on the sea salt ESCC.

付着塩化物量 800mg/m² の条件でのみ割れの発生は応力の傾向と一致する。 L_{mean} は応力の大きさの順にはなっていない。これは、試験片に残留応力を付与するために 180° の折り曲げ・曲げ戻し加工をしたとき、試験片表面に凹凸が生じてやや不均一な応力場が形成されたものと考えられる。

4. 結 言

SUS304 鋼を対象に海塩による応力腐食割れ試験を実施し、以下の点が明らかになった。

- (1) 付着塩化物量の増加と共に SCC 発生量も増加する。鋭敏化の影響は、650℃、熱処理時間 5~8 時間で SCC 発生量のピークが現れる、これは熱処理時間と鋭敏化度の関係と同様の傾向を示す。
- (2) 試験時間の増加に伴い、少ない塩化物量でも SCC が発生する。試験温度 90℃、湿度 30%RH の条件で 6ヶ月間保持しても付着塩化物量 70mg/m² の条件では、き裂の発生は見られない。
- (3) 引張応力 400MPa~570MPa の範囲において、付着塩化物量 800mg/m² の条件でのみ割れの発生は応力の傾向と一致する。

5 参考文献

- 1) 庄司ら, Boushoku-Gijutsu, 35559-565 (1986) .
- 2) ステンレス鋼の応力腐食割れ試験方法, JIS G 0576
- 3) 酒井, 中島, 南, INSS JOURNAL3 '96, pp.168