

十字溶接継手に補修溶接を施した場合の限界 CTOD 遷移曲線

株式会社 IHI 正会員 ○山口 隆一 株式会社 IHI 非会員 山下 洋一

1. 背景および目的

社会インフラの老朽化や維持管理コストの増大から更新よりも延命が期待される。既存インフラの延命手法の 1 つとして補修溶接が挙げられる。現状では既存インフラの母材の材質が悪く採用されないことが多いが、今後老朽化してくる構造物は材質が改善される傾向であるため、補修溶接の機会が増えると見込まれる。一方で、補修溶接は非破壊検査をするものの残存欠陥をゼロにするのは難しいこと、既設構造物は残留応力の発生が避けられず、現場施工であるため熱処理による残留応力除去が難しいことなど技術的課題が存在する。これらの背景から補修溶接の可否を評価することが可能と考えられる限界 CTOD 遷移曲線を構築することを目的として、欠陥を有する十字溶接継手に補修溶接を施した場合の低温時の物性を取得すべく、低温脆性破壊試験を行った。

2. 低温脆性破壊試験要領

低温脆性破壊試験の試験体は材質 SM490A (市珍品:ミルシートの降伏点:349MPa)、板厚 25mm、試験部の板幅 200mm とし、表 1 に示す縦溶接の有無、欠陥導入のタイミング、補修溶接の有無が異なる全 4 体とした。人工欠陥は板厚貫通き裂とし、放電加工によって導入した。ここで、S4 は横溶接前に導入した。欠陥の長さは 27mm、き裂先端の R は 0.075mm、欠陥の位置は横溶接および補修溶接の開先から 5mm とした。補修溶接は S2 を除く試験体に対して行い、その開先はアークエアガウジングおよびグラインダーによって加工した。ここで、開先形状は図 1 に示すように概ね横溶接の溶金をえぐるように加工し、表裏両面に補修溶接を施した。補修溶接状況を写真 1 に示す。

低温脆性破壊試験の計測項目は荷重、試験機変位および熱電対による試験体温度とした。変位速度を 0.5mm/分とした変位制御とし、試験体中央部を恒温槽で覆って、液体窒素を噴霧することで $-75\pm2^{\circ}\text{C}$ の環境下で載荷試験を行った。ここで、熱電対は液体窒素を噴霧する側とは逆側に取り付け、雰囲気温度の影響を避けて試験体の鋼材温度が計測できるようコーティングを行った。なお、載荷試験は 30 分以上 $-75\pm2^{\circ}\text{C}$ を保持した後に実施した。

3. 低温脆性破壊試験結果

各試験体の最大荷重および最大グロス応力(最大荷重を板幅、板厚で除したもの)を表 2 に示す。表 2 より、補修溶接の有無で大きく傾向が異なり、補修溶接をしない S2 の最大グロス応力は 387MPa で

表 1 試験体要領

試験体名	製作順序(本表の左から右へ)				
	欠陥導入	横溶接	縦溶接	欠陥導入	補修溶接
S1	-	○	-	○	○
S2	-	○	○	○	-
S3	-	○	○	○	○
S4	○	○	○	-	○

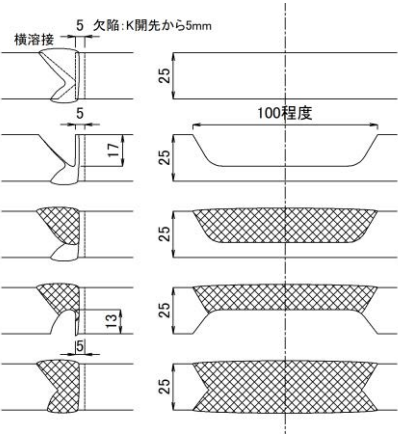
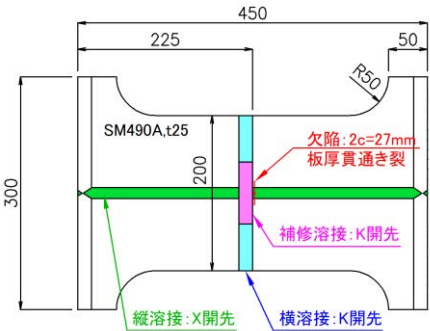


図 1 補修溶接要領



(a) 開先加工後



(b) 補修溶接後

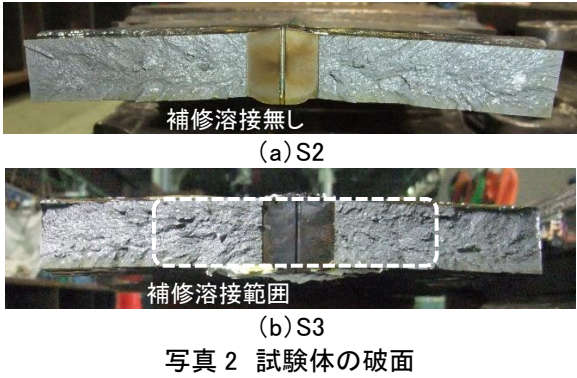
写真 1 補修溶接状況

キーワード 補修溶接, 十字溶接, 欠陥, 限界 CTOD, 遷移曲線

連絡先 〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1 番地 株式会社 IHI TEL 050-3821-1866

表 2 最大荷重と最大グロス応力

試験体名	製作順序(本表の左から右へ)					最大荷重(kN)	最大グロス応力(MPa)
	欠陥導入	横溶接	縦溶接	欠陥導入	補修溶接		
S1	-	○	-	○	○	1060	212
S2	-	○	○	○	-	1935	387
S3	-	○	○	○	○	873	175
S4	○	○	○	-	○	969	194



あったのに対して、補修溶接をした S1, S3, S4 の最大グロス応力は 190MPa 前後と S2 の半分程度であった。

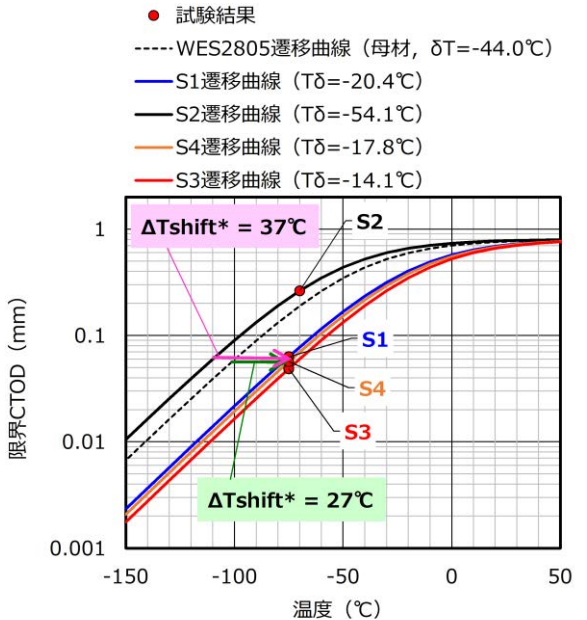
例として S2 と S3 の破面を写真 2 に示す。いずれもシェブロンパターンが見られ、破壊起点は板厚中心であった。これらの傾向は他の S1 と S4 も同様であった。補修溶接の有無による違いは塑性変形を伴って破壊したか否かと、き裂の進展方向であった。後者に関しては、補修溶接をした S1, S3, S4 は横溶接および補修溶接方向にほぼ平行に生じたのに対し、補修溶接をしない S2 はき裂が溶接部から離れた母材に進展した。これは S2 が補修溶接の開先加工をしていないため、縦溶接による高い残留応力がき裂先端に作用していたことが要因であると推測する。

4. 限界 CTOD 遷移曲線

WES 2805:2011 と低温脆性破壊試験の結果から限界 CTOD を算出した。ここで、溶接残留応力によるひずみは、S2 は降伏ひずみ、S1, S3, S4 は BS 7910:2019 の突合せ溶接継手の横方向の残留応力と同等 ($\sigma_m/\sigma_y=0.311$) の応力をヤング率で除したものとした。これは、以下の推測によるものである。

- ・ き裂先端の最終的な残留応力は補修溶接が支配的となる。
- ・ 今回の補修溶接は両面溶接であり、先行する開先面側の補修溶接部の残留応力はかなり緩和する。

算出した限界 CTOD を用いて近似した遷移曲線を図 3 に示す。ここで、近似に用いた曲線は WES 2805:2011 中に示されている 490MPa 級鋼の母材の試験データをフィッティングした曲線式(図 3 の黒破線)を基本式として、試験結果を通るよう係数 (T_8 : 限界 CTOD が上部棚 CTOD/2 となる温度)を求めて描画したものである。図 3 より、補修溶接の有無で大きく傾向が分かれ、補修溶接をすると限界 CTOD 曲線が高温側にシフトしていることが分かる。また、補修溶接無しの S2 は、母材の遷移曲線に近い結果となった。これは、溶接残留応力によるひずみの仮定が実際よりも大きい可能性があることなどが挙げられる。なお、本研究の範囲では、限界 CTOD 遷移曲線から推測される残存き裂部の補修溶接による高温側へのシフト量は、母材と補修溶接ありを比較した場合は 27℃、補修溶接の有無で比較した場合は 37℃と推測される。



* 残存き裂部の補修溶接による遷移曲線の高温側への温度シフト量

図 3 限界 CTOD 遷移曲線

5. 結論

- 本研究で得られた結論を以下に示す。
- (1) 低温脆性破壊試験によって取得した低温時の物性値によって、残存き裂の補修溶接による遷移曲線の高温側へのシフト量を推定できた。これにより、残存欠陥の存在を否定できない十字溶接継手のような難しい補修における補修可否を、構造物の使用温度と照らし合わせ評価できる可能性がある。
 - (2) 今回開発した試験手法は、補修溶接の可否を検討するための有効な手段となる可能性がある。