

1. はじめに

優れた耐食性を有する溶融亜鉛めっき橋梁は、全国的な普及の兆しも見られ、徐々にではあるが架設実績も増加しつつある。しかしこれら溶融亜鉛めっき橋梁について、問題点が全くないわけではない。技術的な問題に限定するならば、割れ、および変形の発生問題があり、亜鉛皮膜の耐久性が有限であることによるメンテナンスなどの問題もある。

とくに問題点の一つである割れに関しては、橋梁部材をめっきすることによって、すみ肉溶接の回し溶接部を中心に発生するものであるが、鋼構造物の構造耐力面での安全性を考慮した場合、低応力条件で破壊する脆性破壊や疲労破壊の起点となる可能性もあり、避けなければならない最も重要な構造欠陥である。そこで割れの防止策を講ずることが非常に重要な課題であると考え、その防止策についての開発研究を行った。

開発研究を行うに当たって問題点を具体的に把握するため、割れ発生の頻度と部位に関するアンケート調査を行った。また同様な目的から割れに関する過去の研究実績についても調査を行った。それらの結果を以下にまとめて示す。

1. 1 アンケート調査結果

溶融亜鉛めっき橋梁の製作実績のある10社を対象に、割れ事例に関するアンケート調査を実施した。その結果、対象とする部材は全て钣桁であり、割れ発生部位は表1. 1と図1. 1に示すように、垂直補剛材端部のスカラップを設けた溶接接合部、吊り金具のスカラップを設けた溶接接合部、垂直補剛材端部隙間部の回し溶接部、水平補剛材端部隙間部の回し溶接部、およびガセットプレート端部の回し溶接部の5ヶ所に分類され、現象面では基本的に二つに区分される。また発生頻度に関しては、水平補剛材端部隙間部の回し溶接部での割れ事例が10社中8社と最も多く、垂直補剛材端部のスカラップを設けた溶接接合部での3社、垂直補剛材端部隙間部の回し溶接部での2社、ガセットプレート端部の回し溶接部での2社、吊り金具のスカラップを設けた溶接接合部での1社の順に少なくなっている。ただし、いずれの部位の割れも同一箇所での発生比率は数%の範囲におさまっている。

表1. 1 钣桁における割れの発生部位と発生頻度

発生部位	現象区分	割れ発生会社数
①垂直補剛材端部のスカラップを設けた溶接接合部	A	2社
②吊り金具のスカラップを設けた溶接接合部	A	1社
③垂直補剛材端部隙間部の回し溶接部	A	2社
④水平補剛材端部隙間部の回し溶接部	B	8社
⑤ガセットプレート端部の回し溶接部	B	2社

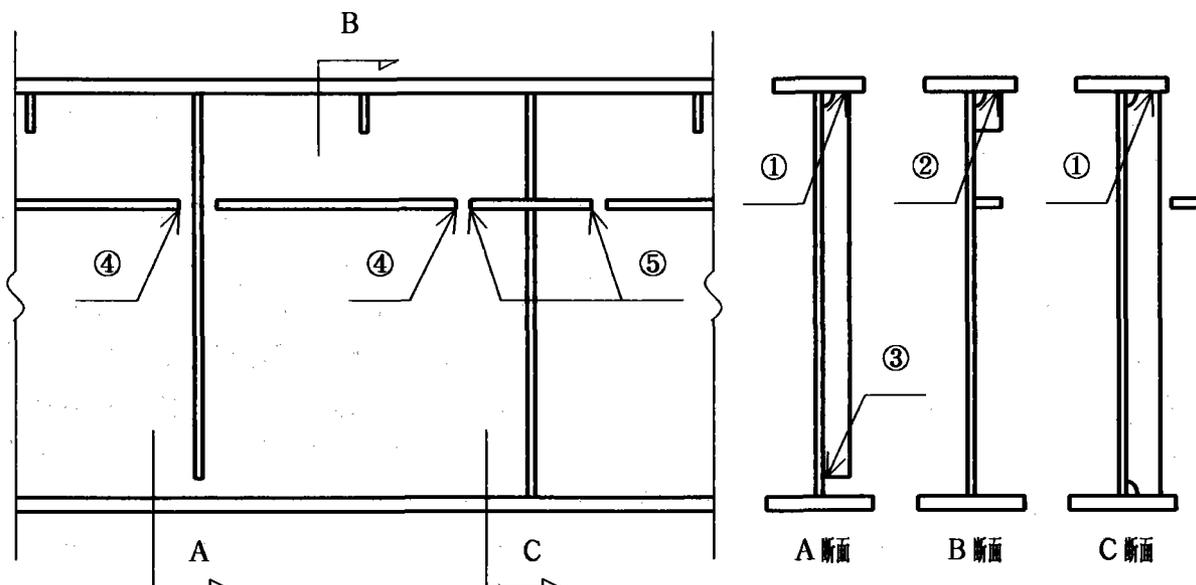


図1. 1 鋼桁における割れの発生部位（記号は表1. 1による）

1. 2 割れに関する研究実績

溶接構造物を溶融亜鉛めっきした場合に発生する割れは、溶融亜鉛めっきの工業化以来古くから発生している現象であり、過去二、三の研究報告が発表されている。これらの報告では割れ現象を液体金属脆化現象の一種としてとらえている。この液体金属脆化現象は、ある特定の金属間の組み合わせにおいて、固体金属と液体金属が接触し、応力が作用した条件下で、固体側の結晶粒界が開裂する粒界破壊の現象である。

近年では、送電線鉄塔における割れ防止に関する開発研究を(株)巴組鐵工所と新日本製鐵(株)が共同で実施している。この研究の特徴を要約すると下記の通りであるが、基本的には割れ発生の原因を液体金属脆化現象としてとらえたものである。

- ①割れの破面観察から、割れ形態は結晶粒界への亜鉛拡散による粒界破壊である。
- ②数多くの割れ事例の観察から、亜鉛脆化割れは主に溶接部止端に発生する。
- ③実験結果から、亜鉛脆化割れの発生条件は溶接部止端の応力条件と鋼材の化学成分によって変化する。
- ④確認実験から、亜鉛脆化割れの防止は鋼材の化学成分の調整により可能である。
- ⑤亜鉛脆化割れ対策鋼の使用に加え、溶接施工上で良好な外観を保持することによって割れを確実に防止することが可能となった。

上記の送電線鉄塔に関する開発研究以降、(株)巴組鐵工所、(株)横河橋梁製作所、および新日本製鐵(株)で構成されるZ B研究会によって、溶融亜鉛めっき橋梁の割れ防止に関する開発研究が実施され、現在でも一部の研究が継続実施されている。このめっき橋梁に関する研究も基本的には送電線鉄塔に関する研究の延長線上にあるが、橋梁構造物が鉄塔構造物と異なり薄肉構造物であることから、研究は亜鉛脆化割れを变形を伴わない微小な割れと、

面外方向の変形に起因する局所的な変形を伴う過大な割れの二種類に区分して、発生メカニズムの解明とその防止法の確立を目的に行われている。それらの研究の要点をまとめて示すと下記の通りである。

1. 2. 1 変形を伴わない微小な割れ

この割れは耐亜鉛脆化割れ性に劣る鋼材の使用において発生するものであり、溶接残留応力とめっき浸漬中に発生する熱応力を組み合わせた応力が、溶接熱影響部の耐亜鉛脆化割れ性を超えて溶接部止端に負荷された場合に発生する割れと定義している。

なお割れ防止の方法に関しては、次の手順で実施している。

①溶接部止端にめっき浸漬中に発生する最大応力の定量的把握

a) 「実大鋼桁部材を用いたひずみゲージによる溶接部止端の残留応力の実測」

最大応力発生位置が補剛材端部の回し溶接部であることの確認、またその最大値が熱影響部（溶接部止端）の耐力値に達していることの確認

b) 「実大橋梁モデルを用いたFEM弾性解析法によるめっき浸漬中の熱応力解析」

熱応力の時間的変化は溶接部位によって変化することの確認、また熱応力の時間的変化の大半が図1. 2に示すように浸漬直後の圧縮状態から引張状態に変化し最終的に無応力となることの確認

c) 「応力-ひずみ曲線に基づく上記の両者を組合せた応力の計算」

最大応力発生位置が補剛材端部の回し溶接部であることの確認、またその応力値が温度上昇による鋼材の耐力低下分だけ低下した鋼材の450℃での耐力値であることの確認

②最大応力条件を用いた鋼材開発のための要求特性値（具体的指標）の設定

a) 「溶接部止端に最大応力条件を負荷したT字形小型試験片を用いた各種の市販鋼と開発鋼の耐亜鉛脆化割れ性の評価」

図1. 3に一例を示すように各種鋼材の最大応力条件下での割れの有無の確認

b) 「各種鋼材の割れ発生に関する溶融亜鉛

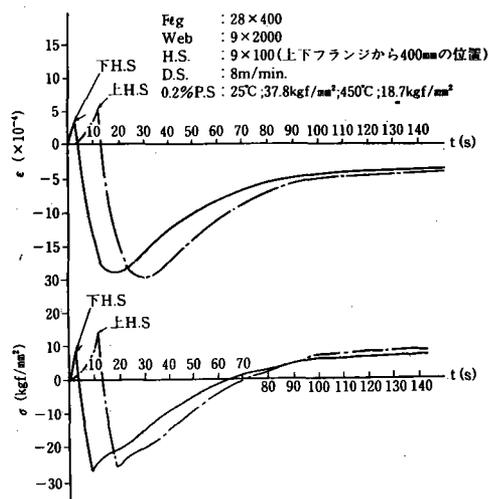


図1. 2 熱応力の時間的変化の代表例

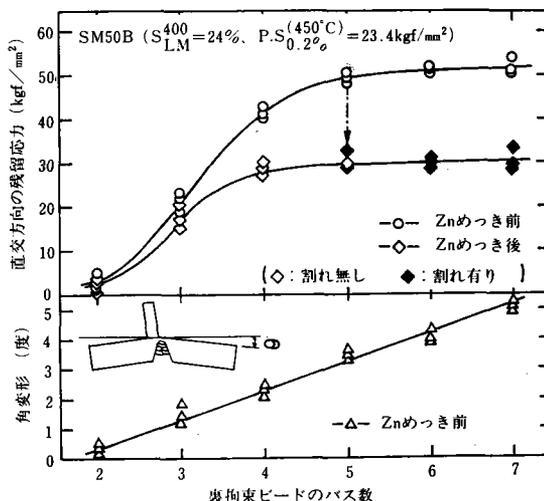


図1. 3 割れ評価試験結果の一例

脆化特性値 (S_{LM}) と 450 °C での 0.2% 耐力による整理」

図 1. 4 に示すように割れ発生の限界境界線の存在の確認

c) 「各種鋼材の 450 °C での 0.2% 耐力のばらつき」の把握」

市販鋼と開発鋼の両者による 0.2% 耐力の上限値 ($SM50; 29, SM58Q; 49 \text{ kgf/mm}^2$) の確認

d) 「0.2% 耐力の上限値を利用した溶融亜鉛脆化特性値 (S_{LM}) による要求特性値の設定」

溶融亜鉛脆化特性値 (S_{LM}) の下限規格値 ($SM50; 31\%, SM58Q; 53\%$) の確定

③ 要求特性値を満足する鋼材 (溶融亜鉛めっき橋梁用鋼) の開発

a) 「最適化学成分系の検討」

橋梁用耐亜鉛脆化割れ鋼の開発を目的とした制御圧延-加速冷却プロセス (TMCP) を適用した C-Mn (1.6% 以下) 系鋼材の実験的な性能確認と選定

b) 「経済的にも優れた橋梁用耐亜鉛脆化割れ鋼の選定」

中 C (0.14~0.16%) - 低 Mn (1.0~1.2%) - Nb - Ti 系鋼の抽出と性能確認

c) 「亜鉛脆化割れ性の改善メカニズムの解明」

粒界に析出する粒界フェライトが亜鉛脆化割れ性に及ぼす影響の確認と、粒界フェライト占有率と溶融亜鉛脆化特性値 (S_{LM}) 間の正の相関関係の明確化

④ 実大鋼材供試体による割れ防止法の確認

a) 「実大鋼材モデル供試体による割れ発生限界の把握」

補剛材端部のすみ肉溶接回し部のパス数を変化した供試体による亜鉛脆化割れ発生の評価確認の実施、および 1 パス溶接部での割れの未発生と多パス溶接部での割れ発生の確認

1. 2. 2 局所的な変形を伴う過大な割れ

この割れは鋼材の耐亜鉛脆化割れ性と相関がない状態で発生するものであり、めっき浸漬中の圧縮熱応力によって、図 1. 5 に示すように水平補剛材端部などの曲げ剛性の不連続部に面外方向の過大な局所変形が発生した場合、凹状

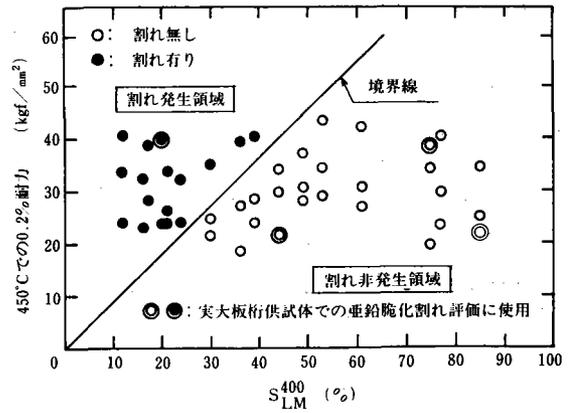


図 1. 4 亜鉛脆化割れの発生領域

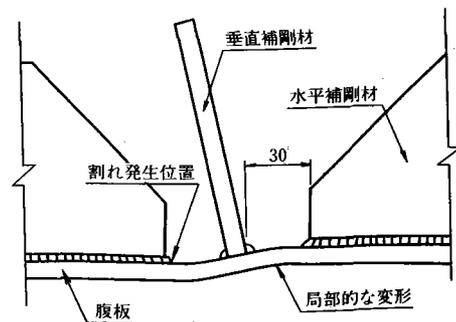


図 1. 5 補剛材端部の変形と割れ発生

に変形した溶接部止端に発生する割れと定義している。この割れの形態は鉋桁モデル供試体による割れ再現実験において多く認められる現象であり、実際の鉋桁において発生する水平補剛材端部の割れも、大半はこの現象によるものと推定される。

この過大な割れの発生メカニズムを下記に示すように推定している。

- ①水平補剛材端部の凹状変形溶接部止端における過大な圧縮塑性変形の発生
 - a)めっき浸漬中の温度上昇過程での部材内の温度不均一による、腹板における過大な圧縮熱応力の発生
 - b)圧縮熱応力の発生に加えて、水平補剛材端部の曲げ剛性の低下と高温下での鋼材の耐力低下による、腹板隙間部におけるS字状の面外局部変形の発生
 - c)凹状変形溶接部止端における応力集中による過大な圧縮塑性変形の発生
- ②温度上昇後の温度均一状態における凹状変形溶接部止端での過大な引張塑性変形の発生
 - a)圧縮状態での圧縮塑性変形、および隙間部などでのS字状の局部変形の発生による、腹板におけるめっき浸漬中の温度均一状態での引張熱応力の発生
 - b)引張熱応力の発生によるS字状変形部の腹板における伸びの発生
 - c)凹状変形溶接部止端における応力集中による過大な引張塑性変形の発生
- ③圧縮引張の繰返し载荷による亜鉛脆化割れの発生
 - a)凹状変形溶接部止端における過大な圧縮引張の繰返し载荷
 - b)圧縮引張の繰返し载荷条件下における鋼材溶接熱影響部の耐亜鉛脆化割れ性の低下

上記の推定した割れ発生のメカニズムについて、報告では実験的な確認を行っている。次にその過程を示す。

- ①亜鉛めっき浸漬中に鉋桁の部材方向に発生する熱応力の解析
鉋桁部材の桁方向に発生する熱応力の亜鉛めっき浸漬中での時間的変化を、弾塑性解析法により計算機を用いて算出し、とくに発生熱応力のうち最大圧縮熱応力と温度均一状態での熱応力値を求めている。発生熱応力に及ぼす影響因子として、部材寸法・サイズ（フランジの板厚と幅、腹板の板厚と高さ、水平補剛材の板厚と取付け位置）、めっき浸漬速度、および使用鋼材の室温とめっき温度での耐力を取り上げ、それぞれの因子を実用の範囲で数値的に変化させている。その結果、最大圧縮熱応力と温度均一状態での引張熱応力に関しては、とくにフランジ厚・腹板厚・鋼材の耐力・補剛材の板厚が大きく影響を及ぼすこと明らかにしている。また各因子の影響度を示す熱応力の重回帰式を求めており、部材寸法・サイズ、浸漬速度、使用鋼材の耐力などの各要因が変化する条件における熱応力の推定式を供している。
- ②各種の水平補剛材の端部形状における面外方向の局部変形の発生条件、および局部変形条件下での溶接部止端でのひずみ・応力変化の実験的確認
水平・垂直補剛材の交差部を有する小型圧縮試験片を用いた、圧縮引張の繰返し载荷試験において次のことを明らかにしている。

- a) 水平補剛材端部での局部変形は使用鋼材の耐力以下の見掛け上の載荷重（載荷荷重を補剛材を含む全断面積で徐した値）で発生する。
- b) 見掛け上の載荷重は水平補剛材端部の形状によって増減し、端部隙間部の補強によって増大し、水平補剛材を垂直補剛材に溶接接合することによって最大となる。
- c) 局部変形により凹状に変形する溶接部止端においては、圧縮時に耐力を超える過大な圧縮ひずみ・応力が発生し、変形前の状態に復帰した時点では耐力を超える過大な引張ひずみ・応力が発生する。

③ 圧縮引張の繰返し載荷条件下での鋼材の耐亜鉛脆化割れ性の確認

過度の変形が発生しないことを前提にした耐亜鉛脆化割れ鋼と市販鋼を用い、亜鉛浴中での圧縮・引張の繰返し曲げ載荷試験を行い、耐亜鉛脆化割れ性に及ぼす引張載荷前の圧縮載荷の影響を確認している。その結果、両者の鋼材において影響度合いは異なるが、両者とも単純な引張曲げ載荷と比較して引張曲げ載荷前の圧縮曲げ載荷によって、割れ発生の限界曲げ荷重が著しく低下することを明らかにしている。

④ 水平補剛材端部での亜鉛脆化割れ防止法の提案

局部変形が発生した場合、必然的に溶接部止端に圧縮・引張の繰返し応力が載荷されることから、水平補剛材端部での局部的変形の発生防止を亜鉛脆化割れ防止の基本条件と考えている。そこで局部変形の防止法として、発生する熱応力を与条件を重回帰式に挿入して求め、発生熱応力から適合する水平補剛材の端部形状を選択する方法か、部材サイズなどの与条件を変更し発生熱応力を低減する方法を提言している。

1. 3 垂直補剛材端部の亜鉛脆化割れの防止について

鋸桁を亜鉛めっきした場合に発生する亜鉛脆化割れに関してアンケート調査を行った結果、発生部位では5カ所に区分され、割れの形態には水平補剛材の端部などの割れと垂直補剛材の端部などの割れの二種類があることが明らかになった。これらの割れのうち前者の水平補剛材端部の割れに関しては、前述の研究報告の紹介で示したように十分な研究がなされ、その発生原因の解明と防止法の確立をほぼ完了している。しかし、後者の垂直補剛材などの割れに関しては、原因についても未解明であり、防止法についても未だ確立していない状況にある。

そこで本研究では、これらの割れに関して原因の究明と防止法の確立を最終目標に、桁のねじれ現象の実験的な解明を行った。桁のねじれ現象と垂直補剛材の割れとの関係については、実際のめっき橋の変形状態の観察結果から桁に

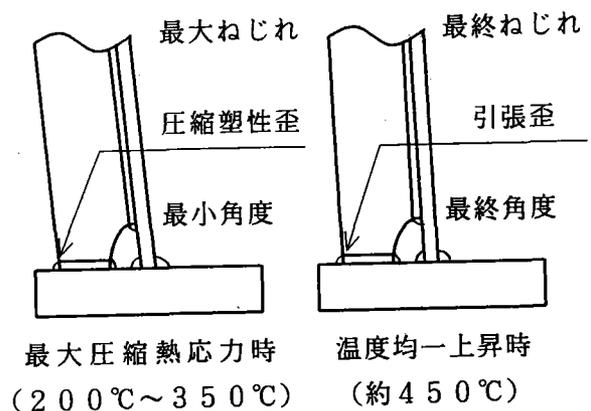


図1. 6 垂直補剛材端部の変形例

ねじれ現象が認められることによるが、この桁のねじれ現象から図1. 6に示すようにめっき浸漬中にフランジと腹板との間に角変形が発生し、垂直補剛材端部の溶接部止端に引張応力、または圧縮・引張の繰返し応力が載荷し、亜鉛脆化割れが発生すると考えたことによる。桁のねじれ現象に関する実験の結果と発生応力に関する解析の結果を以下に示す。