

氏 名	にしお よしふみ 西尾 吉史
本 籍（国 籍）	徳 島 県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	工 第 4 9 号
学位授与年月日	平成 2 8 年 3 月 2 3 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当 論文博士
学位論文 題目	<b>3次元熱伝導－熱応力連成解析による鋼構造物の溶融 亜鉛めっき割れおよび熱変形対策に関する研究</b>
学位審査委員	主査 教 授 岩崎 正二 副査 教 授 海田 輝之 副査 教 授 中村 満 副査 教 授 出戸 秀明 副査 准教授 大西 弘志

## 論 文 内 容 の 要 旨

溶融亜鉛めっきは、鋼構造物を錆から守り、長期防食が期待できる表面処理である。とくに建築、道路および鉄道などにおいて再塗装によるメンテナンスが困難な場合や、メンテナンスに莫大な費用を要する場合を中心に普及している。溶融亜鉛めっきとは鋼構造物を約 440(℃)の溶融亜鉛中へ浸漬させて鋼-亜鉛の合金層を形成・被覆させ、鋼を腐食要因から隔離することにより、鋼材の腐食を防止する処理である。溶融亜鉛めっきを施す過程において、めっき槽中の鋼構造物は急激な温度変化にさらされ、めっき割れや熱変形が生じる場合がある。この原因としては、部材寸法、形状、めっき作業条件、鋼材の成分、溶接方法、残留応力、液体金属脆化等が単独あるいは複合的に関連して発生すると考えられ、その発生を事前に予測することは困難である。これらに対して、設計ディテールの見直し、鋼材の成分、めっき作業条件などを適切に選択することで実用的にめっき割れや熱変形を防止できるものと考えられる。

本論文では、溶融亜鉛めっき時の鋼構造物の挙動を再現する 3 次元熱伝導－熱応力連成解析手法の確立と、その解析手法によるめっき割れおよび熱変形の防止対策を検討することを目的とする。

最初に、2 枚の鋼平板を溶接した T 継手溶接鋼平板を溶融亜鉛中に浸漬させた場合について、溶接部近傍にどのような熱応力が生じるかを明らかにすることを目的とする。3 次元 FEM 解析モデルを作成し、時刻歴毎の 3 次元熱伝導－熱応力連成解析を行い、解析結果と実験結果を比較することで解析手法の妥当性を検討した。3 次元熱伝導解析にあたっては、材料特性値の温度依存性を考慮した。また、2 枚の鋼平板の溶融亜鉛への浸漬方向を考慮することにより、基板と付属板それぞれ

れの最適熱伝達係数を最小二乗法を用いて求めた。その結果、部材毎に最適熱伝達係数を設定することで解析の精度が向上した。次に、得られた時刻歴温度分布を用いて、T 継手溶接鋼平板の熔融亜鉛浸漬時の 3 次元弾塑性熱応力解析を実施した。回し溶接部近傍の実測ひずみ履歴曲線と解析ひずみ履歴曲線を比較検討したところ、発生する最大値や生じる時間はほぼ一致した。また、解析結果から得られた熔融亜鉛浸漬時毎のひずみ分布から、浸漬直後から浸漬完了後に亘って、回し溶接部に応力が集中することが、めっき割れの原因の一つであることが分かった。加えて、回し溶接部で発生したひずみは塑性域に達しており、残留ひずみとして残ることから、本研究の熱応力解析では弾塑性解析が有効であることを示した。

一般的な柱梁仕口部の割れ対策として、実際に割れが発生した熔融亜鉛めっきの施工事例から、ダイアフラムを有する H 形鋼で構成される部材を解析例として取上げ、割れが生じにくいスカラップの構造ディテールを数値解析により検討した。その結果、スカラップからダイアフラム方向へ応力集中が発生しており、割れが発生する可能性のある箇所を解析上明らかにした。また、H 形鋼のウェブとダイアフラムに孔を設けたノンスカラップ工法よりも、ダイアフラムのみに孔を設けた方が、最大相当応力値が小さくなり、割れ発生の可能性を低減できることを示した。

同じく、柱梁仕口部の割れ対策として、めっき抜き孔の孔径および位置を変化させた数種類の実験体を作製し、熔融亜鉛浸漬実験および 3 次元熱伝導－弾塑性熱応力解析を行い、熔融亜鉛めっき時に割れが生じにくいめっき抜き孔の孔径および位置の組み合わせを検討した。その結果、めっき抜き孔径 35(mm)かつ溶接ビードからの隙間 15(mm)に設定することで割れの発生を低減できることを示した。道路橋合成床版に用いる鋼板パネルのように一方向のみに補剛材を有する大型構造物は、温度分布の落差が大きくなる傾向にあるため、残留変形が残る場合がある。そこで、合成床版パネルの熔融亜鉛浸漬実験および 3 次元熱伝導－熱応力連成解析を行い、合成床版パネルの熱変形を低減させるためのめっき条件を検討した。その結果、熔融亜鉛浸漬速度を速く設定することや、熔融亜鉛めっき後の水冷槽の水冷温水は極力高く設定することで、変位や応力を大きく低減できることを示した。

本論文の結果より、防錆処理として高い評価を受けている熔融亜鉛めっきを、めっき割れや熱変形を警戒してめっき処理の利用が進んでいない橋梁等の大型構造物に適用範囲を広げることが期待される。

## 論文審査結果の要旨

熔融亜鉛めっきは、鋼構造物を錆から守り、長期防食が期待できる表面処理である。熔融亜鉛めっきを施す過程において、めっき槽中の鋼構造物は急激な温度変化

にさらされ、めっき割れや熱変形が生じる場合がある。この原因としては、部材寸法、形状、めっき作業条件、鋼材の成分、溶接方法、残留応力、液体金属脆化等が単独あるいは複合的に関連して発生すると考えられ、その発生を事前に予測することは困難である。これらに対して、設計ディテールの見直し、鋼材の成分、めっき作業条件などを適切に選択することで実用的にめっき割れや熱変形を防止できるものと考えられる。そこで本論文では、熔融亜鉛めっき時の鋼構造物の挙動を再現する3次元熱伝導－熱応力連成解析手法の確立と、その解析手法によるめっき割れおよび熱変形の防止対策を検討することを目的としている。

最初に、2枚の鋼平板を溶接したT継手溶接鋼平板を熔融亜鉛中に浸漬させた場合について、3次元FEM解析モデルを作成し、時刻歴毎の3次元熱伝導－熱応力連成解析を行い、解析結果と実験結果を比較することで解析手法の妥当性を検証している。3次元熱伝導解析にあたっては、熱拡散率に用いる全ての材料特性値の温度依存性を考慮したことや2枚の鋼平板のそれぞれの熱伝達係数を最適化手法を用いて求めたために、得られた解析温度履歴曲線と実測温度履歴曲線はほぼ一致している。次に、得られた時刻歴温度分布を用いて、T継手溶接鋼平板の熔融亜鉛浸漬時の3次元弾塑性熱応力解析を実施した。3次元熱応力解析にあたっては、ヤング率、降伏点、熱膨張係数の温度依存性を考慮しているために、実測ひずみと解析ひずみを比較検討したところ、回し溶接部近傍で発生する最大値や生じる時間はほぼ一致した。また、回し溶接部に応力が集中することが、めっき割れの原因の一つであることを明らかにしている。

一般的な柱梁仕口部の割れ対策として、実際に割れが発生した熔融亜鉛めっきの施工事例から、ダイアフラムを有するH形鋼で構成される部材を解析例として取上げ、割れが生じにくいスカラップの構造ディテールを数値解析により検討した。熱応力解析に使用する降伏点応力は、高温化で引張試験を行い決定した。その結果、スカラップからダイアフラム方向へ応力集中が発生しており、その箇所で割れが発生する可能性のあることを解析上明らかにした。同じく、柱梁仕口部の割れ対策として、めっき抜き孔の孔径および位置を変化させた数種類の実験体を作製し、熔融亜鉛浸漬実験および3次元熱伝導－弾塑性熱応力解析を行い、熔融亜鉛めっき時に割れが生じにくいめっき抜き孔の孔径および位置の組み合わせを検討した。割れの判定に際しては、最大主応力値と最大相当応力値の両者を用いて判定すべきであることを指摘している。その結果、めっき抜き孔径35(mm)かつ溶接ビードからの隙間15(mm)に設定することで割れの発生を低減できることを明らかにしている。

道路橋合成床版に用いる鋼板パネルのような大型構造物は、温度分布の落差が大きくなる傾向にあるため、残留変形が残る場合がある。そこで、熔融亜鉛浸漬実験および3次元熱伝導－熱応力連成解析を行い、合成床版パネルの熱変形を低減させるためのめっき条件を検討している。その結果、浸漬速度を速く設定することや、めっき後の水冷槽の温度は極力高く設定することで、変形を大きく低減できることを明らかにした。

本論文のように、3次元熱伝導－熱応力解析の有効性を溶融亜鉛浸漬実験結果によって確認し、その解析手法を用いて溶融亜鉛めっき前の事前検討(部材寸法、形状、めっき作業条件等)を行った方法はこれまでに例がない。本解析手法によって鋼構造物の設計段階から溶融亜鉛めっき時の温度分布を推定し、めっき割れや熱変形を確認できるため、めっき前の設計ディテールの段階で対策を講じることが可能となる。さらに、本解析手法を用いて最適なめっき作業条件(部材吊り位置、浸漬速度、浸漬角度、めっき浴温度、水冷温度等)を求めることでめっき割れや熱変形を防ぐことが可能と言える。その結果、防錆処理として高い評価を受けている溶融亜鉛めっきを、めっき割れや熱変形を警戒してめっき処理の利用が進んでいない橋梁等の大型構造物に適用範囲を広げることが期待される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

### 原著論文名(3編)

3次元熱伝導-熱応力解析による鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する検討, 西尾吉史・岩崎正二・出戸秀明・大西弘志, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.69, No.2, pp.I\_615-I\_624, 2013.

3次元熱伝導－熱応力解析による合成床版パネルの溶融亜鉛めっき時における変形対策に関する検討, 西尾吉史・岩崎正二・出戸秀明・大西弘志, 構造工学論文集, vol.61A, pp.1104-1113, 2015.

鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する実験的および解析的検討, 西尾吉史・岩崎正二・出戸秀明・大西弘志, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.71, No.2, pp.I\_831-I\_840, 2015.