

めっき抜き孔を有する鋼構造物の溶融亜鉛めっき 割れ対策に関する解析的検討（その2）

岩手大学 理工学部 システム創成工学科	名誉教授 工博 岩崎 正二
同	元教授 工博 出戸 秀明
同	准教授 工博 大西 弘志
JFEシビル株式会社	中村 信行
同	阿久津 英典
株式会社デンロコーポレーション 東北ガルバセンター	工博 西尾 吉史

キーワード：溶融亜鉛めっき，めっき割れ，めっき抜き孔，孔径，孔位置

概要

前稿No.65では、柱梁仕口部のめっき割れに着目し、柱梁仕口部を抜き出した実大部分モデルのH形鋼部材を対象とした。これらを3次元熱伝導解析および弾塑性熱応力解析によって、溶融亜鉛めっき時に部材内、特にめっき抜き孔近傍に発生する熱応力分布を推定し、割れが生じにくい孔径を検討した。その結果から以下のように述べた。

- 1) 溶融亜鉛浸漬中において、各めっき抜き孔の端部からPL40側およびH形鋼フランジ側に大きな引張応力が発生しており、割れが発生する原因の一つと考えられる。
- 2) めっき抜き孔径25mmでは割れが発生する可能性があり、孔径35mm程度まで大きくすることで割れの発生を低減できる。

本稿では、前稿で用いたH形鋼部材について、構造および溶融亜鉛めっき時のめっき作業条件を変更した状態を、3次元FEMによる熱伝導－弾塑性熱応力連成解析によって再現し、割れが生じにくい部材構造、およびめっき作業条件を検討した事例について紹介する。

1. はじめに

これまで紹介した浸漬実験および3次元熱伝導一熱応力連成解析では、Case 1～5として、めっき抜き孔径や位置を変更した場合について検討した。本稿ではCase 6～11として、部材構造および溶融亜鉛めっき時のめっき作業条件を変更した状態を3次元熱伝導一熱応力連成解析によって再現する。それらの結果から、溶融亜鉛めっき時に部材内、特にめっき抜き孔近傍に発生する熱応力分布を推定し、割れが生じにくい部材構造およびめっき作業条件を検討する。

2. 解析概要

2. 1 解析手法

解析手法は、前稿で紹介した3次元熱伝導一熱応力連成解析で行う。図1に示すようなFEM解析モデルについて、図2に示す工程で行う。図2に示すように、時刻毎の境界条件の変化に従い熱伝達面を定義し、3次元非定常熱伝導解析を行う。得られた時刻歴の温度分布を外力として、時刻歴毎に浸漬開始から溶融亜鉛槽へ浸漬させた600sec間について、3次元FEM弾塑性熱応力解析を行う。その他詳しい解析手法については前稿と同様であるため割愛する。

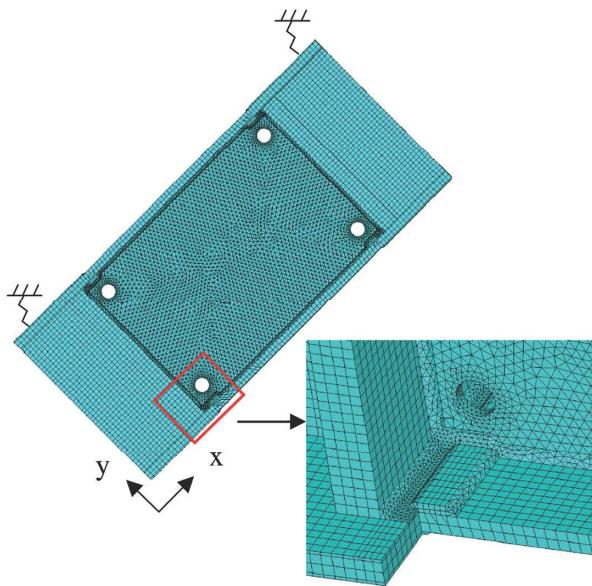


図1 FEM解析モデル(実験体Case 1)
(Fig.1 FEM analytical model (Test Case 1))

2. 2 解析パターン

- 3次元熱伝導解析および弾塑性熱応力解析を行う解析パターンの一覧を表1に示す。
- ・表1に示すように、Case 6は、めっき抜き孔の位置をCase 1とCase 2の中間として溶接ビードと孔の隙間を10mmと設定した。
 - ・割れの発生を低減させる対策として、部材内の板厚比を小さくすることが考えられる¹⁾。そこでCase 7では、H450×200×9×19をH450×200×12×19に変更し、部材内の板厚比を4.4倍から3.3倍に変更した解析モデルを設定する。
 - ・その他の割れ対策として、溶融亜鉛浸漬時の浸漬速度を速く設定した場合をCase 8とする。
 - ・加えて、溶融亜鉛浸漬時の浸漬角度を変更した場合をCase 9, 10, 11とする。

これらの結果から、溶融亜鉛めっき時に部材内、特にめっき抜き孔近傍に発生する熱応力分布を推定し、割れが生じにくい部材構造およびめっき条件を検討する。

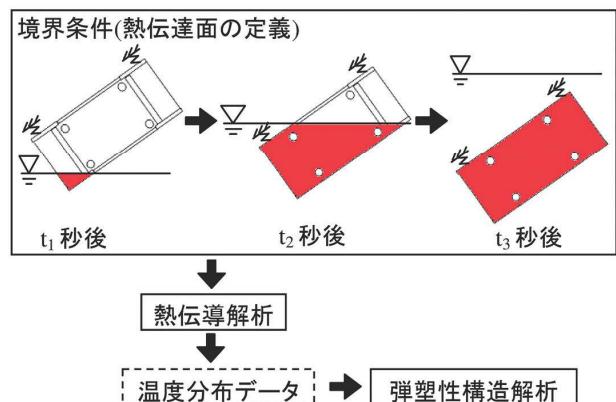


図2 3次元熱伝導一熱応力連成解析の流れ図
(Fig.2 Flowchart of 3-D thermal conductivity - thermal stress analysis)

表1 解析パターン一覧(めっき割れ対策の検討)
(Table1 Analysis conditions (Study on countermeasure for galvanizing cracks))

各 Case		孔径 (mm)	溶接ビードと孔の隙間 (mm)	板厚比 (倍)	溶融亜鉛 めっき槽への浸漬 速度 (m/min)	溶融亜鉛 めっき槽への浸漬 角度(°)	備考		
浸漬実験	Case 1	35	15	4.4	0.5	45	割れ対策型		
	Case 2		5				JASS6 (2007) ²⁾ 標準型		
FEM 解析 のみの 検討	Case 6	35	10	4.4	0.5	45	Case 2 よりも隙間を設けた場合		
	Case 7			3.3			Case 2 よりも板厚比を小さくした場合		
	Case 8						Case 2 よりも浸漬速度を速くした場合		
	Case 9		5	4.4	0.5	30	Case 2 よりも浸漬角度を小さくした場合		
	Case 10					15	Case 9 よりも浸漬角度を小さくした場合		
	Case 11					0	Case 10 よりも浸漬角度を小さくした場合		

3. 解析結果と考察

3. 1 Case 6

Case 6 (めっき抜き孔径35mm, 溶接ビードと孔との隙間10mmにおける最大第一主応力発生時の第一主応力分布図を図3に示す。図3より, 浸漬開始270sec後において, 孔位置6-3の孔端部からH形鋼フランジ方向側に最大307N/mm²の第一主応力が発生している。

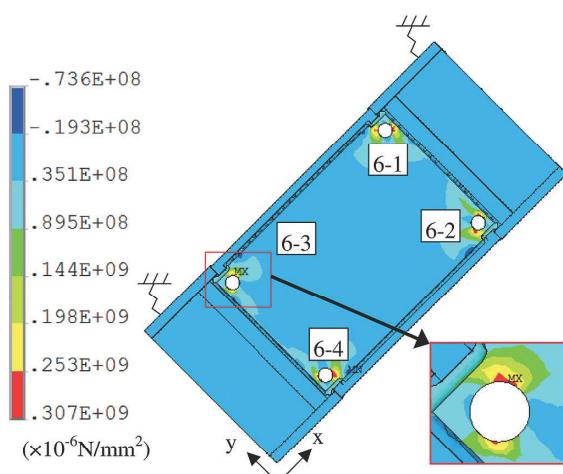


図3 Case 6における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図(浸漬開始270sec後)
(Fig.3 First principal stress distribution diagram when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 6 (after 270 sec. from dipping))

前稿で紹介したCase 1, 2および本稿Case 6の熱応力解析結果より、溶接ビードと孔との隙間と最大第一主応力値の関係を図4に示す。

- ・図4より、溶接ビードと孔との隙間を大きく設定することで、最大第一主応力を低減できることが分かる。
- ・特に、Case 2とCase 6の最大第一主応力差は約19N/mm²（Case 2と比較して5.8%低減）であり、溶接ビードと孔との隙間10mmであっても、割れの低減効果は大きいと思われる。

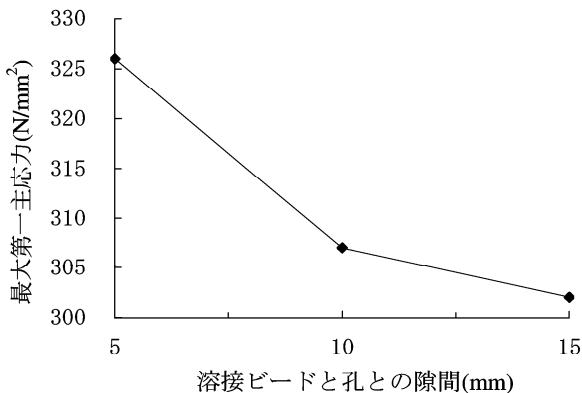


図4 溶接ビードと孔との隙間と最大第一主応力値の関係
(Fig.4 Relation between clearance of weld bead and drain hole and maximum value of first principal stresses)

3. 2 Case 7

Case 7（部材内の板厚比を3.3倍）における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図を図5に示す。図5より、浸漬開始360sec後において、孔位置7-3の孔端部からH形鋼フランジ方向側に最大292N/mm²の第一主応力が発生している。これは、Case 2の最大第一主応力より低く抑えられているため、割れの発生を防ぐことができると推測できる。

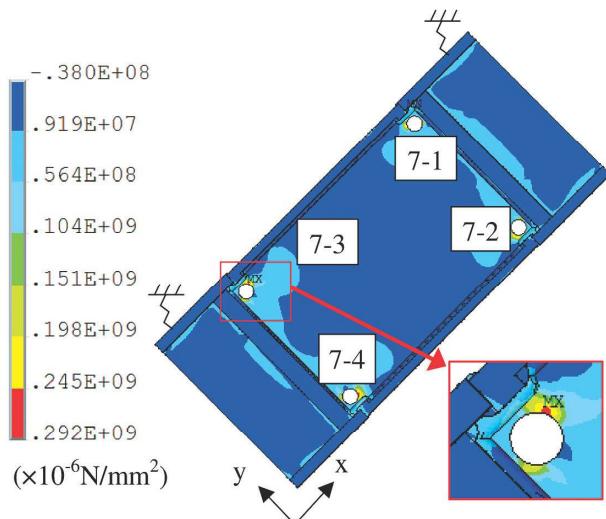


図5 Case 7における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図(浸漬開始360sec後)
(Fig.5 First principal stress distribution diagram when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 7 (after 360 sec. from dipping))

3. 3 Case 8

Case 8（溶融亜鉛めっき時の浸漬速度2.4m/min）における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図を図6に示す。図6より、浸漬開始270sec後において、孔位置8-3の孔端部からH形鋼フランジ方向側に最大319N/mm²の第一主応力が発生している。これは、Case 2で発生する最大第一主応力より低いものの、板厚比を小さく設定したCase 7ほどの割れ低減効果はないと言える。

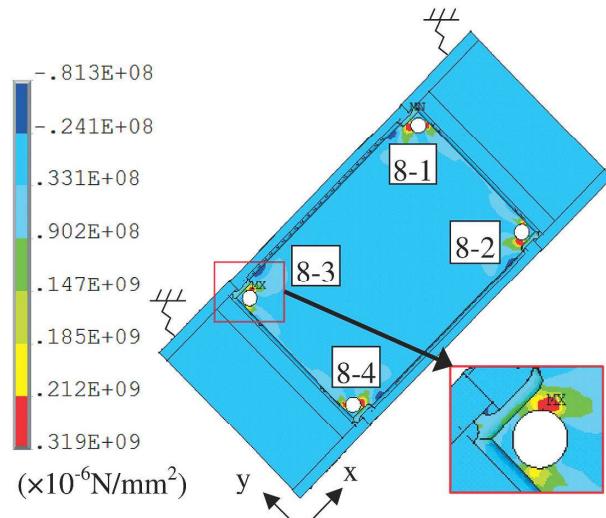


図6 Case 8における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図(浸漬開始270sec後)
(Fig.6 First principal stress distribution diagram when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 8 (after 270 sec. from dipping))

3. 4 Case 9, 10, 11

溶融亜鉛浸漬時の浸漬角度を変化させたCase 9, 10, 11の熱応力解析結果より、浸漬角度と最大第一主応力値の関係を図7に示す。

- ・図7より、浸漬角度を小さくすることで最大第一主応力を低減できることが分かる。
- ・特に、浸漬角度45°のCase 1と浸漬角度0°のCase11の最大第一主応力差は約23N/mm² (Case 2と比較して7.1%低減) と大きな差があるため、溶融亜鉛めっき時の浸漬角度を極力小さく設定することで、割れの発生を低減できると思われる。

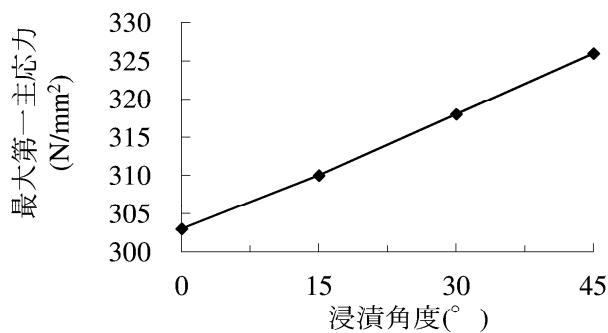


図7 溶融亜鉛浸漬時の浸漬角度と最大第一主応力の関係
(Fig.7 Relation between angle of immersion angle and maximum value of first principal stresses)

3. 5 各Caseの最大第一主応力および履歴曲線

各Caseの熱応力解析結果より、Case 2 の最大第一主応力を基準として、他のCaseとの最大主応力値の低減割合を表2に示す。加えて、各Caseの最大第一主応力発生位置の第一主応力履歴曲線を図8に示す。

- ・表2より、Case 1 およびCase 6～Case11の最大第一主応力は、Case 2 に発生した最大第一主応力より小さい傾向にある。
- ・特に、Case 2 と比べて、板厚比を小さくしたCase 7 では最大第一主応力が約10%低減しており、溶接ビードと孔との隙間を15mmとしたCase 1 および溶融亜鉛めっき時の浸漬角度を0°としたCase11においては最大第一主応力が約 7 %低減させる結果となっている。これらから、部材構造およびめっき作業条件を考慮することで割れの発生を大きく低減できることが分かる。
- ・図8より、全てのCaseにおいて、第一主応力の発生に時間差がみられるが、浸漬開始から150secまでの挙動は、すべての履歴曲線で引張応力（最大約45N/mm²）が発生後に圧縮応力（最大約75N/mm²）が発生していることが分かる。実際のめっき作業条件を模擬した本解析条件ではモデルを吊り上げた状態から下部より順次浸

表2 Case 2 を基準とした最大第一主応力低減割合の一覧
(Table2 Reduction rates of maximum principal stresses based on Case 2)

各 Case	最大第一主応力 (N/mm ²)	最大第一主応力 低減割合 (%減)
Case 1	302	7.5
Case 2	326	-
Case 6 (溶接ビードと孔との 距離 10 (mm))	307	5.8
Case 7 (板厚比 3.3 倍)	292	10.4
Case 8 (浸漬速度 2.4 (m/min))	319	2.1
Case 9 (浸漬角度 30(°))	318	2.5
Case 10 (浸漬角度 15(°))	310	4.9
Case11 (浸漬角度 0(°))	303	7.1

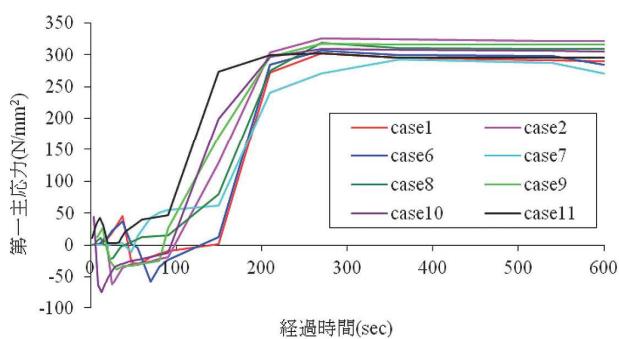


図8 各Caseの最大主応力発生位置における第一主応力履歴曲線
(Fig.8 Chronographic curves of principal stresses at locations where maximum principal stresses arise in each case)

漬した場合を想定しているため、各めっき抜き孔の温度上昇が異なる。これは、板厚が薄いH形鋼のウェブは温度上昇が速いが、そのほかの板厚が厚いPL鋼材は温度上昇が遅い傾向にある。また、モデルを溶融亜鉛へ完全に浸漬させるためには時間がかかり、溶融亜鉛に浸漬する過程で部位や場所によって温度分布が異なる応力の変化が発生し、浸漬開始から270sec程度で最大主応力が発生すると推測できる。

以上の解析結果から、部材構造の割れの対策としては、溶接ビードと孔との隙間を大きく設定し、板厚比を小さく設定することが有効である。その他、めっき作業条件による割れの対策としては、溶融亜鉛浸漬時の浸漬速度を速く設定し、浸漬角度を小さく設定することが有効である。

4. おわりに

本稿では、柱梁仕口部のめっき割れに着目し、柱梁仕口部を抜き出した実大部分モデルのH形鋼部材を対象とした。これらに対して、部材構造（めっき抜き孔の位置、板厚比）および溶融亜鉛めっき時のめっき作業条件（浸漬角度、浸漬速度）を変化させた状態で3次元熱伝導－熱応力連成解析を行い、割れが生じにくい部材構造およびめっき作業条件を検討した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 各Caseの熱応力解析結果から、部材内の板厚比を4.4倍から3.3倍に小さく設定したCase 7の最大第一主応力が最も小さく、また浸漬実験で割れが発生しなかったCase 1の最大第一主応力よりも小さいため、部材内の

板厚比を小さくすることで割れの発生を大きく低減できる。

- 2) 溶融亜鉛めっき時の浸漬速度を現場で可能な範囲で速く設定したCase 8については、Case 2よりも約2%の最大第一主応力を低減できてはいるものの、本モデルの割れ対策として効果は少ないといえる。
- 3) 溶融亜鉛めっき時の浸漬角度を変更したCase 9, 10, 11については、浸漬角度を小さくすることで、Case 2よりも最大約7%最大第一主応力が低減できるため、割れに対して有効な対策と思われる。

これまで本報No.64から3編にわたり溶融亜鉛めっきによる割れ対策の検討について紹介した。これらの検討では、溶融亜鉛めっきによる割れが発生する要因のうち構造形状およびめっき作業条件に着目し、3次元FEMによる熱伝導－熱応力連成解析によって、割れが生じにくい部材構造およびめっき作業条件を明らかにした。

本検討で示した対策を複合して採用することが最も有効な割れ対策であると考えられる。

ただし、実際の現場において、本検討で示した割れ対策を全て採用することが出来ない場合も考えられる。そのような場合であっても、可能な範囲で割れ対策を講ずることで、少しでも割れの発生割合を低減可能と考えられる。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本鋼構造協会：建築用溶融亜鉛めっき構造物の手引き、1998.
- 2) 一般社団法人日本建築学会：鉄骨工事技術指針－工場製作編、p.594, 2007.