

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1）

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	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.64では、めっき抜き孔を有するノンスカラップ工法による一般的な柱梁仕口部のめっき割れ対策について、数種類の実験体を用いた浸漬実験を行い、めっき割れが生じにくいめっき抜き孔の径および位置を検討した。その結果、めっき抜き孔の径を35mm、かつ溶接ビードと孔端との隙間を15mmに設定することで、溶融亜鉛めっきによる割れの発生の可能性を大きく低減できること述べた。

本稿では、前稿で紹介した浸漬実験に用いためっき抜き孔を有するH形鋼部材を解析モデルとして、3次元非定常熱伝導解析および3次元弾塑性熱応力解析を実施し、溶融亜鉛浸漬時にH形鋼部材内、特にめっき抜き孔の近傍にどのような熱応力が生じるかを明らかにした。

1. はじめに

3次元FEM解析過程において、正確な3次元熱伝導解析を行うためには、実験体モデルに適した最適な熱伝達係数が必要となる。そこで、実験体各部に熱電対を設けて溶融亜鉛浸漬時に実験体内に発生する温度測定結果と熱伝導解析結果の差が最小となるような最適な熱伝達係数を求める。得られた最適熱伝達係数を用いて3次元熱伝導解析を行うことにより、溶融亜鉛浸漬時の実験体の温度分布が求められる。それらの結果を用いて3次元弾塑性熱応力解析を実施し、実験体内にどのような熱応力や熱ひずみが発生して割れにつながるのかを明らかにする。さらに、溶融亜鉛めっき時に割れが生じにくくいめっき抜き孔の径および位置の組み合わせを、数種類の実験体の実験結果と解析結果を比較しながら検討する。

前稿で紹介した浸漬実験の実験体を図1および表1に示す。この中から、実験体Case1, Case2およびCase4についてモデル化を行い、3次元熱伝導解析および弾塑性熱応力解析を行う。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、割れが生じにくくい孔径および位置を検討する。

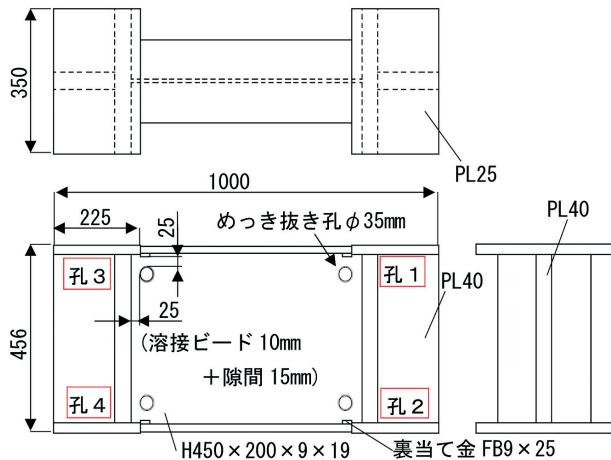


図1 実験体Case1部材詳細図(mm)
(Fig.1 Geometry and dimension of specimen for Test Case 1)

表1 各実験体の孔径および孔位置
(Table1 Hole size and location of each specimen)

実験体Case	孔径(mm)	溶接ビードと孔との隙間(mm)	備考
Case1	35	15	φ35割れ対策型
Case2	35	5	JASS6(2007)標準型
Case3	35	0	0距離型
Case4	25	15	φ25標準型
Case5	25	5	φ25割れ誘発型

2. 解析概要

2. 1 FEM解析モデル

例として、実験体Case1のFEM解析モデルの全体図およびめっき抜き孔周辺の拡大図を図2に示す。

- ・FEM解析モデルは、4面体および6面体SOLID要素を用いて、総節点数61705、総要素数86469のモデルとした。
- ・H形鋼ウェブのめっき抜き孔周辺は特に細かくメッシュ分割を行い、H形鋼ウェブの厚み方向についても2分割でFEM解析モデルを作成した。

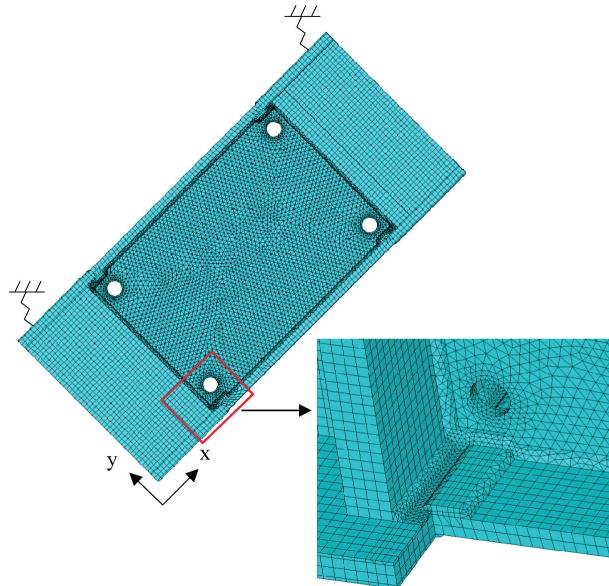


図2 FEM解析モデル(実験体Case1)
(Fig.2 FEM analytical model (Test Case 1))

2. 2 解析方法

3次元熱伝導－熱応力連成解析の流れ図を図3に示す。図3より、解析の流れについては、溶融亜鉛浸漬深さに従い、最初に t_1 sec後の境界条件で、3次元非定常熱伝導解析を行う。次に t_2 sec後、次に t_3 sec後というように時刻ごとの境界条件の変化に従い熱伝達面を定義し、解析モデルの溶融亜鉛浸漬中の温度分布を求める。得られた時刻歴の温度分布を外力として、時刻歴ごと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。

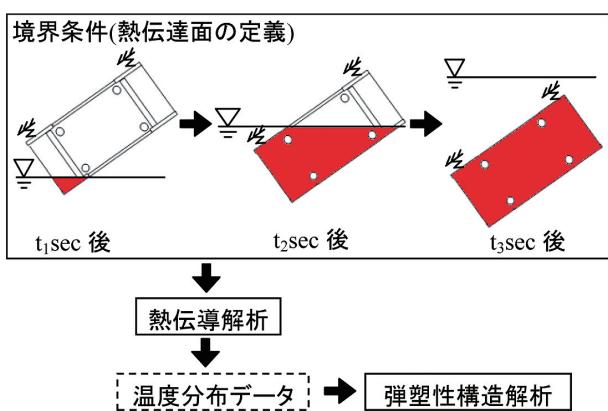


図3 3次元熱伝導－熱応力連成解析の流れ図
(Fig.3 Flowchart of three-dimensional thermal conductivity - thermal stress analysis)

2. 3 材料特性値の温度依存性

熱伝導解析に用いる熱拡散率 κ は式(1)で表され、比熱 c 、密度 ρ 、および熱伝導率 λ による係数である。鋼材の材料特性値は、温度変化によって変動する^{1), 2)}。正確な熱拡散率を求めるために、比熱、密度、および熱伝導率のすべての材料特性値について文献^{1), 2)}を参考に温度依存性を考慮する。その結果、比熱および熱伝導率は図4に示すように設定する。また、密度については、20°C時7873kg/m³から916°C時7646kg/m³まで変動すると設定する。

$$k = \frac{\lambda}{\rho c} \quad \dots (1)$$

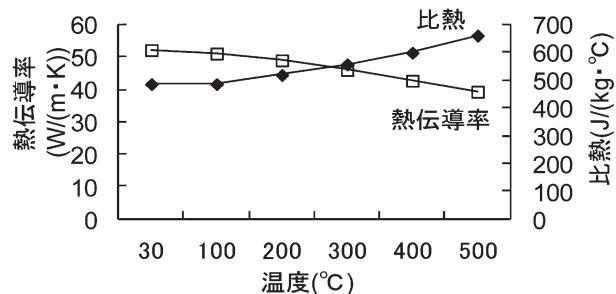


図4 热伝導率および比熱の温度変化
(Fig.4 Thermal conductivity and specific heat at different temperatures)

本解析に用いる各部材の降伏点の温度依存性を図5に示す。

- ・降伏点は、実験体のH形鋼、溶接材料、PL25およびPL40のそれぞれについて、実際に使用した材料のミルシートの値を常温時の値とし、文献²⁾を参考に温度変化の影響を推定して設定した。なお、PL25とPL40の降伏点はほぼ同じ値であった。
- ・ヤング率については、文献²⁾を参考にして20°C時210kN/mm²から500°C時159kN/mm²の温度範囲内で変化するように設定した。
- ・接線係数はヤング率の1/100とし、熱膨張係数については20°C時 $11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ から500°C時 $13.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の温度範囲内で変化するように設定した。

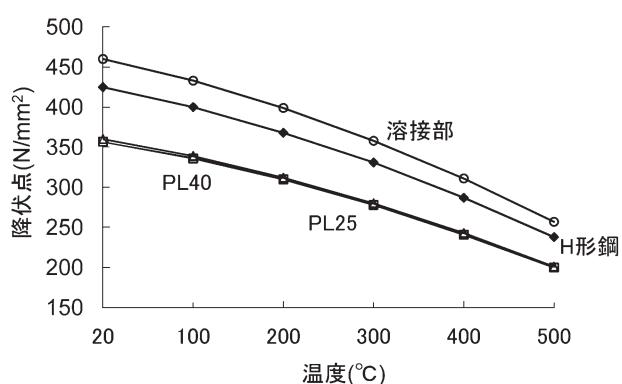


図5 降伏点の温度依存性
(Fig.5 Temperature dependence of yield stress)

2. 4 最適熱伝達係数の設定

境界条件によって変化する可能性のある熱伝達係数は、これまでと同様に最適化手法によって求める。

- ・熱伝達係数を500～10000W/(m² · °C)の範囲で変化させ、解析温度T' °Cを求める。さらに、H形鋼ウェブ、H形鋼フランジ、PL25およびPL40のそれぞれについて式(2)の目的関数OBJを用いて、各節点の解析温度T' °Cが、浸漬実験により得られた各熱電対の実験温度T°Cと近似するような温度分布を最小二乗法で求める。

$$OBJ = \sqrt{\sum (T - T')^2} \quad \dots (2)$$

- ・これらから得られた目的関数OBJと熱伝達係数の関係を図6に示す。図6より、目的関数OBJが最小となる最適熱伝達係数は、すべての部位で800W/(m² · °C)であった。

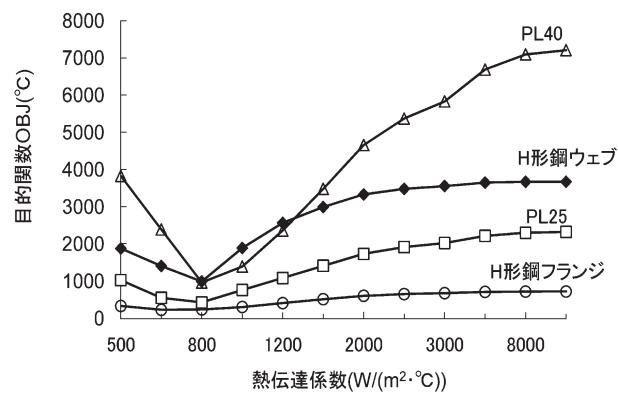


図6 热伝達係数と目的関数OBJの関係
(Fig.6 Relation between heat transfer coefficient and objective function OBJ)

2. 5 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2に示す。表2に示すように、浸漬実験と同じ条件を設定する。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、割れが生じにくい孔径および位置を検討する。

表2 解析パターン一覧(溶融亜鉛浸漬実験の再現)
(Table2 Analysis conditions (simulation of immersion tests))

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
Case1	35	15	4.4	0.5	45	Φ35割れ対策型
Case2		5				JASS6(2007)標準型
Case4		15				Φ25割れ対策型

3. 解析結果と考察

3. 1 热伝導解析結果

最適化手法によって求めた最適熱伝達係数800W/(m² · °C)を用いて境界条件を設定して非定常熱伝導解析を行った。図7は、図8に示した代表的な9点について実験体Case 1の解析値と実験値の温度履歴曲線を示している。

- ・図7より、実験値と解析値の温度履歴曲線は、最大で約20°Cの誤差が見られるところもあるが、概ね温度分布を再現できている。
- ・H形鋼ウェブの熱電対3～7の中では、最初に浸漬する熱電対7の温度上昇が最も早く、浸漬開始から約90secで約400°Cに達した。
- ・加えて、最後に浸漬する熱電対3は、熱電対7と比べて温度上昇が開始する時間に約50secの差がある。そのため熱電対3の温度が上昇し始める浸漬開始60sec時に熱電対7の温度は380°Cに達しており、熱電対3と7の温度差は320°C程度となった。
- ・4つのめっき抜き孔は、熱電対7, 6, 5, 3すなわち孔4, 3, 2, 1の順で温度が上昇することが再現できた。

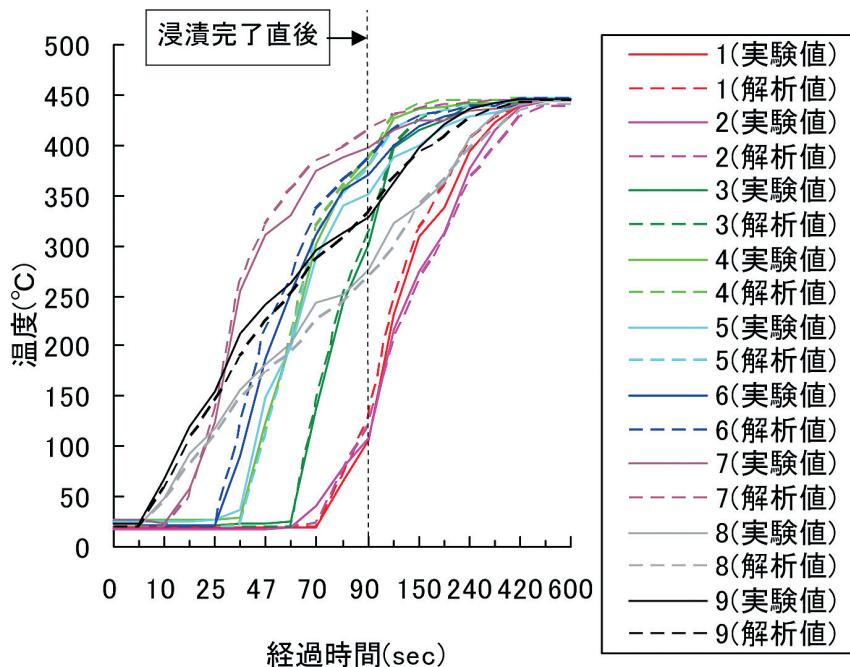


図 7 Case 1 における実験値と解析値の温度履歴
(Fig. 7 Temperature history of experimental values and analytical values in Test Case 1)

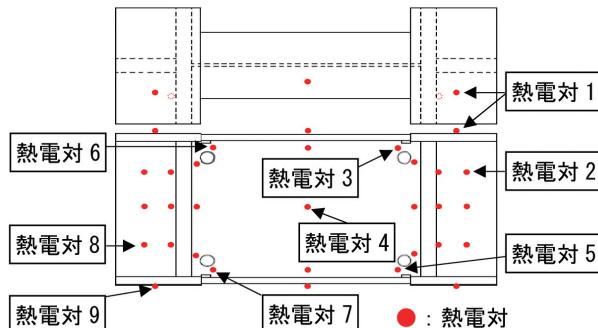


図 8 热電対取付け位置
(Fig. 8 Position of thermocouples)

熱伝導解析結果より、最大第一主応力発生時の温度分布を図9に示す。なお、浸漬実験では実験体の表面温度を測定しているため、解析結果においてもモデルの表面温度分布で評価する。

- ・図9より、浸漬開始270sec経過時に、めっき抜き孔があるH形鋼ウェブはほぼめっき浴温445°Cに達したが、板厚

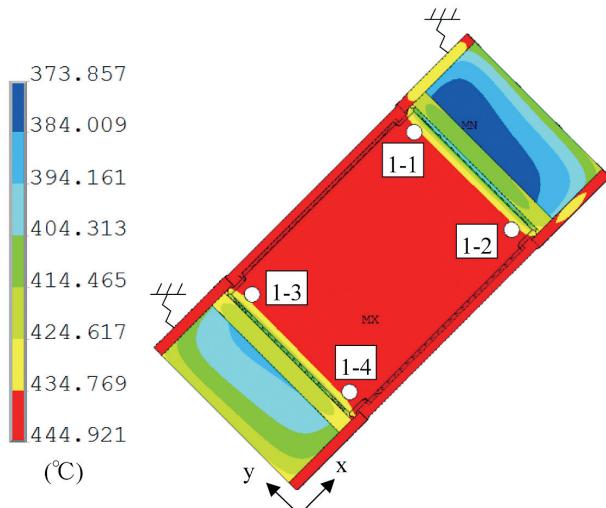


図 9 Case 1 における最大第一主応力発生時の温度分布図(浸漬開始270sec後)
(Fig. 9 Thermal distribution diagram when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 1 (after 270 sec. from dipping))

- が厚いPL40では374~425°Cとなり、H形鋼ウェブとPL40で最大約70°Cの温度差が生じた。
- ・また、実験体Case 2 および実験体Case 4 の温度分布においては、実験体Case 1 とほぼ同等の温度変化となつたため割愛する。

3. 2 熱応力解析結果

熱応力解析結果より、実験体Case 1（めっき抜き孔径35mm、溶接ビードからの隙間15mm）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10に示し、最大相当応力発生時の相当応力分布図を図11に示す。

- ・図10より、浸漬開始270sec後に孔位置1-2の孔端部からH形鋼フランジ側の方向に最大302N/mm²の第一主応力が発生した。
- ・各めっき抜き孔から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いる。これは浸漬実験において実験体Case 2～5に発生した割れの進展傾向と同じであった。
- ・図11より、浸漬開始270sec後、孔位置1-3の孔端部からH形鋼フランジ方向に最大247N/mm²の相当応力が発生している。

これらから、最大第一主応力および最大相当応力が発生する時間は同じであるが各最大応力が発生した孔位置は異なり、第一主応力の方が相当応力より大きな応力が発生しており、実験結果を良く表しているため他の実験体についても第一主応力の結果で検討することとした。本稿では、まず実験体No. 1について、第一主応力および相当応力で評価した結果、相当応力値よりも第一主応力値の方が大きな値となった。よって、主応力で評価することは安全側の評

価となっている。また、相当応力はスカラー量であるため、どのような応力（引張、圧縮）が作用しているのか、また応力のベクトル方向が不明であるため、孔回りの詳細な応力集中状態は評価できない。

以上から、本稿では主に第一主応力を用いて評価した。ただし、溶融亜鉛めっきによる割れが発生する強度評価について著者は、脆性破壊（主応力で評価）および延性破壊（相当応力で評価）が複合的に関係しており、どちらかのみで評価することは危険であると考えている。なお、今回のようなウェブ（薄い鋼板）の応力状態は、ほぼ平面応力状態となっているため、一般的には相当応力と主応力は近似するといわれている。よって値の大小の違いは認められるが、相当応力で評価しても同じような結論になると考える。

次に、熱応力解析結果より、実験体Case 2（めっき抜き孔径35mm、溶接ビードからの隙間5mm）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12に示す。

- ・図12より、浸漬開始270sec後に、孔位置2-3の孔端部からH形鋼フランジ方向側に最大326N/mm²の第一主応力が発生している。
- ・浸漬実験で割れが発生した孔位置2-4において、解析結果では孔端部からH形鋼フランジ方向に315N/mm²の第一主応

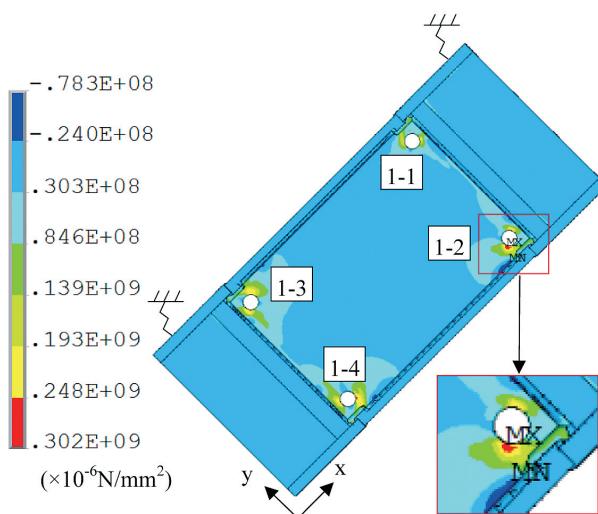


図10 Case 1における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図(浸漬開始270sec後)
(Fig.10 First principal stress distribution diagram when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 1 (after 270 sec. from dipping))

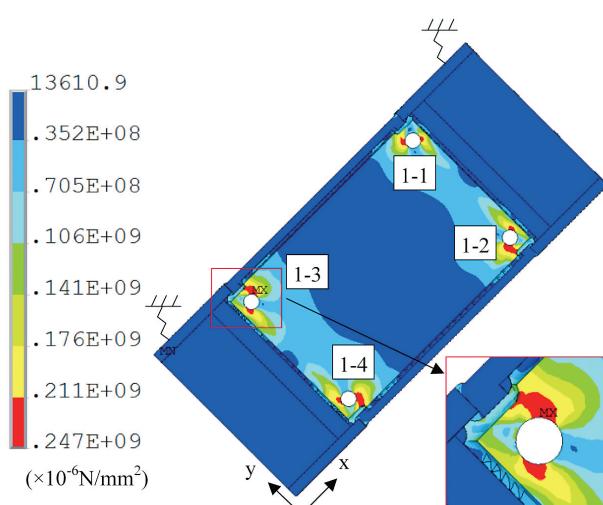


図11 Case 1における最大相当応力発生時の相当応力分布図(浸漬開始270sec後)
(Fig.11 Effective stress distribution diagram when maximum value of effective stresses arises in Test Case 1 (after 270 sec. from dipping))

力が発生しており、解析結果の応力集中部と実験結果の割れの進展方向は一致している。

- ・浸漬実験では、孔位置2-3に割れは確認できなかったが、解析結果から割れが発生しやすい状態であったということが分かる。

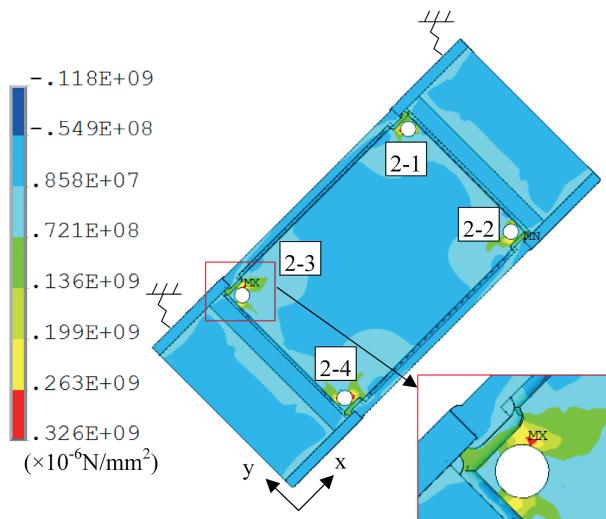


図12 Case 2における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図(浸漬開始270sec後)
(Fig.12 First principal stress distribution diagram when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 2 (after 270 sec. from dipping))

次に、熱応力解析結果より、実験体Case 4（めっき抜き孔径25mm、溶接ビードからの隙間15mm）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13に示す。

- ・図13より、浸漬開始270sec後に、孔位置4-3の孔端部からPL40側の方向に最大365N/mm²の第一主応力が発生している。

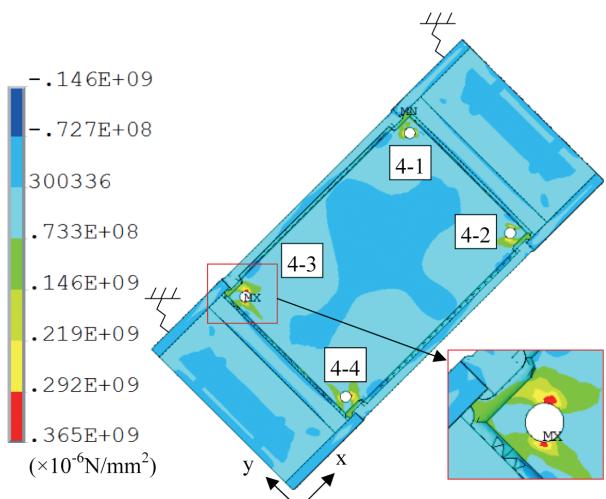


図13 Case 4における最大第一主応力発生時の第一主応力分布図(浸漬開始270sec後)
(Fig.13 First principal stress distribution diagram when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 4 (after 270 sec. from dipping))

- ・解析結果の孔位置4-3近傍に発生した2つの応力集中部は、実験結果の割れの進展方向と一致している。

実験体Case 4の結果から、最大第一主応力発生時における孔4-3周辺の主応力ベクトルの全体図を図14に示す。また、図14の四角枠の拡大図を図15に示す。図中のベクトルの長さは、発生した応力の大きさを表している。

- ・図14、15より、孔端部周辺で割れが発生する方向の垂直方向に引張第一主応力が発生しており、H形鋼のフランジ方向に向かって徐々に小さくなることが分かる。
- ・割れが発生した方向に直交して第一主応力ベクトル（引張）が発生している原因としては、溶融亜鉛浸漬部分の板厚の薄いH形鋼ウェブが熱によって膨張し、浸漬方向と直角方向に伸びようとして引張応力が発生したためと考えている。

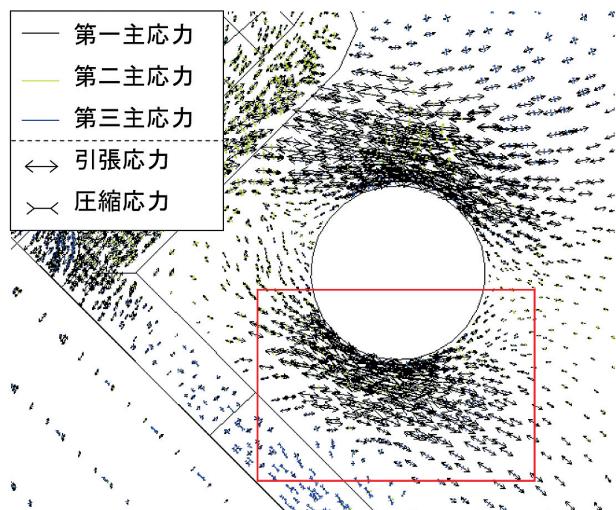


図14 Case 4における最大第一主応力発生時における孔4-3周辺の主応力ベクトル全体図(浸漬開始270sec後)
(Fig.14 Principal stress vector diagram in the area of the drain hole 4-3 when maximum value of first principal stresses arises in Test Case 4 (after 270 sec. from dipping))

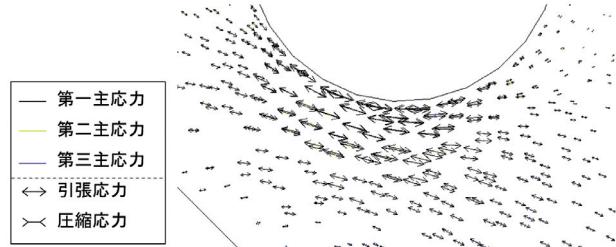


図15 Case 4における最大第一主応力発生時における孔4-3周辺の主応力ベクトル拡大図(浸漬開始270sec後)
(Fig.15 Enlarged view of Fig.14)

図10, 12, 13に示した各実験体の最大第一主応力発生位置の第一主応力履歴曲線を図16に示す。

- ・図16より、実験体Case 1の第一主応力の履歴曲線は、実験体Case 2, 4に発生した第一主応力の履歴曲線より小さい傾向にある。
- ・最大値で比較すると、実験体Case 1の最大第一主応力値は、実験体Case 2より約8%, 実験体Case 4より約20%低減できている。
- ・全ての実験体で、応力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130N/mm²が発生していることが分かる。その後、発生する圧縮応力が大きいほど最終的に大きな引張応力となる傾向が認められる。
- ・図3に示すように、本解析条件では、モデルを傾けて浸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。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は温度上昇が遅い傾向にある。また、実験体を溶融亜鉛へ完全に浸漬させるためには約100secの時間が必要であるため、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り応力の変化が発生し、浸漬開始から270sec程度で割れが発生すると推測できる。

以上の解析結果から、実験体Case 1のめっき抜き孔の径および位置が最も割れの発生を低減できると考えられる。また、実験体Case 1, 4の解析結果から、めっき抜き孔と溶接ビードとの隙間を15mm設けたとしても、孔径25mmの場合は割れの可能性があり、孔径35mm程度までの大きさのめっき抜き孔が必要であることが分かった。これらについては、鵜戸口³⁾によって、孔径および溶接ビードとの距離が大きいほど、最大応力が小さくなることが力学的に示されている。

4. 結論

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および位置を検討した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 柱梁仕口部を抜き出した実験体の熱伝導解析に用いる最適な熱伝達係数を求めた結果、800W/(m²·°C)となった。求めた最適熱伝達係数を用いた熱伝導解析結果と浸漬実験で得られた温度測定結果はほぼ同一であり、概ね温度分布を再現できている。
- 2) 溶融亜鉛浸漬の工程について材料特性値の温度依存性を考慮した熱応力解析を行った結果、浸漬実験で割れが発生した位置の傾向と同様に、各めっき抜き孔の端

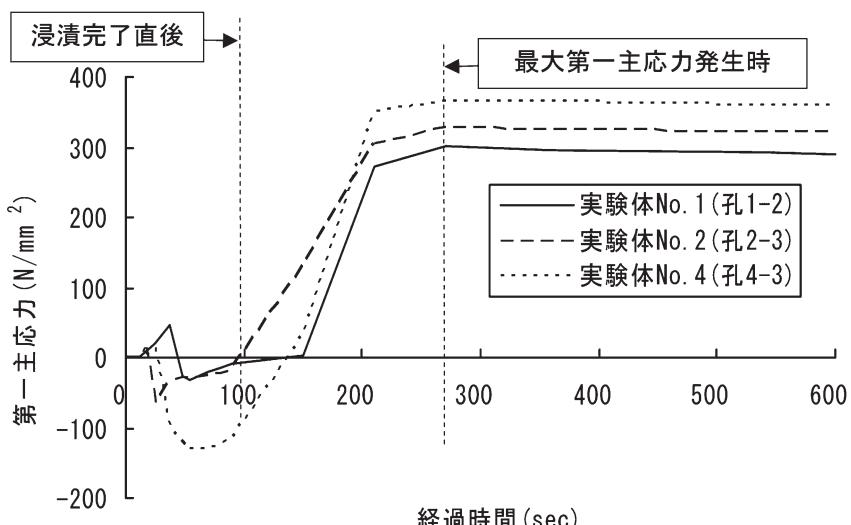


図16 各実験体の最大主応力発生位置における第一主応力履歴曲線

(Fig. 16 Chronographic curves of principal stresses at locations where maximum principal stresses arise in each analytical model)

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集中することが明らかになった。

- 3) 実験体Case 1, 2, 4の熱応力解析結果から、実験体Case 1の最大引張応力が最も小さいことから、実験体Case 1のめっき抜き孔径35mm, かつ溶接ビードからの隙間15mmに設定することで割れの発生を低減できると考えられる。
- 4) 実験体Case 1, 4の熱応力解析結果から、めっき抜き孔と溶接ビードとの隙間を15mm設けたとしても、孔径25mmでは割れが発生する可能性があり、孔径35mm程度までの大きさに広げためっき抜き孔が必要である。

次稿では、本稿で用いた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予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本金属学会：金属データブック，改訂4版，p.131, 2004.
- 2) 一般財団法人国土開発技術研究センター：建築物の総合防火設計法，第4巻，p.118, 1989.
- 3) 鵜戸口英善：双極座標による二三の平面弾性問題の解(その1)：1圓孔を有する半無限平板，日本機械学会論文集，第13巻，第44号，pp.17-40, 1947-1948.

