

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

2016 年 3 月

岩手大学大学院工学研究科

機械・社会環境システム工学専攻

西尾 吉史

目 次

第1章	序論	...	1
1.1	背景	...	2
1.2	既往の研究	...	5
1.3	研究の目的	...	9
1.4	研究の概要	...	10
	参考文献	...	13
第2章	溶融亜鉛めっき中における T 継手溶接鋼平板の 3 次元熱伝導－熱応力連成解析	...	16
2.1	概説	...	17
2.2	解析方法	...	18
2.2.1	3 次元 FEM 解析モデルと解析条件	...	18
2.2.2	3 次元熱伝導－熱応力連成解析手法	...	21
2.2.3	最適化手法による最適熱伝達係数の設定	...	22
2.3	3 次元熱伝導－熱応力連成解析結果と考察	...	24
2.3.1	3 次元熱伝導解析結果	...	24
2.3.2	3 次元弾塑性熱応力解析結果	...	27
2.4	結論	...	32
2.4.1	3 次元熱伝導解析について	...	32
2.4.2	3 次元熱応力解析について	...	32
	参考文献	...	34
第3章	めっき抜き孔の形状変化による H 形鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する検討	...	35
3.1	概説	...	36
3.2	溶融亜鉛浸漬実験	...	37
3.2.1	浸漬実験概要	...	37
3.2.2	残留ひずみ測定方法	...	39
3.2.3	実験結果と考察	...	41
3.3	3 次元熱伝導－熱応力連成解析	...	42

3.3.1	解析概要	…	43
3.3.2	解析結果と実験結果の比較検討	…	45
3.4	めっき抜き孔の形状変化によるめっき割れ対策の解析的検討	…	49
3.4.1	解析概要	…	49
3.4.2	解析結果と考察	…	52
3.5	結論	…	60
3.5.1	溶融亜鉛浸漬実験および3次元熱伝導－弾塑性熱応力連成解析について	…	60
3.5.2	めっき割れが生じにくい構造ディテール検討について	…	60
	参考文献	…	62
第4章	めっき抜き孔の孔径および位置の違いによる H 形鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する検討	…	63
4.1	概説	…	64
4.2	溶融亜鉛浸漬実験	…	66
4.2.1	浸漬実験概要	…	66
4.2.2	分析方法	…	68
4.2.3	実験結果と考察	…	68
4.3	連成解析による溶融亜鉛浸漬実験の再現	…	74
4.3.1	解析概要	…	74
4.3.2	解析結果と考察	…	78
4.4	めっき割れ対策の解析的検討	…	86
4.4.1	解析概要	…	86
4.4.2	解析結果と考察	…	87
4.5	結論	…	91
4.5.1	溶融亜鉛浸漬実験について	…	91
4.5.2	連成解析による溶融亜鉛浸漬実験の再現について	…	91
4.5.3	めっき割れ対策の解析的検討について	…	92
	参考文献	…	93
第5章	合成床版パネルの溶融亜鉛めっき時における熱変形対策に関する検討	…	94
5.1	概説	…	95
5.2	溶融亜鉛浸漬実験	…	97

5.2.1	浸漬実験概要	… 97
5.2.2	実験結果と考察	… 99
5.3	最適化手法を用いた 3 次元熱伝導解析	… 102
5.3.1	解析概要	… 102
5.3.2	最適化手法	… 104
5.3.3	解析結果と考察	… 105
5.4	連成解析による合成床版パネルの溶融亜鉛めっき工程の再現	… 107
5.4.1	解析概要	… 107
5.4.2	解析結果と考察	… 109
5.5	合成床版パネルの変形対策の解析的検討	… 116
5.5.1	解析概要	… 116
5.5.2	解析結果と考察	… 116
5.6	結論	… 119
5.6.1	溶融亜鉛浸漬実験について	… 119
5.6.2	最適熱伝達係数の推定について	… 119
5.6.3	3 次元熱伝導—熱応力連成解析によるめっき工程の再現について	… 119
5.6.4	合成床版パネルの変形対策の検討について	… 119
	参考文献	… 121
第6章	総括	… 122
	謝辞	… 129

第 1 章

序 論

1.1 背景

鉄は安価で機械的性質や物理的性質に優れており様々な分野に採用されている。しかし、錆びるという唯一の問題点を抱えている。この問題を解決し、鋼構造物を錆から守る長期防錆効果とメンテナンスフリーが期待できる表面処理が溶融亜鉛めっきである。この溶融亜鉛めっきは、大気中、水中、土中およびコンクリート中で非常に優れた耐食性を示す¹⁾。また、溶融亜鉛めっき処理された表面の皮膜は衝撃や摩擦などで剥離することも少なく、めっき後の塗装が可能である等の多くの利点があることから現在、電力・通信分野をはじめ土木・建築等の幅広い分野に採用されており、その鋼構造物の形状は小物から大型橋梁など多岐にわたり、溶接構造物も多数存在している。鉄を錆から守るという目的もあいまって省資源・省エネルギー・自然環境保護等の観点から、有効な防錆処理として市場が拡大している。そして現在は建築・土木関係の本体の鋼構造物だけでなく、高力ボルト等の全てに溶融亜鉛めっきを施した鋼構造物が見受けられるようになってきている²⁾。

溶融亜鉛めっきの一般的な作業工程を図 1-1-1 に示す。前処理工程は3つに分けられ、脱脂工程では鋼部材表面に付着している油脂、塗料を除去する。次に酸洗工程では鋼部材に付着している錆、スケールを除去する。さらに鉄と亜鉛のスムーズな反応を促進させるためのフラックス工程がある。前処理工程が完了すると、高温で溶かした亜鉛槽へ鋼部材を浸漬させ、規定の亜鉛付着量を確保した後に引き上げ、冷却水で鋼部材を冷やす。最後に余剰な亜鉛の除去や検査を行い、溶融亜鉛めっき製品として出荷される。

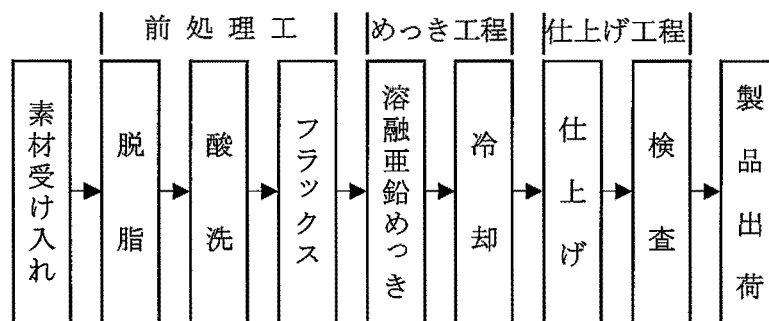


図 1-1-1 溶融亜鉛めっきの一般的な作業工程

このように溶融亜鉛めっきとは鋼部材を約 440(℃)前後の溶融亜鉛へ浸漬させ、鉄－亜鉛の合金層を形成することで鉄を錆から守る表面処理のことである。この時、鋼部材が約 440(℃)の溶融亜鉛中に浸漬するため、急激な温度変化が与えられ、先に溶融亜鉛に浸漬している部分と後から浸漬する部分との間に温度差が生じ、鋼部材内に非定常熱応力が発生する。道路橋合成床版に用いる鋼板パネルのような薄板に一方向のみに補剛材を有する大型構造物は、鋼部材内に発生する温度分布の落差が大きくなる傾向にあるため、それに伴

い発生する熱変形や熱応力も大きくなり、めっき後に残留変形や残留ひずみが残ることもある。ただし、実際の残留変形は部材の冷却過程との間連付けが必要であることや、他部位による拘束状態、溶接部等の応力集中、溶接残留応力等の複雑な影響因子が絡むために、その防止対策は難しいのが現状である。

また、鋼部材に溶接継手部が多く存在する場合、温度差による非定常熱応力や形状の不連続性等による応力集中が発生し、溶接の残留応力の影響とも合わせてスカラップ、めっき抜き孔および溶接部等に割れが発生する場合がある。その一例を示したものが図 1-1-2, 1-1-3, 1-1-4 である。図 1-1-2 に示した柱材について、梁仕口部にあるスカラップ(図 1-1-3)や溶接部(図 1-1-4)にめっき割れが発生している。図 1-1-3 については、スカラップの R 部分の端部よりめっき割れが発生していることが分かる。孔加工時やスカラップ加工時の欠陥あるいは靱性が弱い H 形鋼のフェレットはめっき割れが発生しやすいと言われている。また、図 1-1-4 については、H 形鋼と柱本体の溶接ビードにめっき割れが発生していることが分かる。これは、溶接部等の応力集中や溶接残留応力の影響が大きいものと考えられる^{3),4)}。



図 1-1-2 めっき割れが発生した柱材の全体図



図 1-1-3 柱材のスカラップめっき割れ拡大図



図 1-1-4 柱材の溶接部めっき割れ拡大図

溶融亜鉛めっき割れを材料学的観点から液体金属脆化の一つと解釈することもある。これは、溶融亜鉛浴中で主に溶接熱影響部に引張応力(熱応力や残留応力)が作用すると、固体金属が脆化してめっき割れを引き起こすことがある。めっき割れは鋼材の化学成分の影響を大きく受けるが、一般に高強度になるほどめっき割れが発生しやすいと言われている⁵⁾⁶⁾。この液体金属脆化対策として、溶融亜鉛めっき浸漬前において、割れが発生すると推察される箇所にめっき処理(耐薬品性能を有する塗料)を塗布し、塗膜によって物理的に鋼材と

熔融亜鉛との接触を避けることで、液体金属脆化の発生を避けることが可能である。ただし、不めっき処理部は亜鉛が付着していないため、そもそも熔融亜鉛めっき製品として問題がある。一般的に熔融亜鉛めっき後の不めっき部への補修方法として、不めっきの面積が小さい場合は高濃度亜鉛粉末塗料等による補修が可能であるが、不めっきの面積が大きい場合は莫大な費用が掛かる金属溶射による補修作業が必要となる。

1.2 既往の研究

阿部等⁷⁾は、非分割箱桁橋のパイロット実験桁を用いて、設計・製作およびめっき施工を総合しためっき割れ防止法の検討を行っている。このパイロット実験桁を熔融亜鉛めっき処理し、浸漬速度は実験桁の構造の影響もあったため平均浸漬速度 0.017(m/s)と遅くなり、予想以上に浸漬に時間がかかったと述べている。また、廻し溶接部全 250 箇所のうち、19 箇所にめっき割れの発生が確認されている。その中でフランジとダイアフラムの廻し溶接部のめっき割れの結果を確認したところ、両者の板厚比が小さくなるほどめっき割れの発生率が減少する傾向があり、板厚比の低減がめっき割れ防止に有効であると述べている。さらに、腹板の面外変形も測定しているが、桁端を除けば熔融亜鉛めっき前後でははらみにほとんど差は認められないと述べている。廻し溶接部のめっき割れが多かった理由として熔融亜鉛への浸漬速度が遅いことを一因として考えている。そこで、腹板に発生する熱応力を一次元熱応力解析で求めるため、片側の腹板部を単純 I 桁と仮定して熱伝導解析を行っている。熔融亜鉛めっき時には I 桁の各部位が亜鉛浴面に到達するまでは温度上昇せず、液面に到達後に板の両面からのみ加熱されると仮定し、一次元熱伝導基礎方程式を解いている。得られた熱伝導方程式解を板厚方向に積分することで、板厚方向の平均温度および I 桁の高さ方向にのみ温度分布を持つ一次元温度分布を求めている。また、この時の I 桁長手方向の熱応力を梁の一次元熱応力式を用いて求めている。今回のパイロット実験では、腹板に発生する熱応力がフランジ厚の大小に関わらず大きくなり、圧縮熱応力の最大値が材料強度を超えることを確認している。これらの結果から、めっき割れの発生過程として、この圧縮熱応力により浸漬中でパネル座屈が生じ、水平補剛材先端では圧縮降伏し、熱応力の消滅に伴う変形の戻り過程で引張ひずみが発生したと結論付けている。めっき割れ防止の重要な対策として適正な浸漬速度の確保が必要と述べている。さらに、めっき割れを防止するための板厚比の目安として約 2.5 以下を提案している。

阿部等は別の文献⁸⁾で橋梁部材の熔融亜鉛めっき時に発生するめっき割れを、高ひずみによる割れと亜鉛脆化による割れに分類し、それぞれのめっき割れ防止法について検討している。高ひずみによる割れ防止では、橋梁部材のめっき中の面外変形とそれに伴って発生する水平補剛材端部の局部ひずみの熱弾塑性解析を行い、水平補剛材端部のめっき割れの発生メカニズムと設計・施工上からの割れ防止指標を検討している。橋梁 I 桁のめっき中に

生じる大きな面外変形は、浸漬初期にパネルの横方向の熱膨張が、板厚が大きいこと温度上昇の遅いフランジにより拘束されるためパネルが座屈して発生するが、フランジの熱膨張に伴い座屈変形は回復すると述べている。また、水平補剛材端部ではパネルの座屈変形時に圧縮降伏し、変形の戻りと共に除荷から引張降伏を起こし、この時の引張ひずみ(最終引張ひずみと定義)により水平補剛材端部に高ひずみによるめっき割れが発生すると考えている。この最終引張ひずみは、フランジ厚が大きくなるほど大きく、鋼材の降伏強度が高くなるほど小さくなると述べている。

菊池⁹⁾は、カプセル型高温ひずみゲージを用いて長方形鋼板の溶融亜鉛への浸漬時における熱ひずみを測定し、測定結果と熱ひずみ計算結果の比較検討をしている。その中で、長方形板の温度分布は板の両面から加熱される条件で非定常熱伝導基礎方程式から求めており、長方形板の非定常熱ひずみは準静的二次元問題として計算している。解析により求められた熱ひずみの計算結果と実測結果は定性的によく一致しているが、測定結果のピーク値は計算値に対して小さくなると述べている。また、浸漬速度が速いほど熱ひずみの絶対値は小さくなり、短時間で減少することを明らかにしている。

さらに菊池等^{10),11)}は、溶融亜鉛へ浸漬される鋼管材の1断面について熱変形と熱応力の変化を明らかにするために、鋼管材を溶融亜鉛に浸漬する時の断面形状の時間的変化を測定すると共に高温ひずみゲージを用いて鋼管外面の熱ひずみの変化を測定している。また、鋼管材を溶融亜鉛へ浸漬する時の温度変化について熱伝導方程式を用いて解析的に求め、鋼管材の熱変形および熱応力の変化は、時系列的に有限要素法を用いて解析した結果と比較的によく一致することを確認している。さらに、鋼管材を傾けて溶融亜鉛に浸漬する場合、浸漬速度により全体の変形および熱応力状態が異なり、浸漬速度が速いほど熱変形と熱応力が減少することを明らかにしている。

山岸等¹²⁾は、溶融亜鉛による液体金属脆化割れに、溶接残留応力がどのような影響を与えるか実験的に調査を行っている。その結果、溶接残留応力が550~600(N/mm²)の値を超えると、熱応力が存在しなくても割れが発生すると述べている。しかし、実際の製品では残留応力が溶接ビード止端部では降伏点に達することもあり得るが、溶接残留応力のみによる割れの発生は例がないとしている。この理由として、割れの発生・進展にはエネルギーを必要とするが、実際の鉄塔部材においては、割れを発生させるのに必要なエネルギーが実験に用いた実験体の持つ溶接残留ひずみエネルギーに比べて低いと述べている。また、同じ文献内で送電用鉄塔の鋼管部材のように極厚の鍛造フランジが溶接され、さらに種々のガセットプレートが複雑に溶接されているものを溶融亜鉛めっきする場合に、どここの部位に、いつ、どの程度の熱応力が発生するかを、実際の送電用鉄塔の鋼管部材を用いて熱ひずみ測定実験と有限要素法による解析により、各部に発生する熱応力を求めて評価している。この実験結果から、浸漬速度を速くすることによって一般に熱応力が著しく低下すること、反対に浸漬速度を遅くすることは熱応力が極めて高くなり、割れを誘発する

可能性があることを明らかにしている。めっき割れへの対策としては、めっき作業において浸漬操作時には適切な浸漬速度を守ることと、浸漬途中で停止させないことが必要としている。また、浸漬速度を速くしても鋼管とガセットプレートの板厚比による熱応力が発生するが、それを抑えるためには板厚比を小さくすることが望ましいとも述べている。

日笠等¹³⁾は鋼桁(H形鋼)の実験体で溶融亜鉛浸漬実験を行い、板厚中心温度を測定し、これ基に一次元熱伝導方程式による近似計算で熱伝達係数を求めている。また、二次元非定常熱伝導解析により熱応力計算をするため、板厚方向の平均温度に対する修正熱伝達係数を算出している。別の文献^{14)~16)}は、溶融亜鉛めっき処理時の桁の熱応力度を平面弾塑性問題として計算している。これらによると、桁端部以外の熱応力は一軸応力状態(桁軸方向)であり、平面的な熱伝導は桁のフランジやウェブの端面付近や板厚差のある付近の小領域で発生するが、フランジやウェブの軸方向平均熱応力に与える影響は小さいことを明らかにしている。また、溶融亜鉛めっき処理後に発生する鋼桁の「ねじり」や「はらみ」などのめっき変形は、主としてフランジやウェブの軸方向圧縮熱応力によることから、溶融亜鉛めっき処理時の鋼桁の熱変形挙動解析において、一次元的に求めた鋼桁の温度を用いて計算しても精度上の問題は少ないと述べている。

さらに日笠等¹⁷⁾は、溶融亜鉛めっき処理時の鋼桁の熱弾塑性解析を有限要素法により計算し、主にI-プレート・ガーダーの変形について考察している。この時は鋼桁の節点温度に一次元非定常熱伝導の級数解を用い、弾性係数、線膨張係数、降伏関数の温度依存性および幾何学的非線形性を考慮した塑性流れ理論を適用して解析を行っている。その結果、溶融亜鉛中では軸方向の圧縮熱応力がウェブに発生し、ウェブは局部座屈により「はらみ」変形を生じ、冷却水中ではウェブの軸方向熱応力が引張になり、それに対応した圧縮熱応力がフランジに作用するため、桁に「ねじれ」座屈が生じると述べている。さらに、桁を傾斜して溶融亜鉛に浸漬させると「ねじれ」変形が現れやすいが、桁全体が溶融亜鉛中に保持されることにより減少し、「はらみ」変形に変わることを明らかにしている。

家澤等¹⁸⁾、Toi, Y.^{19),20)}は、溶融亜鉛めっき時における橋梁部材の水平補剛材端部やボルト穴近傍に発生するめっき割れ挙動について、Bodner 型の粘塑性構成式²¹⁾による面内回転剛性を付与した双二次のアイソパラメトリックシェル要素²²⁾を用いた熱弾塑性解析を用いて、力学的に検討されている。ただし、熱伝導解析については1次元の熱伝導方程式解から得られた温度分布を採用しているのみで、3次元解析による検討はなされていない。

一般的に柱梁仕口部のめっき割れ対策として、JASS6(2007)²³⁾で示されているめっき抜き孔を有するノンスラップ工法が採用されることがある。JASS6(2007)ではH形鋼フィレット端あるいは隅肉溶接止端から5(mm)以上離れた位置に孔径35(mm)以上の孔を設けるように示されている。これに対して護等²⁴⁾は、実大の溶接組立H形鋼を用いて、溶融亜鉛めっきによる割れ再現実験を行い、スラップやめっき抜き孔の位置について、割れを防ぐディテールの検討を行っている。その結果、溶融亜鉛めっき抜きを丸孔とすることで溶接残

留応力が低減でき、めっき割れを防止できる。また孔位置を柱梁の交点からウェブの中心部へ移動させることで、溶接の際に発生する孔周辺の引張残留応力を低減することができる。少なくともフィレット端あるいは隅肉溶接止端から 10(mm)以上離すと効果がある。割れ破面観察結果より、破面内に亜鉛が浸透し合金化していることから、めっき浴中で割れが発生していると考えられる。また、スチフナーのスカラップまわりの溶接止端部を仕上げることにより、割れ発生を低減することが可能であると述べている。しかし、実際に推奨値を適用した場合であってもめっき割れが発生した事例がある。

小山等²⁵⁾は、柱梁仕ロスカラップを有する実大部分モデルについて浸漬実験を行い、熱電対を用いて供試体の表面温度を測定している。また、熱伝導解析および熱応力解析を行い、スカラップ回し溶接止端部に発生する応力値を推定している。その結果、板厚比が大きくなるにつれて、亜鉛めっき浴槽浸漬時に部材間に発生する温度差およびスカラップ回し溶接部に発生する応力は大きくなり、割れの発生率は高くなる。また、溶融亜鉛めっきによる割れの要因としては、材料的要因よりも構造的・形状的要因が大きく、仕口部構造をスカラップ工法からめっき抜き孔を設けスカラップを省略したノンスカラップ工法にすることで、割れの発生率が大きく減少すると述べている。その中の検討では、スカラップ工法について 1 種類のみ検討されている。JASS6(1996)²⁶⁾には他にも形状が異なるスカラップが示されているが、その場合のめっき割れ発生率については不明である。後述するように本研究では、第 4 章において溶融亜鉛浸漬時に H 形鋼構造物のめっき抜き孔(円孔)の近傍にどのような熱応力が生じるかを明らかにしている。円孔を有する無限板、半無限板、帯板等の円孔周りの応力集中問題は、弾性学の基本問題として古くから研究が行われている^{27)~29)}。

特に、鵜戸口³⁰⁾によって、直線ベリの近くに円孔を有する半無限板の引張として、孔と孔中心からの距離が応力とどのように関係しているのか述べられている。この中で 1 円孔を有する半無限平板が、直線ベりに平行な一様な引張応力を受けるときに対して、直線ベリの最大応力ならびに直線ベりに一番近い円孔ベりに生じる最大応力を d/a (d : 円中心からの距離, a : 円の半径) の関数で示されている。これによると d/a が大きいほど最大応力が小さくなっている。よって、例えば孔径が同じであっても、溶接ビードからの距離が大きいほど、円孔ベリの最大応力は小さくなると考えられる。

大型主桁の溶融亜鉛めっきにおいて、熱影響により主桁のねじれ変形の問題があり、現地での架設方法や架設工程、コスト、品質確保に大きな影響を与えることが考えられる。坂本等³¹⁾は、大型主桁に溶融亜鉛めっきを行うと、主桁製作時の残留応力が溶融亜鉛浴中で開放されることや、溶融亜鉛による急激な温度変化で発生したはらみ変形が冷却過程で上下フランジに発生する圧縮熱応力がはらみの影響で偏心してねじれ変形が発生すると述べている。これらに対して二本の主桁の両端を拘束板で連結し、擬似箱桁構造とすることで、ねじれ変形を実務上全く影響のない範囲まで低減できている。その結果、従来に比べ

て非常にねじれ変形の少ないめっき桁を製作することができ、保管・輸送面で大きなメリットを生むことができる。特に、現地架設において、地組立を必要とするブロック架設に代えて、単材架設の採用も十分可能となり、塗装桁と同様に架設地点の自然条件や交通規制条件、工程およびコストを考慮したフレキシブルな対応が可能であると述べている。

また、土屋等³²⁾は、実際に発生しためっき割れやねじれ変形事例に対して、3次元熱伝導－熱応力弾性解析によって様々な溶融亜鉛めっき槽への浸漬方法をシミュレーションし、最適な浸漬方法について検討している。その結果、鋼平板と山形鋼の廻し溶接部の割れについては、板厚が大きいと温度上昇が遅い低温の山形鋼と、板厚が小さいと温度上昇が早い高温の鋼平板との間に挟まる溶接部で温度差が発生し、大きな熱応力が発生する。この熱応力に溶接の残留応力や鋼材の残留応力等の影響も併せて割れが発生したものと推測される。異なる浸漬方法との比較では、浸漬させる方向によって割れを回避できる可能性が示されている。また、溶接H形鋼のスカラップ部の割れについては、溶融亜鉛浸漬時に発生する熱応力がウェブとフランジの付け根付近に応力集中するような形で亀裂が発生する。スカラップ形状が小さくなると熱応力がより集中しやすくなる。スカラップ形状が大きくなると発生する熱応力がスカラップの曲線部に沿って拡散しやすくなる傾向がある。めっき割れの原因の一つと考えられる応力集中については、形状の不連続性はスカラップの形状だけでなく、溶接止端部も該当すると考えられる。割れの無いスカラップ部との比較では、熱応力が拡散していることから、スカラップ部の大きさによって熱応力が分散し、割れを防ぐことが可能である。加えて、鋼I桁のねじれ変形については、橋軸方向に傾けて浸漬させた場合は、及び橋軸方向と橋軸直角方向に同時に傾けて浸漬させた場合にねじれ変形が生じる。橋軸方向と橋軸直角方向に傾けて浸漬させる場合には、橋軸直角方向の角度がより大きくなるとねじれ変形も大きくなる。鋼I桁のねじれ変形を防ぐためには、亜鉛浴面に限りなく水平になるように浸漬させることが重要と述べている。ただし、これらの検討では、部材構造によるめっき割れ対策について検討されていない。

Pankert, R等³³⁾によって、溶融亜鉛合金の組成が鋼材の熱勾配に大きく影響することが示されている。いくつかの合金元素とフラックス組成は単に化学的影響を及ぼすだけではなく、高い熱伝達係数によって機械的性質にも大きく影響する。すなわち、高い熱伝達係数は大きな応力とひずみの発生に繋がると述べている。

1.3 研究の目的

これまで記述したように溶融亜鉛めっきを行うことで発生するめっき割れや熱変形の原因は、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ている。また、その発生を事前に予測することはきわめて困難と言われてきた。これらに対して、3次元FEM解析を用い

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、熱応力解析を行うことで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思われる。

既往の研究では、溶融亜鉛めっき時の鋼構造物の挙動について多くの研究^{5)-20),24),25),31)-35)}が行われているが、溶融亜鉛めっき後の冷却工程について検討されている研究は非常に少ない。また、浸漬実験やFEM解析によるめっき割れおよび熱変形防止対策について検討されている研究^{7)-12),17)-20),24),25),31),32)}もやや少ない状態である。そこで本論文では、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。

1.4 研究の概要

本論文は6つの章により構成されており、各章の概要は次の通りである。

第1章「序論」においては、本論文における研究の目的、既往の研究、研究の概要について述べている。

第2章「溶融亜鉛めっき中におけるT継手溶接鋼平板の3次元熱伝導-熱応力連成解析」においては、今野等^{34),35)}が行ったT型鋼平板の溶融亜鉛浸漬実験について、実験温度分布と熱応力分布を再現するために、3次元熱伝導-熱応力連成解析を実施している。今野等は浸漬実験で板厚比 $l/h=1.0$ と $l/h=5.0$ の2種類のT継手溶接鋼平板モデルで実験を行っているが、本検討では、めっき割れは板厚比 l/h が大きいほど発生しやすい²⁾ということから、板厚比 $l/h=5.0$ のモデルのみで検討している。ただし、溶融亜鉛めっき浸漬速度は今野等の浸漬実験と同様に2種類設定し比較検討している。また、溶融亜鉛浸漬実験で得られた温度履歴曲線に解析温度が一致するように、境界条件式内の熱伝達係数の最適値を最小二乗法によって求めた。熱伝達係数を決定するに際して、2枚の鋼平板の溶融亜鉛への浸漬方向などを考慮し、2枚の鋼平板それぞれの熱伝達係数を最小二乗法によって最適化した。また、材料特性値については、温度に依存して変動する事が考えられるため^{36),37)}、文献^{38),39)}を参考に高温時の温度依存性を考慮した。さらに熱応力解析では、材料のヤング率、熱膨張係数、降伏点についても温度依存性を考慮し、3次元弾塑性熱応力解析を実施している。以上の手法による3次元熱伝導-熱応力連成解析から、T型溶接鋼平板の回し溶接部近傍に集中して発生する熱応力を明らかにしている。

第3章「めっき抜き孔の形状変化によるH形鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する検討」においては、柱梁仕口部に発生するめっき割れの原因に対して、部材形状に着目した検討を行っている。まず、一般的に柱梁仕口部の割れ対策として、JASS6(2007)を基準

としためっき抜き孔を有するノンスカラップ工法が適用されることがある。そこで、めっき抜き孔を有する H 形鋼構造物を実験体として、高温ひずみゲージを用いて、溶融亜鉛浸漬時および冷却時に実験体内に発生するひずみ量の測定を行う。また、実験体内に発生する熱ひずみ分布を再現するために、3 次元熱伝導－熱応力連成解析を実施し、実験結果と解析結果の比較検討を行うことにより、溶融亜鉛浸漬時に H 形鋼構造物内にどのような熱応力が生じるかを明らかにする。

次に、実際の溶融亜鉛めっきの施工事例から、割れが生じにくいスカラップの形状を数値解析により検討することにした。この検討では、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、通常スカラップを設ける位置に形状の異なる 2 種類のスカラップをそれぞれ設けたもの(Case1,2)、めっき抜き孔を設けスカラップを省略したノンスカラップ工法(Case3)およびスカラップの省略のみを行ったもの(Case4)の 4 種類について、3 次元 FEM による熱伝導－熱応力連成解析を行う。それらの計算結果から、溶融亜鉛めっき時に割れが生じにくいスカラップの構造ディテールについて検討している。

第 4 章「めっき抜き孔の孔径および位置の違いによる H 形鋼構造物の溶融亜鉛めっき割れ対策に関する検討」においては、第 3 章と同様に、柱梁仕口部に発生するめっき割れの原因に対して、部材形状に着目した検討を行っている。一般的に柱梁仕口部の割れ対策として、JASS6(2007)を基準としためっき抜き孔を有するノンスカラップ工法が適用されることがある。しかし実際に推奨値を適用した場合であっても割れが発生した事例がある。そこで、柱梁仕口部を抜き出した実大部分モデルの H 形構造物に対して、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溶融亜鉛浸漬実験を行う。さらに 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 形鋼構造物内、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する。その解析過程において、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の測定を実施する。それらの実験結果と熱伝導解析結果の差が最小に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い、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いめっき抜き孔の孔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。また 3 次元弾塑性熱応力解析上において、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させた状態を設定し、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。

第 5 章「合成床版パネルの溶融亜鉛めっき時における熱変形対策に関する検討」においては、道路橋合成床版に用いる鋼板パネルのような薄板に一方向のみに補剛材を有する大

型構造物について、溶融亜鉛めっき時における熱変形対策に関する検討を行っている。合成床版パネルのような薄板の大型構造部に溶融亜鉛めっきを行うと、温度分布の落差が大きくなる傾向にあるため、発生する熱応力も大きくなり、残留変形として残る場合がある。大きな残留変位が発生した場合は、溶融亜鉛めっき後に矯正作業が必要となり、現地での架設工程、コストや品質確保に大きな影響を与えることが考えられる。そこで本章では、合成床版の溶融亜鉛めっきによる熱変形に着目する。熱変形の挙動を解明する方法として3次元FEMによる熱伝導－熱応力連成解析によるシミュレーションが考えられる。その中で、正確な熱伝導解析を行うためには、合成床版に適した最適な熱伝達係数が必要となる。そこで、実製品の合成床版パネルについて、熱電対を用いて、溶融亜鉛浸漬時に合成床版パネル内に発生する温度測定を行う。それらの結果から最適な熱伝達係数を求める。その後、3次元熱伝導－熱応力連成解析を実施し、溶融亜鉛めっき時の変形挙動を解明する。更に、溶融亜鉛めっき条件を様々に変更した場合を想定し、3次元熱伝導－熱応力連成解析上において熱変形を低減させる対策を検討する。

第6章「総括」においては、第2章から第5章までの各章における結論を総括し、本研究の意義を明らかにしている。

参考文献

- 1) 日本鉛亜鉛需要研究会：亜鉛ハンドブック，1984.
- 2) 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，2002.
- 3) ASTM Specification A143-01: Standard Recommended Practices for Safeguarding Against Embrittlement of Hot Dip Galvanized Structural Steel Products and Procedure of Detecting Embrittlement.
- 4) Lay, M.G.: Structural Steel Fundamentals - An Engineering and Metallurgical Primer, The Australian Road Research Board, Victoria, Australia, Chapter9, 1982.
- 5) 菊池昌利，家澤徹：溶融亜鉛中における鋼の液体金属ぜい化割れに関する研究，日本造船学会論文集 第149巻，pp.298-305，1981.
- 6) Radeker, V.W.: Development of Stress Cracks in Steel Through Exposure to Liquid Zinc, Stahlu. Eissen, 73, Nr. 10, pp.654-658, 1953.
- 7) 阿部英彦，紫桃孝一郎，家澤徹，加藤昭夫，栗飯原周二：非分割箱桁橋の亜鉛めっき割れ防止に関する基礎的研究，構造工学論文集 vol.42A，pp.955-963，1996.
- 8) 阿部英彦，家澤徹，金沢正午，加藤昭夫，栗飯原周二：橋梁の亜鉛めっき割れ防止に関する熱弾塑性解析と鋼材の基礎的研究，構造工学論文集 vol.43A，pp.1161-1170，1997.
- 9) 菊池昌利：溶融亜鉛中における鋼平板のひずみ測定と熱ひずみ計算，非破壊検査 第29巻，pp.544-549，1982.
- 10) 菊池昌利，家澤徹：溶融亜鉛めっき時における鋼管の変形挙動，材料 第30巻，pp.562-568，1981.
- 11) 菊池昌利，家澤徹：鋼管鉄塔部材溶融亜鉛めっき時の熱応力測定，非破壊検査 第32巻，pp.631-635，1983.
- 12) 山岸啓利，菊池昌利：鉄塔部材の溶融亜鉛浴中における機械的特性と挙動について，鉄塔 No.54，1982.
- 13) 日笠隆司，小林亮介，三浦智一：溶融亜鉛めっき桁のめっき時の熱伝達係数，土木学会関西支部年次講演会概要集，I-20-1~2，1990.
- 14) 日笠隆司，中川和紀，田中一智：溶融亜鉛めっき桁の熱応力解析，土木学会関西支部年次講習会概要集，I-19-1~2，1990.
- 15) 日笠隆司，前田幸雄：溶融亜鉛めっき桁の熱応力解析，第45回土木学会年次学術講演会概要集，pp.222-223，1990.
- 16) 日笠隆司，木村佳英，加東貴司：溶融亜鉛めっき時の桁の軸方向応力について，土木学会関西支部年次講演会概要集，I-19-1~2，1991.
- 17) 日笠隆司，上田幸雄，村川英一：溶融亜鉛めっき時の鋼桁の熱弾塑性挙動に関する有

- 限要素法解析, 構造工学論文集 vol.39A, pp.63-70, 1993.
- 18) 家澤徹, 山下達雄, 金沢正午, 都井裕, 小橋啓司: 亜鉛めっき橋梁の溶融亜鉛めっき
ぜい化割れ発生に関する熱弾塑性解析, 鉄と鋼 Vol.80, No.12, pp.950-955, 1994.
 - 19) Toi, Y., Kobashi, K., Iezawa, T.: Finite-element analysis of thermal elastoplastic behaviors of
bridge girders in hot-dip galvanization, COMPUTERS & STRUCTURES, Vol.53, No.6,
pp.1307-1316, 1994.
 - 20) Toi, Y., Lee, J.M.: Thermal elasto-viscoplastic damage behavior of structural members in
hot-dip galvanization, INTERNATIONAL JOURNAL OF DAMAGE MECHANICS Vol.11,
No.2, pp. 171-185, 2002.
 - 21) J. Aboudi: Mechanics of Composite Materials, Elsevier, 1991.
 - 22) D. R. J. Owen and E. Hilton: Finite Element Software for Plates and Shells, p.235, 1984.
 - 23) 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.
 - 24) 護雅典, 中込忠男, 鈴木至, 金昌秀: 柱梁接合部における溶融亜鉛めっき割れ発生原
因とその防止法, 溶接学会論文集, 第 27 巻, 第 1 号, pp.41-47, 2009.
 - 25) 小山明久, 岩崎雅紀, 永田晋, 直原明: 鉄骨柱仕ロスカラップの溶融亜鉛めっき割れ
に関する検討, 溶接学会論文集, 第 22 巻, 第 3 号, pp.435-442, 2004.
 - 26) 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.437, 1996.
 - 27) Timoshenko, T. P., Goodier, J. N.: THEORY OF ELASTICITY, Thrid Edition, McGraw-Hill
Kogakusha Ltd., pp.90-92, 1970.
 - 28) Howland, R. C. J.: Trans. Roy. Soc., London, Ser. A, Vol.229, p.49, 1930.
 - 29) Peterson, R. E.: Stress Concentration Design Factors, John Wiley, Fig.71, 1953.
 - 30) 鷗戸口 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.
 - 31) 坂本知英, 村上慶弘, 玉田学, 半田一夫: ねじれ変形の少ない溶融亜鉛めっき施工方
法の適用について, 第 57 回土木学会年次学術講演会概要集, I-154, pp.307-30, 2002.
 - 32) 土屋和弘, 岩崎正二, 出戸秀明, 今野貴史, 辻英朗: 溶融亜鉛浸漬時に発生しためっき
割れ及び熱変形の事例解析と対策, 構造工学論文集 vol.55A, pp.953-966, 2009.
 - 33) Pankert, R., Dhaussy, D., Beguin, P. and Gilles, M.: Drei Jahre industrielle Erfahrung mit
GALVECO Legierung. GAV Forschungskolloquium Feuerverzinken, Wiesbaden, 2003.
 - 34) 今野貴史, 岩崎正二, 出戸秀明, 宮本裕: 溶融亜鉛浸漬中に発生する鋼平板の熱ひず
みと温度変化, 構造工学論文集 vol.52A, pp.853-864, 2006.
 - 35) 今野貴史, 岩崎正二, 出戸秀明, 宮本裕, 二上輝彦: 最適化手法を用いた溶融亜鉛浸
漬中の鋼平板の温度分布推計, 構造工学論文集 vol.53A, pp.926-935, 2007.
 - 36) Barzelay, M. E., Tong, K. N. and Holloway, G. F.: Effect of pressure on thermal conductance of
contact joints, NACA TN 3295, 1955.

- 37) Dorn, J. E. (ed).: Mechanical Behavior of Materials at Elevated Temperatures, New York, McGraw-Hill, 1961.
- 38) 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.
- 39) 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.

第 2 章

熔融亜鉛めっき中における T 継手溶接鋼平板の 3 次元熱伝導－熱応力連成解析

2.1 概説

鋼構造物に溶接継手部が多く存在する場合、温度差による非定常熱応力や形状の不連続性による応力集中が発生し、溶接の残留応力の影響とも合わせて溶接部の「めっき割れ」が発生する場合がある。しかし、どのような条件下で変形や「めっき割れ」等の現象が発生するかは、種々考えられる要因（製品の寸法、形状、構造、浸漬速度等）が単独あるいは複合的に関連して発生していると考えられ、その発生を事前に予測することはきわめて困難である。そこで、溶融亜鉛めっき時の急激な温度変化によって発生する「めっき割れ」のメカニズムを明らかにするためには、鋼部材の温度分布や熱応力分布を再現する必要がある。

菊池等¹⁾は鋼管鉄塔部材($\phi 660.4 \times 18$, 長さ: 3,500(mm))を用いて、溶融亜鉛浸漬前後の鋼管材の断面変形形状を測定すると共に、溶融亜鉛浸漬中の鋼管外面の熱ひずみの変化を測定している。その結果として、浸漬速度により、鋼管全体の変形および熱応力状態は異なるが、浸漬速度が速いほど熱変形と熱応力は減少することを明らかにしている。

文献²⁾では、組み合わせ部材の板厚比が大きい場合、その板厚差による温度上昇の差から生ずる熱応力が大きく作用し、特に板厚比 $l/h=2.5$ を超える場合において「めっき割れ」や「変形」が生じやすいということが報告されている。

今野等^{3),4)}は、2枚の鋼平板を溶接したT継手溶接鋼平板の実験体モデルを製作し、実際に溶融亜鉛浸漬実験を実施し、実験体モデルの温度履歴や熱ひずみ履歴を測定している。本章では、T型鋼平板の溶融亜鉛浸漬実験中の実験温度分布と熱応力分布を再現するために、板厚比 $l/h=5.0$ のモデルについて、3次元熱伝導-熱応力連成解析を実施する。その際の溶融亜鉛めっき浸漬速度は2種類設定し比較検討する。また、溶融亜鉛浸漬実験で得られた温度履歴曲線に解析温度が一致するように、一次元熱伝導方程式内の熱拡散率と、境界条件式内の熱伝達係数の最適値を最小二乗法によって求めた。熱伝達係数を決定するに際して、2枚の鋼平板の溶融亜鉛への浸漬方向などを考慮し、2枚の鋼平板それぞれの熱伝達係数を最小二乗法によって最適化した。また、材料特性値については、温度に依存して変動する事が考えられるため^{5),6)}、文献^{7),8)}を参考に高温時の温度依存性を考慮した。さらに熱応力解析では、材料の降伏点についても温度依存性を考慮し、3次元弾塑性熱応力解析を実施した。本研究では、以上の手法による3次元熱伝導-熱応力連成解析から、T型溶接鋼平板の溶接部近傍にどのような熱応力の集中が生じるかを明らかにすることを目的としている。

2.2 解析方法

今野等の文献³⁴⁾では、2枚の鋼平板を溶接したT継手溶接鋼平板の実験体モデルを製作し、実際に溶融亜鉛浸漬実験を実施し、実験体モデルの温度履歴や熱ひずみ履歴を測定している。本章では、T型鋼平板の溶融亜鉛浸漬実験中の実験温度分布と熱応力分布を再現するために、板厚比 $l/h=5.0$ のモデルについて、3次元熱伝導－熱応力連成解析を実施する。その際の溶融亜鉛めっき浸漬速度は2種類設定し比較検討する。また、熱伝導解析において、熱伝達係数の最適値を最小二乗法によって求める。また、材料特性値については、温度に依存して変動する事が考えられるため^{5),6)}、高温時の温度依存性を考慮した。さらに熱応力解析では、材料の降伏点についても温度依存性を考慮し、3次元弾塑性熱応力解析を実施した。以上の手法による3次元熱伝導－熱応力連成解析から、T型溶接鋼平板の溶接部近傍にどのような熱応力の集中が生じるかを明らかにすることを目的としている。

2.2.1 3次元FEM解析モデルと解析条件

図2-2-1は、著者等の文献³⁾における浸漬実験に使用したT継手溶接鋼平板の試験体である。図2-2-2は図2-2-1のA-A'間を含む断面図で高温ひずみゲージと熱電対設置位置を示す。鋼材はSS400鋼材を使用し、下側の鋼板を基板(板厚:h)、これに溶接されている垂直な鋼板を付属板(板厚:l)と呼ぶこととする。小型溶接鋼板の実験体モデルを図2-2-1に示す。鋼材の材質はSS400鋼材を使用し、下側の鋼板を基板(板厚:h)、これに垂直に溶接されている鋼板を付属板(板厚:l)と呼ぶこととする。溶接部は付属板長手方向をすみ肉溶接、付属板の板厚方向を廻し溶接としている。

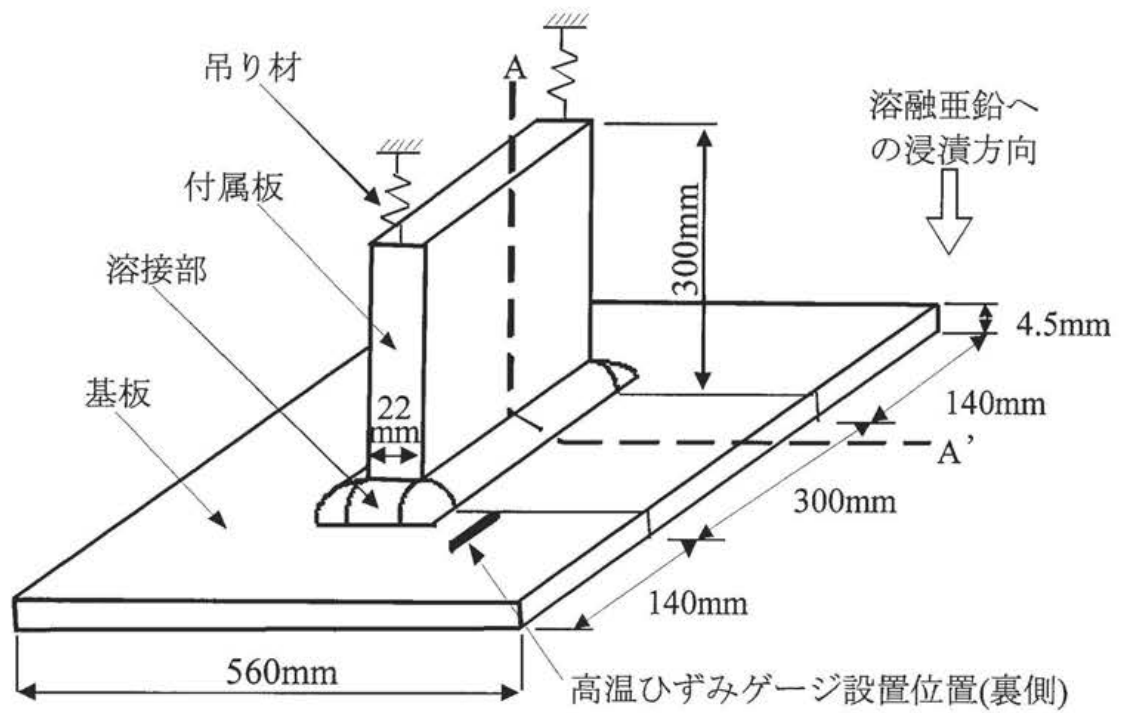


図 2-2-1 T 継手溶接鋼平板の実験体モデル

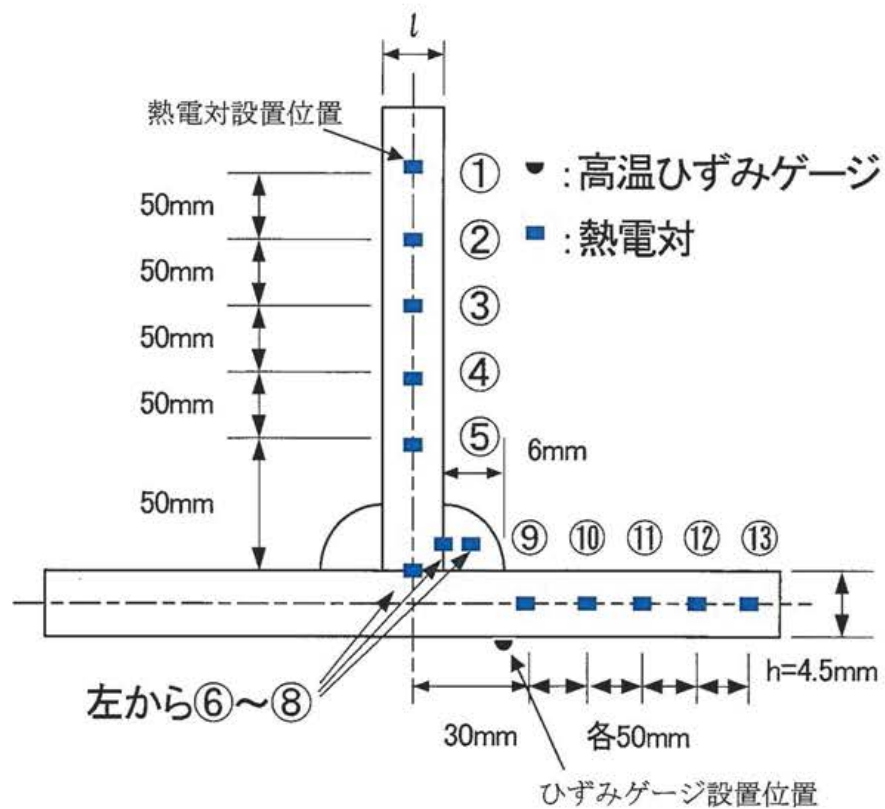


図 2-2-2 高温ひずみゲージと熱電対の設置位置

文献²⁾において、組み合わせ部材の板厚比が大きい場合、その板厚差による温度上昇の差から生ずる熱応力が大きく作用し、特に板厚比 $l/h=2.5$ を超える場合において溶融亜鉛めっきを行うと「割れ」や「変形」が生じやすいということが報告されている。また、実際の構造物の設計において、場合によっては、必要な強度とコストの面から厚比 $l/h=2.5$ を超える場合も見られる。その事例に基づき、板厚比 $l/h=5.0$ のモデルを再現し解析を行うこととした。

本解析の浸漬速度は、著者らが過去に実施した浸漬実験³⁾を参考に、浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ と $V=0.042(\text{m/s})$ の 2 種類を採用した。熱伝達係数の最適化に必要な浸漬実験の試験体温度と熱ひずみの履歴は、試験開始から 2 秒間隔で 120 秒まで測定している。溶融亜鉛の温度は約 440°C である。解析には図 2-2-3 に示すように 8 節点 SOLID 要素を用いて最小要素寸法 $1.9\times 1.4\times 0.8(\text{mm})$ の解析モデルを作成し浸漬シミュレーションを行った。また、熱伝導率、ヤング率、密度、比熱、熱膨張係数などの材料特性値については、文献^{7),8)}を参考に温度依存性を考慮し表 2-2-1 に示す値を設定した。

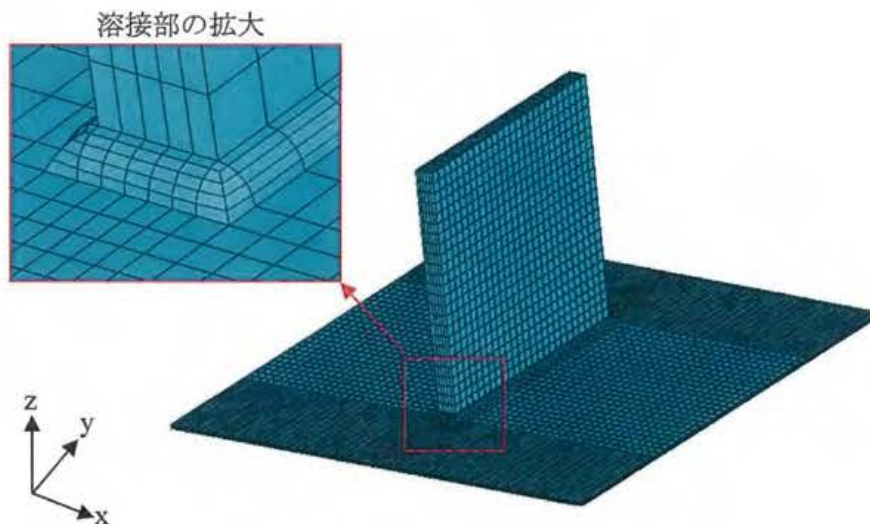


図 2-2-3 T 継手溶接鋼平板の FEM 解析モデル

表 2-2-1 温度依存を考慮した材料特性値

材料特性値名	値	単位
ヤング率	206~148 (30~500($^{\circ}\text{C}$))	(kN/mm^2)
熱伝導率	74.4~38.9 (0~600($^{\circ}\text{C}$))	($\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$)
密度	7873~7646 (20~916($^{\circ}\text{C}$))	(kg/m^3)
比熱	482~681 (30~500($^{\circ}\text{C}$))	($\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$)
熱膨張係数	13.5×10^{-6} (30~440($^{\circ}\text{C}$))	($1/^{\circ}\text{C}$)
降伏点	229~127 (30~500($^{\circ}\text{C}$))	(N/mm^2)

2.2.2 3次元熱伝導—熱応力連成解析手法

本章では、汎用解析プログラム ANSYS を用いた熱伝導解析と熱応力解析の連成解析を行っている。3次元熱伝導—熱応力連成解析の流れ図を図 2-2-4 に示す。T 継手溶接鋼平板の時刻歴の温度分布と熱応力分布を求めるために、最初に t_1 秒後の境界(浸漬)条件において、3次元熱伝導解析を行う。次に t_2 秒後、次に t_3 秒後、というように時刻ごとの境界条件の変化を再現し、その時刻歴毎に熱伝達面を定義し、溶融亜鉛浸漬中の解析モデルの温度分布を求める。求めた時刻歴の温度分布を外力として、時刻歴毎に3次元弾塑性熱応力解析を行う。その時、境界条件によって変化する可能性のある熱伝達係数を次項に示す最適化手法によって求める。

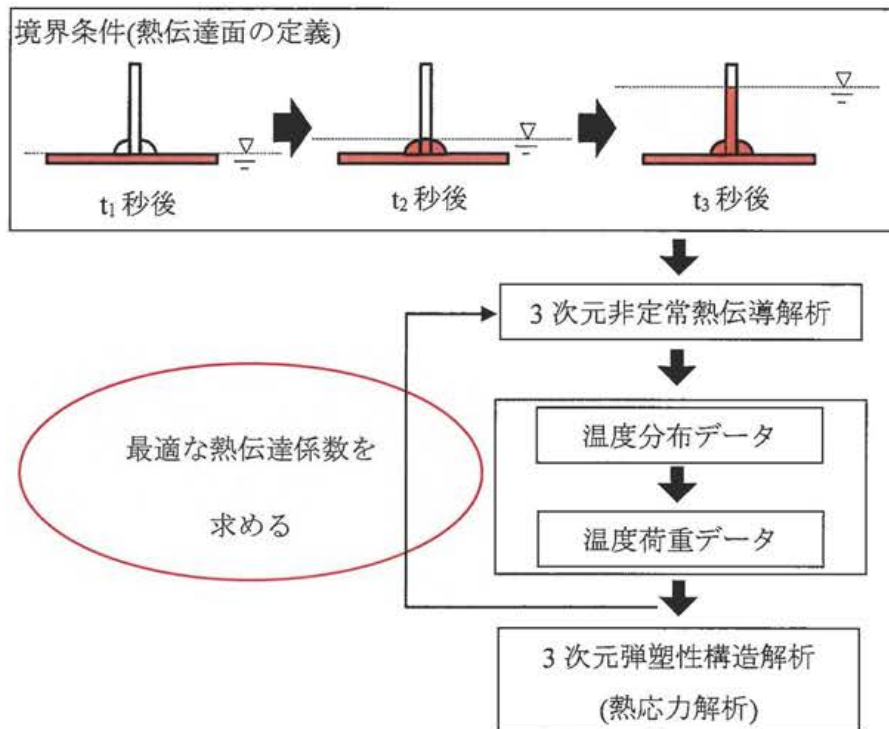


図 2-2-4 3次元非定常熱伝導—熱応力連成解析の流れ図

2.2.3 最適化手法による最適熱伝達係数の設定

熱伝導解析では、単位温度差(鋼板－熔融亜鉛流体)当たりの熱伝達による熱流速を規定する係数である熱伝達係数($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)を基板と付属板それぞれについて 250～3000 の範囲で変化させ、解析温度 $T'(^{\circ}C)$ を求めた。本章では、式(2-2-1)の目的関数 OBJ($^{\circ}C$)を用いて、浸漬実験により得られた各熱電対の実験温度 $T(^{\circ}C)$ が、各節点の解析温度 $T'(^{\circ}C)$ と近似するような温度分布を最小二乗法で求める。

$$OBJ = \sqrt{\sum (T - T')^2} \quad (2-2-1)$$

この目的関数 OBJ($^{\circ}C$)が最小となる熱伝達係数を最適熱伝達係数 $\alpha(W/(m^2 \cdot ^\circ C))$ と呼ぶ。2 枚の鋼平板の熔融亜鉛への浸漬方向を考慮せずに最適熱伝達係数を 1 変数として求めた。 $V=0.008(m/s)$ 時の目的関数 OBJ と最適熱伝達係数 α の関係を図 2-2-5 に示す。図 2-2-5 より目的関数 OBJ が最小値となる最適熱伝達係数 $\alpha=1150$ が得られる。また、熔融亜鉛への浸漬方向を考慮するために、基板と付属板それぞれの最適熱伝達係数を α_1 と α_2 とする。2 変数にして求めた目的関数 OBJ の変化を図 2-2-6 に示す。図 2-2-6 より最適熱伝達係数 $\alpha_1=550$, $\alpha_2=1250$ が得られる。図 2-2-5 に比べて目的関数の値が小さくなり、精度が向上したことが分かる。また、 $V=0.042(m/s)$ の場合も同様にして、1 変数は $\alpha=1050$, 2 変数の場合は $\alpha_1=650$, $\alpha_2=1150$ が求められる。図 2-2-5 と図 2-2-6 を比較すると、2 枚の鋼平板の熔融亜鉛への浸漬方向を考慮しない最適熱伝達係数 α は、考慮した場合に比べて付属板では差が $100(W/(m^2 \cdot ^\circ C))$ と小さいが、基板においては $600(W/(m^2 \cdot ^\circ C))$ と大きいことが分かった。基板の温度履歴結果において、解析温度と実験温度に大きな差が生じた原因の一つと考えられる。よって、本解析では、基板と付属板それぞれの最適熱伝達係数を用いて、時刻歴温度分布を求める。

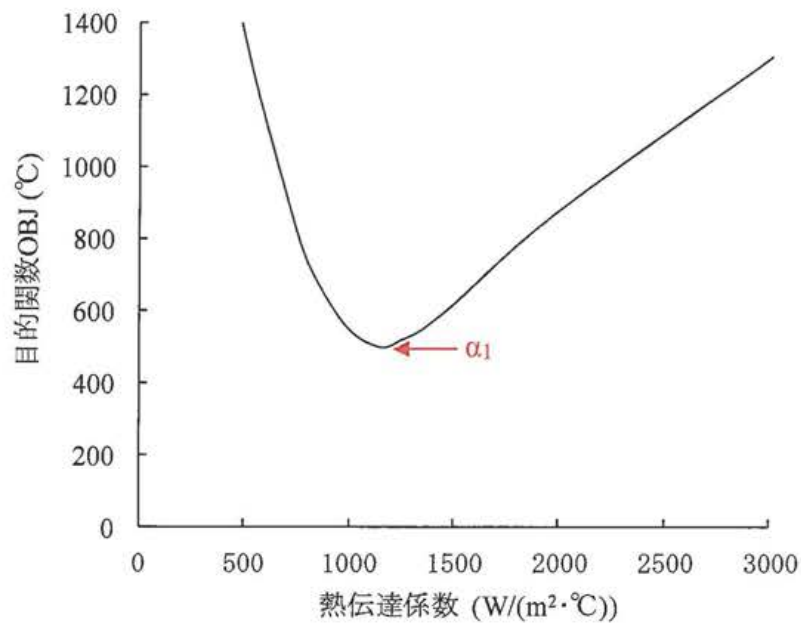


図 2-2-5 最適熱伝達係数を 1 変数とした場合の熱伝達係数による
目的関数 OBJ の変化(板厚比 $\ell/h=5.0$, $V=0.008(\text{m/s})$)

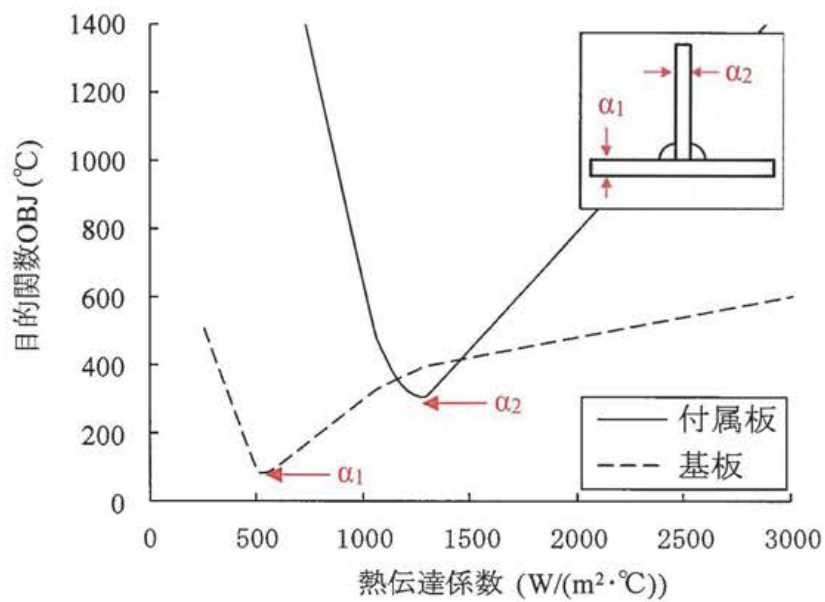


図 2-2-6 最適熱伝達係数を 2 変数とした場合の熱伝達係数による
目的関数 OBJ の変化(板厚比 $\ell/h=5.0$, $V=0.008(\text{m/s})$)

2.3 3次元熱伝導－熱応力連成解析結果と考察

2.3.1 3次元熱伝導解析結果

図 2-2-5 より得られた最適熱伝達係数 $\alpha=1150$ を用いて 3 次元熱伝導解析により求めた解析温度履歴曲線と実験温度の履歴曲線を比較したグラフを浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ の場合を図 2-3-1 に示し、 $V=0.042(\text{m/s})$ の場合を図 2-3-2 に示す。これらの結果から、基板の温度履歴結果は、浸漬速度に関係なく解析温度と実験温度に大きな差があり、浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ では最大約 $80\text{ }(^{\circ}\text{C})$ 、浸漬速度 $V=0.042(\text{m/s})$ では最大約 $50(^{\circ}\text{C})$ の差が確認できる。

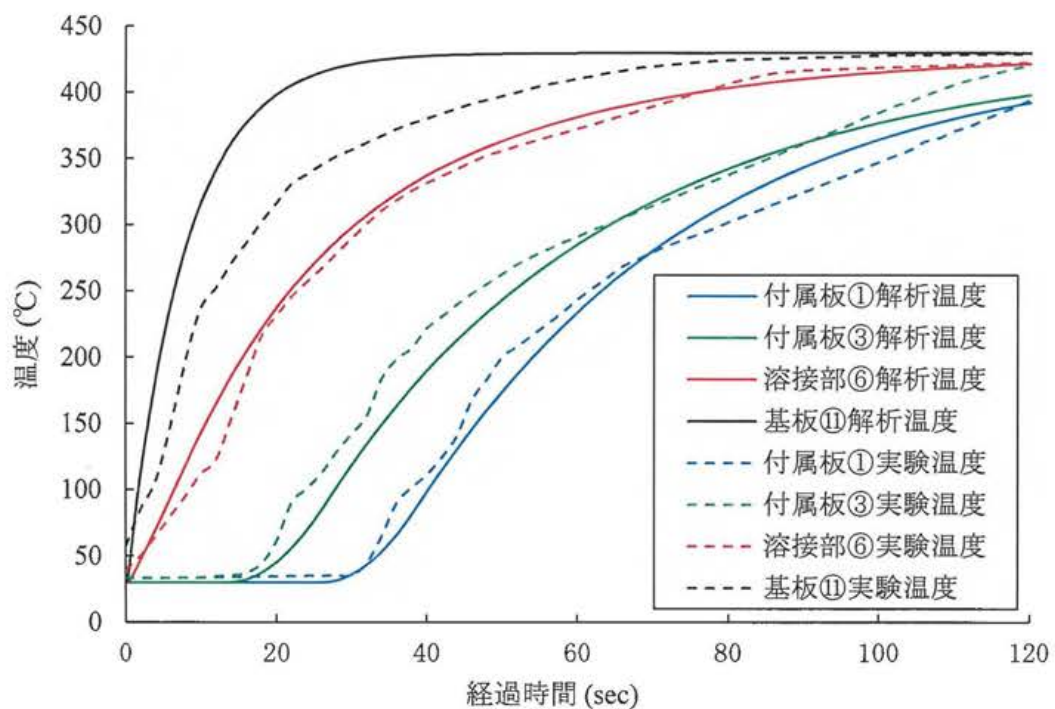


図 2-3-1 最適熱伝達係数を 1 変数とした場合の解析温度と実験温度の履歴曲線
(板厚比 $l/h=5.0$, $V=0.008(\text{m/s})$)

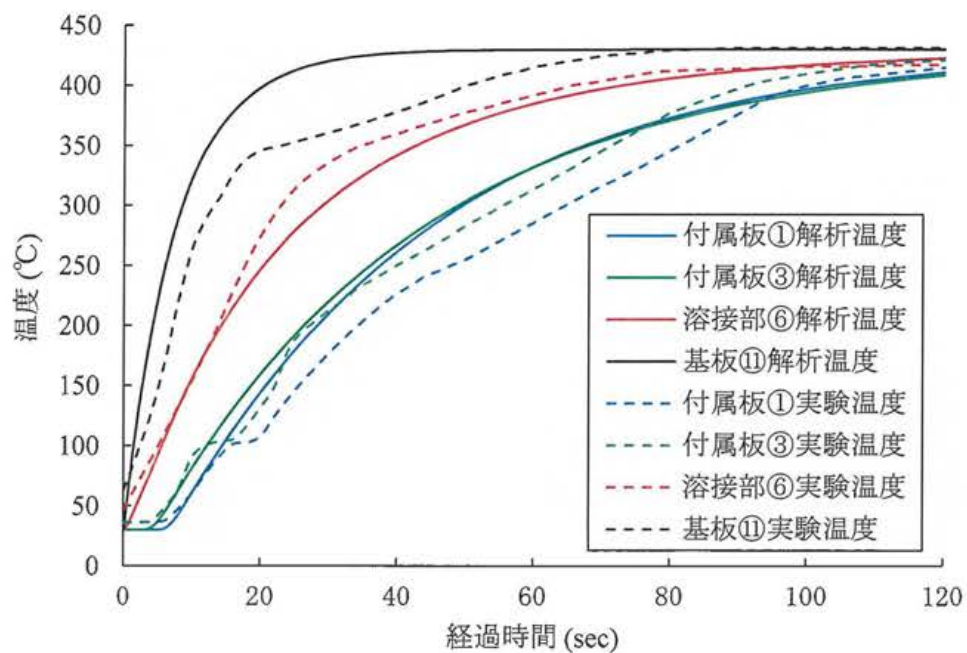


図 2-3-2 最適熱伝達係数を 1 変数とした場合の解析温度と実験温度の履歴曲線
(板厚比 $\ell/h=5.0$, $V=0.042(\text{m/s})$)

図 2-2-6 より得られた最適熱伝達係数 $\alpha_1=550$, $\alpha_2=1250$ を用いて計算した温度履歴曲線と実験温度の履歴曲線を比較したグラフを浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ の場合を図 2-3-3 に示し、 $V=0.042(\text{m/s})$ の場合を図 2-3-4 に示す。これらの結果から、基板の温度履歴結果は、浸漬速度に関係なく解析温度と実験温度の差は小さく、浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ では最大約 $10(^{\circ}\text{C})$ 、浸漬速度 $V=0.042(\text{m/s})$ では最大約 $20(^{\circ}\text{C})$ の差となり、熱伝達係数を 1 変数とした場合に比べて大幅な改善が認められる。

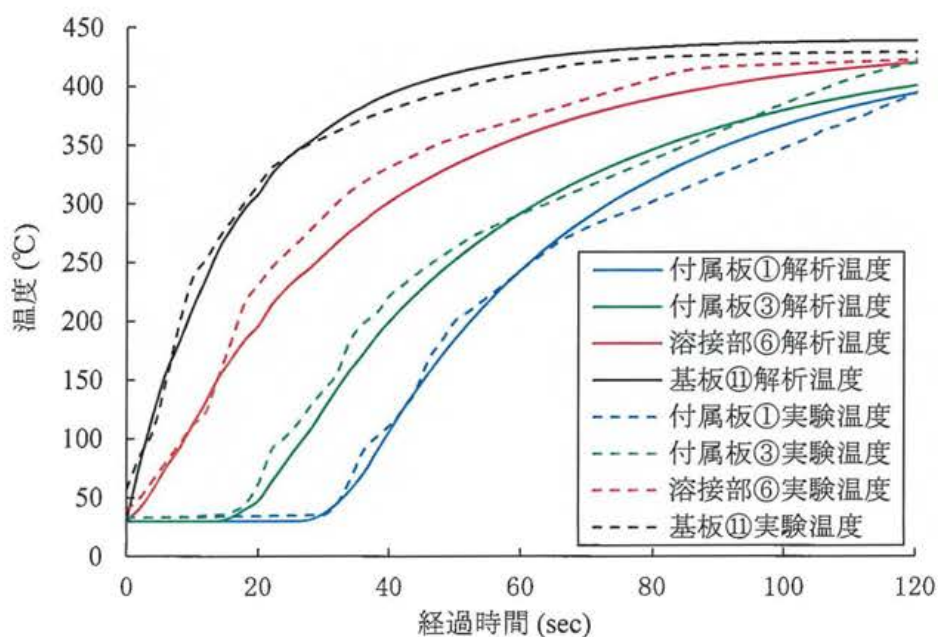


図 2-3-3 最適熱伝達係数を 2 変数とした場合の解析温度と実験温度の履歴曲線
(板厚比 $\ell/h=5.0$, $V=0.008(\text{m/s})$)

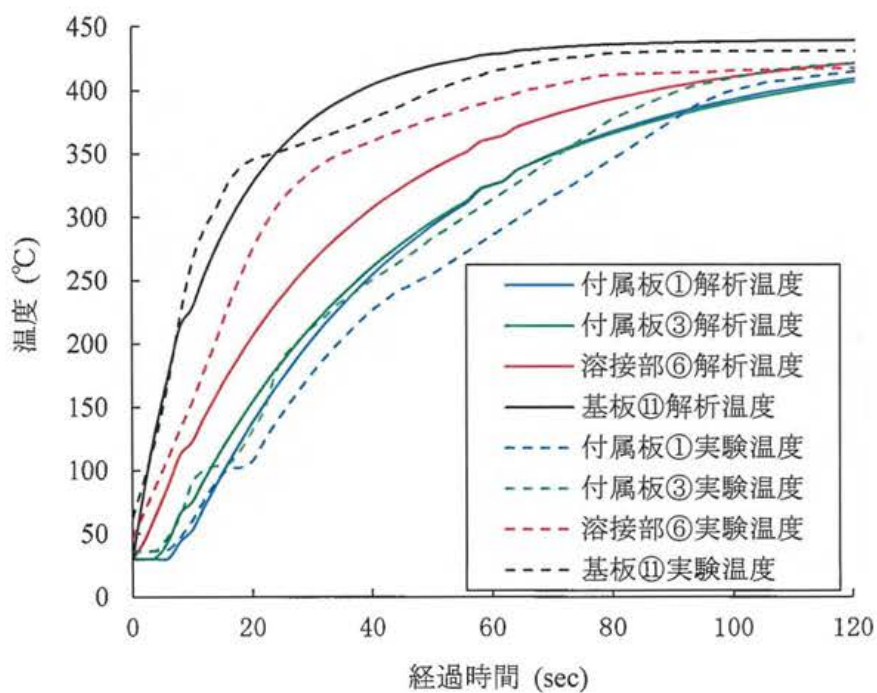


図 2-3-4 最適熱伝達係数を 2 変数とした場合の解析温度と実験温度の履歴曲線
(板厚比 $\ell/h=5.0$, $V=0.042(\text{m/s})$)

以上から、最適化手法による最適熱伝達係数の算出において、熔融亜鉛への浸漬方向を考慮するため、部材の各部位毎に最適熱伝達係数を求めることで、3次元熱伝導解析の精度を向上できることが分かる。また、図 2-3-4 の溶接部⑥の温度履歴結果において、解析温度と実験温度に差が見られる。これは、溶接部の熱伝達係数を基板と同様の値を設定していることが原因として考えられる。対策としては、最適熱伝達係数の算出にあたり溶接部においても基板および付属板と同様にそれぞれ最適熱伝達係数を求めることで、さらに3次元熱伝導解析の精度を向上させることが出来ると考えられる。

2.3.2 3次元弾塑性熱応力解析結果

図 2-3-5 は、最適熱伝達係数を2変数とした場合について、板厚比 $l/h=5.0$ の試験体モデルを浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ および $0.042(\text{m/s})$ で熔融亜鉛に浸漬させた場合の実験値(図 2-2-2 中の基板下面)と3次元熱伝導-熱応力連成解析により求めた解析値の履歴を比較したグラフを示している。縦軸が Y 方向の熱ひずみ、横軸は経過時間(sec)を表している。

図 2-3-5 より、試験体モデルの浸漬速度 $0.008(\text{m/s})$ および $0.042(\text{m/s})$ とも実験ひずみと解析ひずみの最大値や、生じる時間はほぼ一致している。しかし、最大値発生以降のひずみの収束については一致していない。その原因として、図 2-3-3、2-3-4 に示すように、それぞれの浸漬速度において溶接部に発生した温度履歴結果が、ひずみのピーク時から 100 秒程度まで実験温度と解析温度に差が見られることや、また溶接により発生する残留応力を考慮していないこと、さらに熱応力の計算に際してはヤング率の温度依存性を考慮したことなどが、解析ひずみの履歴に大きく影響していると考えられる。

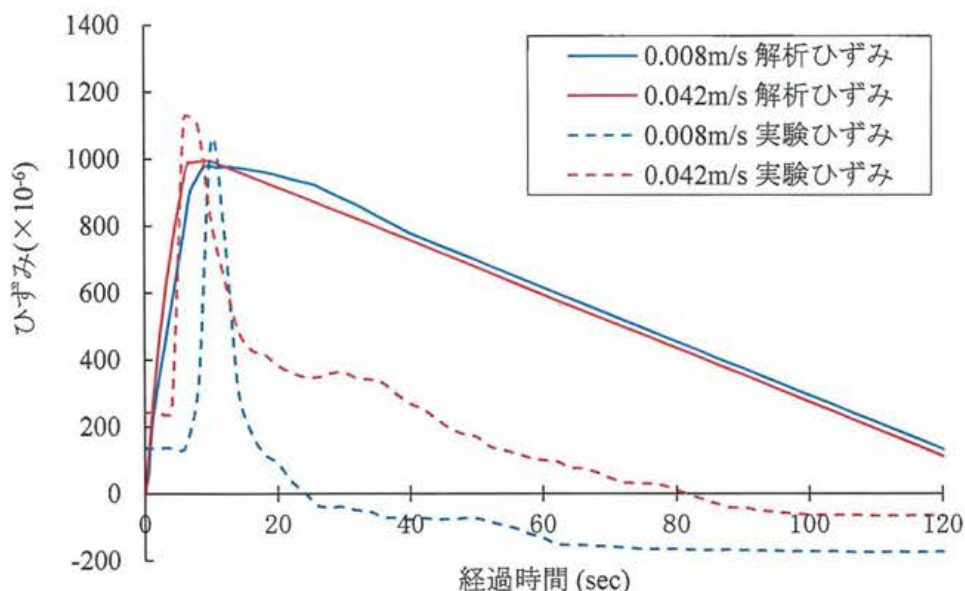


図 2-3-5 最適熱伝達係数を2変数とした場合の Y 方向の解析値と実験値のひずみの履歴曲線(板厚比 $l/h=5.0$)

図 2-3-6, 2-3-7 は, 図 2-3-5 に示した各浸漬速度における最大解析ひずみ発生時の Y 方向のひずみ分布を示す。これらの結果から, 浸漬速度に関係なく鋼平板全体に圧縮ひずみが発生し, 基板と付属板の回し溶接部(図中の赤丸位置)のみに大きな引張りひずみが生じることが分かった。これがこの種の構造物の溶接部めっき割れの原因と考えられる。溶融亜鉛めっきする鋼構造物をあらかじめ連成解析を行うことにより, 溶融亜鉛浸漬中の鋼部材のひずみ分布(応力分布)の変化を再現することができれば, めっき割れ部位の特定も可能となり対策もたて易いと思われる。

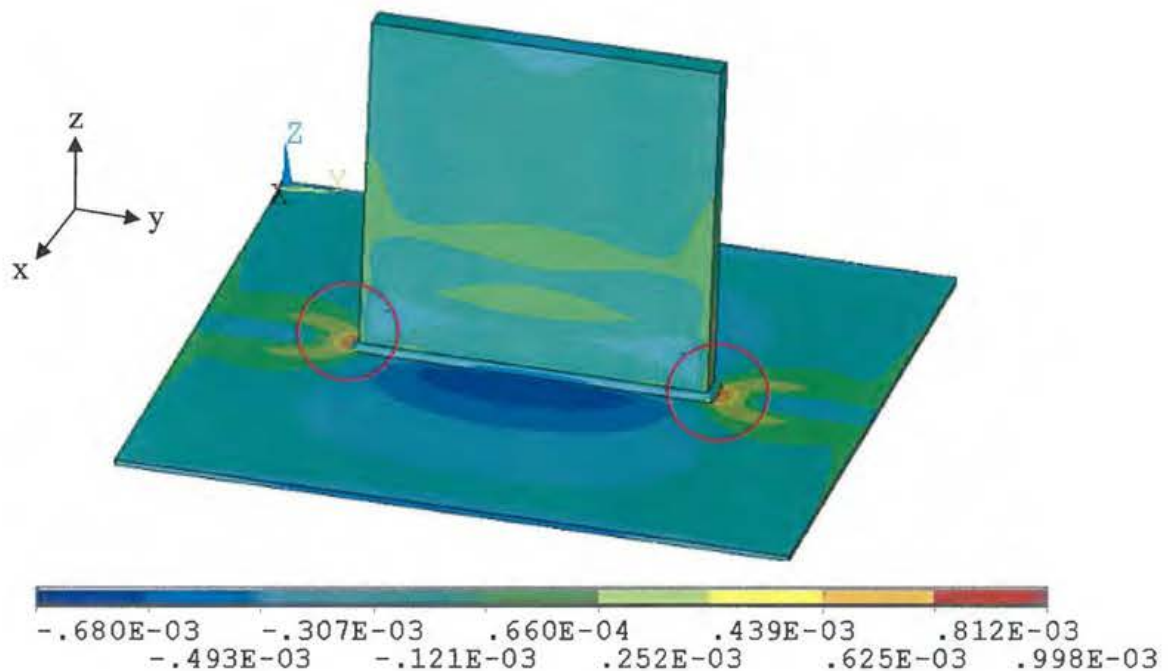


図 2-3-6 最適熱伝達係数を 2 変数とした場合の最大解析ひずみ発生時の Y 方向ひずみ分布(板厚比 $l/h=5.0$, 浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$)

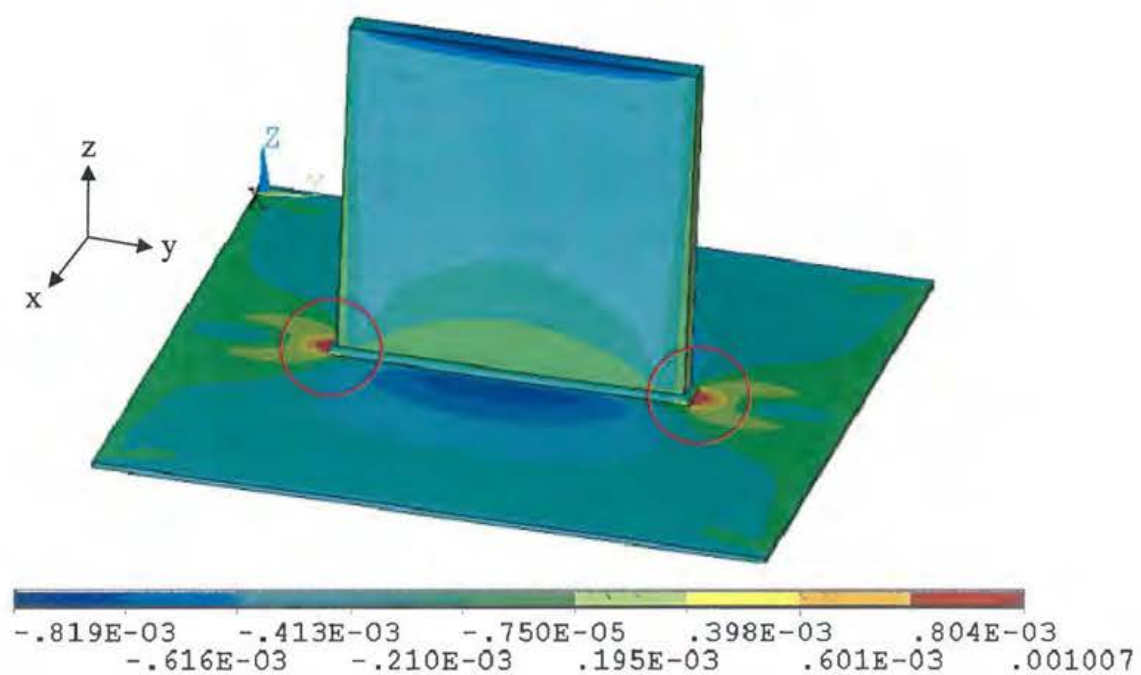


図 2-3-7 最適熱伝達係数を 2 変数とした場合の最大解析ひずみ発生時の
Y 方向ひずみ分布(板厚比 $\ell/h=5.0$, 浸漬速度 $V=0.042(\text{m/s})$)

図2-3-8は、浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ 時の溶融亜鉛への浸漬開始から120秒後におけるY方向の塑性ひずみ分布を示す。これより、応力集中部である基板と付属板の回し溶接部(図中の赤丸位置)に塑性ひずみが確認できることから、その部分のみ塑性域に達しており、残留ひずみとして残ることが分かる。よって、この浸漬実験による熱応力算定については、弾性解析よりも弾塑性解析の方が有効であると分かる。

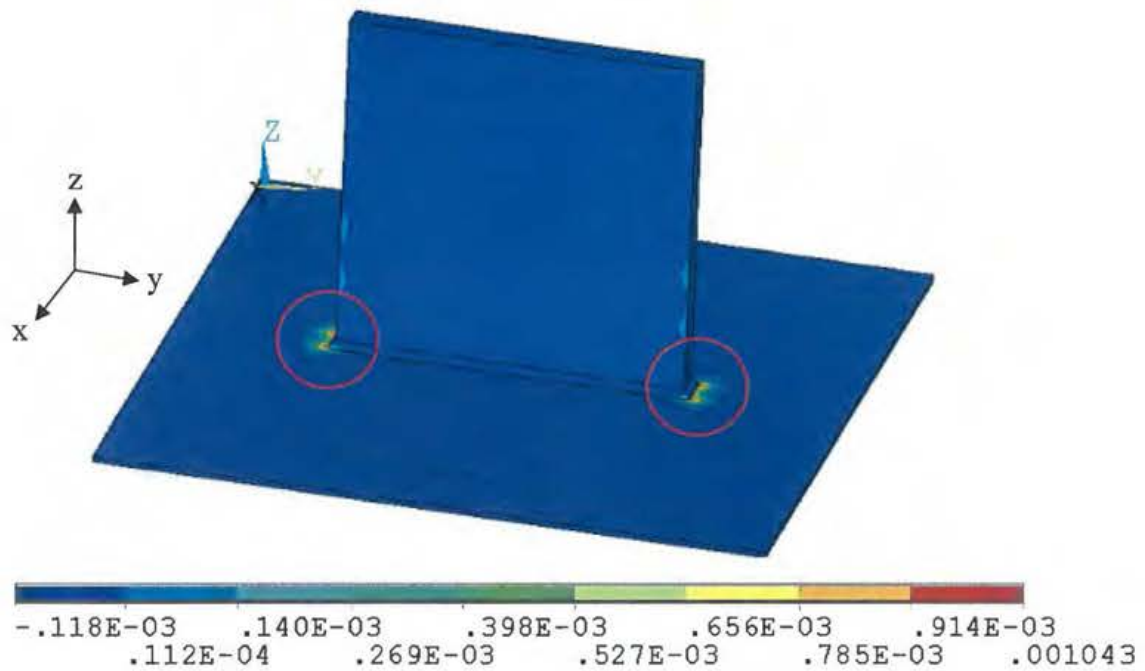


図 2-3-8 最適熱伝達係数を 2 変数とした場合の 120 秒後の
Y 方向塑性ひずみ分布(板厚比 $\ell/h=5.0$, 浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$)

図 2-3-9 は、図 2-3-6, 2-3-7 に示した板厚比 $l/h=5.0$ の試験体モデルを浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$ および $V=0.042(\text{m/s})$ で溶融亜鉛に浸漬させた場合の、基板応力集中部の Y 方向の応力分布履歴曲線を示している。縦軸が Y 方向の応力(N/mm^2)、横軸は経過時間(sec)を表している。図 2-3-9 より、発生した最大応力は降伏点 $229\sim 127(\text{N/mm}^2)$ ($30\sim 500(^{\circ}\text{C})$) を超えているため塑性域に達していると分かる。また、最大の引張応力 $400(\text{N/mm}^2)$ は超えていないため、解析モデルは破断せずに、めっき割れは発生しないと考えられる。

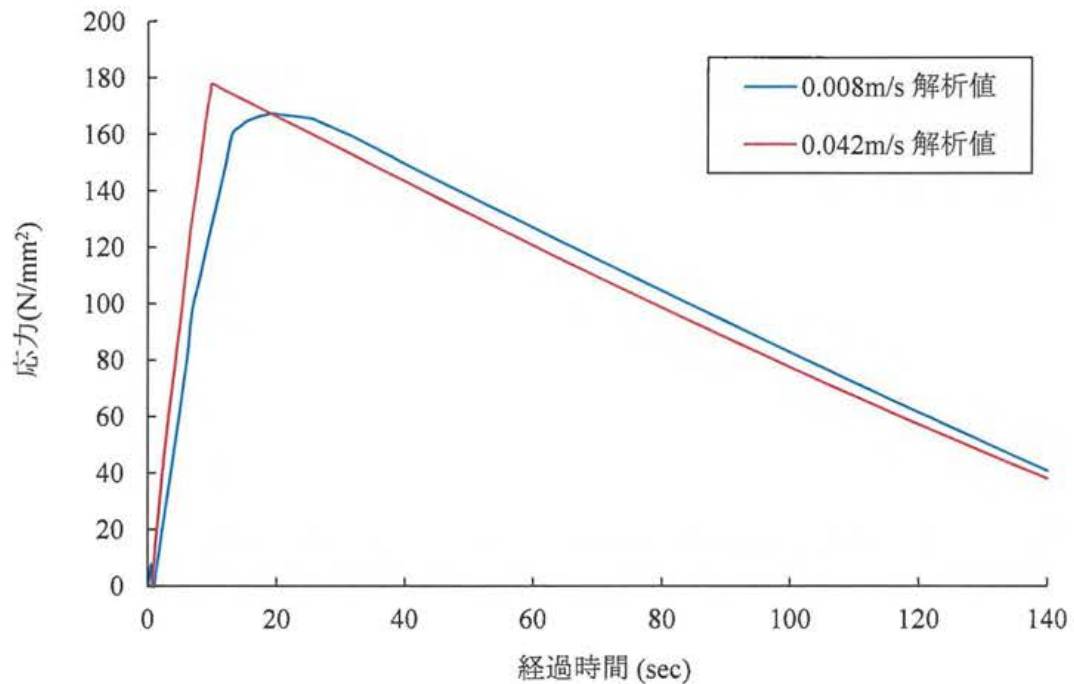


図 2-3-9 最適熱伝達係数を 2 変数とした場合の解析における Y 方向の
応力分布履歴曲線(板厚比 $l/h=5.0$, 浸漬速度 $V=0.008(\text{m/s})$)

2.4 結論

本章では、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して、3 次元 FEM 解析モデルを作成し、時刻歴毎に 3 次元熱伝導－熱応力連成解析を行い、解析結果と浸漬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。

2.4.1 3 次元熱伝導解析について

- 1) 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ため、熱拡散率は温度依存性を有する。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の最適熱伝達係数を最小二乗法を用いて求めた。それらを用いた解析結果から、T 継手溶接鋼平板の溶融亜鉛浸漬時の解析温度履歴曲線と実験温度履歴曲線を比較検討したところ、溶接部で若干誤差があるものの、実測値に近似した結果が得られ、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。

2.4.2 3 次元熱応力解析について

- 2) 3 次元熱伝導解析によって得られた時刻歴温度分布を用いて、T 継手溶接鋼平板の溶融亜鉛浸漬時の 3 次元弾塑性熱応力解析を実施した。その際材料のヤング率、熱膨張係数、降伏点も温度依存性を考慮した。回し溶接部近傍の基板裏面の実験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する結果となった。しかし、最大値以後の曲線挙動については大きな差が生じた。この原因としては、溶接部の解析温度と実験温度に大きな差があったことや、溶接時に発生する残留応力を本解析では考慮していないこと等が考えられる。
- 3) 3 次元熱伝導－熱応力連成解析から得られた溶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、T 継手溶接鋼平板の回し溶接部で応力集中が起きていることを解析上明らかにした。これが、めっき割れの原因の一つと考えられる。
- 4) また、T 継手溶接鋼平板の回し溶接部で発生したひずみは塑性域に達しており、溶融亜鉛めっき完了後以降も残留ひずみとして残ることから、本章の熱応力解析では弾塑性解析が有効であることが分かった。

本解析手法は、溶接部を有する鋼構造物の溶融亜鉛浸漬時の温度分布や応力挙動を把握する解析手法としては、有効であると思われる。また、3次元熱伝導解析において、溶融亜鉛への浸漬方向を考慮するために、部材の各部位毎に最適熱伝達係数を設定することで、解析の精度を高められることが分かる。

次章では、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溶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する。

参考文献

- 1) 菊池昌利：溶融亜鉛中における鋼平板のひずみ測定と熱ひずみ計算，非破壊検査 第 29 巻，pp.544-549，1982.
- 2) 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，pp.52-53，2004.
- 3) 今野貴史，岩崎正二，出戸秀明，宮本裕：溶融亜鉛浸漬中に発生する鋼平板の熱ひずみと温度変化，構造工学論文集 vol.52A，pp.853-864，2006.
- 4) 今野貴史，岩崎正二，出戸秀明，宮本裕，二上輝彦：最適化手法を用いた溶融亜鉛浸漬中の鋼平板の温度分布推計，構造工学論文集 vol.53A，pp.926-935，2007.
- 5) Barzelay, M. E., Tong, K. N. and Holloway, G. F.: Effect of pressure on thermal conductance of contact joints, NACA TN 3295, 1955.
- 6) Dorn, J. E. (ed).: Mechanical Behavior of Materials at Elevated Temperatures, New York, McGraw-Hill,1961.
- 7) 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.
- 8) 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.

第 3 章

めっき抜き孔の形状変化による H 形鋼構造物の
溶融亜鉛めっき割れ対策に関する検討

3.1 概説

溶融亜鉛めっきを行うことで発生する割れの原因は、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ている。このように割れの原因は、種々考えられるが、本章では部材形状に着目する。そこで実際に割れが発生した事例を基に、一般的な柱梁仕口部に対して、溶融亜鉛めっき時に割れが生じにくいスカラップの構造ディテールの検討について述べる。

小山等¹⁾は、柱梁仕口スカラップを有する実大部分モデルについて浸漬実験を行い、熱電対を用いて供試体の表面温度を測定している。また、熱伝導解析および熱応力解析を行い、スカラップ回し溶接止端部に発生する応力値を推定している。その結果、板厚比が大きくなるにつれて、亜鉛めっき浴槽浸漬時に部材間に発生する温度差およびスカラップ回し溶接部に発生する応力は大きくなり、めっき割れの発生率は高くなる。また、めっき割れの要因としては、材料的要因よりも構造的・形状的要因が大きく、仕口部構造をスカラップ工法から孔を設けスカラップを省略したノンスカラップ工法にすることで、めっき割れ発生率が大きく減少すると述べている。その中の検討では、スカラップ工法について1種類のみ検討されている。JASS6(1996)²⁾には他にも形状が異なるスカラップが示されているが、その場合のめっき割れ発生率については不明である。

これまで述べたように、めっき割れの原因は、種々考えられるが、本章では部材形状に着目する。図3-1-1に示すような一般的に柱梁仕口部のめっき割れ対策として、めっき抜き孔を有するノンスカラップ工法が適用されることがある。そこで、めっき抜き孔を有するH形鋼構造物を実験体として、高温ひずみゲージを用いて、溶融亜鉛浸漬時および冷却時に実験体内に発生するひずみ量の測定を行う。また、実験体内に発生する熱ひずみ分布を再現するために、3次元熱伝導－熱応力連成解析を実施し、実験結果と解析結果の比較検討を行うことにより、溶融亜鉛浸漬時にH形鋼構造物内にどのような熱応力が生じるかを明らかにする。加えて、実際の溶融亜鉛めっきの施工事例から、割れが生じにくいスカラップの形状を数値解析により検討することにした。この検討では、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、通常スカラップを設ける位置に形状の異なる2種類のスカラップをそれぞれ設けたもの(Case1, 2)、めっき抜き孔を設けスカラップを省略したノンスカラップ工法(Case3)およびスカラップの省略のみを行った(Case4)の4種類について、3次元FEMによる熱伝導－熱応力連成解析を行う。それらの解析結果から、溶融亜鉛めっき時に割れが生じにくいスカラップの構造ディテールについて検討する。



図 3-1-1 一般的な柱材

3.2 溶融亜鉛浸漬実験

一般的な柱梁仕口部の部分的なモデルとして、めっき抜き孔を有する H 形鋼構造物を実験体とし、高温ひずみゲージを用いて、溶融亜鉛浸漬時および冷却時に実験体内に発生するひずみ量の測定を行う。

3.2.1 浸漬実験概要

(1)実験モデル

めっき抜き孔を有する H 形鋼構造物の実験体を図 3-2-1, 3-2-2 に示す。鋼材の材質は SN490 鋼材を使用し、PL16 400×400(mm)鋼材に JASS6(2007)³⁾を参考にしためっき抜き孔を設けた H250×250×9×14 鋼材を垂直に溶接した実験体とする。また実験体には、y 方向に高温ひずみゲージを 2 箇所および熱電対を 10 箇所に設置する。熱電対は実験体の表面に設置している。

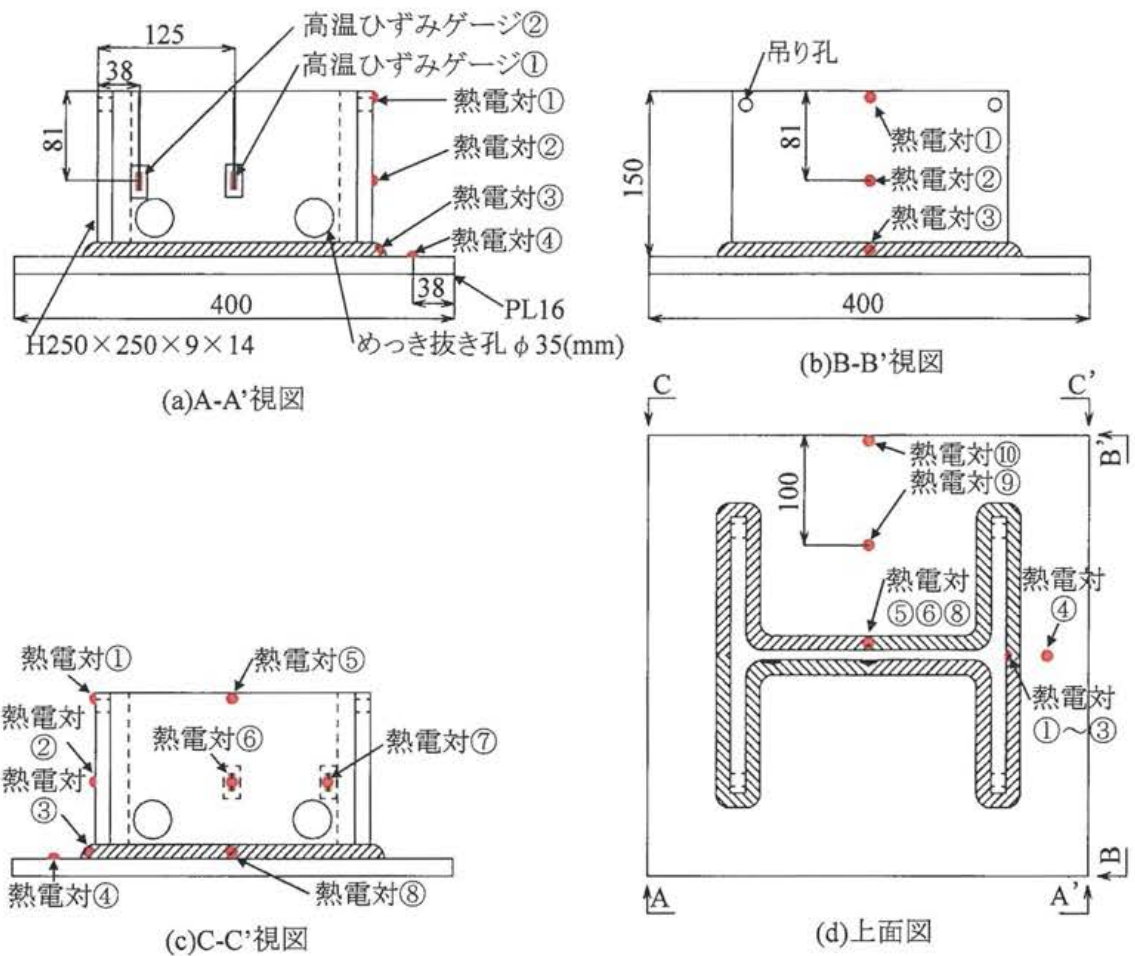


図 3-2-1 実験体モデル全体図(mm)

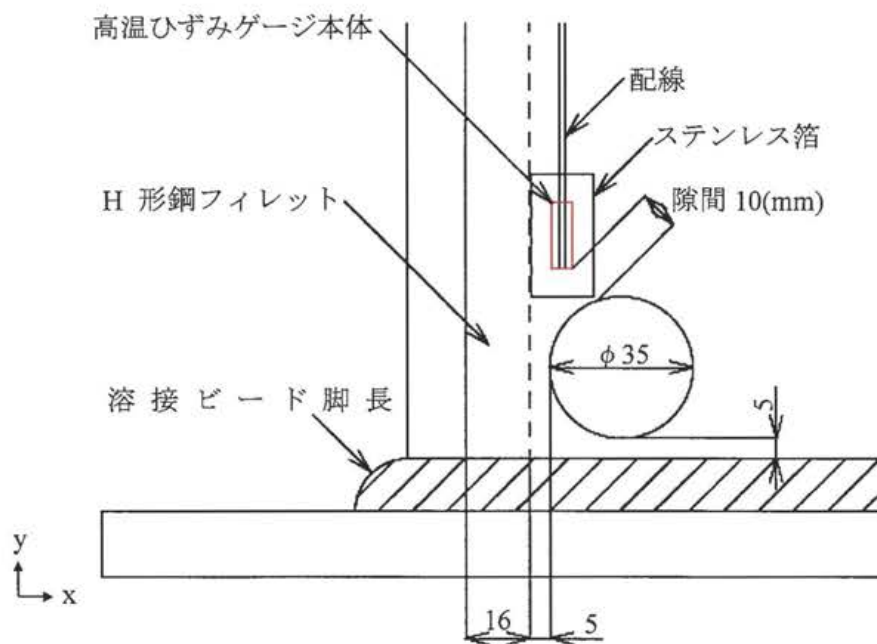


図 3-2-2 実験体モデル拡大図(mm)

(2)実験方法

浸漬実験中の様子を図 3-2-3 に示す。実験体を下面より約 440(°C)の溶融亜鉛へ浸漬速度 2.4(m/min)で浸漬浴面に傾けることなく浸漬させる。その後、約 5(min)間浸漬させた後、溶融亜鉛から実験体を引き上げ、空冷によって実験体の温度を下げる。その間の実験体内に発生するひずみ履歴および温度履歴を 2(sec)間隔で測定する。



図 3-2-3 浸漬実験の様子

3.2.2 残留ひずみ測定方法

実験体内には、鋼材の圧延、熱処理および溶接施工等によって、残留ひずみが内在しており、めっき割れに影響すると考えられる。そこで、浸漬実験と同一な実験体を用いて、図 3-2-4 に示す測定位置について、一般用ひずみゲージを取り付け、切断法によってひずみゲージを中心に 20(mm)角に切断し、実験体内の残留ひずみを測定する。測定位置は、浸漬実験の高温ひずみゲージと同一位置、溶接部周辺および反対側のめっき抜き孔周辺の合計 4 箇所に設置し、これを 3 体測定する。切断法によって切出したひずみゲージの様子を図 3-2-5 に示す。

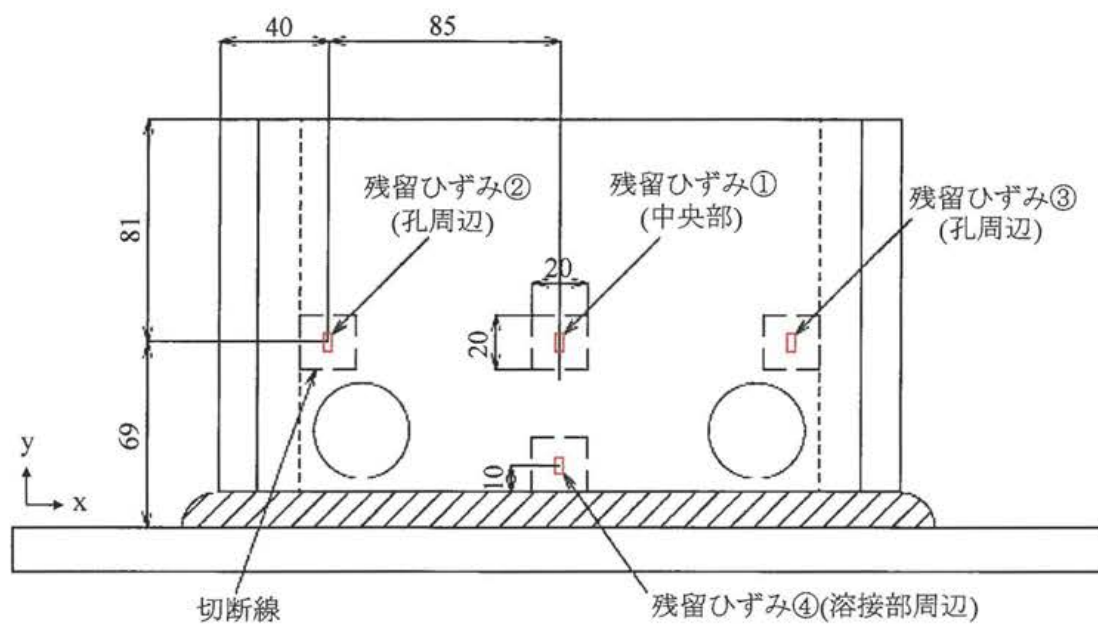


図 3-2-4 残留ひずみ測定位置(mm)

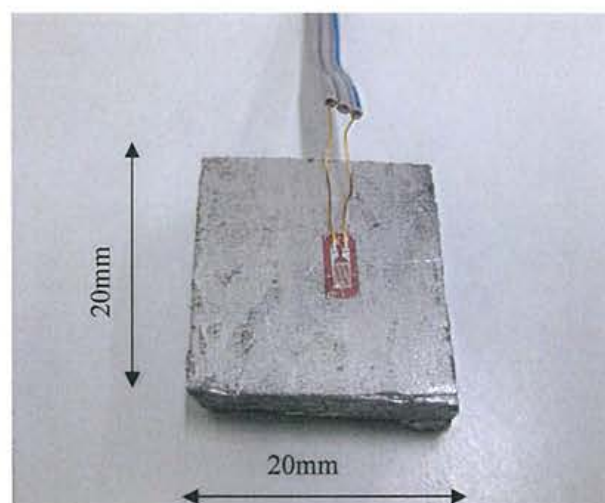


図 3-2-5 残留ひずみ測定後のひずみゲージ

3.2.3 実験結果と考察

(1) 浸漬実験結果

実験体の温度測定結果より、代表的な5箇所の温度履歴を図3-2-6に示す。また、その他の5箇所についても傾向に大きな差はなく、図を見やすくするために、代表的な5箇所のみについて示す。図3-2-6より、めっき浸漬開始直後より、実験体内の温度が急激に上昇し、その後冷却工程にて徐々に温度が低下していることが分かる。特に、板厚の薄い鋼材に設置している熱電対⑥および熱電対⑦については、温度が上昇し易く、冷め易いことが確認できる。逆に、板厚の厚い鋼材に設置している熱電対⑧および熱電対⑨については、温度が上昇し難く、冷め難いことが確認できる。

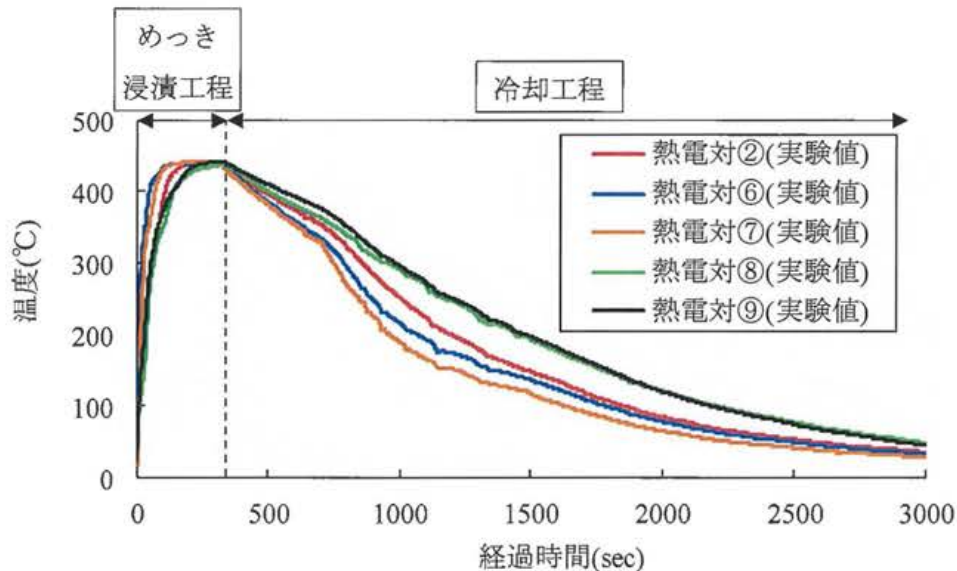


図 3-2-6 浸漬実験による温度履歴曲線

実験体のひずみ測定結果より、各高温ひずみゲージの履歴を図3-2-7に示す。図3-2-7より、ひずみゲージ①については、めっき浸漬直後より最大約330(μ)の引張ひずみが発生しており、ひずみゲージ②では最大約540(μ)の圧縮ひずみが発生していることが分かる。最大ひずみ発生以降は、ひずみゲージ①では約150(μ)、ひずみゲージ②では約250(μ)の圧縮ひずみに収束しており、冷却工程では多少のひずみ変動はあるが、大きなひずみ変動は発生していない。以上から、めっき浸漬工程において、めっき抜き孔周辺には圧縮ひずみが発生し、その値は実験体中央部に発生する引張ひずみよりも大きなひずみが発生することが分かった。

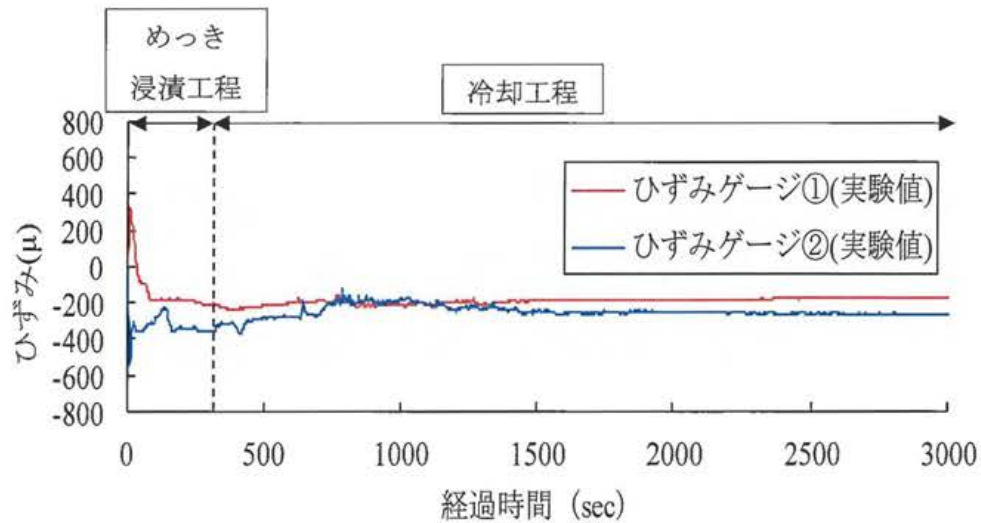


図3-2-7 浸漬実験によるひずみ履歴曲線

(2) 残留ひずみ測定結果

残留ひずみの測定結果を表 3-2-1 に示す。表 3-2-1 より、実験体中央部の残留ひずみ①は平均 66(μ)と小さいが、めっき抜き孔周辺の残留ひずみ②および③では平均 263～519(μ)であり、溶接部周辺の残留ひずみ④では平均 848(μ)と大きな残留ひずみが内在していると分かった。

表 3-2-1 残留ひずみ測定結果(×10⁻⁶)

	残留ひずみ① (中央部)	残留ひずみ② (孔周辺)	残留ひずみ③ (孔周辺)	残留ひずみ④ (溶接部周辺)
1 体目	123	269	490	920
2 体目	57	237	472	781
3 体目	18	283	594	843
平均値	66	263	519	848

3.3 3次元熱伝導－熱応力連成解析

実験体内に発生する熱ひずみ分布を再現するために、3次元熱伝導－熱応力連成解析を実施し、実験結果と解析結果の比較検討を行うことにより、溶融亜鉛浸漬時に H 形鋼構造物内にどのような熱応力が生じるかを明らかにする。

3.3.1 解析概要

(1)解析モデル

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3-3-1に示す。解析モデルは、溶接ビードも含めて実験体モデルをそのままモデル化する。溶接ビードおよびH形鋼のフィレットは6面体SOLID要素を用いており、その他の部位は4面体SOLID要素を用いてFEM解析モデルを作成する。総節点数17142、総要素数14413とする。

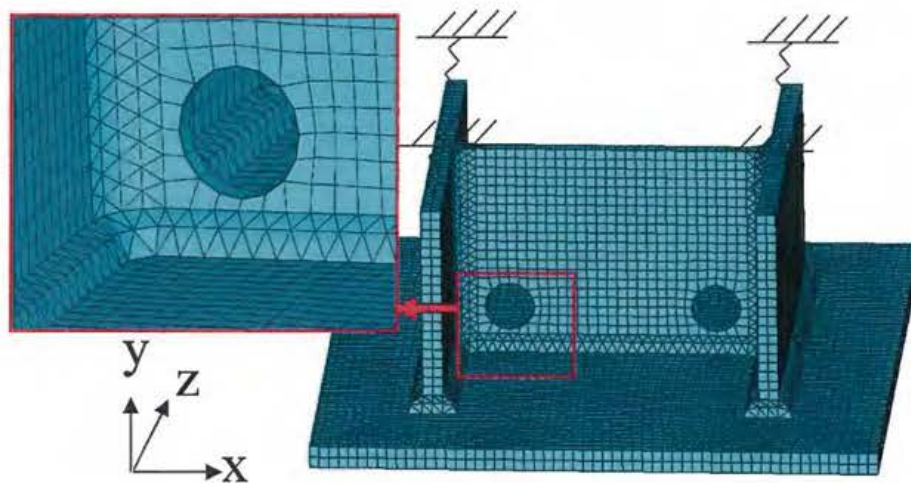


図3-3-1 FEM解析モデル

(2)解析方法

解析には、汎用FEMプログラムANSYSを用いる。また、解析の流れは2.2.2項で述べたように、溶融亜鉛浸漬深さに従い、最初に t_1 秒後の境界条件において、3次元非定常熱伝導解析を行う。次に t_2 秒後、次に t_3 秒後、というように時刻ごとの境界条件の変化を再現し、その時刻歴毎に熱伝達面を定義し、解析モデルの溶融亜鉛浸漬中の温度分布を求める。求めた時刻歴の温度分布を外力として、時刻歴毎に3次元弾塑性熱応力解析を行う。その時、境界条件によって変化する可能性のある熱伝達係数は、2.2.2項で用いた最適化手法によって求める。その結果、H形鋼フランジ部の最適熱伝達係数 $\alpha_1=400(\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}))$ 、H形鋼ウェブ部の最適熱伝達係数 $\alpha_2=1150(\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}))$ 、PL部の最適熱伝達係数 $\alpha_3=600(\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}))$ となり、その値を用いて境界条件を設定し時刻歴温度分布を求める。

熱伝導解析に用いる熱拡散率 κ は式(3-3-1)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。正確な温度分布を求めるために、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^{4),5)}を参考に温度依存性を考慮する。比熱および熱伝導率は、図3-3-2に示すように設定する。また、密度については、20(°C)時7873(kg/m³)から916(°C)時7646(kg/m³)まで変動すると設定する。

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3-3-1)$$

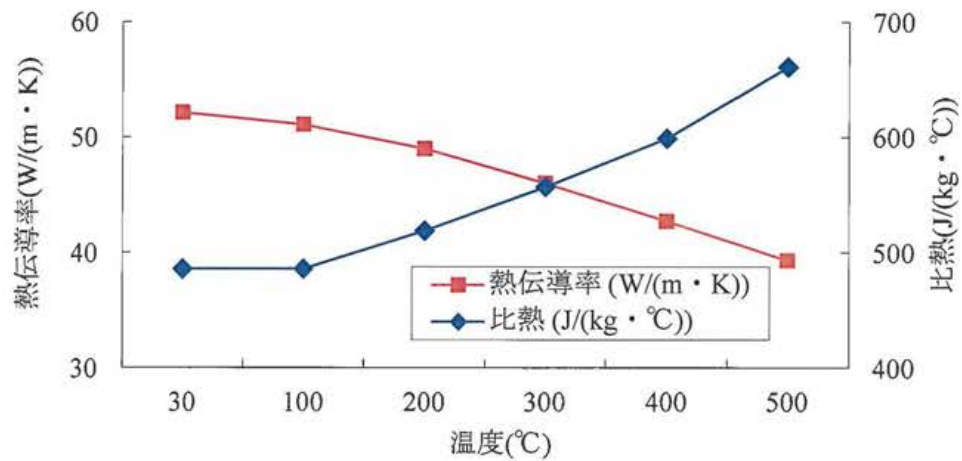


図3-3-2 熱伝導率および比熱の温度変化

鋼材の材料特性については、実験体を製作した同一ロットの材料を使用し、JIS 規格⁶⁾に基づいた材料実験を行い、常温時のヤング率および降伏点を求めた。材料実験の様子を図3-3-3に示し、その結果を表3-3-1に示す。さらに、高温時の温度依存性を考慮するために、文献⁹⁾を参考に温度変化によって材料特性値が変動するように表3-3-2に示す値を設定する。その他の材料特性値の温度変化についても文献^{4),9)}を参考に設定する。



図 3-3-3 材料実験の様子

表 3-3-1 材料実験の結果

材料名	値	単位
ヤング率(PL 材)	193	(kN/mm ²)
ヤング率(H 形鋼)	211	(kN/mm ²)
降伏点(PL 材)	385	(N/mm ²)
降伏点(H 形鋼)	341	(N/mm ²)

表 3-3-2 材料特性値の温度変化

材料特性値名 (材料名)	値 (温度範囲)	単位
ヤング率 (PL 材)	193~146 (30~500(°C))	(kN/mm ²)
ヤング率 (H 形鋼)	211~160 (30~500(°C))	(kN/mm ²)
降伏点 (PL 材)	385~215 (30~500(°C))	(N/mm ²)
降伏点 (H 形鋼)	341~191 (30~500(°C))	(N/mm ²)
熱膨張係数	$11.6 \times 10^{-6} \sim 13.9 \times 10^{-6}$ (30~500(°C))	(1/°C)

3.3.2 解析結果と実験結果の比較検討

(1) 熱伝導解析結果

めっき浸漬工程における実験値と解析値の温度履歴を図3-3-4に示す。図3-3-4より、実験値と解析値の温度履歴はほぼ一致していることが分かる。これらから、本研究の熱伝導解析手法によって溶融亜鉛時発生する実験体の温度分布を正確に推定することが可能である。

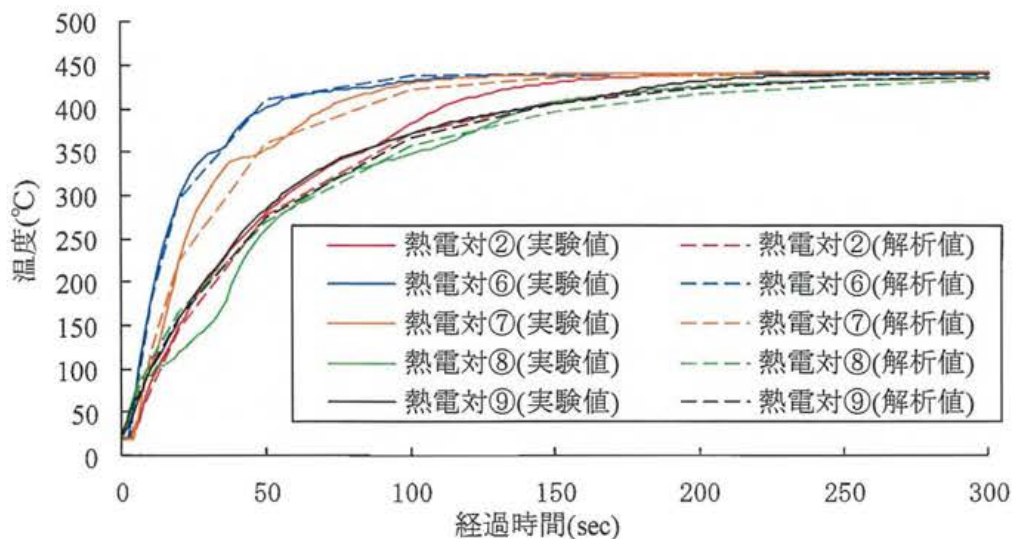


図3-3-4 めっき浸漬工程における実験値と解析値の温度履歴

熱伝導解析結果より、最大ひずみ発生時の実験体内の温度分布を図3-3-5に示す。図3-3-5より、H形鋼ウェブに設けためっき抜き孔では最大358(°C)であるのに対して、H形鋼フランジおよびPL16では最小159(°C)であるため、約200(°C)の温度差が生じていることが分かる。

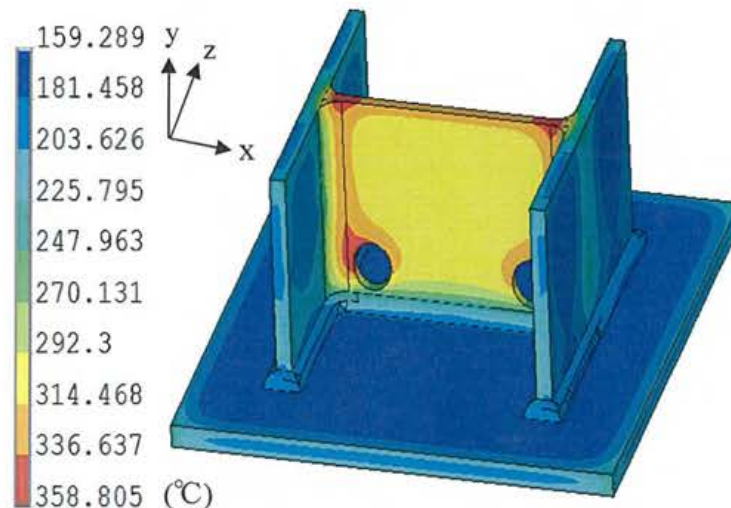


図3-3-5 y方向最大ひずみ発生時の温度分布図(浸漬開始20(sec)後)

(2)熱応力解析結果

めっき浸漬工程における実験値と解析値のひずみ履歴を図 3-3-6 に示す。図 3-3-6 より、ひずみゲージ①およびひずみゲージ②において、実験値と解析値の最大発生ひずみはほぼ一致していることが分かる。これらから、本研究の熱応力解析手法によって溶融亜鉛時に発生する最大ひずみを推定することが可能である。しかし、最大ひずみ発生以降において、解析値のひずみは約 0~80(μ)に収束しているのに対して、実験値では約 200~350(μ)の圧縮ひずみに収束している。これらの原因について明確に断定はできないが、可能性の一つとして、残留ひずみ測定結果から、めっき抜き孔周辺には平均 263~519(μ)、中央部では平均 66(μ)の引張ひずみによる残留ひずみが内在しているため、最大ひずみ発生以降のひずみの収束に影響したと思われる。

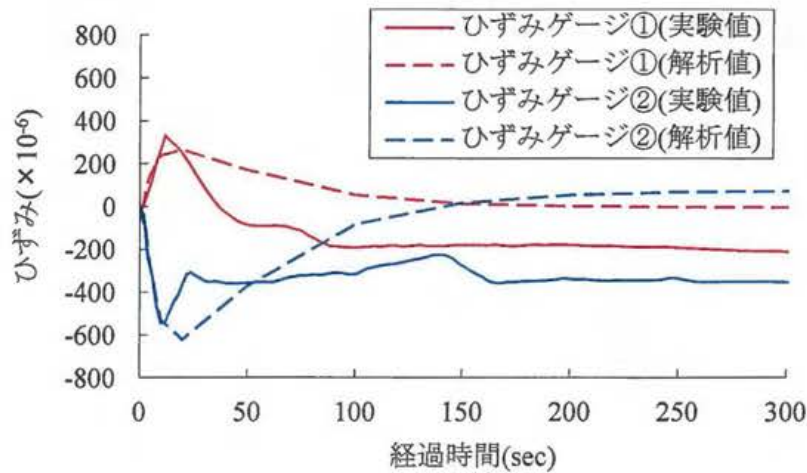


図 3-3-6 めっき浸漬工程における実験値と解析値のひずみ履歴曲線

浸漬実験によるひずみ測定結果は、2 点の情報のため熱応力解析結果より、最大ひずみ発生時の実験体内の y 方向のひずみ分布を図 3-3-7 に示す。図 3-3-7 より、めっき抜き孔周辺および H 形鋼のフィレット部に大きな圧縮ひずみが発生していることが分かる。また、H 形鋼フランジ部において、最大引張ひずみが発生しているが、めっき抜き孔周辺の最大圧縮ひずみに比べて、1/30 程度の小さなひずみであることが分かる。

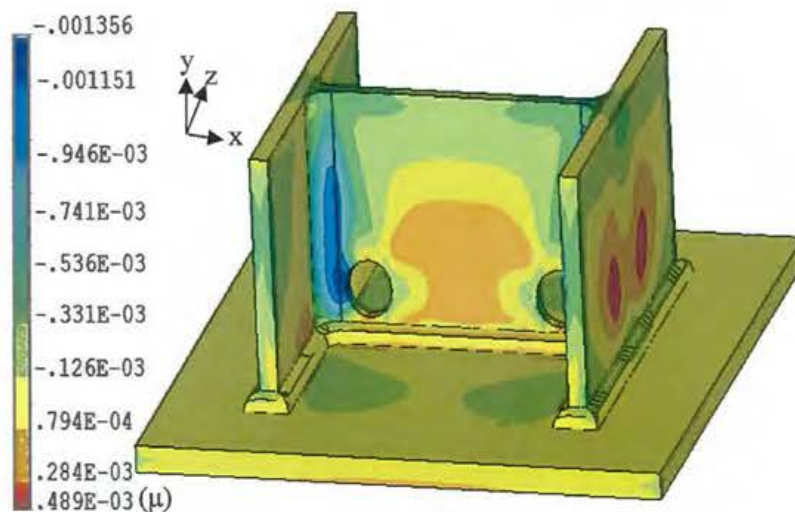


図 3-3-7 y 方向最大ひずみ発生時のひずみ分布図(浸漬開始 20(sec)後)

図 3-3-4 および図 3-3-6 より，板厚の薄い H 形鋼のウェブ部分は他の部分よりも温度上昇が早いことから，他の部位に比べて溶融亜鉛による熱影響により早期から膨張し，ひずみゲージ①では引張応力が発生する。また，その膨張が温度上昇の遅い H 形鋼のフィレットによって拘束されるためウェブ部分に拘束応力が発生すると考えられる。その際，ひずみゲージ②ではウェブ部分に設けためっき抜き孔による形状に起因して圧縮応力が発生すると推測される。

本浸漬実験では，y 方向のひずみのみ測定を行ったが，その他にも様々な方向および種類の応力が複雑に発生していると考えられる。そのため，本章では小山等¹⁾の研究を参考に Von Mises の相当応力値によって，めっき割れが生じ易い部位を推定する。熱応力解析結果より，最大相当応力発生時の実験体内の相当応力分布を図 3-3-8 に示す。図 3-3-8 より，最大相当応力は浸漬開始 4.15(sec)後に発生しており，y 方向の最大ひずみが発生した経過時間(浸漬開始 20(sec)後)とは異なることが分かる。また，めっき抜き孔を起点にして，溶接ビード方向に最大 $367(\text{N}/\text{mm}^2)$ の相当応力が発生していることが分かる。よって，これらの点がもっともめっき割れが生じ易い部位であると推測される。

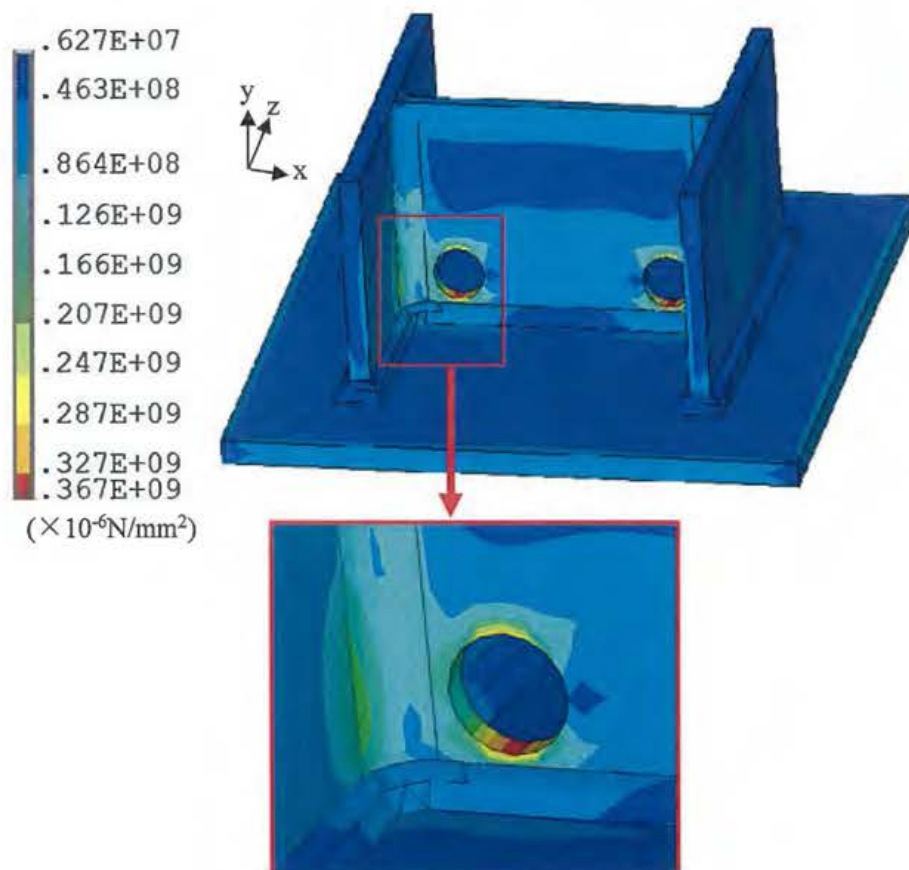


図 3-3-8 最大相当応力発生時の相当応力分布図(浸漬開始 4.15(sec)後)

3.4 めっき抜き孔の形状変化によるめっき割れ対策の解析的検討

これまで述べた3次元熱伝導－熱応力連成解析を用いて、実際にめっき割れが発生した溶融亜鉛めっきの施工事例から、めっき抜き孔を有するH形鋼構造物を解析モデルとして、溶融亜鉛めっき時に割れが生じにくいスカラップ工法およびノンスカラップ工法の構造ディテールについて検討する。

3.4.1 解析概要

(1)解析モデル

実際の溶融亜鉛めっきの施工事例から、図3-4-1示すダイアフラム(PL25×350×350(mm))とH形鋼(H300×300×10×15(mm))の交差部において、図3-4-2に示すようにスカラップ部近傍の溶接ビードおよびH形鋼のフィレット部にめっき割れが発生した。そこで、図3-4-1中の赤枠部分について4面体SOLID要素を用いて、図3-4-3に示すようなFEM解析モデルを作成した。また、実際の吊り条件を再現させるために、解析モデルの4箇所にはバネ要素を用いた拘束条件を設定した。H形鋼については、フランジ部分とウェブ部分の突合せにあるフィレット部分についてもモデル化を行い、溶接ビードについては省略した。

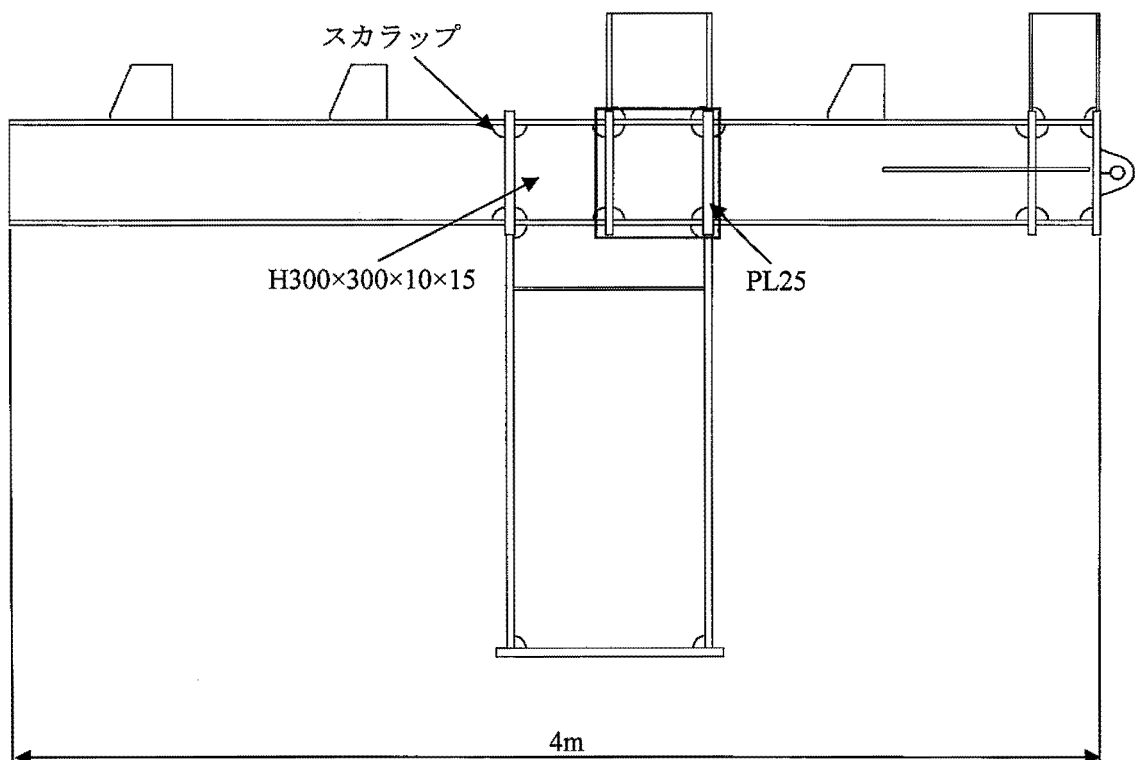


図3-4-1 モデル化部位



図3-4-2 スカラップ部のめっき割れ発生状況

本解析で用いる各モデルの着目部における構造詳細を表3-4-1に示す。モデルパターンは、JASS6(1996)²⁾を参考にしたR形状が異なる2種類のスカラップ工法(case1, 2), JASS6(2007)³⁾を参考にしたH形鋼の4隅に孔を設けたノンスカラップ工法(case3), およびH形鋼に孔を設けないノンスカラップ工法(case4)の計4種類とした。また、通常のH形鋼による柱材において、H形鋼にスカラップまたは孔が設けられている場合、ダイアフラムに孔を設けることは少ないが、各モデルパターンの条件を揃えるために、Case1~3においてもCase4と同じようにダイアフラムに孔を設けた。

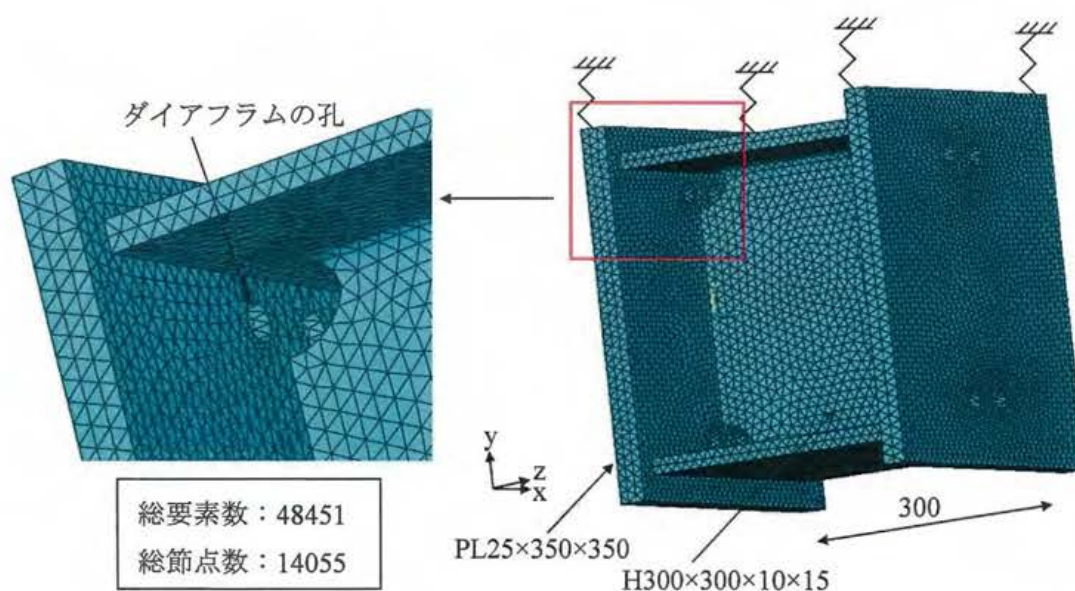

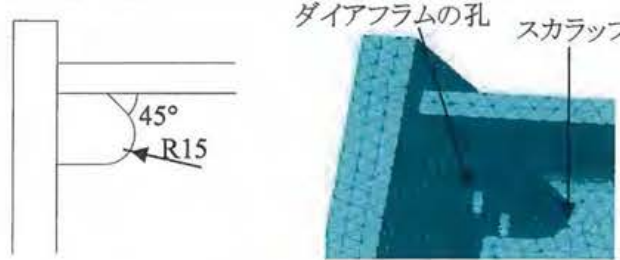

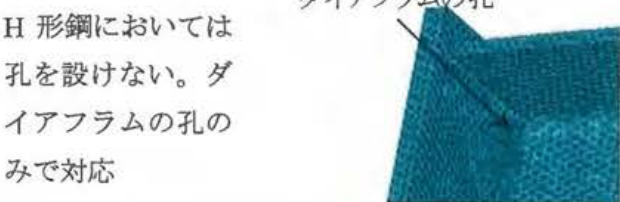


図3-4-3 H形鋼構造物のFEM解析モデル(mm)

表3-4-1 スカラップ有無しのモデルパターン

	亜鉛めっき抜き孔の形状	備考
Case1		文献 ²⁾ を参考にしたスカラップ
Case2		文献 ²⁾ を参考にしたスカラップ
Case3	 <p>溶接ビード 10(mm)+隙間 5(mm)</p>	文献 ³⁾ を参考にしたノンスカラップ
Case4	 <p>H形鋼においては孔を設けない。ダイアフラムの孔のみで対応</p>	H形鋼に孔を設けない形状

(2)解析方法

解析には、3.3 節で述べた 3 次元 FEM を用いた弾塑性熱応力解析を用いる。本解析上におけるめっき条件の設定については、実際のめっき条件を参考にして、熔融亜鉛温度 440(°C)、浸漬角度 15(°)、浸漬速度 5(m/min)、めっき浸漬前に予熱処理を施したとして部材初期温度 70(°C)と設定する。

本解析に用いた降伏点については、実際に使用した鋼材のミルシートに示されている値が常温時 359(N/mm²)であり文献⁵⁾を参考に温度依存性を考慮すると 500(°C)時 193(N/mm²)まで低下するとして、降伏点の温度依存性を考慮している。また、降伏点以降の接線係数についてはヤング率の 1/100 としている。その他の材料特性については、図 3-3-2 および表 3-3-2 に示すような温度依存性を考慮した材料特性値を適用する。

3.4.2 解析結果と考察

(1) 熱伝導解析結果

Case1~4 の熱伝導解析の結果の一例として、最大相当応力発生時の温度分布を図3-4-4~3-4-7に示す。図3-4-4より、H形鋼ウェブ部分の温度は172~268(°C)の範囲に分布しているのに対して、ダイアフラムおよびH形鋼のフィレット部分の温度は123~172(°C)の範囲に分布しており、約50~100(°C)の温度差が発生していることが分かる。これは、H形鋼のウェブ部分の板厚は10(mm)であるのに対して、ダイアフラムは25(mm)およびH形鋼のフィレット部分は厚い部分で最大46(mm)と板厚に差があるため、部材の温度上昇に差が発生したと考えられる。また、図3-4-5~3-4-7においても同様の温度分布傾向にあり大きな差はないと分かる。

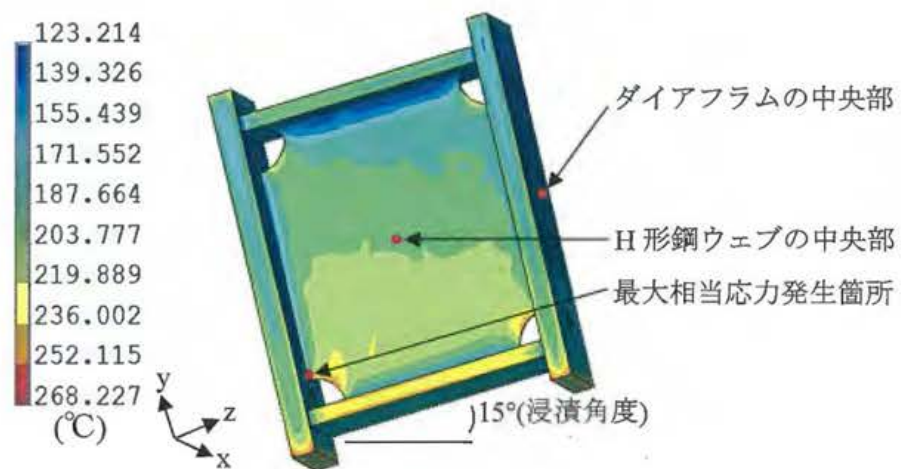


図3-4-4 Case1における最大相当応力発生時の温度分布図(浸漬開始10(sec)後)

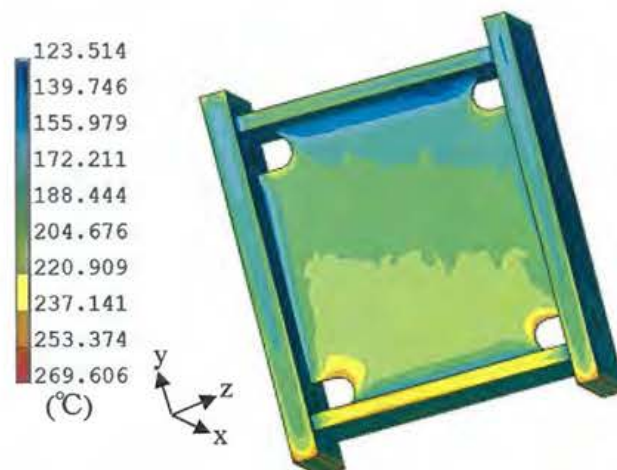


図3-4-5 Case2における最大相当応力発生時の温度分布図(浸漬開始10(sec)後)

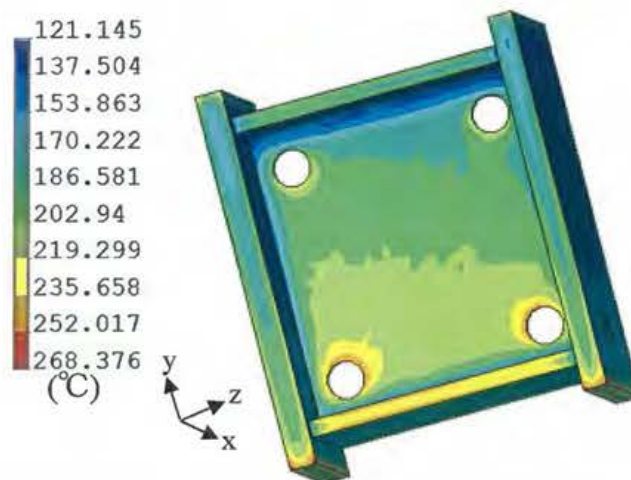


図3-4-6 Case3における最大相当応力発生時の温度分布図(浸漬開始10(sec)後)

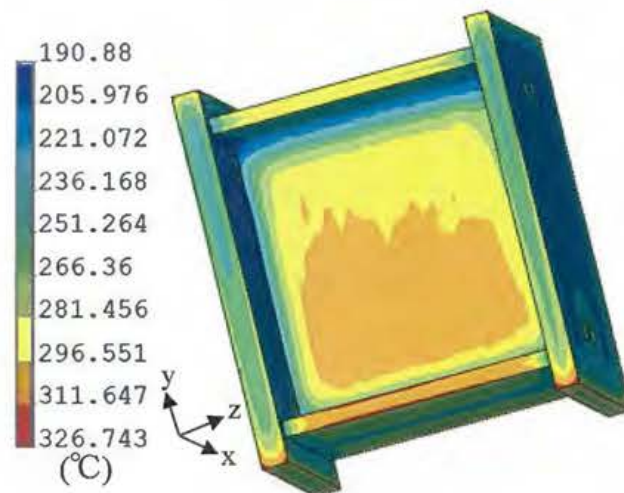


図3-4-7 Case4における最大相当応力発生時の温度分布図(浸漬開始20(sec)後)

Case1 の熱伝導解析の結果から、図 3-4-4 中に赤丸で示した H 形鋼ウェブの中央部、ダイアフラムの中央部および最大相当応力発生箇所の 3 点について、時刻毎の温度履歴曲線を図 3-4-8 に示す。なお、温度はモデルの表面温度で表示している。図 3-4-8 より、H 形鋼ウェブの中央部では浸漬開始約 120(sec)後に熔融亜鉛温度 440(°C)に達しているのに対して、ダイアフラムの中央部および最大相当応力発生箇所では浸漬開始約 200(sec)に熔融亜鉛温度 440(°C)に達しているため約 80(sec)の時間差がある。また、最大相当応力が発生した浸漬開始 10(sec)後において、最大相当応力発生箇所の温度は、H 形鋼ウェブの中央部よりも約 25(°C)低く、ダイアフラムの中央部よりも約 30(°C)高くなっており、部材内に温度差が生じていることが分かる。

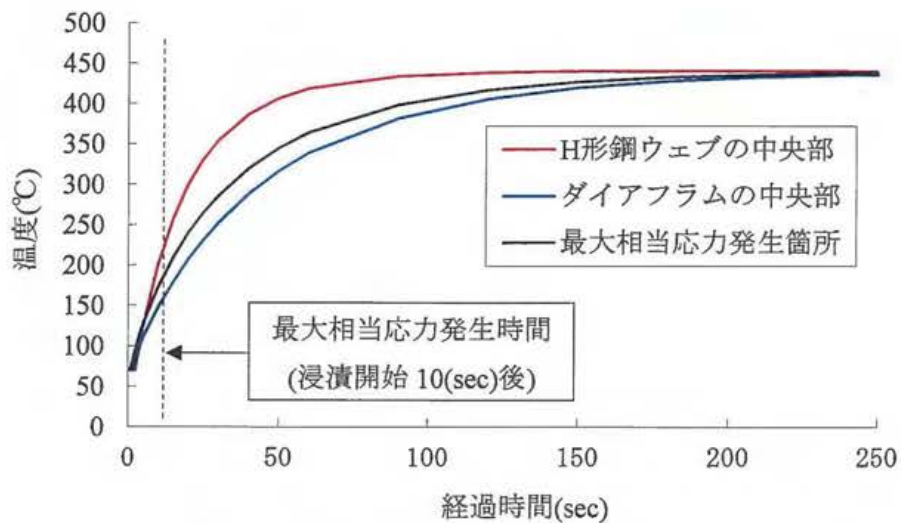


図 3-4-8 Case1 における部材内の温度履歴曲線

(2) 熱応力解析結果

溶融亜鉛めっきによるめっき割れは、様々な原因が考えられる。本章では、その中でも鋼構造物の部材形状に着目し、発生する応力の大きさからめっき割れの可能性について推定する。また、溶融亜鉛めっきを行うことで生じる応力は、様々な方向および種類の応力が複雑に発生していると考えられる。そのため、本章ではそれらの応力を考慮できる Von Mises の相当応力値によってめっき割れの可能性について推定する。

Case1の熱伝導－熱応力連成解析の結果から、最大相当応力発生時(浸漬開始10(sec)後)の全体の相当応力分布図を図3-4-9に示す。図3-4-9より、H形鋼のスカルップからフィレット方向およびダイアフラム方向の2箇所へ応力集中が発生していることが分かる。

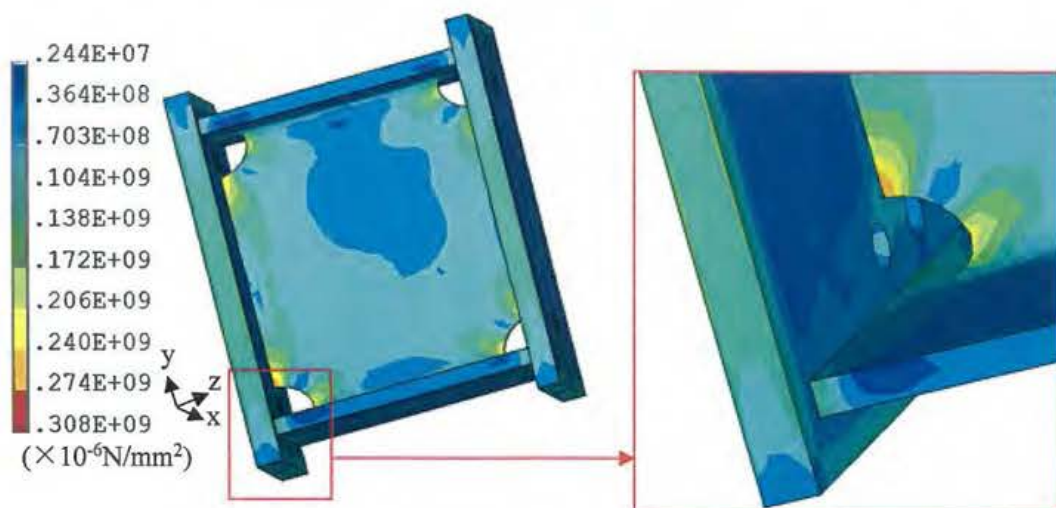


図3-4-9 Case1における最大相当応力発生時の相当応力分布図(浸漬開始10(sec)後)

Case2~4の熱伝導－弾塑性熱応力連成解析の結果から、最大相当応力発生時の全体の相当応力分布図を図3-4-10~3-4-12に示し、最大応力発生位置を赤枠で示す。図3-4-10および図3-4-11より、Case2およびCase3においてもCase1と同様にH形鋼のスカップまたは孔からフィレット方向およびダイアフラム方向へ高い相当応力が集中的に発生していることが分かる。ただし、Case3についてはCase1に比べて、最大相当応力値が、 $26(\text{N}/\text{mm}^2)$ 程度小さくなっていることが分かる。

図3-4-12より、Case4については、H形鋼のウェブの端部において、フィレットとダイアフラムの境目に最大 $257(\text{N}/\text{mm}^2)$ の相当応力が発生していることが分かる。また、Case4の最大相当応力値はCase1~3と比較して、最も小さい相当応力値であることが明らかになった。

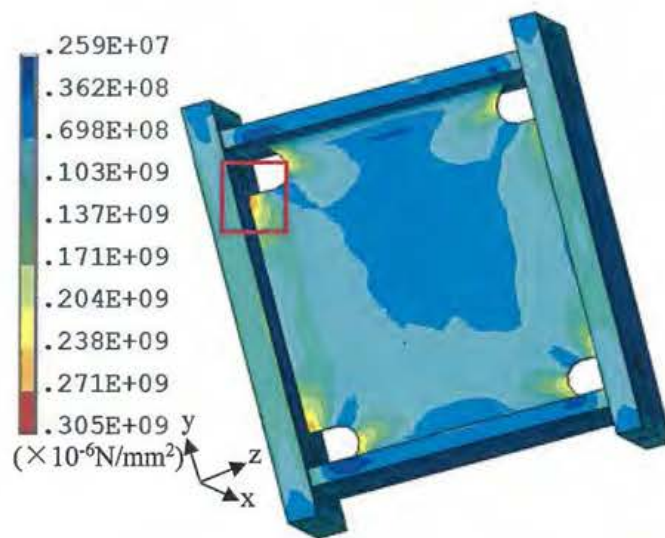


図 3-4-10 Case2 における最大相当応力発生時の相当応力分布図(浸漬開始 10(sec)後)

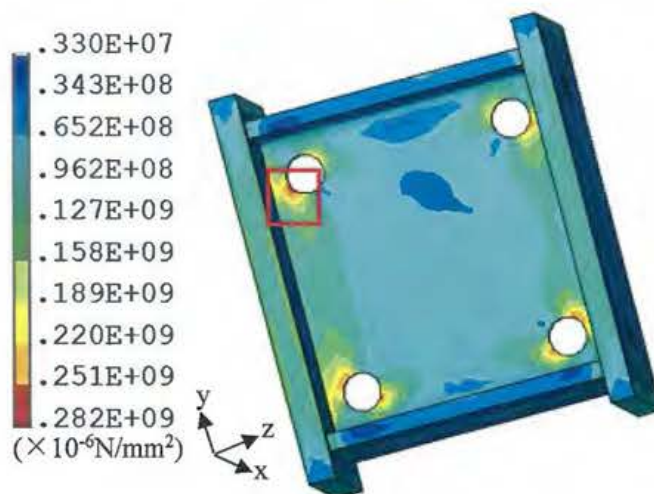


図 3-4-11 Case3 における最大相当応力発生時の相当応力分布図(浸漬開始 10(sec)後)

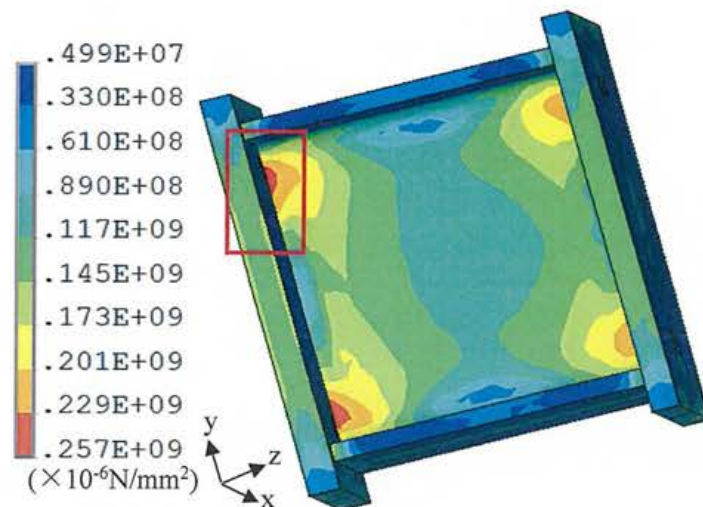


図 3-4-12 Case4 おける最大相当応力発生時の相当応力分布図(浸漬開始 20(sec)後)

図 3-4-13 は、Case1~4 の熱伝導－弾塑性熱応力連成解析の結果から、最大相当応力が発生した箇所について時刻歴毎の相当応力値を示す。縦軸が相当応力(N/mm²)、横軸は経過時間(sec)を表している。図 3-4-13 より、Case4 を除いた解析パターンにおいて浸漬開始から徐々に応力値が高くなり、浸漬開始 10(sec)後に最大相当応力が発生していることが分かる。最大相当応力発生以降は、徐々に応力が低下し、浸漬開始 240(sec)後において、応力がほぼ 0 に収束することが分かった。

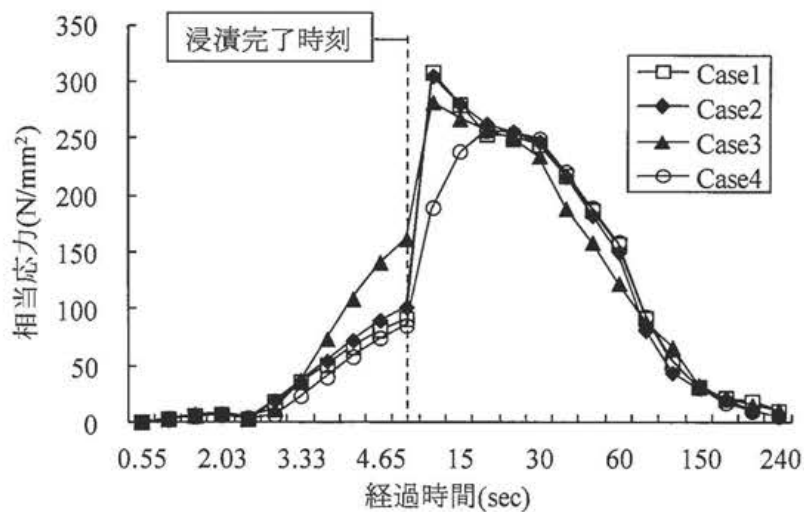


図 3-4-13 各解析パターンにおける最大相当応力発生箇所の相当応力履歴曲線

また、表 3-4-2 に各解析パターンの最大相当応力の一覧を示す。表 3-4-2 より、Case1 および Case2 について発生した応力の傾向は同様である。最大相当応力値は Case1 と Case2 で差がないことから、両者とも割れの発生する可能性は変わらない。また、Case3 について

も応力の発生傾向はCase1とCase2と同様であるが、応力値はCase1の応力値と比べて8.5(%)小さくなっていることから、鋼構造物の部材形状の観点から考えると、Case3の場合の方がめっき割れの発生する可能性が低いと考えられる。最後にCase4についても、その応力値はCase1の応力値と比べて16.6(%)小さくなっていることから、本解析条件においてはCase4の場合が最もめっき割れの発生する可能性が低いと考えられる。

表 3-4-2 各解析パターン毎の最大相当応力一覧

	最大相当応力値 (N/mm ²)	Case1 との応力比	最大相当応力発生箇所
Case1	308 (浸漬開始 10(sec)後)	—	スカラップの端部よりダイア フラム方向へ最大相当応力が 発生
Case2	305 (浸漬開始 10(sec)後)	1.0(%) 減少	スカラップの端部よりダイア フラム方向へ最大相当応力が 発生
Case3	282 (浸漬開始 10(sec)後)	8.5(%) 減少	ウェブの孔よりダイアフラム 方向へ最大相当応力が発生
Case4	257 (浸漬開始 20(sec)後)	16.6(%) 減少	ウェブの端部のフィレットと ダイアフラムの境目において 最大相当応力が発生

以上より、板厚の薄い H 形鋼のウェブ部分は他の部分よりも温度上昇が早いことから、他の部位に比べて溶融亜鉛による熱影響により早期から膨張するが、その膨張が温度上昇の遅い H 形鋼のフィレットやフランジおよびダイアフラムに拘束されるためウェブ部分に拘束応力が発生すると考えられる。その際、ウェブ部分にスカラップや孔が設けられている場合、形状に起因して応力集中が発生する。そのため、Case1 や Case2 のスカラップ工法の場合、H 形鋼のウェブに角部があるため高い応力が発生し易くなる。一方、Case3 の孔を設けたノンスカップ工法の場合では、角部がなく滑らかな R 形状であるため発生した応力が分散し、発生応力が低減したと考えられる。

図 3-4-9~3-4-12 に示すように最大相当応力の発生位置は、各解析パターンによって異なる。よって、各解析パターンの最大相当応力値のみでは、溶融亜鉛めっきによる割れが発生する可能性について評価しにくいと思われる。そのため、Case1~4 の熱伝導-弾塑性熱応力連成解析の結果から、図 3-4-14 に示す各解析パターンのダイアフラムに設けた孔の下端について、時刻歴毎の相当応力値を図 3-4-15 に示す。縦軸が相当応力(N/mm²)、横軸は経過時間(sec)を表している。図 3-4-15 より、図 3-4-13 と比較していずれの解析パターンにおいても、

ダイアフラムに設けた孔に発生する相当応力は、H 形鋼に発生する最大相当応力に比べて小さい応力値であると分かる。また、図 3-4-13 の場合は Case1~3 の解析パターンにおいて浸漬開始 10(sec)後に最大相当応力が発生しているが、図 3-4-15 の場合は浸漬開始 15(sec) 後と若干異なる結果となった。図 3-4-15 における各解析パターンの最大相当応力値については、Case1 および Case2 について発生した相当応力の傾向は同様であり、Case3 はそれらより小さい相当応力値となっている。また、Case4 が最も小さい相当応力値であることが分かる。以上より、鋼構造物の部材形状による溶融亜鉛めっきによる割れが発生する可能性については、表 3-4-2 に示す各解析パターン毎の最大相当応力値について検討した結果と同様であることが分かる。

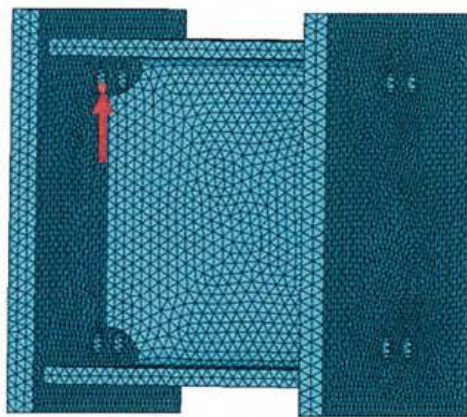


図 3-4-14 ダイアフラムに設けた孔の相当応力の着目箇所

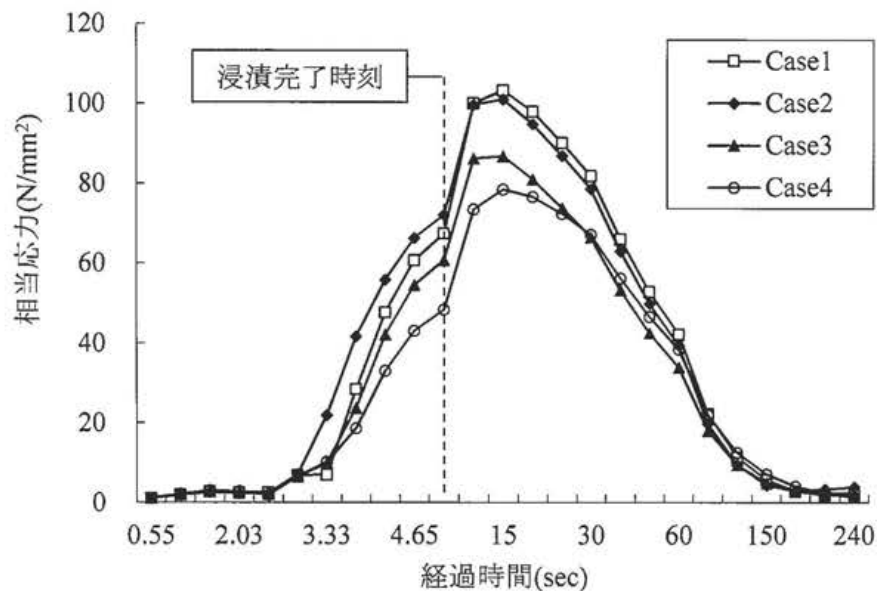


図 3-4-15 各解析パターンにおけるダイアフラムに設けた孔の相当応力の履歴曲線

図3-4-16は、Case1の熱伝導－弾塑性熱応力連成解析の結果から、最大相当応力発生時の相当塑性ひずみ分布を示す。図3-4-16より、H形鋼ウェブの隅に設けたスカロップにおいて(図中の赤丸位置)塑性ひずみが確認できることから、その部分のみ、残留ひずみとして残る可能性がある。よって、溶融亜鉛浸漬による熱応力算定については、弾性解析よりも弾塑性解析の方が有効である。

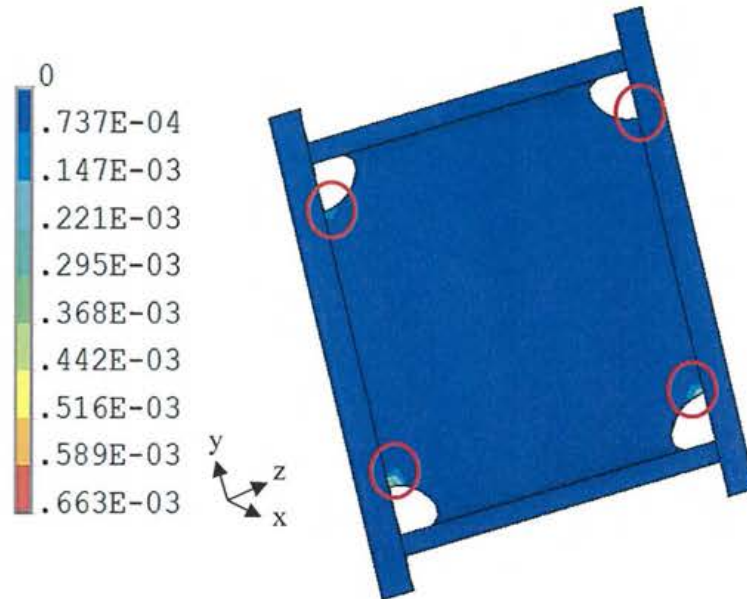


図 3-4-16 Case1 における最大相当応力発生時の相当塑性ひずみ分布図

3.5 結論

3.5.1 熔融亜鉛浸漬実験および3次元熱伝導－弾塑性熱応力連成解析について

本章では、柱梁仕口部のめっき割れに着目し、めっき抜き孔を有するH形鋼構造物を実験体として浸漬実験を行い、浸漬実験によるひずみ測定結果と3次元FEMによる熱伝導－弾塑性熱応力連成解析によるひずみ解析結果を比較した。以下に得られた結果を示す。

- 1) めっき抜き孔近傍には実験体中央部に発生する引張りひずみよりも大きな圧縮ひずみが発生し、その値は中央部の1.6倍程度であった。
- 2) 残留ひずみの測定結果より、めっき抜き孔近傍の残留ひずみは、実験体中央部の残留ひずみよりも大きく、その値は中央部の4～8倍程度であった。
- 3) 浸漬実験より得られたひずみ履歴曲線は、最大ひずみ発生以降は急激に減少し、約150～250(μ)の圧縮ひずみに収束した。その原因については実験体内に内在していた残留ひずみが影響しているものと推測される。
- 4) 3次元FEMを用いた熱伝導－熱応力連成解析より求めたひずみ履歴曲線の解析値を実験値と比較した結果、最大ひずみまでの挙動はほぼ一致した。ただし、解析において最大ひずみ発生以降のひずみ挙動は、緩やかに減少し、実験結果と幾分異なる傾向になった。
- 5) 3次元FEMによる熱伝導－熱応力連成解析の応力分布図から、熔融亜鉛めっき時において、めっき抜き孔から溶接ビード方向に高い相当応力が集中的に発生している。これが、実際のめっき割れが生じやすい部位である可能性がある。

3.5.2 めっき割れが生じにくい構造ディテール検討について

めっき割れ対策の解析的検討として、ダイアフラムを有するH形鋼構造物を取上げて、スカラップの構造形状に着目し、めっき割れが生じにくい構造ディテールについて検討した。以下に得られた結果を示す。

- 6) 本構造では、H形鋼ウェブの4隅にスカラップを設けた場合と孔を設けた場合を比較すると、孔を設けたノンスカラップ工法の方がめっき割れの発生を低減できることが分かった。なお、スカラップ工法の場合は、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、その位置においてめっき割れの可能性が高いことが解析上明らかになった。
- 7) 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ノンスカラップ工法の方が、最大相当応力値が小さくなり、めっき割れ発生の可能性を低減できることが分かった。

このように、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に着目し、溶融亜鉛めっき時に割れが生じにくいスカラップ工法およびノンスカラップ工法の構造ディテールについて検討した。さらに次章では、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割れ対策について、浸漬実験および3次元FEMによる熱伝導－弾塑性熱応力連成解析によって、めっき割れが生じにくい構造形状およびめっき作業条件を検討する。

参考文献

- 1) 小山明久, 岩崎雅紀, 永田晋, 直原明: 鉄骨柱仕口スカップの溶融亜鉛めっき割れに関する検討, 溶接学会論文集, 第 22 巻, 第 3 号, pp.435-442, 2004.
- 2) 一般社団法人日本建築学会: 鉄骨工事技術指針ー工場製作編, p.437, 1996.
- 3) 一般社団法人日本建築学会: 鉄骨工事技術指針ー工場製作編, p.594, 2007.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 一般社団法人日本規格協会: JIS G 3129 鉄塔用高張力鋼鋼材, p.2, 2005.