

梁端ウェブ接合部に発生する溶融亜鉛脆化割れに関する研究

- その1 小型モデル試験体を用いた溶融亜鉛脆化割れの再現実験 -

正会員 ○山下 達雄^{*1} 同 西澤 淳^{*1} 同 田中 剛^{*2}
同 浅田 勇人^{*2} 同 高倉 正幸^{*3} 同 古館 岳実^{*4}

溶融亜鉛脆化割れ 溶融亜鉛めっき 梁端ウェブ接合部
ウェブ円形孔 熱応力 小型モデル試験体

1. はじめに

鉄骨部材の溶融亜鉛めっき施工において、溶融亜鉛脆化割れ（以下、めっき割れと称す）が梁端ウェブ接合部に加工した空気・亜鉛抜き用の円形孔またはスカラップの切削面から発生し、伝播することが稀に認められる。稀に発生するこのめっき割れについての研究資料は非常に少なく、発生メカニズムの解明も不十分であり、具体的な防止対策の提示も行われていない状況にある。

そこで本研究では、めっき割れの発生メカニズムを検討し、各種要因によるめっき割れ発生境界条件を明らかにし、定量的、具体的な防止対策を提示することを目的に実験および解析を行った。本研究では、小型モデル試験体を用いて、めっき割れを再現し、評価する方法を提案し、その提案内容の適否を確認する予備実験、めっき割れに影響を及ぼすと想定される各種要因の影響を確認する応用実験、有限要素解析を用いた熱伝導・熱応力解析およびめっき割れ発生位置の金属学的な組織観察の4項目を行った。本報では予備実験および組織観察の結果を報告する。

2. 実験計画

めっき割れの再現確認試験に使用した梁端ウェブ接合部を模した小型モデル試験体の形状・寸法・隅肉溶接サイズを図1に示す。試験体は、四隅に24φ孔をドリル加工した9mmのウェブを模した鋼板を、12, 14, 16, 19, 22, 25, 28, 32, 36, 40mm厚の柱・梁フランジを模した鋼板で四辺を囲った形状である。四隅のドリル孔はウェブ切断縁と孔縁の間隔が10mmになる位置に配置した。ウェブは鋼種SN490Bの高炉材を使用した。鋼材の機械的性質と化学成分を表1に示す。試験鋼材は一般的に市販されている標準的な材質であり、Ceqは0.42%, CEZは0.38%である。

T継手の隅肉溶接は、1.4mmφフラックス入りワイヤを用い、炭酸ガスシールドアーク溶接法で施工した。特にウェブ・フランジ間の隅肉溶接は、ウェブ側のサイズを6mmに目標設定し、溶接入熱の目標を14～15kJ/cmの範

囲に管理して施工した。なお、ウェブ側の溶接止端とドリル孔縁間の距離は概ね3～5mmの範囲となる。四隅部の溶接後外観の例を写真1に示す。

試験体の溶融亜鉛めっき工程は、柱部材の実際の施工において発生する可能性を想定し、過酷な施工条件を設定した。めっき浴槽の温度を比較的高めの445℃を目標に設定

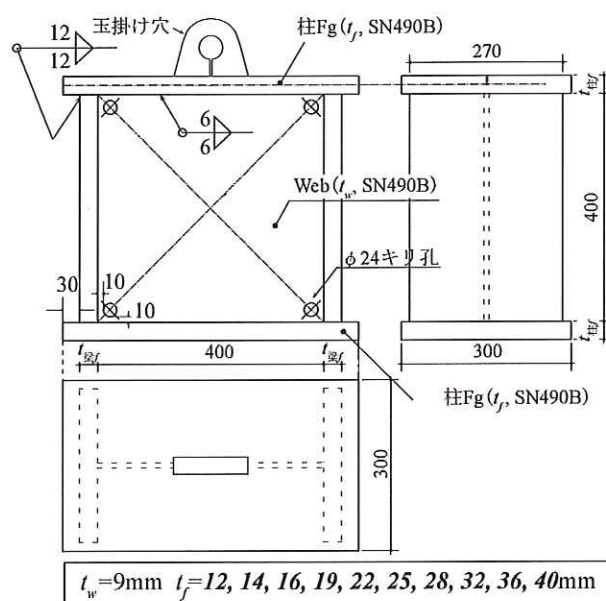


図1 試験体形状



写真1 隅角部の溶接後外観の例

表1 ウェブの機械的性質と化学成分

引張試験			化学成分 (%)									
降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Ceq	(CEZ)
375	524	29	0.16	0.34	1.43	0.014	0.005	0.01	0.03	0.01	0.42	0.38

Study on Liquid Metal Assisted Cracking at Welded Web Connection Caused by Hot-dip Galvanizing

-Part 1: Validation of Small-scale Model Experiments-

YAMASHITA Tatsuo, NISHIZAWA Jun, TANAKA Tsuyoshi, ASADA Hayato, TAKAKURA Masayuki and HURUDATE Takemi

表2 めっき抜き孔における割れ発生数

フランジ厚 t_f (mm)	12	14	16	19	22	25	28	32	36	40
割れ No.1	0	0	1	0	0	4	4	4	4	4
箇所数 No.2	0	0	0	1	0	4	4	4	4	4

し、浸漬・引上げ速度を施工可能な最も遅い0.5m/min.に設定し、浸漬時間を比較的長い8分とした。なお、試験体の浸漬・引上げは、通常のめっき施工と異なり、温度変化に及ぼす要因を減ずるため、試験体を水平に保持した状態で施工した。

めっき施工後のめっき割れの検出は、目視及び磁粉探傷試験を併用して行った。

3. 実験結果

小型モデル試験体を用いて行っためっき割れ再現実験の結果を表2に示す。また、磁粉探傷試験で検出しためっき割れの例を写真2に示す。ウェブ厚を9mmと一定にした本実験では、フランジ厚が16および19mmの場合で、四隅の円形孔のうち1箇所ではめっき割れが発生し、フランジ厚が25mm以上の25, 28, 32, 36, 40mmの場合では、四隅のめっき抜き孔の全箇所ではめっき割れが発生した。また、発生した全てのめっき割れが、めっき抜き孔切削面のほぼ同位置を起点に、同一方向に伝播していること、また、割れが発生するめっき抜き孔についてはそれらの上下・左右方向位置との間に相関がみられないことを確認した。めっき割れ発生起点と伝播方向の模式図を図2に示す。発生起点は、ウェブの対角線直交方向の切削縁であり、伝播方向も同一方向である。

実験結果から、めっき割れが薄板ウェブと厚板フランジ間の板厚差からめっき浸漬中に発生する熱応力を主要因として発生すると推定した。因みに、めっき浸漬中のめっき割れ発生位置における引張応力は、厚板と薄板によって構成される接合部における薄板側であるウェブが先行膨張し、圧縮塑性ひずみを生成し、その後、厚板側であるフランジの後行膨張によって引っ張られ、圧縮塑性ひずみ量に応じて負荷されるものと推測される。この割れ発生位置での応力発生機構の考え方は、橋梁溶接部を対象とした過去のめっき割れ再現実験での結果とほぼ同じである。

4. 考察

めっき割れの性状・発生機構を明らかにし、めっき浸漬初期段階に生成される圧縮塑性ひずみがめっき割れ発生に及ぼす影響を調査することを目的とし、めっき割れ破面の走査電子顕微鏡 (SEM) 観察、3方向 (板表面・切削面・破面) ミクロ組織観察、SEM断面観察、元素マッピング分析およびEBSDによる結晶方位測定を行った。めっき割れ先端のSEMによる観察結果の例を写真3に、元素マッピング分析結果の例を写真4に示す。観察および分析

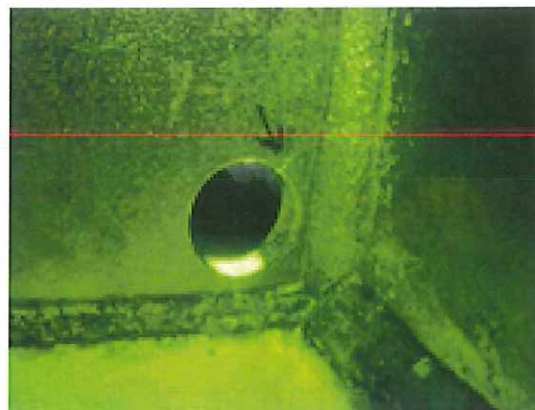


写真2 磁粉探傷試験による割れ検出

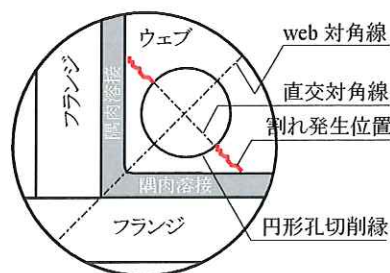


図2 割れ伝播の模式図

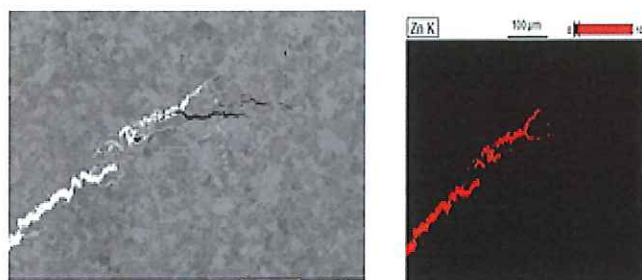


写真3 SEMによる割れ観察 写真4 割れ内部のZnの分布

の結果から、割れは鋼中の結晶粒界を伝播し、その割れ内部に亜鉛が侵入していることを確認した。この結果は、鋼の溶接熱影響部に発生するめっき割れの観察結果と同じであり、本実験で鋼材に発生しためっき割れも、めっき浸漬中に発生する液体金属脆化割れの一種である溶融亜鉛脆化割れであると推定できる。この割れは引張応力が鋼の結晶粒界に作用し、亜鉛が結晶粒界に拡散浸透することを加速し、その両者が相互作用し、結晶粒界が乖離する現象と考えられている。ただ、圧縮塑性ひずみがめっき割れに及ぼす影響については、結晶方位測定やひずみ分布の最新の解析技術を用いても、現状では明らかにすることはできなかった。

5. まとめ

梁端ウェブ接合部に発生する可能性があるめっき割れの再現・評価実験を確立することができた。

*1 (株) 角藤・鉄構事業部
*2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻
*3 清水建設 (株) (元 神戸大学大学院生)
*4 ジャスト (株)

KAKUTO Corporation, Steel Structures Div.
Dept. of Architecture, Kobe Univ.
Shimizu Corporation, (Former graduate student at Kobe Univ.)
JUST Corporation

梁端ウェブ接合部に発生する溶融亜鉛脆化割れに関する研究

- その2 溶融亜鉛脆化割れに及ぼす影響因子の検討 -

正会員 ○西澤 淳^{*1} 同 山下 達雄^{*1} 同 田中 剛^{*2}
同 浅田 勇人^{*2} 同 高倉 正幸^{*3} 同 古館 岳実^{*4}

溶融亜鉛脆化割れ 溶融亜鉛めっき 梁端ウェブ接合部
ウェブ円形孔 熱応力 小型モデル試験体

1. はじめに

前報(その1)では小型モデル試験体を用いて、めっき割れを再現できることを確認した。本報(その2)ではその方法を用いて、めっき割れに影響を与えると想定される各種因子を変数に実験を行い、その影響を考察する。

2. 実験計画

試験体の一覧を表1に示す。前報(その1)のシリーズ1を基本形状とし、実験変数はウェブの板厚、めっき抜き孔の位置、めっき抜き孔径、めっき孔周りの加熱処理(ガス加工)の有無および方法、スカラップとめっき抜き孔の違い、隅肉溶接のサイズ、ウェブの材質および鋼板溶接組立とロール成形H形鋼の違い、とした。基本タイプとしたシリーズ1ではウェブ厚を9mm、めっき抜き孔位置をウェブ側隅肉溶接止端から孔縁までの距離 L を4mm、めっき抜き孔径を24mm、めっき抜き孔周りの加熱なし、フランジとウェブの隅肉溶接のサイズを6mmとした。シリーズ1ではこれらを一定としてフランジの板厚を12~40mmまで変化させている。シリーズ2および3では、ウェブ厚を変数とし12mmおよび14mmとした。シリーズ5および6はウェブの材質を変数とし、シリーズ5ではウェブに高炉材のSS400材を用い、シリーズ6では電炉材のSN490B材を用いた。シリーズ7および8(図1(a),(b))ではめっき抜き孔の位置を変数とし、シリーズ7では隅肉溶接のウェブ側止端と孔縁の距離 L を9mmとし、シリー

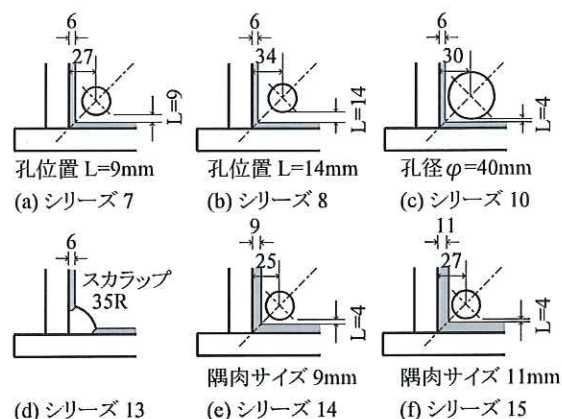


図1 めっき抜き孔近傍の詳細

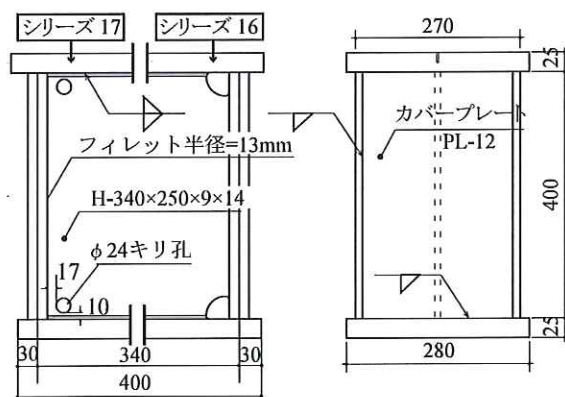


図2 シリーズ17(16) H形鋼試験体の形状

表1 試験体一覧

シリーズ	ウェブ		めっき抜き孔・スカラップ			隅肉 サイズ S[mmm]	フランジ厚・試験体数N (複数の場合はそれぞれ No.1 および No.2 と呼ぶ) t _f [mm]											
	板厚 t _w [mm]	鋼種	孔径 φ [mm]	位 置 L[mm]	加熱		12	14	16	19	22	25	28	32	36	40		
1	9	高炉材	SN490B	24	4	無	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
2	12							-	-	1	1	1	1	-	1	1	1	
3	14							-	-	1	1	1	1	-	1	1	1	
5	9		SS400					-	1	1	1	1	1	1	-	-		
6		電炉材						-	2	2	2	1	-	-	-	-		
7		高炉材						9	-	-	1	2	2	2	-	-	-	
8								14	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-
10							40	-	1	1	1	1	1	1	1	-	-	
11							24	-	1	2	2	2	-	-	-	-	-	
12			SN490B					-	2	2	2	1	-	-	-	-	-	
13				スカラップ	—	無	9	2	2	2	1	1	1	-	-	-	-	
14				24	4			11	1	1	1	2	1	1	-	-	-	-
15			スカラップ	—	-			-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	
16			高炉材 H 形鋼					-	-	1	1	2	2	1	-	-	-	-
17				24	4	-	-	1	1	2	2	1	-	-	-	-	-	

Study on Liquid Metal Assisted Cracking at Welded Web Connection Caused by Hot-dip Galvanizing

- Part2: Experimental Investigations of Various Factors on LMAC -

NISHIZAWA Jun, YAMASHITA Tatsuo, TANAKA Tsuyoshi, ASADA Hayato, TAKAKURA Masayuki and HURUDATE Takemi

ズ8では14mmとした。シリーズ10では、めっき抜き孔径を40mmとしている(図1(c))。シリーズ11および12ではめっき抜き孔のガス加工を想定して、孔周辺の加熱を行っている。シリーズ11では850℃まで加熱した後空冷とし、シリーズ12では850℃まで加熱した直後に水冷した。シリーズ13ではめっき抜き孔の代わりにスカラップを設けた。スカラップは半径35mmの1/4円とし、スカラップ底にはまわし溶接を行った(図1(d))。シリーズ14および15ではフランジとウェブの隅肉溶接サイズを9mmと11mm(図1(e), (f))とした。めっき抜き孔縁と隅肉溶接のウェブ側止端までの距離 L は、標準試験体と同一の4mmとした。シリーズ16および17では、図2に示すとおり鋼板組立てではなく、ロール成形H形鋼を用いた。H形鋼はH-340×250×9×14とし、上下および左右のフランジ厚を揃えるため、H形鋼フランジ外面に2.3~19mmの鋼板を隅肉溶接で取り付けた。めっき抜き孔縁とフィレット先端までの距離 L は4mmとした。スカラップ形状は標準的な複合円型とした。全試験体の製作および溶融亜鉛めっきは(その1)と同様の条件で行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 ウェブ板厚の影響(シリーズ2, 3)

割れ発生箇所数を表2に示す。ウェブ厚を9mmとしたシリーズ1ではフランジが厚くなるほど割れが発生しやすい傾向が見られたのに対し、シリーズ2および3では、

表2 割れ発生箇所数

シリーズ	試験体 No	フランジ板厚(mm)									
		12	14	16	19	22	25	28	32	36	40
1	No.1	0	0	1	0	0	4	4	4	4	4
	No.2	0	0	0	1	0	4	4	4	4	4
2	No.1	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0
3	No.1	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0
5	No.1	-	0	0	0	0	0	0	0	-	-
6	No.1	-	0	1	2	2	-	-	-	-	-
	No.2	-	0	0	0	-	-	-	-	-	-
7	No.1	-	-	0	0	1	2	-	-	-	-
	No.2	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-
8	No.1	-	-	-	0	0	0	0	-	-	-
	No.2	-	-	-	0	0	0	0	-	-	-
10	No.1	-	0	0	0	0	0	0	0	-	-
11	No.1	-	0	0	0	2	-	-	-	-	-
	No.2	-	-	0	0	0	-	-	-	-	-
12	No.1	-	0	1	0	2	-	-	-	-	-
	No.2	-	0	0	0	-	-	-	-	-	-
13	No.1	0	2	4	4	4	4	-	-	-	-
	No.2	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-
14	No.1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
	No.2	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-
15	No.1	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-
	No.2	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-
16	No.1	-	1	2	3	4	-	-	-	-	-
17	No.1	-	0	0	0	2	-	-	-	-	-
	No.2	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-

*1 (株) 角藤・鉄構事業部

*2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

*3 清水建設(株)(元 神戸大学大学院生)・修士(工)

*4 ジャスト(株)

シリーズ1で割れが発生したフランジ厚以上でも、割れが発生していない。

3.2 ウェブの材質の影響(シリーズ5, 6)

ウェブの材質を高炉材のSS400とした試験体は、1体も割れは発生しなかったが、電炉材とした場合は1回目の実験ではフランジの板厚16mm以上の試験体で割れが観察され、2回目の実験では割れは発生しなかった。

3.3 めっき抜き孔位置の影響(シリーズ7, 8)

めっき抜き孔位置 L を標準の4mmとした場合に対して、9mmとしたものはフランジ板厚が16, 19mmのとき割れは発生しなかったが、22および25mmのときは割れが発生した。 L を14mmとした場合は、19, 22, 25および28mmのいずれでも割れは発生しなかった。

3.4 めっき抜き孔の直径の影響(シリーズ10)

めっき抜き孔径を標準24φに対して、40φと大きくした場合ではフランジ板厚が14~32mmのいずれでも割れは発生しなかった。

3.5 加熱の影響(シリーズ11, 12)

加熱空冷の場合では、1回目の実験ではフランジ厚が22mmのときに割れが発生したが、2回目の実験では22mmでも割れは発生しなかった。加熱後直ちに水冷した場合では1回目の実験では16mmと22mmで割れが発生したが、2回目では全てのフランジ厚で割れは発生しなかった。

3.6 スカラップとめっき抜き孔の比較(シリーズ13)

めっき抜き孔の代わりにスカラップとした場合では、1回目の実験ではフランジ板厚が12mmで割れは発生しなかったが、14~25mmの全ての試験体で割れが発生した。2回目の実験では16mmでも割れは発生しなかった。

3.7 隅肉溶接のサイズの影響(14, 15)

隅肉溶接のサイズを9mmおよび11mmと大きくした試験体では割れは発生しなかった。

3.8 H形鋼の場合(シリーズ16, 17)

めっき抜き孔とした場合では1回目の実験ではフランジ厚が22mmのみで割れが発生した。2回目の実験では全ての試験体で割れは発生しなかった。一方、スカラップとした試験体ではフランジ厚が16~22mmの全ての試験体でフィレット側に割れが発生した。

4. まとめ

本実験の結果を以下にまとめる。

(1) めっき割れに影響すると思われる各種因子を変化させた場合にも、フランジの板厚が大きいほうが、割れが発生しやすい傾向が見られた。

(2) 各因子とめっき割れの関係は、実験にばらつきが大きく明確な関係は見られなかった。今後、さらに試験体数を増やし、各因子の影響を明らかにするとともにばらつきの原因についても調査する予定である。

KAKUTO Corporation, Steel Structures Div.

Dept. of Architecture, Kobe Univ.

Shimizu Corporation, (Former graduate student at Kobe Univ.)

JUST Corporation

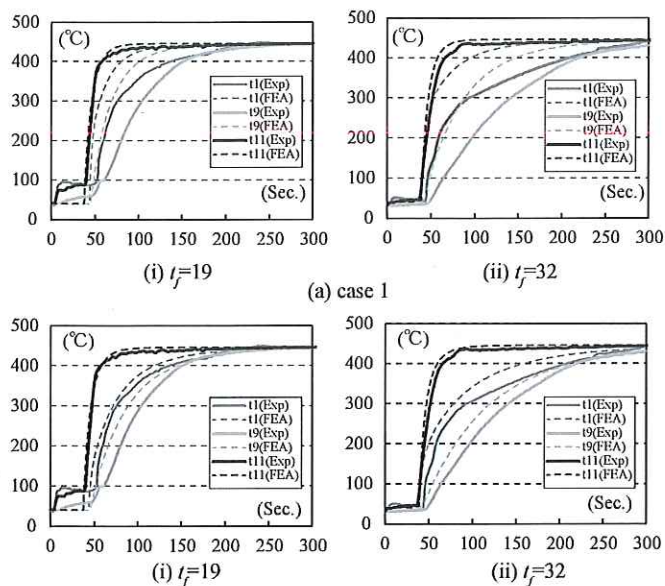


図3 温度履歴 (実験・解析)

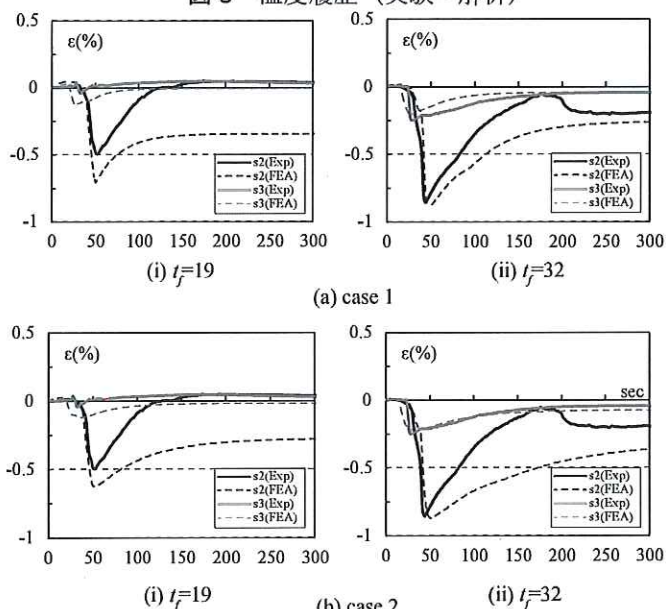


図4 歪履歴 (実験・解析)

図6および図7に示すとおり温度依存性を考慮している。線膨張係数およびポアソン比は温度によらずそれぞれ $1.2 \times 10^{-5} (1/^\circ\text{C})$ および 0.3 と一定とした。塑性域における構成方程式は、von Mises の降伏条件、連合流れ則および等方硬化則に従うものとした。解析には汎用有限要素解析プログラム (ABAQUS ver6.9) を用いる。

3.2 解析結果

温度履歴の解析値と実験値の比較を図3に示す。フランジ厚にかかわらず、ウェブ中央付近における解析値と実験値は良い対応を示す。めっき抜き孔近傍およびフランジについても、熱伝達率の異なる両ケースとも、 t_f の違いによる温度上昇の傾向は概ね捉えられているが、熱伝達率を全領域で同一とした case1 では、解析値の方が実験値に比

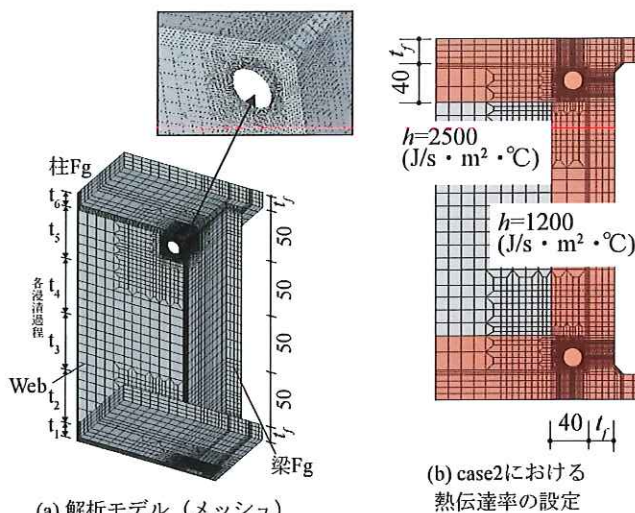


図5 解析モデル

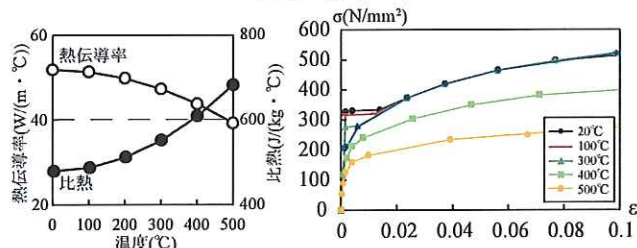


図6 熱物性

図7 応力-歪関係

べて、温度上昇速度が早くなっている。これは、実験における隅角部では、熔融亜鉛温度の低下により、鋼板に固体亜鉛の付着が生じたためと考えられる。一方で、フランジおよびフランジ近傍のウェブの熱伝達率を小さくした case2 ではめっき抜き孔近傍およびフランジのいずれも解析値と実験値の対応は良くなっている。

歪履歴の解析値と実験値の比較を図4に示す。解析値はウェブ中央およびめっき抜き孔近傍の歪履歴の傾向を概ね捉えられている。めっき抜き孔近傍のウェブに生じる最大圧縮歪の値は、 $t_f=19\text{mm}$ の場合で若干過大評価するが、 $t_f=32\text{mm}$ では両ケースとも良い対応を示す。その後の歪の減少挙動は、解析値が実験値に比べて緩やかである。熱伝達率の設定による違いで比較すると、温度履歴に比べて、熱伝達率の設定が歪履歴の再現性に与える影響は小さいと言える。

4. まとめ

めっき浸漬実験および熱伝導・熱応力解析を行い、めっき浸漬中の温度・歪性状を把握するとともに、数値解析の再現性を検討した。

【謝辞】

本研究における浸漬測定実験は田中亜鉛鍍金株式会社の協力を得て行いました。ここに記し、謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 長野真康等：590MPa 級鋼管構造物の溶融亜鉛めっきぜい化割れに対する弾塑性熱応力解析に基づく予測と防止対策，圧力技術，Vol.41, No.1, 2003, 2) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，1999

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻
*2 清水建設 (株) (元 神戸大学大学院生)
*3 (株) 角藤・鉄構事業部
*4 ジャスト (株)

Dept. of Architecture, Kobe Univ.
Shimizu Corporation, (Former graduate student at Kobe Univ.)
KAKUTO Corporation, Steel Structures Div.
JUST Corporation

梁端ウェブ接合部に発生する溶融亜鉛脆化割れに関する研究

- その4 数値解析による各因子の影響分析 -

正会員 ○高倉 正幸^{*1} 同 田中 剛^{*2} 同 浅田 勇人^{*2}
同 山下 達雄^{*3} 同 西澤 淳^{*3} 同 古館 岳実^{*4}

溶融亜鉛脆化割れ 溶融亜鉛めっき 熱伝導・熱応力解析
梁端ウェブ接合部 めっき抜き孔 板厚比

表1 解析ケース一覧

シリーズ 区分	No.	ウェブ 厚 t_w [mm]	フランジ 厚 t_f [mm]	板厚比 t_f/t_w	円形孔		割れ発生 箇所数
					止端部 最短距 離	径	
					L [mm]		
1 フランジ 板厚	1-1	9	12	1.33	4	ϕ 24	0
	1-2		14	1.56			0
	1-3		16	1.78			1
	1-4		19	2.11			1
	1-5		22	2.44			0
	1-6		25	2.78			4
	1-7		28	3.11			4
	1-8		32	3.56			4
	1-9		36	4.00			4
	1-10		40	4.44			4
2,3 ウェブ 板厚	2-1	12	16	1.33	4	ϕ 24	0
	2-2		19	1.58			0
	2-3		22	1.83			0
	2-4		25	2.08			0
	2-5		32	2.67			0
	2-6		48	4.00			-
	3-1	14	19	1.36			0
	3-2		22	1.57			0
	3-3		25	1.79			0
	3-4		28	2.00			0
	3-5		36	2.57			0
	3-6		56	4.00			-
7,8 円形孔 位置	7-1	9	16	1.78	9	ϕ 24	0
	7-2		19	2.11			0
	7-3		22	2.44			1
	7-4		25	2.78			2
	7-5		32	3.56			-
	8-1		19	2.11	14		1
	8-2		22	2.44			0
	8-3		25	2.78			0
	8-4		28	3.11			0
	8-5		32	3.56			0
	40-1		16	1.78	40		-
	40-2		22	2.44			-
	40-3		32	3.56			-
	10 円形孔径		10-1	9	14		1.56
10-2		16	1.78		0		
10-3		19	2.11		0		
10-4		22	2.44		0		
10-5		32	3.56		-		
10-6		40	4.00		-		
V 浸漬速度	0-1	9	12	1.33	4	ϕ 24	-
	0-2		22	2.44			-
	0-3		36	4.00			-
	0-4		12	1.33			-
	0-5		22	2.44			-
	0-6		36	4.00			-

1. はじめに

本報(その4)では, フランジ厚, ウェブ厚, 孔位置, 孔径および浸漬速度がめっき抜き孔近傍の歪性状に与える影響を数値解析によって調べるとともに, 数値解析結果と浸漬実験におけるめっき割れ発生状況との相関を検討する。

2. 各因子の影響

2.1 解析計画

解析ケース一覧を表1に示す。表中には前報(その2)の実験におけるめっき割れ発生状況を併記している。表1に示すように, No.1-1を基本モデルとし, 解析因子は①フランジ厚, ②ウェブ厚, ③円形孔位置, ④円形孔径および⑤浸漬速度である。シリーズ1では, ウェブ厚(t_w)を9mmと一定とし, フランジ厚(t_f)のみを変化させた計10ケース, シリーズ2および3では, フランジ厚とともにウェブ厚を12および14mmと変動させた計12ケース, シリーズ7および8では, 実験と同様にめっき抜き孔位置から溶接止端部までの最短距離 L を9および14mmの2種類とした10ケースと, さらに L を大きくした場合として, $L=40$ mmとした3ケースの計13ケース, シリーズ10では, 基準($\phi 24$)に対して孔径 ϕ を40mmと大きくした計6ケース, シリーズVでは, 浸漬速度の影響を検討するため, 浸漬速度を実験時速度の3倍である1.5m/minおよび ∞ とした計6ケースの, 全47ケースの解析を行った。解析モデルの基本形状および解析条件は前報(その3)と同一であり, 熱伝達率については全領域で $2500(\text{J/s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ と設定した。なお, 解析では熱応力発生の主因であるフランジとウェブの板厚比 t_f/t_w の変動範囲を揃えて各因子の影響を検討するために, 各シリーズで, t_f/t_w を1.33~4.00程度まで変動させて解析を行っている。

2.2 解析結果

2.2.1 めっき抜き孔近傍の応力・歪性状

めっき割れの発生例および応力・歪抽出位置を図1および図2に示す。また, 抽出した応力と歪の関係の一例を図3に示す。応力および歪は, 図2に示すs1の領域の最大値とし, ウェブの対角線方向である45度方向成分を用いている。なお, この応力成分は最小主応力の方向と概ね一致する。全モデルで, ウェブ円形孔近傍で, 浸漬開始後圧縮応力を受け降伏し, 最大圧縮歪に到達する。その後除

Study on Liquid Metal Assisted Cracking at Welded Web Connection Caused by Hot-dip Galvanizing

- Part4 :Impact Analysis of Geometric Parameters by Numerical Simulation -

TAKAKURA Masayuki, ASADA Hayato, TANAKA Tsuyoshi, YAMASHITA Tatsuo, NISHIZAWA Jun and FURUDATE Takemi

荷され、圧縮応力から引張応力に転じ、引張降伏が生じる。ここで、最小歪 $\varepsilon_{\min}$ と定常状態時の終局歪 ε_f の差分を最大引張歪 $\Delta\varepsilon_t$ と定義する。この $\Delta\varepsilon_t$ を熱応力による亀裂発生の指標とし、以下では $\Delta\varepsilon_t$ と各因子の関係を整理する。

2.2.2 各因子の影響

$\Delta\varepsilon_t$ と各因子の関係を図4に示す。

(a) 板厚比 t_f/t_w の影響、(ウェブ厚一定) : 図4(a)

板厚比 t_f/t_w が大きくなるにつれて $\Delta\varepsilon_t$ も大きくなっており、めっき割れの発生状況と一致する結果となっている。

(b) ウェブ厚の影響 : 図4(b)

同一板厚比 t_f/t_w で比較すれば、ウェブ厚 t_w が厚いほど、 $\Delta\varepsilon_t$ は小さくなっている。

(c) めっき抜き孔位置 L の影響 : 図4(c)

t_f/t_w によって、 $\Delta\varepsilon_t$ に対するめっき抜き孔位置 L の影響は変化する。解析では $L=40\text{mm}$ まで変動させており、いずれの t_f/t_w でも $L=40\text{mm}$ で最も $\Delta\varepsilon_t$ が小さくなるが、 $L=40\text{mm}$ ではめっき抜き孔としての機能が損なわれると考えられる。従って、 $L=4\text{mm}\sim 14\text{mm}$ の範囲に着目すると、 L による大きな歪低減効果は期待できないと考えられる。

(d) めっき抜き孔径の影響 : 図4(d)

いずれの t_f/t_w においても、めっき抜き孔径を大きくすることで、 $\Delta\varepsilon_t$ は小さくなっている。

3. めっき割れ発生状況と最大引張歪の相関

浸漬実験 (その2) におけるめっき割れ発生状況を $\Delta\varepsilon_t$ と板厚比 t_f/t_w の関係として図5に示す。 $\Delta\varepsilon_t$ が1.45%より大きい範囲では、割れの発生数が顕著に増大している。



図1 めっき割れ例

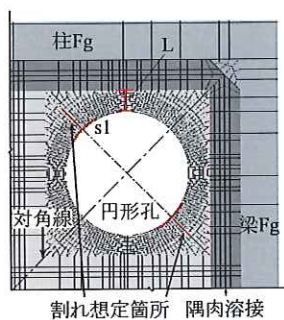


図2 めっき割れ想定位置

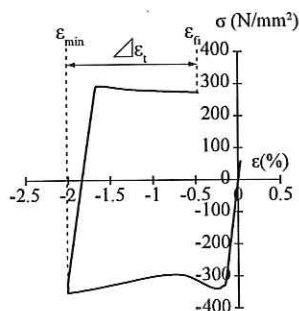


図3 σ - ε 関係例

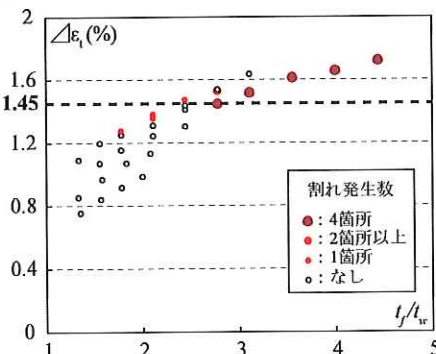


図5 最大引張歪と割れ発生の関係

この $\Delta\varepsilon_t=1.45\%$ が割れ発生の限界歪であると考え。各因子によるめっき割れ防止への効果を定量的に議論するため、限界歪に達する板厚比 t_f/t_w を限界板厚比と定義して表2に示す。ウェブ厚については、 $t_w=9\text{mm}$ の限界板厚比が2.78であるのに対して、 $t_w=12$ および 14mm とすることで限界板厚比は3.81および4.48にまで押し上げる結果となっており、実験の $t_w=12$ における最大板厚比 $t_f/t_w=3.33$ の時にもめっき割れを生じなかった結果と符合している。めっき抜き孔位置の距離 L についてはめっき抜き孔としての機能を損なわない程度の $L=4\sim 14\text{mm}$ の範囲でみれば、むしろ少し離すことで限界板厚比は減少する。孔径については、基準の孔径 $\phi 24$ に対して2倍程度である $\phi 40$ にすることで、ウェブ厚を1サイズアップした程度の歪低減効果が見込める。浸漬速度についても、浸漬速度を 1.5m/min 以上で浸漬すれば、ウェブ厚を1サイズアップした程度の効果が得られると考えられる。

4. まとめ

本報では、数値解析によってめっき抜き孔近傍に発生する最大引張歪を求め、めっき割れ発生状況との相関を調べた。

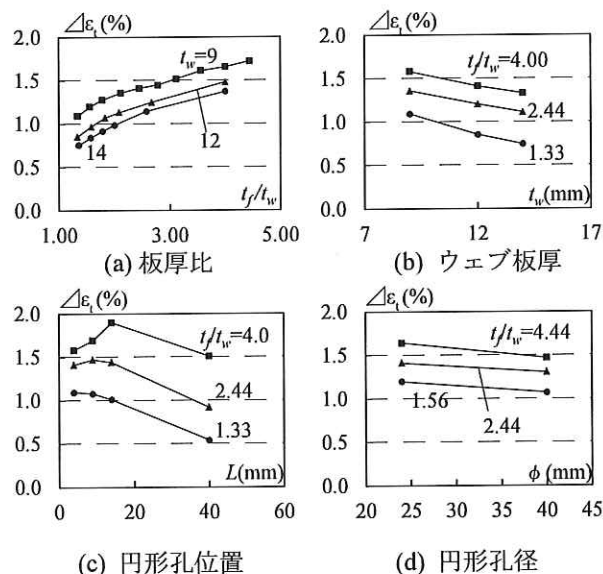


図4 $\Delta\varepsilon_t$ と各因子の関係

表2 各因子と限界板厚比の関係

シリーズ	t_w [mm]	L [mm]	ϕ [mm]	浸漬速度 [m/min]	限界 板厚比
フランジ厚	9				2.78
ウェブ厚	12	4			3.81
	14				4.48
円形孔位置	9	9	24	0.5	2.36
		14			2.48
		40			3.84
円形孔径			40		3.79
浸漬速度		4	24	1.5	3.72
				-	4.16

*1 清水建設 (株) (元 神戸大学大学院生)
*2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻
*3 (株) 角藤・鉄構事業部
*4 株式会社 ジャスト

SHIMIZU Corporation (Former Graduate Student at Kobe Univ.)
Dept. of Architecture, Kobe Univ.
KAKUTO Corporation, Steel Structure Div.
JUST Corporation

梁端ウェブ接合部に発生する溶融亜鉛脆化割れに関する研究 - その5 熱応力解析における材料特性のモデル化の影響 -

溶融亜鉛めっき工法 梁端ウェブ接合部 めっき抜き孔
めっき割れ 熱伝導-熱応力解析

正会員 ○藤原 有希^{*1} 同 浅田 勇人^{*2}
同 田中 剛^{*3} 同 山下 達雄^{*4}

1. はじめに

本報では、既報¹⁾の梁端ウェブ接合部を模した単純模型試験体を対象とし、熱伝導-熱応力解析を行い、鋼材の材料特性のモデル化が溶融亜鉛めっき浸漬時にめっき割れ発生が想定されるめっき抜き孔近傍の歪挙動の再現性に与える影響を検討する。

2. 試験体および浸漬条件

既報の単純模型試験体、円形孔周辺の温度測定位置および歪測定位置を図1に示す。試験体は梁ウェブを模した鋼板(SN490B)の4辺を柱および梁フランジを模した鋼板(SN490B)によって外周を囲む形状である。ウェブ板厚(t_w)はいずれも9mmであり、柱および梁フランジ厚(t_f)は19および32mmの2種類である。梁ウェブの四隅には、めっき抜き孔としてφ24のドリル孔を設けている。

浸漬測定実験における溶融亜鉛めっき施工条件を述べる。亜鉛槽の実測浴温は446℃であり、亜鉛槽への浸漬速度は標準的な条件のうち最も遅い0.5m/min、浸漬時間は8分としている。後述する熱伝導-熱応力解析は図1(a)に示す上部の円形孔周辺を対象とする。温度および歪測定位置は

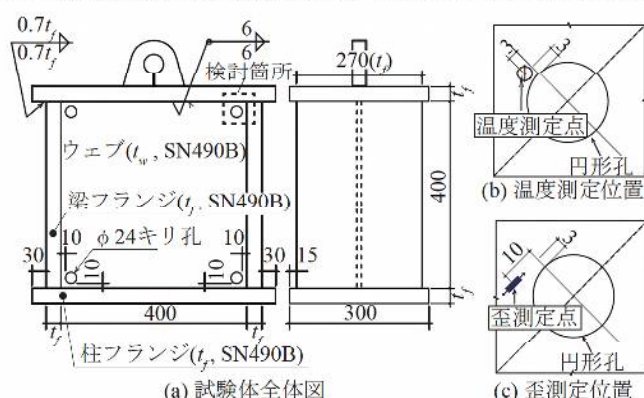


図1 単純模型試験体

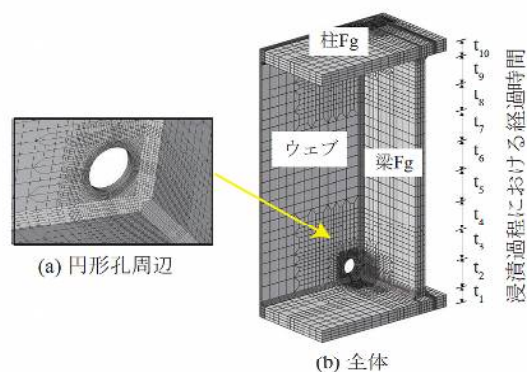


図2 解析モデル

円形孔の割れ発生が予測される近傍とし、歪ゲージは45度方向に貼付した。

3. 熱伝導-熱応力解析

3.1 解析条件

溶融亜鉛めっき浸漬実験を対象とし、熱伝導解析-熱応力解析の一方連成解析を行った。解析モデルを図2に示す。解析は試験体および境界条件の対称性を考慮した1/4モデルとした。解析の温度初期条件は、実験を参考に、溶融亜鉛温度を446℃、鋼材温度を40℃と設定した。さらに、浸漬速度を考慮するため、図3に示すとおり、最初に t_1 秒後の浸漬領域、次に t_2 秒後の浸漬領域、というように時間毎に熱伝達面を計10段階に分けて与えた。亜鉛と鋼材表面の熱伝達率を図4に示す。文献2)を参考とし、梁ウェブ中央付近を2500(J/s・m²・℃)、フランジおよびフランジ近傍のウェブについては1200(J/s・m²・℃)とした。その他の伝熱特性に関する材料特性値は、図5に示すとおり温度依存性を考慮している。線膨張係数およびポアソン比は温度によらずそれぞれ 1.2×10^{-5} (1/℃)および0.3と一定とした。鋼材の一方向の応力-歪関係を図6に示す。応力-歪関係の温度依存性は鋼構造耐火設計指針³⁾(以下、耐火指針)またはEurocode⁴⁾に準拠した。解析では各応力-歪関係には塑性歪0~2%の範囲においてエネルギーが等価になるように決定した歪硬化係数を有するバイリニア型を用いた。また、硬化則には移動硬化則または等方硬化則の2種類を用いた。解析には汎用有限要素解析プログラムABAQUS ver6.9-2を用いた。

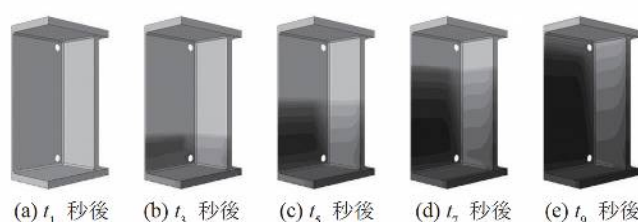


図3 浸漬行程の再現

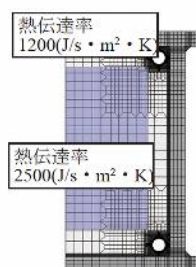


図4 熱伝達率

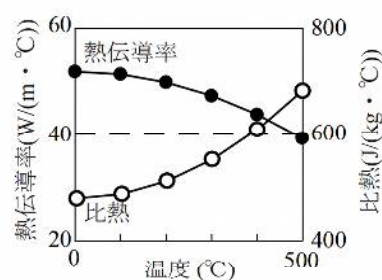


図5 熱物性値

Study on Liquid Metal Assisted Cracking at Welded Web Connection Caused by Hot-dip Galvanizing
Part 5: Effect of Steel Material Properties Models for Thermal Stress Analyses

FUJIWARA Yuki, ASADA Hayato, TANAKA Tsuyoshi, YAMASHITA Tatsuo

3.2 解析結果

図1(b)に示す測定位置における温度履歴を図7に示す。フランジ厚によらず、解析値と実験値は良く対応していることがわかる。

図1(c)に示す測定位置における歪履歴を図8に示す。なお、フランジ厚32mmの試験体については、浸漬中に割れが発生しており、図中には割れが発生したと推定される時点を●印で示す。フランジ厚によらず、硬化則に移動硬化則を適用した方が、最大圧縮歪を経験した後の引張方向への歪の進展挙動の実験値との対応が良いことがわかる。応力-歪関係のモデル化の違いに着目すると、Eurocodeに比べて、耐火指針のほうが、熱平衡状態（定常状態）における引張歪が大きくなっており、実験値との対応が良いことがわかる。次いで、図9(c)に示す円形孔縁の割れ発生想定位置の s_1 における45度方向の応力-歪関係を図9に示す。硬化則によらず、圧縮降伏を経験した後の引張側の降伏応力は温度上昇に伴い低下していることがわかる。また、等方硬化則に比べてバウシinger効果を考慮した移動硬化則の方が、引張側の降伏が早期に生じており、定常状態に至るまでの引張側での塑性歪量は大きく増加していることがわかる。

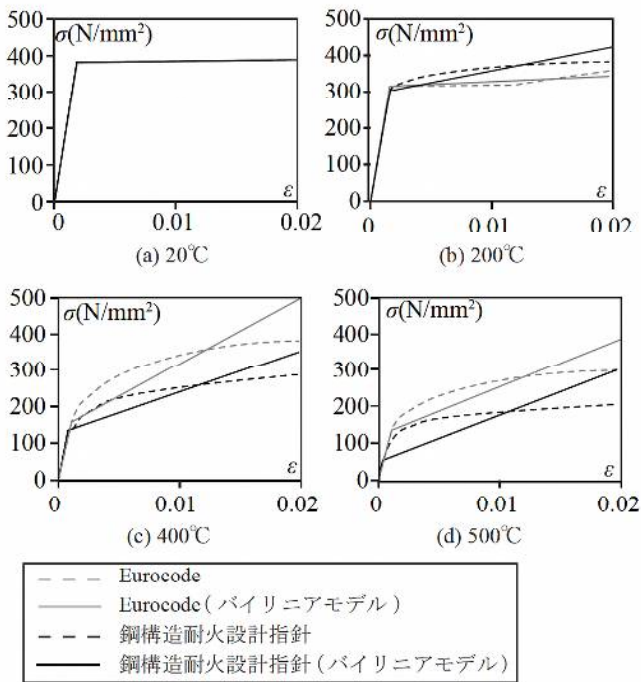


図6 応力-歪関係

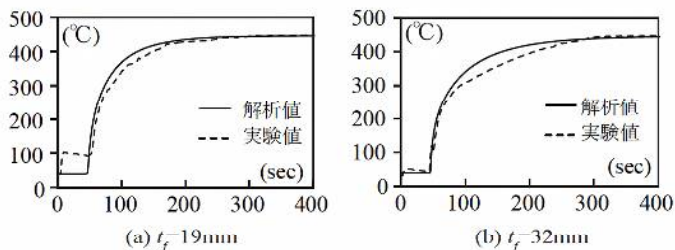


図7 温度履歴

4. まとめ

既報の単純模型試験体を対象とし、熱伝導-熱応力解析を実施した。その結果、鋼材の一方向の応力-歪関係は耐火指針に準拠し、硬化則には移動硬化則を用いる場合が、割れ発生が想定される円形孔近傍の歪挙動の再現性が最も良好であった。

【参考文献】

- 1) 浅田 勇人, 田中 剛, 山下 達雄, 高倉 正幸: 梁端ウェブ接合部に発生する溶融亜鉛めっき割れに関する研究, その3 浸漬測定実験および熱伝導・熱応力解析 - 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1151-1152, 2016.9
- 2) 長野 良康等: 590MPa級鋼管構造物の溶融亜鉛めっきぜい化割れに対する弾塑性熱応力解析に基づく予測と防止対策, 圧力技術, Vol.41, No.1, pp.17-27, 2003
- 3) 日本建築学会: 鋼構造耐火設計指針, 1999
- 4) EN1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design, 2005

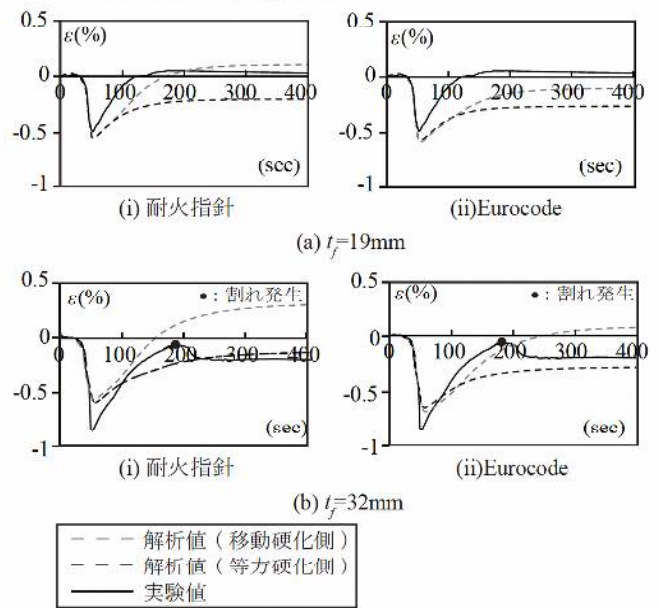


図8 歪履歴

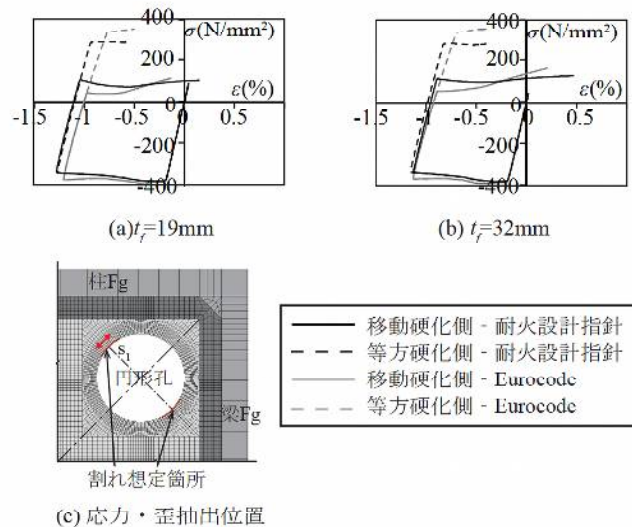


図9 45度方向の応力-歪関係

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・修士課程

*2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・助教・博士(工学)

*3 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士(工学)

*4 株式会社 角藤 博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Architecture, Kobe Univ.

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.

Kakuto Corporation, Dr. Eng.

梁端ウェブ接合部に発生する溶融亜鉛めっき割れに関する研究

- その 6 鋼材特性の影響 -

梁端ウェブ接合部 めっき抜き孔 熱伝導 - 熱応力解析
溶融亜鉛めっき割れ 浸漬実験

正会員 ○藤原 有希^{*1} 同 浅田 勇人^{*2}
同 田中 剛^{*3} 同 山下 達雄^{*4}
同 宮坂 淳一^{*4} 同 古舘 岳実^{*5}

1. はじめに

これまでに著者らは梁端ウェブ接合部を模した単純模型試験体による溶融亜鉛めっき浸漬実験を行い、円形孔(めっき抜き孔)を起点に発生する溶融亜鉛めっき割れ(以下、めっき割れ)に与える、主にフランジとウェブの板厚比、円形孔径および円形孔位置などの幾何学的因子の影響を検討してきた¹⁾。本報では既報と同様にフランジとウェブの板厚比を変化させた上で、鋼材特性、すなわち、材料強度および化学成分がめっき割れに与える影響を検討したので、その結果を報告する。

2. 実験および解析計画

2.1 試験体および浸漬条件

試験体一覧を表 1 に示す。試験体形状は文献 1) と同様とした。実験パラメータは、梁フランジの板厚の他に、鋼種および化学成分である。鋼種については、SS400 および SN490B の 2 種類とし、化学成分の含有量は、ロットが異なる 3 つの鋼材を用いることで変化した。CEZ は、SN490B では 0.38~0.55%、SS400 では、0.24~0.25% である。また、表 1 中に示すウェブ表層部のビッカース硬さは、SN490B では 184~201Hv、SS400 では 150~157Hv である。浸漬実験における溶融亜鉛めっき施工条件を述べる。亜鉛槽の表測浴温は 445°C であり、亜鉛槽への浸漬速度は標準的な条件よりも遅い 0.5m/min、浸漬時間は 8 分とした。

2.2 熱伝導 - 熱応力解析

円形孔縁の歪性状を把握するため、熱伝導解析-熱応力解析の一方方向連成解析を行った。解析モデルを図 1 に示す。解析は試験体および境界条件の対称性を考慮した 1/4 モデルとした。解析における浸漬速度の再現方法や伝熱特性に

ついては文献 2) と同様とした。熱応力解析におけるウェブに使用した鋼材の一方方向の応力-歪関係は、材料試験結果に基づく降伏点を用い、Lie が提案する方法³⁾によって降伏点、ヤング係数および硬化係数に対する温度依存性を考慮した。塑性域の構成方程式は、von Mises の降伏条件、関連流れ則および移動硬化則に基づく。フランジについてはいずれも弾性とした。解析には汎用有限要素解析プログラム ABAQUS ver6.11-2 を用いた。

3. 実験および解析結果

3.1 割れ発生状況

めっき割れの発生例を図 2 に示す。めっき割れの検出は目視および磁粉探傷試験(MT)によって行った。めっき割れはいずれも円形孔縁から概ね 45 方向に向かって進展していた。めっき割れの発生状況は表 1 中に示す通り、フラ

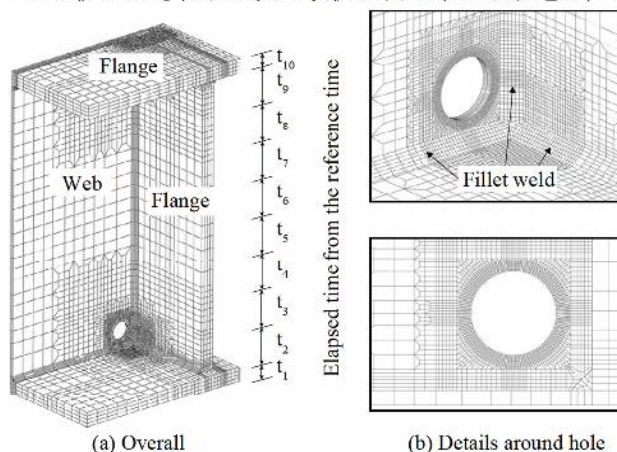


図 1 解析モデル

表 1 試験体一覧

試験体	板厚		鋼種	識別 番号	引張試験結果				化学成分分析結果 (CEZ) [%]	硬さ試験結果 (ウェブ) [Hv]	割れ発生 箇所数
	フランジ [mm]	ウェブ [mm]			フランジ	ウェブ					
					降伏点 [N/mm2]	降伏点 [N/mm2]	引張強さ [N/mm2]	伸び [%]			
28-N1	28	9	SN490B	N1	352	375	540	43	0.46	184	1
19-N1	19				410						0
28-N2	28			N2	352	367	541	41	0.38	192	1
19-N2	19				410						0
28-N3	28			N3	352	379	539	42	0.55	201	1
19-N3	19				410						0
28-S1	28		SS400	S1	352	293	429	29	0.25	155	0
19-S1	19				410						0
28-S2	28			S2	352	275	430	33	0.24	150	1
19-S2	19				410						0
28-S3	28			S3	352	325	453	43	0.25	157	0
19-S3	19				410						0

フランジ、S1 および S2 についてはミルシート値。引張試験片の規格:JIS5 号、ビッカース硬さ試験はいずれも表層部の結果であり、溶接前の値である。

Study on Liquid Metal Assisted Cracking at Welded Web Connection Caused by Hot-dip Galvanizing

Part 6: Effect of Steel Material Properties

FUJIWARA Yuki, ASADA Hayato, TANAKA Tsuyoshi, YAMASHITA Tatsuo, MIYASAKA Junichi, FURUDAITE Takemi

ンジ厚 19mm の試験体はいずれもめっき割れが生じておらず、フランジ厚 28mm の試験体では SN490B 材では 3 体ともに、SS400 材の試験体では 1 体のみめっき割れが生じた。また、めっき割れは、いずれも浸漬方向に対して後行で浸漬される上側円形孔（図 3 参照）で生じた。

3.2 歪性状

解析より得られた円形孔周辺の相当塑性歪分布の例を図 4 に示す。図 2 に示した割れ発生箇所に対応する位置に歪集中が生じている。この歪集中位置における 45 度方向歪の時刻歴を図 5 に示す。45 度方向とは、割れに対して直交する方向に相当する。また、浸漬工程における、浸漬開始点から試験体がめっき槽に全て浸漬するまでの状態を A、試験体全体がめっき槽に浸漬された状態を B とし、図中内に示す。フランジ厚 19mm に比べて、フランジ厚が 28mm の方が、最大圧縮歪と定常状態の歪の差分として定義される引張歪 $\Delta\epsilon_t$ ¹⁾ が大きくなっている。また、下側円形孔に比べて、上側円形孔の方が $\Delta\epsilon_t$ がいずれも大きくなっており、割れ発生状況と対応することがわかる。上側円形孔に生じる $\Delta\epsilon_t$ とフランジとウェブの板厚比 (t_f/t_w) の関係を図 6 に示す。いずれも板厚比が大きいほど、 $\Delta\epsilon_t$ は大きくなっている。また、SS400 材と SN490B 材を比較すると、材料強度が低い SS400 材の方が $\Delta\epsilon_t$ は総じて大きくなっている。

3.3 CEZ の影響

$\Delta\epsilon_t$ と CEZ の関係を図 7 に示す。CEZ および $\Delta\epsilon_t$ が大きくなるにつれて、割れが発生しやすい傾向がみられる。また、CEZ が大きくても、 $\Delta\epsilon_t$ が小さければ、割れは発生していない傾向も見て取れる。

4. まとめ

- 1) フランジとウェブの板厚比が大きくなることで、めっき抜き円形孔に生じる $\Delta\epsilon_t$ は大きくなる。

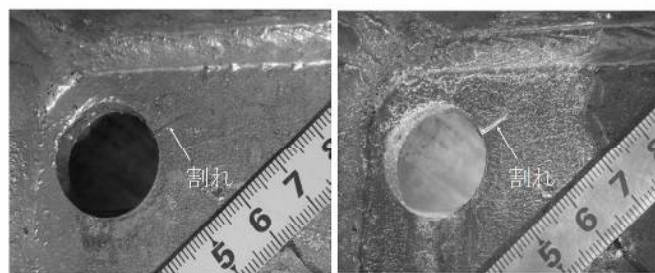


図 3 円形孔の定義

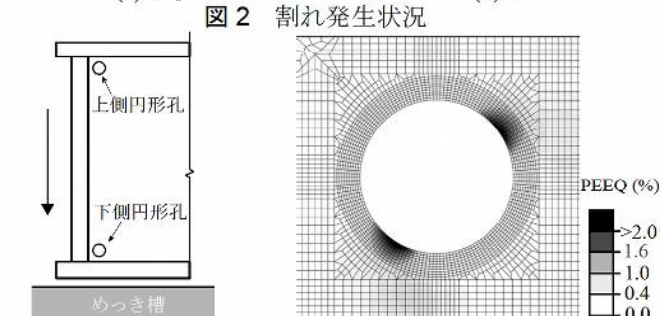


図 4 塑性歪分布

- 2) CEZ および $\Delta\epsilon_t$ が大きくなるにつれて、割れが発生しやすい傾向がみられる。また、CEZ が大きくても $\Delta\epsilon_t$ が小さければ、割れは生じにくい。

【参考文献】

- 1) 山下達雄, 田中剛, 浅田勇人, 高倉正幸: 梁端ウェブ接合部に発生する溶融亜鉛めっき割れに関する研究, その 1~その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1147-1154, 2016.9
- 2) 藤原有希, 浅田勇人, 田中剛, 山下達雄: 梁端接合部に設けられるめっき抜き円形孔周辺に発生する溶融亜鉛めっき割れに関する解析的検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 57 号, 構造系, pp.5-8, 2017.6
- 3) Lie T.T.: Structural Fire Protection, ASCE, 1992

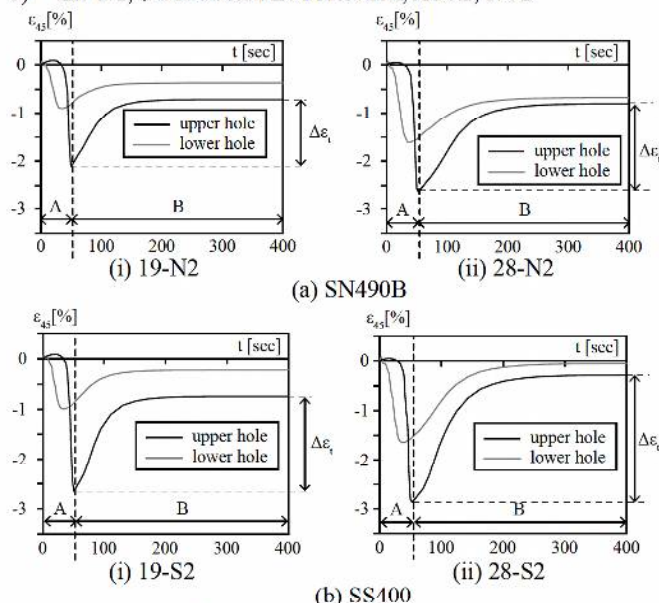


図 5 45 度方向歪の時刻歴

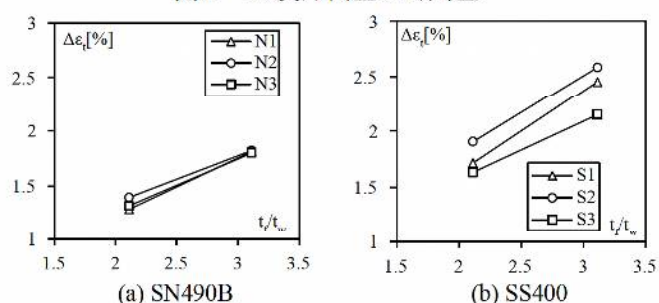


図 6 引張歪と板厚比の関係

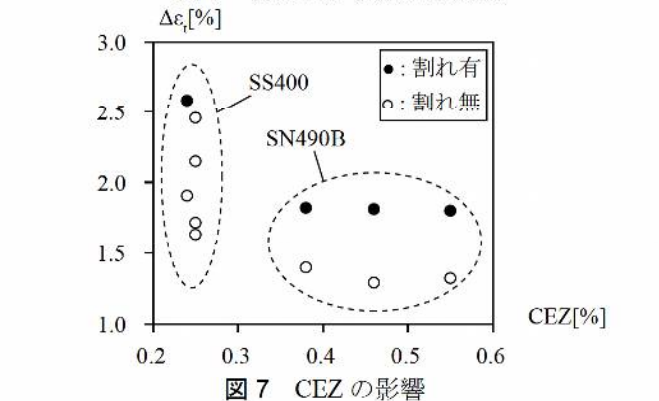


図 7 CEZ の影響

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・修士課程

*2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・助教・博士(工学)

*3 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・教授・博士(工学)

*4 株式会社 角藤

*5 株式会社ジャスト

Graduate Student, Dept. of Architecture, Kobe Univ.

Assistant Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Kobe Univ., Dr. Eng.

Kakuto Corporation

JUST Corporation