

溶融亜鉛めっき箱桁橋梁の熱応力・変形に関する検討

(川之江西ジャンクション橋の設計)

Analysis of Elastoplastic Thermal Stress and Deformation of Hot-Dip Galvanized Box Girder Bridge (Design of Kawano-Nishi Junction Bridge)

伊藤 徳 昭* 土屋 匡 寛** 磯 上 洋**
Noriaki ITOH Masahiro TSUCHIYA Hiroshi ISOGAMI

Summary

Although hot-dip galvanizing is an effective means of preventing rust and erosion, the process is still associated with problems of stress behavior in the galvanized part, member deformation, cracks, etc. Hot-dip galvanizing has been applied to many steel bridges, and especially to their plate girders. Recently, its application to a plate box girder bridge was tried for the first time. This article reports on those matters concerning galvanizing which were closely examined and which were taken into consideration in the design of the bridge, with emphasis on elasto-plastic thermal stress analysis.

1. まえがき

鋼の防錆・防食方法の一つとして溶融亜鉛めっきがある。橋梁本体工における溶融亜鉛めっきの施工実績は最近10年間で急増し、昭和60年には近畿自動車道天理吹田線に本格的に採用されている。そして昭和63年現在では物件数として約500例（総鋼重7万t）となっている。

しかしながらこれらの施工実績は、めっき槽の寸法的制約やめっき変形等からそのほとんどが板桁橋である。箱桁橋への適用例としては、昭和61年に建設省中部地方建設局で施工した土橋橋側歩道橋があるのみである。この橋の場合には、主桁断面が（幅）1.4m×（高さ）1.2mであることから閉断面状態で亜鉛めっきが施されている。

川之江西ジャンクション橋は、四国縦貫自動車道と四国横断自動車道の分岐点（川之江市）に架かる橋長51mの単純非合成箱桁であるが、高速道路本線を跨いでいることおよび桁下空間に余裕がないこと等から将来的なメンテナンスフリーをめざして溶融亜鉛めっきが採用された。本格的な道路箱桁橋への適用としては過去に例のないものである。

大型溶接鋼構造物のめっきに際しては、その防錆・防食効果は大いに期待されるものの、

- ・めっき槽の寸法的制約
- ・めっき時の熱応力、変形と矯正

- ・溶融亜鉛ぜい化
- ・材料の機械的性質の変化

等種々の問題がある。本橋ではこれまでの板桁等における施工実施や実験結果を踏まえ、新たに施工実験および解析検討を行って実施に踏切った。本報告書はこの内、設計上の解析、検討事項について記すものである。

本橋の一般図、設計諸元および標準断面を表-1、図-1、2に示す。

表-1 設計諸元

道路規格	第1種A規格ランプ		
橋 格	一等橋(TL-20、TT-43)		
橋 長	51.000m		
支 間 長	49.750m		
幅 員	10.700m		
形 式	単純非合成曲線箱桁		
斜 角	A ₁ 90°、A ₂ 右61° 34' 53"		
平面線形	R=100m		
縦断線形	3.22% 4.60% V.C.L. 160m		
横断線形	9%		
舗 装	アスファルト舗装 75mm		
床 版	RC床版 220mm		
鋼 重		塗装仕様	メッキ仕様
	40 K 鋼	37.3	44.1
	50 K 鋼	146.8	161.6
	他	5.8	12.3
	合 計	189.9t (100%)	218.0t (115%)

* 技術本部設計部設計第1課係長

** 技術本部設計部設計第1課

2. 溶融亜鉛めっき施工上の問題点

(1) めっき槽の大きさからの制約

大型の溶融亜鉛めっき槽は、関東に1社、関西に2社あるが、その寸法および重量制限は表-2に示すとおりである。めっき部材の寸法は作業上の余裕をみてこれより若干小さくなる。

(2) めっきによる部材変形と割れ

めっきによる部材変形および割れ要因としては、

- ・浸漬時に生じる熱応力に起因するもの
 - ・部材中の残留応力に起因するもの
- の2つに大別されようが、これらはめっき温度や浸漬時間と密接な関わりがある。これをめっき過程に沿って説明すれば次の様になる。

① 鋼と亜鉛の比重が近いこと、めっき槽への浸漬に

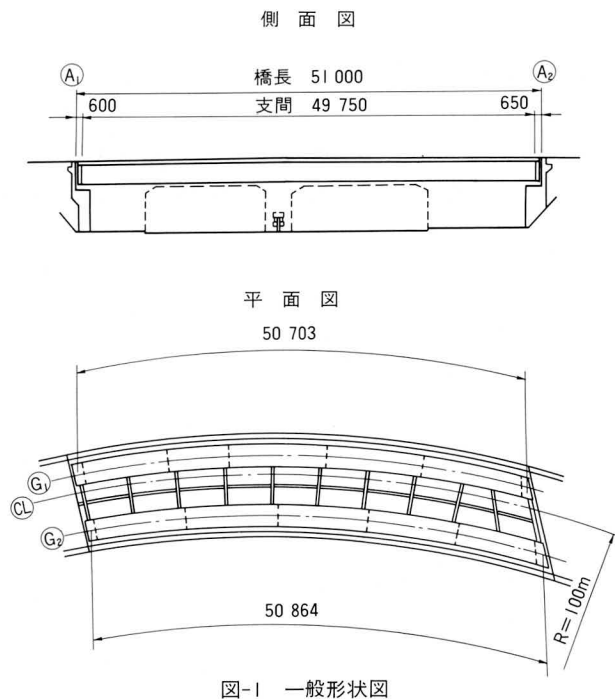


図-1 一般形状図

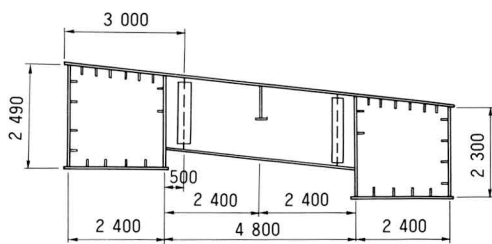


図-2 標準断面図

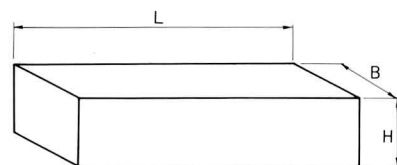
- はある程度の時間を要する。(鋼；7.85、亜鉛；7.14)
- めっき部材の初期温度は約70℃であるが、めっき温度は440～460℃である。
 - 部材の浸漬過程では①、②により、既に浸漬している部分とそうでない部分に温度差を生じる。(熱応力の発生)
 - 部材には板厚差があるため熱容量が各部位で異なる。
 - 部材の温度上昇と共に、鋼のヤング係数や降伏耐力の低下が生じる。熱応力が耐力を上まわれれば塑性ひずみの発生や座屈(板の面外変形)が生じる。
 - 部材内には溶接や加熱矯正によって残留応力が存在する。(通常は内部応力がバランスされて形状保持されている。)浴槽内での高温保持による降伏耐力の低下に伴ない、残留応力のレベルによってはその応力が一部開放される。
 - 水冷過程では、部材はめっき浸漬時の様な温度差は受けずに一気に冷却される。⑤、⑥で生じた塑性ひずみは部材の変形として残存する。
 - めっき温度や浸漬時間、熱応力や残留応力等により溶融亜鉛ぜい化が生じ、その結果溶接部に割れが生じる。

めっきによる変形及び割れについては、鋳桁による実験、実績等からその要因や対策が明らかにされてきている。しかしその定量的な把握は充分にはなされていない。特に残留応力の影響については、橋梁部材が複数部品の溶接接合となっているため現実には把握しきれない。

さらに今回はこれまでにほとんど実績のない箱桁橋への適用であり、変形や割れ要因の推定とその対策には施工実験が必要不可欠である。

表-2 メッキ槽の寸法

	メッキ槽寸法 (m)			部材寸法 (m)			部材重量(t)	
	幅B	高さH	長さL	幅B	高さH	長さL		
関東 A社	2.1	3.3	16.5	1.8	2.8	15.5	10	
関西	B社	1.8	3.6	16.5	1.5	3.0	15.5	10
	C社	1.8	3.6	16.0	1.5	3.0	15.0	10



(3) めっきの仕上り

めっき仕様においては、前述の構造物としての機能に関わる因子と共に、耐食性や見映え等めっきの仕上りについても同時に配慮してゆく必要がある。めっき欠陥としては、

- ・耐食性に影響を及ぼす欠陥
 - きず、不めっき、かすびき、変色など
- ・耐食性には影響のない欠陥
 - 白さび、やけ、ざらつき、たれなど

が挙げられる。

閉断面構造の場合には、特にめっきのまわりを良くすることが欠陥防止上重要となる。そして部材全体を速やかに浸漬できれば、変形や割れの度合も低く抑えることができる。

また浴槽中での保持時間は、めっきの付着量から構成部材中の最大板厚で経験的にきめられる。したがって構成部材の板厚差はできるだけ少ない方が望ましい。

3. 箱桁の分割方法

主桁の最大幅は、曲線桁としてのライズおよび横桁仕口を加味すれば、約3.2mとなってめっき槽に入らない。したがって橋軸方向に分割しなければならないが、その方法としては、1シーム、2シームの2案が考えられる。

表-3 主桁分割案比較

	1シーム	2シーム
断面形状 (ブロック幅は平面ライズを含む)		
単部材の対称性	コの字型(非対称)	I形に近い(ほぼ対称)
単部材重量	重い	軽い
浸漬速度	おそい	早い
引上げ速度	おそい	早い
プレス矯正	不可	可能
ダイヤフラムの剛性	高い	低い
部材数	少ない	多い
鋼重	2シームに比べて軽い	1シームに比べて重い (16トン増)
特色	極力部材数を少なくし、亜鉛メッキ槽寸法に対しギリギリの寸法とし、鋼重の増加を少なくした	極力板桁に近い構造とし、残留変形に対しては、プレスにて矯正する

この得失比較を表-3に示す。

上記比較の結果、箱桁としての形状を有しかつ全体鋼重が軽減できる1シーム案にて試験体を製作し、実際にめっき施工するものとした。1シーム案での部材分割の留意点をまとめると次の様になる。

- ① めっき槽の寸法およびクレーン能力から、最大幅1.8m、最大部材重量10tとする。
- ② 支点部では、ダイヤフラムや補剛材と干渉しない様、支点手前に横シームを設けて小ブロックとする。
- ③ 架設時のベント位置の制約があるためこれを配慮する。
- ④ 縦シームのボルトは工場締めとし、閉断面にて輸送・架設する。

4. 立体FEM弾塑性熱応力解析

めっき中の応力挙動、最終的な部材変形を予測する目的で立体FEM弾塑性熱応力解析を行った。ここで対象としたモデルは、実物大パイロットメンバー(内桁中央部)であり、めっき施工実験との対比を行うものである。また他部材の変形予測を行うため、フランジ厚の違いに着目した解析も行っている。パイロットメンバーの施工実験に先立って、コの字断面の変形形態を把握するため1/2スケールの試験体にて予備実験を実施した。これらの解

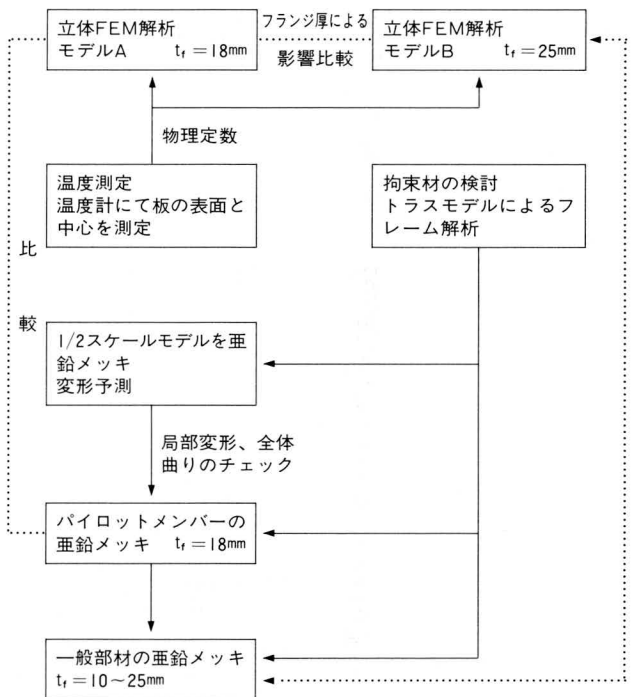


図-3 各種実験と解析

析と施工実験の関係を図-3に示す。

なお本解析では、溶接残留応力等部材の初期応力についてはその設定が難しいことから考慮せず、熱応力のみに着目して解析している。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-4に示す。モデルはフランジ厚の異なる2ケースとし、橋軸方向にはセンターのダイヤフラ

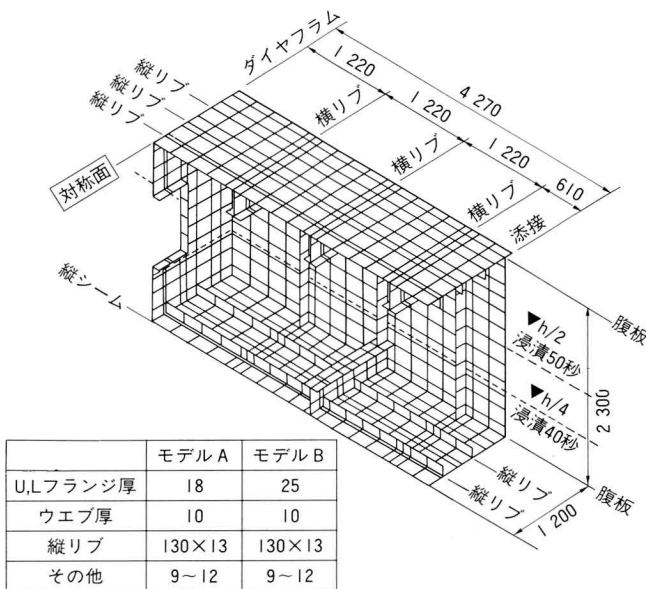


図-4 解析モデル

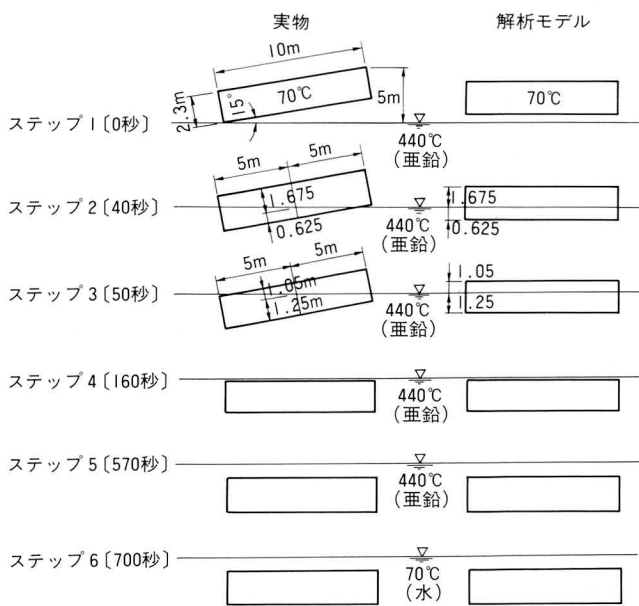


図-5 解析ステップ

ム位置で対称として扱う。

モデルA；パイロットメンバーをモデル化し、施工実験結果と比較する。フランジ厚： $t_f=18\text{mm}$

モデルB；モデルAにおいてフランジ厚のみ $t_f=25\text{mm}$ とする。板厚差による熱容量の違いが応力および変形に及ぼす影響を調べる。

(2) 解析ステップ

解析ステップを図-5に示す。実際のめっき浸漬過程は連続的なものであり、部材への入熱量は時間積分となるが、今回は6ステップとして扱うものとした。また、部材は現実には15度程度の浸漬角度をもつが、計算の簡便化のため解析上は0度としている。浸漬時間については1/2モデルによる実験結果等をもとに推定したものである。

(3) 解析方法

解析は各ステップごとに熱伝導解析を行い、その要素温度をもとにFEMにて弾塑性解析を行うものとした。解析に用いた諸定数を表-4に示す。鋼材のヤング率は温度によって変化するが、最終結果に及ぼす影響は小さいと考え一定値とし、降伏耐力の低減のみを考慮するものとした。また熱伝達率および熱伝導率は、小材片による温度測定実験で得た温度上昇カーブ(図-6)等をもとに求めたものである。ここで熱伝達率は亜鉛から鋼材表面に伝わる単位時間当りの熱量であり、熱伝導率は鋼材表面から鋼材内部へ伝わる単位時間当りの熱量である。

(4) 解析結果

表-5、6に各解析ステップごとの応力度(σ_1 、 σ_2 の最大値と最小値)および変形量を示す。全体的な挙動を記せば以下ようになる。

① ウェブでは、浸漬初期段階で降伏点を越える様な

表-4 解析に用いた諸定数

★物理定数

	比重量 t/m ³	熱膨張 係数	融点 ℃	比熱 Kcal/kg℃	ヤング率 t/m ²
鋼材	7.85	12×10^{-6}	1536	0.111	2.1×10^4
亜鉛	7.14	33×10^{-6}	420	0.214	—

★鋼材の降伏耐力

	20℃	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃
σ_y kg/mm ²	36	34	31	26	25	22

応力が発生し、浸漬が進むにつれて漸減してゆく。
そして水冷後（700秒）では2000kgf/cm²程度の応力が
残留することになる。

- ② フランジでは、浴槽中に保持している段階(570秒)
で最大応力が生じるが、水冷後にはかなり小さな応
力レベルに止まる。これは上下フランジに共通する
傾向である。
- ③ 最終的な部材変形量は、当初予想よりかなり小さ
いものであると言えよう。浸漬初期では主に下フラ
ンジが熱せられることにより、部材全体としては下
に凸形状となる。その後浸漬が進むことによって上
下フランジ共に同程度の伸び（橋軸方向）を示し、
鉛直曲りは解消される。平面曲り値は部材が縦シ
ームを開く方向にそることを示している。これは下フ
ランジとウェブとの溶接部近傍で、ウェブ側に塑性

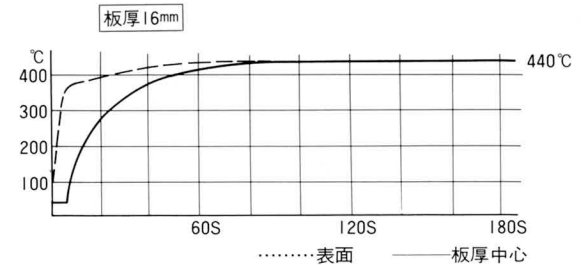
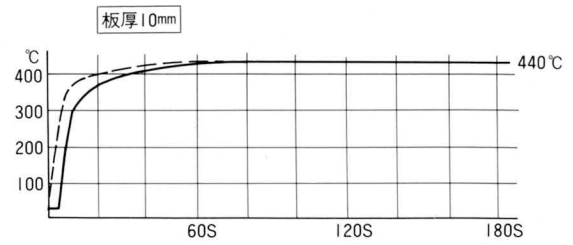
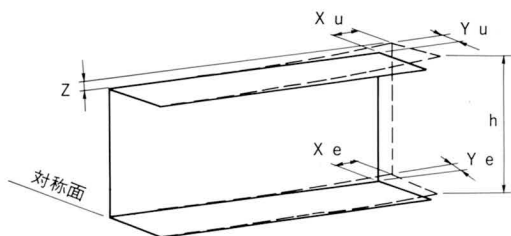
表-5 応力度

		モデルA					モデルB
		40秒	50秒	160秒	570秒	700秒	700秒
上フランジ	max	538	255	412	-882	256	894
	min	-1561	-824	-482	-3163	-295	-598
腹板	max	4109	3383	2573	1053	2498	2239
	min	-3405	-2459	-2234	-3620	-2042	-1750
下フランジ	max	1758	1532	-110	-952	275	937
	min	1453	-739	-466	-3178	-384	-437

表-6 部材の変形

		モデルA						モデルB
		40秒	50秒	160秒	570秒	700秒	700秒	
上Flg	平面曲り Yu	6	4	2	4	(6) 0	1	
	部材の伸び Xu	0	0	20	11	(-) 2	3	
下Flg	平面曲り Ye	3	3	0	6	(4) 2	4	
	部材の伸び Xe	18	20	20	11	(-) 2	3	
鉛直曲り	Z	20	20	0	0	(2) 0	0	
自由端の開き	△h	20	12	4	-10	(-4)-4	-10	

上図に示す方向を正とする。
△hは、上下フランジ間が広がる方向を正とする。
()内はパイロットメンバー実測値



温度上昇カーブから下記の値を求めた。

熱伝達率 = $1.5 \times 1.0^{-4} \text{Kcal/cm}^2 \cdot \text{Sec} \cdot \text{°C}$

熱伝達率 = $0.25 \times 1.0^{-4} \text{Kcal/cm}^2 \cdot \text{Sec} \cdot \text{°C}$

図-6 温度測定結果

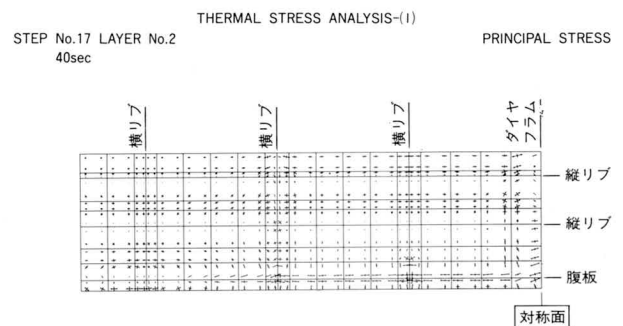
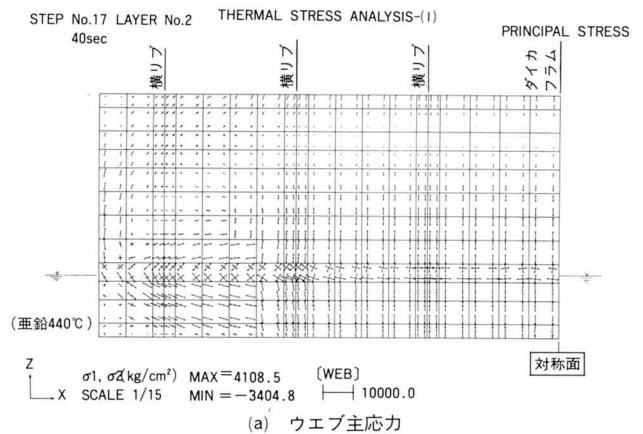


図-7 モデルA ステップ2 (浸漬40秒)

ひずみが生じることによるものと考えられる。またフランジ自由端では、上下間隔が狭まる方向に変形している。

モデルBについては、途中経過の傾向はモデルAと同一であるため最終結果のみを掲載する。フランジの応力が若干高めではあるが、変形もモデルAと大差ないものであると言えよう。

図-7～図-9に代表的な浸漬ステップの解析結果を示す。

1) 浸漬40秒——図-7

下フランジでは、ウェブとの交点で橋軸方向に圧縮応力が生じており、自由縁で引張に転じている。ウェブではめっき面（浴槽表面）を境にして浸漬部で圧縮、未浸漬部で引張応力が生じている。又自由縁側と対称面（ダイヤフラム）側では応力の流れが急変しているが、これは中央の横リブが他の横リブに比べて剛（下フランジも拘束したタイプ）であることによると考えられる。なお矢線のスケールはフランジとウェブで異なっている。

2) 水冷後（700秒）——図-8、図-9

モデルA、B共にウェブの応力を示す。いずれも浸漬40秒時点でめっき面の上下に生じた応力が残留していることを示しており、塑性域図からも明らかである。なお応力レベルは全体的に浸漬40秒から半減しており、めっき面より上側ではほとんど消失している。

(5) パイロットメンバーとの比較

解析上多くの仮定を含んではいるが、モデルAとパイロットメンバーの最終変形の比較を表-6に示す。変形量自体が小さいこともあるが、両者はよく一致している。当初最も懸念された縦シームの口開き（添接不可能）は解消された。

5. まとめ

ここでは、各種施工実験および解析検討を通じ、本橋の設計に反映させた主な事項についてまとめる。

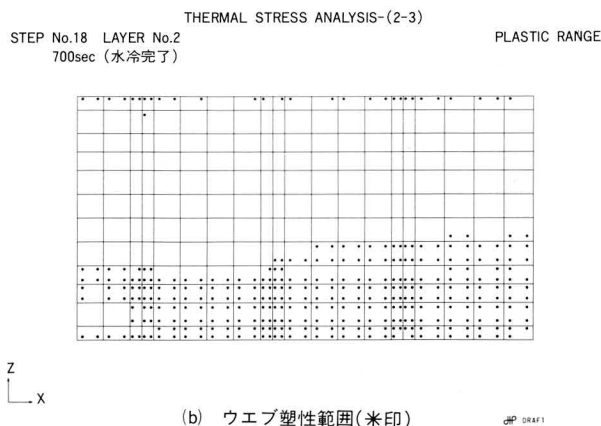
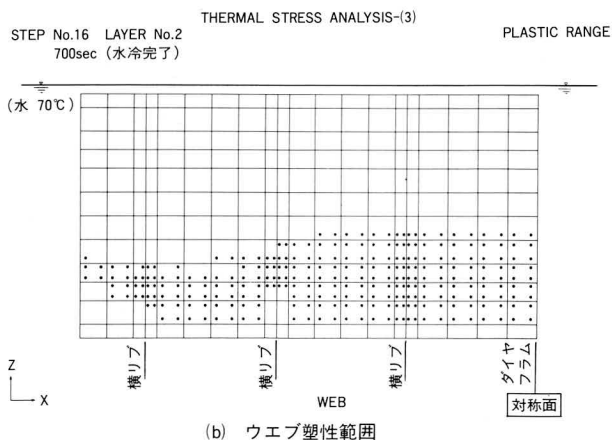
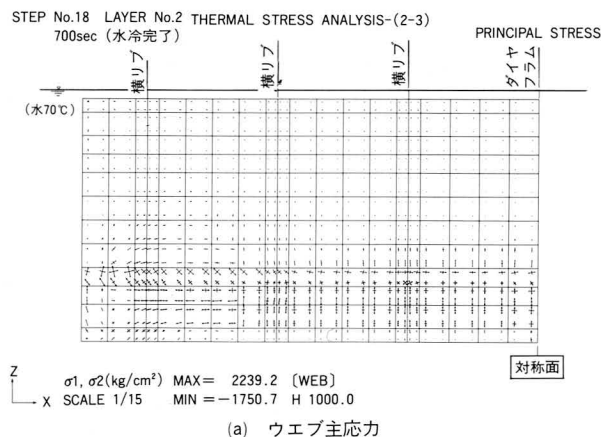
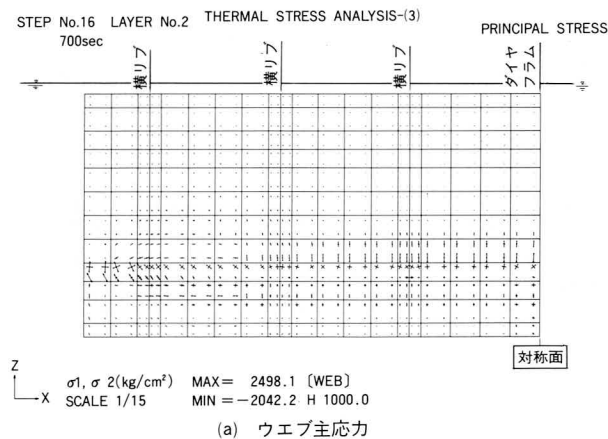


図-8 モデルA ステップ6 (水冷完了)

図-9 モデルB ステップ6 (水冷完了)

(1) 使用材料

基本的には発注先である日本道路公団の仕様（設計要領第二集）に沿ったが、フランジとウェブについては、めっきの仕上りに影響があるシリコンを規定($Si \leq 0.2\%$)し、耐割れ性能の高いTMCP鋼（Thermo-Mechanical Control Process）を用いた。

(2) 最小板厚

板桁橋の実績では、はらみ防止のためにウェブ厚を塗装桁として設計する場合より1mm増厚しているが、今回は増厚していない。各部の最小板厚は設計より求まる値として、

- ・フランジ ; 10mm
- ・ウェブ ; 10mm
- ・その他 ; 9mm

を採用した。

(3) 水平補剛材

1/2モデルによる施工実験から、ウェブのはらみ防止のため、設計上2段の水平補剛材を4段（外観から、両壁高欄側ウェブのみ）とした。

(4) 構造詳細

めっきの仕上り、浸漬速度アップ等のため、各部の構造詳細を工夫した。その主な点を図-10に示す。

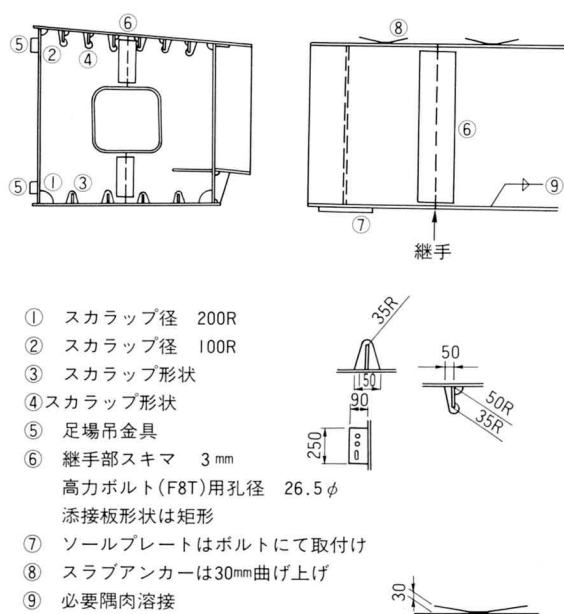


図-10 構造詳細

6. 考察

(1) FEM解析について

今回の解析結果では、ウェブ面の下フランジ側に広範囲に塑性域が生じているが、そのほとんどは浸漬40秒の段階で生じたものである。この塑性域の発生は次の理由によるものと考えられる。

- ① 解析ステップの粗さ——浸漬時間と部材の入熱量の関係は図-11の実線で考えられるが、解析上は破線として扱っているため実際の2倍程度の熱応力を与えていることになる。
- ② 今回の解析では座屈解析をしていない。——このため補剛材で囲まれたパネル全幅に塑性域が及んでいるものと考えられる。
- ③ 浸漬時間——解析上浸漬開始から浸漬完了までの時間を160秒としているが、パイロットメンバーでは90秒で浸漬を完了している。浸漬速度が早い程熱応力を低減できる。

したがって、解析上上記以外に幾多の仮定を設けてはいるものの、今回の様な部材形状でも、熱応力によって解析結果にみられる様な塑性域が発生することはほとんどないものと考えられる。

また、解析上の最終変形はほとんど無視し得るものであり、パイロットメンバーに生じた変形は、部材の非対

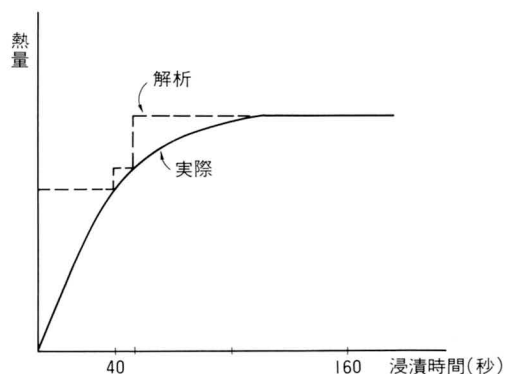


図-11 浸漬時間と入熱量の関係

称性および残留応力に起因するものであると推定される。製作ではフランジ、ウェブのパネル組立後、ローラー矯正で残留応力除去を行っているが、このことが部材変形を抑える上で大きな効果を示したものと考えられる。

(2) 構造詳細その他

- ① 縦シーム面の拘束材の検討については本稿で触れていない。しかし、めっき部材がコの字型の非対称断面であることから、何らかの拘束が必要であろうと考えられた。したがって解析上拘束材は無視しているが、めっき部材には橋軸方向にL-75×75×9をブレス状に組んで取付けている。この効果について明確ではないが、部材のねじり変形防止に対して有効であったと考えられる。
- ② スクラップは通常の塗装桁に比べればかなりのオーバーサイズである。これは、めっきのまわりや浸漬速度を配慮したものであるが、パイロットメンバーの浸漬状況からみて採用値よりやや小径のスクラップで充分であったと思われる。

7. あとがき

めっき槽の寸法的制約から、箱桁を分割してめっきした場合、どのような変形性状を示すか予想し難い所があった。そこで、予備実験と解析を行い、更にその結果を踏まえた実物大パイロットメンバーのめっき施工により、1シームの分割で施工可能であることを確認した。

今回の実験および解析から、

- ① 浸漬速度を早める（構造上の工夫をはかる）、
- ② 残留応力度を低減させる製作方法をとる、
- ③ ねじり変形を防止する為に拘束材を設ける、等の

対策を施せば、箱桁であっても防錆処理方法の1つとしてめっきを選択出来ると言える。

めっき橋は、塗装仕様と比べ初期コストは高くなるが、高い防錆機能と、維持管理面からの要求により、今後増加する事が予想される。鋼橋への要求が多様化していく中で、亜鉛めっき箱桁がその選択肢の1つとなり得るものとしている。

最後に、本橋のめっき施工に当って、日本道路公団高松建設局、伊予三島工事事務所ならびに、めっきを担当された新星工業株式会社の方々に御指導、御協力を戴いた事を深く感謝致します。

〈参考文献〉

- 1) 日本道路公団大阪建設局；近畿自動車道天理吹田線 溶融亜鉛めっき橋梁工事報告書、昭和63年3月
- 2) 金沢、山下、家沢、征矢；溶融亜鉛めっき橋梁の研究（I）、巴組鐵工所技報No.1、1987年
- 3) 金沢、山下、家沢、征矢；溶融亜鉛めっき橋梁の研究（III）、巴組鐵工所技報No.3、1989年
- 4) 日本橋梁建設協会；溶融亜鉛めっき橋 設計・施工マニュアル（案）、1990年1月
- 5) 藤本、古村、安部；高温度における構造用鋼材（SM50）の第一期クリープに関する実験、日本建築学会論文報告集、昭和56年8月
- 6) 鎌田、青木、沓掛；溶融亜鉛めっき橋の施工試験、宮地技報No.2、1986年
- 7) 伊藤、荒井；溶融亜鉛めっき曲線箱桁の設計、土木学会第45回年次学術講演会、平成2年9月
- 8) 鈴木、福田、青木；溶融亜鉛めっき曲線箱桁の製作、土木学会第45回年次学術講演会、平成2年9月

1990.10.31受付