

## 東海高架橋の設計および製作

仙田 英俊<sup>1)</sup> 河野 明寛<sup>2)</sup> 土屋 裕治<sup>3)</sup>  
石井 博彦<sup>4)</sup> 庄山 修<sup>5)</sup> 竹村 昌徳<sup>6)</sup>

今日の鋼橋建設において省力化，コストダウンが求められる趨勢の中，現在建設中の第二東名高速道路における鋼高架橋では全面的に「少数主桁形式」が採用され，主桁の現場溶接継手，10径間を超える多径間連続桁，PCプレキャスト床版の採用などこれまでにない構造となっている。

日本道路公団名古屋建設局より第二東名高速道路として発注され，高田機工・駒井鉄工・富士ピーエス共同企業体にて受注した東海高架橋は，将来的には共に第二東名高速道路として供用される伊勢湾岸道路の東端に連なる高架橋である。本橋においても少数主桁形式が採用されているが，架設現場に輸出用自動車のヤードが隣接しているために，主桁の現場継手は高力ボルトを使用している。

本文は当社が施工した本線橋下り線を中心にした設計・製作について報告を行うものである。

### まえがき

東海高架橋は第二東名高速道路（以下「第二東名」という）として発注され，本線橋2橋，ランプ橋4橋を高田機工・駒井鉄工・富士ピーエス共同企業体として受注したものである。伊勢湾岸道路の東端に連なる高架橋であり，伊勢湾岸道路との同時供用をめざして現在急ピッチで架設中である。少数主桁形式が採用されており，上り線が15径間連続桁，橋長750.000m，下り線が14径間連続桁，橋長700.000mと多径間化が図られている。

本橋の位置図を図-1に，下り線の一般図を図-2に，設計諸元を表-1に示す。

表-1 設計諸元

路線名	第二東名高速道路
橋名	東海高架橋
形式	15(14)径間連続鋼桁橋
道路規格	第1種第2級
橋長	750.000m(700.000m)
支間長	44.250+5×44.000+70.000+3×50.000+4×52.000+51.250m (43.250+3×44.000+70.000+44.000+3×50.000+4×52.000+51.250m)
有効幅員	14.715m(14.370m)
設計速度	100km/h
車線数	3車線+3車線
舗装	透水性アスファルト舗装 75mm
床版形式	PCプレキャストコンクリート床版 270mm
設計荷重	B活荷重

( )内は下り線を示す。

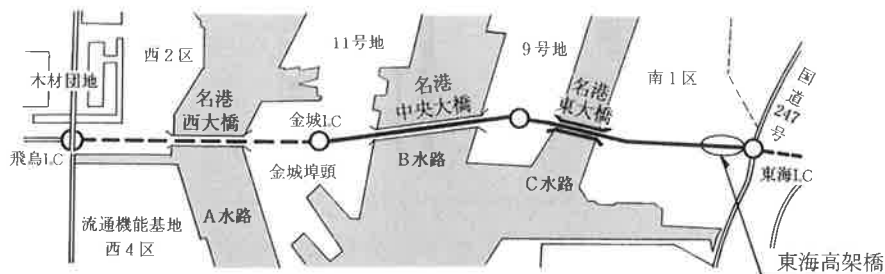


図-1 位置図

1) 東京設計部設計課 2) 東京設計部設計課 3) 富津工場橋梁部製造課 4) 富津工場技術部部长  
5) 富津工場橋梁部次長 6) 富津工場技術部技術課副課長

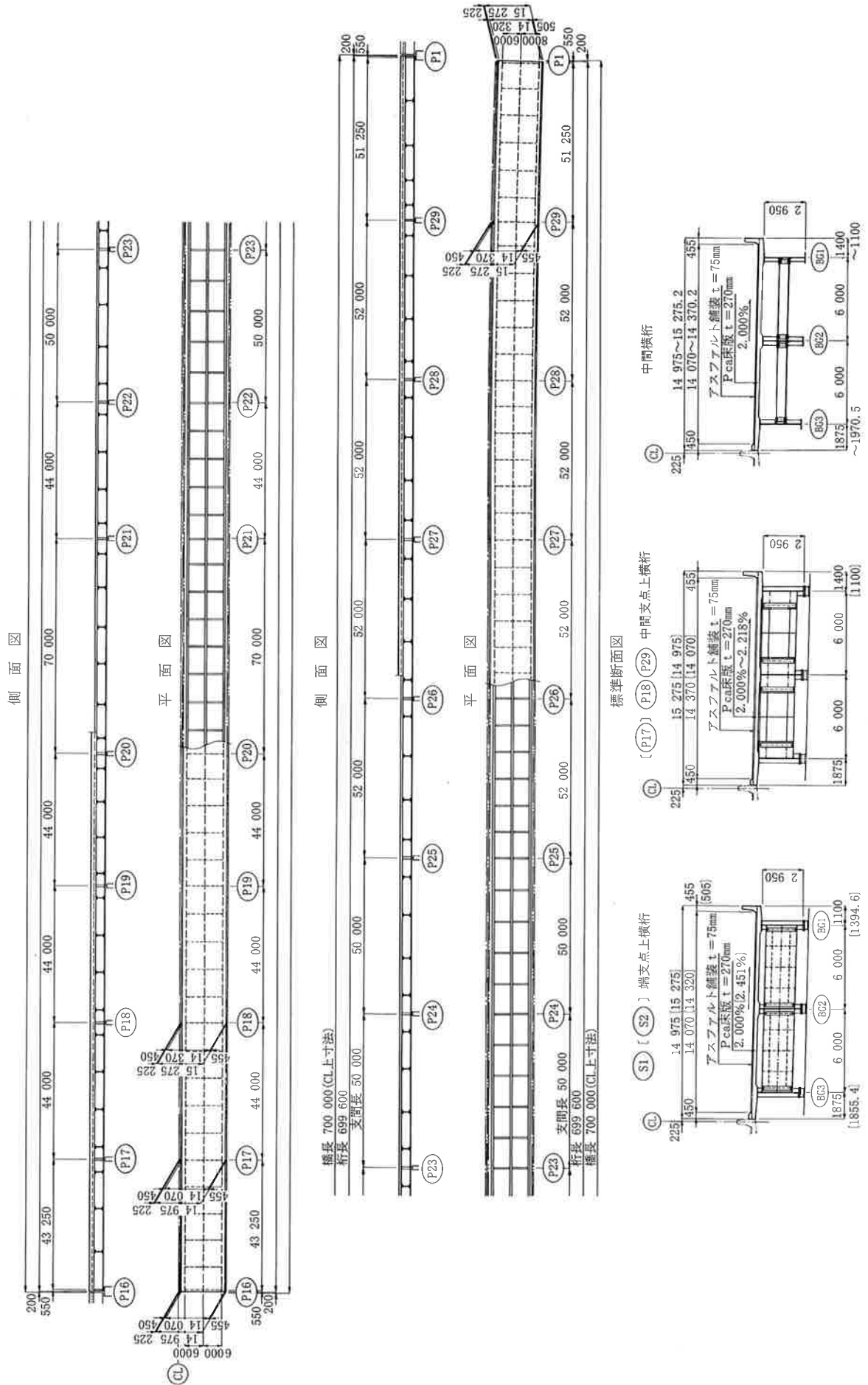


図-2 下り線構造一般図

## 1. 橋梁概要および特徴

本橋の標準的な幅員は片側3車線であるため、下り線で15.275mとかなり広い。通常の桁配置の場合、主桁本数は7本程度となるところを、少数主桁形式として主桁間隔6mで3本配置とし、PCプレキャスト床版を使用している。対傾構の代わりに形鋼の横桁を配置し、横構を省略して、横荷重は床版に受け持たせる構造となっており、橋梁下方からの印象はすっきりとしている。

第二東名では通常主桁の継手は現場溶接となっているが、本橋では架設現場が輸出用自動車のヤードと隣接しており、火気などの使用の制限より高力ボルト継手としている。

以下に本橋の特徴を記す。

### 1) 設計

- ・ PCプレキャスト床版を用いた少数主桁形式の採用
- ・ 一部材一断面
- ・ 横構、対傾構の省略(形鋼の横桁を配置)
- ・ 腹板にテーパプレートを採用
- ・ 主桁現場継手に高力ボルトを使用

### 2) 製作

- ・ 仮組立て省略と数値仮組立の採用
- ・ 予熱低減鋼の採用
- ・ 新塗装系の採用

## 2. 設計について

### 2.1 主桁の設計

#### (1) 主桁形状

主桁高は上下フランジを含めて2,950mmの一定とし、板厚変化は腹板側に逃がしている。フランジの幅は代表的な支間長ごとに、鋼重が軽くなるよう検討した結果、支間長70mの径間は700mm、その他の径間は650mmとした。また、中間支点上の下フランジは、許容曲げ圧縮応力度 $\sigma_{bs}$ の低減によりかなり板厚が厚くなるため、隣の断面との板厚差に制限を設け、それを越えた場合はフランジ幅を広げた。

腹板厚は水平補剛材を1段として決定した。

#### (2) 主桁の設計

断面決定は格子解析によって求められた断面力に対して行っている。

断面変化位置は現場継手位置とし、1部材1断面としている。現場継手位置は輸送、架設の条件の他に、添接板をPCプレキャスト床版のスタッド間隔の中に納めるため、PCプレキャスト床版の配置を考慮して決定した。添接板とPCプレキャスト床版との取り合いを図-3に示す。

継手部の板厚差は後述の理由により0mmまたは3mm以上とし、フランジの板厚差が1~2mmの断面変化は設けていない。

腹板は板厚の変化が小さく、板厚変化は両外側に逃がすため、板厚差は3mm以上にはならない。そのため、水平補剛材を1段配置とし、基本的な腹板厚を全橋に亘って15mmに統一した。したがって、各格間で垂直補剛材間隔が様々な値となっている。道路橋示方書・同解説(以下「道示」とする)Ⅱ編8.4では鋼種SM570の場合、本橋の桁高に対しての最小腹板厚は16mmとなるが、緩和規定で15mmとし、曲げ圧縮応力度のチェックを行った。

腹板厚を最小板厚で一定にしたために、せん断応力度が大きくなる中間支点両側の格間では垂直補剛材間隔が狭くなり、主桁の添接板が入らないケースが生じた。この場合、支点上断面の腹板厚を厚くし、添接板が収まる垂直補剛材間隔を確保し、隣接ブロックにテーパプレートを使用して添接部に板厚差が生じないようにした。図-4にテーパプレート使用例を示す。

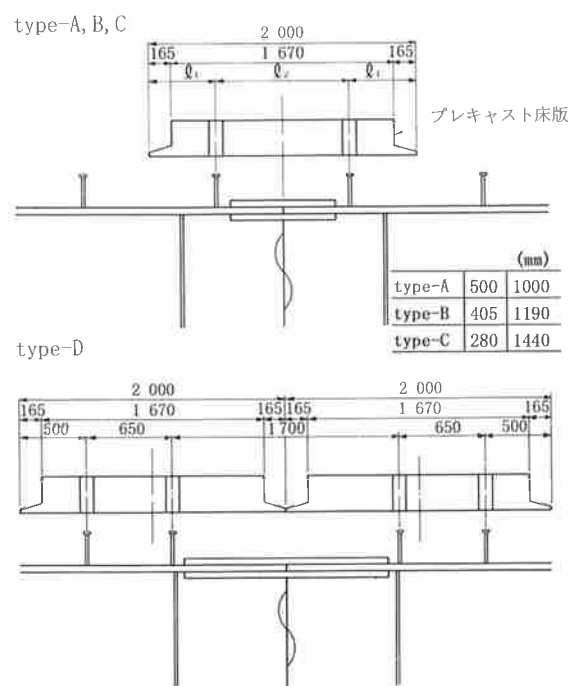


図-3 添接板とPCプレキャスト床版との取り合い

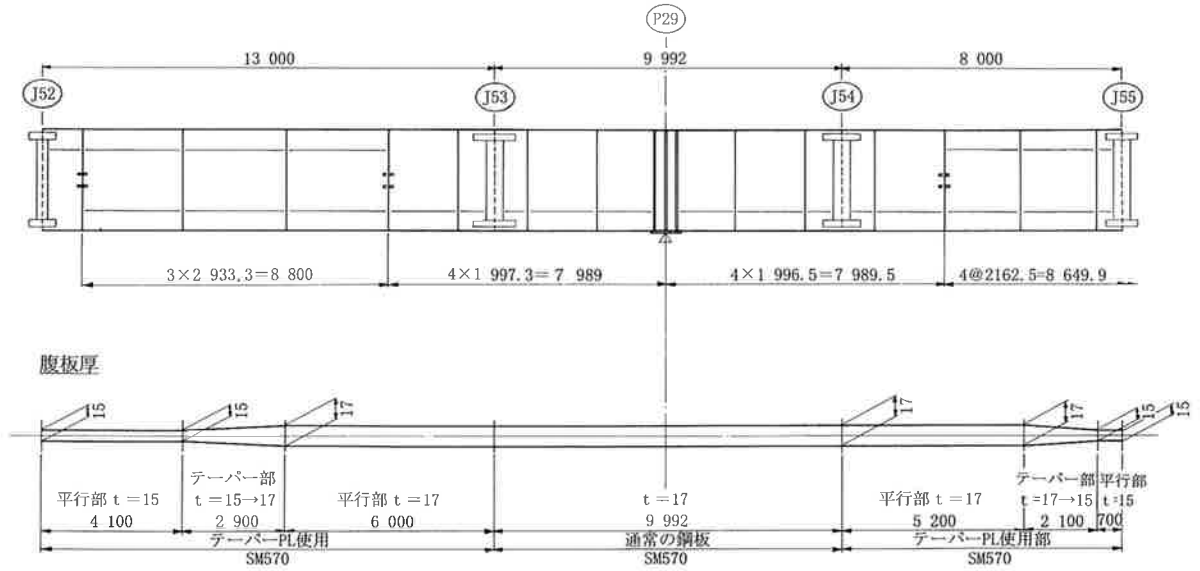


図-4 テーパープレート使用例

## 2.2 現場継手の設計

架設現場が海岸部に近いことより、現場継手には防錆処理を施した六角高力ボルトを使用し、耐力点検法で締め付けている。

フランジの断面が相当大きいので、現場継手を高力ボルトとすると、継手も長尺・多列ボルトとなり、添接板も厚くなる。また、添接板があまりにも大きくなると、PCプレキャスト床版のスタッドジベルとの取り扱い上好ましくない。ボルト列数は道示の解説文に“1ボルト線上に12本程度まではすべり耐力が低下しないという実験例もある。”とあることより最大12列とし、できるだけボルト列数を減らすためにフランジのみM24ボルトを使用した。

合理化・省力化の観点からは、腹板の添接板はモーメントプレートとシャーププレートとを一体化するほうが材片数の低減、現場でのハンドリングなどメリットが多い。しかし、本橋では1列目のボルト本数が最大9本必要となったため、一体化したものではボルト本数が多く、添接板も扱いにくくなり合理化とは言い難い。したがって、腹板の添接板は従来のモーメントプレートとシャーププレートに分割したものとした。

フィラープレートは腐食の観点から最小板厚は3.2mmとし、材質はSS400とした。2mm以下の板厚差をフィラープレート無しで接合した場合、添接板が厚いため高力ボルトで締め付けてもなじみにくいことが考えられ、1~2mmの板厚差は断面決定の時点で設けなかった。

添接板は、PCプレキャスト床版が載る上フランジ上側以外はフランジの両縁から5mm控え、添接板とフランジの目違いが生じても吸収できるディテールとしている(図-5)。

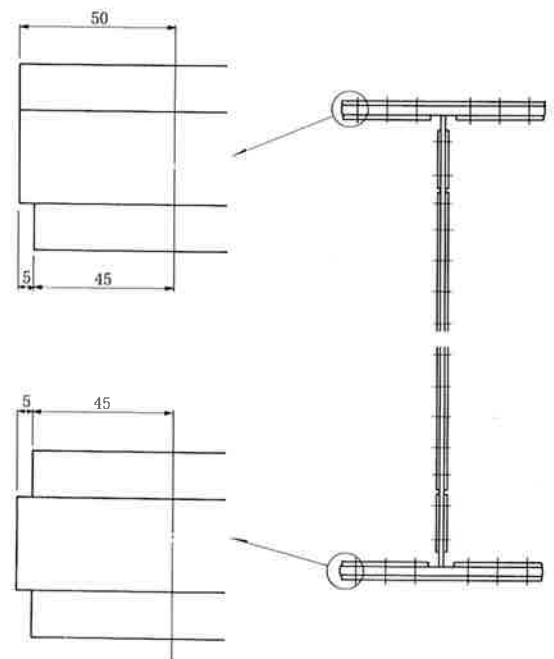


図-5 主桁添接板

## 2.3 横桁の設計

### (1) 支点上横桁

横構および対傾構を省略した少数主桁形式では、風荷重、地震荷重などの水平荷重は床版で受け持つ。床版によって伝えられた力は支点上で支点上横桁を通じて支承、下部工へと伝達される。

この伝達機構を考慮し、支点上横桁は図-6に示す3柱式ラーメンにて断面力を算出し設計している。載荷荷重は水平力による各支点の水平反力とし、試験工区である東海大府高架橋での全体FEM解析によって求められた外桁：内桁：外桁＝1.0:2.1:1.0の比率で載荷している。また、支点上補剛材は橋軸直角方向の水平反力による曲げモーメントを考慮して設計している(図-7)。

(2) 中間横桁

中間横桁はH形鋼を使用し、主桁高の1/2の

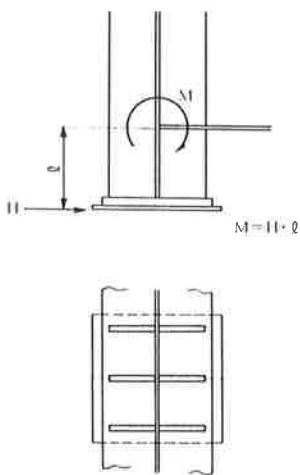
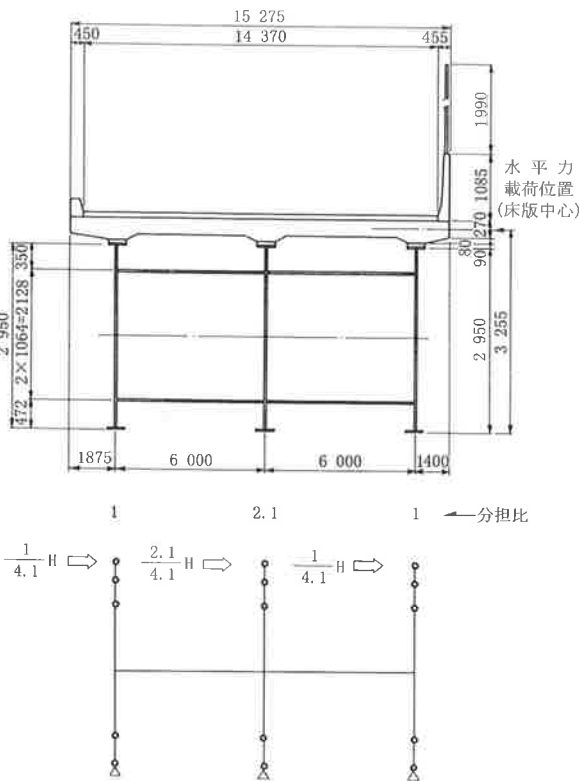


図-7 水平反力による曲げモーメント

位置に配置し、横桁間隔は最大10mとしている。しかし、中間支点近傍で主桁下フランジの固定点間距離が大きいと板厚が厚くなりすぎるような場合には、支点の隣の横桁間隔を7m程度まで小さくした。

主桁との連結は図-8に示すスプリットT接合としている。この形式はT型のコネクションを主桁の腹板に引張ボルトにより連結しており、溶接がないため疲労に対して有利な構造である。なお、引張ボルトの設計は日本鋼構造協会の「橋梁用高力ボルト引張接合指針(案)」(以下「指針」という)によった。

高力ボルトは耐力点検出法で締め付けることは前述した。しかし、引張ボルト接合を行う場合、指針では締め付け方法はトルク法でなくてはならないと規定している。本橋では中間横桁取付部の引張ボルトはトルシアボルトを使用し、工場で締め付け、塗装まで施工した。

2.4 橋梁付属物

(1) 支承

支承はゴム支承の反力分散沓を使用し、「第二東名・名神高架橋 反力分散型ゴム支承の設計基準(案)」に従って設計している。サイドブロックは橋軸直角方向のみに取り付けられている。

アンカーボルト箱抜き施工誤差に対しては、箱抜き位置の測量後に下沓のアンカーボルト孔を施工するようにして対処している。

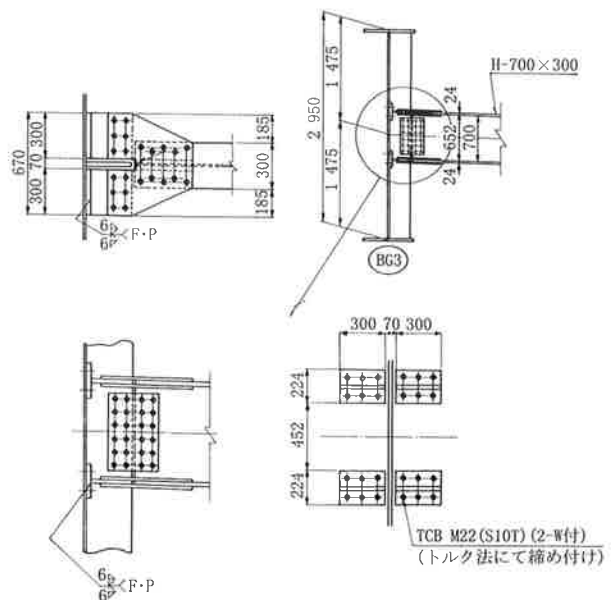


図-8 中間横桁取付部

(2) 落橋防止装置

落橋防止装置はPCケーブルを用いたケーブルタイプと、上部工に梁を取り付け、下部工の突起にぶつけるストッパータイプの2種類を取り付けている。P16側のケーブルタイプは、隣接工区が変速車線のために拡幅しており、主桁腹板の位置が一致していないことから、端支点上横桁の巻き立てコンクリート同士をつなぐ形式とした。

(3) 排水装置

排水柵は支間長にかかわらず各支点上に1ヵ所とし、横引き管を用いない構造としている。

3. 製作について

製作面から見た本工事の大きな特徴としては、いかにコストを抑えるかが大きなポイントであり、発注者側からも、コストダウンに向けての提案(VE提案)を強く指導された。製作に当たる当社富津工場の特徴を最大限に活かすと共に、大きな成果が期待できる項目として下記の項目を採用した。

- ・ 予熱低減鋼の採用  
(鋸桁自動組立装置を利用し、厚板フランジに対応)
- ・ テーパー鋼板の採用  
(板継ぎ、フィラープレートの省略)
- ・ 機能性プライマーの採用  
(加工手順による溶接性の向上)
- ・ 新薄膜重防食塗装系の採用  
(費用削減、塗装工程低減)
- ・ 実仮組立の省略  
(仮組立シミュレーションの採用)

3.1 予熱低減鋼

構造上フランジ材に板厚55mmのSM570材を用いていることから、溶接施工時期を考え、予熱低減鋼を採用した。

予熱低減鋼の優位性を調査するため、50mm厚のSM570-Q(一般調質鋼)および55mm厚のSM570-EX(予熱低減鋼)について、以下の溶接性試験を実施した。供試材の化学成分は表-2のとおりである。表-2にあるように予熱低減鋼は、Cu, Ni, Cr を低くし、Mn, Mo を一般調質鋼より若干高めに行っているのが分かる。

表-2 供試材の化学成分表

材 質	化学成分					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
SM570-Q	11	24	131	9	1	19
SM570-EX	8	26	145	4	1	2

(×10 <sup>-2</sup> )							
	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ceq	PCM
	21	10	12	5	2	40	21.5
	3	5	17	4	-	38	18.1

(1) 最高硬さ試験結果

一般的に、板厚の厚い方が冷却速度が速いため硬くなりやすいが、図-9に示すように、55mm厚の予熱低減鋼の方が最高硬さが低い結果となっており、予熱低減鋼の優位性が示されている。

また、手溶接(SMAW)と炭酸ガス半自動溶接(GMA)では後者がより低くなっている。これは、GMAの方が入熱量が大きいためである(当社の仮付け溶接はGMAで施工しており、より安全側の施工といえる)。

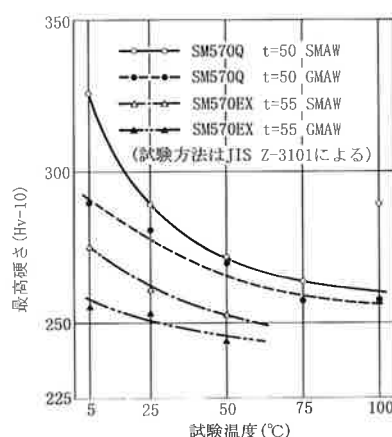


図-9 最高硬さ試験結果

(2) Y型スリット割れ試験結果

JISZ-3158により最高硬さ試験と同じ条件で試験したが、SM570-Q(t=50) SM570-EX(t=55)共に、表面割れ率、断面割れ率およびルート割れ率は0の結果を得た。

(3) 試験結果の考察

以上のように最高硬さ試験およびY型スリット割れ試験から、予熱なしで施工しても問題ないことが確認された。

平成8年12月改訂版の道路橋示方書では、新たにPCM値と最低予熱温度の目安が追加されて

表-3 最低予熱温度表

板厚 (t)	溶接法	PCM	HD	K	TP (°C)
50mm	SMAW	0.215	3	1000	+25.6
50mm	GMA	0.215	1	1000	-21.9
*55mm	SMAW	0.181	3	1100	-20.5
*55mm	GMA	0.181	1	1100	-68.0

\*予熱低減鋼

いる。供試材の化学分析値を用いて最低予熱温度 TP(°C) を試算すると表-3のとおりとなる。

最低予熱温度 (TP) の算定式

$$TP = 1440 Pw - 392 \text{ (°C)}$$

$$Pw = PCM + HD / 60 + K / 40000$$

溶接金属の拡散性水素量 (HD)

- ・低水素系被膜アーク溶接法の場合

$$HD = 2 \text{ cc} / 100\text{g}$$

(安全側から 3 cc で試算)

- ・炭酸ガス半自動溶接の場合

$$HD = 1 \text{ cc} / 100\text{g}$$

継手の拘束度 (K)

$$K = 20t \text{ kgf} / \text{mm} \cdot \text{mm}$$

表-4 塗装系比較表

項目	仕様	
	J H C 2仕様	新薄膜重防食塗装系
ミルメーカー	一次処理 無機ジंकリッチ プライマー 15μ (0.20kg/m <sup>2</sup> )	一次処理 無機ジंकリッチ プライマー 17μ (機能性プライマー) (0.20kg/m <sup>2</sup> )
工場	二次処理 無機ジंकリッチ ペイント 75μ (0.70kg/m <sup>2</sup> ) ミストコート (0.16kg/m <sup>2</sup> ) エポキシ樹脂塗料 下塗 60μ (0.30kg/m <sup>2</sup> ) エポキシ樹脂塗料 下塗 60μ (0.30kg/m <sup>2</sup> ) ポリウレタン樹脂 塗料中塗 30μ (0.17kg/m <sup>2</sup> ) ポリウレタン樹脂 塗料上塗 25μ (0.14kg/m <sup>2</sup> )	二次処理 無機ジंकリッチ ペイント 75μ (0.70kg/m <sup>2</sup> ) ミストコート (0.16kg/m <sup>2</sup> ) 変性エポキシ樹脂 塗料 120μ (0.45kg/m <sup>2</sup> ) ポリウレタン樹脂 塗料上塗 25μ (0.14kg/m <sup>2</sup> )
	1. 防食性	○~◎
2. 耐候性	○	○
3. 溶接・溶断性	○	◎
4. 耐汚染性	○	○
5. 施工性		
エアレス作業性	○	○
硬化乾燥性	◎	◎
6. 工場塗装回数	6	4
7. 合計膜厚	250μ	220μ
8. 工費比率	1.00	0.81

最高硬さ試験において危険域まで余裕があること、通常橋梁の拘束度は20t (t:板厚) 前後であるが70tの拘束度を有する条件の厳しいY型スリット割れ試験でも割れ率が0であること、この試算でも予熱なしに施工しても良いことなどが裏付けられ、今後の冬季施工となる物件では、予熱低減鋼の採用は有効であることが確認された。

### 3.2 新薄膜重防食塗装系

塗装工程削減と費用低減を考慮した新塗装系と従来の塗装系との比較表を表-4に示す。

### 3.3 製作全体フローチャート

製作全体のフローチャートを図-10に示すが、一般的な仮組立を行う作業工程とでは後半部分に差異がある。

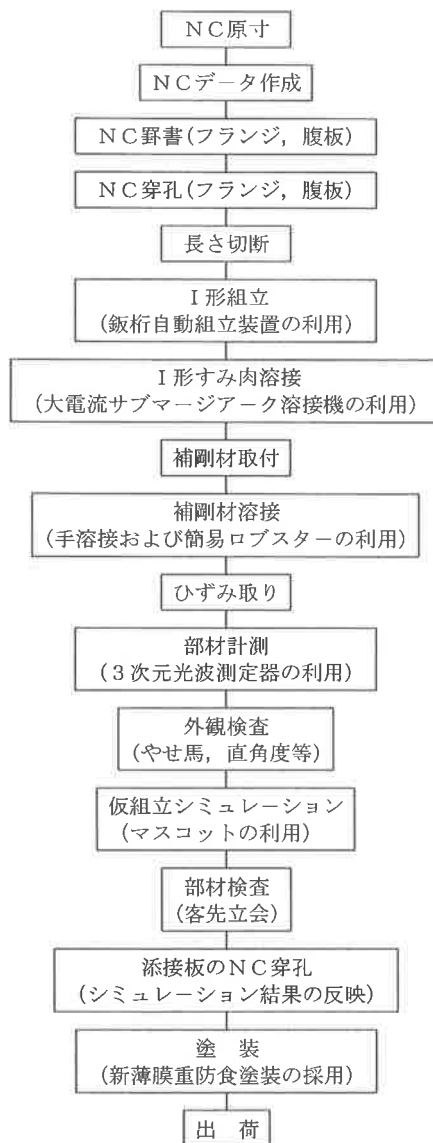


図-10 製作全体フローチャート

### 3.4 仮組立シミュレーション

#### (1) 代替仮組立の方法と範囲

代替仮組立の方法は、部材計測による単品部材の精度確認と数値仮組立(シミュレーション)により、精度確認を行った。

本橋は横構を省略しているが、各支点位置には架設時に形状を保持するための仮横構を設置した。したがって、製作精度の確認をするために、支点部は実仮組立を行った。

さらに、本工事の仮組立は、代替仮組立を基本としているが、現場の架設条件および数値仮組立の検証を考慮し、部分的に実仮組立を行った。範囲は下記のとおりである。

- ・ランプ桁：全量を実仮組立  
(代替仮組立と比較検証する)
- ・本線桁：支点部の隣接ブロックを実仮組立  
(位置決め用横構があるため)

#### (2) 部材計測

部材計測項目と計測機器を表-5に示す。

計測機器(3次元光波測定器)は下記を使用した。

- ・メーカー：(株)ソキア
- ・3Dステーション：NET2A
- ・測定可能範囲：2～100m
- ・精度：測角部 2秒  
測距部  $0.8 + 1\text{ppm} \times D(\text{mm})$

3次元計測を行う計測位置は、予めシミュレーションシステムから出力された計測点指示図により決定した。

表-5 部材計測項目および機器

部材名	計測項目	計測機器
主桁	部材長 部材高さ 横桁取付位置 縦断勾配 平面曲がり キャンバー 各ボルト孔位置 フランジ幅	3次元光波測定器
	フランジと腹板の直角度	直角定規, スキマゲージ
	腹板の平面度	直尺, スキマゲージ
横桁	部材長 部材高さ 各ボルト孔位置	3次元光波測定器
	フランジと腹板の直角度	直角定規, スキマゲージ
	腹板の平面度	直尺, スキマゲージ



写真-1 計測状況



写真-2 ターゲット取付状況

部材精度の確認は、3次元光波測定器にて計測したデータをシミュレーションシステム(マスコット)に取り入れて、座標計算を行い、部材検査成績書として出力した。そして、この成績書の製作誤差より合否を判定した。なお、寸法以外の外観および付属物の取り付け位置などは、外観検査を行い図面との照合を行った。計測状況およびターゲットの取付状況を写真-1, 2に示す。

#### (3) 数値仮組立

本工事に使用する数値仮組立(シミュレーション)システムは、下記のシステムを使用した。

- ・メーカー：日本構研情報(株)との共同開発
- ・システム名：マスコット

数値仮組立による、部材精度確認のフローチャートを図-11に示す。

主桁部材配置は、NC原寸データをもとに作成された3次元形状認識データと、3次元光波測定器にて計測した計測データをもとにして、各主桁を所定の位置に配置し、CAD画面を用いて会話形式で、支間長、キャンバーなどの調整を行った。調整は、現場継手部で所定の精度内に入るように行い、その数値を添接板加工情報として出力させた。横桁部材配置も、主桁部材配置と同様の要領で調整を行った。



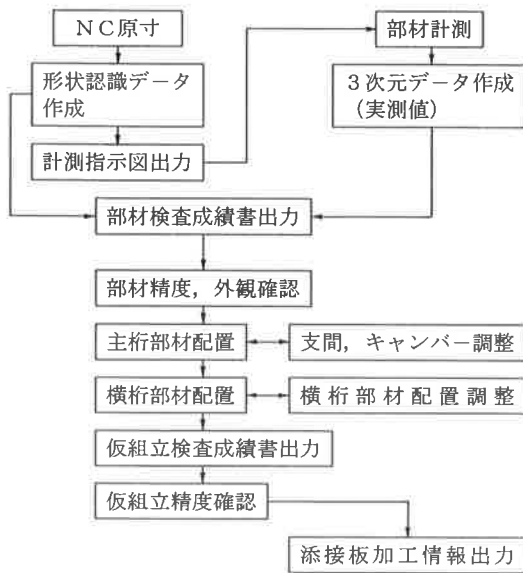


図-11 数値仮組立フローチャート

CAD画面での部材配置調整が完了した後、結果を帳票として出力し、再確認している。出力結果表は、下記の内容が、確認できるものである。

- ・ 全長, 支間長
- ・ 桁高
- ・ 桁の中心間隔
- ・ 桁の通り
- ・ 平面对角長
- ・ そり
- ・ 桁の鉛直度
- ・ フランジ幅
- ・ 横桁の孔ずれ
- ・ 現場継手部のすき間
- ・ 現場継手部の相対誤差
- ・ フランジの直角度
- ・ 板の平面度

シミュレーション結果

現物計測結果

合否の判定は、構造物施工管理要領（日本道路公団）の部材および仮組立の精度基準により行った。

シミュレーション出力帳票を図-12～23に示す。

(4) 立ち会い検査

本工事の立ち会い検査は基本的に部材検査であり、参考として仮組立シミュレーション結果の説明を行った。社内検査では、仮組立シミュレーションを行うため、3次元光波測定器を用いて計測を行った。しかし、立ち会い検査時には、測定結果などの処理に時間がかかるため3次元光波測定

器は使用せず、テープ計測によって部材長、桁高などを検査した。また、外観チェックシートを用いて、付属物の取付位置、やせ馬、直角度などの検査を行った。

(5) 実仮組立, 数値仮組立および現場施工結果の比較

ランプ桁（Cランプ）におけるキャンバー値は表-6のとおりである。また、キャンバー値比較表を図-24に示す(縦断勾配は含まない)。グラフが示すとおり最大5mm程度の誤差が生じているが、

表-6 ランプ桁（Cランプ）キャンバー値 (単位: mm)

		S1	C1	C2	C3	C4	PC1	C5	C6	C7	C8	S2
G2 桁	設計	0	26	35	28	10	0	13	34	40	29	0
	実仮	-4	28	36	31	10	4	15	36	39	31	5
	数仮	0	25	35	31	16	1	16	39	41	30	3
	現場	-1	28	40	28	9	0	15	33	42	27	0
G1 桁	設計	0	29	41	34	13	0	10	29	36	26	0
	実仮	0	32	43	40	17	3	9	31	35	29	0
	数仮	1	32	43	34	14	-1	11	30	38	27	0
	現場	-	3	4	3	1	-1	11	27	38	25	0

設計：設計値      実仮：実仮組立  
 数仮：数値仮組立      現場：現場測定値

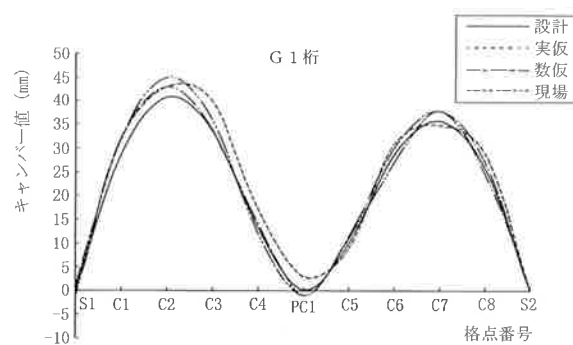
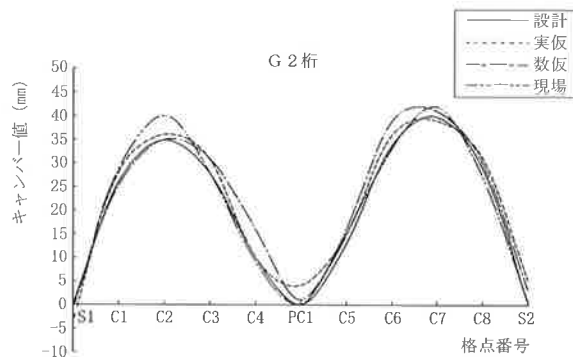


図-24 キャンバー値の比較

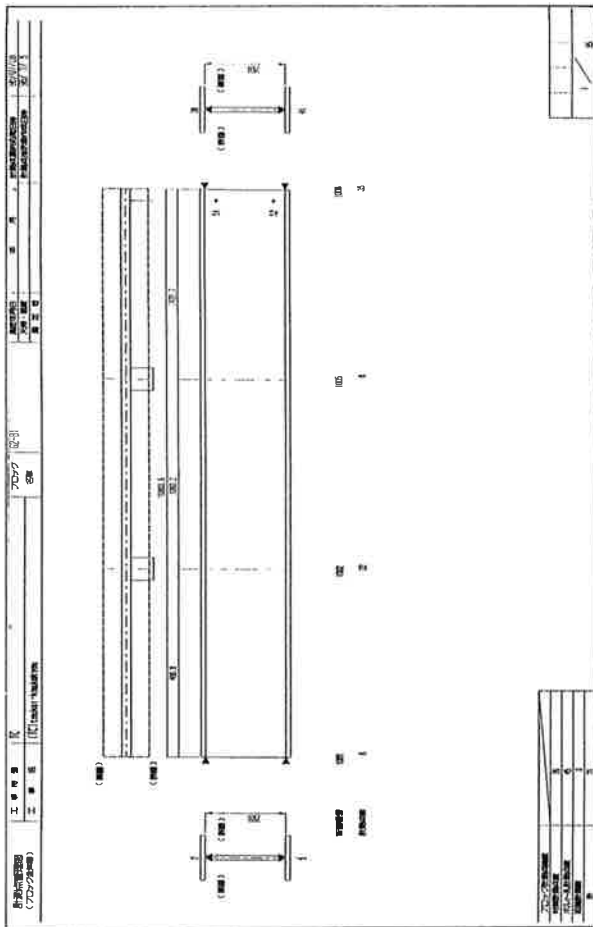


図-12 計測点管理図 (ブロック全体図)

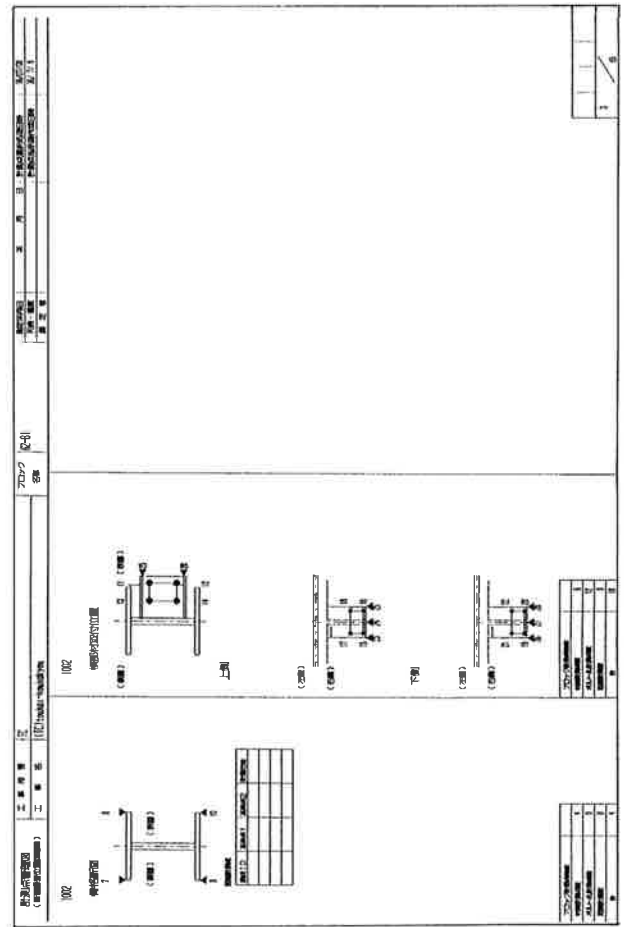


図-14 計測点管理図 (断面番号位置詳細図)

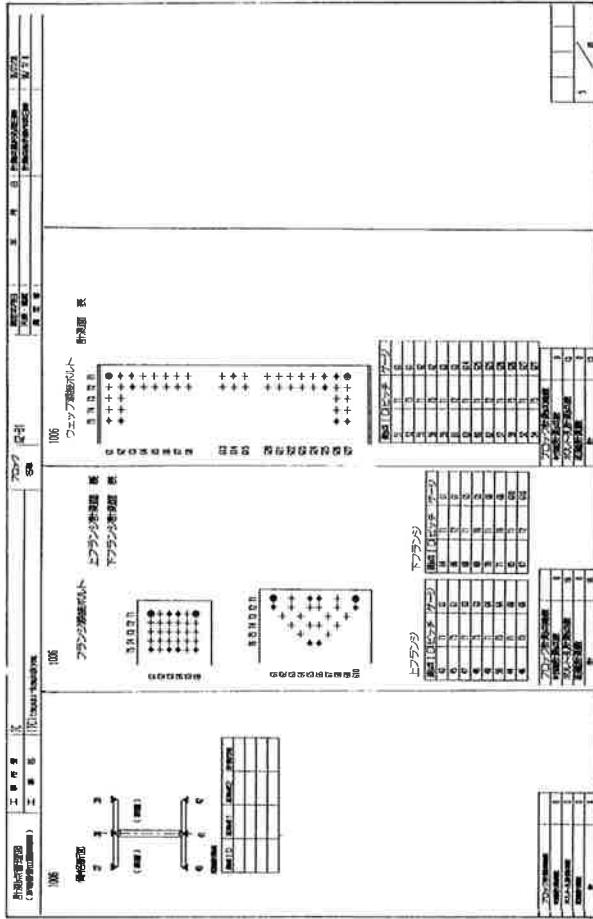


図-13 計測点管理図 (断面番号位置詳細図)

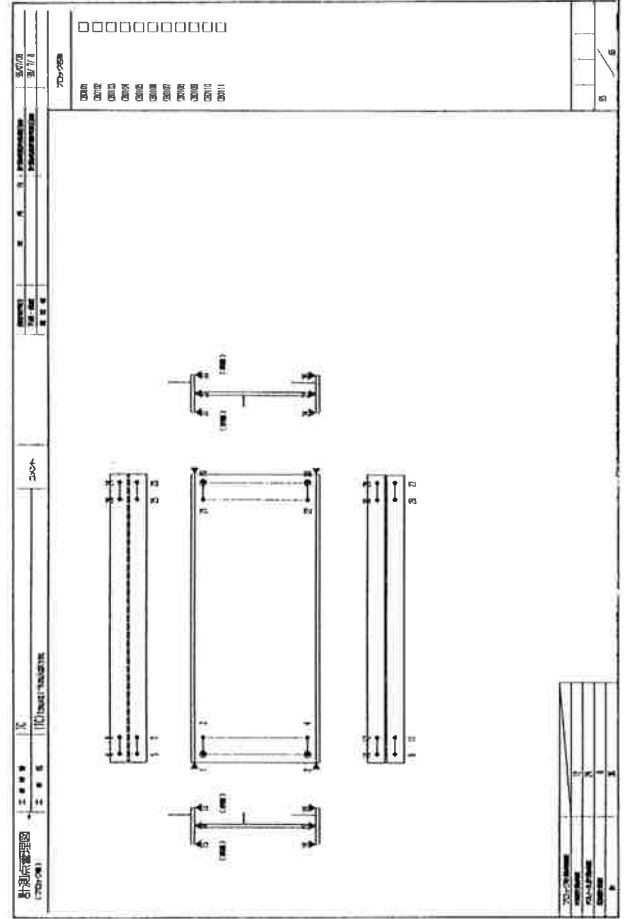


図-15 計測点管理図 (ブロック図)

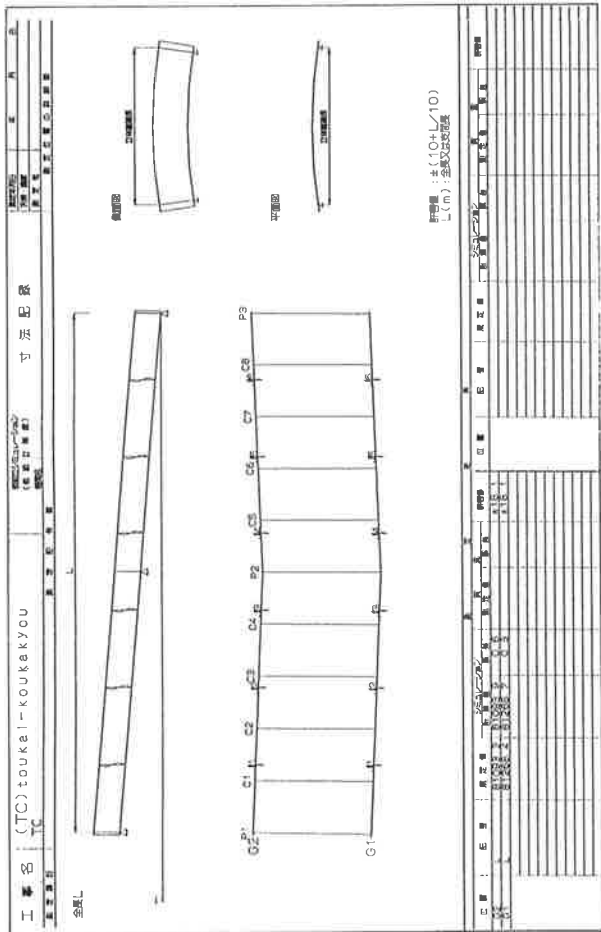


図-16 仮組立シミュレーション(その1)

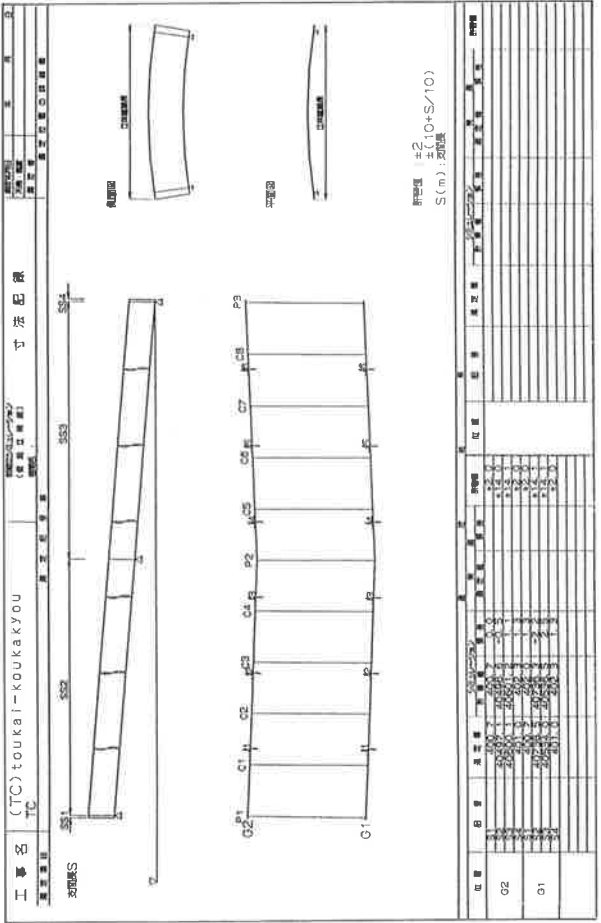


図-17 仮組立シミュレーション(その2)

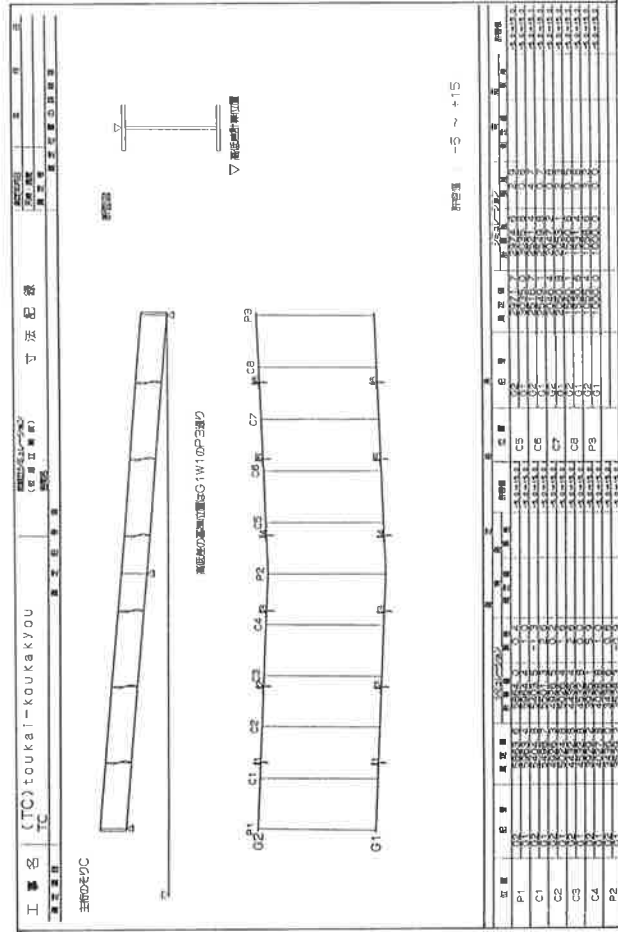


図-18 仮組立シミュレーション(その3)

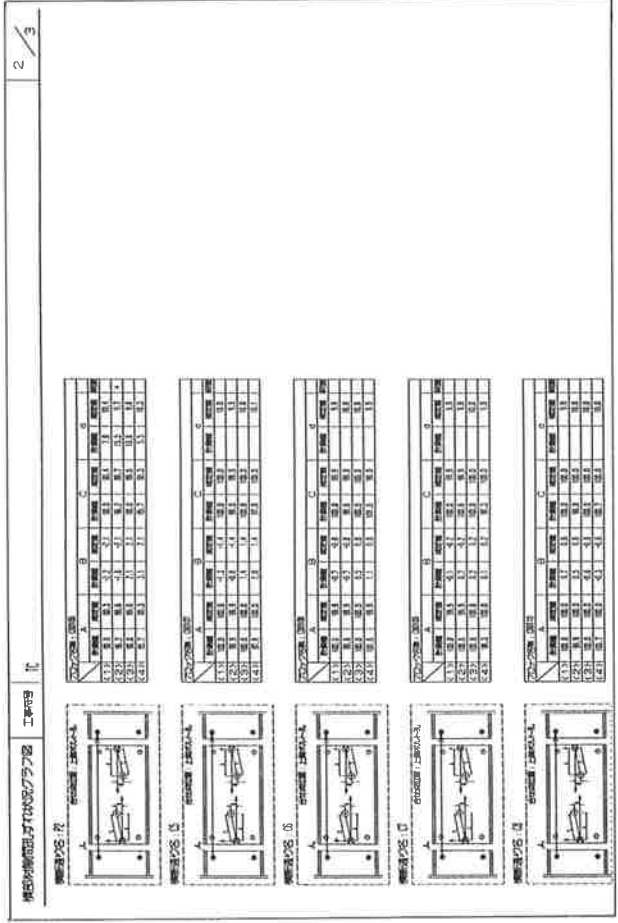


図-19 横部材寸法間孔ずれ状況グラフ図



許容誤差(−5mm～+15mm)内であり、数値仮組立(シミュレーション)の信頼性が証明されたと考えられる。この結果を踏まえて、本線桁では数値仮組による実仮組立省略を本格的に採用した。

## あとがき

今回、当社で初めて少数主桁、仮組立省略などの合理化構造を製作し、現在架設中である。

特に製作面で実仮組立省略、代替仮組立に取り組んだことは特筆すべき点であろうと思われる。すなわち、代替仮組立の手段として、部材を3次元計測した上で仮組立シミュレーションを行ったことである。本工事だけではあるが、部材精度をより向上させれば、良好なシミュレーション結果を得ることが確認できた。

今後、部材精度とシミュレーションの関係を積み重ね、

- ①部材精度をより向上させ、仮組立シミュレーションを行わない。
- ②部材精度をラフにし、仮組立シミュレーションの結果から調整ブロックで全体形状を確保する。

のいずれかの方向に収束していかなければ、仮組立省略の意義は薄れるものと思われる。現在、仮組立省略の導入期で、仮組立シミュレーションのシステム開発にウェイトが置かれている感が強いが、システム開発がほぼ成熟した段階で、本来に戻って実仮組立省略の意義を再考すべきであろう。

上述の①、②あるいは他の方法のいずれに収束しようとも、精度の許容値の見直しも必然的に必要になると思われる。各位のご意見を賜れば幸いである。

最後に、ご指導、ご協力を頂いた関係各位に深く感謝の意を表します。