

Ⅲ期築港工区(3径間連続曲線鋼床版箱桁)の設計

辰口 聖一¹⁾ 谷口 利行²⁾
吉村 文達³⁾

近年、市街地では架設空間が限定された高架橋が多くなっている。必然的にこれらの架設工法として送出し工法が多く採用され、また、送出し装置の進歩とともに、より大規模な橋梁や曲線橋梁の架設にも適用されるようになってきている。

送出し工法により架設される橋梁では、最初から送出しを念頭においた設計をする必要がある。解析では、送出しから完成系まで変化する構造系の中から最適な構造系と荷重の組合せを選定すること。また、送出し途中では全体の安定のほかにも局部的な部分の安全性も確保する必要がある。

本橋は曲線鋼床版箱桁に送出し工法を採用した例であり、主にその設計について概要を記すものである。

まえがき

本橋は大阪府道高速湾岸線、港大橋北の天保山運河上に位置する曲率半径 $R=260\text{m}$ の3径間連続鋼床版箱桁である。昭和59年、阪神高速道路公団より駒井・佐藤・東海の3社JVとして受注したものである。同位置は、当社が昭和47～49年に設計・製作・架設を行った築港第3工区(阪神高速道路公団：3径間連続鋼床版箱桁、鋼製橋脚)のちょうど下段にあたる所でもある。(図-1参照)

本橋は3径間のうち、2径間は運河上、残り1径間は陸上部となる。このうち、運河上の2径間は架設中も航路を確保しなければならず、ベント等の水上施設は設けられない。また、上方は供用中の橋梁があるため余裕空間が狭く架設に利用できない。したがって、架設工法として運河上の2径間は手延機による送出し、陸上の1径間はベント利用のトラッククレーン工法とした。

本橋では曲線桁の送出し工法が架設の特色となり、また送出しを考慮した解析が設計の特色となる。以下に本橋の特色を混じえながら設計の概要を報告する。

1. 工事概要

本工事の概要を下に、一般形状を図-2に示す。

路線名	大阪府道高速湾岸線
工事名	Ⅲ期築港工区(その2)鋼桁工事
橋格	1等橋(TL-20, TT-43)
形式	3径間連続曲線鋼床版箱桁
橋長	219.902m

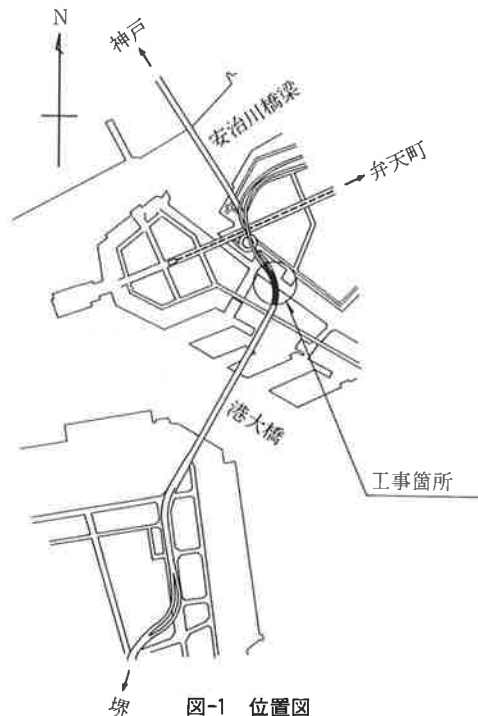


図-1 位置図

1) 大阪橋梁技術部設計第1課係長 2) 大阪橋梁技術部設計第1課
3) 大阪橋梁技術部設計第2課課長

支間長 61.496+85.977+71.429m
 総幅員 25.499~26.079m
 主要鋼材 SM58, SM50Y, SS 41
 総鋼重 2,579ton
 架設工法 手延機による送出し工法 (運河上)
 トラッククレーン工法 (陸上部)

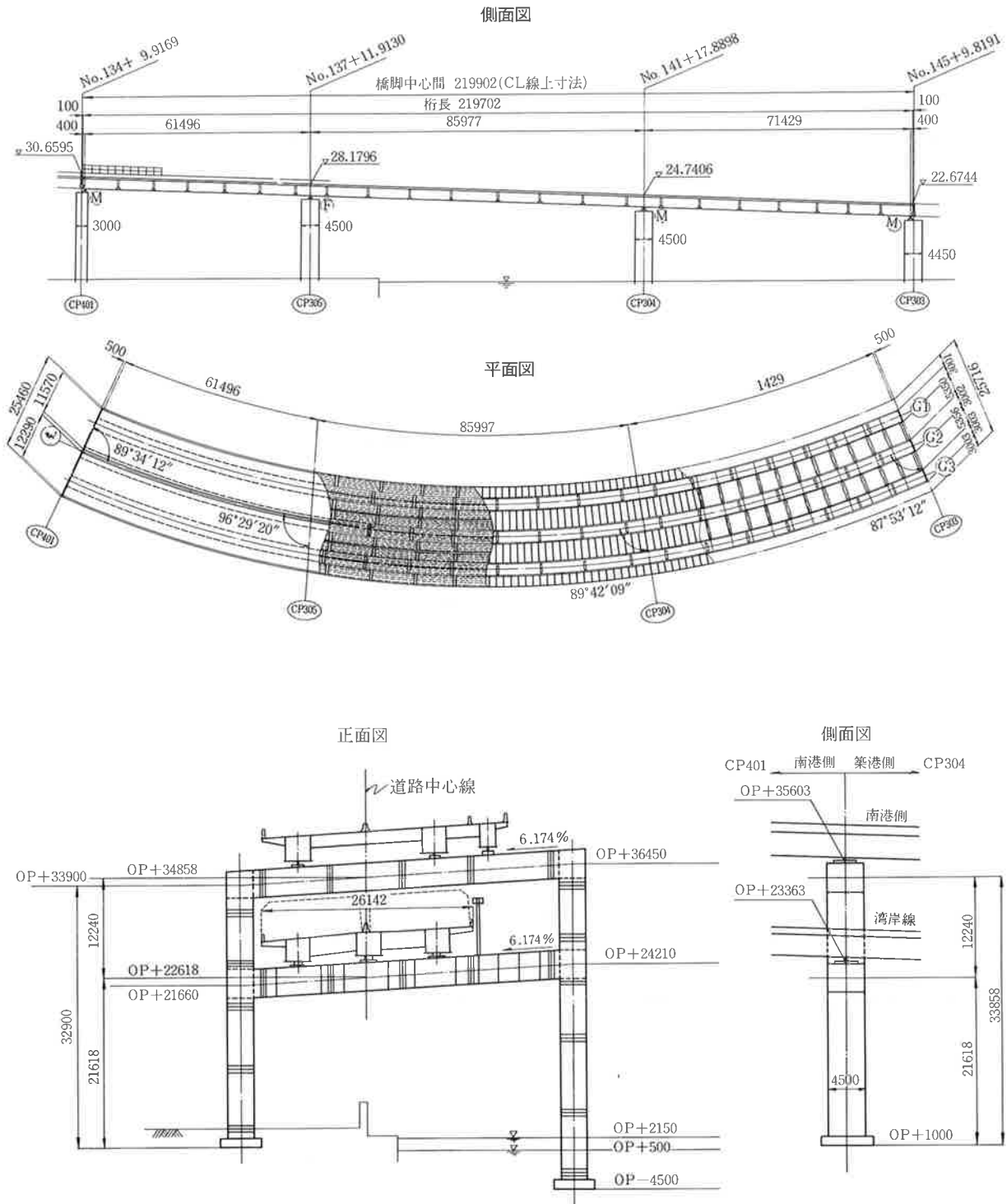


図-2 一般図

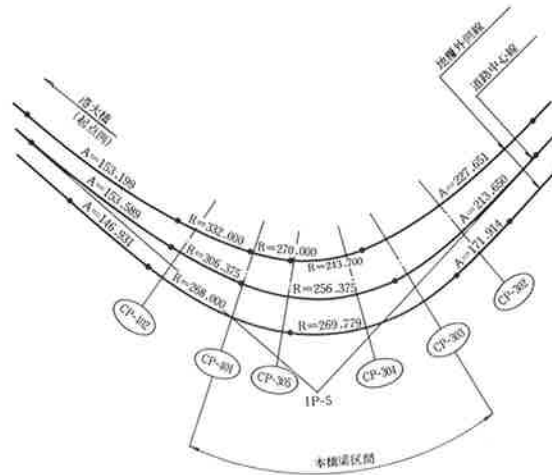
2. 線形

本橋の線形要素を図-3に示す。

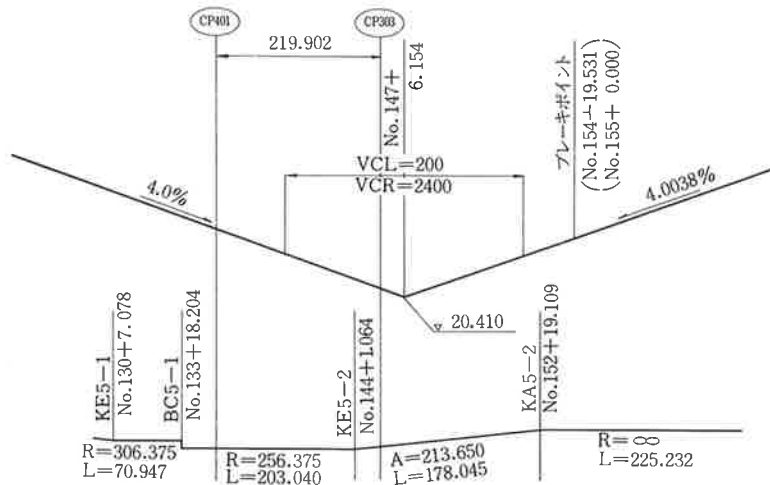
平面線形は円およびクロノイドで構成され、左右地覆外側線と道路中心線の3本が基準要素となっている。

各主桁線および主桁幅（腹板間隔）は基本計画に合わせて決定した。その後、現場実測により計画線と既設橋脚位置とを照合した結果、橋軸・橋軸直角方向ともずれていることが判明した。計画支承位置でのずれ量は橋軸方向が4~29mm、橋軸直角方向が4~330mmであった。既設橋脚には基本計画に基づいて沓座が設けられており、橋軸方向および橋軸直角方向の小さなずれ量に対しては沓座の余裕で十分対処できた。しかし、橋軸直角方向のずれに対しては沓座の余裕のみで対処できず、箱桁中心と支承中心とを偏心させた。

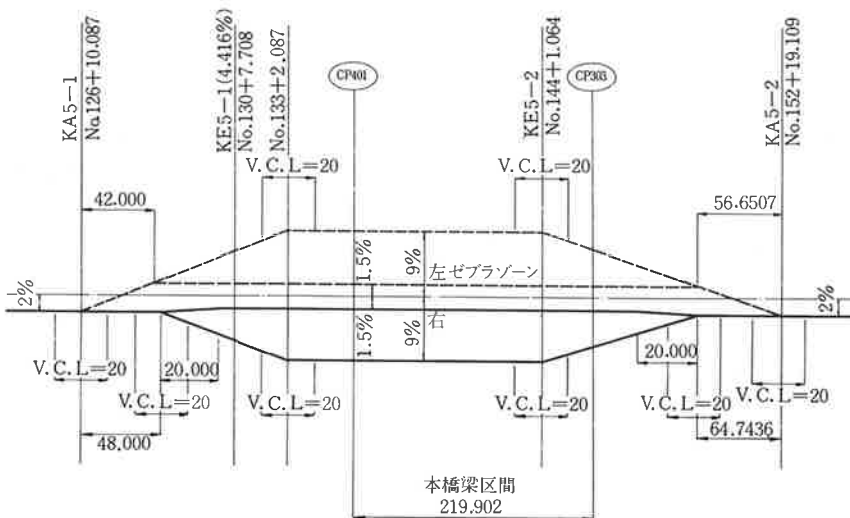
横断形状は曲率半径と設計速度(80km/h)から最大9%の横断勾配となり、また曲率内側に視距による拡幅部が設けてある。この拡幅部の横断勾配は一率1.5%、中央分離帯部はレベルとなるため、図-4に示す形状となる。本橋は鋼床版であるため、舗装面の勾配変化位置がデッキプレート折曲げ位置となる。特に中央のG2桁上では、箱内2ヶ所での折曲げとなり、製作の上でも難しい線形であった。



平面要素



縦断線形



横断勾配

図-3 線形図

(切断線)

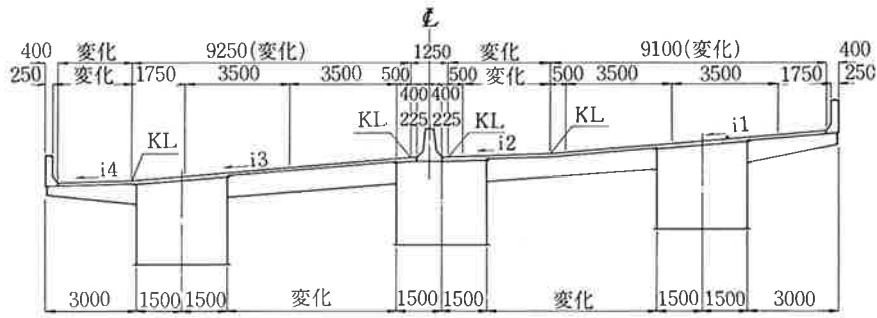


図-4 横断形状

3. 鋼床版

分配横桁は本橋が曲線桁であることから6m以内の間隔となるように配置し、その間3等分位置(1.18~1.89m)に横リブを設けた。

縦リブは本橋の最小曲率半径がR=250mであるため、閉断面リブ(トラフリブ)では曲げ加工が難しくなる。したがって、開断面リブ(バルブプレート)を使用した。

本橋に用いた横リブ、ブラケット、縦リブ断面を図-5に示す。

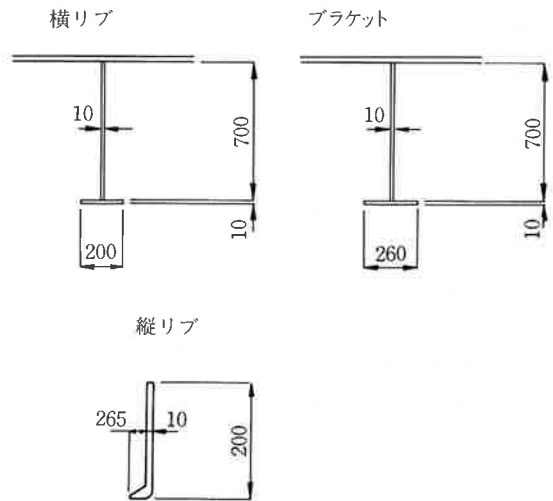


図-5 横リブ・ブラケット・縦リブ

4. 主桁

(1) 解析の方針と手順

本橋の架設要領を図-6に示す。

主桁は3径間のうち2径間を手延機による送出し架設、残り1径間をトラッククレーン架設によるため、解析構造系は送出し直後の2径間連続1本梁から最終の完成系まで大きく変化する。設計ではこの架設順序と構造系を考慮して解析しなければならない。表-1に架設ステップとそれに対応した解析構造系を示す。

主桁の断面は各構造系での安定照査および合計応力度にて決定されることになるが、構造系がいくつもあると仮定条件(剛度、鋼重)が決めにくく、時間も要する。そこで、本橋の設計では表-1の解析に先立ち、実際とは異なる構造系にて解析を行い基本となる断面を求めた。次に、この基本断面を表-1の解析にあてはめ、最終断面を決定する手順をとった。図-7にこの手順を示す。

なお、送出し途中においては、設計時引張となるフランジの圧縮応力照査、送出し装置上の応力集中、腹板の座屈照査が必要となる。これは後の8. 架設時の照査に記す。

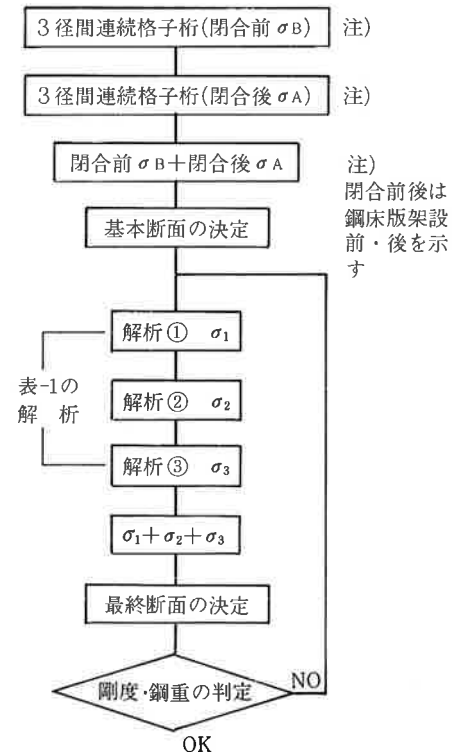


図-7 フローチャート

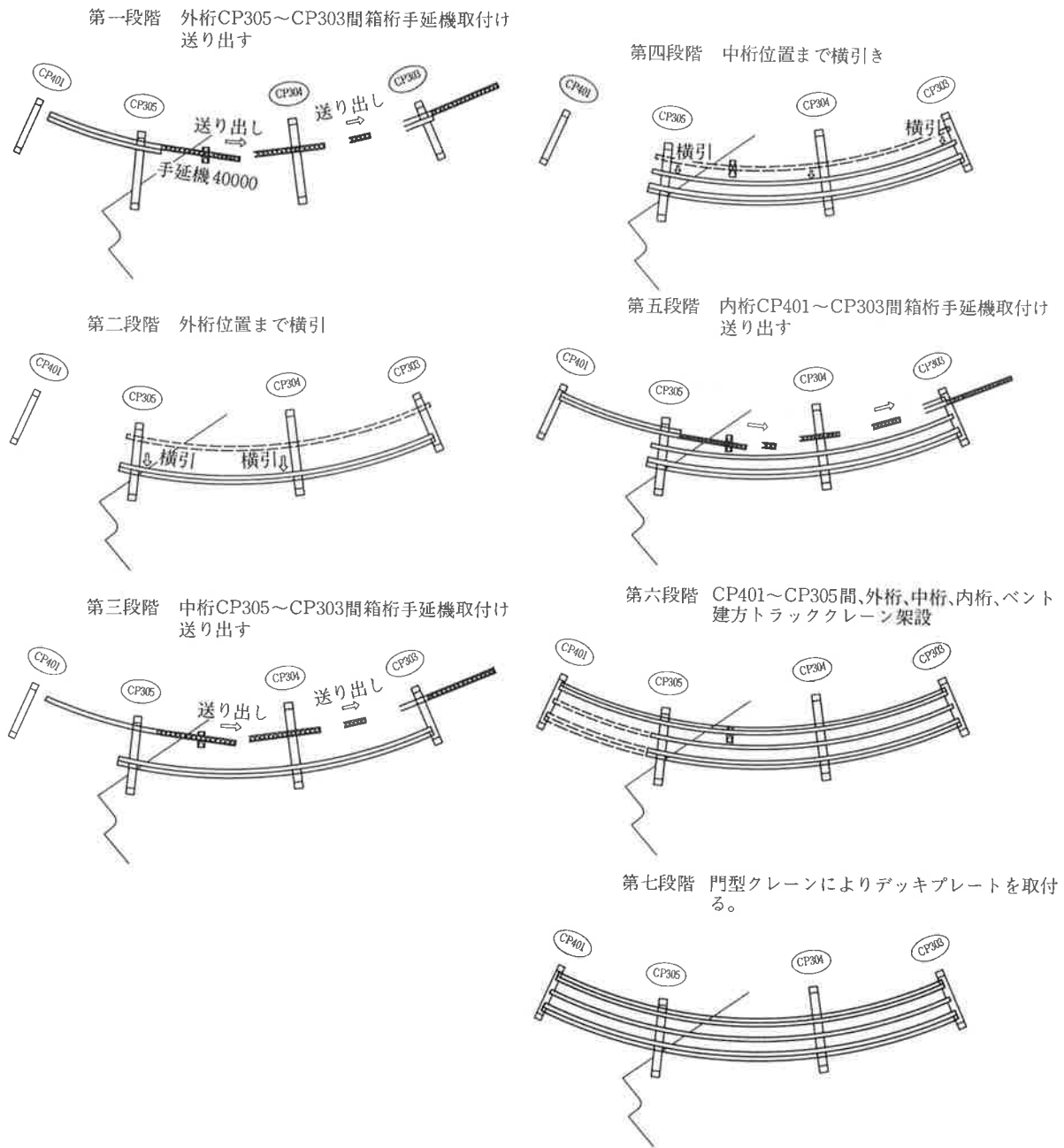

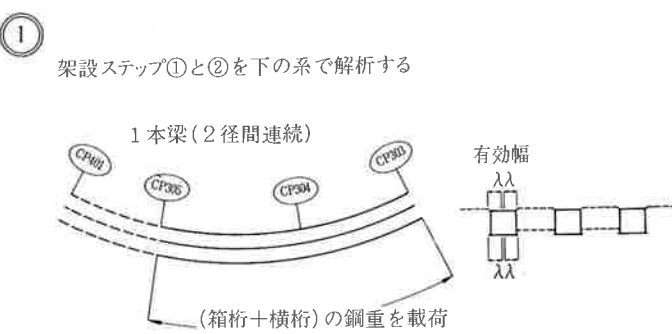
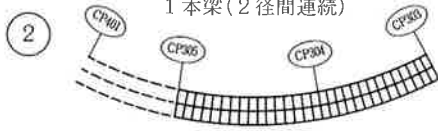

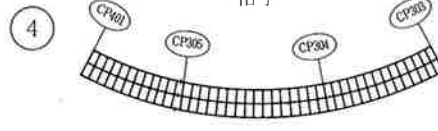
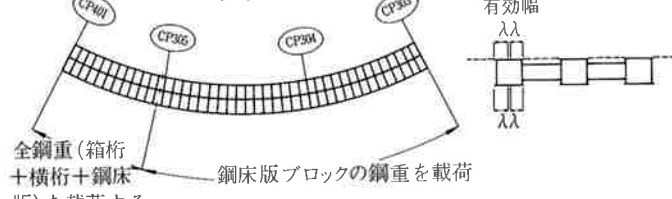
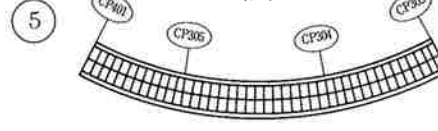
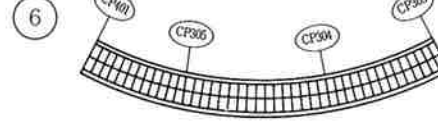
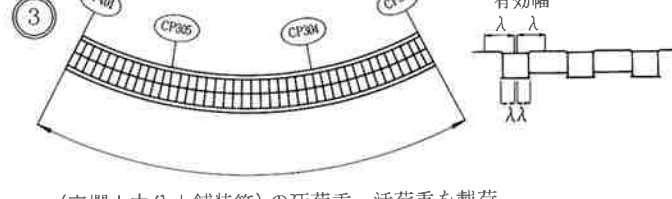


図-6 架設要領図

(2) 応力度計算

本橋の主桁断面には①横断勾配が途中で変化する(G1, G2桁)②デッキプレートに重ね継手があることから、応力度計算も実形状に合わせて算出した。

表-1 架設ステップ・解析構造系

架設ステップ	解析構造系
<p>①</p>  <p>CP305～CP303間を送出し架設する。</p>	<p>①</p> <p>架設ステップ①と②を下の系で解析する</p>  <p>1本梁(2径間連続)</p> <p>(箱桁+横桁)の鋼重を載荷</p>
<p>②</p>  <p>1本梁(2径間連続)</p> <p>CP305～CP303間の横桁を架設する。</p>	
<p>③</p>  <p>格子</p> <p>CP401～CP305間の主桁および横桁をベントを利用し架設する。</p>	<p>②</p> <p>架設ステップ③～⑤を下の系で解析する</p>
<p>④</p>  <p>格子</p> <p>CP401～CP305間のベントを解体する</p>	 <p>格子</p> <p>全鋼重(箱桁+横桁+鋼床版)を載荷する</p> <p>鋼床版ブロックの鋼重を載荷</p>
<p>⑤</p>  <p>格子</p> <p>全径間に鋼床版ブロックを架設する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 架設ステップ③ではCP401～CP305間にベントを利用する。ベント使用中、CP305～CP303間はCP401～CP305間の影響を受けず、CP401～CP305間は無応力状態。 ● 架設ステップ④で、3径間連続桁のCP401～CP305間に(主桁+横桁)の鋼重を載荷した状態になる。
<p>⑥</p>  <p>格子</p> <p>高欄+中分+舗装等を施工する</p>	<p>③</p>  <p>格子</p> <p>(高欄+中分+舗装等)の死荷重、活荷重を載荷する。</p>

5. ダイヤフラム

支点上ダイヤフラムは1箱1脊であり、鋼道路橋設計便覧¹⁾に基づく通常的设计法を行ったのでここでは省略し、中間ダイヤフラムの設計法を以下に述べる。

中間ダイヤフラムの設計法はいろいろとあるが、代表的なものとして坂井・長井の提案²⁾³⁾、中井・村山の提案⁴⁾、小松・長井の提案⁵⁾等が挙げられる。この中でも坂井・長井の提案は鋼道路橋設計便覧に記載され、一般に広く用いられていると思われる。しかしながら、坂井・長井の設計式において、機械的に諸元値を代入し、ダイヤフラムの必要剛度を求めようとすると、しばしば過大な値が要求されることがある。場合によっては、ダイヤフラム間隔を狭くすればする程、必要剛度が大きくなる傾向を示すこともある。本橋においてもダイヤフラム間隔を6mとして計算すると、図-8のラーメン形式での必要板厚が全てt=21mmとなる。これは、中間ダイヤフラム自体が変形しないよう十分剛な値が要求されているためと思われる。そこで、坂井・長井の提案式にかわり小松・長井の設計法⁵⁾を採用することとした。小松・長井の設計法は坂井・長井と同じくBE-AMアナロジーに立脚したものであるが、そのまえがきの中でも上記の問題点が述べられている。また、次の点で坂井・長井の設計法とは異った特徴をもっている。

- ① 箱桁の断面変形に伴う付加応力が許容曲げ応力度の数%以内になるようなダイヤフラム間隔、剛度を選択できる。すなわち、必ずしも剛なダイヤフラムを必要としない。
- ② 中間ダイヤフラム間にある横リブの補剛効果も考慮されている。

図-8に本橋の中間ダイヤフラムおよび横リブを示す。また、本橋では箱桁に発生するそり応力度が許容応力度の4%程度におさまるようなダイヤフラム剛度（板厚構成）とした。文献⁵⁾には中間ダイヤフラムの設計手順は示されているが、具体的な計算例がないので、以下に本橋での手順と計算例を示す。なお、記号および設計式は文献⁵⁾に合わせてあるので、詳しくは文献⁵⁾を参照されたい。

(1) 単位長さあたりの横リブ剛性kを求める。

横リブ剛性Kcは

$$Kc = 48E \cdot \frac{\bar{B}/Iu + \bar{B}/I\ell + 6\bar{H}/Ih}{3(\bar{H}/Ih)^2 + 2(\bar{B}\bar{H}/IuIh) + 2(\bar{B}\bar{H}/I\ell Ih) + \bar{B}^2/IuI\ell} \quad (8)$$

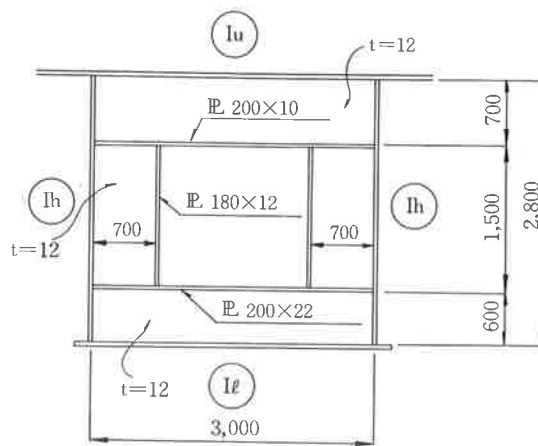
$$= 1.013 \times 10^9 \text{ cm}^4$$

単位長さあたりの横リブ剛性kは

$$k = \frac{Kc}{Lcf} \quad (9)$$

$$= 5.442 \times 10^6 \text{ cm}^4 / \text{cm}$$

中間ダイヤフラム



横リブ

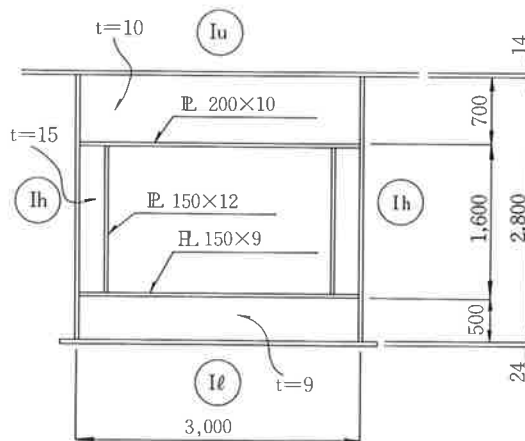


図-8 中間ダイヤ・横リブ

ここに

\bar{B} : 垂直部材の中立軸間距離 = 297.38cm

\bar{H} : 上下部材の中立軸間距離 = 243.77cm

$Iu, I\ell, Ih$: ラーメンの上下垂直部材の断面2次モーメントでデッキプレート・下フランジ・腹板の有効幅は24tとする。

$$Iu = 106853 \text{ cm}^4$$

$$I\ell = 58391 \text{ cm}^4$$

$$Ih = 1250 \text{ cm}^4$$

Lcf: 横リブ間隔 = 186.3cm

(2) 箱桁の断面変形に関するずり定数IDWを求める。

$$IDW = \frac{1}{3} \left\{ \alpha_1^2 Fu \left(1 + \frac{2Bu_1}{B} \right)^2 + \alpha_2^2 F\ell \left(1 + \frac{2B\ell_1}{B} \right)^2 + 2Fh (\alpha_1^2 - \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2) \right\} \quad (2)$$

$$= 9.64 \times 10^{11}$$

ここに

B : 腹板中心間隔

Bu1 : 上フランジの突出幅=277.0cm

Bb1 : 下フランジの突出幅= 15.0cm

Fu Fℓ Fh : リブを含む上下フランジおよび片側腹板断面積

α₁α₂ : 文献⁵⁾式(3.a,b)、(4.a,b)より

(3) 無次元パラメータ π₁ を求める。

$$\pi_1 = \beta \cdot L_D = \sqrt[4]{\frac{k}{E \cdot I_{DW}}} L_D \dots\dots\dots (15)$$

$$= 0.128 \times 6.0$$

$$= 0.768$$

ここに

L_D : ダイアフラム間隔=6.0mとして計算

(4) そり応力度を曲げ応力度の F_{cr} % 以内におさえる条件式(29)'の左辺の値を求める。

$$24f_u(\beta L_D, \gamma) (L_D/L_U)^2 + 360f_c(\beta L_D, \gamma) (L_D/L_U^2) < \frac{F_{cr}}{100} \cdot (1+30/L_U) \dots\dots\dots (29)'$$

f_u, f_c は βL_D および γ の関数で文献⁵⁾図-8,9より求める。このとき、必要相関剛比 γ を仮定し f_u, f_c を求める。

γ = 5 のとき f_u = 0.154, f_c = 0.259 ∴ 左辺 = 0.266
 γ = 10 のとき f_u = 0.128, f_c = 0.230 ∴ 左辺 = 0.234
 γ = 15 のとき f_u = 0.114, f_c = 0.218 ∴ 左辺 = 0.219

(5) 式(29)'の右辺の値を求める。

そり応力度を許容曲げ応力度の4% (F_{cr} = 15に相当)程度とすると

$$\frac{F_{cr}}{100} (1+30/L_D) = 0.238$$

(6) 式(29)'の不等号の条件から必要相関剛比の最小値は

$$\gamma = 10 \text{ のとき } 0.234 < 0.238$$

したがって、必要相関剛比 γ_{req} = 10 となる。

(7) 中間ダイアフラムの剛度 K を求める。

$$K = \beta' \frac{48E \left(\frac{\bar{B}}{I_u} + \frac{\bar{B}}{I_\ell} + 6 \frac{\bar{H}}{I_h} \right)}{3 \frac{\bar{H}^2}{I_h^2} + 2 \frac{\bar{B}\bar{H}}{I_u I_h} + 2 \frac{\bar{B}\bar{H}}{I_\ell I_h} + \frac{\bar{B}^2}{I_u I_\ell}}$$

$$= 1.031 \times 10^{11} \dots\dots\dots \text{文献}^{5)} \text{表-2}$$

(8) 中間ダイアフラムの実相関剛比 γ を求める。

$$\gamma = \frac{KL_D^3}{EI_{DW}} \dots\dots\dots (16 \cdot a)$$

$$= 10.02$$

ここに

I_{DW} : 2) と同様に求める。

∴ 必要相関剛比 γ_{req} ≤ 実相関剛比 γ となり、そり応力度を許容曲げ応力度の4%程度におさえたダイアフラム剛度となる。

6. 横 桁

横桁は全て図-9に示すような上下分割タイプとした。これは、全径間を通して横桁の下部を取付けた後、鋼床版ブロックを架設するためである。

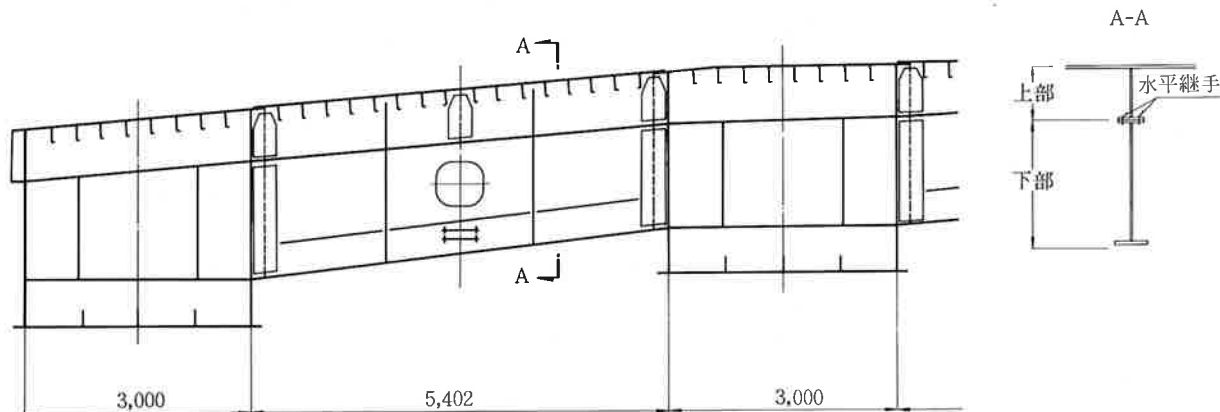


図-9 横 桁

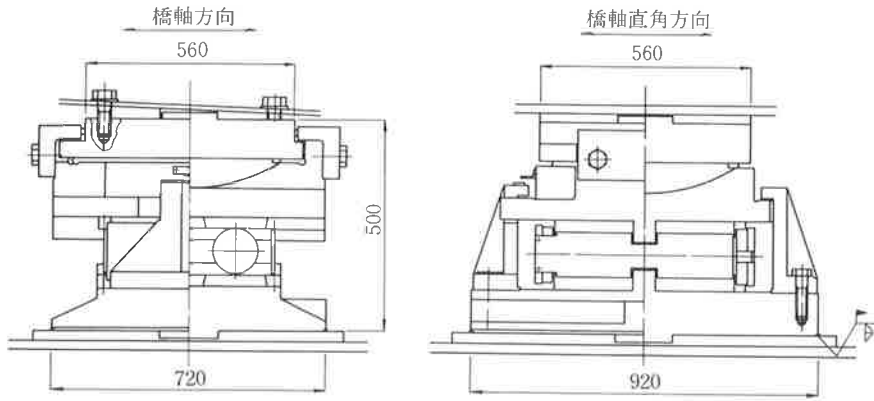


図-10 BPローラー支承

7. 支 承

支承の型式は基本計画では固定がピン支承、可動がピンローラー支承となっていたが、計画高さの変更により支承高さが低くおさえられる結果となった。そのため、可動にピンローラーあるいはピボットローラーが使用できなくなった。しかも、既設橋脚の支承設計条件がローラー型式を想定しているため、本橋の可動支承にはBPローラー支承を採用することにした。図-10に本橋で使用したBPローラーの一例を示す。また、固定支承はピボット支承とした。

8. 架設（送出し）時の照査

(1) 送出し時の解析

本橋に使用する送出し装置の1ストローク（送出し量）は1mである。送出しは主桁の最後端にブロックを連結し、連結した分だけ送出すことになる。この間1mごとに支点位置が移動するため、断面力および形状も刻々と変化する。解析をこの1mごとのステップで行なえば、主桁の性状変化を実際に即した形で把握できるが、解析上の手間は非常に煩雑となる。また、ステップの間をとばして解析すると性状の急変がつかめず、危険なステップを見落とすことになる。本橋では、送出し装置や橋脚の間隔、断面変化位置等を考慮して図-11に示すステップを送出し時の解析ステップとした。

送出しは主桁1本ごとに行うので、解析上のモデルとしては手延機も含めて1本棒に置換する。ただし、本橋が曲線桁であること、送出し装置は腹板直下に並列して設置することから面内構造として解析するのではなく、面外構造として扱わなければならない。また、主桁は変断面連続桁であること、製作キャンバーにより送出し途中で支点変位の影響を受けることから解析には十分な精度を有する必要がある。以上のことを考慮し、実解析には当社保有のプログラ

ム“KASETU-R”を使用した。また、解析時に負反力が生じる支点は実際には効いていないので、この支点を除いて再度計算する手順を考慮した。

(2) 照査項目

送出し時の主桁は、①桁全長にわたり正負の曲げモーメントが発生する。②本来支点とはならない腹板に送出し装置からの反力が作用する等から図-12に示す手順にて照査を行った。

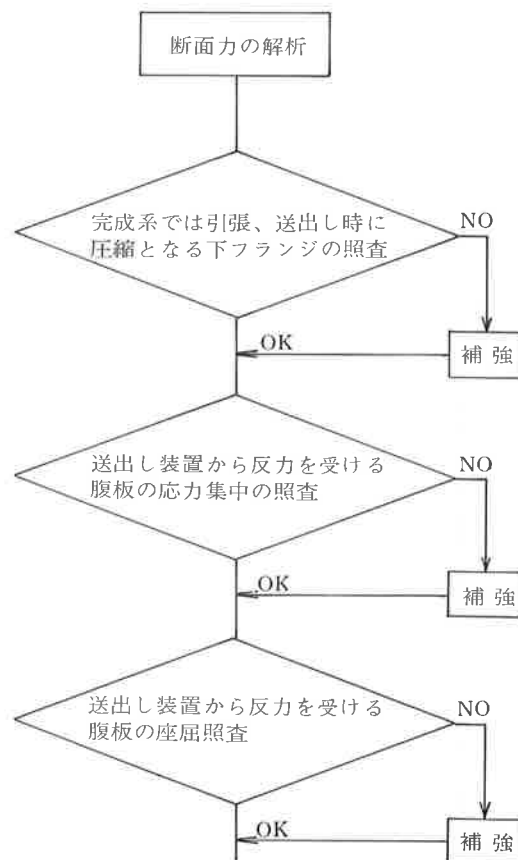


図-12 断面力の解析フローチャート

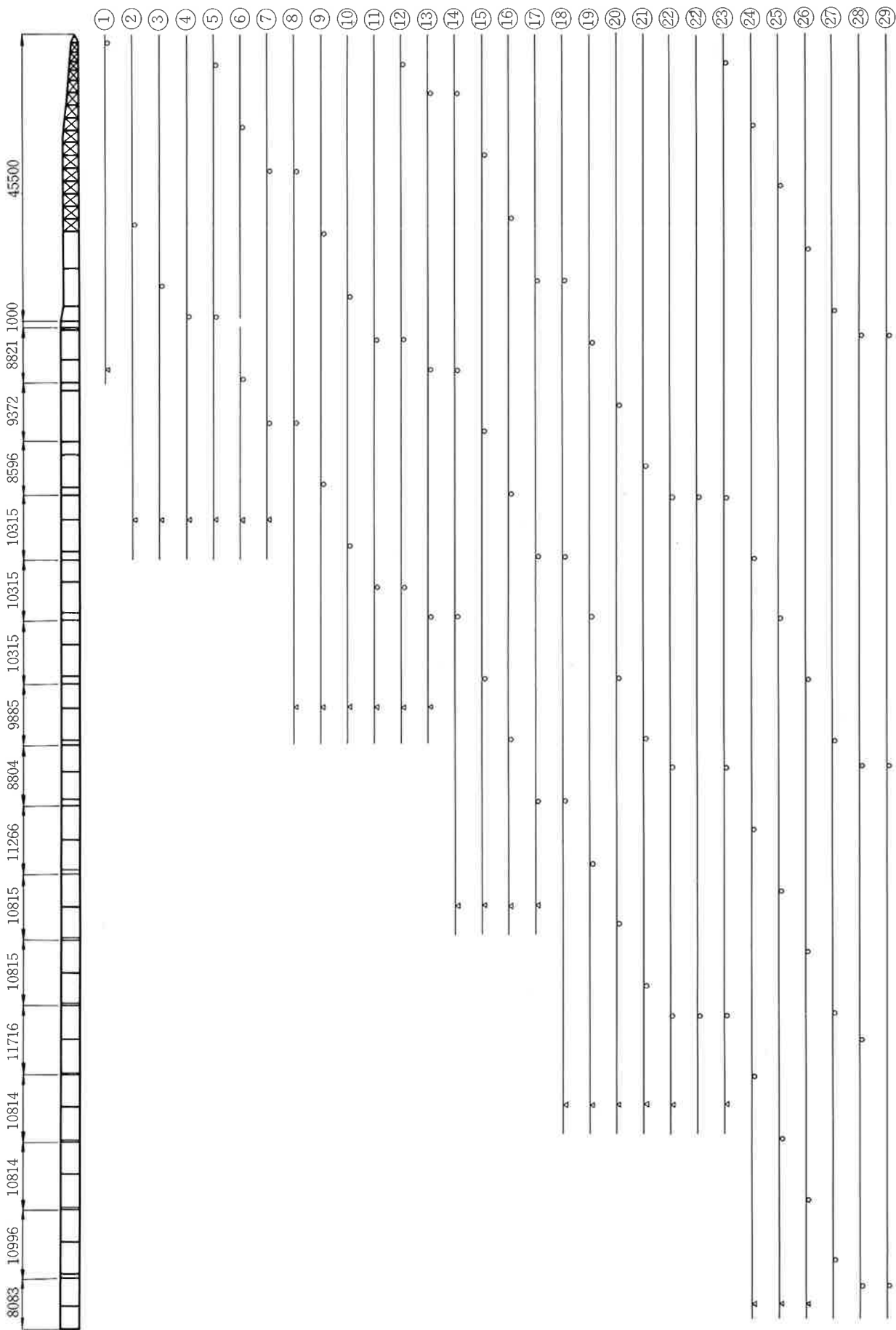


図-11 解析ステップ

(3) 下フランジの照査と補強

完成系で引張となる下フランジには縦リブを3本配置してあるが、圧縮応力が作用した場合、リブ間隔 b と下フランジ厚 t の比 b/t より許容圧縮応力度 σ_a が決まる。作用圧縮応力度 $\sigma > \sigma_a$ であれば補強することになる。

補強は、① 新しいリブを既設リブ間に追加する。
② ①の方法でも満足しなければ、①と併用し下フランジを増厚する。本橋では全て①の方法で満足した。また、新しいリブは横リブを貫通させず横リブの前後で切り、不連続とした。

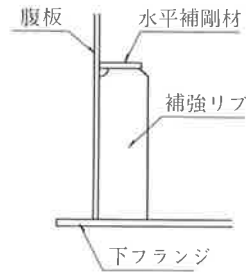


図-13 補強リブの取付

(4) 腹板の応力集中の照査と補強

送出し装置のような平面から分布荷重を受けた場合、腹板に生ずる最大応力度 σ は次式で表わせる。^{6) 7)}

$$\sigma = - \frac{2R}{\pi tw} \left\{ \frac{1}{X'} - \frac{X' - d}{Xe(Xe - d)} \right\}$$

- ここに R : 分布荷重 (=反力)
- tw : 腹板厚
- X' : $d + tf + S$
- Xe : $hw + d + tf + S$
- hw : 腹板高
- tf : 下フランジ厚
- S : 腹板と下フランジの溶接サイズ
- d : $d = \frac{2b}{\pi} + 1.654 \left(\frac{I}{tw/2} \right)^{1/2}$
- b : 分布幅
- I : $I = 5tf^4 / 12$

上式で求めた作用応力度 σ が許容応力度 σ_a より大きければ次の方法で補強する。なお、許容応力度は文献⁸⁾によった。

- ① 補強リブ (垂直) を取付ける。(図-13)
 - ② 腹板を厚くする。(図-14)
- ①は補強リブにも反力を分担させ、腹板の作用応力度を減らすわけであるが、送出し装置の支圧面積から通常補強リブ30cm程度の間隔で設けなければならず、既に箱桁が製作されている場合には補強リブと下フランジとの溶接のためにキャンバーが狂うこともあるので注意を要する。
本橋では補強リブを設けた方が8・(5)で述べる腹板の座屈防止に有利と考え、①の方法とした。



図-14 水平継手

安全率計算指針 DAS t 012 (以下、B方式) とによる計算方式がある。

A、B方式とも文献^{9, 11, 12)} に詳しく述べられているのでその計算手順、計算例は省略するが、いずれも水平および垂直補剛材で囲まれた腹板パネルに着目し、作用応力度からA方式は座屈安全率を、B方式は座屈応力度と座屈安全率を求めている。しかしながら、A方式では①B方式より高い安全率を与える。¹¹⁾ ②座屈係数 K_R を求める際、実形状寸法から算

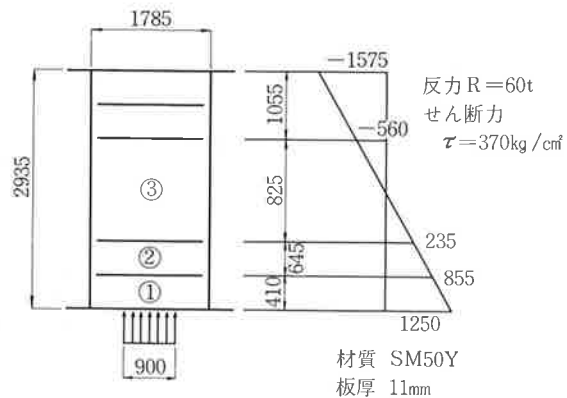


図-15 せん断力

(5) 腹板の座屈照査と補強

送出し装置上の腹板には曲げモーメントによる圧縮応力度 (水平方向)、せん断応力度、反力による圧縮応力度 (鉛直方向) が作用し、複雑な応力状態を示す。このような応力状態での腹板の座屈照査は、近年の長大橋化に伴う送出し工法の増加によって、各方面で研究調査されてきている。よく報告される例として、文献⁹⁾ (以下、A方式) とドイツの新しい座屈

表-2 座屈安全率の一例

パネル	A方式	B方式
①	2.49	1.95
②	※	1.94
③	※	3.63

※ 座屈係数 K_R が適用範囲外

出される α (パネルの縦横比)、 β (反力分布長/パネル長)の値によっては文献⁹⁾の表-3を適用できない場合がある(本橋の場合、適用外が多い)。などのため、現時点では架設途中の橋体の安全を確実化するという観点から、本橋の計算方式はB方式を採用した。

図-15に本橋での応力状態を、表-2にこの時の安全率を一例として示す。

照査の結果、所要安全率が確保されていない場合、図-16に示すステップに従い、垂直または水平補剛材を追加した。

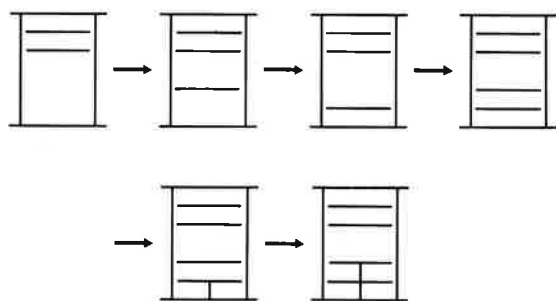


図-16 補強方法の決定ステップ

9. 製作キャンバーと仮組立

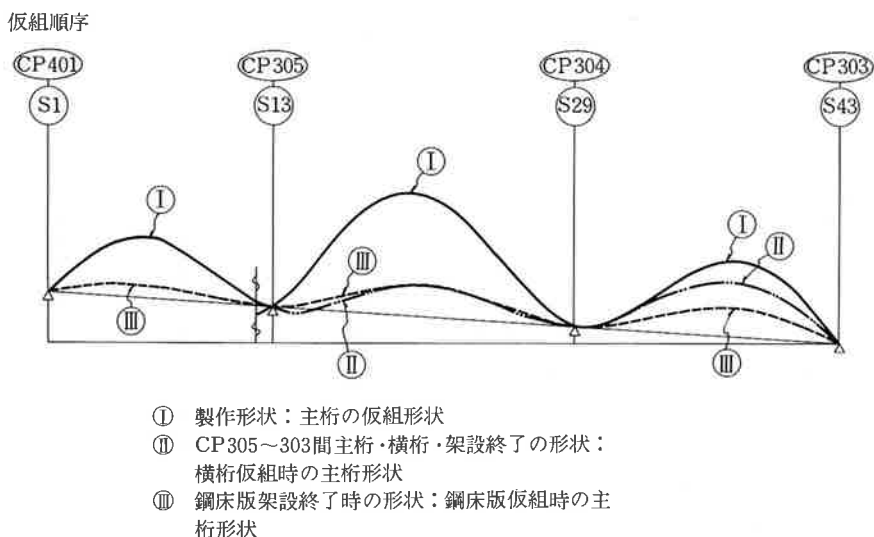
橋体は前述の架設工法により、2径間連続1本梁から完成形状まで順次変化する。設計において架設工法(順序・構造系等)を考慮したが、製作ならびに仮組立においても同じことである。主桁は送出し工法で架設された時点で支点支持状態となり、主桁自重分のたわみが生じた形状となる。この状態から、残り1径間の主桁ならびに横桁、床組(鋼床版)の架設が始まる。したがって、主桁、横桁、床組の製作キャンバーが各々に異なる。

図-17に主桁の製作キャンバーおよび仮組立時の形状を示す。

仮組立は、

- ① ①の形状で主桁を連結(無応力状態)
 - ② CP305~303間の主桁を①から②の形状へジャッキダウン(CP401~305間は①のまま)
 - ③ ②の形状で横桁を連結
 - ④ 主桁を②から③の形状へジャッキダウン
 - ⑤ ③の形状で床組を連結
- し、所定の精度を確認する。

以上のように、製作ならびに仮組立は非常に手間のかかるものになるが、この手順を踏まなければ現場での組立もできない。



- ① 製作形状：主桁の仮組形状
- ② CP305~303間主桁・横桁・架設終了の形状：横桁仮組時の主桁形状
- ③ 鋼床版架設終了時の形状：鋼床版仮組時の主桁形状

図-17 製作形状・主桁の仮組形状

あとがき

以上、Ⅲ期築港工区の設計編について概要を述べたが、中間ダイヤフラムの設計法や腹板の座屈照査法は架設工法にかかわらず、今後の設計の参考になれば幸いである。

本橋は現在、架設を行っており、施工編の報告は次の機会になされることと思う。

送出し工法は送出し装置の進歩とともに、より大型橋梁の架設にも採用されてきている。本橋の設計・製作・架設での経験が次の橋梁への踏台となることを望み、工事が無事完了することを祈る。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧、昭和54年2月
- 2) 坂井・長井：鋼箱桁橋の中間ダイヤフラム設計法に関する一試案、土木学会論文報告集、第261号、1977年5月
- 3) 坂井・長井：曲線箱桁橋の中間ダイヤフラム設計法に関する一試案、土木学会論文報告集、第306号、1981年1月
- 4) 中井・村山：ダイヤフラムを有する曲線箱桁のずり応力の解析と設計への応用、土木学会論文報告集、第309号、1981年5月
- 5) 小松・長井：中間ダイヤフラムの新しい設計法に関する研究、土木学会論文報告集、第326号、1982年10月
- 6) 荒井・前田：送り出し装置を用いた架設工法、横河橋梁技報 Vol.1 No.1
- 7) 荒井：送り出し装置上の腹板の座屈について、横河橋梁技報 No.2
- 8) 日本建設機械化協会：橋梁架設工事の手引き(上)調査編・計画編、昭和50年10月
- 9) 荒井：送り出し装置上の腹板の座屈について(続)、横河橋梁技報 No.3
- 10) 小松編：鋼構造の補剛設計、森北出版、1982年
- 11) 三宅・岡田・平山・杉野・田崎：送出し架設工法の自動設計システム、橋梁と基礎1983年10月
- 12) 伊藤：鉛直局部荷重を受けるプレートガーダー腹板のDAS_t指針012による座屈照査例、橋梁と基礎、1984年3月