

PC 斜張橋 “豊後橋” の設計と施工について

古 賀 則 光*
西 本 博 明**
三 橋 正 義***
中 村 一 樹†

1. ま え が き

豊後橋は北九州市小倉北区の紫川に架けられた2径間連続PC斜張橋であり、市街地に架かる本格的道路橋として我が国最初のものである。

一般に斜張橋は、美観的、経済的に優れた橋梁形式であると認められ、諸外国においては数多く架設されている。我が国では1960年に鋼斜張橋として架設された、

表-1 設計条件

項 目	内 容	備 考		
形 式	主 桁	2径間連続 PC 中空床版	橋 長 75.700 m 支間長 2@37.450 m	
	斜 材	平行2面吊り3段ハープ形	PC 鋼より線	
	塔	2本独立柱	RC 構造	
	線 形	縦断勾配 1.22% 放物線 横断勾配 1.50% 直 線		
荷 重	自動車荷重	TL-20		
	衝撃係数	道路橋示方書による	l は斜材定着間距離	
	地 震	静的解析 $K_h=0.13$ $K_v=0$		
		動的解析 応答スペクトル	土木研究所、絶対最大加速度応答スペクトル使用	
	クリープ	$\varphi_{\infty}=2.0$	$\varphi_t=\varphi_{\infty}(1-e^{-t/x})$	
	重 度	乾燥収縮	$\epsilon_s=15 \times 10^{-5}$	
温 度		部材相対差	±15 度	
		部材厚差	± 5 度	
レラクセーション	5%	主ケーブル、斜張ケーブル		
架 設	主 桁	総支保工		
	塔	大型パネル工法		
材 料	コンクリート	$\sigma_{ck}=400 \text{ kg/cm}^2$	主桁、塔	
	PC 鋼 材	PC 鋼線 12-φ8 (SWPR 1)	主桁、フレシノー工法	
		PC 鋼より線 7-φ11.1 (SWPR 7B)	斜材、SEEE 工法	
そ の 他	支 点 沈 下	2.0 cm	各支点の組合せ考慮	
	た わ み	活荷重に対し $L/600$		

* 北九州市役所建設局河川課主査
** 福岡北九州道路公社係長
*** 九和設計(株)設計課長
† オリエンタルコンクリート(株)本社技術部

勝瀬橋が最初のものである。これから以後、鋼斜張橋は急速な進歩で世界の水準にまで達したのに比べ、PC斜張橋は出遅れているのが現状である。しかし、内外の情勢から推して、コンクリートの特性を生かすことのできるPC斜張橋は、今後長大支間への一途をたどるものと考えられる。

本橋は昭和58年10月6日に供用開始され、北九州市のシンボルとなり、紫川の川面に優美な影を落としている。以下に本橋の設計、施工にあたり、その概要について報告する。

2. 設 計

2.1 設計条件

本橋の設計に当たり、国内での本格的(1等橋)なPC

表-2 材料強度および許容応力度

(a) コンクリート

		主 桁	塔
設計基準強度		400 kg/cm ²	400 kg/cm ²
プレストレス導入時強度		340 "	—
許 容 力 度	曲げ圧縮 応 力 度	プレストレス 導 入 時	180 "
		設 計 時	140 "
度	曲げ引張 応 力 度	プレストレス 導 入 時	-15 "
		設 計 時	-15 "
度	せん断 応 力 度	設 計 時	5.5 "
		終 局 時*	53 "
	斜め引張応力度(せん断ねじり)	13 "	—
軸 圧 縮 応 力 度		110 "	110 kg/cm ²

* 終局荷重時最大値

(b) PC 鋼材

	主 桁	床 版・横 桁		斜 材
	フレシノー 12-φ8	SEEE F-100	SBPR 95/110 φ26	SEEE F-100
引 張 強 度	150 kg/mm ²	190 kg/mm ²	110 kg/mm ²	190 kg/mm ²
降 伏 点 応 力 度	130 "	160 "	95 "	160 "
許 容 応 力 度	設 計 時	90 "	110 "	66 "
	緊 張 作 業 時	117 "	140 "	85.5 "
	プレストレス 導 入 時	105 "	130 "	77 "
レラクセーション	5%	5%	3%	—

報 告

斜張橋の施工事例が全くなかったため、諸外国の施工事例を調査研究したうえで、現行の道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編および（財）海洋架橋調査会“PC斜張橋上部工設計指針（案）”により、表-1に示すような設計条件を設定した。また材料強度および許容応力度は表-2に示したとおりである。

2.2 構造形式の選定

上部工の構造形式の選定に際しては、3径間単純PC中空床版橋、3径間連続PC箱桁橋および2径間PC斜張橋の各形式について比較検討し、この結果、工費の面では大差がなく、桁高が最小で、都市景観に関する市の基本方針に合った景観的にもっとも優れた2径間連続PC斜張橋を採用した。図-1に本橋の一般図を示す。

主桁は、取付け道路との関係から、最も桁高を低くで

きる中空床版形式とした。この結果、桁高を70cmまで下げることが可能となり、従来のPC桁橋では考えられなかった桁高/支間比(1/53.5)を実現することができた。主桁と橋脚の結合は、たわみが小さく、経済的にも有利な剛結構造とした。したがって両橋台上の支承は可動支承とし、ゴム支承を使用している。

塔はRC構造とし、美観上の理由から独立2本柱とした。塔基部は、左右の歩道があるため、斜材を地覆部で定着した場合、活荷重の荷重分配が悪くなるので、車道端にもってゆき、主桁と剛結する構造とした。

斜材は、側面から見て前後の交錯のないハープ形とした。斜材数は、1斜材のケーブル数、応力振幅および美観を考慮して3段とした。斜材の角度は、塔の頂点と主桁端を結ぶ直線の角度にほぼ合わせ 27° とした。

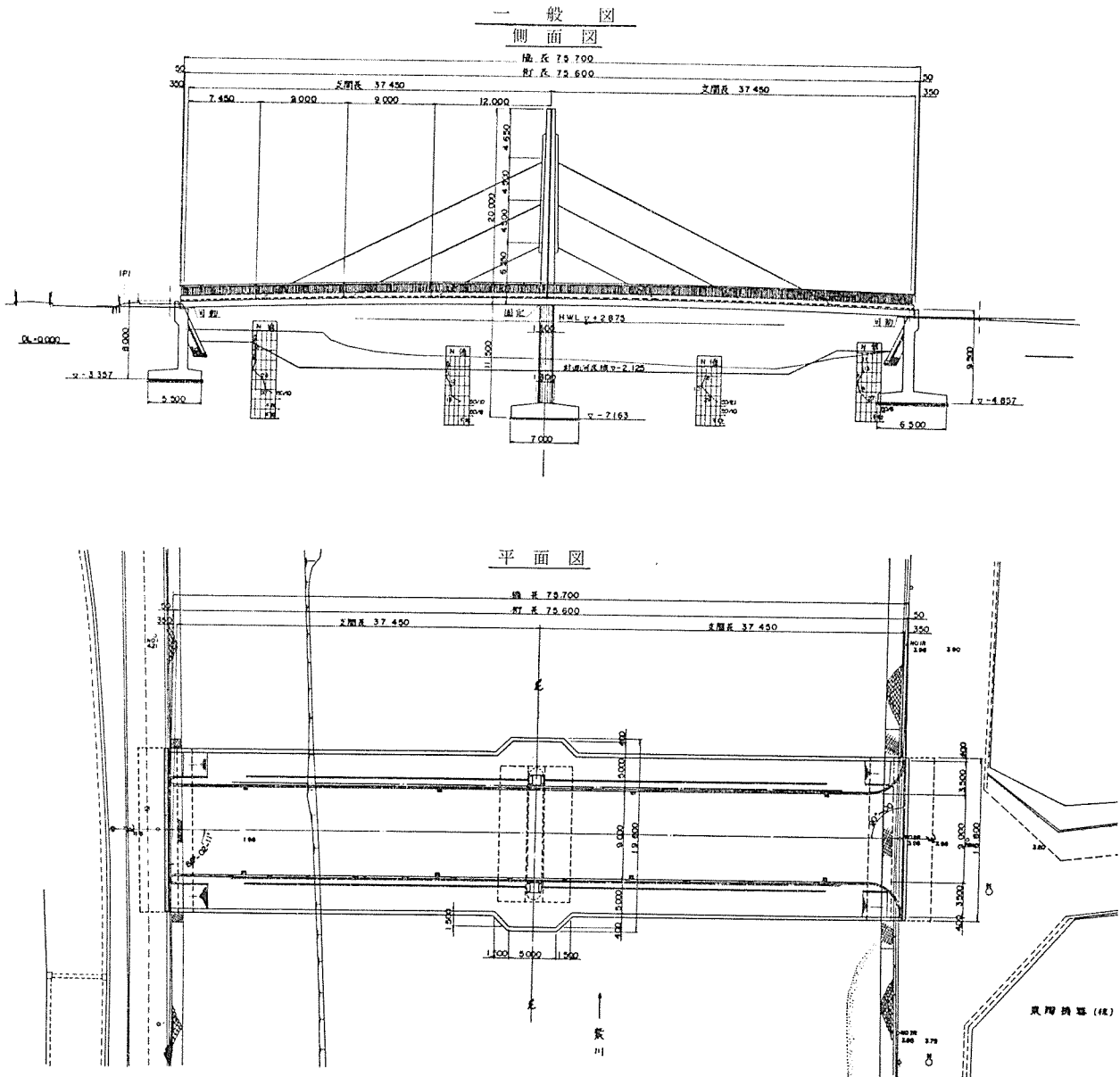


図-1(その1) 一般図(側面図, 平面図)

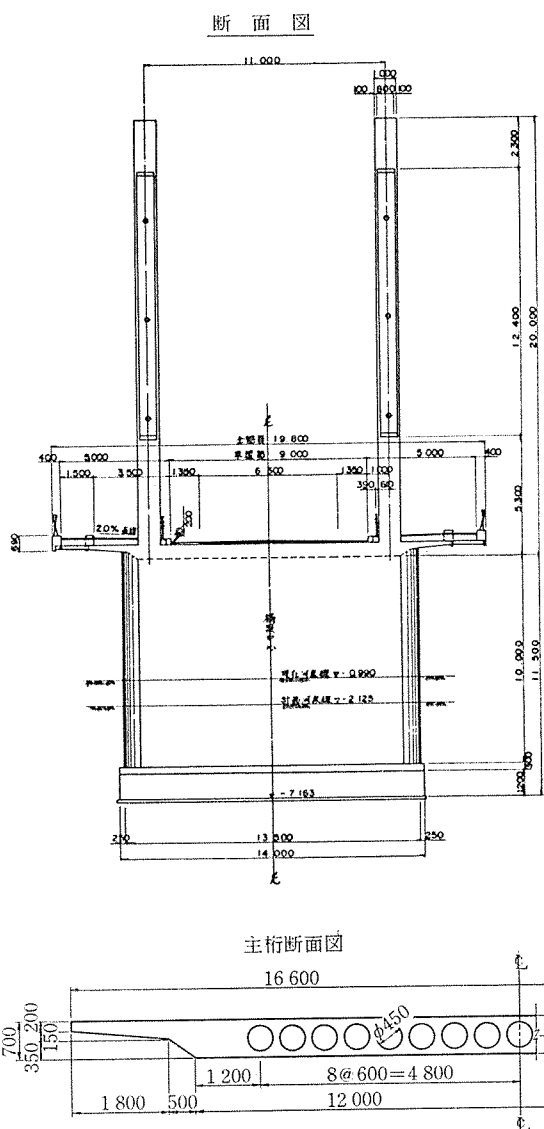


図-1 (その 2) 一般図 (断面図, 主桁断面図)

2.3 構造解析

一般に斜張橋の断面力の算出は、主桁、塔および斜材を含む全体構造系を平面骨組として変形法で解析しているが、本橋のように支間に比べ幅員が広い場合 ($B/L=1/2.34$)、平面骨組解析のみでは横方向分配の影響を適確に把握できないため、便宜上 7 本主桁に分割し立体骨組解析を行った (図-2)。

また上記立体骨組解析を行う場合、骨組の仮定にやや大胆な仮定があると考えられたため、橋面荷重が作用した時の各主桁への分配率を有限要素法によって解析し、その値を参考にして双方の比較検討を行った。耐震設計においては静的解析と動的解析を行い、特に動的解析の場合、固有値解析の結果をもとに応答スペクトル解析を行い、部材の最大応力値を求め断面検討を行った。耐風設計については、斜張橋の場合特に問題とされる自励振動のうち、ねじれフラッターと、限定振動の風琴振動に

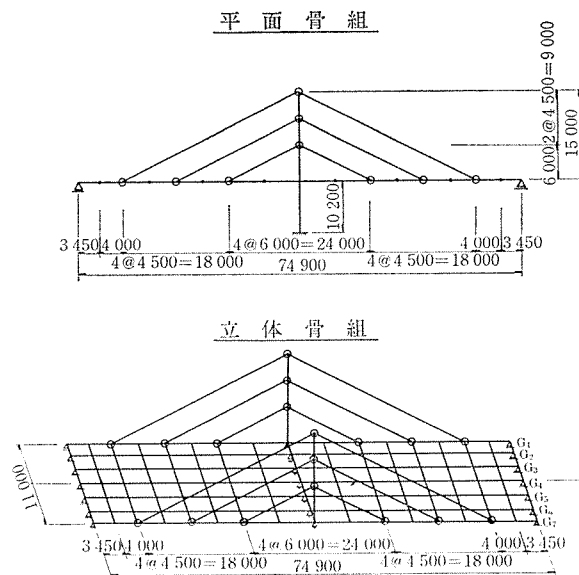


図-2 構造解析モデル

ついて検討を行い、歩行者等に不安を感じさせるような振動が生じないことを確認した。

斜材ケーブルの定着位置における局部引張応力度は、Y. Guyon, Mörsch の簡易法にて計算し、ケーブルの主桁、塔への曲線配置による腹圧力については有限要素法によって解析を行い、安全性を確認した。

以上が本橋の構造解析の概要であるが、以下においては主として次の 3 項目について詳しく述べる。

- 立体骨組解析と平面骨組解析による主桁断面力についての比較。
- 有限要素法による解析と立体骨組解析による断面力の比較 (橋面荷重について)。
- 立体骨組解析における横桁剛度の影響について。

(1) 立体骨組解析と平面骨組解析による主桁断面力の比較

図-2 に示すごとく、立体骨組解析は変形法理論により 7 本の主桁と 17 本の横桁から成るものとし、橋脚は弾性支点として処理した。なお、この場合の横桁の剛性は道路橋示方書により有効幅を横桁間隔と見なして算出した。

立体骨組解析による断面力は、主桁自重、橋面荷重、斜材緊張力および活荷重については立体骨組モデルを用いて解析し、クリープ、乾燥収縮、主桁のプレストレスによる 2 次断面力、温度応力等は平面骨組モデルとして解析した断面力を立体骨組解析による桁自重の分配率によって各主桁に配分した。また平面骨組解析による各主桁の断面力 (曲げモーメント、軸力、せん断力) は平面骨組解析で算出した主桁全体の各断面力を前記分配係数に乗じて求めた。

図-3 に設計荷重時の活荷重最大時の曲げモーメント

報 告

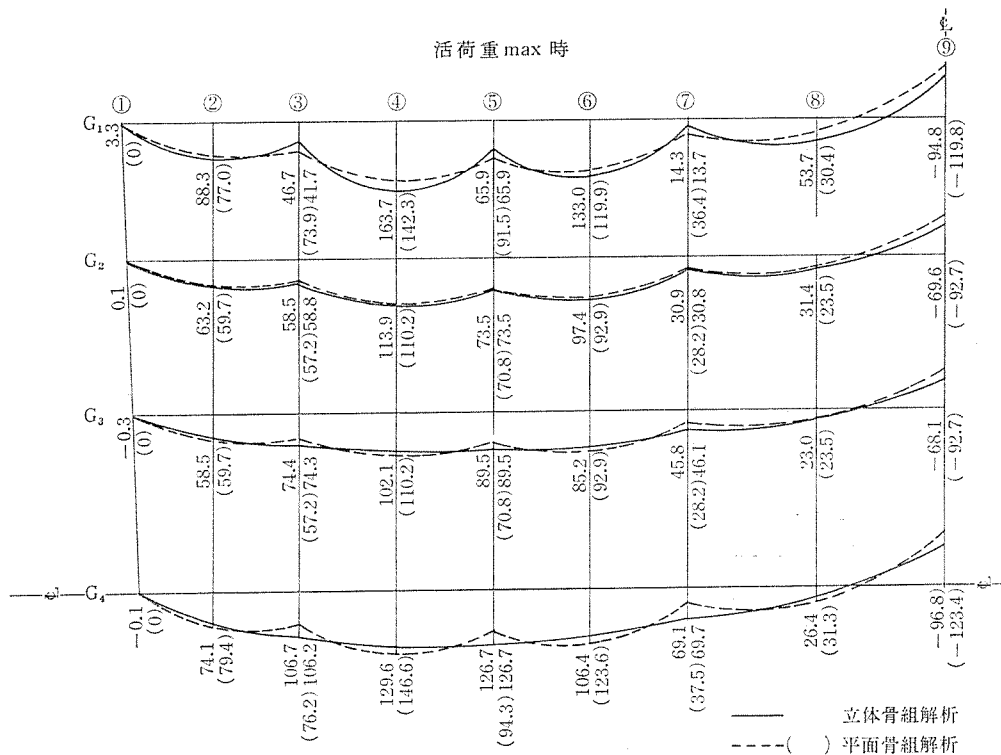
図を示す。図から明らかなように耳桁 G_1 と中桁 G_4 には横方向分配による影響が顕著に現われている。また活荷重最小時、中桁 G_3 —④ 節点と G_4 —④⑦ 節点において曲げモーメントが逆符号となる場合が生じた。したがって応力度は双方のケースについて照査した。

(2) 有限要素法による解析と立体骨組解析による断面力力の比較

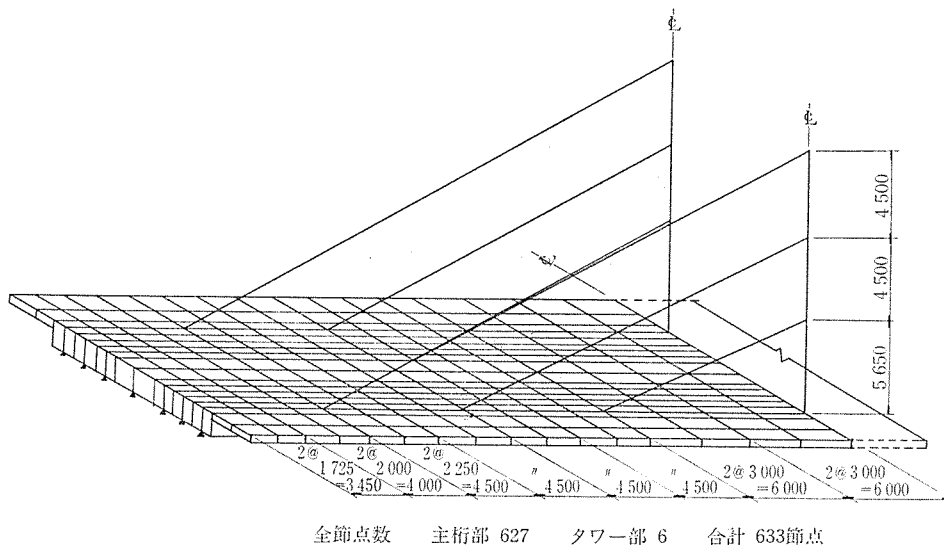
本橋は支間に比べて幅員が広く、通常の平面骨組解析とは異なった応力状態になることが予想されるために、断面力解析は立体骨組解析と平面骨組解析を併用した

が、立体骨組解析は骨組の仮定にやや大胆な面があり、これを有限要素法によった解析と比較する必要があると考えたため、橋面荷重を例にとり双方の照合を行った。なお、立体骨組解析のモデルは 図—2、有限要素法による解析のモデルは 図—4 に示す。また解析は電々公社ライブラリープログラム STRAP を用いて行った(有限要素法解析)。

この結果、主桁方向の断面力については、立体骨組解析に比べ、有限要素法による解析が若干減少する傾向にあり、特に問題はないことがわかった。ただし、横方向



図—3 設計時モーメント図 ($G_1 \sim G_4$ 主桁) (t·m)



全節点数 主桁部 627 タワー部 6 合計 633節点

図—4 有限要素法による解析モデル

については立体骨組解析が主桁の張出し床版を荷重分担域として考慮していないのに対して有限要素法による解析は考慮しているため、有限要素法では斜材定着位置での負の曲げモーメントがより大きく生じた。また中間 G₄ 桁部の負の曲げモーメントが減少している。これらの値について応力計算の照査を行った結果、安全であった。

桁自重、斜材緊張力、活荷重による断面力についても、有限要素法による解析は立体骨組解析とは幾分違った結果を与えると考えられるが、これらは張出し床版部の影響が橋面荷重ほどには出ないと予測されるので、立体骨組解析結果によっても充分安全であると考えた。

(3) 立体骨組解析における横桁剛度の影響について立体骨組解析において横桁の有効幅を道路橋示方書に準じて計算したところ、ほぼ横桁間隔までが有効となった。しかしながら本橋のように桁高の低い版構造を立体骨組構造に置換して解析を行う場合、横剛性の違いが断面力に大きな差異を及ぼすと考えられるので、有効幅を50%にしたものについて若干の検討を行った。

図-5 に桁自重曲げモーメントの比較結果を示す。

検討の結果、横桁の有効幅を低減したことによる桁軸方向の断面力については

- 若干ながら耳桁と中桁間の荷重分配が悪くなり、正の曲げモーメントは耳桁より中桁が若干大きくなった。

○横桁は全体的に曲げモーメントが低減される傾向にある。

○桁軸方向の軸力については荷重分配がより悪くなる傾向を示した。しかし剛度の影響によって生じる応力度の差は小さく、何ら構造設計上問題とはならなかった。また、横桁についても応力的に問題にならなかった。

3. 施 工

3.1 施工概要

本橋は、支保工による場所打ち工法で施工された PC 斜張橋である。施工順序は、図-6 のとおりであり、通常の河川構造物と同じく、工事用道路の盛土から着手した。

工事工程の順序は、表-3 に示すように、当橋梁では塔の施工が工程上の主要点であった。

表-3 工事工程表

	昭和57年				昭和58年						
	9月	10	11	12	1	2	3	4	5	6	
準備工											
橋脚頭部の施工											
支保工											
主桁製作工											
塔の施工											
斜材緊張工											
斜材防護工											
支保工解体工											
橋面工											

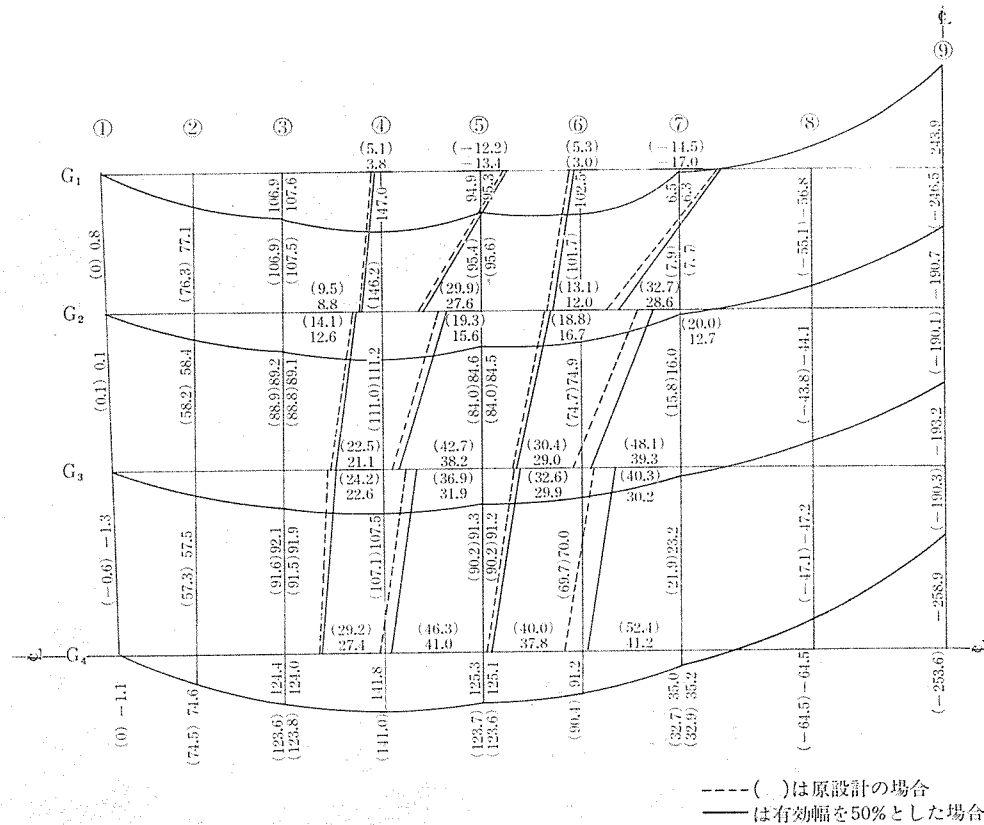
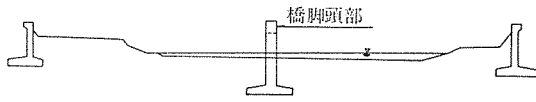
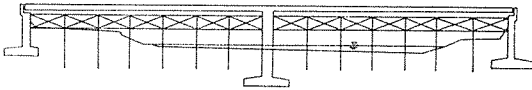


図-5 桁自重曲げモーメント (t·m)

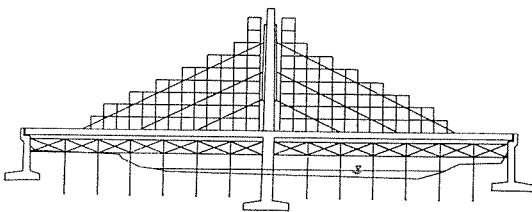
報 告



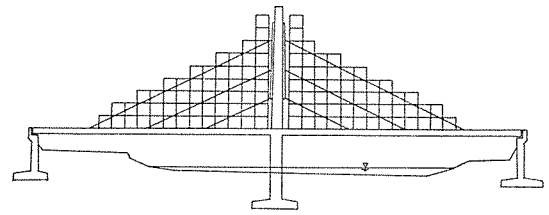
(1) 工事用道路，橋脚頭部の施工



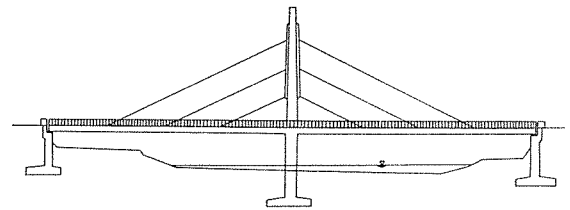
(2) 基礎杭，支保工，主桁製作工



(3) 塔の施工，斜材緊張工



(4) 斜材防護工，支保工および基礎杭の解体撤去工



(5) 橋面工

図-6 施 工 順 序

3.2 主桁の施工

(1) 支保工

橋台，橋脚とも直接基礎で施工されていることから分かるように，現地の地盤は，比較的浅い所に N 値 30 程度を期待できる支持層が存在している。また，河床から主桁までの余裕高さは僅少であり，杭の引抜きに問題があったが，杭の根入れ長は短いことが予測され，支保工の基礎は，杭基礎とし，その上に梁支柱式支保工を構築した（写真-1）。

(2) 型枠，鉄筋，斜材

底板は，鋼製型枠を使用し，鉄筋，シースを組み立てた後に中空型枠をセットした（写真-2）。

斜材は，主桁に埋込み定着されるため，その位置，高

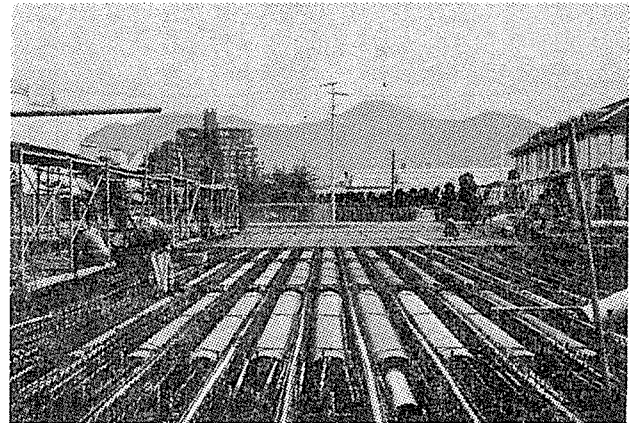


写真-2 鉄筋シース組立て

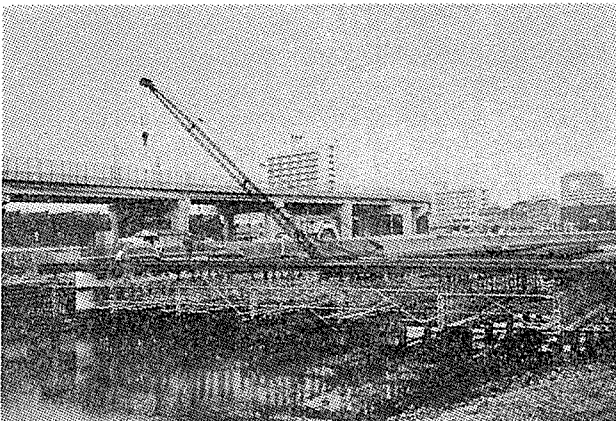


写真-1 支保工の構築

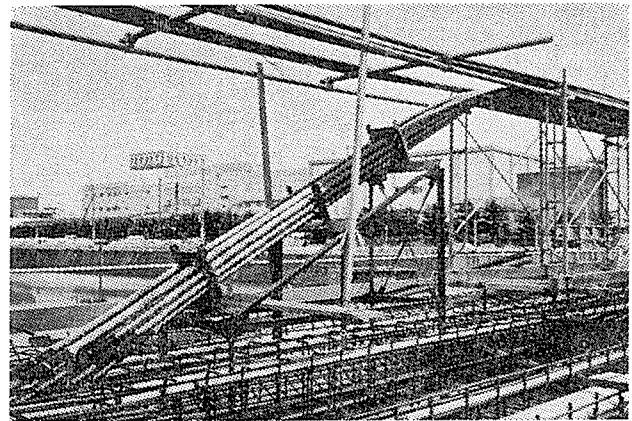


写真-3 主桁への斜材ケーブル定着

さ、方向に厳しい制約があり、斜材定着部近傍の施工には、斜材のセットを優先し、その後に、鉄筋、シース、中空型枠の組立てを行った。斜材セットに使用した架台、および金具を写真-3に示す。

(3) コンクリート打設、緊張、グラウト

コンクリートの打設は、約 600 m³ を、ポンプ車3台にて、約7時間で打ち込み、その養生は、打込み完了直後から被膜剤を散布し、その後に、シート覆いとした。また、斜材定着部付近には、鉄筋、PC 鋼材が交錯しており、コンクリートが十分打ち込まれるよう苦心した。

主桁に配置したケーブル (12-φ8) の緊張は、試験緊張で求められた、弾性係数、および摩擦係数を使用して管理したが、シース内に挿入したピアノ線が、新しかったこともあり、摩擦係数は小さく ($\mu=0.22$)、そのばらつきも少なかった。

グラウトは、冬期の施工であることを考えて W/C を 40% に設定し、シース内に水通しをした後に、セメン

トミルクを注入した。シースの変曲点には、空気孔を設け、確実な充填作業を行った。

3.3 塔の施工

主桁上面より 19.3 m の高さを5分割し、その基本ブロック長を 4.5 m とした。型枠は、コンクリート面の跡埋め作業を最少限にとどめ、また、美観上からも、コンクリート面がそのままのため、大型パネルを用い、胴梁を締め込む方式とした (写真-5)。

斜材が定着されるブロックの施工手順は、

- ① 斜材定着用の鋼製妻枠の取付け
- ② 斜材の取付け
- ③ 鉄筋組立て
- ④ 型枠組立て
- ⑤ コンクリート打設

の順序であり、鉄筋、斜材が交錯する個所については、コンクリートに流動化剤を添加し、スランプを 15~18 cm に落として、ポンプ車にて打ち込んだ (写真-6)。

3.4 塔側斜材の施工

片側を主桁に埋込み定着された斜材は、主桁のコンクリート打設前には、主桁上面に組み立てられた鳥居枠上に仮置き、打設後は、主桁上面に移動し、塔の施工が進むにつれて、クレーン車にて引き揚げ、鋼製妻枠へと取

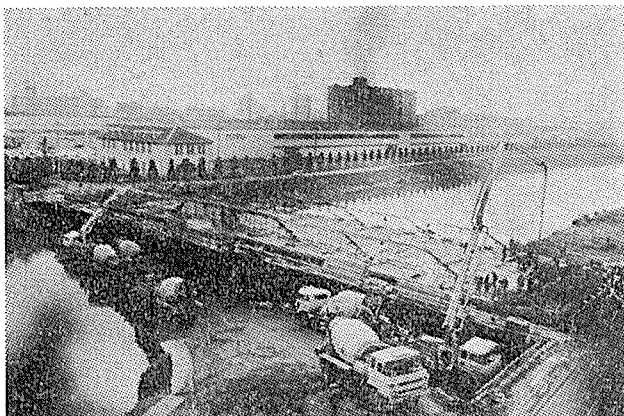


写真-4 コンクリート打設

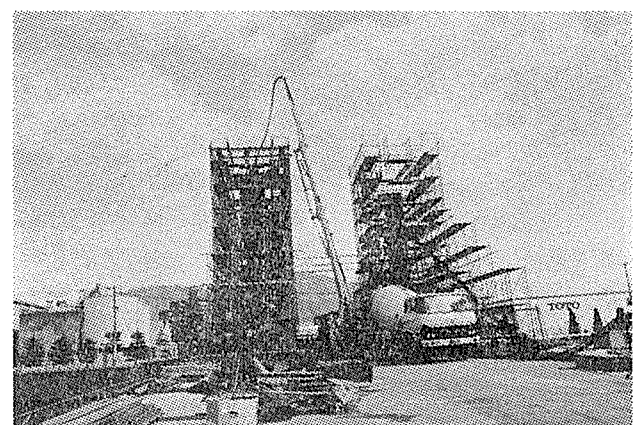


写真-6 塔コンクリート打設

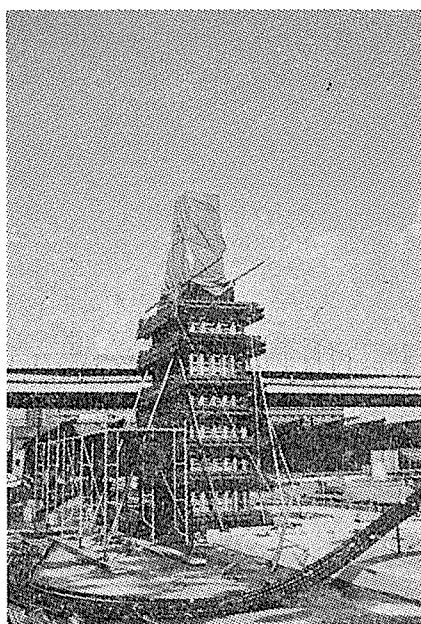


写真-5 塔の型枠

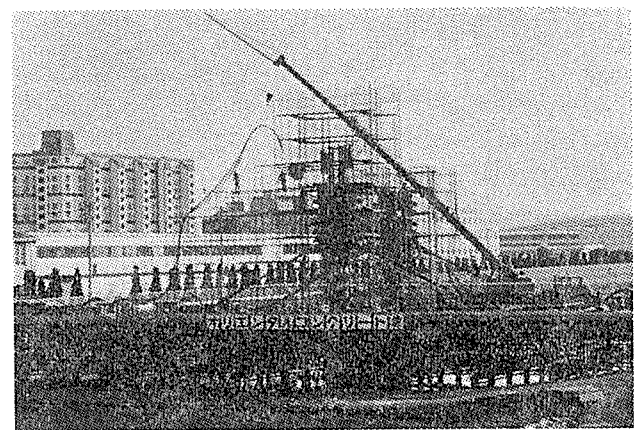


写真-7 斜材の架設

報 告

り付けた。斜材の正規の位置を確保するために、取付け個所には、既設の塔を利用して、鋼製の架台と金具を取り付けた（写真—7, 8, 9）。

3.5 斜材の緊張工

塔の施工完了後、塔の足場上にダブルポンプを据え、SEEE ジャッキ 4 台にて、最上段の斜材から、10 t → 20 t → 25 t → 30 t → 調整力という 6 段階にわたって緊張した。緊張力は、死荷重に見合うだけの量とし、緊張時には、各段階ごとに、主桁のそり量と、埋込みゲージによる塔、および主桁のひずみ量とを設計値と照合しながら作業を進めていった。

緊張力は、荷重計と圧力計の読みとで判断し、伸び量は、塔、および主桁の変形を考慮して、参考値として管理した。なお、荷重計は、各定着部に 1 個配置したが、一定着部のみ 5 個配置し、相互の緊張力の動向を把握するのに役立てた（写真—10）。

3.6 斜材の防護工

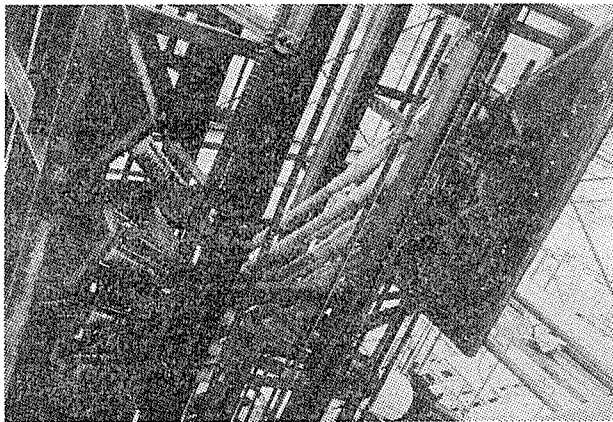
斜材そのものは、高密度のポリエチレンで被覆されているが、その重要性を鑑み、二重、三重の防護と美観を目的として、ステンレス管にて斜材を囲み、ステンレス管と斜材との空隙部には、セメントモルタルをモルタルポンプ車にて 4 m ずつ流入した（写真—11）。自然流下

方式の打込み方法を採用したのは、実験結果に基づいたものであり、流動化剤を使用して、ワーカビリティの向上を図った配合も実験結果に従ったものである。

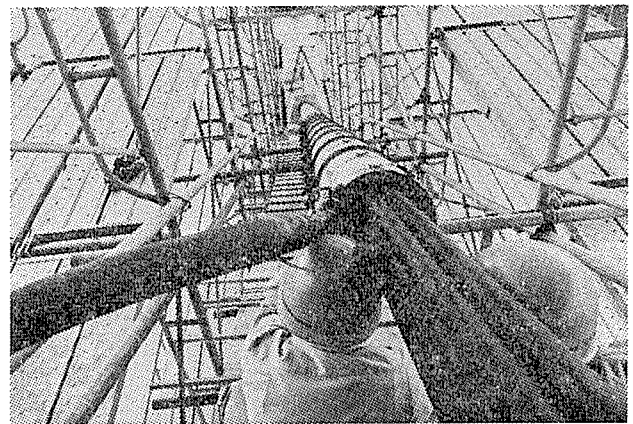
ステンレス管の塔側、および主桁側両端の取付け部には、予め取り付けられた鞘管との間にシリコンを充填し、主桁と斜材との変位角を吸収できる構造とした。

3.7 基礎杭の撤去

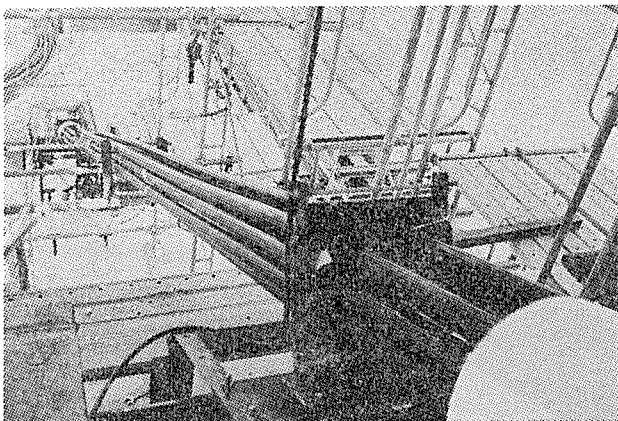
斜材緊張後の支保工解体、および杭基礎の撤去工は、雨期に入る前に施工を完了させるという制約があり、杭撤去には不十分な作業空間を克服するのに、いわゆる



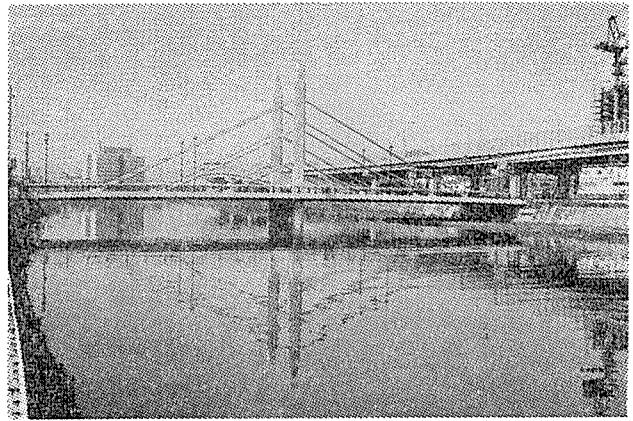
写真—8 塔部斜材定着



写真—11 斜材ケーブル保護工



写真—9 斜材取付け架台



写真—12 完成

“じか抜き工法”を採用した。

5. あとがき

本橋の設計、施工にあたっては、経済性、美観、作業性、安全性等、十分な検討を重ね、ここに無事工事を終えることができた。

今後、PC 斜張橋は数多く架設され、長大化するものと思われるが、本橋のように比較的支間が小さい場合でも、桁高制限を受けたり、周囲の景観との調和を求められるような PC 橋では、斜張橋も有効な構造形式の1つであろう。本報告が今後の設計、施工に参考になれば幸

いである。

なお、今後 PC 斜張橋の発展のための課題として、架設工法の検討、斜材定着方法および定着体等の開発、研究が急務と思われる。

また設計に関しては、局部応力の照査、耐風設計、耐震設計等についても報告したかったが、紙面の都合上省略した。今後、別の機会に報告したいと考えている。

最後に本工事の設計、施工にあたり多大な御指導と御尽力をいただいた関係各位に心から感謝の意を表します。
【昭和 58 年 12 月 2 日受付】

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート技術の現況

本書は全国七都市で行った第 10 回 PC 技術講習会のテキストとして編纂したもので、PC 技術の現況と題し、下記に示すとおり内容も豊富なものとなりました。地区によってはテキストの不足を生じた会場もあり、大変な盛況でした。その内容は大きく 4 項目からなっており、すなわち PC の設計に関する各国の規定、PC 鋼材について、建築に関する PC 部材の接合法、さらに今度の編纂に最も力点を置いた PC 橋の架設工法総覧であります。

特に最後の項は、PC 橋梁関係者にとっては、最近の新しい工法も採りいれられていることにもより、大変よくまとまった格好の資料になることと思います。掲載資料を欲ばり、頁数が多くなり過ぎた嫌いがありましたが、ご自身の勉強のためにもさることながら社員教育用にも最適かと存じます。ご希望の方は代金を添えて（社）プレストレストコンクリート技術協会（電 03-261-9151）宛お申し込みください。

体 裁：A 4 判 216 頁

定 価：5,000 円 送 料：800 円

内 容：(A) プレストレストコンクリートの設計に関する各国の規定（主としてひびわれ発生許容プレストレストコンクリートについて）。(B) PC 鋼材について。(C) PC 部材の接合法（その力学的基本特性）。(D) プレストレストコンクリート橋の架設工法総覧，1) 概説，2) PC 桁の移動架設工法，3) 場所打ち工法（支保工），4) プレキャストブロック工法，5) カンチレバー工法，6) 移動支保工，7) 押出し工法，8) PC 鉄道橋の架設。