

外ケーブル方式を採用した PC 7 径間連続桁の設計

齊 藤 三 男*
 林 田 享**
 今 井 秀 治***

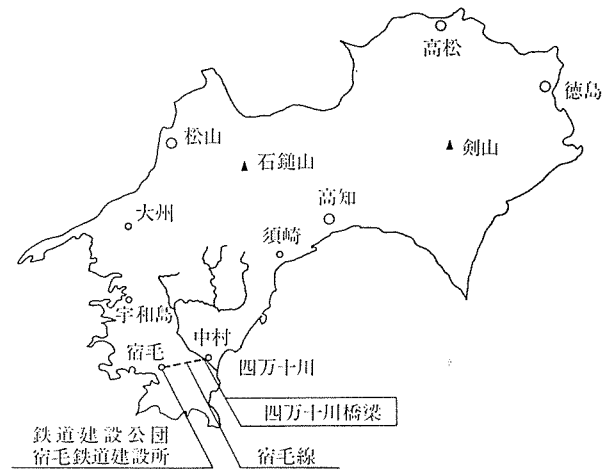
1. はじめに

四万十川橋梁は、高知県宿毛市から中村市に至る宿毛線において、日本で“最後の清流”と称される四万十川をほぼ直角に横断する位置に架設される 橋長 494 m の単線鉄道橋である（図—1, 2）。

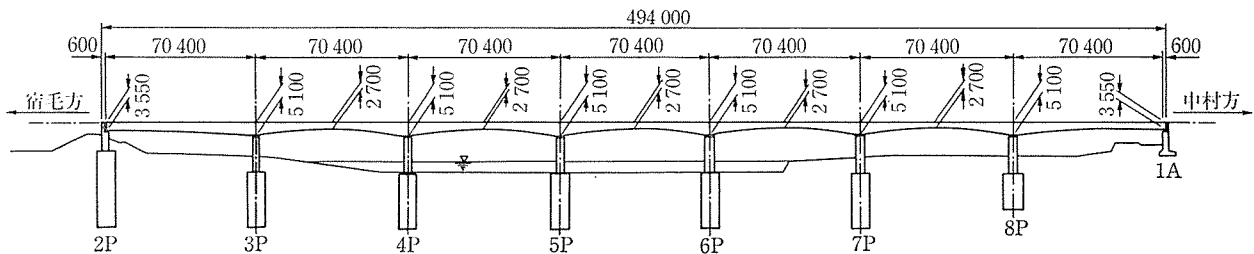
この橋梁は、昭和 48 年に場所打ちカンチレバー方式による PC 7 径間連続桁として上下部工の設計を終え、このうち、下部工については昭和 51 年に既に施工を完了している。宿毛線建設再開に伴い再度この桁の設計を行ったが、今回の設計主旨は、新しい材料と現代のプレストレストコンクリート設計・施工技術を活用し近代的な PC 橋梁とすることにあつた。

本橋の特色は、旧設計で単一工法に限定して設計されている PC 鋼材を、施工性と経済性の観点から、張出し施工中に定着される PC 鋼材として鋼棒（ディビダーク工法）を使用し、径間連結 PC 鋼材に一本当たりの緊張

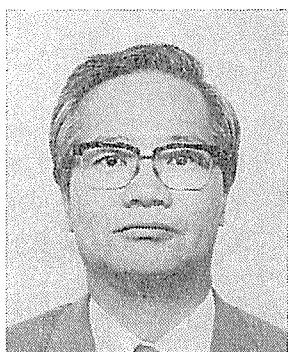
力の大きいストランドケーブル（フレシナー工法）を配置し、このうち、後者の一部の PC 鋼材を外ケーブル方式として全径間にわたり配置したことにあつた。



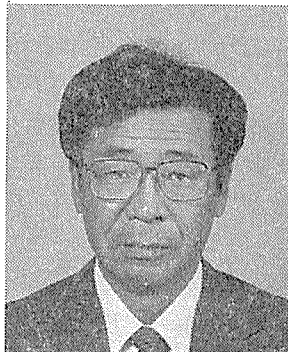
図—1 位置 図



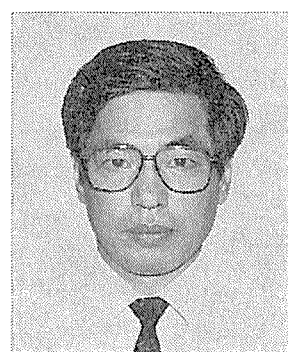
図—2 側 面 図



* Mitsuo SAITO
 日本鉄道建設公団大阪支社
 工事第課長



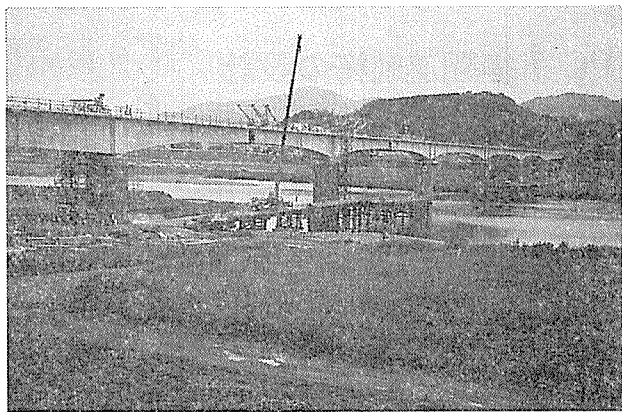
** Toru HAYASHIDA
 鹿島建設（株）
 四万十作業所所長



*** Shuji IMAI
 （株）日本構造橋梁研究所
 大阪支社設計部

当時の設計と今回の設計による主要材料を表—1 に示すが、この表からも過去 15 年間の PC 橋の設計・施工技術のめざましい進歩を推し量ることができる。

四万十川橋梁は、平成 2 年 5 月現在張出し施工を終え（写真—1）、中央ブロック連結後、外ケーブルの緊張が行われる予定であり、完成後はこの方式による我が国最大規模の橋梁とな



写真—1

表—1 旧設計との主要材料比較

設計時期 荷重	昭和 48 年	昭和 62 年	材 料 差
	KS-14	KS-12	
主要材料			
コンクリート	3 280 m ³	2 750 m ³	- 530 m ³
鉄 筋	255 tf	301 tf	+ 46 tf
P C 鋼 材	259 tf	140 tf	- 119 tf

る。この報告は特に外ケーブルに関する計画と設計について概要を記載する。

2. 計画概要

2.1 設計条件

本橋の工事概要および設計条件を下記に、使用材料の強度と主な許容応力度を表—2 に示す。

- 橋 名：四万十川橋梁
- 場 所：高知県中村市
- 施工工期：昭和 63 年 10 月～平成 2 年 10 月
- 発 注 者：日本鉄道建設公団 大阪支社
- 橋 種：コンクリート単線鉄道橋
- 構造形式：PC 7 径間連続箱桁
- 橋長(支間)：494 m (7×70.4 m)
- 橋 幅：5.86 m
- 荷 重：KS-12 有道床
- 施工方法：場所打ちカンチレバー工法

2.2 構造概要

構造寸法図を 図—3, 4 に示す。支承は鉄道橋で実績の多いゴム沓(最大反力 900 tf)を採用し、桁の伸縮(最大移動量 160 mm)に対応するため滑り構造とした。上部工の地震時水平力は、ダンパー式ストッパーを用い各橋脚に分散する方式で、常時の桁水平移動固定位置は橋梁中心の 5P 橋脚としている。

2.3 外ケーブルに関する計画

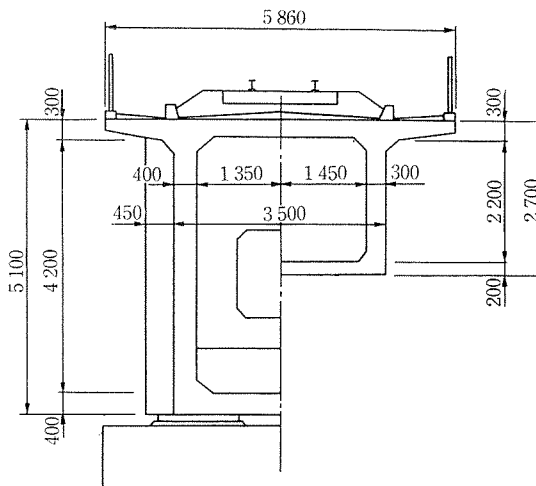
(1) ケーブル配置方法の比較

外ケーブルを使用する場合、一般に①全ケーブルを外側に配置する場合と②コンクリート内部配置との併用方

表—2 材料強度および許容応力度

1) コンクリート		(単位：kgf/cm ²)	
設計基準強度		400	
許容曲げ圧縮応力度	導入直後	180	
	設計荷重時	140	
許容曲げ引張応力度	導入直後	-15	
	静荷重時	0	
	設計荷重時	-10	
許容せん断応力度	設計荷重時	5.5	
許容斜め引張応力度	設計荷重時	-13	
2) PC 鋼材		(単位：kgf/mm ²)	
種 別	断面内に配置される PC 鋼材		外ケーブル
	カンチレバー用	径間連結用	
	SBPR 95/120 φ32 mm	SWPR 7B 12T15.2	SWPR 7B 12V15.2
引 張 強 度	120	190	
降 伏 点 応 力 度	95	160	
許容引張 応 力 度	初引張応力度	86	147
	導入直後	81	137
	設計荷重時	71	115
3) 鉄筋……SD 35			

中間支点上 径間中央



図—3 標準断面図

式に大別される。両者の選択は、主桁架設方法にもよる。

本橋は、主桁架設が場所打ちカンチレバー方式によることを考慮し、②併用方式を採用した。この方式とすべての PC 鋼材を主桁内部に配置した場合(内ケーブル方式)との数量比較を行った。PC 鋼材は、実績により下記のものを使用した。

- カンチレバー用鋼材……SBPR 95/120 φ32 mm
- 径間連結用鋼材………SWPR 7B 12 T 15.2 mm

比較結果を、図—5, 表—3 に示す。

外ケーブル方式の PC 鋼材量の減少理由は、主桁自重

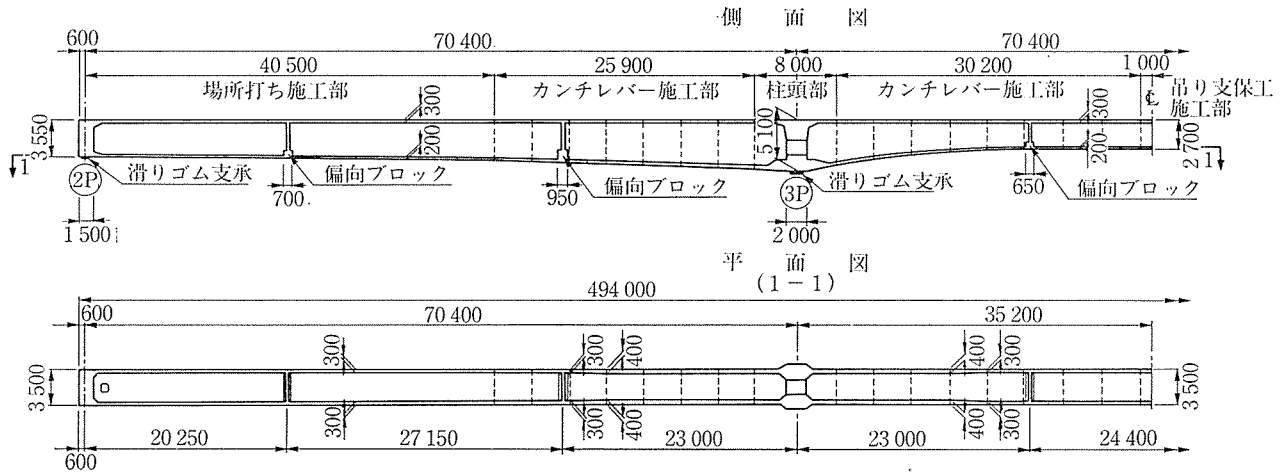


図-4 主桁構造寸法図

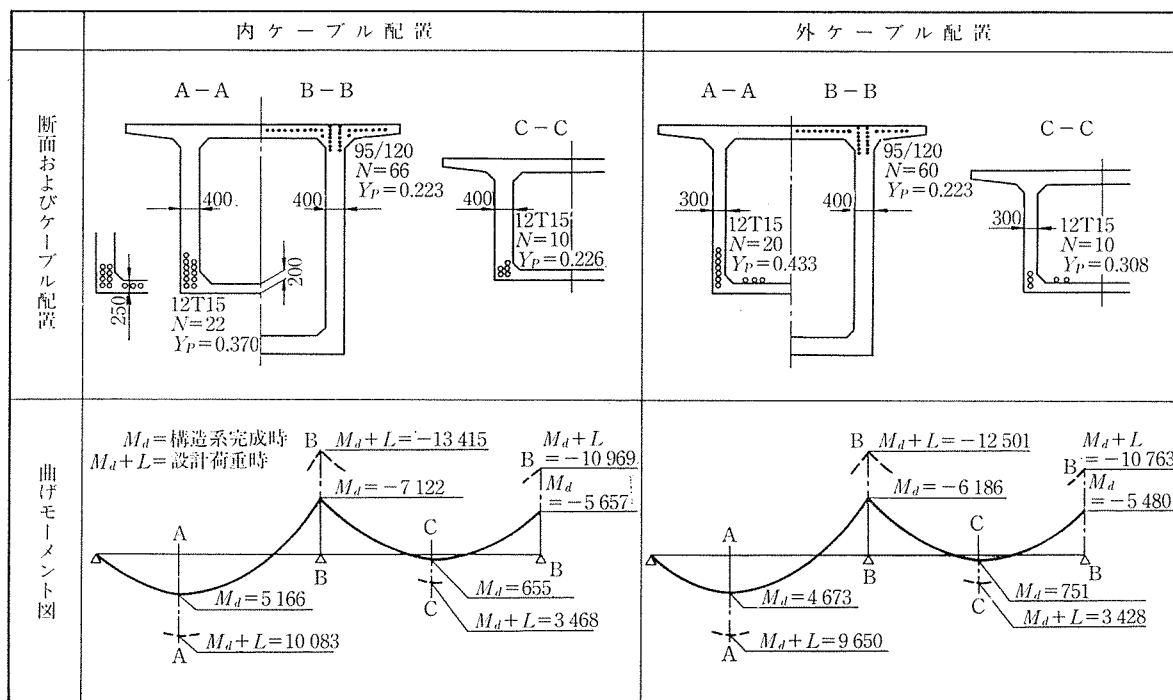


図-5 ケーブル配置方法の比較

表-3 数値の比較

		内ケーブル	外ケーブル	比率
自重による曲げモーメント (tf・m)	側径間 0.4l	5170	4670	0.90
	中間支点上	7120	6190	0.87
コンクリート体積 (m³)		2560	2410	0.94
PC鋼材の本数	側径間	22	20	0.91
	中間支点 (φ32)	66	60	0.91

曲げモーメントの減少と、外ケーブルの導入直後の引張力が、断面内に配置されるケーブルに比べ、シース（防護管）との摩擦損失が小さく、非常に大きな値を得るためである。

同一配置形状の場合の導入直後のPC鋼材応力度を比

較し、図-6に示す。外ケーブルと防護管の摩擦係数は防護管の波打ちの影響は無いものと考え、長さに沿っての損失係数 λ を0とし、曲線に沿っての摩擦係数 μ はケーブルの曲線部がコンクリート内に配置されるため、局所的な配置不良を考慮し0.3の値を使用した。

径間連結鋼材をすべて外側に配置しない理由は、主桁に必要な曲げ破壊耐力を外ケーブルと付着あるPC鋼材で確保することを基本としたためである。

(2) 外ケーブルの配置形状

外ケーブルの配置形状は、従来の部材断面内に配置されるケーブルに比較し、幾何学的拘束条件が少なく形状選定の自由度が大きい。このことは、曲げとせん断に対する合理的なケーブル配置を可能にする。しかし、複雑

なケーブル配置は偏向ブロック数の増加と施工の煩雑さを招く。単線用の本橋の主桁内空断面は狭く、しかも高さの変化を伴っている。このためケーブル形状はケーブル設置の施工性の観点から、通常、径間内に設けられる

2 箇所の隔壁に偏向ブロックを設け、比較的シンプルな配置形状とした (図-7, 8, 写真-2)。

外ケーブルの引張力は、前述のように 144 m 間を連続配置としても大きな値となり、1 径間配置に比し定着

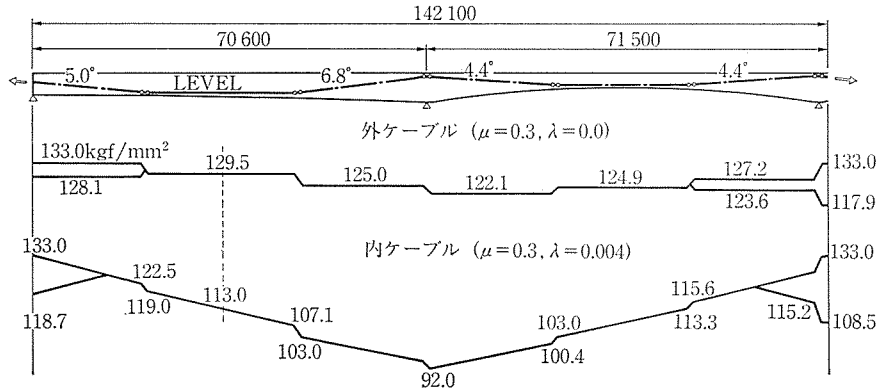
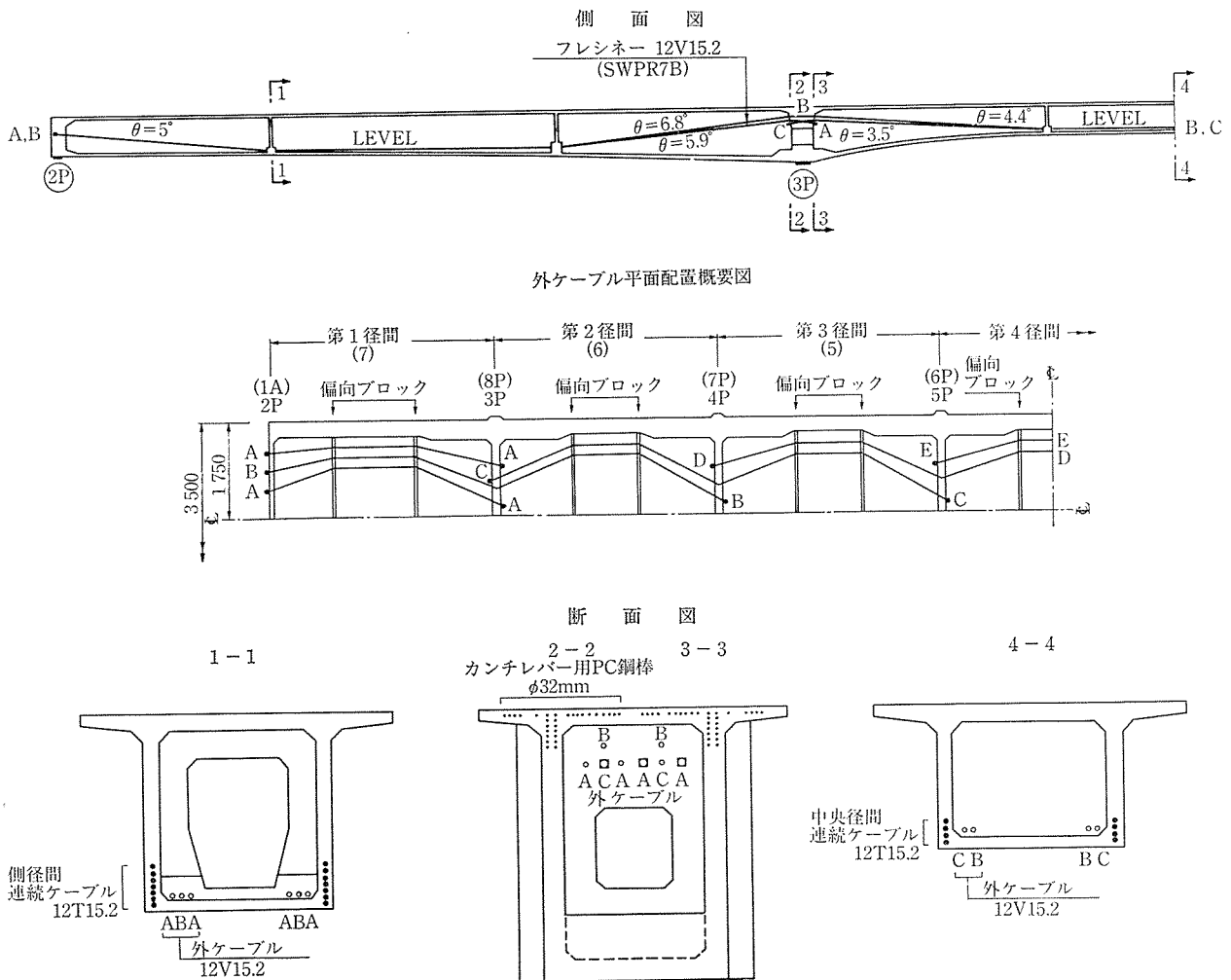
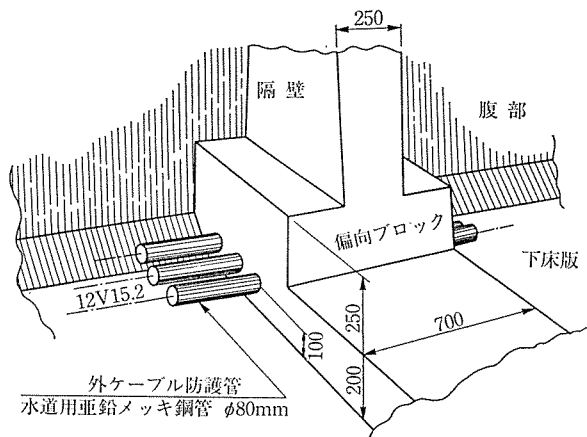


図-6 導入直後の PC 鋼材応力度比較図

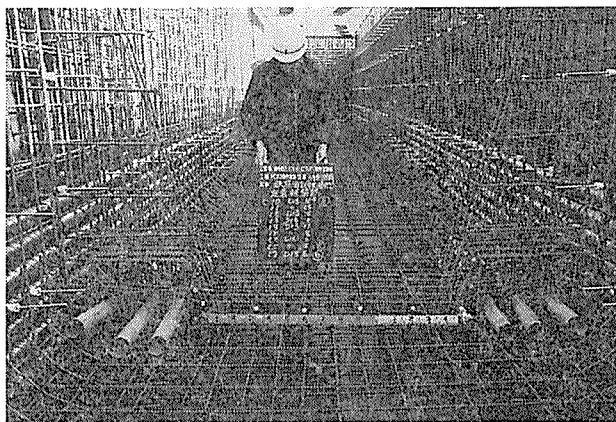


(注) □ 外ケーブル定着具
フレシネー-12V15 エンドキャップ型

図-7 外ケーブル配置概要図



図—8 偏向ブロック詳細図



写真—2 偏向ブロック配筋状況

に関する経済性を得る。このため、本橋のケーブル配置は2径間連続配置を基本形状とした。なお、定着装置はセット量の少ないフレシネー 12V15.2 を使用、このうち、箱桁内部の気象作用の影響の少ない中間支点部（写真—3）には、定着用切欠きを避けるためエンドキャップ型を使用した（図—9）。

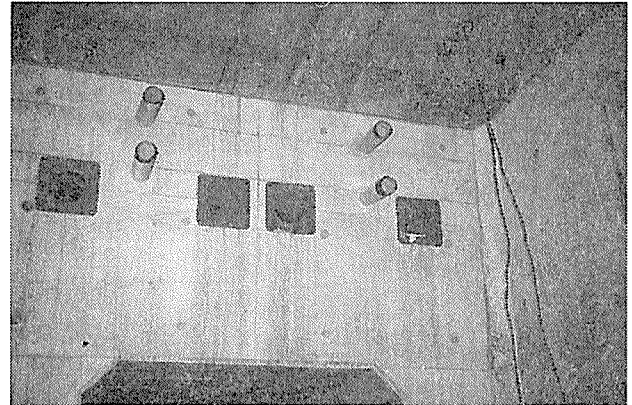
（3）防錆処置

空气中に配置されるケーブルの防錆方法として、一般的に、防護管には硬質ポリエチレン管や鋼管が使用され、グラウト材としてセメントペーストやグリースが使用される。この材料の組合せの採択は、主に桁完成後の外ケーブルの交換に関する管理面の条件に依存される。

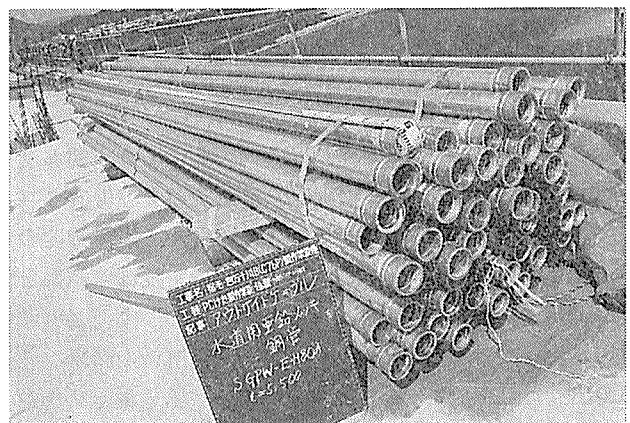
本橋の防錆処置は、桁完成後の管理が第3セクターに移管されることを考慮し、耐久性の観点から、鋼管にセメントペーストを注入する方式を採用した。

鋼管（水道用亜鉛メッキ鋼管内径 80.7 mm，肉厚 4.2 mm）は、ねじ付きの定尺 5.5 m もの（写真—4）を現地搬入し、構造系完成後、箱桁内部で鋼管継ぎ手により1本化される。また、各偏向ブロック間に1箇所、プレストレス導入による主桁の弾性短縮量程度を許容し得る伸縮継ぎ手を設けている。

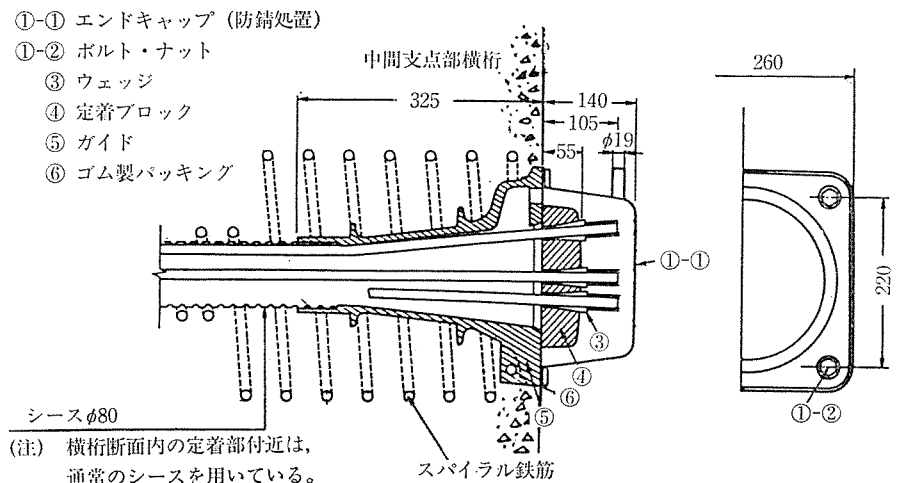
鋼管は硬質ポリエチレン管に比較し、重量が重く配置



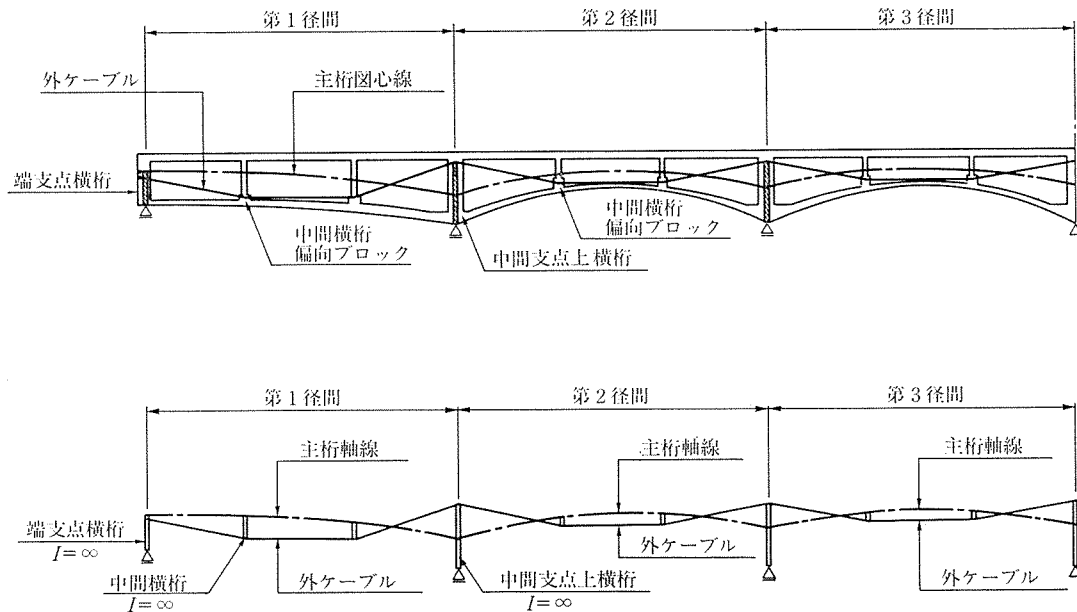
写真—3 柱頭部外ケーブル配置状況



写真—4 防護管（水道用亜鉛メッキ鋼管）



図—9 フレシネー 12V15.2 エンドキャップ型定着具



図—10 外ケーブル変動応力算定構造モデル

時の施工性が劣る反面、ねじ付き鋼管を使用することで現場溶接の手間の省略と、曲げ加工を工場製作とすることでケーブル形状の幾何学的精度の向上を得る。さらに、鋼管の大きな曲げ剛性は、現場施工時の不測の折れ角を軽減できる利点がある。

(4) ケーブルの振動

ケーブルの自己振動周期が構造物の曲げ振動周期と近似した場合、ケーブルは振動し、定着具および偏向ブロック部で不測の付加応力が生じ、ケーブルの疲労強度の低下につながり構造物の耐久性に悪影響を及ぼす結果となる。

本橋全体の主桁の固有周期は、固有値解析の結果、 $T = 0.88$ 秒 (1次モード) であった。一方、ケーブルの振動周期を近似的に慣性力を無視して次式で求めると

$$T_n = 2L/n\sqrt{(m/F)}$$

式中、 F : 引張力 (188 t)

L : 固定位置間のケーブル長 (最長 27 m)

n : 考慮する振動次数 (l)

m : 単位長さ当たりの質量 ($0.003 \text{ tf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^2$)

したがって、 $T_n = 0.22$ 秒となる。

偏向ブロック間を自由長とした場合、ケーブルの振動周期は主桁の振動周期と一致しないが、列車荷重の衝撃周期とケーブルの振動周期が一致しケーブルが共振する恐れも十分に考えられる。本橋の場合、この点に関し、桁完成後、列車走行によるケーブルの振動測定が予定されており、今後の資料を得るとともに本橋のケーブル固定間隔に関する検討を行う予定である。

(5) PC 鋼材応力度

外ケーブルの設計荷重時許容引張応力度は、コンク

リート内に配置された付着あるケーブルと同一値が使用される。これは、使用荷重による外ケーブルの応力変動幅が付着あるケーブルのそれに比べ著しく小さいこととケーブル固定装置により振動を抑制することが可能であり、疲労に関する特別な配慮を必要としないことによる。

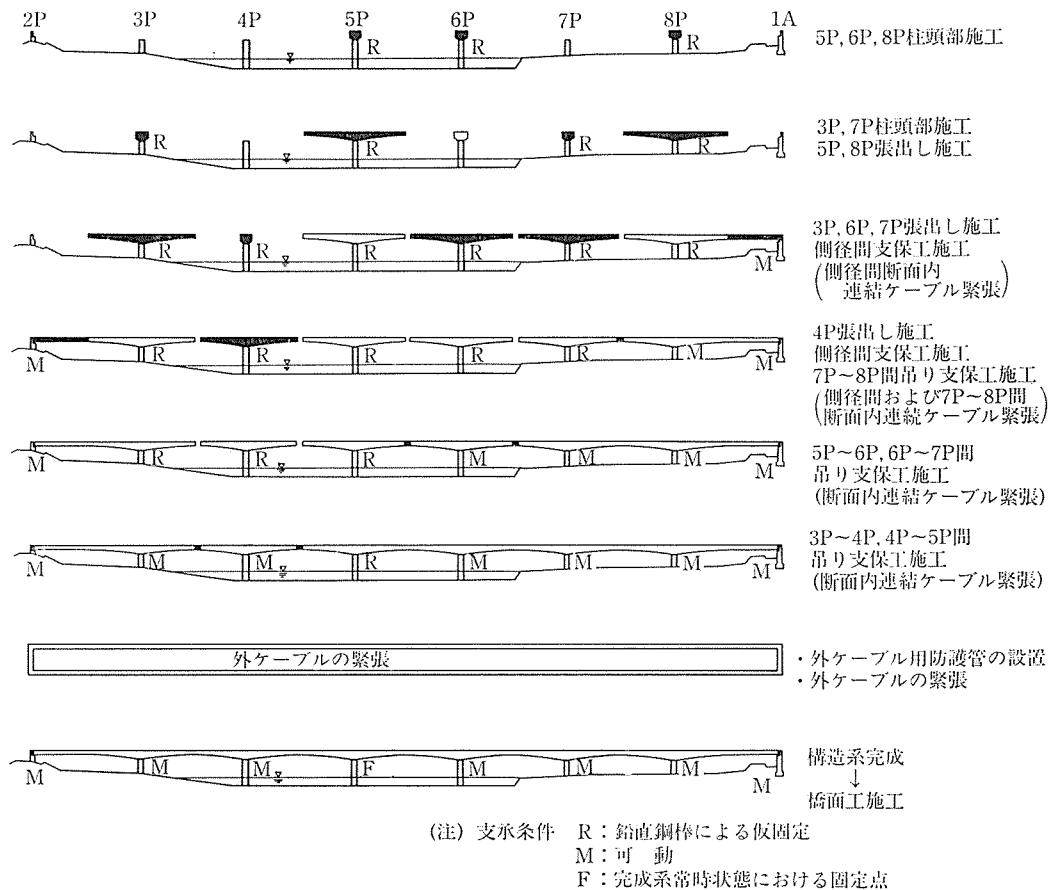
本橋の列車荷重による外ケーブルの応力度増加量を図—10 に示す構造モデルで算定した結果、側径間中央部で $1.6 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ となり、同位置の付着あるケーブルの応力度増加量 $3.7 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ に対し、十分小さい値であった。以上のことから、本橋における外ケーブルの設計荷重時許容引張応力度は、付着あるケーブルと同一の $0.6\sigma_{pu}$ の値を使用した。

3. 設 計

3.1 設計概要

設計計算に使用した構造系完成手順を図—11 に示す。本橋の設計は、建造物設計標準に従い許容応力度法で行うことを基本としている。しかしながら、我が国の示方書類には外ケーブルの設計荷重時のプレストレス減少量の算定方法や外ケーブル使用時の主桁の曲げ破壊安全度の算定方法について明確に条文化されておらず、この種の桁を設計する場合の懸案事項となる。ここでは特に上記の2項目について四万十川橋梁で用いた設計手法を述べる。

本橋の断面力計算は7径間連続の平面骨組構造モデルとし、施工時の構造系の変化を考慮し変形法により算定した。コンクリートのクリープおよび乾燥収縮による影響は、施工時 ($t=0$) から完成時 ($t=\infty$) までの経時変



図—11 構造系完成手順

化と構造系の変化に対応可能な電算プログラムを使用した。主要点の断面力を表—4 に示す。

3.2 設計荷重時のプレストレス減少量の算定

付着ある PC 鋼材のコンクリートのクリープと乾燥収縮によるプレストレスの減少量は、断面 PC 鋼材位置のコンクリートのひずみ変化に等しいと考えて計算される。一方、外ケーブルのプレストレス減少量は、定着間ケーブルの総伸び変化量（ケーブル図心位置コンクリートのひずみ変化の総量）としてとらえる必要があり、一断面ひずみ則は成立せず、一般的に前者よりプレストレスの減少量は少ない。このケーブル図心位置コンクリートのひずみ変化の総量を厳密に求めるのは複雑な電算処理を必要とする。本橋では、コンクリートのクリープと乾燥収縮による外ケーブルの鋼材応力度減少量は、下記に示す猪股俊司博士の実用的提案式によって近似解を求めた。

有効プレストレス力 P_e は、PC 鋼材のリラクセーションを別途考慮すると、

$$P_e = P_0 \cdot \frac{(n \cdot \rho_p \cdot \phi \cdot P_0 - E_p \cdot \epsilon_{cs} \cdot A_p)}{1 + n \cdot \rho_p \cdot (1 + x \cdot \phi)}$$

で表される。

式中、 P_0 ：緊張材引張力（負符号）

表—4 主要点の曲げモーメント（単位：tf・m）

荷重	位置	2P~3P	3P	3P~4P	
		側径間中央部	支点上	径間中央部	
主桁自重	張出し施工終了時	—	-6.278	—	
	構造系完成時	4.345	-6.829	-1.28	
直後の力	連結ケーブル	214	559	997	
	外ケーブル	529	1.380	950	
クリープ・乾燥収縮の影響	$t=0 \sim$ 構造系完成時	12	31	0	
	$t=0 \sim t=\infty$ 時	110	292	292	
橋面工		1.298	-2.217	326	
列車荷重	最大	2.835	954	1.516	
	最小	-954	-3.917	-568	
荷重組合せ	構造系完成時	5.100	-4.859	1.819	
	全死荷重時	6.496	-6.815	2.437	
	設計荷重時	最大	9.331	-5.861	3.953
		最小	5.542	-10.737	1.869

n ：ヤング係数比

ρ_p ：PC 鋼材断面積比 $= A_p / A_c$

ϕ ：クリープ係数

E_p ：PC 鋼材のヤング係数

ϵ_{cs} ：乾燥収縮度

α : エージング係数

この式は、「PC 鋼材ひずみ変化は コンクリート 乾燥収縮ひずみと、プレストレッシングによるコンクリート総断面に関する弾性コンクリートひずみのクリープによるクリープひずみ増との和である」との仮定による。

本橋は、付着ある PC 鋼材との併用方式であるため、式中の P_0 , A_p には PC 鋼材総量の値を使用し、有効係数を求めた。クリープ係数および乾燥収縮度は、外ケーブル緊張時のコンクリートの有効材令と仮想部材厚さ、使用環境条件等を考慮し定めた。また、エージング係数は外ケーブル緊張時のコンクリートの有効材令が長期間となることを考慮し 0.8 と定めた。

以上、各設計断面における有効 PC 鋼材本数を図-12 に示し主要点の合成曲げ応力度結果を表-5 に示す。

3.3 曲げ破壊安全度の算定

付着のない PC 鋼材の曲げ破壊時の応力度増加量は、ひびわれ区間を挟む 定着間の鋼材総伸び量の 関数となる。この応力度増加量は、付着ある PC 鋼材の一断面のひずみ変化による応力度増加量に比較し著しく小さくなるのが容易に推察できる。しかし、コンクリートひびわれ発生後の外ケーブルの総伸び量を知ることは容易でない。

本橋の曲げ破壊安全度の算定は、外ケーブルの応力度増加量が 一断面のひずみ則の外にあることを考えあわせ、外ケーブルのプレストレッシング作用を荷重作用に含ませ、次の条件式が成立することを確かめる方法とした。

$$1.7 \cdot (M_d + M_{L+1}) + F + M_p \leq M_R$$

式中、1.7 : 建造物設計標準による荷重係数

M_d : 死荷重による曲げモーメント

M_{L+1} : 衝撃を含む活荷重による曲げモーメント

F : 不静定曲げモーメント

M_p : 外ケーブルのプレストレッシング作用による静定曲げモーメント

M_R : 付着ある鋼材による曲げ破壊抵抗モーメント

本設計では、外ケーブルのプレストレス作用力には、鋼材応力度増加量を見込まずに有効張力を使用し、安全側の設計とした。

側径間中央部において設計荷重時に必要なケーブル総本数を一定として、付着あるケーブルと外ケーブルの

表-5 主要断面の曲げ応力度表

(単位 : kgf/cm²)

荷重	設計断面		側径間中央		第1支点上		第2径間中央	
	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
主 桁 自 重	76	-117	-64	78	-4	6		
橋 面 工	23	-32	-18	22	9	-14		
活 荷 重	最 大	49	-71	8	-10	42	-64	
	最 小	-17	24	-32	40	-16	24	
直後のプレストレス	断 面 内	PC 鋼 棒	-	-	108	-30	-	-
		ケ ー ブ ル	-23	186	-	-	-16	129
		外 ケ ー ブ ル	-12	88	11	-3	-9	69
直後の2次力	連 結 ケ ー ブ ル	4	-5	5	-6	28	-44	
	外 ケ ー ブ ル	9	-13	12	-15	26	-40	
クリープ・乾燥収縮の影響	打設～構造系完成	1	-4	-5	1	1	-4	
	打設～ $t=\infty$ 時	5	-24	-17	1	10	-27	
リラクゼーション	P C 鋼 棒	-	-	-3	1	-	-	
	連 結 ケ ー ブ ル	1	-9	-	-	1	-6	
	外 ケ ー ブ ル	0	-4	-1	1	-1	-2	
外ケーブルの減少量の影響		0	-7	-2	2	-2	-3	
荷 重 組 合 せ	構 造 系 完 成 時	56	121	63	27	27	107	
	全 死 荷 重 時	83	62	32	52	43	68	
	設 計 時	最 大	132	-9	39	42	85	4
		最 小	66	86	0	92	27	92

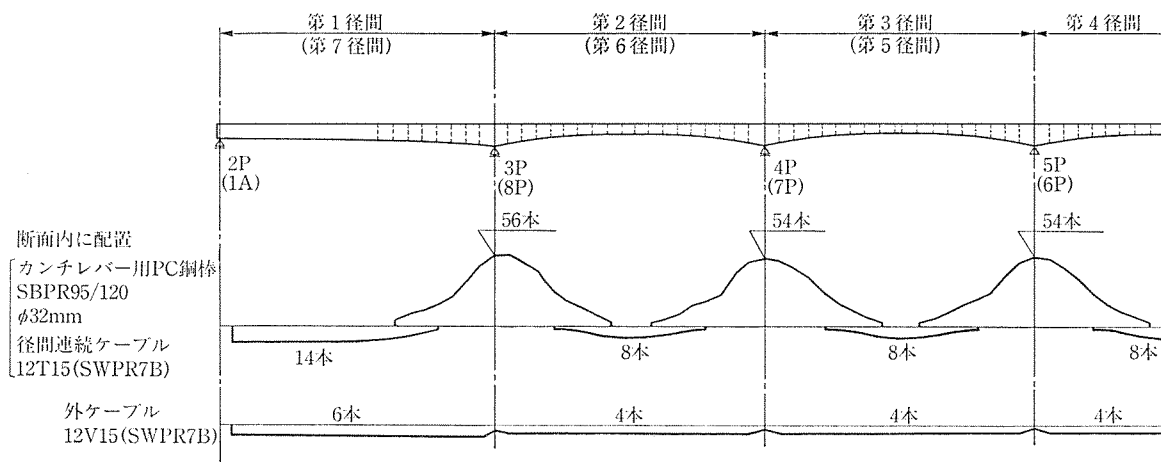
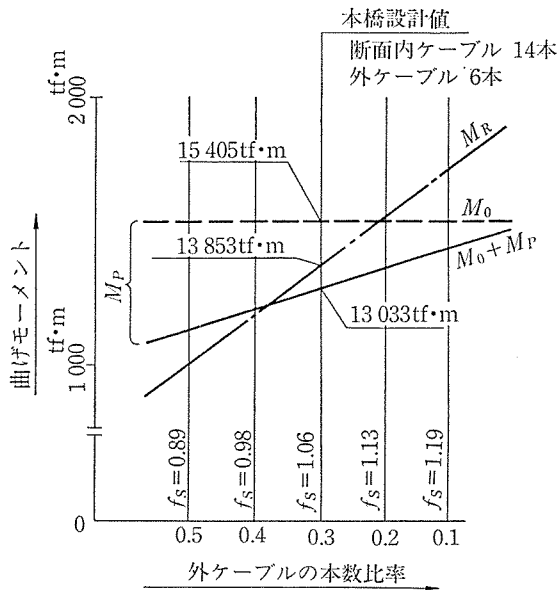


図-12 各設計断面における PC 鋼材の有効本数

本数比率を変化させた場合の曲げ破壊安全度検討結果を
 図—13 に示す。



M_R : 付着ある鋼材による曲げ破壊抵抗モーメント
 M_0 : 作用荷重による終局時曲げモーメント
 M_P : 外ケーブルによる静定モーメント
 f_s : 曲げ破壊安全度

$$= \frac{M_R}{M_0 + M_P}$$

図—13 外ケーブルと断面内ケーブルの本数比率の
 変化と曲げ破壊安全度の関係

4. あとがき

外ケーブル方式の実績が少なく、設計・施工面において今後の研究によることも多い。しかし、主桁コンクリート重量を軽減できるこの方式は、主桁架設費と下部構造を含む橋梁全体の建設費において有利な状況にあると考えられ、今後、使用の機会が増大するものと思われる。また、設計において、ケーブル配置の枠（断面）を取り外すことにより、PC 技術者の自由な創造力を発揮できる魅力ある方式でもあると言える。

本橋では、偏向ブロックの応力測定やケーブルの振動測定が予定されており、外ケーブルの試験緊張結果とともに今後の設計に有益な資料を提供するものと思われる。

最後に、本橋の設計にあたり御指導頂いた日本鉄道建設公団本社設計室、同大阪支社工事第三課、現場資料を提供して頂いた同宿毛鉄道建設所および鹿島建設の皆様
 に感謝の意を表明いたします。

参 考 文 献

- 1) 猪股俊司著：PC 橋にアウトケーブルを用いた設計例、PC 構造物最近の設計例と未来像（プレストレストコンクリート技術協会技術講習会テキスト）、昭和 59 年 3 月
- 2) アウトケーブルに関する調査報告、首都高速道路公団、昭和 62 年 3 月

【1990 年 6 月 21 日受付】

◀刊行物案内▶

FIP「プレストレストコンクリート材料の極低温下挙動」 に関する技術水準報告書

体 裁：B 5 判 53 頁
 定 価：2 500 円 送 料：300 円
 内 容：緒言、序論。1. 極低温化の構造物と荷重載荷条件；極低温下の構造物、供用条件と荷重、危険状態と荷重、構造物の設計と材料特性。2. 低温下における材料の挙動；PC 鋼材、定着具用鋼材の種類と性質、鉄筋、極低温下のコンクリートとグラウト。3. 低温下での複合挙動；はじめに、低温下での付着、プレストレスング・システムの挙動、注釈、PC の破壊靱性。4. 低温試験方法；鋼材の試験、コンクリートおよびグラウトの試験方法、定着部の試験、付着部の試験、付着に関する試験。