

PC ケーブルを用いた曲線桁の片持ち張出し工法

—— 沢水第二橋（下り線）の設計・施工 ——

明 石 行 雄*
金 井 壮 次**
北 原 剛***

1. はじめに

沢水第二橋は、九州自動車道の八代～人吉間に位置する、橋長約 530 m の PC 橋であり、急峻な地形の制約を受け 橋脚設置箇所が 限定されたことから、 $R=300$ m という小さな曲率半径を有する曲線橋となっている。また橋脚が非常に高いことから架設工法として片持ち張出し工法が採用された。

沢水第二橋（下り線）の片持ち張出し施工法としては、PC ケーブルシステムを用いた張出し工法（Free Cantilever erection with Cables 工法、以下 FCC 工法と略記する）が採用された。我が国における片持ち張出し工法は、工法の成立した歴史的背景から、緊張材として PC 鋼棒を用いるバーシステムが主として採用されている。しかしながら、バーシステムはカップラーによる接続を必要とし、多大な鋼棒本数を配置することが必要であった。一方、FCC 工法（ここで対象とする PC 定着工法はクサビ式定着工法に限定するが）は、古くからヨーロッパを中心に世界各国で施工されてきており、高強度かつ可撓性のあるケーブルシステムを採用することにより設計・施工・経済性・品質管理面で片持ち張出し施工の有利性を向上させた工法である。

本橋は、ケーブルシステムの特徴を積極的に生かすことによって曲線桁に適応した施工例である。また本橋における片持ち張出し施工の特徴としては、

- ・ 曲率半径が 300 m と小さいこと
- ・ 横断勾配が 9% と急勾配であること
- ・ 上り線と下り線の隙間が 10 cm と狭いこと
- ・ 張出し施工区間が一般道と交差すること
- ・ 側径間の支保工施工部の地形が急峻であること

などがあげられる。

設計・施工一般に関する報告は、他誌にすでに掲載しているので、ここでは「PC ケーブルを用いた曲線桁の片持ち張出し工法の設計・施工」にテーマを限定して報

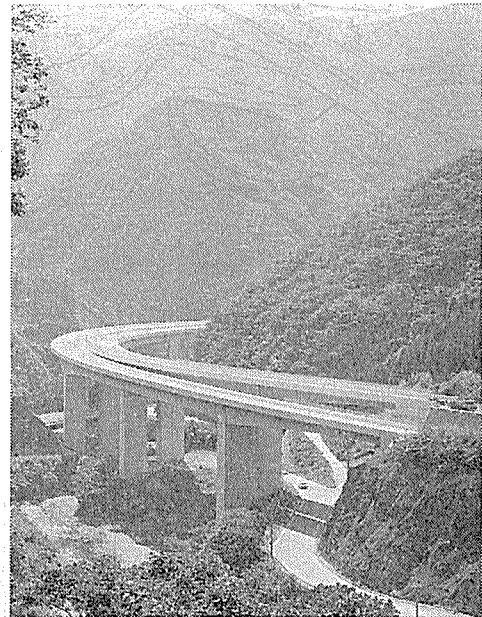


写真-1 全景写真

告する。

2. 工事概要

工事名：九州自動車道沢水第二橋他 1 橋（PC 上部工）工事

路線名：九州自動車道鹿児島線・宮崎線

工事箇所：熊本県球磨郡山江村大字万江

工事期間：自 昭和 60 年 10 月 4 日

至 昭和 63 年 3 月 21 日

構造形式：A 橋 PC 2 径間連続ラーメン橋

B 橋 PC 3 径間連続ラーメン橋

C 橋 PC 3 径間連続ラーメン橋

道路規格：第一種 3 級 B

橋 種：プレストレストコンクリート橋

橋 格：1 等橋（TL-20, TT-43）

橋 長：527.35 m

桁 長：A 橋 123.05 m

B 橋 251.50 m

C 橋 152.20 m

* 日本道路公団福岡建設局人吉工事々務所工事長

** 大成建設（株）横浜支店東名足柄橋西（作）所長

*** 大成建設（株）土木設計部構造第 1 設計室主任



B橋 74.8+90.0+84.8 m

10.15~12.45 m

平面線形： $R=300\text{ m}$

横断 $i=4.0\sim 9.0\%$

し施工)

PC 鋼 棒 FAB 工法 (参考文献⁵⁾)コンクリート ($\sigma_{ck}=400 \text{ kg/cm}^2$); $6\,555 \text{ m}^3$

鉄筋 (SD 30 B) ; 709 t

型 枰 ; 21 236 m²

PC 鋼材

縦方向 PC 鋼より線 (SWPR 7 A 12 T 12.4 mm);
212 t

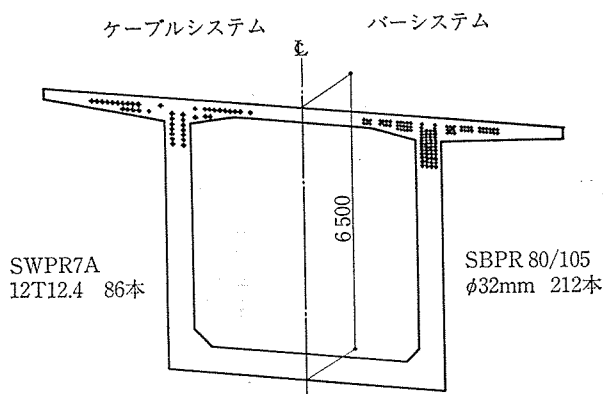


図-2 ケーブルシステムとバーシステムの
PC 鋼材断面配置の比較（下り線）

横 締 め PC 鋼棒 (SBPR 80/105 ϕ 32 mm); 74 t
鉛直締め PC 鋼棒 (SBPR 95/120 ϕ 32 mm); 23 t

3. FCC 工法の特徴

本橋の施工で採用した FCC 工法は、ケーブルシステムによる片持ち張出し施工であり、以下のような特徴を有している。

3.1 設計面の特徴

- 1) 高強度の PC 鋼材を使用することができる。
- 2) 大容量のケーブルの使用が可能であり、鋼材本数が少なくなり、断面内の配置が容易となる（図-2）。
- 3) PC ケーブルは可撓性に優れており、曲線状のケーブル配置が容易である。

3.2 施工面の特徴

- 1) コンクリート打設時にはシースのみ配置しておけばよく、施工は容易である。
- 2) 鋼材本数が少ないので、シース組立て、緊張、グラウトなどの施工性が良い（写真-2）。
- 3) PC ケーブルの挿入は、プッシュスルーマシンを用い行われるので、挿入作業は容易で特に熟練工を

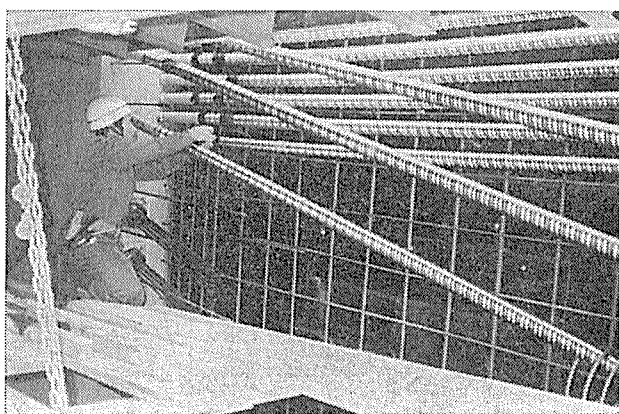


写真-2 シースの組立て状況

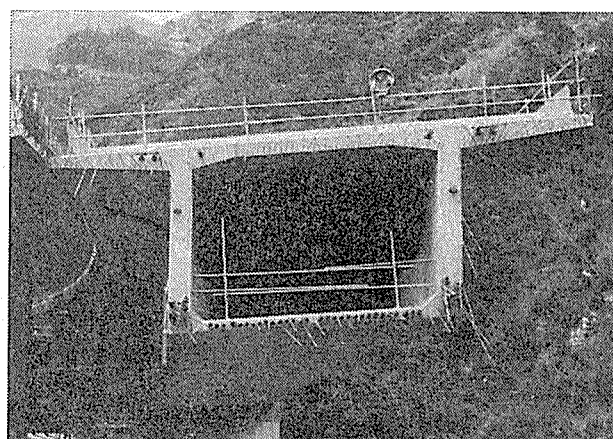


写真-3 FCC 工法ケーブル緊張端

必要としない。また、挿入はコンクリート養生中に行われる。

- 4) PC ケーブルは緊張直前までに挿入すればよいため、防錆に対する管理が容易である（写真-3）。
- 5) 張出し施工時カップラーが不要のため PC 鋼材の測長管理が不要である。
- 6) PC ケーブルはすべて後挿入するため、張出し施工時に PC 鋼材のカップリングを必要としない。そのためグラウトを施工する場合その流れが一樣で、注入が確実となり耐久性が向上する。

4. 設 計

4.1 構造解析モデルおよび解析結果

本橋は前述のとおり曲線橋であるので、荷重（死荷重・活荷重）およびプレストレスによりねじりモーメントが発生する。そこで、このねじりモーメントの算定に当たっては、以下に示す基本的考え方にに基づき、各荷重に対して構造モデルを仮定し解析した。

- ① 曲げモーメントおよびせん断力については、平面ラーメン解析および立体ラーメン解析により試算し比較した結果、構造系の差による影響が少ないため、架設系・完成系ともに平面ラーメンにより解析を行った。

コンクリートの材令差および構造系の変化により発生するクリープ拘束力の解析については、厳密な解析を行った（4.2 クリープ拘束力の解析参照）。

- ② ねじりモーメントの解析は、立体ラーメンにより解析を行った。また活荷重によるねじりモーメントについては、橋脚の影響を考慮して立体格子により影響線解析を行った（4.3 ねじりモーメントの算定参照）。

図-3 にB橋の曲げモーメント図とねじりモーメント図を示す。

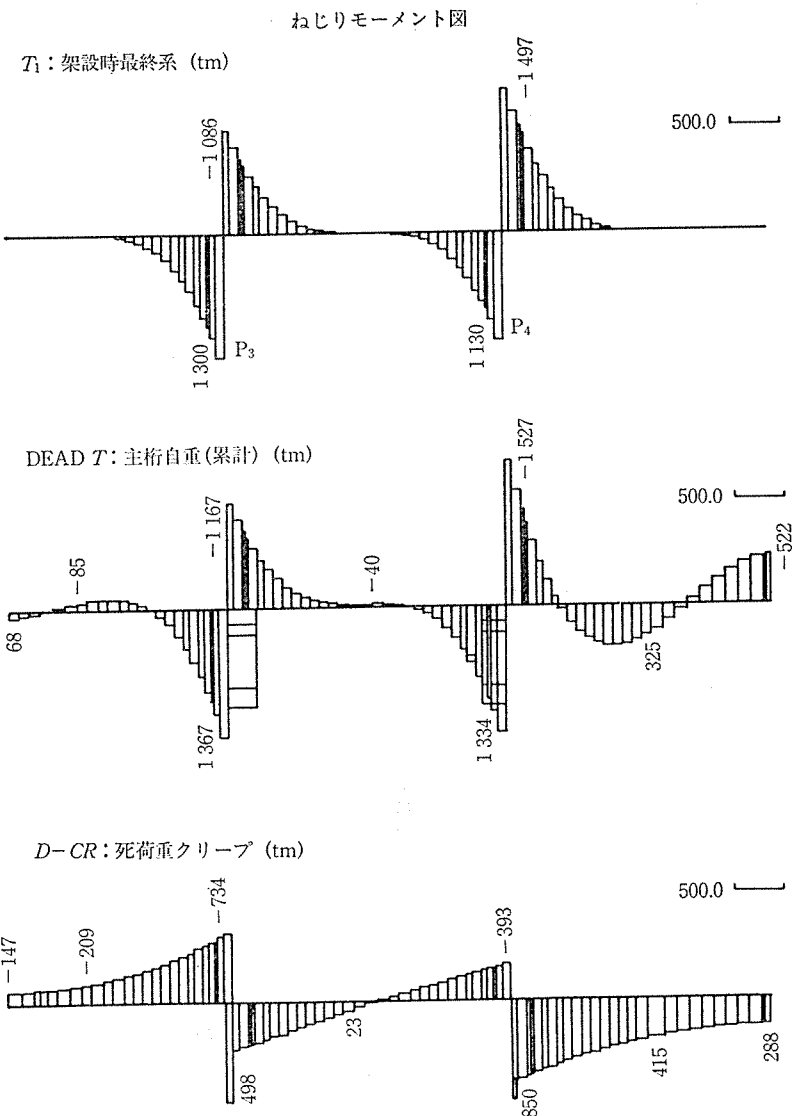
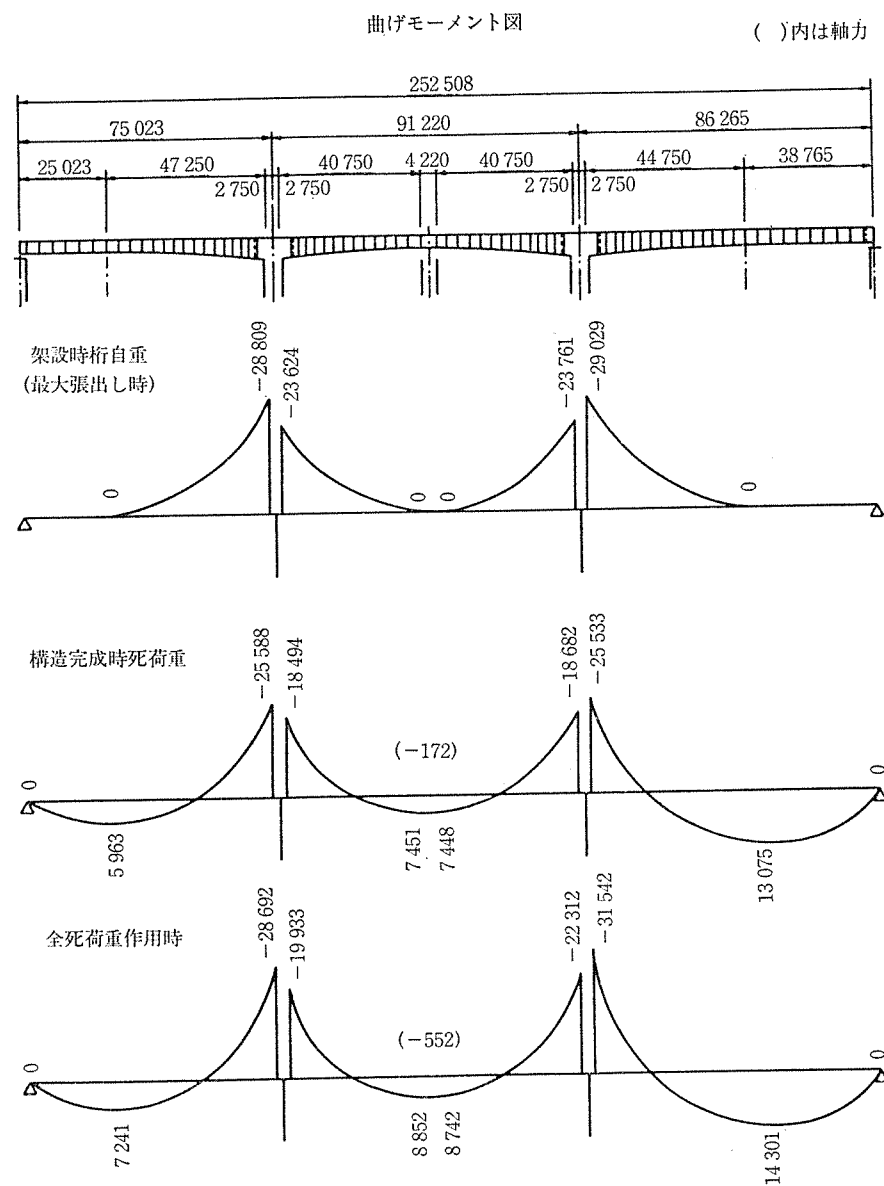


図-3 B橋曲げモーメント図およびねじりモーメント図

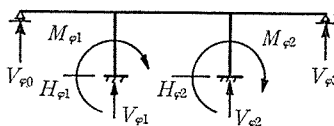
表—1 クリープ2次力の厳密解と簡略解の反力比較表

支点	反力記号	$W_2 - W_1$ (全支保工一分割)	クリープ2次反力 W_3			比率 $W_3/(W_2 - W_1)$		
			実用計算式	厳密解 1	厳密解 2	実用計算式	厳密解 1	厳密解 2
P_1	$V_{\varphi 0}(t)$	248	207	184	133	0.83	0.74	0.54
P_2	$H_{\varphi 1}(t)$	30	25	22	24	0.83	0.74	0.78
	$V_{\varphi 1}(t)$	-248	-207	-184	-139	0.83	0.74	0.56
	$M_{\varphi 1}(tm)$	10 403	8 649	7 693	5 250	0.83	0.74	0.51
P_3	$H_{\varphi 2}(t)$	-30	-25	-22	-24	0.83	0.74	0.78
	$V_{\varphi 2}(t)$	-248	-207	-184	-117	0.83	0.74	0.47
	$M_{\varphi 2}(tm)$	-10 403	-8 649	-7 693	-5 039	0.83	0.74	0.48
P_4	$V_{\varphi 3}(t)$	248	207	184	123	0.83	0.74	0.50

Dischinger 簡略式：補正材令 133 日とし、 $\varphi = 1.78$ の場合

厳密解 1：平均補正材令 133 日とした場合

厳密解 2：各施工ブロックごとの材令を考慮した場合



4.2 クリープ拘束力の解析

コンクリート構造物を段階施工により分割施工を行う場合、各ブロックでコンクリートの材令に差が生じ、また架設時と完成時で構造系が変化するためクリープ変形を拘束する力が働きクリープ2次力が生じることが知られている。

従来このクリープ2次力の算出は、構造完成時以降に発生するものと仮定し平均材令を用いて、道示 編2.1.3式（解 2.1.1）に示される Dischinger の簡略式により求められてきた。

$$\Delta R_{\varphi} = (R_0 - R_1) \times (1 - e^{-\varphi})$$

ここに、

ΔR_{φ} ：コンクリートのクリープによる反力の変化量

R_0 ：最終構造系を一度に施工すると仮定した場合の死荷重およびプレストレスによる反力

R_1 ：最終構造系になる前の構造系における死荷重およびプレストレスによる反力

φ ：最終構造系が完成した後の各ブロックにおける残留クリープ係数の平均値

しかし、この方法によると、本橋においては以下のような問題点が考えられた。

- ・非対称な施工を行う場合材令差による影響を適切に評価するのが困難である。
- ・ラーメン構造の場合、橋脚のクリープ変形の影響を考慮した解析は複雑となる。

そこで、本設計ではより合理的な設計を目指し、Dischinger の簡略式の基となっている基本式に従来の変位法を適用して、この拘束力を各施工段階で解析した。以下にこの簡単な説明を行う。

材令 τ で持続荷重が載荷されたときのコンクリートのひずみ $\varepsilon(t)$ は、以下に示す Dischinger の基本式によ

ると、持続荷重の載荷による弾性ひずみ $\varepsilon_c(\tau)$ と時間の経過に伴って発生してくるクリープひずみ $\varepsilon_k(t)$ ならびに乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_s(t)$ を合計して得られる。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \varepsilon_c(\tau) + \varepsilon_k(t) + \varepsilon_s(t) \\ &= \frac{\sigma_e(t)}{E_c} + \int_0^t \frac{\sigma_e(\tau)}{E_c} \cdot \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} d\tau + \varepsilon_s(t) \end{aligned}$$

このうちクリープと乾燥収縮による塑性ひずみは、H. Trost の累加原則ならびに D. Schade が与えた材令係数 $\rho(t, \tau)$ を用いると、

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ks}(t) &= \varepsilon_k(t) + \varepsilon_s(t) \\ &= \frac{\sigma_e(\tau)}{E_c} \cdot \varphi(t, \tau) + \frac{\sigma_{ks}(t)}{E_c} \\ &\quad \times [1 + \rho(t, \tau) \cdot \varphi(t, \tau)] + \varepsilon_s(t, \tau_s) \end{aligned}$$

で表される。ここで、

$\varepsilon_{ks}(t)$ ：クリープと乾燥収縮による塑性ひずみ

$\sigma_e(\tau)$ ：持続荷重の載荷によって生じた弾性応力度

$\sigma_{ks}(t)$ ：クリープと乾燥収縮により発生した応力度

$\rho(t, \tau)$ ：材令係数

$\varphi(t, \tau)$ ：材令 τ で持続荷重が載荷されたときの経過時間 t におけるクリープ係数（道示 解 2.2.2）

$\varepsilon_s(t, \tau_s)$ ：材令 τ_s で乾燥収縮の影響を受け始めたときの経過時間 t における乾燥収縮度（道示 解 2.2.5）

E_c ：コンクリート弾性係数

である。

さらに上式は、

$$E_{\varphi} = \frac{E_c}{1 + \rho(t, \tau) \cdot \varphi(t, \tau)}$$

と置くことによって次のような簡単な式で表すことができる。

◇工事報告◇

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ks}(t) &= \frac{\sigma_e(\tau)}{E_c} \cdot \varphi(t, \tau) \\ &+ \frac{\sigma_{ks}(t)}{E_\varphi} \\ &+ \varepsilon_s(t, \tau_s)\end{aligned}$$

ここで、 E_φ はクリープ換算弾性係数と呼ばれる係数である。この式からわかるように、クリープと乾燥収縮によって発生するひずみは、コンクリートの弾性係数をクリープ換算弾性係数 E_φ で置き換え、さらに持続荷重の載荷による弾性ひずみにクリープ係数をかけることによって一般の弾性計算と同じ方法で計算することができ。また、上式より乾燥収縮のひずみについては、クリープひずみと独立して取り扱えることがわかる。

実際の計算では、この E_φ を用いてクリープ換算剛性マトリックスとクリープ換算等価節点力を計算し、これによりクリープによって発生する曲げモーメント M_φ および軸力 N_φ を求めた。

また乾燥収縮についても同様に、乾燥収縮ひずみに対する等価節点力を求め、乾燥収縮ひずみによる軸力 N_s を算出した。

表—1 に簡略式による結果と厳密解による結果の比較表を示す。これによるとクリープによる2次反力は、厳密解が簡略解より2～3割小さいことがわかる。

また、表中厳密解1はコンクリートの材令を平均して解析した場合で、厳密解2は各施工ブロックごとのコンクリート材令を考慮した場合の解析結果で、本設計では厳密解2の結果を適用した。

ここに、 W_1 ：分割施工を考慮した場合の反力

W_2 ：全支保工施工を考慮した場合の反力

W_3 ：クリープ2次反力

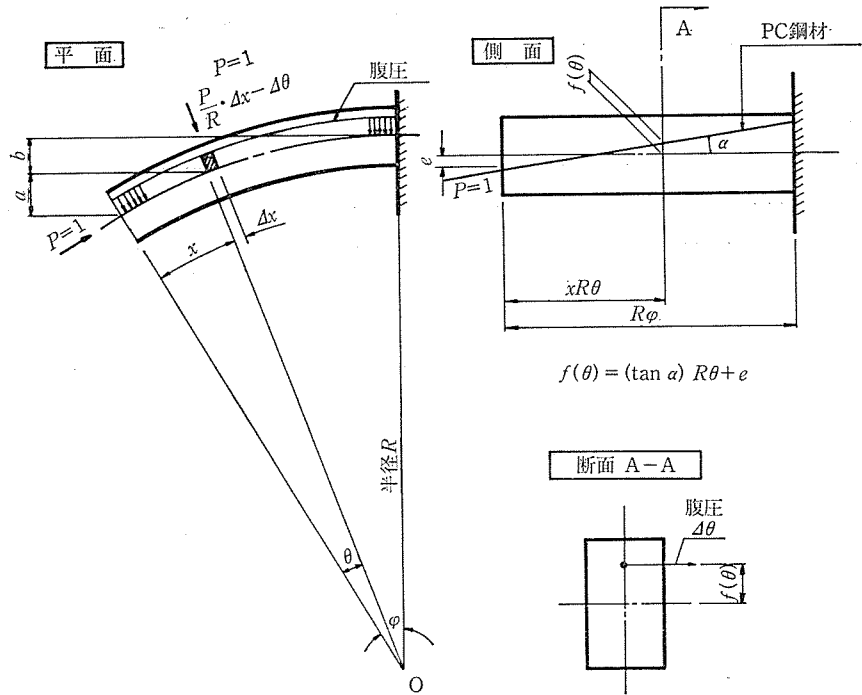
4.3 ねじりモーメントの算定

前述したとおり本橋は曲線桁であるので、これに起因したねじりモーメントが発生する。設計は4.1に示した構造モデルを用いてこのねじりモーメントを求めた。

ここでは特色的なプレストレスおよびクリープ拘束力によるねじりモーメントの算定方法について詳述する。

(1) プレストレスによるねじりモーメント

不静定構造にプレストレスを導入すると不静定2次モーメントや不静定2次せん断力が発生する。これと同様に曲線桁の場合、構造が完成した後にプレストレスを導入すると不静定2次ねじりモーメントが発生する。



図—4 架設時プレストレスによるねじりモーメント

一方、静定構造である片持ち張出し時においてもプレストレスによるねじりが発生すると考えられるが、片持ち梁に PC 鋼材を対称に配置した場合、プレストレスによってはねじりモーメントは発生しないことが知られている。

以下に架設系（静定構造）と完成系（不静定構造）におけるプレストレスによるねじりモーメントの考え方について述べる。

(a) 架設系（静定構造）

図—4 に示すような曲率半径 R を有する片持ち梁に、鉛直方向に $f(\theta)$ の関数で表される形状を有する PC 鋼材を断面の中心に1本配置し、緊張端に単位緊張力 $P_T=1$ を導入した場合、次の3つのねじりモーメントが桁に作用する。

- ・腹圧力 U_{HP} によるねじりモーメント
- ・鉛直分力 $P_T \cdot \sin \alpha$ によるねじりモーメント
- ・水平分力 $P_T \cdot \cos \alpha$ によるねじりモーメント

これらのねじりモーメントは以下の式で表される。

① 腹圧力によるねじりモーメント M_{t1}

x における微小区間の腹圧力 ΔU_{HP} は、

$$\Delta U_{HP} = \frac{P_T}{R} \cdot \Delta x = 1 \cdot \frac{\Delta x}{R} = \Delta \theta$$

腹圧力 ΔU_{HP} によるねじりモーメント ΔM_{t1} は、

$$\begin{aligned}\Delta M_{t1} &= \Delta \theta \cdot \cos(\varphi - \theta) \cdot f(\theta) \cdot \cos \alpha \\ &= \sin \alpha \cdot \theta \cdot \cos(\varphi - \theta) \cdot \Delta \theta \\ &\quad + \cos \alpha \cdot \cos(\varphi - \theta) \cdot \Delta \theta\end{aligned}$$

よって腹圧力 U_{HP} によるねじりモーメント M_{t1}

は,

$$M_{t1} = R \cdot \sin \alpha \cdot \int_0^\varphi \theta \cdot \cos(\varphi - \theta) \cdot d\theta \\ + e \cdot \cos \alpha \cdot \int_0^\varphi \cos(\varphi - \theta) d\theta$$

ここで, $\varphi - \theta = \bar{\theta}$ とすると,

$$M_{t1} = -R \cdot \sin \alpha \cdot \int_0^\varphi (\bar{\theta} - \varphi) \cdot \cos \bar{\theta} d\bar{\theta} + e \cdot \cos \alpha \\ \cdot \int_0^\varphi \cos \bar{\theta} d\bar{\theta} \\ = -R \cdot \sin \alpha \cdot \int_0^\varphi \bar{\theta} \cdot \cos \bar{\theta} d\bar{\theta} \\ + (e \cdot \cos \alpha + R \cdot \varphi \cdot \sin \alpha) \cdot \int_0^\varphi \cos \bar{\theta} d\bar{\theta}$$

また,

$$\int_0^\varphi \bar{\theta} \cdot \cos \bar{\theta} d\bar{\theta} = [\varphi \cdot \sin \varphi]_0^\varphi + [\cos \varphi - 1]_0^\varphi \\ = \varphi \cdot \sin \varphi + \cos \varphi - 1$$

$$\int_0^\varphi \cos \bar{\theta} d\bar{\theta} = [\sin \bar{\theta}]_0^\varphi = \sin \varphi$$

であるから,

$$M_{t1} = -R \cdot \sin \alpha \cdot (\varphi \cdot \sin \varphi + \cos \varphi - 1) \\ + (e \cdot \cos \alpha + \varphi \tan \alpha) \cdot \sin \varphi \\ = -R \cdot \sin \alpha \cdot (1 - \cos \varphi) + e \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \\ \dots\dots\dots (1)$$

② 鉛直分力によるねじりモーメント M_{t2}

プレストレスによる鉛直分力は,

$$P_V = P_T \cdot \sin \alpha = 1 \cdot \sin \alpha = \sin \alpha$$

鉛直分力によるねじりモーメント M_{t2} は,

$$M_{t2} = (a + b) \cdot P_V = (a + b) \cdot \sin \alpha \\ = R \cdot (1 - \cos \varphi) \cdot \sin \alpha \dots\dots\dots (2)$$

③ 水平分力によるねじりモーメント M_{t3}

プレストレスによる水平分力は,

$$P_H = P_T \cdot \cos \alpha = 1 \cdot \cos \alpha = \cos \alpha$$

水平分力によるねじりモーメント M_{t3} は,

$$M_{t3} = e \cdot \sin \varphi \cdot P_H = e \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \\ = e \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots (3)$$

以上の (1), (2), (3) 式は, (1) 式 = (2) 式 + (3) 式となり, プレストレスによるねじりモーメントは発生しない。

(b) 完成系 (不静定構造)

構造が完成した後に緊張する PC 鋼材のプレストレスによって発生するねじりモーメントを求めるには, 各部材にプレストレス力 P_T とプレストレス力による腹圧力 U_{HP} を載荷すれば良い。ただし, 腹圧力の算定はプレストレス力の変化・主桁の曲率の変化に影響され, 誤差が大きくなり実用的でない。そのため本設計では 図-5 に示すように直線桁でプレストレス力による不静定 2 次

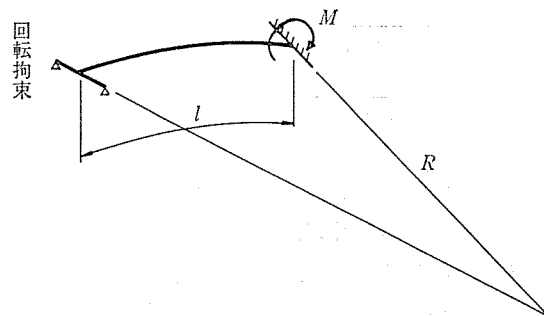
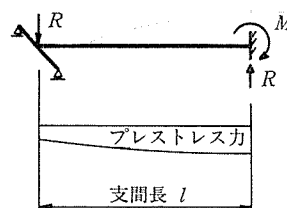


図-5 完成時プレストレスによるねじりモーメント

反力を求め, この不静定 2 次反力を曲線桁の支承の境界条件を満足するように載荷し再分配して求めた。つまり完成時には腹圧力によるねじりモーメントは無視し, PC ケーブルプレストレスによる曲げ変形拘束ねじりモーメントのみを考慮した。

(2) クリープ 2 次ねじりモーメント

曲線桁ではモーメントと同様にねじりモーメントにおいてもクリープ変形は生じる。このため構造系が変化してねじりクリープ変形が拘束された場合, ねじりクリープ 2 次モーメントが発生する。

しかしこの 2 次力を厳密な解析で求めてもオーダが小さいことから, この 2 次力は無視し, 曲げクリープ変形拘束力により発生するねじりモーメントのみを考慮した。このねじりモーメントは, 平面ラーメンによるクリープ 2 次の厳密な解析の結果を用い Dischinger の簡略式により計算した。以下にこの計算の手順を示す。

① 平面ラーメンにおけるクリープの厳密な解析結果から橋脚つけ根のクリープ 2 次反力を H_φ , V_φ , M_φ とする (図-6)。

② Dischinger の簡略式を用い, 平面ラーメンにおける厳密な解析結果の低減係数 η を逆算する。

$$\eta_H = \frac{H_\varphi}{H_0 - H_1}$$

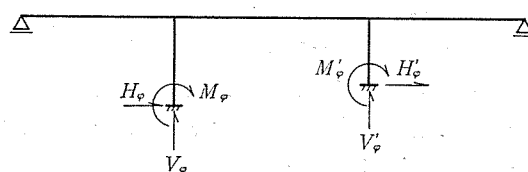


図-6

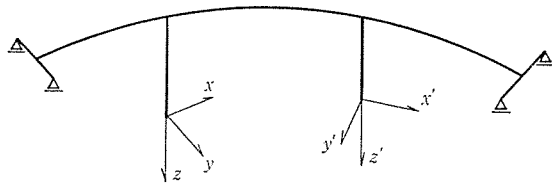


図-7 立体ラーメンの構造系

$$\eta_V = \frac{V_\phi}{V_0 - V_1}$$

$$\eta_H = \frac{M_\phi}{M_0 - M_1}$$

ここで、

η : クリープによる低減係数

R_ϕ : 厳密な解析によるクリープ2次反力

R_0 : 全支保工施工を考慮した場合の反力

R_1 : 分割施工を考慮した場合の反力

- ③ 立体ラーメンとしての構造系を図-7のように仮定し、各橋脚における局部座標を橋脚軸方向を z 軸、橋脚における接線方向を x 軸、法線方向を y 軸とする。

ここで平面ラーメンにおける反力 H は x 軸方向力、 M は y 軸回りの回転、 V は z 軸方向に対応する。

- ④ 立体ラーメンによりオールステージング施工の場合と施工段階を考慮した場合に発生するねじりモーメントを求める。
- ⑤ ②、③の結果から Dischinger の簡略式を用い、立体ラーメンの橋脚におけるクリープ2次反力を求める。

$$X_\phi = \eta_H \times (X_0 - X_1) : x \text{ 方向力}$$

$$Y_\phi = \eta_H \times (Y_0 - Y_1) : y \text{ 方向力}$$

$$Z_\phi = \eta_V \times (Z_0 - Z_1) : z \text{ 方向力}$$

$$M_{x\phi} = \eta_M \times (M_{x0} - M_{x1}) :$$

x 軸回りモーメント

$$M_{y\phi} = \eta_H \times (M_{y0} - M_{y1}) :$$

y 軸回りモーメント

- ⑥ こうして求めたクリープ2次反力を立体ラーメンの橋脚に作用させることにより面外反力およびねじりモーメントを算出する。このとき橋脚の拘束条件は、 z 軸回りの回転のみを拘束した。

4.4 プレストレス

(1) 本橋における PC ケーブル

FCC 工法の PC ケーブル配置は、片持ち張出し施工時に各ブロックごとに段階的に緊張してゆくカンチレバーケーブルと構造完成時に緊張するスパンケーブルから構成される。以下に各ケーブルの配置上の特徴について述べる。

① カンチレバーケーブル

張出し架設時では、橋脚柱頭部で負の曲げモーメントが最大となり、径間中央に近づくに従って減少してゆく。一方、構造完成後には径間中央に正の曲げモーメントが発生する。

カンチレバーケーブルは、この柱頭部の負の曲げモーメントに対して所要プレストレスを計算し本数を決定する。またカンチレバーケーブルには先端ブロックを一体化する働きもあり、1ブロック当たり最低4本以上のケーブルを緊張するものとした。

つまり、カンチレバーケーブルのプレストレスは、柱頭部で所要プレストレスを満足し、かつ張出し先端でブロック一体化に必要なプレストレスが導入されれば良く、緊張端で多大なプレストレスの導入は必要としない。むしろこのプレストレスは径間中央に近づくに従い、構造完成後に発生する正の曲げモーメント領域に対して不利に働くため、径間中央付近のカンチレバーケーブルによるプレストレスは少ないほうが良い。

以上の理由から本橋では、カンチレバーケーブルの緊張は、1回の張出し施工において片側からのみで行う交互片引き緊張とし、合理的なケーブル配置と施工効率の向上を図った。また、PC ケーブルでは緊張後のセットで鋼線応力が減少するが、これも前述した完成後の正の曲げモーメント領域に対して有利である。

図-8 にカンチレバーケーブルを両引き緊張した場合と、片引き緊張した場合に導入される鋼線応力を示す。この差分を設計時の曲げモーメントと対比すると図-9 のようになり、両引き緊張した場合、斜線で示した部分が設計時に不利となる。

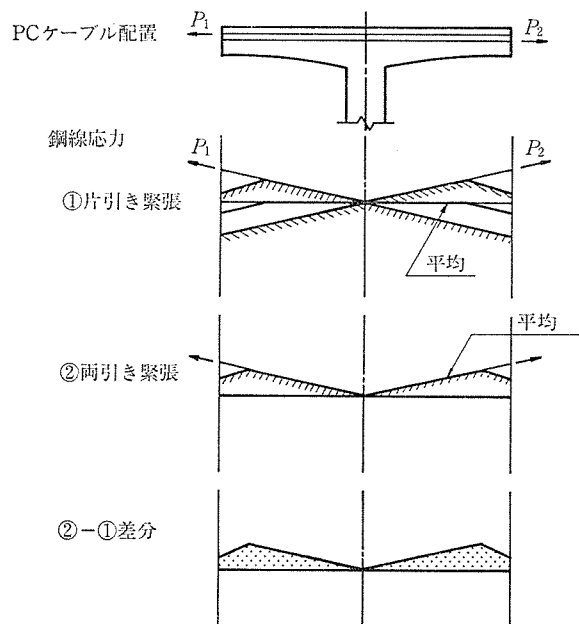
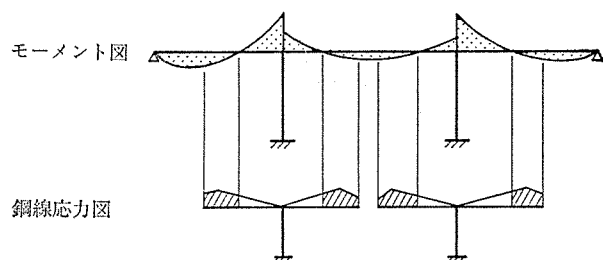


図-8 緊張方向による鋼線応力の比較



ハンチング部は不利な区間を示している。

図-9 曲げモーメントと鋼線応力の比較

② スパンケーブル

スパンケーブルは、構造完成以降に発生する正の曲げモーメントに対して配置するケーブルで、下床版に配置されるものとウェブに配置されるものがある。

下床版に配置したスパンケーブルの定着は、下床版に突起を設け箱桁内に定着するのが一般的である。

これに対しウェブに配置したスパンケーブルは、桁の上縁にまで曲げ上げ上床版に箱抜きを設けて定着する方法がよく採用されてきた。しかし、この定着方法の場合には、以下のような問題点が懸念された。

- ・上床版定着部に設けられる緊張ジャッキスペース用箱抜きは、断面欠損となるうえに、広い範囲で鉄筋を切断するため、鉄筋の有効な働きが妨げられる。また鉛直締め鋼棒や横締め鋼棒を配置する場合には、ピッチ等の制約を受ける。
- ・上床版まで曲げ上げるときに、カンチレバーケーブルや鉛直締め鋼棒と交差するため鋼材配置が困難となるうえ、シースのあきが少なくなるので、コンクリート打設時に締固めが不確実になり易い。
- ・上床版の箱抜きから雨水や異物の侵入が考えられ、構造物の耐久性の低下を招く。

そこで本橋では、図-10 に示すようにスパンケーブルを曲げ上げないでストレートに伸ばし、そのまま箱桁内部に定着する方法を提案し設計を行った。その結果、設計的には、箱抜きによる断面欠損・鋼材の切断などの構造上の欠陥を無くすることができ、桁の構造機能を向上させることができた。また施工性の改善により、密実で高品質なコンクリートの施工ができ、耐久性を向上させることができた。

このスパンケーブルのストレートに定着する方法は国内では実施例がまだ少ないが、海外ではこの方法はすでに施工されており、最近では最大規模の径間（260 m）を有するオーストラリアの Gateway Bridge でこれに類似した方法が採用されている。

このスパンケーブルのストレート定着の採用に当たっては、カンチレバーケーブルとスパンケーブルの定着位

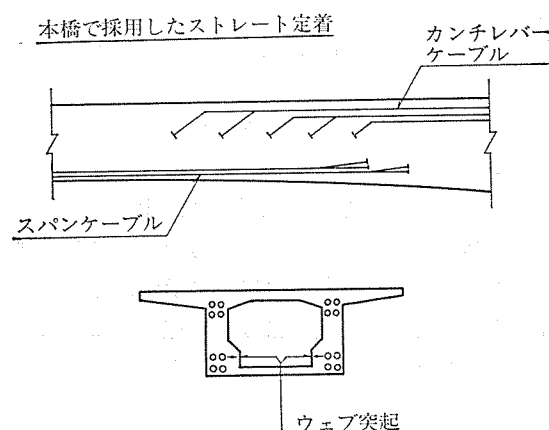
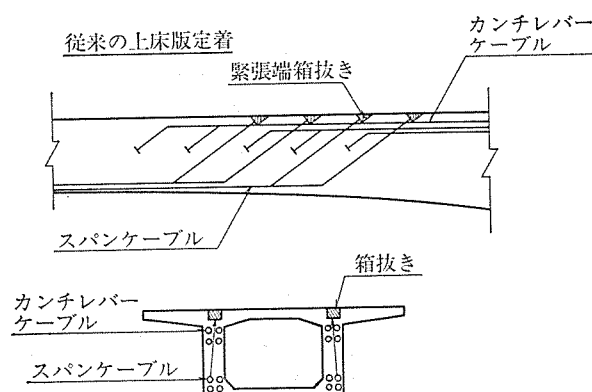


図-10 スパンケーブルのストレート定着

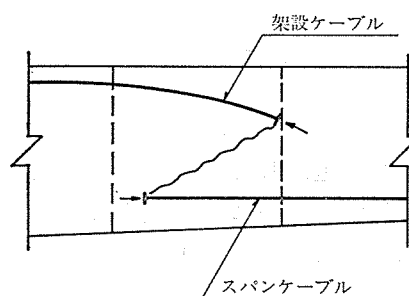


図-11 PC ケーブル間の偶力により作用するせん断力

置が離れていることから、図-11 に示すように PC ケーブル間の偶力によりせん断力が働く。そこで以下の式を用い、せん断応力度の増分を考慮した斜引張応力度の検討を行った。

$$\sigma_I = \frac{1}{2} \times (\sigma_x - \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau^2 + 4\sigma_x\tau})$$

◇工事報告◇

ここに、

σ_I : 主桁に作用している斜引張応力度

σ_x : " 垂直応力度

τ : " せん断応力度

$d\tau$: 偶力によるせん断応力度の増分

その結果、本橋においては発生する斜引張応力度は許容値を満足しており問題の無いことを確認した。

今後橋梁の長大化が進み、桁高や導入力の増大が見込まれ、さらに大きな偶力によるせん断力が作用することが予想される。このような橋梁を設計する場合において、カンチレバーケーブルとスパンケーブルのラップ区間に発生する応力の解析に当たっては、平面保持の仮定が適用できないので、ウェブをシャイベの力学モデルに置換し、光弾性試験や FEM による解析を行う方法もある。

(2) 曲線桁におけるプレストレスの留意点

① プレストレスの摩擦係数

曲線桁の場合、橋軸方向に配置された PC ケーブルのプレストレスは、桁の平面線形にともなう曲率から摩擦損失が生じる。そこで本橋では以下に示す式を用い、この曲率による摩擦を単位長さ当りの摩擦係数に換算し、直線桁の λ に加えてプレストレスを計算した (参考文献³⁾)。

$$\begin{aligned}\lambda^* &= \lambda + \mu \times \frac{1}{R} \\ &= 0.004 + 0.3 \times \frac{1}{300} = 0.005\end{aligned}$$

ここに、 λ^* : 曲線桁における摩擦係数

λ : 直線桁 " "

② 水平腹圧力に対するウェブの検討

曲線桁の場合、図-12 に示すように桁の平面曲線に起因してプレストレス力による水平腹圧力 (q_{HP}) が PC 鋼材配置位置に作用する。この水平腹圧力は、コンクリート全断面に作用する軸圧縮応力度 (σ_x) の曲線中心方向成分 (q_{HC}) と釣り合っている。しかし q_{HP} が集中荷重であるのに対し、 q_{HC} はウェブ全高に作用する分布荷重であるので、ウェブには横方向曲げモーメントが生じる (参考文献⁴⁾)。最近海外工事でも、この PC ケーブルによる腹圧力によって発生したパンチングの事故例が報告されている。そこで本橋ではこのパンチングおよび横方向の曲げモーメントに対し検討を行った。その結果、現在配置しているスターラップで満足していることを確認した (図-12, 13)。

また曲線桁では、桁の平面曲線とプレストレス力の圧力線の相違が大きいと桁の面外方向に曲げが生ずるので、橋軸方向の PC ケーブルは、桁の平面曲線とプレストレス力の圧力線が一致するように配置し、ウェブコン

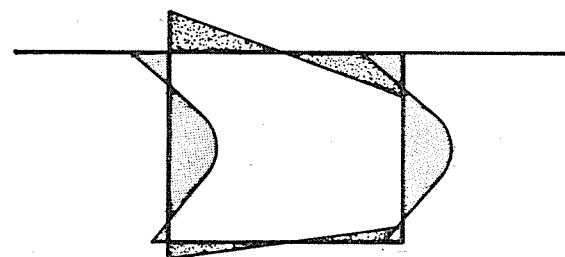
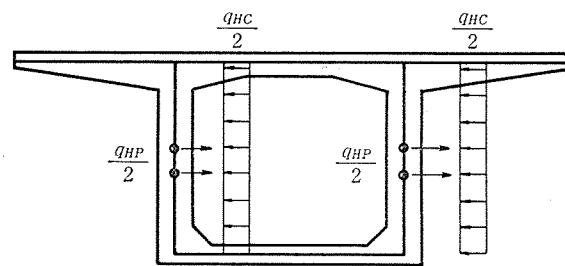
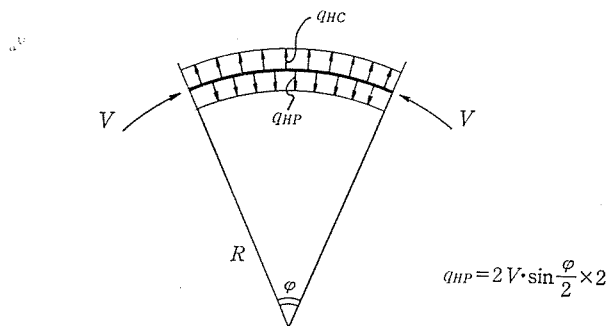


図-12 桁の平面線形に起因して発生する横方向曲げモーメント

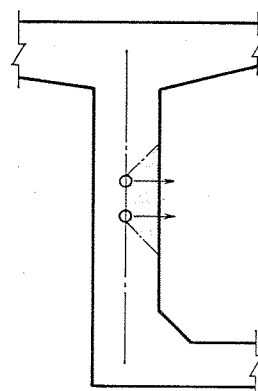


図-13 ウェブに発生するパンチング

クリートの剝離やウェブの面外座屈等が生じないようにした。この点で可撓性の優れている PC ケーブルを曲線桁の橋軸方向 PC 鋼材として用いることは一般的に有利と言われている。

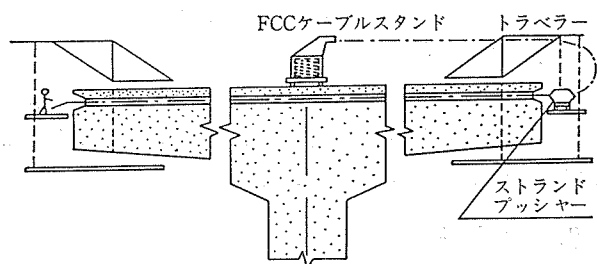


図-14 FCC 工法ケーブル挿入システム

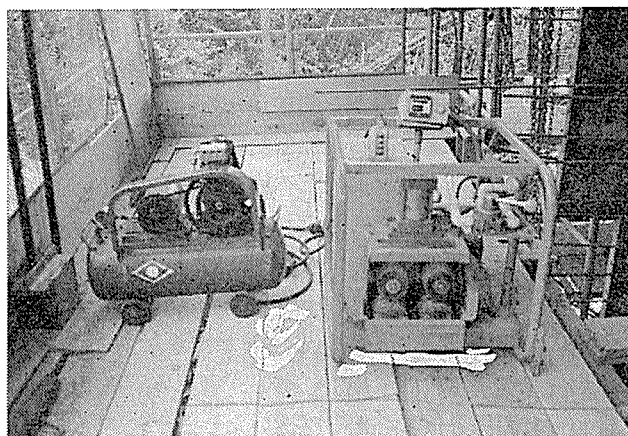


写真-4 プッシュスルーマシン

5. 施 工

施工一般については既に他誌に述べているので、ここでは曲線桁の張出し施工について特筆する。

5.1 曲線桁における PC 鋼材の選定

曲線桁の場合、張出し施工のブロック長は、外側と内側では長さが異なり、PC 鋼材の長さも各ケーブルごとに異なる。つまり曲線桁では PC 鋼材の長さの管理、材料管理が複雑である。

したがって曲線桁の張出し施工に使用する PC 鋼材としては、自由に現場で加工ができ長さ管理の容易な PC ケーブルを選択した。

5.2 PC ケーブル挿入システム

PC ケーブルの挿入は、コイルからストランドを引き出し、直接シース内に挿入する連続システムを採用し、システムの装置としてはプッシュスルーマシンと FCC スタンドを用いた(図-14)(写真-4, 5)。

FCC 工法の PC ケーブル挿入システムには、以下のような特徴がある。

- ① ストランドはコイルの形状で FCC スタンドに格納されており、防錆保護されている。
- ② プッシュスルーマシンはピンチローラーによる駆動方式で 0~1.5 m/s の速度でストランドを挿入でき、挿入長さがデジタル表示され自動停止できるシステムになっている。

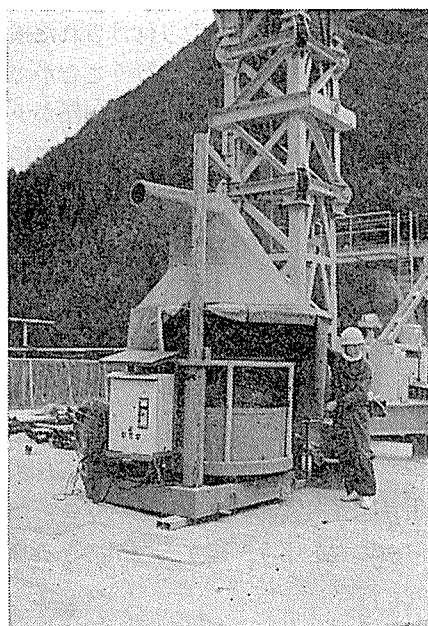


写真-5 FCC スタンド

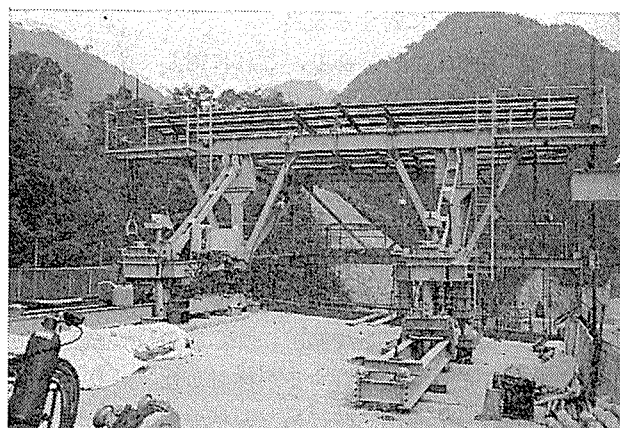


写真-6 トラベラー (200 tm)

- ③ FCC ケーブルスタンドのコイルをのせるテーブルには旋回機能が装備されており、挿入時にストランドに発生するヨリを除去することができるようになっている。これにより挿入がよりスムーズとなり、挿入可能な PC ケーブル長も長くなった。

本橋の実績では、以上の装置を用いて最大長さ 106 m の PC ケーブル (φ 12.4 mm 12本) を挿入した。

5.3 トラベラー (移動式作業台車)

曲線桁では主桁にカントがつけられており、本橋においても最大 9% の横断勾配がある。またトラベラーの移動に当たっては、曲線桁の平面線形に沿って方向を修正していく必要がある。このためトラベラーにいくつかの改良を加えた(写真-6)。

(1) 移動方向に対する改良

トラベラーの移動に際して行う移動方向の修正は、レールを移動してセットするときに、レールの先端を平面線形に沿ってシフト(本橋梁における最大シフト量は約

◇工事報告◇

7 cm) し、トラベラー本体に取り付けられた横方向ガイドにより移動方向の制御を容易に行うことができた。

計画の段階では、移動方向の修正に困難が予想されたため、トラベラーの後部には、ハンドリングにより強制的にシフトできる装置を装備したが、この装置を利用するにはおよばなかった。

(2) 横断勾配に対する改良

本橋の横断勾配は最大9%と急勾配であるため、左右のトラベラー主構の高低差が約50 cmもあるので、トラベラー主構下に調整台を取り付けることで対処した。また横断勾配が4~9%まで変化しているので、調整台をブロック化して各勾配に準じて取り替えられるようにした。またトラベラー後部のフックローラーについてもテンションバーに穴を開け、適宜調整ができるようにした。

トラベラーレールのセットは、キャンバー(楔状の枕木)によるレベル調整を行った。

(3) 縦断勾配に対する改良

本橋は縦断勾配も4%あり、これに対してもトラベラー後部のフックローラーで ± 21 cmの調整ができるようにした。またトラベラー移動時の逸走を防止するための安全装置も装備した。

5.4 曲線桁のたわみ管理

本橋は、平面曲線を有する桁を張出し架設するため、張出し施工中に主桁自重およびトラベラー重量によりねじり変形が生じる。そこで施工に際しこのねじり変形が上げ越し量にどの程度影響するか検討した。計算を簡単にするため、最大張出し時の桁を一括で施工した場合を仮定しねじり角を求めた。

その結果、平面曲線 $R=300$ m で、最大張出し長さが約 47.5 m に対し上床版張出し先端でのねじりによる最

大変位は、約 ± 1.0 mm 程度であり、この値は張出し施工時には無視できると判断された。

また、一般にねじりクリープ変形は曲げクリープ変形に比べ非常に小さいことが知られており、上越し管理としては、ねじり変形を無視し、通常の管理を行った。

6. おわりに

以上、曲線桁を FCC で片持ち張出し施工する場合における設計・施工の特徴的事項について述べたが、クリープによるねじりモーメント2次力等の解析手法にまだまだ開発の余地は残っているものと考えられる。

最近の動向として景観を配慮した設計や地形の急峻な場所での施工など、制約条件を受けるケースが多く見られ、今後本橋のような曲線桁の施工は頻繁に行われるようになってくるものと考えられる。このような曲線桁の設計・施工に本稿が参考になれば幸いと思われる。

本橋の上部工工事は昭和 61 年 3 月より着手し、昭和 63 年 3 月に無事竣工を迎えることができた。

最後に本橋の設計・施工に際し、御指導、御援助をたまわった関係各位に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 明石行雄, 原田初男: 沢水第二橋の設計・施工, 橋梁, Vol. 24, No. 2, 1988
- 2) 佐藤素啓, 渡辺 実, 佐藤 昇: 変位法によるコンクリート構造物のクリープ・乾燥収縮解析の基礎理論, プレストレストコンクリート, Vol. 22, No. 2, 1980
- 3) 日本道路協会: コンクリート道路橋設計便覧
- 4) F. レオンハルト著, 横道英雄, 成井 信, 上坂康雄訳: コンクリート橋, 鹿島出版会
- 5) 神鋼鋼線工業(株)資料: FAB 工法設計施工指針(案)
- 6) VSL: news letter, August, 1985

[1988 年 2 月 13 日受付]

◀刊行物案内▶

日本原子力発電敦賀 2 号機 PCCV

本書は、プレストレストコンクリート第 28 巻の特別号として発刊されたもので、我が国で初めて採用されたプレストレストコンクリート製原子炉格納容器(日本原子力発電(株)敦賀発電所 2 号機)に関して、その各種模型実験、設計・施工に至る各分野にわたり詳述した貴重な資料です。今後ますます多く採用されるであろう、この種 PCCV を取り扱う関係者にとって、必携の図書と確信します。

在庫限定につき、ご希望の方は代金を添え(現金書留かまたは郵便振替東京 7-62774)プレストレストコンクリート技術協会宛お申し込みください。

体 裁: B 5 判 128 頁

頒布価格: 3 000 円(送料: 150 円)