

PRC 橋 脚 の 設 計 と 施 工

和 田 克 哉*
山 口 修 一**

1. ま え が き

高速葛飾川口線は、東京都葛飾区小菅三丁目まで高速6号線（2期）から分岐し、埼玉県川口市大字西新井宿にて、東北縦貫自動車道および東京外郭環状道路に接続する延長18.5 kmの路線である。高速道路は図-1の断面図に示すとおり、東京都内では東京都市計画道路補助

113号線、埼玉県内では川口市計画道路岩槻東京線が、高架橋下に街路整備事業として同時に計画されているため、橋脚位置が制限されるとともに、梁下空間もまた所定の建築限界を確保した構造形状が求められる。

葛飾川口線のうち足立区加賀皿沼町付近は、センターランプに近接しているため、高速道路本線が左右に分離しており、中央分離帯部の橋脚からの梁は、高速道路を

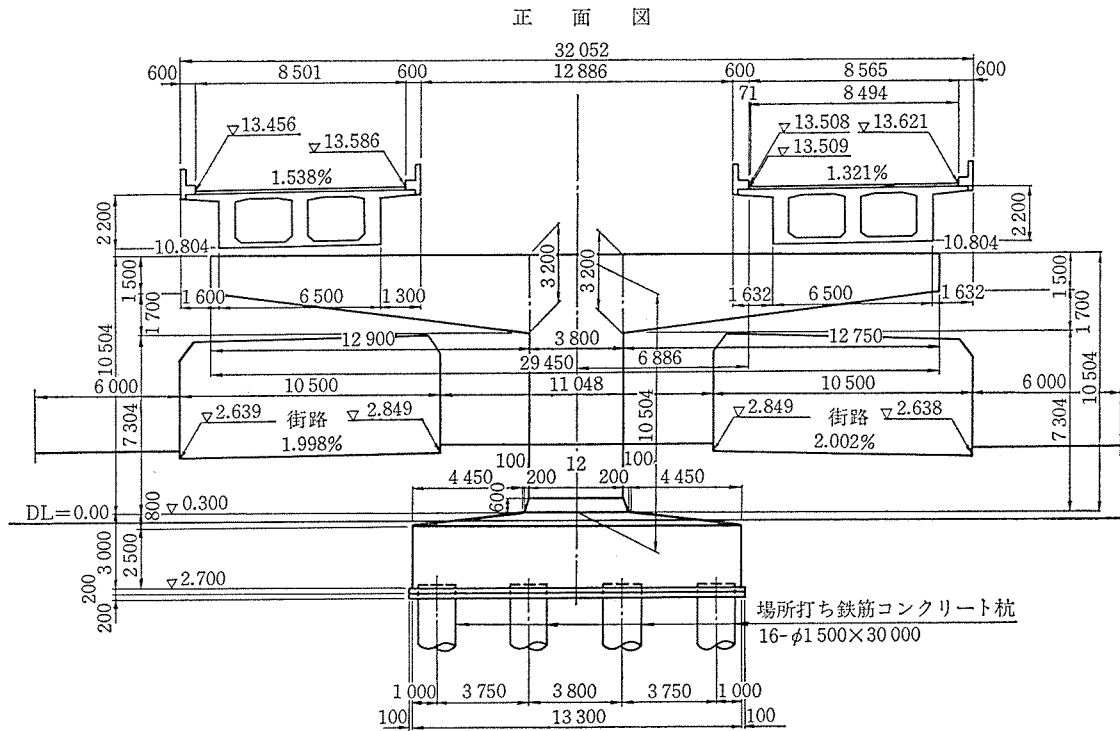
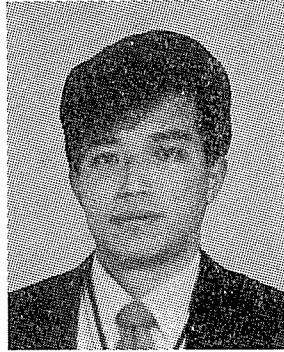


図-1 (a) 橋脚一般形状図 (正面図)



* Katsuya WADA
首都高速道路公団工務部
設計技術課課長補佐



** Syuichi YAMAGUCHI
首都高速道路公団第2建設部設計課技師

支えるため 13 m 近くの張出しを有し、かつ街路建築限界からの余裕も少ないため、梁高さも制限され鉄筋コンクリート構造では設計不可能となった。

これらから数種の試算をもとに、経済性・施工性、などを検討し、PRC 構造を採用した。PRC 部材の設計に関する規定は未だ明確にされていないため、基本的には、鉄筋コンクリート部材にプレストレスによる外力が作用している部材として解析したが、これら解析法構造断面を定めるにあたり検討した内容とその設計法の概要、更には施工法についてふれてゆきたい。

以下ここでとりあげた PRC 部材とは、図-2 に示す 3 径間連続 PC 箱桁の 2 番目 (※印) に位置する橋脚で

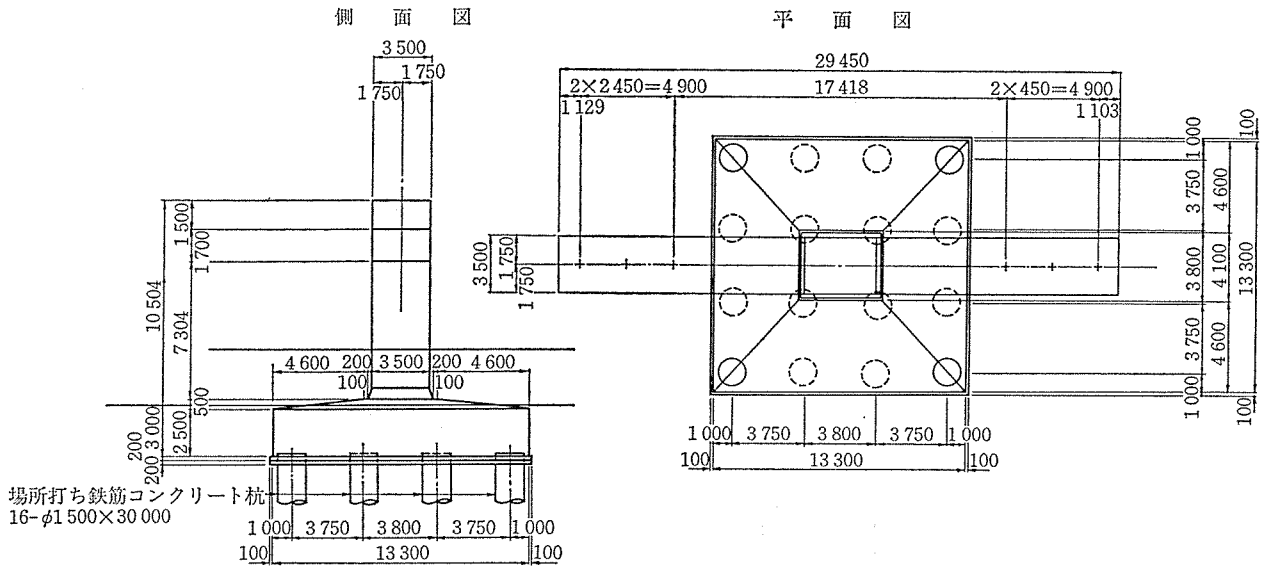


図-1(b) 橋脚一般形状図(平面図, 側面図)

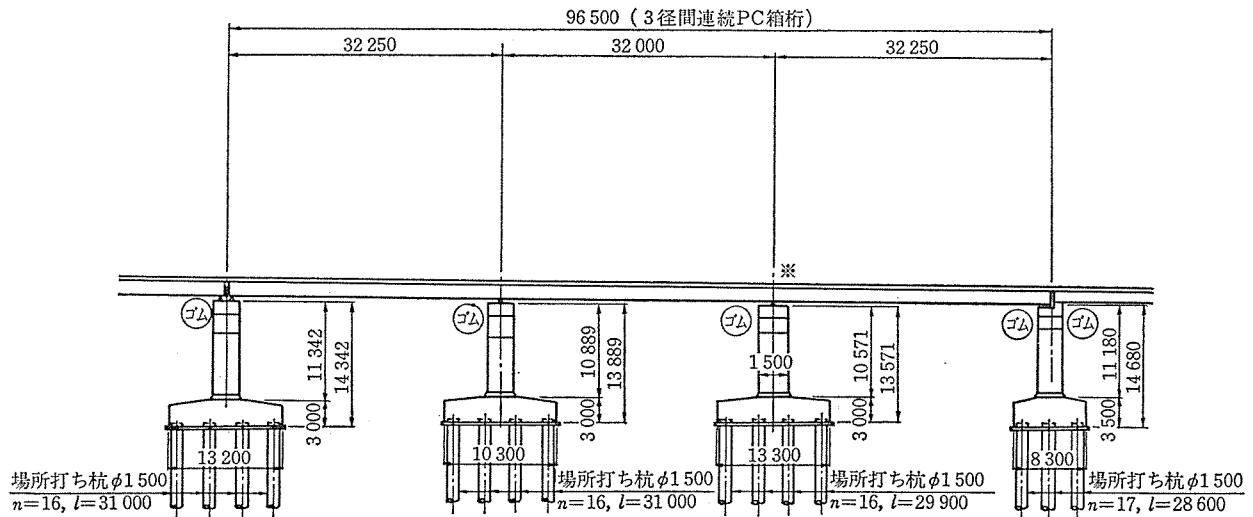


図-2 3径間連続PC箱桁

ある。

2. PRC 部材と PC 部材の比較

詳細設計を行うに際し、PRC 部材と PC 部材について、特に問題となる橋脚梁部材の比較検討を行った。

比較した上部構造の-span 割は、図-2 のとおりであり、幅員は上り車線のみ約 10 m とした。

2.1 荷 重

- ① 上部工死荷重 (地震, 高欄, 舗装, 防音壁, 付加荷重) $R_d=667 \text{ t}$
- ② 活荷重 $R_l=159 \text{ t}$
 $i=0.179$
- ③ 地震時水平荷重
 - a. 橋軸方向 $W=1860 \text{ t}$ (固定脚のため, 3径間分の荷重が含まれる)
 - b. 橋軸直角方向 $H_d=174 \text{ t}$

2.2 PRC 部材の断面計算

PRC 部材は、プレストレスによる外力が作用する部材として考え、プレストレス (P) による曲げモーメントは、荷重による曲げモーメント (M) を減ずる方向へ作用が反対方向の曲げモーメント (M_P) として作用させる。断面の応力度計算は、曲げモーメント ($M-M_P$) と軸力 (P) を外力として与え、RC 断面として計算する。

PRC 構造として、図-3 の断面を仮定した。

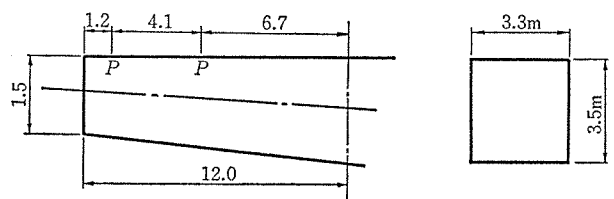


図-3 梁の断面

報 告

PC ケーブルは定着端が狭く、その本数が制限されることから、できるだけ鉄筋で抵抗させ不足分を PC 鋼材で補う。したがって鉄筋 D51 を 2 段で 150 mm 間隔で配置すると、PC ケーブル 12T12.4 が 26 本必要となり、この場合の断面力は以下のとおりである。

$$P_t = 115 \text{ t}, \eta = 0.87, P_e = 100 \text{ t}$$

- ① 上部工による断面力 (梁つけ根)

$$S = 667 \text{ t} + 186 \text{ t} = 853 \text{ t}$$

$$M = 426.5 \times (6.7 + 10.8) = 7644 \text{ t}\cdot\text{m}$$

- ② 梁自重による断面力

$$S_d = 247.5 \text{ t}$$

$$M_d = 1287 \text{ t}\cdot\text{m}$$

- ③ プレストレス力による

断面力 12T12.4, ctc

30 cm, 26 本として,

$$P_e = 26 \times 100 \text{ t/本}$$

$$= 2600 \text{ t}$$

$$M_{P_e} = 2600 \times 1.20$$

$$= 3120 \text{ t}\cdot\text{m} \text{ (図-4)}$$

- ④ 断面力の集計

$$S = 853 + 225 = 1078 \text{ t}$$

$$M = 7464 + 1287 - 3120 = 5631 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$N = 2600 \text{ t}$$

以上の断面力に対し、PC 鋼材を無視して RC 断面として検討した結果、引張側に D 51 を 2 段で 44 本 (22×2)、圧縮側に D 51 を 22 本配置すれば許容応力度内に収まる (図-5)。

2.3 PC 部材の断面計算

梁断面を図-6 に仮定し、12 T 12.4 を 57 本配置する。

- ① 荷重による応力度

上部工死荷重 $M = 5837, \sigma' = -95.3, \sigma = 95.3$

梁自重 $M = 1170, \sigma' = -19.1, \sigma = 19.1$

活荷重 $M = 1628, \sigma' = -26.6, \sigma = 26.6$

死荷重合計 $M = 7007, \sigma' = -114.4, \sigma = 114.4$

総合計 $M = 8635, \sigma' = -141.0, \sigma = 141$

- ② プレストレス力

$$\sum P_e = 57 \times 100 = 5700 \text{ t}$$

$$M_{P_e} = 5700 \times 0.86 = 4902 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\sigma_{c,i}' = \frac{570}{10.5} \pm \frac{490.2}{6.125} = 54.29 \pm 80.03$$

$$= \begin{cases} 134.3 \text{ kg/cm}^2 \\ -25.7 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

- ③ コンクリートの応力度

- a. プレストレス導入直後

$$\sigma_c' = -19.1 + (134.3 \times 1.2) = 142.1 < 150$$

$$(\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2)$$

$$\sigma_c = 19.1 - (25.7 \times 1.2) = -11.7 < -12$$

- b. 死荷重作用時

$$\sigma_c' = -114 + 134.3 = 19.9 > 0$$

$$\sigma_c = 114.4 - 25.7 = 88.7 < 120$$

- c. 設計荷重時

$$\sigma_c' = -141 + 134.3 = -6.7 > -12$$

$$\sigma_c = 141 - 25.3 = 115 < 120$$

- d. 終局荷重時

$$M_{ud} = 1.3 \times 7007 + 25 \times 1628 = 13179.1 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M = 0.9 \times A_p \times 0.84 \times \sigma_{pu} \times d$$

$$= 0.9 \times 195.6 \times 0.84 \times 2.61 \times 57 \text{ 本}$$

$$= 21999 \text{ t} > M_{ud}$$

$$(A_p \sigma_{pu} = 195.6 \text{ t}, d = 1.75 + 0.86 = 2.61 \text{ m})$$

$$F = \frac{21999}{13179} = 1.67 \text{ OK}$$

PC 部材の場合はストランドが 57 本必要となり (PRC 部材では 26 本)、経済性から PRC 部材が有利である

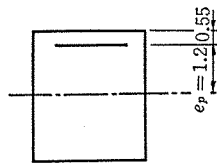


図-4 PRC 部材の偏心距離

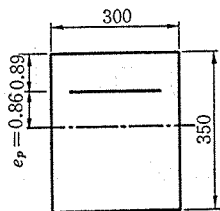
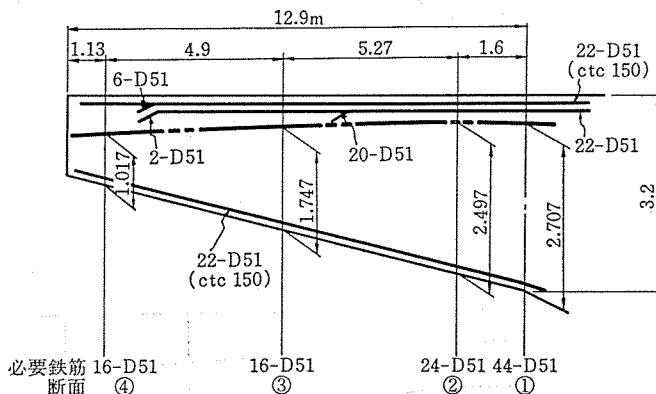


図-6 PC 部材の偏心距離



(a) 側断面

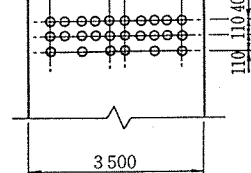
PCストランド12T12.4mm

$$A_{p, P} = 289.85 \text{ (26本)}$$

ケーブル配置

$$395 \text{ 4} \times 300 \text{ 310 4} \times 300 \text{ 395}$$

$$= 1200 \quad = 1200$$



(b) 横断面

図-5 PRC 部材の鋼材配置

と判定した。

3. PRC 部材の計算

3.1 計算ケース

PRC 部材の断面応力計算は、PC 鋼材を鉄筋と同様にみなし荷重に抵抗するとした場合、PC 鋼材は荷重に抵抗しないとした場合、の2種類の計算を行った。

なお、 n (鉄筋とコンクリートのヤング係数比) は、RC 部材とみなし、 $n=15$ を用いる。

また、死荷重作用時のひび割れ発生を防ぐため、鉄筋の許容引張応力度を 1000 kg/cm^2 程度におさえ、次の6種類について計算した。

- ① 設計荷重作用時 (地震時)
 - a. コンクリート引張側無視, PC 鋼材有効
 - b. " , PC 鋼材無視

許容応力度は道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編による。
- ② 死荷重作用時
 - c. コンクリート引張側無視, PC 鋼材有効
 - d. " , PC 鋼材無視

許容応力度は引張鉄筋 1000 kg/cm^2 程度。
- ③ プレストレッシング直後
 - f. 全断面有効, PC 鋼材無視

許容応力度は引張縁コンクリート 13.5 kg/cm^2 。

なお梁・柱部材については、道路橋示方書にしたがい破壊抵抗曲げモーメントの計算を行い、破壊安全率を1.0以上となるように設計した。

3.2 設計条件

- ① 構造形式

T形橋脚 (PRC 梁)

基礎杭

鉄筋コンクリート場所打ち杭 $\phi 1500$
- ② 材料強度および許容応力度
 - a. コンクリート (表-1)

表-1 コンクリートの許容応力度

部 材	橋脚躯体	フーチング	基礎杭
設計基準強度	σ_{ck} 350 kg/cm^2	210 kg/cm^2	>300 kg/cm^2
許容曲げ圧縮応力度	σ_{ca} 116.7 "	70 "	80
許容せん断応力度	τ_a 5.0 "	65 "	7
平均せん断応力度	$\tau_{a'}$ 46.5 "	28 "	—
(終局荷重作用時) 許容付着応力度	τ_{oa} 19 "	14 "	12

b. 鉄筋 (表-2)

なお死荷重作用時の鉄筋の応力度は、 1000 kg/cm^2 程度にする。

表-2 鉄筋の許容応力度

応力度部材の種類	鉄筋の種類			
	SD 30	SD 35		
引張応力度	荷重の組合せに衝突荷重あるいは地震の影響を含まない場合	一般の部材	1800 kg/cm^2	1800 kg/cm^2
		水中あるいは地下水位以下に設ける部材	1600 "	1600 "
力度	荷重の組合せに衝突荷重あるいは地震の影響を含む場合の許容応力度の基本値	1800 "	2000 "	
圧縮応力度		1800 "	2000 "	

- ③ コンクリートの弾性係数

橋脚躯体 $\sigma_{ck}=350 \text{ kg/cm}^2$ $E_c=3.25 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

フーチング " =210 " " = 2.6×10^5 "

基礎杭 " =240 " " = 2.7×10^5 "
- ④ 設計震度

地盤種別4種

橋脚……橋脚高 $h \leq 15 \text{ m}$ $K_H=0.26$

フーチング $K_H=0.13$

流動化に対して注意を要する地盤内
- ⑤ 単位体積重量

鉄筋コンクリート

$\tau_c=2.5 \text{ t/m}^3$ (大気中), $\tau_c=1.5 \text{ t/m}^3$ (水中)

土 $\tau_g=1.8 \text{ t/m}^3$ (大気中), $\tau_g=0.8 \text{ t/m}^3$ (水中)
- ⑥ 許容応力度の割増し係数

荷重の組合せ……割増し係数

 - a. 主荷重 (P)+温度変化の影響 (T)……1.15
 - b. 主荷重 (P)+風荷重 (W)……1.25
 - c. 主荷重 (P)+衝突荷重 (CO)……1.50
 - d. 活荷重および衝撃以外の主荷重+地震の影響 (EQ)……1.50
 - e. 活荷重および衝撃以外の主荷重+温度変化の影響 (T)……1.65
 - f. 架設時荷重 (ER)……1.25
- ⑦ 終局荷重作用時の荷重の組合せ
 - a. $1.3 \times (\text{死荷重}) + 2.5 \times (\text{活荷重} + \text{衝撃})$
 - b. $1.0 \times (\quad) + 2.5 \times (\quad)$
 - c. $1.7 \times (\text{死荷重} + \text{活荷重} + \text{衝撃})$
 - d. $1.3 \times (\text{死荷重} + \text{地震の影響})$
 - e. $1.0 \times (\text{死荷重}) + 1.3 \times (\text{地震の影響})$
- ⑧ フーチングの根入れ

街路計画高より $H_0=2.5 \text{ m}$ 程度とする。
- ⑨ 基礎杭の支持力

基本的には、「道路橋下部構造設計指針・同解説 くい基礎の設計編」(昭和51年8月、日本道路協会)による。
- ⑩ 横方向地盤反力係数

$K=1.0 \text{ kg/cm}^3$

報 告

⑪ 杭頭における許容水平変位量

$$\delta = 5 \text{ mm}$$

ただし変位法によって計算を行った場合には、 $\delta \leq 10 \text{ mm}$ までよいこととする。

3.3 計算結果

計算にあたっては、柱、梁とも電算を用いた。応力度の照査は、設計方針で述べたように、設計荷重作用時、死荷重作用時、プレストレッシング直後の3つのケースで照査した。表-3 は梁のつけ根の応力を示す。

表-3 梁の計算結果

計 算 ケ ー ス	コンクリート 圧縮応力度 (kg/cm ²)	鉄筋応力度 (kg/cm ²)	破壊安全率	
設計 作用 荷重時	① コンクリート引張 無視, PC 鋼材有効	109.5 < 116.7	1 329.1 < 1 800	1.289 ≥ 1.0
	② コンクリート引張 無視, PC 鋼材無効	112.5 < 116.7	1 538.2 < 1 800	
死 荷 重 作 用 時	③ コンクリート引張 無視, PC 鋼材有効	84.3 < 116.7	770.2 < 1 000	
	④ コンクリート引張 無視, PC 鋼材無効	85.9 < 116.7	871.5 < 1 000	
	⑤ 全断面有効, PC 鋼材無視	77.9 < 116.7 -33.6 > -35.0 (引張縁)		
プレ ス ト レ ス 直 後 レ ッ ク	⑥ 全断面有効, PC 鋼材無視	2.6 ≥ -13.5 43.1 > -35.0		

柱については、一般の RC 橋脚と同じであるので、柱下端についての値を示す。

地震時

$$\text{圧 縮 縁 } 105.0 < 175 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{引 張 鉄 筋 } -2 630.9 > -3 000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{破壊安全率 } 1.019 > 1.0$$

3.4 配筋細目

(1) 鉄筋の定着

① 梁

梁の主鉄筋は、梁付け根で必要とする鉄筋の 1/3 は途中で定着せず、梁先端まで延長し、残りの鉄筋を 2 段に分けて定着した。

鉄筋の定着は鉄筋が不要となった断面から、その断面の有効高さだけ延長し、更に 20φ 折り曲げて定着した。

② 柱

柱の主鉄筋は、柱下端で必要とする鉄筋の 1/2 は途中で定着せずに上まで延長し、残りの鉄筋を 2 段階に分けて定着した。

鉄筋の定着は次の 2 通りの方法で定着長を計算し、長い方の定着長で定着した。

- 1) 鉄筋が不要となった断面（設計断面）から有効高さだけ延長し、更に 20φ 折り曲げて定着する。

- 2) 定着する鉄筋を除いた残りの鉄筋の応力度が設計断面における鉄筋応力度の 1/2 になる位置まで鉄筋を延長する。

上記 1), 2) について試算し、長い方の定着長 1) により定着した。また、この橋脚では梁高が低く、プレストレスによるコンクリートの圧縮応力度が大きいため、圧縮鉄筋を主鉄筋の 1/2 配置した。

4. 施 工

本工事の施工順序は 図-7 に示した。工事は基礎杭工、山留め工、フーチング工を経て PRC 橋脚工へ進むが、ここでは、PRC 橋脚施工にともなう施工上の留意事項を主に記述させていただき、その他の工事については省略した。

4.1 コンクリート工

鉄筋は、配筋検査をコンクリート打設ごとに行い、また放置しておくとしびを生ずる恐れがあり、支保工組立て時（柱部施工時、梁部施工時両方とも）には十分注意した。

コンクリートの型枠については、フーチング部、柱部にメタルフォームを用い、梁部については、木製型枠を併用した。またフーチングと柱の取付け部のズレを防ぐため、アンカーとしてフーチング打設時に鉄筋等を埋め込み、キャンパー、チェーン、ターンパクル等にて調整を行った。柱型枠の高さは、鉄筋の継手（圧接）等を考え、なるべく等間隔に継ぎ目を設けた。なお柱の転倒防止にあたっては、アンカー杭を設けワイヤーロープチェーンによって固定した。

コンクリート打設は 3 回に分けて行い、打継目は、梁部より 50 cm 以下に設けた。コンクリート打設の 1 回目と 2 回目は、レッカー車を用いて行い（図-8）、梁部については、コンクリートポンプ車で打設した。打設速度は 1 時間 3 m³ とし、締固めは、棒状のバイブレーターを用いて、十分に締め固めた。なお柱部のコンクリート打込みにあたっての一層当りの打込み高さは、30 cm ~ 20 cm を原則とした。

4.2 PC 工

シースおよび PC 鋼線は、鉄筋の組立てと並行しながら所定の位置に配置した。PC 鋼線の固定方法は、スターラップに鉄筋（棚筋）を溶接し、コンクリート打設時に移動しないように棚筋とシースを結束線で結束した。PC ケーブルの配置には、スターラップを用いるために、結束線のほか、要所を数か所溶接してスターラップが傾かないようにした。シースを所定の位置に固定した後、シースを痛めぬように PC 鋼線を入れて行い、PC ケーブル配置後の溶接は禁じた。これら PC 鋼線は、図

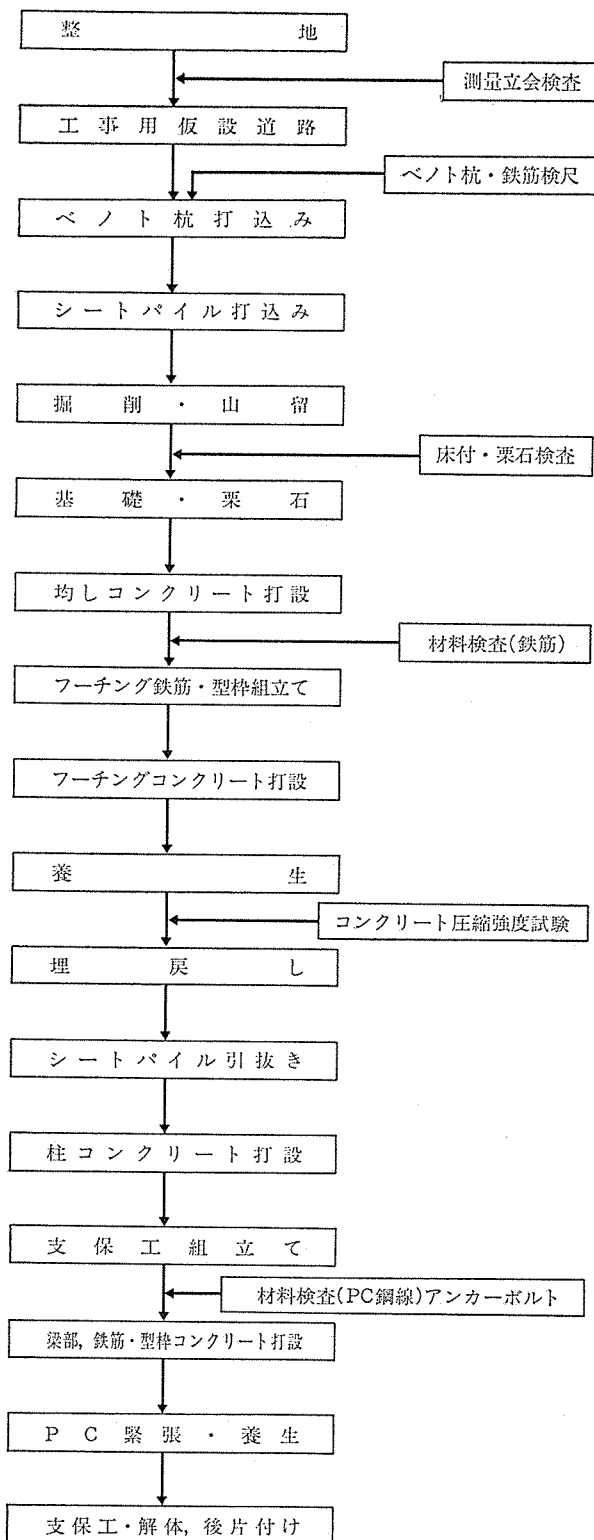


図-7 施工順序フローチャート

—9 に示すように定着した。

4.3 緊張工

(1) ジャッキ

PC 鋼線の緊張に先立って緊張計画書を作成し、プレストレスリングはコンクリートの圧縮強度が $\sigma_{ck}=0.85 \times \sigma_{28}$ に至った時に行った。緊張に用いたジャッキの仕

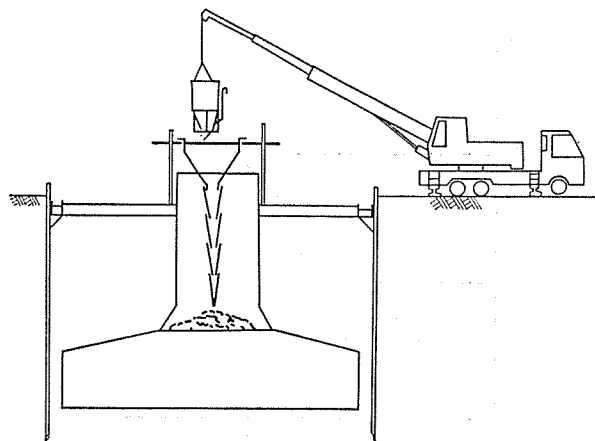


図-8 柱部コンクリート打設

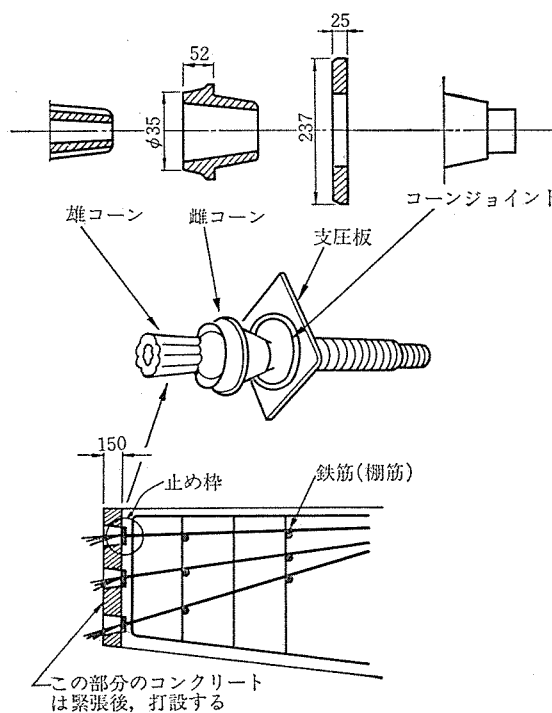


図-9 PC 鋼線の定着

様は表-4 である。

表-4 ジャッキの仕様

(2) 緊張管理

従来は、試験緊張を行い、数ケーブルの平均値の μ, λ を計算し、その値を用いて、各ケーブルの伸びおよび緊張力を計算し、その値を基準として管理していたが、摩擦係数そのものが平均値しか得られず、条件が異なった場合は、摩擦試験を行わなければならないため、次の方法を用いて管理した。

摩擦係数 μ, λ を別々に分けることは、応力計算に便利であるが、本来は、同じ性質をもったものであるた

型 式	S6 型
最大ストローク	300 mm
最大使用圧力	600 kg/cm ²
最大緊張力	182.2 t
圧入ピストン受圧面積	63.5 cm ²
引張ピストン	303.6 cm ²
重 量	135 kg

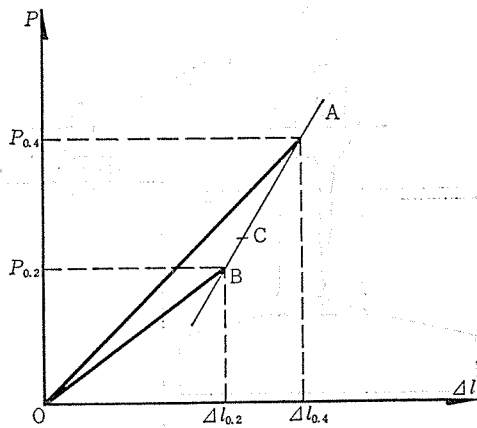


図-10 引止め線

め、分離して考えることに無理がある。 μ は角度1ラジアン当りの摩擦係数であり、 λ は長さ1m当りの微妙な角変化(シーズの波うち)をある特定の値(ラジアン)に表現するもので、同じ角変化の係数と考えてよい。したがって μ が大きくなれば λ も大きくなり、その比 μ/λ は、一定の値であろうと推定し、緊張計算式を次のように考えた。

$$\begin{aligned} \sigma_{p0} &= \sigma_{pi(0)} (1 + \mu\alpha + \lambda l) \\ &= \sigma_{pi(0)} \left\{ 1 + \mu \left(\alpha + \frac{\lambda}{\mu} l \right) \right\} \end{aligned}$$

このうち $\lambda/\mu = 0.004/0.3 = 0.0133$ (一定)とする。

また摩擦係数 μ は、0.3を標準としてバラついていると考えられるので、 μ は、0.2と0.4の場合について予め計算しておいた。その結果をグラフにすると図-10のようになる。

図-10により μ が0.2と0.4の間にある場合は、プレストレスング結果をグラフに描けば点線となり、どこで引き止めるかは、ABを結んだ線とOC線が交わる点Cで止めれば、摩擦係数の大小にかかわらず設計断面には所定の応力が導入されたことになる。 $\mu = 0.3$ とすれば、 $\pm 10\%$ に相当する μ の値は約 ± 0.4 であるから、 $-0.1 < \mu < 0.7$ の範囲に μ があれば、ケーブル1本当りの管理(Mのばらつき)は満足する。

4.4 グラウト工

プレストレス導入後、シーズ内を水洗いし、グラウトを行った。プレストレス導入後、ジャッキにかけたPC鋼材を切断しグラウト注入を行った。注入に当たって

は、グラウトポンプでゆっくり注入し、グラウト液はグラウトポンプに入れる前に、フルイを通し静かに圧入し流出口から十分流出させ、注入のグラウト液と同品質になった時に流出口のビニールホースを折り曲げ閉じる。その後注入力をししばらく保持した後、注入孔からノズルを抜き取り、グラウトを完了する。

施工に先だち使用材料の配合について、施工状態に近い状況でコンシステンシー試験、ブリージング試験、膨張率試験および強度試験を行う。使用グラウト材の標準配合は表-5のとおりである。

表-5 グラウトの配合

セメント C(kg)	水 W(kg)	W/C(%)	ポゾリス P(g)	アルミ粉 Al(g)	Al/C (%)
80	32	40	200	5.6	0.007

5. あとがき

RC構造としてその設計が不可能な場合、あるいはひびわれが制限されるような場合、PRC部材が用いられることがある。それはRC部材の欠点を補う役目としてPCを使用するが、結果として鉄筋とPC鋼材により部材が構成されるため、不経済となることもある。

しかし、これらPRC部材の設計に関する規定は明確にされていないため、その都度ある条件を設定し、検討しながら行われている。逆の見方をすれば、PRC部材の設計は、その構造物固有の条件により、設計者の思想が大きな比重をしめるため、その設計が一律に画一的に決めたい要因を含んでいる。

また、それぞれ確立された設計手法をもつRC部材とPC部材の中間的な部材であるため、一般的にはどちらかの設計法に包含して考え、独自の設計をとらなくてもことたりることが多いためでもある。

ここでは、これらPRC部材の設計、施工について高架橋の橋脚を例にその検討の経緯について述べてきた。工事も最終段階をむかえ、来たるべき供用を待つ状態となったのを機会に報告させていただいた。これらの報告が、今後PRC部材の設計、施工に関する一資料として参考にしていただければ幸いである。最後に本報告をとりまとめるにあたり御協力いただいた関係諸氏に紙上をかり厚く御礼申し上げます。