

柿生跨線橋上部構造の設計と施工

指 宿 克*
 関 野 昌 丈**
 長 田 裕***

1. ま え が き

横浜上麻生線の改築工事にともない、小田急線と交差する部分において現況の平面交差を立体化し、道路構造の改善と将来予想される交通の安全性と迅速化を期して計画した柿生跨線橋の概要は下記のとおりである（図-1、写真-1）。

施工場所：神奈川県川崎市柿生地内

橋 格：一等橋（TL-20）

橋 長：133.0 m

支 間：取付部 36.7 m 3.0 連

跨線部 20.5 m 1.0 連

幅 員：7.0 m

構造形式：

取付部；ポストテンショニングPC単純桁

（プレハブ方式によるレオンハルト工法）

（アウトサイド集中PCケーブル，プレストレス導入力 2185 t）

跨線部；プレキャストPC単純桁

（レオバ方式 S-66）

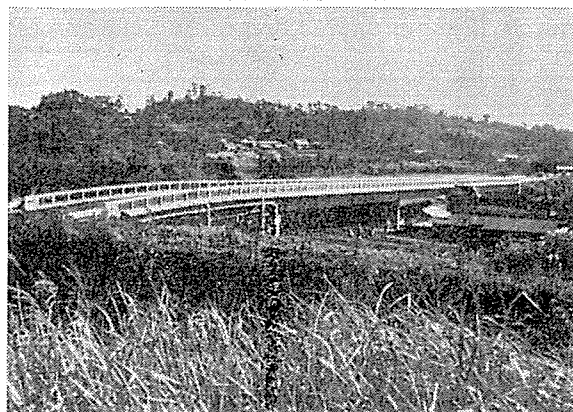
上記のうち本稿においては取付部，プレハブ方式の径間に限って，その設計概要および施工方法の特長について報告する。なお本報告の作成に当って大成建設KK小原忠孝氏に資料その他多大の協力を頂きましたことを付記し，厚く謝意を表する次第である。

2. 設 計

（1）構造の決定

断面は，ねじり剛性断面 2 次モーメントが大きく，外観上もよい箱型断面とした（折込付図 参照）。箱型断面はレオンハルト方式による PC 橋梁の一般的な断面であるが，特にプレハブ工法の場合，ブロック自体の安定性からも適当である。図-1 にあるように上床版 15 cm，

写真-1 全 景



下床版 13 cm，腹部 25 cm のスレンダーな断面であるが，これはプレハブ工法アウトサイド PC ケーブルの採用と密接な関係がある。すなわち断面の正確な保持のために精密な鋼製型わくを使用する。施工単位が小さいので品質管理がゆきとどく。PC 鋼材が腹部の断面外にあるので腹部の厚さが PC 鋼材の配置の制約を受けない。またうすい腹部にも容易にコンクリートが打設できる。腹部内に働く斜め引張力ないし斜め圧縮力の伝達がシースによって妨害されない。以上の理由である。

橋軸方向に等断面としわずかに緊張定着端に 35 cm のハンチをつけるだけとしたので，ブロックの形はすべて同じになった。本橋の場合は，単純桁であるから構造上も等断面でよいが連続桁の場合でも変断面は内部支承上付近の下床版を厚くするとどめ，他は一樣な寸法にすれば型わくも単一でよいし，またプレストレスの方からも有利となる。ただ問題となるのは，腹部の斜め引張応力であるが，これに対しては，必要な範囲に PC 鋼材による立締めを行なって解決すればよいと考えられる。

つぎに橋体を橋軸方向にいくつかのブロックに分割するかという問題がある。これには工期，型わくの転用回数，全体の施工規模に見合ったブロックの大きさなどを考えて決定する必要がある。

本橋では，一連の橋体を 10 個に分割し，3 連分全体でブロックの数は 30 個とした。ブロックの高さは 1.8 m，長さは 2.875 m，重量は 約 20 t である（写真-2，3）。

* 神奈川県土木部道路建設課立体交差係長

** 神奈川県土木部道路建設課橋梁係長

*** 神奈川県土木部川崎土木事務所工務第二課長

写真-2 ブロック

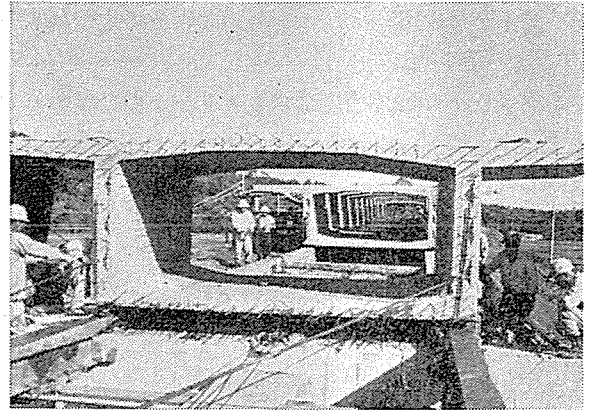
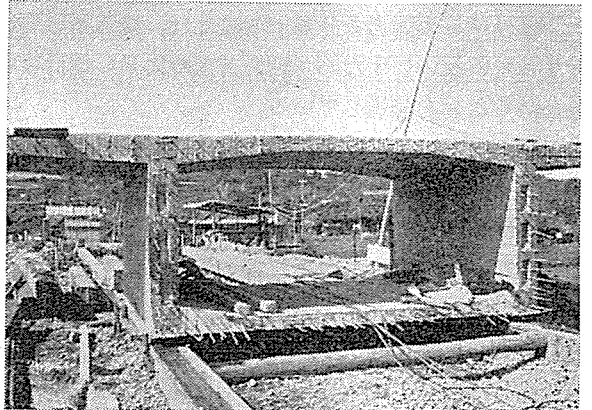


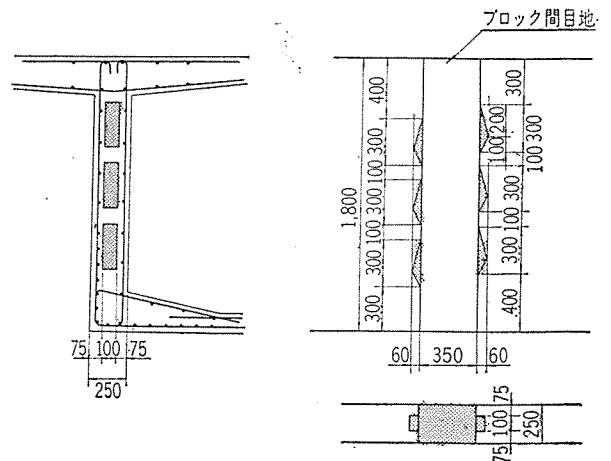
写真-3 ブロック



の継目面に非常な精度が要求されることと、桁の塑性状態における安全性、継目面の疲労に対する強度、耐久性の点で不明な点が多い。それに対して、本橋のような施工法ではわずかではあるが、現場でコンクリートを打設しなくてはならない欠点はあるが、上記のような不安はない。したがって、すべてのブロックを一度に継ぐレオンハルト工法の場合は、後者の方が適している。

なお、目地の施工にあたっては、ブロックの継目面をチッピングするとともに図-2に示されているように凹面を作ってせん断力に対して抵抗性を高めた。

図-2 プレハブ ブロック間の目地



ブロック間の目地の厚さは35 cm とした。

ブロックの目地の位置は、ちょうどレオンハルトPCケーブルの屈曲部になっているが、この屈曲力を腹部に伝達する働きをしている。目地部の縦ばりの支圧力およびせん断力を計算し、また鉄筋の重ね合せ長、コンクリート打設の容易さを考慮したうえ決定した。

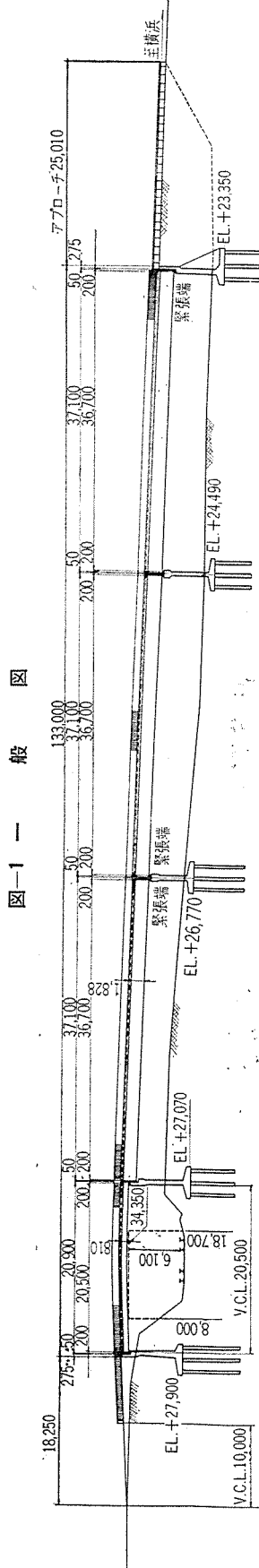
鉄筋はすべてツイストバー (Twist bar) を使用した。高張力鋼を使用した方が経済的であり、また異形鉄筋であるのでコンクリートとの付着もよい等の利点がある。

なお、Twist Barの静的および動的疲労に関して北大 横道教授の試験により、安全性がたしかめられている。

鉄筋はφ9 mm をおもに使用し、下床版と腹部のつなぎ鉄筋、腹部の橋軸方向鉄筋は2つの鉄筋を結んだU型フックを用いてコンクリートとの付着効果を高めた。

ブロックの目地に関しては、一つはフランスのAval sur le Rhône 橋で施工されたように、エポキシ樹脂を継目の面に塗ってはり合わせてゆく方法と、ドイツのAger 橋をはじめ本橋のように、ブロック間の目地に所要の間隔をとり鉄筋を重ね合せ、目地にコンクリートを打設してブロックを継ぐ方法がある。

前者は、工期が早いという利点はあるが、ブロック



導入プレストレス力は 2185 t, PC鋼材は 3/8" PCストランドを 2×165=330 本を使用し, その定着はルーパアンカーとした。

コンクリートの縁応力度はコンクリートのひびわれを防止するように 5 kg/cm² 以上の圧縮応力度が残るように設計し,

$$\begin{aligned} \text{プレストレス導入時} & \begin{cases} \sigma_o = 30.4 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_u = 159.2 \text{ " } \end{cases} \\ \text{設計荷重作用時} & \begin{cases} \sigma_o = 107.9 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_u = 5.1 \text{ " } \end{cases} \end{aligned}$$

となっている。

コンクリートは, $\sigma_{28}=350 \text{ kg/cm}^2$ のものを使用した。コンクリートの応力を計算する際には, 換算断面計算を行っていない。すなわち設計荷重時に PC鋼材の応力が上がることを無視している。

斜引張応力度は, せん断応力度の値が許容斜引張応力度より大となる点について, プレストレス導入時, 設計荷重時, 破壊荷重時についてそれぞれ検討し Twist Bar で全せん断力に抵抗させるように配筋する。

緊張は片引き, 緊張端のブロックは 折込付図 のように設置し, $\mu=0.20$ としてブロックにかかる圧縮力を計算し圧縮鉄筋として $\phi 22 \text{ mm}$ Twist Bar 17 本を配置して抵抗させる。

(2) 設計上の特殊性

a) クリープ係数 プレハブ方式のため, 橋体の各ブロックごとに, プレストレス導入時のコンクリートの材令が異なり, 乾燥収縮, クリープ係数が異なる。このため連続桁などのように不静定構造物の場合には, 2次不静定力が生ずるが, 本橋のように単純桁の場合は, PC鋼材の引張力の低下に影響するだけである。厳密には, 各ブロックごとの φ, ϵ_s を考慮して, 有効引張力 P_e を決定すべきであるが, この設計では, 安全側に目地部の現場打ちコンクリートを対象として $\varphi=2.0, \epsilon_s=15 \times 10^{-5}$ としてプレストレスの損失を計算した。なお摩擦損失については $\mu=0.15, \lambda=0.0005$, 鋼線のリラクゼーションは 5% と仮定した。所要プレストレス力 P_e に対して有効引張係数 $\eta=0.828$ である。

b) PC ケーブルの屈曲力 (Umlenk Kraft) の伝達

プレストレス力は目地部縦ばりにある屈曲点を通じ, 縦ばりのせん断応力として桁部へ移行する。この際, 縦ばりにかかる支圧応力, 縦ばりのせん断応力分布によって規制される縦ばりの幅, およびアウトサイド ケーブルによる腹部への偏心曲げモーメントの検討が問題になってくる。

1) 縦ばりの支圧応力: 屈曲力を支持するブロック目地部の縦ばりに作用する支圧応力は次式で計算される。

$$\sigma = \frac{P\alpha}{bl}$$

P : 1 ケーブル当たりのプレストレス力

α : ケーブルの曲り角 (ラジアン)

b : 屈曲部のシースの幅

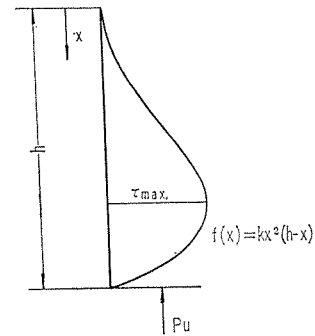
l : 屈曲部のシースの長さ

支圧応力度を 95 kg/cm² 以下にするには,

$$l \geq \frac{P \cdot \alpha}{b \cdot \sigma_a} = \frac{1100 \times 0.02133}{0.104 \times 950} = 0.237 \text{ m}$$

よって, 屈曲部シース長は 24 cm 以上必要となる。

図-3 せん断応力分布図



2) 縦ばりと腹部の間に働くせん断応力: せん断力の働く面が, 荷重のごく近傍であるから, せん断応力の分布は 2次パラボラではなく, 図-3 のような $f(x)=kx^2(h-x)$ なる曲線を仮定する。

$$\int_0^h f(x) dx = P_u$$

とおいて, $f(x)$ の最大値を求めると,

$$\tau_{\max} = \frac{16}{9} \cdot \frac{P_u}{b \cdot h}$$

ここに P_u : Umlenk Kraft 23.2 t

b : 縦ばりの幅 40 cm

h : 縦ばりのケーブルより上の高さ 84.5 cm

ゆえに $\tau_{\max}=12.2 \text{ kg/cm}^2 < 18 \text{ kg/cm}^2$

前に述べたように, このような作用最大せん断応力度からも縦ばりの幅, したがってブロック間の目地の幅は規制される。なお Umlenk Kraft は, 縦ばりに対して多少傾いているので, このために縦ばりに水平曲げモーメントが働くが, この値は計算すると非常に小さいので

図-4 ケーブルが断面におよぼす力

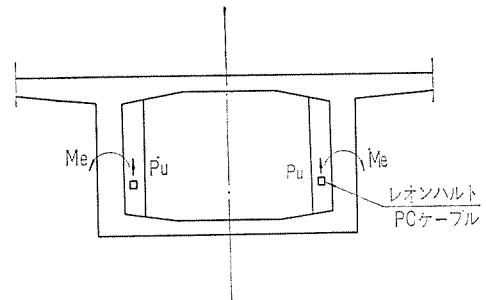
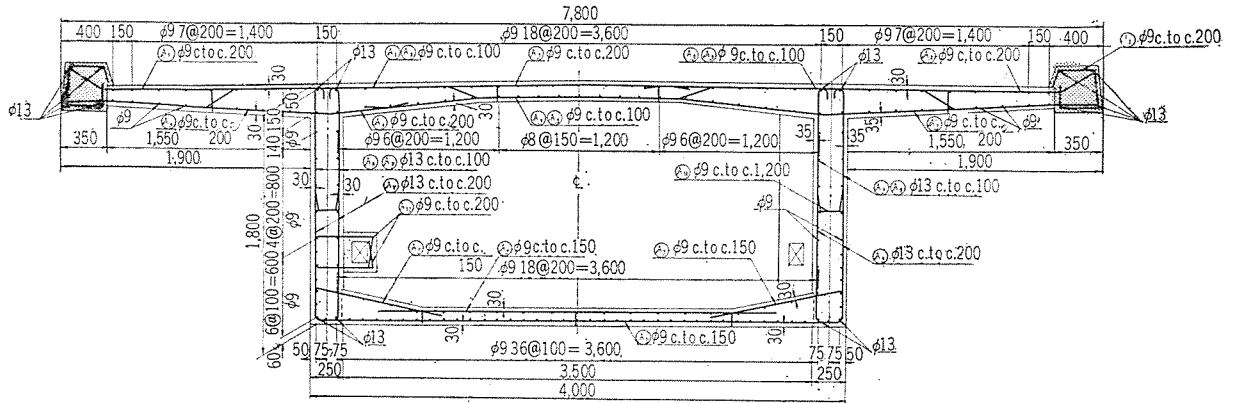


図-5 標準横断配筋図



問題はない。

3) 腹部にかかる偏心曲げモーメント：アウトサイドケーブル工法のために、PCケーブルの屈曲力は腹部に偏心して作用するので図-4のような偏心曲げモーメントが働く。

この場合、箱型断面とし上下床版の有効幅を算定し、床版設計の際の死荷重および活荷重曲げモーメントを合成して、配筋計算を行なった。

c) 直線部ケーブルと腹部コンクリートとの付着 破壊荷重時に、桁が塑性状態に入ったとき、PC鋼材と桁のコンクリートに付着をつけておく方が、構造物の安全性ははるかに大きい。

そこで、緊張後に直線部シースをコンクリートで被覆し、その硬化後に、シース内にグラウトして、PC鋼材と腹部のコンクリートを一体とした。

またこの結合力を保護するために、腹部の表面から引き起した ϕ9 mm の鉄筋を 20 cm 間隔でシースのまわりにまいて補強した(図-5 参照)。

なお、プレストレス後にかかる死荷重と活荷重によって、PCケーブルと腹部の間に働く設計荷重時のせん断応力度は 2 kg/cm² に過ぎず、破壊荷重時にもこの付着が切れることによって桁が破壊状態に入ることはないので、腹部コンクリートの中にPCケーブルを配置してある桁と同様な安全性を有している。

d) 目地部コンクリートの乾燥収縮 目地部のコンクリートの乾燥収縮は、ブロックによってその変形が拘束されるので、ひびわれを発生させるおそれがある。

コンクリートは無収縮あるいは、膨張性にするための付加材もあるが、試験の結果、強度にまだ信頼性がないので、ブロックと同じコンクリートを目地部にも使用した。

そこで、目地部の養生には十分注意し、コンクリート打設後3日で初期緊張を与えるようにした。それまでにあらわれる乾燥収縮のひずみ度は 5~6×10⁻⁵ と考えら

れ、 $E_c=250\,000\text{ kg/cm}^2$ ($\sigma_{28}=350\text{ kg/cm}^2$ 以上、 $\sigma_3=250\text{ kg/cm}^2$) とすると引張応力に換算して、 $\sigma_c=-6\times 10^{-5}\times 250\,000=-15\text{ kg/cm}^2$ になる。これを打消すに必要なプレストレス力は、全断面について 419 t となるが、ステージングの抵抗があるので、これを加味して、初期緊張プレストレス力を 500 t とした。

3. 施 工

(1) プレハブブロックの製作

合計 30 個に分割されたブロックは、取付部の盛土上にすえ付けられた精密に仕上げられた1個の鋼製型わくによって製作する(図-6、写真-4 参照)。

型わくと橋梁架設地点との間は、約 50 m の距離をおき、その間にでき上がった一連分 10 個のブロックをストックできるようにした。

箱型断面のコンクリート桁の施工について、問題となることの一つに下床版のコンクリート打設がある。一つは入りくんだ内型わく内で下床版をふくめて一挙にコンクリートを打設する方法と、他は、まず下床版を打設して、そのコンクリートの硬化を待ってから、上床版の型わくを組むという従来の方法とがある。いずれにしても一長一短があるが、本橋ではドイツのアガー橋になってブロックの下床版を分離して先に製作した。これに

写真-4 鋼製型わく

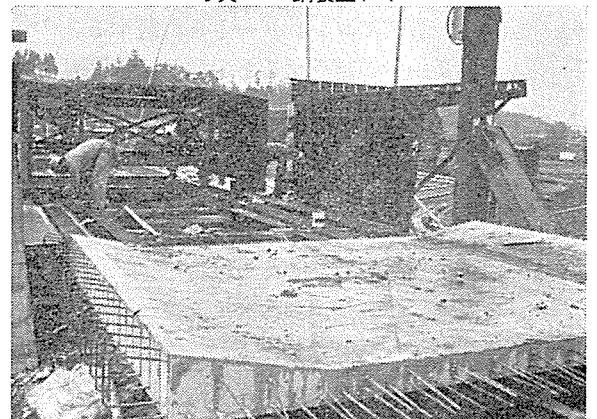
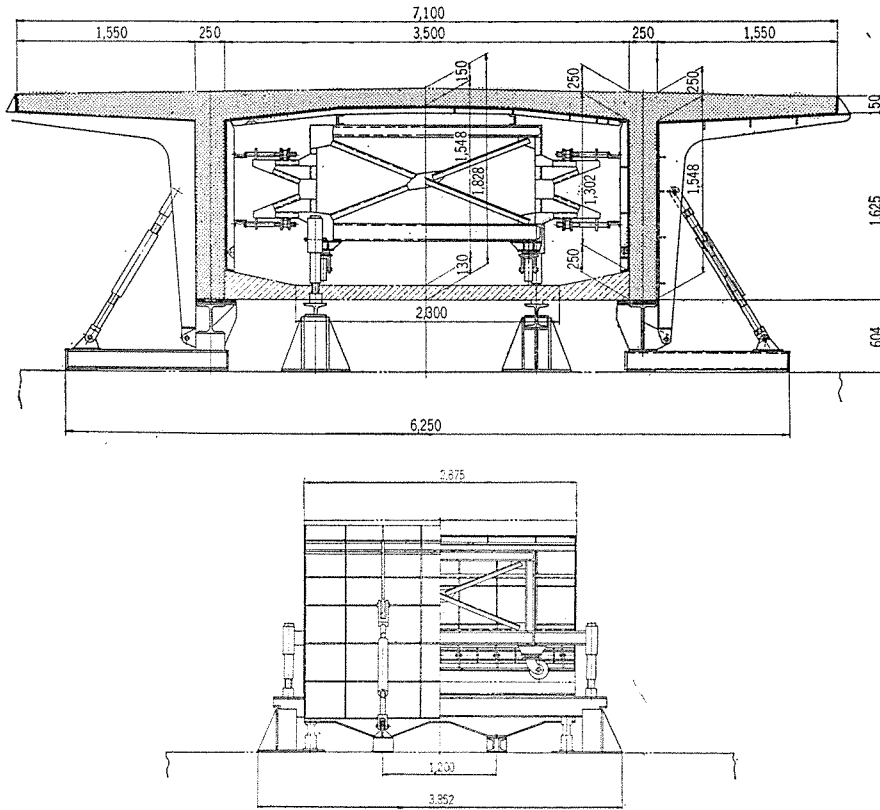


図-6 鋼製型わく図



よって厚さ 13 cm というきわめて薄い下床版のコンクリートを正確な寸法で作ることができた。

ブロックの製作はつぎの順序によって行なった。

1) 下床版の配筋とコンクリート打設、硬化した下床版を1個ストックする。

2) 腹部の外型わくを建込み、定位置で固定し、硬化した下床版を外型わく内に送り込む。

3) 腹部の配筋を行なう。

4) ゴム車輪のついた腹部の内型わくを、下床版上に運搬したのちスクリー ジャッキで持ち上げ、上床版のコンクリートの荷重が下床版にかからないようにする。

内型わくは上面および側面をスピンドルで拡げる。

5) 上床版の配筋および横締めを行なうための直径 24 mm のPC鋼棒を 56 cm の間隔に配置する。

6) 上床版、腹部にコンクリートを打設する。

7) コンクリートが硬化すると内型わくを離脱し外型わくはターンバックルを操作してブロックを引き出す。

以上の順序にしたがって、型わく組立て、配置、コンクリート打設、脱型の工程で、ブロックは天候にかかわらず、4日に1個の速度で製作された。

(2) ブロックの運搬とすえつけ

ブロックには、移動がスムーズに行なわれるように、木製のすべりシューを取りつける。

盛土上には、ヘッドおよび軟石けんを塗布した木製レ

ールを敷き、重量 20 t のブロックは、ダブル ウインチによって、その上を引張りながら移動する。

動摩擦係数は約 0.05、したがって、引張りに要する力は 1 t であるが、静摩擦係数は、大体 0.10 程度であるので、始動時には、ジャーナル ジャッキで軽く押し出す。

ストック ヤードに、1連分10個のブロックができ上がる頃にはステージングが架設されている。

ステージングは、6 m おきに木製の支柱を立て、その上に高さ 30 cm の I ビームを4本ならべて渡した。

この I ビームには、上面にグリースを塗って、ブロックのすべり台をかねている。

移動中のブロックの横方向の

ズレに対しては、鋼製の側板を木製のすべりシューの両側に取りつけて防止した。

ブロックは、プラントに対して遠い側から 35 cm の間隔をおいてならべ、ジャッキによって上下、左右の微調整を行ない、所定の位置にすえつける。

施工中、ブロックの重量などによって、ステージングに沈下が生じた場合、ジャッキとキャンバーによって容易に高さの調整を行なうことができるのも、この工法の大きな利点である。

(3) PC ケーブルの布設

シースは腹部にそって、箱型断面の内側に配置する。屈曲部シースは、ブロック間の目地部に支持台をおいて、所定の高さ、傾きに正確に取りつけ、その間に直線部シースを溶接する。

緊張端、定着端には、ループ アンカーの背面鋼板を規定の傾きを保持しながら配置し、その内側にアンカー ブロックの配筋をする(写真-5)。

シース内には、3/8" PCストランド (150/176) 165本が布設される。一層分 11本のPCストランドがならぶと、シース内に、間隔材をそう入しPCストランドの間隔を整然と保つ(折込付図 参照)。

PCストランドの布設が終ると、屈曲部シースには、緊張時の摩擦損失を減らすために、支圧板、すべり板をそう入し、シースのふたを溶接して閉じる(写真-6)。

写真-5 ループ アンカー設置

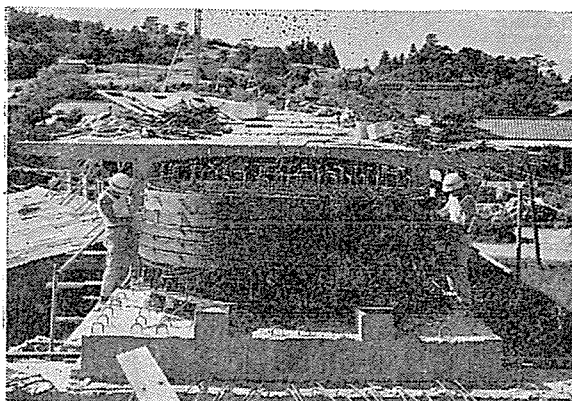
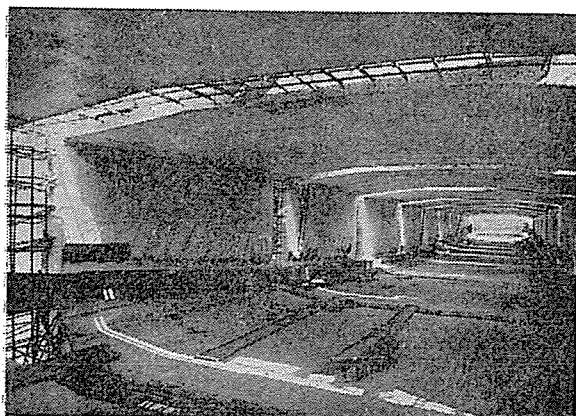


写真-6 シース配置



(4) 現場打ちコンクリート

緊張端、定着端およびブロック間の目地部に配筋する。型わくはブロックを利用して、腹部では、内型わく、外型わくをフォーム タイで締め、上床版はつり型わくとするので、非常に簡単にとりつけられる。

緊張端、定着端のコンクリートは、主コンクリートを使用して1日で打設を終え、つぎの日の午前中には、ブロック間の目地部のコンクリートを打設して、目地を閉じる。

(5) 緊張作業

目地部のコンクリートの乾燥収縮によるひびわれの発生を防ぐ目的で、現場打ちコンクリート打設後3日で緊張を開始する。

第一次緊張では、4台のジャッキで500tのプレストレスを導入する。

目地部のコンクリートの強度の増加を考慮に入れて、順次、プレストレス力を増加してゆく。

第二次緊張のプレストレス力は1200t、第二次緊張終了後、コンクリートブロックを緊張端部の目地に入れて一時的に緊張力を保持し、ジャッキのストロークを補うために、ジャッキ支圧面に、コンクリートブロックをそう入する。

現場打ちコンクリート打設後2週間を経過してから、

6台の500tジャッキを使用して最終緊張を行なう。

最終緊張では、2180tのプレストレスを導入する。

各緊張段階において、緊張端部のPCストランドの引き出し量と、径間中央のシース直線部4ヵ所に設けてある観測窓で、PCストランドの移動量を測定し、実際の摩擦係数を求めて、設計計算上の計画緊張力を補正する。

本橋では、摩擦係数 $\mu=0.15$ 、 $\lambda=0.0005$ として設計したが、測定の結果は $\mu=0.10\sim 0.12$ ($\lambda=0.00333\mu$ に換算して計算する)であった。

摩擦係数が小さいのは、アウトサイドケーブルのため直線部のケーブルが、まわりのコンクリートに拘束されていないためと考えられる。

このように、アウトサイドケーブルによる工法の場合、直線部のシースを使わない設計もできるが、直線部ケーブルの摩擦係数 λ は0とすることができ、さらに屈曲部の摩擦も、ケーブルに振動を与えることによって小さくすることができるので、長径間連続桁のようにきわめて大きいプレストレス力を必要とし、かつ通常の方法では相当大きい摩擦損失が予想されるような場合、特に有利となる。

最終緊張後、緊張端目地部にコンクリートブロックをそう入し、ジャッキを取のぞいてコンクリートを打設する。PC鋼棒による床版の横締めも並行して行なう。

(6) シース被覆コンクリートおよびグラウト

破壊荷重時において桁が塑性状態になったときの安全性を増すために、シース直線部は、あらかじめ腹部表面に布設した鉄筋で巻き、25cm×30cmのコンクリートで被覆して、腹部と一体とする。

シース被覆のコンクリートが硬化したのち、シース内にセメントミルクを注入する(写真-7)。

4. あとがき

最後に本工法の特長を簡単に要約して述べる。

1) 十分な品質管理のもとに施工ができるので、精度

写真-7 架設完了

