

紀勢本線有田川橋梁の設計施工における 急速施工への検討

国鉄大阪工事局
国鉄構造設計事務所

宮 口 尹 秀
小 池 晋

1. 概 説

国鉄第3次長期計画の一環として、紀勢本線白浜、海南間の線増工事が39年度後半より開始された。天王寺から海南までは既に複線開業されているので、まず、海南、紀伊由良間35km8を線増し、42年3月に部分開業することにした。このうち有田川橋梁がある藤並、紀伊宮原間は、地元との設計協議の関係で40年11月から着工できることになった。

有田川橋梁は現在線の曲線改良および現在線橋梁の老朽化という点から、約100m上流に複線橋梁で新設することにした。有田川はよく氾濫すること有名で、左岸一帯は遊水地になっており、本流部分の他にこの区間に400mあまりの避溢橋を設けた。このため延長912mの複線橋梁という長大橋梁になった。有田川橋梁の概要は下記ならびに写真1の如くである。

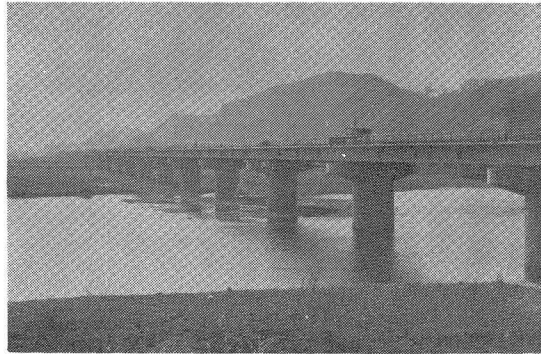


写真-1

本 流 部 分	上部構造	3径間連続PC桁(32.0+32.5+32.0)		4連
	基 礎	円形ケーソン		
鳥尾川部分	上部構造	単純PC桁(25.20)		3連
	基 礎	H鋼杭		
避溢橋部分	3径間	ラーメン、鉄筋コンクリートT型桁		
	基 礎	H鋼杭		

各部分の工事はそれぞれ単独に施工できるので、以下はこれらの中で工程的に最も苦しい本流部分について述べたものである。本流部分は計画洪水流量と斜角の関係でスパン32m以上となったが、R.L.から桁下までが2m15と制約されたので、当初下路PC桁で考えていたが、連続桁とし、かつ軌道を直結にすると上路で設計可能であり、アブローチの工費を含めても経済的となるので、3径間連続PC桁としたものである。基礎地盤は良く締った礫混じりの砂層だったが、上部構が不静定であり、しかも直結軌道を採用したので、開業後の沈下をできるだけ小さくするため、ケーソン基礎

とした。

藤並，紀伊宮原間は現在線を新上り線に一度切替えないと下り線の工事が一部施工できないので，切替後の工事工程より新上り線の使用開始を41年12月1日と決めた。これに間に合わすには，軌道工事に2ヶ月，試運転に1ヶ月かかるので，橋梁は8月末に完成しなければならない。すなわち，有田川の本流部分は40年11月から41年8月までの10ヶ月間で13基のケーソンを沈め，橋脚を立ち上げ，延長390mの連続PC桁を完成するという苦しい工程となった。

これまでの国鉄の工事例を見ると，設計ならびに架設条件が良く似ている赤穂線の吉井川橋梁（ $33.200 \times 3 + 7.00 \times 2 = 101.400$ 4連 $l = 40.290$ レオンハルト法）では上部構のみで約13ヶ月を要している。これは型枠を連続桁1連分だけ準備し4回転用いている。また，東北線の鬼怒川橋梁（ $30.120 + 30.620 + 30.120$ 3連 他連続桁2連 スパン30～36m $l = 47.405$ フレンネー工法）でも上部だけで約7ヶ月を要している。その他の工事例でも場所打ちで施工すると，支保工組立から桁完成まで1径間約3ヶ月程度かかっているようである。これらの工事例から考えて，有田川で連続桁1連づつ場所打ちしていくと，複線橋梁でもあるし上部のみで一年以上を要すると考えられる。そのうえ有田川は荒れ河川なので出水期を避ければ更に日数がかかる。かりに全ての桁を同時に製作すれば，4～5ヶ月でできるであろうが，これに要する労務者，資材，現場設備は膨大なもので，不経済な工事となるし，有田川のような水の出やすい河川で，河川敷全幅の足場を組むのは少し無理である。以上のように普通に行なわれている場所打ちの施工では工程的に間に合わないので，現場製作のプレキャストのPC桁を架設後，目地コンクリートを打設し，連続合成して3径間連続桁を完成する方法で，工程を短縮することにした。以下はこの工法の設計，施工について述べたものである。

2. 設 計

1. 設 計 条 件

プレキャスト合成連続桁の設計概要は図一Ⅱ・1 に示す通りで，32.400 および31.400のプレキャスト単純桁を架設後，各橋脚上において，80cmの場所打ち目地コンクリート，および継ぎケーブルによって，全長97.460の3径間連続桁に合成することにした。（3径間連続桁： 97.460×4 連＝連続桁全長：390.400）

本橋梁設計上の特殊な条件としては，図一Ⅱ・1 に示すように，国鉄において本格的な直結軌道を採用した最初のコンクリート橋であり，桁と直結用短枕木との結合等の関係から，主桁の上突縁は非対称な形となっている。また，直結軌道のため，将来桁のクリープ等によるたわみの変化を極力小さくする必要があるため，プレストレスによる2次応力をできるだけ小さくするよう考慮した。なお，プレキャストの桁は移動架設を考慮して主桁1本当りの重量を100t以内とし，架設後中間支点の前後約9mの区間は場所打ちコンクリートによって箱型断面とした。

次に本橋梁に用いた一般的な設計条件を示すと次の通りである。

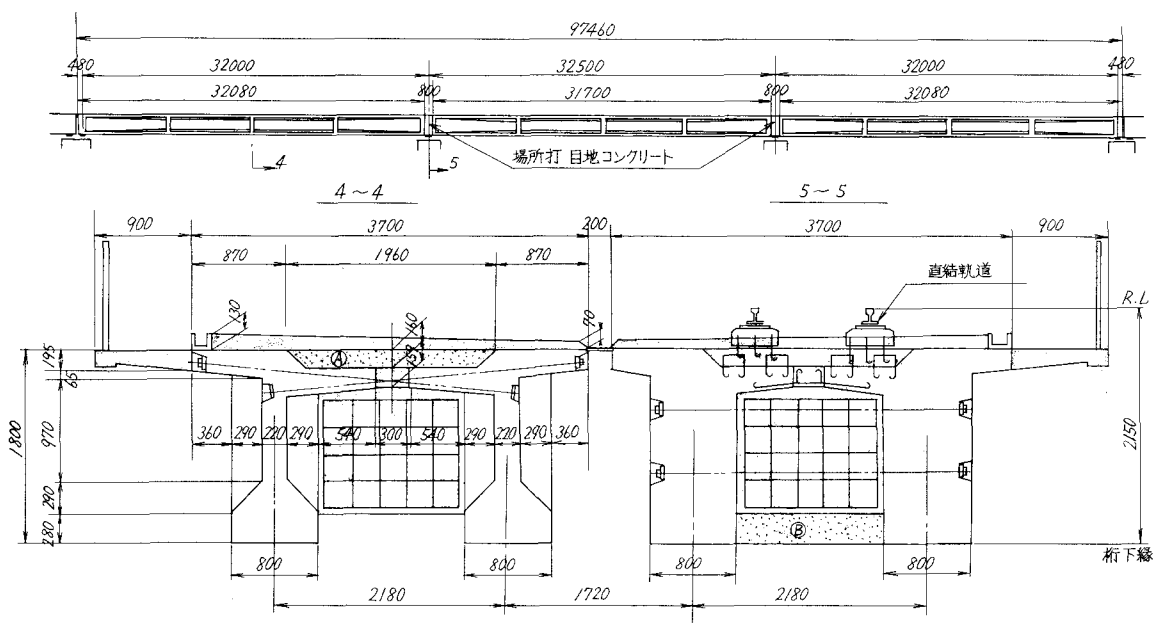


図-Ⅱ・1

(a) 橋梁型式：プレキャスト合成PC連続桁（スパン中央断面は2主桁，支点付近は箱型）

(b) 橋長：97.460：3径間連続桁単線並列……4連

(c) スパン割：32.000+32.500+32.000

(d) 活荷重：KS-16

(e) 衝撃係数：0.34

(f) クリープ係数： $\phi = 2.0$

(g) 乾燥収縮度： $\epsilon_s = 15 \times 10^{-5}$

(h) リラクゼーション：5.0%（12- ϕ 8について）

(i) 破壊荷重：1.3×死荷重+2.5×活荷重，または1.75×（死荷重+活荷重）

(j) ヤング係数： $E_p = 2,000,000 \text{ Kg/cm}^2$

(k) $E_c = 350,000 \text{ Kg/cm}^2$

(k) コンクリートの許容応力度その他

強度： $\sigma_{28} = 400 \text{ Kg/cm}^2$

許容応力度：プレストレス導入直後（圧縮）： 170 Kg/cm^2

プレストレス導入直後（引張）： -15 Kg/cm^2

設計荷重作用時（圧縮）： 130 Kg/cm^2

設計荷重作用時（引張）： 0 Kg/cm^2

設計荷重作用時（斜引張）： -9 Kg/cm^2

破壊の安全度検討荷重作用時（斜引張）許容値： -20 Kg/cm^2

破壊の安全度検討荷重作用時（斜引張）最大値： -4.0 Kg/cm^2

(1) P C 鋼材の強度および許容応力度その他

P C 鋼線 $12-\phi 8$

引張強度： 155 Kg/mm^2

降伏点応力度： 145 Kg/mm^2

設計荷重作用時の許容引張応力度： 93 Kg/mm^2

緊張作業中の許容引張応力度： 121 Kg/mm^2

P C 鋼棒 $\phi 24$ (SBPC110)

引張強度： 110 Kg/mm^2

降伏点応力度： 95 Kg/mm^2

設計荷重作用時許容応力度： 66 Kg/mm^2

2. 設計上の問題点

(1) プレキャスト単純桁

プレキャスト単純桁に導入するプレストレスは、架設後の主桁自重、横桁、スラブ縦目地、支点付近の箱型断面用底版コンクリート等の死荷重と合成して、上下縁とも、ほぼ同量の圧縮応力度となるよう考えた。

すなわち、単純桁架設後これを連続合成するまでおよび連続合成後において生じるクリープ等によるそり上りを極力制限するためである。なお、これと同時に、既に架設された単純桁上を、次のスパンのプレキャスト桁を架設トロを用いて、縦取りするため約 100 t の荷重が移動することもあり、1台のトロに載る約 50 t の移動荷重に対して充分安全であるような、プレスト量をも考慮する必要があった。

以上の点を考え、プレキャスト単純桁に対するプレストレスは図-Ⅱ・2 に示すように、スパン中央断面において15ケーブル中8ケーブルを用いた。桁の断面要素は表-Ⅱ・1 の通りで、プレストレス、および死荷重との合成応力度は表-Ⅱ・2 のようである。有効プレストレスの計算において、クリープ、乾燥収縮の進行度は、プレストレス導入後連続桁に合成されるまで約1ヶ月が経過するものとして、全量の $1/5$ だけ考えた。

また、図-Ⅱ・2 に示すように上突縁が非対称であるので、断面主軸が鉛直、水平とも $2^\circ-13'$ 傾斜するが、これを考慮した

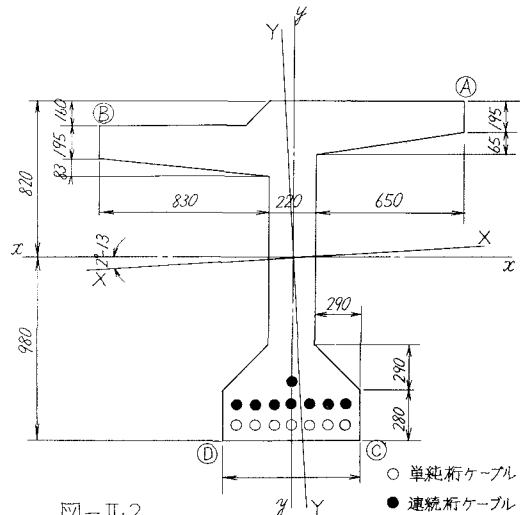


図-Ⅱ・2

合成応力度を求めると表Ⅱ・3. のごとくなり，総合的にはほとんど問題がなかった。

断面要素（1主桁当り）

表Ⅱ・1 断面要素（コンクリート断面について）

		中央断面	支点断面
断面積：	$A \text{ (m}^2\text{)}$	0.999	1.326
中立軸より上縁および下縁までの距離	$Y \text{ (m)}$	0.82	0.825
	$Y \text{ (m)}$	0.98	0.975
断面2次モーメント	$I \text{ (m}^4\text{)}$	0.397	0.433
断面係数	$Z' \text{ (m}^3\text{)}$	0.484	0.525
	$Z \text{ (m}^3\text{)}$	0.405	0.444

プレストレスと死荷重との合成応力度

表Ⅱ・2 スパン中央断面の合成応力度

部 位 応 力 度		$\sigma_c \text{ kg/cm}^2$		備 考
		上 縁	下 縁	
プレ ス ト レ ス		-37.7	156.7	
桁 自 重		71.6	-88.5	
縦目地，横桁，底板		6.9	-8.2	
有効プレストレス		-35.2	146.1	$\phi=0.4$ $\epsilon_s=3 \times 10^{-5}$
合 成 応 力 度	プレストレス導入直後	33.4	68.2	
	死荷重作用時	42.8	49.4	

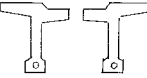
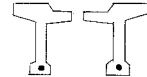
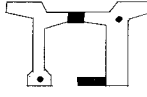
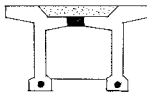
表Ⅱ・3 プレストレスおよび桁自重応力との合成 (kg/cm^2)

	σ_p	σ_{do}	$\sigma_p + \sigma_{do}$
A	-40.7	83.1	42.4
B	-27.0	68.6	41.6
C	60.4	-23.0	37.4
D	83.7	-47.4	36.3

2. 連続桁

プレキャスト単純桁を橋脚上に架設した後，上スラブ縦目地，横桁，および支点前後の9 mの下スラブコンクリートを打設して箱型断面とし，横桁部の横締め，上スラブの交差横締めを完了した後，橋脚上の連続合成目地部のコンクリートを打設し，連続ケーブルおよび継ぎケーブル（キャップケーブル）によって連続合成を実施する。直結軌道工事は連続結合後に行なわれるので，図－Ⅱ・1 の④部は鉄筋コンクリートとして活荷重合成されることになる。各荷重状態とその際の抵抗断面の形状は表－Ⅱ・4 の通りであり，連続合成ならびに直結軌道工事終了時の断面要素は表－Ⅱ・5 の通りである。

表－Ⅱ・4

曲げモーメント	抵抗断面の形状	
桁自重曲げモーメント	プレキャスト単純桁，純断面	
連続合成のため，縦目地，横桁支点付近の箱型断面用下スラブ等の場所打ちコンクリートによる曲げモーメント	プレキャスト単純桁，P C 鋼材等の換算断面	
直結軌道工事のための場所打ちコンクリートおよび橋側歩道等による曲げモーメント	連続合成用断面におけるP C 鋼材等の換算概面	
活荷重＋衝撃その他による曲げモーメント	全上断面，ただし，スパン中央付近の＋Mに対しては上スラブ凹部④を考えた換算断面	

表－Ⅱ・5 連続桁の断面要素（半断面のコンクリート総断面について）

	中 央 断 面	支 点 断 面
断 面 積 : A (m^2)	1.172	1.818
中立軸より上縁およ Y' (m)	0.715	0.914
び下縁までの距離 Y (m)	1.085	0.886
断面2次モーメント I (m^4)	0.472	0.581
断 面 係 数 $\begin{cases} Z' (\text{m}^3) \\ Z (\text{m}^3) \end{cases}$	$Z' (\text{m}^3)$	0.636
	$Z (\text{m}^3)$	0.656

中間支点付近はボックス断面となり、キャップケーブル、連続ケーブル定着のためウェブも厚くなるが、連続桁となってから作用する死、活荷重に対して、変断面の影響を考慮した場合と、等断面と考虑した場合との M_{max} 、 M_{min} を比較すると図

Ⅱ・3 のようで大差はなかった。なお、活荷重による支点上の負の曲げモーメントは図Ⅱ・4，に示すように、とがった状態ではなく、 M' だけ低下したなだらかな山形となる。本橋の場合 $M' = q \cdot a^2 / 8 = 4.8 \text{ t} \cdot \text{m}$ となり約 6.8 % 減少することになった。

本橋においては初めにプレキャスト単純桁として 15 ケーブル中 8 ケーブルにプレストレスを導入し、これを架設して連続桁とした後、スパン中央断面付近においては残りの 7 ケーブルにより、また、支点付近においては図Ⅱ・5 に示すようにこの 7 ケーブルにキャップケーブル 14 本を加えた 21 ケーブルによってプレストレスが与えられる。プレキャスト単純桁の状態で 8 ケーブルによって与えられたプレストレスおよび自重によるモーメントは、その後連続桁として構造形式が変化するため、そのクリープ変形は拘束され、そのモーメントは時とともに次式のように変化する。

$$M = M_B + (M_L - M_B) (1 - e^{-\phi})$$

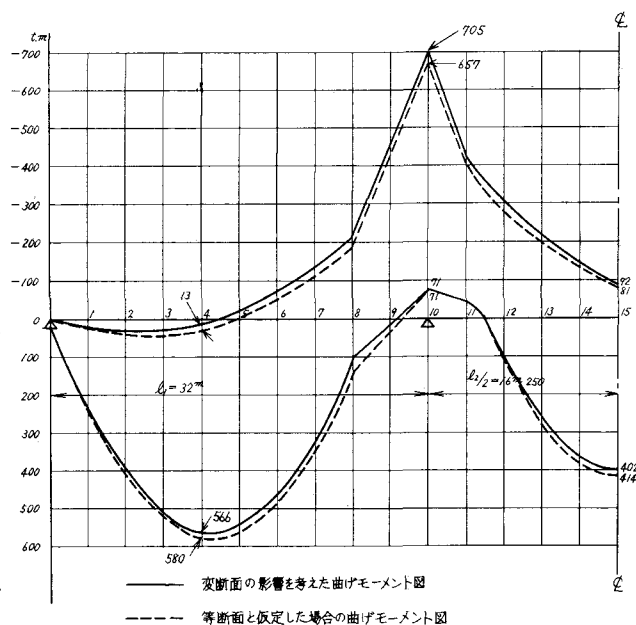
上式中

M = 任意の時刻 (クリープ係数 ϕ の時) のモーメント

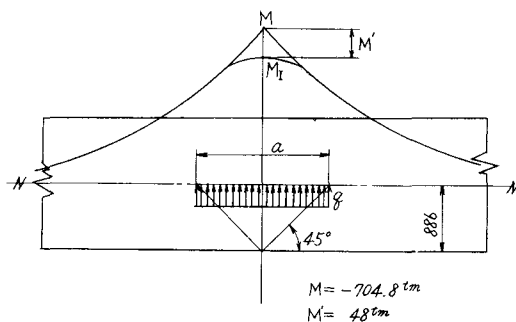
M_B = 単純桁としてのモーメント

M_L = 仮に最初から連続桁ができていたとした場合のプレストレス、または自重によるモーメント

上式でクリープ終了時 ($t = \infty$) のモーメントを求め、2 次モーメントを求めると表Ⅱ・6 のようであり、全設計曲げモーメントの最大 9.0 % 程度であった。このよ



図Ⅱ・3 連続桁としてから作用する、死活荷重による曲げモーメント



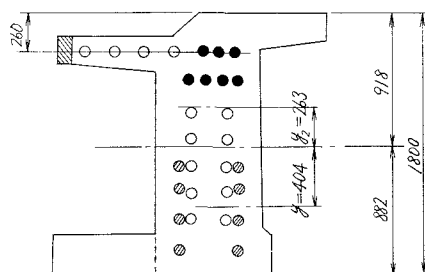
図Ⅱ・4

うに影響が小さいのは、前述のように単純桁の上下縁がほぼ同量の圧縮応力となるようプレストレスを導入したことによる。

連続桁にしてから緊張したものは構造形の変化による2次応力はないが、クリープ、乾燥収縮にともなうモーメントの低下による不静定モーメントを考慮した。しかし、これはごく小さく問題にならなかった。

(8) 支承構造

可動支承にはベヤリングプレート支承（銅合金の基材に黒鉛を主とした固型潤滑材を埋込んだもの）を用いた。また、単純桁が架設される時は、仮支承としてサンドジャッキ（820×300，砂厚40）を使用し、連続合成をする前に本支承に受け換え



- 連続ケーブル
- ⊗ 単純桁ケーブル
- ジャックケーブル

y_1 単純桁ケーブル図心位置

y_2 連続およびジャックケーブル図心位置

図-11.5

表-11.6

(f m)

断面位置	側径間中央	支 点 上	中央径間中央
全 設 計 曲 げ モ ー メ ン ト	9 1 6	7 0 5	7 8 4
ク リ ー プ に よ る 2 次 モ ー メ ン ト	6.1	6 5	5 4

た。この支点移動による影響も計算したが、ごく小さい値であった。

(4) その他の問題

単純桁で緊張するケーブルおよび連続桁で緊張するケーブルのクリープ、乾燥収縮によるプレストレス減少量は次のように考えた。

単純桁の状態で導入されたプレストレスが、連続桁となってからクリープ、乾燥収縮のため減少する量としては、連続合成までを1ヶ月と考え、この間にクリープと乾燥収縮は全体の $\frac{1}{5}$ が終了、リラクセーションは5割全部終了しているものとして計算した。なお、連続合成がなされた後の連続ケーブル7本によるプレストレスに対しては、コンクリート打設後2ヶ月近く経過するのでC.S. Whitney の法則によると、 $\phi = 2.0 \times \frac{3}{4}$ ， $\epsilon_s = 1.5 \times 10^{-5} \times \frac{3}{4}$ 程度と考えられるが、安全を見て $\phi = 2.0$ ， $\epsilon_s = 1.5 \times 10^{-5}$ の値を用いて設計した。

3. 施 工

1. 施工工程

工期短縮のためプレキャスト合成桁を採用したとはいえ、延長390mの複線橋を下部構造を含めて約10ヶ月で完成するのは工程的に相当きついと思えた。これに対し実際施工された工程は図一Ⅲ・1の通りで、右岸方より連

続桁2連分がのる7基の下部構

造を4月末までに、残りを6月中

旬までに完成した。一方右岸ア

プローチ盛土上にベース6基を

設けて桁の製作を行ない、4月

中旬より架設を始めた。桁製作

の工程は型枠組立、鉄筋組立、

ケーブルの配置で6日（型枠2

～3日、鉄筋2日、ケーブル配

置4～5日）、コンクリート1

日、養生5日、緊張1日、グラ

ウト1日、の計14日程度で、型枠は主桁2.5本分を転用した。桁架設は手延式ガーダーにより、架

設機の移動も含めて1径間につき平均10日間かかり、主桁1本につき2.5日であった。また、連続

合成の方は底スラブと目地コンクリートに10日、養生3日、緊張グラウトに5日程度で、上り線は

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

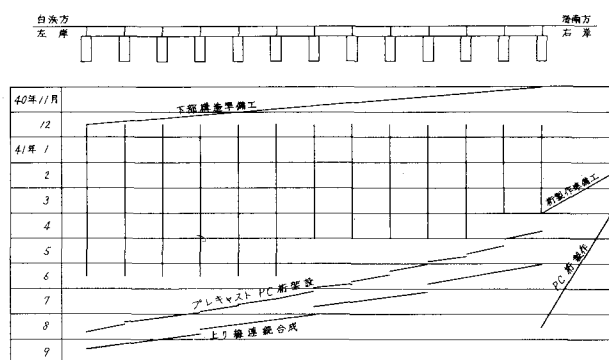
3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。

3径間架設されると直ちに連続合成して行った。以上のような状態で大体所要の工程で施工することができた。



図一Ⅲ・1 有田川橋梁本流部分施工工程

2. 施工状態

スライド説明

3. 施工上の問題点

シンプルPC桁製作上の問題点としては、桁の設計において桁高制限されたことと、架設重量を100t以内としたため、割合ウェブの細い構造となり、せん断補強用の鉄筋量が多く、また連続ケーブル定着用のリブにも補強筋が多かったのでコンクリートの締め固めが困難だったこと、および直結軌道の関係で、上フランジが変断面となったため、フランジ付け根の高さが左右異なり、フランジとウェブの打継目の外観が悪くなった点である。

桁の運搬架設上では、連続ケーブル定着用のリブが連続桁の中央スパンの桁では約10tもあり、その分だけ桁の重心が偏心したため、ジャッキ操作、桁のトロ運搬に慎重を要したこと、また、桁をサンドジャッキの仮沓に据えると、やはりこの偏心のため桁が若干傾斜し、その整正を要したことである。

連続ケーブルの配置は、シースをあらかじめプレキャスト桁に埋め込んであるので、目地部でシー

スを接続し、ケーブルを挿入すれば良かった。それでもシンプルなら3～4人で1本5～6分で挿入できるものが、ケーブル先端に鉄製キャップをかぶせ、8～10人で押して1本30分もかかるので、連続桁1連分の配置に3日かかった。

連続ケーブル、キャップケーブルの緊張作業は狭いボックス断面内でやるので、危険であり、ジャッキの盛替えがやり難くその上夏は暑苦しく能率が低下した。シンプルならケーブル8本を半日で緊張するところ、キャップケーブルで1日に10本、連続で8本程度であった。

また、シースの錆によるのか、配置形状によるのか鋼線の摩擦係数がシンプルの時より大きいので、減摩剤として石鹼水を使用した。

グラウトについてはケーブルの凸部に中間排出口を設け、キャップケーブルは両端より注入して一番高い中間排出口へ押し上げた。

4. あ と が き

一般にプレキャスト桁の利点を上げてみると以下の通りである。①まとまったものを完成してから運搬した方が、材料の小運搬に要する時間と経費が節約できる。②型枠などを転用する場合も、プレキャスト桁の方は至近距離で簡単である。③不安定で狭い足場作業より能率的である。④支保工製作に要する日数より桁架設の日数の方が遙るかに短い。⑤工期短縮のため下部構と平行してあらかじめ桁を製作しておくことができる。これに対し不利点としては次のことが上げられる。①架設器材の能力で桁の大きさが制限される。現在のところ100t以上の器材は特殊となる。また、架設した桁上を運搬するので、その面からも重さが制限される。②重量物を扱うのでそれだけ危険度が高い。③桁数が少ない場合は支保工より不経済となる場合もある。④横締作業が余分にある。以上の如くだが、ある程度の桁数があれば工程的にはプレキャスト桁の方が絶対的有利だと思う。連続桁をプレキャスト合成する場合も、これらの利点は同じことだが、工程的には連続合成作業も合わせて比較する必要がある。本工事の場合は桁運搬に下り線を専門に使ったので、架設したところから連続合成したが、単線の場合は桁架設終了後に合成するので、その分だけ余計かかる。しかし、本工事のように1連20日以下で合成されるなら、やはり場所打ちよりはずっと速いと思う。

プレキャスト合成連続桁の問題点としては、設計上ではクリープ、乾燥収縮による応力の移り変り、施工面では桁の偏心による影響、作業空間の狭さから来る能率低下等があるが、今回は桁高、桁重量が制限されているからでもあり、一般にはもっと楽な施工ができる構造になると思う。

計画の段階ではとても工程が苦しいと思っていたが、実際に施工された方々の感想ではごくあたりまえのことであった。このことは割何経済ペースでやってこの程度のスピードで施工可能だということで、連続PC桁の急速施工にプレキャスト合成桁による方法もっと使用されても良いのではないのでしょうか。