

アウトケーブルを用いた PRC 桁の設計・施工（その1）

——福塩線 芦田川 橋梁——

小林 明 夫*
 渡 辺 忠 朋*
 山 住 克 巳*
 池 田 英 昭**
 小 松 道 生***

1. まえがき

旧国鉄では、設計理論の検討・模型実験等を経て現在までに十数橋の PRC 桁の設計・施工を行ってきた。

PRC 桁は、設計荷重時にひびわれを許容した設計をしており、従来の PC 桁に比べ PC 鋼材の減少がはかられ非常に経済的な構造である。

今回、JR 西日本福塩線（河佐・備後三川間）にアウトケーブルを用いた PRC 桁の設計・施工を行ったので、以下に報告する。

2. 計画概要

2.1 橋梁概要

本橋梁は、建設省のダム建設計画に伴って水没する区間の線路付替により、一級河川芦田川に架設した鉄道橋である。

名 称：芦田川橋梁

場 所：広島県

（福塩線 福山起点 36 km 006 m 00）

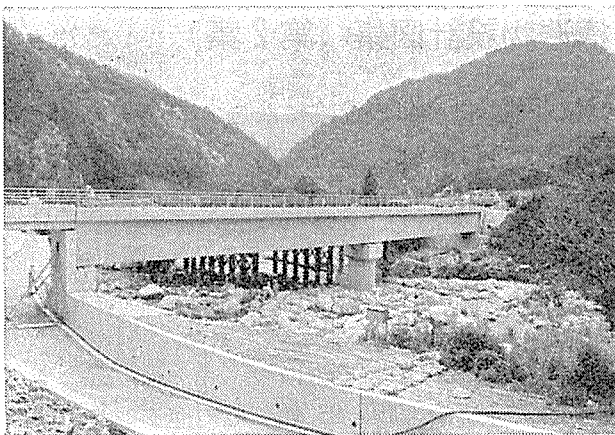


写真-1

橋 長：72.5 m（内 7.7 m は RC スラブ桁）

スパン割：30.86 m × 2 + 7.08 m

構造形式：PRC 単線 1 室箱形桁

ケーブル配置：アウトケーブル

定着工法：フレシナー工法

設計荷重：KS-14

また、本橋梁は、前後の地形、在来線との取付け等の計画により、曲線半径 400 m、縦断勾配 22/1 000 とし、橋脚を河川の流心方向に合わせたことにより、斜角桁（1 連目 62°40'01"、2 連目 67°18'33"）となった。ただし、曲線半径は張出しスラブの形状により考慮することとして桁は直線とした。

2.2 構造形式の計画

下部工は、河川の阻害等を考慮して、河川内には橋脚 1 基のみを建設することとし、両側の堤体部に建設する橋台、橋脚との位置関係により、本橋梁は桁長 32.4 m、

表-1 鉄道橋 PRC 桁一覧

No.	線 名	構 造	桁 長 (m)	桁 高 (m)	連 数
1	桜井線	単線 2 主 T 桁	17	1.1	1
2	東北新幹線	複線 2 室箱桁	25	2.2	8
3			25	2.35	3
4*			30	2.6	2
5	埼京線	単線 2 主 T 桁	19.8	1.6	8
6			17.5	1.6	8
7*	函館本線	複線 2 室箱桁	30	2.6	2
8			19.4	1.6	7
9	奥羽本線	単線 2 主 T 桁	17.5	1.6	8
10			25	2.3	5
11	奥羽本線	単線 1 室箱桁	25	2.3	2
12			16.6	1.5	1
13*	福塩線	単線 1 室箱桁	25.8	2.2	2
(本橋) 14*			32.4	2.75	2

注) アウトケーブル方式（*印）の場合の PC 鋼材量、軸方向引張鉄筋量は、No. 4, 7 は 12 T 12.7—8 本、693.432 cm²（複線分）、No. 13 は 12 T 12.7—2 または 3 本、476.52 cm²、No. 14 は 12 V 12.7—4 本、330.152 cm² である。

*（財）鉄道総合技術研究所線路構造研究室

** JR 西日本広島工事事務所三原工事区

*** 興和コンクリート（株）大阪支店

スパン 30.86 m を 2 連架設することとした。

また、架設工法については、建設省との協議の結果、支保工形式とすれば特に問題はなく、また、地盤が良好なため基礎杭等が不要であり不経済とはならないことから、支保工による場所打ち形式とした。

スパン 25~30 m 程度で場所打ちの場合、従来は PC あるいは RC の箱形桁を用いるのが一般的であった。RC 桁を用いた場合、経済的となるが、過去の施工実績によれば、桁下面に顕著な曲げひびわれを生じた例も報告されている。また、国鉄では、設計理論の検討、模型実験等を経て、現在までに表-1 (本橋を含めて) に示す PRC 桁を施工しており、桁の応力度状態、ひびわれ、変形挙動等について実橋での測定を実施している。

以上より、経済性、施工実績等を考慮して、本橋梁は、RC 桁の曲げひびわれを制御することを目的とした PRC 箱形桁を採用することとした。

2.3 設計の基本

箱形桁のウェブ幅は、PC 鋼材をウェブ内に配置する通常の方式とした場合、コンクリートの打込み等の施工性を考慮して決める場合が多く、桁のスパン中央部付近で 25~35 cm 程度としている。本橋梁では、PC 鋼材を箱桁内空部に配置するアウトケーブル方式として、ウェブ幅を減少させることにより桁自重の軽減をはかることとした。なお、本橋梁のウェブ幅は、鉄筋の配置、コンクリートの打込みを考慮のうえスパン中央部付近で 20 cm とした。

本橋梁の設計は、腐食に対する付近の環境条件が厳しくないことから、全死荷重作用時において有害とされない程度の曲げひびわれの発生を許容するものとし、コンクリートの引張側を無視して軸力のある RC 部材として設計した。なお、曲げひびわれ幅を制御するため、全死荷重作用時の軸方向引張鉄筋の応力度を 1000 kgf/cm² 以下に制限することとした。また、全設計荷重作用時の曲げひびわれ幅は 0.2 mm に制限することとした。

次に、PC 鋼材量と軸方向鉄筋量の最適な組合せを決定するため、PC 鋼材 (12 V 12.7) を 3~8 本配置した 6 ケースについて、以下の検討を行った。

- ① 全死荷重作用時の引張鉄筋応力度を 1000 kgf/cm² に制限 (曲げひびわれ幅を制限) する PC 鋼材量および引張鉄筋量の検討 (偏心軸力のある RC 部材)
- ② 終局限界状態での所要の破壊安全度を確保するのに必要な PC 鋼材量および引張鉄筋量の検討 (付着のない PC 部材)

図-1 に PC 鋼材本数と所要軸方向引張鉄筋量の検討

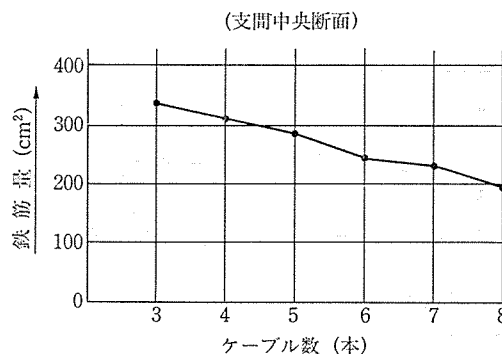


図-1 PC 鋼材本数と引張鉄筋量の関係

結果を示す。これらは、いずれも②の検討ケースにより定まったものである。この検討の結果、主として PC 鋼材と軸方向引張鉄筋量の組合せによる経済性とコンクリートの曲げひびわれ幅から、PC 鋼材本数を 4 本とした場合が最適であると判断した。

3. 設 計¹⁾

本橋は、アウトケーブルを使用した PRC 箱形単純桁 (支間 30.86 m × 2 連) である。

桁の一般図・断面図を図-2 に示す。

設計条件を表-2(a), (b) に示す。

以下に、設計で留意した事項の概要を示す。

3.1 破壊の検討

破壊の検討の曲げ耐力は、PC 鋼材のプレストレスは桁本体と同様の挙動をせず軸力としてのみ有効と考えられるので、偏心軸力が作用する RC 構造として設計した。

せん断の検討は、通常の PC 桁と同様の方法でせん断耐力の照査を行った。

3.2 ひびわれの検討

(1) 曲げひびわれの検討

PRC 桁の実橋測定²⁾によると、PRC 桁にひびわれが発生するとコンクリートの乾燥収縮等によりひびわれ幅が大きくなるので、常時作用している死荷重等に対してひびわれが発生しないようにするため、全死荷重作用時のコンクリートの縁応力度を 24 kgf/cm² に制限した。

また、全死荷重作用時にひびわれが発生してもひびわれ幅が耐久性上有害とならないように、全死荷重作用時に鉄筋の引張応力度を 1000 kgf/cm² 以下とした。

設計荷重作用時の曲げひびわれの検討は、曲げひびわれ幅を 0.2 mm 以下とした。曲げひびわれ幅の算定は、土木学会コンクリート標準示方書 (昭和 61 年制定) によった。

(2) せん断およびねじりの検討

せん断ひびわれの発生する確率が小さくなるように、

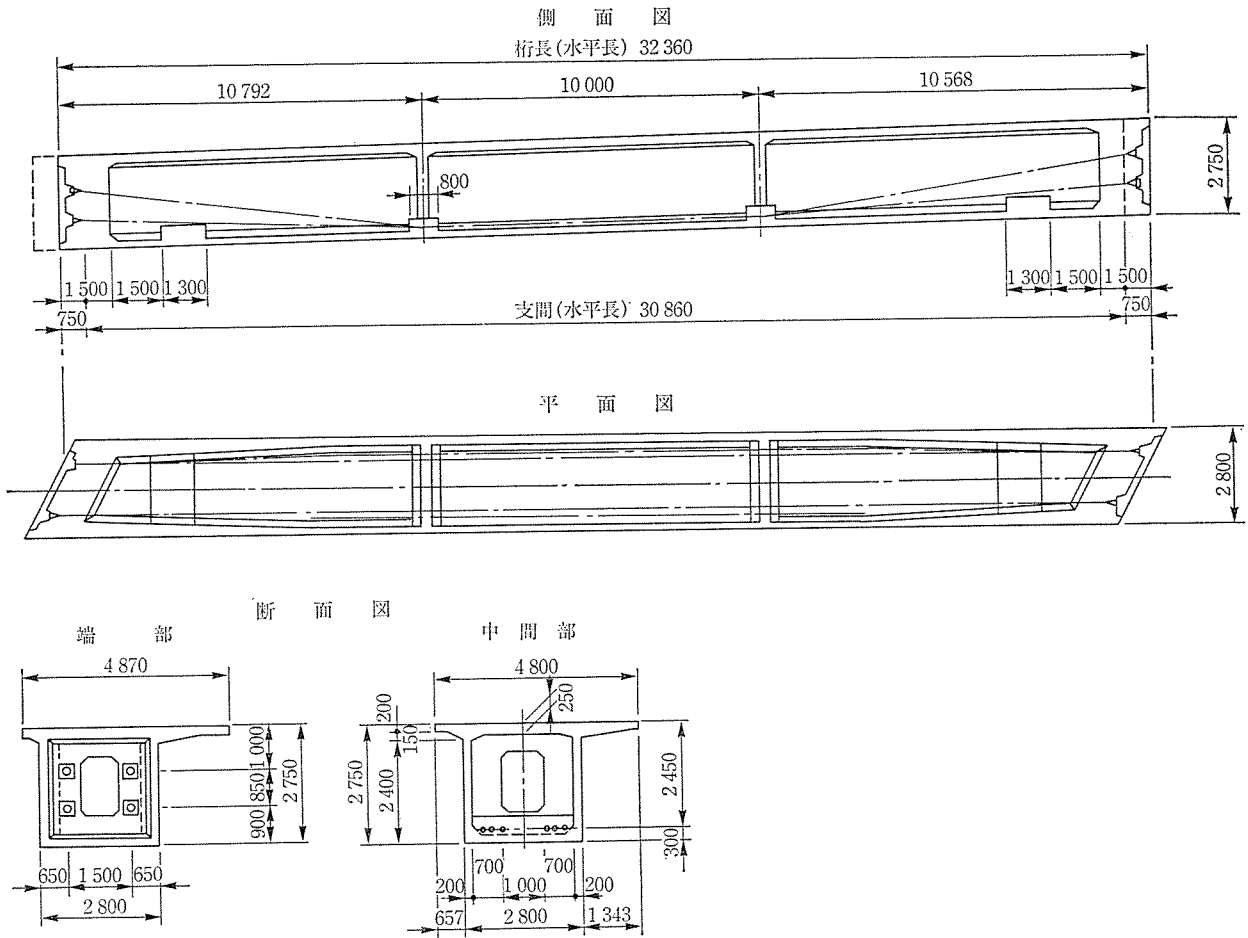


図-2 一般図

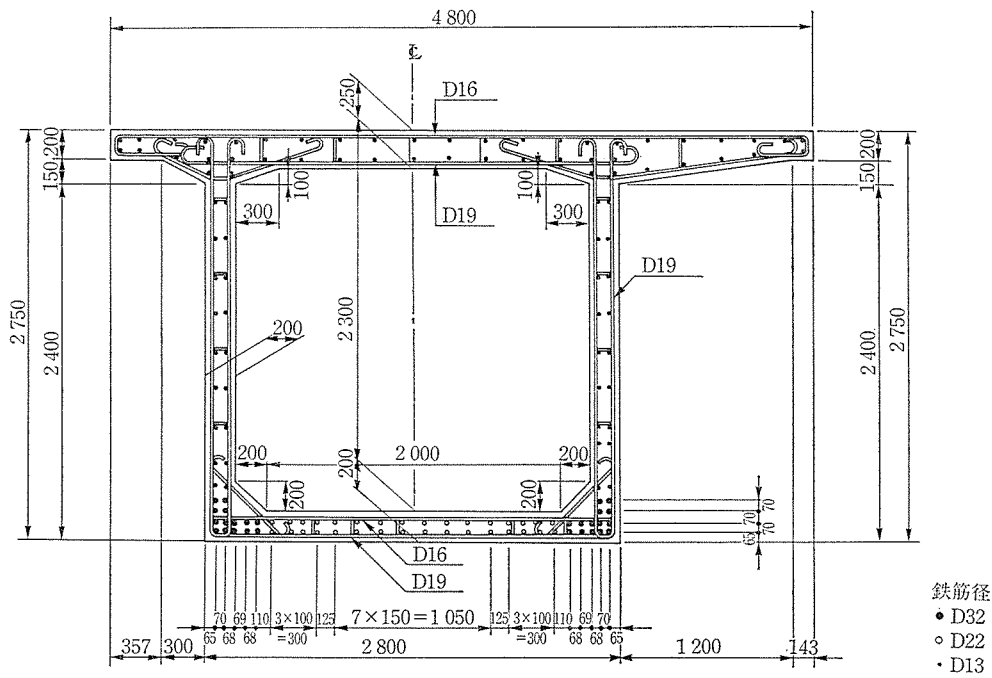


図-3 断面寸法および鉄筋配置

表-2(a) 設計条件

桁長	32.360 m
支間	30.860 m
斜角	67°18'30"
形式	PRC アウトケーブル方式 (箱形断面)
幅員	全幅 4800 m (単線+橋側歩道)
軌道形式	有道床構造
列車荷重	KS-14
設計水平震度	$K_h=0.15$
曲線半径	400.000 m
衝撃係数	0.338

表-2(b) 設計条件 (材料強度および許容応力度)

工種	種別	単位	主桁		
コンクリート	クリープ係数	—	2.6		
	乾燥収縮度	—	20×10^{-5}		
	粗骨材の最大寸法	mm	20		
	強度	設計基準強度	kg/cm ²	350	
		プレストレス導入時	kg/cm ²	300	
	許容応力度	プレストレス導入直後	kg/cm ²	160	
		圧縮引張	kg/cm ²	—	
	許容応力度	永久・設計荷重用時	kg/cm ²	125	
		圧縮引張	kg/cm ²	—	
		せん断力	kg/cm ²	19.5	
	せん断力とねじり	kg/cm ²	25.3		
鉄筋	許容応力度	せん断力またはねじり	kg/cm ²	12	
		せん断力とねじり	斜引張 (参考)	kg/cm ²	15.5
	ひびわれ幅	永久荷重用時	mm	0.1	
		設計荷重用時	mm	0.2	
	地覆, 高欄コンクリート設計基準強度	kg/cm ²	240		
PC鋼材	引張強度	kg/mm ²	190		
	降伏点応力度	kg/mm ²	160		
	許容応力度	緊張作業中	kg/mm ²	145	
		プレストレス導入直後	kg/mm ²	133	
		設計荷重時	kg/mm ²	114	
レラクセーション	%	5			
鉄筋	SD-35	降伏強度から定まる基準許容応力度	kg/cm ²	2000	
		ひびわれを考慮する場合の許容応力度	kg/cm ²	1000	
		腹鉄筋の計算をする場合	kg/cm ²	3500	

表-3 中央断面応力度

種別	材料位置		コンクリート		鉄筋 (kg/cm ²)	PC鋼材 (kg/mm ²)
	上縁 (kg/cm ²)	下縁 (kg/cm ²)	重位	心置	重位	心置
全断面有効	プレストレス導入時	プレストレス自重作用時	-6.4	57.7	—	112.3
			25.1	10.4	—	—
有効プレストレス作用時	全死荷重用時	全設計荷重用時	-5.6 (41.7)	51.3 (-19.1)	—	99.8
			(74.6)	(-69.2)	—	106.6
RC部材	全死荷重用時	設計荷重用時	41.6	—	393	—
			74.0	—	1573	—

設計荷重用時に斜引張応力度を制限し、かつスターラップの引張応力度を 2000 kgf/cm² 以下とし、通常の RC 桁に準じた設計を行った。

3.3 疲労の検討

アウトケーブル方式は、PC 鋼材を部材の断面外に配置するために PC 鋼材とコンクリートの間に付着がなく、列車荷重による応力度の変動が PC 鋼材全長に分散し応力変動の幅が小さくなる。

本橋においては、PC 鋼材の有効プレストレス³⁾ 99.8 kgf/cm² に対して、列車荷重による PC 鋼材の応力度の増加量が 7.0 kgf/mm² と小さい計算結果となり、疲労の影響は無視できる程度と考えられる。

したがって、疲労の影響については、引張鉄筋についてのみ検討を行った。

引張鉄筋の疲労の検討は、通常の RC 構造と同様に、列車荷重の大きさと載荷回数とから疲労を考慮した許容引張応力度 (1900 kgf/cm²) を用いて検討した。

3.4 ケーブルおよびケーブル配置

アウトケーブルには、PC 鋼より線 12 V 12.7 でグリースとポリエチレンパイプで PC 鋼材を被覆し防食性を有したアンボンド鋼より線を用いた。

ケーブルは、スパン内の 2 箇所中間横桁を設け、そ

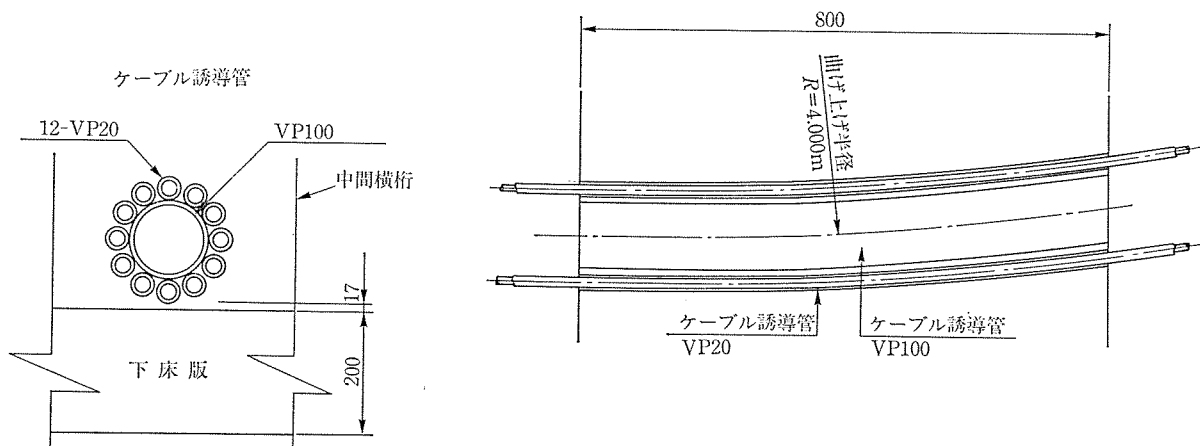


図-4 ケーブル誘導管

◇工事報告◇

の横桁の下部にケーブルを支持するための部材を設けて支持させる方式とした。支持点においては、ケーブル形状に折れを生じず、ケーブルが曲線変化となるように曲げ上げ部内のコンクリートにポリエチレン製のケーブル誘導管を配置した(図-4)。

ケーブルの緊張方法は、桁施工上の制約条件から片引

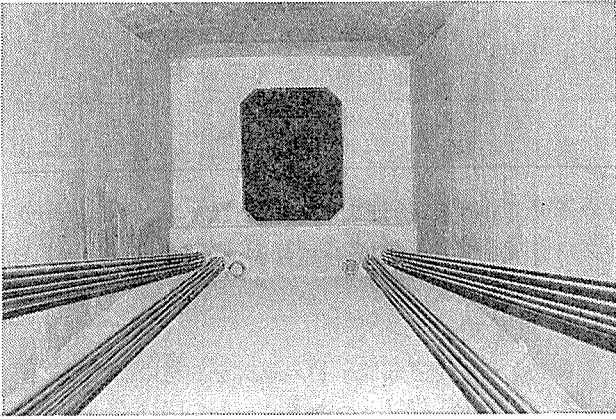


写真-2

(内側の2本は予備ケーブル用ケーブル誘導管である。)

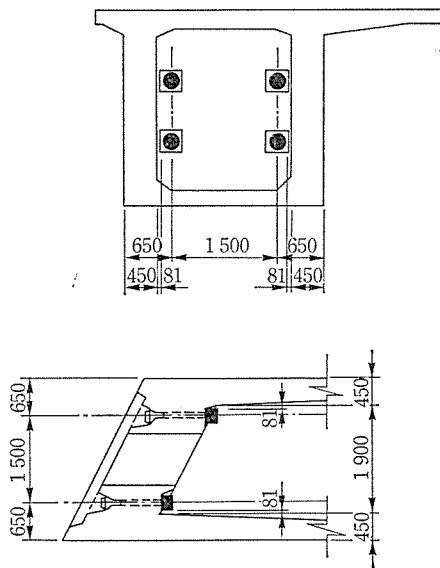


図-5 端部定着装置取付け位置図

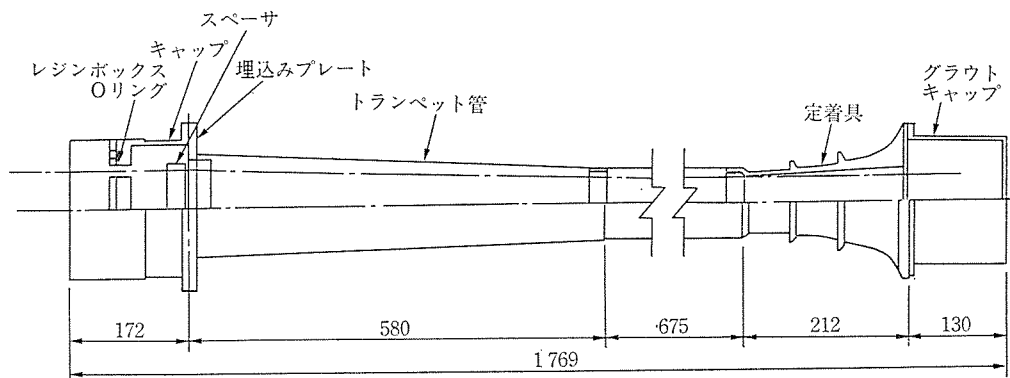


図-6 定着装置

きとした。なお、下スラブ上面には、ひびわれが大きくなった場合を考慮し、予備ケーブルを配置できるように定着部ブロックを設けている。

3.5 定着具

PC 鋼材は端横桁内に定着した(図-5 参照)。

定着具付近の PC 鋼材は、定着するため被覆材(ポリエチレンパイプ)を除去しなければならない。したがって、被覆をしていない部分を防食する必要がある。

本橋では、図-6 に示すような装置を用いた。定着部の横桁内に定着具に接続したトランペット管を配置し、トランペット管内には PC 鋼材が乱線しないように間隔保持材を配置してある。

定着区間(端横桁内)は、トランペット管端部および定着具端部の両端にキャップを取り付け、その間にグリースを充填し鋼材を防食する方法を用いた。

4. 施工概要

施工順序は図-7 に示したとおりである。ここでは、このうちの鉄筋組立て、コンクリートの配合・打込み、定着部の施工等特色のある点についてのみ述べることにする。なお、施工は終点方径間、起点方径間の順に行った。

4.1 鉄筋および型枠の組立て

本橋梁は、PC 鋼材を箱桁内空部に配置するアウトケーブルとしてウェブ厚を 20 cm としているため、下床版とウェブの交差部(ハンチ部)に比較的太径の軸方向鉄筋 D32 を集中した形で配置することとなった(図-3 参照)。この鉄筋の継手はガス圧接で行ったが、圧接位置や圧接による短縮量を考慮して、予め配筋の計画書を作成して配筋を行った。

また、端横桁の主ケーブル定着部および中間横桁のケーブル曲げ上げ部は、集中応力が作用することから補強鉄筋が密に配置されている。したがって、主鉄筋、スターラップ、配力筋および補強鉄筋の組立て順序を十分に考慮して配筋を行う必要があり、事前の検討を十分に行

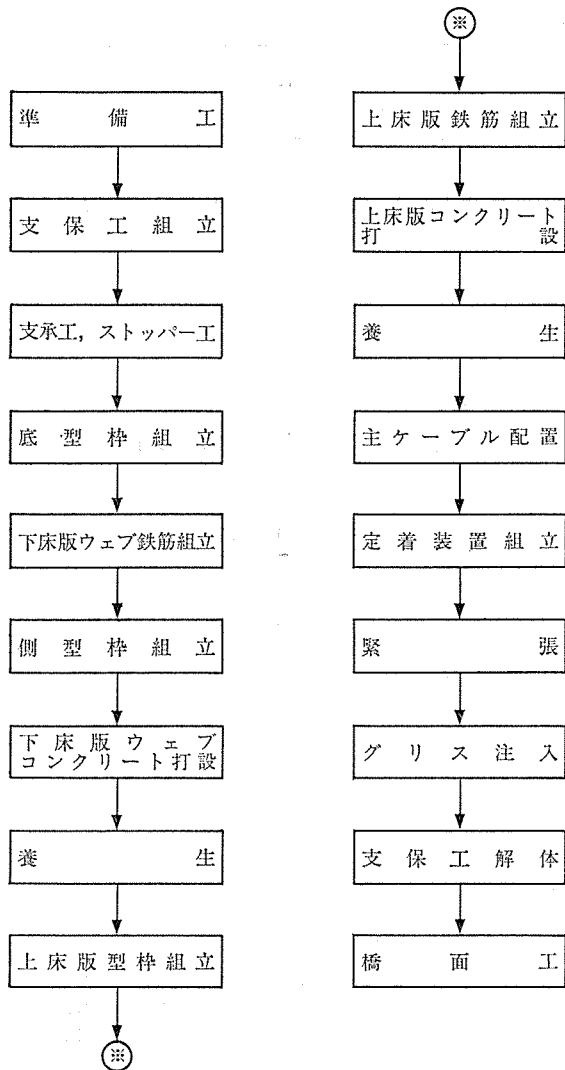


図-7 施工流れ図

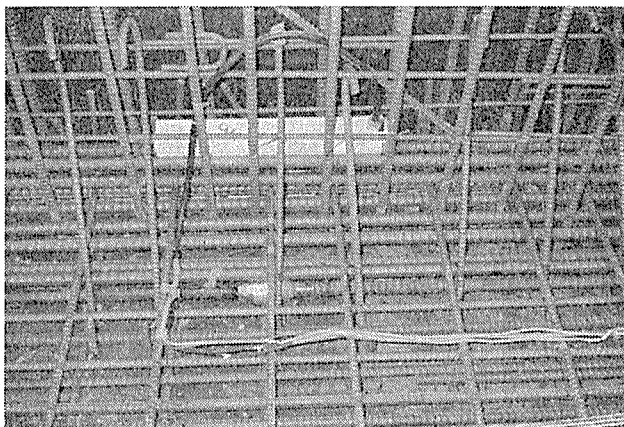


写真-3

って配筋した。

桁端部の側型枠の組立ては、施工スペースを考慮して、終点方径間は外型枠、内型枠の順に、起点方径間はその逆の順序で組立てを行ったが、本橋の場合アウトケーブルとして特殊な定着具を用いたため、外側、内側ともに座掘り型枠（箱抜き用の型枠）を必要とした。本橋

側面図

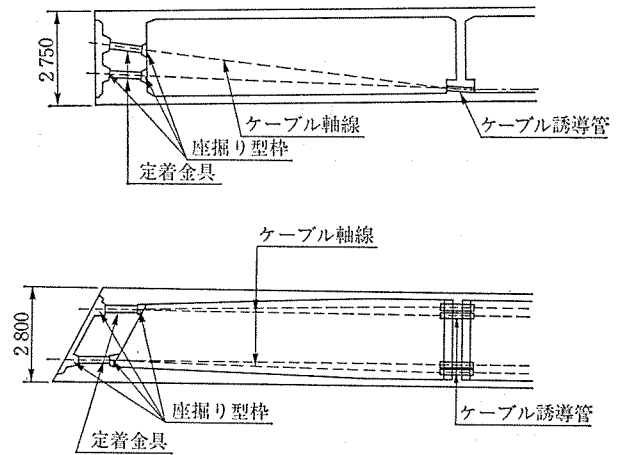


図-8 側面図

は斜角桁でもあり、ケーブルの曲げ上げ角度との関係で特に内側の座掘り型枠の製作にあたっては、その形状寸法について事前に十分な検討を行った。また、型枠組立ての際には、後で挿入するケーブルの直線性を確保しておくことが重要であることから、取付け角度・方向の精度を確保して堅固に固定しておかなければならず、この作業にもかなりの時間を要した（図-8 参照）。

4.2 ケーブル曲げ上げ部の誘導管の加工および設置

中間横桁部のケーブル曲げ上げ部の誘導管（図-4 参照）は、PC 鋼材 12 本を平行に配置するため、各管の曲げ加工形状が異なっており、所定の曲げ半径が得られるように製作精度に十分配慮した。中央の VP 100 の変形を防止するため、その中に予め無収縮モルタルを打設しておいてから設置した。設置に際しては、補強鉄筋や下床版天端との純間隔が狭いこと、中間横桁の浮き型枠に固定すること等により、設置位置、方向性の確保および固定方法に十分な配慮を必要とした。

4.3 コンクリートの配合

構造寸法、配筋を考慮したうえで、打込み方法、締固め等の計画に基づいて、以下の条件を満足するように、予備試験、試験練りを行って配合を決定した。

- ① 硬化熱によるひびわれ発生を極力抑制するため、普通セメントを使用し、単位セメント量をできるだけ少なくすること。
- ② 部材厚が薄く（下床版、ウェブとも 20 cm）、下

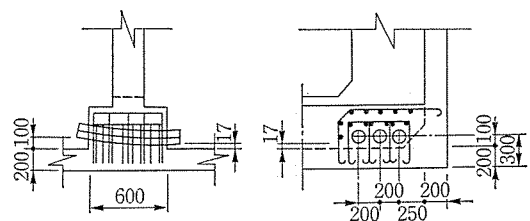


図-9 ケーブル誘導管配置図

表-4 試験練り記録

種類	W/C	S/A	C	W	S	G	AE	Sl	Air	σ_7	σ_{28}
①	39.9	37.5	467	186	635	1074	4.983	9.0	2.1	464	—
②	39.9	41.0	389	155	753	1100	4.151	0.8	2.8	366	477
③	39.9	41.0	389	155	753	1100	3.890	12.2	3.7	358	471
④	39.9	41.0	389	155	753	1100	3.890	18.0	—	—	—

設計基準強度：350 kg/cm²

種類①～④は次のとおり

- ①：セメント→早強ポルトランド 混和剤→ボゾリス No. 70
 - ②：セメント→普通ポルトランド 混和剤→ボゾリス No. 70
 - ③：セメント→普通ポルトランド 混和剤→ボゾリス SP-8 N (高性能 AE 減水剤)
 - ④：セメント→普通ポルトランド 混和剤→ボゾリス SP-8 N 流動化剤→NP-80 (後添加)
- ※ ④は流動化剤投入 30 分後のスランプ変化のみを測った (Sl→14 cm)。

床版ハンチ部に鉄筋が密に配筋されており、また、ケーブル曲げ上げ部（ケーブル誘導管部）は特に確実に締め固める必要があること等から流動性が良いこと。

- ③ ウェブ部分は、打込み高さが比較的高いため材料分離を生じないこと、また、浮き型枠部に対しては打込み締固め後短時間で流動性を減じること。

試験練りは、セメントおよび混和剤の種類を変えて表-4 に示す 4 種類の配合について行った。その結果、上記の条件に最も適合した、普通ポルトランドセメント、高性能 AE 減水剤を用いた配合（表中の③）を採用した。

4.4 コンクリートの打込み

コンクリートの打込みは、下床版・ウェブ部分および上床版部分の 2 回に分けて行った。ウェブの高さが高いため、材料分離を防ぐため、下床版ハンチ部の打込みは、ハンチ部のやや上方にコンクリート投入口を設けて、その上方の部分は極力ポンプの吐出口を打込み面近くまで下げて打ち込んだ。締固めは内振バイブレーター（棒型 ϕ 46 mm, ϕ 32 mm）を用い、下床版ハンチ部には外振バイブレーターを併用した。打込み速度は約 11

表-5 打設記録（下床版、ウェブ）

昭和 63 年 1 月 21 日 2 月 18 日

	採取車	スランプ		σ_7	σ_{28}
		搬入直後	流動化剤投入後		
昭 63.1.21	1 台目	12.7	18.6	355	466
	3 台目	11.6	15.9		
	5 台目	10.6	15.8		
	17 台目	12.9	18.0		
	9 台目	11.7	18.6		
	11 台目	11.0	18.3		
昭 63.2.18	13 台目	11.4	19.1	344	458
	1 台目	13.5	20.3		
	3 台目	14.0	20.9		
	5 台目	12.9	20.0		
	7 台目	13.4	19.0		
	9 台目	12.5	19.6		
	11 台目	13.6	18.4	344	471
	13 台目	13.2	19.2		

表-6 圧縮強度試験（プラント）

		(kg/cm ²)					
打設日		昭 63.1.21	昭 63.1.21	昭 63.2.6	昭 63.2.18	昭 63.2.18	昭 63.2.27
σ_2	①	135	—	—	—	—	138
	②	131	—	—	—	—	136
	③	138	—	—	—	—	140
	平均	135	—	—	—	—	138
σ_7	①	349	354	339	350	337	345
	②	357	341	344	339	349	340
	③	359	337	346	339	345	349
	平均	355	344	343	343	344	345
σ_9	①	—	—	317	—	—	—
	②	—	—	325	—	—	—
	③	—	—	316	—	—	—
	平均	—	—	319	—	—	—
σ_{28}	①	471	457	467	461	469	472
	②	465	455	471	462	471	474
	③	461	463	476	469	472	469
	平均	466	458	471	464	471	472

打設日 63.1.21 は、生コン車 3 台目、11 台目より、また、打設日 63.2.18 は、生コン車 5 台目、11 台目より採取したものをそれぞれ行った。

表-7 養生温度

打設日	打設箇所	外気温 (°C)	シート内温度 (°C)
昭 63.1.21	P ₁ ~P ₂ 下床版, ウェブ	6/10	10/16
昭 63.2.6	P ₁ ~P ₂ 上床版	-3/9	9/15
昭 63.2.18	A ₁ ~P ₁ 下床版, ウェブ	-3/6	6/11
昭 63.2.27	A ₁ ~P ₁ 上床版	1/7	10/24

外気温およびシート内温度は自記温度計より最低値、最高値を読んだ。

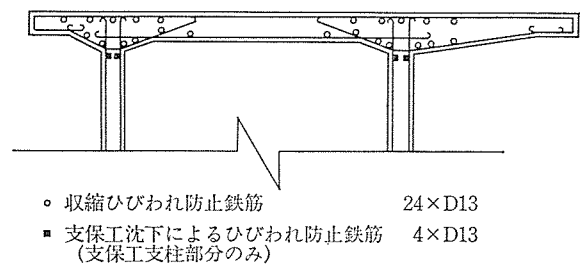


図-10 ひびわれ防止鉄筋配置図

m³/h であった。

コンクリートの打込み時期が冬期であったため、ジェットヒーター（サーモスタットで温度管理）を用いて保温養生、保湿養生を行い、自記温度計に記録した。打設記録、圧縮強度試験および養生温度の記録を表—5, 6, 7に示す。なお、支保工沈下によるひびわれならびに打継ぎ部分の収縮ひびわれを防止するため用心鉄筋を図—10のように配置した。

4.5 PC 鋼材配置および定着装置の組立て

PC 鋼材はフレシネー 12 V 12.7 で、アンボンドのパラレル配置であり、箱桁内では露出して配置するため、表面をポリエチレンで被覆している。配置はまず PC 鋼材を箱桁内に取り込み、1本ずつケーブル誘導管に通し、端部の定着装置の部品を順次通しながらグリスダクトより外側に出して緊張用定着具にセットした。セットする際は、ケーブルによじれを生じないように1本毎に番号を付けておき順次下段より配置した。ケーブル表面の被覆ポリエチレンは、緊張時の余長(65 cm)、緊張による伸び(約 20 cm)、余裕(約 10 cm)を考慮して鋼材に損傷を与えないように慎重に除去した。

4.6 緊張作業

緊張は、ケーブルの付着がないため摩擦によるロスがかなり小さいこと、施工スペースが確保できないことによりすべて片引きで行った。

アウトケーブルであるため、一般に緊張前の PC 鋼材にはたるみ、張力の不均等があるが、緊張前に1本毎に張力調整機により 200 kg の力で引張ることにより張力の均一化をはかった。

緊張は上段、下段の順に行い、左右2本のケーブルを同時に均等に緊張した。緊張時には、ジャッキ、定着装置、曲げ上げ部の異常の有無を確認しながら行った。緊張力と伸び量の関係は、ほぼ予想どおりの値であった。

4.7 定着部保護のためのグリス注入

緊張完了後ケーブルの余長を切断して定着装置を完全に組み立て、レジンをレジンボックスに注入した。キャ

ップとレジンボックス、レジンボックスと PC 鋼材の間は、粘度を使用して予めシールした。また、レジンは速乾性であるので、主硬化剤の混合比を調節して可使用時間に注意しながら注入した。

レジンの硬化後にグリスの圧入を行った。圧入に際してはエアの混入がないように注意し、ホースの確認、注入器の作動音に注意しながら連続的に圧入してエンドキャップの流出孔よりグリスが流出するのを確認した後、流出孔を塞いで作業を完了した。なお、グリスの稠度は温度による影響が大きく、したがって圧入時間もグリスの温度の影響を受ける。本橋は冬期の施工であったため、グリスを温水のなかに入れておき保温した状態で圧入を行った。本橋での1箇所当りの圧入時間は約 30～50 分を要した。

5. あとがき

本橋梁は、昭和 62 年 10 月から 63 年 3 月にかけて PRC 桁の施工が行われ、その後、隣接するトンネル内の軌道工事、切換え地点の路盤工事、列車試運転等の準備を行って供用を開始する予定である。

アウトケーブルを使用した PRC 桁は、その施工例はまだそれほど多くないため、その挙動を知るため芦田川橋梁では、施工途中の内部鉄筋のひずみ、桁のそり、縮み等、および工事用車輛、道床バラスト等の死荷重載荷時のひずみ、桁のたわみ等の測定を行っている。これらについては稿を改めて発表する予定である。

参考文献

- 1) 渡辺, 小林, 池田: アウトケーブルを用いた PRC 桁の設計, 土木学会第 43 回年次学術講演会概要集, 昭和 63 年 10 月
- 2) 石橋, 金森: 鉄道橋における PRC げた, コンクリート工学, Vol. 25, No. 7, July 1987
- 3) 猪股: 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, 昭和 59 年 3 月

【1988 年 11 月 17 日受付】