

「先端吊移動式作業車を用いた P C斜張橋施工法の研究」

A NEW CONSTRUCTION METHOD OF CABLE-STAYED CONCRETE BRIDGES
USING STAY CABLES AS TEMPORARY SUPPORTS

*

**

今井 義明 田中 茂義

By Yoshiaki Imai and Shigeyoshi Tanaka

A new construction method of cable-stayed concrete bridges has been developed. This is a rational cantilever method which utilizes the stay cables as temporary supports during erection. According to an ordinary cantilever method, the deck between stay cables is divided into two or three blocks ; after the completion of every block, the stay cables are installed and tensioned to support the deck. According to the new method, however, the deck between cables is erected at a time by using a new travelling form. This method provides the following merits : shortening of erection time of deck and decreasing of tendon volume in deck.

1. はじめに

我国で、P C斜張橋は、10年ほど前から次第に増加し、現在では、主径間長が 200mを越す長大橋の代表的な構造形式として認知されるに至っている。

長大P C斜張橋の架設は、当然カンチレバー施工法によるが、P C連続箱桁橋やラーメン橋で実施されている従来施工法を用いたものが大半である。即ち、斜ケーブル間の主桁を2～3ブロックに分割し、1ブロック長が2.5m～4.0mのブロックをカンチレバー状態で順次施工して、斜ケーブル定着ブロックを施工後、新しい斜ケーブルを装着緊張する架設法である。しかしながら、斜張橋は、主桁を塔から斜ケーブルで吊り上げた構造であり、その構造特性を利用したより機能的な施工法が考案され、実用され始めている。斜ケーブル間を1ブロックとし、塔から本設または仮設斜ケーブルで移動式作業車の先端を支持した状態で、コンクリートを打設する施工法である。工期が短縮するのみでなく、架設時に発生する断面力が小さくなり、主桁内P C鋼材量が減少する利点がある。

本稿では、この先端吊工法を4工法に大別し、その特徴を分析するとともに、施工時の構造上の優位性を証明する。また4. では、実橋への応用例について述べる。

2. 先端吊工法

先端吊工法は、本設または仮設の斜ケーブルを利用して移動式作業車の先端を支持した状態で、斜ケーブル間の主桁部分を一度に製作する工法である。斜ケーブル間隔は、カンチレバー施工の場合、普通6～10m

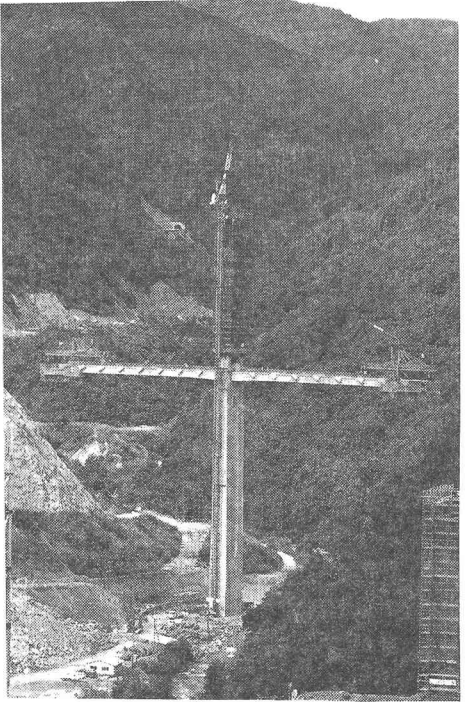
* 工修 大成建設株式会社 土木部土木設計部設計長 (〒163 東京都新宿区西新宿1丁目25番地1号)

** 大成建設株式会社 土木部土木設計部主任 (〒163 東京都新宿区西新宿1丁目25番地1号)

と考えられる。PC桁橋で従来行われていた施工法では、1ブロック長が2.5m～4.0m程度のため、斜ケーブル間の主桁を製作するのに2回～3回の繰り返し作業が必要となる。本工法によれば、工期を大幅に短縮できるとともに、新設する斜ケーブル間の主桁コンクリート重量を、先端吊斜ケーブルと既設コンクリート桁で支持された移動式作業車が負担するため、主桁架設時に発生する各部断面力は減少し、架設時に必要な主桁内PC鋼材量は減る。一方、移動式作業車は、1ブロック長が長い大型化するが、長大PC斜張橋の架設に本工法を適用すれば、工期短縮とPC鋼材量の減少の効果が大きく経済性の向上が期待できるのである。

現在までに考案された先端吊工法は、下記の4工法に大別できる。先端を吊る斜ケーブルが本設か仮設かという違いと、先端吊斜ケーブルの固定法の差により分類した。工法名は、特徴を一言で表わすように仮称した。

- 〔工法1〕 本設ケーブルによる移動式作業車先端吊工法 (SLT工法)
- 〔工法2〕 仮設ケーブルによる移動式作業車先端吊工法
- 〔工法3〕 プレキャスト部材先行架設工法
- 〔工法4〕 斜ケーブル定着部先行打設工法



写真－1 日中大橋

表－1 先端吊工法比較表

	工 法 1	工 法 2	工 法 3	工 法 4
工 法 名	本設ケーブルによる移動式作業車先端支持工法	仮設ケーブルによる移動式作業車先端支持工法	プレキャスト部材先行架設工法	斜ケーブル定着部先行打設工法
施 工 手 順	移動式作業車の支保工桁先端を本設の斜ケーブルであらかじめ支持し、主桁コンクリートを打設する。	移動式作業車の支保工桁先端を仮設の斜ケーブルであらかじめ支持し、主桁コンクリートを打設する。	斜ケーブル定着部を含む主桁の一部をプレキャスト部材とし、移動式作業車に緊結する。斜ケーブルを装着後、残りの主桁コンクリートを打設する。	斜ケーブル定着部を含む主桁の一部をまず移動式作業車上でコンクリート打設する。硬化後、支保工桁と緊結。斜ケーブルを装着し、残りの主桁コンクリートを打設する。
先端斜ケーブルの 種 類	本設ケーブル	仮設ケーブル	本設ケーブル	本設ケーブル
斜ケーブルの固定法（主桁側）	ロッドを継ぎ足し、移動式作業車に固定。コンクリート硬化後、主桁に盛替。	移動式作業車に固定	プレキャストコンクリート部材に固定。	定着部コンクリートの硬化後、固定。
従来工法と比較した工期	早 い	早 い	早 い	やや 早 い
施 工 例	・ 衛原大橋（日本） ・ 日中大橋（日本）	・ Pasco-Kennewick 橋（U.S.A.）	・ Rhein 橋（スイス）	・ 宇部カントリー橋（日本） ・ Penang橋（マレーシア）

2-1 本設ケーブルによる移動式作業車先端吊工法〔工法1〕

移動式作業車の先端を、製作する主桁ブロックに装着する本設斜ケーブルであらかじめ支持し、打設コンクリート荷重を分担する工法である。

1986年に完成した衝原大橋は、場所打ちカンチレバー施工法で架設された。図-1に、その移動式作業車の概略図を示す。本橋のように支保工桁は、一般に主桁の下側に配置される。本設斜ケーブルは、ロッドを継ぎ足して、ロッド先端で支保工桁を支持する。主桁コンクリートの硬化後、主桁内PC鋼材を緊張する。引き続き、斜ケーブル張力を支保工桁から主桁に移行するため、定着部の盛替えを行なう。

定着部の盛替え前には、斜ケーブル張力の水平分力が移動式作業車の支保工桁に作用するため、支保工桁後端を既設コンクリート桁に支持させ、水平分力の伝達を図る。

著者等は、上記工法をS L T (Suspended Long Traveller) 工法と名づけ、既に国内において2橋の実績を有する。

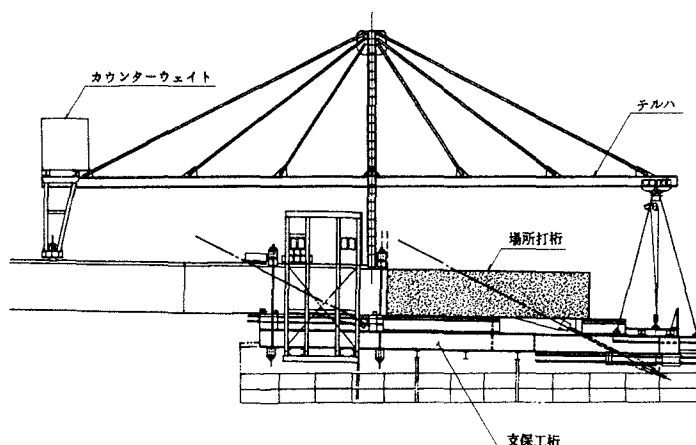


図-1
衝原大橋
移動式作業車

2-2 仮設ケーブルによる移動式作業車先端吊工法〔工法2〕

移動式作業車の先端を仮設ケーブルで支持し、主桁コンクリートの打設または、プレキャスト桁の接合を行なう工法である。

1978年に完成した Pasco-Kennewick橋 (U.S.A.) は、プレキャストカンチレバー施工法で架設された。図-2に、その移動式作業車の概略図を示す。この橋の移動式作業車の支保工桁は、主桁の上側にあり、プレキャスト桁の吊り上げ、接合時には、塔頭部の横梁から仮設ケーブルで先端を斜めに吊り上げた構造となる。仮設ケーブルによる支持中は、ケーブルの水平分力が支保工桁に作用するので、支保工桁の後端は既設コンクリート桁の上面切欠部に水平方向に固定されている。

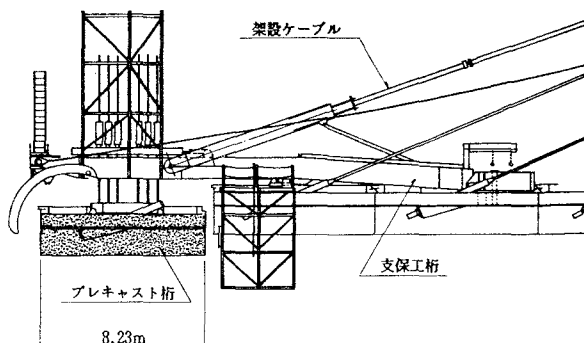
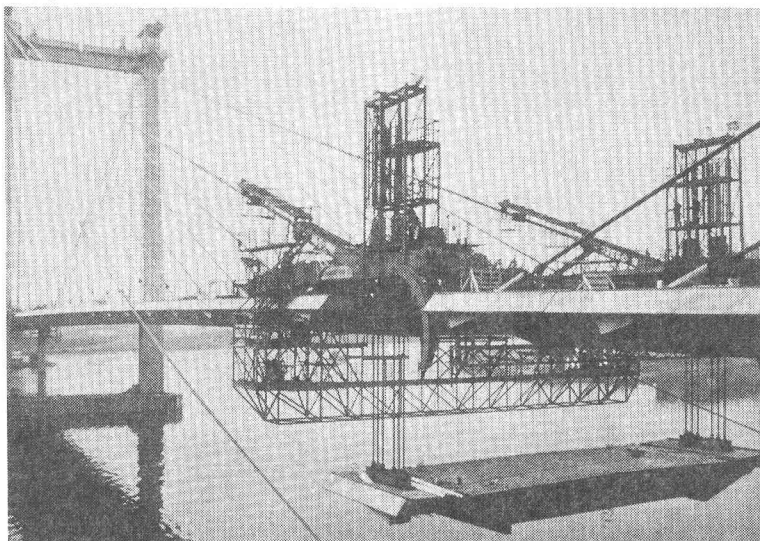


図-2
Pasco-Kennewick橋
移動式作業車

本工法では、先端吊ケーブルが仮設材であり、ブロック施工が進展し、移動式作業車が前進する度に仮設ケーブルを延長する必要がある。仮設ケーブル重量は相当重く、ブロック施工ごとにジャッキによる緊張、除荷を行なうため、構造、施工性に工夫を要する。前出の Pasco-Kennewick橋では、1ブロックごとに、両端に内ネジを切った仮設ケーブルを継ぎ足していたが、F. レオンハルト教授によれば、きわめて高価に付いたという。



写真－2

Pasco-Kennewick橋
移動式作業車

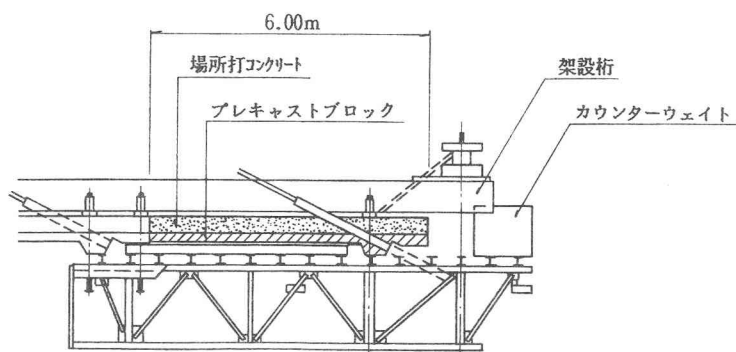
2-3 プレキャスト部材先行架設工法〔工法3〕

斜ケーブル定着部を含む主桁の一部をプレキャスト部材とし、カンチレバー状態の移動式作業車に載荷して、移動式作業車の支保工桁に緊結する。次に本設斜ケーブルを装着し、プレキャスト部材以外の主桁コンクリートを打設して一体製作する工法である。

1985年に完成した Rhein橋（スイス）に使用された移動式作業車の概略図を図－3に示す。斜ケーブル定着部をプレキャスト部材としたことにより、定着部の正確な配置が可能となった。また、既に十分な強度を有するため、斜ケーブルを装着して、引き続き残りの主桁コンクリートの打設ができる。

斜ケーブル張力の水平分力は、プレキャスト部材から支保工桁に伝達され、支保工桁後端で既設コンクリート桁に支持させる。

しかしながら、プレキャスト部材は重量が大きいため、移動式作業車の先端まで運搬し設置する設備が必要である。



図－3

Rhein橋
移動式作業車

2-4 斜ケーブル定着部先行打設工法〔工法4〕

斜ケーブル定着部を含む主桁の一部を、カンチレバー状態の移動式作業車上で先行打設する。コンクリート硬化後、先行部を移動式作業車の支保工桁と緊結する。次に本設斜ケーブルを装着し、残りの主桁コンクリートを打設する工法である。斜ケーブル張力水平分力の処理を含め、2-3 の〔工法3〕と類似しているが、すべて場所打コンクリートのため、重いプレキャスト部材の運搬は不要である。しかし、主桁コンクリートを2回に分けて打設するため、前出の3工法に比べて工期が長くなる。

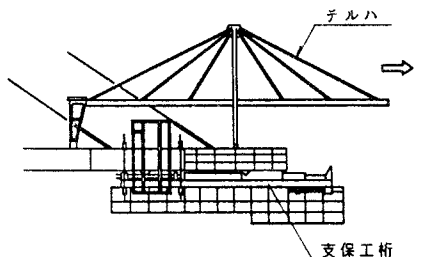
3. S L T工法の検討

3-1 S L T工法の特徴

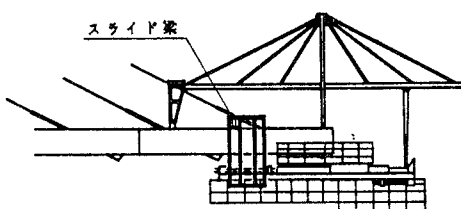
S L T (Suspended Long Traveller) 工法とは、2-1 で述べたように、本設ケーブルにより移動式作業車先端を支持する工法である。

図-4 に S L T 工法の移動式作業車の作業手順を示す。

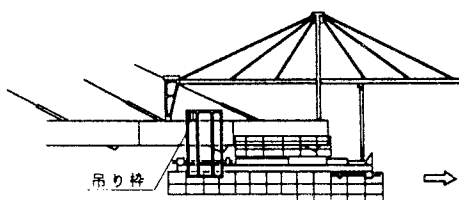
①斜ケーブル緊張後・テルハ移動



③斜ケーブルかわし作業



②テルハ据付後、支保工桁の移動



④支保工桁据付・斜ケーブルセット・コンクリート打設

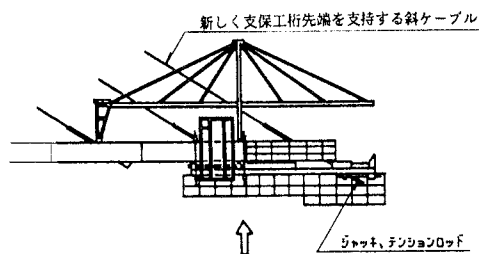


図-4 作業手順図 (S L T工法)

本工法で使用する移動式作業車は、支保工桁とテルハで構成される。支保工桁は、コンクリート打設時には、先端を斜ケーブルで支持され、後端を既設桁に P C 鋼棒で仮固定される。支保工桁と斜ケーブルとの連結は、斜ケーブルのソケットが主桁下端の定着部までしか届かないことから、斜ケーブルのソケットにプルロッドを継ぎ足し、支保工桁にナット定着する。

斜ケーブルで仮支持するため、支保工桁先端には定着治具、ジャッキ等を装備する。定着治具は、各張出しブロック毎に斜ケーブル定着点の位置、定着角度が変化するため、すべてのブロックに正確に対応できる可動定着構造が必要である。また、支保工桁に導入される斜ケーブルの水平分力は、支保工桁後方部分を既設ブロックに支持させねばならない。

支保工桁先端に装着した斜ケーブルには、若干の緊張力を導入する。4. で引用する衝原大橋では1本当たり50tの張力を導入した。この緊張力は、斜ケーブルのサグを小さくして見掛けの弾性係数の低下を防ぎ、支保工桁、既設コンクリート桁にあらかじめ正の曲げモーメントを発生させ、コンクリート打設後の曲げモーメントを緩和させることを目的とする。

コンクリートの打設・養生後、主桁内のPC鋼材を緊張し、斜ケーブル定着点を支保工から主桁定着部へ移行する。

一方、テルハは、支保工桁の移動に対する補助的機能を有し、チェーンブロックで支保工桁前方を吊る役割を担う。

3-2 従来工法との比較（対象・衝原大橋）

4. で述べる衝原大橋をモデルとして、SLT工法と従来工法を比較した。試算で用いた解析モデルと荷重を図-5に示す。対象とした解析モデルは、主桁のカンチレバー施工が主塔中心から61.65mまで終了した状態である。SLT工法の場合は⑧ブロック目の7.0m分を施工する状態であり、従来工法は斜ケーブル間隔を2分割して施工するため、⑬ブロック目の3.5m分を施工する状態である。ただし、主塔中心から61.65mまで終了し、斜ケーブルの装着、緊張が完了した状態の既設コンクリート桁の曲げモーメント分布は、斜ケーブル張力の調整により、斜ケーブル定着位置で支持された連続桁の曲げモーメント分布になっているものと仮定した。

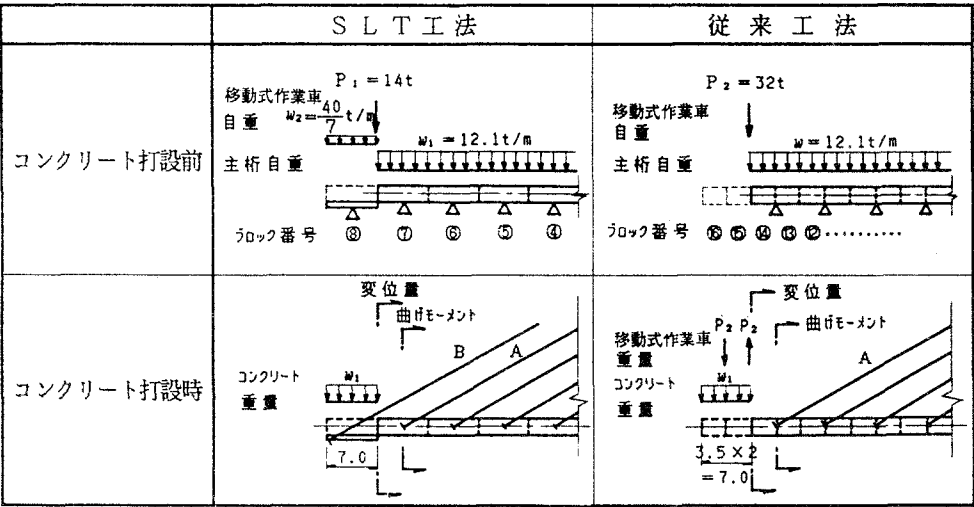


図-5 工法比較における解析モデルと荷重

新ブロックのコンクリートを打設した際の斜ケーブル張力、主桁曲げモーメント、変位量を比較したものが表-2である。移動式作業車重量としては、SLT工法が54t、従来工法が32tと仮定した。

計算結果から、既設コンクリート桁先端の斜ケーブル張力およびその定着部の曲げモーメントは、SLT工法では従来工法の約70%しか発生していない。また先端ブロックと既設ブロックの継目位置の変位量も60%以下に押えられている。この原因は、SLT工法の先端斜ケーブル（Bケーブル）に、Aケーブルの約60%の張力が作用し、7.0m分のコンクリート重量が、カンチレバー支持ではなく、両端支持に近い状態で支持されているからである。

3-3 従来工法との比較（対象・A橋）

図-6に示す3径間連続PC斜張橋を想定し、SLT工法と従来工法の2種類の架設法を用いた場合の主桁内縦方向PC鋼材量を比較するための試算を行なった。試算に用いた主な設計条件は次の通りである。

荷 重 自重、静荷重、活荷重 (TL-20)
主桁内PC力、斜ケーブル調整力、衝撃係数、クリープ、乾燥収縮、温度変化を考慮した。

材料強度 コンクリート

主桁 $\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$

塔 $\sigma_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$

主桁内PC鋼材 PC鋼棒 SBPR 80/105
PC鋼より線 SWPR 7A

斜ケーブル PC鋼線 JIS G3536 解説
(HiAmアンカーケーブル)

許容応力度 (d)日本道路協会編「道路橋示方書・同解説」I、Ⅲに従う。施工時は、設計時の1.25倍とするが、コンクリートの許容曲げ引張応力度は 15 kg/cm^2 と仮定する。斜ケーブルの設計時の許容応力度は、 $1/3 \sigma_{pu}$ (σ_{pu} : 引張強度)とする。

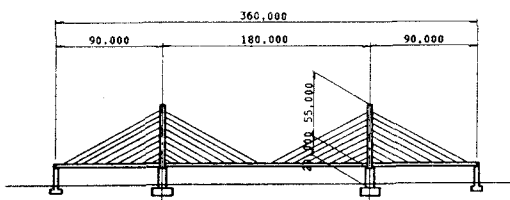
主桁での斜ケーブル定着間隔は8.0 mで、斜ケーブル断面積は、両工法とも同じである。移動式作業車重量はSLT工法の方が約1.7倍重い。

試算結果を表-3に示す。主桁内PC鋼材は、架設時に必要なPC鋼材（1次鋼材）としてPC鋼棒を使用し、完成系の荷重に対して、PC鋼より線を用いた。両工法では、架設時の曲げモーメント分布が異なり、1次鋼材の配置方法に違いがあるが、主桁内縦方向PC鋼材量の合計は、SLT工法の場合、従来工法の約70%となった。また、斜ケーブル定着間隔8 m分の工期も、従来工法の2/3に短縮された。

表-2 SLT工法と従来工法の比較表

比較項目			SLT工法	従来工法	SLT工法 従来工法
斜 ケ ー ブ ル 張 力 (t)	Aケーブル	打設前	197.9	268.5	0.696
		〃時	49.4	87.0	
		合 計	247.3	355.5	
	Bケーブル	打設前	86.9	—	—
		〃時	66.0	—	
		合 計	152.9	—	
Aケーブル定着点 曲げモーメント (t・m)		打設前	-85.2	-163.9	0.727
		〃時	-307.6	-376.7	
		合 計	-392.8	-540.6	
ブロック間継目 変 位 量 (cm)		打設前	0.0	0.0	0.563
		〃時	12.0	21.3	
		合 計	12.0	21.3	

側面図



主桁断面図

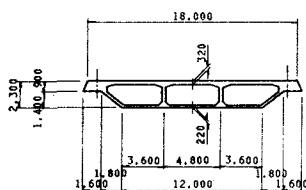


図-6 A橋一般図

表-3 A橋におけるSLT工法と従来工法の比較

		SLT工法	従来工法
主桁内縦方向PC鋼材	PC鋼棒 SBPR 80/105	92 t	156 t
	PC鋼より線 SWPR 7A	59 t	64 t
移動式作業車重量		308 t	185 t
工期（斜ケーブル間8.0 m分）		19日	12+12+3=27日

4. 先端吊工法の実橋への適用

衝原大橋は、神戸市に建設された呑吐ダムの湖面橋で、我国で初めて先端吊工法を採用したPC斜張橋である。以下では、衝原大橋を例にSLT工法を用いる場合の施工時計算法及びその実測値について述べる。

一般図を図-7に示す。橋長174.0m、スパン86.3mの2径間連続PC斜張橋で、主桁は総幅員6.36mの2主桁断面である。

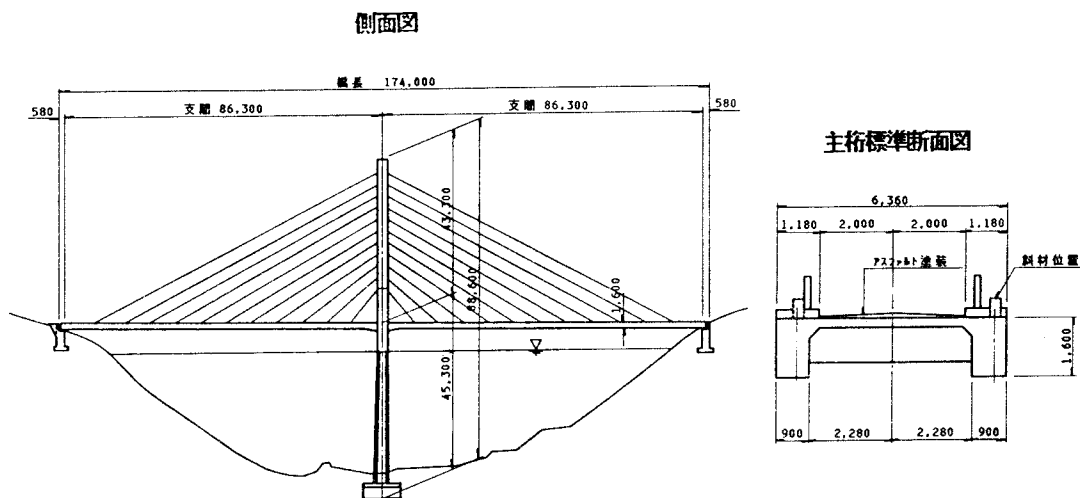


図-7 衝原大橋一般図

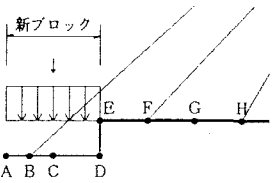
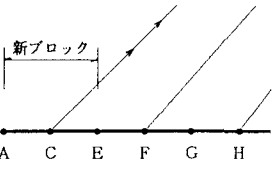
PC斜張橋のカンチレバー施工時には、全施工ステップにおける主桁のレベル及び斜ケーブル張力の確認が必要であり、常時、計算値を把握しておかねばならない。通常、各部材の断面力や温度補正值も含めて、現地に設置したパーソナルコンピューターにデータを蓄積し、随時、データを取出し、実測値と計算値の比較照合が可能な施工管理システムが用いられる。先端吊工法は、カンチレバー施工時に、より入念な主桁レベル張力の管理が必要となるが、以下の計算手法でデータを作成すれば十分な管理が可能である。SLT工法では、標準1サイクルを、表-4に示す7ステップに分割し、累加計算を行う。計算上のモデルは、STEP①、②では、主桁先端に固定された移動式作業車の支保工桁が構造の一部であり、先端斜ケーブルの定着位置も他のステップと異なるため、表中に示すⅠモデルを採用する。先端部の断面剛性は支保工桁の値を用い、部材軸も、主桁及び支保工桁の重心位置として段差を設け、剛性無限大の仮想材DFで結合する構造である。一方、STEP③～⑦は、支保工桁上のコンクリートが硬化し、支保工桁に作用していた荷重は、斜ケーブル張力を含め、すべてコンクリート桁に移動させるため、新ブロックにコンクリート桁の剛性を用いたⅡモデルを使用して計算する。

原大橋施工中の主桁レベルの計算値と実測値を対比した例が図-8である。A₂側第5ブロックコンクリートを打設した直後（STEP E8）の値である。本橋では、第1ブロックから第4ブロックまでは、左右同時打設を実施したが、第5ブロックからは、作業の能率化を考え、左右の主桁ブロックを交互に打設してカンチレバー施工を行った。その際、施工中の安定を確保する目的で、最外線の斜ケーブルをA₁、A₂橋台に仮固定して、塔頂部の変形を拘束している。STEP E8は、A₁側第5ブロックのコンクリートを打設した次の段階のステップである。主桁レベルの実測値は、計算値と同じ条件にするため、+15℃の状態へ温度換算したものである。STEP E8での実測値と計算値の差は、最大38mmであった。

表-5は、STEP E8での斜ケーブル張力である、計算値との誤差は最大11.7%で、全体に過緊張気味になっている。

本橋では、主桁レベル及び斜ケーブル張力の管理基準を25mm、 $\pm 5\%$ に設定した。閉合後の斜ケーブル張力の最終調整後、主桁レベルは、一ヵ所のみ管理基準を越えたが、他は基準値内に収まった。斜ケーブル張力は、すべて基準値を満足した。この結果から、提案した施工計算手法の十分な実用性が確認されたと考える。

表-4 標準1サイクルにおける解析上のモデル化

ステップ	内 容	計 算 モ デ ル
①	斜ケーブル仮緊張	Ⅰモデル 新ブロックの剛性は、支保工桁の剛性とし斜ケーブルは、支保工桁に定着する。 
②	コンクリート打設	
③	桁内PC鋼線緊張	
④	テルハ移動	Ⅱモデル 新ブロックの剛性は、コンクリート桁の剛性を使用。軸線は主桁重心線とする。 
⑤	斜ケーブル本緊張	
⑥	斜ケーブル緊張緩和	
⑦	支保工桁移動	

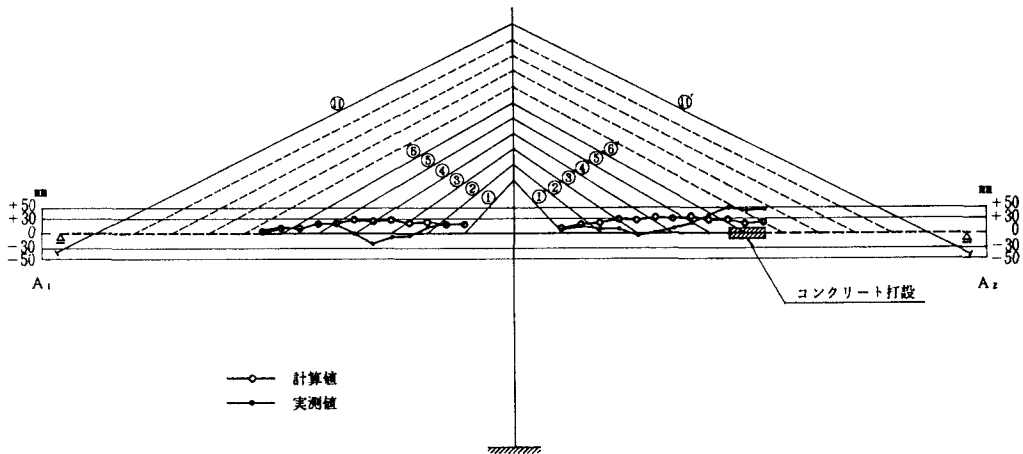


図-8 A₂側 第5ブロック コンクリート打設 (STEP E8)

5. 結 論

PC斜張橋の新しい施工法として、移動式作業車の先端吊工法について検討した。国内の実績は3橋だが、海外では数橋見ることができる。従来の桁橋のカンチレバー施工法と異なり、塔と斜ケーブルを有する斜張橋構造を利用したより有利な施工法である。本稿は、この先端吊工法を4種類に大別し、特徴を分析するとともに、その内の「本設斜ケーブルによる移動式作業車先端吊工法（SLT工法）」を対象に、試算結果及び実橋への適用について述べた。

検討結果は次の通りである。

- ① 主桁のカンチレバー施工では、斜ケーブル間隔を1ブロックとして施工する。従来工法では、2～3ブロックに分割して施工するため、先端吊工法では、主桁製作工期が2/3程度に短縮できる。
- ② コンクリート打設時に、移動式作業車の支保工桁先端を斜ケーブルで支持するため、既設桁および斜ケーブルに生じる断面力が少なく、架設時に必要な主桁内PC鋼材量（1次鋼材量）が減少する。本稿の試算例では、完成系の荷重に対して必要なPC鋼材を含めた主桁内全縦方向PC鋼材量が、従来工法の70%程度となった。
- ③ 移動式作業車の重量は、1ブロック長が長くなるため、従来工法より重くなる。衡原大橋の場合、先端吊工法の方が約1.7倍の重量であった。
- ④ 先端吊工法によるカンチレバー施工時の主桁レベル及び斜ケーブル張力は、十分な精度で管理できる。

以上の結果から、先端吊工法は、移動式作業車の重量が増加するが、工期が短縮し、主桁内縦方向PC鋼材量が減少するため、長大斜張橋の施工へ本工法を適用すると、さらに有用性を発揮すると考えられる。

PC斜張橋の先端吊工法が理解され、我国での採用実績が増加してゆくことを期待する。

参考文献

- 1) 吉村 戌, 植木 義春, 今井 義明: PC斜長橋“衡原大橋”の設計と施工、プレストレストコンクリート Vol.29, No.1, Jan.1987
- 2) M. Yoshimura, S. Tanaka, M. Yasuda: New Cast-In-Situ Cantilever Method (Tsukuhara Bridge), Proceeding Vol.2 of Cambridge Conference 1987.11
- 3) F. Leonhardt, W. Zellner, H. Sverinsson (成井信訳): コロンビア川にかかる Pasco-Kennewick PC斜張橋、橋梁 1980.8
- 4) 成井 信, 渡部 篤: PC斜張橋の現況、橋梁と基礎 85-8
- 5) ㈱プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC斜張橋資料 昭和63年3月

(1988年10月12日受付)

表-5 斜ケーブル張力 (SREP E8)

単位 (ton)

斜材番号	目 標 値	実 測 値			誤 差	誤差 (%)
		上 流 側	下 流 側	実測合計		
11	99.4	—	—	—	—	—
6	136.7	—	—	—	—	—
5	295.8	143.1	148.7	291.8	4.0	1.4
4	164.4	83.5	85.9	169.4	-5.0	-3.0
3	143.9	79.3	70.7	150.0	-6.1	-4.2
2	114.0	59.7	62.6	122.3	-8.3	-7.3
1	127.8	73.1	69.7	142.8	-15.0	-11.7
1'	131.5	66.9	68.4	135.3	-3.8	-2.9
2'	117.4	67.5	60.5	128.0	-10.6	-9.0
3'	147.9	75.7	80.1	155.8	-7.9	-5.3
4'	170.7	84.2	91.5	175.7	-5.0	-2.9
5'	305.8	145.7	143.9	289.6	16.2	5.3
6'	131.7	—	—	—	—	—
11'	101.7	—	—	—	—	—