

PC 3径間連続吊床版橋 とんぼのはしの設計・施工

浜田 眞一*1・勝山 達郎*2・山下 和博*3・橘田 敏之*4・長谷川 克年*5

まえがき

宮崎県の北西部に位置する高鍋湿原は、高鍋防災ダムの東側と西側の2つの湿原からなり、自生のサギソウ、ノハナショウブ等の貴重な植物やミナミトンボ、ツヨシトンボ、ハッチョウトンボ等の貴重な昆虫が生息する。

本橋は、その東部と西部を結ぶ遊歩道として計画されたもので、橋長 150 m、支間長 30+80+30 m、幅員 2.0 m (有効幅員 1.5 m) の PC 3 径間連続吊床版橋である。なお、3 径間連続形式として本橋は橋長および中央径間長とも国内最長であり、世界的にも有数の吊床版橋となった。

本橋の設計計画に当たっては、利用者に配慮し勾配変化率の少ない緩やかな線形とした。ケーブル配置形状については、諸検討の結果全ケーブルを全径間通しケーブルとすることに決定し、その実現のために技術開発を行った。

本橋は、中央径間が深い湛水域にあり、プレキャスト版の接合にコンクリート目地を使用したことから、目地

型枠施工に通常使用される吊足場を排し、移動作業車を開発することで安全性を一段と向上することができた。

本橋は7ヶ月の工期で平成8年3月に竣工した。本文は設計、施工ならびに振動実験についての報告である。

1. 計画概要、構造概要

計画当初の橋梁形式の選定に当たっては PC 斜張橋、鋼吊橋、鋼ローゼ橋および PC 吊床版橋の4形式を比較した結果、特に周囲の景観を構造物が阻害しない形式として PC 吊床版橋を採用した。

工事名：平成6年度県営防災ダム事業高鍋地区2工区

平成7年度県営防災ダム事業高鍋地区1工区

発注者：宮崎県

工事場所：宮崎県児湯郡高鍋町上江地内

橋長：150 m

支間長：30+80+30 m

幅員：2.0 m (有効幅員：1.5 m)



写真-1 完成写真

*1 Shinichi HAMADA : 宮崎県 農政水産部 次長

*2 Tatsuro KATSUYAMA : 宮崎県 農政水産部農地整備課 課長

*3 Kazuhiro YAMASHITA : (株) 日設コンサルタント 技術部 部長

*4 Toshiyuki KITSUTA : 大日本土木 (株) PC 技術室 室長

*5 Katsutoshi HASEGAWA : 大日本土木 (株) PC 技術室

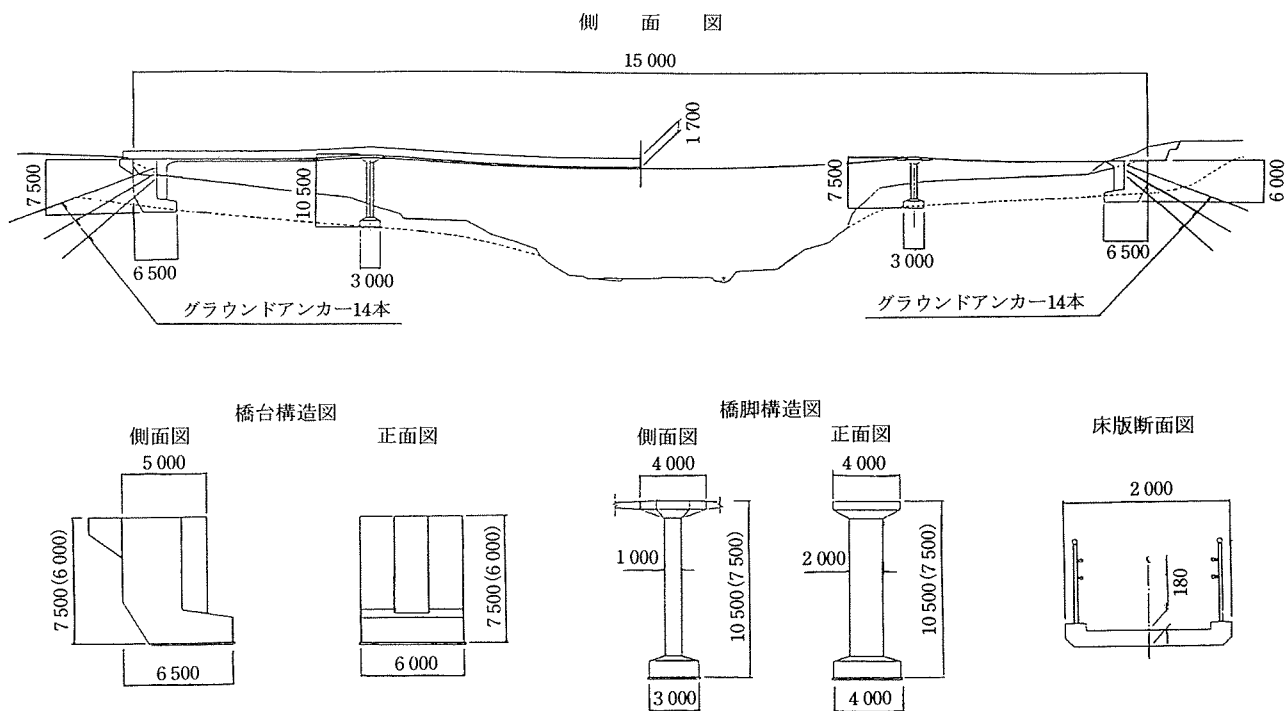


図-1 全体構造図

表-1 設計課題と対策および効果

設計課題	対策	1次効果	2次効果
(1) 橋脚柱頭部のスリム化, 滑らかな線形追求	① 1次, 2次ケーブルの連続化	柱頭部への1次, 2次ケーブルの定着がなくなること柱頭部寸法がスリム化できた	・PC鋼材量, 定着具数, 緊張回数等の減少 ・柱頭部においては定着作業がなくなり作業性, 安全性が向上
	② 柱頭部に鋼製受け台を設ける	使用性(歩行性)の向上	
(2) 橋脚の無絞化	2次ケーブルの大幅ディテンションの実施	橋脚下端を剛結にできた	構造の単純化による施工性の向上, 耐久性の向上
(3) 経済性を追求する目地構造の採用	コンクリート目地の採用による目地部鉄筋の配置	導入緊張力が減少できた	

活荷重: 群集荷重 200 kgf/m²

使用材料: 上部工, コンクリート, $\sigma_{ck}=400$ kgf/cm²

PC鋼材, 12 T 12.4 および F 230

なお, 完成写真を写真-1に, 全体構造図を図-1に示す。

2. 設計

2.1 設計課題と改善効果

3 径間連続吊床版橋の設計事例は, 極めて少なく未だ一般的な設計法が確立されているとは言い難い。そこで設計計画では, 以下の設計課題を踏まえた汎用性に富む設計法の提案を目標に, 施工性, 経済性および安全性の追求を行い, 所期の成果を収めることができた。

- 1) 橋脚, 橋脚柱頭部のスリム化, 滑らかな線形
- 2) 橋脚の無絞化*1
- 3) 経済性を追求する目地の採用

上記の課題に対する対策とその効果を表-1に, 対策と開発項目を表-2に示す。

表-2 対策と開発項目

対策	開発項目
1次, 2次ケーブルの連続化	(1) 1次ケーブル受け台の採用 (2) サグ調整方法の開発
2次ケーブルの大幅なディテンションの実施	(3) プレストレス導入方法の改善

2.2 具体的な改善策

(1) 1次ケーブル受け台構造

柱頭部の1次ケーブルを滑らかな線形に合わせて配置するために図-2の鋼製受け台を開発した。また, 1次ケーブルはプレキャスト版の架設の際にプレキャスト版を誘導する役割を与えるため, 受け台上に1次ケーブルの位置を確保のためのガイドを設けた。1次ケーブル受

*1 橋脚の絞化, すなわち橋脚下端をヒンジ構造とすることは, 設計時の橋脚部材に対し有効である。

しかし, 橋脚下端をヒンジ構造とすることは, 施工時において橋脚の安定のため筋かい等の処置を施す必要があり, さらに本橋脚下端は防災ダムのH.W.L以下となり, 耐久性の面で適当であるとは言い難い。

◇工事報告◇

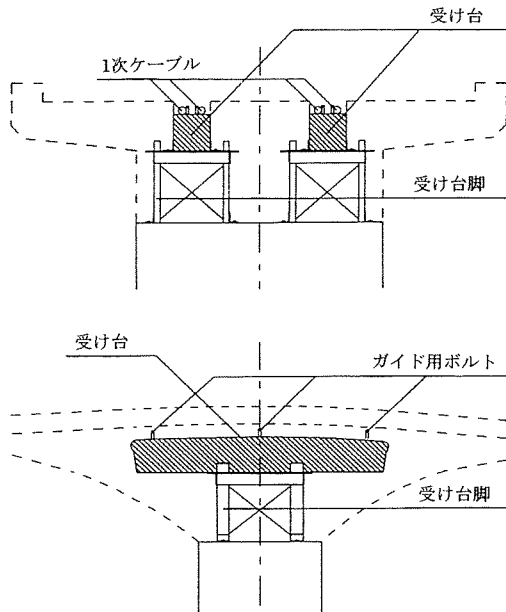


図-2 1次ケーブル受け台構造

受け台構造を図-2に示す。

(2) サグ調整金具

プレキャスト版架設終了時のサグ量は、1次ケーブルと受け台間の摩擦の存在により、所定のサグ量が得られない可能性がある。そこで、プレキャスト版架設終了時に、所定のサグ量に調整するための調整金具(図-3)を開発した。

本金具によるサグの調整は、1次ケーブルと橋脚柱頭部の相対位置をジャッキを用いて移動させて行う方法である。

仮に、プレキャスト版架設終了時におけるサグ量が中央径間が大きく、側径間が小さくなった場合、1次ケーブルを中央径間側から側径間側へ移動させて所定のサグ量に調節する。

(3) 導入緊張力のディテンションング

吊床版にプレストレスを導入し床版線形が変化することにより床版端の水平力が変化するが、この水平力の変化量は導入前の線形とプレストレスの導入量により決ま

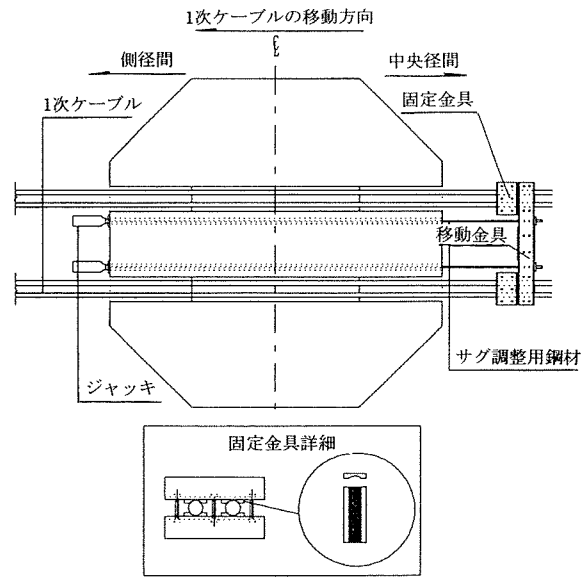


図-3 調整金具取付け図

る。

したがって、連続形式で支間割りが均等でない場合は、プレストレスの導入量が同じでもプレストレスの導入により生じる各径間の水平力が異なり、橋脚に水平力が作用することになる。このため橋脚構造をヒンジとする例も見受けられる。

本設計では、ヒンジの弱点を解消し、ヒンジ化の複雑さを避けるため側径間の導入緊張力低減を目的とするディテンションング(PC鋼材の引戻し)を実施する方法を着想し、これを実施することで橋脚のスリム化も合わせて実現した。

なお、ディテンションングは各ケーブルの定着時に随時行い、ディテンションング量の大きさは、あらかじめプレストレス導入直後およびクリープ・乾燥収縮終了時に生じる橋脚の曲げモーメントの大きさを考慮して決定した。設計上のディテンションング量は32mmであり、導入時およびディテンションング直後のPC鋼材張力を図-4に、またディテンションングの効果を表-3に示す。

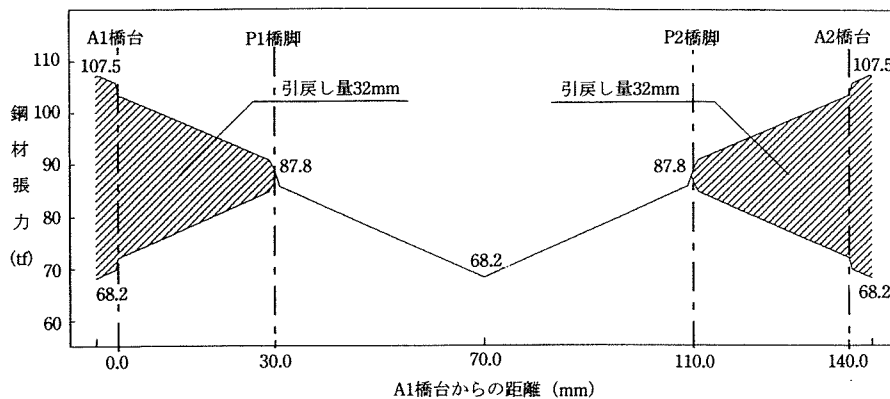


図-4 PC鋼材張力

表-3 ディテンショニング効果

ケース	径間	導入直後の各径間 プレストレス力 (tf)	橋脚曲げモーメント (tfm)	
			P 1 橋脚	P 2 橋脚
ディテンショニングを 行った場合	A 1 側径間	517.8	45.5	68.4
	中央径間	525.6		
	A 2 側径間	517.8		
ディテンショニングを 行わない場合	A 1 側径間	644.5	53.8	91.5
	中央径間	525.6		
	A 2 側径間	644.5		

2.3 吊床版橋の線形

サグ量は、吊床版橋における諸元の中で最も重要な要素である。サグ量を小さく設定すると最急勾配が緩くなり、使用性に優れる反面大きな水平力が発生し、上下部工ともに工事費に大きな影響を与える。

さらに、振動特性もサグ量決定の要素になることもある。本橋では中央径間のサグ量を使用性から 1.7 m とし振動特性の検討も合わせて行っている。なお、吊床版の最急勾配は、橋脚上に円曲線を入れてこの勾配を緩和することにより 8.5% としたほか、身障者や子女などの利用者に対する配慮として、一定距離 8.5 m ごとに 1.5 m の水平部を設けることとした。

2.4 構造解析

吊床版橋は、部材剛性が小さく張力が卓越する柔な構造の部分と、橋台・橋脚付近の床版取付け部（嘴部）の剛性が順次大きくなり局部的に大きな曲げモーメントが発生する部分とがある。

そのため設計荷重時の構造解析は、ケーブル理論に大変形解析理論を併用した。

また、耐震設計は震度法、および応答解析によっている。

構造解析結果を表-4 に、断面力、コンクリート応力度を表-5 に示す。

3. 施 工

3.1 施工課題と改善策の提案

吊床版橋は、従来より施工の簡略化、急速化が図られてきており、プレキャスト版間の目地部の構造は、吊床

表-4 構造解析結果

架設段階	ケーブル理論解析		大変形解析
	サグ量 (m)	水平力 (tf)	水平力 (tf)
床版架設時	2.237	363.4	
プレストレス導入時	1.937	423.5	
橋面工施工後	1.984	498.7	
クリープ・乾燥収縮終了時	1.700	588.6	589.2
活荷重時	1.774	693.7	686.5
温度変化時	-15℃	1.653	748.4
	+15℃	1.891	647.4

表-5 最大曲げモーメントとコンクリート応力度

x (m)	M (tfm)	N (tf)	σ_u (kgf/cm ²)	σ_l (kgf/cm ²)
1.0	-17.8	89.2	1.4	10.2
2.0	-13.0	86.1	6.7	14.9
4.0	-7.4	80.4	-17.5	33.4
6.0	-3.3	74.7	0.1	22.8

x : 橋脚から中央径間への距離

M : 最大曲げモーメント

N : コンクリート断面に作用する軸力

σ_u, σ_l : 上縁および下縁コンクリート応力度

版橋の施工性に大きな影響を及ぼす要因の一つである。プレキャスト版間の目地構造には、目地に鉄筋を配置しない薄いモルタル目地構造と、鉄筋を配置できる目地幅のコンクリート目地構造に大別される。

モルタル目地を採用すると、目地部施工は橋面上より施工が可能になり施工性に優れる反面、設計上コンクリートの引張りを認めないフルプレストレスとしなければ

表-6 施工法の改善点とその効果

改善	内 容	改善点の評価			
		施工性	安全性	経済性	機能性
(1) プレキャスト版の改良	目地部の場所打ち部配筋の改善	○			
(2) プレストレッシングの改善	2次ケーブルのディテンショニングの採用	○	○	○	○
(3) 仮設足場の改善	吊足場 ^{※1} の排除		○		○
	移動作業車 ^{※2} の採用		○	○	○

※1 吊床版橋のコンクリート目地部型枠施工は、従来から下方空間が大きい場所では仮設ケーブルによる吊足場が一般的に使用されてきた。

※2 移動作業車の採用により鉄筋の引張力が期待できるコンクリート目地を容易に採用することができるだけでなく、防護、養生足場用ケーブル等、仮設撤去等の苦渋作業も回避できる。

◇工事報告◇

ばならない。一方、コンクリート目地は、目地部型枠施工に足場が必要になるが、設計上コンクリートの引張りを認めることで、PC鋼材量を節減することができる。なお、コンクリート目地部施工は、通常仮設ワイヤー吊足場が用いられてきた。

本橋では、PC鋼材量の節減のためコンクリート目地構造を採用することとし、施工の改善課題として施工上問題が多い仮設吊足場の代替工法として移動作業車を採用したほか、表-6に示す施工の改善を行い、所期の成果を収めることができた。

3.2 施工上の具体的な改善事項

(1) プレキャスト版の鉄筋配置の改善

コンクリート目地方式の吊床版橋では、30 cm程度のコンクリート目地部を設け、目地部において主鉄筋を重ね継ぎ手により接合している。そのため、プレキャスト版架設の際に隣り合うプレキャスト版の主方向鉄筋は重ね継ぎ手が容易な配置となることが要求される。

そこで、本橋では隣り合うプレキャスト版をプレキャスト版A、プレキャスト版Bの2種類とし割付を行い、お互いの主方向鉄筋を鉄筋径分ずらすことで、プレキャスト版架設時の作業効率の向上を図った。

(2) ディテンションング

ディテンションング(PC鋼材の引戻し)を実施するためには、ディテンションング中の雄コーンの引き込まれ防止のため図-5に示すディテンションング装置を用

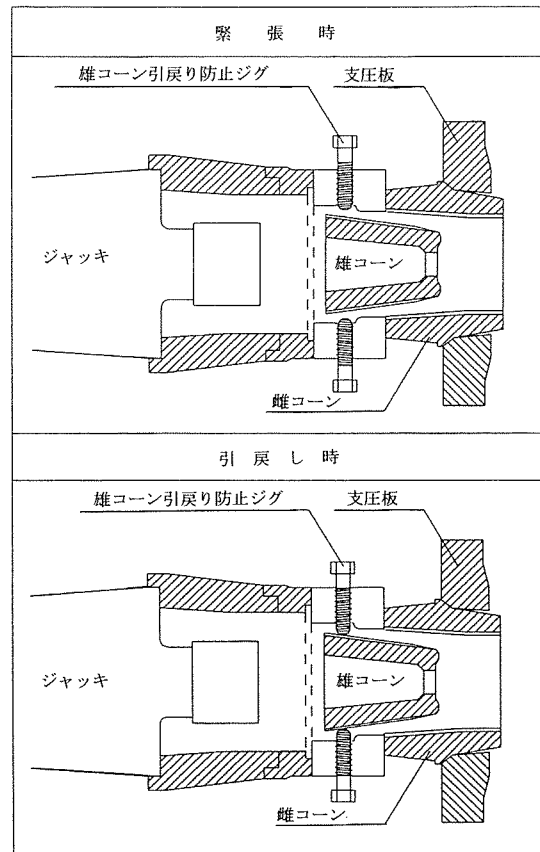


図-5 ディテンションング装置

いる必要がある。

ディテンションング装置は、リングとジグにより構成されており、引戻し作業時において雄コーンを固定することができるフレシネー工法緊張システムに用意されているディテンションング装置を使用した。

(3) 移動作業車

本橋の目地部の型枠施工では、上部工上を移動する移動作業車を採用することで経済性、施工性、安全性の改善を図った。

開発方式(移動作業車)と従来方式(吊足場)との評価結果を表-7に示す。また、図-6に移動作業車を示す。

表-7 移動作業車による改善点

施工法	従来方法 (吊足場)	開発工法 (移動式足場)
作業性	△	○
組立解体	時間を要し困難	容易
作業空間	調整が必要	一定した作業空間が確保できる
経済性	× 施工延長に比例	○ 施工延長に比例しない
足場構造	ケーブル、アンカーの養生等が必要	下部構造を利用した施設は一切不要

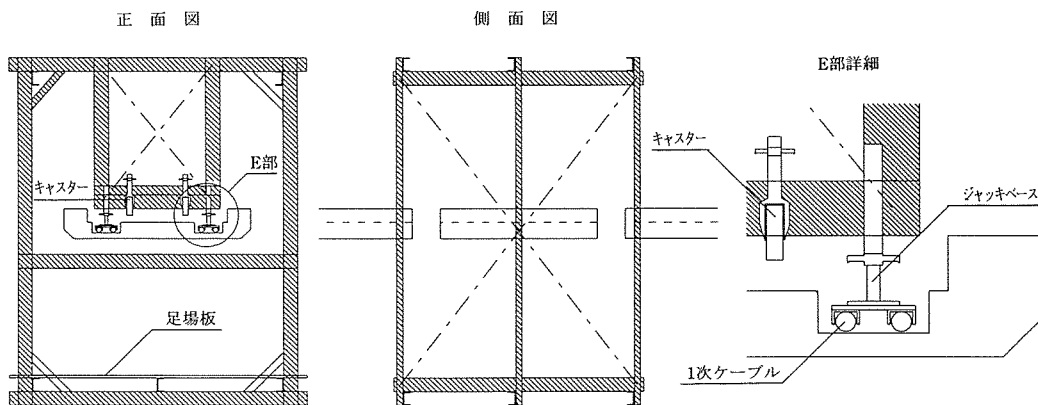


図-6 移動作業車

開発工法の移動作業車は、移動を簡易化するため軽量形鋼を使用し、総重量を0.8 t程度に止めた。また、作業性を考慮して1回の移動で2箇所のコンクリート目地が施工可能な長さとした。

移動作業車は、移動時にはキャスターでプレキャスト版上を移動し、型枠施工などの作業時には作業車荷重を1次ケーブル上にジャッキベースを利用して受け替えることで、プレキャスト床版に負荷される移動作業車荷重を除去している。

3.3 実施工程

実施工程は、プレキャスト版の配筋の改善によりプレキャスト版の日最大架設数は14枚とすることができた。

実施工程表を表-8に示す。

表-8 実施工程表

作業項目	7年				8年		
	9	10	11	12	1	2	3
準備工	—						
グラウンドアンカー工		—	—	—			
柱頭部工				—			
1次ケーブル架設					—		
プレキャスト版架設					—	—	
場所打ち部工						—	
2次ケーブル工							—
橋面工							—

3.4 施工管理

本橋の主要な施工管理項目は、サグ量の管理およびプレストレスの管理である。

以下に管理の概要を述べる。

3.4.1 サグの変動要因

適正なサグの設定に当たっては、サグに影響を及ぼす諸要因に配慮しながら、適正な形状とするための処置(管理)をとることが要求される。

本橋で考慮した諸要因を挙げると、i) 床版の実重量、ii) 気温の変動、iii) 橋脚の変位、iv) 橋脚上の1

次ケーブルと受け台間の摩擦に基づく誤差等である。

以下、諸要因について述べる。

i) 床版重量の計算値との差異とサグ量の再設定

プレキャスト版の実重量は、設計単位重量に対し9%程度大きな値となった。

床版の実重量の増加により発生する水平力を減少するため設計サグ量を+25 mmに再設定した。

ii) 気温、橋脚変位のサグ量の影響

気温、橋脚変位によるサグ量への影響は、±15℃の気温に対し中央径間で±150 mm、橋脚変位5 mmに対し中央径間で37 mmのサグの増減が生ずる。

3.4.2 サグ値および橋脚の変位

サグは、設計値を基準に床版コンクリート重量、橋脚変位の影響等を考慮しながらアバットのグラウンドアンカーの許容アンカー力を超えないように、かつ各径間のバランスを確保できるよう修正および調整を行う必要がある。

表-9は、このようなサグ調整を実施したサグと当初設計で決めたサグの比較表である。なお、中央径間の設計値に床版重量補正をすると施工値は設計値とよく一致している。

橋脚の変位は最大6 mmの値を示したが、橋面施工段階での変位は極めて小さくなり、ディテンションングの有効性が大であることを示している。

3.4.3 ディテンションングの管理

ディテンションング量は、PC鋼材の摩擦に応じ変える必要がある。したがって、事前に想定した摩擦係数に対し、ディテンションング量を算定しておき、ディテンションング量と摩擦係数のグラフを作成した。

想定した摩擦係数は、 $\mu=0.06, 0.1, 0.14, 0.3$ とした。この理由は、試験緊張で摩擦係数は $\mu=0.1$ 程度であったため0.04の幅を持たせたことと、気象条件などから摩擦係数が大きくなると想定し $\mu=0.3$ にたいしてもディテンションング量を算定した。

また、セット量はディテンションング量に含ませ、各

表-9 サグ量管理結果

施工段階	サグ量(m)						橋脚変位(mm)
	A1側径間		中央径間		A2側径間		
	設計	実測	設計	実測	設計	実測	P1
1次ケーブル架設終了時	—	—	0.144	0.148	—	—	+1.0
プレキャスト版架設終了時	0.060	0.064	1.750	1.765	0.060	0.064	+4.0
場所打ちコンクリート打設終了時	0.109	0.115	2.225	2.245	0.109	0.114	+6.0
プレストレス完了後	0.083	0.109	1.951	1.981	0.083	0.111	+1.0
橋面工施工後	0.072	0.100	1.943	1.969	0.072	0.102	+0.5

1) 実測値は温度および橋脚の変位による補正を行ったものである。

2) 橋脚変位は中央径間側への変位を正とした。

3) 橋面工施工後のサグ量についてはプレストレス完了時より橋面工の施工完了までに1ヶ月程度の期間を要したためその分のクリープを推定し設計値としている。

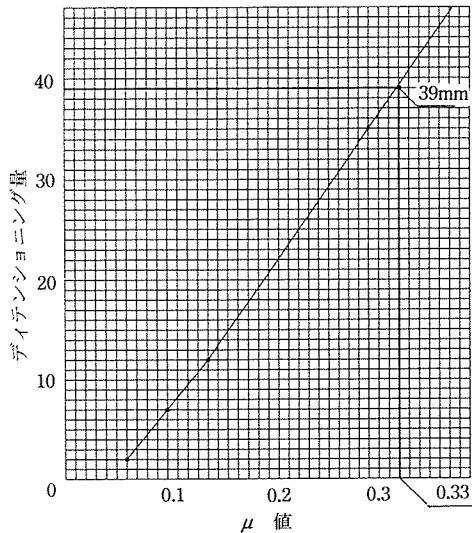


図-7 ディテンション量の管理グラフ

摩擦係数に対し構造上許容できるディテンション量に上限値と下限値を設定し幅を持たせた。

PC鋼材のディテンション管理グラフの一例を図-7に示す。

緊張時の摩擦係数 $\mu=0.33$ に対して、PC鋼材のディテンション量を 39 mm として定着を行った。

4. 振動使用性

設計段階における振動使用性については、固有値解析を行いその振動周期に対し、一般的な歩行者のパワースペクトル (2 Hz 程度) との比較により照査を行った結果、表-10に示すように7次、8次モードは歩行者のパワースペクトル (2 Hz 程度) 付近であるが、7次モードは2次の逆対称、8次モードは3次の対称と比較的振幅が小さいため、歩行者の歩行性を損なうような揺れではないとの判断をした。

しかし、3径間連続形式の吊床版橋における振動実験報告は極めて少ないことから、振動実験により確認を行った。

実験方法は、橋面上の10測線に14台の加速度計を取り付け、固有値解析結果を目安に人力により振動を与え、各種走行パターンにより、振動モードと周波数の確認および振動使用性の確認を行った。

なお、振動使用性の評価は、振動に対する人間の心理的反応を客観的に判断するため、系列カテゴリ法を用いた。表-10に固有値の解析結果と実験結果を、表-11にカテゴリとその振動速度を示す。

また、使用性の検討については、特にランダム歩行、ランダム走行での各径間中央における振動速度結果について表-12に示す。

表-12より、振動使用性に対しては、ランダム走行の6人による走行に対してのみ、若干歩きにくいとの結果

表-10 固有値解析結果と振動実験結果

次数	振動モード	解析値	実験値
1	水平対称1次	0.702 Hz	—
2	鉛直対称1次	0.874 Hz	1.03 Hz
3	鉛直逆対称1次	1.043 Hz	0.99 Hz
4	水平逆対称1次	1.222 Hz	—
5	鉛直対称2次	1.654 Hz	1.66 Hz
6	水平対称2次	1.744 Hz	—
7	鉛直逆対称2次	1.967 Hz	2.24 Hz
8	鉛直対称3次	2.098 Hz	2.36 Hz

表-11 カテゴリ評価と最大振動速度¹⁾

カテゴリNo	カテゴリ評価	最大振動速度 (cm/sec)
0	全く感じない	—
1	少し感じた	0.6
2	明らかに感じた	1.2
3	少し歩きにくい	2.4
4	大いに歩きにくい	3.8

表-12 ランダム歩行およびランダム走行の最大振動速度結果

	荷重	最大振動速度 (cm/sec)		
		A1側径間	中央径間	A2側径間
ランダム歩行	1人 (80 kg)	0.407	0.370	0.261
	4人 (294 kg)	0.431	0.865	0.323
	6人 (447 kg)	1.259	1.125	1.080
ランダム走行	1人 (71 kg)	0.535	1.351	0.500
	4人 (294 kg)	1.205	1.006	1.573
	6人 (447 kg)	3.286	1.312	3.216

になったが、その他のケースについては、振動が感じられるものの、振動によって走行性および歩行性上の問題は無いことが確認できた。

以上の結果から、本橋が振動使用性に関して問題を生じる可能性は小さいと考えられる。

あとがき

長径間連続吊床版の実績は極めて少ないとの認識の下に、合理的な設計施工の追求が始まった。自由度のある線形の選択を可能にし、橋脚のヒンジを排し、さらに下方の仮設ワイヤー足場の代替工法を見つけることを重要なテーマとして設計施工法を模索してきたところ、テーマ実現のための汎用性に富む幾つかの解決策を着想することができ、良好な成果を収めることができた。

今、3径間のなだらかな橋線が水面に映え、その役割を待つ。橋は景観を横切る、長いゆらぎのある2本の光と化している。

参考文献

- 1) 小堀為雄, 梶川康男:「橋梁振動の人間工学的評価法」, 土木学会論文報告集, 第230号, pp. 23~31, 1974. 10
【1996年8月28日受付】