

外ケーブル併用吊床版橋 (いわき公園展望橋) の設計・施工

オリエンタル建設(株) 東北支店 正会員 ○二階堂輝幸
 同上 東北支店 正会員 柳内 博光
 同上 第二技術部 正会員 町 勉
 福島県いわき建設事務所 道路課 熊谷 高

1. はじめに

いわき公園展望橋 (仮称) は、県立いわき公園内に架設される歩行者専用橋である。本橋は、①架設地点が丘陵地であること、②景観性に優れること、③架設地点の支持層が風化泥岩であることなどから、上部構造の構造形式として外ケーブル併用吊床版橋¹⁾を世界で初めて採用している。これは、従来の直路式吊床版橋では床版断面内に配置していたプレストレス導入用の2次ケーブルを、鋼製の鉛直材を介して床版外部に設置したものである。その特徴は、次のとおりである。

- (1) 外ケーブルのサグを吊床版のサグよりも大きく設定することで、下部構造への作用水平力が従来の直路式吊床版橋の70%程度に低減され、より広範囲の地質条件に対応できる。
- (2) むじれ振動特性が改善されることから、フラッター発現風速が増加し耐風安定性が向上する。
- (3) 2次ケーブルを吊床版断面外に配置することから、ケーブル配置本数の制約が無くなる。
- (4) 2次ケーブルにプレハブケーブルを用いることで、耐久性上の弱点となる可能性のあるグラウトが不要となる。
- (5) 施工方法は、従来の直路式吊床版橋で用いられる懸垂架設工法が適用でき、桁下条件の制約を受けない。本稿では、外ケーブル併用吊床版橋の設計・施工について報告する。

2. 工事概要

本橋の工事概要を以下に示す。また、全体一般図を図-1、断面図を図-2、主要材料を表-1に示す。

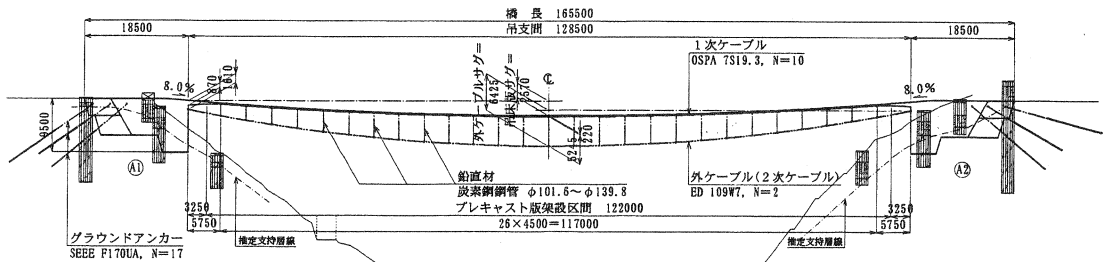


図-1 全体一般図

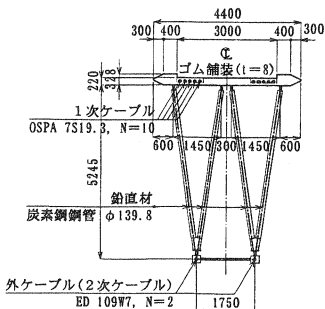


図-2 支間中央断面図

表-1 主要材料

コンクリート	吊床版部 $\sigma_{ck} = 50\text{N/mm}^2$	橋台定着部 $\sigma_{ck} = 40\text{N/mm}^2$	橋台一般部 $\sigma_{ck} = 21\text{N/mm}^2$
P C鋼材	1次ケーブル OSPA	外ケーブル ED	アンカー SEEE
鉄筋	SD295A		
鋼管	STK400, $\phi 101.6$, $t = 5.7 \sim \phi 139.8$, $t = 4.5$		

工 事 名：都市公園整備工事
 架 設 位 置：福島県いわき市平上高久地内
 橋 種：歩道橋
 活 荷 重：群集荷重2.0kN/m²
 構 造 形 式：外ケーブル併用吊床版橋
 基 礎 形 式：グラウンドアンカー併用直接基礎
 施 工 方 法：懸垂架設工法

橋 長：165.500m
 設計吊支間：128.500m
 有効幅員：3.000m
 設計サグ：吊床版 2.570m (L/50)
 鉛直材 6.425m (L/20)
 温度変化：吊床版 ±15℃
 外ケーブル・鉛直材 +25℃, -15℃

3. 設計概要

3.1 上部構造の設計

(1) 構造解析

本橋の設計は、①構造形式が吊構造であること、②吊床版取付部の局部応力を合理的に把握できることなどから、構造解析には幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮した複合非線形解析²⁾を用いて行った。

また、吊床版標準部は、プレキャスト版の接合部がモルタル目地構造であることから引張応力発生限界部材として、吊床版取付部は、場所打ち構造であることからひび割れ幅限界部材として照査を行った。

供用時および各施工段階の設計値を表-2に示す。永久荷重作用時の死荷重分担比率は、吊床版が約40%、外ケーブルが約60%である。なお、作用水平力は、表-3に示すように、従来の直路式吊床版橋と比較すると、永久荷重作用時で71%、変動荷重作用時で76%に低減されている。PC鋼材の応力度は、供用時の最大で1次ケーブルが約0.51σ_{pu}、外ケーブルが約0.44σ_{pu}である。また、群集荷重による応力変動は1次ケーブルが17N/mm²、外ケーブルが40N/mm²であり、いずれも疲労強度(σ_{pp}=0.6σ_{pu}, N=200×10⁴の場合、f_{prd}=93.5N/mm²)を十分満足している。

(2) 吊床版取付部

吊床版取付部の主鉄筋は、複合非線形解析によって求めた最下段鉄筋引張応力度から床版下縁のひび割れ幅を算出し、ひび割れ幅が許容ひび割れ幅を満足するように配置を決定した。吊床版取付部(場所打部)のひび割れ幅を図-3に、吊床版取付部(場所打部)形状および主鉄筋の配置

表-2 供用時および各施工段階の設計値

限界状態	荷重状態	サグ量 (m)	作用水平力(kN)		PC鋼材応力度(N/mm ²)		コンクリート応力度(N/mm ²)	
			吊床版	外ケーブル	1次ケーブル	外ケーブル	上縁	下縁
施工時	1次ケーブル架設・張力調整	0.229	11850		695			
	プレキャスト版・吊足場架設	2.990	16780		983			
	吊床版後打部打設	3.319	17930		1051			
	外ケーブル緊張	2.942	4630	7104	979	848	10.06	12.64
	橋面工・吊足場撤去	2.917	3840	7026	975	838	10.64	13.42
	外ケーブルリラクゼーション終了	2.938	4520	6694	978	799	10.13	12.76
供用時	永久荷重作用時(クリープ・収縮終了)	2.570	9413	5502	916	656	4.97	6.66
	群集荷重	2.679	12545	5834	933	696	2.70	3.60
	変動荷重作用時 群集荷重+温度上昇	2.831	11348	5821	927	694	4.33	4.27
	群集荷重+温度低下	2.542	14068	5691	941	679	0.90	2.57
備考	1次ケーブル: σ _{pp} =1600N/mm ² , σ _{pu} =1850N/mm ²		外ケーブル: σ _{pp} =1160N/mm ² , σ _{pu} =1570N/mm ²					

表-3 作用水平力の比較

供用時	外ケーブル併用吊床版橋	従来の直路式吊床版橋	比率	
永久荷重作用時	14915 kN	20952 kN	0.71	
変動荷重作用時	群集荷重	18379 kN	24722 kN	0.74
	群集荷重+温度上昇	17169 kN	23395 kN	0.73
	群集荷重+温度低下	19759 kN	26054 kN	0.76

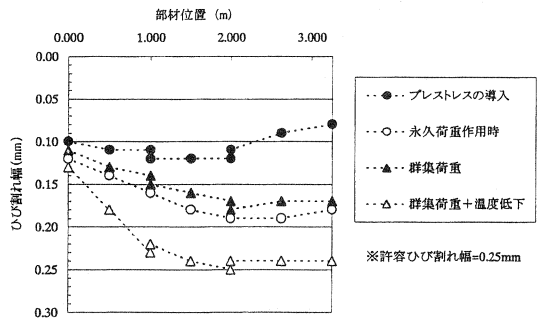


図-3 吊床版取付部のひび割れ幅

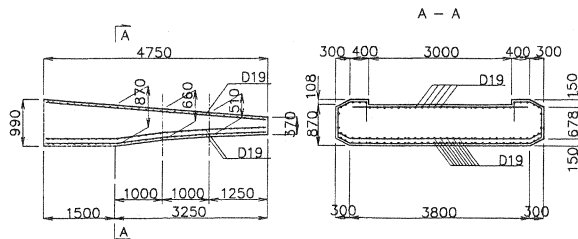


図-4 吊床版取付部形状および主鉄筋の配置

筋の配置を図-4に示す。

(3) 1次ケーブル

吊床版橋はサグの微調整が必要であることから、1次ケーブルの定着工法には、セットロスが無いねじ定着方式の定着工法を選定することとし、OSPA工法を採用した。

(4) 外ケーブル

外ケーブルには、工場製作のプレハブケーブルと現場製作ケーブルがあるが、本橋では、防錆工法(グラウト工の有無)、架設方法、鉛直材との連結部構造等に対して有利であるプレハブケーブルを選定することとし、EDアンカーケーブルを採用した。

(5) 鉛直材および鉛直材連結部

鉛直材には一般構造用炭素鋼鋼管を用い、鉛直材長さは、吊床版と外ケーブルの設計サグにより設定し、鋼管径および厚さは、細長比120を満足するように設定した。

また、吊床版のクリープ・収縮により、鉛直材に過度な曲げが生じないようにするため、鉛直材連結部は、橋軸方向の回転変形を拘束しないヒンジ構造とした。さらに、鉛直材下端においては、外ケーブルを上下から挟み込み、固定ボルトにより一体化するケーブルサドルを使用し、ケーブルサドルと外ケーブルが橋軸方向に滑らない構造とした(写真-1)。

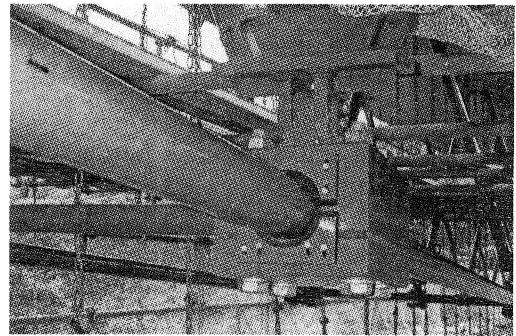


写真-1 ケーブルサドル

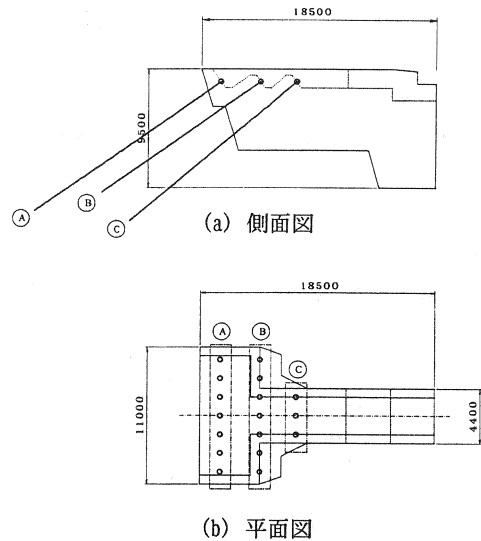


図-5 グラウンドアンカーの配置 (A1橋台)

3.2 グラウンドアンカーの緊張順序の検討

本橋におけるグラウンドアンカーの配置を図-5に示す。グラウンドアンカーの緊張順序は、各施工段階の上部構造水平力を考慮して、地盤に過大な反力が生じないように決定しなければならない。また、本橋の橋台の支持層は変形係数の小さい風化泥岩であることから、グラウンドアンカーの緊張作業においては、橋台の変形挙動を把握して緊張順序を設定する必要があった。そこで、施工段階を考慮した橋台の安定計算を行い、各施工段階の橋台変位と地盤反力度を算出した。

橋台の安定計算は、フーチングと地盤の接地面を剛部材と地

表-4 上部構造水平力と橋台変位・地盤反力

(a) バネケース1 (変形係数 200,000kN/m²)

施工段階	上部構造		A1橋台			
	サグ量 (m)	端部水平力 (kN)	水平変位 (mm)	鉛直変位 (mm)	回転角 (度)	最大地盤反力 (kN/m ²)
①グラウンドアンカー一次緊張(グループA)	-	-	1.2	1.2	0.007	435
②グラウンドアンカー二次緊張(グループB)	-	-	2.2	2.3	0.012	617
③一次ケーブル張力調整	0.229	11850	-0.2	0.8	0.003	371
④グラウンドアンカー二次緊張(グループC)	0.229	11850	0.2	1.2	0.004	435
⑤プレキャスト版架設後	2.990	16780	-0.8	0.5	0.000	345
永久荷重作用時	2.570	14915	-0.5	0.8	0.001	378
変動荷重作用時(群集荷重+温度低下)	2.542	19759	-1.3	0.4	-0.002	422

(b) バネケース2 (変形係数 63,800kN/m²)

施工段階	上部構造		A1橋台			
	サグ量 (m)	端部水平力 (kN)	水平変位 (mm)	鉛直変位 (mm)	回転角 (度)	最大地盤反力 (kN/m ²)
①グラウンドアンカー一次緊張(グループA)	-	-	3.6	3.9	0.020	435
②グラウンドアンカー二次緊張(グループB)	-	-	6.8	7.1	0.036	617
③一次ケーブル張力調整	0.229	11850	0.3	3.6	0.012	425
④グラウンドアンカー二次緊張(グループC)	0.229	11850	1.4	4.7	0.017	489
⑤プレキャスト版架設後	2.990	16780	-1.2	3.1	0.005	406
永久荷重作用時	2.570	14915	-0.2	3.9	0.010	450
変動荷重作用時(群集荷重+温度低下)	2.542	19759	-2.6	3.0	0.001	398

盤バネでモデル化した FRAME 解析を行った。その際、地盤バネには、支持層である CL 層の地盤内にある橋台背面を含めた接地面すべてを考慮した。また、地盤バネ係数は、泥岩の平均的な変形係数 (バネケース 1) と低めの変形係数 (バネケース 2) の 2 通りを考慮して設定した。上部構造水平力と橋台変位・地盤反力の計算結果を表-4 に示す。検討の結果、緊張は橋台背面側のグループ A およびグループ B を一次緊張とし、上部構造の 1 次ケーブル架設・張力調整の後に、二次緊張としてグループ C を緊張することとした。

また、橋台変位が大きい場合には、グラウンドアンカーの段階的な緊張による残存引張力の弾性変形減少や上部構造の水平反力による張力増加が考えられる。そこで、安定計算の際に算出した各施工段階におけるアンカー定着点の変位量をもとにアンカーの弾性伸び量を算出し、アンカーの弾性変形による緊張力変化を検討した。検討の結果、永久荷重作用時の残存引張力は設計アンカー力以上であり、かつアンカーの許容引張力以下であることから、想定する地盤バネの範囲では初期緊張力を決定する際に、弾性変形による緊張力変化に対する補正が必要ないことを確認した。

4. 施工概要

本橋の施工順序を図-6 に示す。以下に、橋梁上部工の主要工種について、施工順序に従い施工方法を説明する。

(1) グラウンドアンカーの緊張

1 次ケーブルの架設に先立って、グラウンドアンカーの一次緊張を行った。その際、グラウンドアンカーの緊張力、およびその後に作用する上部構造の水平力により、過大な橋台変位が生じないようにするため、橋台変位量の計測を行った。表-5 に、グラウンドアンカー A グループ緊張後の橋台変位の実測値と計算値を示す。水平変位にはトランシットを、鉛直変位の測定にはレベルを使用し、回転角の測定には据置型傾斜計を使用した。実測値は、バネケース 1 の計算値とほぼ等しく、実際の地盤の変形係数が一般的な風化泥岩と同程度であると把握することができたことから、その後のグラウンドアンカーの緊張順序は、前述の事前に検討した緊張順序に従って行うこととした。

(2) 1 次ケーブル架設・張力調整

1 次ケーブルは、7S19.3 の P C 鋼より線をねじ式定着工法で使用するものであるが、ねじ式定着工法には 19.3mm のより線をさらにより合わせる多重より線型と、より合わさない平行線型とがあ

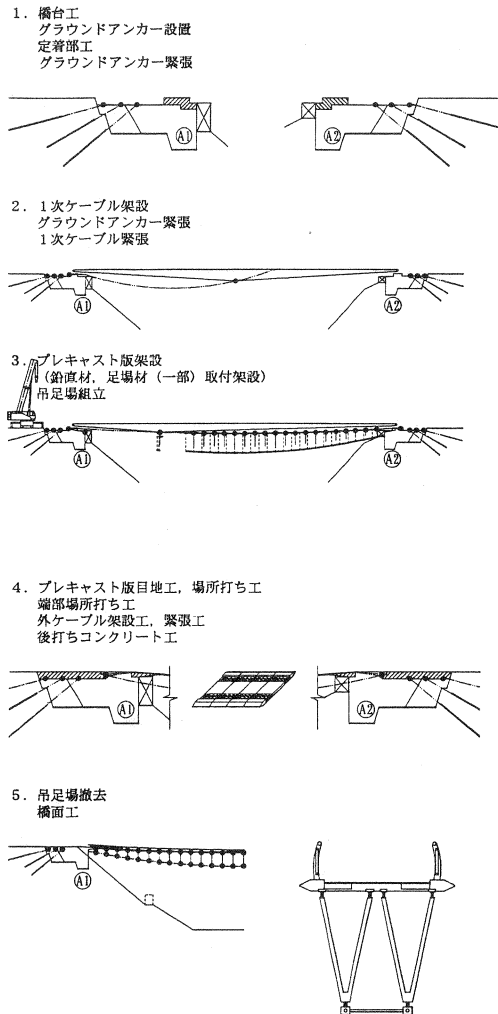


図-6 施工順序

表-5 橋台変位量測定結果 (A1 橋台)

	実測値	計算値	
		バネケース1	バネケース2
水平変位	mm	1	4
鉛直変位	mm	0	4
回転角	度	0.007	0.020

る。しかし、多重より線型のケーブルでは、1本当りの架設重量が重くケーブル架設設備を大掛かりにする必要があることから、ねじ式定着の信頼性と現場組立型ケーブルの施工性を兼ね備えた平行線型のケーブルを使用した。

1次ケーブルの架設は、橋台間に張渡したワイヤーによる吊下げ方式とし、ウィンチにより引出しを行った。全ケーブル架設完了後、1次ケーブルの張力調整を行った。1次ケーブルの緊張管理については、緊張力と伸び量で行った。

(3) プレキャスト版架設

プレキャスト版は、工場から搬入した後、架設順序を考慮して場内に仮置きした。架設は、A1橋台前面の支保工上に敷設した軌条に、横取り台車を配置し、そこへプレキャスト版を据え置いて、1次ケーブルの下まで横取りした。写真-2に、プレキャスト版の架設状況を示す。横取りしたプレキャスト版は、クレーンで吊り上げた後、1次ケーブルに懸垂させ、A2側ウィンチからの引出しワイヤーとA1側ウィンチからのおしみワイヤーをプレキャスト版に取付けて引出した。また、プレキャスト版の引出し前には、吊足場材および鉛直材を取付けた。

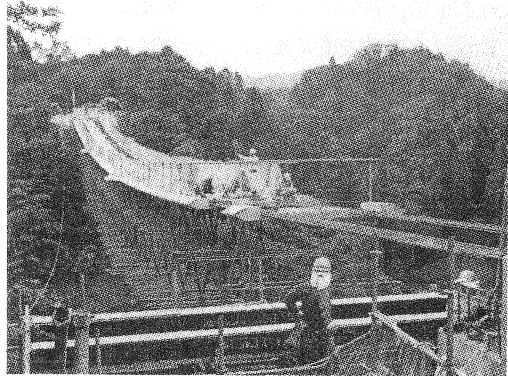


写真-2 プレキャスト版の懸垂架設状況

プレキャスト版の位置は、橋軸直角方向のずれに対しては小型ジャッキを用いて調整し、高低のずれに対しては、吊プレートのボルトの高さで調整した。また、プレキャスト版間の目地間隔(設計寸法10mm)の保持は、互いのプレキャスト版から出ている鉄筋をワイヤークリップで緊結することによって行った。プレキャスト版架設完了後の全景を写真-3に示す。

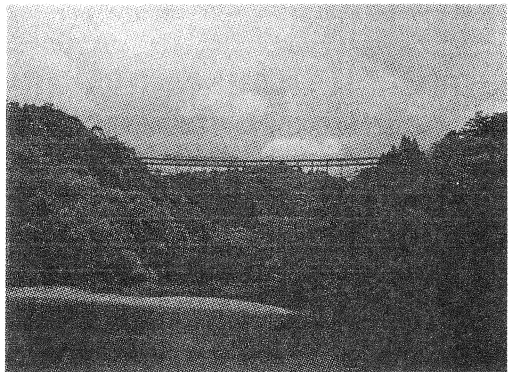


写真-3 プレキャスト版架設完了後の全景

(4) プレキャスト版後打部・吊床版取付部のコンクリート打設

上部構造における場所打ちコンクリート工は、プレキャスト版後打部と吊床版取付部とがあるが、両者を同時に施工した場合のコンクリート打設による吊床版のねじれ、死荷重が増加することによるサグ量の増加が、計画値と異なる場合も懸念された。そのため、まず初めに、プレキャスト版後打部のコンクリートを打設し、吊床版のねじれ及びサグ量を確認した後、吊床版取付部の施工を行うものとした。

なお、プレキャスト版後打部は、コンクリート打設に先立って目地モルタルの注入を行い、ポンプ車2台により支間中央からA1およびA2橋台側へ同時に打設した。

(5) 外ケーブルの架設・緊張

外ケーブルは、工場で防食加工及び定着体取付けまでを行った完全プレハブ型を使用した。外ケーブルの重量は、1本あたり350N/mと比較的重量が大きいものであったが、吊足場を完成させた後、吊足場上で引出すことによって架設を行った。外ケーブルの架設状況を写真-4に示す。外ケーブルの引出し後は、テンションロッドをアンカーヘッドに取付け、外ケーブルがケーブルサドルに接する付近まで緊張力を与えた。

ケーブルサドルへの外ケーブルの取付けは、緊張ジャッキにより外ケーブルをさらに引込み、鉛直材下端

のケーブルサドルが外ケーブルに接した箇所から取付けボルトで固定した。なお、外ケーブルの緊張および緊張後の吊床版のクリープ・収縮の進行により、ケーブルサドルは、外ケーブルの伸びとともに変位を伴い、それにより鉛直材の傾きも変化する。そのため、外ケーブルには、設計サグ時に鉛直材が垂直となるように、外ケーブルの伸びを考慮したマーキングを外ケーブル表面に施し、マーキングに合わせてケーブルサドルを取付けた。

ケーブルサドルへの外ケーブルの取付けがすべて完了した後、更に緊張力を与えて所定のサグまで緊張した。緊張作業は、サグ測定、および計測機器による鋼材温度・応力測定を随時行い、構造物の状態を確認しながら行った。

(6) サグ管理

吊床版橋のサグは温度変化の影響を受けやすいため、各施工段階におけるサグの管理においては、1次ケーブルおよび外ケーブルに熱電対を取付け、温度影響値を考慮した上でサグの管理を行った。

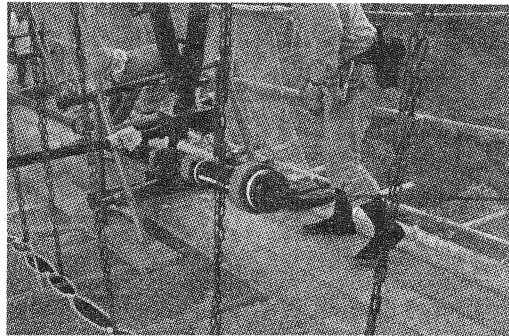


写真-4 外ケーブル架設状況

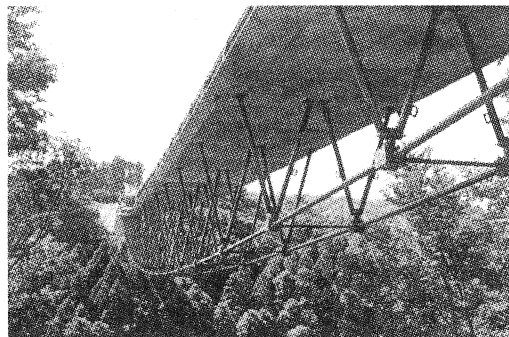


写真-5 完成写真

5. おわりに

本橋は、世界で初めて外ケーブルを併用した吊床版橋であり、従来の直路式吊床版橋に比べて長支間化に対応でき、サグ比（縦断勾配）も小さくなることから、今後は簡易な道路橋への適用が期待される。

最後に、本橋の設計・施工に際し、多大なる御指導・御協力を賜りました神鋼鋼線工業(株)の荒木氏、榊氏をはじめとする関係各位に、心より感謝の意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 角本・重信・須田：外ケーブルを併用した吊床版橋の構造特性，第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.627-632，1997.10.
- 2) 町・吉川・正司・角本：PC吊床版橋の吊床版取付部形状に関するパラメトリック解析，第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2001.11.（投稿中）