

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

オリエンタル建設(株)	第二技術部	正会員	○町 勉
同上	第二技術部	正会員	吉川 卓
同上	第二技術部	正会員	正司明夫
同上	福岡支店技術部	正会員	角本 周

1. はじめに

PC吊床版橋は、①軽快な曲線ラインが景観的に優れている、②短期間に施工が可能である、③施工が桁下条件に左右されないなどの理由により、我が国においても公園内の遊歩道や山間部の小規模吊橋を中心に多数の施工実績がある¹⁾。また、PC吊床版橋の構造上の最大の特徴は、吊構造であるがゆえに、比較的大きな水平力が下部構造に作用することである。しかし、PC吊床版橋の構造形式のなかには、床版断面外に配置した2次ケーブル(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を従来の直路式吊床版橋の60~80%程度に低減することを可能にした外ケーブル併用吊床版橋がある²⁾。最近では、吊支間が128.5m、かつ支持層が風化泥岩である架設地点において、PC吊床版橋の長支間化に対処する構造形式である外ケーブル併用吊床版橋が採用されており³⁾、今後、PC吊床版橋は、吊支間150m~200mへの適用、あるいは簡易な道路橋への適用が期待される。

しかしながら、PC吊床版橋を長支間化するためには、次の問題点を解決する必要がある。一般に、PC吊床版橋は、ケーブル理論で設計を行うものであるが、ケーブル理論における吊床版端部の支持条件はピン結合を仮定している。それに対し、実際の吊床版端部の支持条件は、図-1(a)に示す剛結構造にすることが一般的であるため、プレストレスの導入、クリープ・収縮の進行、あるいは温度低下などにより、吊床版取付部に局部的な曲げモーメントが発生することで、供用時において、吊床版取付部下縁に橋軸直角方向へのひび割れが発生し易いという問題点がある(図-2)。過去には、図-1(b)に示すくちばし構造として、局部的な曲げモーメントを緩和させる方法が採用されることもあったが、構造の簡略化や耐久性などの理由により、現在では剛結構造を採用することがほとんどである¹⁾。いずれにしても、吊床版取付部に対する設計手法は、未だ確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、吊床版取付部の挙動の解明と設計手法の確立を目的として、実際に施工された吊支間128.5mの外ケーブル併用吊床版橋に対して、吊床版取付部形状をパラメータとした複合非線形解析を行い、吊床版取付部形状とひび割れ発生位置の関係を明らかにするとともに、最適な取付部形状の検討を行った。

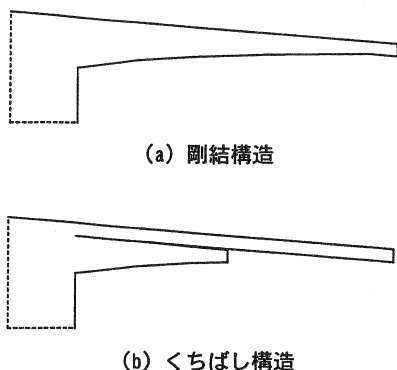


図-1 吊床版取付部の一般的な形状

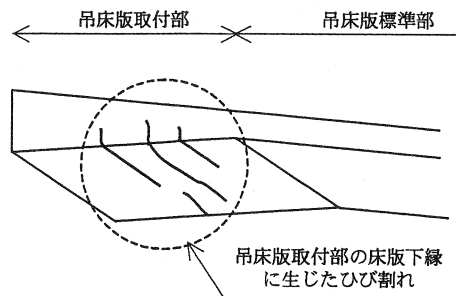


図-2 吊床版取付部に発生するひび割れ状況

2. 検討対象橋梁および設計条件

実橋レベルで比較的長支間のP C吊床版橋の吊床版取付部形状を検討するため、検討対象橋梁には、実際に施工された吊支間 128.5m の外ケーブル併用吊床版橋をモデル橋とした³⁾。検討対象橋梁の構造一般図を図-3に、支間中央断面図を図-4に示す。また、設計条件、使用材料等も、モデル橋と同一の条件を与えることとした。設計条件を表-1に、使用材料を表-2に示す。

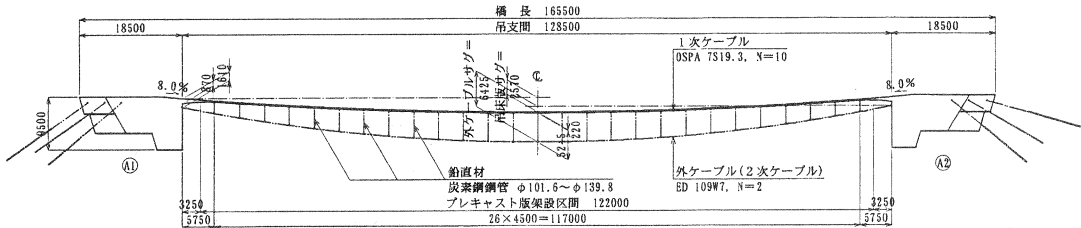


図-3 構造一般図

表-1 設計条件

設計吊支間	128.500m
有効幅員	3.000m
基本サグ	吊床版 2.570m (L/50) 鉛直材 6.425m (L/20)
活荷重	群集荷重 2.0kN/m ²
温度変化	吊床版 ±15°C 外ケーブル・鉛直材 +25°C, -15°C

表-2 使用材料

	設計基準強度, 規格, 種類	ヤング係数
コンクリート	$\sigma_{ck} = 50\text{N/mm}^2$	$E_c = 3.30 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
PC鋼材	1次ケーブル	$E_p = 2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	外ケーブル	$E_p = 1.96 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
鉄筋	SD295A	$E_s = 2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
鉛直材	STK400, $\phi 101.6 t=5.7 \sim \phi 139.8 t=4.5$	$E_t = 2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

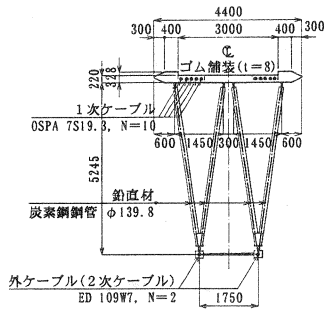


図-4 支間中央断面図

3. 解析ケース

最近のP C吊床版橋の設計において、最も多く採用される吊床版取付部形状は、吊床版標準部から吊床版端部まで床版厚が直線変化する剛構造である。そこで、解析ケースは、吊床版取付部の区間長（以下、取付部区間長と称する）と吊床版端部の床版厚をパラメータとし、過去の実績形状を参考にして設定した。解析ケースを表-3に示す。まずはじめに、床版の厚さ変化がないものを基本モデルとして設定した。それに対し、床版厚の変化があるものは、取付部区間長を 2.000m, 3.500m, 5.000m の3通りとし、さらに、それぞれの取付部区間長に対して、床版厚を 220mm~1100mm まで 220mm づつ増加させることとした。このようにして定められた各解析ケースにおける取付部形状を図-5に示す。

また、各解析ケースの取付部区間長および端部床版厚から算定する取付部形状に関する諸数値と吊支間の関係を図-6に示す。図中には、過去に施工されたP C吊床版橋の取付部形状に関する諸数値も付記する。図-6 (a)に示すように、吊支間と取付部区間長の関係は、吊支間が長いほど取付部区間長が長くなる傾向があることがわかる。同様に、図-6 (b)に示すように、吊支間と両橋台側の取付部区間長の和の比（以下、取付部区間長比と称する）の関係も、吊支間が長いほど取付部区間長比が大きくなる傾向があることがわかる。一方、吊支間と床版厚比（標準部床版厚と端部床版厚の比）の関係は、図-6 (c)に示すように、床版厚比を 2.0~3.0 で設定することが多いことがわかるが、床版厚の変化勾配で表した場合には、図-6 (d)からは明確な傾向がないように思われる。

表-3 解析ケース

No.	ケース	サグ比	吊支間 L (m)	有効幅員 B (m)	取付部区間長 L_b (m)	取付部区間長比 $L/(2L_b)$	標準部床版厚 t_1 (m)	端部床版厚 t_2 (m)	床版厚比 t_2/t_1	変化勾配 $(t_2-t_1)/L_b$
1	基本モデル	50	128.500	3.000	---	---	0.220	0.220	1.0	---
2	$L_b=2.000m$	50	128.500	3.000	2.000	32.1	0.220	0.440	2.0	0.110
3	$L_b=2.000m$	50	128.500	3.000	2.000	32.1	0.220	0.660	3.0	0.220
4	$L_b=2.000m$	50	128.500	3.000	2.000	32.1	0.220	0.880	4.0	0.330
5	$L_b=3.500m$	50	128.500	3.000	3.500	18.4	0.220	0.440	2.0	0.063
6	$L_b=3.500m$	50	128.500	3.000	3.500	18.4	0.220	0.660	3.0	0.126
7	$L_b=3.500m$	50	128.500	3.000	3.500	18.4	0.220	0.880	4.0	0.189
8	$L_b=3.500m$	50	128.500	3.000	3.500	18.4	0.220	1.100	5.0	0.251
9	$L_b=5.000m$	50	128.500	3.000	5.000	12.9	0.220	0.440	2.0	0.044
10	$L_b=5.000m$	50	128.500	3.000	5.000	12.9	0.220	0.660	3.0	0.088
11	$L_b=5.000m$	50	128.500	3.000	5.000	12.9	0.220	0.880	4.0	0.132
12	$L_b=5.000m$	50	128.500	3.000	5.000	12.9	0.220	1.100	5.0	0.176

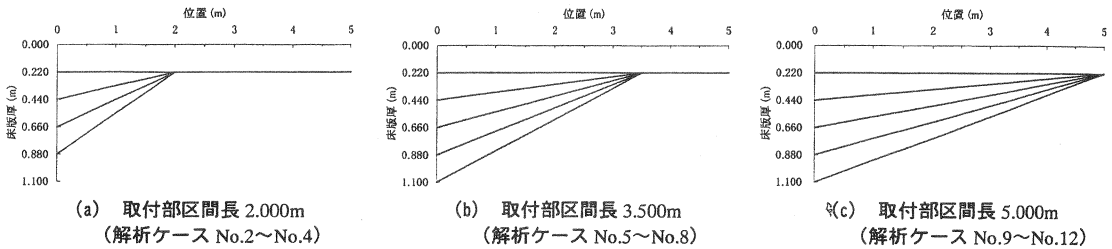


図-5 各解析ケースにおける取付部形状

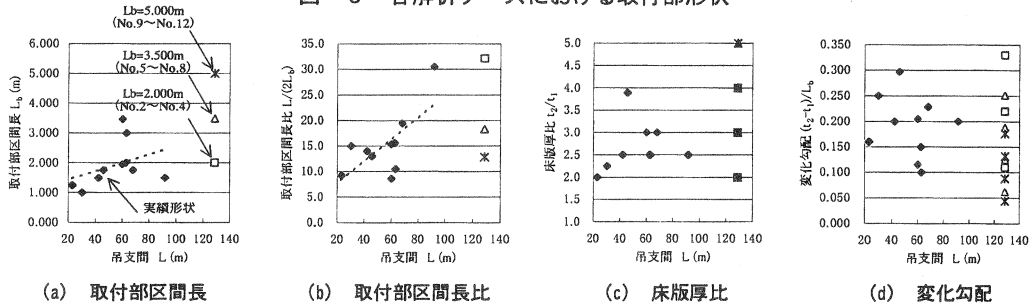


図-6 吊支間と取付部形状の関係 (実績形状と解析における形状)

4. 解析方法および解析モデル

複合非線形解析における解析条件を表-4に示す。幾何学的非線形性は、すべての部材に対して考慮したが、材料非線形性は、ひび割れ幅限界部材である吊床版取付部近傍におけるコンクリートの引張側の応力-ひずみ曲線のみを考慮し、コンクリートの圧縮側および鋼材の応力-ひずみ曲線は線形部材としてモデル化した。なお、ひび割れ幅限界部材は、図-7に示す引張軟化特性を与えると同時に、軸方向鉄筋をモデル化することとした。この引張軟化特性は、引張強度を超えるまでは線形部材として扱うが、引張強度を超えた直後からは引張応力を完全に無視するものであり、ひび割れ発生後の部材特性はRC部材と等価になるものである。また、コンクリート床版に使用する梁要素は、ファイバーモデルであり、断面の高さ方向に26~34層に積分点を設けた。

解析モデルは、実際の施工段階を考慮して3段階モデルとした。解析モデルを図-8に示す。段階1では、1次ケーブル架設・張力調整の段階に

表-4 解析条件

使用要素	要素種類	要素特性	
		要素種類	要素特性
吊床版 (コンクリート)	要素種類	3節点梁要素(曲線)	非線形要素(引張側のみ)
	要素特性	部材軸方向	断面高さ方向
	積分点	26~34層	
	一次ケーブル	要素種類	3節点トラス要素(曲線)
	外ケーブル	要素特性	弾性要素
	積分点	2点	
鉛直材	要素種類	2節点トラス要素	
	要素特性	弾性要素	
	積分点	2点	
鉄筋	要素種類	埋込鉄筋要素	
	要素特性	弾性要素	
	積分点	2点	
解析仕様	応力評価点	積分点	
	求解法	Newton-Raphson法または修正Newton-Raphson法	
	収束判定法	残差力・残差変位	
	幾何学的非線形解析手法	Total Lagrange法	

おける端部水平力を外力として与えた。段階2では、1次ケーブル端部の水平方向を拘束し、プレキャスト版・鉛直材・吊足場の自重、さらにプレキャスト版後打部の自重を載荷した。段階2で得られた1次ケーブルの曲線をもとに、段階3では、コンクリート床版、鉛直材、および外ケーブルの部材をモデル化した。また、吊床版取付部のモデル化は、吊床版取付部の断面図心位置を通るように梁要素の軸線を設定し、端部の支持条件は完全固定にした。さらに、取付部区間長に関係なく、端部から5mの区間をひび割れ幅限界部材と仮定し、この区間のみ軸方向鉄筋をモデル化した。軸方向鉄筋は、いずれの解析ケースにおいても、床版の上側、下側ともにD19@150の1段配置と仮定した。

5. 解析結果

(1) 供用時および施工中の吊床版取付部の応力変化

実際にモデル橋で適用した取付部形状（ただし、実橋は2次曲線形状）に最も近い形状である解析ケース11について、施工時および供用時におけるサグ、水平力、および吊床版取付部の応力度を、表-5に示す。表に示すように、吊床版取付部の上縁側は、プレストレス導入の際に、設計基準強度の44%程度となる比較的大きな圧縮応力度が発生し、クリープ・収縮の進行とともに圧縮応力度が低下する結果となった。一方、吊床版取付部の下縁側は、プレストレス導入の際に引張応力度が発生した後、クリープ・収縮の進行によって鉄筋引張応力度が100N/mm²程度に増加し、さらに群集荷重+温度低下の際には鉄筋引張応力度が140N/mm²に達する結果となった。以上のことから、プレストレス導入、クリープ・収縮、温度低下の際には、吊床版のサグが小さくなるとともに、吊床版取付部に下側引張の曲げモーメントが作用するといえる。

(2) パラメトリック解析結果

吊床版取付部近傍に発生する床版上縁のコンクリート圧縮応力度、および床版下縁側の鉄筋引張応力度を、各解析ケース毎に図-9～図-14に示す。図には、プレストレス導入、クリープ・収縮、群集荷重+温度低下の各段階の解析結果を示す。取付部区間

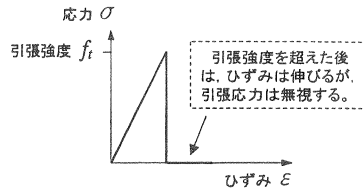
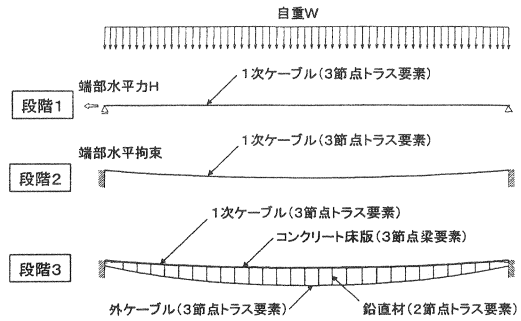
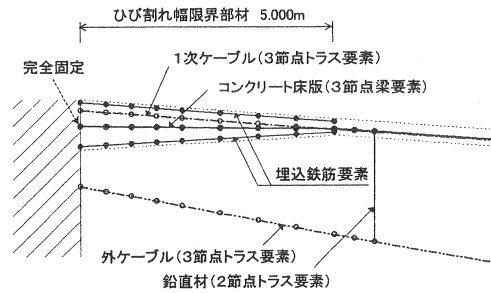


図-7 ひび割れ幅限界部材の引張軟化特性



(a) 全体図



(b) 取付部近傍拡大図(段階3)

図-8 解析モデル

表-5 供用時および各施工段階のサグ・水平力・取付部応力度 (解析ケース No.11)

限界状態	荷重状態	サグ量		作用水平力 (kN)		取付部応力度 (N/mm ²)		
		(m)	吊床版	外ケーブル	床版上縁	最下段鉄筋		
施工時	1次ケーブル架設・張力調整	0.229	11850					
	プレキャスト版・吊足場架設	2.990	16780			圧縮応力度の最大値 ↓	引張応力度の最大値 ↓	
	吊床版後打部打設	3.319	17930					
	外ケーブル緊張	2.940	4660	7103	21.99			59.1
	橋面工・吊足場撤去	2.915	3870	7025	23.11			68.7
	外ケーブルリラクゼーション終了	2.936	4550	6694	22.07			59.0
	永久荷重作用時(クリープ・収縮終了)	2.568	9459	5510	14.61			96.3
供用時	群集荷重	2.678	12579	5843	11.48			83.7
	群集荷重+温度上昇	2.825	11328	5831	6.31	65.1		
	群集荷重+温度低下	2.541	14115	5700	14.98	143.0		

長 2.000m, 3.500m, 5.000m のいずれのケースにおいても, 端部床版厚が大きくなるにつれて, 圧縮側, 引張側のそれぞれのピーク位置がともに吊床版取付部の前方に移行する結果となった。また, それぞれのピーク値も取付部形状によって異なり, 例えば, 取付部区間長毎に群集荷重+温度低下時の鉄筋引張応力度の最大値を比較すると, 床版厚によって $70\text{N/mm}^2 \sim 94\text{N/mm}^2$ 程度の差がある結果となった。なお, 引張側の解析結果は, 便宜上, 鉄筋引張応力度で示したが, 吊床版取付部下縁に生じるひび割れは, 吊床版取付部の床版厚の設定によって, ひび割れ発生位置およびひび割れ幅が異なることがいえる。

以上のことから, 吊床版取付部に発生する局所的な曲げモーメントに対する設計には, 吊床版取付部の床版厚変化の設定が重要な要素であることが明らかとなった。モデル橋における最適取付部形状として, 圧縮側, 引張側の両者のピーク値を小さくし, かつ取付部区間長全体の応力分布をできるだけ均等にする形状を選択すると, 解析ケースのなかでは, 取付部区間長 5.000m の端部床版厚 880mm が最適であると思われる。

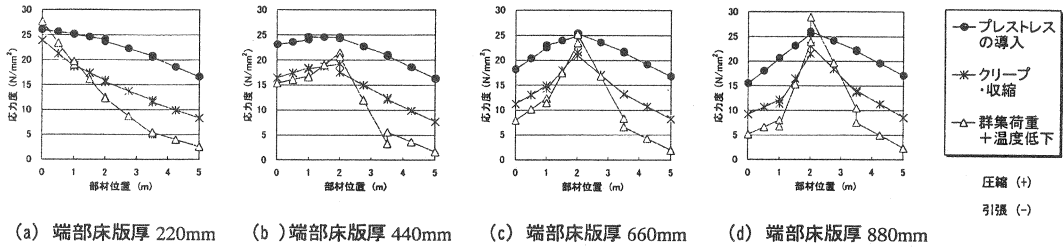


図-9 吊床版取付部近傍のコンクリート上縁圧縮応力度 (取付部区間長 2.000m)

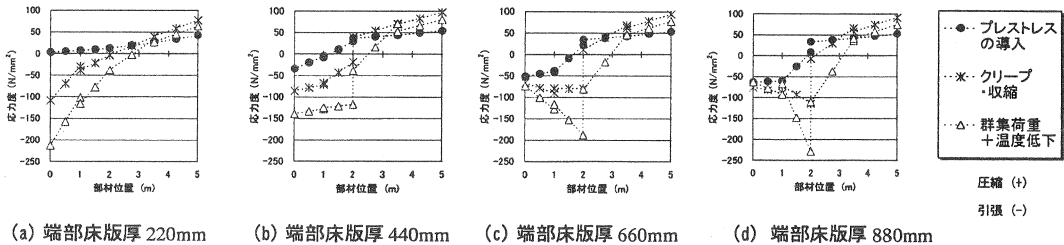


図-10 吊床版取付部近傍の最下段鉄筋引張応力度 (取付部区間長 2.000m)

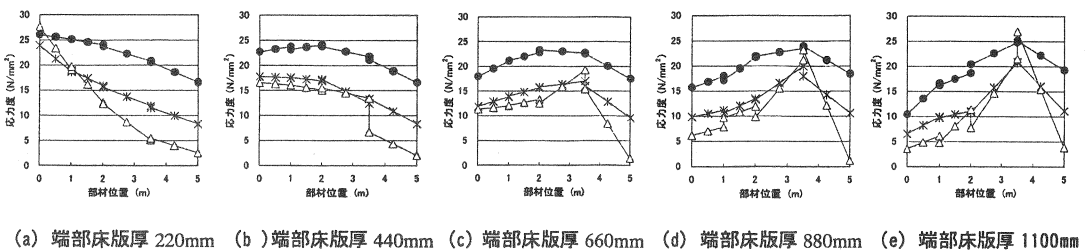


図-11 吊床版取付部近傍のコンクリート上縁圧縮応力度 (取付部区間長 3.500m)

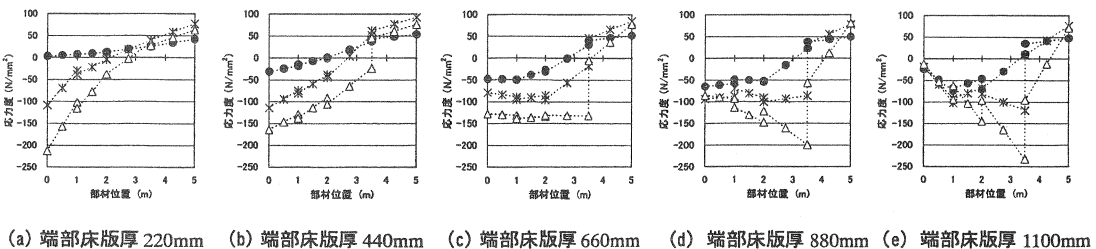
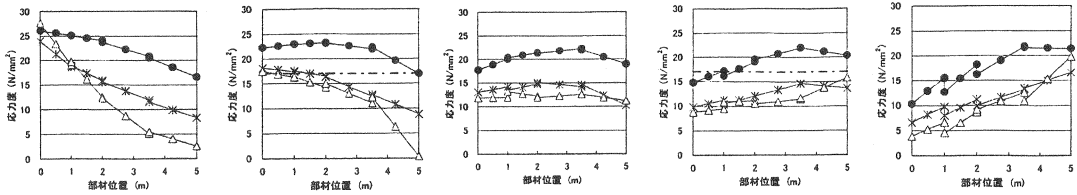
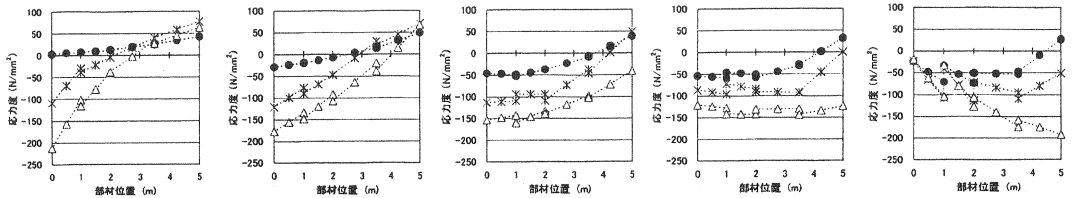


図-12 吊床版取付部近傍の最下段鉄筋引張応力度 (取付部区間長 3.500m)



(a) 端部床版厚 220mm (b) 端部床版厚 440mm (c) 端部床版厚 660mm (d) 端部床版厚 880mm (e) 端部床版厚 1100mm

図-13 吊床版取付部近傍のコンクリート上縁圧縮応力度 (取付部区間長 5.000m)



(a) 端部床版厚 220mm (b) 端部床版厚 440mm (c) 端部床版厚 660mm (d) 端部床版厚 880mm (e) 端部床版厚 1100mm

図-14 吊床版取付部近傍の最下段鉄筋引張応力度 (取付部区間長 5.000m)

6. おわりに

本研究では、吊床版取付部の挙動の解明と設計手法の確立を目的として、吊支間 128.5m の外ケーブル併用吊床版橋に対して、吊床版取付部形状をパラメータとした複合非線形解析を行った。その結果をまとめることとなる。

- 1) 吊床版取付部は、プレストレス導入、クリープ・収縮、温度低下の際に、吊床版のサグが小さくなるとともに、下側引張の曲げモーメントが作用する。
- 2) 吊床版取付部のコンクリート上縁は、プレストレス導入の際に、設計基準強度の 44% 程度の比較的大きな圧縮応力度が生じるが、クリープの進行とともに低下していく。
- 3) 吊床版取付部の最下段鉄筋の引張応力度 (ひび割れ幅) は、クリープ・収縮とともに大きくなり、さらに温度低下の際にも大きくなる。
- 4) 吊床版取付部の端部床版厚が大きいほど、コンクリート圧縮応力度および鉄筋引張応力度 (ひび割れ幅) のピーク位置が吊床版取付部の前方に移行する。また、それぞれのピーク値は、取付部形状によって異なる。

以上のことから、吊床版取付部は、端部床版厚や吊床版区間長などの取付部形状をパラメータとした複合非線形解析を行うことで、最適な取付部形状の設計が可能となることが明らかとなった。しかしながら、本研究では、吊支間 128.5m の外ケーブル併用吊床版橋だけを対象として検討したものであり、また、吊床版取付部の形状も直線変化するもの限定している。よって、今後は、従来の直路式吊床版橋も対象とし、吊支間、設計サグ比、プレストレスの大きさ、曲線変化する形状等もパラメータに含めて総合的に検討していく予定である。

参考文献

- 1) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PC吊床版橋設計施工規準 (案), 2000.11
- 2) 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.
- 3) 二階堂・柳内・町・熊谷：外ケーブル併用吊床版橋 (いわき公園展望橋) の設計・施工, 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)