

支間長800mエクストラドーゾ吊橋の設計に関する研究

三井住友建設(株)	正会員	工博	○ヘン	サルピソット
三井住友建設(株)	正会員	工修	内堀	裕之
三井住友建設(株)	正会員	工博	永元	直樹
三井住友建設(株)	正会員	工博	春日	昭夫

Abstract : In the design of a large span bridge, a hybrid bridge which combines both suspension and cable-stayed structure inherently comes with higher towers in comparison to the conventional suspension bridge. Consequently, the angular change of the main cable at the tower saddle could be larger which causes increasing secondary stress in the main cable and the cable becomes more critical in fatigue. Therefore, in this study, to deal with the secondary stress in the main cable and enhance the aerodynamic stability, the authors aim to develop a 800 m span of concrete butterfly web girder bridge which is a hybrid between an extradosed and a suspension structure. In this paper, three different extradosed spans of the proposed hybrid bridge are comparatively designed and discussed to confirm their structural behaviors. It is confirmed that this new type of hybrid bridge can be designed, and moreover it is found that the system with extradosed span to main span ratio 61% is the most efficient system than others.

Key words : Extradosed and suspension hybrid bridge, Butterfly web girder, Secondary stress

1. はじめに

ハイブリッド斜張吊橋は吊橋のケーブルシステムに斜ケーブルで補剛することで、ブルックリン橋で採用されたように耐風安定性を向上させることが従来より広く知られている¹⁾。しかし、超長大スパン橋梁の設計において、ハイブリッド斜張吊橋を採用する場合、一般的に吊橋よりも高い主塔が適用されている²⁾。その結果、塔頂での主ケーブルの曲げ角度が大きくなり、架設途中および活荷重作用時のケーブルシステムの大きな変形により、主ケーブルに2次応力が大きく発生する。そのため、2次応力を考慮したケーブル疲労などの安全性が懸念され、実験等による確認が必要とされている³⁾。

一方、エクストラドーゾ構造では、桁の剛性を大きくすることによって、主塔を低くすることが可能である。また、主桁にバタフライウェブを適用することによって、上部工構造の重量を軽減できるほか、開口断面を有する主桁構造のため耐風安定性がより向上する⁴⁾。本研究では、主ケーブル2次応力の低減および耐風安定性の向上を図ったコンクリートの超長大スパン橋梁の開発を目的として、エクストラドーゾ構造および吊構造を組合せた支間長800mのエクストラドーゾ吊橋を提案し、構造の検討を行った。本論文は、エクストラドーゾ区間の異なった3つの構造を比較し、構造の実現性を確認するとともに数量による各構造の評価を行ったものである。

2. エクストラドーゾ吊橋の構造概要

2.1 主桁および主塔の形状

提案するエクストラドーゾ吊橋はエクストラドーゾ構造および吊構造のハイブリッド橋梁で、図-1および図-2に示すように、有効幅員30mを有する2面吊りの超長大道路橋とした。主桁は、コンクリート製のバタフライウェブ3室箱桁で、桁高は7mとした。主塔の高さは、一般的な吊橋と同程度となるように、中央支間長の1/8となる100mとした。主ケーブルのサグ比は1/8.89とした。

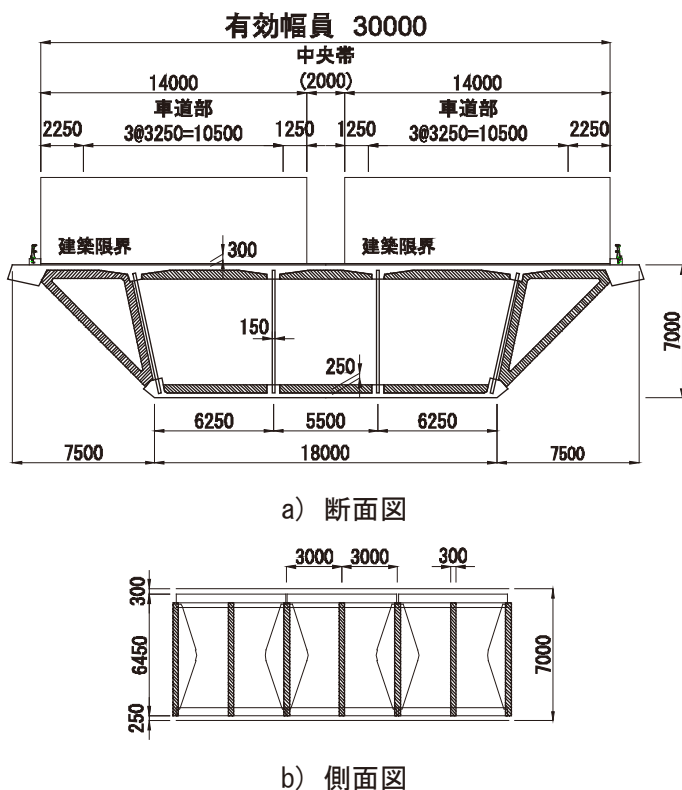


図-1 主桁の形状 (単位: mm)

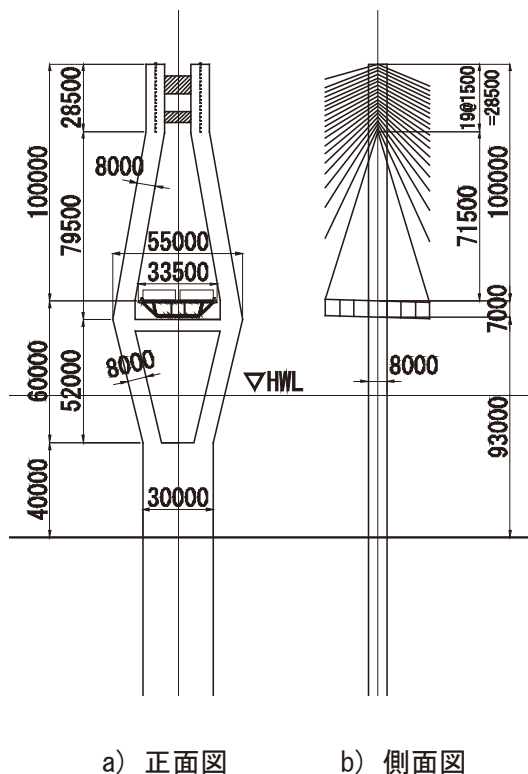


図-2 主塔の形状 (単位: mm)

2.2 エクストラードズド区間の設定

文献1) によれば、ハイブリッド斜張吊橋においては、側径間長が中央径間の25~30%程度と比較的短いのが好ましい構造システムである。今回は図-3に示すように、中央支間長を800m一定とし、エクストラードズド区間長と中央径間長との比率（以後、エクストラードズド区間比率と呼ぶ）を変化させ、それぞれ79%、61%および43%の3つの異なった構造を検討し比較を行った。なお、エクストラードズド区間は張出し架設を想定し、側径間長は主塔に対して対称となるように設定した。

3. 設計の検討概要

3.1 設計条件および使用材料

設計条件および使用材料は、道路橋示方書⁵⁾ およびPC斜張橋・エクストラードズド橋設計施工規準⁶⁾ に従い、それぞれ表-1および表-2に示す。

表-1 設計条件

項目	設計値	
中央支間	800 m	
有効幅員	30.0 m	
縦断勾配	側径間	3%
	中央径間	1.5% 放物線
活荷重	B活荷重	
設計温度	20°C	
温度変化	コンクリート	±15°C
	ケーブル	±27°C
安全率	主ケーブル	3.0
	ハンガーケーブル	3.5
	斜材	2.5

表-2 使用材料

使用材料	名称	強度 (N/mm ²)	重量 (kN/m ³)
コンクリート	主桁	高強度 $f_{ck} = 60$	24.5
	主塔	高強度 $f_{ck} = 40$	24.5
主ケーブル	PWS-127(φ5)	$f_{pu} = 1770$	77.0
ハンガーケーブル	NEW-PWS(φ7)	$f_{pu} = 1770$	77.0
斜材	SWPR7B(φ15.2)	$f_{pu} = 1860$	77.0
PC鋼材	SWPR7B(12S15.2)	$f_{pu} = 1860$	77.0
鉄筋	SD 345	$f_{sy} = 345$	77.0

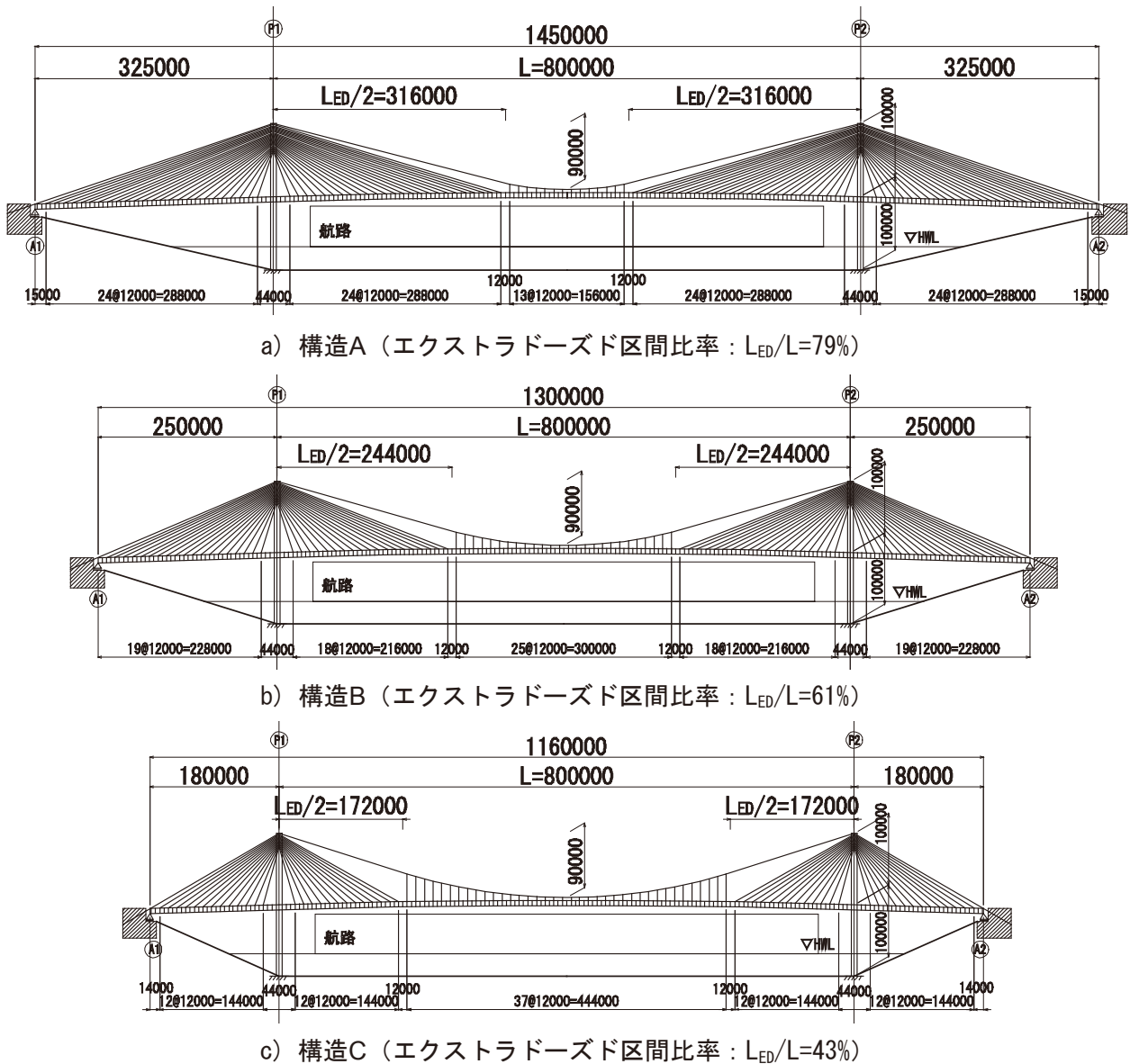


図-3 エクストラドーズド区間比率の違いによる各構造の側面図

3.2 解析モデルおよび架設の手順

弾性平面骨組みモデルを用いて、エクストラドーズド区間比率を変化させてそれぞれ概略検討を行った。施工の手順は、図-4に示すように (1) エクストラドーズド区間の張出し施工、(2) プレキャスト製桁の吊上げによる吊区間架設、の順に行うことを想定した。また、吊区間架設により主塔に発生する曲げモーメントは予めセットバックしたサドルを移動することで低減することとし、主塔の設計には考慮しなかった。最後に、PC鋼材によりエクストラド

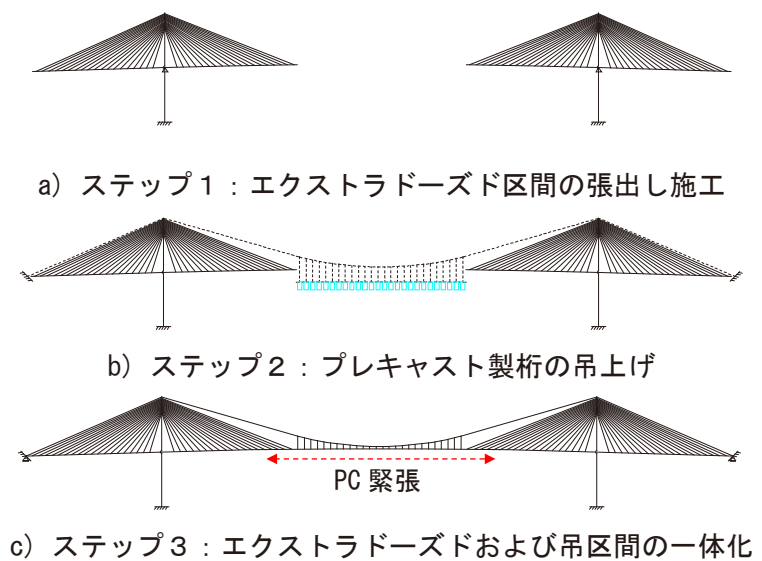


図-4 解析モデルおよび架設のイメージ図

ズド区間および吊区間の桁を一体化する。なお、主ケーブルの曲線は式 (1) により、算出した¹⁾。

$$y = -\frac{k_m}{M_m(l_m/2)} M_m(x) \tag{1}$$

ここで、 l_m 、 k_m 、 $M_m(x)$ はそれぞれ中央径間長、主ケーブルのサグおよび主ケーブルに作用する死荷重によるモーメント曲線である。

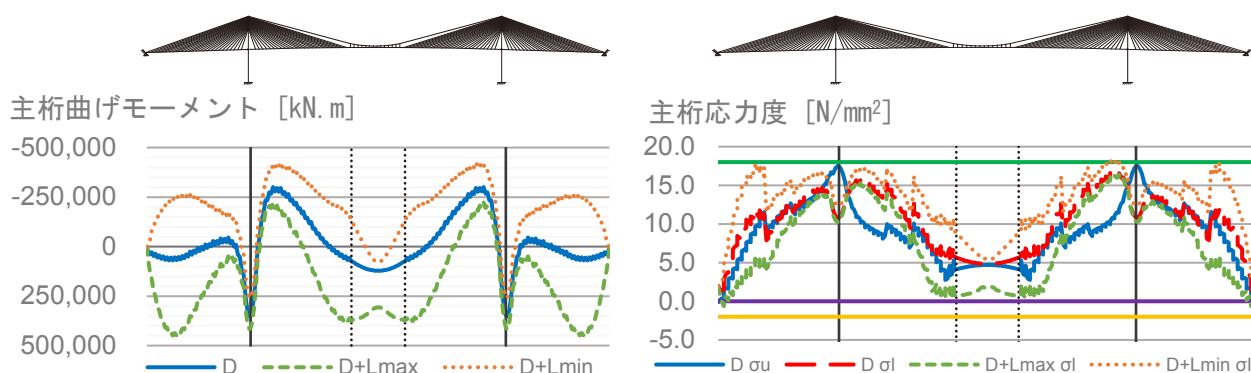
4. 設計の検討結果

4.1 主桁の設計

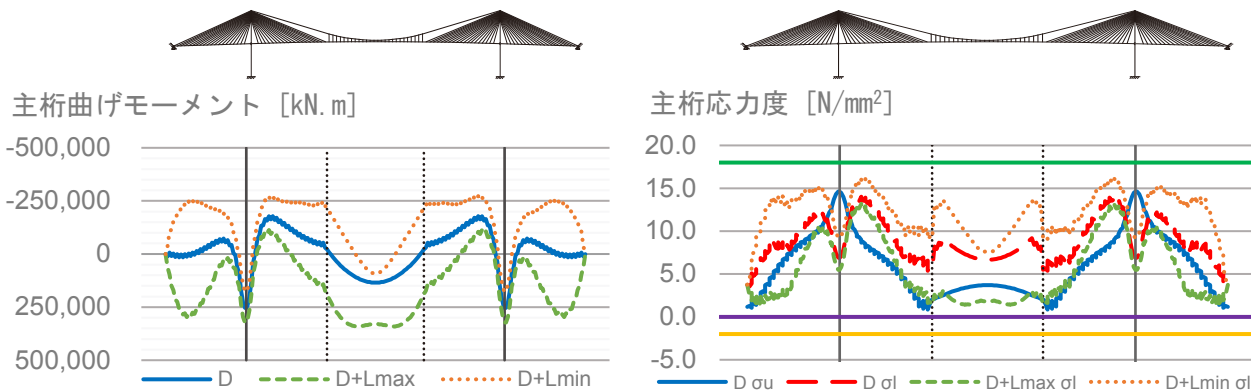
図-5にエクストラドーズド区間比率の異なった各構造の主桁に作用する曲げモーメントおよび応力度の結果を示す。これらの結果から、主桁の応力度は

表-3 主桁コンクリートの許容応力度 [N/mm²]

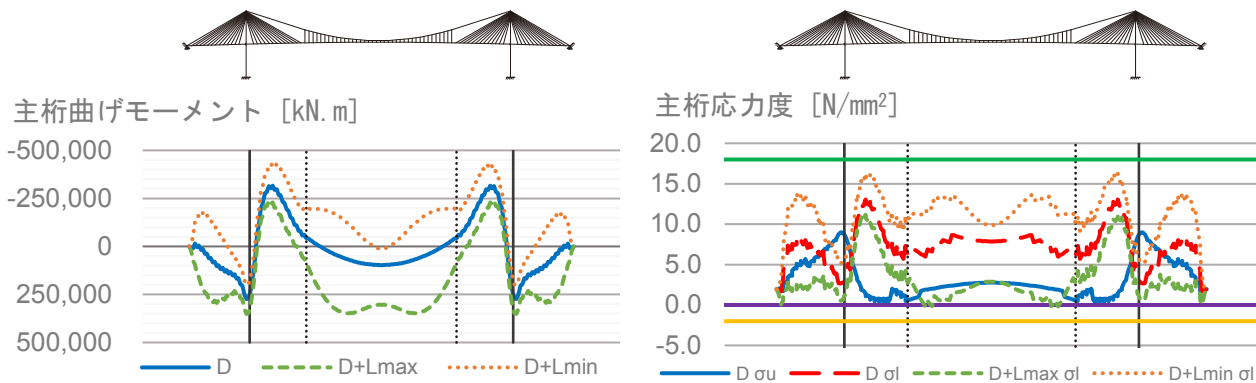
死荷重時		活荷重時	
引張側	圧縮側	引張側	圧縮側
0	18	2	18



a) 構造A (エクストラドーズド区間比率 : $L_{ED}/L=79\%$)



b) 構造B (エクストラドーズド区間比率 : $L_{ED}/L=61\%$)



c) 構造C (エクストラドーズド区間比率 : $L_{ED}/L=43\%$)

図-5 各構造の主桁の曲げモーメントおよび応力度

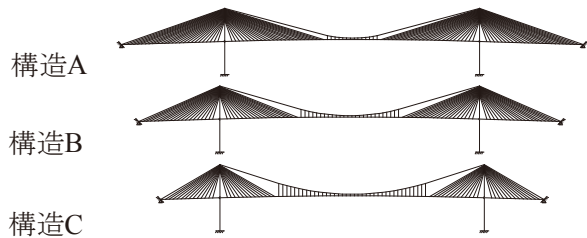
どの構造においてもすべて表-3に示す許容値を満足し、提案した構造は実現可能と考えられる。ただし、図-6に示すように、死荷重時には吊区間に対しエクストラドーズド区間の主桁に作用する軸力が大きいため、各構造におけるエクストラドーズド区間の床版厚は表-4に示す値が必要であった。

表-4 各構造の必要な床版厚 [mm]

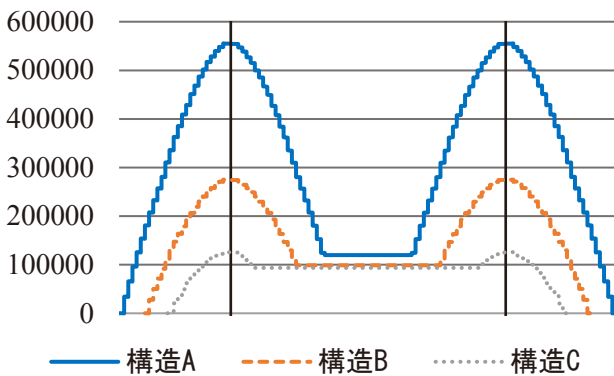
各構造	上床版厚	下床版厚
構造 A	500 (支点部)	1200 (支点部)
構造 B	300 (全区間)	400 (全区間)
構造 C	300 (全区間)	250 (全区間)

4.2 斜材の設計

斜材の設計は、PC斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工基準⁶⁾に基づいた。斜材の許容値は、活荷重による応力変動を上限130N/mm²にし、0.4 f_{pu} で設定した。図-7から分かるように、どの構造においても側径間での斜材応力変動が非常に大きくなった。側径間の中間橋脚追加などにより、斜材応力変動を抑えられれば、より合理的な構造が実現できると考えられる。

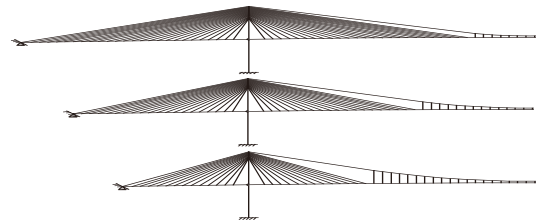


死荷重時の主桁軸力 [kN]

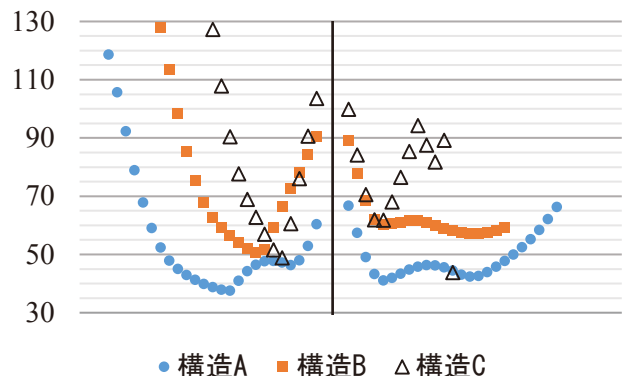


— 構造A - - - 構造B 構造C

図-6 死荷重時の主桁に作用する軸力図



活荷重による斜材の応力変動 [N/mm²]



● 構造A ■ 構造B △ 構造C

図-7 活荷重による斜材の応力変動図

4.3 主ケーブルおよびハンガーケーブルの設計

各構造の主ケーブルおよびハンガーケーブルの応力度を表-5に示す。主ケーブルの構成は構造A、BおよびCに対して、それぞれPWS-127を160本、192本および274本となった。ハンガーケーブルは構造Bおよび構造CではNEW-PWS (7φ283) であるが、構造Aは下床版厚が厚くなるため、NEW-PWS (7φ337) が必要となった。

表-5 主ケーブルおよびハンガーケーブルの応力度

各ケーブル	各応力度 (N/mm ²)	構造 A	構造 B	構造 C
主ケーブル	ケーブル構成 (PWS-127)	160 本	192 本	274 本
	最大応力度	483.6	583.8	571.1
	活荷重による応力変動	58.3	48.83	38.2
	許容応力度	590.0		
ハンガーケーブル	ケーブル構成 (NEW-PWS)	7φ337	7φ283	7φ283
	最大応力度	435.8	494.4	478.5
	活荷重による応力変動	41.7	51.8	55.6
	許容応力度	505.7		

4.4 主塔の設計

各構造における主塔の設計結果を表-6に示す。この結果から、どの構造においても提案した主塔が設計可能といえる。なお、吊区間架設による主塔に発生する曲げモーメントはセットバックによる低減を行い、主塔部材は圧縮状態となるため、鉄筋の圧縮応力度を示している。

表-6 主塔の鉄筋応力度

設計荷重	応力度 (N/mm ²)	構造 A	構造 B	構造 C
死荷重時	σ'_c (14.0)*	9.7	9.1	9.5
	σ'_s (200)*	145.7	136.0	142.1
活荷重時	σ'_c (14.0)*	10.5	9.7	10.1
	σ'_s (200)*	156.7	145.0	150.9
温度変化時	σ'_c (16.1)*	10.9	10.2	10.4
	σ'_s (200)*	163.0	153.0	155.2

*括弧内は許容応力度を示す。

4.5 数量の比較

エクストラードズド区間比率の異なる各構造の数量を表-7に示す。なお、各構造の橋長が異なるため、考察は800m中央径間のみで集計する数量を比較する。この数量の結果からエクストラードズド区間比率が大きい構造Aのコンクリート数量が他の

表-7 各構造の数量の比較

		各材料	単位	構造 A	構造 B	構造 C
橋梁全長集計	コンクリート (主桁のみ)		m ³	54,990	38,296	32,068
	各ケーブル	主ケーブル	ton	9,568	10,411	13,495
		ハンガーケーブル	ton	31	61	120
		斜材	ton	7,352	3,729	2,132
		PC 鋼材	ton	300	349	469
		合計	ton	17,252	14,551	16,216
中央支間集計	コンクリート (主桁のみ)		m ³	29,862	23,302	22,116
	各ケーブル	主ケーブル	ton	5,206	6,257	8,944
		ハンガーケーブル	ton	31	61	120
		斜材	ton	3,641	1,844	1,052
		PC 鋼材	ton	231	294	348
		合計	ton	9,109	8,456	10,464

構造の数量よりも著しく多いことが分かる。これは構造Aの床版厚がかなり厚くなったためである。また、各ケーブルの数量の合計はエクストラードズド区間比率が61%である構造Bがもっとも少ないことが分かる。したがって、検討する3つ構造の中でエクストラードズド区間長が中間にある構造Bがもっとも好ましい構造であるといえる。

5. まとめ

本研究では主ケーブル2次応力の低減および耐風安定性の向上を図ったバタフライウェブのエクストラードズド吊橋を提案し、実現性の検討を行った。また、エクストラードズド区間長と中央径間長との比率を変化させ、3つの異なる構造の概略設計および数量を比較した。その結果、提案した橋梁は十分実現可能であると確認できた。また、数量比較から、エクストラードズド吊橋には中央支間長に対して最適なエクストラードズド区間長があることが分かった。ただし、今回の構造は活荷重による側径間斜材応力の変動が非常に大きいため、側径間斜材の応力変動を抑えるための対策や、コンクリート部材では重要であるクリープ・乾燥収縮の問題を今後の課題として、検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) Gimsing, N. J. and Georgakis, C. T. : Cable supported bridges, John-Wiley, West Sussex, UK, 2012.
- 2) 例えば, Highly-strung, Project reports, Bridge Design & Engineering, Issue no.80, Third quarter 2015.
- 3) 例えば, Lee, M.ほか: Angular Change and Secondary Stress in Main Cables of Suspension Bridges, International Journal of Steel Structures 16(2), 2016, pp. 573-585.
- 4) 春日: Multi-span extradosed bridges, Proceeding of Multi-Span Large Bridges, pp.67-82, 2015.7.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2014年3月
- 6) プレストレストコンクリート工学会: PC斜張橋・エクストラードズド橋設計施工規準, 2009年4月