

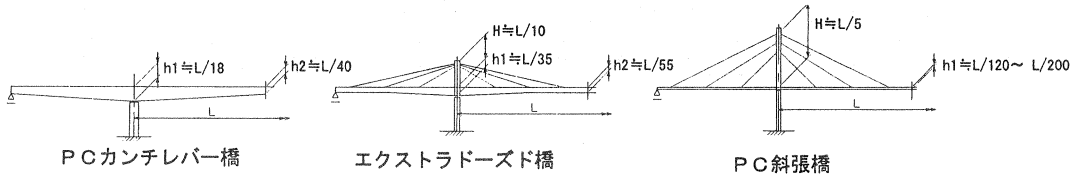
(24) 地震国におけるPC長大橋の構造形式による経済合理性と構造合理性について

九州大学大学院 正会員 大塚久哲
 九州大学大学院 正会員 矢葺 亘
 新構造技術(株) 正会員 若狭忠雄
 (株)エスイー 正会員 ○緒方純二

1. はじめに

近年、複合斜張橋も含めてプレストレストコンクリート橋は長大化の一途を辿っている。地震国において、PC長大橋の構造形式による経済性と構造合理性を上・下部工一体の評価システムで定量的に評価することはPC長大橋を経済的に選定する上で極めて重要な視点であると思われる。一般に、PC長大橋で考えられる構造形式は、歴史的発展過程を考慮して、カンチレバー橋、斜張橋およびエクストラードズド橋に分類できると思われる。これらの構造形式は上・下部工を一体として評価した場合、地震国においては、上・下部工の地震時相互作用から、その選定基準に、ある範囲の適合性があるものと思われる。

そこで、筆者らはPCカンチレバー橋については既往の例を引用し、PC斜張橋とエクストラードズド橋についてはスパン $L=120, 150, 180, 200\text{m}$ の4ケースで地震時の構造特性、耐震性および経済性の検討を行い、各形式の適性支間の範囲を求めることを試みた。



図一 構造形式と桁高の関係

2. 構造特性

2.1 プレストレスの考え方

長大カンチレバー橋において、桁高をできるだけ低くし、上部構造を軽量化し下部工への影響を小さくすることは、極めて重要なことである。更に、支間が長大化してPCの特徴を発揮するにはPCの偏心量を大きくする必要が生じる。その結果、コンクリート製の主塔を高く設けた($H=L/5$ 程度)PC斜張橋が誕生した。また、架設方法と耐震性能を考えると、最終的にPC斜張橋はマルチサスペンデット型式にならざるを得ない。一方、航空障害、景観上の問題から主塔を高く出来ない条件下で、主桁を薄く軽くしたい場合は、偏心量を斜張橋の1/2程度に設定することが考えられ、M athivatが提唱したのがエクストラードズド橋である。エクストラードズド橋のように主塔高が低い場合、鉛直成分が小さいため活荷重による応力変動は小さくなるが、逆に、主桁を吊る効果は少ない。したがって、図一の様な桁高関係になる。

2.2 圧縮特性

カンチレバー橋では、一般に中間支点の桁高が $L/18$ であり、支間中央桁高は $L/40$ 程度である。(図一)一方、コンクリートの圧縮応力度は σ_{ck} の1/3程度を許容している。また、PC斜張橋では、斜材の吊り効果による曲げモーメントの低下と共に、一般には、耐久性の問題から、圧縮応力 $3\sim 7\text{N/mm}^2$ 程度のプレストレスが導入されている。一方、エクストラードズド橋では桁高が中間支点上で $L/35$ 、支間中央で $L/55$ となるが、斜材の扁平性のため主桁への斜材水平分力(圧縮力)が作用して、コンクリートの圧縮応力を検討した結果、表一に示すように $14\sim 19\text{N/mm}^2$ と圧縮応力が卓越している。従って、主桁のコ

表一 諸元および応力表

	PC斜張橋				エクストラードズド橋			
	L=150m		L=200m		L=150m		L=200m	
桁高 (m)	支間中央部		1.8	2.0	3.0	5.0	6.0	5.0
	支店部		1.8	2.0	5.0	6.0	5.0	6.0
主塔高 (m)			35.0	45.0	15.0	20.0	15.0	20.0
斜材吊り間隔 (m)			7.5	7.0	3.5	7.0	3.5	7.0
主桁 合成応力度 (N/mm ²)	支間中央部	上縁	3.3	3.5	6.2	11.7	6.2	11.7
		下縁	0.0	-1.0	-0.9	-1.7	-0.9	-1.7
	支店部	上縁	-	-	6.7	7.6	6.7	7.6
		下縁	-	-	14.4	12.7	14.4	12.7
付近	上縁	4.0	4.2	5.9	3.0	5.9	3.0	
	下縁	5.9	6.3	4.9	19.0	4.9	19.0	
ケーブル	断面	鉛直成分	0.89	-0.82	-0.30	-0.40	-0.30	-0.40
		水平成分	0.42	0.29	0.21	0.19	0.21	0.19
分力 *	断面	鉛直成分	0.49	-0.57	-0.95	-0.92	-0.92	-0.92
		水平成分	0.91	0.92	0.97	0.98	0.97	0.98
斜材応力振幅 (N/mm ²)			90	120	40	50	40	50
鉛直分担率 (%) **			85	90	10	20	10	20
クリープ、乾燥収縮による斜材張力減少量 (N/mm ²)			21	31	114	66	114	66

* 斜材張力を1.0とした場合の鉛直、水平方向の分担。
 ** 斜材の分担荷重/全載荷荷重 (%)。

ンクリート強度は50N/mm²以上に上げる必要がある。

2.3 鉛直荷重分担率および応力振幅

斜材の鉛直分担率はエクストラードズド橋およびPC斜張橋の構造特性を表す指標として鉛直荷重分担率 $\beta = 30\%$ 程度をエクストラードズド橋とPC斜張橋の境界の目安としており、斜材の許容値も応力振幅が $\Delta\sigma_p$ により $0.4\sigma_{pu}$ 、 $0.6\sigma_{pu}$ と区別しているようである。本検討結果によれば鉛直分担率、応力振幅は、表-1のようになり、エクストラードズド橋で鉛直分担率は10~20%で、斜張橋で85~90%で応力振幅は、エクストラードズド橋で $\Delta\sigma_p = 40 \sim 50\text{N/mm}^2$ で斜張橋で $\Delta\sigma_p = 90 \sim 120\text{N/mm}^2$ となっている。エクストラードズド橋のように主塔高が低い場合、鉛直成分が小さいため活荷重による応力変動は小さくなっているが、主桁を吊る効果は少ないことが判る。

2.4 クリーブ、乾燥収縮による影響

クリーブ、乾燥収縮による斜材ケーブルの引張力減少量は検討結果、表-1に示すように斜張橋では20~30N/mm²、エクストラードズド橋では80~120N/mm²とエクストラードズド橋の方が3倍以上に大きくなっている。これは、エクストラードズド橋の方が軸圧縮応力が大きいいため、斜材張力減少に与える影響が大きくなっているものと考えられる。

2.5 架設時および設計荷重時の応力

エクストラードズド橋は架設時に斜材の引張力調整を行わないことが施工上の利点であるが、主桁の中間支点から斜材最下段付近の断面において、架設時に下縁で引張応力、設計時に下縁で圧縮応力がクリティカルとなる。一方、斜張橋の場合は、斜材の引張力調整が行なわれるが、架設時と完成時の応力状態を自由に調整できる。このことが、斜張橋の長支間化を可能にしている。

3. 耐震性評価

3.1 固定度と支承条件の影響

耐震性評価において、各構造形式の下部工との連結条件は上下部一体の耐震性能にとって極めて重要である。PC斜張橋で一般に用いられるサスペンデッド型式は、斜材による地震時減衰効果が大きく、地震力の下部工への影響を大幅に軽減できる。

一方、エクストラードズド橋では、斜材の鉛直抵抗が少ないため、サスペンデッド型式の適用は困難である。連続桁型式は3つの形式で採用されるが、支承のコスト比率が高いため、工事費の増加につながりやすい。さらに、ラーメン型式は、カンチレバー橋、エクストラードズド橋ではよく使用されている。この型式は、主桁と橋脚が剛結されているが、地震による断面力は構造の減衰効果が少ないためサスペンデッド型式ほど小さくならない。(表-3参照)。

3.2 基礎の条件と構造減衰

基礎の条件には、岩盤基礎と弾性地盤が考えられる。岩盤の場合、下部工への影響は、カンチレバー橋、エクストラードズド橋、斜張橋の順に応答値は減少する。弾性地盤の場合には、地震時の応答値は、カンチレバー橋が大きく、エクストラードズド橋では、上下部が弾性支持の場合、上部構造の重さと減衰効果の少なさから基礎への影響は大きくなる。一方、サスペンデッド型式斜張橋では主桁の軽さと、斜材の減衰効果により基礎工の曲げモーメント、水平力共に大きく減少する。

3.3 非線形動的解析

(1) 解析条件

本検討ではエクストラードズド橋と斜張橋の非線形動的解析の条件は次のようである。

- ① 地域区分・・・A地域とする。
- ② 地盤種別・・・岩盤(I種地盤)および弾性地盤(III種地盤)
- ③ 入力波・・・TYPE I、TYPE IIのそれぞれについての3波平均

表-2 固有周期

基礎の 支持条件	1次の固有周期(sec)		
	PC斜張橋	エクストラードズド橋	
	サスペンデッド型式	連続型式	ラーメン型式
岩盤支持の場合	2.47	1.76	1.08
弾性支持の場合	2.82	1.80	1.09

(2) 解析結果比較

1) 固有値

表-2に支間150mで岩盤(I種地盤)と弾性地盤(III種地盤)、A地区におけるPC斜張橋とエクストラードズド橋の1次の固有周期および断面力が示されている。地震力に影響を与える1次の固有周期はPC斜張橋で2.5~2.8sec、エクストラードズド橋で1.1~1.8secと前者が長周期となっている。

2) 支間L=150mの場合の主塔・橋脚における断面力応答

図-2に主塔・橋脚における曲げモーメント図を、図-3に主塔・橋脚におけるせん断力図を示し、それぞれの橋脚付根断面力を、表-3に示す。地震波タイプI、IIの比較では、曲げモーメントについては、斜張橋のサスペンデッド形式の場合、タイプIの方が大きく他の場合は、タイプIIの方が大きくなっている。これは、サスペンデッド構造の長周期による影響と考えられる。せん断力については、すべての場合タイプIIが大きくなっている。ゴム支承とラーメンの比較では、曲げモーメントについてはゴム支承の方が大きい、水平力はラーメンの方が大きくなっている。岩盤と弾性支持の比較においては、曲げ、水平力共に岩盤支持の方が大きくなっているがその差は小さい。斜張橋とエクストラードズド橋との比較では、橋脚付根の曲げモーメントは斜張橋がエクストラードズド橋と比較して0.73~0.76とエクストラードズド橋より小さくなっている。また、水平力は斜張橋が0.35~0.36と小さくなくなり、工事費にかなり影響を与える事が判る。これは、サスペンデッド型式による構造減衰効果によるものと考えられる。

支間L=150mの場合の弾性基礎例えば、鋼管矢板基礎で検討した結果、斜張橋とエクストラードズド橋の基礎の大きさはそれぞれ、 $22.4 \times 19.0 \times 20$ および $24.2 \times 22.4 \times 20$ となり基礎工工事費は1:1.3と斜張橋の方がかなり安価となる事が判った。

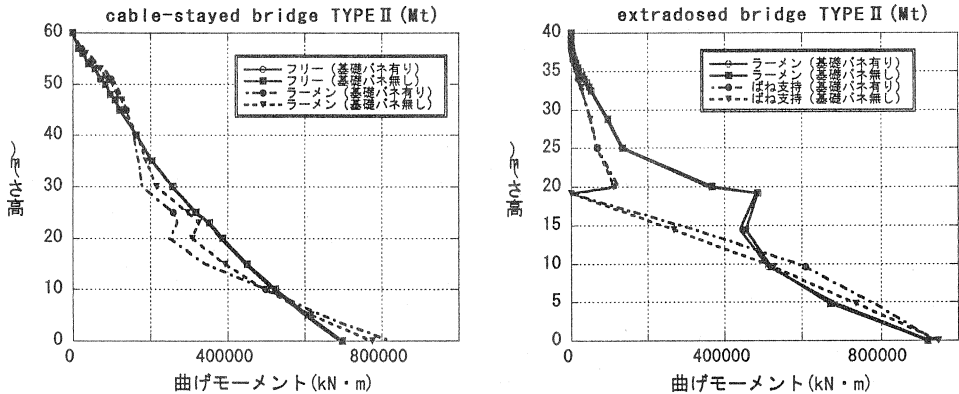


図-2 動的解析モーメント図(橋軸方向)

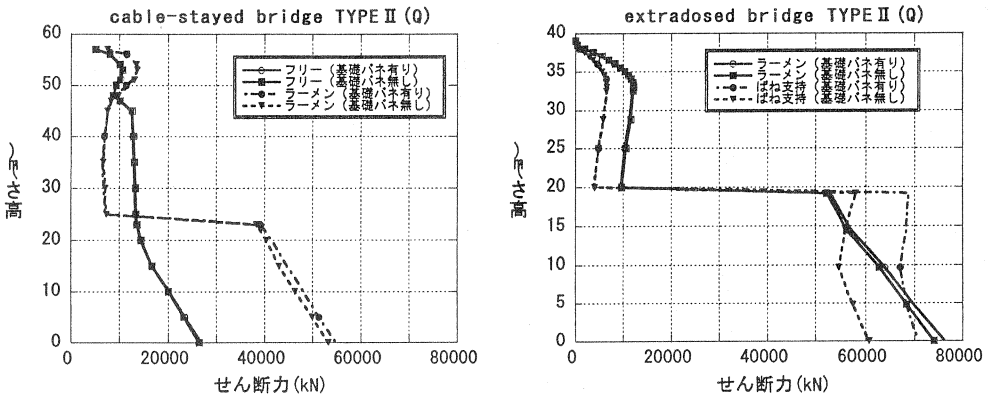


図-3 動的解析せん断力図(橋軸方向)

表-3 橋脚付根断面力表(L=150m、橋軸方向)

項目	地震波	支承条件	PC斜張橋		エクストラードズド橋		比率	
			①サスペンデッド	②連続(ゴム反力分散)	③ラーメン構造	①/②	①/③	
曲げ モーメント (kN・m)	タイプⅠ	岩盤支持	734,860	932,550	906,570	0.79	0.81	
		弾性支持	733,190	908,540	906,470	0.81	0.81	
	タイプⅡ	岩盤支持	697,140	948,700	920,720	0.73	0.76	
		弾性支持	691,420	937,790	925,430	0.74	0.75	
水平力 (kN)	タイプⅠ	岩盤支持	21,840	55,350	66,390	0.39	0.33	
		弾性支持	22,090	59,770	67,480	0.37	0.33	
	タイプⅡ	岩盤支持	26,470	55,680	73,970	0.48	0.36	
		弾性支持	26,880	70,830	76,250	0.38	0.35	

4. 数量比較

エクストラードズド橋および斜張橋の実績を基にしたコンクリート、斜材ケーブル重量の数量と、今回の試設計による数量をプロットしたものを図-4に示す。

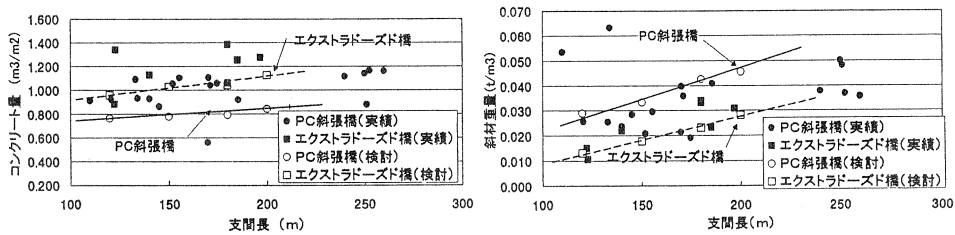


図-4 支間長と上部工数量の関係

5. 工事費比較

カンチレバー橋、エクストラードズド橋およびPC斜張橋の上部工工事費の実績と今回の試設計による工事費をプロットしたものを図-5に示す。図より、エクストラードズド橋とPC斜張橋の経済支間の境はL=150m程度となっていることが判る。また、L=150mの検討結果では、上部工のみの工事費比(PC斜張橋/エクストラードズド橋)でも、0.94とPC斜張橋が6%程度安価である。さらに、橋脚、基礎工を含めた上下部工工事費比(PC斜張橋/エクストラードズド橋)では、岩盤の直接基礎の場合0.84、弾性基礎(鋼管矢板基礎)の場合0.80と、橋脚と基礎工を含んだ工事費では、16~20%程度PC斜張橋が安価になることが判った。

6. まとめ

PCカンチレバー橋、PC斜張橋、エクストラードズド橋の3形式について、支間100~200mで検討した結果、上部工工事費の経済性の境はエクストラードズド橋と斜張橋ではほぼL=150m程度であることが明らかとなった。また、下部工の地盤橋脚高等の条件によっても異なるが、Ⅲ種地盤の鋼管矢板基礎で検討した場合でもサスペンデッド型式の斜張橋が主桁重量軽減と斜材による構造減衰効果によって、基礎工事費が30%程度安価となり、上下部構造全体の評価で支間長150m以上の領域では斜張橋が有利であることが明らかになった。また、エクストラードズド橋はスパン80~150m程度の領域で、カンチレバー橋と比較して桁高を大幅に低減できるため、景観性も含めて優れた構造形式であると思われる。

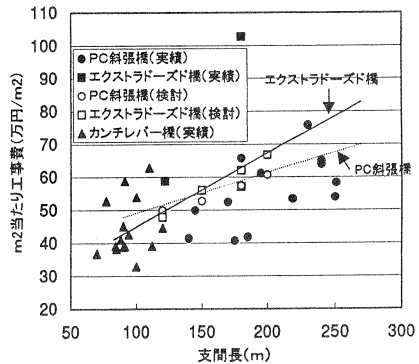


図-5 支間長上部工工事費の関係