

(12) 複合斜張橋の力学特性と経済性

九州大学工学部 正会員 ○ 大塚 久哲
佐藤工業(株) 正会員 末吉 功一
九州大学工学部 正会員 太田 俊昭
九州大学工学部 正会員 今井 富士夫

1. はじめに

コンクリートは圧縮部材に適しており、鋼は引張部材として用いられるとその真価を発揮する。

文献1)、2)で取り扱っている部分定着式(部定式)斜張橋の主桁軸力は、塔近傍で圧縮、主径間中央部と側径間端部で引張となる。勿論、主桁には曲げモーメントも作用するが、マルチケーブルの長大斜張橋の場合、曲げ応力よりも軸応力の方が卓越するので、部定式斜張橋の主桁は塔近傍で圧縮部材、主径間中央部と側径間端部で引張部材になると考えてよい(4章参照)。したがって部定式斜張橋は、橋軸方向に鋼とPCを連結した主桁をもつ複合斜張橋とした方が、力学的に合理的であり、ひいては経済的な構造となると思われる。

本文はこのような観点から行った研究の成果の一端を紹介するものであり、次のような構成としている。

まず、主桁支持方式の異なる斜張橋の一般的な力学特性について述べる。次に、それぞれの主桁支持方式の斜張橋を対象に、鋼斜張橋と複合斜張橋の力学挙動の比較を行い、複合斜張橋における最適な主桁支持方式及びPC桁の配置を検討する。その後、主径間長と側径間長の比が2:1程度の部分定着式斜張橋を対象に、PC桁長と桁全長の比、およびPC桁と鋼桁のコスト比をパラメータに複合斜張橋の経済性を論じる。

最後に、主径間長と側径間長の比が4:1と側径間長が短い複合斜張橋を対象に、主桁支持方式の差異による力学挙動の変化について考察し、このような径間比の斜張橋でも、部定式が有利であることを示す。

2. 主桁支持方式による斜張橋の分類

自定式はケーブルを3径間連続の主桁に定着する方式であり、現在架設されている斜張橋のほとんど全てがこの支持方式である。主桁には軸力として圧縮力が作用する(図1(a))。

完定式は主桁を3個の単純桁とした構造である。ケーブルをアンカレイジに定着するため、水平スラストを受け持つ巨大なアンカレイジを必要とする。主桁には軸力として引張力が作用する(図1(b))。

部定式は軸力を伝達しない伸縮継手を側径間に挿入した構造である。側径間端支点側のケーブルはアンカレイジに定着されるため、完定式ほど大きくはないが、ある程度のアンカレイジを必要とする。塔近傍の主桁には圧縮力、側径間端支点側及び主径間中央部の主桁には引張力が作用する(図1(c))。

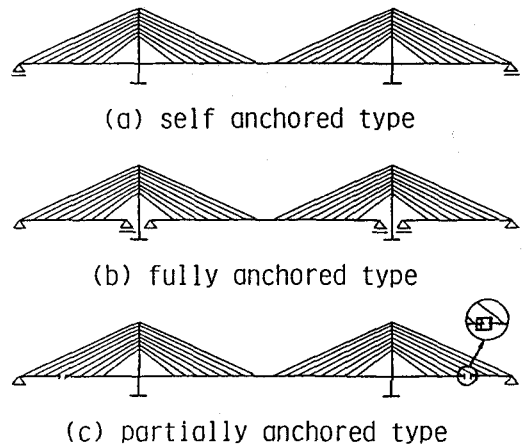


図1 主桁支持方式の異なる3タイプの斜張橋

3. 解析手法

本研究では斜張橋を平面骨組構造物として解析し、各節点では水平変位、鉛直変位及びたわみ角の3つの自由度を考慮した。部定式の側径間に挿入する伸縮継手は、半剛性節点として定式化した⁴⁾。数値計算ではモーメントを全く伝達しない伸縮継手($K=0$)と、モーメントを完全に伝達する伸縮継手($K=\infty$)の2種類のモデルを部定式として解いた。

4. 主桁支持方式による力学特性比較

図2～4は主径間長500mのモデル橋梁の主桁の軸力、曲げモーメント及び合成応力度を各主桁支持方式について比較したものである(文献 3)より転載)。

2章で考察したように、自定式の主桁には圧縮軸力が作用し、完定式の主桁には引張軸力が作用している。部定式の主桁には圧縮軸力と引張軸力の両方が作用している。したがって、部定式の最大軸力は、圧縮、引張側とも、それぞれ自定式、完定式と比べて小さい(図2)。両軸力の絶対値は伸縮継手の位置に関係するので伸縮継手の位置を変えることにより、圧縮力と引張力の大きさを調節できる。

図3に見られるように、完定式の曲げモーメントは中間支点上で零となるので、負の曲げモーメントの値は他の支持方式に比べて極端に小さい。また、この例では伸縮継手位置のモーメントが小さいため、2つの部定式におけるモーメント分布の差はほとんどない。

図4は軸力と曲げモーメントから計算した主桁応力を示す。図の値はケーブル定着点における主桁応力を結んだものであり、実線は主桁上縁応力、破線は主桁下縁応力を示す。部定式では K の値に関わらずほぼ等しい主桁応力となった。図中の上縁応力と下縁応力の差の半分は曲げによる応力を表している。

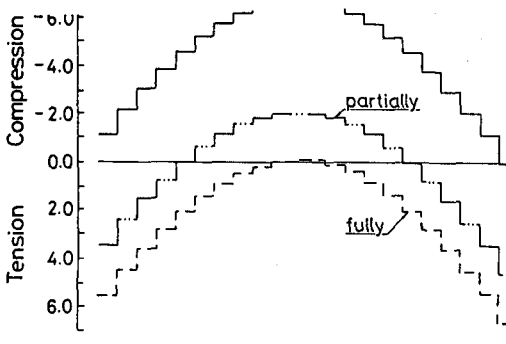


図2 主桁の軸力

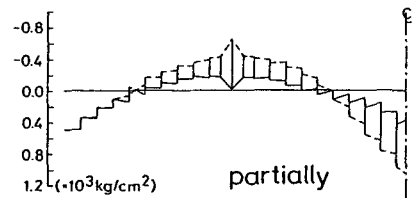
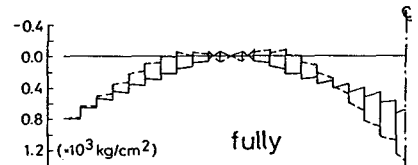
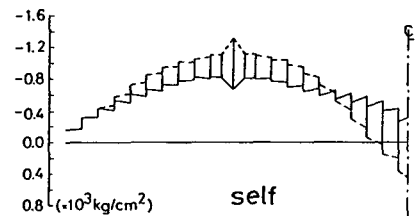


図4 主桁応力

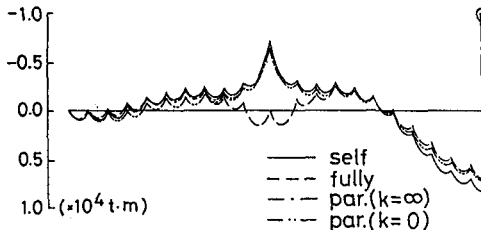


図3 主桁の曲げモーメント

図5は軸力による応力が主桁応力に占める割合を、各主桁支持方式ごとに主桁応力が最大となる点で求め、比較したものである（文献3）より転載）。この百分率は、中央径間240mで30～45％であるのが、1100m の中央径間では70～80％となる。このようにスパンが長くなるに伴い、軸力による応力の比率が増加し、曲げ応力の比率が減少する。したがって、図4の主桁の合成応力の分布は、スパンが長くなるほど図2の軸力分布と似ており、曲げモーメントを考慮した後の主桁応力全体に対しても部定式が有利であることがわかる。

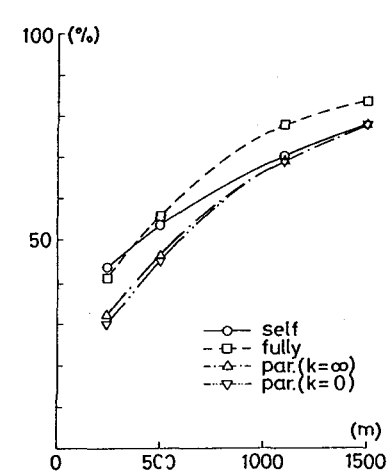


図5 軸力による応力の比率

5. 複合斜張橋の力学特性

5.1 解析モデル

図6に示すような、中央径間420m、12段マルチケーブルのセミハープ型を対象とする。主桁支持方式は前述の自定式、完定式、部定式（ $K=0、\infty$ ）の4通りであり、各主桁支持方式に対して、図6に示すような3タイプのモデルを考えた。タイプ1は鋼斜張橋であり、タイプ2、3は鋼桁とコンクリート桁を橋軸方向に結合した複合斜張橋である。ケーブルにはプレストレスを導入し、活荷重（ $L-20$ ）のうち等分布荷重 p を側径間も含めて満載し、線荷重 P を主桁中央点に集中荷重として載荷した。各構造要素の断面諸元及び荷重の大きさを表1に示す。

5.2 計算結果と考察

（A）主桁の軸力 表2は軸力の最大値を示す。全タイプとも部定式の軸力は、自定式、完定式の軸力よりかなり小さく、部定式が有利と言える。タイプ別では、タイプ3の軸力が最も小さい。

（B）主桁の曲げモーメント 表3は主桁の最大曲げモーメント（すべて主径間中央点であった）を示す。

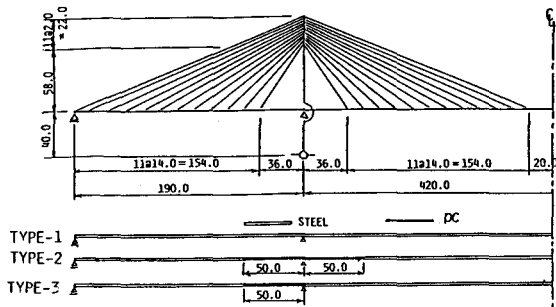


図6 複合斜張橋のモデル

表1 断面諸元と荷重

（桁）		
鋼桁		
断面積	（m ² ）	0.42
断面2次モーメント	（m ⁴ ）	0.57
P C 桁		
断面積	（m ² ）	6.77
断面2次モーメント	（m ⁴ ）	10.52
（塔）		
断面積	（m ² ）	0.455
頂部		2.439
基部		0.387
断面2次モーメント	（m ⁴ ）	1.934
頂部		
基部		
（ケーブル）		
断面積	（m ² ）	0.0138
上段		0.0119
中段		0.007
下段		
（荷重）		
死荷重	（t/m）	6.76
鋼桁死荷重		20.208
P C 桁死荷重		
活荷重		
等分布荷重	（t/m）	3.763
線荷重	（t）	53.75

表2 主桁の最大軸力（ton、－は圧縮力）

	自定式	完定式	部定式 ($K=0$)	部定式 ($K=\infty$)
TYPE-1	-3480	3466	2313	2304
TYPE-2	-3681	3755	2310	2301
TYPE-3	-3460	3455	2013	2008

表3 主桁の最大モーメント（ton・m）

	自定式	完定式	部定式 ($K=0$)	部定式 ($K=\infty$)
TYPE-1	4360	3697	4287	4275
TYPE-2	4283	3693	4275	4271
TYPE-3	5056	4486	5303	5300

モーメントは完定式が最も小さく、部定式と自定式の差は小さい。部定式に着目すれば、タイプ3の曲げモーメントがタイプ1、2に比して突出して大きいことがわかる。

以上のことより、複合斜張橋においても、桁に作用する断面力の観点からは部定式が有利であると言える。コンクリート桁を配置すべき位置については、タイプ2と3の主桁応力を比較した場合、タイプ2の方が小さくなることや図4の応力分布から、あるいは施工上の便利さからも、タイプ2のように塔から対称に配置するのが合理的と考えられる。次章では、このタイプの複合斜張橋の経済性を検討する。

6. 複合斜張橋の経済性

図6に示すモデルのタイプ2を対象に、PC桁長と桁全長の比、およびPC桁と鋼桁のコスト比をパラメータに複合斜張橋の経済性を議論する。断面決定は、許容応力の90%以上を条件として試行錯誤的に行った。ケーブル価格は鋼桁価格の2倍とした。

図7はPC桁長と桁全長の比 L_{pc}/L をパラメータに、PC桁と鋼桁の単位重量当りコスト比 C_{pc}/C_s の変化に伴う、複合斜張橋と鋼斜張橋の上部工（主桁とケーブル）のコスト比 K_{com}/K_s の推移を示したものである。図中、PCとあるのはPC斜張橋のことで、この図から C_{pc}/C_s が0.12程度まではPC斜張橋の上部工コストが、 C_{pc}/C_s が0.25程度までは複合斜張橋の上部工コストが鋼斜張橋の上部工コストを下回ることがわかる。

図8は C_{pc}/C_s をパラメータに、 L_{pc}/L の変化に伴う上部工コスト比 K_{com}/K_s の変化を示したものである。 C_{pc}/C_s が0.25より大きければ、 L_{pc}/L の増加に伴って上部工コスト比は単調に増加するが、 C_{pc}/C_s が0.25より小さい範囲では、 L_{pc}/L の増加に伴って曲線は極値を有する形状となる。例えば C_{pc}/C_s の値が0.15であるとすると、 L_{pc}/L が約0.8でコスト比は極小となり、その値は0.7程度である。

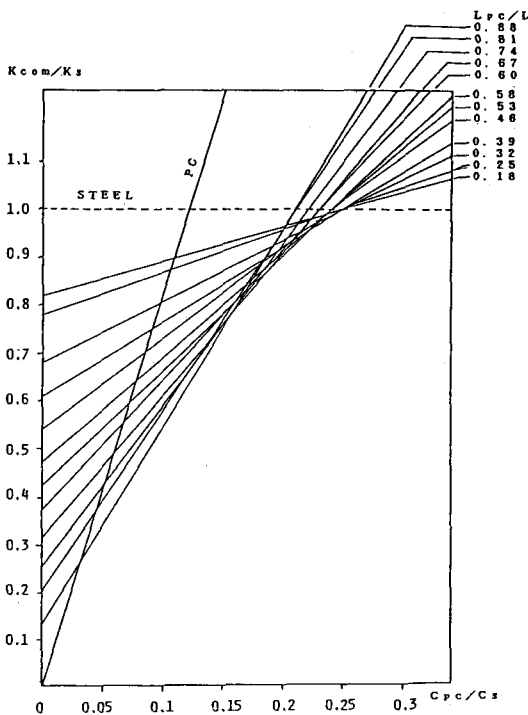


図7 上部工のコスト比較（その1）

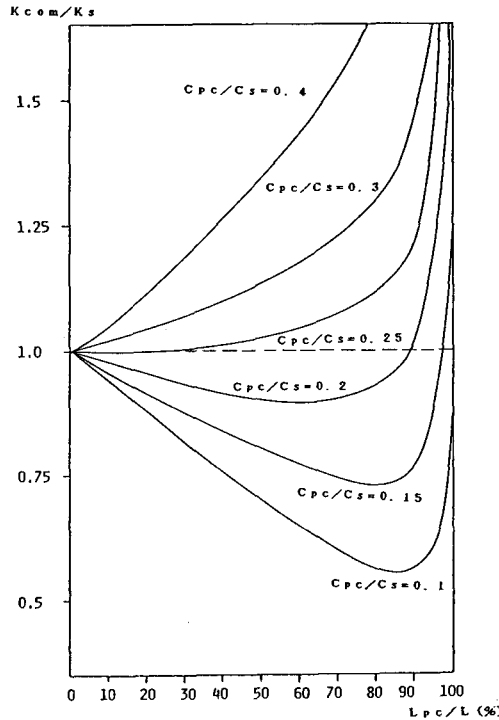


図8 上部工のコスト比較（その2）

7. 側径間の短い複合斜張橋の力学特性

図9に示す、主径間長と側径間長の比が4:1と通常の斜張橋より側径間の短い斜張橋では、側径間部の自重が小さいため、カウンターウェイトとして、側径間をPC桁とすることが行われている。ここでは、側径間をPC桁とした複合斜張橋を対象に、主桁支持方式を変えたときの力学挙動を検討する。断面諸元及び荷重は表1と同じである。

図10(a)、(b)、(c)はそれぞれ、主桁の鉛直変位、軸力、曲げモーメントを示す。主桁支持方式の差に着目したときの本モデルの力学性状は一般的な主径間長と側径間長の比(2:1程度)を有する斜張橋の場合とほぼ同様であることが知られる³⁾。すなわち、曲げモーメントを伝達しない伸縮継手を有する部定式の場合($K=0$)には、主桁の側径間の変位が大きくなるが、部定式の軸力分布は絶対値の小さい有利な性状を示している。特にこのモデルの場合、最大曲げモーメントが側径間に生じ、部定式ではその大きさが半減することからも、部定式が自定式に比べて有利であると言える。

PC桁の位置については、本モデルのPC桁がカウンターウェイトとしての役目を果たしていることから、主径間側にPC桁を伸ばすことは得策ではないと思われる。

8. 結論

主桁支持方式に着目した場合、部定式斜張橋は自定式及び完定式斜張橋と比べて有利であると言われている。本研究で行った数値計算に見るかぎり、このことは複合斜張橋の場合にもあてはまると言えよう。

PC桁と鋼桁の単位重量当たりコスト比は、種々の要因により変動するものと思われるが、現在のところ C_{pc}/C_s の値は0.15程度であると言われており、その場合には本文で見たように複合斜張橋の上部工のコストは斜張橋のそれに比べてかなり安くなる。勿論、複合斜張橋の上部工の自重は、鋼斜張橋に比べて必然的に重くなり、それが基礎工の施工費の増大をもたらすなどの負の要因もある。しかしながら、ある条件下では複合斜張橋が真に経済的となることも十分に考えられることであり、今後、一般的な主径間長と側径間長の比(2:1程度)を有する斜張橋の場合にも、複合斜張橋が考えられてよいと考える。

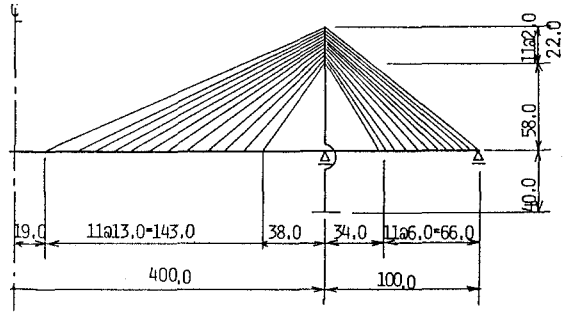
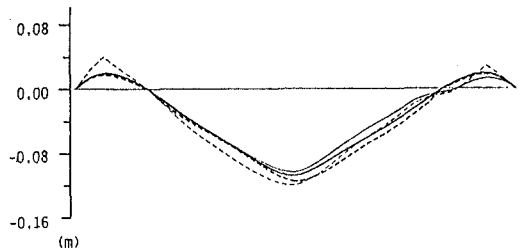
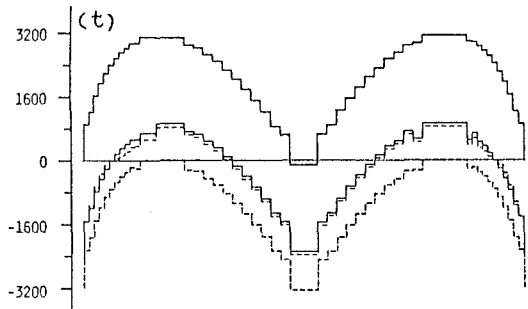


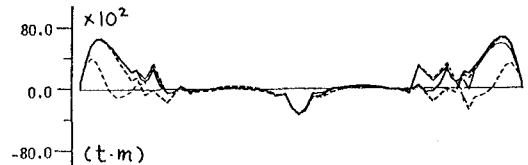
図9 側径間の短い複合斜張橋



(a) 主桁の鉛直変位



(b) 主桁の軸力



(c) 主桁の曲げモーメント

図10 計算結果

SELF —
FULLY - - -
PAR(0) ···
PAR(∞) —·—

【参考文献】

- 1) Gimsing, N.I.: Cable Systems for Bridges, Proc. of 11th Congress of the IABSE, Aug.31 - Sep.5, 1980, Vienna, Austria, pp.727-732
- 2) Otsuka, H et.al: Optimum Anchoring for Long Span Cable-Stayed Bridges, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.1, No.2, 1984.10, pp.87-95
- 3) 大塚 他: 主桁支持方式の異なる長大斜張橋の力学特性比較、構造工学論文集、Vol. 31A, 1985.3, pp. 351-360
- 4) リブスレイ(山田他訳): マトリックス構造解析入門、培風館、1968
- 5) 大塚久哲: 長大斜張橋の経済性比較、オペレーションズ・リサーチ、30巻10号、1985.10, pp.614-619
- 6) 大塚 他: 主桁支持方式の異なる長大斜張橋の非線形挙動特性、構造工学論文集、Vol. 32A, 1986. 3, pp.107-115
- 7) 園田 他: 主桁支持方式の異なる長大斜張橋の地震応答解析、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、1986.3, pp.88-89
- 8) 内谷 他: 主桁支持方式の異なる長大斜張橋の走行荷重応答解析、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、1986.3, pp.86-87
- 9) 土木学会関西支部: 複合斜張橋の設計法に関する研究、1985.6 (昭和58,59年度共同研究グループ、代表者 山田善一)
- 10) 阿部宗人: プレストレストコンクリート斜張橋について、橋梁と基礎、1984.12, pp.21-24