

主桁支持方式の異なる長大斜張橋の非線形挙動特性

NON-LINEAR BEHAVIOR OF LONG SPAN CABLE-STAYED BRIDGES WITH VARIOUS TYPES OF ANCHORAGES

大塚久哲・園田佳巨・太田俊昭・今井富士夫

By Hisanori OTSUKA, Yoshimi SONODA, Toshiaki OHTA, Fujio IMAI

Partially anchored cable-stayed bridges are reported to be more efficient for long spans than self and fully anchored cable-stayed bridges and suspension bridges. Since the partially anchored systems have the expansion joints in the side spans, their structural behavior is different from those of other anchored systems. The static characteristics of partially anchored cable-stayed bridges investigated by linear analysis have been already reported. However non-linear behavior due to the sag of cables and the deformation of the towers and the girder should be investigated in the case of long span cable-stayed bridges. The object of this paper is to clarify the effect of nonlinearity in the long span cable-stayed bridges with various types of anchorages and offer the non-linear results obtained by changing main span length, span-sag ratio and shape of cables.

1. まえがき

斜張橋の主桁支持方式としては、自己定着式（自定式）、完全定着式（完定式）、および部分定着式（部定式）の3方式が考えられる。このうち桁に作用する軸力は、部定式が最も小さく、長大橋についても有利な支持方式となりうるが、Gimsingらによって指摘されており¹⁾、またこれら3方式の線形力学特性については、パラメトリック解析による比較検討が、著者らによってなされている²⁾。しかしながら、長大斜張橋では、その力学特性に及ぼすケーブルのサグおよび、塔・主桁の幾何学的非線形性の影響が無視できない場合のあることが指摘されている^{2), 4)}。しかも主桁軸力に着目した場合、自定式では圧縮力、完定式では引張力、部定式ではその中間の内力分布となり（図-1参照）、上述の非線形性の影響は主桁支持方式に

＊	工博	九州大学助教授	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎	6-10-1)
＊＊		九州大学大学院生	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎	6-10-1)
＊＊＊	工博	九州大学教授	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎	6-10-1)
＊＊＊＊		九州大学助手	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎	6-10-1)

よって異なることが予想される。本研究は、非線形解と線形解の比較によって、主桁支持方式の異なる長大斜張橋における非線形性の影響を明らかにしようとするものであり、あわせて主径間長、スパンサグ比、およびケーブル張り形状をパラメータとする非線形解析結果を提示するものである。

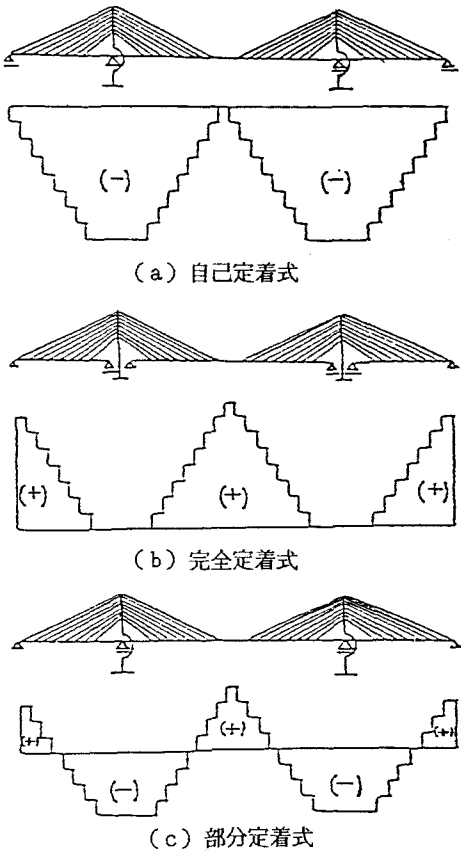
2. 各主桁支持方式の構造モデル

自定式はケーブルを主桁に定着する方式であり、主桁には軸力として圧縮力が作用する（図－1（a））。完定式は塔の真下で主桁を切断し、主桁を3個の単純梁に置き換えた構造である。ケーブルを主桁を介して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。ケーブルの一部を、主桁を介してアンカレイジに定着し、残りを主桁に定着するため、塔近傍の主桁には圧縮力、側径間端部および主径間中央部の主桁には引張力が作用する。（図－1（c））。

3. 解析手法

本研究では、斜張橋を2次元モデルとして取り扱い、各節点にて水平変位、鉛直変位およびたわみ角の3つの変形を考慮した。線形解析ではケーブルを軸力部材とし、非線形解析では桁・塔の幾何学的非線形性とケーブルのサグ（放物線形状と仮定）を考慮した。非線形連立方程式の解法としては、反復法（ニュートン・ラフソン法）と増分法とを組み合わせた混合法を適用した⁴⁾。

部定式の側径間に挿入する伸縮継手は、半剛性節点としてモデル化した。これは、断面一様な直線部材（長さs、曲げ剛性EI）を考え、その両端1および2は、単位回転角度差あたりにそれぞれ $4EI K_1/s$ 、 $4EI K_2/s$ のモーメントを伝える接合部によって、隣接部材に結合されるものである。Kの値を零とすればその部材端はピン節



図－1 主桁支持方式の異なる3タイプの斜張橋とその主桁軸力

表－1 解析モデルの断面諸元

主径間長	(m)	250	500	750	1000
主桁					
断面積	(m ²)	0.571	0.994	0.7	1.0
断面2次モーメント	(m ⁴)	0.9414	2.90	12.0	20.0
縁距離	(m)	1.55	1.6	3.5	5.0
塔					
断面積	(m ²)				
頂部		0.442	0.968	1.3	1.5
基部		0.487	1.392	1.7	2.0
断面2次モーメント	(m ⁴)				
頂部		0.352	1.518	4.3	7.0
基部		0.544	2.284	6.2	10.0
縁距離	(m)	1.5	2.0	3.5	5.0
ケーブル					
断面積	(m ²)				
上段 (1～4本目)		0.0106	0.046	0.083	0.12
中段 (5～8本目)		0.0072	0.038	0.069	0.10
下段 (9～10本目)		0.0045	0.030	0.055	0.08
荷重					
等分布荷重	(t/m)	9.905	13.925	18.975	21.825
線荷重	(t)	48.75	48.75	66.25	66.25

点，無限大とすればその部材端は剛節点となる。したがって，例えば部材端2のみに伸縮継手を有する部材の場合， $K_1 = \infty$ とおけばよいことになる⁵⁾。

伸縮継手がモーメントを伝達するモデルでは，継手位置で左右の部材に異なる軸方向変位のみが生じるように考えた。一方，モーメントを伝達しない伸縮継手では，異なるたわみ角と軸方向変位が生じるように自由度をとった。

4. 解析モデル

解析モデルとしては図-2に示すような，10段マルチケーブルのセミハープ型斜張橋を基本とした。各主径間長に対する断面諸元を表-1に示す。ここで解析モデルは鋼斜張橋を想定しており，250 mモデルの断面諸元はかもめ大橋，500 mモデルは安治川橋梁を参考にして定めた⁶⁾。他のモデルについては，250 mモデルを参考にして妥当と思われる諸元を仮定した。

主径間長をパラメータとした数値計算では，図-2と相似形の斜張橋を考えた。スパンサグ比をパラメータとした数値計算では，図-2において塔高のみを変化させた。（塔に対するケーブルの定着点高は，塔高に比例させて変化させた。）ケーブルの張り形状を変化させた数値計算では，図-2において塔に対するケーブルの定着点間隔を変えた。

部定式の伸縮継手は，両側径間とも5本目と6本目のケーブル間に挿入し，モーメントを完全に伝達する伸縮継手（ $K = \infty$ ）と，モーメントを全く伝達しない伸縮継手（ $K = 0$ ）の2種類を考えた。すなわち，自定式，完定式，部定式A（ $K = 0$ ），部定式B（ $K = \infty$ ）の4つの主桁支持方式に対して，比較検討を行った。荷重は，その載荷モデルとして（a）対称載荷，（b）非対称載荷の2通りを考えた（表-1，図-3参照）。

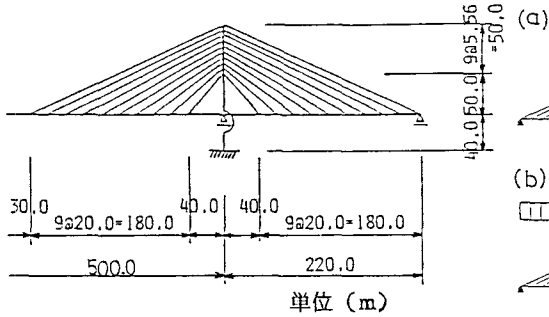


図-2 解析モデルの一般図（ $L=500m$ ）

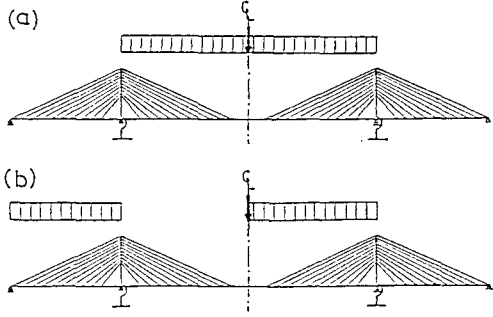


図-3 荷重載荷モデル

5. 非線形性の影響の考察

表-2 各構造要素の非線形性

5.1 構造要素と非線形性

ケーブル，桁と塔の各構造要素の非線形性の影響を調べる。

すなわち，荷重を対称載荷したときのスパン1000mの主桁の主径間中央点の鉛直変位を，線形解（LIN），ケーブルのみに非線形性

$$\overline{NLC} = \frac{(NLC - LIN)}{LIN} \times 100 (\%)$$

$$\overline{NL} = \frac{(NL - LIN)}{LIN} \times 100 (\%)$$

	NLC	NL
自定式	8.18	9.33
完定式	-8.15	-7.97
部定式B	-5.66	-5.38
部定式A	-4.98	-4.78

を考慮した解（NLC） ，ならびにケーブル、桁、塔の全てに非線形性を考慮した解（NL）の3つについて比較検討した。その結果が、表一2である。表は、各非線形解と線形解との差を線形解で除したものの値を各支持方式について示している。 表より、NLとNLC の差はわずかであることから、塔と主桁の非線形挙動は構造全体にはあまり影響せず、ケーブルの非線形挙動がその非線形挙動を支配していることがわかる。また完定式、部定式ではケーブルの非線形性の影響が変位の減少として現れていることも、負の値をとることから知られる。

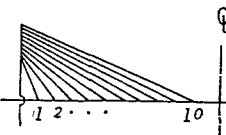
5. 2 主桁支持方式と非線形性

各支持方式についての線形解（LIN ）と非線形解（NL）の比較を行う。ここでの図表は、すべてこの両者の相対量でまとめられており、 $\delta(\%) = (NL-LIN) / LIN \times 100$ である。

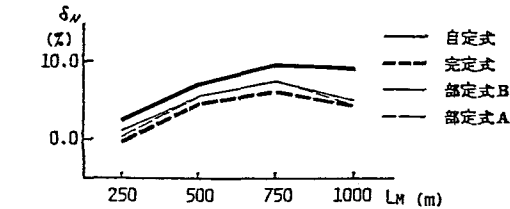
5. 1でケーブルの非線形性の影響が支配的であることが判ったので、まずケーブル張力について、その1例を示す。表一3は、スパン1000mの完定式について、その左塔より主径間側のケーブルの主桁との定着点でのケーブル張力を水平成分（ δ_H ）と鉛直成分（ δ_V ）とに分けて示したものである。表より、非線形解は鉛直成分については減少する傾向があるが、水平成分は増加する傾向が強い。このことは他の支持方式についてもいえ、したがって、主桁の軸力の最大値は、支持方式に関わらず非線形解の方が大きくなる。

すなわち、図一4は、その結果を表わしている。この主桁軸力に対する非線形性の影響は、自定式・部定式・完定式の順に大きい。次に主径間中央点の主桁鉛直変位についてみると図一5の結果を得る。一般に、完定式と部定式の主径間中央部では引張軸力が働くが、この力は桁の鉛直方向の変位を抑制する作用がある。一方、ケーブルの非線形性によって、ケーブル張力の鉛直成分は減少し変位は増大することになるが、完定式と部定式では前者の影響の方が大きく、このため非線形解は線形解より小さくなる。このことは、主桁軸力の非線形性による増加が750 mより小さい1000mモデルで、線形解に対する鉛直変位の減少も少なくなることで確認される。これに対して、自定式については一般に言われるように非線形解の方が大きい。これは、自定式では、桁に圧縮力が作用し、鉛直方向変位の抑制効果がないためと考えられる。

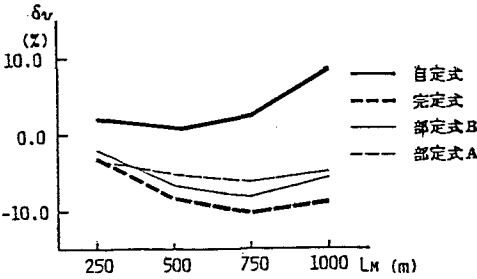
表一3 ケーブル張力の各成分



番号	$\delta_H\%$	$\delta_V\%$
1	-0.3	-3.8
2	2.2	-1.7
3	4.9	-0.2
4	7.1	1.0
5	8.6	1.5
6	8.7	0.9
7	7.6	-1.0
8	5.6	-3.6
9	3.5	-6.3
10	1.8	-8.7



図一4 主桁軸力の非線形性



図一5 主桁鉛直変位の非線形性

6. 主桁支持方式の差による力学特性の比較

6. 1 支間長をパラメータにした解析結果

5章で述べたように、線形解と非線形解の差は主径間長によって変化するけれども、大きいところで10%近くにも達する。著者らはすでに文献³⁾で線形解析により主桁支持方式の異なる長大斜張橋の力学特性比較を行っているが、ここでは非線形解析の結果を新たに提示し、それに基づいて主桁支持方式の差異が長大斜張橋の力学特性に及ぼす影響について考察する。

(1) 主桁の鉛直変位

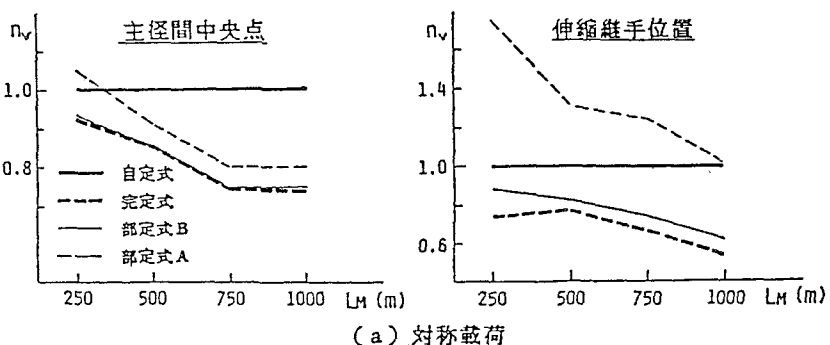
図-6 (a) は荷重を対称載荷したときの主径間中央点の鉛直変位および側径間の部定式の継手位置にあたる点の鉛直変位を、それぞれ各支持方式について比較したものであり、図-6 (b) は荷重を非対称載荷したときの変位を比較したものである。縦軸は自定式の変位に対する各支持方式の変位の比 (n_v) を示し、横軸は主径間長 (L_m) を示す。

主径間中央点における変位比についてみてみると、対称載荷の部定式Aにおいて、 $L_m = 250$ mで自定式よりも大きな値となるが、一般に載荷形式に関わりなく、自定式の変位に比べ他の支持方式のそれは小さくなり、スパンが長大となるとその傾向は顕著となる。

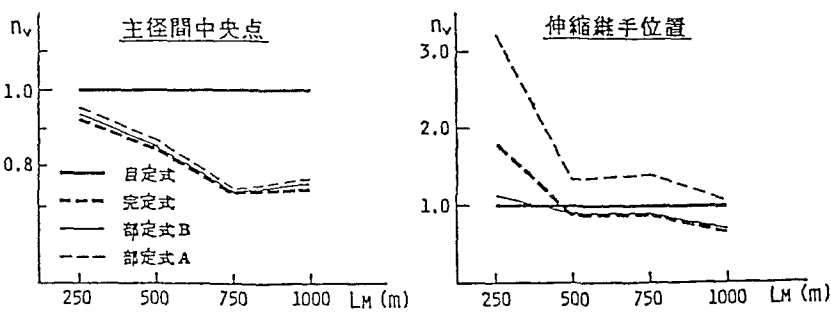
次に、伸縮継手位置における変位比をみると、対称載荷では、自定式に対して部定式Aを除く他の2者の変位は小さいが、部定式Aの変位は自定式に比べ大きくなっており、特に、 $L_m = 250 \sim 500$ mの比較的短いスパンで極めて大きくなっている。これは部定式Aが伸縮継手位置でモーメントを伝達しないため、側径間の曲げ剛性が不足し、比較的に短い間は側径間が定着桁としての機能を十分に果たしていないためと思われる。しかしながら、その変位比は、スパンの長大化に伴い減少する傾向にある。これらのことは、非対称載荷の場合についてもほぼ同様である。

(2) 主桁の水平変位

図-7 (a), (b) はそれぞれ対称載荷、非対称載荷時の主桁水平変位を、 $L_m = 1000$ mモデルについて比較した図である。本解析で採りあげた自定式モデルは、1支点のみヒンジで他の支点はローラーであるため、橋軸方向の水平力が片側に集中し、橋台上の主桁水平変位量が極めて大きくなる。これに対し、部定式では伸縮継手位置で水平変位に不連続な部分が生じるものの、その量は小さく ($L_m = 1000$ mでは自



(a) 対称載荷



(b) 非対称載荷

図-6 主桁鉛直変位の比較

定式の約3%程度)、構造上問題となるほどの量ではないことが知られる。また、継手の違いによる差異はほとんど見受けられない。完定式は、塔の真下で水平変位を生じるが、その値は自定式と部定式の間に位置する($L_n = 1000\text{m}$ では自定式の約14~18%程度)。

(3) 主桁の曲げモーメント

主径間中央点の主桁曲げモーメントを、各主桁支持方式に対して比較すれば、図-8(a)、(b)をうる。この図から载荷パターンによらず、自定式の値が最も大きいことが知られる。ここで径間長が変化するとき各支持方式間の差が一定の傾向を示さないのは、各径間長で $E_G I_G / E_C A_C$ の値が異なるので、桁、ケーブル等の荷重分担率が各径間長毎に違うためと思われる。

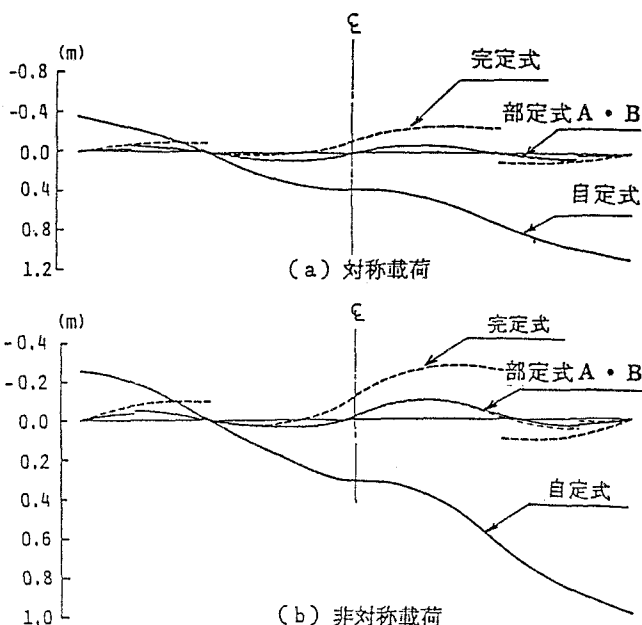


図-7 主桁の水平変位 ($L_n = 1000\text{m}$)

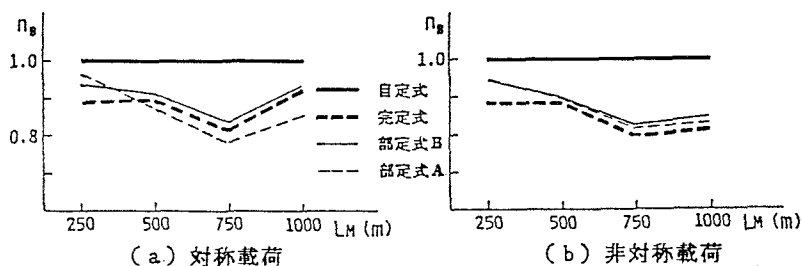


図-8 主桁の曲げモーメントの比較

(4) 主桁の軸力

主桁の最大軸力は、4つの支持方式で比較すると、部定式が最小になることは既に指摘されている。

図-9に示すように、本例でもその傾向は示されており、特に、塔の位置における圧縮軸力が自定式に比べ大きく減少している。この傾向は、継手条件にはほとんど影響されない。軸力の絶対量はケーブル張力の水平成分の総和であるため、ケーブルの張り形状などを変えない限り殆ど変わる

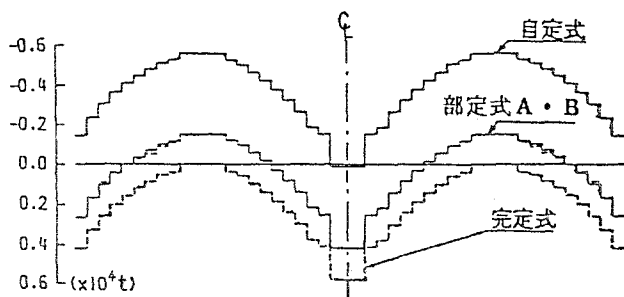


図-9 主桁の軸力 ($L_n = 500\text{m}$)

ないが、圧縮軸力と引張軸力の割合は、継手位置を変えることで調整できよう。

本例では、側径間中央に伸縮継手を挿入しており、継手より外側の引張域のケーブルの方が、圧縮域のケーブルより張力が大きいため、主桁の引張軸力が、圧縮軸力より大きくなった。

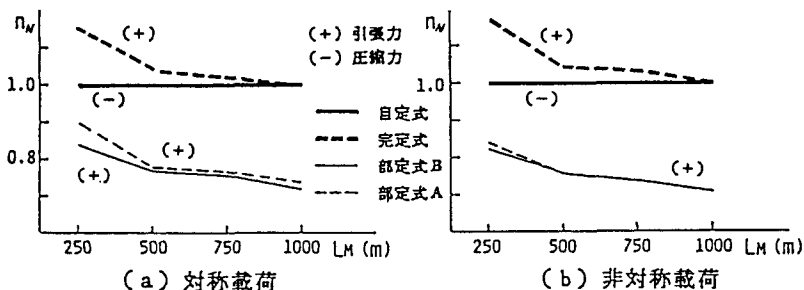


図-10 主桁軸力の比較 ($L_H=500\text{m}$)

図-10は、2つの荷重載荷モデルの主桁軸力の最大値を比較したものである(ただし、自定式では圧縮力、完定式・部定式では引張力の値である。)。図から、スパンが長大になるほど軸力における部定式の優位性は大きくなることが判る。

(5) 主塔水平変位

図-11は左右の塔の水平変位を各支持方式について比較したものである。対称載荷および非対称載荷の場合の右塔の水平変位についてみると、自定式・部定式A・部定式B・完定式の順に小さくなっており、自定式に対する他の支持方式の差は、スパンが長大化するほど大きくなっている。特に、完定式と部定式Bは小さく、また、この両者の差は少ない。

また、対称載荷の左塔においても、部定式Aの $L_H \leq 500\text{ m}$ を除いて上記とほぼ同様な傾向となるが、部定式Aの $L_H \leq 500\text{ m}$ のみ自定式よりも大きな変位となった。これは側径間の伸縮継手位置でモーメント伝達がないため、この位置で主桁に曲げ不連続角が生じ、そのため、側径間の主桁が上向きに大きく変位するためである。このことは、右塔についても同様であるが、比較対象とした自定式の右塔の変位が大きいため、その影響は明確に現れていない。

一方、非対称載荷の左塔では、自定式・完定式・部定式B・Aの順に小さくなっている。

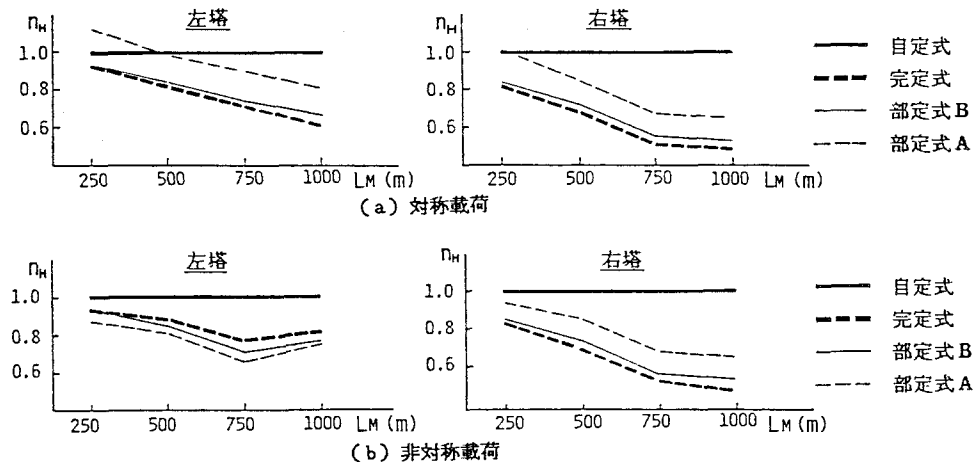
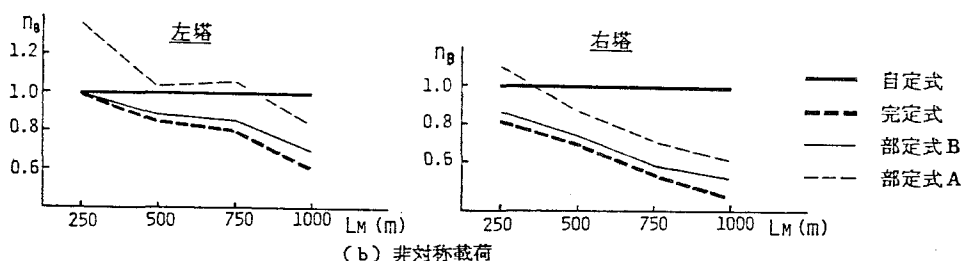
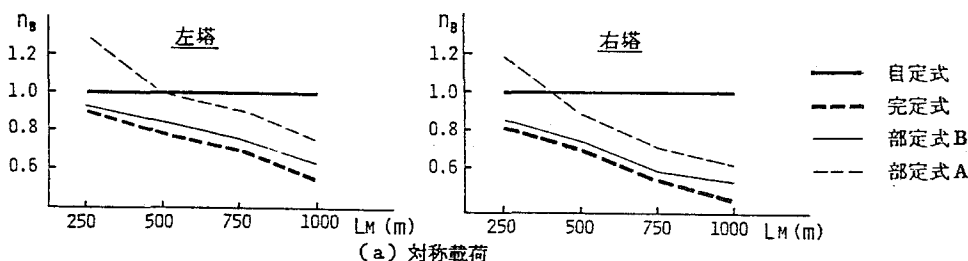


図-11 主塔の水平変位の比較

(6) 主塔の曲げモーメント

図-12(a)は対称載荷時の主塔底部の曲げモーメントを各支持方式について比較したものである。スパン250 mでは、部定式Aの曲げモーメントが一番大きく不利となる。しかし、スパンが長大になるにつれて自定式のモーメントが大きな値となる。(b)の非対称載荷でもこれらの傾向はほぼ同じであった。



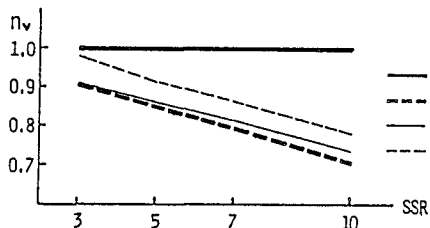
図一 1 2 主塔の曲げモーメントの比較

6. 2 スパンサグ比あるいはケーブル張り形状をパラメータとした解析結果

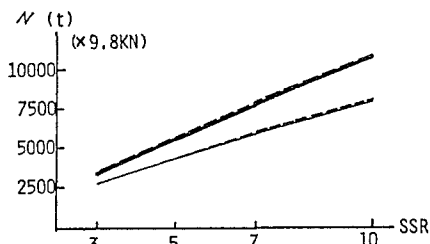
スパン500mを対象に、SSR（スパンサグ比＝主径間長／塔高）、 L/H （＝最下段ケーブル定着高／塔高）を変化させたとき、すなわち、斜張橋の幾何形状を変えたときの挙動特性について明らかにする。ただし、荷重は主径間のみ満載とし、変位の比較は自定式の値に対する各支持方式の値の比をとって行った。

(1) SSRの変化に伴う非線形挙動

まず、SSRを大きくしていったとき（塔高のみを低くしていく）の非線形解の鉛直変位を各支持方式で比較すると、自定式が最も不利になることが判る（図一 1 3）。SSRが大きくなるとケーブルの傾斜角が小さくなりケーブル断面効率が悪くなるため、このときケーブル張力の鉛直成分は減少していても水平成分は大幅に増加しているので、主桁軸力はどの支持方式においても増加することになるが、その量は部定式が最も少ない（図一 1 4）。また、主桁曲げモーメント、塔水平変位、塔曲げモーメントいずれを比較しても、部定式、完定式が自定式より常に有利であった。したがって、これらの結果より、部定式は、他の支持方式より塔高を低く設計できると言えよう。



図一 1 3 主桁鉛直変位の比較



図一 1 4 最大主桁軸力の比較

(2) L/H の変化に伴う非線形挙動

ケーブルの張り渡し形状を、ファン形（ $L/H=0.9$ ）からハープ形（ $L/H=0.1$ ）へ変化させると、SSRを大きくしていくと同様にケーブルの断面効率が悪くなる。よって主桁の鉛直変位は増加するが、その割合は自定式が最も大きい（図一 1 5）。また、主桁軸力の最大値も増加するが、部定式はその割合が

最も小さい（図-16）。これは、ハープ形にすると下段ケーブルほどケーブルの傾斜角がファン形に比べ小さくなり、したがってケーブル張力の水平成分が増加するが、部定式では圧縮力および引張力の両方に分散されるため、他の2つの支持方式に比べ影響が少ないからであろう。

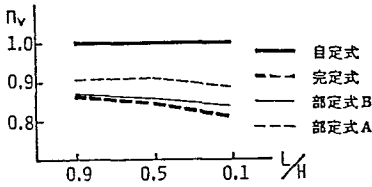


図-15 主桁鉛直変位の比較

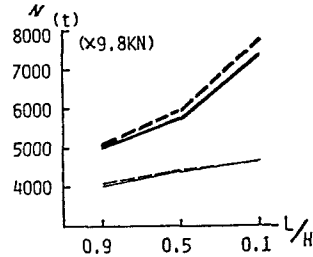


図-16 最大主桁軸力の比較

7. 結論

本論文は、主桁支持方式の異なる3種類の長大斜張橋について、線形解析と非線形解析を行い、両解析の差及び3者の挙動特性の差について検討したものである。得られた知見を要約すると、

- (1) 斜張橋における非線形挙動と線形挙動の差は、主にケーブルの非線形性に起因するものである。
- (2) 主桁軸力は、主桁支持方式の相違に関わらず、非線形解の方が線形解よりも大きい。その増加の度合は、自定式の場合が最も顕著である。
- (3) 部定式の鉛直変位は、完定式と同じく、線形解より非線形解の方が小さい。これは、通常の自定式斜張橋の鉛直変位は、非線形解の方が大きくなることと対照的である。

以上を総合して、非線形解析を行えば、他の2形式に対する部定式の力学的優位性が一層明確になると言えよう。

本研究は、昭和60年度文部省科学研究費（奨励研究（A））の補助を受けた。記して謝意を表する。
また、数値計算には本学大型計算機センターのFACOM M-382(OSIV/F4 MSP)を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Gimsing, N.J.: Cable Systems for Bridges, Proc. of 11th Congress of the IABSE, Aug.31-Sep.5, 1980, Vienna, Austria, pp 727-732.
- 2) 山本・北原：ケーブルの非線形性を考慮した斜張橋解析，住友重機械技報，第23巻，第69号，昭和50年12月
- 3) 大塚・吉田・太田・今井：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年3月）
- 4) 前田・大西：大径間斜張橋の静的、動的解析プログラム（第1，2回），橋梁 Vol.13, No.1, pp.58~63, No.2, pp.16~23, 1977.
- 5) リブスレイ（山田，川井 共訳）：マトリックス構造解析入門，培風館，1968.
- 6) 小松・川谷：斜張橋の自動車走行による動的応答と衝撃係数に関する研究，土木学会論文報告集，第275号，（1978年7月）

（1985年10月18日受付）