

長大斜張橋の座屈安定解析に関する 2, 3 の考察

STUDY ON BUCKLING STABILITY ANALYSIS OF A LONG-SPAN CABLE-STAYED BRIDGE

中村一史*・前田研一**・林 正***・成田信之****

Hitoshi NAKAMURA, Ken-ichi MAEDA, Masa HAYASHI and Nobuyuki NARITA

*正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

**正会員 工博 東京都立大学助教授 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

***正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

****正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢 1-1)

In this paper, an advantageous calculation method for finite displacement analyses of the buckling stability is proposed. This method enables treatment of load parameters to the cable prestressing force similar to the dead and live loads, and comparison with the buckling eigenvalue analyses. In comparing the results of buckling finite displacement analyses with those of eigenvalue analyses by using a cable-stayed bridge with the center span of 1,000 m, the validity and efficiency of the proposed method was confirmed. Moreover, two singular points were searched in the ultimate behavior. It became obvious that the first singular point was the bifurcation point of asymmetrical mode, and that the second point was the limit point of symmetrical mode. Also, effects of the cable flexibility and of support conditions of the main girder on the ultimate behavior were discussed.

Key Words: long-span cable-stayed bridge, finite displacement buckling analysis, singular point, buckling mode

1. 緒言

近年における斜張橋の長大化は目覚ましく、完成すれば世界最長となる中央径間長 890m を有する多々羅大橋の建設が現在、完成間近になっている。一方、斜張橋の適用限界スパンは、支間の長大化に伴う主桁軸力の増大による座屈安定性の問題が支配的な要因となることから、1,500m 程度であると言われている。吊橋との経済的競合¹⁾を踏まえれば、今後、中央径間長 1,000m 級の斜張橋を採用する可能性は十分に考えられる。しかし、この規模の斜張橋の構造特性については未だ十分に検討されておらず、各方面から精力的に研究が行われている。

たとえば、文献 2) では、限界状態設計法を意識した弾塑性有限変位解析の解析手法を提案している。その中で、斜張橋の終局挙動を検討する際、プレストレス一定で死荷重のみ漸増させると、曲げモーメントのバランスを不当に崩すことから、プレストレスも死活荷重と同様に荷重として漸増する必要があることを指摘し、その制御法を提案している。これによれば、座屈固有値解析法と座屈有限変位解析法とが任意の荷重状態について対比できることになる。

また、座屈有限変位解析法と座屈固有値解析法の両者を同時に適用した研究として、文献 3) のように、小規模な鋼斜張橋を対象としたものであるが、線形座屈固有値解析結果と活荷重のみを漸増させた弾塑性有限変位解

析結果の比較を行ったものがある。その結果、最低次の座屈固有モードと有限変位解析による崩壊モードとが異なることを明らかにしている。

本論文は、限界状態設計法への適用を考慮に入れ、斜張橋特有のケーブルのプレストレスに対しても死活荷重と同様の荷重パラメータをより簡便に設定でき、座屈固有値解析と対比できる座屈有限変位解析の解析手法を提案することを目的としたものである。また、この解析手法を組み込むとともに、より効率よく特異点探索を行える解析プログラムを開発し、これを用いて斜張橋の終局挙動における分岐経路の存在を明らかにすることを目的としたものである。数値計算例は支間 1,000m の試設計例を対象とし、主桁の支持条件やケーブルの弛緩などが及ぼす影響についても検討するものとした。

なお、本論文では、解析手法の有用性、および、分岐経路の存在の検証を第一の目的として、解析は弾性範囲で行うものとした。また、同様の理由から初期不整などもここでは考慮しないものとした。

2. 解析理論と解析手法

2.1 座屈固有値解析法

(1) 線形座屈固有値解析法

斜張橋の場合、ケーブルの完成時設計張力 T は、一般に、図-1(a), (b) に示すように、通常の完成系モデル

に各部の死荷重を載荷させたときの張力 T_D と、全ケーブルを除去したモデルから算定されたプレストレ T_{PS} の和で微小変位解析により与えられる。つまり、死荷重載荷による T_D に対応する軸力 N_D とプレストレス T_{PS} により導入される軸力 N_{PS} の和によって実際に作用すべき主桁および主塔の軸力 N が与えられる。ケーブルの軸力 N は張力 T に等しい。これらの各部材の軸力 N を用いて線形化有限変位理論に基づく幾何剛性マトリックス $K_G(N)$ を作成すれば、次式によって基本荷重(死荷重+プレストレス)に対する座屈固有値 λ が求められる。

$$[K_0 + \lambda K_G(N)] D = 0 \quad (1)$$

ここに、 K_0 は線形剛性マトリックスである。

さらに、活荷重を基本荷重に加える場合は、死荷重と同様に完成系モデルを対象として、微小変位解析によりケーブルの張力 T_L と主桁および主塔の軸力 N_L を求めて各部材の軸力 N に加えればよい。

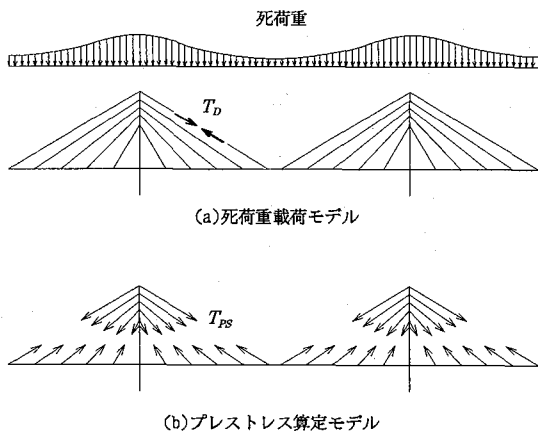


図-1 ケーブルの完成時張力

(2) 線形化座屈固有値解析法

一般に斜張橋は非線形性が強い構造物であり、基本的な設計計算などは微小変位解析で行われているが、非線形性の度合を把握する場合や、架設計算などでは、有限変位解析を行うことも少なくない。しかし、有限変位解析の計算では、初期形状決定により定められた無応力形状を基準としており、完成形状を基準とした微小変位解析とは計算ルーチンが異なる。従って、上述の線形座屈固有値解析へ移行するためには、幾何剛性マトリックス $K_G(N)$ を作成する計算ルーチンが別途必要となり、計算の流れが煩雑化する。そこでよく用いられているのが線形化座屈固有値解析法であり、(死荷重+プレストレス)載荷時または活荷重をさらに載荷した時の平衡状態での変位 D に関する接線剛性マトリックス K_T の非線形項 $K_{TG}(D)$ を用いて、次式により座屈固有値 λ が求められる。

$$[K_0 + \lambda K_{TG}(D)] D = 0 \quad (2)$$

なお、ケーブルの自重によるサグを含む任意方向の弛緩を考慮するために、一本のケーブル部材を複数の軸力要素に分割してリンク構造系へ置換する手法が用いられているが、リンク構造系の解析は、微小変位解析では不安定となるので、この解析法による必要がある。

本論文では、ケーブルの弛緩が及ぼす影響を把握することも目的の1つとしており、従って、線形化座屈固有値解析法を適用することとした。

2.2 座屈有限変位解析法

(1) 漸増プレストレスの取扱

著者らは、文献4)に、初期形状決定として、主桁、主塔の無応力形状、および、各ケーブル(リンク構造系への置換も含む)の無応力長 ℓ_{c0} を決定する手法を詳述している。

しかし、実際の計算では、形状決定された主桁、主塔の無応力形状の座標の入力によって、各ケーブルの両端節点の座標が決まり、初期長 ℓ_{ci} が自動的に定まることから、この初期長に調整長 $\Delta \ell_c = \ell_{c0} - \ell_{ci}$ を付加して無応力長 ℓ_{c0} に一致させる必要がある。

この調整長 $\Delta \ell_c$ を付加しない状態での死荷重載荷による張力が図-1(a)に示した T_D に対応することから、 $\Delta \ell_c$ の付加による張力の変化が図-1(b)の T_{PS} に対応することになる。従って、 $\Delta \ell_c$ の付加を荷重の一種と扱えば、荷重パラメータ α を乗じて死活荷重と同様にプレストレスを漸増できることになる。荷重増分法から変位増分法に移行する場合も、等価節点外力として取扱えば、 α の値の変化に換算して制御できる。プログラムの修正は、計算ルーチンの根幹には関係なく容易に行え、温度荷重に換算して初期長を調整すれば、汎用コードでも対処可能である。

(2) 分岐座屈と特異点探索

座屈問題において、分岐型の場合、その経路も含めて解析を行うことは必ずしも容易ではない。分岐点、屈服点(極大点、極小点)は数学上の特異点であり、特異点の前後では、接線剛性マトリックスの行列式の符号が変化することはよく知られている。これと等価なもので、接線剛性マトリックスの対角要素(ピボット)の負値の個数が特異点の個数に対応して増加するという性質⁹⁾があり、特異点が一意的に定まる。本論文では、この性質から特異点の存在を判定する手法を用い、特異点への収束は2分法の挟み込みによる収束法を採用した。

さらに、分岐経路のモード形状は、特異点において特異行列から求まる零固有値に対する固有ベクトルを後座屈モードとして判別し、非対称モードの分岐経路の探索は、この固有ベクトルと相似な変形を微小な不整として付与することによって行うものとした。

なお、これらを組込んだ解析プログラムは、構造系の不安定挙動および後座屈経路の追跡を精度良くかつ高い収束性で解析できる必要がある、より厳密な移動座標系を用いた文献6)のものを基本とした。

値はバネ剛度の変化に関わらずほぼ一定であり、遊動円木モードの固有値はバネ定数 1,000tf/m までは上昇して逆対称一次モードの固有値に近接するが、それ以降は水平バネの拘束効果によってモードそのものが消滅することがわかる。また、対称一次モードの固有値の値はほとんど変化しない。

これに対して、無応力調整をしない場合は、同様に遊動円木モードが消滅するが、バネ定数を 1,000tf/m からさらに上げていくと、逆対称一次モードおよび対称一次モードの固有値は両者とも上昇を続けることがわかる。したがって、水平バネを考慮する場合には、前節で述べた完成形状で無応力調整が不可欠であることが確かめられる。

これらの結果より、逆対称一次モードの固有値が安定し、遊動円木モードが消滅することが確認された時のバネ定数 1,000tf/m を、水平バネ剛度として決定した。

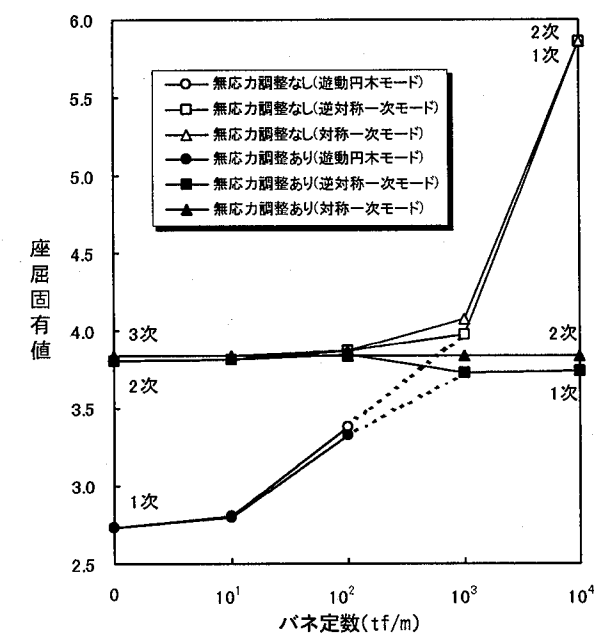


図-4 バネ定数と座屈固有値との関係

4. 数値計算結果とその考察

4.1 荷重ケース

荷重の種類は死荷重 D 、プレストレス PS および活荷重 L とし、表-2 に示すように case a) ~ c) の 3 ケースの組み合わせを考え、座屈有限変位解析においては、荷重パラメータ α を原則として計算不能となるまで漸増させることとした。なお、活荷重については本州四国連絡橋公団の基準⁸⁾を準拠し、全径間に等分布荷重、および、各径間の中央部に集中荷重を載荷した。

表-2 荷重ケース

ケース	荷重条件
case a)	$\alpha (D+PS)$
case b)	$\alpha (D+PS+L)$
case c)	$(D+PS)+ \alpha (L)$

4.2 座屈有限変位解析結果

図-5 は、case a)における全モデルの解析結果として、荷重パラメータ α と中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位との関係を示したものである。全てのモデルにおいて特異点がそれぞれ 2 個探索されていることがわかり、1 つ目の特異点は分岐点に対応し、2 つ目の特異点は α の極大点と一致し屈服点を示している。

水平バネの効果によって構造系全体の耐荷力は上昇し、1 つ目と 2 つ目の特異点は近接する傾向にあることがわかる。ケーブルモデルの相違では、直線ケーブルモデルの方がリンクケーブルモデルに比べて、 α_{max} の値は若干大きくなり、ピーク点を過ぎてから荷重は漸減しながらも変形は進行していく。なお、これ以降の座屈有限変位解析結果では、両ケーブルモデルの差異の傾向はほぼ同様であるため、リンクケーブルモデルの解析結果のみを示す。

上述した解析結果における特異点は、2.2 節の解析手法によって求められたものである。その具体的な特異点探索の一例として、case a)における水平バネを考慮しないリンクケーブルモデルの荷重パラメータ α と中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位の関係を取りあげ、図-6 に示す拡大図を用いて探索の経過を説明する。なお、ここで着目した主桁節点およびその変位方向は、変位増分法の制御点および制御方向に対応している。

各プロット点は有限変位解析のニュートンラフソン法による収束点(括弧内の数字は収束回数)である。系が安定であればピボットは常に正值であり、図中では、記号 $\bigcirc$ で示している。一方、A 点の記号 $\bullet$ は、収束時に接線剛性マトリックスのピボットの 1 つが負値になったことを示している。1 ステップ前の $\bigcirc$ 点では正值であることから、O-A 間に特異点が 1 個存在する。従って、これを 2 分法の挟み込みによる収斂(図中 A-B-C...の経路)から、負のピボットが出現する点を探索し、収束した②点を特異点と判定した。

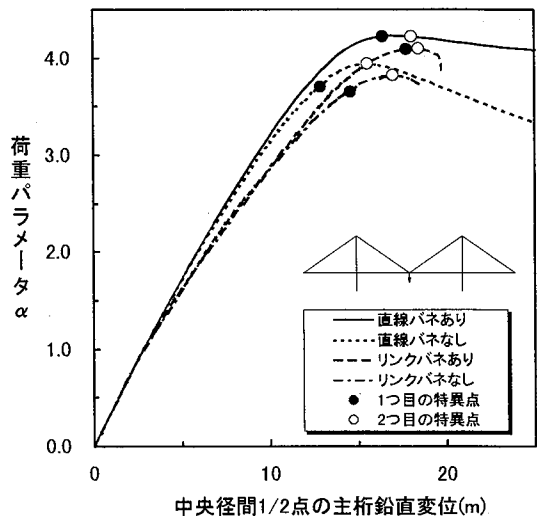


図-5 case a)における全モデルの解析結果

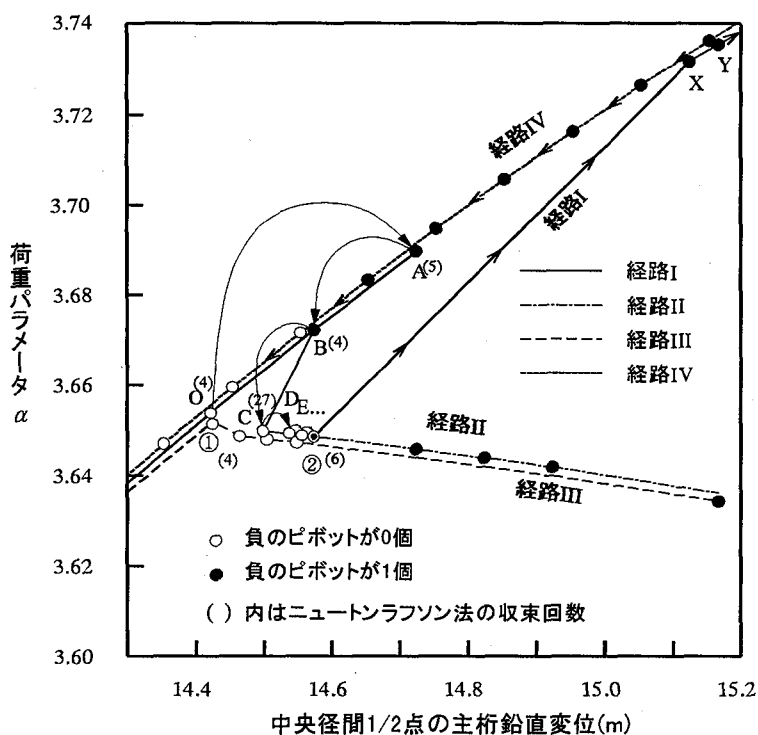


図-6 case a)における特異点探索結果の一例

特異点②は、分岐点に対応し、以降同様な変位制御によって、さらに次の特異点およびその経路(経路I:X-Y...)の探索に向かうことになる。さらに、経路IIが、特異点②において特異行列から求まる零固有値に対する固有ベクトルを微小な不整として付与することによって得られた分岐経路である。

この例を含む全てのモデルおよび荷重ケースにおいて、対称荷重載荷の対称モード経路から、分岐後は非対称モード経路を辿っているが、分岐経路のモード形状の判別については次節に詳述する。

図-7, 8, および, 9 は、それぞれ case a), b), および, c)における荷重パラメータ α とリンクケーブルモデルの中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位の関係を示したものである。図中、対称モード経路を実線で、非対称モード経路を点線で示した。なお、case a)および b)については初期の無応力形状を基準とした変位を示し、case c)については基本荷重($D+PS$)と漸増荷重 L が異なることから、完成形状を基準とした変位を示した。

基本的に 3 ケースともほぼ同様な変形能を示し、終局付近で 2 つの特異点が探索されていることがわかる。すなわち、1 つ目の特異点では、これを通して分岐経路である非対称モード経路が探索され、2 つ目の特異点では、 α の極大値と一致し屈服点を示している。全ケースにおいて、水平バネの効果によって、耐荷力は上がり、その傾向は case c)において顕著である。また、 L のみを漸増させた case c)の場合、case a)および b)に比べて、終局の変位はかなり大きくなること、および、逆にバネなしモデルの方がバネありモデルよりも 2 つの特異点が近接していることがわかる。

さらに、図-10, 11 および 12 には、case a)の水平バネを考慮しないリンクケーブルモデルにおける主塔位置の主桁軸力、主塔位置の主桁曲げモーメント、および、主塔基部の曲げモーメントを示す。図中、実線で対称モード経路、点線で非対称モード経路を示した。図-10 より、主塔位置は主桁軸力が最大となる箇所であるが、終局まではほぼ線形挙動を示していることがわかる。図-11 および 12 より、基本荷重($\alpha=1.0$)ではほとんど生じていなかった曲げモーメントが、漸増荷重によって非線形的に増大し、非対称モード経路では、非対称変形が累加することから乱れた挙動を示していることがわかる。

4.3 終局付近の詳細挙動

本節では、より詳細に終局挙動を検討するために、case a)のリンクケーブルモデルを対象に、終局付近を拡大した図を用いて考察する。図-13 に、水平バネを考慮しないモデルの中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位、

および、図-14 および 15 に、水平バネを考慮したモデルの中央径間 1/2 点および 2/5 点の主桁鉛直変位を示す。

解析では、荷重増分法と変位増分法を併用し、可能な限り荷重増分法によるものとして、特異点の直前で変位増分法に切り替えた。図-14 よりわかるように、バネありモデルでは、分岐した後、中央径間 1/2 点の鉛直変位が減少する挙動(点線部)を示した。そこで、変位増分法の変位制御点は安定した単調増加変位を生じる必要があることから、バネなしモデルでは中央径間 1/2 点、および、バネありモデルでは図-15 より中央径間 2/5 点の鉛直変位を制御した。

図-13 に示したバネなしモデルの 2 つの特異点②, ③のうち、1 つ目の特異点②付近をさらに拡大した図が前出の図-6 であり、その位置は経路 I 上にあり厳密な分岐点ではないことがわかる。一方、変位増分幅を小さくし、①点を通るよう制御すれば、通常の有限変位解析によっても、対称モード経路から分岐して、特異点②を通った後は非対称モード経路 II に一致する経路 III が得られる。従って、真の分岐点は、ほぼ①点としてもよいと考えられ、このような現象は極めて不安定な状態での数値計算誤差によるものであるが、実用上はほとんど問題ないといえる。なお、経路 IV は、2 つ目の特異点③へ向かう経路上から除荷によって得られた経路であり、対称モード経路を逆に辿っていくことがわかる。図-14 および 15 における④点も、①点と同様にして求められたものであり、真の分岐点と考えられる。

図-16 は、バネなしモデルにおける図-13 に示した各着目点での変形図および後座屈モード図を示したものである。図から明らかなように、分岐点①では対称変形で

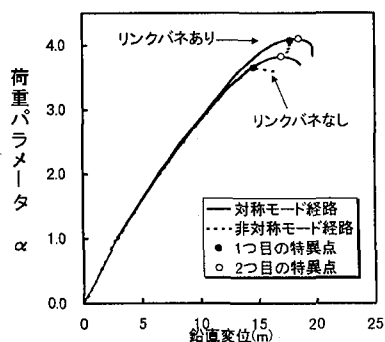


図-7 case a)における中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位

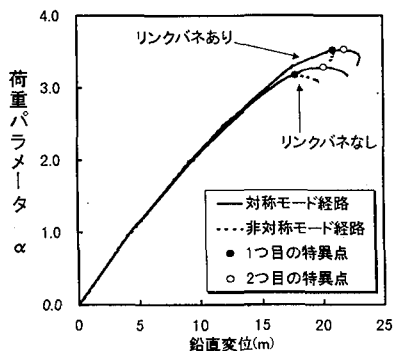


図-8 case b)における中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位

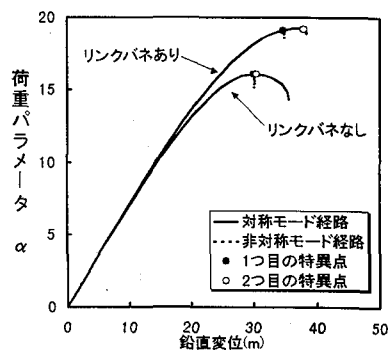


図-9 case c)における中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位

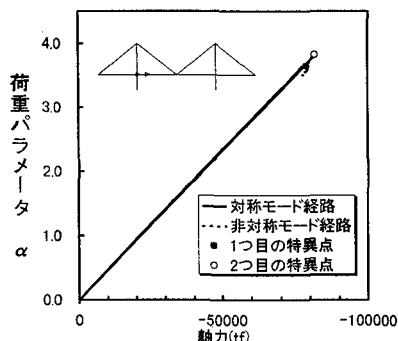


図-10 case a)のバネなしモデルの主塔位置の主桁軸力

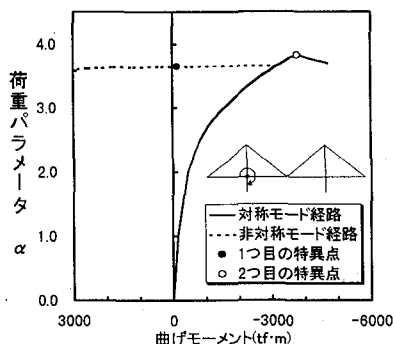


図-11 case a)のバネなしモデルの主塔位置の主桁曲げモーメント

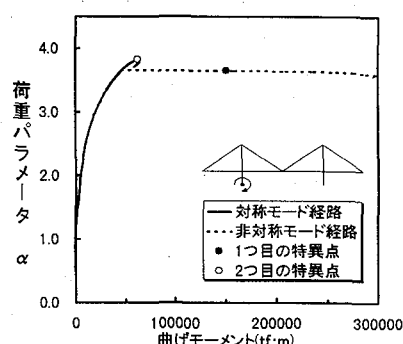


図-12 case a)のバネなしモデルの主塔基部の曲げモーメント

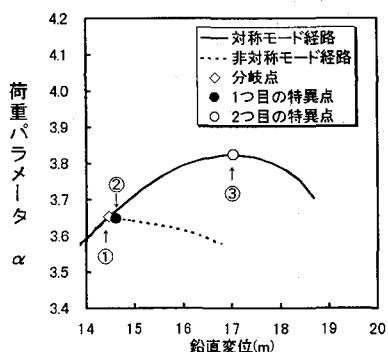


図-13 case a)のバネなしモデルの中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位

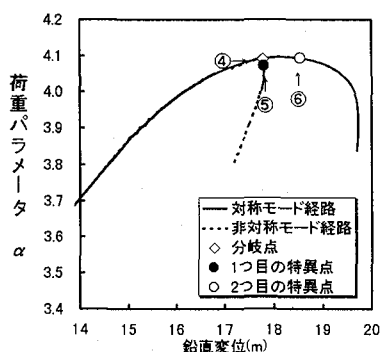


図-14 case a)のバネありモデルの中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位

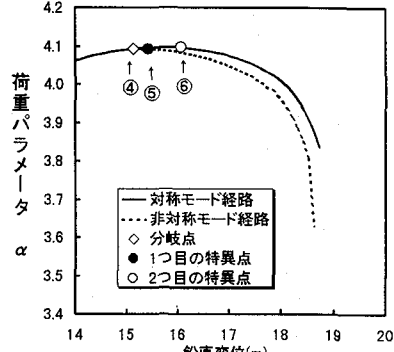


図-15 case a)のバネありモデルの中央径間 2/5 点の主桁鉛直変位

あるが、1つ目の特異点②では非対称変形となり、後座屈モードも非対称モードとなっている。従って、分岐前是对称モード経路であったものが、分岐後は非対称モードとなる経路であることが確かめられる。一方、2つ目の特異点③では、対称変形で、後座屈モードも対称性があることから、屈服点であることが確かめられる。

図-17は、バネありモデルにおける図-14および15に示した各着目点での変形図および後座屈モード図を示したものであり、バネなしモデルと同様に、対称モード経路および非対称モード経路を特定できる。なお、特異点⑤の変形図は対称変形に近いが、分岐点④と非常に近接していることによるものである。図を略したが、④-⑤間の微小な変位増分による増分変形は確かに非対称変形であった。

ただし、バネなしモデルにおける特異点②の後座屈モードとバネありモデルにおける特異点⑤の後座屈モードが大きく異なっていることには注意が必要である。これについては、線形化座屈固有値解析結果の比較とあわせて次節で考察する。

4.4 座屈固有値解析結果との比較

本節では、case a)について線形化座屈固有値解析を行った結果と、前節までに述べた座屈有限変位解析結果を比較しながら考察する。表-3に座屈有限変位解析および線形化座屈固有値解析から求められた座屈荷重の比較として、分岐点、屈服点の荷重パラメータ α 、および、1～3次の固有値 λ の値をそれぞれ示す。表中には、後座屈モード、および、固有モードについてもそれぞれ付記した。

表-3 case a)の座屈有限変位解析結果と線形化座屈固有値解析結果の比較

直線ケーブルモデル								
座屈有限変位解析				線形化座屈固有値解析				
次数	バネなし		バネあり		バネなし		バネあり	
	座屈荷重	後座屈モード	座屈荷重	後座屈モード	固有値	固有モード	固有値	固有モード
1st	3.69919	遊動円木	4.21877	逆対称一次	2.759439	遊動円木	3.762717	逆対称一次
2nd	3.93930	逆対称一次	4.22020	対称一次	3.838387	逆対称一次	3.864942	対称一次
3rd					3.864898	対称一次	3.882737	対称二次

リンクケーブルモデル								
座屈有限変位解析				線形化座屈固有値解析				
次数	バネなし		バネあり		バネなし		バネあり	
	座屈荷重	後座屈モード	座屈荷重	後座屈モード	固有値	固有モード	固有値	固有モード
1st	3.64693	遊動円木	4.09101	逆対称一次	2.725855	遊動円木	3.729254	逆対称一次
2nd	3.82256	逆対称一次	4.09477	対称一次	3.809403	逆対称一次	3.836538	対称一次
3rd					3.836493	対称一次	3.848800	対称二次

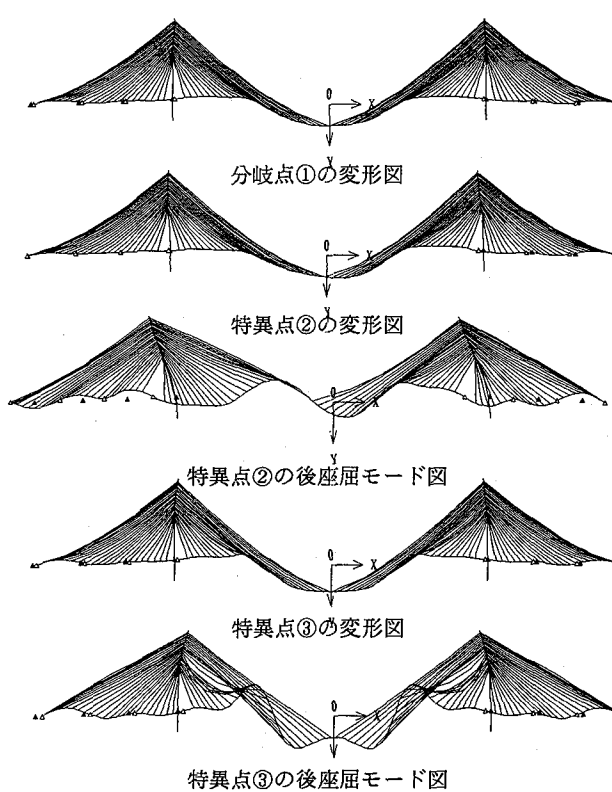


図-16 case a)のバネなしモデルにおける各着目点の変形図および後座屈モード図

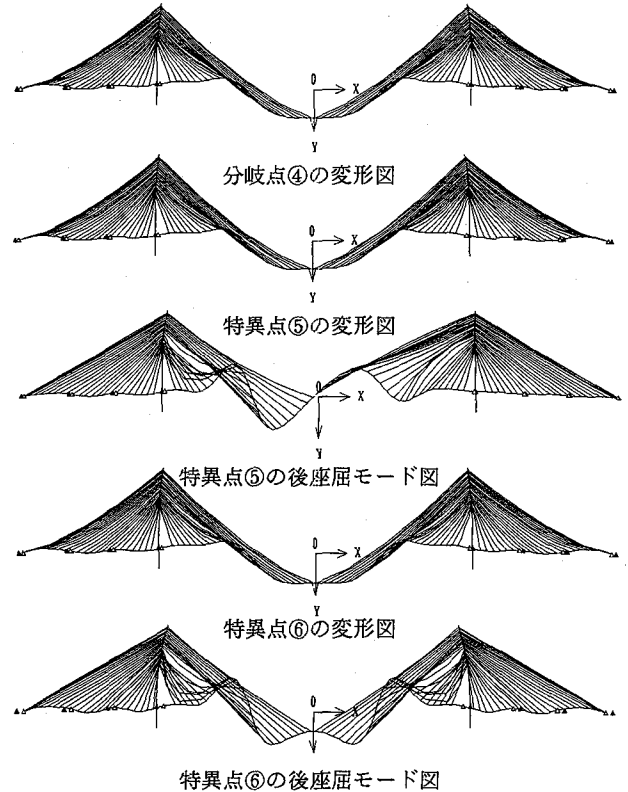


図-17 case a)のバネありモデルにおける各着目点の変形図および後座屈モード図

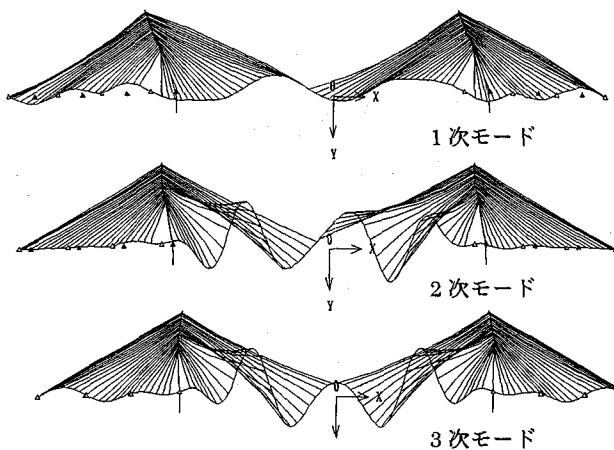


図-18 case a)のバネなしモデルの線形化座屈固有値解析による固有モード図

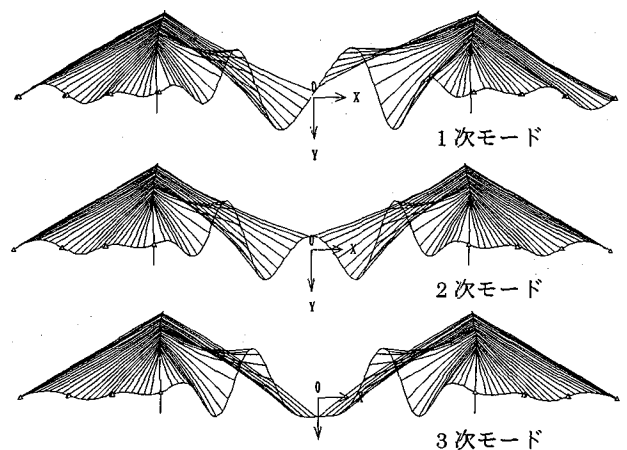


図-19 case a)のバネありモデルの線形化座屈固有値解析による固有モード図

まず、直線ケーブルモデルの方がリンクケーブルモデルに比べて全ての値が若干高くなっていることから、面内剛性を実際より高く評価しているモデルといえる。また、バネなしモデルの1次の固有値を除けば、両解析結果はそれぞれのモデルでほぼ良い一致を示している。バネありモデルと比較すれば、有限変位解析の結果の方が固有値解析結果よりも値は大きくなる傾向にあることもわかる。

さらに、後座屈モードと固有モードとの対応関係を具体的に考察するために、図-18 および 19 に、リンクケーブルのバネなしモデルおよびバネありモデルの線形化座屈固有値解析による1次から3次までの固有モード図を示す。この2つの図より、図-4 に既に示し、表-3 にも付記したように、バネなしモデルの1次モードは遊動円木モードであり、2次、3次モードがそれぞれ逆対称一次、対称一次モードであることがわかる。これに対して、バネありモデルでは、遊動円木モードは現れず、1次、2次モードがそれぞれ逆対称一次、対称一次モードであり、3次モードは対称二次モードであることがわかる。

図-16 および図-17 との比較によれば、バネなしモデルの特異点②、および、バネありモデルの特異点⑤の後座屈モードが、遊動円木モード、および、逆対称一次モードにそれぞれ一致していることは明らかである。一方、特異点③および⑥は、ともに対称一次モードに一致している。

しかしながら、表-3 に示したバネなしモデルの分岐点の荷重パラメータ α は、1次ではなく、2次の固有値に近い値となっている。この要因としては、遊動円木モードに対応する変形に伴う非線形性が比較的大きいことが考えられる。また、2次の逆対称一次モードに一致するモード形状の分岐経路が見つからなかったことから、1次の遊動円木モードにおいて連成している逆対称成分と逆対称一次モードとの相互作用なども要因として考えられるが、十分な検討が必要である。

5. 結 言

中央径間長 1,000m の長大斜張橋を対象に、本論文で提案した解析手法を適用し、座屈安定解析を行って終局挙動を検討した結果、次のことがいえた。

(1)形状決定された無応力長に対するケーブルの初期長の調整を等価節点外力に置き換え、一種の荷重として扱えば、死活荷重と同様に荷重パラメータを設定でき、漸増プレストレスをより簡便に取扱える。

(2)接線剛性マトリックスのピボットの負値の個数によって特異点の存在を判定し、2分法の挟み込みによる収斂法を用いて収束させれば、大規模で複雑な構造物の分岐型の座屈問題であっても、より効率よく確実に特異点を探索できる。

(3)分岐点に対応する特異点において、特異行列から求まる零固有値に対する固有ベクトルと相似な変形を微小な不整として付与することによれば、比較的容易に分岐

経路を探索できる。また、各特異点における零固有値に対する固有ベクトルを後座屈モードとして、その形状によれば、座屈変形経路のモード形状を容易に確定できる。

(4)解析の結果、荷重ケースおよび解析モデルの相違に関わらず、特異点は2つ探索された。1つ目の特異点は、その前後で対称モードから非対称モードに変化する分岐点に対応しており、対称載荷の場合にも非対称モードの分岐経路が存在することを明らかにできた。また、2つ目の特異点は、荷重パラメータの極大値と一致する屈服点であり、対称モードの屈服現象を生じることが確かめられた。

(5)ケーブルモデルの相違はそれほど顕著には現れなかったが、リンクケーブルモデルの場合、直線ケーブルモデルに比べて耐荷力が若干下がり、解析上の安定性もよくなかった。

(6)水平バネを考慮した場合、座屈有限変位解析結果と線形化座屈固有値解析結果には大きな差異はないが、前者の方が後者より座屈荷重が少し大きくなる結果が得られた。また、水平バネの考慮のためには、完成形状での無応力調整が不可欠であった。

(7)水平バネを考慮しない場合は、考慮した場合と比べて耐荷力が下がり、座屈有限変位解析結果と線形化座屈固有値解析結果が大きく異なる結果が得られた。この要因として、遊動円木モードに対応する変形に伴う非線形性が比較的大きいことなどが考えられた。

今後は、弾塑性領域まで考慮した場合や初期不整の与える影響についての検討、および、弾塑性有限変位挙動を呈する終局近傍での非線形座屈固有値解析法を適用した検討を行いたい。

最後に、当時東京都立大学の卒業研究生であった、中田 聡氏(現 栃木県)、および、平野 和志氏(現 東京都)らによる解析データの作成・整理などへの協力に対して、心より謝意を表したい。

参考文献

- 1) 野村国勝・中崎俊三・成田信之・前田研一・中村一史：長大吊形式橋梁の構造特性と経済性，構造工学論文集，Vol.41A，1995.3.
- 2) 北田俊行・野口二郎・丹生光則・狩野正人：鋼斜張橋の耐荷力解析におけるプレストレスの取扱いに関する一考察，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，Vol.18，1994.7
- 3) 中村俊一・七浦恒康：鋼斜張橋の終局強度に関するケーススタディー，橋梁と基礎，1989.7.
- 4) 前田研一・林 正・瀬戸内 秀規・中村一史・成田信之：長大斜張橋の立体有限変位解析，構造工学論文集，Vol.41A，1995.3.
- 5) 前田幸雄・林 正：構造解析における多元連立非線形方程式の数値計算法，日本鋼構造協会 第11回マトリックス構造解析法研究発表論文集，1977.
- 6) 前田幸雄・林 正：立体骨組構造物の有限変位解析，土木学会論文報告集，No.253，1976.
- 7) 星埜正明・宮田利雄：長大斜張橋(支間 1,000m)の試設計，橋梁と基礎，1990.2.
- 8) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準(1989)・同解説，1989.4.

(1997年9月26日受付)