

長大斜張橋の分岐座屈特性に及ぼす主桁の初期たわみの影響

EFFECTS ON BIFURCATION BUCKLING CHARACTERISTICS
OF INITIAL DEFLECTIONS OF MAIN GIRDER IN A LONG-SPAN CABLE-STAYED BRIDGE

中村一史* ・ 前田研一** ・ 紺野 誠*** ・ 林 正**** ・ 成田信之*****

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

*工修 東京都立大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

**工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

***工修 東京都立大学大学院生 (現日本鋼管(株)) (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

****工博 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 (〒940-2137 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

*****工博 (社)日本鋼構造協会専務理事(前東京都立大学教授) (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 3-3-1)

In this paper, the analytical technique for introducing initial deflections of main girders in cable-stayed bridges is proposed to apply the equivalent imperfection design method on the basis of the elastic finite displacement theory. The initial deflections, which are similar to buckling eigen-modes, correspond to fabrication errors, and include effects of not only residual stresses but also plastic deformations. Moreover, using a cable-stayed bridge with the center span length of 1,000m, finite displacement analyses with searching singular points and linearized eigen-value analyses are employed in order to investigate effects on bifurcation buckling characteristics of modes and scales of the initial deflections. From the results of analyses, useful data can be derived to the equivalent imperfection design method at the ultimate limit state.

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

1. 緒言

近年、限界状態設計法への移行¹⁾を念頭に置いて、吊形式橋梁を含む鋼構造物の終局強度に着目した、弾性有限変位解析、および、弾塑性有限変位解析に基づく種々の実用的な設計法の提案が活発になっている²⁾。

弾性有限変位解析に基づく設計法の一つである等価初期不整法では、初期たわみ、および、残留応力等の不整要因の相乗作用やパラツキが終局強度に及ぼす影響を、等価初期たわみ(あるいは等価等分布横荷重)を全体構造系に導入し、付加曲げモーメントを与えることによって考慮するものとしている。これに対して、弾塑性有限変位解析に基づく設計法では、初期たわみを残留応力と分離して導入するものとしている。

等価初期たわみ、または、初期たわみの形状については、適切な方法により決定するものとしているが、有効な一方法として、分岐座屈問題となるような場合は、幾何剛性行列を用いた線形座屈固有値解析によって得られる固有モードを基に決めればよいとしている。ただし、最低次の固有モードと有限変位解析による終局状態での変形モードとが、大きく異なる場合があるので注意が必要であるとしている。

また、それらの大きさの決定については、類似の構造物に関する設計・製作に関する基準がある場合にはそれを準拠し、ない場合には責任技術者の判断によればよいとしている。

両者の設計法を比較すると、弾塑性有限変位解析に基づくものがより精緻な設計を可能にすることは明らかであるが、実務設計の場での適用を考えると、弾性有限変位解析に基づくものの確立とその適用性の拡大が望まれる。そのような背景の下、上述の弾性有限変位解析に基づく等価初期不整法において導入される等価初期たわみによって、塑性化の影響をも考慮する設計法が、小規模構造物を対象として、検討され始めている³⁾。

したがって、これらの設計法を、吊形式橋梁の一つであり、長大化⁴⁾が著しく、支間 1,000m 時代の到来も近いとされる斜張橋の設計法として適用するためには、等価初期たわみ、または、初期たわみが及ぼす影響を十分に把握する必要がある。特に、斜張橋の場合、終局状態での変形モードと最低次の線形座屈固有モードが大きく異なった例⁵⁾も報告されており、最低次以外の座屈固有モードなどにも着目して、終局強度に最も不利な影響を及ぼす形状を検討することが不可欠である。

しかしながら、初期たわみの形状と大きさを変えて、長大斜張橋の終局状態における変形挙動などを詳細に検討した研究は、弾性、弾塑性有限変位解析によるものともに、これまでみられず、それを導入する手法さえも明確に提示されていない。

一方、著者ら^{9,10)}は、斜張橋特有のケーブルのプレストレスの耐荷力解析における取り扱い⁹⁾について、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、座屈固有値解析と直接に対比できる有限変位解析手法を提案している。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弾性有限変位解析プログラムを開発し、これを適用して中央支間 1,000m の長大斜張橋の試設計例の終局挙動における分岐座屈特性を、主桁の支持条件やケーブルの弛緩などが及ぼす影響も考慮して検討している。

その結果、対称構造に対称荷重を載荷して漸増させた場合にも、屈服点に至る対称変形モードの基本経路の途中に分岐点が探索され、その点から分岐する非対称変形モードの分岐経路の存在が明らかになっている。さらに、実橋に即して主桁の両端がバネ支持された解析モデルでは、分岐点での後座屈モードと分岐経路での変形モード、および、屈服点での変形モードが、それぞれ逆対称一次、および、対称一次の線形化座屈固有モードにそれぞれ対応することが確かめられている。

本論文は、これまでの成果を踏まえ、弾性有限変位解析に基づく等価初期不整法の長大斜張橋への適用に向けて、初期たわみを製作誤差に対応して導入する解析手法を提案し、最低次以外のものも含む線形化座屈固有モードを基にした主桁の初期たわみ形状とその大きさが分岐座屈特性に及ぼす影響を、それによる付加モーメントにも着目して把握することを目的としたものである。

さらに、主桁の支持条件を変えた解析や、ケーブルの弛緩の影響を考慮した解析、および、ケーブルと塔を除いた連続桁の固有モードを基にした初期たわみによる解析なども行って比較するとともに、初期たわみを導入した線形化座屈固有値解析も実施して、座屈固有値、固有モードと、有限変位解析における終局状態での荷重パラメータ、変形モードとの相関関係についても検討したものである。

なお、初期たわみの大きさについては、斜張橋、および、類似の構造物の設計・施工基準等に定められた基準値、あるいは、施工実績などから推測されるレベルの範囲だけでなく、将来、等価初期不整法を拡張し、塑性化の影響をも考慮した等価初期たわみを導入することを想定して、簡易弾塑性有限変位解析結果から、塑性化による終局状態の荷重パラメータの低減のレベルを予測し、そのレベルの範囲まで拡大して検討するものとした。

2. 解析手法と解析理論

2.1 製作誤差に対応した初期たわみの導入

長大斜張橋の場合も、一般に、断面を決定する際の基

本的な設計計算は線形の微小変位解析法を用いて行われる。この基本となる設計計算において、完成時の断面力などを求める際には、図-1 に示すような斜張橋特有の解析モデルの組み合わせが適用されることが多い。

すなわち、図-1 (a)に示す通常の斜張橋モデルに、ケーブル、主桁、塔などの各部の死荷重を載荷して、死荷重時の各ケーブルの張力 T_D をはじめ各部の断面力が算出され、各ケーブルのプレストレス T_{PS} を算定する時は、図-1 (b)に示すような全ケーブルを仮に除去したモデルを対象に、その時の主桁、塔の各部の断面力が算出される。

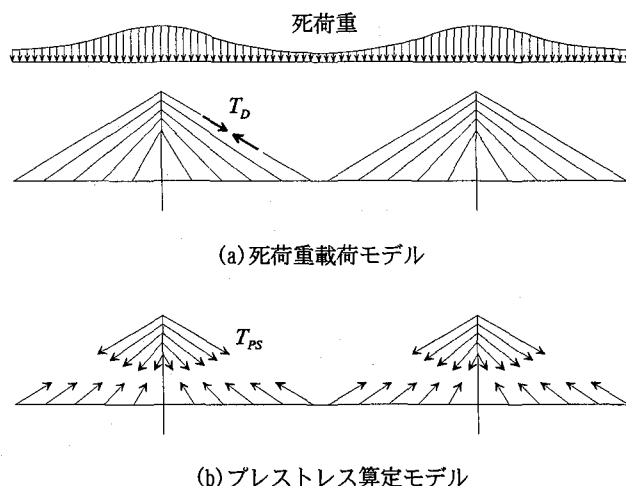


図-1 設計計算モデル

その結果、完成時の各ケーブルのプレストレスを含む設計張力 T_C は、 $T_C = T_D + T_{PS}$ で与えられ、主桁、塔の各部の(死荷重+プレストレス)時の断面力も、両者のモデルにおける断面力の合計値で与えられることになる。

したがって、斜張橋特有の設計条件を満たす有限変位解析モデルを作成するためには、設計張力 T_C が各ケーブルに生じた状態で、主桁、塔が所定の完成形状となり、断面力の分布状態も上述の微小変位解析による計算値と一致するように、初期形状決定を事前に行っておく必要がある^{9,10)}。

この初期形状決定の手法の詳細については、文献 9)、10)に述べられているので省略するが、主桁、塔の初期形状となる無応力形状は、図-2 に示すように、各ケーブルの設計張力 T_C の各座標軸方向成分に対応する外荷重を、全ケーブルを仮に除去したモデルにケーブル、主桁、塔などの各部の死荷重とともに載荷し、その載荷状態で完成形状となるように決定される。こうして得られる主桁、塔の無応力形状が、工場における製作形状に対応することは明らかである。

そこで、本論文では、有限変位解析モデルの無応力形状の主桁、塔の各節点の各軸の座標に初期たわみの各座標軸方向成分を加え、それを改めて初期形状とすることによって、初期たわみを導入し、付加曲げモーメントを

与えることを提案する。

完成形状を基準に初期たわみを導入する場合は、ケーブルの完成時張力の変化が付加曲げモーメントを左右することから、その取り扱いが問題となり、問題が解決したとしても、初期形状決定を毎回やり直さなければならないからである。さらに、提案した手法によれば、導入される初期たわみは、製作誤差に対応することになり、現行の設計・製作基準などをある程度反映することもできるからである。

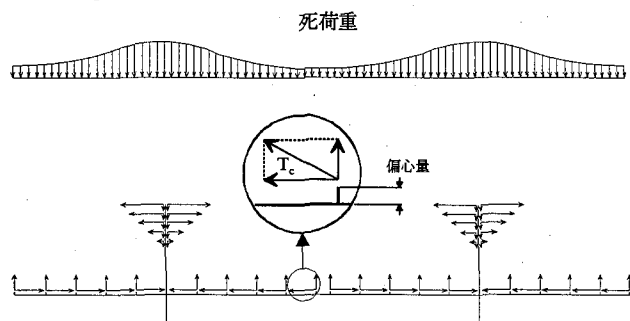


図-2 主桁・塔の無応力形状を決定する際のモデル

2.2 線形化座屈固有値解析法

座屈固有値解析法としては、解析の基準となる基本荷重下での平衡状態における接線剛性行列の非線形項を、線形座屈固有値解析法における幾何剛性行列の代わりに用いる線形化座屈固有値解析法を適用することとする。

線形化座屈固有値解析法が、線形座屈固有値解析法に代えて適用されることは多く、両者の解析結果にはほとんど差異がないこともよく知られている。また、これによれば、提案した手法による初期たわみの導入も、全く問題なく取り扱うことができる。

2.3 弾性有限変位解析法^{6),7)}

(1) 漸増プレストレスの取扱

前々節で述べた斜張橋の初期形状決定では、各ケーブル(弛緩の影響を考慮するためにリンク構造系に置き換える場合も含む)については、完成形状の主桁、塔にそれらの両端を支持された状態で設計張力 T_c となるように、無応力長が決定される。

しかし、実際の計算では、主桁、塔の初期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、初期長が自動的に定まることから、この初期長に調整長を付加して無応力長に一致させる必要がある。

調整長を付加しない状態での死荷重载荷による張力が図-1 (a)に示した T_0 に対応することから、調整長の付加による張力の変化が T_{ps} に対応することになる。

著者らは、この点に注目し、各ケーブルに対する調整長の付加を等価節点外力に置き換え、荷重の一種として取り扱うことにより、死荷重と同様に荷重パラメータを乗じて、プレストレスを漸増することを文献 6), 7)で提案した。これにより、有限変位解析結果と座屈固有値解析結果との直接的な対比が可能となった。

なお、提案した手法に従って初期たわみを導入し、主桁、塔の初期形状を変化させた場合にも、荷重パラメータを乗じる基本荷重が変動しないように、各ケーブルに作用する等価節点外力の値は変えないものとする。

(2) 分岐座屈問題と特異点探索

斜張橋のように、分岐座屈問題となるような構造系の場合、分岐経路の探索も含めて解析を行うことは、必ずしも容易ではない。そのため、著者らは、文献 6), 7)に詳述したように、上述のプレストレスの取り扱い手法を組み込むとともに、次のような特色をもつ弾性座屈有限変位解析プログラムを独自に開発した。

① 分岐点、屈服点(極大点)に相当する特異点の探索にあたっては、特異点の前後における接線剛性マトリックスの対角要素(ピボット)に現れる負値の個数の変化によって、特異点の存在とその個数を判定し、個々の特異点への収束は2分法を用いた挟み込みによる収束法によった¹¹⁾。

② 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、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った。

③ 不安定挙動および後座屈挙動を精度良くかつ高い収束性で追跡するために、より厳密に移動座標系を取り扱った立体有限変位解析法¹²⁾に基づくものとし、変位増分法も適用できるようにした。ただし、荷重増分法から変位増分法に移行した場合も、荷重パラメータの値の変化に換算できるようにした。

3. 数値解析モデル

解析対象は、側径間に2基の中間橋脚と3%の直線勾配、中央径間に1.5%の放物線勾配をもち、中央支間1,000mのA形主塔を有する長大斜張橋の試設計例¹³⁾(図-3)とした。これは本州四国連絡橋公団の設計基準¹⁴⁾を準用して設計されたもので、主要な断面諸元は表-1に示すとおりである。

主桁のモデル化については、箱桁構造を魚骨構造に置き換え、主桁の支持条件が及ぼす影響について検討する目的で、全体構造系の挙動に及ぼす影響が比較的大きい橋軸方向の弾性拘束条件に着目し、実橋に即して、両端にいわゆる水平バネがない場合と、ある場合の2種類を考えた。また、塔のモデル化については、忠実に骨組構造に置き換えた。

ここに、主桁の水平バネの剛度としては、線形化座屈固有値解析を予め行って、逆対称一次モードの固有値がバネ定数の変化に対してほぼ一定の値に収束し、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を採用した。なお、この水平バネの設置にあたっては、不当なプレストレスの導入を避けるために、完成形状で無応力となるように初期長を調整した。

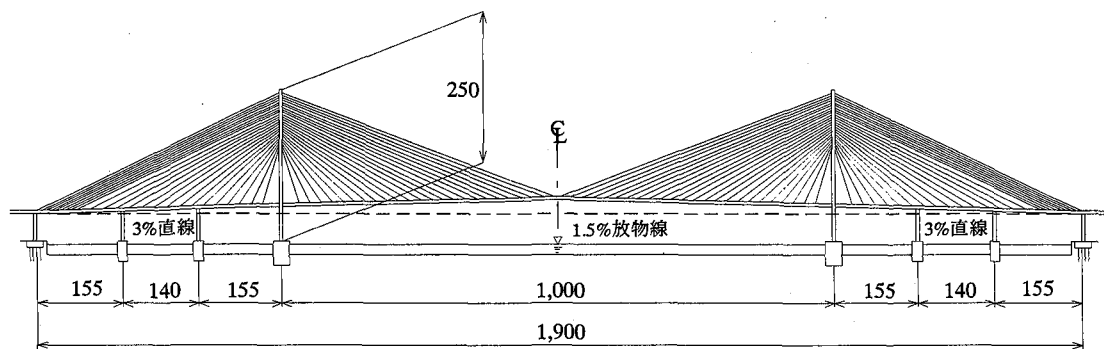


図-3 試設計例

表-1 断面諸元

	主桁	主塔
A(m ²)	1.58	1.24~3.30
J(m ⁴)	6.4	12.0~20.0
Iy(m ⁴)	150	10.20~24.40
Iz(m ⁴)	2.66	11.99~45.22
ケーブル		
A(m ²)	0.006278~0.01343	

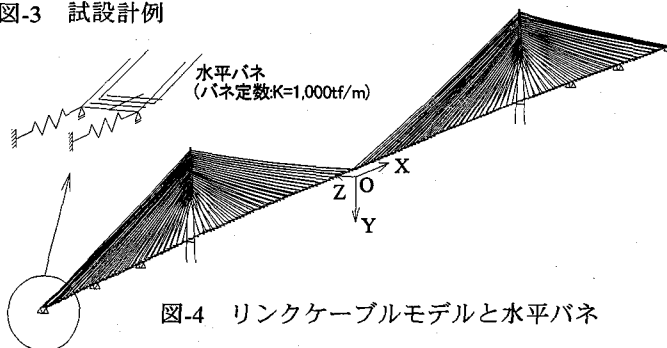


図-4 リンクケーブルモデルと水平バネ

ケーブルのモデル化については、単一の直線軸力部材(直線ケーブル)とする場合と、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、全ケーブルを水平方向に等分割した4部材から成るリンク構造(リンクケーブル)に置き換える場合の2種類を考えた。

したがって、主桁とケーブルのモデル化を組み合わせ、バネなし直線ケーブルモデル(以下、ASモデルと略称する)、バネなしリンクケーブルモデル(同、ALモデル)、バネあり直線ケーブルモデル(同、BSモデル)、および、バネありリンクケーブルモデル(同、BLモデル、図-4)の4種類の立体骨組構造解析モデルを、表-2に示すように作成した。

斜張橋特有の設計条件を満たすための初期形状決定によって得られる主桁、塔の初期形状(無応力形状)が全ての解析モデルで同一であることは明らかであり、初期たわみが導入される前のこれらの4種類の解析モデルを、各々の基本モデルとする。

表-2 解析モデル

ケーブルモデル	水平バネ	モデル名	(節点数:部材数)
直線ケーブル	無	ASモデル	(705:896)
	有	BSモデル	(709:900)
リンクケーブル	無	ALモデル	(1,281:1,664)
	有	BLモデル	(1,285:1,668)

4. 初期たわみの形状と大きさ

4.1 初期たわみの形状

提案した手法に従って、基本モデルにおける主桁、塔の初期形状(無応力形状)の節点座標に初期たわみ成分を付加することによって、初期たわみを導入することとし、終局強度に最も不利な影響を与える形状を検討するために、次のような種々の形状のものを採用した。

(1)基本モデルの座屈固有モード

まず、初期たわみの形状として、文献2)で提案されているように、座屈固有値解析による固有モードの相似形を考え、最低次以外のものにも着目するものとした。

そこで、4種類の基本モデルを対象に、完成時すなわち(死荷重+プレストレス)時の線形化座屈固有値解析を行った。その結果の一部を、表-3、および、図-5に示す。表-3は、全モデルの3次までの固有値とそのモード形状を示し、図-5は、直線ケーブルモデル(ASモデル、BSモデル)の固有モード図を示したものである。これらの図表より、バネなしモデル(ASモデル、ALモデル)の場合、最低次の固有モードに橋軸方向の遊動円木成分が支配的に現れていることが解る。

ここでは、各固有モードに対応する初期たわみ形状を、バネなしモデルの最低次に対応するものについては遊動円木モード、全モデルの逆対称一次モード、対称一次モードに対応するものについては、単に逆対称モード、対称モードとそれぞれ呼び、これらの固有モードと相似な形状の初期たわみを導入することとした。

ただし、本論文では、研究の第1段階として、主桁にのみ初期たわみに導入するものとした。固有モードにおける主桁と塔に関する成分は一定の関係をもっているが、初期たわみ、および、残留応力その他の不整や将来的には塑性化の影響も含めた等価初期たわみの大きさは、各々異なる量を探ることが必要となるからである。

また、主桁の初期たわみを導入するにあたっては、橋軸方向成分の付加の有無による差異がほとんどなかったことから、その鉛直方向成分のみを無応力形状の鉛直方向座標に付加し、初期たわみを導入した各解析モデルの初期形状とした。

表-3 線形化座屈固有値解析結果

次数	ASモデル		ALモデル		BSモデル		BLモデル	
	固有値	固有モード	固有値	固有モード	固有値	固有モード	固有値	固有モード
1次	2.759439	遊動円木(逆対称)	2.725855	遊動円木(逆対称)	3.762717	逆対称一次	3.729254	逆対称一次
2次	3.838387	逆対称一次	3.809403	逆対称一次	3.864942	対称一次	3.836538	対称一次
3次	3.864898	対称一次	3.836493	対称一次	3.882737	対称二次	3.848800	対称二次

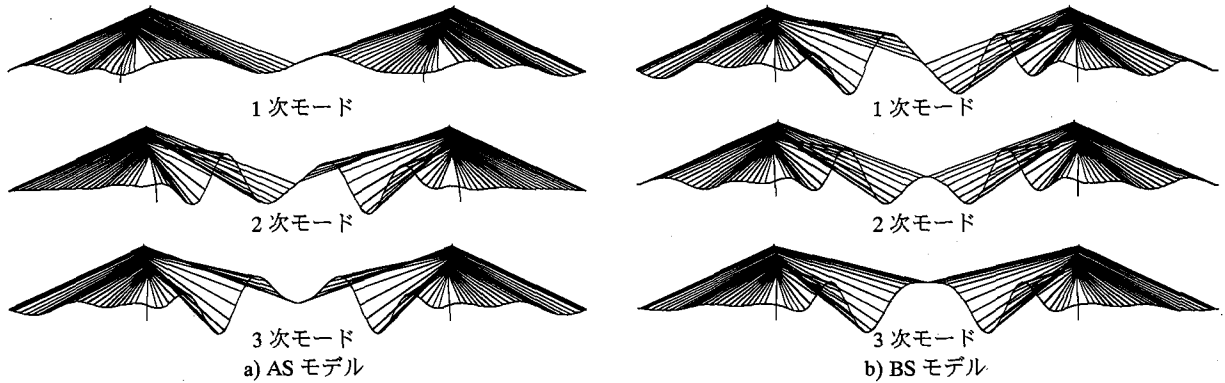


図-5 直線ケーブルモデルの座屈固有モード図

(2)連続桁モデルの座屈固有モード

さらに、比較のために、初期たわみ形状として、基本モデルから全ケーブルと塔を取り除いた、図-6 に示すような7径間の連続桁モデルの座屈固有モードの相似形も考えることとした。

この連続桁モデルを対象に線形化座屈固有値解析を行って得られた固有モード図を、1次の対称一次モード、および、2次の逆対称一次モードについて図-7 に示す。

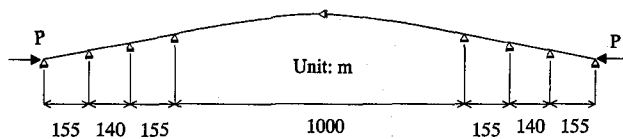


図-6 連続桁モデル

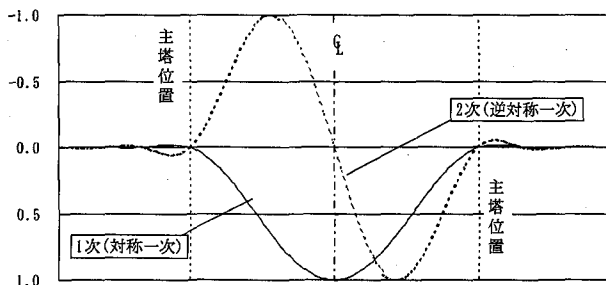


図-7 連続桁モデルの座屈固有モード図

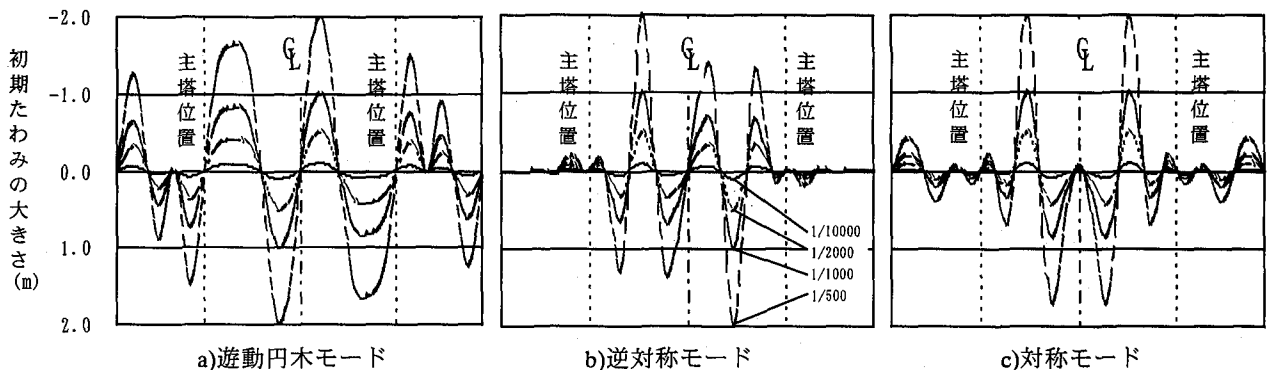


図-8 初期たわみ形状と大きさ(ASモデル)

図から、橋軸方向の拘束を除いて同一の境界条件ではあるが、基本モデルの固有モードにおける主桁に関する成分とは大きく異なっており、モード形状が非常に滑らかな曲線であることが解る。

したがって、これらの固有モードと相似な形状の初期たわみを導入することとし、基本モデルの場合と同様に、両固有モードに対応する初期たわみ形状を、単に桁逆対称モード、桁対称モードとそれぞれ呼ぶものとした。

4.2 初期たわみの大きさ

初期たわみの大きさとしては、中央支間 1,000m に対して最大値 $\pm 0.1\text{m}$ (100mm) の鉛直方向成分を付加するケースを 1/10,000 と表すとすると、それに 1/2,000, 1/1,000, および、1/500 の 3 ケースを加えた、計 4 ケースを設定することとした。AS モデルを例にとって、基本モデルの座屈固有モードに対応する初期たわみ形状とその大きさを示せば、図-8 のようになる。

現行の設計・製作基準で、主桁の製作誤差に関して具体的に規定しているのは、道路橋示方書¹⁵⁾と本州四国連絡橋公団の鋼橋等製作基準¹⁶⁾における仮組立の許容誤差の規定であり、ともに $\pm(10+L/10)\text{mm}$ と定められ、支間 L が 1,000m の場合、その許容値は 110mm ということになる。

また、長大橋梁も対象とした本州四国連絡橋公団の設計基準である前出の文献 14)では、設計荷重の一つとして、製作、架設誤差を規定しており、斜張橋の主桁の製作・組立誤差、および、閉合時の架設誤差(組立誤差の一種とも考えられる)などの影響を考慮するものとしているが、具体的な誤差の値は示されていない。

参考のために、本州四国連絡橋の斜張橋工事における主桁の出来高誤差の目標値をみると、 $\pm\{25+0.25(L-50)\}$ mm であり、支間 L が 1,000m の場合、262.5mm の目標値ということになる。ただし、この出来高誤差には、塔の倒れ誤差や、ケーブルの測定誤差などによるものも含まれていることはいうまでもない。

したがって、残留応力の影響、および、その他の不整の影響を含めたとしても、等価初期たわみの鉛直方向成分の最大値が、支間 L の $1/2,000$ を超えることはほとんど考えられない。

しかし、初めに述べたように、将来的には、等価初期たわみに塑性化の影響も含めることを目指しており、本論文と同じ解析モデルを対象とした簡易弾塑性有限変位解析と弾性有限変位解析の比較結果¹⁷⁾を参照して、主桁断面の塑性化を考慮した解析結果と終局時の荷重パラメータの値がほぼ一致した中央支間の $1/500$ の大きさまで、ここでは検討するものとした。

5. 数値計算結果とその考察

5.1 荷重条件と計算法

荷重条件は、死荷重を D 、プレストレスを PS として、完成時の荷重組み合わせである $(D+PS)$ を基本荷重とし、これに荷重パラメータ α を乗じて荷重を漸増させ、有限変位解析を行なうものとした。

この有限変位解析では、特異点を探索して、基本経路上に分岐点が存在した場合には、分岐経路の探索も行うこととし、各変形経路について、原則として各増分段階の Newton-Raphson 法による反復計算において収束解が得られなくなるまで計算を行うものとした。ただし、解の収束状況を監視して、適切な段階で荷重増分法から変位増分法へ切り替え、安定した解が得られるように配慮した。

また、有限変位解析結果と直接に対比させるために、 $(D+PS)$ 時の平衡状態における接線剛性行列を用いた線形化座屈固有値解析も行うものとした。

5.2 基本荷重下での初期たわみの影響

まず、基本荷重($\alpha=1$)下での有限変位解析結果から、初期たわみを導入したことによる主桁の完成形状の変化と付加曲げモーメントの導入状況について、BS モデルを例にとって図-9 ～図-12 に示す。他の解析モデルにおいても、これらの BS モデルの結果と大きな差異はみられなかった。

図-9 は、桁端を基準(0m)とした標高を用いて、逆対称モードの初期たわみ($1/1,000$)を導入した場合の主桁の

初期形状と完成形状を、初期たわみを導入しない場合のものと比較したものである。この図から、最大 ± 1.0 m

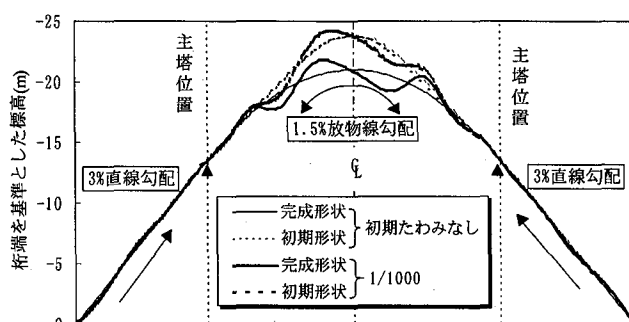


図-9 逆対称モードの初期たわみ導入時の無応力形状と完成形状(BS モデル)

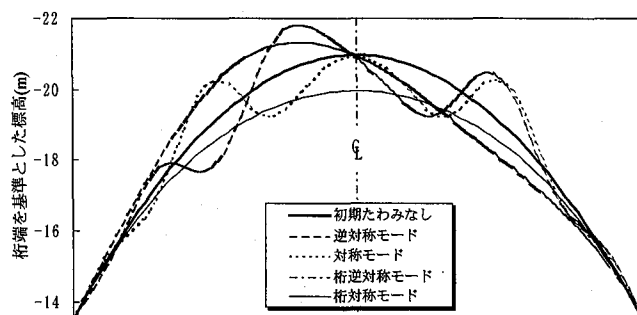


図-10 初期たわみ(1/1000)の形状と主桁中央径間の完成形状(BS モデル)

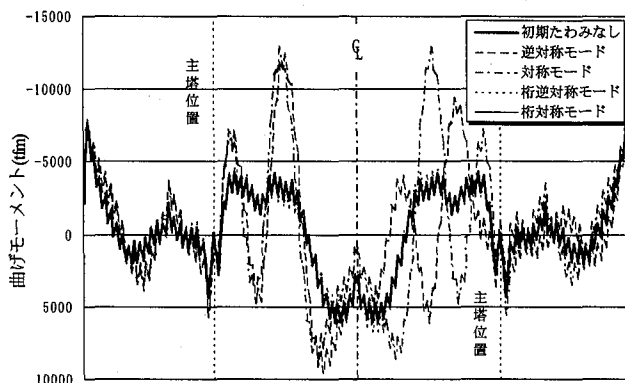


図-11 初期たわみ(1/1000)の形状と主桁の完成時曲げモーメント(BS モデル)

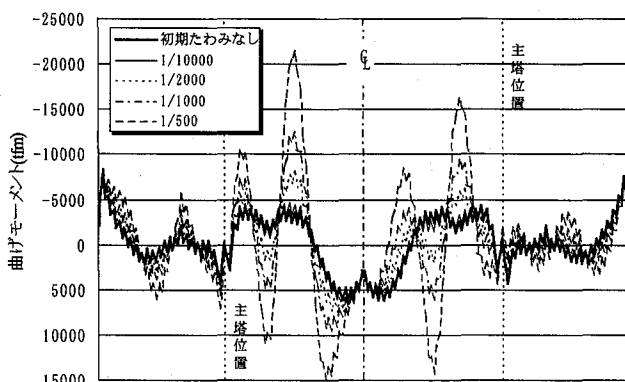


図-12 逆対称モードの初期たわみ導入時の主桁の完成時曲げモーメント(BS モデル)

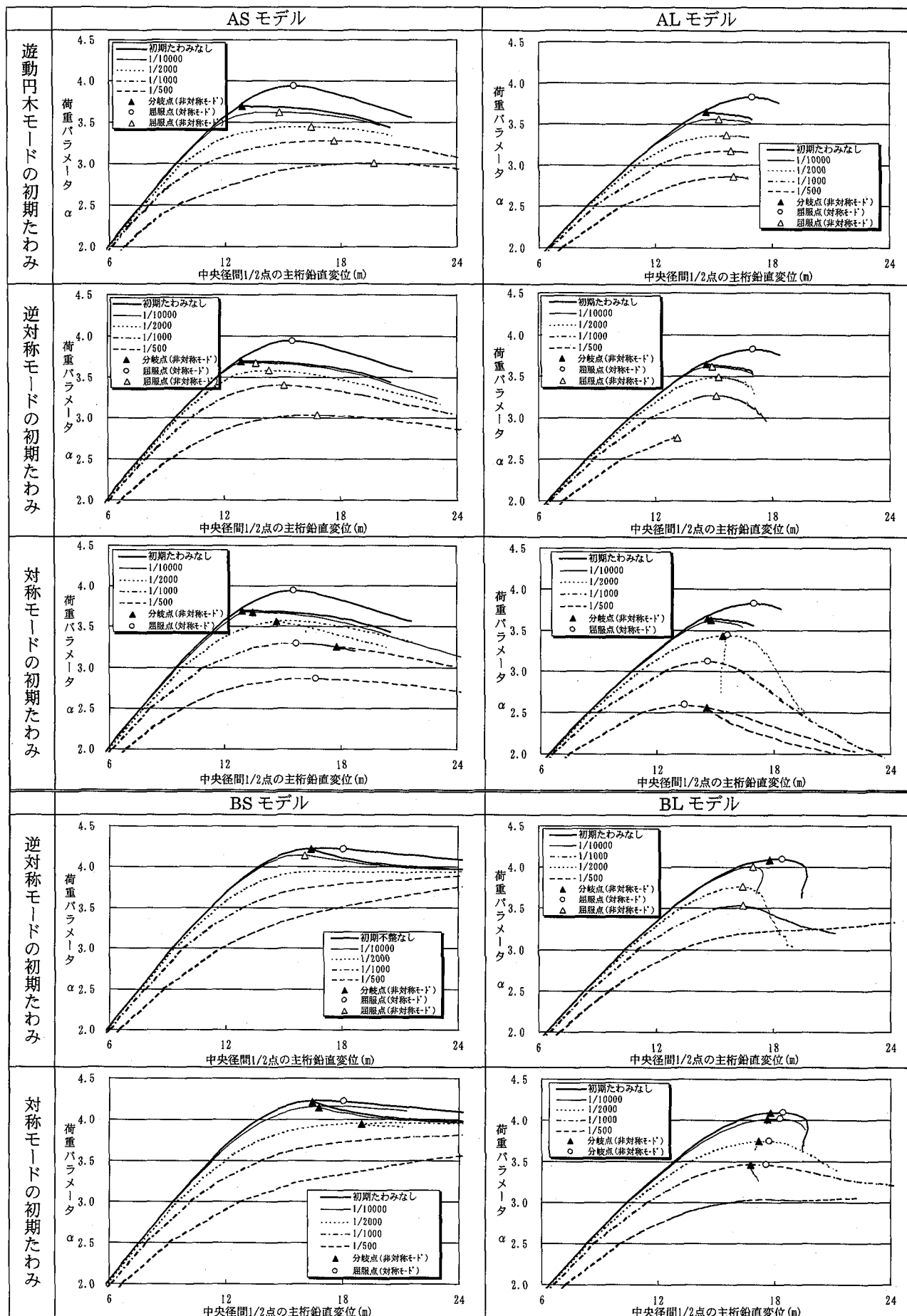


図-13 初期たわみ形状と各解析モデルの終局付近の荷重-変位曲線

の初期形状の標高の差異によって、最大±1.3m 程度の完成形状の標高の差異を生じていることが解る。

また、図-10、および、図-11 は、初期たわみ(1/1,000)を導入した場合の主桁の完成形状(中央径間部)、および、

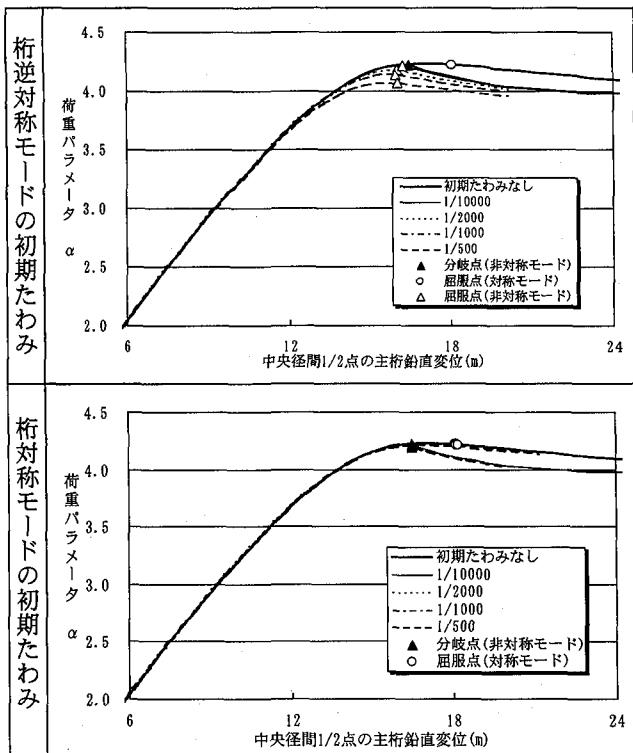


図-14 桁座屈モード導入時の終局付近の荷重-変位曲線(BSモデル)

完成時曲げモーメントを、その形状別にそれぞれ示して、初期たわみを導入しない場合のものとともに比較したものである。これらの図からは、桁逆対称モード、桁対称モードの初期たわみの場合、逆対称モード、対称モードの場合と同程度に完成形状は変化するが、付加曲げモーメントはほとんど導入されていないことが解る。

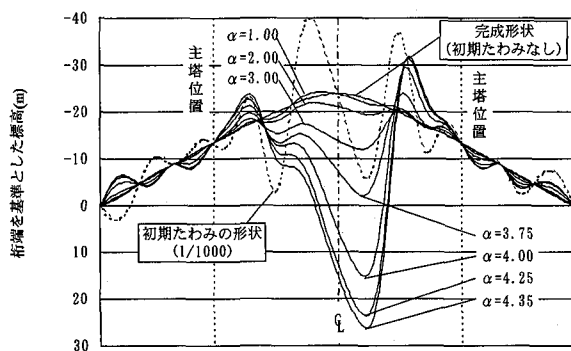
ここに、図は省略したが、ケーブル張力の変化は、逆対称モードの初期たわみの場合、最上段ケーブルで 660tf から±15tf、付加曲げモーメントの大きい位置近くに定着され、最も変化した中段ケーブルで 492tf から±76tf であった。

さらに、図-12 は、逆対称モードの初期たわみを導入した場合の主桁の曲げモーメントを、初期たわみの大きさ別に示して、初期たわみを導入しない場合のものとともに比較したものである。この図からは、初期たわみの大きさにほぼ比例して付加曲げモーメントが導入されていることが解り、やはり図は省略したが、対称モードの場合も同様であった。

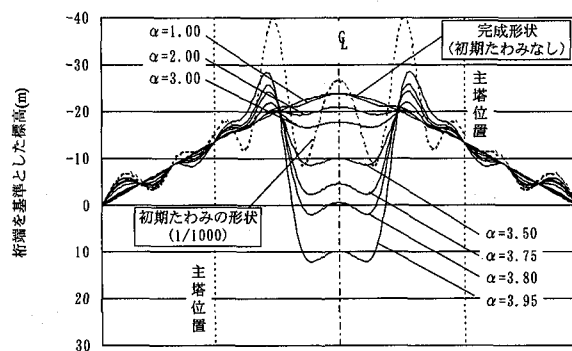
なお、完成時の主桁軸力に及ぼす影響については、初期たわみ形状に関係なく、その大きさが最大 1/500 の場合でも、大きな変化はみられなかった。

5.3 有限変位解析結果とその考察

次に、漸増荷重載荷による有限変位解析結果を、図-13、および、図-14 に示す。両図は各解析モデルの終局付近の荷重-変位曲線を、導入した初期たわみの形状とその大きさに別、初期たわみを導入していない場合のものも

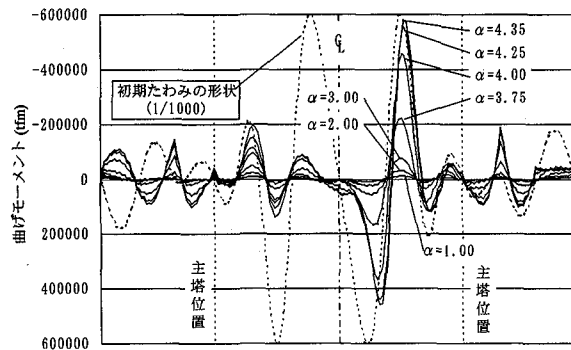


a)逆対称モードの初期たわみ

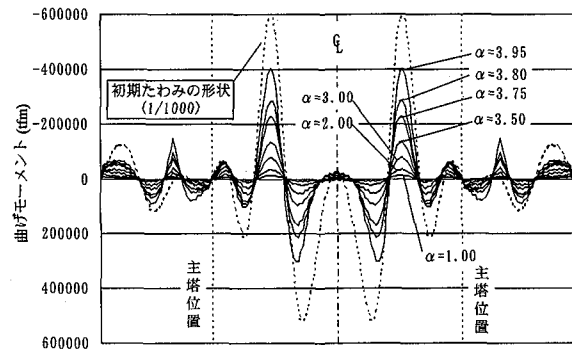


b)対称モードの初期たわみ

図-15 漸増荷重による主桁の標高の変化(BSモデル)



a)逆対称モードの初期たわみ



b)対称モードの初期たわみ

図-16 漸増荷重による主桁の曲げモーメントの変化(BSモデル)

含めて、探索された特異点とその変形モードとともに示したものである。

これらの図から、初期たわみを導入する前の基本モデルの座屈固有モードと相似な形状を用いた場合と異なっており、ケーブルと塔を除いた連続桁モデルのそれと相似な形状を用いた場合は、同じ境界条件にもかかわらず、前節で述べたように付加曲げモーメントがほとんど導入されなかったことから、荷重-変位曲線には大きな変化がないことが解る。

また、基本モデルの座屈固有モードと相似な遊動円木モード、または、逆対称モードの初期たわみを導入した場合、荷重-変位曲線は、導入量 1/10,000 では、初期たわみを導入していない場合の非対称モード変形の分岐経路に漸近し、そこから導入量が大きくなるのに伴い低下していることが解り、探索された特異点は、全て変形モードが非対称の屈服点(極大点)で、分岐点、分岐経路は探索されなかった。

これに対して、対称モードの初期たわみを導入した場合は、変形モードが対称の基本経路上の屈服点と、後座屈モード、変形モードが非対称の分岐点、分岐経路がともに探索され、荷重-変位曲線は、導入量 1/10,000 では、それを導入していない場合の基本経路と分岐経路に漸近し、そこから導入量が大きくなるのに伴い低下していることが解る。

これら両者の相異が、初期たわみを導入していない場合の分岐経路における変形モードが非対称であることによるものであることは明らかである

なお、特に BS、BL モデルの場合に顕著であるが、初

期たわみ形状が逆対称モードの場合、および、それが対称モードの場合ともに、その導入量が大きくなるのに伴い荷重-変位曲線が単調増加傾向となったこともあって、屈服点が消滅し、探索することができなくなっていることも解る。分岐点については、消滅したかどうかの確証は得られていないが、初期たわみの導入量が大きくなるに伴って、やはり探索されなくなった。

さらに、遊動円木モード、または、逆対称モードの初期たわみを導入した場合と、対称モードのものを導入した場合とで、荷重-変位曲線の低下の度合いを比較すると、後者の場合の方がより大きく低下していることが解る。

そこで、BS モデルの両者の場合について、図-15、および、図-16 にそれぞれ示すように、漸増荷重による主桁の桁端を基準とした標高、および、曲げモーメントの変化を比較すると、最低次ではない対称一次モードと相似な形状の場合の方がより大きく低下したのは、荷重パラメータを乗じた基本荷重(D+PS)が対称であったことによるものであることは明らかといえる。

5.4 座屈固有値解析結果との比較

最後に、座屈固有値解析結果を、有限変位解析結果と対比させて、図-17 に示す。すなわち、本図は、BS、BL モデルの 1 次、2 次の座屈固有値、あるいは、探索された特異点(変形モードも付記)における荷重パラメータの値と、導入した初期たわみの大きさとの関係を、その形状別に、初期たわみを導入していない場合のものも含めて示したものである。

この図から、両者の解析結果を比較すると、逆対称モ

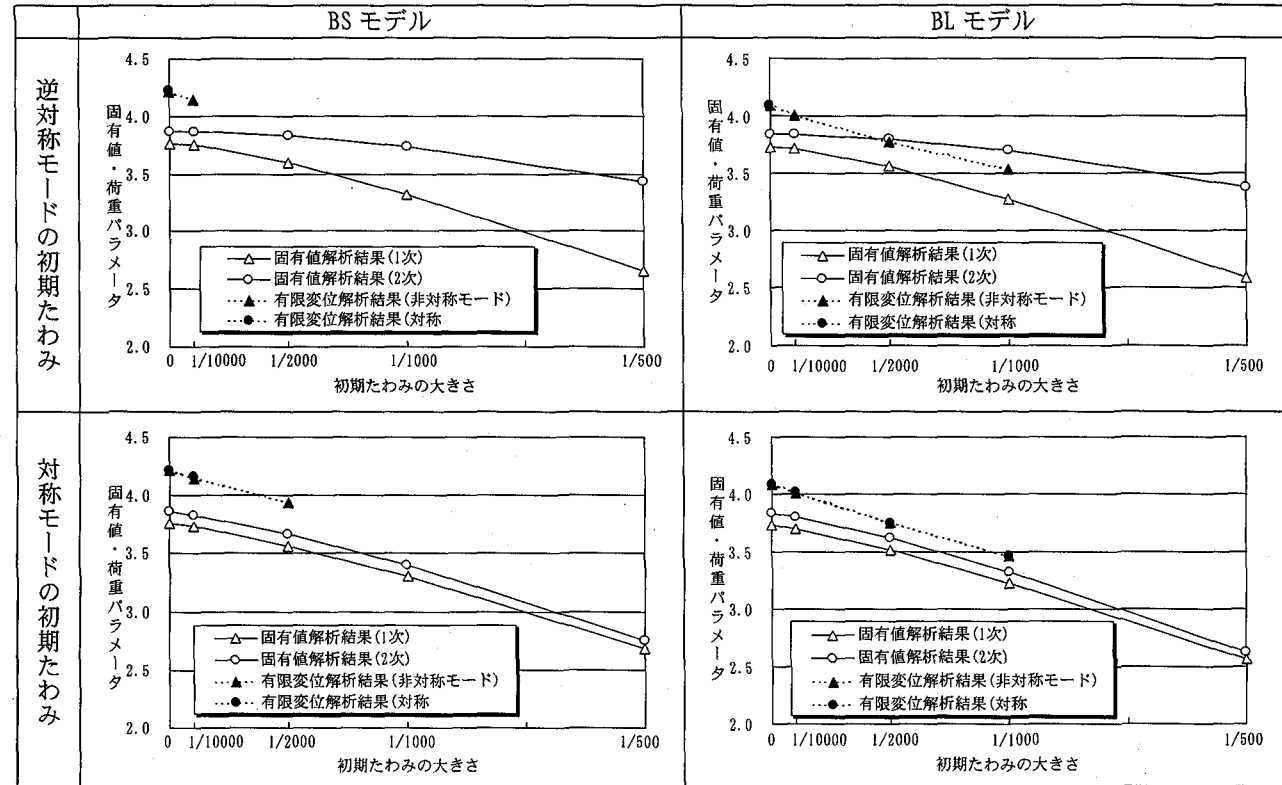


図-17 初期たわみ導入時の固有値解析結果と有限変位解析結果(BS、BL モデル)

ードの初期たわみを導入した場合、探索された特異点は屈服点のみであり、それに関する非対称の変形モードが、図は省略したが、1 次の座屈固有モードに対応していることが確かめられる。

これに対して、対称モードの初期たわみを導入した場合は、分岐点と屈服点ともに探索されており、初期たわみを導入しない場合と同様に、各々に関する非対称、対称の変形モードが、やはり図は省略したが、1 次と2 次の座屈固有モードにそれぞれ対応していることが確かめられる。

図からは、これらの有限変位解析結果において、分岐点の鋭敏性がここでは認められないことも解る。その理由の一つには、分岐点と屈服点が近接していることが考えられる。

また、前述のように初期たわみの導入量が大きくなるのに伴って探索できなくなったが、探索された特異点における荷重パラメータの値は、逆対称モードの場合、および、対称モードの場合ともに、導入量が大きくなるにしたがって直線的に低下していることが解る。

さらに、座屈固有値も、探索された特異点における荷重パラメータの値と同様に、初期たわみ形状が逆対称モードの場合、および、それが対称モードの場合ともに、導入量が大きくなるにしたがって直線的に低下していることが解る。

したがって、荷重パラメータの値を結ぶ線と座屈固有値を結ぶ線の両者の線はほぼ平行になっており、座屈固有値は、導入量が大きくなっても荷重-変位曲線の低下を確実に評価できることから、初期たわみが終局強度に及ぼす影響を示す一指標になり得るものであるといえる。

6. 結 言

中央支間 1,000m の試設計例を対象に、主桁の初期たわみが長大斜張橋の分岐座屈特性に及ぼす影響について、その形状、および、塑性化の影響も考慮に入れた等価初期たわみを想定した範囲までその大きさを変えて検討した結果からは、次のことがいえた。

- (1) 提案した手法は、製作誤差に対応して初期たわみを与えることができ、全体構造系の座屈固有モードと相似な形状のものを用いることによって、有限変位解析モデルに付加曲げモーメントを合理的に導入できる。
- (2) ケーブルと塔を除いた連続桁モデルの座屈固有モードと相似な形状の初期たわみを導入した場合は、同じ境界条件にもかかわらず、付加曲げモーメントがほとんど導入されず、終局状態に至る荷重-変位曲線にも大きな変化はみられなかった。
- (3) 遊動円木モード、または、逆対称一次モードと相似な形状の初期たわみを導入した場合の荷重-変位曲線は、初期たわみを導入していない場合の非対称モード変形の分岐経路を下回って、導入量が大きくなるのに伴い低下し、探索された特異点は、全て変形モードが非対称の屈

服点(極大点)で、分岐点は探索されなかった。

- (4) 対称一次モードと相似な形状の初期たわみを導入した場合の荷重-変位曲線は、変形モードが対称の屈服点と、後座屈モード、変形モードが非対称の分岐点、分岐経路がともに探索され、導入量が大きくなるのに伴って、荷重-変位曲線の傾向は、初期たわみを導入していない場合の荷重-変位曲線が全体的に徐々に低下する形となった。
- (5) 荷重-変位曲線は、遊動円木モード、または、逆対称一次モードと相似な形状の初期たわみを導入した場合に比べ、最低次ではない対称一次モードと相似な形状のものを導入した場合の方がより大きく低下した。これは、荷重パラメータを乗じて漸増させた基本荷重が対称であったことによるものと考えられた。
- (6) 初期たわみを導入した場合、屈服点のみが探索された場合は、それに関する変形モードが1 次の座屈固有モードに対応し、分岐点と屈服点がともに探索された場合は、初期たわみを導入しない場合と同様に、それぞれに関するものが1 次と2 次の座屈固有モードに対応することが確かめられた。
- (7) 終局状態を示す特異点における荷重パラメータの値は、初期たわみの形状に関係なく、導入量が大きくなるにしたがって直線的に低下したが、導入量が大きくなるのに伴って、荷重-変位曲線が単調増加傾向となったこともあり、特異点が探索されなくなった。
- (8) 座屈固有値は、探索された特異点における荷重パラメータの値と同様に、初期たわみの形状に関係なく、導入量が大きくなるにしたがって直線的に低下し、導入量が大きくなっても荷重-変位曲線の低下を確実に評価できることから、初期たわみが終局強度に及ぼす影響の一つの指標になり得るものであることが解った。

したがって、弾性有限変位解析に基づく鋼構造物の終局強度設計法として提案されている等価初期不整法を、長大斜張橋に適用することを進めていくうえで、有益な資料を提供できたと考えられる。

今後は、荷重の組み合わせや非対称載荷の影響、および、塔の初期たわみの影響とその塑性化の影響などについても検討する必要がある。また、将来、等価初期たわみに塑性化の影響も考慮する場合には、その大きさなどは、弾塑性解析等によって適切なパラメータに関する基準耐荷力曲線を与え、それを基に決定する必要がある。

最後に、当時東京都立大学の大学院生、および、卒業研究生であった、平野 和志氏(現 東京都)、および、師山 裕君(現 大学院)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) 土木学会：鋼構造物設計指針—平成9年版、鋼構造シリーズ9、1997。
- 2) 土木学会：鋼構造物の終局強度と設計、鋼構造シリーズ6、pp.235-239, pp.253-268, 1994。

- 3) 伊藤博昭, 野上邦栄, 成田信之: ラーメン構造における荷重および構造パラメータを考慮した等価初期たわみ, 土木学会第 52 回全国大会年次学術講演会講演概要集-IA, pp.228-229, 1997.
- 4) 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, Vol.23, No.7, 1989.
- 5) 野村國勝, 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.
- 6) 中村一史, 前田研一, 林 正, 成田信之: 長大斜張橋の座屈安定解析に関する 2, 3 の考察, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998.
- 7) H.Nakamura, K.Maeda, M.Hayashi, N.Narita: Buckling Stability Analysis of a Long-Span Cable-Stayed Bridge by Finite Displacement Theory, Proc. of International Colloquium on Computation of Shell & Spatial Structures, IASS, Taipei (Taiwan), 1997.
- 8) 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, 日本鋼構造協会, Vol.18, 1994.
- 9) 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.
- 10) 土木学会: 構造工学における計算力学の基礎と応用, 構造工学シリーズ 6, pp.475-480, 1994.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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, Vol.24, No.2, 1990.
- 14) 海洋架橋調査会: 上部構造設計基準, 本州四国連絡橋公団, 1989 年 4 月.
- 15) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (Ⅱ 鋼橋編), 平成 8 年 12 月.
- 16) 海洋架橋調査会: 鋼橋等製作基準, 本州四国連絡橋公団, 1993 年 5 月.
- 17) 師山 裕, 紺野 誠, 前田研一, 中村一史, 野上邦栄, 成田信之, 林 正: 長大斜張橋の初期不整を考慮した弾塑性有限変位解析, 土木学会第 53 回全国大会年次学術講演会講演概要集-IA, pp.266-267, 1998.

(1998 年 9 月 18 日受付)