

長大斜張橋の分岐座屈特性に及ぼす初期たわみの影響と荷重条件

Effects of Initial Deflections on Bifurcation Buckling Characteristics
in a Long-Span Cable-Stayed Bridge under Variable Loading Condition

中村一史* ・ 前田研一** ・ 紺野 誠*** ・ 師山 裕**** ・ 林 正*****

Hitoshi NAKAMURA, Ken-ichi MAEDA, Makoto KONNO, Yu MOROYAMA and Masa HAYASHI

- *工修 東京都立大学大学院助手 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 東京都立大学大学院教授 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 日本鋼管(株) 橋梁建設部 橋梁設計室 (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-1)
 ****工修 東京都立大学大学院院生(現 石川島播磨重工業(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)

In this paper, to apply the equivalent imperfection design method based on the elastic finite displacement theory considering effects of the plastification, effects of introducing initial deflections of main girders in long-span cable-stayed bridges are investigated. The initial deflections are similar to buckling eigenmodes, and their scales are derived considering the reduction of load carrying capacity estimated by simplified elasto-plastic finite displacement analyses. 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 of modes and scales of the initial deflections on bifurcation buckling characteristics under variable loading conditions including asymmetric live loads. From the results of analyses, the applicability of the equivalent imperfection design method for long-span cable-stayed bridges can be indicated.

Key Words: long-span cable-stayed bridge, bifurcation buckling, plastification, initial deflection, loading condition, finite displacement analysis, eigen-value analysis

1. 緒 言

周知の通り、現在、鋼構造物の設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法への移行¹⁾という過渡期にある。許容応力度設計法は、微小変位理論に基づいて算定された、各部材ごとの断面力を唯一つの安全率を用いて照査する設計法である。これに対して、限界状態設計法は、終局限界状態における強度に着目し、複数の安全係数を導入して、構造全体系としての所要の耐荷力の確保について照査するものである。後者は、前者で指摘されている種々の問題点を払拭するばかりでなく、設計の合理化、および、より経済性を追求した構造設計を可能にするものとして注目されているものである。

近年、この限界状態設計法への移行を念頭に置き、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各種の設計法の提案²⁾が活発になっており、これらは、吊形式橋梁の一つで、今後、スパンのさらなる長大化が期待され、支間 1,000m 時代の到来³⁾も近いとされている斜張橋の設計法としても提案されている。

最も精緻な設計を可能にする斜張橋の設計法が、複合

非線形問題に対応できる弾塑性有限変位解析^{4,5)}に基づくものであることはいうまでもない。しかしながら、実務設計の場における適用を考えると、弾塑性有限変位解析を実行することは、解析の繁雑さや、計算時間、および、コストなどの点から制約を受け、設計者に大きな負担を求めることになる。それゆえに、未だ実績のない、あるいは、実績の少ない長大スパンの斜張橋の終局限界状態における安全性を最終的に照査する際には、弾塑性有限変位解析に基づく設計法を適用するとしても、それらの試算段階や、既に十分な実績のあるスパンのものの照査にまで適用することは、合理的とはいえない。

したがって、多くの構造パラメータをもつ長大斜張橋の耐荷力を、特有の設計条件を満たして、簡便にかつ十分な精度で評価できる弾性有限変位解析に基づく実用的な設計法の確立と、その適用性の拡大が強く望まれてきた。文献 2) には、弾性有限変位解析に基づく設計法の代表的なものの一つとして、等価初期不整法が提案されている。

この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バ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。

等価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。

最近、上述の等価初期不整法を発展させた手法として、等価初期たわみにより、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ではあるが、検討され始めている⁹⁾。このような手法が、適用範囲を拡げ、長大斜張橋の設計法としても確立されれば、実用的な設計法としての有用性は高いと思われる。

そのためには、初期たわみが及ぼす影響を十分に把握しておく必要がある。特に、斜張橋の場合、終局状態での変形モードと最低次の座屈固有モードが大きく異なった例⁷⁾も報告されており、最低次以外の座屈固有モードにも着目し、荷重の載荷状態とも対応させて、終局強度に影響を及ぼす初期たわみの形状の検討が不可欠である。さらに、初期たわみの大きさによる終局強度の低下の状況を把握し、それによって塑性化の影響による終局強度の低下を考慮し得る可能性を検討する必要がある。

しかしながら、初期たわみの形状とその大きさを変えて、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かった。

そこで、著者らは、塑性化の影響を含めた等価初期たわみによる等価初期不整法の長大斜張橋への適用に向け、初期形状決定で定められる無応力形状の誤差に対応して、初期たわみを導入する解析手法を提案し、中央支間1,000mの長大斜張橋の試設計例を対象に、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検討した⁸⁾。

検討にあたって、荷重条件は、(死荷重+プレストレス)、すなわち(D+PS)を基本荷重とし、それに荷重パラメータを乗じて漸増させ、特異点を探索する弾性有限変位解析(以下、座屈有限変位解析と呼ぶ)、および、基本荷重下での平衡状態における線形化座屈固有値解析を、初期たわみの形状とその大きさを変えて実施した。

主桁の初期たわみ形状は、初期たわみのない状態での線形化座屈固有値解析から得られる最低次以外のものも含む座屈固有モードを基に与えた。また、簡易弾塑性有限解析結果から、塑性化に伴う終局状態の荷重パラメータの低減のレベルを予測し、初期たわみ導入に伴う座屈

固有値の低減のレベルが、それと同等になる大きさまで、その導入量を増加させた。

その結果、初期たわみの形状として座屈固有モードと相似な形状を用いれば、付加曲げモーメントを合理的に導入でき、初期たわみ導入量の増加に伴って、終局強度の指標となる特異点での荷重パラメータの値や、座屈固有値がほぼ直線的に低減されることが確かめられ、等価初期たわみによって塑性化の影響による終局強度の低下を考慮し得る可能性のあることを示唆できた。

本論文は、同じ長大斜張橋の試設計例を対象に、さらに、(死荷重+プレストレス+活荷重)、すなわち(D+PS+L)を基本荷重として、変動荷重である活荷重の載荷位置を変え、非対称載荷を含めた荷重条件に対応する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検討したものである。

さらに、基本荷重(D+PS)の場合も併せ、座屈有限変位解析、線形化座屈固有値解析、および、簡易弾塑性解析による全ての解析結果を対比させて、塑性化の影響を考慮して終局強度を評価するための適切な荷重条件と、それに対応する初期たわみ形状とその大きさについて検討したものである。

2. 解析手法と解析理論

2.1 初期形状決定と初期たわみの導入法

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、プレストレスを含む設計張力が各ケーブルに作用した状態で、主桁、塔が所定の完成形状となるように初期形状決定を事前に行う必要がある^{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、全ケーブルを仮に除去したモデルに、各ケーブルの設計張力の各軸方向成分に対応する外荷重を、ケーブル、主桁、塔などの各部の死荷重とともに載荷して、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、本研究では、既に文献8)で提案したように、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軸方向成分を一種の誤差として加え、それを改めて初期形状とすることにより、初期たわみを導入し、付加曲げモーメントを与えることとした。

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、提案した導入法によれば、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、実際の初期不整に関する導入量分については、現行の設計・製作基準等の規定や、これまでの実績をある程度反映させることができるからである。

2.2 線形化座屈固有値解析法

座屈固有値を求めるための解析法としては、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した。

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、上述の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からである。

2.3 座屈有限変位解析法

(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プレストレスを含む設計張力となるように、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。この調整長の付加による張力の変化がプレストレスに対応することは容易に確かめられる^{11),12)}。

本研究では、この点に注目して、既に文献 11), 12) で提案したように、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、死活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とした。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である。

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した。

(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計算を行うことは必ずしも容易ではない。そのため、本研究では、文献 11), 12) に詳述したように、上述の漸増プレストレスの取り扱い手法を組み込むとともに、弾性範囲内で、分岐点、屈服点(極大点)に相当する特異点や、分岐経路の探索¹³⁾を効率良く行える座屈有限変位解析プログラムを独自に開発した。

なお、不安定挙動および後座屈挙動の追跡を精度良くかつ高い収束性で解析するために、より厳密に移動座標系を取扱った立体有限変位解析法¹⁴⁾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。

2.4 簡易弾塑性有限変位解析法

塑性化の影響による終局強度の低下を評価するために、本研究では、次のような条件

- ① 弾性・完全塑性体の材料と仮定する。
- ② 部材要素内の軸方向の塑性域の進展は考慮しない。
- ③ 両端節点での断面内の塑性域の進展のみから、部材要素の節点力と断面剛性を算定する。
- ④ 断面は平面保持されているものとし、降伏の判定には垂直応力のみを用いる。

による平面問題の簡易弾塑性有限変位解析プログラムを独自に開発して、適用することとした。ここに、剛性方程式の誘導等については、文献 15) を参照した。

また、初期形状決定や、初期たわみ導入のための手法、および、漸増プレストレスの取り扱い手法などは、前節で述べた座屈有限変位解析プログラムと全く同様とした。ただし、移動座標系を取扱った平面有限変位解析法¹⁶⁾に基づいてはいるが、荷重増分法のみしか適用できず、後座屈挙動の追跡はできない。

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% の直線勾配を、中央径間に 1.5% の放物線勾配をもち、中央支間 1,000m の A 形塔を有する長大斜張橋の試設計例¹⁷⁾(図-2.1)とした。これは、本州四国連絡橋公団の設計基準¹⁸⁾を準用して設計されたものであり、主桁の断面形状は図-2.2 に、主要な断面諸元は表-2.1 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、橋軸方向の支持条件としては、両端で弾性拘束されているものとした。

ここに、弾性拘束のための水平バネの剛度は、線形化座屈固有値解析を予め行って、最低次の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際のバネ定数 1,000tf/m を採用するものとした。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バネ部材の初期長を調整した。

塔のモデル化については、忠実に骨組構造に置き換えた。また、ケーブルのモデル化については、単一の直線軸力部材(直線ケーブル部材)とした。

これらの各部のモデルを組み合わせ、初期形状決定を行って作成された(死荷重+プレストレス)時の平衡状態における解析モデルのスケルトン図(完成形状)を、図-2.3 に示す。初期たわみが導入される前のこの解析モデルを、基本解析モデルとした。

4. 初期たわみの形状とその大きさ

4.1 初期たわみの形状

前々章で述べた手法に従って、基本解析モデルの初期形状(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た。

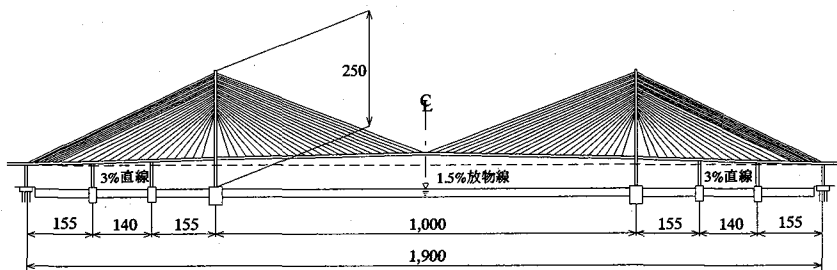


図-2.1 試設計例

表-2.1 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
$I_y(m^4)$	150	10.20~24.40
$I_z(m^4)$	2.66	11.99~45.22
ケーブル		
$A(m^2)$	0.006278~0.01343	

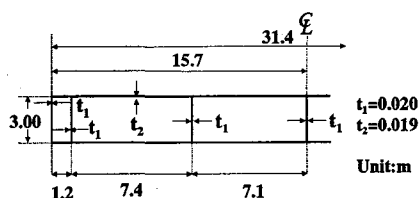


図-2.2 主桁の断面形状

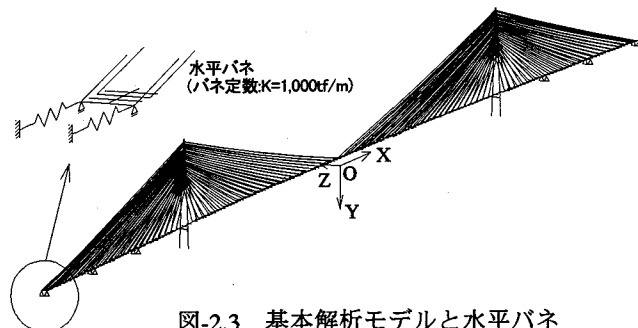


図-2.3 基本解析モデルと水平バネ

初期たわみの形状としては、解析の基準となる基本荷重が載荷された状態での基本解析モデルを対象に線形化座屈固有値解析を行って、得られた座屈固有モードと相似な形状を与えるものとした。採用する座屈固有モードは、基本荷重が対称荷重である場合は、逆対称一次、対称一次モード、非対称荷重である場合は、一次、二次モードのそれぞれ2モードとした。

ただし、ここでは、研究の第1段階として、主桁にのみ初期たわみを導入するものとした。座屈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、製作誤差、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、各々異なる量を採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、その橋軸方向成分の付加の有無による影響の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、初期たわみを導入する各解析モデルの初期形状とした。

4.2 初期たわみの大きさ

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¹⁹⁾と本州四国連絡橋公団の鋼橋等製作基準²⁰⁾における仮組立の許容誤差の規定である。

これらの規定に加え、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とその実績を参照すると、文献8)で詳述したように、製作誤差、残留応力の影響、および、その他の不整の影響を含めた等価初期たわみの鉛直方向成分の最大値が、支間の1/2,000を超えることはほとんど考えられない。

しかし、本研究では、初めに述べたように、将来的には、等価初期不整法における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いる。

それゆえに、予め、基本解析モデルを対象に主桁断面の塑性化を考慮した簡易弾塑性有限変位解析結果と、初期たわみを導入した解析モデルを対象とした座屈固有値解析結果とを比較して、後者による座屈固有値が、前者の終局状態の荷重パラメータの値を下回るようになる大きさまで検討するものとした。その結果、中央支間1,000mに対して最大値±2.0mの鉛直方向成分を付加する場合を1/500の大きさとして、この程度の大きさまで導入量を増加させる必要のあることが解った。

したがって、ここでは、導入する初期たわみの大きさとして、1/10,000、1/2,000、1/1,000、および、1/500の4ケースの大きさを設定するものとした。

5. 数値計算法

本研究では、2章で述べた座屈有限変位解析法、座屈固有値解析法、および、簡易弾塑性有限変位解析法を適用して、以下のように解析計算を行うものとした。

まず、座屈有限変位解析にあたっては、解析の基準である基本荷重に荷重パラメータ α を乗じて、作用荷重を漸増させ、荷重-変位曲線、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。

特異点の探索については、変位増分法において、着目点(中央径間主桁1/2点)の鉛直変位を0.5mピッチ(荷重パラメータ α に換算)で漸増させ、接線剛性行列の対角要素(ピボット)の負値の個数の変化から分岐点または屈服点の存在を判定し、2分法による挟み込みを10回繰り返して収束させることにより行った。

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、荷重-変位曲線の各変形経路について、各増分段階でのNewton-Raphson法による反復計算が収束しなくなるまで計算を行うことを原則とした。

次に、線形化座屈固有値解析は、基本荷重(荷重パラメータ： $\alpha=1.0$)下での平衡状態における接線剛性行列を用いて行い、これによって、座屈固有値と、漸増プレストレスを取り扱った座屈有限変位解析における荷重パラメータとを直接に対比できるようにした。

さらに、簡易弾塑性有限変位解析にあたっては、座屈有限変位解析と同様に、基本荷重に荷重パラメータ α を乗じて、作用荷重を漸増させ、各増分段階で Newton-Raphson 法による反復収束計算を行った。また、塑性化に関する指標点を求めるために、これらの付近では荷重パラメータの増分を $\Delta\alpha=0.001$ と小さくして計算を行い、荷重-変位曲線において、初降伏を起こす点を塑性化開始点、Newton-Raphson 法による反復計算が収束しなくなる直前の点を終局状態での塑性化ピーク点とした。

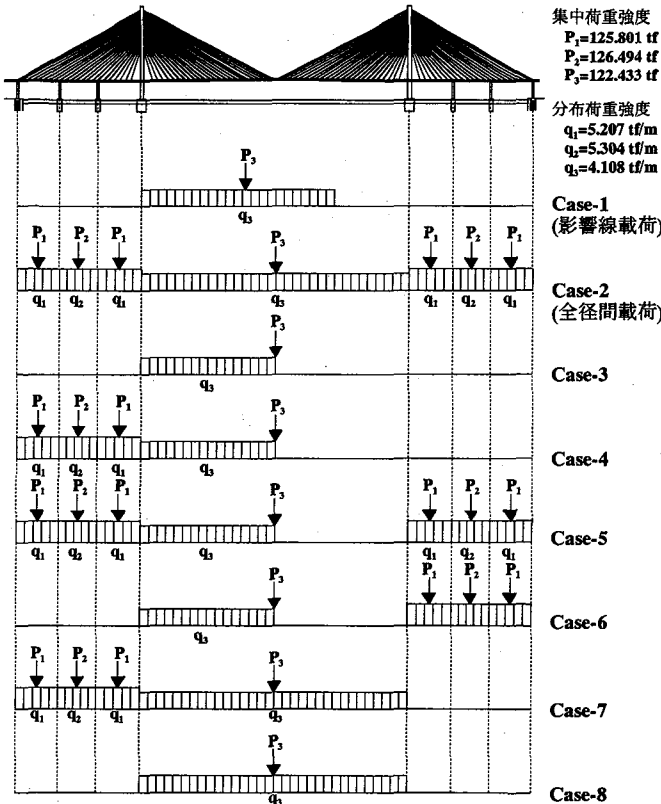


図-6.1 活荷重の荷重ケース

6. α (D+PS+L)時の分岐座屈特性

6.1 活荷重の荷重ケースとその選定

本章では、基本荷重を(死荷重+プレストレス+活荷重)、すなわち(D+PS+L)として、初期たわみが分岐座屈特性に及ぼす影響を検討するが、活荷重は変動荷重であり、その荷重位置を選定する必要があった。

そこで、まず、図-6.1に示す活荷重の荷重ケース Case-1～Case-8について、基本解析モデルを対象に座屈有限変位解析、および、線形化座屈固有値解析を行った。ここに、Case-1は、影響線解析結果から、塔位置での主桁軸力が最大になるように荷重位置を定めたものである。

その解析結果の一部として、各荷重ケースにおける中央径間1/2点の主桁鉛直変位に着目した終局付近の荷重-変位曲線の基本経路を図-6.2に示す。表-6.1には、探索

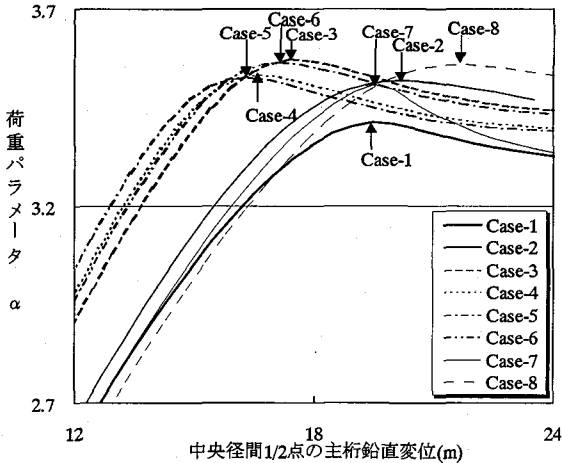


図-6.2 各荷重ケースの終局付近の荷重-変位曲線
表-6.1 分岐点・屈服点での荷重パラメータの値

および1～2次の座屈固有値

荷重ケース	荷重パラメータ		座屈固有値	
	分岐点	屈服点	1次	2次
Case-1	-	3.409	2.909	3.016
Case-2	3.505	3.514	2.954	3.040
Case-3	-	3.571	3.109	3.207
Case-4	-	3.532	3.101	3.194
Case-5	-	3.526	3.099	3.195
Case-6	-	3.565	3.106	3.208
Case-7	-	3.507	2.956	3.045
Case-8	3.546	3.556	2.961	3.052

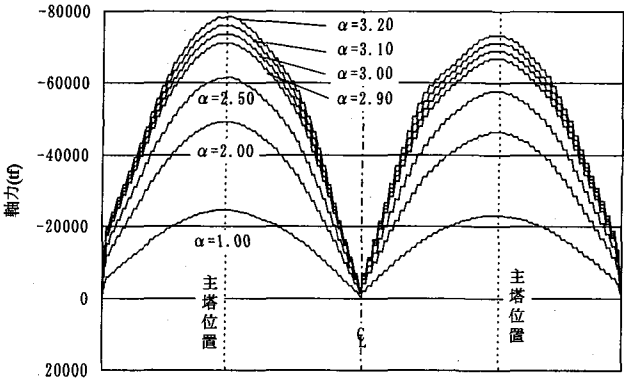


図-6.3 漸増荷重による主桁軸力の変化(Case-1)

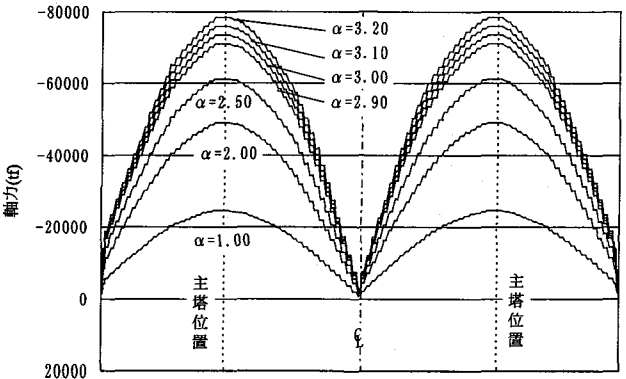


図-6.4 漸増荷重による主桁軸力の変化(Case-2)

された分岐点と屈服点での荷重パラメータ α の値、および、1次、2次(対称载荷のケースの場合は逆対称一次、対称一次)の座屈固有値をそれぞれ示す。

これらの図表から、荷重-変位曲線には多少の差異がみられるものの、非対称载荷のケース(Case-1, Case-3~7)において探索された屈服点での荷重パラメータ α の値、および、1次、2次の座屈固有値の差異は比較的小さいことが解る。同様に、対称载荷のケース(Case-2, Case-8)において探索された分岐点と屈服点での荷重パラメータ α の値、および、逆対称一次、対称一次の座屈固有値の差異も比較的小さいことが解る。

したがって、対称载荷、非対称载荷のケースからそれぞれ1ケースを代表させるものとして、特異点での荷重パラメータ α の値と最低次の座屈固有値を最も小さいCase-1(影響線载荷)、および、それに次ぐCase-2(全径間载荷)の2ケースを選定した。

これらの両ケースについて、参考のために、基本解析モデルを対象とした座屈有限変位解析での漸増荷重による主桁軸力の変化を図示(図-6.3, および、図-6.4)すると、Case-1の場合は、Case-2の場合と比べて、少ない総荷重量で片側の塔位置における主桁軸力が増加していくものの、最大値はほぼ同じ値であることが解る。

6.2 初期たわみの影響と载荷位置

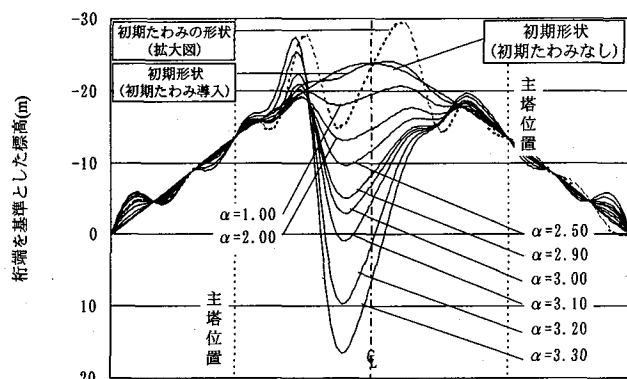
前節で選定したCase-1(影響線载荷)、Case-2(全径間载荷)の活荷重の载荷ケースについて、初期たわみを導入し

た解析モデルを対象に座屈有限変位解析を行った結果の一部を、図-6.5~図-6.10に示す。

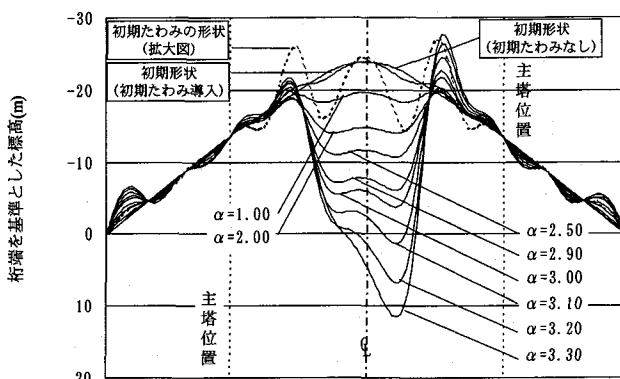
図-6.5, および、図-6.6は、非対称载荷のCase-1において、1次、2次の座屈固有モードと相似な形状の初期たわみを導入し、その大きさを1/1,000とした場合について、漸増荷重による主桁の桁端を基準とした標高、および、曲げモーメントの変化をそれぞれ、初期たわみ形状や、初期たわみの有無による初期形状(無応力形状)の変化とともに示したものである。また、図-6.7, および、図-6.8は、対称载荷のCase-2において、逆対称一次、対称一次の座屈固有モードと相似な形状の初期たわみを導入し、その大きさを1/1,000とした場合について、同様の図を示したものである。

これらの図から、漸増荷重による主桁の標高と曲げモーメントの変化が、初期たわみの形状に大きく支配されていることが解る。また、それらの最大値をみると、初期たわみの形状による差異、および、Case-1とCase-2における差異は、Case-1で2次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に少し大きくなるものの、余り大きくないことが解る。

一方、図-6.9は、Case-1において、1次、2次の座屈固有モードと相似な形状の初期たわみの大きさを、図-6.10は、Case-2において、逆対称一次、対称一次の座屈固有モードと相似な形状の初期たわみの大きさを、それぞれ変えて導入した際の終局付近の荷重-変位曲線を、初期たわみを導入していない場合のものも加えて、探索された

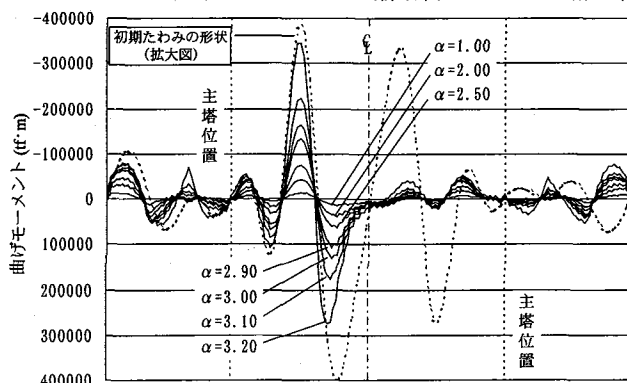


a) 1次の固有モードに基づく初期たわみ導入時

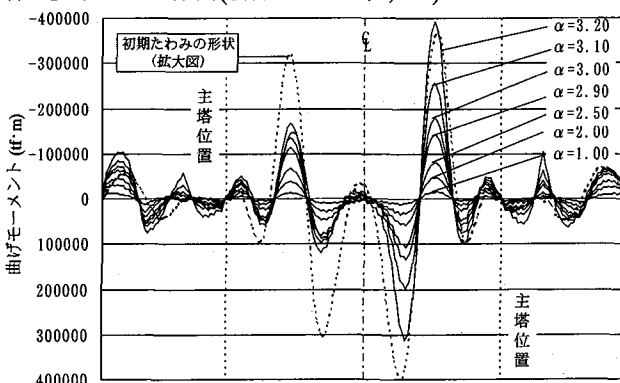


b) 2次の固有モードに基づく初期たわみ導入時

図-6.5 Case-1 漸増荷重による主桁の桁端を基準とした標高(初期たわみ 1/1,000)



a) 1次の固有モードに基づく初期たわみ導入時



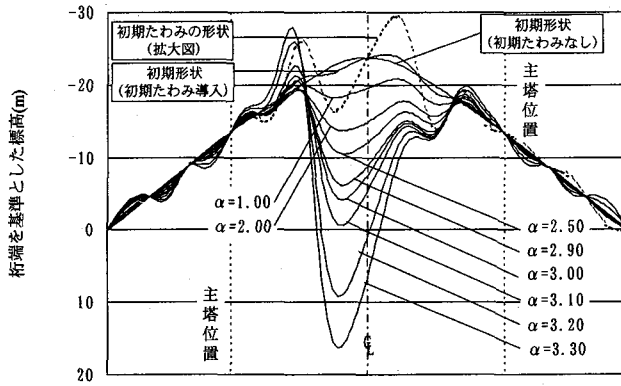
b) 2次の固有モードに基づく初期たわみ導入時

図-6.6 Case-1 漸増荷重による主桁の曲げモーメント(初期たわみ 1/1,000)

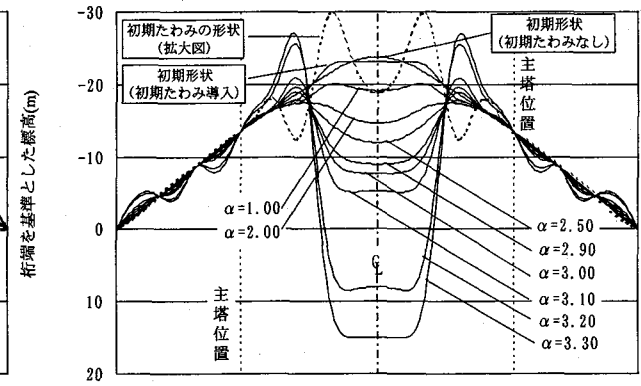
特異点とその変形モードとともに示したものである。これらの図から、前節で既に言及したことを含め、次のよ

うなことが解る。

すなわち、図-6.9 からは、Case-1 では、初期たわみな

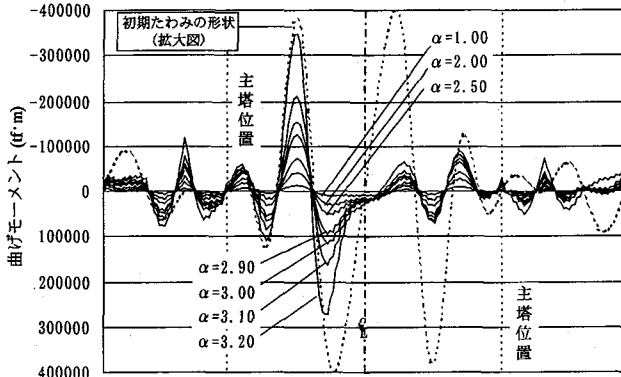


a) 逆対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

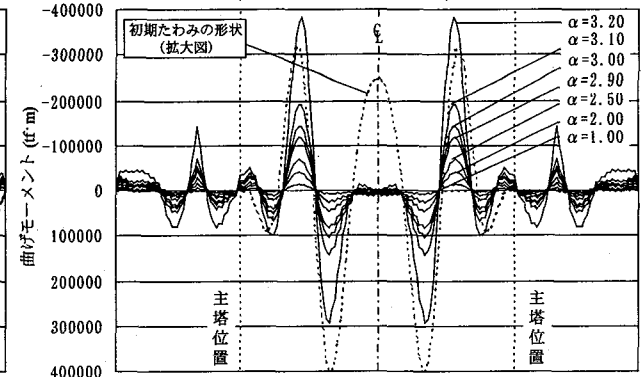


b) 対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

図-6.7 Case-2 漸増荷重による主桁の桁端を基準とした標高(初期たわみ 1/1,000)

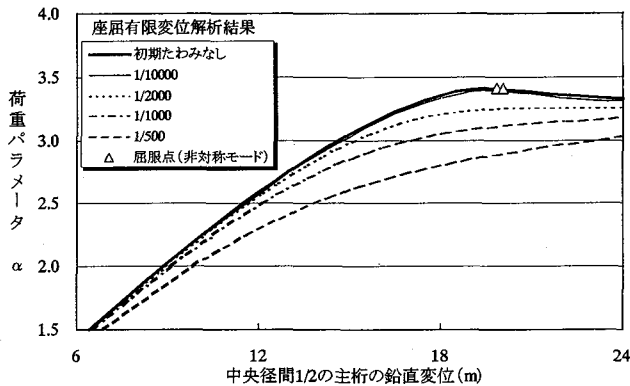


a) 逆対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

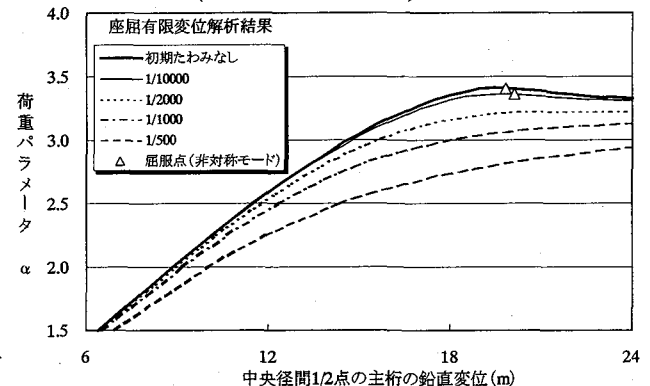


b) 対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

図-6.8 Case-2 漸増荷重による主桁の曲げモーメント(初期たわみ 1/1,000)

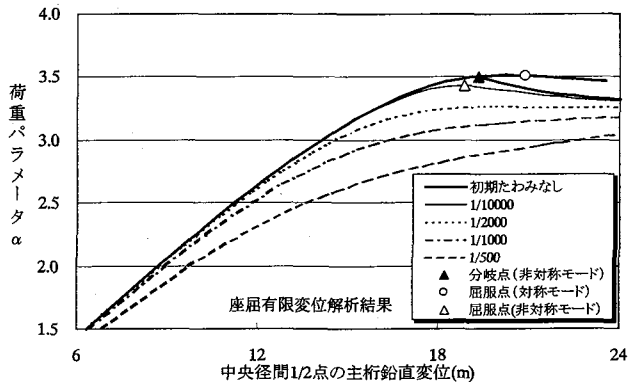


a) 1 次の固有モードに基づく初期たわみ導入時

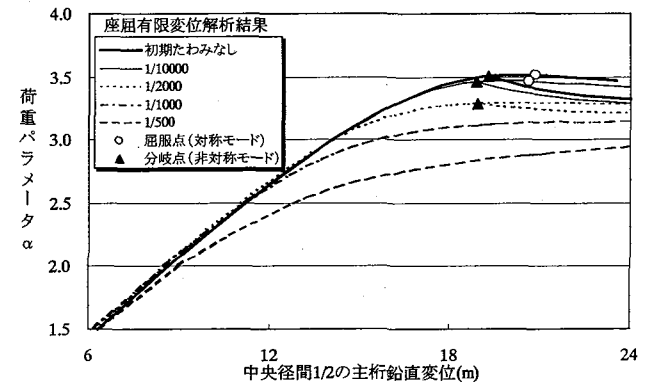


b) 2 次の固有モードに基づく初期たわみ形状導入時

図-6.9 Case-1 における終局付近の荷重-変位曲線



a) 逆対称一次モードに基づく初期たわみ導入時



b) 対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

図-6.10 Case-2 における終局付近の荷重-変位曲線

しの場合にも作用荷重の非対称性によって、変形モードが常に非対称となり、非対称変形モードの屈服点のみが特異点として探索され、初期たわみを導入した場合も同様であることが解る。

これに対して、図-6.10 からは、Case-2 では、初期たわみなしの場合には、非対称変形モードの分岐点と、対称変形モードの屈服点が探索され、対称形の初期たわみを導入した場合は同様であるが、非対称形の初期たわみを導入した場合は、非対称変形モードの屈服点のみが探索されることが解る。

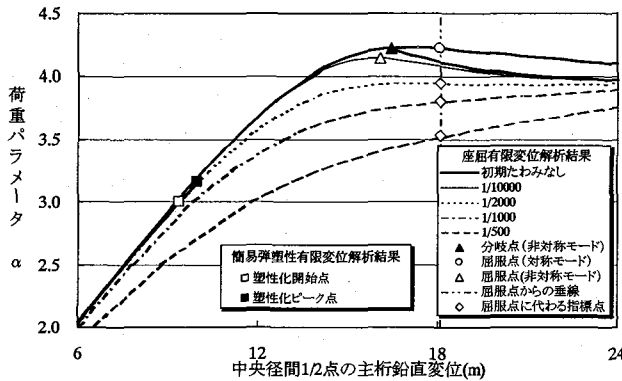
また、両図から、Case-1, Case-2 ともに、初期たわみの導入量の増加に伴って、荷重-変位曲線が徐々に低下するとともに、全て単調増加傾向の基本経路のみとなって、特異点が探索されなくなることが解る。したがって、

Case-2 で、対称一次の座屈固有モードと相似な初期たわみを導入した場合の基本経路は、常に対称変形モードとなり、それ以外の場合には、非対称変形モードの経路となることも解る。

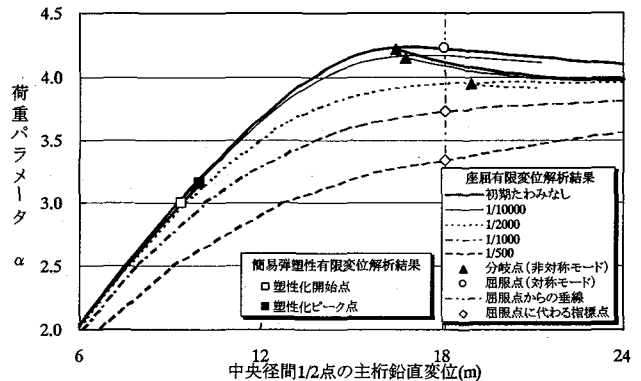
さらに、両図において、初期たわみの大きさの各ケースについて荷重-変位曲線の基本経路を比較すると、初期たわみを導入した場合の Case-1 と Case-2 における差異は余り大きくないことが解る。

7. 塑性化の影響と等価初期たわみ

本章では、前章の $\alpha(D+PS+L)$ 時の Case-1(影響線載荷)、Case-2(全径間載荷)における座屈有限変位解析結果に、両載荷ケースの線形化座屈固有値解析結果を加え、さらに、文献 8) の $\alpha(D+PS)$ 時のそれらの解析結果も加えて、両者

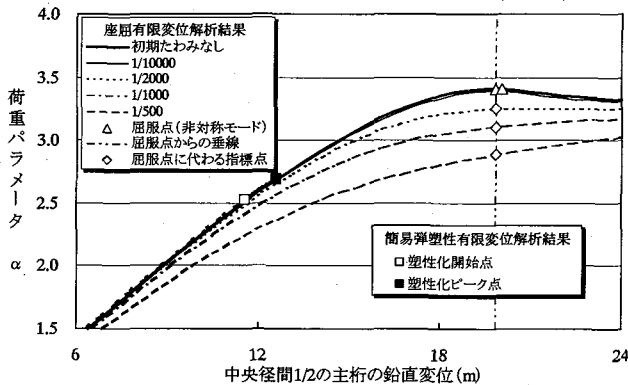


a) 逆対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

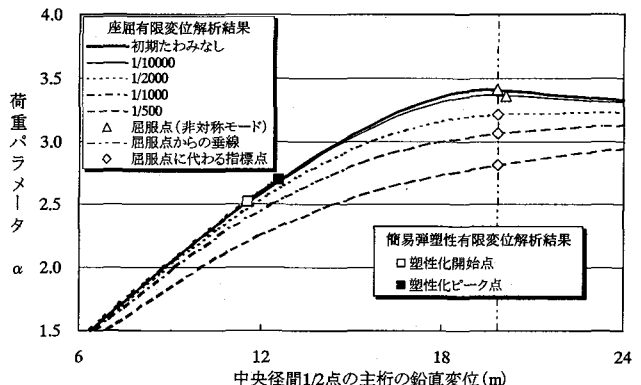


b) 対称一次モードに基づく初期たわみ形状導入時

図-7.1 $\alpha(D+PS)$ 時の終局付近の荷重-変位曲線

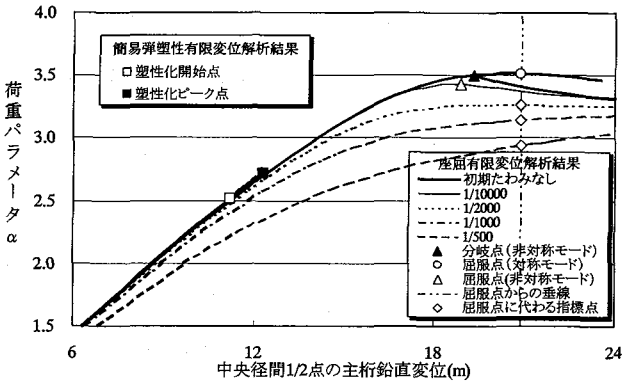


a) 1 次の固有モードに基づく初期たわみ導入時

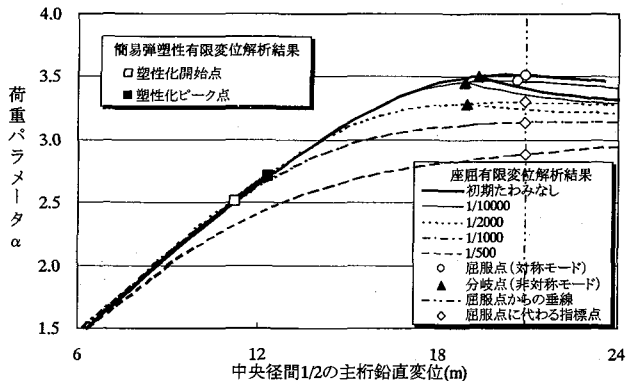


b) 2 次の固有モードに基づく初期たわみ形状導入時

図-7.2 $\alpha(D+PS+L)$ 時の Case-1 における終局付近の荷重-変位曲線



a) 逆対称一次モードに基づく初期たわみ導入時



b) 対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

図-7.3 $\alpha(D+PS+L)$ 時の Case-2 における終局付近の荷重-変位曲線

の荷重条件での簡易弾塑性有限変位解析結果と対比させることにより、塑性化の影響を等価な初期たわみとして置換できる可能性を検討する。同時に、長大斜張橋の終局強度を評価するための適切な荷重条件と、それに対応する初期たわみ形状とその大きさについても検討を加える。

7.1 簡易弾塑性解析結果との比較

本節では、まず、座屈有限変位解析結果と簡易弾塑性有限変位解析結果を対比させて、初期たわみ導入、あるいは、塑性化に伴う終局状態での荷重パラメータ α の値の低減の状況、および、終局時の全体構造の変形とその増分変形モードを比較する。その結果の一部を、図-7.1～図-7.4 に示す。

図-7.1～7.3 は、中央径間 1/2 点の主桁鉛直変位に着目した荷重-変位曲線を、荷重条件や、活荷重の載荷ケース別に示したものである。ここに、座屈有限変位解析によるものについては、導入した初期たわみの形状とその大きさのケース別に、初期たわみを導入していない場合のものも含めて示し、探索された特異点に関してはその変形モードも付記している。

これらの図中、初期たわみの導入によって特異点が探索されなかった座屈有限変位解析による荷重-変位曲線に、初期たわみを導入していない場合に探索された屈服点から垂線を下ろし、両者の交点を屈服点に代わる指標点として示した。また、簡易弾塑性有限変位解析による

荷重-変位曲線には、塑性化開始点も付記した。

これらの図から、簡易弾塑性有限変位解析による全ての荷重-変位曲線は、座屈有限変位解析による初期たわみを導入していない場合のものの経路をほぼ辿るが、塑性化開始点から塑性化ピーク点に至るまでの荷重パラメータの増加は小さく、終局状態での荷重パラメータ α の値が大きく低減されることが解る。また、座屈有限変位解析による荷重-変位曲線において、屈服点に代わる指標として与えた点が、初期たわみ導入に伴う終局状態での荷重パラメータの低減の状況を十分に表現できていることも解る。

一方、図-7.4 は、 $\alpha(D+PS+L)$ 時の両載荷ケースについて、終局時の全体構造の変形図とその増分変形モードを比較したものである。ここに、簡易弾塑性有限変位解析によるものは、塑性化ピーク点での変形を、座屈有限変位解析によるものは、導入した初期たわみの大きさが 1/500 の場合について、その形状別に、屈服点に代わる指標点での変形をそれぞれ表している。また、終局時の増分変形モードは、塑性化ピーク点、あるいは、屈服点に代わる指標点に至る直前の増分段階で得られた変位に対応するものである。

この図から、両解析による終局時の全体構造の変形図が一致することはないが、増分変形モードについては、座屈有限変位解析において、Case-1（影響線載荷）では、2 次の座屈固有モード、Case-2（全径間載荷）では、対

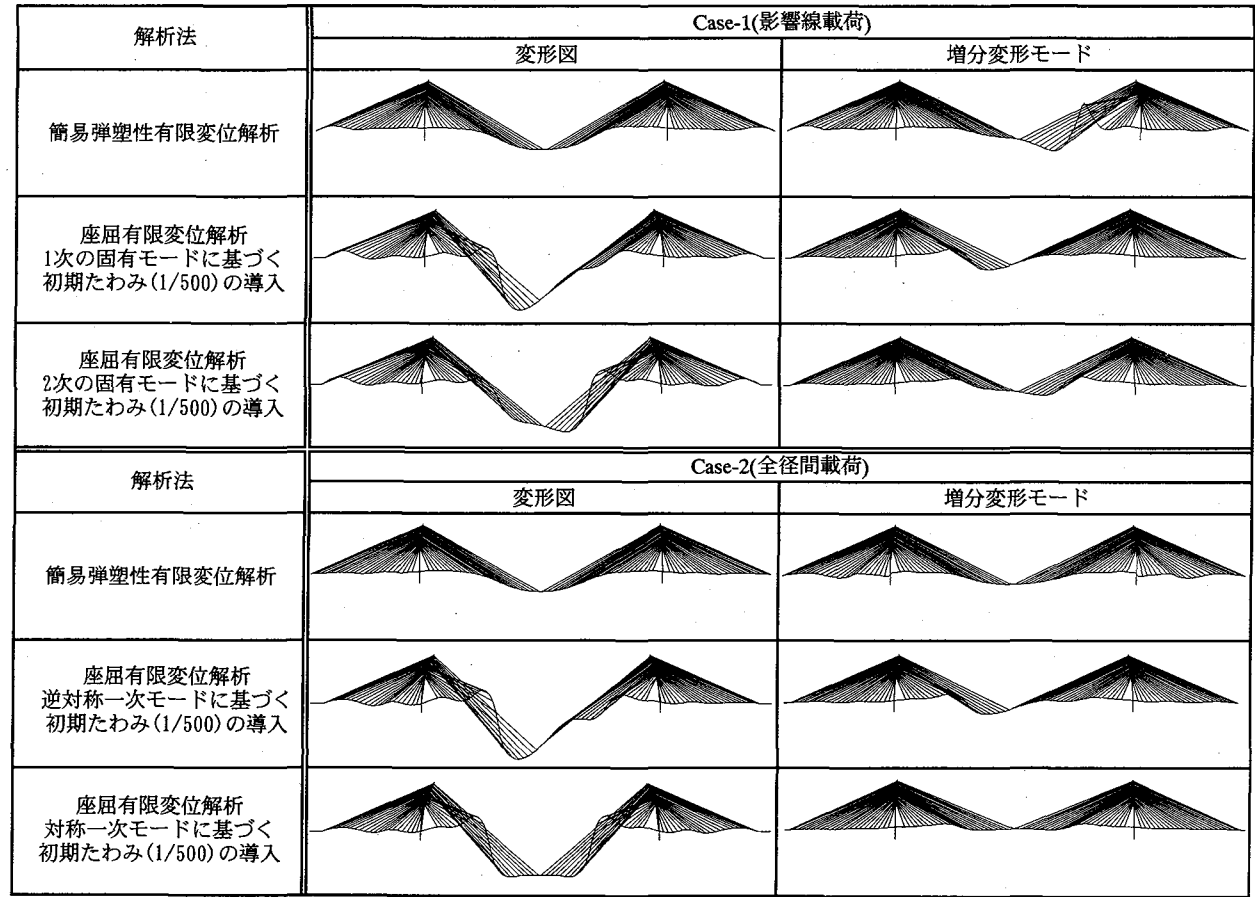


図-7.4 $\alpha(D+PS+L)$ 時の終局状態の変形図と増分変形モード

称一次の座屈固有モードと相似な形状の初期たわみをそれぞれ導入した場合のものと、簡易弾塑性有限変位解析によるものとがほぼ一致することが解る。

7.2 等価初期たわみの大きさの評価

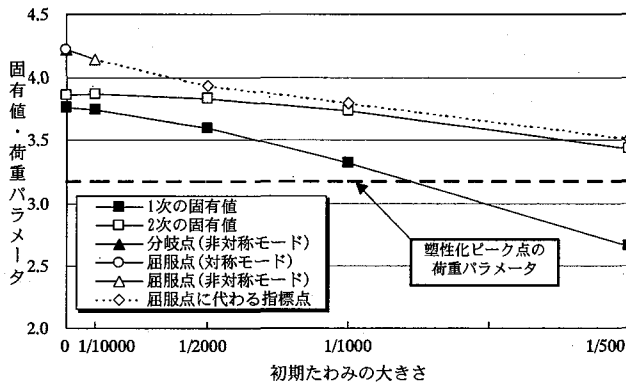
本節では、線形化座屈固有値解析によって得られる座屈固有値を、座屈有限変位解析による特異点または屈服点に代わる指標点、および、簡易弾塑性有限変位解析による塑性化ピーク点での荷重パラメータとともに、終局強度の指標の一つとして、これらを比較する。その結果の一部を図-7.5～図-7.7に示す。

これらの図は、荷重条件や、活荷重の載荷ケース別に、1次、2次の座屈固有値、および、特異点または屈服点に代わる指標点、あるいは、塑性化ピーク点での荷重パラ

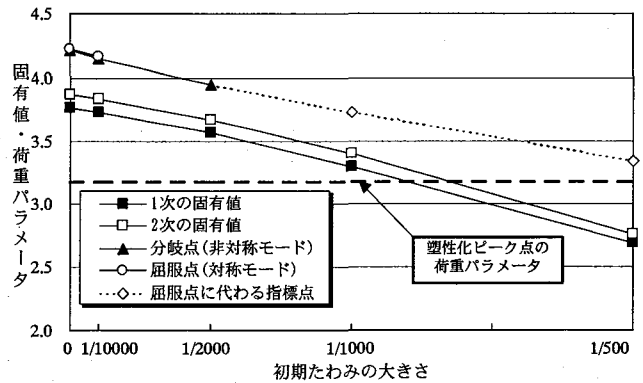
メータ α の値を示したものである。ここに、線形化座屈固有値解析、および、座屈有限変位解析によるものについては、導入した初期たわみの形状別に、その大きさを横軸にとって、初期たわみを導入していない場合のものも含めて示し、探索された特異点に関してはその変形モードも付記している。

これらの図から、荷重条件や、活荷重の載荷ケース、初期たわみ形状にかかわらず、その導入量の増加に伴って、1次、2次の座屈固有値、および、特異点または屈服点に代わる指標点での荷重パラメータの値がほぼ直線的に低減され、等価初期たわみによって塑性化の影響による終局強度の低下を考慮し得る可能性の高いことが確かめられる。

すなわち、それらの値が直線的に低減され、塑性化ピ

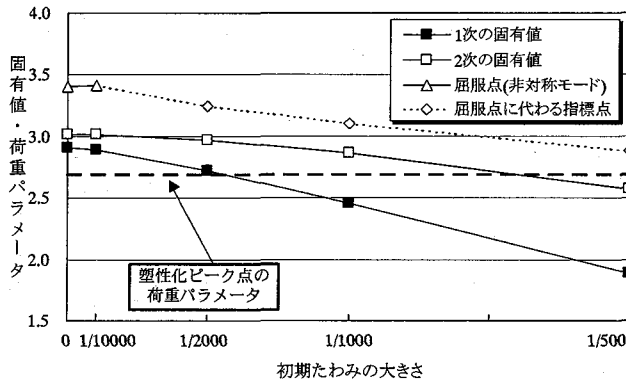


a) 逆対称一次モードに基づく初期たわみ導入時

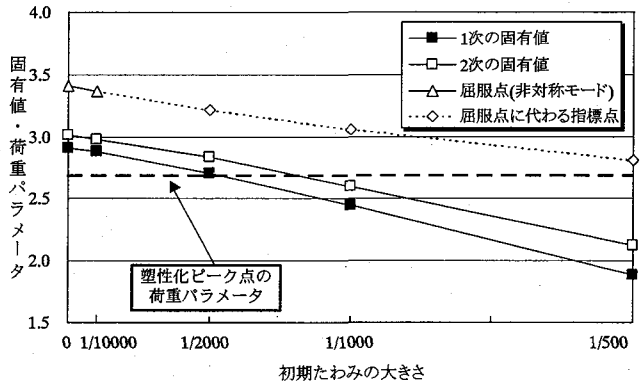


b) 対称一次モードに基づく初期たわみ形状導入時

図-7.5 α (D+PS)時における座屈有限変位解析結果と座屈固有値解析結果の比較

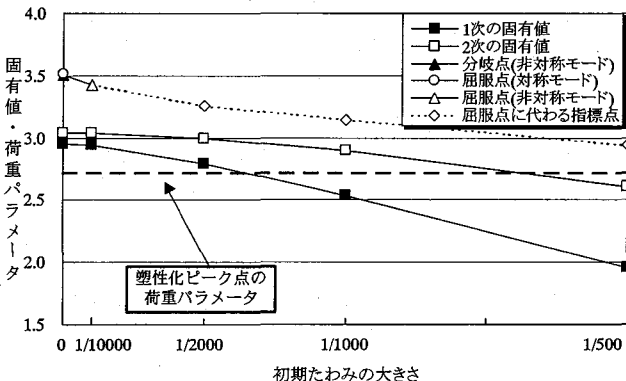


a) 1次の固有モードに基づく初期たわみ導入時

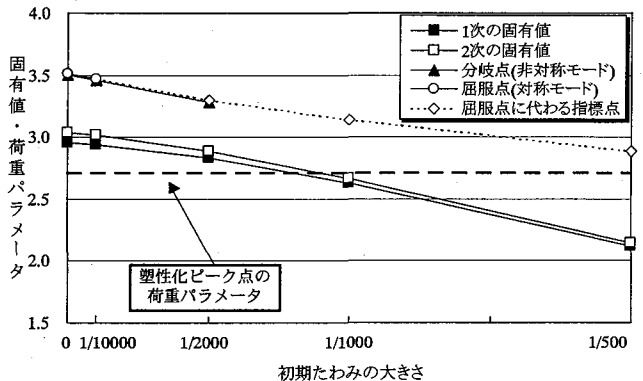


b) 2次の固有モードに基づく初期たわみ形状導入時

図-7.6 α (D+PS+L)時の Case-1 における座屈有限変位解析結果と座屈固有値解析結果の比較



a) 逆対称一次モードに基づく初期たわみ導入時



b) 対称一次モードに基づく初期たわみ形状導入時

図-7.7 α (D+PS+L)時の Case-2 における座屈有限変位解析結果と座屈固有値解析結果の比較

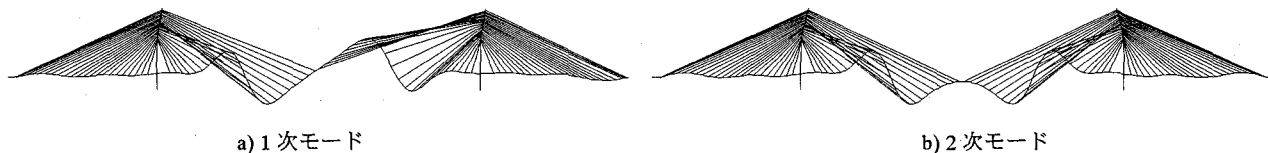


図-7.8 Case-2における対称一次モードに基づく初期たわみ(1/500)導入時の座屈固有モード図

ーク点での荷重パラメータの値に一致する際の初期たわみの大きさが、塑性化の影響と等価な導入量ということになる。

7.3 荷重条件と等価初期たわみの形状の選定

前節における検討結果から、塑性化の影響と等価な初期たわみの大きさを評価できることが解ったが、荷重条件(活荷重の載荷ケースを含む)や、初期たわみの形状によって、異なる値となることはいままでの間、また、終局強度の指標によっても、異なる値となる。

したがって、将来、実用的な設計法として、塑性化の影響を含めた等価初期たわみによる等価初期不整法の長大斜張橋への適用を可能にするためには、適切な荷重条件と等価初期たわみの形状を選定し、終局強度の指標に応じてその大きさを決定する必要がある。

まず、荷重条件については、(D+PS)よりも(D+PS+L)を基本荷重とする方が合理的であるが、その場合、Case-1の載荷ケースを採用すると、影響線解析を行う必要があり、個々の橋によって活荷重の載荷位置が異なることになる。今、Case-1とCase-2の場合を比較すると、前者の方が終局状態での荷重パラメータの値は小さいが、後者との差異は大きくなく、設計の容易さを考えれば、全径間載荷のCase-2が選定されることになる。

次に、等価初期たわみの形状については、基本荷重が(D+PS+L)で、載荷ケースがCase-2の場合、最低次の逆対称一次、2次の対称一次の座屈固有モードと相似な形状をそれぞれ導入した際の終局状態での荷重パラメータの値の差異も大きくなく、終局時の増分変形モードを一致させることを考えれば、最低次ではないが、対称一次の座屈固有モードに基づくものが選定されることになる。

さらに、終局強度の指標については、座屈有限変位解析による特異点または屈服点に代わる指標点での荷重パラメータの値を適用するのが妥当であるが、座屈固有値解析の簡便さを考えると、試算段階などでは、座屈固有値を終局強度の指標とすることも検討に値するといえる。なお、この場合においても、簡易弾塑性有限変位解析の終局時の増分変形モードに一致させることを考えれば、図-7.8に示すCase-2における対称一次モードに基づく初期たわみ(1/500)導入時の座屈固有モード図から、2次モードを選定すればよいことがわかる。

これらのようにすることによって、等価初期たわみの大きさを具体的に評価できるようになったが、実際の設計における導入量を決定するためには、試設計を含む数多くの設計例を対象とした評価結果を蓄積するとともに、弾塑性解析等によって適切な構造パラメータに関する基

準耐荷力曲線を得ることが不可欠である。

8. 結 言

本研究では、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、基本荷重や活荷重の載荷位置などの荷重条件、初期たわみの形状、および、その大きさを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変えて検討した。

その結果、荷重条件や、初期たわみ形状にかかわらず、その導入量の増加に伴って、座屈固有値、および、特異点または屈服点に代わる指標点での荷重パラメータの値がほぼ直線的に低減され、等価初期たわみによって塑性化の影響による終局強度の低下を考慮し得る可能性の高いことが確かめられた。

さらに、将来、実用的な設計法として、塑性化の影響を含めた等価初期たわみによる等価初期不整法の長大斜張橋への適用を可能にするための適切な荷重条件と等価初期たわみの形状を選定でき、等価初期たわみの大きさを具体的に評価できるようになった。

今後は、試設計を含む数多くの設計例を対象とした評価結果を蓄積するとともに、弾塑性解析等によって適切な構造パラメータに関する基準耐荷力曲線を与えて、これらを基に実際の設計における導入量を決定できるようにすることが課題といえる。また、ここでは、研究の第1段階として、主桁の初期たわみが及ぼす影響を検討したが、塔断面の塑性化の影響が問題となる場合における塔の初期たわみに関する検討も今後の課題といえる。

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) 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。
- 4) 関西道路研究会・道路橋調査研究委員会編：コンピュータによる鋼橋の終局強度解析と座屈設計，共立出版，1998。
- 5) 北田俊行，大南亮一，丹生光則，田中克弘，狩野正人：ケーブルを有する鋼橋の弾塑性有限変位解析の効率化，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，第14巻，1990。
- 6) 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.
- 7) 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.
 - 8) 中村一史, 前田研一, 紺野 誠, 林 正, 成田信之: 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, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999.
 - 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) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.
 - 15) S.Komatsu & T.Sakimoto: Nonlinear Analysis of Spatial Frames Consisting of Members with closed Cross-Sections, Proc. of JSCE, No.252, 1976.
 - 16) 前田幸雄, 林 正, 中村 守: 増分法による平面骨組構造物の加速計算法, 土木学会論文報告集, No.223, 1974.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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.

(1999 年 9 月 17 日受付)