

9 斜張橋の設計における非線形問題

大阪大学工学部 前田幸雄・林 正、川田工業㈱○前田研一

1. 緒 言 近年、斜張橋は急速なる発展を遂げ、主径間長200～400m程度の橋梁に適した形式として定着しつつある。しかも、さらに長径間の橋梁においても、経済性、および、美観の点で、従来の吊橋より優れた形式であるとさえ、昨今では言われ始めている。しかしながら、その設計法は未だ完全には確立されておらず、多くの研究者、設計技術者達の努力と関心を集めている。そして、彼らの指摘する最大の問題の1つが斜張橋特有の非線形問題であり、設計における合理的な取扱い方の検討が必要、かつ、急務であるとしている。

本研究は 斜張橋の設計、製作、および、架設に対応して著者らが開発した非線形解析プログラムを適用し、種々の計算例から、幾何学的非線形問題の合理的な取扱い方について、一種の基準を設定、確立することを目的としたものである。そして、本文では、開発、適用した非線形解析プログラムの概要と特徴を最初に説明し、さらに、各種のパラメトリック解析例、および、実際設計例の結果を示しながら、最後に、設計技術者に対して何らかの指標を与えることを試みる。

2. 非線形解析プログラムの概要と特徴 適用した解析プログラム^{1)、2)}は斜張橋の設計、製作、および、架設に対応して開発したものであり、初期歪、形状変化の影響などの通常の非線形問題を含めて、次のような斜張橋特有の非線形問題に対処することができる。

- [1] 架設法に対応したモデルの設定 (特に、片持梁工法を採用する場合は、中央併合用桁の両端点でのモーメント値が零となるような連続梁モデルの他に、両端点にヒンジを強制的に挿入したゲルバー梁モデルを考えることができる。そして、後者については、両ヒンジ点で隣接ブロックとのたわみ角の適合を一般には満足しないため、併合後に載荷される荷重による断面力の計算において、その影響を考慮している。)
- [2] サグの影響による剛性の低下を考慮するための放物線ケーブルの計算式の適用 (計算式として、従来の修正弾性係数³⁾、および、著者らが提案したケーブル方程式、接線剛性行列^{4)、5)}の両者を組込んでいる。なお、後者においては、ケーブルの両碇着点における異なる張力、および、接線角の計線角の計算も行なう。)
- [3] ケーブルが所要プレストレスを有している状態で主桁、主塔が所定の完成形状にあるための所要キャンバーの算定 (この場合、主桁、主塔に載荷される外力として、軸線に関するプレストレスの通常の水平成分、鉛直成分に対応する集中荷重に加え、ケーブルの総重量の $\frac{1}{2}$ に対応する集中荷重を与えれば、サグの影響も自動的に考慮されることになる。)
- [4] サグの影響を考慮して放物線ケーブルが完成形状で所要プレストレスを有するための所要無応力長の算定 (前述のケーブル方程式から計算するが、完成形状での接線角も同時に与えられる。)
- [5] 各架設段階から、完成時、さらには、活荷重載荷時における変形、断面力の連続的計算 (主桁、主塔の無応力状態での形状に対応するキャンバー、および、ケーブルの無応力長を

用いることにより、断面諸量、および、支承条件を調整するのみで、容易に実行できる。)

なお、ケーブルの「プレストレス」とは、従来、死荷重支持用の張力に付加すべき調整用の張力という意味であったが、これは綿形解析を適用するために必要な便宜的、かつ、非合理的な考え方に起因するものであり、本文では、完成時にケーブルに導入すべき総張力という簡明な意味で用いている。

3. 基本設計における非線形性の幾何学的要因

3-1 初期歪、形状変化の影響

完成時の形状は当然既知であり、その状態で主桁、主塔に対し死荷重、および、ケーブルのプレストレスに対応する外力を载荷して得られる断面力も 非線形性を考慮する必要は全くない。

したがって、非線形性が問題となり得るのは、活荷重载荷時における、死荷重、プレストレス、活荷重による初期歪、および、活荷重による形状変化の影響である。ところが、まず、初期歪の影響については、主桁、主塔に対応する曲げ部材、および、ケーブルに対応する軸力部材とも、実際問題の範囲内では、それらの剛性に及ぼす影響はほとんどないということが容易に確かめられた。また、一方、形状変化の影響も、「道示」のたわみ制限により制約を受けるため、主桁の変形、断面力については顕著ではなく、線形的な重ね合わせも充分可能であることが 多くの計算例から推測できた。

しかしながら、主塔の曲げモーメント分布に及ぼす形状変化の影響は 計算例によっては、無視できない場合があった。そして、その影響の大部分が 活荷重によるケーブルの張力に関するものではなく、完成時におけるプレストレスに関するものであることについては、注意を要するものと思われる。

3-2 ケーブルのサグの影響

ケーブルのサグの影響による非線形性は 前節と同じ理由から完成時には問題とはならず、活荷重载荷時における剛性の低下、および、両碇着点での異なる張力という形で現われ、問題となる。図-2、表-1 は 図-1 に示すモデルにより、初期応力、および、径間長に対応する水平射影長をパラメーターとして、それらの非線形性の度合を表わしたものである。

前者は 放物線ケーブル部材による水平変位の値に対する、単なる弾性係数、および、修正弾性係数を有する軸力部材による値の誤差を表わしている。この図からは、完成時でのケーブルの導入応力が大きくない場合、あるいは、径間長が長くなる場合には、誤差が無視できず、

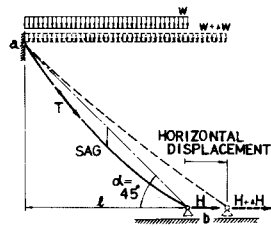


図-1 モデル

表-1 ケーブルの応力

$H/A \cdot \sec 45^\circ$ (t/m^2)	l (m)	T_a/A (t/m^2)	T_b/A (t/m^2)
1.0×10^4	100	10400	9616
	200	10814	9248
	300	11242	8899
	400	11683	8570
	500	12137	8265
2.0×10^4	100	20396	19612
	200	20799	19232
	300	31310	18860
	400	21627	18497
	500	22051	18143
3.0×10^4	100	30394	29610
	200	30793	29227
	300	31198	28848
	400	31607	28475
	500	32021	28107
4.0×10^4	100	40394	39610
	200	40791	39224
	300	41192	38842
	400	41597	38465
	500	42005	38091
5.0×10^4	100	50393	49610
	200	50789	49223
	300	51188	48839
	400	51590	48459
	500	51995	48082

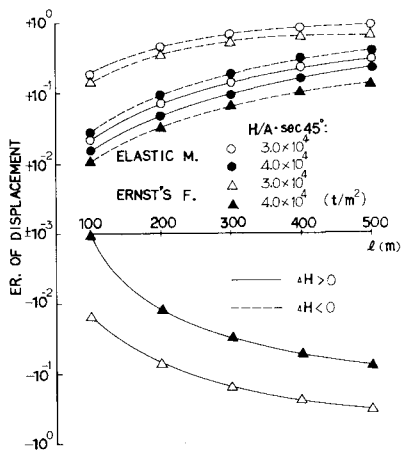


図-2 水平変位の誤差

放物線ケーブル部材を用いてサグの影響を考慮する必要があるとい
うことが 十分に予測できる。 また、後者は 放物線ケーブル部
材の両碇着点の異なる張力を表わしている。 そして、この表から
は、許容応力程度の応力を対象とする場合でも、径間長が長くなる
につれて、張力の差異が無視できない量となることが解る。

4. 製作段階における設計計算の非線形性と製作、架設誤差

4-1 主桁の製作キャンパーの算定

図-3 に示すモデルを対象とするキャンパーを計算し、その収束

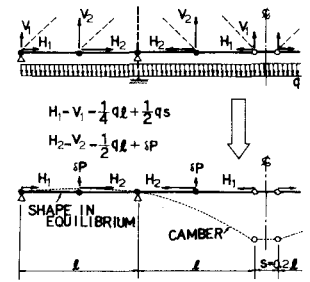


図-3 モデル

解に対する線形解

の誤差、および、

線形解を無応力形

状とし荷重を載荷

した際の平衡時形

状の誤差の張出部

長さに対する比率

を 同時に表わし

たのが図-4であ

る。「道示」の

仮組立ての精度、および、建設省各地方建設局の「施工管理基準」、「

出来高規格値」などの値から判断して、無視できない製作誤差、そして、

それによる規格値を越える架設誤差を生ずる場合も充分予想されることが

この図から解る。 なお、計算では、便宜上、ゲルバー梁

ではなく張出梁を対象としたが、図-4の破線のように、剛性

の弱い場合には解の発散も見られたので、注意を要する。 参

考のために、解の収束、発散状況の一例を 図-5 に示す。

4-2 ケーブルの製作無応力長と碇着部製作角の算定

図-7、表-2 は

図-6 に示すモデルに

より、初期応力、およ

び、径間長に対応する

水平射影長をパラメー

ターとして、それぞれ

の非線形性の度合を表

わしたものである。

前者は 放物線ケーブ

ル部材による無応力長

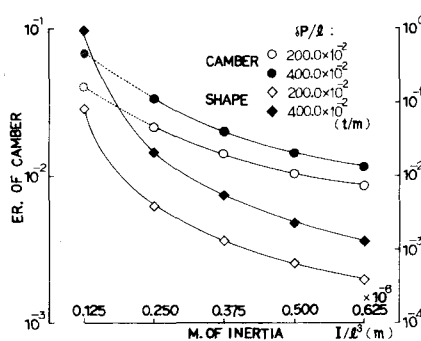


図-4 キャンパーと平衡時形状の誤差

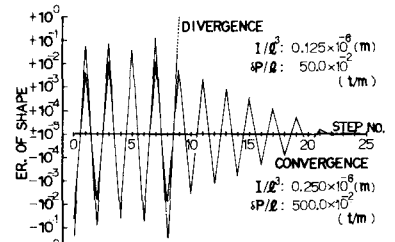


図-5 収束、発散状況

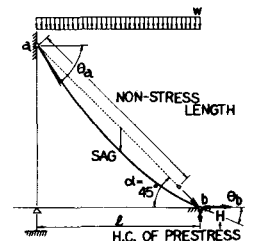


図-6 モデル

表-2 ケーブルの接線角

$H/A \cdot \sec^2 45^\circ$ (t/m^2)	l (m)	θ_a (deg.)	θ_b (deg.)
1.0×10^4	100	47.16	42.66
	200	49.16	40.12
	300	51.02	37.38
	400	52.75	34.40
	500	54.36	31.18
2.0×10^4	100	46.10	43.85
	200	47.16	42.66
	300	48.18	41.42
	400	49.16	40.13
	500	50.10	38.78
3.0×10^4	100	45.73	44.24
	200	46.45	43.46
	300	47.16	42.66
	400	47.84	41.84
	500	48.51	40.99
4.0×10^4	100	45.55	44.43
	200	46.10	43.85
	300	46.63	43.26
	400	47.16	42.66
	500	47.67	42.05
5.0×10^4	100	45.44	44.54
	200	45.88	44.08
	300	46.31	43.62
	400	46.74	43.14
	500	47.15	42.66

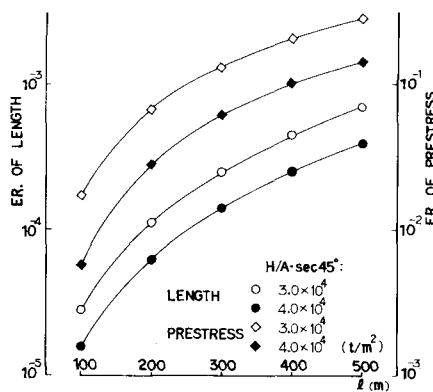


図-7 無応力長とプレストレスの誤差

の値に対する軸力部材による値の誤差、および、軸力部材による無応力長の値を用いて放物線ケーブル部材としての計算を行なった場合の導入張力、すなわち、プレストレスの水平成分の誤差を同時に示したものである。この図からは、同様に、完成時でのケーブルの導入応力が大きくない場合、あるいは、径間長が長くなる場合には、ケーブル・メーカーの保証測長誤差の値と比較しても無視できない製作誤差、そして、それによる規格値を越える架設誤差を生ずることが十分に予測できる。また、後者は放物線ケーブル部材の両碇着点の異なる接線角を示している。そして、この表からは、各架設段階、完成時、および、活荷重載荷時において、径間長の長くない場合でも、接線角がかなり変動することが解り、この現象に対処できる碇着部の設計が必要であることが確認できる。特に、碇着部の傾角については、その製作誤差が架設誤差に直結すると思われるため、架設法に対応して正確な値を算定するべきである。

5. 架設計算における非線形解析の有用性とその実例

5-1 非線形解析の合理性と有用性

線形解析による各架設段階での変形、断面力の計算は逆算による非合理な方法を用いなければならず、必ずしも簡便であるとは言えない。したがって、その度合が非常に大きい場合も十分に予測される幾何学的非線形性を当然考慮できることに加えて、非線形解析によれば、主桁、主塔のキャンバー、および、ケーブルの無応力長の値を操作することによって製作誤差に対応する架設誤差の検討を行なうことも可能であり、架設計算における非線形解析の有用性は多々であると思われる。

5-2 非線形解析の実例

対象とするのは、図-8、表-3に示す「新滝橋」(事業主体・北陸地建、橋土工・川田工業㈱、横河橋梁製作所)をモデルとする2径間対称斜張橋である。なお、製作誤差としては、キャンバーが仮組立て

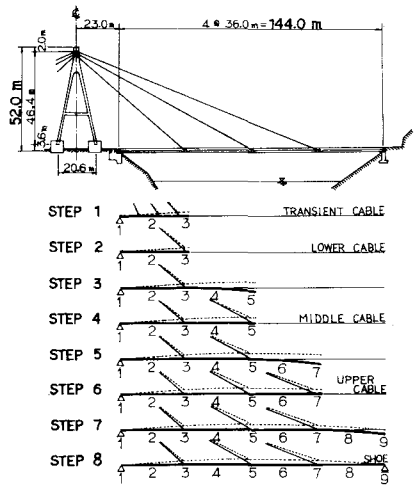


図-8 新滝橋

表-3 死荷重強度と断面諸量

DEAD LOAD	Pre-	4.085	(t/m)
	Post-	2.917	(t/m)
CABLE	Lower	L. C. R. $\phi 60 \times 8$	
	Middle	L. C. R. $\phi 70 \times 8$	
	Upper	L. C. R. $\phi 80 \times 8$	
GIRDER (STEEL DECK)	Area	0.347~0.424	(m ²)
	Inertia	0.199~0.239	(m ⁴)

表-4 各架設段階での変位、モーメントの最大、最小

STEP	LINEAR		NON-LINEAR			
	DISPL. (m)	MOMENT (tm)	(Axial C.) DISPL. (m)	(Axial C.) MOMENT (tm)	(Parabolic C.) DISPL. (m)	(Parabolic C.) MOMENT (tm)
1,2	-0.065	597	-0.066	602	-0.123	602
3	0.862	-3603	0.698	-3107	0.695	-3107
4	-0.163	599	-0.164	603	-0.261	711
5	1.161	-3928	0.854	-3107	0.892	-3107
6	-0.455	923	-0.453	928	-0.655	1070
7	0.423	-2647	0.424	-2647	-0.169	-2646
8	-0.159	-1645	-0.159	-1641	-0.194	-1685
Compl.	0.058	-1204	0.058	-1204	0.058	-1204

表-5 張力導入時、完成時でのケーブルの応力と接線角

STEP	CABLE		STRESS (t/m ²)		SLOPE (deg.)	
2	Lower	Axial	7353	7353	39.06	39.06
		Parabolic	7696	7059	42.14	36.06
4	Middle	Axial	7698	7698	27.18	27.18
		Parabolic	8345	7878	30.26	23.80
6	Upper	Axial	9497	9497	20.72	20.72
		Parabolic	10168	9721	23.81	16.88
Compl.	Lower	Axial	19853	19853	39.13	39.13
		Parabolic	20196	19559	40.17	37.91
	Middle	Axial	19245	19245	27.28	27.28
		Parabolic	19424	18993	28.54	26.05
	Upper	Axial	25698	25698	20.89	20.89
		Parabolic	25950	25475	22.27	19.49

の精度に対応して+25mm、無応力長が保証測長誤差に対応して+20mmとする。

表-4~6に、計算結果の一部を示す。これらの表からは、次のようなことが言える。まず、表-4から、ケーブル張力の導入時には、形状変化の影響はほとんどないが、サグの影響は顕著であり「施工管理基準」の値を越える変形の誤差を生じていることが解

表-6 製作誤差がある場合の諸値と真値との比較

KIND		CONDITION	STEP				
			2	4	6	Compl.	
DISPL.	(m)	Error	-0.062	-0.182	-0.571	0.125	
		Real	-0.123	-0.261	-0.655	0.058	
MOMENT	(tm)	Error	602	781	1131	-1013	
		Real	602	711	1070	-1204	
CABLE TENSION (t)	L.	Error	157	225	267	407	
			144	213	254	394	
				239	275	552	
	M.			226	262	539	
			U.			366	903
						350	887
	L.			Real	157	235	277
		144	222		264	399	
			232		269	540	
	M.		219		257	528	
		U.				364	929
						348	912

る。逆に、導入直前では、形状変化による影響のみが顕著であることも解る。また、表-5から、各段のケーブルの張力導入時、および、完成時において、初期応力がかなり小さいために、両碇着点での異なる張力、接線角の差異は大きく、変動も激しいことが解る。したがって、ジャッキ架台などの架設機材の設計、および、管理張力値の決定などに、それらの影響を考慮しなければならないことが解る。最後に、表-6から、製作誤差に対応する架設誤差がケーブルの張力にはほとんど生じずに、変形に対する「施工管理基準」、「出来高規格値」の値を越える誤差という形で生じることが解る。このことは変形に対する施工管理が張力管理に比して有効であることを意味している。

6. 結 言 以上に、斜張橋の設計における幾何学的非線形問題として重要であると思われるものについて、それらの非線形性を論じて来たが、設計条件によっては無視できないものが多いということを十分に確認できたと考えられる。したがって、今後はどのように設計において取扱うかということが問題となる。非線形解析による設計を義務付けることは単純な一方法であるが、他方で、各種設計条件をパラメーターとして与えられる非線形性による誤差に対応する量を考慮した設計法を確立することも実用上不可欠である。しかしながら、そのためには、明確な一種の設計基準の設定が必要であり、著者らを含めた多くの研究者、設計技術者達による成果の蓄積を待たねばならない。なお、本文の計算例には、UNIVAC 1106（川田工業㈱電算センター）を用いた。

参 考 文 献

1)前田・大西：有限要素法・有限変形理論による大径間斜張橋の静的、動的非線形解析プログラム、橋梁、Vol.13, No.1,2, 1977。
2)前田・林・前田：架設を考慮した大径間斜張橋の非線形解析法に関する2、3の考察、土木学会年次学術講演会講演概要集、1977。
3) H.J. Ernst：Der E-Modul von Seilen unter Berücksichtigung des Durchhanges, Bauingenieur, Heft 2, 1965。
4)前田・林・前田：サグを考慮したケーブル部材の計算式、土木学会論文報告集、No.257, 1977。
5) Y. Maeda, M. Hayashi & K. Maeda：Non-Linear Analysis of Cable-Stiffened Structures, Proc. of Japan National Congress for Applied Mechanics, Vol.26, 1978。

NON-LINEAR PROBLEMS IN DESIGN OF CABLE-STAYED GIRDER BRIDGES

Yukio MAEDA*, Masa HAYASHI** and Ken-ichi MAEDA***

In recent years, a considerable number of cable-stayed girder bridges have been built or proposed in various countries. Furthermore in future, larger bridges covering a main span more than 600 meters, will prove to be more economical and more aesthetics. Consequently, this type of bridges has become a centre of attraction to design engineers, and the importance of more scientific consideration in design have been pointed out as world-wide problems left unsolved.

The purpose of the present study is to investigate non-linear problems in design of cable-stayed girder bridges and to establish a certain standard for design engineers in regard to more adequate application of non-linear analyses. This paper consists of six chapters with the following contents :

1. Introduction
2. The non-linear analysis program developed by the authors for each stage, namely basic design, fabrication or erection stage, is outlined.
3. Governing factors and effects of the geometrical non-linearity at the basic design stage are pointed out. Particularly, the effects of sag of cable members are concretely showed by using the results of parametric analyses.
4. Similarly, by using the results of parametric analyses, the degree of non-linearity in calculation of required camber of a girder or the non-stress length of cable members, in design for fabrication stage, is examined. Moreover, by comparing with accuracy in actual measurements, the results are discussed as practical problems.
5. The great usefulness of non-linear analyses in design for erection stage is suggested by giving practical examples to clarify the discussion. In the stage, essentially it is impossible to take the geometrical non-linearity into account with linear analyses, and they are not very simple and rational ones. Therefore, by visualizing the problems from a different angle, it is especially emphasized that errors in actual erection works due to ones in actual fabrication works seem to be worthy to be studied by non-linear analyses.
6. Finally, from all of the contents mentioned above, general features in the design of cable-stayed girder bridges by non-linear analyses are discussed.

This study shows a progressive report of the whole research project on non-linear problems of cable-stayed girder bridges, and in future the final report will be presented.

* Department of Civil Engineering, Osaka University

** Department of Civil Engineering, Osaka University

*** Research Laboratory, KAWADA Industries Inc.