

非線形の効果を考慮した長大吊橋の影響線載荷計算法

A CALCULATION METHOD FOR LONG-SPAN SUSPENSION BRIDGES BY USING INFLUENCE-LINE
CONSIDERING NON-LINEAR EFFECT

江川定利* 古田秀博** 矢野久元***

By Sadatoshi EGAWA Hidehiro FURUTA and Hisamoto YANO

A new calculation method with influence-line for long-span suspension bridges is introduced in this paper. As they have geometrical non-linearities, it can't be calculated with influence-line. Therefore, after the loading positions and its intensities have been decided with influence-lines, the large number of finite displacement analysis are done with them. But this method needs enormous calculation time and very complicated working process. Furthermore, the calculation error is not clear. The new calculation method is proposed to solve them by changing the loading method.

Key Words: suspension bridges, influence-line, non-linearity

1. まえがき

長大吊橋は作用荷重による変形が大きく、変形がその剛性に影響を与えることから、荷重と変位や部材力の関係が線形とならない。しかし、設計に使用する変位や断面力の最大・最小成分は何千ケースにも及び、これをすべて有限変位解析により求めるのは不可能である。そこで、関門橋に始まり大鳴門橋、南北備讃瀬戸大橋を経て最近のレインボーブリッジに至るまで、長大吊橋の影響線載荷計算法には、初期剛性のみを考慮した線形化有限変位による影響線載荷計算法や、線形化有限変位解析により荷重載荷位置と荷重強度を決定し、この荷重を用いて再度、有限変位解析を行い、変位や断面力を求める計算法¹⁾が用いられてきた。線形化有限変位解析は、変形に伴う剛性の変化を考慮することはできないが、重ね合わせの原理が成り立ち、一般の橋梁のような単位荷重法による影響線解析を行うことができることから、解析時間を短縮することが可能である。しかしながら、この計算法は、比較的小規模で剛性の高い、すなわち幾何学的非線形性の小さい吊橋以外への適用には注意を要する。一方、文献1)の影響線載荷計算法は、載荷位置決定後に行う有限変位解析において、変形に伴う剛性の変化を考慮することはできるが、着目変位や断面力に対応する膨大な荷重ケースについて有限変位解析を行わねばならず、解析時間が膨大となってしまう。なお、この計算法は、活荷重が吊橋の変形挙動に与える影響は小さく、線形化有限変位解析によって活荷重載荷位置を決定しても

*	(株)横河技術情報・課長補佐	橋梁技術部	(〒273 船橋市山野町27番地
**	正会員 工修 (株)横河技術情報・課長	CAD・CAEシステム部	(同上)
***	(株)横河技術情報・課長	橋梁技術部	(同上)

有限変位解析によって決定したものの差が非常に小さいという仮定の上に成り立っている。しかし、この仮定の妥当性の検討に関する報告は現在のところほとんど見当らず、山村等²⁾が有限変位解析とMüller-Breslauの原理を組み合わせることでその計算精度と計算速度の改善を図った報告があるのみである。さらに、この計算法は、非線形剛性項（変形により発生する軸方向力に起因する剛性変化）を作り替えながら活荷重載荷位置を変化させ、これがある位置に収束するまで計算を繰り返すものである。ところが、最近の長大吊橋の解析は、解析時間の短縮と解析作業工数の低減および解析精度の向上を目的に完全な立体骨組モデル^{3) 4)}を使用する傾向にある。したがって、山村等の方法では、解析に要する時間と費用が膨大なものとなってしまう、長大吊橋に適用することは困難である。

そこで著者等は、従来から行なわれている初期剛性と変形に伴う剛性の変化を考慮できる影響線載荷計算法を基本にした新しい計算法⁵⁾を提案する。この計算法の特徴は、変形に伴う剛性の変化を厳密に考慮しながら影響線載荷計算法の利便性を利用できるため、従来の計算法に比べてかなり少ない計算量で精度の高い結果を効率良く求めることができる。したがって、吊橋を完全な立体骨組によりモデル化したとしても、解析時間と費用の面から見て十分に実用に耐えうるものである。なお、幾何学的非線形性の効果を考慮した影響線載荷計算法には、Perryの解法⁶⁾が古くから使用されてきている。しかしながら、①変断面、不等分布死荷重の影響を考慮できない、②補剛トラスは梁に置換する必要がある、③主ケーブルの形状は近似的に放物線と仮定し、塔・ハンガーなどの剛性、変形を無視している、④塔の部材力、反力は直接計算できない²⁾といった制限があるため、長大吊橋の詳細な解析に使用するのは困難と考えられる。

以下、本論文で提案する新しい計算法について説明するとともに、その計算精度と収束性について考察する。さらに、線形化有限変位解析による影響線載荷計算法および従来から行われてきた変形に伴う剛性の変化を考慮した影響線載荷計算法¹⁾の妥当性についても検証する。

2. 変形に伴う剛性の変化を考慮した従来の影響線載荷計算法^{1) 2)}

従来、吊橋の解析はコンピュータの計算速度、メモリーやディスク容量の限界、解析精度等を考慮した多数の解析モデルを用いて行われてきた。平面骨組モデルや立体骨組置換モデル等の簡略化した解析モデルの使用、および有限変位解析と線形化有限変位解析等の解析理論の使い分けはこれらを考慮したものである。一方、解析精度の面からは、立体骨組置換モデルで補剛トラスを一本の梁部材に置換する際、その断面のずれ変形やそり変形、補剛トラスのねじり剛性による荷重分配効果および荷重の同時載荷状態等を考慮するなど、解析精度向上への努力がなされてきた。このため、設計者は複数の解析モデルの作成、複数の適用理論の理解および解析結果の変換作業等を行うことになり、解析作業効率が悪いうえに異なる解析精度の結果を組み合わせた設計断面力を算出することとなり、その設計断面力の精度を把握することが困難となっている。

この問題を解決するため、吊橋を忠実な完全立体骨組モデルで表現することにより、従来用いられていた様々な仮定、置換処理、簡易計算を排除し、計算精度の向上と作業効率の改善を目指した計算法が考案されてきた。この計算法は、以下のような処理手順で実行される。

- ①橋梁の形状に忠実な立体骨組モデルを作成し、線形化有限変位解析により立体影響線の算出を行う。
- ②立体影響線を用いて荷重載荷位置と荷重強度を決定する。
- ③②の情報をを用いて節点荷重を生成する。
- ④節点荷重を鉛直成分とねじり成分に分解する。
- ⑤有限変位解析用に、立体骨組モデルから立体自由度成分を拘束した平面自由度成分（変位2、回転1）のみを持つ立体骨組平面成分モデルを作成する。
- ⑥鉛直荷重には立体骨組平面成分モデルを、ねじり荷重には立体骨組モデルを用いて解析する。
- ⑦⑥の情報を立体骨組モデルを基本としたファイルに格納する。

⑧⑦のファイルをもとに断面力や変位の後編集作業を行い、設計データを生成する。

しかし、コンピュータの能力の向上により大規模なモデルの解析が可能になったものの、その計算ケース数が膨大となる。このため、上記の計算法は、以下に示すような点について工夫されている。

この計算法において、扱わねばならない載荷計算ケース数とその組み合わせケース数は膨大なものとなることから、これを減らすための対策が必要となる。そこで、長大な吊橋の影響線形状が非常に滑らかで、近傍した節点において類似していることに注目すると、活荷重の載荷位置とその強度が設計上の判断からある誤差範囲内で同一のものとして分類することができる。この考え方に基づき、同一と分類された複数個の計算ケースを代表するものについてのみ計算することとして、計算ケース数の削減を図る。この分類処理は、影響線から生成された節点荷重の位置と荷重値を比較して行う。

また、長大な吊橋の立体骨組モデルによる解析は、その計算ケース数が多い場合ホスト・コンピュータにとっても負担が大きい。その上、吊橋の場合には変形挙動に幾何学的非線形性があるため有限変位解析を行わねばならず、負担はより一層大きくなる。そこで、吊橋のねじり荷重に対する変形の非線形性が小さいことに着目して、鉛直荷重には立体骨組平面成分モデルを用いた有限変位解析を、ねじり荷重には立体骨組モデルを用いた線形化有限変位解析を使用して計算時間を短縮する。

3. 変形に伴う剛性の変化を考慮した新しい影響線載荷計算法

従来の影響線載荷計算法は、前述のような計算上の工夫を行うことによって実際に多数の吊橋に適用されてきた。しかし、解析に投じた計算量や作業量は、こうした計算上の工夫にもかかわらず膨大なものであった。これは、一つの設計値を求めるために線形化有限変位解析を用いた影響線載荷計算と、それによって決定された着目変位や断面力成分に関する荷重強度と載荷位置を用いた有限変位解析を行わねばならないためである。そして、必要とする設計値を得るまでに複数の手順を経るため、煩雑な解析結果ファイルの操作作業が必要であるためである。

一方、解析精度の面からは、線形化有限変位解析を用いて計算した影響線形状がどの程度正しいものであるかという議論がほとんどなされていない状況である。この原因としては、①「線形化有限変位解析と有限変位解析によって決定される荷重強度と載荷位置がそれほど大きく違わないだろう。」という仮定②「従来の実績から特に大きな問題がない。」および③「この手法以外に適当な手法が見当たらないこと。」等が考えられる。

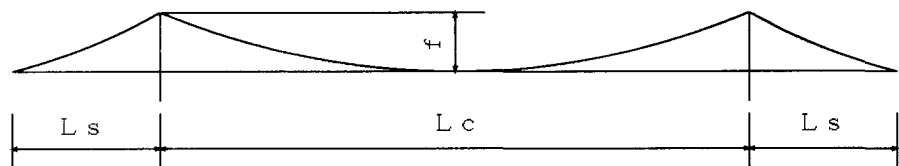
さらに、従来の影響線載荷計算法は、着目する変位成分あるいは断面力成分に関して、載荷領域内のすべての節点に単位荷重を載荷し、その影響度を与える影響線を求める。そして、この影響線から各成分の最大値や最小値を与える荷重の載荷領域と荷重強度を決め、これらを用いて有限変位解析を行うものである。しかし、吊橋は幾何学的非線形性を有していることから、このような重ね合わせの原理に基づく線形的な取り扱いをすることは困難である。すなわち、ここで得られた載荷領域は正しいものであるとは言い難い。そこで、著者等は上記の問題を同時に解決するため、次のような新しい計算法を提案する。

載荷荷重を線荷重と分布荷重とに分けて考えると、分布荷重は線荷重に比べて総量で大部分を占めるものとなる。一方、吊橋の幾何学的非線形性は、ケーブルの変形剛性に大きく依存していることから、分布荷重を先に載荷すると大部分の幾何学的非線形効果が出現してしまう。このため、後で載荷される線荷重による幾何学的非線形効果は非常に小さいものと考えることができ、従来の影響線を用いた載荷計算法と同様の方法で線荷重の載荷位置を決定することが可能である。これを検証するため、図-1にあるような吊橋モデルを表-1のような諸元⁷⁾で解析した。なお、このモデルの構造諸元は、日本の代表的な吊橋である若戸大橋、関門橋、平戸大橋、因島大橋、大鳴門橋、南北備讃瀬戸大橋、下津井瀬戸大橋、大島大橋、此花大橋および外国の代表的な吊橋についてまとめた長大鋼橋研究委員会の吊橋の実績調査報告書⁷⁾に基づき決定したもの

である。また、幾何学的非線形性に着目することから平面モデルとした。表－２は、この結果を示すもので、分布荷重の載荷位置を決定した後、これを載荷し、この載荷状態で線荷重を設計荷重の 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 倍だけ載荷した際の結果を示す。これらから、補剛桁に発生する断面力や変位に対する幾何学的非線形効果は、たとえ設計荷重の 2 倍の線荷重を与えた場合でも、せん断力で最大 0.021% と非常に小さく、設計荷重においてはほとんど影響が無いことがわかる。以下に本計算法の具体的な計算手順を示す。

- ①線形化有限変位解析を用いた単位荷重載荷法により着目成分の影響線を求め、この影響線を用いて分布荷重（実荷重強度）のみの載荷領域と荷重強度を決定する。
- ②①の情報を用いて有限変位解析を行う。
- ③②の変位後の剛性を用いて影響線を求め、線荷重の載荷位置を決定する。さらに、分布荷重についても載荷領域の補正を行う。
- ④③の計算の結果、変位や断面力成分が最大・最小となる載荷位置が決まり、各成分の最大・最小値が求まる。

この載荷計算で、さらに精度の高い結果を必要とする場合には、③で補正された載荷領域を用いて②～④を繰り返すことにより、非線形の効果を正確に取り入れることができる。



図－１ モデル図

表－１ 解析パラメータ^ア

パラメータ	報告書の値	本論文で使⽤した値
$\sqrt{(2Hd/EI)} * Lc$	0.0161Lc 10 (500m～600m) 20 (1100m～1200m) 30 (1500m～1800m)	20
Ls/Lc	0.2～0.5	0.25
Py/(Ms+2Mc)	0.1～0.38	0.1, 0.15, 0.2
Lc/f	9～11	10
Ms/Md	0.94-0.00021Lc	0.73
Py (tf)	1.84～5.32	2.688, 4.032, 5.376 8.064, 10.752
I (m ⁴)		4.0, 8.0
備考)		
EI : 曲げ剛性		
Lc : 中央径間長		
f : ケーブルサグ		
Mc : ケーブル重量 (単位長さ当たり)		
Md : 死荷重 (Ms+2Mc)		
Hd : 1 ケーブル当たりのケーブル水平張力		
Ls : 側径間長		
Py : 分布活荷重強度		
Ms : 吊構造重量 (単位長さ当たり)		

表-2 分布荷重載荷後の線荷重による非線形効果

補剛桁の曲げモーメント (t f・m)				
線荷重	0.5P ₀	1.0P ₀	1.5P ₀	2.0P ₀
線形化有限変位解析	13944.094	15545.869	17147.645	18749.421
有限変位解析	13944.361	15546.091	17147.506	18748.606
誤差 (%)	-0.002	-0.001	0.001	0.004
補剛桁のせん断力 (t f)				
線荷重	0.5P ₀	1.0P ₀	1.5P ₀	2.0P ₀
線形化有限変位解析	-125.983	-147.513	-169.044	-190.574
有限変位解析	-125.979	-147.502	-169.020	-190.534
誤差 (%)	0.003	0.007	0.014	0.021
補剛桁の鉛直変位 (mm)				
線荷重	0.5P ₀	1.0P ₀	1.5P ₀	2.0P ₀
線形化有限変位解析	-524.818	-565.326	-605.835	-646.343
有限変位解析	-524.829	-565.338	-605.836	-646.322
誤差 (%)	-0.002	-0.002	0.000	0.003
備考)				
誤差：(線形化有限変位解析／有限変位解析-1.0) x100 (%)				
P ₀ ：設計荷重 (P ₀ =102 t f)				

ここで用いる非線形計算法には、反復過程における剛性方程式の係数行列を一定に保ったまま計算を進めていく修正Newton法あるいはvon Mises 法を用いる。この計算法は、剛性行列の変更による作り直しがないため、計算時間の点で有利であるが、反復過程での収束性が悪いという欠点を持っている。しかし、吊橋のように幾何学的非線形性がそれほど小さくなく、荷重載荷によって非線形性が小さくなっていく構造物の場合、収束性は特に問題とはならず、その利点の方が大きいと考えられる。

一方解析時間について考察すると、変位および断面力成分の1つだけに着目した場合、従来の計算法は分布荷重と線荷重を同時に載荷し有限変位解析を1回だけ行えばよいのに対して、本計算法は分布荷重を有限変位解析を用いて載荷し、線荷重の載荷位置と分布荷重の載荷領域の補正を線形化有限変位解析を用いて行うことから、計算時間の増加は避けられない。しかし、従来の計算法は、分布荷重の載荷領域が同じでも線荷重の載荷位置が異なれば別の荷重ケースとして有限変位解析を行う必要があるのに対して、本計算法では同一ケースと判断し、1ケースの有限変位解析と線形化有限変位解析を行うだけでよく、計算ケース数を大幅に減ざることができるという利点を有している。なお、これを検討するため、やはり図-1にある解析モデルを表-1の諸元⁷⁾で解析し、どの程度にグルーピングされるかを調べてみた。その結果、表-3で示すように、1パネル内に影響線のクロッシングがあるものを同じ載荷状態と判断すると、その全載荷ケースは、平均43.6%に減少し、さらにその範囲を2パネルに広げると26.4%に減少することがわかる。すなわち、約1/4ケースに着目した有限変位解析を行うだけでよいことになり、本計算法は従来の計算法よりその計算ケース数、すなわち解析時間を大幅に減少させることができる。また、表-4に示すように、分類の範囲による影響を1パネル内側から2パネル外側の範囲についてLc/4点の曲げモーメントに着目した検討を行ったが、ほとんど誤差がないことがわかる。

表-3 影響線のグルーピング

1 パネル内に影響線のクロッシングがある場合のグルーピングの状況																	Gc/Ac (%)
G p		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	18	49	56		
グルーピング数	ケーブル張力		2												1	5.0	
	ハンガー張力	4	2											1		12.3	
	補剛桁の曲げモーメント	13	30		3	1		1			1	1				41.7	
	補剛桁のせん断力	60														100.0	
	補剛桁の鉛直変位	26	8	1	1			2								60.3	
	合計	102	42	1	4	1	0	2	1	0	1	1	0	1	1	43.6	
2 パネル内に影響線のクロッシングがある場合のグルーピングの状況																	Gc/Ac (%)
G p		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	18	49	56		
グルーピング数	ケーブル張力		2												1	5.0	
	ハンガー張力	4	2											1		12.3	
	補剛桁の曲げモーメント		3		12		5						2			18.3	
	補剛桁のせん断力	20	20													66.7	
	補剛桁の鉛直変位	11	2	4	2	2				2						36.5	
	合計	35	27	4	16	2	5	0	0	0	2	0	2	1	1	26.4	

備考)

G p : 同じ載荷状態であると判断できる載荷荷重ケースの数
G c : グルーピング後の全載荷荷重ケース数
A c : グルーピング前の全載荷荷重ケース数

例)

G p の5は、5成分が同じ載荷状態となっていることを示している。
グルーピング数の5は、同じ載荷状態となっているグループが5個あることを示している。
例えば、1 パネル内に影響線のクロッシングがある場合のケーブル張力について考えると、G p = 2には2グループ、G p = 5 6には1グループのケースが存在していることを示している。よって G c は2 + 1 = 3 ケース、A c は2 * 2 + 5 6 * 1 = 6 0 ケースとなり、G c / A c (%) = 3 / 6 0 * 1 0 0 = 5 %となる。
G p = 2 の場合、図に示すように影響線①と②のクロッシング位置は、主桁の1 パネルの範囲内にあるため同一載荷状態と判断する。

1 パネル長

表-4 分布荷重载荷範囲の影響

	①	②	③	④
L c / 4 点の曲げモーメント (tf・m)	14345.032	14329.319	14330.433	14326.023
誤差 (%)	0.112	0.0	0.008	-0.023
備考)				
① : 1 パネル内側に分布荷重を载荷				
② : 正確に载荷				
③ : 1 パネル外側に分布荷重を载荷				
L c : 中央径間長				
誤差 : { (①, ③, ④) / ② - 1.0 } x 100 (%)				

4. 数値計算例

ここでは、図-1のような中央径間長1000mの3径間吊橋を用いて計算を行う。このモデルは、表-1のように $\sqrt{(2Hd/EI)} * Lc$ を20、側径間長と中央径間長の比を0.25、スパンとケーブルサグの比を10、全死荷重と吊構造重量の比を0.73とし、活荷重と死荷重の比0.1と0.2に対して、活荷重が約5tf/mとなるように断面2次モーメントIを決定した。活荷重と死荷重の比を0.1とした補剛桁の曲げ剛性は、トラス型式に、また、0.2は箱桁型式に対応した値である。本論文では、以上の諸元を用いて、活荷重と死荷重の比0.1, 0.15, 0.2について、中央径間の1/4、1/2点および側径間の1/2点の位置での値に着目し比較検討を行った。

なお、本計算法および従来の載荷計算法の解析精度を把握するために、山村等の計算法²⁾と類似した有限変位解析を用いた載荷計算を以下の手順によって行った。

①線形化有限変位解析を用いた単位荷重載荷法により着目成分の影響線を求め、この影響線を用いて分布荷重の載荷領域と荷重強度、線荷重の載荷位置と荷重強度を決定する。

②①の情報を用いて有限変位解析を行う。

③②の変位後の剛性を用いて影響線を求め、分布荷重の載荷領域と線荷重の載荷位置の補正を行う。

④③で補正された値を用いて有限変位解析を行う。

⑤着目した変位や断面力成分の値が収束するまで③と④を繰り返す行う。

この載荷計算は、有限変位解析を行った繰り返し計算法であるため解析精度は良くなるものの、1つの変位および断面力成分ごとに載荷計算が必要であり、載荷計算には数回の有限変位解析を行う必要があることから解析時間は膨大となる。

また、上記の計算は立体平面成分モデルに対して①と②のみ行えば従来の計算法と同じであり、分布荷重のみに着目して計算を行えば本論文で提案する計算法と同じとなる。

(1) 従来の影響線載荷計算法における幾何学的非線形性の効果

従来の影響線載荷計算法における幾何学的非線形性の効果を確認するために、従来の影響線載荷計算法とこれから有限変位解析を省略した載荷計算法を使用して計算した。その結果、表-5からわかるようにケーブル張力、ハンガー張力については、箱桁型式、トラス型式ともに2つの計算法にほとんど違いは見られなかった。しかし、補剛桁の曲げモーメント、せん断力、鉛直変位については表-6、表-7および表-8からわかるように活荷重と死荷重の比が0.1, 0.15, 0.2と大きくなるにつれて誤差が大きくなり、曲げモーメントと鉛直変位は最大約11%の誤差が見られ、せん断力は最大約4%の誤差が見られた。曲げモーメントに着目すると最小値の方が最大値の誤差よりも大きく、側径間については最大値は誤差はほとんど見られないが、最小値では約3%~約11%の誤差が見られた。次にせん断力に着目すると、中央径間では最大値、最小値とも誤差はほとんど同じであった。ところが、側径間では最大値の誤差は非常に小さいものの最小値は約2%~約3%の誤差となった。また、鉛直変位に着目すると、中央径間では最大値の方が最小値の誤差よりも大きくなった。側径間では最大値の誤差はほとんど見られないものの、最小値では約3%~約11%となった。

表－５ ケーブル張力およびハンガー張力の比較

	トラス型式の誤差 (%)						箱桁型式の誤差 (%)					
	ケーブル			ハンガー			ケーブル			ハンガー		
L/D	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2
0.10	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.15	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1
0.20	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1
備考) Lc : 中央径間長 Ls : 側径間長 L : 活荷重強度 D : 死荷重強度 誤差 : (有限変位解析を含まない従来の計算法 / 有限変位解析を含む従来の計算法 -1.0) x100 (%)												

表－６ 補剛桁の曲げモーメントの比較

	トラス型式の誤差 (%)						箱桁型式の誤差 (%)					
	最大値			最小値			最大値			最小値		
L/D	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2
0.10	2.0	2.3	-0.4	4.4	5.3	4.6	2.1	2.2	-0.3	3.1	4.2	3.5
0.15	3.0	3.5	-0.4	6.5	8.0	7.7	3.1	3.5	-0.3	4.6	6.5	5.7
0.20	4.0	4.7	-0.3	8.7	10.7	10.8	4.1	4.6	-0.3	6.2	8.7	7.9
備考) Lc : 中央径間長 Ls : 側径間長 L : 活荷重強度 D : 死荷重強度 誤差 : (有限変位解析を含まない従来の計算法 / 有限変位解析を含む従来の計算法 -1.0) x100 (%)												

表－７ 補剛桁のせん断力の比較

	トラス型式の誤差 (%)						箱桁型式の誤差 (%)					
	最大値			最小値			最大値			最小値		
L/D	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2
0.10	2.3	1.7	0.1	2.0	2.2	2.2	2.1	1.7	0.0	1.9	1.7	1.7
0.15	3.4	2.5	0.1	3.0	3.3	3.3	3.2	2.5	0.0	2.9	2.5	2.5
0.20	4.6	3.3	0.1	4.1	4.4	4.5	4.4	3.3	0.1	4.0	3.3	3.4
備考) Lc : 中央径間長 Ls : 側径間長 L : 活荷重強度 D : 死荷重強度 誤差 : (有限変位解析を含まない従来の計算法 / 有限変位解析を含む従来の計算法 -1.0) x100 (%)												

表－8 補剛桁の鉛直変位の比較

	トラス型式の誤差 (%)						箱桁型式の誤差 (%)					
	最大値			最小値			最大値			最小値		
L/D	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2	Lc/2	Lc/4	Ls/2
0.10	3.1	4.1	-0.4	0.7	2.9	4.5	2.9	3.7	-0.4	0.9	2.5	3.4
0.15	4.8	6.3	-0.4	1.1	4.5	7.5	4.4	5.7	-0.3	1.4	4.0	5.5
0.20	6.4	8.5	-0.3	1.6	6.1	10.6	5.9	7.7	-0.3	2.0	5.4	7.7
備考) L c : 中央径間長 L s : 側径間長 L : 活荷重強度 D : 死荷重強度 誤差 : (有限変位解析を含まない従来の計算法 / 有限変位解析を含む従来 の計算法 - 1.0) x100 (%)												

(2) 中央径間の1／4点の曲げモーメントに着目した計算法の比較

表－5～8の結果より、曲げモーメントの最大値の幾何学的非線形性の効果について着目すると、中央径間の1／4点での影響が大きいことから、この点の曲げモーメントに着目し、従来の影響線載荷計算法およびこれから有限変位解析を省略した線形化有限変位解析による載荷計算法、本計算法および有限変位解析による載荷計算法について 較検討を行った。吊橋は、その中央径間長が長くなるにつれて補剛桁がトラス型式となることが多くなるため、本検討ではトラス型式に対応する剛性を使用した。また、幾何学的非線形の影響を確認するために活荷重と死荷重の比を0.15とした。本計算法については表－9からわかるように収束計算が1回目で得られた値と収束した値を比較すると差が十分に小さいことから、収束計算を1回のみ行った値を用いて比較検討を行った。表－10は、各計算法の結果を比較したものである。この表からわかるように、本計算法と従来の影響線載荷計算法は有限変位解析を省略した載荷計算法に比べて、有限変位解析を用いて厳密に解析した結果に非常に近い結果を示している。このことから、本検討モデルでは幾何学的非線形の影響による載荷領域の差が十分に小さいものと判断できる。

表－9 本計算法と有限変位解析との比較

	1 回目	2 回目	収束値
L c / 4 点の曲げモーメントの誤差 (%)	-0.01	0.02	0.02
備考) L c : 中央径間長 誤差 : (本計算法 / 有限変位解析 - 1.0) x100 (%)			

表－10 各計算法の比較

	①	②	③	④
L c / 4 点の曲げモーメント (tf・m)	14842.838	14323.950	14329.319	14331.308
誤差 (%)	3.569	-0.051	-0.014	0.0
備考) ① : 従来計算法 (有限変位を含まない) ② : 従来計算法 (有限変位を含む) ③ : 本計算法 ④ : 有限変位解析 L c : 中央径間長 誤差 : { (①～③) / ④ - 1.0 } x100 (%)				

5. あとがき

有限変位解析による計算法と比較しても十分解析精度が高く、計算時間を実用の範囲に抑えることができる新しい長大吊橋の計算法を提案した。この計算法の特長は、吊橋の特性を考慮することにより影響線載荷計算法の中に幾何学的非線形の効果を取り入れたことにある。

本論文では、従来の計算法と本計算法を比較し、解析精度と作業性について検討した。その結果、有限変位解析の結果を真の値と仮定してそれぞれの結果を比較したところ、両計算法は、有限変位解析の結果に非常に近い値となった。しかし、従来の計算法は載荷領域の誤差が不明確であるのに対して、本計算法では載荷領域の誤差を明確にして補正を行っている点でより合理的な計算法と言える。なお、本検討では、有限変位の影響による載荷領域の差が小さく、本計算法および従来の計算法とも解析精度が高い結果を示したが、活荷重と死荷重の比が大きくなり有限変位の影響による載荷領域の差が大きくなると、従来の計算法では載荷領域の補正を行っていないために解析誤差が大きくなる可能性がある。さらに、本計算法は、1回の収束計算で十分な精度を得ることができるため、従来の計算法に比較して計算時間の増加は僅かなものとなっている。また、載荷位置の決定処理を線荷重と分布荷重に分離したことによって、従来の計算法と比べて同一と見なせる載荷状態が多く、計算ケースを大幅に減らすことが可能である。

以上から、長大吊橋の解析に完全な立体骨組モデルを使用しても十分に処理可能であり、解析対象物のモデル化に伴う様々な仮定、置換処理および簡易計算等の解析誤差の要因を排除できるとともに、解析作業の自動化率を高めることができ、十分な効率化を図ることが可能である。

参考文献

- 1) 飯田勝, 石村久治, 古田秀博, 小林達: 長大吊橋の構造計算システム, 横河橋梁技報, No. 15, pp. 34~41, 1986. 1
- 2) 山村信道, 長谷川紀夫: 有限変形法による吊橋の影響線解析, 橋梁と基礎, pp. 32~39, 1982. 10
- 3) 白石典之, 古田秀博, 石村久治, 飯田勝: 長大吊橋の新解析システム, 横河ブリッジ技報, pp. 188~192, 1992. 1
- 4) 林正, 前田研一, 増井由春, 内海靖, 山野長弘: 長径間吊橋の立体有限変位解析, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 329~342, 1991. 3
- 5) 江川定利, 古田秀博, 矢野久元: 長大吊橋の影響線解析法に関する一提案, 鋼構造年次論文報告集, 第1巻, pp. 449~pp. 456, 1993. 7
- 6) 川田忠樹: 長径間吊橋の理論と計算, 1969. 3
- 7) “吊橋の実績調査報告”(第4次報告書), 長大鋼橋研究委員会, 1991. 8

(1993年9月16日受付)