

【システム解説】

斜張橋の最適ケーブルプレストレス自動決定システム

Automatic Determination System of Optimum Cable Prestress
for Cable-Stayed Bridges

中崎俊三*
Shunzo NAKAZAKI

片山哲夫**
Tetsuo KATA YAMA

内海靖***
Yasushi UCHIUMI

越後滋****
Shigeru ECHIGO

斎藤道生*****
Michio SAITO

谷脇一弘*****
Kazuhiro TANIWAKI

1. まえがき

近年、斜張橋はますます大型化する傾向にあり、構造形式もマルチファン型に代表されるように多段ケーブルを用いた不静定次数の高い構造物が次々と計画および建設されつつある。また、斜張橋は、優美さと経済性を兼ね備えた橋梁である。その構造特性は、プレストレスという内部不静定力の導入により、構造各部、特に主桁の応力状態を比較的自由に設定できる特性を有している。しかし、その反面広範囲な自由度のために、構造各部の最適パラメータの選定は非常に繁雑なものとなっている。

特にプレストレスの決定においては、設計時に考慮すべき制約条件を満足するよう試行錯誤により行っているのが現状であり、ケーブル本数の少ない小規模の斜張橋に関しては比較的容易にプレストレスを決定する事が可能であるが、ケーブル本数が多くなるに従い、考慮すべき制約条件の数も増加し、プレストレスの決定に多大な労力を要することとなる。さらに、この操作は部材剛度などの変更に伴い必然的に繰り返されるものであり、最適ケーブルプレストレスを自動的に決定することができるのは設計支援システムの開発が望まれる。

斜張橋の総合的な最適設計を行うためには、設計プレストレスの最適化のみならず部材断面の最適化も同時に実行なければならない。しかしその場合、性質の異なる設計変数、考慮すべき制約条件の増加など複雑な問題の取り扱いとなり最適解が得られる保証はない。実際問題としては、それぞれを独立して取り扱う多段階最適化問題として考える方がより実用的であろう。

本システムは、斜張橋の総合的な最適設計を行うため

の一次レベル問題として、最適ケーブルプレストレスの決定問題を取り扱い、経済効果が十分期待できるようなプレストレスを自動決定する設計支援システムである。

本システムで採用した手法における基本的プロセスは、山田らにより提案された方法¹⁾、すなわちひずみエネルギー最小の目的関数を設定し、単位プレストレスによる影響値を用いた繰り返し計算により最適ケーブルプレストレスを決定する方法である。本文はさらに、設計者の意図を十分反映できるように各目的関数に重み係数を導入し、この重み係数を種々変化させることにより設計者の経験的判断をも伴った目的関数を任意に設定できるようにした。さらに、本システムでは、任意部材の断面力が許容値以下となるような複数の制約条件も取り扱いが可能であり、完成時のみならず架設時応力状態も考慮した最適ケーブルプレストレスを決定できるなどの特長を有している。

本報告は、システムの概要および数値計算例を通してその有効性と特長について述べるものである。

2. システム概要

図-1に最適ケーブルプレストレス自動決定システムの概略フローチャートを示す。

本システムは、平面骨組解析プログラム (KASUS/PLANE)、最適ケーブルプレストレス決定プログラム (KASUS/PREST) および、変位・断面力図化プログラム (KASUS/ZUKA) より構成されている。

KASUS/PRESTは、KASUS/PLANEにより計算された死・活荷重断面力および各ケーブルの単位プレストレスによる影響値など諸データを、DATA FILEを介して自動的に受け渡されることにより膨大な量の入力

*川田工業株技術本部設計部次長 **川田工業株技術本部設計部設計部長橋課係長 ***川田工業株技術本部設計部長橋課

****株システムエンジニアリング技術部技術二課課長 *****株システムエンジニアリング大阪支社営業課係長

*****株システムエンジニアリング大阪支社技術課

データを効率よく処理している。また、得られた最適ケーブルプレストレス応答値はDATA FILEを介してKASUS/ZUKAに自動的に受け渡され図形処理される。

以下KASUS/PRESTの概要については次章3.で述べる。KASUS/PLANE,KASUS/ZUKAの概要については文献^{2),3)}を参照されたい。

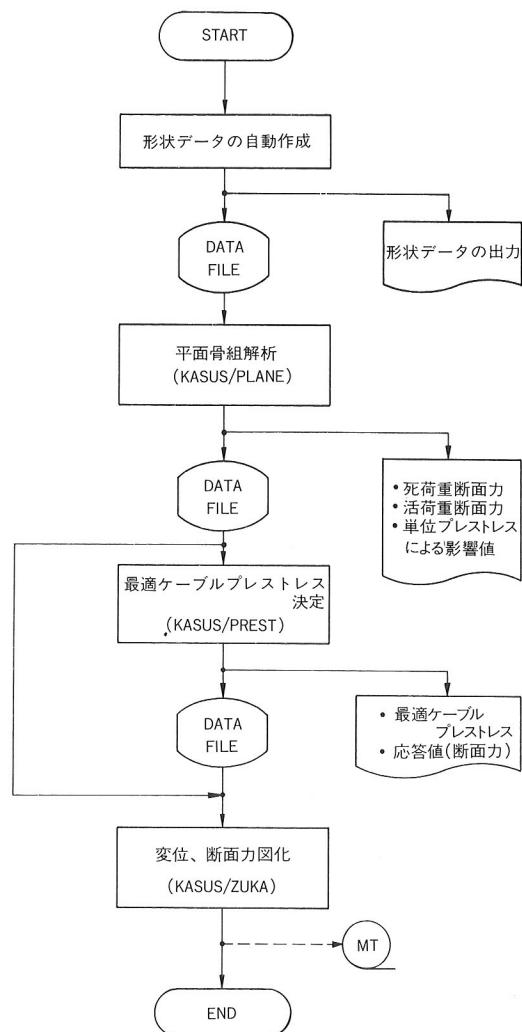


図-1 概略システムフローチャート

3. 最適ケーブルプレスト決定プログラム (KASUS/PREST) の概要

一般に、ケーブルプレストレスの導入目的としては、
① 死荷重(D)+活荷重(L) (最大値、最小値)+
プレストレス(Ps) 状態において桁および塔の断面力を均等かつ最小とする。

② 死荷重+活荷重(最大値)+プレストレス状態においてケーブル張力をなるべく均等化する。

などが考えられている。また、①、②の目的を満足するようなプレストレスを決定する際に考慮しなければならない制約条件としては、

③ 死荷重状態において塔に曲げモーメントが生じな

い。

- ④ ケーブル引張許容張力から定まる上限制約および、いかなる荷重組合せにおいてもケーブル張力が圧縮とならないようなケーブル張力(プレストレス)の下限制約を満足する。
- ⑤ 前死荷重状態において架設閉合部材の断面力をできるだけゼロに近づける。
- ⑥ 任意着目部材の断面力が完成時あるいは架設時応力状態から定まる許容値と等しくなる、もしくはそれ以下となるようなプレストレスを決定する。

などが挙げられる。ここに、③、④はプレストレスに関する制約条件であり、⑤、⑥はプレストレスの線形関数として表わされる制約条件である。

①の目的を満足するプレストレスの決定法としては、種々の研究が報告^{1),4),5)}されているが、いずれの方法も主桁のひずみエネルギーを最小とするような、言い換ればケーブル定着点を支点とする連続桁としての断面力分布となるようなプレストレスを得ようとするものであることが論じられている。

③～⑥の制約条件の大半に対処するために星型は、モデル化による方法を述べているものの、構造解析の結果生じる断面力の足し合せを複数の解析モデルに対して行う必要がある。

そのため、本プログラムでは、KASUS/PLANEより自動的に受け渡された断面力および、影響値を用いて最適化計算によりプレストレスを決定する方法を採用することとした。①を満足する目的関数としては、山田らにより提案されている③の制約条件を考慮したひずみエネルギー最小を考え、制約条件としては、④のケーブル張力に関する上・下限制約および⑤、⑥に関する複数の等号あるいは不等号線形制約条件を考慮した。また、②のケーブル張力を均等化する目的に関しては、ケーブル張力の平均値と各ケーブル張力の差分の二乗和を最小とする目的関数を設定する。

①、②に対する目的関数を同時に最小化する場合、①のひずみエネルギー最小とする目的関数のプレストレスに対する感度(偏微係数)は、②のケーブル張力を均等化する目的関数に対する感度に比べて非常に鈍感なため、一方的に②の目的を満足した最適解が得られることとなり、目的関数のオーダーを一致させるようなスケーリングを行う必要がある。そのため、本プログラムでは、各目的関数に重み係数を導入し、設計者がこの重み係数を任意に選択することにより種々の最適解が得られるようにした。最終的に、最適ケーブルプレストレスの決定は、上述の方法により求めた各最適解に対する断面力図などを利用し設計者の経験的判断に委ねられることとなる。

図-2に最適ケーブルプレストレス決定プログラムの概略フローチャートを示す。

本プログラムでは、非線形問題に最も能率的と言わされているヘッセの行列を用いたニュートン法により最適解の決定を行った。また、複数の等号あるいは、不等号線形制約条件を考慮した最適解の決定に際しては、ラグランジュ関数を導入し、このラグランジュ乗数をニュートン法で改良することにより最適解を決定する双対法⁷⁾を適用した。

これらの理論の詳細な記述については紙面の都合により別の機会に譲ることとするが、この双対法は、従来のSLP法のように目的関数の線形近似を行う必要はなく非常に最適解への収束性が良好であり、4.で述べる計算モデルの最適解を得るために必要とした繰り返し回数はいずれのケースにおいても3回程度であった。

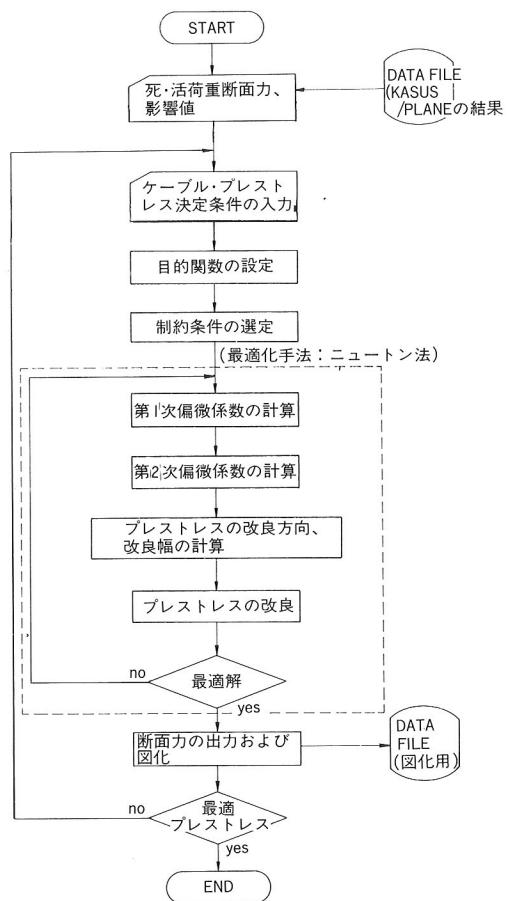


図-2 概略プログラムフローチャート

4. 数値計算例

本システムの数値計算例として、既に供用を開始している橋梁⁸⁾を参考に、図-3に示すような中央径間350mのハーブ型3径間連続斜張橋を対象に最適ケーブルプレストレス決定計算を行った。

数値計算ケースは、

- ① ケース1：桁のひずみ重み係数（軸力=1, 曲げ

モーメント=1), 塔のひずみ重み係数（軸力=1, 曲げモーメント=1）

② ケース2：桁のひずみ重み係数（軸力=0, 曲げモーメント=1), 塔のひずみ重み係数（軸力=1, 曲げモーメント=1）

③ ケース3：ひずみ重み係数は②と同様とし、上二段、下二段のケーブル張力を均等化する重み係数として0.0001を設定する。

④ ケース4：ひずみ重み係数は②と同様とし、死荷重状態において主桁④点の曲げモーメントを0とする。さらに、死荷重+活荷重+プレストレス状態においてケーブル張力を3,500ton以下とする。

以上の4ケースについて行う。ここに、ひずみ重み係数は、各部材の軸力もしくは曲げモーメントに対するひずみエネルギーに乗ずる重み係数を示し、1の場合考慮、0の場合無視することを示している。また、上記いずれのケースにおいても、死荷重状態において塔に曲げモーメントが生じない条件は必然と考慮されている。

数値計算結果を表-1および図-4に示す。表-1は最適ケーブルプレストレス量および最終ケーブル張力を各ケースについて表したものである。また、図-4には、本システムにより得られたプレストレスの実用性を示すため、プレストレス導入前、導入後の主桁曲げモーメント図を示した。

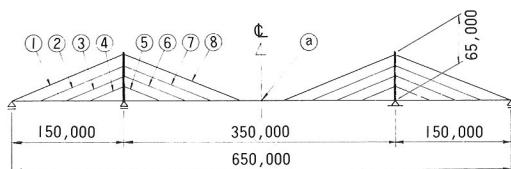


図-3 計算モデル

表-1 最適ケーブルプレストレス量および最終ケーブル張力

	ケーブル No	D+L(+)	PS	D+L(+) +PS		ケーブル No	D+L(+)	PS	D+L(+) +PS
ケ ス 1	①	3,386	302	3,688	ケ ス 3	①	3,386	-202	3,184
	②	2,260	-266	1,994		②	2,260	700	2,960
	③	1,766	381	2,147		③	1,766	-29	1,737
	④	1,257	556	1,813		④	1,257	534	1,791
	⑤	1,270	529	1,799		⑤	1,270	507	1,777
	⑥	1,827	332	2,159		⑥	1,827	-78	1,749
	⑦	2,282	-315	1,967		⑦	2,282	651	2,933
	⑧	3,081	373	3,454		⑧	3,081	-131	2,950
ケ ス 2	①	3,381	322	3,708	ケ ス 4	①	3,386	114	3,500
	②	2,260	-279	1,981		②	2,260	831	3,091
	③	1,766	364	2,130		③	1,766	-536	1,230
	④	1,257	863	2,120		④	1,257	977	2,234
	⑤	1,270	836	2,106		⑤	1,270	950	2,220
	⑥	1,827	315	2,142		⑥	1,827	-586	1,241
	⑦	2,282	-328	1,954		⑦	2,282	783	3,065
	⑧	3,081	393	3,474		⑧	3,081	185	3,266

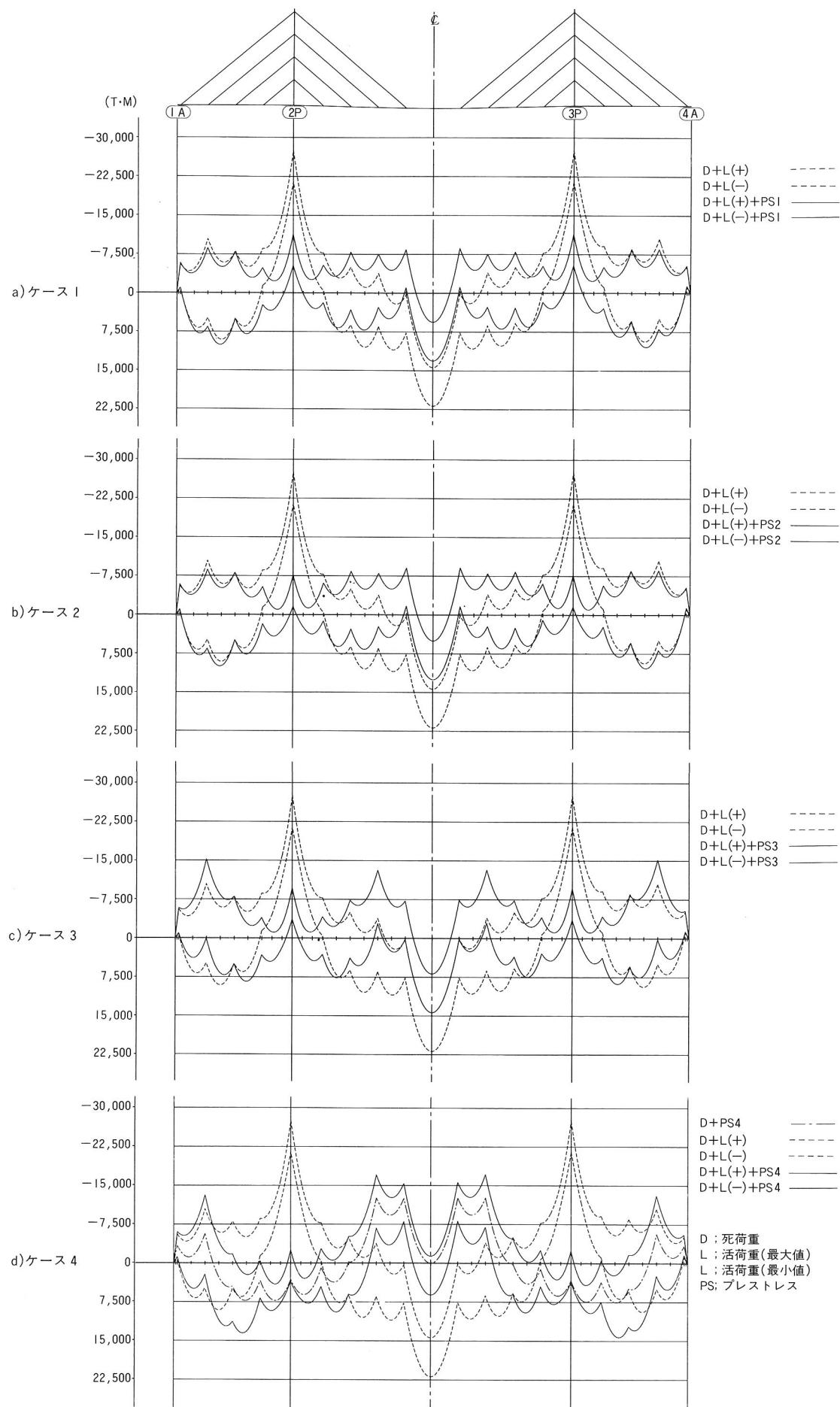


図-4 各ケーブル張力(プレストレス)による主桁曲げモーメント図 図化例

5. あとがき

本文は、今回開発を行った斜張橋最適ケーブルプレストレス自動決定システムの有効性と特長について述べたものである。

本システムは、最適ケーブルプレストレスの自動決定だけでなく、使用者が入力した任意のプレストレスに対する応答計算も行うことが可能である。また、斜張橋設計・架設支援システム-KASUS-の中に組み込まれているシステムであるため、完成時のみならず架設時に生じる種々の制約を考慮した最適ケーブルプレストレスを容易に決定することができる。

今後は、部材断面の最適化問題まで考慮した総合的な斜張橋最適設計システムに拡張していく方針である。

参考文献

- 1) 山田・古川・江草・井上：斜張橋ケーブルの最適プレストレス量決定に関する研究、土木学会論文集、No.356, 1985.
- 2) 前田・内海・斎藤：斜張橋の設計支援システムと施工管理システム、土木学会第10回電算機利用に関するシンポジウム論文集、1985.
- 3) 野村・中崎・内海・前田・斎藤：吊橋・斜張橋の設計、架設計算プログラムシステム-KASUS-, 橋梁, Vol.21, No.5, 1985~9回連載。
- 4) 星埜：斜張橋のケーブルプレストレスの一計算方法、土木学会論文集、No.374, 1986.
- 5) 長井・赤尾・佐野・井澤：3径間連続マルチケーブル斜張橋の基本形状決定に関する一考察、土木学会論文集、No.362, 1985.
- 6) 前田・林・鞆：斜張橋の最適設計法、JSSC, 第13回マトリックス解析法研究発表論文集、1979.
- 7) 大久保・谷脇：双対理論および部材のSuboptimizationによるトラス構造物の最適設計法、土木学会論文集、No.350, 1984.
- 8) 阪神高速道路公団編：大和川橋梁工事誌、1984.