

【プログラム紹介】

ケーブル橋梁構造（吊橋、斜張橋） の設計、架設計算プログラム

Analysis Program for Design and Construction of Suspension Structure

野村国勝 *
Kunikatsu NOMURA
 中崎俊三 **
Shunzo NAKAZAKI
 内海靖 ***
Yasushi UCHIUMI
 前田研一 ****
Kenichi MAEDA

1. まえがき

本州四国連絡橋計画が実施段階に移行し、長径間吊橋、斜張橋の設計、施工が、我国において本格化しつつある。本プログラム [KASUS - Kawada's Suspension Structure Analysis Program] は、そのような情勢の下に、ケーブル橋梁構造（吊橋、斜張橋）の設計、架設計算プログラムとして開発されたものである。

本プログラムは、次の特徴を有するものである。

- ①骨組構造物としての有限要素法および有限変位理論に基づくマトリックス構造解析法によるものである。
- ②Renumbering 機能を応用し、構造特有の規則性、データファイルの規準化などによって、完成系の入力データ作成の省力化を図っている。
- ③設計上の独特的な仮定を満足する無応力長、形状などの初期状態の入力データは、自動的に作成される。
- ④大次元連立方程式の解法としてコレスキー・ウェーブフロント法も適用しており、外部メモリーを使用すれば、トラス構造の吊橋補剛桁あるいは斜張橋主桁を対象とすることができる。
- ⑤固定荷重解析のみならず、影響線計算および線形補間による最大、最小値計算などの設計計算を実行できる。
- ⑥特有の幾何学的非線形問題である吊橋主ケーブルの2次応力および斜張橋ケーブルのサグの影響も考慮した架設計算を実行できる。
- ⑦立体骨組に関する入力データを追加することによって、汎用プログラム NASTRAN のデータデックが自動的にファイルされ、各架設段階での3次元固有振動解析を実行できる。

本文は、本プログラムの概要を、これらの特色に特に着目しながら、説明するものである。

2. プログラムの構成

図-1に、プログラムの構成図を示す。この図からわかるように、Subprogram-I（入力データ作成）

Subprogram-II（設計計算用）および Subprogram-III（架設計算と3次元固有振動解析用）によって構成されている。

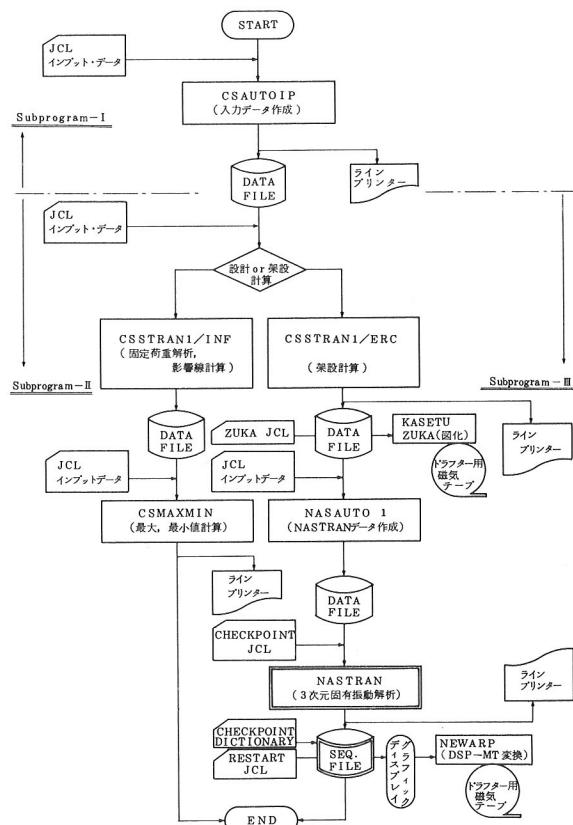


図-1 プログラムの構成図

3. Subprogram-I（入力データ作成； CSAUTOIP）

3-1 Renumbering 機能の応用

本プログラムは、メモリーサイズの縮少、および、演算時間の短縮を図り、節点番号のリナンバリング機能¹⁾

*川田工業技術本部技術部部長 **川田工業技術本部技術部長大橋課課長 ***川田工業技術本部技術部長大橋課 ****川田工業技術本部研究室

を有している。ユーザーが与えた任意の大小関係を表わす節点番号は、連続なもの(External Sequence No.)に変換された後、CM法あるいはGPS法によって、指示した要素(Band, Wave, Frontなど)を縮少するもの(Internal Sequence No.)にリナンバリングされる。すなわち、各節点は3通りの節点番号を付されていることになる。したがって、ユーザーは任意の不連続な節点番号を与えることができ、節点番号の変更、追加などが非常に容易である。しかも、従来とは異なって、演算結果の出力に際しては、ユーザーが与えた番号が用いられることから、データ処理も容易である。

なお、部材番号の場合も、リナンバリング機能には無関係であるが、単なる大小関係のみから連続なものに変換される。したがって、同様に不連続な部材番号付けでもよく、その変更、追加が非常に容易な他、種類別の番号付け(例えば、補剛桁、主桁部材は1000番台、主塔部材は2000番台など)も可能である。

3-2 完成系のデータ作成の省力化

完成系のデータ作成は、構造特有の規則性の活用、共通化、および、データファイルの標準化などを行うことによって、最大限の省力化がなされている。

例えば、前節で述べたようにユーザーによる節点番号付けは任意であることから、放物線勾配の桁の等間隔の節点に関して連続な節点番号を付し、両端および中央のみの節点座標、分割数のみを入力すれば、他の節点座標のデータが同時に算定される。また、トラス桁の場合には、上・下弦材、斜材および垂直材の各種部材の両端の節点番号のデータは、適当な節点、部材番号付けによって、規則性のパターンの指定、および、特定の部材のそれらのデータを入力するのみで、容易に算定される。さらに、断面の等しい部材の諸量および強度の等しい部材等、分布・節点集中荷重のデータなどは、そのグループ単位で効率よく入力される。

なお、作成された入力データはデータファイルに記憶されるが、本プログラムではカード・イメージを用いており、ファイル上でのデータの修正、変更も可能である。

3-3 初期状態のデータ作成の自動化

本プログラムでは、後述するような有限要素法および有限変位理論に基づく解式が組込まれていることから、吊橋、斜張橋に特有の設計上の仮定を満足するために、

各部材の無応力長、および、各節点の初期状態での座標のデータが必要であるが、以下に述べるような算定法で、入力された完成系のデータから自動的に作成される。

3-3-1 吊橋の場合

吊橋の場合は、主ケーブルがハンガーを介して補剛桁の全死荷重を担う条件を満足するとすれば、補剛桁は所定の完成形状で無応力状態であり、製作長、製作キャバーに対応する所要無応力形状を算定する必要はない。また、エンドリンクおよびタワーリンクの所要無応力長は、完成形状に対応する所定の位置に定着された状態で補剛桁の両端パネルの全死荷重の各々半分に相当する張力を有することから、容易に逆算される。

しかしながら、主ケーブルについては、所定の完成形状に対応するものとして、一般には、主径間のサグが既定されているのみであり、補剛桁の全死荷重を担う条件、および、完成時に主塔が直立する条件を満足する完成形状、完成時張力を事前に算定し、製作長に対応する所要無応力長を逆算する必要がある。そして、算定された完成形状に対応する所定の位置に定着された状態で補剛桁の全死荷重に相当する張力を有することから、ハンガーの所要無応力長が逆算される。また、主塔についても、完成時に直立する条件を満足するとすれば、主ケーブルの算定された完成時張力の鉛直方向成分およびタワーリンクの張力は軸方向力としてのみ作用することから、所要無応力長が逆算される。

そこで、ここでは、主ケーブルの完成形状、完成時張力の算定法について、概略を説明する。

まず、主径間のサグが既知であるとすれば、各節点の橋軸方向の座標は補剛桁のパネル間隔から自動的に決定されていることから、主ケーブルの両端の節点およびサグを与えられた節点の3節点における釣合い条件によって、(各部材について一定である)張力の水平成分および両端の部材の張力の鉛直方向成分の値が求められる。したがって、主ケーブルの中間の各節点には補剛桁の全死荷重に相当する鉛直方向荷重のみが作用することから、各部材の張力の鉛直方向成分および各節点の鉛直方向座標の値は釣合い条件によって両端から順次に求められ、完成時張力、完成形状が算定されることになる。さらに、側径間については、完成時に主塔が直立する条件によって各部材の張力の水平成分は主径間のものと共通であり、両端の2節点における釣合い条件から、両端の部材の張

力の鉛直方向成分の値が求められる。そして、主径間と同様にして、各部材の張力の鉛直方向成分および各節点の鉛直方向座標の値が順次に求められ、完成時張力、完成形状が算定されることになる。また、スプレーサドルの可動方向の角度およびバックステイ部の主ケーブルの完成時張力も、スプレーサドル上の節点における釣合い条件から算定される。ただし、これらの算定に用いた主ケーブルの死荷重の仮定値と、算定された所要無応力長に対応して補正された値との差異が無視できない場合には、補正された値を新たな仮定値として、同様の算定法を反復して適用しなければならない。

3-3-2 斜張橋の場合

斜張橋の場合は、ケーブルの製作長に対応する所要無応力長、および、主桁、主塔の製作長、製作キャンバーに対応する所要無応力形状が、事前に算定されていなければならない。そこで、ここではこれらの算定法について概略を説明する。

ケーブルの所要無応力長は、主桁・主塔の完成形状に対応する所定の位置に定着された状態でプレストレスを含む所定の完成時張力となる条件から算定される。したがって、ケーブルの形状を直線形状とすれば容易に逆算されるが、死荷重の分布によるサグの影響を考慮して放物線形形状とする場合には、非線形のケーブル方程式を解くことによって算定される。

一方、主桁・主塔の所要無応力形状は、ケーブルの完成時張力・死荷重に対応する外荷重（明らかにケーブルの形状には無関係である）を載荷された状態で、所定の完成形状となる条件から算定される。したがって、ケーブルを除去した完成形状の主桁・主塔の仮想モデルを対象として、次のような反復収束計算によって算定される。すなわち、まず最初に、完成形状の仮想モデルに死荷重およびケーブルの張力に対応する外荷重を載荷して生じる各節点の変位を幾何学的非線形性を考慮して求め、それと絶対値が等しく、符号が逆の量だけ完成形状から隔った位置に無応力形状を仮定する。次に無応力形状に再び同じ荷重を載荷し、それによる変形形状と完成形状との差異に相当する節点変位について、同様に絶対値が等しく、符号が逆の量だけその無応力形状から隔った位置に新たな無応力形状を仮定する。以後、同様の計算を、仮定した無応力形状に載荷して得られる変形形状と所定の完成形状との絶対誤差が所要の許容値以内に収束する

まで、繰り返し反復する。

4. Subprogram-II(設計計算:CSSTRA N1/INF, CSMAXMIN)

4-1 固定荷重解析

有限変位理論の発達に伴って、平面骨組構造物としての吊橋、斜張橋の多くの解式^{2), 3)}が発表されているが、それぞれ、有限要素法に基づく多項式の変位関数および有限変位理論に基づく変位-ひずみ関係式を用いた解式によって容易に一般化されるものである。したがって、本プログラムには、有限要素法および有限変位理論に基づいて、着目した変形状態での変形後の座標系に関する総ひずみエネルギーから誘導された剛性、接線剛性マトリックス⁴⁾が組込まれている。また、せん断剛性を考慮した補正も可能である。

固定荷重解析は、これらの解式を用いて、増分法および反復法を併用した混合法⁵⁾によって行われる。そして、多元連立方程式の数値計算法としては、バンド・マトリックス表示式に対するGauss Elimination法、および、Cholesky Factorization-Wave Front Solution法⁶⁾の両者から一方を選択できるようになっている。特に、後者では、外部メモリーによる読み込みと書き込みによって部分構造化することも可能であり、内部メモリーを効率的に使用できるとともに、解析可能な構造系の大きさの制約も大幅に軽減される。

4-2 影響線の計算

各種の節点変位および部材断面力の影響線は、設計基準温度での死荷重時および活荷重満載時の両者の場合の平衡状態での接線剛性マトリックスによって線形化された2種のものが計算される。

さらに、温度変化、温度差、支点変位および製作、架設時の誤差などの各種の要因による影響値も必要に応じて計算され影響線の計算結果とともに、データファイルにカード・イメージで記憶される。

4-3 最大値、最小値の計算

着目する節点変位、部材断面力を指定し、設計活荷重の種類、強度が与えられれば、各々の最大値、最小値、および、載荷状態が計算される。本プログラムでは、道路荷重の線荷重、分布荷重はもちろん、鉄道荷重に対応して載荷長が指定された等分布荷重なども取扱うことが

可能である。また、死荷重時、活荷重満載時の両者の場合の影響線による結果を用いて、吊橋の場合（斜張橋の場合には、両者の差異がほとんどないこともあり、安全側の値を探る）には、撓度理論に基づく Peery の影響線解法⁷⁾におけるものと同様の手法によって、無次元パラメータに関する線形補間が施される。

さらに、各種の要因による影響値を用いて、それぞれの絶対量も算定される。

5. Subprogram-III(架設計算と3次元固有振動解析: CSSTRAIN/ERC, NASAUTO 1, NASTRAN)

5-1 架設計算

架設計算是、通常の計算法にしたがって、完成時の平衡状態を初期状態として順次に桁を取り除く計算を、仮設荷重、架設ヒンジなども考慮し、各架設段階について連続的に行うことによる。適用される式、数値計算技法などは、4-1の固定荷重解析の節で説明したものと全く同様である。

本プログラムでは、ケーブル橋梁構造特有の幾何学的非線形問題である吊橋の主ケーブルの2次応力⁸⁾、および、斜張橋のケーブルのサグ^{9), 10)}の影響を考慮した非線形解析さらには比較のための線形解析も可能である。

また、計算結果は各架設段階ごとにカード・イメージでデータファイルに記憶された後、図化処理を行えば、ドラフターなどに描画することもできる。図-2は、ドラフターによる架設段階図の描画の一例であり、図から

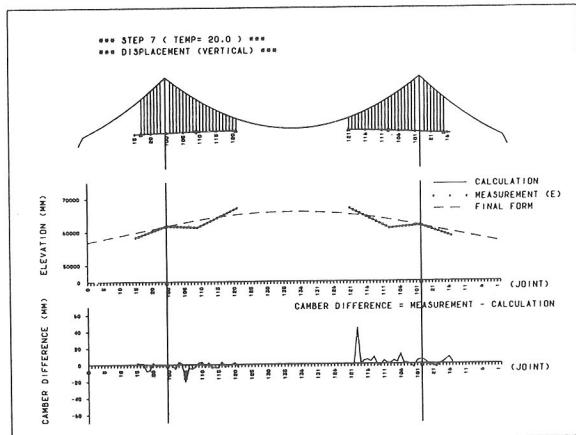


図-2 ドラフターによる架設段階図（理論、実測値）の描画の一例

わかるように、理論計算値に加えて、実測値も図示できるようになっている。

5-2 3次元固有振動解析

前節に説明したように、各架設段階での計算結果はカード・イメージでデータファイルに記憶されるが、その際に、変形後の節点座標、部材断面力の他に、各部材の断面諸量および両端の節点番号などのデータも同時に記憶される。本プログラムでは、これらのデータに、3次元問題に関するものを新たに入力して加えれば、構造特有の規則性から、NASTRAN による3次元固有振動解析のためのデータデック¹¹⁾が自動的に作成される。ここで、吊橋の主ケーブル、ハンガー、および、斜張橋のケーブルの張力の影響は、DEFORM カードによって考慮される。

固有値問題は Givens 法、Determinant 法あるいは Inverse Power 法によって解かれ、NASTRAN 特有の図化処理機能を用いれば、グラフィックディスプレイ、ドラフターなどに描画することも容易にできる。図-3 は、グラフィックディスプレイによるある架設段階のモード図の描画の一例である。

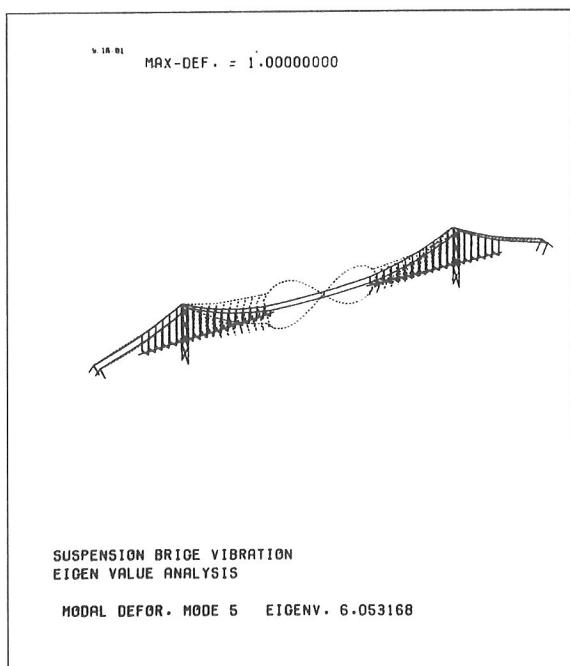


図-3 グラフィックディスプレイによるモード図の描画の一例

6. あとがき

本文は、当社が開発した長径間橋梁形式であるケーブル橋梁構造（吊橋、斜張橋）の設計、架設計算プログラムの概要について述べたものである。

本プログラムは、本文で述べたように従来のものにはなかった多くの特徴を有しており、鉄道、道路併用の長径間吊橋および斜張橋などの実用計算にその効果が大いに発揮されるものと思われる。

なお、本プログラムは既に吊橋および斜張橋の架設計算、3次元固有振動解析に実際に適用され、十分な成果を上げている。そして、前者の場合には、架設現場において、ホストコンピュータと専用回線でオンラインされたマイコンによってデータの入力および変更、計算実行の指示を与え、フロッピーディスクに転送される図化データを用いてX-Yプロッタに描画し、即時に実測値と対照させる施工管理システムに供されている。

また、現在、本プログラムをモード重畠法あるいは直接積分法による線形化および非線形動的応答解析プログラムに拡張し、走行荷重（L荷重、鉄道荷重）による応答、渦励振（風琴振動）による限定振動のシミュレーションを実行するプログラム（KASUS/DYNA）を開発中であるが、これについては次回に報告する予定である。

参考文献

- 1) 古賀・南：「NASTRAN Level 1 5.1 0 の新機能」，ユニバック研究会第10回構造解析事例発表会報告集，1980.
- 2) 日本鋼構造協会編：「吊構造」，コロナ社，1975.
- 3) 小西一郎編：「鋼橋・設計編II」，丸善株式会社，1975.
- 4) 前田・林・中村：「増分法による平面骨組構造物の大変形解析の加速計算法」，土木学会論文報告集，No. 223, 1974.
- 5) 土木学会編：「土木工学における数値解析／変形応力解析編」，サイエンス社，1974.
- 6) Bathe, K. J. and E. L. Wilson: 「Numerical Methods in Finite Element Analysis」, Prentice-Hall, Inc., 1976, (菊地文雄訳：「有限要素法の数値計算」，科学技術出版社，1980.)
- 7) Peery, D. J. : 「An Influence Line Analysis for Suspension Bridges」, Proc. of ASCE,

ST11, 1960.

- 8) 前田・林・前田：「主ケーブルの2次応力を考慮した吊橋の有限変位解析」，土木学会論文報告集，No. 315, 1981.
- 9) 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.
- 10) 前田・林・前田：「斜張橋の設計における非線形問題」，第24回構造工学シンポジウム論文集，1978.
- 11) 日本ユニバック編：「NASTRAN—ユーザーのための手引書—」，1972.