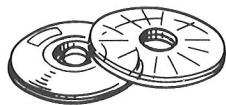


システム解説



長径間吊橋の設計支援システム

Computational Design System for Long-Span Suspension Bridge

越後 滋*
Shigeru ECHIGO

藤江和久**
Kazuhisa FUJIE

山野長弘***
Nagahiro YAMANO

杉原 賢治***
Kenji SUGIHARA

内海 靖****
Yasushi UCHIUMI

勝俣 盛*****
Mori KATSUMATA

1. まえがき

吊橋の設計計算に適用される構造解析法は、明石海峡大橋を頂点とするわが国の長大吊橋架橋の歴史とともに大きく変遷してきた。

平面解析についていえば、撓度理論に基づく解析法にはじまり、補剛トラスを等価な梁に置換した骨組モデルに対する線形化有限変位解析法へ移行し、現在では、補剛トラスを忠実にモデル化した骨組モデルを対象とする有限変位解析法が、設計計算はもちろん、架設計算においても中心的な位置を占めるようになった。

一方、立体解析については、平面解析とは比較にならない大容量の演算を行うため、補剛トラスを等価な梁に置換した骨組モデル（いわゆる魚骨モデル）に線形化有限変位解析法を適用するのが一般的であり、有限変位解析結果が報告され始めるようになったのは明石海峡大橋の施工計画が具体化して以後である。

この背景には、その工事規模の大きさから経済設計の観点にたって、より厳密な解析法を適用したいという設計サイドからの要望のほかに、最近のコンピュータ技術の目覚ましい進歩が挙げられる。この結果、数万自由度に及ぶ大容量の演算処理がパソコンやワークステーションでも可能になってきており、長大吊橋の設計計算における立体解析に対して有限変位解析法を適用する環境も、かなり整ってきたといえる。

このような状況のもと著者らは、すでに立体有限変位解析プログラムを開発し、その概要や適用例を文献1)および2)に報告している。その後、前後処理プログラムなどを整備し、さらに活荷重処理プログラムや地震応答解析プログラムとも連動させて、設計支援システムと

しての体裁を整えてきた。

本文は、立体有限変位解析プログラムを中心とする設計支援システムの解析機能および処理機能の特色について述べるものである。

2. システムの概要と特色

解析プログラムには、通常の初期形状および初期応力計算法に加えて、安定な収束性を確保するための解法として有限回転を考慮した解析法を適用し、より一般的な形で解式を誘導し組み込んでいる。また、本解析プログラムは初期不整を考慮することができ、特異点解析の機能とあわせて構造系の安定解析にも対応可能である。また、ウインドシューなどの特殊な部材のモデル化に対応できるように、非線形解析における従属節点の処理のための計算式も新たに誘導し組み込んでおり、さらに、特殊要素として緩衝要素、間隙要素を追加し特殊な構造モデルにも対応できるようになっている。

このほかにも、架設計算を連続的に実行できる機能、補剛トラスを立体魚骨モデルに置き換えた場合でもトラス部材の断面力として出力できる機能、影響線解析による活荷重処理機能などを有しており、膨大な量の入出力データの処理や図化処理などを行う前後処理プログラムと、地震応答解析プログラムをあわせて、吊橋の設計支援システムとして整備されている。

以下に、上述の各解析機能と前後処理プログラムの処理機能について説明する。

(1) システムの構成

設計支援システムの構成を図-1に示す。改めて本システムの有する解析機能を列挙すれば次のとおりである。

① 任意形骨組線形解析（静・動解析）

*川田テクノシステム(株)取締役開発部長 **川田テクノシステム(株)開発部開発一課係長 ***川田テクノシステム(株)開発部開発一課 ****川田工業(株)技術本部長大橋課 *****川田工業(株)技術本部中央研究室

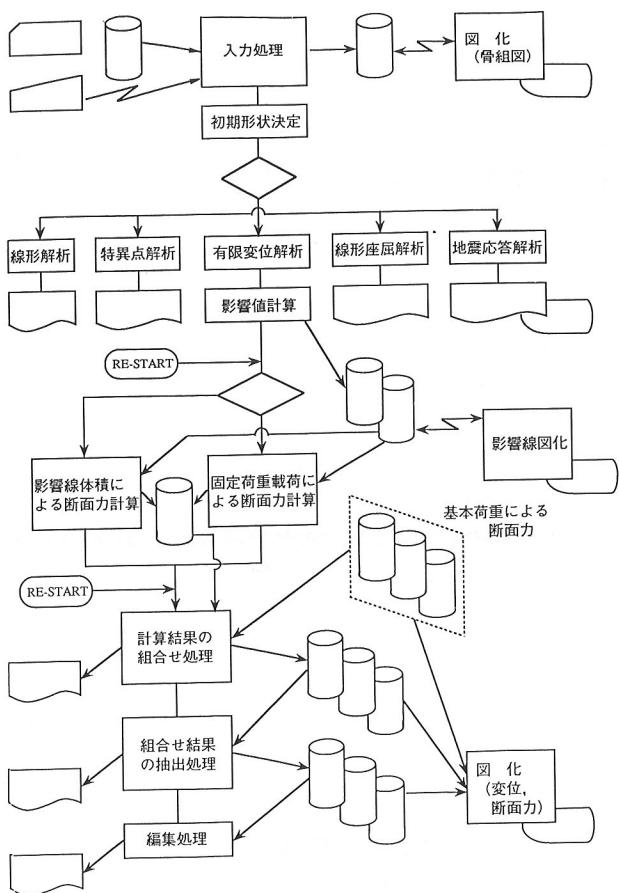


図-1 吊橋設計支援システムの構成

- ② 任意形骨組幾何学的非線形解析
- ③ 吊橋、斜張橋などの初期形状解析
- ④ 吊橋、斜張橋などの初期応力解析
- ⑤ 影響線解析（線形・非線形）
- ⑥ 弾性安定解析（特異点解析）
- ⑦ 線形座屈解析
- ⑧ 地震応答解析

なお、これらはすべて同一の入力データによって解析することができる。

(2) 形状データの自動作成とチェック機能

リナンバリング機能を有しているため、節点、部材番号を任意につけることができる。また、膨大な量の入力データについては作業の省力化のため種々の自動生成機能やコピー機能を設けるとともに、入力データをチェックする機能や図化機能を応用して、入力ミスによる誤計算を可能な限り排除できるようにしている。

(3) 解析機能

a) 初期形状（初期応力）解析

吊橋や斜張橋の解析では構造解析の前に、死荷重における特有の設計条件を満足させるための初期形状が事前に決定されなければならない。

本解析プログラムでは、主ケーブル等の初期形状決定計算、および、主塔の初期形状決定のための反復計算が、

入力作業などの数値計算全体の効率性からマトリックス法のプログラムに組み込まれており、初期形状データが自動生成される。計算式は非対称吊橋にも適用できる一般化された手法である。なお、初期形状決定法について文献1)に詳述しているので参照されたい。

一方、斜張橋の初期形状決定の際には、初期応力解析（完成形状での平衡状態において生じる初期応力を求める）によってケーブルの設計プレストレスを導入した初期形状決定が可能である。

b) 固定荷重

本解析プログラムで考慮できる荷重は次のようにある。

- ① 自重
- ② 分布荷重、集中荷重
- ③ プレストレス荷重、部材の伸び量および縮み量
- ④ 温度荷重
- ⑤ 節点変位

c) 特殊機能

本解析プログラムでは、梁、トラス要素など通常の解析要素のほかに、より実際に近い解析を行うために次の特殊要素を準備している。

- ① 緩衝要素：部材軸力の抵抗値（上・下限値）を入力し、この値を超えた場合にはその部材を切断する。非抗圧材、非引張材、ステイなどのモデル化に使用できる。
- ② 間隙要素：部材両端の節点間距離が設定長より短くなったときに機能する間隙のある要素。ストッパーなどのモデル化に使用できる。
- ③ 境界要素：斜め支承に用いる。
- ④ 無応力長の変更
- ⑤ 断面性能および座標値の誤差量

d) 数値解法

非線形解析における問題の一つに、収束状態の判定がある。汎用プログラムでは、いわゆるブラックボックス的な部分になるわけであるが、独自に開発した本解析プログラムではその数値計算法が明確であり、収束判定条件として絶対誤差を与える方法と相対誤差を与える方法のいずれかを指定することにより、結果に対する妥当な評価が可能である。本解析プログラムでは、非線形解析のための数値解法として次の解法を選択できる。

- ① 反復法：Newton法、修正Newton法
 - ② 増分法：荷重増分法、変位増分法、推定増分法
- これらの中から構造物の非線形性状に適した解法を選ぶことにより、数値計算の効率化を図ることができる。
- また、構造全体の解析では要素の自由度から各節点ごとの自由度を調べ、解析に必要な自由度のみを用いた剛性行列を自動的に作成する。この手法によって、剛性行

列が大幅に縮小され、消去演算に要する時間が著しく短縮される。

(4) 影響線処理

任意点の変位、反力、断面力に着目した活荷重による最大・最小値を計算することができる。図-2は活荷重載荷概念図である。本システムでは、有限変位解析による活荷重処理法と影響線体積による活荷重処理法の2つの方法を選択することができる。

有限変位解析による計算法はまず、任意の荷重載荷状態にある構造系において、主構上で単位荷重を移動させることによって影響線縦距を求める。次に、この影響値を着目成分別に並べ換えたあと活荷重の載荷範囲を自動的に決定する。これを固定荷重として載荷して、有限変位解析を行うものである。

一方、線形化有限変位解析法に準じた活荷重処理法としては、前述した影響値を用いて着目断面力の影響線体積を計算し活荷重断面力を計算するものである。

これら一連の計算中、影響値計算結果はファイルに出力されているため、着目成分のみ変更して何度も計算することができる。この結果、必要な断面力にのみ着目した計算が可能となり、莫大な量になる計算に対して効率化を図っている。

なお、本システムでは単位荷重の載荷方向や荷重強度は任意に選ぶことができることから、風荷重などの影響線的な取扱いについても対応可能である。

(5) 架設計算

架設系の計算時に特に必要な機能として、本システムでは次の機能を有する。

- ① 節点および部材の追加、除去が可能である。
- ② 支点の追加、除去が可能である。
- ③ 部材（材料）特性値を変更することができる。
- ④ 部材結合条件を変更することができる。

これらの解析機能によって完成系からフリーケーブル状態まで、各架設ステップを順に追った架設解体計算を連続的に実行することができる。

(6) 地震応答解析

本設計支援システムでは、前述したように有限変位解析の入力データをそのまま用いて動的解析を行うことができる。本システムが有する動的解析の機能と特徴は次のとおりである。

- ① 線形固有値解析
- ② 応答スペクトル解析 (CQC法、RMS法)
- ③ 時刻歴応答解析
- ④ 位相差を考慮できる

応答解析においては、道路橋示方書などに規定されたスペクトル、地震波のほかに、任意のスペクトルおよび任意の地震波も考慮できる。また、減衰定数の取扱いと

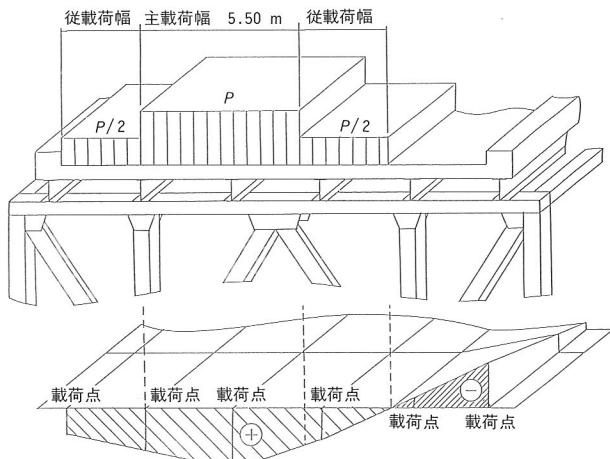


図-2 活荷重載荷概念図

して運動エネルギーに依存する場合とひずみエネルギーに依存する場合のいずれかを選ぶことができる。

(7) 梁-トラス間の変換

実際の設計において常に補剛トラスを忠実にモデル化した解析を行う必要はなく、目的に応じてそれを等価な梁で置き換えた魚骨モデルで解析する場合も考えられる。このような場合には、梁-トラスの換算式^{3), 4)}を用いて剛度変換および断面力変換を行うことにより、魚骨モデルで得られた断面力をトラスモデルの各種部材の軸力に自動変換することができる。

(8) 出力処理

完成系、架設系で計算された結果は、集計表作成プログラムにより各荷重ケースにおける断面力の組合せ、割増係数による常時換算、および複数の荷重組合せ内の最大・最小値の抽出が可能である。また、変位、断面力の図化処理プログラムにより、任意の荷重ケースにおける変位図や架設系ごとの変化量を表した架設変位図、および抽出断面力に対する断面力図などを図化することができる。

図-3, 4は、それぞれ固定荷重載荷時の上・下弦材軸力図および面外荷重に対する塔頂水平変位の影響線図を示している。さらに、断面力集計表として図-5は、架設時断面力抽出集計表の出力例を示したものである。これらの図表は、成果品として設計計算書等にそのまま

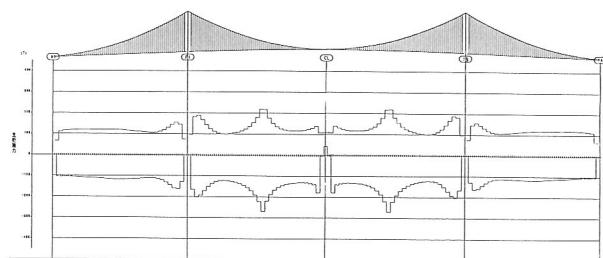


図-3 固定荷重載荷時上・下弦材軸力図

水平変位の影響線(着目点1067)

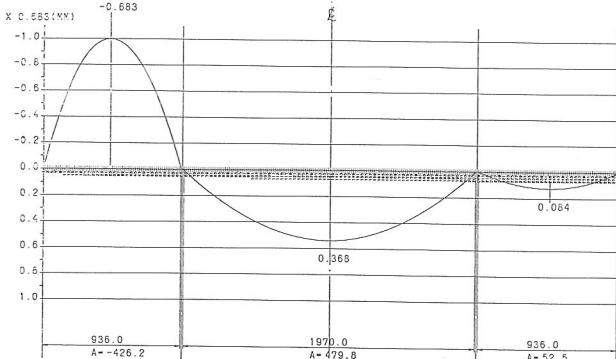


図-4 塔頂水平変位影響線図

上 弦 材 緩 力

部材番号	201	202	203	204	205	206	207
(+) 最大値	703.8	250.1	720.3	222.2	712.5	230.4	712.7
(-) 最小値	-2852.6	-2512.4	-2214.6	-1936.7	-1623.2	-1269.4	-775.1
STEP1-1	---	---	---	---	---	---	---
STEP1-2	---	---	---	---	---	---	---
STEP1-3	---	---	---	---	---	---	---
STEP2-1	235.6	---	---	---	---	---	---
STEP2-2	203.8	---	---	---	---	---	---
STEP2-3	194.4	---	---	---	---	---	---
STEP2-4	194.2	---	---	---	---	---	---
STEP3-1	186.2	---	---	---	---	---	---
STEP3-2-1	185.9	---	---	---	---	---	---
STEP3-2-2	183.7	---	---	---	---	---	---
STEP3-3-1	183.1	---	---	---	---	---	---
STEP3-3-2	181.0	---	---	---	---	---	---
STEP4-1-1	175.3	---	---	---	---	---	---
STEP4-1-2	221.5	---	---	---	---	---	---
STEP4-2-2	215.6	---	---	---	---	---	---
STEP4-3-1	211.0	---	---	---	---	---	---
STEP4-3-2	208.9	---	---	---	---	---	---
STEP4-4-1	207.7	---	---	---	---	---	---
STEP4-4-2	703.8*	---	---	---	---	---	---
STEP5-1-1	331.5	-2.7	---	---	---	---	---
STEP5-1-2	41.3	-2.8	---	---	---	---	---
STEP5-2-1	5.3	-2.9	---	---	---	---	---
STEP5-2-2	457.0	-4.4	---	---	---	---	---
STEP5-3-1	410.8	221.2	198.3	---	---	---	---
STEP5-3-2	388.3	220.8	198.2	---	---	---	---
STEP5-4-1	376.1	-19.5	230.6	---	---	---	---
STEP5-4-2	121.2	250.1*	199.9	---	---	---	---
STEP6-1-1	-98.6	-137.8	720.3*	-2.9	---	---	---
STEP6-1-2	488.9	231.4	718.0	-3.0	---	---	---
STEP6-2-1	361.5	167.3	717.8	-3.1	---	---	---
STEP6-2-2	221.3	154.0	716.5	-3.7	---	---	---
STEP6-3-1	586.9	98.6	352.0	-4.1	---	---	---
STEP6-4-1	480.8	-129.3	70.9	222.2*	203.4	---	---
STEP6-4-2	365.7	-257.1	650.1	219.2	203.1	---	---

図-5 架設時断面力集計表出力例

使用できるものである。なお、集計表の出力形式については、利用者の要望によって自由に変更することができる。

3. あとがき

開発された解析プログラムは、明石海峡大橋級の長径間吊橋について、補剛トラスを立体トラスモデルに忠実に置き換えた全橋モデルを対象とする場合でも、完成系および任意の架設系における立体有限変位解析が可能である。また、主ケーブル等の初期形状決定は解析的に行われ、主塔のそれについても幾何学的非線形性を考慮していることから、全部材を組合せて全体構造を解析することにより、吊橋特有の設計条件を完全に満足することができる。

さらに、影響線処理機能や種々の特殊要素、梁-トラスの変換機能、豊富な集計・図形処理機能および地震応答解析プログラムとの連動などとあわせて、吊橋の設計計算に立体有限変位解析法を適用する場合でも十分対処することができる。また、本支援システムを構成しているプログラムは、著者らが開発したものであり、構造系の

モデル化の際に解析プログラムの変更等が余儀なくされた場合でも柔軟に対応することができる。

なお、末筆ながら本設計支援システムの完成にあたっては、長岡技術科学大学・林 正教授に多大なご指導と貴重なご助言をいただいたことをここに記し、心より感謝の意を表します。

また、東京都立大学・前田研一助教授には本設計支援システムの開発にあたり極めて有益なご助言を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.1, 37A, 1991.
- 2) 斎藤道生・山野長弘・千原申三・前田研一・内海 靖・勝俣 盛：長径間吊橋の立体有限変位解析に関する研究、川田技報、Vol.11/JAN., 1992.
- 3) 本州四国連絡橋公団：昭和48年度本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査報告書（別冊6 吊橋のねじり解析）、土木学会、1973.
- 4) 本州四国連絡橋公団：昭和51年度本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査報告書（別冊2 トラス橋の解析）、土木学会、1976.