

紹介

ケーブル部材を含む骨組の有限変位解析プログラム

細見 雅生¹⁾ 吉村 文達²⁾

最近、斜張橋やニールセン橋などケーブル部材を含む橋梁の建設が盛んである。これらの橋梁形式の解析方法として、ケーブル部材をトラス部材として扱う線形解析と、ケーブル部材（非抗圧部材）を含む骨組の有限変位解析があり、両解析法が、橋梁の特性や架設時の変形量などを考慮して選択、併用されている。本文では後者のケーブル部材を含む骨組の有限変位プログラムである「LARGE-C」および「SHIM」についての紹介を行う。また、線形解析結果を用いて上記の有限変位解析プログラムの初期条件を決定する方法をあわせて紹介する。

まえがき

LARGE-Cは平面骨組の有限変位解析プログラムであり、次のような特徴を持っている。

- はり部材の他にケーブル部材（非抗圧部材）の扱いが可能である。
- ケーブル部材に発生する初期張力、はり部材の初期軸力がある場合、それらの力による系全体の変形を計算する。すなわちバランス計算を行う。またアンバランスのまま計算を開始する事も可能である。
- 架設時の解体計算が可能である。

SHIMは立体骨組の有限変位解析プログラムであるが、斜張橋やニールセン橋などのケーブル張力調整のための最適シム量を算出する機能を持っている。その特徴としては、

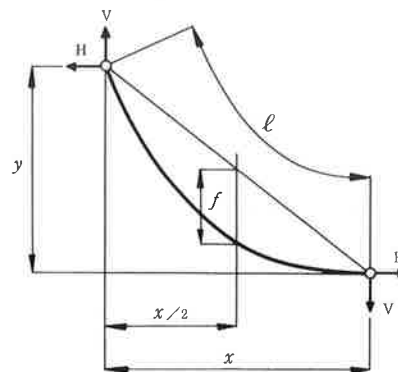
- LARGE-C同様、はり部材の他にケーブル部材の扱いが可能である。
- ケーブル部材に発生する初期張力のバランス計算を行う。
- 立体骨組を使用しているので、片主構面のシム調整による立体的効果が考慮出来る。
- 最適シム量計算には、共役勾配法を用いた最適化手法を用いている。

記号の説明

本文で用いるケーブルに関する記号を以下に示す。

- w : ケーブルの単位重量（無応力時に w_0 ）
- x : " 水平固定間距離
- y : " 鉛直 "
- H : ケーブル張力の水平成分
- V : " 鉛直成分
- l : ケーブル弧長
- Δl : ケーブルの弾性のび量
- l_0 : ケーブル無応力長
($l_0 = l - \Delta l$)
- f : サグ
- ψ : 無次元パラメータ

$$\psi = \frac{w \cdot x}{2 \cdot H}$$



1) 大阪橋梁技術部 設計第2課副課長 2) 大阪橋梁技術部次長

1. LARGE-C の概要

有限変位解析についてはよく知られているので説明を省略し、ここではプログラム中でのケーブル部材の扱い方について説明する。ケーブルは一様な自重を持つカテナリー形状のケーブルとして扱い、基本式は文献1)による。ケーブルの初期入力条件として下記の項目が必要である。

- ①ケーブル定着点の座標 (X)
- ②無応力時の単位重量 (w_0)
- ③断面積 (A)
- ④無応力長 (l_0)、水平力 (H)、サグ (f) の1つ選択

④に示すように、 l_0 、H、 f の3つの条件の内いずれを使用してもよいという特徴を持っている。プログラム内部では無応力長 (l_0) を計算し、以降の計算では l を参照している。ケーブルの入力条

件としてH、 f が与えられた場合の l_0 の計算フローを図-1、図-2に示す。Hが与えられた場合の l_0 の計算はケーブルの製作長を決定する時にも使用出来る。図中の ψ は

$$\psi = \frac{w \cdot x}{2 \cdot H} \dots\dots\dots(1)$$

定義されるケーブルの特性を示す無次元パラメータである。

図-3にプログラム全体の計算フローを示す。ケーブル部材を扱うため下記の機能を持っている。

- ①ケーブル部材の接線剛性行列の計算
- ②つり合い力計算のための、変形後の座標、増分変位、ケーブル条件 (w_0 、A、 l_0) よりケーブル部材の割線剛性行列の計算

図-4に変形後の割線剛性行列を算出する時に使用する ψ およびケーブル部材端力の計算フローを示す。

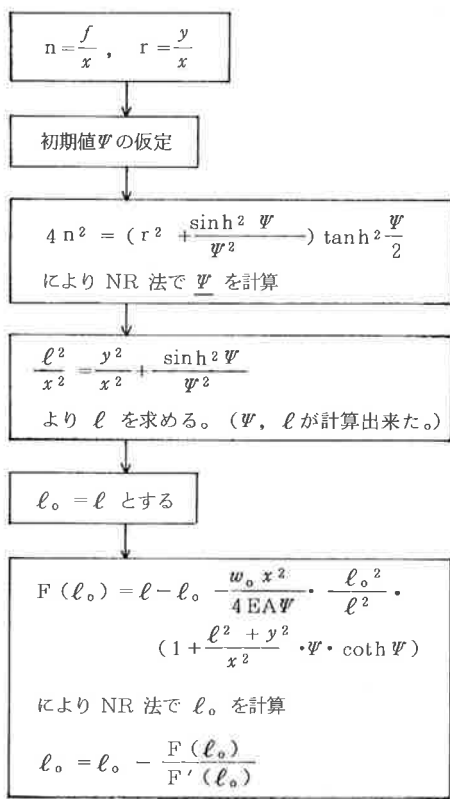


図-1 f が与えられた場合

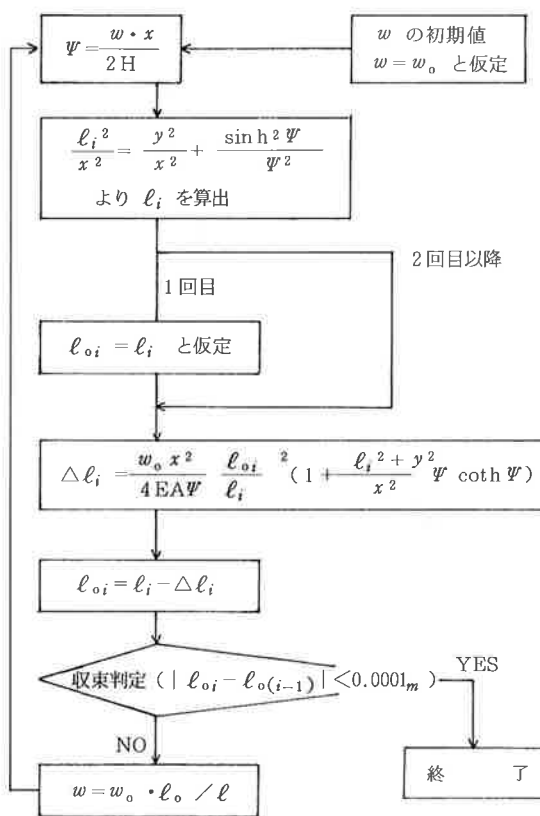


図-2 H が与えられた場合

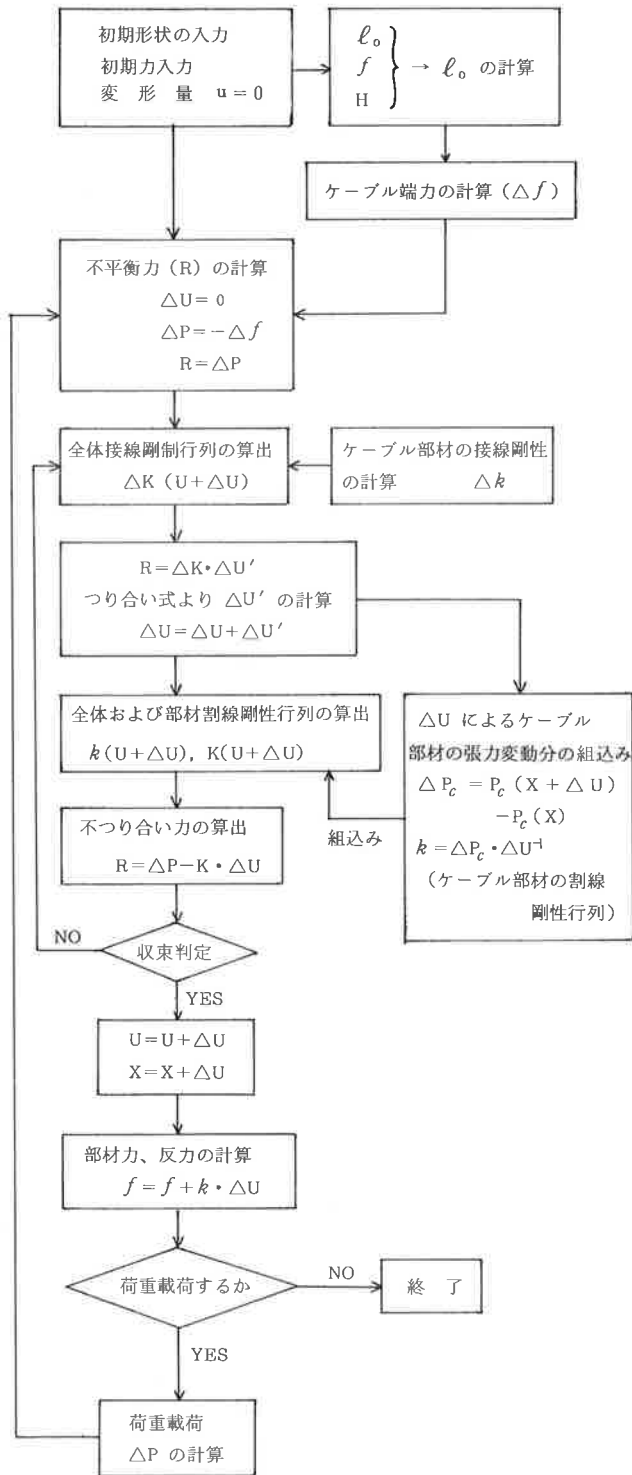


図-3 LARGE-C プログラムフロー

2. LARGE-C の計算

有限変位解析では変形後の座標における釣合いを考慮していることから、変形による影響を正確に評価するためには死荷重などによる変形後の座標が完成形状となるようにする必要がある。

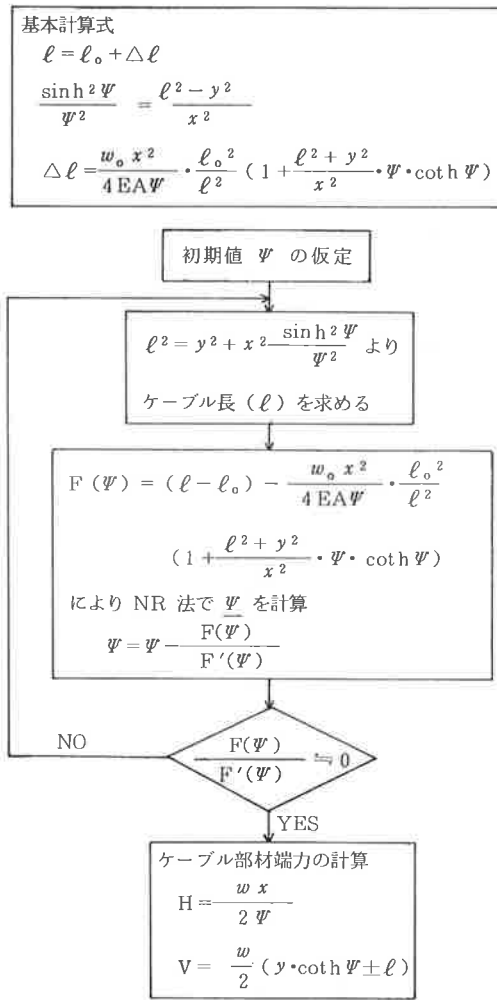


図-4 ψ、部材端力の計算

一般的な骨組構造物（ケーブル部材なし）を解析する場合、

- ①無応力形状から計算を開始
- ②任意段階の形状から計算開始

の2つの初期条件入力ケースが考えられる。①の場合、荷重載荷時の形状が完成形状となるように、無応力形状を収束計算より求め、入力形状とする。②の場合は、下記の2通りの入力ケースが考えられる。

(a)入力形状の他、入力形状時の釣合い断面力を初期断面力として入力する。入力形状、初期断面力は①に任意段階までの荷重載荷を行いあらかじめ算出しておく。

(b)任意段階における形状、釣合い断面力が不明であるが、完成時の形状、荷重および初期力が与えられている場合は、これらを荷重として考え、①と同様に収束計算により入力形状を算出する。

一方、ケーブル部材を含む骨組構造物を解析する場合、ケーブルに自重があり、どの段階においてもケーブルに張力が発生するため、上記の方法をその

まま使用出来ないが、(b)で示した方法とほぼ同様に扱う事が出来る。ケーブル部材は死荷重による張力の他にプレストレスによりある程度自由にその張力を設定する事が出来るので、完成形状時の目標張力を設定し、この完成形状と目標張力よりケーブル無応力長をあらかじめ算出する。入力形状は(b)の方法と同様に収束計算により求める事が出来る。入力形状に上記の無応力長のケーブルを組込んだ時のケーブル張力が(b)の初期力にあたる。

実際の設計々算では、線形解析によりあらかじめ死荷重、プレストレスによるケーブル張力（ケーブル部材はトラス部材として扱う。）を求め完成形状とケーブル張力からケーブル無応力長を算出し、有限変位解析の入力条件とするのがもっとも効率的である。線形解析における入力形状は、線形解析では変形後の座標における釣合いを考慮していないため（入力形状で釣合い計算を行っている。）完成形状

をそのまま使用しても精度上問題ないと考える。

図-5に本プログラムを使用する場合の解析手順の例を示す。

図-6～8に図-5の手順に従って解析を行った例を示す。線形解析と有限変位解析を死荷重時の断面力で比較した結果、よく一致しており両解析の妥当性が確認出来た。両解析結果に多少の差が生じているが、この原因として、ケーブル無応力長設定時の数値のまるめ誤差も含まれるが、主な原因は解析法の差によるものと考えられる。

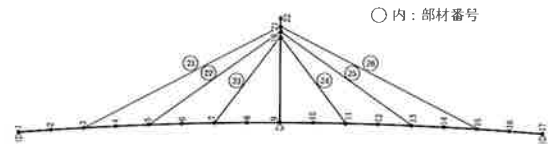


図-6 骨組図

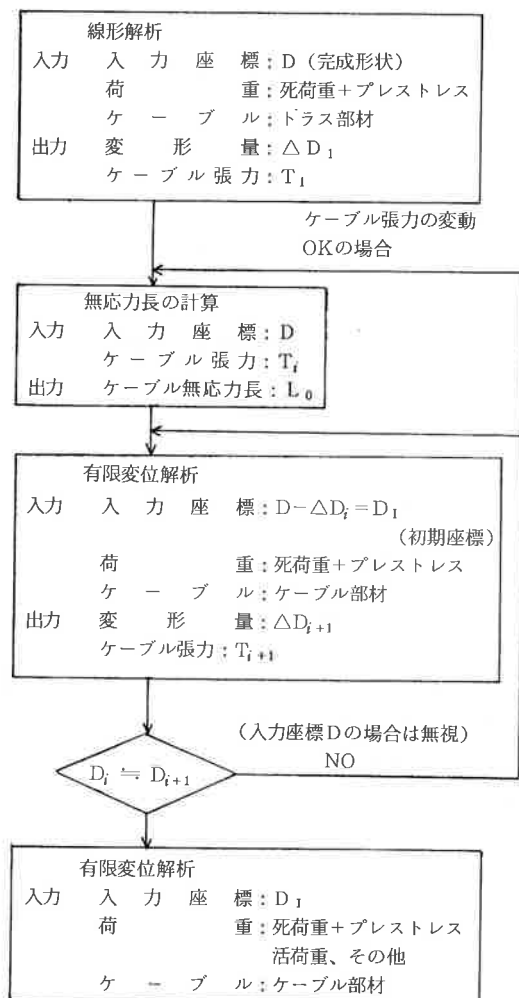


図-5 解析手順

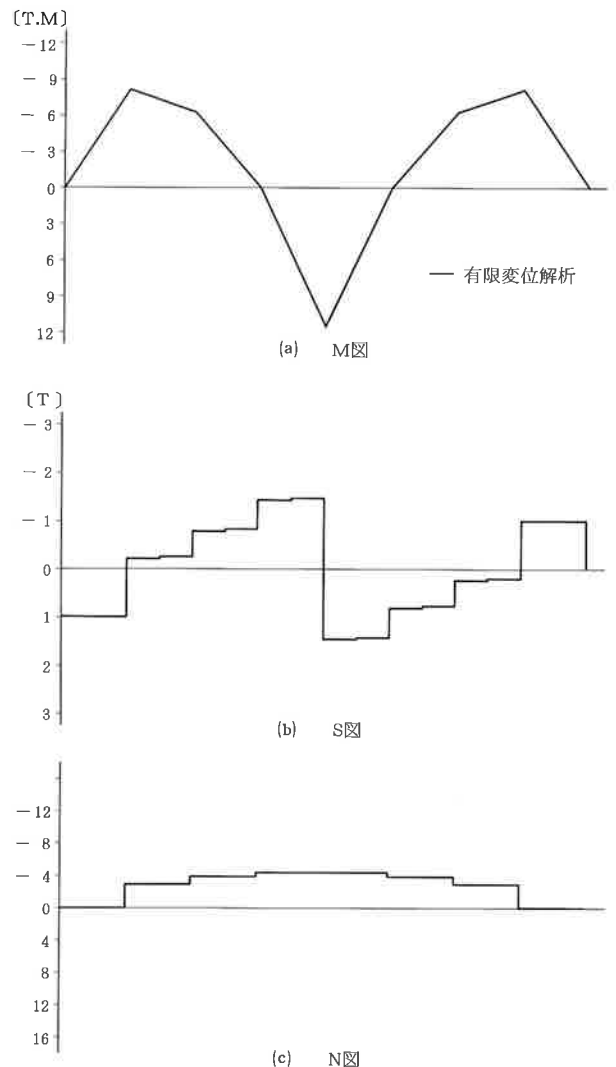


図-7 プレストレス時断面力

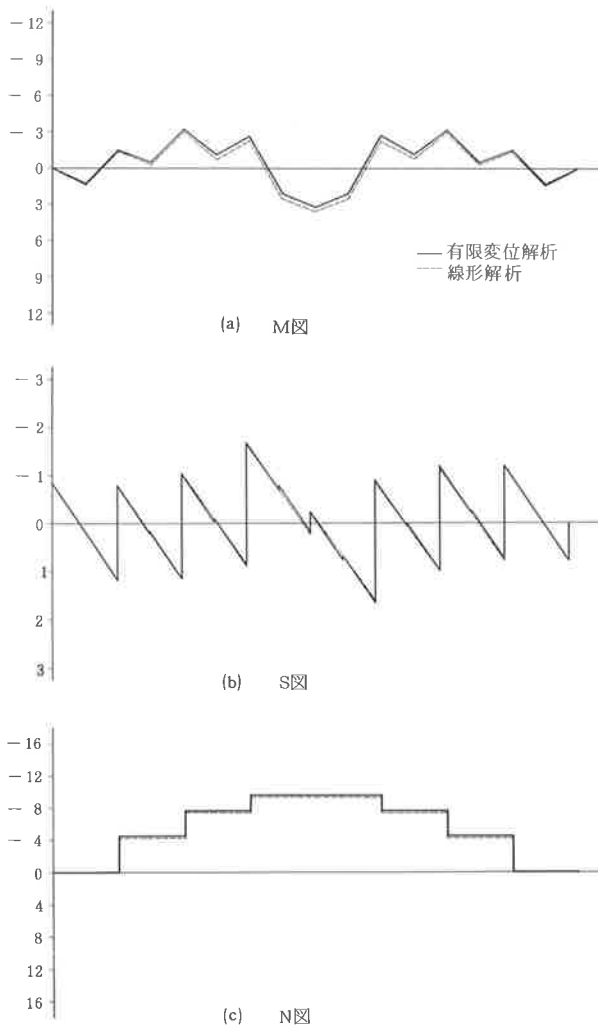


図-8 死荷重+プレストレス時断面力

また、ケーブル入力条件としての ℓ_0 、 H 、 f で与えたケースについて解析を行った。計算結果を表-1に示す。それぞれの解析結果に差はなく、ケーブル入力条件の違いにより差がなく計算出来る。

3. SHIM の概要

SHIMは最適シム量を計算するプログラムである。構造解析部分においては有限変位解析を行っている。使用出来る要素としては、3次元はり、2次元はり、ケーブル要素の3種類である。最適シム量計算には共役勾配法による最適化手法を用いており、基本式は文献2)による。シム調整計算の概要を以下に示す。

各ケーブルの単位シム調整による張力変化量を算出し、シム調整による影響マトリックス (X) を求める。設計張力 (T_0) に対して計測張力 (T) が生じた場合の張力調整量は

$$\Delta T = T - T_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

表-1 ケーブル入力条件の違いによる解析結果の比較 (死荷重+プレスト時)

ケーブル入力条件	部材番号	ケーブル無応力長 (m)	サグ (m)	ケーブル長 (m)	ψ
無応力長 (ℓ_0)	21	27.126	0.0554	27.155	0.81555×10^{-2}
	22	19.809	0.0370	19.826	0.74625×10^{-2}
	23	13.490	0.0211	13.499	0.62435×10^{-2}
	24	13.490	0.0211	13.499	0.62435×10^{-2}
	25	19.809	0.0370	19.826	0.74625×10^{-2}
	26	27.126	0.0554	27.155	0.81555×10^{-2}
水平力 (H)	21	27.126	0.0554	27.155	0.81561×10^{-2}
	22	19.809	0.0370	19.826	0.74622×10^{-2}
	23	13.490	0.0211	13.499	0.62438×10^{-2}
	24	13.490	0.0211	13.499	0.62438×10^{-2}
	25	19.809	0.0370	19.826	0.74622×10^{-2}
	26	27.126	0.0554	27.155	0.81561×10^{-2}
サグ (ψ)	21	27.126	0.0554	27.155	0.81615×10^{-2}
	22	19.809	0.0370	19.826	0.74638×10^{-2}
	23	13.490	0.0211	13.499	0.62389×10^{-2}
	24	13.490	0.0211	13.499	0.62388×10^{-2}
	25	19.809	0.0370	19.826	0.74638×10^{-2}
	26	27.126	0.0554	27.155	0.81616×10^{-2}

となり、シム調整量は理論上は下式により求められる。

$$\Delta T = X \cdot \Delta \ell \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta \ell = X^{-1} \Delta T = D \cdot \Delta T \quad \dots\dots\dots(4)$$

($D = X^{-1}$ とする。)

しかし種々の要因により発生するケーブル張力を誤差なく調節する事は過大なシム量を与える事になるため、ケーブル張力誤差容値 (ϵ_{max}) を設定し、シム調整量の2乗和を最小にするシム調整量を最適化手法を用いて求める。シム調整量を

$$\Delta \ell = D \cdot (\Delta T + \epsilon) \quad \dots\dots\dots(5)$$

とし張力調整量 (ΔT) に誤差量 (ϵ) を含めて考える。シム調整量の2乗和を目的関数とする。

$$F = \Delta \ell^T \cdot \Delta \ell = \{D \cdot (\Delta T + \epsilon)\}^T \cdot \{D \cdot (\Delta T + \epsilon)\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

Fが最小となるように ϵ を共役勾配法を用いて算出し、式(5)に代入して $\Delta \ell$ を求める。

プログラムのフローを図-9に示す。プログラムは大きく4つの計算の流れにより構成されている。

- ①死荷重解析
- ②影響マトリックスの計算
- ③最適化計算
- ④シム調整後の死荷重解析

①の死荷重解析のみを実行する事も可能であり、通常の立体の非線形解析プログラムとしても使用出来る。

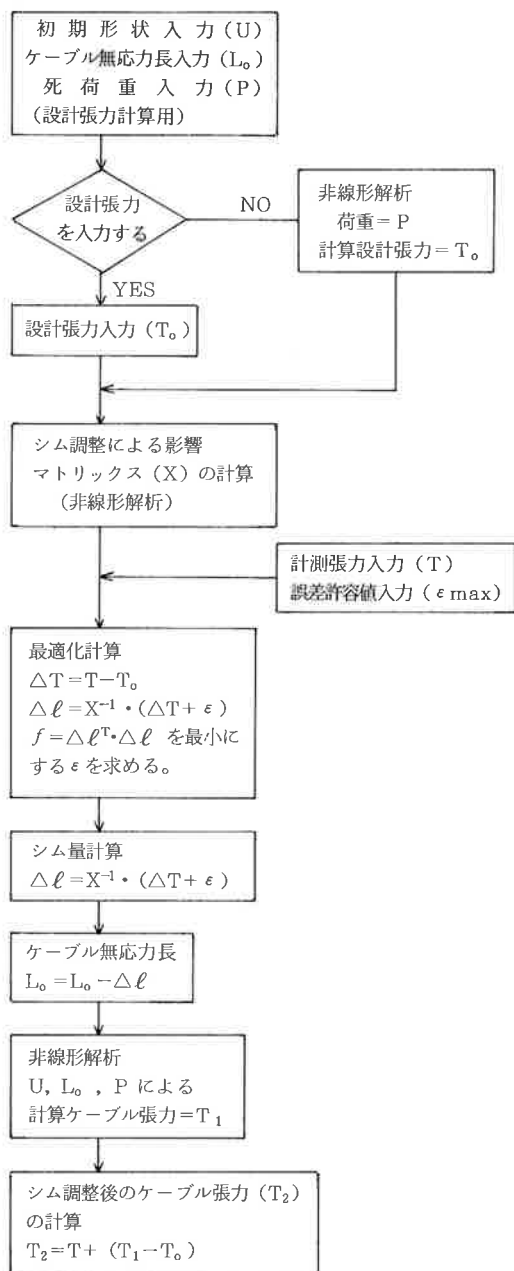


図-9 SHIM のプログラムフロー

4. SHIM の計算例

表-2、図-10~14、にニールセン橋の計算例を示す。シム調整時のケーブル張力誤差許容値(εmax)を5%としている。表-2より調整後のケーブル張力が設計張力の5%を越えているものもあるが、これはシム調整後に非線形解析を再度行っているためで

あり、非線形の傾向が強い部材(作用応力度の低いケーブル部材)に生じている。これを避ける方法として、

- ①ケーブル張力誤差許容値を目標値よりも小さめに設定する。
- ②ケーブルプレストレスによりケーブル部材に張力を導入し、剛性を確保する。

が考えられる。

また、本プログラムは現場での張力管理を容易にするため、データ通信を用いてパソコンの画面上にケーブル張力、および計算結果を表示できるシステムとなっている。写真-1、2に本計算例を用いた表示例を示す。

表-2 ケーブル張力一覧表

部材番号	設計張力 <T ₀ >	計測張力 <T>	シム調整後張力<T ₁ > (T ₁ /T ₀ ×100<%>)
51	48.696	47.136	48.736 (100.1)
52	12.922	31.076	18.879 (145.1)
53	53.999	49.497	53.428 (98.9)
54	35.462	22.838	32.746 (92.3)
55	52.329	57.584	52.582 (100.5)
56	40.234	39.108	38.327 (95.1)
57	26.366	26.812	27.759 (105.3)
58	19.670	25.719	20.669 (105.1)
61	18.993	17.288	18.042 (95.0)
62	25.657	26.568	24.382 (95.0)
63	39.812	38.811	37.826 (95.0)
64	53.401	55.394	53.505 (100.2)
65	36.780	30.650	34.896 (94.9)
66	50.598	43.619	53.067 (104.9)
67	14.981	27.228	15.980 (106.7)
68	49.634	61.123	52.076 (104.8)
119	43.819	37.463	41.661 (95.1)
120	19.214	14.359	18.241 (94.9)
121	44.750	44.531	43.608 (97.4)
122	35.836	42.577	37.566 (104.8)
123	42.742	45.745	42.553 (99.6)
124	39.937	39.425	41.905 (104.9)
125	21.901	14.383	20.523 (95.1)
126	17.570	17.701	16.690 (95.0)
129	18.144	13.769	17.233 (95.0)
130	22.149	19.988	21.042 (95.0)
131	38.757	48.584	40.472 (104.4)
132	44.470	47.651	44.790 (100.7)
133	36.081	22.347	34.272 (95.0)
134	43.755	44.276	43.738 (100.0)
135	18.812	20.358	19.539 (103.9)
136	44.199	52.061	46.416 (105.0)

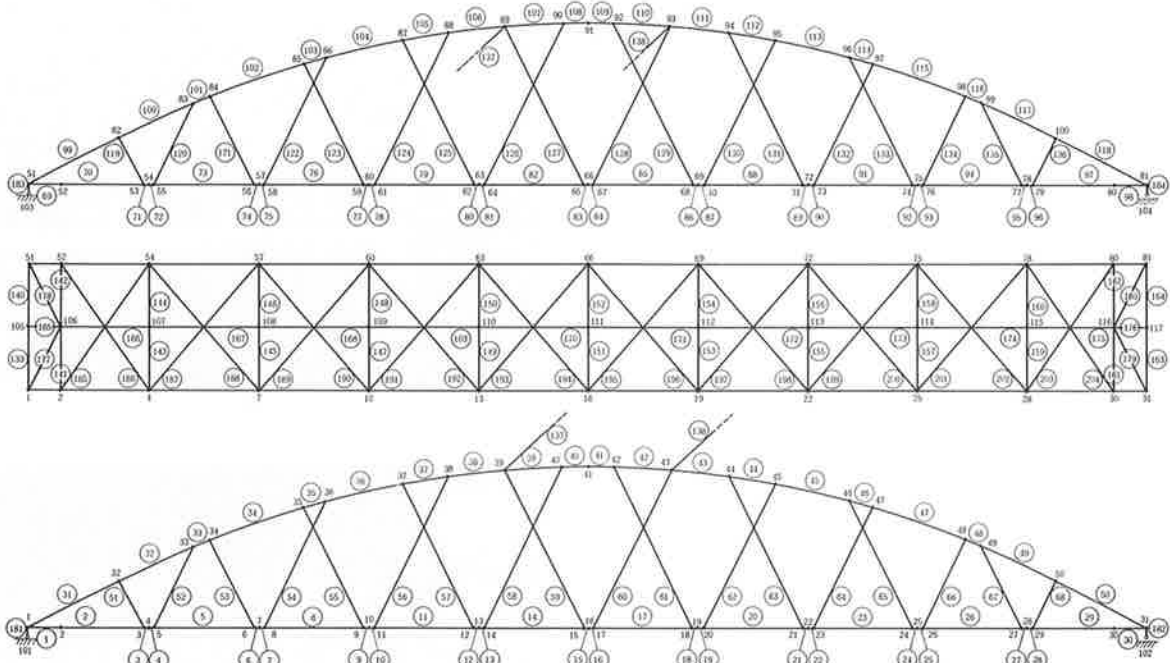


図-10 骨組図

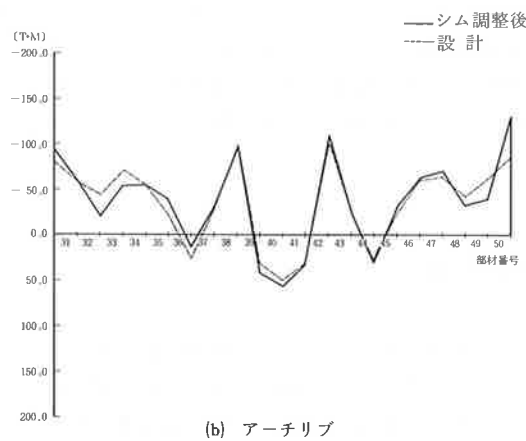
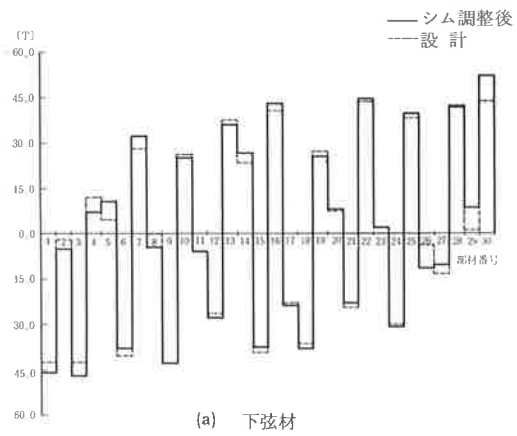
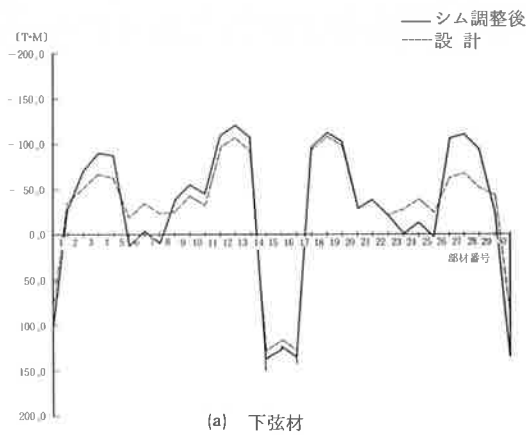


図-11 M 図

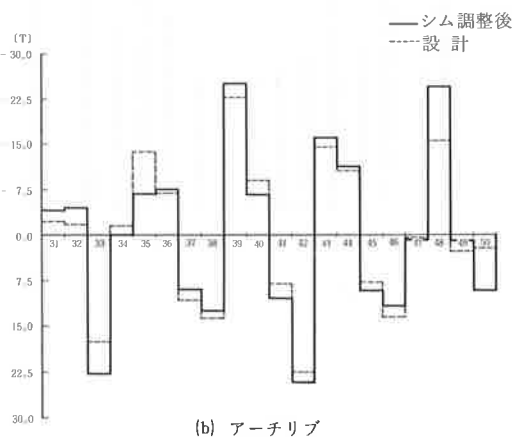
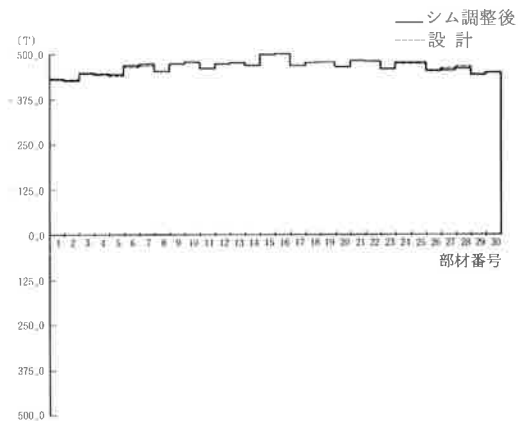
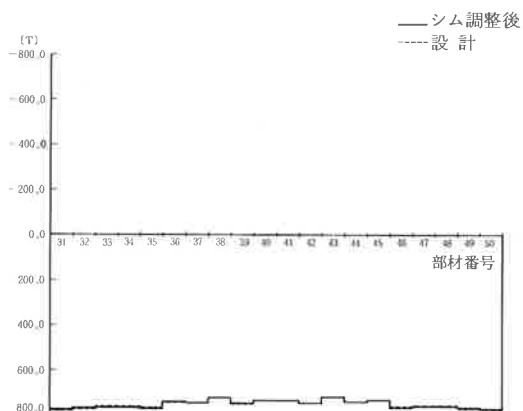


図-12 S 図



(a) 下弦材



(b) アーチリブ

図-13 N 図

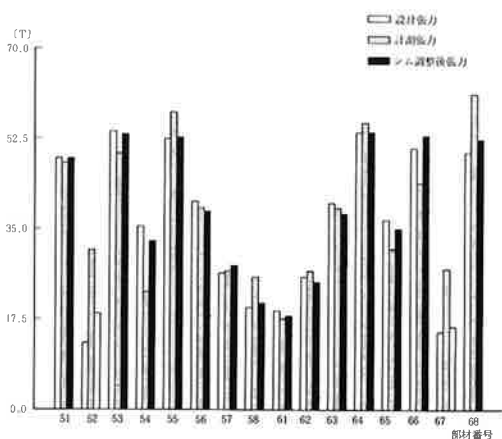


図-14 ケーブル張力

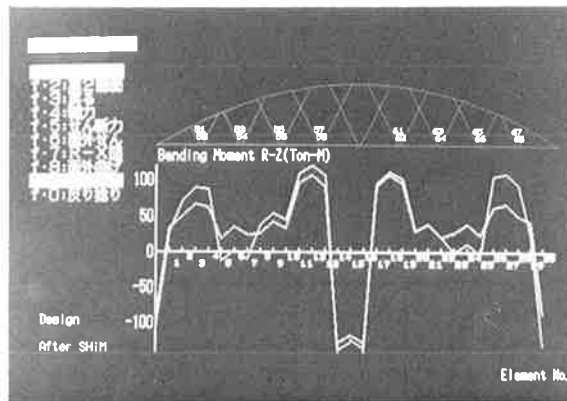


写真-1

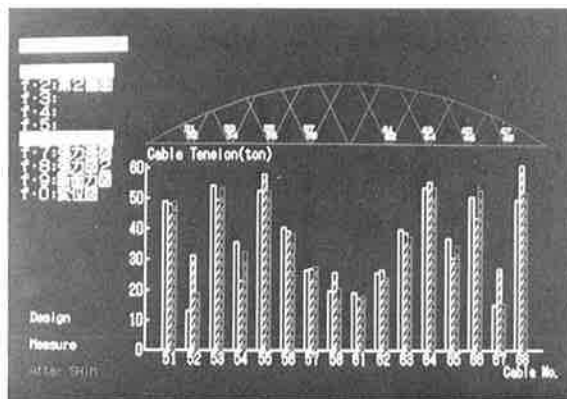


写真-2

あとがき

本報告では、斜張橋やニールセン橋などのケーブル部材を含む構造物の非線形解析プログラムとその計算例の紹介を行った。LARGE-C計算例の中では骨組の初期形状やケーブル部材の入力時の扱い方について紹介を行った。ケーブル部材の入力条件としての無応力長は骨組の初期形状、変形後の形状と密接に関連しており、解析結果に大きく影響するため特に注意が必要である。本報告が今後のケーブル部材を含む構造物の非線形解析の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 後藤：柔ケーブル材の接線剛性方程式について土木学会論文報告集第270号（昭53・2）
- 2) 松村、新家、頭井、寺西：斜張橋のケーブル張力調整、橋梁と基礎（昭54・8）