I-180　有限変形法の吊橋解析への応用

本州四国連絡橋公団　正会員　林 有一郎

1 まえがき

軸力部材の有限変形理論によれば「軸引張力Tを持つ軸力部材は3次元的に軸剛性 AE/L_0, 横剛性 T/L を持つ」ということができる。又 AE/L_0, L/T の成分をもつ剛性マトリックスで結ばれる変位増分と節点力増分の関係式をケーブルに適用した場合，水平方向の釣合式と鉛直方向の釣合式から撓度理論に於て使われるケーブル方程式と鉛直方向釣合式を導くことができる。これらの性質を利用して微小変形理論では不安定系となるキャットウォーク問題や、ケーブルの変形問題を3次元的に容易に解析することができる。又梁一柱の有限変形理論と組み合せることによって吊橋の静的，動的解析が可能である。ここではキャットウォーク問題と吊橋のケーブル2次応力問題への有限変形法の適用について報告する。

2 キャットウォーク解析

キャットウォークの解析の問題点として次の2点が考えられる。

(1) 吊橋ケーブルの架設時の形状，即ち目的とするカテナリー形状に、架設機材を載荷したキャットウォークの形状を合わせるために、如何にキャットウォークのメインロープ，ストームロープ，ハンガーを組み立てるか。

(2) 鉛直荷重、水平横荷重に対する釣合式の解法、即ち収れん計算の行ない方。

これらの2つの問題を同時に考慮した解法として文献(1)があるが、ここではキャットウォークの形式を平行ハンガー形式とし，主として(2)のみを目的とし放物線形状を修正してメインロープのサグを合わせるように初期形状を作ってゆくことにする。軸力部材の接線剛性マトリックスは，3次元的に軸剛性 AE/L_0, 横剛性 T/L とすればよい。

形状を決める流れは次のようになる。

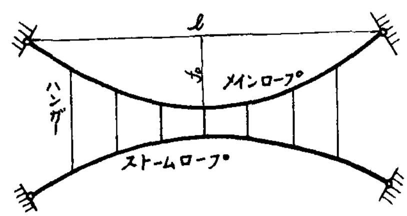
a. メインロープについて，サグ f_0 の放物線を作り，各部材の実際長 L_i を計算する。

b. メインロープの作用荷重を分布荷重に換算する。即ち

w =（メインロープ自重）+プレストレス+（ハンガー自重+クロスブリッジ）/l

c. w より水平張力 H を求め，幾何学的な関係より T_i, 無応力長 L_{0i} を求める。

$$H = \frac{w l^2}{8 f_0} \qquad T_i = H/\cos\alpha_i \qquad , \quad L_{0i} = L_i/(1 + \frac{T_i}{AE})$$



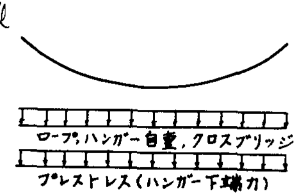


図-1 キャットウォーク形状

d. 仮定した形に対する節点外荷重を計算する。

e. 各節点についてロープ内力と節点外力との不平衡力を計算し，上記の接線剛性マトリックスを使って不平衡力が微小になる迄収れん計算して，最終釣合形を求める。

f. 最終釣合形のサグが目的の f_0 とちがっていたらその分だけ上げこしたサグの放物線を作り，aに帰る。

g. 目的のサグになる迄以上の操作をくりかえす。

h. ストームケーブルについて a〜f と同じ操作を行なう。但し w はストームケーブル自重とプレストレスとなる。

i. ハンガー無応力長を $L_{0i} = L_i/(1 + \frac{T_i}{AE})$ から求める。

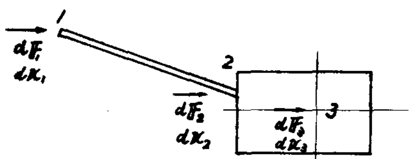
j. 最後に全節点を結びつけて有限変形により微小の不平衡力を除去する。

この方法をスパン1,100 m，メインロープサグ92.4 m，ハンガー間隔数22のキャットウオークに適用した結果、目的のカテナリーに対してサグは一致、隣接点で最大30 cmの差が生じた。この差はでき上り形状が放物線に近くなっているからで、最初の形状仮定をカテナリーから出発すれば、もう少し近似が良くなると思われる。でき上った完成形状に対する面外荷重解析は、前述の接線剛性マトリックスを使用することによって容易に行なうことができる。

3. ケーブル2次応力解析

吊橋主ケーブルの2次的な曲げ応力の要因として種々のものが考えられるが、そのうちケーブルバンド、ラッピングワイヤの締付け効果による2次応力は、有限変形理論により解析できる。この解析は、ケーブルバンド部を剛体とみなし、バンド間にはさまれるケーブル部分をある曲げ剛性をもつ梁ー柱とするものである。

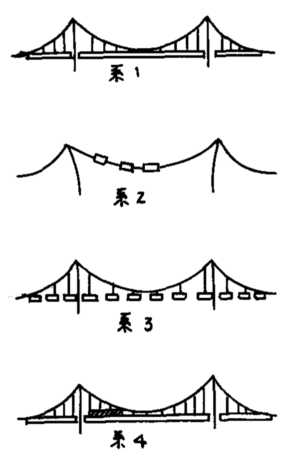
最初に弾性部材と剛体とが結びついた系の剛性マトリックスを求めておく。部材1－2の接線剛性マトリックスは例えば軸力部材に対しては文献1，梁ー柱に対しては文献2で与えられているとする。部材1～2の間の剛性式，2～3の間の釣合式，又2～3の間で歪エネルギーがゼロなので外力ポテンシャルがゼロとなる式から、dF_1，dF_3，をdx_1，dx_3で表わす接線剛性マトリックスが得られる。



図－2　弾性部材と剛体

解析は次のような流れで行われる。(系1)初期の形状をもつ吊橋の完成状態を有限変形理論で組み立てておく。(系2)ケーブルのみの系に補剛桁上向き重量をかけ収れんさせ、ケーブル架設時状態を作る。その状態でケーブルに剛体バンドをとりつける。ケーブルには実際とは違うが安全側の解析のためにこの時点で曲げ剛性を入れて2次応力解析の出発点とする。(系3)バンドのついた曲げ剛性をもつケーブル系に補剛桁死荷重を負荷重として加える。釣合った後でハンガー端を桁でつなぎ、桁に曲げ剛性を入れる。(系4)ハンガーバンドのついた吊橋系に活荷重を加えて有限変形解析を行なう。

この解析においてケーブルの曲げ剛性は桁の曲げ剛性に比べて約1/50程度であり極めて微小であるので、文献(3)の包含式ではうまく収れんしない。この場合は元の引張式（即ち節点力が双曲線関数表示）を使って修正増分法によって収れんさせるとうまくゆく。今迄の解析によるとケーブル径1102 mm、スパン270－1100－270 mの吊橋で、曲げ fiber stress は補剛桁死荷重と活荷重で1次応力の約半分、活荷重だけではさらにその半分位でるという結果を得ている。



図－3　2次応力解析の系

参考文献

(1) 波田、新家、広中、中西，"エネルギー法によるケーブル構造解析（第2報），"土木学会第26回年次学術講演会講演集，昭和46年10月

(2) 林有一郎、上久保久弥，"有限変形還元法によるケーブル解析"，日本鋼構造協会第5回大会研究集会マトリックス構造解析法研究発表論文集，昭和46年6月

(3) 林有一郎，"剛性マトリックス法による吊橋解析，"日本鋼構造協会第7回大会研究集会マトリックス構造解析法研究発表論文集，昭和48年6月