

吊橋の最小重量設計とその二、三の特性

室蘭工業大学 正員 杉本博之

1. はじめ

筆者は、すでに、モデル化した短径間吊橋(スパン180m, 300m)の、有限変形を考慮した最適設計を行ない、片側に1本のスチールがある場合に、その効果について考察を加え、他の特性と共に発表した⁽³⁾。

本論文では、前述のモデルにスパン450mの吊橋を加え、1本のスチールの他に複数のスチールを設置し、スチールの初期応力をも考慮して最小重量設計を行ない、その数値計算の結果を整理し考察を加えたものである。

本論文で用いた有限変形法は、他に詳しいので省略する^{(1),(2)}。また、最適設計法についても、やはり他に詳しいが^{(2),(3)}、本論文では、全応力設計法から強制的に増加させ最適性を検討する設計変数として、スチールとケーブルの断面積のみを考えている。これは、すでに得られている結果⁽³⁾、また、ε, ζの予備計算の結果よりとられた処置である。

許容応力度等細部の規程は、本州四国連絡橋上部構造設計基準(案)(昭和48年9月)、道路橋示方書(昭和47年)に従った。

2. 目的関数

最適設計は、その目的関数により分類すると、コストを最小にするものと、重量を最小にするものの二つに分けられる。最適設計法の研究の初期には、目的関数としてもっぱら重量が用いられたが、最近ではコストを目的関数とする報告が増えており、一方で、目的関数としてはコストを使うべきだという強い意見も存在している。

コストの場合は、材料費、人件費等を含む製作費等を最小にしようとするものであるが、設計に用いられる種々のパラメーターは、経済的条件、同じ経済的条件下でも、その内部での地域的条件、また時間的条件により大きく変動することが予想される。例えば、石油ショックを前に挟む昭和46年と昭和50年の間では、鋼材単価で2~3割、人件費で10割増加している。このように、コストを目的関数として得られた結果の有効性は、時間的、空間的に、狭い範囲に限定されると思われる。

我々が、設計の対象としている構造物に使用される材料、例えば、鉄、セメント等は一次生産品であり、その埋蔵量、生産量には当然限界があり、これらが無駄のないように消費すべきことはいうまでもない。従来、重量を目的関数とする場合、重量とコストの間には強い相関関係があるという説明がなされてきたが、有限な資源を有効に使うという、一つの価値観に立脚する関数であると定義することができるとと思われる。

本論文では、式(1)で表わされる総体積を目的関数とした。

$$V = \sum_{i=1}^n \rho_i A_i \quad (1)$$

3. 設計条件

吊橋は、図-2. a, b, cに示すスパン180m, 300m および450m とし、それぞれモデルA, B, Cとする。考慮したスチールの位置を図に破線で示してあるが、スチールの無い場合を0, 1本の場合をS, 2本の場合をD, 全部つける場合をMとし、スチールの位置により、図-2あるいは表-1の数字を当て、これらの3つの英数字の組み合わせによりタイプを示した。例えば、モデルBで、スチール2, 4を有する場合タイプBD2となる。

断面は、スチール、ケーブル、ハンガー、上弦材、腹材、下弦材がそれぞれ等断面とする。各部材のヤング率、許容応力度を表-2に示す。補剛トラスの各部材は正方形断面とする。活荷重は、補剛トラスの上弦材の格点に集中荷重(モデルAで100t, B, Cで150t)と

type	stay
AD	1 3
BD1	1 3
BD2	2 4
BD3	3 5
CD1	1 4
CD2	2 5
CD3	3 6
CD4	4 7

表-1 タイプとスチール

して作用し、連続荷重として移動させた。構造解析上の仮定として、死荷重はすべてケーブルによって支持され、その8割はハンガーにより伝達され、ハンガーにも初期応力があるとしている。スチーの初期応力も考慮できる。考慮する場合は、以下の考え方による。

スチーの初期応力は、スチーのたれみがある値以内にするために導入し、スチー以外の構造の架設後に人為的に発生させるものとする。また、この初期応力の導入により、吊橋の各節点は移動しないものとして初期応力の他の部材への再配分は無視する。初期応力の大きさは、次のようにして求められる。

スチーに導入する初期応力の大きさは、図-1のスチーABの中心Cでの自重 $w(\text{kg/m})$ による最大たれみ δ が αl となるように決定する。その時に必要な軸力の水平分力は、

$$H = \frac{wx^2}{8f} = \frac{wx^2}{8\alpha l} \tag{2}$$

となり、スチーに加えるべき初期軸力 F^0 は、

$$F^0 = \frac{H}{\cos \alpha} = \frac{wx}{8\alpha} \tag{3}$$

となる。本論文では、 α を1.5%とした。さらに、 $w = 7.85 \times 10^{-4} \text{ A}$ であることを考慮すると、式(3)は次のようになる。

$$F^0 = 0.0654Ax \tag{4}$$

ここで、 F^0 : kg, A: スチー断面積(cm^2), x : cmである。

4. 計算結果および特性

以下に数値計算の結果、およびそれより得られた特性について考察を加える。

数値計算は、各タイプにおいて、死荷重が1(モデルAのみ)、2, 4, 6, 8 kg/m とし、さらに、それぞれにおいて、微小変形理論(δ)、有限変形理論(f)、スチーの初期応力を考慮した微小変形理論(δ_i)、同じく有限変形理論(f_i)の4ケースの計算を行なった。結局、後で示すように、モデルAで110ケース、モデルBで152ケース、モデルCで200ケースの計算を行なったことになる。これらの結果の内、総体積、スチーおよびケーブルの断面積、最大垂直変位を図示したが、総体積は 100 m^3 、スチーおよびケーブル断面積は 500 cm^2 に対する比で表示してある。

4-1 総体積とタイプ 図-3. a, b, cは、各モデルごとのタイプと、計算理論 δ, f, δ_i, f_i をとり、縦軸に 100 m^3 に対する比で表わした総体積(V)をとったものを、死荷重ごとにまとめたものである。

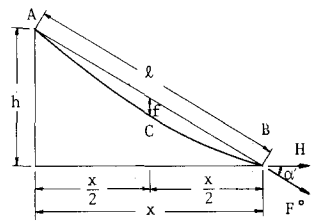


図-1 スチーの初期軸力

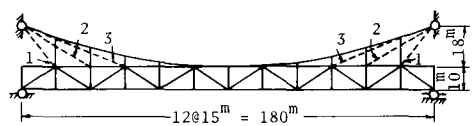


図-2.a モデルA

member	$\sigma_a (\text{kg/cm}^2)$	$E (\text{kg/cm}^2)$
stay, cable	5600	2.0×10^6
hunger	5600	1.4×10^6
truss	SM58	2.1×10^6

表-2 ヤング率, 許容応力度

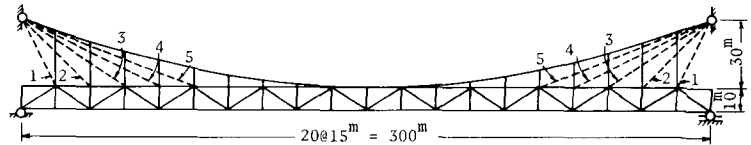


図-2.b モデルB

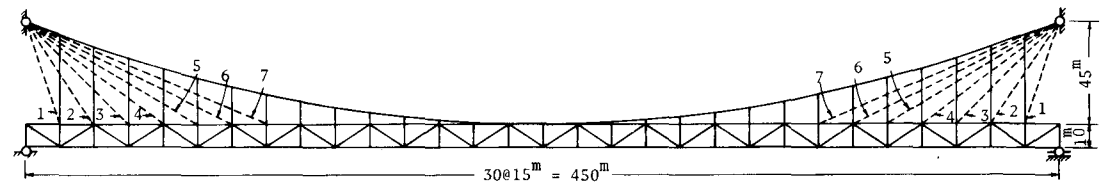


図-2.c モデルC

総体積と各タイプの間係を検討すると、まず、モデルAでは、死荷重により全体の傾向は、ほとんど変化がない。ただ、Sタイプの中で、最小重量を与えるのが、死荷重の小さい範囲ではS3であるのに対し、大きくなるとS2に移行しているのがみられる。モデルA全体では、Dタイプが最も重量が少ない。また、MタイプがDタイプよりも重量が大きいのが注目される。

次に、モデルB(図-3. b)では、S1, S2がほとんど差がなく、Sタイプの中では、S3, S4が最も重量が少ない。また、S5は、S3, S4よりも重く、死荷重が大きくなるに従い、その傾向が強くなる。Dタイプでは、D3が最も重量が少なく、また、モデルB全体でも、これが最も少ない。Mタイプは、D3には劣るが、他のタイプよりは重量が少ない。

最後に、モデルC(図-3. c)を検討する。Sタイプでは、S6が死荷重に関係なく最小重量を与える。また、死荷重が2, 4 t/m で、S2の重量が0よりも非常に多く、ステイの設置が逆効果となっている。Dタイプでは、死荷重の小さい範囲ではD3, 大きい範囲ではD4が重量が少ない。モデルC全体では、Mタイプが最も重量が少ない。

ステイの効果を全体的に検討すると、S1, S2はほとんど効果がなく、場合によっては逆効果となるが 適当なタイプに注目すると、ステイの設置は有効であり、例えば、タイプC0とCMを比較してみると、死荷重8 t/m の場合、総体積で18.6 m^3 、ケーブルおよび主構が2面あることを考慮すると、その重量差は290 k に達する。

4-2 有限変形理論と微小変形理論 有限変形を考慮することの影響は、図-3. a, b, cで検討する。

図-3. aの縦軸の縮尺が、b, cの倍であることを考慮して、それぞれの α と f 、 α_i と f_i の結果を比較すると、やはり、モデルCの場合が、最も差が大きく、スパンが長くなるほど、有限変形を考慮する効果が現われてくることが知られる。例えば、死荷重が6 t/m の場合、タイプAMの α_i と f_i の差が0.3 m^3 であるのに対し、タイプCMでは、1.8 m^3 となる。

4-3 ステイの初期応力の影響 ステイの初期応力の影響は、図-3. a, b, cの α と α_i 、 f と f_i の結果を比較することにより知られる。

モデルA, Bでは、両者にほとんど差がないが、モデルCでは、ほとんどのケースで1 m^3 程度、初期応力を考慮した方が増加している。

4-4 ステイ、ケーブルの断面積とタイプ 図-4. a, b, cは、各モデルごとのタイプと、ステイ、ケーブルの断面積(α , f , α_i , f_i とほぼほとんど差がないので、 f_i の結果を示した)を図示したものであり、横軸にタイプ、縦軸に500 cm^2 に対する比で表わした断面積をとったものを、死荷重ごとにまとめたものである。図に説明したように、左の棒がステイ、右がケーブル断面積を示す。点線が全応力設計、実線が修正された結果である。

一般的に、スパンが短かくて、死荷重が小さい場合は、ステイ断面積がケーブル断面積を上回るが、死荷重あるいはスパンの増加につれ、両者の差は大きく開いてくる。

タイプとの関連をみると、ステイ断面積は、タイプの影響を比較的大きく受けるが、ケーブルは、特に死荷重の大きい場合、ほとんどタイプに関係しない。また、これらの断面積の増減は、図-3の総体積の増減とは無関係

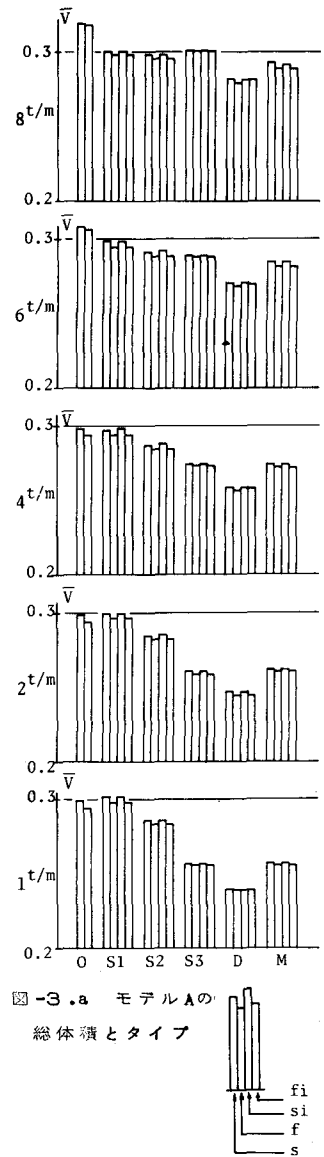


図-3. a モデルAの
総体積とタイプ

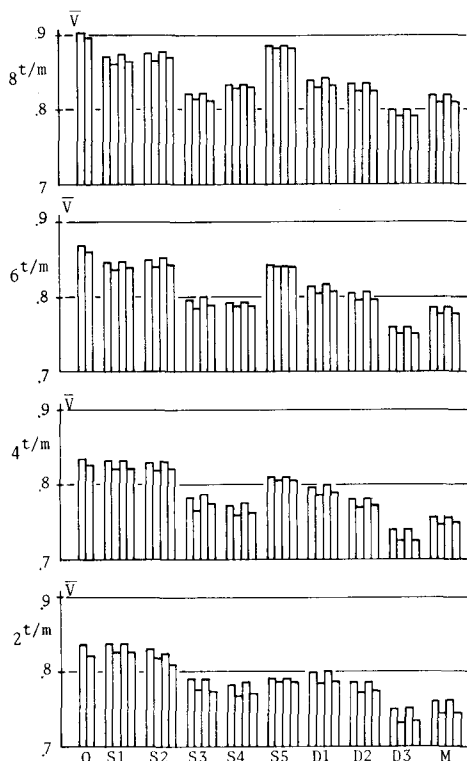


図-3.b モデルBの総体積とタイプ

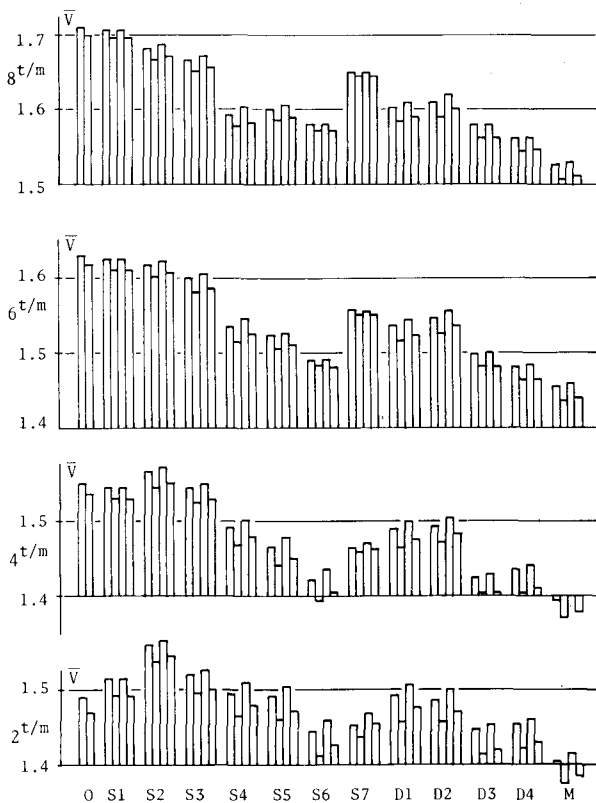
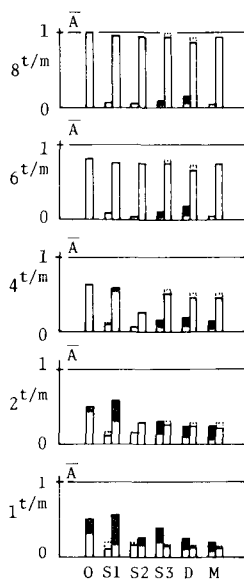
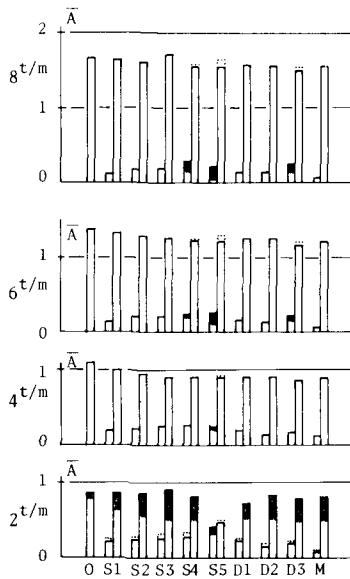


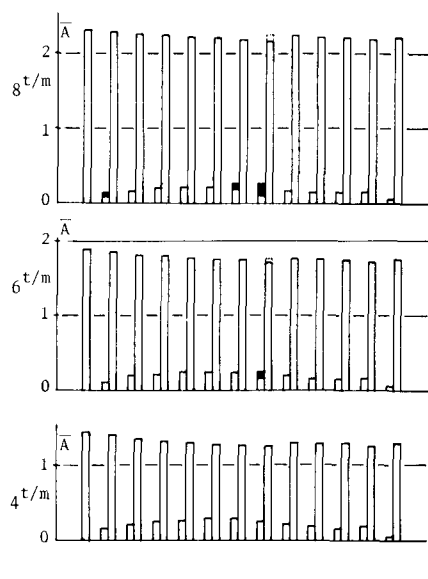
図-3.c モデルCの総体積とタイプ



a モデルA

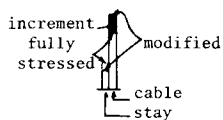


b モデルB



c モデルC

図-4 スティ、ケーブルの断面積とタイプ



係であり、前述のステイの設置による総体積への効果は、補剛トラスへの影響より得られた部分が大きいといえる。

4-5 最適性 図-4に説明してあるように、全応力設計が最適とならなかった場合を、実線と点線の関係を示し、その時の増分を黒でつぶした。

3つのモデルを通じて、死荷重が 2 t/m 以上で全応力設計の結果が最適とならなかったタイプでは、その数は少ないが、AO, AS1を除いてすべてステイ断面積が応力的に余裕のある断面となり、それらのタイプのほとんどは、スパンセンター側のステイを有しているものである。

4-6 最大垂直変位とタイプ 最大垂直変位(φ)の結果と各タイプの関係を図-5に示した。

死荷重が大きくなるに従い、最大垂直変位はタイプにほとんど関係なくなる。ただ、スパンセンター側のステイを有する、タイプBS5, BD3, CS7の結果が少なくでているのが注目される。これは、ステイの位置のみでなく、図-4. b, Cに示されているように、これらのタイプに対応するステイ断面積が、他に比べて大きいのも影響していると思われる。

5. 結論

本論文より得られた結論を箇条書きにすると以下ようになる。

- (1) 目的関数について考察を加え、最小重量設計を省資源の立場から説明した。これは、しかし、最小コスト設計の手法の研究の重要性を否定するものでないことは当然である。
- (2) 種々のタイプのタワースティの有効性を検討した。その結果、一部では逆効果であったが、一般的には有効であり、本論文で対象としたタイプの中では、タイプAD, BD3, CMがすぐれていた。
- (3) 有限変形を考慮することの影響は、スパンの増大とともに大きくなっている。
- (4) スティの初期応力の影響は、それほど大きくない。これは、式(4)の α が、1.5%であることも関係している。
- (5) スティ断面積が、ケーブル断面積よりも大きいのは、モデルAの死荷重が1, 2 t/m に限定されている。これが、斜張橋と吊橋の競合範囲であると思われる。
- (6) 死荷重が 2 t/m 以上では、ほとんどのタイプで全応力設計の結果が最適となった。ただ、スパンセンター側のステイを有する一部のタイプで、ステイが応力的に余裕のある断面となった。

6. あとがき

本論文の計算は、北海道大学大型計算機センターのFacom 230-75を使用した。その費用の大部分は、昭和51年度文部省科学研究費によった。ここに、感謝の意を表する。

また、本論文の図面作成に、山蘭工業大学 技官 昆野茂氏の協力を得たことを付記し謝意を表する。

参考文献

- (1) 杉本博之;有限変形を考慮したトラス構造物の最適設計,土木学会北海道支部論文報告集,第31号,1975,2.
- (2) 杉本博之;吊橋の最適設計に関する基礎的研究,土木学会第30回年次学術講演会講演概要集,1975,10.
- (3) 杉本博之;短径間吊橋の最適設計とスティの効果について,土木学会北海道支部論文報告集,第32号,1976,2.

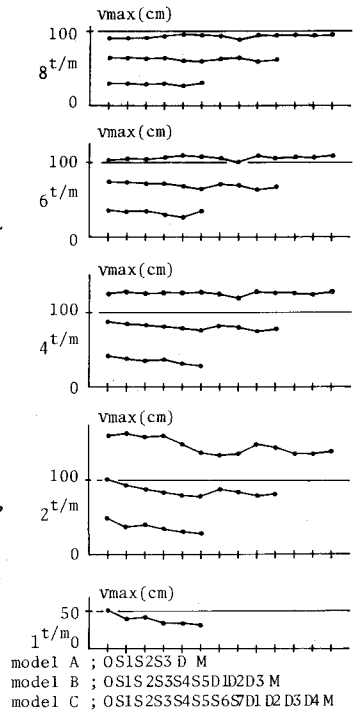


図-5 最大垂直変位とタイプ