

無補剛吊り水管橋の静的挙動

STATICAL BEHAVIOR OF WATER-PIPELINE SUSPENSION BRIDGES

崎元達郎*, 中村聖三**, 湯治秀郎***, 渡辺 浩****

by Tatsuro SAKIMOTO, Shozo NAKAMURA,

Shuro YUJI and Hiroshi WATANABE

Statical behavior of water-pipeline suspension bridges are analyzed by a finite element method which is capable of considering finite displacements and initial prestressing of cables. Also large span model tests are carried out and the results are compared with the numerical ones. Using the results of parametric computations and experiments, statical behavior of water-pipeline suspension bridges are studied and many important features for design use are found and presented.

1. はじめに

現在、我国における水管橋の設計は、通常「水管橋設計基準」¹⁾に基づいて行われている。ここで対象とされているのは、パイプビーム水管橋と補剛水管橋であり、吊構造形式にするとしてもトラスなどによる水管の補剛を前提としているように見受けられる。本研究で対象としている吊形式水管橋は補剛トラスなどを有しない無補剛のものであり、上記設計基準にはこのような構造形式に関する直接的な記述が存在しない。

また、比較的支間の小さい吊橋を設計する場合に適用できる基準として、「小規模吊橋指針・同解説」²⁾が挙げられるが、この指針は支間200m以下の橋に対して、線形計算によることを基本としている。しかし、本研究で対象としている吊形式水管橋は、無補剛であるために剛性が低く、非常にたわみ易いものと推察され、その幾何学的非線形性をどの程度、またどのように設計に考慮すべきかが問題となる。

本論文の目的は、対象とする無補剛吊形式水管橋の基本的な数値モデルに対して、種々の構造パラメータを変化させて幾何学的非線形解析を行うとともに模型による静的載荷実験を実施することにより、本構造の静的構造特性を明らかにした上で、上記「設計基準」と「指針」に照らした設計上の問題点を抽出し、安全かつ合理的な設計法を確立するための基礎データを提示することにある。

*	工博	熊本大学教授	工学部土木環境工学科	(〒860 熊本市黒髪2-39-1)
**	工修	川崎製鉄(株)	鋼構造研究所土木建材研究室	(〒281 千葉市長沼町351)
***		川崎製鉄(株)	土木技術部鉄構海洋技術室	(〒100 千代田区内幸町2-2-3)
****		熊本大学大学院	工学研究科	(〒860 熊本市黒髪2-39-1)

2. 解析法の概要

2.1 理論と解析方法

本研究では、解析法として増分移動座標法により定式化された1節点6自由度の棒要素による有限要素法を用い、幾何学的非線形性を考慮することとした。定式化の基礎は文献3)に置いたが、そこでは考慮されている材料的非線形の部分は取り除き、若干の改良を加えた。

誘導の詳細は省略するが、局所座標から全体座標への変換マトリクスを T とすると、全体座標系における部材の増分つり合い式、およびそれを集成した全体構造に対する増分つり合い式は次式となる。

$$(K_0 + K_g) \cdot u = P - (T \cdot \bar{P} - \bar{P}) \quad (1)$$

ここに、 K_0 ：微小変位の剛性マトリクス、 K_g ：幾何剛性マトリクス、

u ：増分変位ベクトル、 P ：増分外力ベクトル、 $\bar{P}$ ：全断面力ベクトル、

$\bar{P}$ ：全外力ベクトル

本研究では、Newton-Raphson法による繰り返し計算を荷重増分法で行なうことにより、式(1)の解を得ることとした。なお、繰り返し計算においては、各節点における増分変位が全変位の 10^{-3} 以下になれば解が収束したものとして、次の荷重段階に移るようにした。

2.2 解析法の妥当性の検討

ここで用いる計算プログラムの検証をするために、長さ L の片持ちばりの自由端に荷重 P が作用する場合について計算を行った。計算結果の一例として、要素分割を20、荷重増分ピッチを1.0とした場合について、荷重 P に対する自由端のたわみの計算値を図-1に示す。計算値は楕円積分分解によく一致しており、本解析法により幾何学的非線形性が十分な精度で解析できることが確認された。

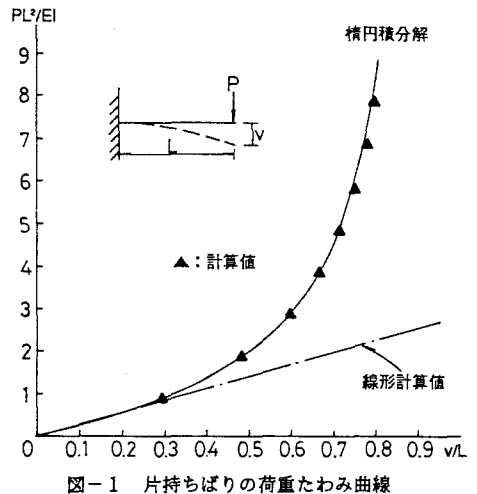


図-1 片持ちばりの荷重たわみ曲線

3. 無補剛吊り水管橋の解析

3.1 解析モデル

今回、研究の対象とした無補剛吊り水管橋は図-2に示すような構造形式であり、次のような構造上の特徴を有する。

- ① 水管をトラスなどにより補剛することはせず、メインケーブルより下ろしたハンガーにより、直接水管を吊り下げる。
- ② メインケーブルのほかに水管の両側下方に1本ずつ耐風ケーブルを設け、タイケーブルを介して水管と連結することにより、耐風安定性を高めている。なお、耐風ケーブルには風荷重に対する剛性を高めるため、所定量のプレストレスを導入する。
- ③ ハンガーは鉛直としたが、橋軸方向の剛性を確保するた

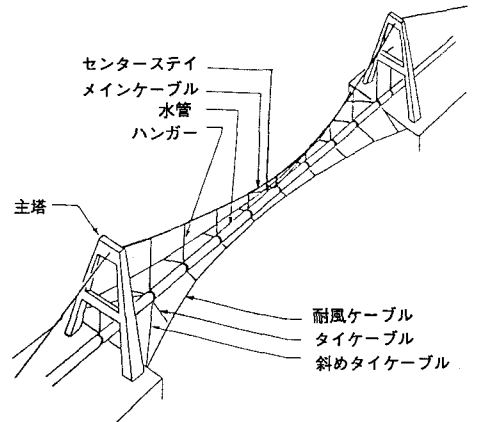


図-2 無補剛吊り形式水管橋の概略図

めに、支間中央部にセンターステイ（斜材）を設ける。

このような構造においては、メインケーブルサグ比、耐風ケーブルサグ比、タイケーブル開き角（図-3参照）は設計における重要な形状パラメーターであると考えられる。また、耐風ケーブルに導入するプレストレスにより、力学特性が変わることも予想される。

このような観点から、これら設計パラメーターが本構造の静的挙動に及ぼす影響を調査するため、表-1に示すような解析モデルについて解析を行った。計算対象とした支間は150mと300mであり、表-2に示す諸元を有する骨組モデルとした。

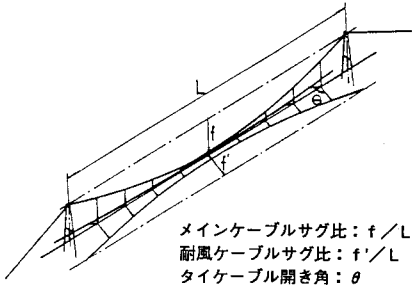


図-3 形状パラメーター

表-1 形状パラメーターの組み合わせ

	メイン ケーブル サグ比	耐 風 ケーブル サグ比	タイ ケーブル 開き角	計算対象	
				150m	300m
基本モデル	1/10	1/20	120°	*	*
モデル：2	1/10	1/20	160°	*	*
モデル：3	1/10	1/20	140°	*	*
モデル：4	1/10	1/20	100°	*	*
モデル：5	1/10	1/20	90°	*	*
モデル：6	1/ 6	1/20	120°	*	*
モデル：7	1/ 8	1/20	120°	*	*
モデル：8	1/12	1/20	120°	*	*
モデル：9	1/14	1/20	120°	*	*
モデル：10	1/10	1/18	120°	*	*
モデル：11	1/10	1/16	120°	*	*
モデル：12	1/10	1/14	120°	*	*
モデル：13	1/10	1/12	120°	*	*
モデル：14	1/10	1/10	120°	*	*

表-2 部材諸元（上段：支間150m、下段：支間300m）

	メイン ケーブル	耐 風 ケーブル	ハンガ- タイ・ケーブル	水道管	主 塔
径 (cm)	8.80 9.20	5.30 5.80	2.80 2.80	71.12 71.12	60.96 101.60
単 位 重 量 (kgf/cm)	0.447 0.483	0.106 0.115	0.031 0.031	2.190 2.190	2.340 3.950
破 断 荷 重 (x10³kgf)	641.0 701.0	179.0 193.0	53.0 53.0	— —	— —
断 面 積 (cm²)	53.60 58.50	12.80 13.80	3.74 3.74	278.70 278.70	298.40 502.70
断面二次モーメント (x10⁴cm⁴)	— —	— —	— —	17.0 17.0	13.2 62.8
ヤ ン グ 率 (x10⁶kgf/cm²)	1.60 1.60	1.40 1.40	1.40 1.40	2.10 2.10	2.10 2.10

図-4に基本モデルの形状・寸法を示す。ここでは、構造を安定な系にし、計算の収束性を増すために、塔頂より耐風ケーブルを支持する斜めハンガー（耐風ケーブルハンガー）を取り付けている。実構造では、メインケーブルの各節点から耐風ケーブルハンガーを取り付ける場合が多いが、ここでは塔頂からのもので代表させた。

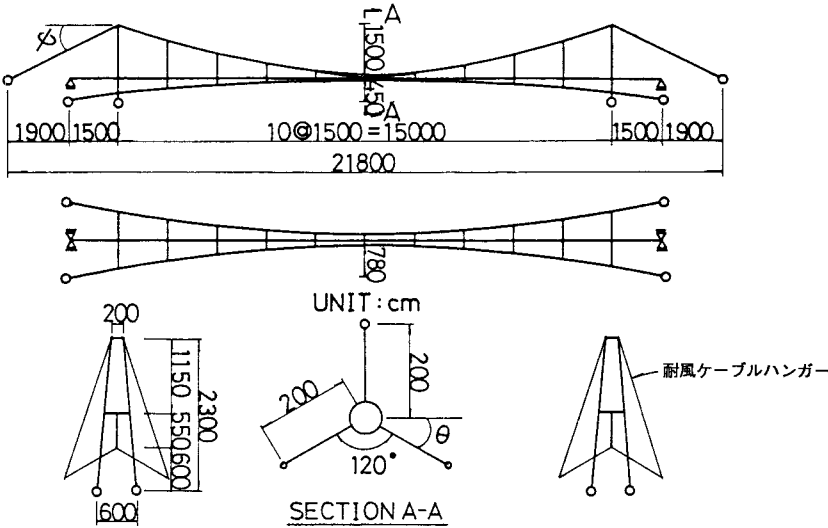


図-4 基本モデル（支間150m）の形状・寸法

3.2 数値計算方法

荷重の載荷方法としては施工の順序を考慮して次の4段階（図-5参照）を考え、この順序により載荷を行うものとする。

① 死荷重（自重）の載荷

耐風ケーブルとタイケーブルは、構造系としては入力するが、この段階では、計算上存在しない部材として取り扱う。その方法としては、耐風ケーブルおよびタイケーブルの自重を0とすること、また耐風ケーブルの端部を自由端とすることによる。荷重値は部材長と各部材の単位重量から計算したものを各節点に与えるものとする。

② プレストレスの導入

耐風ケーブルの両端にプレストレス力を外力として作用させる。プレストレス力の大きさは、風荷重載荷時に風下側の耐風ケーブルのプレストレス力が破断強度の数%残る程度に定めることを目標とした。

③ 活荷重（水荷重）の載荷

耐風ケーブルの両端をアンカーし、固定の境界処理をして、活荷重を載荷する。それぞれの節点の活荷重値は、部材長と管内水の単位重量から計算したものとする。

④ 風荷重の載荷

それぞれの節点の荷重値は小規模吊橋指針に従い、風速55m（300kgf/m²）の条件のもとで計算し、各節点に水平横方向に載荷するものとする。

節点の拘束条件は図-4に示すように定めたが、水管のx方向変位の拘束は支間中央の1点のみとした。これは、水管自身のアーチアクションと、拘束条件の非対称性による計算結果の非対称性を排除して、計算結果を理解しやすくするためである。

本研究では、第3段階までの載荷によって完成時の形状（以下目標形状と呼ぶ）となるようにするために、以下に述べる最適化手法を用いた繰返し計算により、架設前の初期形状を逆算する。

得られた無応力状態の形状（以下初期形状と呼ぶ）に対し、最終的に1～4段階の載荷を行いその結果を比較・検討に用いるものとする。

なお、本来設けられるべき水管のキャンバーは力学特性の検討に関係しないと考えて、今回は設けないこととし、水管は水平に設置するものとした。

3.3 最適化手法による初期形状の決定法

上記3段階の載荷の後に、水平な水管位置を保つ完成形状になるようにするために、架設前の初期形状を以下のように計算した。まず、水管・メインケーブル及び耐風ケーブルをそれぞれ放物線に近似できると仮定し、さらに水管中央部をHcm持ち上げ、タワー上端をDcm倒し、無応力状態の初期形状を設定する。次に、設定した形状に上記の3段階の荷重を載荷し、水管中央部のたわみh及びタワー上端の水平変位dを求め、次式で誤差関数ERを定義する。

$$ER = F_1(D, H) + F_2(D, H) = \alpha_1 + \alpha_2 \tag{2}$$

ここに、 $F_1(D, H) = (D - d)^2 = \alpha_1$ $d = f(D, H)$

$F_2(D, H) = (H - h)^2 = \alpha_2$ $h = g(D, H)$

ここで、いま与えたD、Hが求めるべき値から微小量(ΔD, ΔH)だけずれていたとすると、

$D = D^* + \Delta D$ D^* : タワー上端を倒す量の真値
 $H = H^* + \Delta H$ H^* : 水管中央部を持ち上げる量の真値

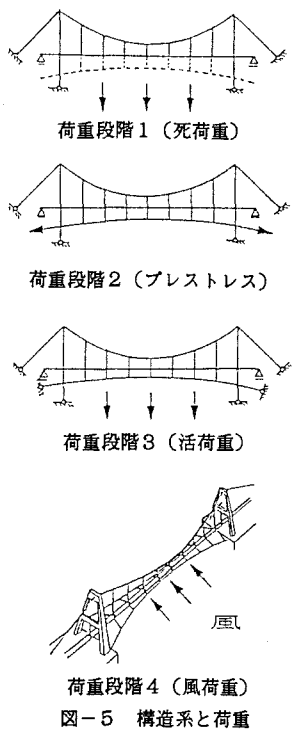


図-5 構造系と荷重

となる。つまり、

$$F_1(D, H) = F_1(D + \Delta D, H^* + \Delta H) = \alpha_1$$

$$F_2(D, H) = F_2(D + \Delta D, H^* + \Delta H) = \alpha_2$$

である。上式をTaylor展開し、2次項以上を無視すると次式を得る。

$$F_1(D, H) = F_1^*(D^*, H^*) + \frac{\partial F_1}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial F_1}{\partial H} \Delta H = \alpha_1$$

$$F_2(D, H) = F_2^*(D^*, H^*) + \frac{\partial F_2}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial F_2}{\partial H} \Delta H = \alpha_2$$

ここで数値が求められた時に、 $D^0 = d, H^0 = h$ なので、

$$F_1^*(D^*, H^*) = F_2^*(D^*, H^*) = 0$$

となる。すなわち、

$$\begin{bmatrix} P & Q \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta D \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$$

$$\therefore \begin{bmatrix} \Delta D \\ \Delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & Q \\ R & S \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$$

とかける。ここに、

$$P = \frac{\partial F_1}{\partial D} = \frac{1}{\delta} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{F_1(D + \delta, H) - F_1(D, H)}{\delta}$$

同様に

$$Q = \frac{\partial F_1}{\partial H}, \quad R = \frac{\partial F_2}{\partial D}, \quad S = \frac{\partial F_2}{\partial H}$$

である。以上のようにして $\Delta D, \Delta H$ を求め、 $D^* = D - \Delta D, H^* = H - \Delta H$ と修正し、 $ER \leq$ (許容値) になるまで繰り返す。本計算では許容値を仮に1.0cmとした。

上記の方法を用い、初期値を適当に与えた時の収束状況を図-6に示す。図から明らかなように、どの初期値から始めても1点に収束しており、水管中央部の持ち上げ量 $H = 89.8\text{cm}$ 、タワー上端の倒す量 $D = 8.1\text{cm}$ という結果になった。しかし、完成形状での水管の形は図-7の○印で示すように波打っており、目標とする完成形状(水平)との誤差は水管中央部では1.0cm以下であるが、最大で8.3cmあり、無視できない値となっている。そこで、 $ER \leq 1.0\text{cm}$ になった後、水管の節点座標のみをそれぞれ前回のたわみ量だけ持ち上げ、ケーブル類は放物線で近似した初期形状を設定した計算を最後に1回付加した。その結果、水管の完成形状は図-7の■印で示すようになり、誤差は最大で0.09cmとなり、実用的な結果が得られた。

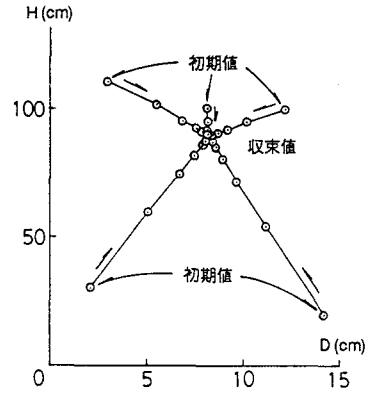


図-6 解の収束状況

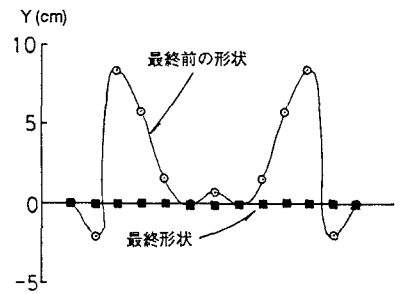


図-7 水管の最終形状

4. 解析結果と考察

4.1 基本モデル(支間150m)の解析結果と考察

1) ケーブル軸力の検討

各荷重段階におけるそれぞれのケーブルの軸力は表-3のとおりである。これによると、耐風ケーブル、タイケーブルのプレストレスが活荷重の載荷によって減少する様子(荷重段階: 2, 3)、また風荷重の載荷によって風上側の耐風ケーブルの引張軸力が増加し、風下側の耐風ケーブルの引

表-3 各ケーブル軸力(上段: tf)の破断軸力に対する比(下段)

着目部材	荷 重 段 階				破断荷重 (tf)
	1	2	3	4	
メインケーブル	56.1 (0.09)	77.3 (0.12)	160.0 (0.25)	165.1 (0.26)	641.0
風下側 耐風ケーブル		45.0 (0.25)	40.1 (0.22)	7.4 (0.04)	179.0
風上側 耐風ケーブル		45.0 (0.25)	40.1 (0.22)	84.6 (0.47)	179.0
ハンガー	5.0 (0.09)	7.1 (0.13)	17.0 (0.32)	18.4 (0.35)	53.0
風下側 タイケーブル		1.3 (0.02)	1.1 (0.02)	0.4 (0.01)	53.0
風上側 タイケーブル		1.3 (0.02)	1.1 (0.02)	3.6 (0.07)	53.0

張軸力が減少する様子（荷重段階：4）がよくわかる。

小規模吊橋指針において、メインケーブル、ハンガー、耐風ケーブル、タイケーブルの各ケーブルに要求される安全率はそれぞれ、3.0、3.5、1.5、1.5であるが、主塔から直接水管を吊っているハンガーの軸力が荷重段階3において既に破断強度の30%を越えており、必要な安全率3.5を満足するためには部材断面の変更するか、支持方式の改善を検討するかの対策が必要であると思われる。

その他のケーブルは、全て必要な安全率を満たしている。

本計算値を小規模吊橋指針による設計値と比較するとメインケーブル軸力は160tf（本計算）に対し158tf（設計値）であり、耐風ケーブル軸力は84.6tf（本計算）に対し107tf（設計値）となる。すなわち、本解析の様に、プレストレスによるケーブルの剛性増加が考慮できる有限変位解析法を用いれば、耐風ケーブルについてはより小さな径のケーブルの使用が可能となる。

2) 水管に働く応力度の検討

水管に働く圧縮または引張による応力度は、曲げ応力度と比較して無視できるほど小さいので、曲げ応力度を水管に働く応力度とする。

計算の結果、荷重段階3における鉛直曲げ応力度の最大値は980kgf/cm²、荷重段階4における鉛直曲げ応力度の最大値は1012kgf/cm²、水平曲げ応力度の最大値は390kgf/cm²となった。水管にSTK-400を用いた場合の許容応力度1400kgf/cm²に対して、問題はないと思われる。

また、最大応力が生じる位置は主塔直下であるが、これはハンガーの定着点が他と異なり主塔であることによりこの部分のたわみが小さく、水管に角折れが生じているためと考えられる。したがって、主塔下での水管の支持方法を改善することにより、最大応力度を小さく抑えることも可能となると考えられる。

小規模吊橋指針による基本モデルの設計例では、水平曲げの応力度が761kgf/cm²と計算されるが、本計算では400kgf/cm²程度以下である。これは、同指針では応力度を支間180mの単純ばりを基礎に算定していることに起因しており、本法のようなプレストレスによる耐風ケーブルの剛性増加を考慮した有限変位理論による解析が必要な理由のひとつとなる。

3) 変位の検討

図-8は、初期形状及び完成形状（y座標）を、また図-9は、完成形状および風荷重載荷後の水平方向の形状（z座標）を示している。風荷重の載荷によって、水管は177.1cm（スパンの1.2%）水平方向に変位する。小規模吊橋指針による設計例においては、水平変位は346cmと計算されており、精確な水平変位を求めするためには、本解析のような有限変位解析を行なう必要がある。

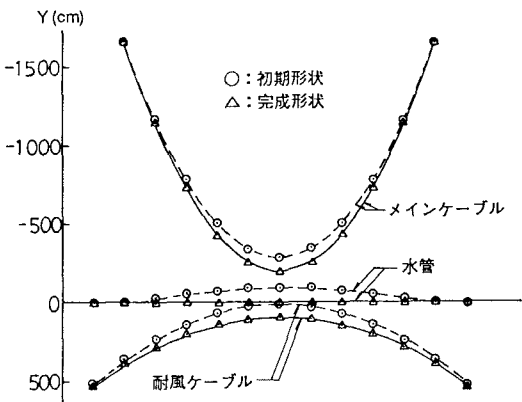


図-8 鉛直方向の変位図（側面図）

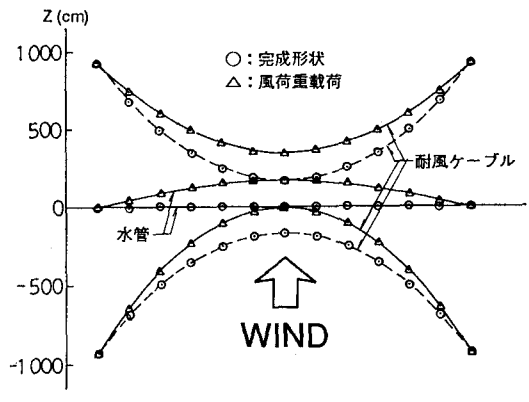


図-9 水平方向の変位図（平面図）

4) プレストレス量を変化させた場合の検討

施工時に耐風ケーブルに導入されるプレストレス力の大きさとしては、風荷重載荷時に風下側の耐風ケーブルの軸力が0または負値にならないように定めたが、ここではプレストレス力を変化させて解析を行ない構造特性の変化を調べるものとする。解析を行なうプレストレス力の大きさは60tf、75tf、90tfとし、45tfとあわせて検討を行なった。解析結果を各項目ごとに要約すると以下ようになる。

① メインケーブルの軸力

図-10より、プレストレス力が大きくなるにともない若干軸力も増加することがわかる。これは、プレストレス力の下向き成分がメインケーブルを引き下げることに起因する。

② 耐風ケーブルの軸力

図-11より、プレストレス力が大きくなるに伴い軸力も増加することがわかるが、これは、主に初期プレストレス力の増加に起因するもので、風上側、風下側とも、風荷重による軸力の増減量にはほとんど変化がないことがわかる。

③ 水管の応力

図-12は、プレストレス力の大きさを変化させた場合の水管に働く応力（第1段階の死荷重応力を差し引いた値）の最大値の変化を示したものである。鉛直曲げ応力は、主塔からの吊支持が剛であるため折れ曲がりが生じる結果、主塔の直下で生じる。また、水平曲げ応力は支間の1/4点付近の節点で生じている。図より、鉛直曲げによる水管の応力はプレストレス量の増加とともに増大し、水平曲げによる水管の応力はプレストレス量の増加とともに減少することがわかる。

④ 水管の水平変位

図-13より、プレストレス力が大きくなるにともない水平方向の剛性が大きくなるため水平変位は大きく減少していることがわかる。したがって、風荷重による水管の水平変位を小さく抑えるためには導入プレストレス力を大きくすることが効果的である。

以上の結果より、プレストレス力の大きさは、水管の水平変位の制限値が無ければ、風下側の耐風ケーブルのプレストレス力が破断軸力の数%程度残るように決定すればよいが、水管の水平変位を制限する必要がある場合は、導入プレストレス力を大きくすることで、ある程度調節できることがわかる。ただし、プレストレス量を大きくすると鉛直曲げによる水管の応力も増加するので、注意を要する。

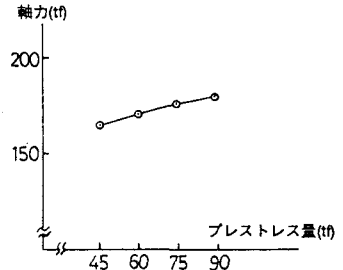


図-10 メインケーブルの軸力（最大値）の比較

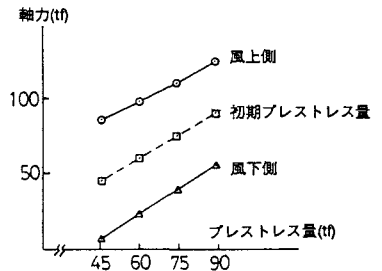


図-11 耐風ケーブルの軸力（最大値）の比較

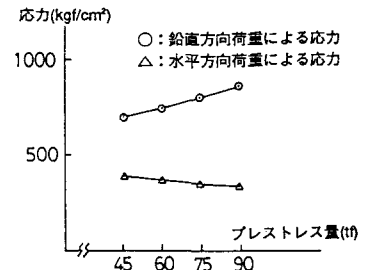


図-12 水管に働く応力（最大値）の比較

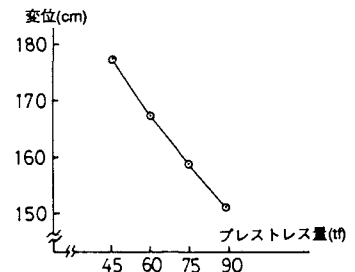


図-13 水平変位（支間中央点）の比較

4.2 構造パラメータを変化させた場合の解析結果と考察

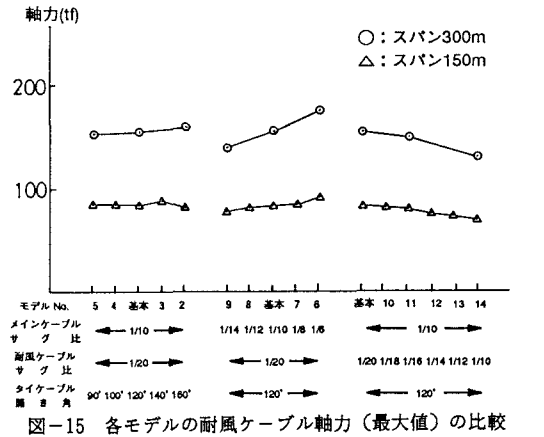
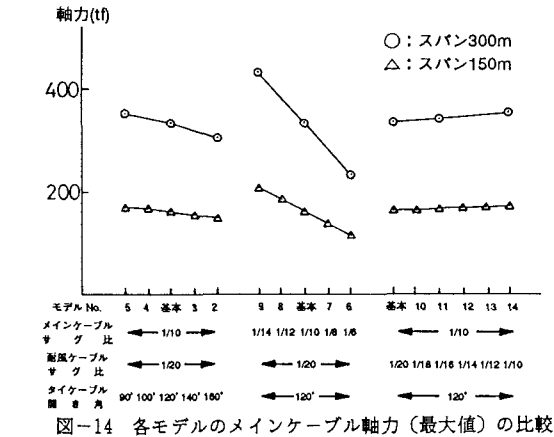
1) メインケーブルの軸力

図-14は、メインケーブル軸力の最大値の変化を示したものである。メインケーブルザグ比が大きくなると、軸力は急速に減少する。耐風ケーブル開き角によっても若干変動するが、耐風ケーブルザグ比に対してはほとんど変動しない。支間300mの場合の軸力は、支間150mの場合と比べると約2倍であり、軸力に及ぼす

非線形性の影響は小さいと考えてよい。

2）風上側耐風ケーブルの軸力

図-15は、風上側耐風ケーブルの軸力の最大値の変化を示したものである。この値には、初期プレストレス（支間150mの場合：45tf、支間300mの場合90tf）を含んでいる。軸力はタイケーブル開き角に対しては変動せず、メインケーブルザグ比を大きくすれば増大し、耐風ケーブルザグ比を大きくすれば減少する傾向にある。支間300mの場合の軸力は、初期プレストレスの違いにかかわらず、支間150mの場合の約2倍になっている。上記1）と考え併せて、メインケーブルザグの変化のみに着目すると、ザグ比が大きくなるとメインケーブルの軸力は減少するが、風上側耐風ケーブルの軸力は増加するという「trade off」の関係にある。

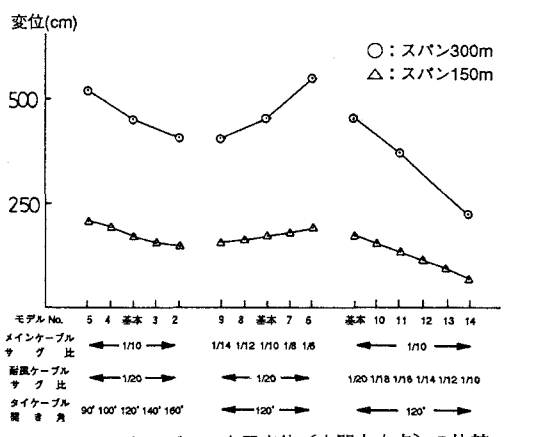
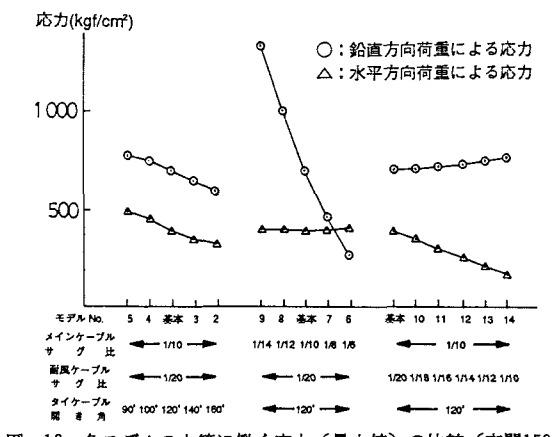


3）水管の応力

図-16は、水管応力（死荷重応力を除く）の最大値の変化を示したものである。前述したように、鉛直曲げ応力は、主塔からの吊り支持が剛なために折れ曲がりが生じる結果、主塔の直下で生じ、水平曲げ応力は支間1/4点付近で生じるケースが多い。図よりメインケーブルザグ比の変化が水管の鉛直曲げの応力に大きく影響することがわかる。その最大値は、支間150mの場合1331kgf/cm²、支間300mの場合1949kgf/cm²である。

4）風荷重による水管の水平変位

図-17は、風荷重による水平変位の最大値（水管中央）の変化を示している。耐風ケーブルのザグ比を大きく、またタイケーブルの開き角を大きくすると、水平変位は著しく減少することがわかる。支間300mの場合は、メインケーブルザグ比と耐風ケーブルザグ比に対する変動率は支間150mの場合より大きく、その絶対値も支間150mの場合の約2.5倍である。



5) 風荷重と水管の水平変位の間の非線形性

図-18は、風荷重を設計荷重以上に増大していった場合の水管の水平変位の変化を示している。この図より、解析対象としたモデルの水平方向の変位に対する非線形性は設計荷重レベルでは無視できる程度に小さいことがわかる。しかしながら、この結果から、構造解析が微小変位理論でよいという結論にはならない。なぜならば、この解析にはプレストレスによる耐風ケーブルの剛性増加が考慮されており、微小変位理論では、その効果が考慮できないからである。

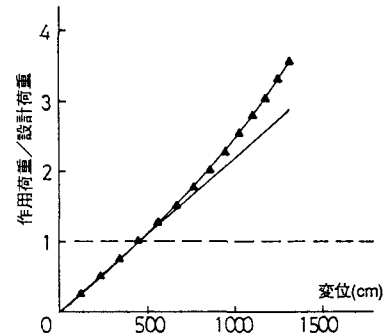


図-18 風荷重と水管の水平変位との間の非線形性

5. 模型実験

5.1 模型体

主として解析プログラムの妥当性の検証および構造特性の把握を目的とするため、模型体は具体的な水管橋の構造諸元のモデル化を避け、基本的な構造部材のみを有する簡略モデルとした。そのため、水管とケーブル類の相似率などは実際の橋梁のそれとは必ずしも合致していない。

図-19に模型体の形状・寸法を示す。なお、各部材には以下に示すような材料を用いた。

- メインケーブル：ピアノ線 ($\phi 1.5\text{mm}$)
- 耐風ケーブル：〃
- ハンガー：ピアノ線 ($\phi 1.0\text{mm}$)
- タイケーブル：〃
- 水管：アルミ管 ($\phi 35.0 \times 1.0\text{mm}$)
- 主塔：鋼管 ($\phi 34.0 \times 3.2\text{mm}$)

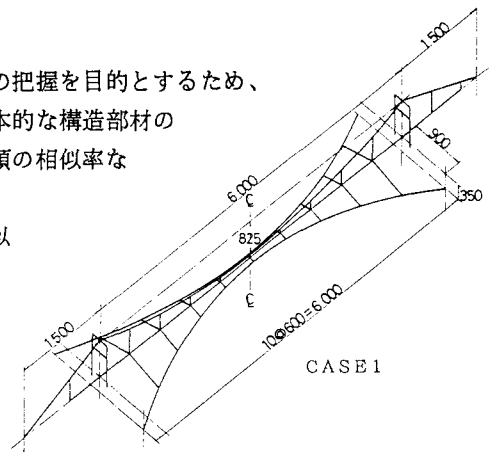


図-19 模型体の形状・寸法

また、力学的諸特性に及ぼすメインケーブルならびに耐風ケーブルのサグ比の影響も調査できるように、模型体においてメインケーブルと耐風ケーブルの定着点を2カ所に設けた。したがって、模型体の形状としてはメインケーブルと耐風ケーブルのサグ比が2種類ずつ、計4種類となり、それぞれについて実験を行なった。それら実験ケースを一覧表にして、表-4に示す。

表-4 実験ケース一覧表

	メインケーブル サグ比	耐風ケーブル サグ比	タイケーブル 開き角
CASE1	0.138	0.148	137.5°
CASE2	0.138	0.103	119.5°
CASE3	0.088	0.103	119.5°
CASE4	0.088	0.148	137.5°

5.2 調査項目と実験方法

設計において考慮すべき荷重としては、自重・水・風・地震・雪などが挙げられるが、補剛桁を持たずケーブル構造で水平方向の剛性を確保している本構造に関しては、静的特性として特に風・地震などの水平方向荷重に対する応答を調査しておくことが重要であると考えられる。このような観点から、実験においては以下に示す項目を測定し、メインケーブルサグ比・耐風ケーブルサグ比・耐風ケーブル初期張力などの設計パラメーターの影響を調査するとともに解析値と比較することとした。

- ① 水平載荷時の水管各部の変位・応力
- ② 〃 各ケーブルの軸力

静的載荷実験は、模型体の組み立て→水管キャンバーの導入→耐風ケーブル初期張力の導入→水平方向載

荷、という手順で行ない、水管に導入するキャンパーは、耐風ケーブルに初期張力を導入した際、水管がほぼ水平になるような値を、あらかじめFEM解析で求めておいた。荷重は支間中央付近3点に作用させ、載荷治具(0.825kgf)を取り付けた後、各点5kgfの荷重ピッチで20kgfまで載荷した。なお、各実験ケース(表-4参照)において耐風ケーブルに導入する初期張力は20、40、60および80kgfの4通りとした。

また、測定項目は水管のハンガー取り付け位置における変位、メインケーブル・耐風ケーブルの定着点における軸力およびハンガー・タイケーブルの軸力とし、各々変位計・特製のロードセルおよび歪ゲージを用いて測定した。

5.3 実験結果と考察

ここでは、実験値と解析値とを比較することにより、本解析プログラムの妥当性について検討を加える。まず、図-20に水平方向載荷時の水管の水平変位分布を、水管支点の鉛直・水平・橋軸方向変位を全て拘束した場合の解析値と比較して示す。また、図-21には、水管支間中央点における水平方向変位の荷重による変化を解析値と比較して示す。なお、図-21において実線は水管支点の変位を全て拘束した場合、破線は水管支点の橋軸方向変位を許した場合の解析値である。

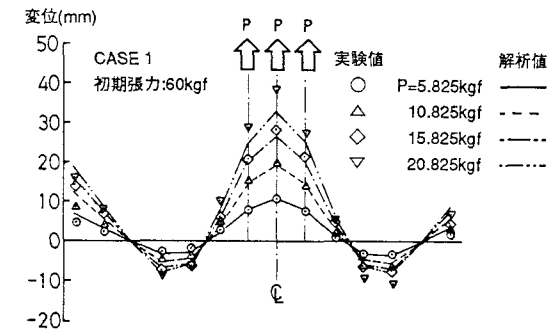


図-20 水管の水平変位分布(解析値:水管軸方向拘束)

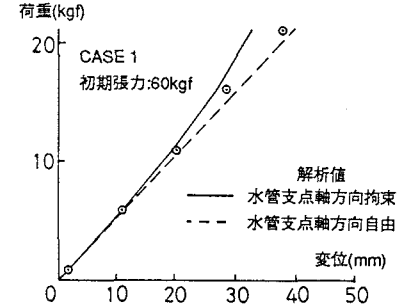


図-21 水平変位(支間中央点)と荷重の関係

図-20より、水管の水平変位分布については、側径間の水管変位が全般的に解析値より小さいことを除けば、比較的荷重の小さい領域では各実験ケースとも実験値と解析値はよく一致している。一方、図-21より荷重の大きい領域では、実験値は実線から破線に近づいているのが判る。これは、実験模型の支点条件が、水管の軸方向に関して不完全な拘束となっていることに起因するものである。図-22はそれを裏付けるために、水管の支点における軸方向変位と支間中央点における水平方向変位を荷重に対してプロットしたものである。この図から、水管の支点における軸方向変位が急激に大きくなる点と水管支間中央点における水平変位の実験値が実線から破線に近づいていく点(20kgf)とが一致していることが判る。参考のため、図-21に示した水管水平変位の実験値を支点の軸方向変位を許した場合の解析値と比較して図-23に示すが、両者は良い一致を示している。

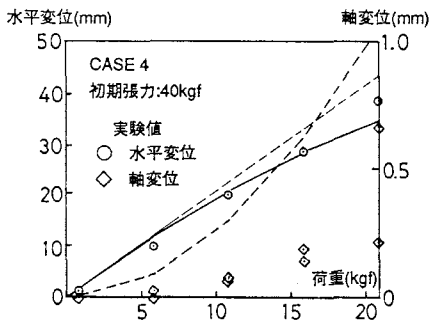


図-22 水平変位および軸変位の荷重による変化

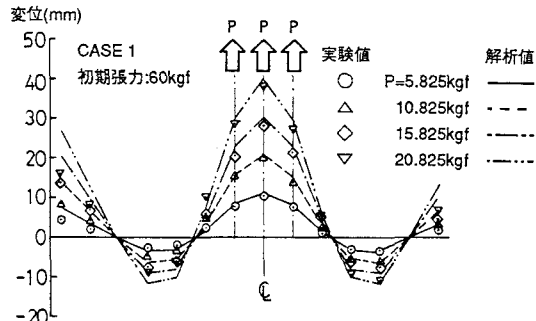


図-23 水管の水平変位分布(解析値:水管軸方向自由)

次に、図-24には、メインケーブルおよび耐風ケーブルの軸力の分布を解析値と比較して示し、図-25にはメインケーブルと耐風ケーブルの端部における軸力の荷重による変化を示す。なお、これらの図においては、軸力が小さい領域での測定値におけるケーブルの曲げの影響を排除するため、耐風ケーブルに所定の軸力が導入された時点での測定値を原点として、それからの増分で整理している。また、実線と破線との違いは変位の場合と同様、解析における境界条件の違いである。

図-25においても変位の時と同様、荷重が小さいときは実線に近く、荷重が大きくなると破線に近づく傾向が読み取れる。図-24では、縦軸をスケールアップしているため実験値と解析値との間にかなりの違いがあるように見えるが、その誤差は大きくても10%程度であり、模型体の製作精度などを考慮するとよく一致しているものと考えられる。

以上のことから、本解析法による計算結果は信頼できるものであり、前述した数値解析結果も実際の橋梁の力学特性を十分に反映したものであると判断できる。

6. まとめ

数値解析および模型実験の結果から得られた知見をまとめると以下ようになる。

- ① 静的な荷重に対する本構造の変位および断面力は、幾何学的非線形性を考慮した有限要素法による立体骨組解析プログラムにより、かなり精度良く求めることができる。
- ② 今回の解析モデルでは端部において水管を主塔から吊る構造としたが、水管の他の部分を吊っているメインケーブルに比べて主塔の剛性が高いため、この部分の水管はたわみにくい。したがって、この部分に角折れのような曲げ変形が生じ、鉛直面内の曲げ応力度の最大値もこの部分に生じる。また、主塔から直接下ろされたハンガーの軸力も所要安全率を下回る結果となった。
- ③ したがって、この付近の水管の継手の設計、水管の材質、ハンガーの断面決定について、応力的に余裕を持たせたり、タワー位置でより柔に支持する構造とするなど設計上の注意が必要である。
- ④ 水平風荷重に対する水管の水平変位の最大値は支間中央で生じ、基本モデルではその値は177cm（支間の1.2%）とかなり大きい。しかし、小規模吊橋指針による設計例では、340cm程度と計算され、本計算の倍程度となる。慣用設計法は線形計算であるため過大評価となっており、精確な水平変位を求めるためには、本解析法のようなプレストレスによる耐風ケーブルの剛性増加を考慮できる有限変位解析法を用いる必要がある。
- ⑤ 水平曲げによる応力度の最大は1/4点付近に生じる。しかし、その値は、小規模吊橋指針による設計計算値（760kgf/cm²）の1/2程度である。これも、慣用の設計法の計算の方が過大評価であると考えられ、本法の様な有限変位理論を用いなければならない理由となる。
- ⑥ 風荷重と水平変位の関係には、設計荷重以下ではほとんど非線形性は現われない。しかしながら、水管

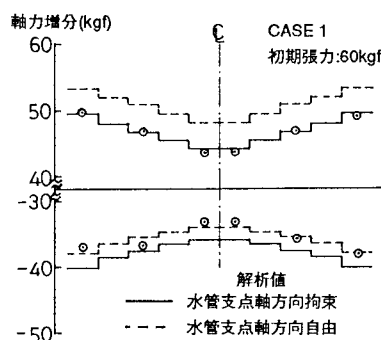
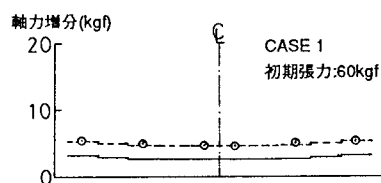


図-24 ケーブル軸力増分の分布

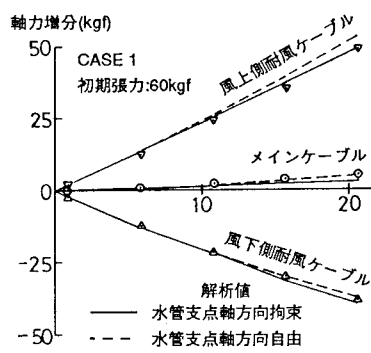


図-25 ケーブル軸力の荷重による変化

の水平曲げ応力度、水平変位耐風ケーブルの計算には、プレストレスによるケーブル剛性の増加の効果を考慮することが重要で、考慮しなければ過大設計となる。

- ⑦ 耐風ケーブルの初期プレストレス量を増加するとメインケーブルの軸力が若干増加するが、水管の水平変位を小さく抑えることができる。
- ⑧ タイケーブルの開き角は、大きいほど各ケーブルの軸力、水管の曲げ応力度、水管の水平変位を小さくすることができる。この意味では、タイケーブルの開き角を 180° すなわち耐風ケーブルを水平に張るのが、静的には最良であるとも言えるが、動的特性と併せて判断する必要がある。
- ⑨ メインケーブルのサグ比については、大きいとメインケーブルの軸力と水管の応力は小さくできるが、耐風ケーブルの軸力と水管の水平変位は大きくなる。影響が大きい水管の応力に着目するとサグ比は大きいほど良い。しかし、メインケーブルサグ比は、主塔の高さ（主塔の鋼重）にも影響を及ぼすので、より厳密な構造系全体の経済性を追求する場合は、最適設計の手法を用いて検討する必要がある。
- ⑩ 耐風ケーブルのサグ比を大きくするとメインケーブルの軸力はわずかに大きくなるが、他の性状には良い影響を及ぼす。特に、水管の水平変位を小さくおさえる効果が大きいので、耐風ケーブルのサグ比は、大きいほど良い。しかしながら、現場によってアンカーの位置が限定されることが多いことも考慮に入れる必要がある。
- ⑪ 水管の支点における拘束条件は静的挙動に大きく影響する。したがって、実構造の設計においては、支点における拘束条件を適切にモデル化することが大切である。

本文では、無補剛吊形式水管橋の完成系における静的挙動について、解析的および実験的に検討した結果を述べた。本研究により、本構造の基本的な静的構造特性は明らかにできたものとする。現在、風荷重などの外力が偏って作用する場合について、架設途中の構造系での力学挙動を含めて検討中であり、別の機会に報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 日本水道鋼管協会：水管橋設計基準(WSP007-88)、1988.9.
- 2) (社)日本道路協会：小規模吊橋指針・同解説、1984.4.
- 3) Komatsu, S. and Sakimoto, T. : Nonlinear Analysis of Spatial Frames Consisting of Members with Closed Cross Sections, Proc. of JSCE, No.252, Aug. 1976, pp.143-157.

(1991年9月30日受付)