

吊形式水管橋のコスト最小設計

熊本大学工学部 正 員 ○二木 秀敏
 同 上 正 員 小林 一郎
 同 上 正 員 崎元 達郎
 川崎製鉄(株) 正 員 中村 聖三

1. はじめに 筆者らはこれまで無補剛吊形式水管橋に関する一連の研究を行ってきた¹⁾。幾何学的非線形解析より、1) メインケーブルのサグ比についてはそれが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。2) 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、等が明かとなった。ここでは、これらの値をはじめ詳細設計に先だって決定すべきパラメータに関してコスト最小設計を行うための最適設計問題の設定と構造解析を線形理論と非線形理論で行ったときの部材力の比較について述べる。

2. 最適設計問題の設定

2.1 設計変数

1) 骨組形状に関する変数(3変数)

メインケーブルサグ比: $f_m = H_m/L_c$

耐風ケーブルサグ比: $f_w = H_w/(L_c + 2L_w)$

スパン比: $r = L_s/L_c$

ただし、 H_m, H_w はメインケーブルと耐風ケーブルのサグである。また、 L_c, L_w は主塔間および主塔と耐風ケーブル定着点間の距離で、定数とする。

2) ケーブル断面積に関する変数(4変数)

メインケーブル断面積 A_m 、耐風ケーブル断面積 A_w 、ハンガーケーブル断面積 A_h 、タイケーブル断面積 A_t

2.2 制約条件

1) ケーブルの軸力の制限

$$\text{メインケーブル軸力} : \nu N_m - T_m \leq 0 \quad (1)$$

$$\text{耐風ケーブル軸力} : \nu N_w - T_w \leq 0 \quad (2)$$

$$\text{ハンガーケーブル軸力} : \nu N_h - T_h \leq 0 \quad (3)$$

$$\text{タイケーブル軸力} : \nu N_t - T_t \leq 0 \quad (4)$$

ただし、 N は部材の軸力、 T はケーブルの破断強度、 ν は安全率を表す。

2) 水管の応力の制限

$$\text{直応力} : \max(\sigma_v, \sigma_h/1.2) - \sigma_a < 0 \quad (5)$$

$$\text{せん断応力} : \max(\tau_v, \tau_h/1.2) - \tau_c < 0 \quad (6)$$

$$\text{合成応力} : \max((\sigma_v/\sigma_a)^2 + (\tau_v/\tau_a)^2, (\sigma_h/\sigma_a)^2 + (\tau_h/\tau_a)^2) - 1.2 < 0 \quad (7)$$

ただし、添字 v は主荷重時、 h は風荷重載荷時を表す。また、 σ_a, τ_a は、許容応力度である。

2.3 目的関数

本水管橋は、補剛吊橋と比較し、上部工の使用鋼重を大幅に低減できるが、このことは相対的にアンカーのコストが大きくなることを意味している。このため目的関数としては、アンカーのコストも含め、次の通りに定める。

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \rightarrow \min \quad (8)$$

C_1, C_2, C_3 については以下のとおりである。

1) ケーブルの総コスト

$$C_1 = C_m \rho A_m \Sigma l_m + C_w \rho A_w \Sigma l_w + C_h \rho A_h \Sigma l_h + C_t \rho A_t \Sigma l_t \quad (9)$$

C_i : 単位重量当りの単価、 ρ : 単位体積重量、 A_i : ケーブルの断面積、 Σl_i : ケーブル i の全長

2) 塔のコスト (C_T)

$$C_2 = 2C_T(f_m, N_H) \quad (10)$$

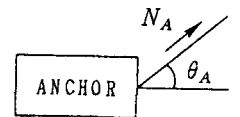
ただし、 C_T は f_m (メインケーブルスパンサグ比)、 N_H (メインケーブルの塔頂での水平力) の関数とする。

3) アンカーのコスト (C_A)

$$C_3 = 2C_A(N_A, \theta_A) \quad (11) \quad \text{図-1. アンカー部}$$

ただし、図-1 に示すように N_A はサイドケーブルの軸力、 θ_A はサイドケーブル取り付け角である。

ここで C_2, C_3 はあらかじめ各々の変数に対してパラメータ解析を行い、回帰式を求めておくものとする。



3. 解析モデル 図-2 に解析モデルを示す。2.1 の 1) にあるように L_c, L_w は定数であるので、実際には H_m, H_w, L_s を変化させるものとする。また、構造解析の計算順序は 1) 死荷重の載荷、2) プレストレスの導入、3) 活荷重(水荷重)の載荷、4) 風荷重の載荷となっている。ただし、耐風ケーブルは第2段階で取り付けその両端を自由端としてプレストレス力を作作用させ、第3段階以降は両端を固定端として解析を行っている。

4. 構造解析 最適設計を行う場合には、最適化計算そのものが非線形解析となるため、構造解析については、極力簡便な方法でより正確な応力度の評価が行えることが望ましい。前述のとおり本構造形式は変位に対しては非線形性の強い構造であるが、ここでは、最適設計の前段階として構造解析法の違いによる応力度の比較を行った。

解析の基本モデルは、 $L_c = 150\text{m}$ 、 $f_m = 1/10$ 、 $f_w = 1/20$ とした。その他表-1 に示すとおり 14 モデルについて線形解析と非線形解析を行った。ただし、非線形解析は文献 2) の解法に従っている。表-1 にはメインケーブルの軸力の最大値の比較を行ったが、主荷重時(活荷重載荷まで)に

は非線形解の方が 1, 2 % 大きくなるだけで最大値の差は大きくないことがわかる。また、風荷重載荷時には線形解の方が若干大きめの値を示しているが、この差も無視できる程度のものである。このことから、プレストレスが導入されたケーブル構造においては、部材力は線形解に近いものになっているものと思われる。 $L_c = 300\text{m}$ という小規模吊り橋設計指針の適用範囲を越える大スパンの構造に対してもモデル計算を行い、非線形解との差は数%にとどまるという結果を得ている。

本コスト最小設計の主旨は、詳細設計に入る前に、主として骨組形状に関するパラメータを決定することにある。このため、部材断面積の決定に当たっては構造解析は線形計算に従っても十分その目的を達成できるものと考ええる。なお、 C_2, C_3 の回帰式また最適設計の結果については講演時に報告の予定である。

参考文献 1) 崎元他: 吊形式水管橋の非線形解析と設計上の問題点の考察、第 45 回年講、pp.600-601、1990。 2) 小松、崎元: Nonlinear Analysis of Spatial Frames ..., 土木学会論文集, No.252, pp.143-157, 1976。

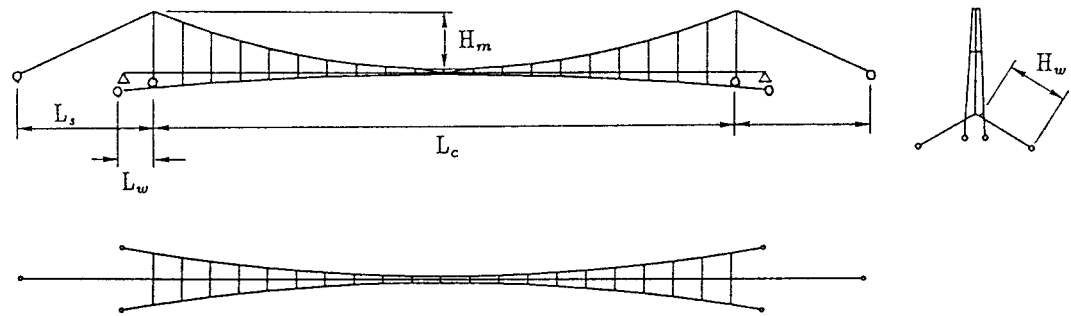


図-2. 解析モデルの平面、側面図

表-1. 各モデルの構造パラメータとメインケーブルにおける軸力の最大値(単位: t f) の比較

	スパン	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	活 荷 重 載 荷 まで			風 荷 重 載 荷 まで		
					非線形解	線形解	差	非線形解	線形解	差
基本モデル	150m	1/10	1/20	120°	160.3	157.9	-2.4 (-1.5%)	165.1	165.7	0.6 (0.4%)
モデル: 2	150m	1/10	1/20	160°	149.4	147.2	-2.2 (-1.5%)	151.7	152.1	0.4 (0.3%)
モデル: 3	150m	1/10	1/20	140°	155.3	152.9	-2.4 (-1.5%)	158.6	159.0	0.4 (0.3%)
モデル: 4	150m	1/10	1/20	100°	164.6	162.0	-2.6 (-1.6%)	171.5	172.2	0.7 (0.4%)
モデル: 5	150m	1/10	1/20	90°	166.4	163.8	-2.6 (-1.6%)	174.6	175.3	0.7 (0.4%)
モデル: 6	150m	1/6	1/20	120°	113.3	112.8	-0.5 (-0.4%)	116.9	117.0	0.1 (0.1%)
モデル: 7	150m	1/8	1/20	120°	136.7	135.5	-1.2 (-0.9%)	140.9	141.1	0.2 (0.1%)
モデル: 8	150m	1/12	1/20	120°	183.3	179.2	-4.1 (-2.2%)	188.6	189.7	1.1 (0.6%)
モデル: 9	150m	1/14	1/20	120°	204.9	198.7	-6.2 (-3.0%)	210.7	212.4	1.7 (0.8%)
モデル: 10	150m	1/10	1/18	120°	162.0	159.5	-2.5 (-1.5%)	166.2	167.0	0.8 (0.5%)
モデル: 11	150m	1/10	1/16	120°	164.0	161.4	-2.6 (-1.6%)	167.7	168.5	0.8 (0.5%)
モデル: 12	150m	1/10	1/14	120°	166.3	163.8	-2.5 (-1.5%)	169.4	170.5	1.1 (0.6%)
モデル: 13	150m	1/10	1/12	120°	169.3	166.8	-2.5 (-1.5%)	171.7	173.0	1.3 (0.8%)
モデル: 14	150m	1/10	1/10	120°	173.0	170.5	-2.5 (-1.4%)	174.8	176.2	1.4 (0.8%)