

(8) 無補剛吊形式水管橋の形状最適化

SHAPE OPTIMIZATION OF WATER-PIPELINE SUSPENSION BRIDGES

小林一郎*・崎元達郎**・古田俊宏***・中村聖三****

Ichiro KOBAYASHI, Tasturo SAKIMOTO, Toshihiro FURUTA and Shozo NAKAMURA

Shape optimization problem of water-pipeline suspension bridges are presented by using non-linear optimization technique. The total cost of cables, towers and anchorages is the objective function. The tower structure and anchorage are optimized and the cost functions of these structures are formulated in advance. The design variables are the main-cable sag ratio f_m , the wind-cable sag ratio f_w , the side-span to main-span ratio r and the cross sectional areas of cables.

Key Words : Water pipeline, Suspension bridges, Shape optimization, Space frame analysis, Two-level Optimization

1. まえがき

一般的な吊橋では、主荷重などの鉛直方向荷重に対する剛性確保と風荷重等の横荷重に対する剛性確保のため、トラスやボックス桁からなる比較的大規模な補剛桁を必要とする。ただし、これは道路橋や鉄道橋のように主荷重が移動荷重の場合であり、水管橋やガスパイプなどのように等分布荷重が主荷重で、かつ機能部材（鋼管など）がある程度剛性を有し構造部材としても利用できる場合には、これを補剛桁の一部として用いることにより、極めて軽量かつシンプルな構造とすることが可能となる。ただし、このような無補剛吊橋では機能部材のみの剛性では不足することが多いため、主ケーブルの他に耐風ケーブルなどの補助ケーブルを併用することにより構造的な安定を得ることになる。本形式の吊橋は、カナダを中心としていくつかの実施例があるが、わが国には歩道橋としての施工例があるのみである。筆者らはこれまで、本形式の静的非線形解析、耐風、耐震安定性についての一連の研究を行ってきた^{1),2),3),4)}。

本研究では、無補剛吊形式水管橋の完成形状において、詳細設計に先だって決定すべき骨組形状に関するパラメータについてコスト最小設計を試みる。ただし、直接最適設計を行うには、4段階に分けた荷重載荷の各段階で幾何学的非線形解析を行う必要があり、いわゆる、OPTIMIZER（最適化計算）に比べANALYZER（構造解析）の部分の計算時間が極度に長くなるため、簡易的な構造解析を用いる必要がある。また、目的関数も1）ケーブル構造、2）主塔、3）アンカーレッジの3つに分け、2）、3）については、メインケーブルのサグ比、サイドスパンの取り付け角度等の変数の関数として、あらかじめ最適化を行っておくものとする。ここでは、2. で構造解析の概要を述べ、3. では最適設計問題の定式化を行う。4. では、主として塔およびアンカーレッジの最適解の結果について述べ、5. でまとめを行う。

* 工博 熊本大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目)

** 工博 熊本大学教授 同 上

*** 工修 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部土木技術部 (〒100 千代田区内幸町2-2-3)

**** 工修 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部鋼構造研究所 (〒281 千葉市長沼351)

2. 構造解析の概要

図-1に本水管橋の概要図と各部材の名称を示す。前述のように、構造部材としては、メインケーブル、ハンガーの他に耐風ケーブルとタイケーブルの4種類のケーブルで構成されている。水管はその機能によって断面が決定されるものと考え、コスト評価の対象としては4種類のケーブルのみを考える。図-2は解析モデルの骨組形状である。 L_s 、 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図-3に示すように1)死荷重の載荷(D荷重)、2)プレストレスの導入(P荷重)、3)活荷重(水荷重)の載荷(L荷重)、4)風荷重の載荷(W荷重)の4段階よりなっている。ただし、耐風ケーブルには第2段階でプレストレス力作用させ、第3段階以降は両端を固定端として解析を行っている。

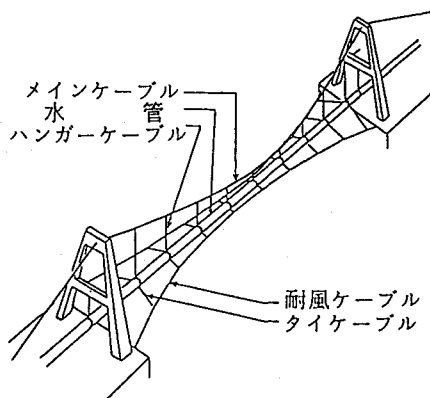


図-1 水管橋の概要図

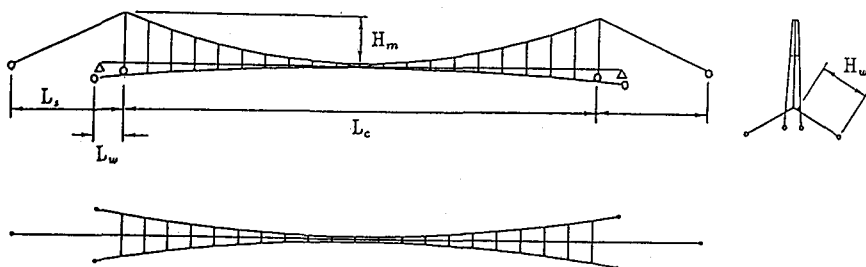


図-2 解析モデルの骨組形状

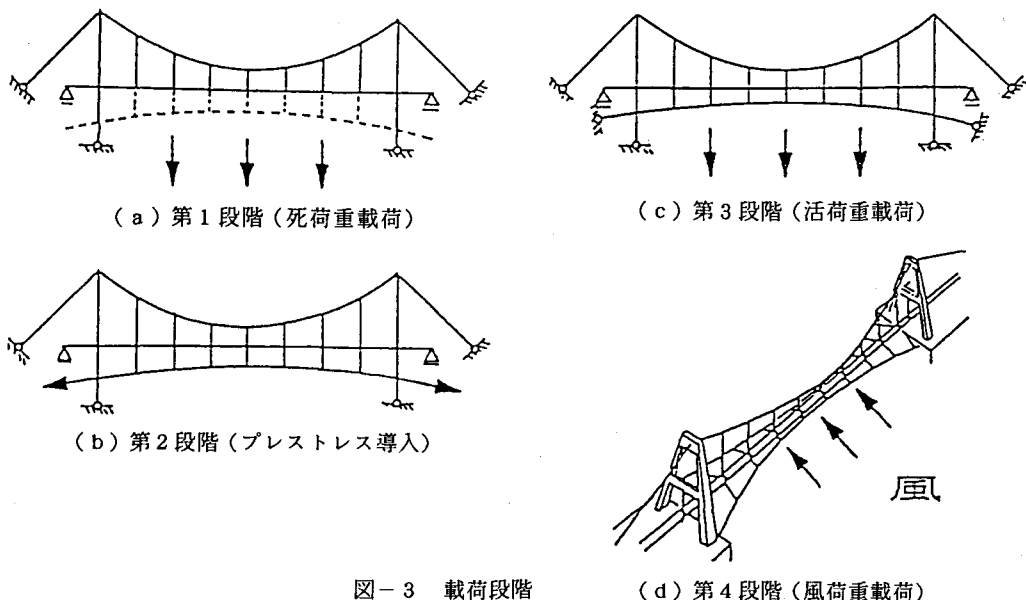


図-3 載荷段階

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部材力あるいは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部材力の比較を行った。すでにD荷重からL荷重までの3段階の線形解と非線形解の最大部材力にはほとんど差のないことが確かめられている⁵⁾のでここでは、風荷重(W荷重)による解の比較を行った。表-1はメインスパン $L_c = 150\text{ m}$ と $L_c = 300\text{ m}$ のときの解で、第3段階までは線形解析し、風荷重のみ線形解析した場合と非線形解析⁶⁾した場合の結果の比較である。表より、メイン、ハンガー、タイの各ケーブルの差は最大でも6%であり、すべてを線形解析で行っても最適解にそれ程の差は生じないと思われる。これに対して耐風ケーブルでは30%近く線形解の方が大きくなり、非線形解析を行った方が合理的な設計になることがわかる。そこで、ここでは耐風ケーブルについては第4段階の風荷重に対する線形解の最大部材力に0.7を掛けて応力制約式をたてることとする。

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する。

表-1 構造解析の結果の比較 (単位: tonf)

(a) $L_c = 150\text{ m}$

	メ イ ン		耐 風		ハ ン ガ ー		タ イ	
	線形解	非線形解	線形解	非線形解	線形解	非線形解	線形解	非線形解
D	54.25		—		3.20		—	
P	74.31		45.00		4.53		1.45	
L	162.37		40.01		10.93		1.32	
W	162.37	166.32	107.65	85.12	10.93	11.23	3.38	3.19
差 (比)	-3.95 (-2.4%)		22.53 (26.5%)		-0.30 (-2.7%)		0.19 (6.0%)	

(b) $L_c = 300\text{ m}$

	メ イ ン		耐 風		ハ ン ガ ー		タ イ	
	線形解	非線形解	線形解	非線形解	線形解	非線形解	線形解	非線形解
D	122.15		—		3.29		—	
P	171.60		100.60		5.08		1.83	
L	319.30		90.92		10.43		1.65	
W	319.30	329.82	238.53	184.80	10.43	10.69	4.02	4.04
差 (比)	-10.52 (-3.2%)		53.72 (29.1%)		-0.26 (-2.4%)		-0.02 (0.5%)	

3. 最適設計問題の設定

3.1 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 $r = L_s/L_c$ とする。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)

部材剛性に関する変数として、4 種類のケーブルの断面積を考える。すなわち、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 である。

3.2 制約条件

制約条件としては、上記 4 種類のケーブルの最大部材力に制限を設けるものとする。各ケーブルの破断荷重を T_S 、軸力を T 、安全率を ν とすると、

$$\nu T \geq T_S \quad (1)$$

となる。また、ここでは、水管の断面の設計は行わないが、一応、応力照査を行うこととし、①完成系での合成応力度の照査、②風荷重載荷時の合成応力度の照査を行う。

3.3 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レッジ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、アンカーレッジのコストも含め、次の通りに定める。

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \rightarrow \min \quad (2)$$

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

$$C_1 = C_m \rho A_m \sum l_m + C_w \rho A_w \sum l_w + C_h \rho A_h \sum l_h + C_t \rho A_t \sum l_t \quad (3)$$

ただし、 C_i は単位重量当りの単価、 ρ は単位体積重量、 $\sum l_i$ はケーブル i の全長である。また、添え字 m, w, h, t はそれぞれメインケーブル、耐風ケーブル、ハンガー、タイケーブルを表わす。

2) 塔のコスト

塔については、図-4 に示すように $L_c = 150$ m のときは、図-1 に示したような箱型断面の A 型 (以下 type A と呼ぶ) で、 $L_c = 300$ m のときはパイプ断面の門型 (type B) である。たとえば、type B の場合では、応力度の照査を行う場合には、局部座屈と全体座屈を考慮し、柱およびブレースの合計重量が求められる。また、水管位置は常に、地上より 6 m とし、塔高が変化した場合の骨組形状は相似形で変化するものとする。

塔 1 基のコスト C_T は、次式のように、メインケーブルサグ比 f_m とメインケーブルの塔頂での鉛直力 N_V の関数として求められる。

$$C_2 = 2C_T(f_m, N_V) \quad (4)$$

3) アンカーレッジのコスト

ここでは、メインケーブルと耐風ケーブルのアンカーレッジの総コストについて次式を考える。ただし、メインケーブルのアンカーレッジのコスト C_A はサイドケーブルの最大軸力 N_A とサイドケーブルの取り付け角 θ_A の、耐風ケーブルに関するコスト C_B は取り付け部の耐風ケーブルの最大軸力 N_B と耐風ケーブルの取り付け角 θ_B の関数とする。

$$C_3 = 2C_A(N_A, \theta_A) + 4C_B(N_B, \theta_B) \quad (5)$$

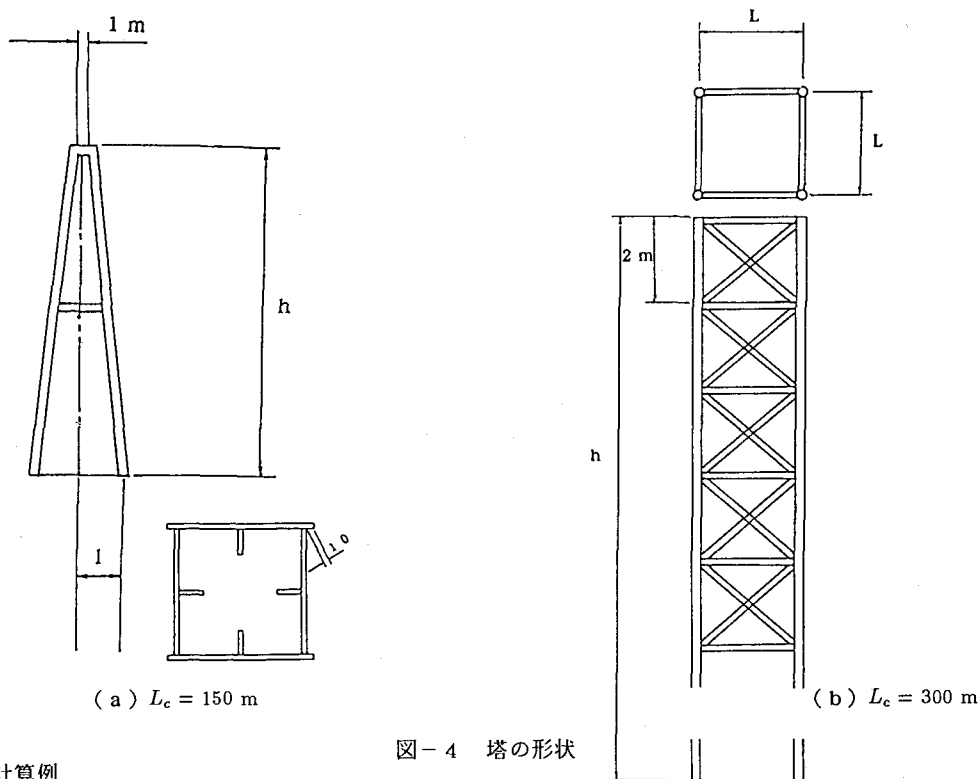


図-4 塔の形状

4. 適用計算例

ここでは、主として塔およびアンカーレッジの最適設計の結果とケーブルの最適化の概要について述べる。

表-2 は $L_c = 300 \text{ m}$ のときの各変数と最適主塔重量の関係を示したものである。表の値に単価を掛けて、塔1基のコスト C_T が求められる。表より、 f_m と N_V が大きくなれば塔の最適鋼重も単調に増加しているのがわかる。

アンカーレッジのコストの評価は、式(5)に示したように挙動変数 N (N_A または N_B) と θ (θ_A または θ_B) に対して、図-5のような矩体の諸元 a 、 b 、 c を設計変数、水平方向の滑動、鉛直方向の浮き上がり等を制約条件とし体積最小設計を行う。結果は、表-3に示したように、 N が小さくなれば体積は小さくなるが、 θ については55度付近が最も小さな値を示している。

式(2)の目的関数に従って、スパン $L_c = 300 \text{ m}$ の場合のケーブルコストを求めた一例を示す。ここでは、骨組形状に関する変数は、定数とし、 $f_m = 1/10$ 、 $f_w = 1/20$ 、 $r = 68/300 = 0.22667$ とした。断面積の初期値としては、メインケーブル断面積 $A_m = 100 \text{ cm}^2$ 、耐風ケーブル断面積 $A_w = 50 \text{ cm}^2$ 、ハンガーケーブル断面積 $A_h = 20 \text{ cm}^2$ 、タイケーブル断面積 $A_t = 20 \text{ cm}^2$ である。ただし、メインケーブルはロックドコイルロープ2本、その他は、ストランドロープ1本を使用するものとする。式(1)で示した、安全率はそれぞれ、 $\nu_m = 3.0$ 、 $\nu_w = 1.5$ 、 $\nu_h = 3.5$ 、 $\nu_t = 1.5$ である。単位面積当りの風荷重強度は 0.03 kgf/cm^2 、耐風ケーブルへのプレストレス導入量は $P = 120 \text{ tonf}$ とし、水管は直径70cmのものを用いた。なお、最適化手法としてはS L Pを用いた。

最適解は $A_m^* = 76.85 \text{ cm}^2$ 、 $A_w^* = 21.21 \text{ cm}^2$ 、 $A_h^* = 3.87 \text{ cm}^2$ 、 $A_t^* = 0.468 \text{ cm}^2$ である。各ケーブルの重量比は $1.000 : 0.4003 : 0.0171 : 0.0022$ となった。また、表-2、3より塔およびアンカーレッジのコストを加算した場合、ケーブルの総コスト、塔およびアンカーレッジのコストの比は $1.000 : 0.2743 : 0.0674$ となった。ここでは、塔に関しては沓等の付属品、アンカーレッジに関してはアンカーフレーム等のコストを考慮していないため、これらを加算したより実際的なコスト評価が必要である。

表-2 塔の最適鋼重 (単位: tonf) $L_c = 300$ m

N_y \ L_c	1/15	1/12	1/10	1/9	1/8	1/7	1/6
900	62.1	73.2	84.3	91.6	105.3	117.8	135.0
800	55.8	65.8	75.7	82.6	94.9	106.2	121.4
700	48.7	58.6	67.4	76.4	84.2	94.5	108.2
600	44.5	52.6	63.0	68.5	75.8	85.2	100.9
500	38.2	45.1	53.8	58.5	67.2	77.4	92.2
400	30.7	37.9	45.0	49.5	56.9	63.9	79.2
300	24.2	28.5	34.4	39.1	43.1	52.3	60.0
200	19.3	22.7	26.2	28.6	33.1	37.2	44.9
100	11.0	12.9	14.8	16.2	18.1	20.4	25.0

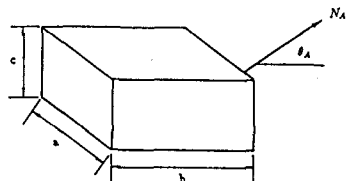


図-5 アンカーレッジの形状

表-3 アンカレッジの最適体積 (単位: m^3)

N \ θ	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
20	22.500	46.400	77.500	92.500	117.975	147.600	162.000	176.400	203.840	219.700	254.800	269.500
25	21.600	46.400	77.500	92.500	117.975	147.600	162.000	172.800	203.840	219.700	254.800	264.600
30	21.600	46.400	77.500	92.500	117.975	144.000	158.400	172.800	203.840	215.475	249.900	264.600
35	21.600	46.400	75.000	90.000	114.950	144.000	158.400	169.200	199.680	215.475	249.900	259.700
40	21.600	44.800	75.000	90.000	114.950	140.400	154.800	169.200	195.520	211.250	245.000	254.800
45	20.700	43.200	72.500	87.500	111.925	136.800	151.200	162.000	191.360	207.025	240.100	249.900
50	19.800	43.200	70.000	85.000	108.900	133.200	147.600	158.400	187.200	198.575	230.300	245.000
55	19.800	41.600	67.500	82.500	102.850	129.600	144.000	158.400	183.040	198.575	220.500	240.100
60	21.600	42.000	63.000	83.250	105.000	125.000	148.225	169.200	187.200	211.420	229.376	252.648

5. まとめ

本研究は無補剛吊形式水管橋の完成形状の最適化を試みるものである。本構造は有限変位解析を必要とするが、構造計算例を示し、最適設計に必要な軸力の算出には線形解析で十分であることを述べた。また、最適設計問題の設定に当たっては、ケーブルの総コストだけでなく、主塔、アンカーレッジのコストをそれぞれ別個に最適化し、塔に作用する鉛直力やサイドケーブルのアンカーレッジへの取り付け角といった、構造解析や骨組形状から得られるいくつかの変数の関数として最適コストをまとめ、ケーブルの最適化が行われれば、即座に塔およびアンカーレッジを含めた全コストが求められるようにした。なお、今回は骨組形状については定数としたが、本構造の各部のより詳細なコスト評価を行い骨組形状も含めた最適化を行う予定である。

参考文献

- 1) 崎元達郎他: 吊形式水管橋の非線形解析と設計上の問題点の考察、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集、pp.600-601、1990.
- 2) 崎元達郎他: 吊形式水管橋の架設計算について、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、pp.618-619、1991.
- 3) 久保喜延他: 無補剛吊形式水管橋の三次元模型による耐風性の検討、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、pp.488-489、1991.
- 4) 久保喜延他: 無補剛吊形式水管橋断面の渦励振制振法、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、pp.490-491、1991.
- 5) 小林一郎他: 吊形式水管橋のコスト最小設計、平成2年度西部支部研究発表会講演概要集、pp.24-25、1991.
- 6) 小松、崎元: Nonlinear Analysis of Spatial Frames 土木学会論文集、No.252, pp.143-155, 1976.