

ケーブルへの質量付加による斜張橋主塔の 大地震対策に関する研究

井上幸一¹・杉本博之²・森下邦宏¹・山本利弘³・古川浩平⁴

¹正会員 工修 三菱重工業(株) 広島研究所鉄構・土木研究室 (〒730-8642 広島市中区江波沖町5番1号)

²正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064-0926 札幌市中央区南26条西11丁目1番1号)

³工博 リョーセンエンジニアズ(株) 技術計算センター (〒733-0036 広島市西区観音新町1丁目20番24号)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2丁目16-1)

既設斜張橋の大地震対策を考えた場合、特に1本柱形式の塔に関しては橋軸直角方向の地震に対する応答が問題となることが多い。しかし、塔の断面補強や制振、免震などの対策は実施工上大きな困難を伴うことが予想される。そこで、本研究ではケーブルとの連成により塔の地震応答が大きく変化し得る点に着目し、ケーブルへの質量付加によりその振動数を変化させることで塔の地震応答を制御する方法について検討した。最適化手法を用いてモデルとした斜張橋の各ケーブルへの合理的な質量配分を決定した結果、橋軸直角方向地震に対する塔の応答を無対策の場合の最大約1/3に低減でき、大地震対策として有効であることが確認できた。

Key Words: cable-stayed bridge, seismic response, counter measure, great earthquake, optimization technique

1. まえがき

平成8年に改定された道路橋示方書¹⁾において、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大強度を持つ地震動(以下レベル2地震と呼ぶ)に対する耐震性能の照査が義務づけられた。そして、これに基づき既に供用中の、主に都市内高速道路高架橋を中心に耐震補強工事が実施されてきている。

一方、高速道路高架橋以外のラーメン橋、アーチ橋や斜張橋など各種形式の比較的規模の大きい橋梁についても耐震検討が始められているものがある。しかし、各々の構造特性に応じ、基礎や部材の弾塑性なども考慮した動的検討が必要となること、実施工もふまえた現実的で有効な対策を見出すことが困難であることなどから、耐震補強工事の実施にまで進んでいないのが現状である。しかし、これらの橋梁は重要橋梁であることが多く、所要の耐震性能を有することが社会的に強く要請されている。

比較的中小規模の斜張橋においては、1本柱形式の塔を採用している場合が多い。このような斜張橋において、橋軸直角方向地震により生じる塔の曲げモーメントは基部で最大になるが、この曲げモー

メントにより塔基部に塑性ヒンジが形成されると塔はもはや地震力に抵抗できなくなる。ケーブルや桁の損傷は比較的局部的なものになると想定されるが、塔の損傷は全体の崩壊につながるため絶対に避けなければならない。しかし、可能な限りスレンダーに作られた塔の断面補強は容易ではない。

そのため、断面の補強とは別の観点から、耐震性を向上させる方法を検討することが必要となる。それには、制振、免震などの方法が考えられるが、マスダンパーなどの制振装置を既設塔頂部の狭い空間に設置することは容易ではなく、また塔の大きな反力を支持している塔支承を免震化する工事は実際上ほとんど不可能と考えられる。

斜張橋は桁、塔及びケーブルから構成され、この3者の連成により複雑な応答性状を呈することが知られている。本研究は、斜張橋のこのような特性を逆に利用して、より現実的な斜張橋塔のレベル2地震対策を提案するものである。即ち、ケーブルとの連成により塔の地震応答が大きく変化し得るという斜張橋の特性に着目し、ケーブルへの質量付加によりその固有振動数を変化させることで塔の地震応答を抑制する方法について検討する。

検討に際しては、多数のケーブルの影響を同時に考慮して実際の施工などの条件をふまえた上で合理的な付加質量を決定するため、最適化手法を適用するものとする。

2. ケーブルへの質量付加による地震応答制御方法の概要

近年建設された斜張橋はマルチケーブル化し、ケーブル段数が10段前後のものが多くなっている。そのため、最上段から最下段までのケーブルの固有周期が広範囲に分布し、そのうち数本は塔や桁の固有周期に接近していることが多い。このような斜張橋では塔のたわみ振動とケーブル振動が連成しているモードが多数存在し、橋軸直角方向地震に対する応答解析を実施すると、ケーブルの振動を考慮するかしないかにより応答解析結果にかなりの差が見られることを我々はしばしば経験している。

この事実は、塔や桁の応答に対しケーブルの振動が少なからず影響していることを意味している。言い換えれば、ケーブルを利用して塔や桁の応答を制御できる可能性があることを示唆している。

塔や桁の地震応答は、それらの固有周期とケーブルの固有周期との関係で決まり、ケーブルの固有周期を変化させれば塔や桁の地震応答が変化するものと考えられる。ケーブルの固有周期を変化させる方法として、ケーブルの質量あるいは張力を変化させることが考えられる。張力に関しては、構造各部において適切な応力状態になるようにケーブルプレストレスが決められており、これを変えることは全体強度に与える影響が大きく、困難である。

一方、質量に関してはケーブルに付加質量を与えることで比較的容易に調整可能であるが、死荷重の増加になることやサグが大きくなることなどから、ある程度制限を設けることは必要であろう。重りの付け方としては、例えば比重の大きな金属製の厚肉管を半割にしたものでケーブルを挟み、これを閉じ合わせるような方法が考えられる。この場合、図-1に示すように重りがケーブルのたわみの妨げにならないように不連続に取り付けるのが良いと考えられる。

以上の点から、ケーブルに付加質量を与えてその振動性状を変化させることにより、橋軸直角方向地震時の斜張橋の応答の低減を図ることを考える。この時、多数のケーブルの振動が複雑に影響し合うことが予想されることから、単に個々のケーブル影響の線形的な考えでは合理的な付加質量の分布を決定することは極めて困難であると予想される。

そこで本研究では、最適化手法を適用し、全ケーブルの影響を同時に考慮して合理的な付加質量分布を決定することを試みる。付加質量決定の規準としては、塔の応答を最小にすることの他に、死荷重の増加をできるだけ抑えるようにするため塔の応答が

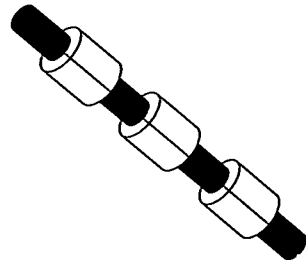


図-1 ケーブルの付加質量の例

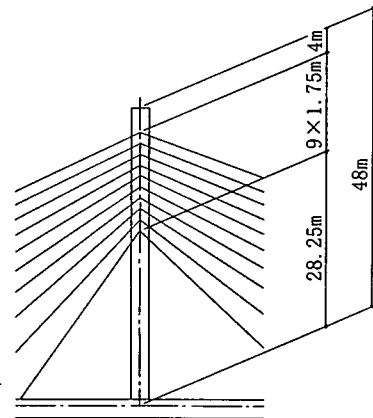
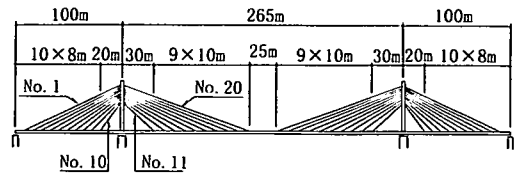


図-2 検討対象斜張橋

許容範囲内という制約条件の下で総付加質量を最小にすること、あるいは施工性を考え塔の応答を抑えるとともに質量を付加するケーブル数をできるだけ減じることなどが考えられる。

3. ケーブルへの質量付加の影響

(1) 検討方法と対象橋梁

次に、ケーブルへの質量付加が斜張橋の地震応答に与える影響について、数値解析により検討する。対象とする橋梁は、図-2に示す3径間連続鋼斜張橋である。ケーブルは10段の1面吊りであり、塔は1本柱形式である。この橋梁は道路橋一等橋として設計されたものであるが、耐震設計は平成8年以前の道路橋示方書に準じている。

着目する応答としては橋軸直角方向地震時の塔基部の応力を考えるが、本形式の斜張橋では橋軸直角方向地震に対して塔に軸力が生じないため、塔基部の曲げモーメントで代表させる。解析モデルの概要

表-1 ケーブル諸元

No	断面積 (m ²)	質量 (t/m)	張力 (MN)
1	0.0192	0.160	7.34
2	0.0192	0.160	7.72
3	0.0192	0.160	8.08
4	0.0116	0.098	5.05
5	0.0116	0.098	5.17
6	0.0116	0.098	5.23
7	0.0072	0.060	3.21
8	0.0072	0.060	3.05
9	0.0072	0.060	2.70
10	0.0072	0.060	2.06
11	0.0072	0.060	1.64
12	0.0072	0.060	2.29
13	0.0072	0.060	2.71
14	0.0072	0.060	2.92
15	0.0116	0.098	4.85
16	0.0116	0.098	4.86
17	0.0116	0.098	4.77
18	0.0192	0.160	7.69
19	0.0192	0.160	7.39
20	0.0192	0.160	7.06

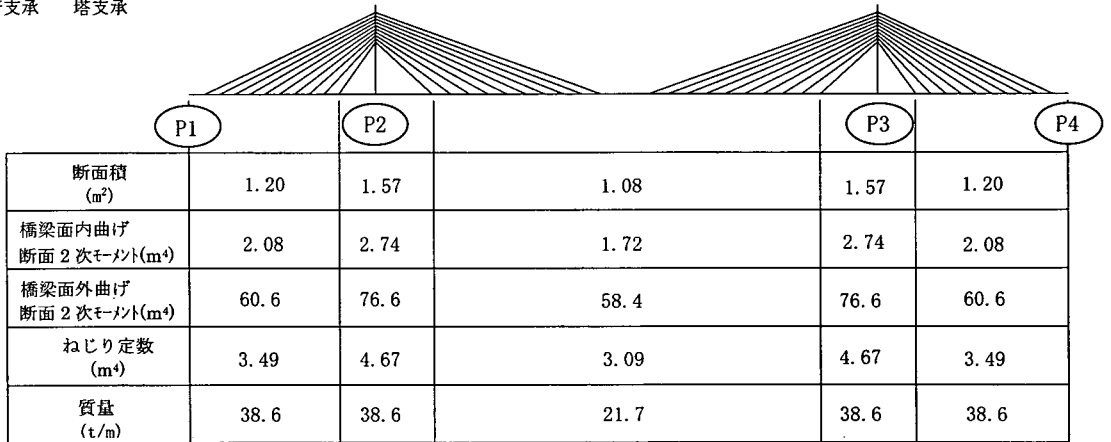
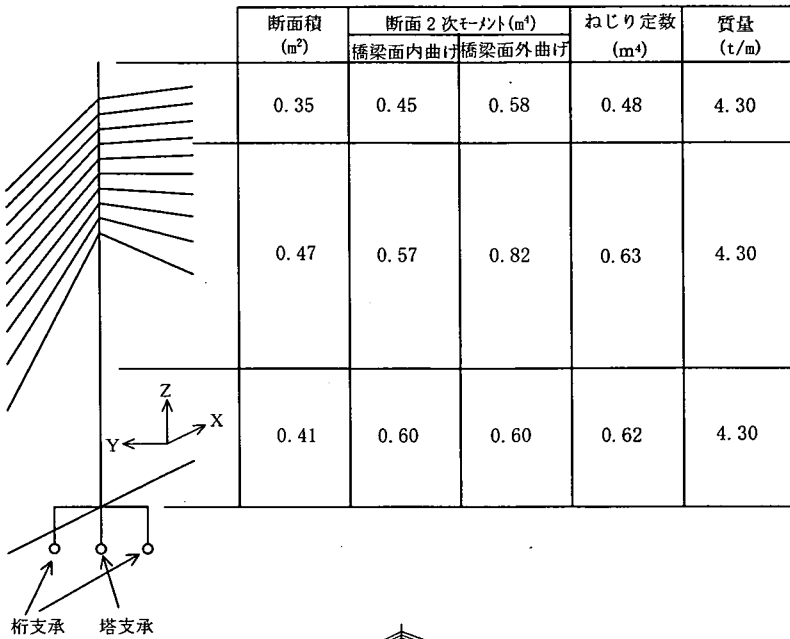


図-3 解析モデル概要

を、図-3 及び表-1 に示す。解析モデルは、塔および桁には梁要素を用い、ケーブルにはプレストレスを含む死荷重張力に相当する幾何剛性を考慮したトラス要素を用いた有限要素モデルである。ヤング率は、塔および桁について $2.00 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ケーブルについて $1.95 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とした。各ケーブルは 50 分割して中間質点を設けており、モデル全体で要素数は 1082、自由度数は 2106 である。

境界条件は、全支承とも Y, Z 方向固定、P2 の塔支承のみ X 方向固定である。X 軸周り、Y 軸周りと Z 軸周り回転は全支承とも自由である。

地震応答解析は応答スペクトル法を用い、応答計算に採用するモード数は 100 であり、100 次モードは 10Hz を上回っている。応答値の評価は、固有周期が接近した多数のモードが存在することから、次に示す完全 2 次結合式²⁾によるものとした。

即ち、点 n の最大応答 x_n は

$$x_n = \sqrt{\sum_j \sum_k \alpha_{jk} \Phi_{nj} \Phi_{nk} S_j S_k} \quad (1)$$

ここに、 Φ_{nj} は n 点の j 次振動モード、 S_j は j 次振動に対する応答スペクトルである。また、 α_{jk} は j 次と k 次の振動モード間の連成が最大応答に及ぼす影響を表す以下の式で与えられる係数である。

$$\alpha_{jk} = \frac{2\sqrt{\beta_j \beta_k} \{(\omega_j + \omega_k)^2 (\beta_j + \beta_k) + (\omega_j^2 - \omega_k^2) (\beta_j - \beta_k)\}}{4(\omega_j - \omega_k)^2 + (\omega_j + \omega_k)^2 (\beta_j + \beta_k)} \quad (2)$$

ω_j, β_j はそれぞれ j 次振動の固有円振動数, 減衰定数である。

入力は, 道路橋示方書¹⁾の 6.3 に与えられるタイプ I の第 2 種地盤に対する応答スペクトルを用いる。地域別補正係数は 1.0, 減衰定数別補正係数は道路橋示方書¹⁾の 6.3 による。

なお, 構造減衰はケーブルのみ 0.16% とし, その他はすべて 2% とした。

(2) 固有値解析結果

図-4 に固有モードの一部を示す。構造の対称性から全体の 1/2 を示しており, また, 橋軸直角方向地震に対する応答に寄与しない逆対称モードは省略している。

塔単独の固有周期は 1.40Hz であるが, 全体系ではケーブルとの連成により 0.79~2.31Hz (1~24 次) の間に塔の曲げを伴うモードが多数出現している。また, 次数の低い順に上段ケーブルから振動が生じている。

桁に関しては橋軸直角方向たわみ振動は 1.20Hz であり, ケーブルとの連成により 0.93Hz (3 次) となっている。このモードでは, 塔の曲げも生じている。

(3) 応答の変化

各ケーブル単独に, 全長にわたって等分布付加質量を与えたときの塔基部曲げモーメント応答の変化を, 図-5 に示す。ケーブル番号は, 図-2 に示すとおりである。図-5 の横軸は付加質量比, 即ち付加した質量のケーブル自身の質量に対する比率を表しており, 下限は 0.0, 上限は 1.0 としている。また, 縦軸は塔基部曲げモーメント応答値を示しており, 付加質量を与えない場合は 147.0MN・m であった。

側径間側では上 2 段ケーブル (No. 1, 2) が塔基部曲げモーメントの減少に与える影響が大きく, しかも複雑な変動を呈している。3 段目以下のケーブルは, 与えた付加質量の範囲内では塔基部曲げモーメントを減少させる効果はない。一方, 中央径間側では上から 2 段目のケーブル (No. 19) が塔基部曲げモーメントの減少に与える影響が, 他のケーブルに比べ格段に大きくなっている。No. 19 ケーブルは, No. 20 ケーブルに次いで質量が大きく, 図-4 に示すようにその振動は No. 20 ケーブルよりも多数の 4 つのモードに出現しているため, 影響が大きくなったものと考えられる。

次に, 最も効果のある No. 19 ケーブルの付加質量比を 0.5 に固定し, 上記同様に各ケーブル単独に付加質量を与えた場合の塔基部曲げモーメント応答の変化を求めた。これを図-6 に示す。縦軸は, 図-5 同様塔基部曲げモーメントの応答値を示しており, No. 19 ケーブルのみに質量比 0.5 の付加質量を与えたときの塔基部曲げモーメントは 81.7MN・m であった。図中の一点鎖線は, まったく質量を付加しない場合の塔基部曲げモーメントを示している。図-5 で示した塔基部曲げモーメント減少に効果のあった

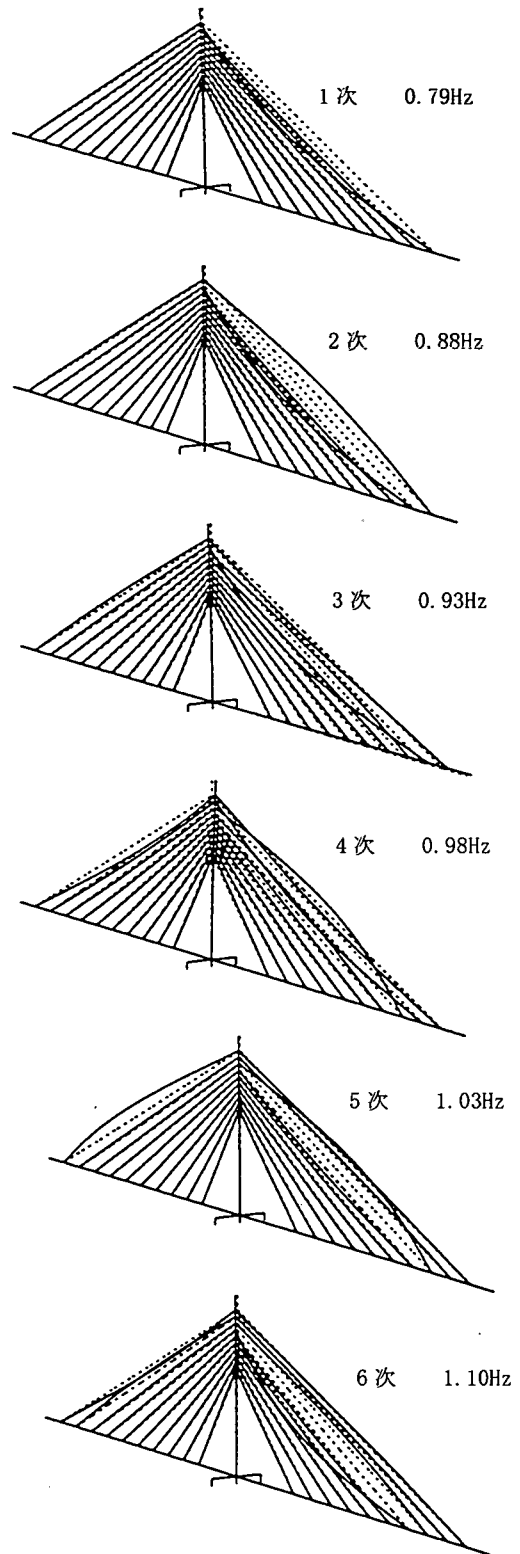


図-4 固有振動モード

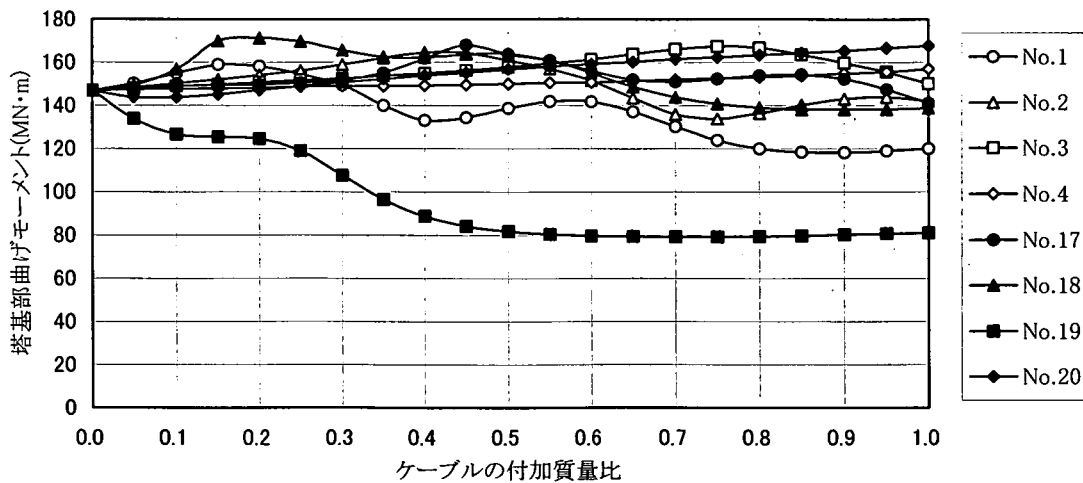


図-5 塔基部曲げモーメントに与える付加質量の影響

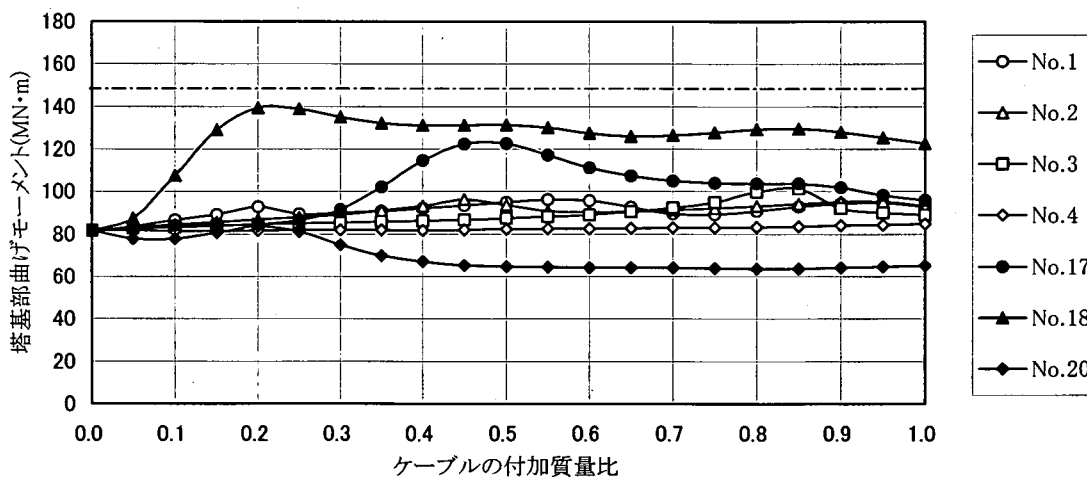


図-6 塔基部曲げモーメントに与える付加質量の影響
(ケーブル No. 19 の付加質量比を 0.5 に設定した場合)

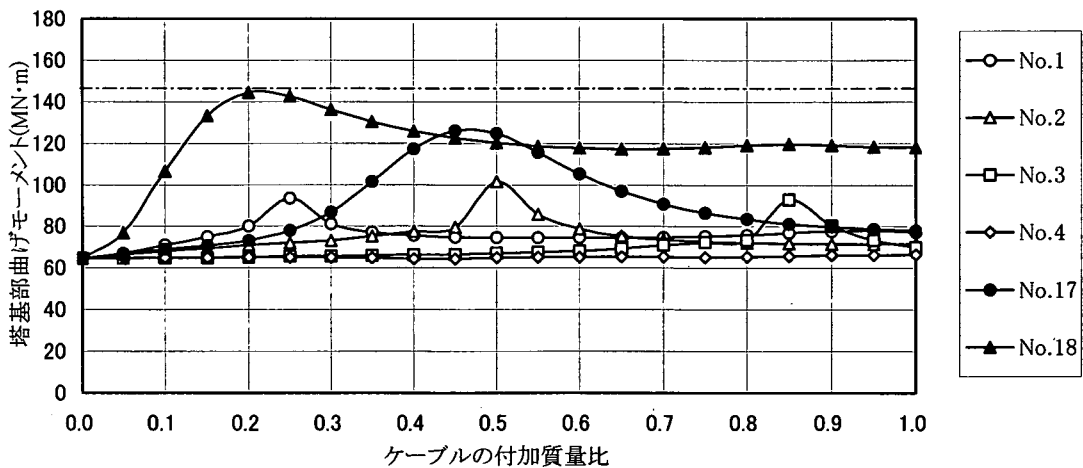


図-7 塔基部曲げモーメントに与える付加質量の影響
(ケーブル No. 19, 20 の付加質量比を 0.5 に設定した場合)

ケーブル No. 1 と 2 の効果がなくなり、代りにケーブル No. 20 が有効になってきている。

そこで、さらにケーブル No. 19 と 20 の付加質量比を 0.5 とした場合、その他ケーブル単独に質量付加した影響を同様に調べると、図-7 に示す結果となった。No. 19 と 20 ケーブルのみの付加質量比を 0.5 とした場合の塔基部曲げモーメントは 64.6MN・m となり、まったく付加質量を与えない場合の塔基部曲げモーメント応答値 147.0MN・m の 44% となっている。

図から明らかなように、これ以上どのケーブルに対して単独に付加質量を与えても、もはや塔基部曲げモーメントは低減できない結果となっている。

以上の検討のように、ケーブルの付加質量の与え方によって塔基部曲げモーメント応答は大きく変化し、無対策の場合の半分以下にすることも可能であることがわかった。しかし、ケーブル付加質量の与え方はこの他にも無数に考えられ、その中により合理的なものが存在する可能性があるが、それをこのように試行錯誤的に決定することは多くの労力を要し、非常に困難である。

4. 最適化手法による付加質量決定法

前述のように各ケーブルが複雑に影響し合うため、感度解析のみを頼りにした試行錯誤的な検討では多大の労力を要することになる。また、図-4 に示すように塔とケーブルとが連成するモードが多数存在するため、物理的な考察から付加質量を決定することも極めて困難である。

そこで、最適化手法を用いて付加質量を決定することにする。

実際の問題では様々な要求や制約があるものと考えられるが、本研究では代表的な最適化の規準として以下の 3 種類を考えた。なお、いずれの規準においても、付加質量比の上下限を考慮する。

- I 塔基部曲げモーメントを最小化する。
- II 塔基部曲げモーメントを制限値以下とし付加質量の総量を最小化する。
- III 塔基部曲げモーメントと同時に質量を付加するケーブル数をできるだけ少なくする。

(1) 規準 I による最適化

いま、橋軸直角方向地震に対する塔基部曲げモーメントを M 、各ケーブルへの付加質量比を x_i ($i=1,2,\dots,n$)、これを要素とするベクトルを \mathbf{x} とする。ここに、 n は質量付加の対象としているケーブル本数である。

塔基部曲げモーメントを目的関数として、これを最小にすることを考えるものとする。目的関数 M は設計変数 \mathbf{x} の非線形関数であるが、これを設計変数のある値 $\mathbf{x}^{(k)}$ において展開して

$$M(\mathbf{x}^{(k+1)}) = M(\mathbf{x}^{(k)}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial M(\mathbf{x}^{(k)})}{\partial x_i} \cdot (x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}) \quad (3)$$

と表し、最適化計算を行う。ここに、 k は最適化計算における繰返し回数を表し、微係数は差分法を用いて設計変数を微小量 Δx_i 変化させたときの塔基部曲げモーメントの変化から以下により求めた。

$$\frac{\partial M(\mathbf{x})}{\partial x_i} = \frac{M(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) - M(x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)}{(x_i + \Delta x_i) - x_i} \quad (4)$$

最適化計算は、全ての設計変数について微係数が数値計算的に零になるまで繰返す。

また、設計変数には次の上下限を設定する。

$$x_{Li} \leq x_i \leq x_{Ui} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

この規準は、塔の地震時応力状態が厳しく、少しでも応答を減じたい場合、あるいは、以下に示す基準 II あるいは III を用いて検討する場合に、塔基部曲げモーメントが許容値以下にできるかどうか見きわめる場合などに適用できる。

(2) 規準 II による最適化

塔基部曲げモーメントが許容値以下にできる場合には許容値以上に応答を低減する必要はなく、次にはケーブルへの質量付加を抑えて死荷重増加の影響をできるだけ小さくすることを考えなければならぬことも予想される。

このような場合には、付加質量の総計 A を目的関数とし、塔基部曲げモーメントに対する制約条件式 G を考慮して

$$A(\mathbf{x}) = \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{x} \quad (6)$$

$$G(\mathbf{x}) = M(\mathbf{x})/M_u - 1.0 \leq 0.0 \quad (7)$$

と表される最適化問題を考える。ここに、 \mathbf{a} は各ケーブル自身の質量を表すベクトル、 M_u は塔基部曲げモーメントの上限値であり、規準 II による最適化の結果に基づき設定する。式(5)に示す設計変数の上下限も併せて考慮する。

(3) 規準 III による最適化

斜張橋ケーブルへの質量付加による耐震対策を実施する場合、施工性や現地工事の労力を考えると付加質量の総量の低減よりも、質量を付加するケーブル本数を減らす方が望ましい場合もあろう。このような要求に対しては、以下のような最適化問題が考えられる。

即ち、目的関数としては塔基部曲げモーメント M と質量付加するケーブル本数 N とを考え、次式を用

いる。

$$F = (M/M_0) + \alpha(N/N_0) \quad (8)$$

ここに、 α は曲げモーメントに対する質量付加ケーブル数の重みを表す係数、 M_0 と N_0 はそれぞれ目的関数中の曲げモーメントとケーブル本数とを正規化して取り扱うための定数で、前者はモーメントの次元を持ち後者は無次元量である。

質量を付加するケーブル本数 N を考えるとこのことは、質量を付加する、またはしないという事象を扱うことになる。これは、1または0をとる離散変数によって表すことができる。従って、この問題は、離散変数を取り扱う組合せ最適化の問題となる。

5. 数値計算例と考察

3. で示した解析モデルと解析条件を用い、4. の各規準に基づいて行った数値計算の結果を示す。最適化計算は、規準Ⅰに対して準ニュートン法³⁾、規準Ⅱに対して可能方向法³⁾を適用した。また、規準Ⅲに対しては、遺伝的アルゴリズム⁴⁾を適用した。

(1)規準Ⅰ及びⅡによる最適化

質量付加ケーブルは全数を考えるが、対称性から設計変数は全部で20とした。また、設計変数の上限は1.0、下限は0.0とした。なお、付加質量はケーブル全長にわたって等分布させるものと仮定した。

規準Ⅰでは、塔基部曲げモーメントを目的関数とした。また、規準Ⅱでは付加質量の総量を目的関数としたが、塔基部曲げモーメントの上限 M_u として規準Ⅰの最適化の結果を上回る58.8MN・mまで許容できるものと仮定した制約条件を設けた。

いずれの最適化に対しても、変数の初期値を一律に0.0から1.0まで0.1刻みで変え、11種類の初期値の組合せに対して最適化を行った。収束条件は、目的関数の値の相対変化が0.1%以下とした。

最適化計算の結果を表-2に示す。規準Ⅰの場合は無対策の時の塔基部曲げモーメントの値147.0MN・mの34%の50.3MN・mに低減している。付加質量は概ね上段で多くなっており、付加質量比の上限値1.0に達している箇所がある。下段の方にも付加質量比0.5前後の質量を与える結果となっており、このような結果は3.で検討したような感度解析のみからでは到達することは困難であろう。なお、付加質量の総量は約241tであり、モデル橋梁の全ケーブル質量の70%、全質量11200tの2.2%である。

一方、規準Ⅱでは塔基部曲げモーメントは規準Ⅰの結果を上回る58.8MN・mまで許容しているため、付加質量の総量は約172tに減少している。付加質量の分布を規準Ⅰの結果と比較すると、付加質量の総量に対する影響の度合いの大きい上段ケーブルの付加

表-2 規準Ⅰ及びⅡによる最適化の結果

ケーブル No.	ケーブル質量(t)	規準Ⅰ		規準Ⅱ	
		付加質量比	付加質量(t)	付加質量比	付加質量(t)
1	16.32	0.315	5.14	0.271	4.42
2	15.04	1.000	15.04	0.612	9.21
3	13.78	0.487	6.71	0.339	4.67
4	7.67	0.616	4.73	0.408	3.13
5	6.91	0.807	5.58	0.463	3.20
6	6.16	0.523	3.22	0.432	2.66
7	3.32	0.487	1.62	0.467	1.55
8	2.88	0.524	1.51	0.464	1.34
9	2.46	0.484	1.19	0.477	1.17
10	2.08	0.484	1.01	0.479	1.00
11	2.47	0.501	1.24	0.482	1.19
12	3.00	0.546	1.64	0.478	1.43
13	3.55	0.700	2.49	0.491	1.74
14	4.12	0.610	2.51	0.618	2.55
15	7.68	0.608	4.67	0.422	3.24
16	8.64	0.455	3.93	0.332	2.87
17	9.60	0.216	2.07	0.129	1.24
18	17.26	1.000	17.26	0.791	13.64
19	18.85	0.983	18.53	0.674	12.70
20	20.45	1.000	20.45	0.634	12.97
計	344.48	—	241.05	—	171.79
塔基部曲げモーメント			50.3MN・m		58.8MN・m

表-3 応答の比較

応答	無対策-A	規準Ⅰ-B	B/A	
ケーブル変位(m)	1	1.851	0.880	0.48
	2	1.154	0.765	0.66
	3	0.751	1.017	1.35
	4	0.587	1.002	1.71
	5	0.259	0.554	2.14
	6	0.177	0.255	1.44
	7	0.339	0.104	0.31
	8	0.127	0.165	1.30
	9	0.213	0.148	0.70
	10	0.186	0.174	0.94
	11	0.131	0.183	1.40
	12	0.102	0.150	1.48
	13	0.123	0.645	5.25
	14	0.276	0.688	2.50
	15	0.634	1.124	1.77
	16	1.023	1.835	1.79
	17	1.431	1.894	1.32
	18	2.025	2.204	1.09
	19	5.521	2.189	0.40
	20	6.049	2.343	0.39
桁の最大曲げモーメント(MN・m)	1538.0	1830.1	1.19	
塔基部曲げモーメント(MN・m)	147.0	50.3	0.34	

質量の減少が著しく、中間と下段ケーブルへの付加質量にはあまり大きな差がない結果となっている。

さらに規準Ⅰについて、各部の応答を無対策の場合と比較して表-3に示す。無対策の場合に比べてケーブルの応答は上2段において著しく減少しているが、その他については増加しているものも見られる。全般的には、無対策の場合に比べ平均化されているようである。一方、桁の応答は19%増加している。これは、次のことを意味しているものと考えられる。

即ち、ケーブルの付加質量は本質的に構造物の減衰を高めるものではなく、塔、桁及びケーブルで構成される振動系においてケーブルの振動特性を変化させることにより、塔と桁の運動エネルギーのバランスを変化させているものと思われる。従って、塔の応答の減少は桁の応答の増加につながるが、塔と桁の質量の差を考えると、桁の応答の増加は塔の応答の減少に比べ小さくなるものと思われる。

規準Ⅰの付加質量を与えた場合の振動モードを図-8に示す。当然のことながらケーブル振動の周期は長くなっているが、塔のたわみ振動と連成しているモードが多数存在している状況は無対策の場合と同様である。桁のたわみ振動モードは6次に現れており、無対策の場合の3次と固有周期はほぼ同じであるが、連成しているケーブルの数は増えている。また、塔のたわみ振動を伴っていない点が相違している。

(2) 規準Ⅲによる最適化

遺伝的アルゴリズムを適用し、最適化する。

規準Ⅲにおいて、定数 M_0 を無対策時の塔基部曲げモーメント 147.0MN・m、 N_0 を全ケーブル数 20 とし、また、設計変数は全ケーブルとも上下限值の間を等分して8つの離散量

{0.0, 0.14, 0.29, 0.43, 0.57, 0.71, 0.86, 1.0} をとるものとした。さらに、人口サイズは 100、終了条件は連続して 20 世代設計が更新されない場合とし、単純 GA により最適化を行った。

重み係数 α の値を 0.0, 1.0, 10.0 の3通りとして行った結果を表-4に示す。 α が 0.0 の場合は規準Ⅰに対応するため、その結果も比較のため示す。

重み係数 α が 0.0 の場合と規準Ⅰの結果とを比較すると、目的関数の差は 10% 弱であり、ケーブル付加質量の値も概ね対応したものとなっている。

次に、 α を 1.0 として M/M_0 と N/N_0 とを同時に考慮すると、前者は 0.42、後者は 0.30 となった。規準Ⅰに比べ、塔基部曲げモーメントの増加は 17% であるのに対し、質量付加するケーブル本数は 70% の減少となった。塔基部強度にも関係するが、施工性を考えると質量を付加するケーブル本数は少ないほうがよいので望ましい解が得られたと考えられる。

さらに、 α を 10.0 とすると、 M/M_0 は 0.62 であるのに対し N/N_0 は 0.15 となり、重み係数を大

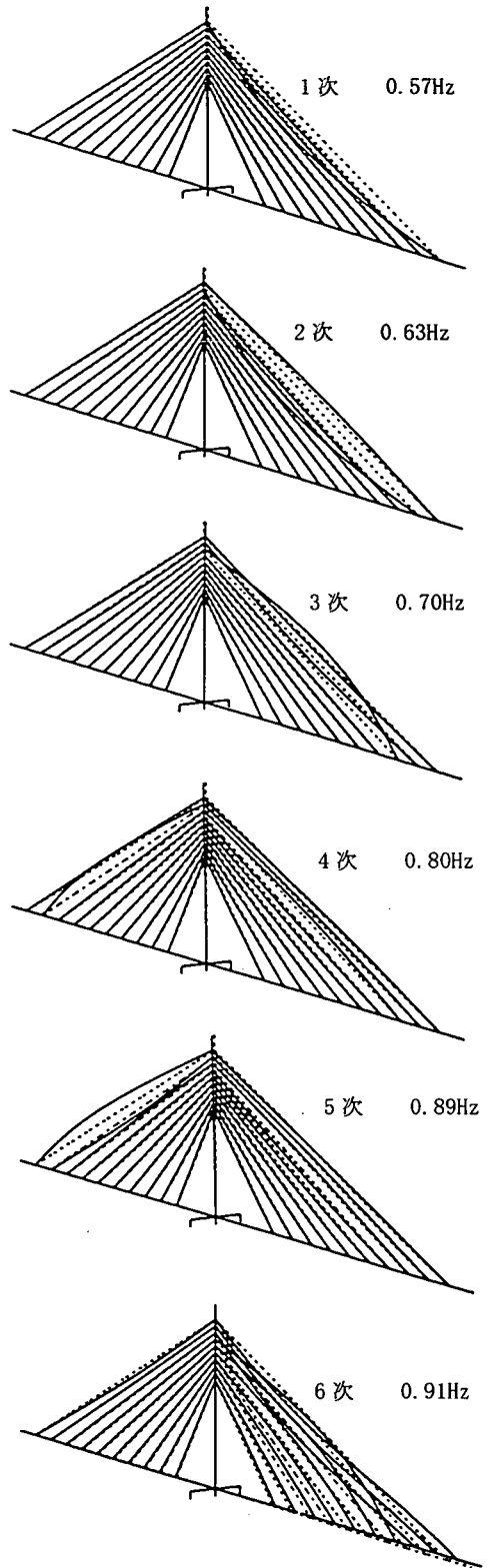


図-8 規準Ⅰによる質量付加後の固有振動モード

表-4 規準Ⅲによる最適化の結果

	規準Ⅰ	$\alpha=0.0$	$\alpha=1.0$	$\alpha=10.0$
ケーブル 付加質量比	1	0.315	0.14	0.00
	2	1.000	0.43	0.00
	3	0.487	1.00	1.00
	4	0.616	1.00	1.00
	5	0.807	0.57	0.00
	6	0.523	0.43	0.00
	7	0.487	0.29	0.00
	8	0.524	0.29	0.00
	9	0.484	0.43	0.00
	10	0.484	0.14	0.00
	11	0.501	0.14	0.00
	12	0.546	0.71	0.00
	13	0.700	1.00	0.29
	14	0.610	0.29	0.00
	15	0.608	0.29	0.00
	16	0.455	0.71	0.00
	17	0.216	0.00	1.00
	18	1.000	1.00	0.00
	19	0.983	0.86	1.00
	20	1.000	1.00	1.00
M/M_0	0.34	0.37	0.42	0.62
M (MN·m)	50.3	54.5	61.9	91.3
N/N_0	1.00	0.95	0.30	0.15
N (本)	20	19	6	3
総付加質量(t)	241.05	218.88	142.76	62.90
桁の最大曲げ モーメント(MN·m)	1830.1	1828.2	1821.7	1738.3

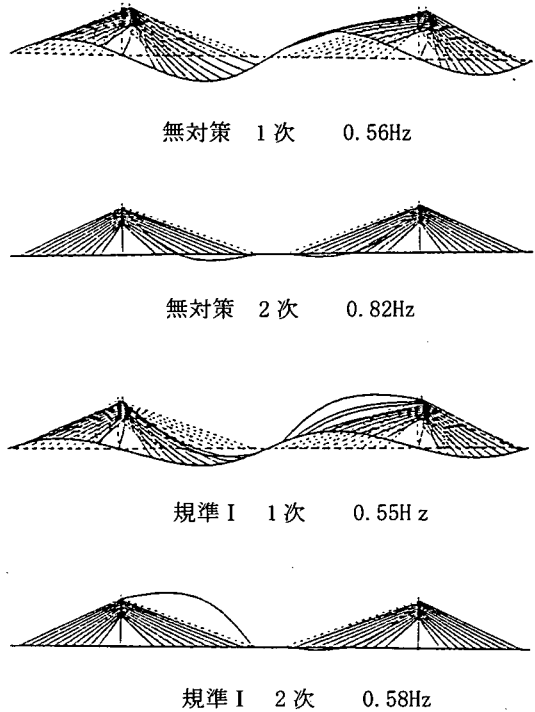


図-9 橋軸方向地震により励起されるモードの比較

大きくした効果が忠実に反映された結果となっている。なお、 α が1.0と10.0の場合で質量を付加するケーブルの位置に差が見られる。特に、 α が10.0の場合には側径間には質量付加ケーブルが必要ないという結果になっている。これは、この問題が塔基部曲げモーメントと質量を付加するケーブル本数の多目的問題⁵⁾となっているため、塔基部曲げモーメントを犠牲にすれば質量を付加するケーブル本数を少なくできることを示している。

(3) 橋軸方向地震に対する応答

以上の検討は、橋軸直角方向地震に対する応答について実施してきた。一方、橋軸方向地震に対する塔の応答に関しては、ケーブルの付加質量の影響は一般的に比較的小さいと考えられる。以下に無対策の場合と前述の規準Ⅰにより求めた付加質量を与えた場合について、橋軸方向地震に対する特性や応答を比較する。

まず、図-9に橋軸方向地震により励起されるモードを示す。ケーブルに質量を付加した場合の1次モードでは中央径間側の上段ケーブルの連成振動が見られるが、質量付加による固有振動数の変化は小さい。全モードの図示は省略するが、2次モード以降に塔の振動を伴わない各ケーブル単独の振動モードが多数現れており、当然のことながら質量を付加した場合の方が固有振動数は低くなっている。

表-5 橋軸方向地震応答値の比較

応答値	無対策	規準Ⅰ
塔曲げモーメント(MN·m)	30.8	32.2
塔軸力(MN)	8.848	9.232

次に、橋軸方向地震に対する応答解析の結果として、塔基部で生じる最大応答曲げモーメント及び軸力を表-5に示す。地震応答解析の条件は橋軸直角方向地震に対するものと同様である。

これら応答値は、橋軸直角方向地震に対するものに比べケーブルの付加質量による変動は小さくなっている。このようにケーブルへの質量付加の影響が小さいのは、振動モードの特性によるものと考えられる。即ち、塔は橋軸直角方向と異なり、橋軸方向に多数のケーブルの軸方向剛性により拘束されているため一部ケーブルの振動の影響が小さいものになるためであろう。

なお、ケーブルに質量を付加した規準Ⅰの方が応答が4%程度大きくなっているが、塔基部曲げモーメントは橋軸直角方向地震に対するものに比べ小さく、軸力も絶対値は小さい。規準Ⅰの場合の軸力と曲げを合わせた発生応力は101N/mm²であり、十分に

弾性域内に収まる応答となっている。一般的に橋軸方向地震に対する塔の応答は比較的小さく、上記程度の応答の増加が強度上問題になることは少ないと考えられる。もちろん、実際の適用に際しては橋軸方向地震に対する応答を確認しておかなければならないことは言うまでも無い。

6. 結論

既設斜張橋においては、塔の断面補強や制振、免震などの実施が困難であるためレベル 2 地震対策が手付かずの状態であった。

そこで、新たな対策案としてケーブルへの質量付加による塔の橋軸直角方向応答の低減法について検討した。その結果、各ケーブルへの付加質量配分によっては塔の応答を大幅に低減可能であることがわかった。同時に、比較的程度が小さいものの桁の応答は増加する。しかし、比較的中小規模の斜張橋では通常塔は桁に比べ耐力的に厳しい状態にあり、損傷を受けた場合には塔の方が致命的な結果をもたらすものと想定されることから塔の応答低減は有効な対策となり得るものと考えられる。

ケーブルへの質量付加を大地震対策としてより効果的にするためには、各ケーブルへの付加質量の配分を適切に決定する方法が重要となってくる。マルチケーブルの斜張橋の場合、塔、桁及びケーブルが影響し合うモードが多数存在するため、感度解析や物理的考察のみに基づく付加質量決定では多大な労力が必要となり、また満足できる結果が得られない恐れもある。

そこで、本研究では施工性なども考慮したいくつかの規準に基づき、最適化手法を用いて合理的に決定する方法を試みた。その結果、満足できる解を得ることができ、決定法として十分に実用に供すことができると思われる。

本文中の感度解析に示したように、塔の応答がケーブルの振動特性の変化に対し複雑な変化を示す場合がある。従って、ケーブルへの質量付加を実際に適用する場合には事前にケーブルと塔の振動計測を行い、その結果をふまえて付加質量を決定すべきであろう。

本研究で検討した耐震対策は、工法そのものは非常に簡単なものである。実際の施工に際しては供用中の交通に対する対策など既設橋梁の補修・補強に共通する問題はあるものの、社会的に重要性の高いことが多い斜張橋の耐震性を高めるという点で意義あるものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編, 1996
- 2) Kiureghian, A. Der: A response spectrum method for random vibration analysis of MDOF system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 8, 1981
- 3) Vanderplaats, G. and Sugimoto, H.: A general-purpose optimization program for engineering design, *Computer and Structures*, Vol. 24, No. 1, 1986
- 4) 杉本博之, LU Bianli: 工業最適化のための汎用 GA プログラムについて, 北海学園大学学術論集第 96 号, 1998
- 5) 中山弘隆: 多目的計画に対する満足化トレードオフ法の提案, 計測自動制御学会論文集, Vol. 20, 1984

(2000. 11. 9 受付)

STUDY ON ADDITIONAL MASS TO THE CABLE-STAYED BRIDGE AS A COUNTERMEASURE AGAINST GREAT EARTHQUAKE

Koichi INOUE, Hiroyuki SUGIMOTO, Kunihiro MORISHITA,
Toshihiro YAMAMOTO and Kohei FURUKAWA

Though it is necessary even for already constructed bridges to improve their antiseismic property according to the Specifications for Highway Bridges 1996, there are many cases in which reinforcement is almost impossible. The tower of cable-stayed bridge responds to transverse great earthquake is one of such cases.

In this study, we made an attempt to reduce the response of tower by means of additional mass to the cables, which changed the interaction among girder, tower and cables. Because there were innumerable combinations of additional mass distributed to the cables, the best decision was made by some optimization techniques. Some numerical examples showed that the response could be reduced to sufficient level.