

技術ノート

キーワード

斜張橋
主塔
局部座屈
全体座屈
有効座屈長

斜張橋主塔の 有効座屈長の算定について

Evaluation of Effective Length of Tower
in Cable-Stayed Bridge

伊藤 博章*
Hiroaki ITOH

瀬田 真**
Makoto SETA

街道 浩**
Hiroshi KAIDOH

1. はじめに

斜張橋の主塔は、ケーブルを介して主桁を支持する重要な構造要素である。また、その形状は多様で斜張橋全体の印象を決定する大きな要因となっている。

一般に、鋼斜張橋の主塔の設計は、軸力および二軸方向の曲げモーメントを受ける部材として、局部座屈照査(応力度の照査)および全体座屈照査(安定の照査)を行い、断面の決定が行われる。道路橋示方書¹⁾において、このような軸力と曲げモーメントを受ける部材の照査は、有効座屈長の概念²⁾を導入し、各部材を両端単純支持された等断面柱に置き換えて、式(1)、(2)の照査を行うものとしている。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy}(1 - \sigma_c/\sigma_{eay})} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{bao}(1 - \sigma_c/\sigma_{eaz})} \leq 1 \dots\dots(1)$$

$$\sigma_c + \frac{\sigma_{bcy}}{(1 - \sigma_c/\sigma_{eay})} + \frac{\sigma_{bcz}}{(1 - \sigma_c/\sigma_{eaz})} \leq \sigma_{cal} \dots\dots(2)$$

σ_c : 軸方向圧縮応力度

σ_{bcx} : 強軸まわりの曲げモーメントによる曲げ圧縮
応力度

σ_{bcz} : 弱軸まわりの曲げモーメントによる曲げ圧縮
応力度

σ_{caz} : 弱軸まわりの許容圧縮応力度

σ_{bagy} : 局部座屈を考慮しない橋軸まわりの許容曲げ
圧縮応力度

σ_{bao} : 局部座屈を考慮しない許容曲げ圧縮応力度の
上限値

σ_{cal} : 局部座屈に対する許容圧縮応力度

σ_{eay} : 強軸まわりの許容オイラー座屈応力度

σ_{eaz} : 弱軸まわりの許容オイラー座屈応力度

ここで、 $\sigma_{caz}, \sigma_{eay}, \sigma_{eaz}$ は、有効座屈長および断面二次半径により決定される。

斜張橋の主塔には複数のケーブルが定着され、主塔はちょうど、一端を多数のばねにより弾性支持され、他端を固定された梁のような構造となる。このため、主塔の断面力は複雑に変化し、その有効座屈長の算出は容易ではなくなる。しかし、有効座屈長算定の誤りは構造の崩壊につながる可能性が大きいいため、ケーブルの寄与を考慮したうえで慎重に行わなければならない。

たとえば、簡単にするためにオイラー座屈³⁾を考えた場合、両端を単純支持された圧縮力を受ける柱の座屈強度は次式で与えられる。

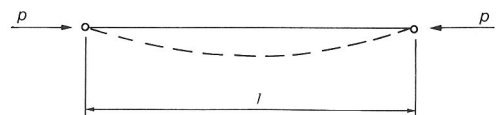


図-1 圧縮力を受ける柱

$$p = \pi^2 \frac{EI}{l^2} \dots\dots(3)$$

ここで、Eはヤング率、Iは曲げ剛性、lは部材長(有効座屈長)である。式(3)より、柱の耐荷力は降伏応力などの材料強度ではなく、幾可学的要素に支配されていると判断できる。

したがって、斜張橋主塔のような軸力および曲げモーメントを受ける部材の設計において、各断面の正確な許容応力度の計算以上に、有効座屈長を正確に算出することが重要であることがわかる。

本報告では、既往の鋼斜張橋の設計例において用いられた、有効座屈長の算出方法および安定照査方法をいく

*川田工業(株)技術本部設計部設計課課長 **川田工業(株)技術本部設計部設計課

つか紹介し、さらに著者らが実際の鋼斜張橋設計に用いた有効座屈長の算定方法および計算結果について述べるものである。

2. 既往の有効座屈長算定例

斜張橋は、ケーブルの配置や主塔の形式などがさまざまであるため、主塔の有効座屈長の算定方法もいろいろな方法が採用されている。ここでは、著者らが実際の設計を行うに際して参考にした、既往の有効座屈長算定例および安定照査方法を示す。

(1) 水郷大橋⁴⁾

主塔の形式は1本柱型、ケーブルの配置は3段1面吊りハープ型である。有効座屈長は、ケーブル面内に対して、主塔のケーブル定着部は主桁の変形に伴い水平方向に変位するため塔高の1.2倍、最上段についてはサドルが可動であるため2.1倍としている。ケーブル面外に対しては、主塔のケーブル面外方向の初期曲がりを考慮し塔高の0.8倍としている。

(2) 川崎橋⁵⁾

主塔の形式はH型ラーメン構造、ケーブルの配置は主径間6段、側径間4段2面吊りファン型である。有効座屈長は、主塔の面外方向に対して上段ケーブルの定着点と支承間としている。橋軸方向に対しては、座屈解析を行い座屈荷重を求め、実荷重との比較により安全性を検討している。

(3) 大和川橋梁⁶⁾

主塔の形式は1本柱型、ケーブルの配置は4段1面吊りハープ型である。有効座屈長は、ケーブル面内に対して下端固定、上端ヒンジ(塔高の0.7倍)、ケーブル面外に対しては、理想的な状態で座屈変形時においても軸力の作用線が塔の基部を通ることから、両端ヒンジ(塔高の

1.0倍)と仮定している。さらに、全体構造の有限変位弾塑性解析から、塔の座屈に対する末端条件の妥当性を証明している。

(4) 南港歩行者専用橋⁷⁾

主塔の形式は1本柱型、ケーブルの配置は4段1面吊りファン型(側径間はハープ型)である。有効座屈長は、ケーブル面内に対して両端ピン(塔高の1.0倍)、ケーブル面外に対して下端固定、上端自由(道示推奨値では塔高の2.1倍)としている。また、3次元骨組モデルによる弾性座屈解析を行い、全体座屈の安定照査を行っている。

(5) 櫃石島・岩黒島橋⁸⁾

主塔の形式はH型2層ラーメン構造、ケーブルの配置は2面吊りマルチファン型である。橋軸方向および橋軸直角方向に対して座屈解析を行い、その座屈モードから決定した有効座屈長および道路橋示方書の基準耐荷力曲線から算出した許容応力度により、圧縮と曲げを受ける部材としての安定照査を行っている。

(6) 名港西大橋⁹⁾

主塔の形式はA型ラーメン構造、ケーブルの配置は2面吊りマルチファン型である。橋軸方向については、固有モード図から主桁中間支点部の弾性拘束ケーブルの効果認められたので、水平梁より下側は1端自由、1端固定(道示推奨値では基部から水平梁間の2.1倍)と考え、ケーブルより下方で水平梁より上側は両端ピン(上下水平梁間の1.0倍)として有効座屈長を算定している。また、橋軸直角方向については、耐荷力に関する実験結果を参考に有効座屈長を求めている。

(7) S字斜張橋(かつしかハープ橋)¹⁰⁾

主塔の形式は1本柱型、ケーブルの配置は1面吊りマルチファン型である。有効座屈長は、ケーブル面外方向の座屈に対してはケーブルの引き止め効果を考慮し、塔

表-1 既往の設計例における有効座屈長

				有効座屈長	
橋梁名	主塔形式	ケーブル形式	塔高(m)	ケーブル面内	ケーブル面外
水郷大橋	1本柱	1面ハープ	43.4	塔高の1.2倍 ケーブル最上段は2.1倍	塔高の0.8倍
川崎橋	H型ラーメン	2面ファン	29.7	座屈解析により安全性を確認している	上段ケーブルの定着点と支承間とする
大和川橋梁	1本柱	1面ハープ	60.0	塔高の0.7倍	塔高の1.0倍
南港歩行者専用道橋	1本柱	1面ファン	26.0	塔高の1.0倍	塔高の2.1倍
櫃石島・岩黒島橋	2層ラーメン	マルチファン	136~149	座屈モードから決定	座屈モードから決定
名港西大橋	A型ラーメン	マルチファン	122.0	水平梁の下側は1端自由1端固定、上側は両端ピンとする	実験結果より決定
S字曲線斜張橋	1本柱	マルチファン	65.0	塔高の1.0倍	塔高の1.0倍
荒津大橋	1本柱	マルチファン	55.0	塔高の0.8倍	塔高の1.1倍

高の1.0倍とし、ケーブル面内方向への座屈に対しても、弾性全体座屈解析結果を参考にして塔高の1.0倍としている。

(8) 荒津大橋¹¹⁾

主塔の形式は1本柱型、ケーブルの配置は1面吊りマルチファン型である。有効座屈長は、ケーブル面外方向については、ケーブル鉛直分力の合力が塔基部を通るので塔高の1.1倍としている。また、ケーブル面内方向については、基部を固定し、頂部を複数のばねで支持した主塔のモデルを考え、これと先端のたわみが等しい柱の有効座屈長(塔高の0.8倍)を有効座屈長としている。

以上に述べた既往の設計における有効座屈長の一覧を表-1に示す。

3. 有効座屈長の算出

著者らが、2章で紹介した既往の設計例を参考にして行った有効座屈長の算定方法、およびその結果を以下に示す。

設計対象とする橋梁は、図-2に示すような2径間連続鋼斜張橋である。ケーブルは1面吊りファン形式で、4段配置されている。主塔の構造は図-3に示すような逆Y型ラーメン構造である。

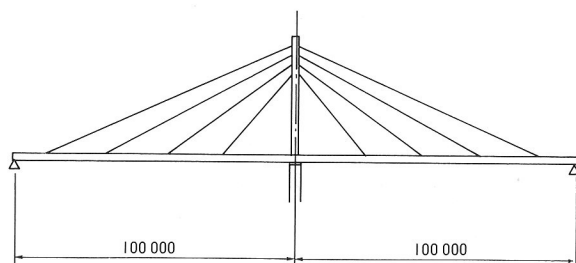


図-2 橋梁全体図

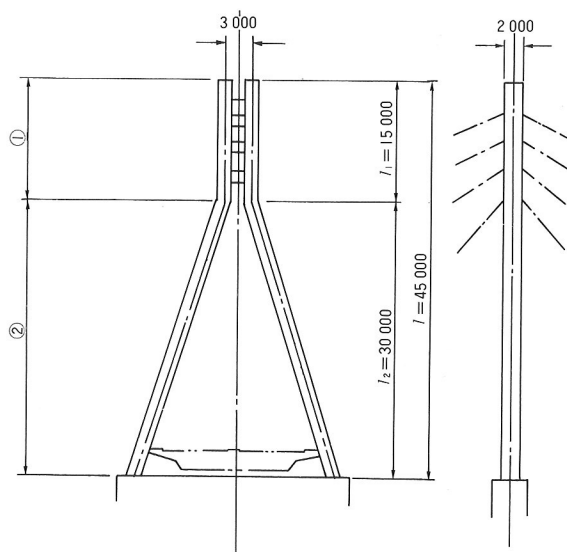


図-3 主塔構造図

図-3に示す主塔の部分①において、左右の主塔は剛度の高い横梁により結合されているため、この部分は主塔面内の全体座屈を起こさないものと仮定する。このため、主塔面内に関しては部分②が全体座屈を起こすものとし、この部分の有効座屈長を算出する。また、主塔面外の全体座屈を考える場合、部分①はケーブルにより拘束されているため座屈を起こしにくいと判断できる。したがって、主塔面外に関しても部分②が全体座屈を起こすものとし、この部分の有効座屈長を算出した。

(1) 主塔面内の有効座屈長

主塔面内の座屈に関しては、全体座屈の対象となる部分②の形状から考えて、ケーブルの引き止めなどのこの部分への影響が比較的少ないものと判断できる。このため、全体構造から主塔のみを取り出したモデルを考え、この構造モデルの弾性座屈解析を行い、その座屈モードから有効座屈長を算定する。

図-4に、解析の結果得られた主塔面内の座屈モードを示す。ただし、座屈解析においてこの座屈モードは2次のモードであり、1次のモードは主塔面外の座屈モードである。座屈解析に必要な初期荷重の大きさは、設計解析において主塔に生ずる軸力の最大値程度とし、部分②上端に載荷する。座屈モードから、下端固定、上端ヒンジの支持条件が適切であることがわかる。この支持条件を道示の表-解2.2.2「柱の有効座屈長」にあてはめると、有効座屈長 l_1 は部分②の高さ l_2 の0.8倍(24.0m)となる。

(2) 主塔面外の有効座屈長

主塔面外の座屈に関しては、ケーブルの引き止めの効果が大きいことが予想されるので、この影響を考慮でき

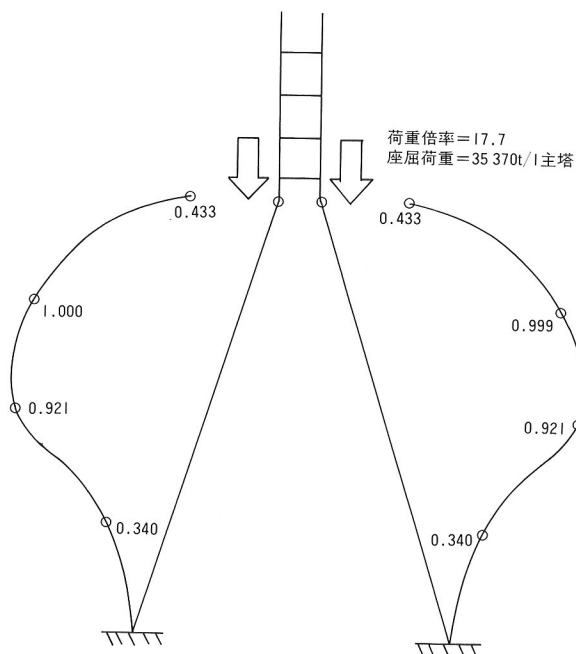


図-4 主塔の面内座屈モード

る方法を用い有効座屈長を求める。

2章に示した既往の設計例のいくつかは、ケーブルをばね要素に置き換えた主塔モデルの座屈解析を行い、ケーブルの引き止め効果を表現している^{8),11)}。しかし、ケーブルと等価な作用をするばね要素の誘導および配置は比較的困難である。また、この方法では、引張力には抵抗するが、圧縮力には抵抗しないケーブルの性質を表現することができない。そこで、ここではケーブル橋梁構造平面解析プログラム“KASUS”を使用した¹²⁾。“KASUS”は、引張力のみに抵抗し圧縮力には抵抗しない非抗圧要素を有しており、この要素をケーブル部材位置に配置し全体解析を行うことにより、精度良くケーブルの影響を評価することが可能である。

橋梁全体を図-5 a)に示すような平面骨組構造に置き換える。このとき、左右2本の主塔を断面積および剛性の等しい1本柱によりモデル化する。主塔の部分②の上端に荷重を載荷し、この荷重を1000 tずつ増加させ有限変形解析を行う。このときの、荷重-主塔頂部水平変位関係を図-5に示す。荷重が15000 tから16000 tに増加する間に変位は急激に増加し、17000 tで収束しなくなることから、荷重が16000 tから17000 tの間で主塔の全体座屈が起きているものと考えられる。座屈荷重を16000 tとすると、式(3)のオイラーの座屈公式から次のように有効座屈長を算出することができる。

$$\begin{aligned} l_{01} &= \sqrt{\pi^2 EI / p} \\ &= \sqrt{3.14^2 \times 2.1 \times 10^7 \times 0.3 / 16000} \\ &= 62.307 \text{ (m)} \quad (\text{部分②の高さの2.08倍}) \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

また、図-6に荷重が16000 tの時の主塔の面外変位分布を示す。この変位分布より、下端固定、上端回転固定

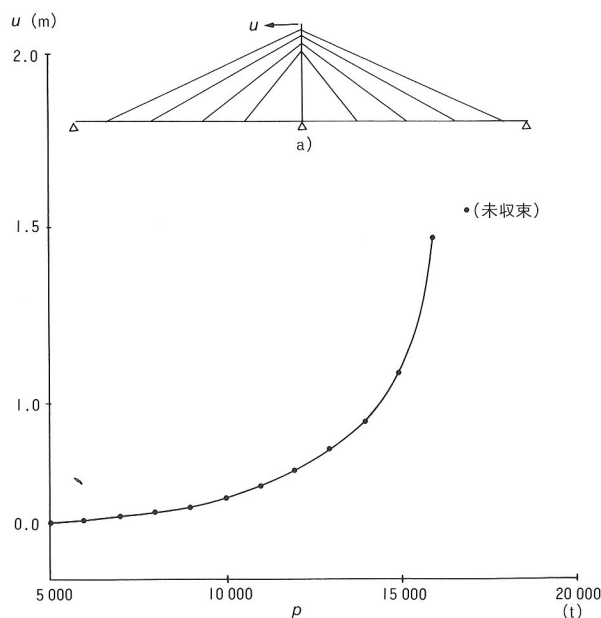


図-5 荷重-主塔頂部水平変位関係図

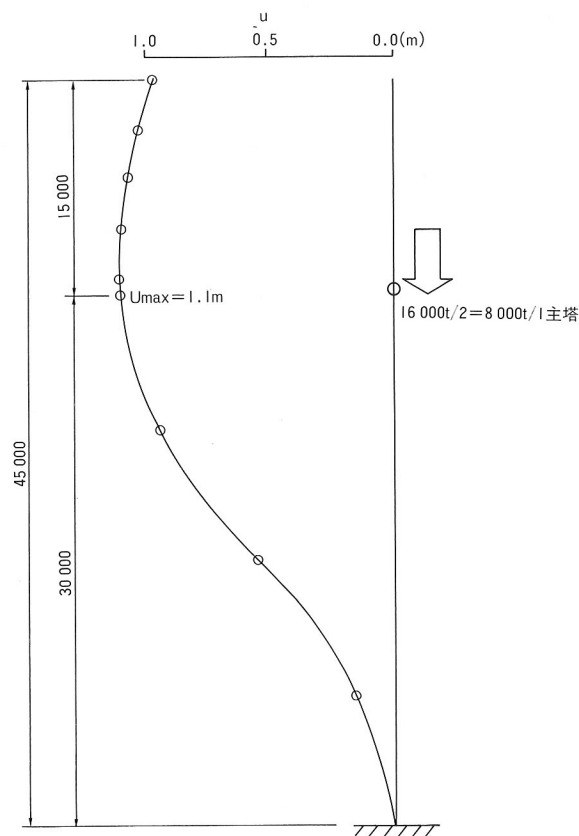


図-6 主塔面外変位分布

の支持条件が適切であることがわかる。この支持条件を道示の表-解2.2.2「柱の有効座屈長」にあてはめると、有効座屈長 l_{02} は主塔の高さ l の1.2倍(54.0m、部分②の高さの1.8倍)となる。

ここでは、座屈荷重が16000 t以上であることを考慮し、有効座屈長を l_{01} と l_{02} との平均的値として部分②の高さの1.9倍(57.0m)とすることとした。

なお、(1)節で述べた主塔のみの構造モデルの座屈解析において、主塔面内の座屈モードは2次の座屈モードであり、1次の座屈モードは主塔面外方向の座屈である。1次の座屈モードの荷重倍率は3.425であり、座屈荷重は6850 t/1主塔となる。(2)節の結果より主塔面外座屈荷重は8000 t/1主塔以上であると判断できるので、ケーブルの効果により、少なくとも1150 t/1主塔だけ座屈荷重が増加していると考えられる。

4. おわりに

本報告は、設計の現場において斜張橋の有効座屈長を求めるに際し用いた方法、およびその結果について述べたものである。ここで採用した方法は、主塔面内に対しては座屈解析から求めた座屈モードにより、主塔両端の支持条件を判断して有効座屈長を算定し、また、主塔面外に対しては、ケーブルの影響を考慮することができる解析プログラム“KASUS”を用いた有限変位解析から荷

重-変位関係および変位分布を求め、これらから有効座屈長を算定する方法である。

この方法において使用する構造モデルは、鋼斜張橋の設計を行う場合に作成する構造データに、若干の修正を加えることで得られる。このため、本報告において行った計算は、設計解析業務に際して比較的簡単に行えるものであることを付記しておきたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，pp.130～134，1980年2月。
- 2) 小西一郎編：鋼橋(基礎編I)，丸善，pp.498～509，1977年7月。
- 3) 土木学会：座屈設計ガイドライン，技報堂，pp.1～2，1987年10月。
- 4) 清水・太田・小山：国道51号水郷大橋の設計・施工について，橋梁，pp.28～44，1976年12月。
- 5) 加藤・日種・松村・黒山・寺西：川崎橋の設計と施工(上)，橋梁と基礎，pp.8～16，1987年11月。
- 6) 松本・江見・石崎：大和川橋梁上部工の設計，橋梁と基礎，pp.10～17，1979年7月。
- 7) 渡辺・日種・石田・南条：南港歩行者専用道橋(3径間連続斜張橋)の設計，橋梁と基礎，pp.4～11，1981年1月。
- 8) 成井・山根・松下・八田：櫃石島・岩黒島道路鉄道併用橋斜張橋の設計(2)，橋梁と基礎，pp.32～40，1981年2月。
- 9) 加藤・飯岡・川人：名港西大橋(上部工)の設計，橋梁と基礎，pp.18～26，1983年12月。
- 10) 高橋・山崎・安藤：S字曲線斜張橋上部工の設計(上)，橋梁と基礎，pp.25～33，1985年4月。
- 11) 吉村・田中・井上・藤田：鋼3径間連続箱桁斜張橋荒津大橋上部工の設計(上)，橋梁，pp.2～12，1986年3月。
- 12) 野村・中崎・内海・前田：ケーブル橋梁構造(吊橋，斜張橋)の設計，架設計算プログラム，川田技報，vol.3，1983。