

## 4 径間超長大吊橋の弾塑性挙動と終局強度

東京都立大学大学院 ○学生会員 染谷 厚徳  
 東京都立大学大学院 正会員 野上 邦栄  
 東京都立大学大学院 正会員 山沢 哲也  
 長岡技術科学大学 正会員 長井 正嗣

### 1 はじめに

本四架橋プロジェクトの完了後、次世代海峡横断橋プロジェクトの検討が進められている。しかし、このプロジェクトを実現させるためには、新材料、新構造形式の開発が必要になるとともに、経済性、耐久性に富んだ設計・施工が要求されている。このような背景のもと、これまでの実績から3径間吊橋の重連構造形式が考えられる。しかし、この形式は中間アンカレイジを設置する必要があり、塔基礎も増えることから経済性に劣る。そこで、多径間吊橋が選択肢として注目されている<sup>1)</sup>。多径間吊橋は水深が深く、架設距離が非常に長くなるような海峡横断橋の場合において、巨大な中間アンカレイジが不要となり、かつ海中基礎の数も減らすことができ、施工性、経済性に富むと考えられる。構造特性は、活荷重たわみが大きく、塔頂部でのケーブルの滑りが大きい、中央主塔の塔頂最大水平変位が大きい、中央主塔を挟んだ両側のケーブルの張力差が大きいなどの諸問題が明らかにされている。一方で、スパンが大きいほど死荷重の活荷重に対する比率が大きくなり、活荷重の構造特性に及ぼす影響は小さくなる。我が国では、多径間吊橋を本格的に施工した橋は、日本の小鳴門橋（中央径間 158m）のみであり、長大橋への採用例はない。

これまで、4径間吊橋を対象にしてその構造特性<sup>2)</sup>、活荷重の載荷方法<sup>3)</sup>、中央塔の座屈特性などに着目した研究が報告されている。しかし、構造全体系の弾塑性挙動について検討した研究は見当たらない。そこで、本研究では中央径間長 3000m・4径間長大吊橋を対象にし、塔剛性とケーブル安全率をパラメータにして、その構造全体系の弾塑性挙動および終局強度について解析的検討を実施した。

### 2 解析モデルおよび解析条件

解析対象とした吊橋は、図-1に示すような中央径間長 3000mの4径間連続補剛桁吊橋であり、中央塔および両側塔は共に塔高 350mの6層ラーメン形式である<sup>4)</sup>。側径間と中央径間のスパン比を 1:2:2:1、サグ比を 1/10、さらにケーブル中心間隔を 35.5m、ハンガーケーブルの定着間隔を 50mとして本州四国連絡橋設計基準に基づいて行った。桁断面は桁高 7mの流線型単室箱桁である。補剛桁の断面諸元は補剛材を考慮した等価板厚（デッキプレート 20mm，その他 18mm）により計算している。主塔は、塔高が基部から  $h = 350\text{m}$ の6層ラーメン形式であり、多室箱型を有する変断面塔柱である。表-1に主塔・主桁の断面諸元、表-2に主ケーブル・ハンガーの断面諸元を示す。使用鋼材は桁が SM400，塔が SM570 である。また、主ケーブル、ハンガーの許容応力度は各々  $804\text{N/mm}^2$ ， $627\text{N/mm}^2$  である。

本解析の荷重条件として、死荷重  $D$  が作用する初期状態  $1.0D$  から死荷重  $D$  と活荷重  $L$  を載荷した状態に対して荷重パラメータ  $\alpha$  を乗じて荷重  $\alpha(D+L)$  を漸増させる。また、 $\alpha$  に 1 を加えた荷重パラメータを荷重倍率  $\beta (= \alpha + 1)$  と定義する。変位増分法における変位制御は中央塔塔頂部の鉛直変位とした。活荷重載荷を全径間（満載）、活荷重を側径間から中央塔まで載荷した（偏載）の2ケースとし、塔剛性とケーブル安全率 2.2 と 1.8 をパラメータにした。この解析では、初期不整は考慮していない。

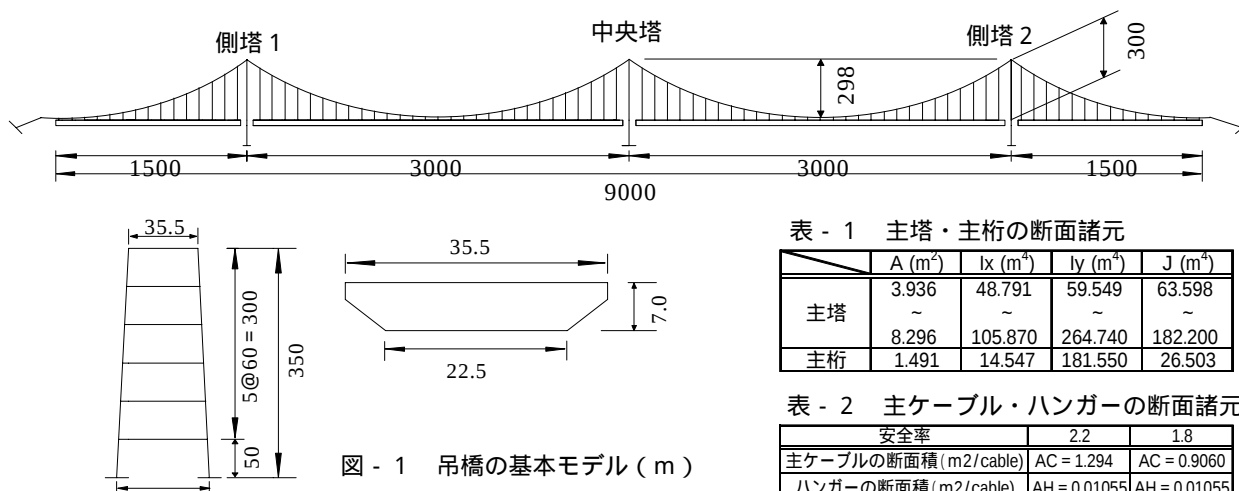


表-1 主塔・主桁の断面諸元

|    | A (m <sup>2</sup> ) | I <sub>x</sub> (m <sup>4</sup> ) | I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> ) | J (m <sup>4</sup> ) |
|----|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 主塔 | 3.936               | 48.791                           | 59.549                           | 63.598              |
|    | ~                   | ~                                | ~                                | ~                   |
| 主桁 | 8.296               | 105.870                          | 264.740                          | 182.200             |
|    | 1.491               | 14.547                           | 181.550                          | 26.503              |

表-2 主ケーブル・ハンガーの断面諸元

| 安全率                               | 2.2          | 1.8          |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| 主ケーブルの断面積 (m <sup>2</sup> /cable) | AC = 1.294   | AC = 0.9060  |
| ハンガーの断面積 (m <sup>2</sup> /cable)  | AH = 0.01055 | AH = 0.01055 |

キーワード：4径間超長大吊橋，弾塑性有限変位解析

連絡先：〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL：0426-77-1111 FAX：0426-77-2772

### 3. 解析結果

図 - 2 は、偏載状態の中央塔および側塔の各塔頂部における水平変位と荷重倍率、さらに主ケーブル安全率の関係を示している。主ケーブルの安全率を 2.2 から 1.8 に低減すると、終局時の荷重倍率は  $\beta = 2.527$  となり、構造全体系の終局を迎える。主塔の塔頂部水平変位は主ケーブルの初期降伏を迎えると大きく水平方向変位が急激に増加する。図 - 3 は、主ケーブルの安全率による初期降伏と終局強度の関係を示している。満載の場合、主ケーブルの安全率  $\gamma_c = 1.8$  では、ハンガー、主ケーブル、の順に初期降伏を起こし、主桁・側塔 1・側塔 2、が同時に初期降伏を迎え、終局時の荷重倍率は  $\beta = 2.662$  となる。同じく偏載の場合では、ハンガー、主ケーブル、中央塔の順に初期降伏を迎え、主桁・側塔 2 が同時に初期降伏を起こし、終局時の荷重倍率は  $\beta = 1.528$  となる。主ケーブルの安全率  $\gamma_c = 2.2$  では、偏載、満載ともに主ケーブルに初期降伏は見られず、ハンガーの破断で終局を迎える。図 - 4 は、偏載状態における終局時の構造系全体の変形挙動を示したものである。側塔 1 と中央塔間の桁のたわみが大きく、中央塔の変形が顕著に表れている。図 - 5 は、偏載状態における中央塔の応力分布を表している。縦軸は塔位置を、横軸は作用応力を降伏応力で除した無次元量を表す。中央塔は、 $\beta = 1.312$  で初期降伏し、最大応力度は 180m 付近（塔高  $h$  の 3/5 位置）に発生している。同様に図 - 6 は、側塔 2 の応力分布を表している。側塔 2 は、 $\beta = 1.441$  で初期降伏し、最大応力度は 180m 付近に発生している。図 - 7 は「側塔 1：中央塔：側塔 2」の塔剛性を「1：1：1」、「1：2：1」、「2：1：2」の 3 ケースとし、主ケーブルの安全率と終局強度の関係を示したものである。満載状態での主ケーブルの安全率  $\gamma_c = 1.8$  では、「1：1：1」、「1：2：1」の 2 ケースで終局強度は  $\beta = 1.662$ 、 $\beta = 1.673$  とほぼ等しい値をとる。「2：1：2」の塔剛性においては主ケーブルの安全率  $\gamma_c = 2.2$  の場合と終局強度はほぼ等しい値をとり、ハンガーの破断で終局を迎える。

### 4. 結論

主ケーブルには、主塔塔頂部の変位の増加を防ぐ働きがあり、主ケーブルが初期降伏を起こすと、急激に主塔塔頂部の変位が増大し、付加曲げモーメントによる応力再分配が始まり、主塔の負担を急激に増大させる。主ケーブルの安全率の低減は、構造系全体の終局強度に及ぼす影響が大きい。

また、塔剛性と主ケーブルの安全率と終局強度の関係より、単純に主塔の剛性を上げて、終局強度には影響を及ぼさない場合がある。全体系の終局時の荷重倍率に着目した時の、最もバランスのとれた合理的な塔剛性の比率に着目することが考えられる。

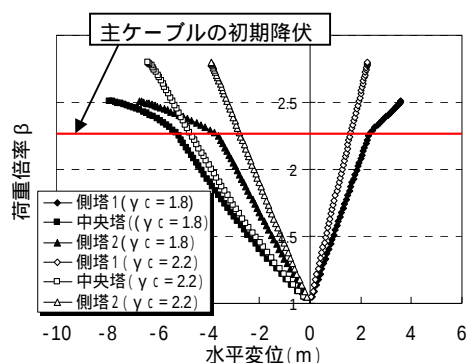


図 - 2 塔頂部荷重 - 変位曲線

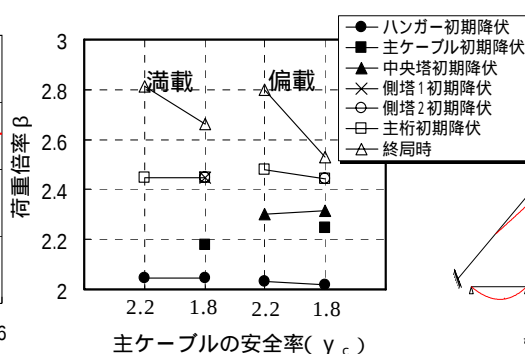


図 - 3 主ケーブルの安全率による初期降伏と終局強度の関係

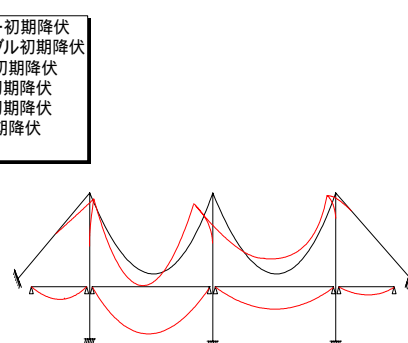


図 - 4 吊橋全体の変形

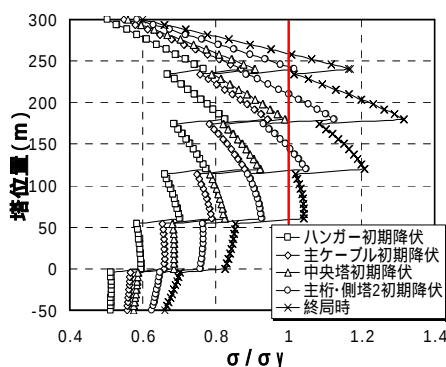


図 - 5 中央塔の応力分布

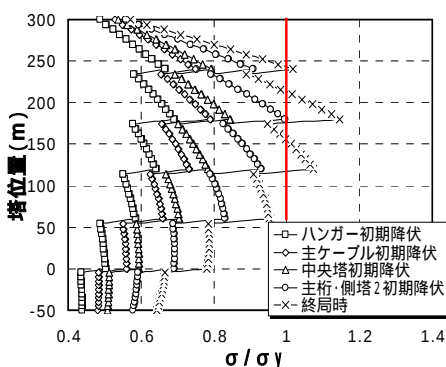


図 - 6 側塔 2 の応力分布

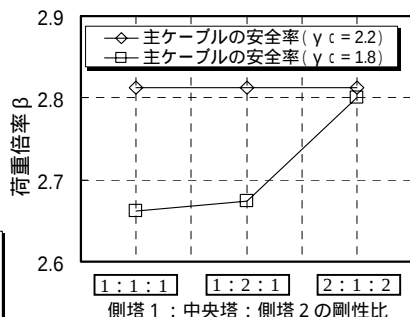


図 - 7 主ケーブルの安全率と主塔の剛性比の比較

参考文献 1) 吉田：二径間吊橋の構造検討，本四技報，Vol.14, No56, 1990、2) 大橋，村瀬：4 径間吊橋主塔の挙動に着目した活荷重の載荷方法について，土木学会年次学術講演会，No.52, 1995、3) 岩屋，駒田，守矢，平山：4 径間吊橋の構造特性に関する一検討，土木学会年次学術講演会，No.51, 1994、4) 大竹，野上，山沢，岩崎，長井：4 径間長大吊橋の弾塑性挙動に関する一検討，土木学会年次学術講演会，No.60, 2003