

## 4 径間超長大吊橋の弾塑性挙動と終局強度特性に関する考察

Elasto-Plastic Behaviors and Ultimate Strength of 4 Super Long-Span Suspension Bridges

野上邦栄\* ・ 大久保亜衣\*\* ・ 森園康之\*\*\*

Kunie Nogami, Ai Okubo, and Yasuyuki Morizono

\*工博 首都大学東京 教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

\*\*工修 神奈川県 厚木土木事務所 (〒 243-0016 神奈川県厚木市田村町 2-28)

\*\*\*工修 (株) 長大 東京支社構造事業部 (〒 114-0013 東京都北区東田端 2-1-3)

At present, it has been reported that the limit span of a suspension bridge will be around 4000m. In order to realize such super long-span bridge, the development of new construction techniques is necessary. Furthermore, in Japan, the economy and durability by the rational design is strongly demanded. This paper clarifies the elasto-plastic behavior and the ultimate strength of continuous suspension bridge with 4 super long spans. In particular, we examine the effectiveness of applying two boxes and grating cross-section to a main stiffening girder and 2000 MPa high strength cable to the main cable.

**Key Words :** multi span, suspension bridge, ultimate strength, elasto-plastic

### 1. はじめに

現在、吊形式橋梁の限界スパンは、吊橋で 4000m、斜張橋で 1800m 程度であると言われている。このような超長大橋の建設を実現するためには、超長大橋に対する新材料、新構造形式の開発、さらに経済性、耐久性に富んだ合理的な設計・施工が要求される。

超長大橋の実現に向けた吊形式橋梁の構造形式には、これまでの実績からまず 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ー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ことになる。そこで、多径間吊橋が選択肢として注目されている。

日本の多径間吊橋のこれまでの実績としては、小鳴門橋の 4 径間吊橋 (70.6m+160.0m+160.0m+50.8m) がある。長大橋としては本州四国連絡橋の来島海峡大橋やオーランドベイ橋の計画時において 4 径間吊橋が検討されたが、最終的には両橋梁とも 3 径間吊橋の重連形式が採用された。したがって、現在までのところ多径間吊橋の長大橋への適用例はない。

このような状況において、我が国の海峡横断プロジェクト計画に対する研究開発では、4 径間および 5 径間吊橋を対象にして、その構造特性<sup>1),2),3)</sup>、経済性、活荷重の載荷方法<sup>4),5)</sup>、中央塔の座屈特性<sup>6)</sup>などに着目した幅広い研究が報告されている。これまでの研究により、多径間吊橋の構造特性には、

- 1) 活荷重たわみが大きい。
- 2) 塔頂部でのケーブルの滑りが大きい。
- 3) 中央塔の塔頂最大水平変位が大きい。
- 4) 中央塔を挟んだ両側のケーブルの張力差が大きい。

などの問題点が明らかにされている。一方、

- ① 径間長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。
- ② 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、巨大な中間アンカレージが不要となる。
- ③ 3 径間吊橋を重連するよりも多径間吊橋の採用により、下部工数を減らすことができ、施工性、経済性の面から有利になる。

などの多径間吊橋の利点も報告されている。

また、トラス形式や箱桁形式の主桁構造が主流である 3 径間吊橋に対して、多径間吊橋の主桁構造には、耐風安全性を確保しつつ、死荷重を軽くしコスト削減を図るために、箱桁形式とグレーチング形式の組み合わせやオールグレーチング床版桁形式がこれまでに提案されている<sup>7),8),9)</sup>。主塔構造は、フレキシブルタワー、橋軸方向に A 型構造のリジッドタワーなどが検討されている<sup>2)</sup>。また、主ケーブルの安全率は、明石海峡大橋で採用された 2.2 をさらに低減した 1.8 が「海洋横断道路吊橋ケーブル設計指針」<sup>10)</sup>に規定された。

以上の研究開発状況において、これまで多径間吊橋の構造全体系の弾塑性挙動および終局強度について検討した研究は見当たらない。そこで、著者らはこれまでに中央径間長 3000m を有する 4 径間超長大吊橋を対象にして、吊橋全体系の終局強度の立場から主塔構造の合理化に向けた解析的研究<sup>11)</sup>を行ってきた。

本研究では、本州四国連絡橋基準類に基づき、試設計した中央径間長 3000m を有する 4 径間超長大吊橋を対象にして<sup>11)</sup>、特に、主桁に箱桁断面および 2 箱+グ

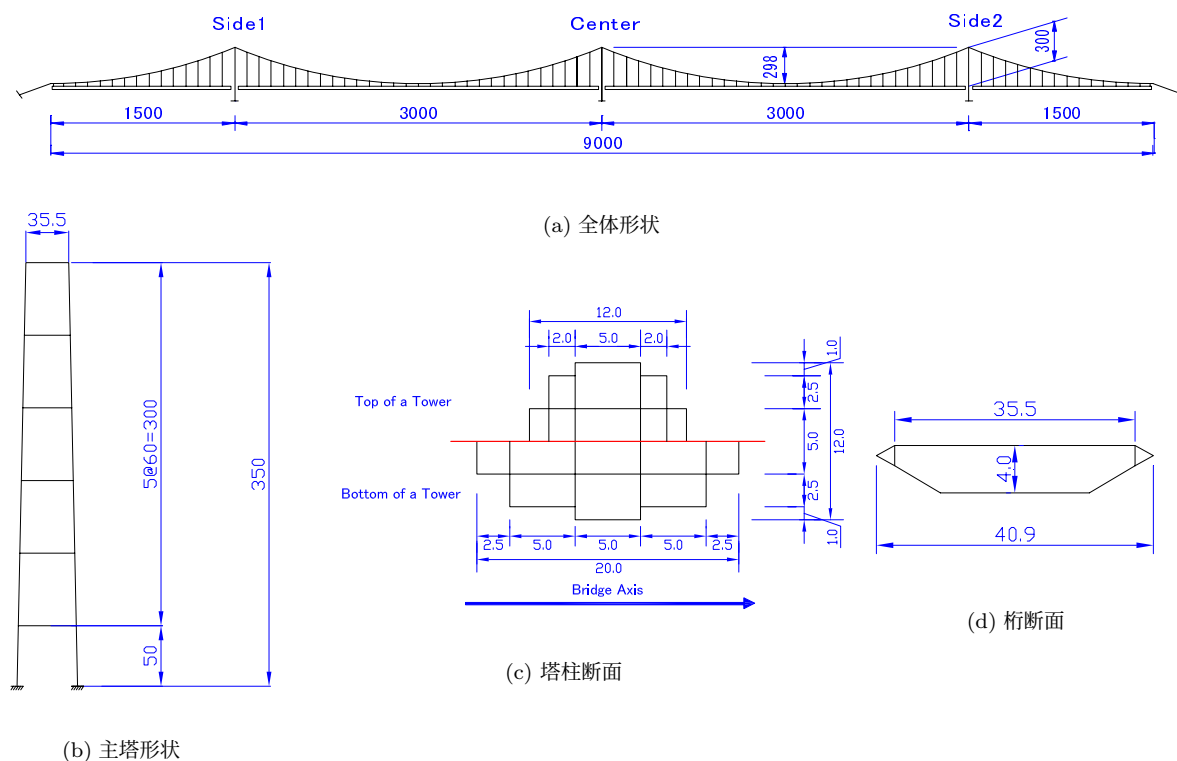


図-1 吊橋の基本モデル (単位：m)

レーシング桁断面を適用した場合、さらに主ケーブルに 1770 MPa と 2000 MPa の高強度ケーブルを適用した場合の構造全体系の終局強度特性を解析的に明らかにし、それらの有効性について検討する。

## 2. 基本モデル

本研究で対象とした吊橋モデルは、本州四国連絡橋公団の上部構造設計基準<sup>12)</sup> (以後、本四基準と呼ぶ) および吊橋主塔設計要領<sup>13)</sup> に基づいて試設計した。なお、主ケーブルの断面設計には海洋横断道路吊橋ケーブル設計指針<sup>10)</sup> を採用した。

### 2.1 構造条件

基本モデルは、図-1(a) に示すような中央径間長 3000m を有する 4 径間 3 ヒンジ補剛桁吊橋であり、側径間と中央径間のスパン比を 1:2:2:1、主ケーブルは片側一本配置とし、サグ比を 1/10、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 とした。中央塔および両側塔は、共に (b) に示すように 350m の 6 層ラーメン形式鋼製主塔であり、多室箱型を有する変断面塔柱である。また、中央塔と側塔は同一断面形状とした。主ケーブルは片側一本配置とし、補剛桁は (d) に示すように桁幅として 35.5m を有する車線数 6 車線 (片側 3 車線)、基本断面として単室流線型箱桁構造を採用した。耐風安定性については、本研究の対象外とした。

### 2.2 荷重条件

設計で対象とした荷重条件は、常時の死荷重  $D$  + 活荷重  $L$  と死荷重  $D$  + 風荷重  $W$  である。補剛桁の死荷重強度  $W_G$  (kN/m) は舗装厚 50mm、地覆・防護柵 7.84 kN/m、付属物など 19.6 kN/m を仮定した各重量と桁重量との合計に対して 40% 割増して算出した  $W_G = 220.5$  kN/m を用いた<sup>14)</sup>。

同様に、変断面を有する主塔の死荷重強度  $W_T$  (kN/m) は、 $W_T = A_T \times \gamma_s \times 1.4$  により算出した。なお、40% の割増は、ボルトや軸力に抵抗できない横方向補剛桁や添接板などの部材を考慮する係数である<sup>14)</sup>。また、 $\gamma_s$  (=76.93 (kN/m)) は鋼材の単位体積重量である。 $A_T$  は主塔の断面積であり、補剛材などを考慮した換算板厚を用いて算出した断面積である。

活荷重は、本四基準に示される等価  $L$  荷重  $W_L = 26.46$  (kN/m/Br) の等分布荷重を全長にわたり一定として用いることにする。

### 2.3 断面諸元

前述の構造条件および荷重条件を基に、応力度照査および安定照査を満足するように、板厚および鋼材をパラメータにして断面設計を行った。得られた各構成要素の鋼種および断面諸元を表-1 にまとめる。なお、表中に示される「 $A$ 」は断面積、「 $I_{xx}$ 」は  $x$  軸 (橋軸方向) まわりの断面二次モーメント、「 $I_{yy}$ 」は  $y$  軸 (橋軸直角方向) まわりの断面二次モーメント、「 $J$ 」はサンパンのねじり定数、「 $t$ 」は板厚である。なお、ハンガーの安全率は  $\gamma_H = 2.5$ 、主ケーブルの安全率は、海洋横断

表-1 各構成要素の基本断面諸元

| 構成要素            | 材質              | A (m <sup>2</sup> )                                                                        | I <sub>xx</sub> (m <sup>4</sup> ) | I <sub>yy</sub> (m <sup>4</sup> ) | J (m <sup>4</sup> ) | t (mm)                                                         |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------|
| 箱桁              | SM490Y          | 1.458                                                                                      | 5.324                             | 175.48                            | 18.95               | t <sub>u</sub> =20<br>t <sub>b</sub> =18<br>t <sub>w</sub> =18 |
| グレーチング桁         | SM490Y          | 1.177                                                                                      | 3.976                             | 174.79                            | 10.49               | t <sub>g</sub> =2                                              |
| 側主塔 1, 2<br>中央塔 | SM490Y<br>SM570 | 3.145                                                                                      | 39.03                             | 47.64                             | 50.88               | 32                                                             |
|                 |                 | 3.715                                                                                      | 46.38                             | 66.89                             | 64.81               | 36                                                             |
|                 |                 | 4.536                                                                                      | 56.99                             | 95.97                             | 84.72               | 42                                                             |
|                 |                 | 5.302                                                                                      | 67.00                             | 130.33                            | 105.27              | 47                                                             |
|                 |                 | 6.350                                                                                      | 80.68                             | 179.61                            | 133.23              | 54                                                             |
|                 |                 | 7.320                                                                                      | 93.42                             | 233.59                            | 160.77              | 60                                                             |
| 上部水平材           | SM400           | 1.96                                                                                       | 35.62                             | 8.08                              | 19.06               | 40.6                                                           |
| 中間水平材           |                 | 2.20                                                                                       | 58.73                             | 9.56                              | 24.74               |                                                                |
| 下部水平材           |                 | 2.00                                                                                       | 51.50                             | 5.87                              | 16.40               |                                                                |
| 主ケーブル           | ST1770          | A <sub>C</sub> =0.887 m <sup>2</sup> /cable<br>A <sub>C</sub> =0.696 m <sup>2</sup> /cable |                                   |                                   |                     |                                                                |
|                 | ST2000          |                                                                                            |                                   |                                   |                     |                                                                |
| ハンガー            | ST1570          | A <sub>C</sub> =0.0106 m <sup>2</sup> /cable                                               |                                   |                                   |                     |                                                                |

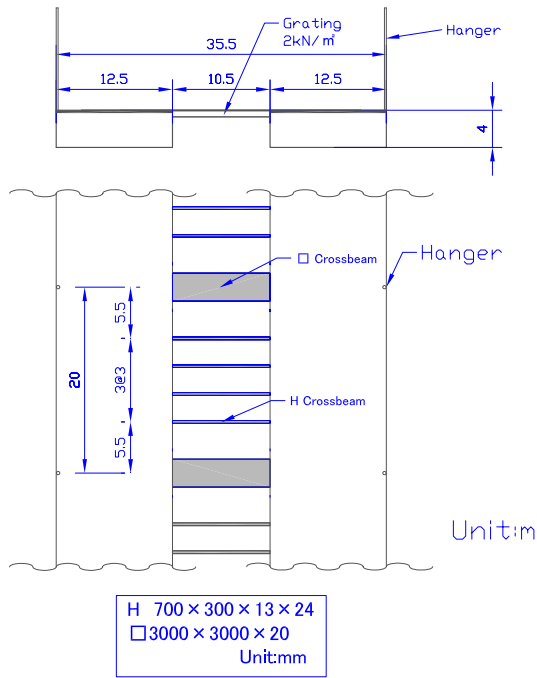


図-2 2箱+グレーチング断面

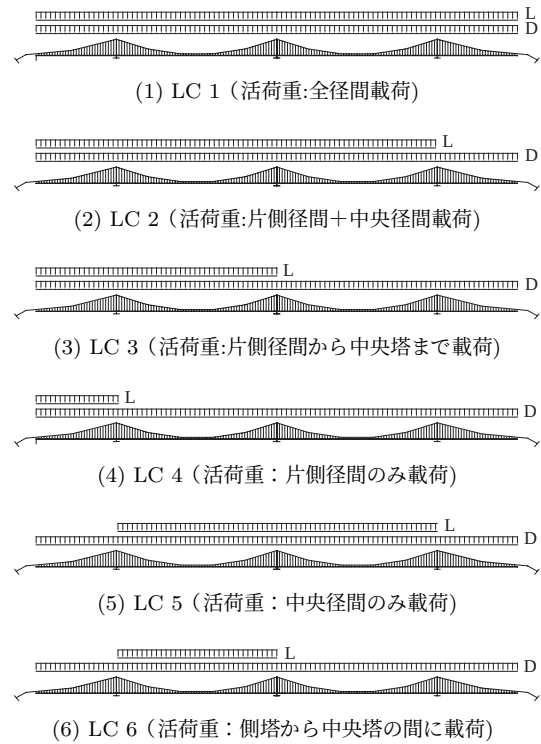


図-3 荷重載荷条件

道路吊橋ケーブル設計指針<sup>10)</sup>の成果を踏まえて  $\gamma_c=1.8$  を用いている。

塔柱の鋼種は、中央塔に SM570 および両側塔に SM490Y、水平材に SM400 を採用した。また、補剛桁には単室箱断面と 2 箱+グレーチング断面を採用した。まず、単室箱断面の鋼種は SM490Y である。上フランジ厚は最小板厚相等の 12 mm、下フランジ厚は 10mm とし、縦リブを考慮した換算板厚として前者を 20mm、後者を 18mm とした。ウェブは縦リブ 8mm を考慮した換算板厚 18mm を用いた<sup>14)</sup>。

一方、2 箱+グレーチング断面は、図-2 に示すよう

に、補剛桁断面の中央部 10.5m においてグレーチング断面を適用する。桁高は単室箱桁断面と同様に 4m と設定する。また、両側の箱断面は、縦リブを考慮した換算板厚として、上フランジ厚は 20mm、下フランジおよび腹板の板厚は 16mm とした。グレーチングの重量は 2 kN/m<sup>2</sup> とし、その床組は、H700×300×13×24mm の横梁を 3 m 間隔に配置し、□ 3000×3000×20×20mm の横梁を 20m 毎に配置した。鋼種は、オープングレーチング部床組および両側の箱断面ともに SM490Y である。なお、解析上、オープングレーチング部は横梁を

表-2 材料特性

|                 | 補剛桁    | 主塔     |        | 主ケーブル  |        | ハンガー   |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | SM490Y | SM490Y | SM570  | ST1770 | ST2000 | ST1570 |
| $\sigma_u$      | 490    | 490    | 568    | 1764   | 2059   | 1568   |
| $\sigma_y$      | 355    | 355    | 451    | 1372   | 1771   | 1176   |
| $E$             | 205800 | 205800 | 205800 | 196000 | 196000 | 137200 |
| $E'/E$          | 0      | 0      | 0      | 0.0364 | 0.0364 | 0.0383 |
| $\varepsilon_y$ | 0.0011 | 0.0011 | 0.0022 | 0.007  | 0.009  | 0.0085 |
| $\varepsilon_p$ | -      | -      | -      | 0.062  | 0.049  | 0.083  |

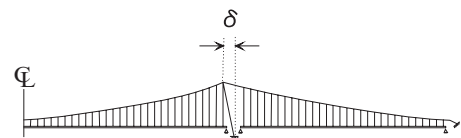
Unit : (MPa)

考慮した換算板厚を有する板としてモデル化した。この換算板厚  $t_g$  は式 (1) により求めた<sup>15)</sup>。

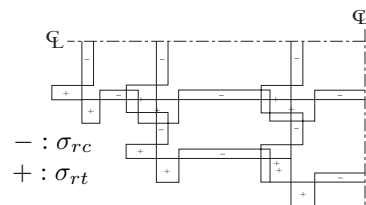
$$t_g = \frac{E B L_p A_l}{G \frac{L_l^3}{L_l}} \quad (1)$$

ここに、 $A_l$  は横梁の断面積、 $B$  はグレーチング幅、 $L_l$  は横梁部材長さ、 $L_p$  は横梁の格間長、 $E, G$  はそれぞれヤング率およびせん断弾性係数である。

主ケーブルには、本四基準<sup>12)</sup>に基づいた平行線ケーブル 1770 MPa の ST1770 と、今回新たに高強度ケーブル 2000 MPa を設定した<sup>16)</sup>。また、ハンガーはストランドロープ ST1570 である。



(a) 初期たわみ



(b) 残留応力分布

図-4 主塔の初期不整

### 3. 解析条件

数値計算には、構成する薄肉断面部材に対して一般に用いられる基本仮定のもと、幾何学的非線形性に材料非線形性が加わった複合非線形問題として定式化した自主開発ソフトを使用する。材料の応力-ひずみ関係には増分塑性理論による増分法を、さらに、この非線形数値計算には Newton-Raphson 法と組合わせて求める変位増分法を採用する。解析モデルは、主塔と補剛桁を 3 次元はり要素、ケーブルに 4 節点を持つ 3 次元ケーブル要素を用いて立体骨組構造としてモデル化した。

#### 3.1 載荷方法

荷重条件は、死荷重  $D$  が作用する初期状態  $1.0(D)$  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。なお、増分荷重に死荷重を含めるかどうかについては議論のあるところであるが、これまで死荷重を含める場合、含めない場合  $(D+\alpha L)$  共に報告されており、明確な規定は存在しない。そのため今回の検討では著者らの既存の検討との整合性を考え、死荷重についても増分荷重に含めることとした。

活荷重の載荷パターンは、本来影響線載荷により各構成要素に対して最も厳しい荷重条件を設定することになるが、今回の場合図-3 に示すような 6 ケースを仮定した。

#### 3.2 構成則

解析モデルの主塔、補剛桁、主ケーブル及びハンガーに使用した鋼材の材料特性を表-2 に示す。表中の  $\sigma_u$  は引張強度、 $\sigma_y, \varepsilon_y$  は降伏応力および降伏ひずみ、および  $E, E'$  はヤング率およびひずみ硬化係数である。主塔および補剛桁に対して完全弾塑性型、主ケーブルおよびハンガーはバイリニア型を仮定した。なお、鋼種の変更は行わず全ての安全率に対して同一の鋼材とする。また、主塔および補剛桁の局部座屈の影響は考慮していない。

#### 3.3 主塔の初期不整

吊橋の耐荷力に影響を与える初期不整は、主塔のみに考慮する。主塔の初期たわみは、図-4(a) のように塔頂部において橋軸方向変位  $\delta$  を有する直線形状の初期たわみとして  $\delta=h/2000$  ( $h$  は塔高) を対象とする。さらに、残留応力は図-4(b) のような塔柱多室箱型断面 (1/4 断面) に  $\sigma_{rc}/\sigma_y=0.4, \sigma_{rt}/\sigma_y=1.0$  を有する理想化した溶接型残留応力分布を仮定した。ここに、 $\sigma_{rc}, \sigma_{rt}$  および  $\sigma_y$  は各々圧縮残留応力、引張残留応力および降伏応力である。

なお、これまでに実測された主塔の圧縮残留応力  $\sigma_{rc}$  は、板厚 30~60mm において  $0.1\sigma_y$  以下と非常に小さいことが報告されている。さらに、明石海峡大橋の主塔の場合、その製作精度として主塔の各製作ブロックの鉛直度は  $1/10\,000$  が要求されており、主塔架設終了後



の検査測定では塔頂での製作・架設の誤差は最大 39mm と非常に高精度で架設されていること、また部材の初期たわみは最大で部材長の 1/1800、平均で 1/5000 と小さいことが確認されている<sup>17)</sup>。しかし、本研究ではこれまでの実測結果に比べてより大きな初期不整として、道路橋示方書<sup>18)</sup>に規定された柱の基準耐荷力曲線において基本としている圧縮残留応力  $\sigma_{rc}=0.4\sigma_y$  を、さらに部材長の 1/2000 の初期たわみを採用した。なお、補剛桁は初期不整の実測値が小さく<sup>19)</sup>、また軸圧縮力が小さいことから、初期不整は考慮していない。

また、3 主塔の初期たわみの導入方法には、それぞれ 2：初期たわみが左側に発生する場合、1：初期たわみが右側に発生する場合、0：初期たわみが発生しない場合、の 3 ケースを考える。本研究では、既存の研究で明らかにされている初期不整を無視した場合の図-3 の 6 ケースの活荷重載荷条件において、終局強度に影響を及ぼす 3 ケース (LC1~LC3) に対して、図-5 のように、吊橋の終局強度が最も低下するように中央塔と側塔に初期たわみを導入する。図中の LC1(1+1+1)、LC2(1+1+2)、LC3(2+2+2) の簡略化表記により示したケース名は、例えば、(2+1+0) は (側塔 2-中央塔 1-側塔 0) を意味し、各主塔の数字は初期たわみの向きが、2 は左、1 は右、0 は無しを意味する。

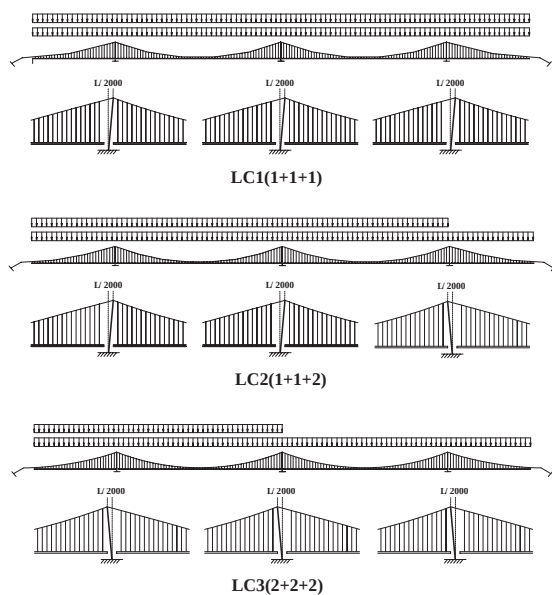


図-5 終局強度が最も低下する初期たわみの組み合わせ

#### 4. 補剛桁の断面形状と耐荷力

2. で試設計した 4 径間吊橋を対象にして、3. の解析条件のもと、弾塑性有限変位解析を行った。まず、主桁の断面形状の違いが耐荷力に及ぼす影響について検討する。主桁には単室箱断面および 2 箱+グレーチング断面の 2 パターンを対象にした。なお、ケーブル強度は 1770 MPa を用いる。

#### 4.1 活荷重載荷条件が耐荷力に及ぼす影響

3.1 の図-3 に示した LC1 から LC6 の 6 ケースの活荷重載荷条件が構造全体系の耐荷力に及ぼす影響についてパラメトリック解析を行った。なお、ここでの解析では、初期不整を考慮していない。

図-6(1) は、主桁に箱断面を用いたモデルにおいて、各活荷重載荷条件による各構成要素の初期降伏時荷重倍率および終局時荷重倍率をまとめたものである。ここに、終局時荷重倍率は、荷重-変位曲線における終局限界点 (ピーク点) に達したときの荷重倍率である。LC1 では、側塔 1、側塔 2、ハンガー、ケーブルの順に初期降伏を起こし、終局時の荷重倍率  $\beta=2.173$  となり終局を迎えた。LC2 では、側塔 2、側塔 1、ハンガーの順に初期降伏を起こし、終局時の荷重倍率  $\beta=2.106$  となり終局を迎えた、この時、中央塔およびケーブルには降伏が発生していない。また、最も荷重倍率の厳しいケースとなった。LC3 では、側塔 2、ハンガー、中央塔、側塔 1 の順に初期降伏を起こし、終局時の荷重倍率  $\beta=2.210$  となり終局を迎えた。この時、ケーブルには降伏が発生していない。

LC4 では、ハンガー、側塔 2、側塔 1、ケーブルの順に初期降伏を起こし、終局時の荷重倍率  $\beta=2.302$  となり、最も終局荷重倍率が大きかった。LC5 では、側塔 1・側塔 2、ハンガーの順に初期降伏を起こし、終局時の荷重倍率  $\beta=2.116$  となり終局を迎えた。LC6 では、側塔 1、側塔 2、ハンガー、中央塔の順に初期降伏を起こし、終局時の荷重倍率  $\beta=2.184$  となり終局を迎えた。したがって、各ケースにおける終局時荷重倍率は、2.1~2.3 の範囲になった。なお、全荷重条件に対してハンガーの降伏荷重倍率はほぼ一定値を示した。

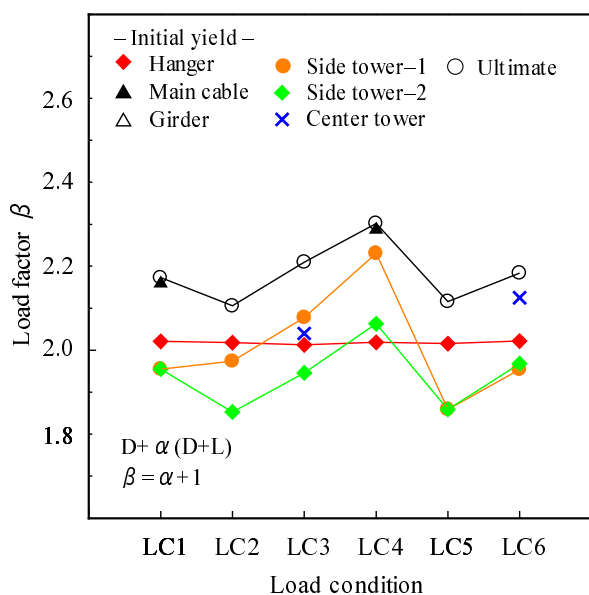
次に、主桁に 2 箱+グレーチング断面を有するモデルの解析結果をまとめたのが図-6(2) である。このモデルは、全荷重条件においてケーブルに初期降伏が生じている。また、箱断面モデルとほぼ同様な荷重倍率傾向を示したが、その値はより大きな値となった。特に、側塔の初期降伏時荷重倍率が箱断面モデルのそれに比較して大きな値を示している。各ケースにおける終局時荷重倍率は、2.2~2.4 を示した。

#### 4.2 初期不整が耐荷力に及ぼす影響

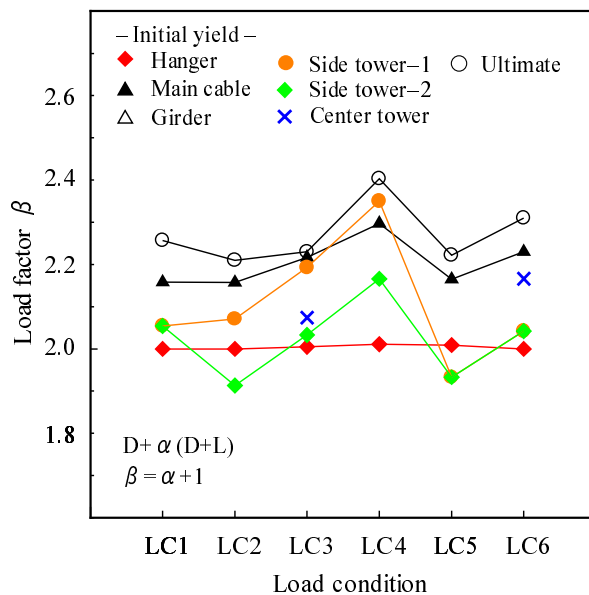
4.1 で明らかのように、2 箱+グレーチング断面の補剛桁において他の荷重条件に比して終局時荷重倍率が小さくなる LC1、LC2、LC3 を対象にして、図-5 の厳しい初期不整を主塔に導入して解析を行い、構造全体系の耐荷力に及ぼす初期不整の影響について検討した。

図-7(1) は、箱断面モデルについてまとめたものである。全ケースともそれぞれ終局時の荷重倍率  $\beta$  が、主塔に初期不整を考慮していない図-6(1) の結果と比べて低下しており、LC1 では 3.6% ( $\beta=2.094$ )、LC2 では 3.1% ( $\beta=2.041$ )、LC3 では 3.5% ( $\beta=2.133$ ) を示した。なお、終局強度が最も厳しい条件となった LC2 においても、終局時の荷重倍率は  $\beta=2.0$  を保持している。

各構成要素の荷重倍率において、終局主塔の初期降

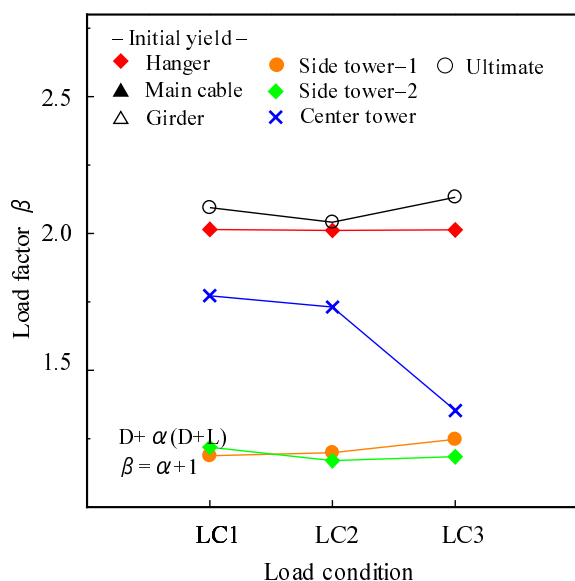


(1) 箱断面

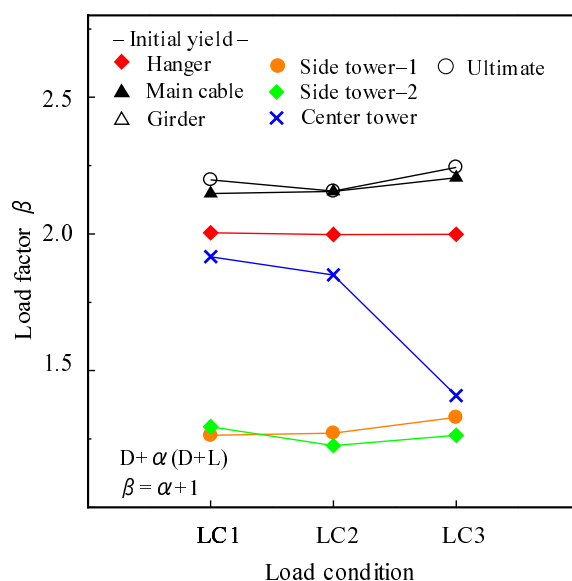


(2) 2箱+グレーチング断面

図-6 各構成要素の初期降伏時および終局時荷重倍率 (初期不整無し, 1770 MPa)



(1) 箱断面



(2) 2箱+グレーチング断面

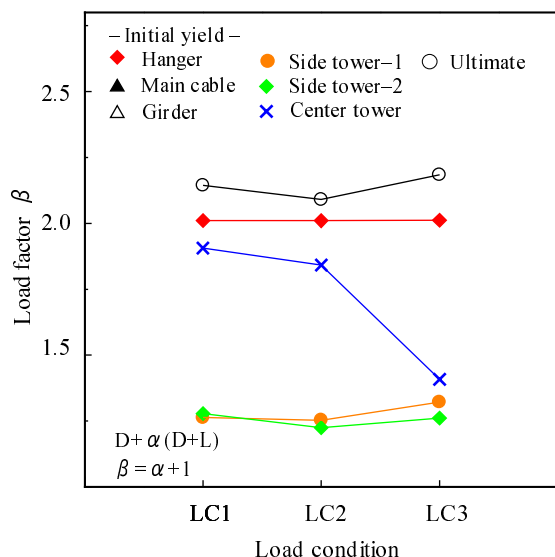
図-7 各構成要素の初期降伏時および終局時荷重倍率 (初期不整有り, 1770 MPa)

伏は早まり、特に両側塔においては各載荷条件に対して、初期降伏を荷重倍率  $\beta=1.2$  前後で起こしている。また、中央塔にも初期降伏が発生している。ハンガーは、初期降伏を  $\beta=2.01$  過ぎに起こしており、これは主塔に初期不整を考慮していない場合とほとんど差がない。

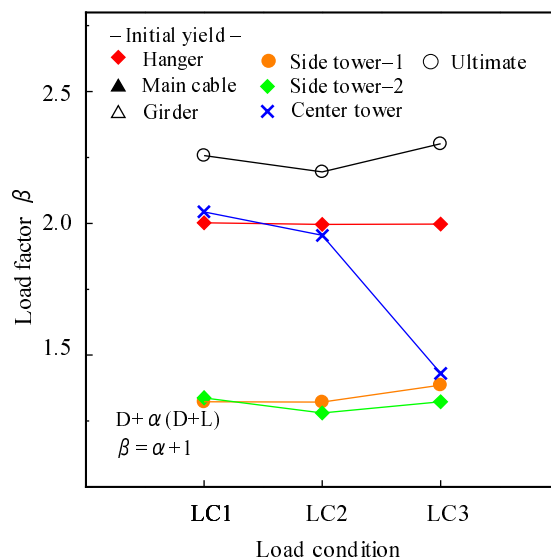
次に、主桁にグレーチング型桁断面を有するモデルの解析結果についてまとめたのが図-7(2)である。LC1~LC3の各ケースともそれぞれ終局時の荷重倍率  $\beta$  が、主塔に初期不整を考慮していない図-6(2)と比べると、約 2.5%ほど低下している。終局強度が最も厳

しい条件となった LC2 においても、終局時の荷重倍率  $\beta=2.2$  程度を保持している。

ハンガーは、初期降伏を  $\beta=2.0$  過ぎに起こしており、これは主塔に初期不整を考慮していない場合とほとんど差がない。主ケーブルは、図-7(1)の箱断面モデルでは初期降伏が発生していなかったものが、初期降伏を  $\beta=2.1$  過ぎに起こしている。ハンガーと同様に、主ケーブルの初期降伏時荷重倍率も一定値となっており荷重条件の違いによる影響は少ない。図-6(2)の初期不整なしの結果に比して、初期降伏時および終局時の荷重倍率は高めの値になった。しかし、主塔の初期降



(1) 箱断面



(2) 2 箱+グレーチング断面

図-8 各構成要素の初期降伏時および終局時荷重倍率 (初期不整有り, 2000 MPa)

伏は早まり、特に両側塔においては各载荷条件に対して、荷重倍率  $\beta=1.3$  前後で初期降伏を起こしている。

## 5. 高強度ケーブルと耐荷力

主ケーブルに新材料である 2000 MPa 新鋼線を適用し、桁断面およびケーブル強度の違いが耐荷力に及ぼす影響について、初期不整を導入して検討した。

図-8(1)は、主桁に箱断面を有するモデルの解析結果を示している。LC1~LC3の各ケースともそれぞれ終局時の荷重倍率  $\beta$  が、ほぼ 2.1 を確保している。なお、主ケーブルに従来の 1770 MPa 旧鋼線を適用した図-7(1)に比べて、終局時荷重倍率は全ケースで約 2.3% 増加した。全ケースともに、主塔の初期降伏は遅くなるのに対して、ハンガーは従来のケーブルを用いたモデルとほぼ同じ時期に初期降伏を起こしている。

次に、主桁に 2 箱+グレーチング断面を有するモデルの解析結果についてまとめたのが図-8(2)である。LC1~LC3の各ケースともそれぞれ終局時の荷重倍率  $\beta$  が、LC1では  $\beta=2.257$ 、LC2では  $\beta=2.195$ 、LC3では  $\beta=2.302$  となった。終局強度が最も厳しい条件となった LC2 においても、終局時の荷重倍率  $\beta=2.2$  程度を保持している。

なお、主ケーブルに従来の 1770 MPa 旧鋼線を適用した図-7(2)に比べて、終局時荷重倍率は全ケースで 1.8~2.73% 増加した。全ケースともに、従来のケーブルを適用したモデルでは主ケーブルが降伏を起こしていたのに対して、高強度ケーブルを適用したモデルでは、初期降伏を起こさずに終局を迎えている。

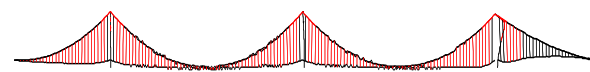
また、主塔の初期降伏は遅くなるのに対して、ハンガーは従来のケーブルを用いたモデルとほぼ同じ時期に初期降伏を起こしている。したがって、ハンガーは主ケーブルの違いによる構造全体系の耐荷力に対して、

表-3 LC2 における終局時荷重倍率

|                 | 箱断面   | 2 箱+グレーチング断面 |
|-----------------|-------|--------------|
| 初期不整無し, 1770MPa | 2.106 | 2.210        |
| 初期不整あり, 1770MPa | 2.041 | 2.157        |
| 初期不整あり, 2000MPa | 2.090 | 2.195        |



(1) 箱断面モデル ( $\beta=2.106$ )



(2) 2 箱+グレーチング断面モデル ( $\beta=2.210$ )

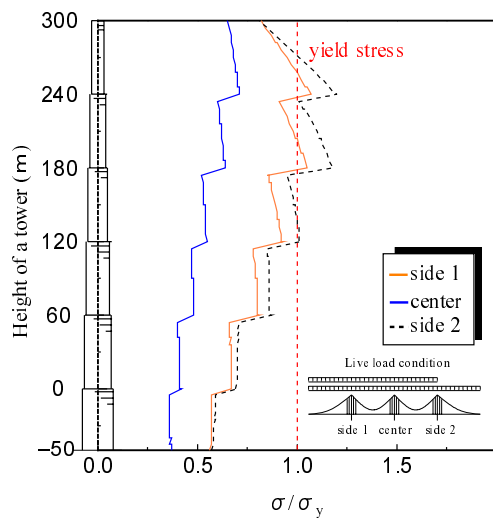
図-9 終局時変位増分モード (初期不整無し, 1770 MPa)

その塑性化の影響は小さい。

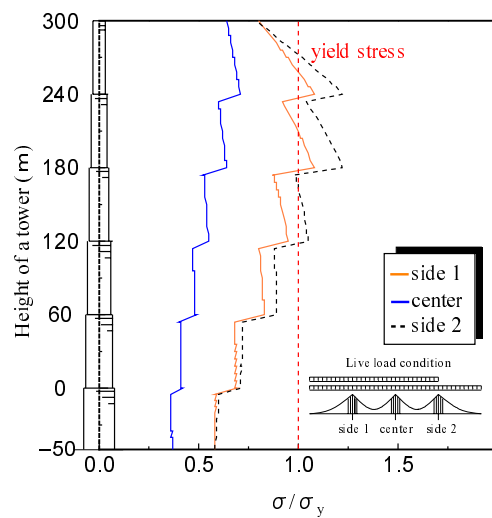
## 6. 考察

4.では、主ケーブルに 1770 MPa を適用した箱断面と 2 箱+グレーチング断面の両モデルに対して、活荷重载荷条件の違い、および主塔に初期降伏を考慮した場合について検討した。さらに、5.では両断面モデルに対して、主ケーブルに 2000 MPa の高強度ケーブルを適用した影響について検討した。いま、解析結果において最も厳しい終局強度を与える LC2 の载荷条件に対して終局荷重倍率をまとめたのが表-3 である。

表-3 および図-6 から明らかなように、2 箱+グレーチング断面は死荷重を軽減できるため、終局時の荷重倍率が箱断面モデルのそれに比べて 4~5% 増加する。な

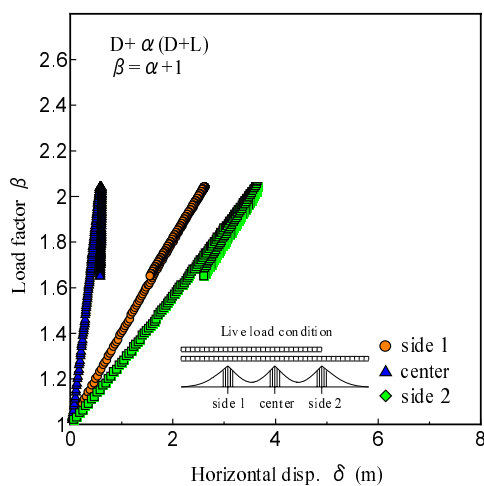


(1) 箱断面

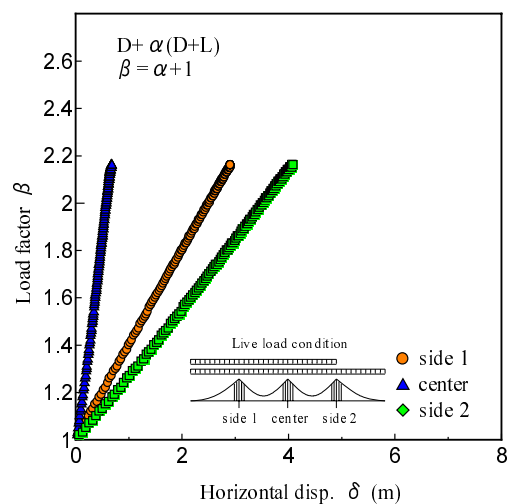


(2) 2箱+グレーチング断面

図-10 終局時の主塔応力分布 (初期不整無し, 1770 MPa)

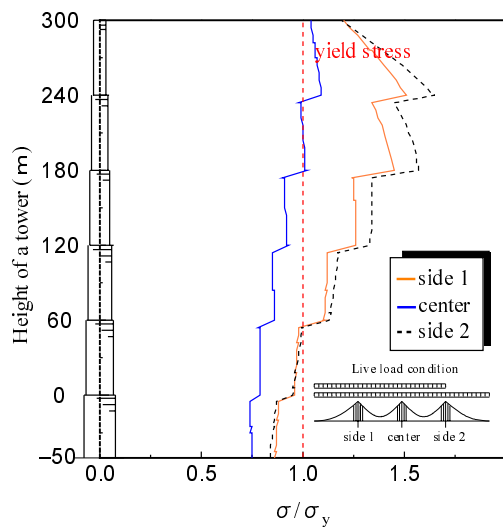


(1) 箱断面

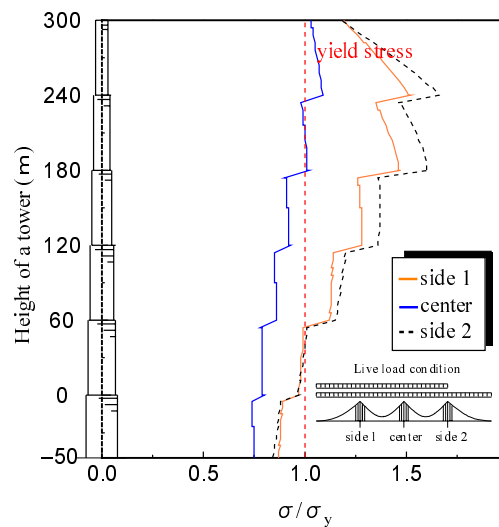


(2) 2箱+グレーチング断面

図-11 荷重-変位曲線 (初期不整有り, 1770 MPa)



(1) 箱断面



(2) 2箱+グレーチング断面

図-12 終局時の主塔応力分布 (初期不整有り, 1770 MPa)



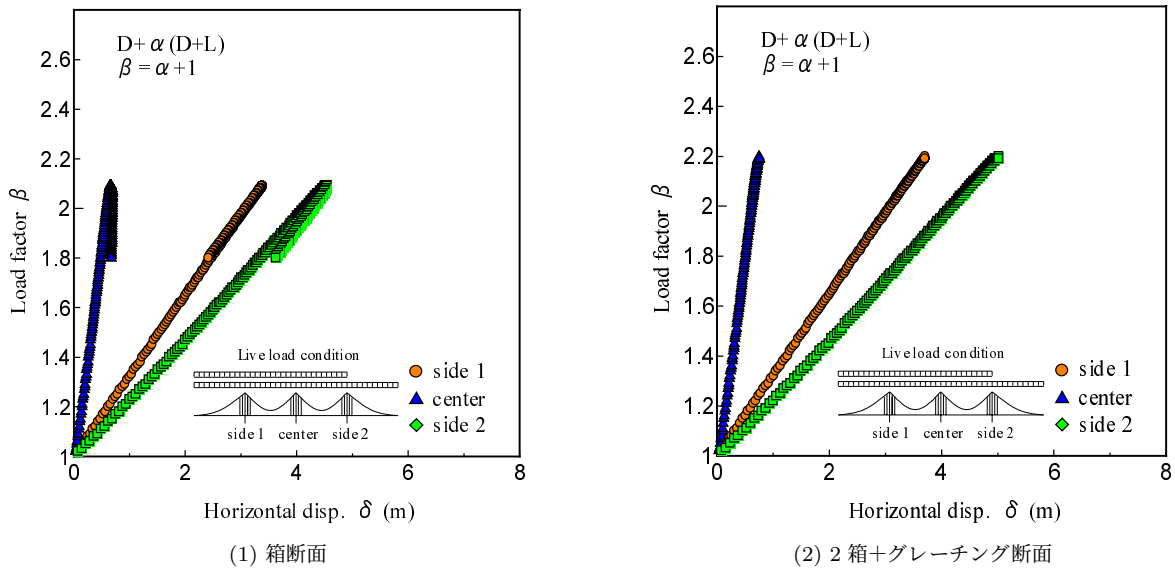


図-13 荷重－変位曲線 (初期不整有り, 2000 MPa)

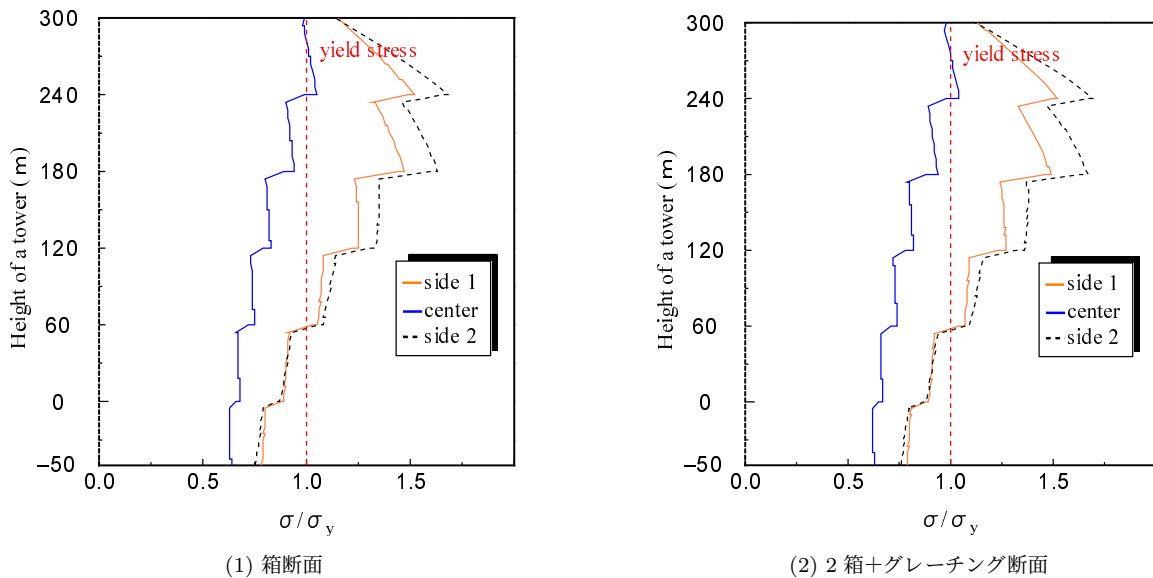


図-14 終局時の主塔応力分布 (初期不整有り, 2000 MPa)

お、2 箱+グレーチング断面はケーブルに 1770 MPa を適用した場合、主ケーブルが初期降伏を起こし、その直後に終局を迎える。

主ケーブルに 1770 MPa を適用し、初期不整を考慮しない両断面モデルは、図-9 の終局時変位増分モード (終局時の荷重ステップとその前の荷重ステップ間の増分変位) から明らかなように側塔 2 の塑性が進展して大きく変形して終局を迎える。終局時の主塔の最大応力は、図-10 の応力度分布に示したように両側塔の桁上塔高の 4/5 の位置に発生し、120~280m の桁高領域に塑性進展がみられる。

主塔に初期不整を導入した場合の荷重－変位曲線を示したのが図-11 である。中央塔に比べて側塔の塔頂部水平変位が大きいことがわかる。終局時の荷重倍率は、初期不整を考慮しない場合に比して、箱桁断面で

3.6%、グレーチング桁断面で 2.6%に低下している。また、図-12 に示すように両モデルともに、3 主塔の最大応力は主塔に初期不整を導入する前と同じ位置に発生している。そして、中央塔は塔頂部から桁上塔高の 3/5 位置の領域に、2 側塔は桁上から塔頂部にかけて塑性進展がみられる。

最後に、2000 MPa の高強度ケーブルを適用したモデルは、図-15 の両桁断面モデルの終局時変位増分モードから明らかなように 3 主塔に塑性領域が発生し、特に側塔 1, 2 の塑性進展が大きく、側塔 2 の塑性変形により終局を迎えている。表-3 から明らかなように従来のケーブルを適用したモデルに比べて終局時荷重倍率が 2%前後増加するが、図-13 に示すように塔頂部の水平変位は、より大きな値を示している。また、図-14 において主塔の応力分布は図-12 と比べると塑性が進

展している範囲は側塔の場合ほぼ同じであるが、中央塔の塑性領域は桁上塔高の 4/5 位置付近のみと少ない。このことから、高強度ケーブルを適用すると、終局限界状態までケーブルには塑性領域が発生せずに弾性挙動をすること、さらに中央塔は 4/5 位置付近の断面内の一部が塑性するものの中央塔の大部分は弾性状態にあることにより構造全体系の終局耐力が増加したと考えられる。

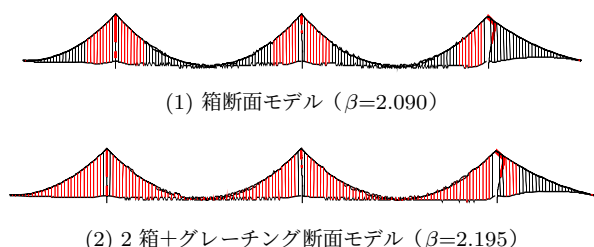


図-15 終局時変位増分モード (初期不整有り, 2000 MPa)

## 7. 結論

本研究では、4 径間超長大吊橋の開発を目的として、中央径間 3000m を有する 4 径間超長大吊橋の弾塑性挙動および終局強度特性について検討した。得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 箱断面モデルおよび 2 箱+グレーチング断面を有する主桁の橋梁全体系の終局強度への影響では、片側の側径間と中央径間に活荷重を偏載荷した LC2 の荷重載荷条件において、最も終局強度が低下した。また、2 箱+グレーチング断面モデルは死荷重を軽減できるため、箱断面モデルに比べ 5% 終局強度が増加した。
- 2) 主塔の初期不整の橋梁全体系の終局強度に与える影響では、最大で初期不整を考慮しない場合の終局強度に比べて、箱断面モデルにおいて 3.8%、2 箱+グレーチング断面モデルにおいて 2.7% 低下した。
- 3) 主ケーブルに高強度ケーブルを適用した結果では、従来のケーブルを使用したときと比べて、橋梁全体系の終局強度が 2~3% 増加し、終局時の荷重倍率は、2 箱+グレーチング断面モデルにおいて 2.2 を確保できることを明らかにした。
- 4) 今回対象とした 4 径間超長大吊橋において、2 箱+グレーチング断面を有する補剛桁の適用、および高強度ケーブルの主ケーブルへの適用は橋梁全体系の終局強度を向上させる効果があり、終局時における従来の所要荷重倍率と同等の値を保持することから、充分安全性を確保できることを明らかにした。

最後に、本研究における弾塑性有限変位解析では、断面の局部座屈は考慮していない。実際の断面では局部座屈の発生により局部座屈を考慮しない場合より終局強度が低下することが考えられる。より精度の高い終

局強度の算出のためには局部座屈を考慮する必要がある、今後の検討課題にしたい。

## 参考文献

- 1) 吉田修：二径間吊橋の構造検討，本四技報，vol.14，No.56，1990
- 2) 藤原稔：超長大橋の新しい構造形式調査の概要：海峡横断，vol.17，2001
- 3) 池田虎彦，古市潔彦：多径間吊橋の構造特性の検討：海峡横断，vol.17，2001
- 4) 樋口康三，大橋治一，深谷寿久：多径間吊橋における活荷重載荷方法による構造特性への影響，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，I-A309，1996
- 5) 岡田淳，西川和廣，村越潤：四径間吊橋の活荷重載荷方法の検討，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，I-A308，1996
- 6) 吉田修，守矢健夫：4 径間吊橋の構造特性と実用化へ向けての一考察，構造工学論文集，vol.43A，1997
- 7) 中島英輔：オープングレーチングの構造・特性調査の概要：海峡横断，vol.17，2001
- 8) 山野一彦，今野信一：長大吊橋の耐風安定性に関するグレーチングの効果とその使用実績：海峡横断，vol.8，1997
- 9) 山岸一彦，佐々木雅敏，福井幸夫：オープングレーチング床版超長大吊橋の設計検討：海峡横断，vol.12，1998
- 10) 本州四国連絡橋公団：海洋横断道路吊橋ケーブル設計指針，2002
- 11) 野上邦栄，染谷厚徳，山沢哲也：4 径間超長大吊橋の弾塑性挙動と合理的主塔剛性比，構造工学論文集，vol.52A，2006
- 12) 本州四国連絡橋公団：上部構造設計基準・同解説，1989
- 13) 本州四国連絡橋公団：吊橋主塔設計要領・同解説，1989
- 14) 野上邦栄，斎藤一則，長井正嗣，藤野陽三：超長大吊橋の終局強度に着目した主ケーブル，ハンガーおよび主塔の安全率の合理化，土木学会論文集，No.682/I-56，pp.323-334，2001
- 15) 土木学会：座屈設計ガイドライン，鋼構造シリーズ 12，2005
- 16) T.Tarui, N.Maruyama, T.Eguchi and S.Konno: Development of high strength galvanized steel wire for bridge cable, IABSE, Seoul, 2001
- 17) 山岸一彦，山田郁夫：上部工設計基準類の変遷，橋梁と基礎，Vol.32，No.8，pp.98-102，1998.
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，II 鋼橋編，丸善，2002.
- 19) 大橋治一，依田照彦，樋口康三：長大斜張橋鋼床版の初期不整の実測データとその圧縮強度評価，土木学会論文集，No.549/I-37，pp.55-64，1996.

(2010 年 9 月 24 日 受付)