

## 主塔高さに着目した鋼管斜張橋の構造特性

## Structural Characteristics of Pipe Girder Cable-Stayed Bridges Considering Tower Height

中村俊一 \*

Shun-ichi NAKAMURA

庄司哲也 \*\*

Tetsuya SHOJI

\*Ph.D. 東海大学 工学部 土木工学科 教授 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

\*\*東海大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)

A new type of cable-stayed bridge using concrete filled steel girders has been proposed, and basic structural behavior and design have been studied. This new composite cable-stayed bridge is expected to have larger capacity for buckling, which may reduce the tower height. It is found from a parametric study using three different tower heights that the sectional forces of girders, cables and towers increase for the lower tower. But the total steel weight of the bridge, which has a 25% shorter tower than the conventional, is the same as the one with conventional tower height.

Key Words: cable-stayed bridge, pipe girder, seismic design, buckling strength, tower height

## 1. はじめに

鋼橋の低コスト化および競争力向上には、桁製作時の溶接加工量を削減することが有効であり、鋼管やH形鋼などの製鉄所で製造される製品を利用したり、鋼板をプレスにより冷間成形して主桁にする方法が考えられる。さらに、これらの鋼製主桁断面内部にコンクリートを充填すれば、鋼板の局部座屈が抑制され耐力・じん性が向上できる。この際、充填材として通常のコンクリートのみならず、非常に軽い気泡モルタルや、逆に鉄鉱石を骨材にした重いコンクリートなどを構造部位に応じて使いわけることにより、断面力および反力のバランスが向上できる。中村は、この設計思想に基づき種々の新形式橋梁を提案している<sup>1),2),3)</sup>。

本論文では、これらのうち鋼管を主桁とする合成斜張橋の構造および設計法について考察する。中村らはすでにスパン900mの鋼管斜張橋についての基本的な検討をしており<sup>4)</sup>、また松本らはスパン600mの鋼管斜張橋に関して風洞実験を実施しており、いずれも実現可能であると報告している<sup>5)</sup>。

通常の斜張橋においては、ケーブル張力の水平成分が主桁に伝達され、主桁には曲げモーメントに加え圧縮軸力が作用する。したがって、座屈耐力を確保することが重要となり、そのため比較的主塔を高くして圧縮軸力を低減している。ちなみに、吊橋ではケーブルのサグはスパンの1/10-1/11程度であるが、斜張橋

では桁面上の主塔高さはスパンの1/4-1/5程度である。しかし、本形式ではコンクリート床版も圧縮力を分担し、さらに、主桁は鋼とコンクリートの合成桁であるため剛性も高く、通常の鋼斜張橋より高い座屈耐力が期待できると考えられ、主塔を低くできる可能性がある。本研究では、この点に着目し、3種類的主塔高さに対し試設計を実施し、最適な主塔高さに関し考察する。

## 2. 構造の概要

中村らが提案している鋼管斜張橋<sup>4)</sup>を図-1および図-2に示す。鋼管を2主桁とし、PC床版を用い、両者をジベルで一体化する。側径間の鋼管桁内部にはなるべく重いコンクリートを充填して、端支点到発生する負反力を抑制する(領域A1,A2)。主塔部では圧縮力が卓越するため、やはり鋼管内にコンクリートを充填し圧縮力に抵抗させる(領域A2,B)。一方、スパン中央では圧縮力は作用せず、しかもなるべく軽くしたいため鋼管内は非充填とする(領域C)。床組構造は両主桁間に横桁と縦桁を配し、その上にPC床版を設置する。また、ケーブルは鋼管主桁を貫通して鋼管下面に定着するため、ケーブル張力が直接主桁に伝達され力学的にも合理的である。

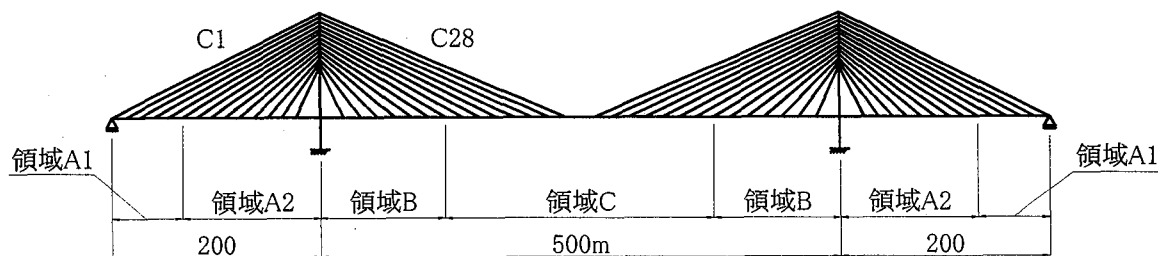


図-1 鋼管斜張橋の一般図

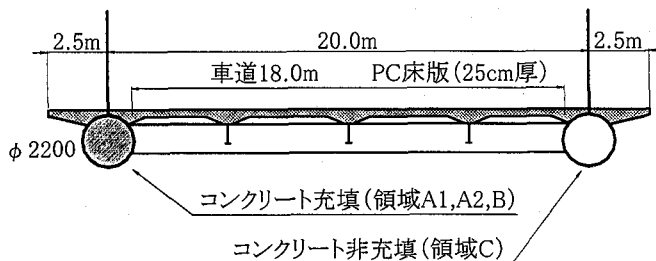


図-2 鋼管斜張橋の断面図

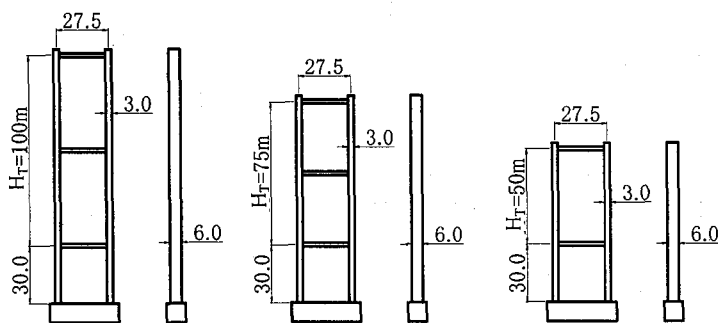


図-3(a) 3種類の主塔形状

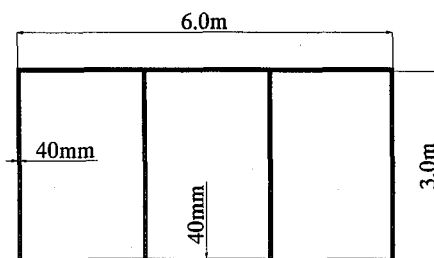


図-3(b) 主塔断面

対象橋梁は、車道幅員 18m、スパン 200+500+200m、ケーブル間隔は 20m とした。図-3(a)に示す 3 種類の主塔高さに対し試設計を実施し、最適な主塔高さに関し考察した。ここでは、桁面から主塔先端までの高さ  $H_T$  を主塔高さパラメーターとしたが、実際の主塔高さはこれに桁下部分 30m を加える必要がある。主塔断面は、図-3(b)に示す矩形断面とし、幅 3.0m、高さ 6.0m、板厚 40mm、材質 SM490Y とした。検討を簡略化するため、高さ方向には一定とした。

鋼管桁は、鋼管は直径 2,200mm、22mm 厚、材質は SM490Y とした。ケーブルは、引張強度 160kgf/mm<sup>2</sup> の亜鉛メッキ鋼線を平行に束ねたプレファブ平行線ケーブルを想定した（許容引張応力：64kgf/mm<sup>2</sup>）。これらの断面性能を表-1 に示す。なお、相対比較をするため、検討に用いた部材断面は 3 種類の主塔高さに共通とした。

床組構造としては、両側の鋼管桁を 9.0m 間隔で横

桁（腹板高 1200mm）で連結する。さらに、3 本の縦桁（腹板高 800mm）を設置し、その上に床版を設置する。床版は橋軸直角方向にプレストレスを導入した厚さ 25cm のプレキャスト PC 床版とし、鋼管主桁とはグループ配置されたスタッドで結合する。

### 3. 常時荷重に対する検討

#### 3.1 常時荷重

領域別の死荷重強度を表-2 に示す。鋼管内に充填するコンクリートは、死荷重時に主塔が鉛直になり曲げモーメントが発生しないよう、さらに端支点の負反力を最小にするよう設定した。その結果、側径間を 2 分割し、主塔に近い方により比重のやや重いコンクリート（比重 2.9）を、その他には軽量コンクリート（比重 1.1）を充填した。

表-1 断面諸元 (1面あたり, 鋼換算)

|      |          | A (m <sup>2</sup> ) | I (m <sup>4</sup> ) |
|------|----------|---------------------|---------------------|
| 主桁   | コンクリート床版 | 0.4464              | (充填)0.6598          |
|      | 鋼管       | 0.1708              | (非充填)0.2888         |
|      | 充填コンクリート | 0.5186              |                     |
|      | 縦桁       | 0.0112              | 0.0011              |
|      | 横桁       | 0.0306              | 0.0065              |
| 主塔   |          | 0.9600              | 3.8082              |
| ケーブル | C1       | 0.01920             | —                   |
|      | C2~C6    | 0.01204             | —                   |
|      | C7~C11   | 0.01620             | —                   |
|      | C12~C17  | 0.01204             | —                   |
|      | C18~C22  | 0.01620             | —                   |
|      | C23~C27  | 0.01204             | —                   |
|      | C28      | 0.01920             | —                   |

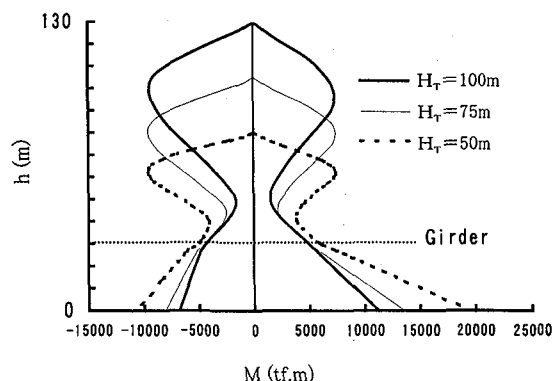


図-6 主塔の最大最小曲げモーメント

表-2 死荷重強度 (1面あたり)

|          | 領域 A1 | 領域 A2 | 領域 B  | 領域 C  |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 鋼管主桁     | 1.34  | 1.34  | 1.34  | 1.34  |
| 充填コンクリート | 3.99  | 10.53 | 3.99  | 0.00  |
| コンクリート床版 | 7.81  | 7.81  | 7.81  | 7.81  |
| アスファルト舗装 | 1.55  | 1.55  | 1.55  | 1.55  |
| 縦桁・横桁    | 0.64  | 0.64  | 0.64  | 0.64  |
| 合計 (t/m) | 15.34 | 21.87 | 15.34 | 11.34 |

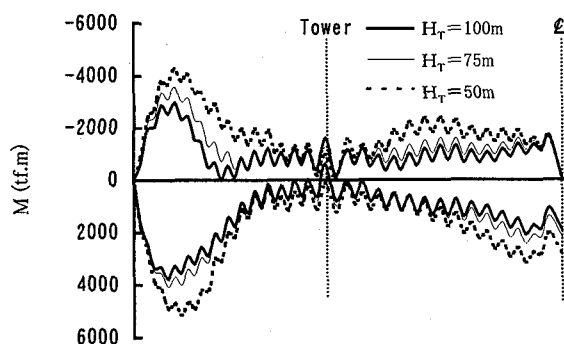


図-4 鋼管主桁の最大最小曲げモーメント

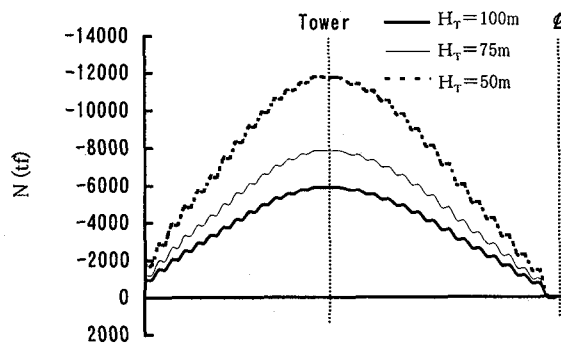


図-5 鋼管主桁の最大圧縮軸力

近年, 種々のコンクリートが実用化されており, 比重の制御も可能となっている. 気泡コンクリートや超軽量骨材を使用すれば, 比重 1.0 程度も可能であり, 実際の橋梁にも採用されている<sup>6), 7)</sup>. また, 骨材の材質や使用量を適切に選択すれば重量化も可能である.

ケーブルには, 死荷重載荷時に鋼管桁に発生する曲げモーメントが平滑化するようにプレストレスを導入した.

活荷重は道路橋示方書に規定されるB活荷重とし, 影響線解析により断面力を求めた. また, 衝撃係数も考慮した.

なお, プレキャスト PC 床版を用いているためコンクリートのクリープおよび乾燥収縮は場所打ちコンクリートに比べ小さいため, 本研究ではこれらの検討を省略した.

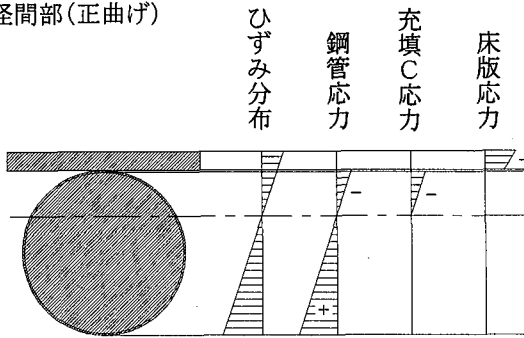
### 3.3 断面力

死荷重および活荷重により鋼管主桁に発生する最大・最小曲げモーメントを図-4に示す. 中央径間中央部では正の曲げモーメントが卓越し, 主塔部では負の曲げモーメントが卓越し, 側径間部では正と負の両者の曲げモーメントが発生する. この発生曲げモーメントの傾向は通常の鋼製斜張橋と同一であるが, 値は主塔が低くなるほど大きくなる.

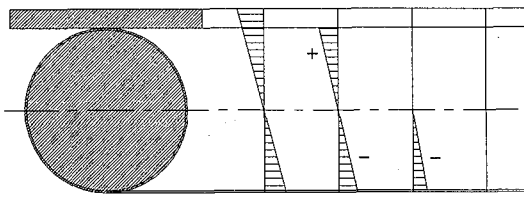
鋼管主桁に発生する最大圧縮軸力を図-5に示す. 全径間で圧縮軸力が発生し, 主塔部で最大となる. この軸力分布の傾向も, 通常の鋼製斜張橋と同一である. ただし, 主塔高さ  $H_T=50\text{m}$  の時が  $H_T=100\text{m}$  の2倍近くにもなる.

主塔の曲げモーメント分布を図-6に示す. ケーブル定着部と基部の2カ所で最大の曲げモーメントが発生している. これらの傾向は3種類の主塔高さに共通であるが, 基部での曲げモーメントは主塔高さ  $H_T=50\text{m}$  の時が最も大きくなる.

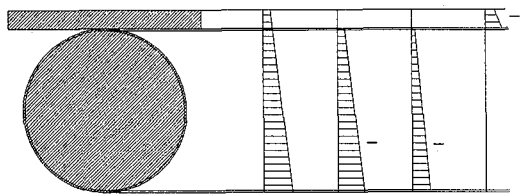
(a)側径間部(正曲げ)



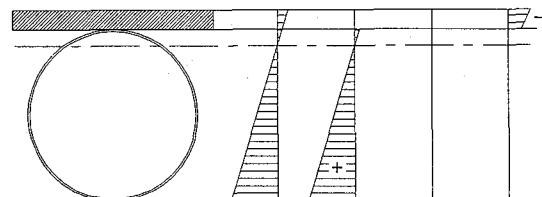
(b)側径間部(負曲げ)



(c)主塔部(負曲げ)



(d)中央径間中央部(正曲げ)



+:Tension    -:Compression

図-7 鋼管主桁の応力とひずみの分布

### 3.4 応力照査

過去の研究により<sup>8)</sup>、鋼管が弾性範囲にあれば、鋼管主桁に発生するひずみは平面保持の原則に従うこ

とがわかっている。また、鋼管上面に溶着されたスタッドは、通常の鋼I桁あるいは鋼箱桁上面に溶着されるスタッドと同等のずれ止め耐力を有することも確かめられている。

鋼管桁には、スパン方向に複雑な断面力が発生するが、代表的な断面における鋼管桁のひずみおよび応力分布を図-7に示す。

側径間部には、正と負の曲げモーメントおよび圧縮軸力が発生する。正曲げモーメントに対しては、(a)に示すように、合成桁と同様の応力分布となる。鋼管下縁には引張応力、コンクリート床版には圧縮応力が発生する。鋼管内部の充填コンクリート上部は圧縮となる。

負曲げモーメントに対しては、(b)に示すように、床版コンクリートは引張となるため応力は無視し、鋼管および充填コンクリートの圧縮部のみに応力が発生する。なお、床版コンクリートに発生するひびわれ幅については、過去の研究<sup>4)</sup>により、適量の鉄筋を配置することにより制御できると考えられる。

主塔部では、負曲げモーメントおよび大きな圧縮軸力が発生する。そのため、(c)に示すように、全断面が圧縮となり、床版コンクリートおよび充填コンクリートともに圧縮応力が発生する。

一方、中央径間中央部では圧縮軸力は発生せず、正曲げモーメントがクリティカルとなる。したがって、(d)に示すように、鋼管下縁には引張応力、コンクリート床版には圧縮応力が発生し、合成桁と同一の応力分布となる。

なお、実際の応力照査は、断面を高さ方向にスライスしたファイバー要素として応力計算した。この際、鋼管の応力・ひずみ関係はバイリニアとし、コンクリートは放物線とした。

また、鋼I桁を対象とした床版の有効幅については道路橋示方書に規定があるが、合成斜張橋に関するこの種の研究は過去に例がない。ここでは、合成斜張橋の場合には鋼I桁に比較して等価支間長が長くなると考え、床版全幅を有効として応力計算した。

鋼管主桁の中央径間中央、主塔部、側径間部に発生する応力度を図-8、図-9、図-10に示す。中央部では正の曲げモーメントが卓越し、鋼管とコンクリート床版が合成桁として機能するため、鋼管下縁に引張応力が発生し、主塔が低くなるにつれて引張応力度は増加する。主塔部においては、圧縮軸力と負の曲げモーメントが作用し、鋼管下縁には大きな圧縮応力が発生し、主塔が低くなるほど圧縮応力が増加する。側径間部には正および負の曲げモーメントが発生するが、負の曲げモーメントがクリティカルになり、鋼管下縁が圧縮で、鋼管上縁が引張であり、これらも主塔が低いほど増加する。

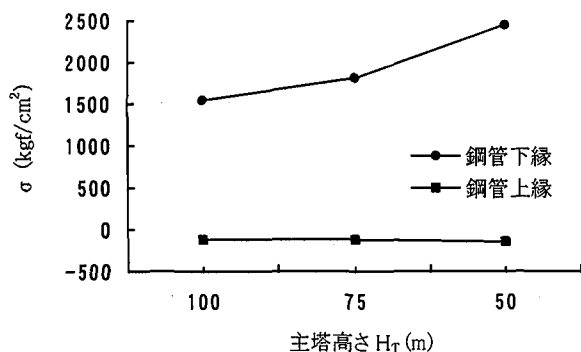


図-8 主径間中央の鋼管応力

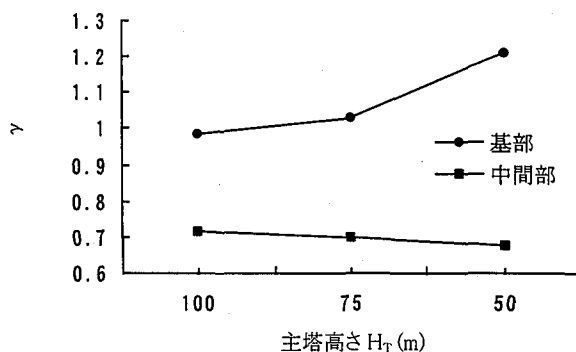


図-12 主塔の応力照査値

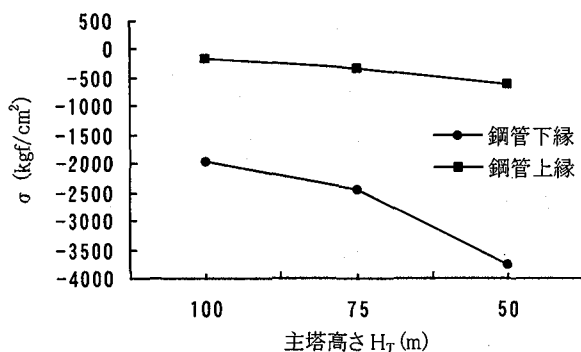


図-9 主塔部の鋼管応力

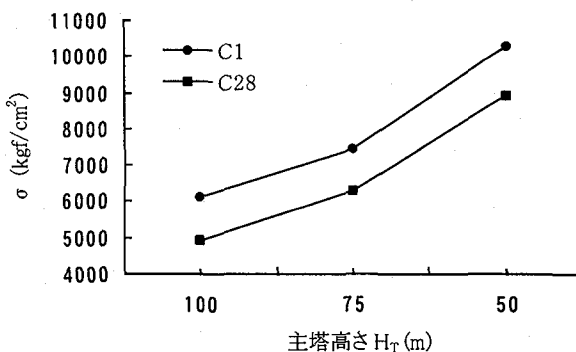


図-13 ケーブルの応力

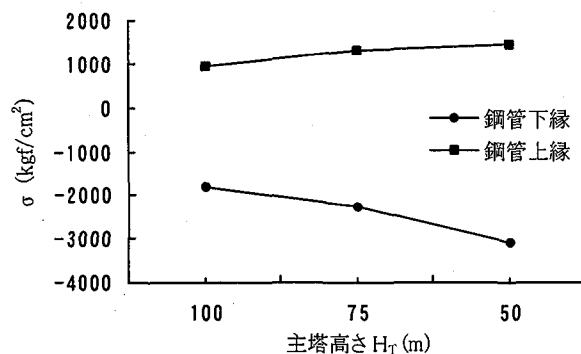


図-10 側径間の鋼管応力 (負曲げ)

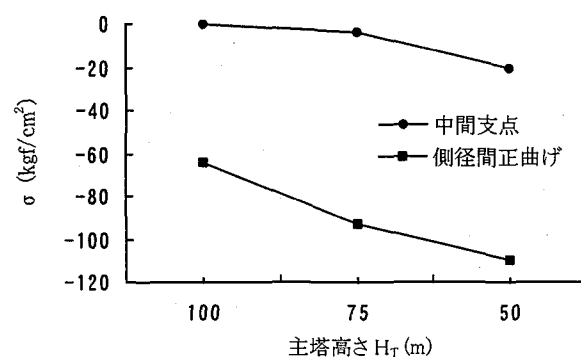


図-11 床版応力

コンクリート床版に関しては、側径間部における正曲げモーメントで大きな圧縮応力が発生し、これも主塔が低いほど増加する (図-11)。

主塔には、圧縮軸力と曲げモーメントが作用するが、軸圧縮応力と曲げ応力のそれぞれの許容応力に対する比の和を応力照査値  $\gamma$  とし図-12 に示した。なお、許容軸圧縮応力を算出するための有効座屈長は  $0.7(H_T+30)$  とした。曲げモーメントは主塔基部において最大になり、応力照査は最も厳しくなる。この応力照査値も主塔が低いほど増加する。

ケーブルは、引張強度  $160\text{kgf/mm}^2$  の亜鉛メッキ鋼線を平行に束ねたプレファブ平行線ケーブルを想定した (許容引張応力:  $64\text{kgf/mm}^2$ )。アンカーケーブルとセンターケーブルの発生応力を図-13 に示すが、これも主塔が低いほど増大する。なお、3 ケースを相对比较するため、すべての主塔高さに対し同一のケーブル断面積を用いている。したがって、 $H_T=75, 50\text{m}$  では許容応力を越えており、実際にはケーブル断面積を増やす必要がある。

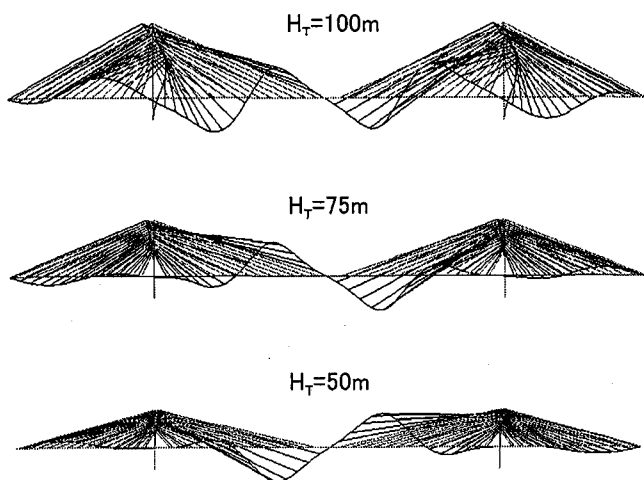


図-14 座屈モード

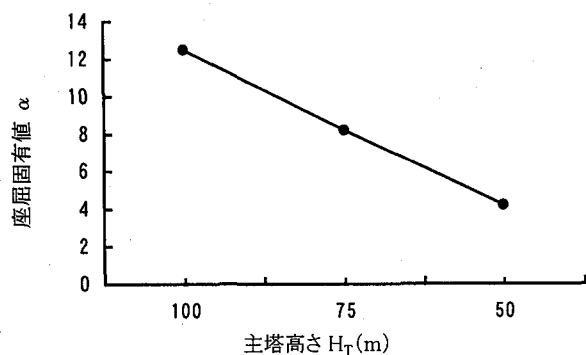


図-15 座屈固有値

#### 4. 全体座屈の検討

鋼管主桁の座屈耐力を検討するため、線形座屈解析を実施した。死荷重および活荷重を全載荷した状態を対象とした。3種類の主塔高さの座屈モードを図-14に示すが、中央径間の鋼管桁のモードはほぼ同一の形状を示している。次式で定義される座屈固有値  $\alpha$  を図-15に示す。

$$P_u = \alpha (D + PS + L) \quad (1)$$

ここで、 $P_u$ ：全体座屈荷重、 $D$ ：死荷重、 $PS$ ：プレストレス、 $L$ ：活荷重である。座屈固有値は、主塔高さが100mでは12.5と非常に大きいですが、主塔が低くなるほど座屈固有値は下がり、主塔高さ50mでは4.2となる。しかし、これは安全な値とみなすことができ、主塔高さ50mの場合でも安全な座屈耐力を有すると考えられる。ただし、詳細な座屈耐力の照査には弾塑性有限変位解析が必要となるが、これは今後の課題とした。

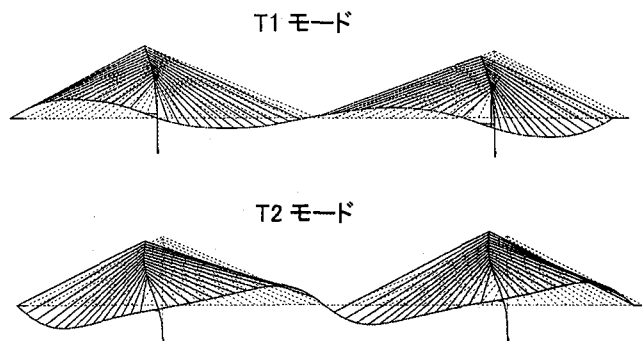


図-16 固有振動モード

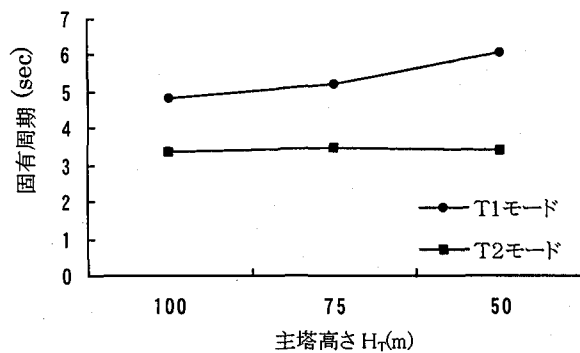


図-17 固有周期

#### 5. 耐震検討

主塔の設計には、耐震検討が不可欠である。本章では、震度法レベルの地震力に対して応答スペクトル法により検討する。

##### 5.1 固有振動解析

耐震解析モデルは多質点系モデルとし、鋼管桁と主塔をはり要素、ケーブルをトラス要素とした。基礎はコンクリートケーソン（直径40m、高さ20m）とし、I種地盤上の直接基礎を想定した。ケーソン下端には、道路橋示方書に規定される鉛直・水平・回転地盤バネをモデル化した。鋼管桁の支持条件は、鉛直方向には主塔部および端支点で支持し、水平方向には端支点をバネで支持した（バネ定数1500tf/m）。

主塔の曲げモーメントに影響する代表的な2つの固有振動モード(T1, T2)を図-16に示す。T1モードでは主塔上部のみが変形しており、T2モードでは主塔上部と下部で変形が見られる。

主塔高さと2つの振動モードに対応する固有周期の関係を図-17に示す。周期の長いT1モードは主塔高さが低くなるほど固有周期は長くなるが、T2モードはあまり変化しない。

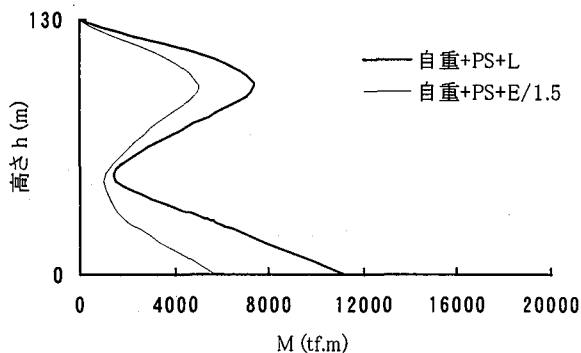


図-18 主塔の曲げモーメント ( $H_T=100\text{m}$ )

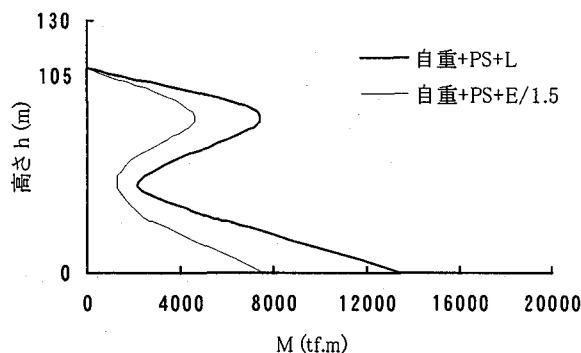


図-19 主塔の曲げモーメント ( $H_T=75\text{m}$ )

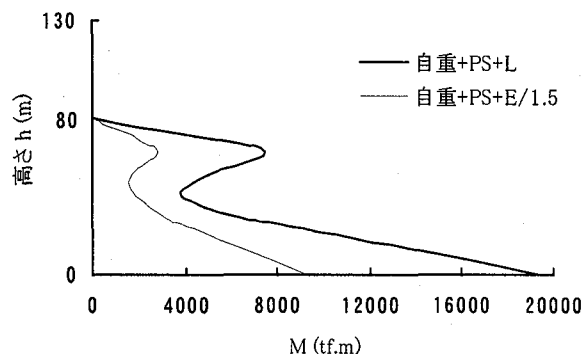


図-20 主塔の曲げモーメント ( $H_T=50\text{m}$ )

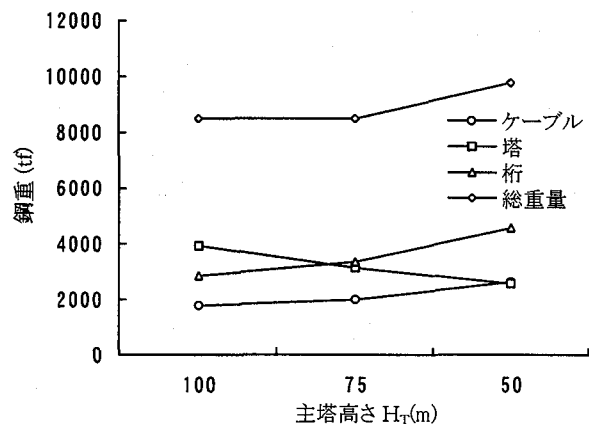


図-21 鋼重比較

## 5.2 応答スペクトル法による解析

震度法レベルの地震力に対し、応答スペクトル法により主塔に発生する曲げモーメントを算出した。設計応答スペクトルは道路橋示方書耐震編に示されるⅠ種地盤用のものを用いた。地域別補正係数は1.0とし、減衰定数  $h$  は0.05とした。なお、主塔には初期軸力を導入し、変形時に生ずる偏心モーメントすなわち  $P-\delta$  効果も考慮した。

3種類の主塔高さに対し、応答スペクトル解析で得られた20のモード結果を用い、RMS法で求めた主塔の曲げモーメントを図-18, 19, 20に示す。同図には、常時荷重による曲げモーメントも示したが、これと比較するため地震力による曲げモーメントは1.5で除した。

地震時曲げモーメントは基部とケーブル定着部にピークがある。これは、図-16に示したT1とT2の2つのモードが卓越しているからである。これらの地震時曲げモーメントは、常時荷重による傾向と一致しているが、基部での値が中間部より大きく、いずれのケースも常時荷重による曲げモーメントの値の方が大きいことがわかる。

以上より、震度法レベルの地震力に対しては、本検討で用いた規模の鋼管斜張橋では常時荷重が卓越すると言える。なお、大地震時についても検討する必要があるが、これに関しては今後の課題とした。

## 6. 最適主塔高さの検討

3種類の主塔高さに対して概略の鋼重を算出した(図-21)。まず、主塔高さ100mについて総鋼重を算出し、主塔高さ75mと50mに対しては、得られた応力を主塔高さ100mと比較し、その割合から必要鋼重を簡易的に推定した。鋼管主桁およびケーブルは主塔が低いほど断面力が増加し、必要鋼重は増加する。一方、主塔に関しては主塔が低くなるほど断面力は増加するものの、主塔が低くなるため鋼重は減少する。これらを合計した全体鋼重は、主塔高さが100mと75mでほぼ同一となり、主塔高さ50mではこれより大きくなる。

以上より、主塔が低くなるほど主桁・主塔・ケーブルとも応力は増大し、座屈固有値も低下する。しかし、従来の主塔 ( $H_T=100\text{m}$ ) より低い主塔 ( $H_T=75\text{m}$ ) でも安全性は確保でき、全体鋼重も同等程度となる。したがって、景観などの理由により低い主塔が望まれる場合には、本形式は有効であるといえる。

## 7. まとめ

鋼管を主桁とする新形式の合成斜張橋を対象とし、主塔高さをパラメーターにした構造検討を実施した。

通常の鋼斜張橋においては、座屈耐力を確保するため比較的主塔を高くして主桁に発生する圧縮軸力を低減している。しかし、本形式ではコンクリート床版も圧縮軸力を分担し、さらに合成桁であるため剛性も高く、通常の鋼斜張橋より高い座屈耐力が期待できると考えられ、主塔を低くできる可能性がある。本研究では、3種類の主塔高さに対し試設計を実施し、最適な主塔高さに関し考察した。

その結果、主塔が低くなるほど、主桁・主塔・ケーブルに発生する断面力およびそれに伴う応力は増加する。また、主塔が低くなるほど座屈固有値も低下するが、従来の主塔 ( $H_T=100\text{m}$ ) より低い主塔 ( $H_T=50\text{m}$ ) でも座屈安全性は確保できる。

一方、震度法レベルの地震力によって生じる主塔の曲げモーメントは、対象とした斜張橋では常時荷重に対してクリティカルにはならなかった。

3種類の主塔高さについて全体鋼重を算定したが、従来の主塔 ( $H_T=100\text{m}$ ) および低い主塔 ( $H_T=75\text{m}$ ) の全体鋼重は同等程度となり、景観などの理由により低い主塔が望まれる場合には、本形式は有効であると考えられる。

本検討により、鋼管斜張橋は構造的に成立し、さらに通常の鋼斜張橋に比較して、主塔を低くできる可能性を見出した。今後は、本形式の実現性をより高めるため、床版および床組に関する詳細構造、コンクリート床版のクリープ・乾燥収縮の影響、ケーブル定着部の詳細構造、床版の有効幅などについて検討する予定である。

本研究は、平成12年度科学研究費補助金・基盤研究Cとして研究補助を受けて行ったものである。

## 参考文献

- 1) Nakamura: Design strategy to make steel bridges more economical, Journal of Constructional Steel Research, Vol.46, No.1, paper number 48, 1998.
- 2) Nakamura: New structural forms for steel/concrete composite bridges, Structural Engineering International, Journal of IABSE, Vol.10, No.1, 45-50, 2000.
- 3) 中村: コンクリート充填鋼製主桁を用いた複合橋梁の提案, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.237-242, 1999.
- 4) 中村, 沖本, 富永, 竹田, 日紫喜: 鋼管を主桁とする長大合成斜張橋の構造特性, 鋼構造論文集, 第5巻17号, pp.1-11, 1998.
- 5) 松本, 八木, 石崎, 白土, 陳: 長大斜張橋エッジガーダー断面の耐風安定性に関する研究, 第15回風工学シンポジウム, pp.389-394, 1998.
- 6) 保坂, 西海, 中村: 圧縮強度およびヤング係数の異なるコンクリート系材料を充填した鋼管の曲げ性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1565-1573, 1998.
- 7) 保坂, 杉本: 鉄道における最近の鋼・コンクリート複合橋梁, 橋梁と基礎, Vol.34, No.7, pp.31-40, 2000.
- 8) 保坂, 中村, 西海: 鋼管桁の曲げ耐力およびRC床版とのずれ止めに関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1301-1312, 1997.

(2000年9月14日受付)