

鋼管桁を用いた斜張橋の構造と景観検討

田中寛泰^{*1}・中村俊一^{*2}・辻 健吾^{*3}

Structural and Aesthetic Studies on Cable-Supported Bridges Using Steel Pipe Girders

by

Hiroyasu TANAKA, Shun-ichi NAKAMURA and Kengo TSUJI

(Received on March 31, 2007 & accepted on May 24, 2007)

Abstract

Two new types of cable-supported bridges using steel pipe girders and steel orthotropic decks are proposed: two-pipe-girder bridges with two cable planes and three-pipe-girder bridge with one cable plane. Each cable-supported bridge with a main span of 500m was designed and verified to be feasible. Wind-tunnel tests were then conducted for these bridges. Torsional flutter occurred at a nondimensional wind speed of about 4.5 for the two-pipe-girder bridge. However, the three-pipe-girder bridge showed superb aerodynamic properties. The aesthetics of these new bridges were studied using computer graphics and models, which show that the proposed bridges are not only structurally sound but also attractive, impressive and harmonious with their surrounding environments.

Keywords: cable-supported bridge, pipe girder, computer graphics, aesthetics

1. はじめに

建設コストの削減および合理的な構造を目的とした鋼管2主桁とコンクリート床版を合成させた斜張橋が提案されており¹⁾, その耐風性に関しても研究がなされている²⁾. 本論文では, この形式を発展させた2種類の鋼管桁を用いた斜張橋を提案し^{3),4)}, それらの静的な構造特性および景観特性を検討する.

提案する吊り形式橋梁を Figs.1,2,3,4 に示す. 第一の提案形式は, 2本の鋼管主桁を幅員両端部に配置し, その間に鋼床版を設置する2面吊り形式の斜張橋である (Fig.3). コンクリート床版を鋼床版にすることにより重量が軽くなり, また床版施工期間も大幅に短縮できる. また, 鋼管桁は製鉄所で製造される鋼管を用いるため, 桁加工の工数が少なく, 橋全体の経済性も向上すると期待される. また, 鋼床版面を鋼管上面とほぼ同一にして風の抵抗を減少させ, 耐風性の向上も期待する. 第二の提案形式は, 3本の鋼管桁を用いた1面吊り形式の斜張橋である (Fig.4). 中央の鋼管桁を大口径にし, これをケーブルで吊る. この中央鋼管桁が主に曲げモーメント, 軸力, ねじりモーメントに抵抗する. 両端の鋼管桁と中央鋼管桁は横桁で連結され, 鋼床版が横桁上に設置される. 本橋は斬新な形式であり, 景観的にも優れると期待される. これら2種類の新構造は吊橋および斜張橋のいずれにも適用可能であるが, 本論文では2鋼管2面吊り斜張橋および3鋼管1面吊り斜張橋を研究対象とした. 斜張橋のスパンは200+500+200mとした (Fig.1).

橋梁の景観をどのように評価するかは明確でないが, 一般的

には設計された橋梁のイラストや Computer Graphics (CG)や模型などを作成し, 学識経験者や住民代表などで構成されるグループでそれを評価する方法が用いられる. 本論文で提案した鋼管橋はこれまでにない新しい形式であるため, 構造検討のみならず景観検討が重要であると考えられるため, Computer Graphics を用いて種々の角度から景観評価を試みた. すなわち, 橋梁本体を三次元モデル化し, 想定架橋地点にて撮影した風景写真との合成写真を作成する. さらに, 周辺地形も三次元モデル化し, 橋梁本体をそれに配置し, 視点を動かした動画を作成する. また, CG による照明効果の確認や模型製作による構造の確認も実施した. これらを総合して提案橋梁の景観特性を把握した.

2. 鋼管斜張橋の構造概要

2.1 構造概要

提案する斜張橋は, 2鋼管桁2面吊形式 (Fig.3) と3鋼管桁1面吊形式 (Fig.4) の2種類である. どちらも中央径間長 500m, 側径間長 200m, 橋長 900mを想定した (Fig.1). 主塔は2面吊りと1面吊りで上部の主塔形状を変化させ, 両者とも主塔高さは150mである (Fig.2).

2鋼管2面吊り桁断面を Fig.3 に示す. 両端の主桁は, 直径 2400mm, 板厚 25mm, 材質 SM490Y の鋼管とした. 幅員は片側3車線ずつ, 合計6車線を想定し, ケーブル間距離は30mとした. ケーブルは直接鋼管桁に定着するが, 定着用の鋼管を設け, これが主桁鋼管を貫通する方式を想定している. 横桁は腹板高

*1 川田工業(株) 設計部
*2 工学部 土木工学科 教授
*3 三菱重工橋梁エンジニアリング(株) 橋梁建設部

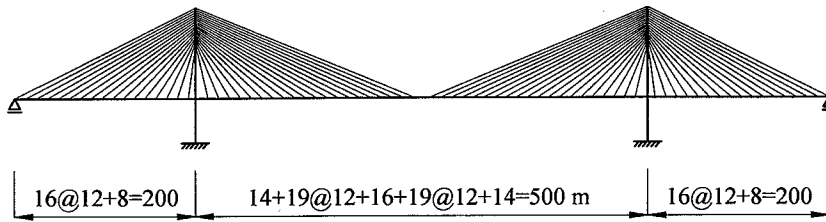
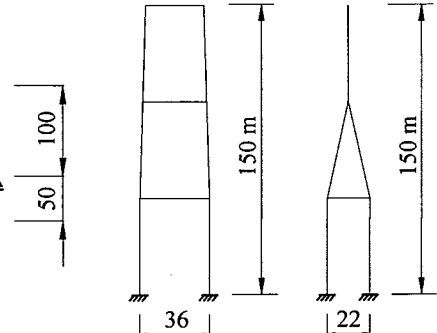


Fig.1 一般図



a) 2面吊り b) 1面吊り

Fig.2 主塔形状

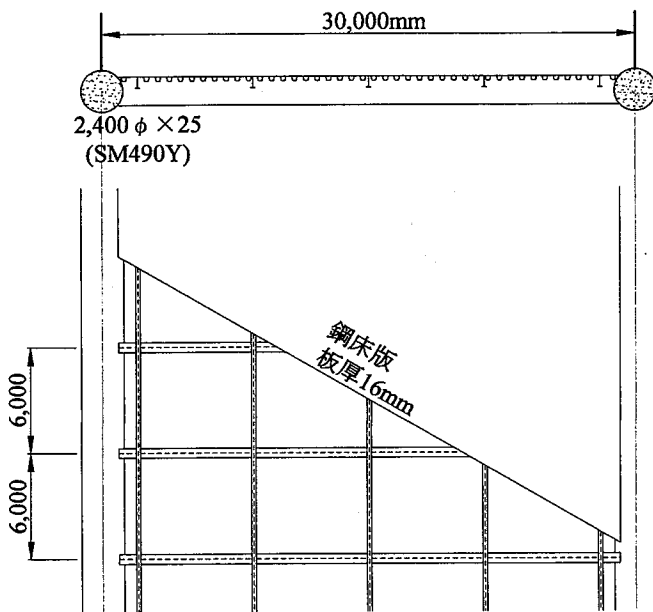


Fig.3 2鋼管桁断面図

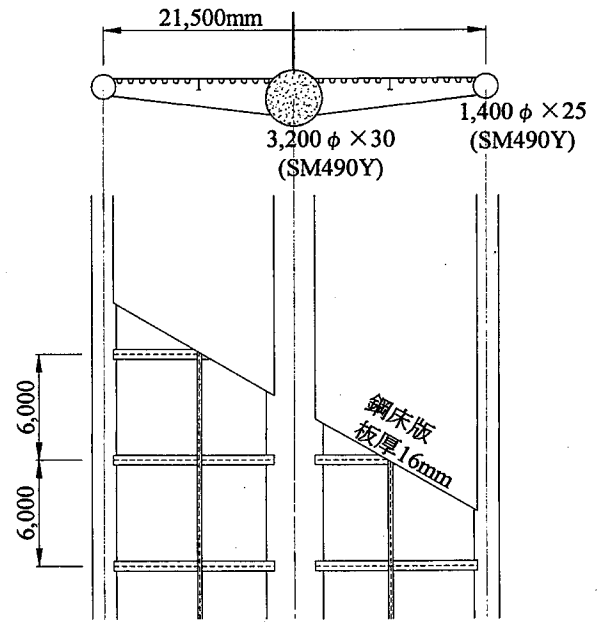


Fig.4 3鋼管桁断面図

1600mmの鋼I桁とし、6m間隔で主桁間を連結する。さらに、縦桁、Uリブ、デッキプレート(16mm厚)を配置し、これらで床組を構成している。

3鋼管桁1面吊り桁断面をFig.4に示す。中央に直径3200mm、板厚30mmの鋼管を配置し、両端には直径1400mm、板厚25mmの鋼管を配置した。材質はSM490Yとした。幅員は片側2車線ずつ、合計4車線を想定し、全幅員は21.5mとした。床組構造は、2鋼管桁橋と同様である。

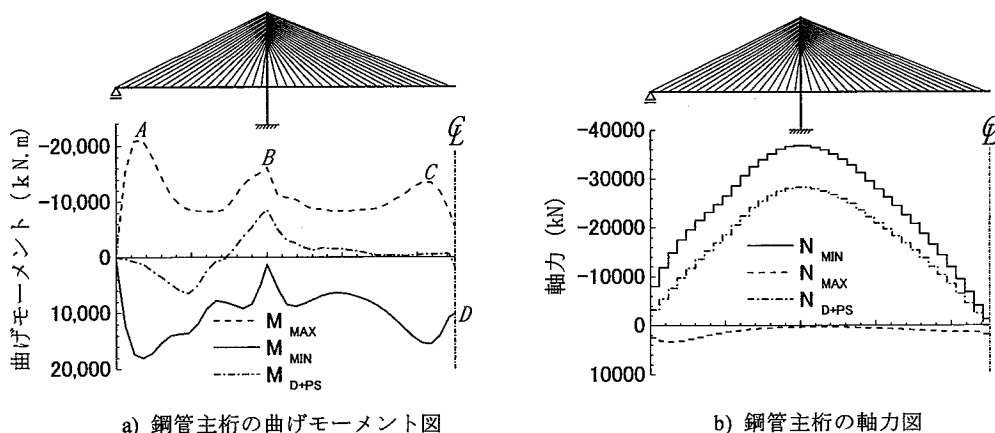
死荷重載荷状態で桁の曲げモーメント分布を平滑化させ、かつ主塔に過大な曲げモーメントを発生させないようにケーブル・プレストレスを導入した。活荷重については車線荷重とし、8.0kN/m/laneとした。さらに、端支点に負反力が発生せず、かつ主塔の曲げモーメントを小さくなるよう、側径間の鋼管内にコンクリートを充填した。なお、鋼管内にコンクリート系材料を全充填すれば曲げ耐力が向上することは過去の研究により実証されている⁹⁾。

2.2 静的構造解析

2鋼管2面吊り斜張橋の主桁発生断面力をFig.5に示す。本図においてD+PSは死荷重およびケーブル・プレストレスを示す。

鋼管主桁の曲げモーメントは側径間端部で最大であり、圧縮軸力は主塔部で最大である。主要な4カ所(A, B, C, D点)での鋼管主桁の応力度照査をTable 1に示すが、すべて許容範囲内である。なお、線形座屈解析によれば主桁の有効座屈長は約40mであり、これを用いて許容圧縮軸応力度を算出した。また、側径間および主塔付近の主桁断面照査には鋼管内充填コンクリートを考慮している。すなわち、圧縮領域におけるコンクリートを断面計算に入れている^{1),9)}。

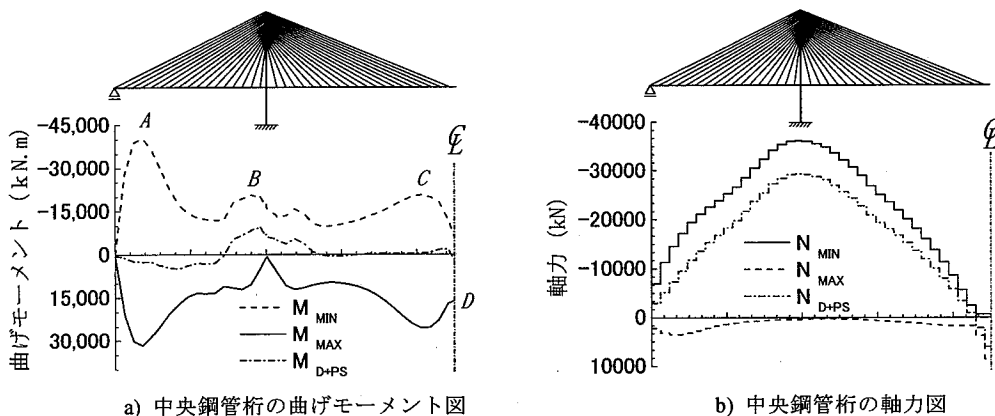
3鋼管1面吊り斜張橋の主桁発生断面力をFig.6に示す。中央鋼管主桁の曲げモーメントは側径間端部で最大であり、圧縮軸力は主塔部で最大である。主要な4カ所(A, B, C, D点)での鋼管主桁の応力度照査をTable 2に示すが、すべて許容範囲内である。なお、線形座屈解析によれば主桁の有効座屈長は約56mであり、これを用いて許容圧縮軸応力度を算出した。また、2鋼管桁と同様、側径間および主塔付近の主桁断面照査には鋼管内充填コンクリートを考慮している。なお、活荷重が偏載した場合には主桁は幅員方向に傾斜する。過度の傾斜は車輛の走行安全上問題であるが、本斜張橋の最大傾斜角は約2°と小さく問題なかった。



a) 鋼管主桁の曲げモーメント図

b) 鋼管主桁の軸力図

Fig.5 2 鋼管桁モデルの断面力図



a) 中央鋼管桁の曲げモーメント図

b) 中央鋼管桁の軸力図

Fig.6 3 鋼管桁モデルの断面力図

Table 1 2 鋼管斜張橋の応力照査

着目断面	曲げモーメント	軸力	σ_{MSU}	σ_{MSL}	σ_N	許容応力 (N/mm ²)		K1	K2
	M (kN·m)	N (kN)	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	σ_{Ma}	σ_{Na}		
側径間 A 点	-20,917	-7,078	67	-66	-7	210	138	0.267	0.367
主塔付近 B 点	-16,107	-35,234	50	-56	-38	210	138	0.038	0.545
中央径間 C 点	-13,417	-8,320	61	-136	-21	210	138	0.142	0.799
中央径間 D 点	10,151	-523	-36	79	-1	210	138	0.180	0.369

σ_{Ma} : 許容曲げ応力度, σ_{Na} : 許容圧縮応力度, σ_{MSU} : 鋼管上縁の曲げ応力度, σ_{MSL} : 鋼管下縁の応力度, σ_N : 軸応力度, $K1 = \sigma_{MSU} / \sigma_{Ma} + \sigma_N / \sigma_{Na}$, $K2 = \sigma_{MSL} / \sigma_{Ma} + \sigma_N / \sigma_{Na}$

Table 2 3 鋼管斜張橋の応力照査

着目断面	曲げモーメント	軸力	σ_{MSU}	σ_{MSL}	σ_N	許容応力 (N/mm ²)		K1	K2
	M (kN·m)	N (kN)	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	σ_{Ma}	σ_{Na}		
側径間 A 点	-40,573	-7,684	77	-60	-5	210	131	0.328	0.322
主塔付近 B 点	-20,615	-34,606	28	-28	-23	210	131	0.038	0.309
中央径間 C 点	-20,512	-8,002	55	-89	-18	210	131	0.124	0.562
中央径間 D 点	16,276	-6,804	-21	40	-4	210	131	0.135	0.156

σ_{Ma} : 許容曲げ応力度, σ_{Na} : 許容圧縮応力度, σ_{MSU} : 鋼管上縁の曲げ応力度, σ_{MSL} : 鋼管下縁の応力度, σ_N : 軸応力度, $K1 = \sigma_{MSU} / \sigma_{Ma} + \sigma_N / \sigma_{Na}$, $K2 = \sigma_{MSL} / \sigma_{Ma} + \sigma_N / \sigma_{Na}$

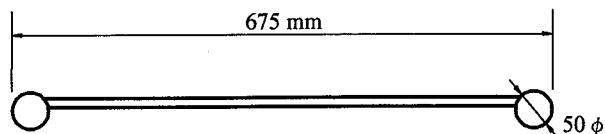


Fig.7 2鋼管桁風洞実験用模型

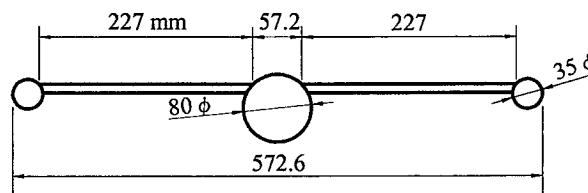


Fig.8 3鋼管桁風洞実験用模型

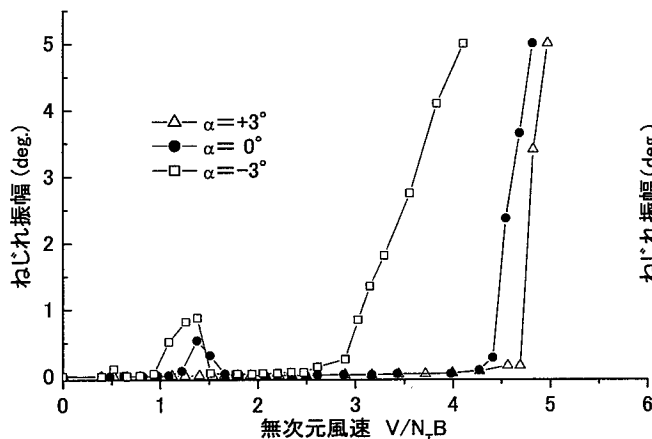


Fig.9 2鋼管桁パネ支持試験結果

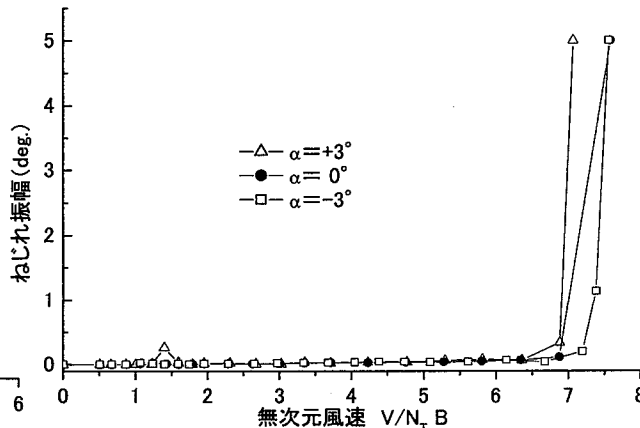


Fig.10 3鋼管桁パネ支持試験結果

Table 3 フラッター発現風速

迎角	無次元風速		実橋風速 (m/s)	
	2鋼管桁	3鋼管桁	2鋼管桁	3鋼管桁
+3°	4.72	6.92	82.7	116.5
0°	4.45	7.49	78.0	126.1
-3°	3.06	7.36	53.6	123.9

2.3 耐風安定性

本形式の基本的耐風特性の把握および優れた改良断面を開発するため、二次元剛体部分模型を用いたパネ支持試験を実施した。2鋼管桁基本断面のパネ支持試験の2次元剛体部分模型は縮尺1/48で製作した(Fig.7)。実験風の迎角は0°, +3°, -3°とした。使用した風洞施設は、三井造船(株)昭島研究所所有の水平回流閉鎖型(ゲッチングン型)構造物用低速風洞(測定部高さ3.0m, 幅2.0m, 長さ20.0m)である。試験は、本州四国連絡橋公団の風洞実験要領⁷⁾に従った。パネ支持試験結果をFig.9に示す。迎角0°および+3°のケースでは、無次元風速(V/N_TB)が4.5付近でねじれフラッターが発生した。ここで、V:風速、N_T:ねじれ振動数、B:全幅員である。ただし、迎角-3°ではねじれフラッターが無次元風速3程度で発生し、また迎角-3°と0°の低風速域で1°以下の渦励振の発現が確認された。実橋のねじれフラッター発現風速のまとめをTable 3に示す。本斜張橋においては、負迎角を除いて実橋風速約80 m/sと高風速が確保されている。なお、センターバリアーを床版下面に設置すれば、基本断面と比較して約70%も発現風速を上昇させることを確かめており、負迎角に対しても実橋風速約80 m/sを満足できる。

3鋼管桁基本断面のパネ支持試験用の2次元剛体模型は縮尺1/40で製作した(Fig.8)。パネ支持試験結果をFig.10に示すが、無次元風速7程度で、ねじれフラッターが発生した。3鋼管桁基本断面の迎角依存性は小さく、しかも低風速域での渦励振の発生も殆どみられず、空力的に良好な断面である。ただし、ねじれフラッター発現実橋風速は、斜張橋では100m/s以上である

(Table 3)。

3. 鋼管斜張橋の景観設計

現在、橋梁の設計に際し景観設計をどのように評価するかの基準が明確でなく、設計した橋梁の景観性が優れているかどうかの判断根拠は不明確である。これは、橋梁景観の評価は個人により異なり、客観的な判断が困難であることが大きな要因である。また、架橋地点の周辺環境(地理的特性、制約条件)が多様多様であり、統一的な評価手法が困難である。

一般的には、設計された橋梁のイラストやComputer Graphics(CG)や模型などを作成し、学識経験者や住民代表などで構成されるグループでそれを評価する方法が採られる。本論文で提案した鋼管橋はこれまでにない新しい形式であるため、構造検討のみならず景観検討が重要であると考えられる。そこで、Computer Graphicsを用いて種々の角度から景観評価を試みた。すなわち、橋梁本体を三次元モデル化し、想定架橋地点にて撮影した風景との合成写真を作成する。さらに、周辺地形も三次元モデル化し、橋梁本体をそれに配置し、視点を動かした動画を作成する。また、CGによる照明効果の確認や模型製作による構造の確認も実施した。

3.1 Computer Graphics

使用したソフトは、2次元汎用CADであるAutoCAD LT 2000

および3D-CGソフトウェアのAutodesk VIZ 4である。まず、試設計で決定した構造諸元をもとに、CADにて2次元図面データを作成する。そして、その2次元で表される図形に厚みを付けソリッド化する。しかし、CADはあくまでも2次元製図ソフトなので、景観検討を行うには限界がある。

次に、CGソフトウェアを用い、CADで作成したデータを読み込む。CGソフトウェアでは、3次元モデルは距離とともに縮小され、奥行きと空間を表す人間の視覚に近い表示ができる。さらに、鋼やコンクリートなどの材質を視覚的に表現ができ、3次元モデルに質感を持たせることができる。また、想定架橋地点の風景写真と合成することにより、現実感のある合成静止画像を作成できる。また、映画のフィルムのような動画をPC上で作成できる。景観設計においては、実橋梁と周辺環境との調和が重要であり、CGによるシミュレーションは有効である。

3.2 想定架設地点の景観特性

想定した架橋地点は神奈川県内にある芦ノ湖である(Figs.11,12)。ただし、実際に架橋する計画は無く、また、湖の両側を結ぶルートについても明確な根拠はない。あくまでも提案形式の橋梁を架橋する規模として適したため、景観設計用を選択した。

芦ノ湖は、山間部に位置する湖である。山間部の景観特性は、地形が曲線により構成され、谷の開放性があり、樹木が多く季節によって色彩の変化があることである。また、湖は水面と空と山から構成され、山が低いと見通しがよく開放感があるが、山が高くなると重圧感が生じる。芦ノ湖周辺の風景に対し、本橋梁は自然景観の一部となるような役割を重視した。

3.3 鋼管主桁の景観特性

主桁に鋼管を用いることが、本橋梁の最大の特徴である。橋梁本体の3次元モデルをFigs.14, 15に示す。3鋼管形式では、主に中央の鋼管が曲げおよびねじれ剛性に寄与するため、その鋼管径は大きい。主桁に箱桁を用いている鶴見つばさ橋は、閉じた箱桁断面(Fig.13)であるため、桁底部を眺め上げたとき、視距離が近づくにつれ、ずっしりと重い印象を受ける。しかし、本橋梁形式(Figs.16, 17)は、鋼管の曲線による影響および補剛桁内部構造を露出することで、その重圧感が緩和される。また、横桁の配置が一定のリズム感を創り、軽快な印象を与える。

3.4 主塔の景観特性

2面吊形式の主塔の形状は門形式とした(Fig.14)。1面吊形式においては、主塔を1本柱形式とすると桁幅が大きくなるため、A形形式を採用した(Fig.15)。また、主塔頂部のケーブル定着部にはスリットを設けた。陰影を付けることにより、のっぺりとした印象は薄れると考えられる。

3.5 ケーブルの景観特性

ケーブルは、 $\phi 7\text{mm}$ の亜鉛めっき鋼線を平行に束ねた平行ワイヤストランドを想定した。側径間側には17本配置し、主塔には2.5m間隔、主桁には12.0m間隔で定着した。また、中央径間側には20本配置し、主塔には2.1m間隔、主桁には12.0m間隔で定着した。マルチケーブル形式としたため、ケーブル1本あたり断面を小さくでき、風が吹き抜けるような軽快な印象を与える。1面吊形式は、ケーブル面が中央にしかないため車

両通行時に開放感を与える。一方、2面吊形式においては、2面のケーブルが入り組んで見えるため景観上やや劣ると考えられる。

3.6 色相

物を確認するとき、色がついているからその形がわかり、光沢や濃淡からその材質を判断できる。色のもつ効果は人間に多大な影響を与えるため、橋梁用の色相の選定は重要である。本橋梁では、周囲の環境に溶け込む景観特性を目標としたため、空や水面をイメージする白っぽい色相を用いた(Figs.16, 17)。あらかじめ撮影した風景写真に設計した橋梁をはめ込み、合成写真とし、この色相の妥当性を確認した。

3.7 視点場の影響

橋梁とその周辺環境をひとつの風景として捉えたときの印象は、見る側の位置(視点場)により異なる。地図データより周辺地形を3次元モデル化し、橋梁本体をそれに配置し、視点を海や陸や山上に移動させた動画を作成した。この動画により、遠景、中景、近景からの視点を一連の流れのなかで表現でき、橋梁本体の視覚的印象が明確になる。遠景では周辺環境に対してのスケールや見え方のバランス、中景では橋梁自体のプローション、近景では部材の配置や材質などが視覚に影響してくると思われる。また、運転者の視点での動画も作成した(Figs.20, 21)。これらの作成した動画は中村研究室のホームページに掲載してある⁹⁾。

3.8 ライトアップ

ライトアップにより景観性を積極的にアピールし、その土地のシンボリックな存在とすることができる。また、夜間通行の安全性を満たすためにも必要である。このライトアップによる影響をCGにより検討した(Figs.22, 23, 24, 25)。

3.9 模型の制作

景観設計のため、模型を作成した(Photos.1, 2)。縮尺は1/300で、模型の全長は3mである。模型製作は、製作・施工時における問題点を把握することができる有効な手段である。模型製作は実際の施工手順を考慮し、張り出し方法を用いた。

主塔は、基礎となる木製ブロックの上に、主塔平面形状を模した厚さ約4.5mmのベニヤ板を3枚重ねた主塔模型を配置する。主桁は、中央鋼管として直径10mm、外鋼管として4.5mmの円柱状の木材を、横桁(板厚0.5mm)で連結する。その上にデッキプレートとして、厚さ0.1mmのアルミ板を配置した。橋面部となる舗装は格子状のネットをデッキプレートに貼付け、街灯および高覧は1mmの銅線で再現した。ケーブルは、直径1.8mmの竹ひごを用いた。ケーブル定着部間隔は、側径間側では主塔部は8.3mm間隔で主桁部に40mm間隔で定着し、また中央径間側では主塔部に7mm間隔で主桁部には40mm間隔で定着した。

模型製作において、模型縮尺を1/300よりも大きくしている部材がある。たとえば、横桁の腹板厚は16mmであり、その1/300を再現すると模型での板厚は0.05mmとなる。これは、人の手によって造ることは非常に困難となるため0.5mmとした。これ以外にも、ケーブルの断面積およびデッキプレートの板厚を増大している。



Fig.11 芦ノ湖



Fig.12 想定架橋地モデル化

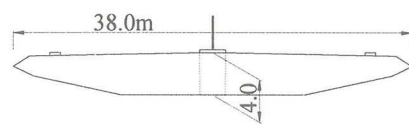


Fig.13 鶴見つばさ橋

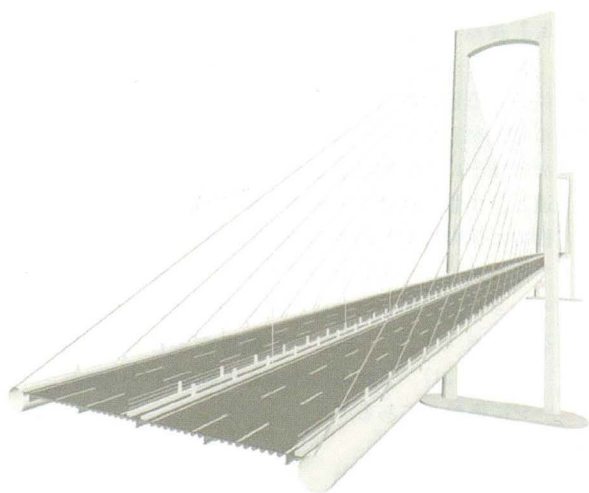


Fig.14 2 鋼管形式モデル化

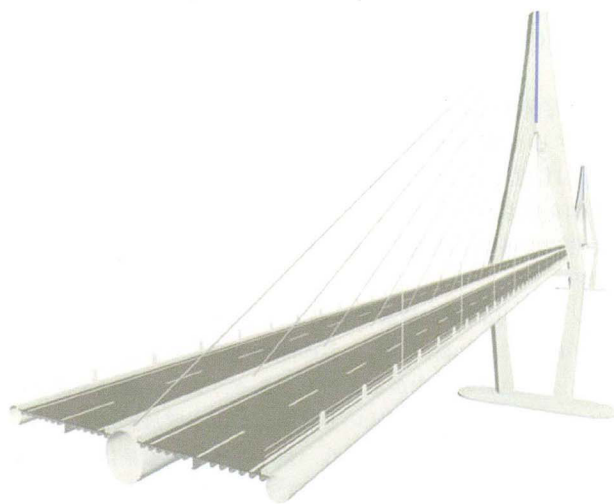


Fig.15 3 鋼管形式モデル化



Fig.16 2 鋼管形式合成写真 (Fig.11 の A 方向から見た)



Fig.17 3 鋼管形式合成写真 (Fig.11 の A 方向から見た)

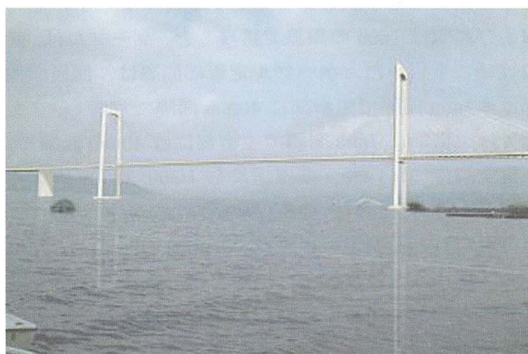


Fig.18 2 鋼管形式合成写真 (Fig.11 の B 方向から見た)



Fig.19 3 鋼管形式合成写真 (Fig.11 の B 方向から見た)



Fig.20 2 鋼管橋合成写真(近景)



Fig.21 3 鋼管橋合成写真(近景)



Fig.22 2 鋼管橋ライトアップ(全景)

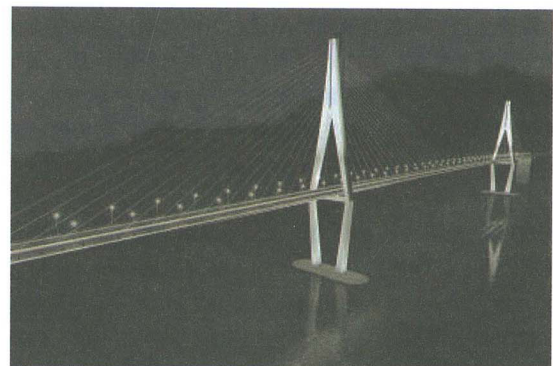


Fig.23 3 鋼管橋ライトアップ(全景)



Fig.24 2 鋼管橋ライトアップ(路上)



Fig.25 3 鋼管橋ライトアップ(路上)

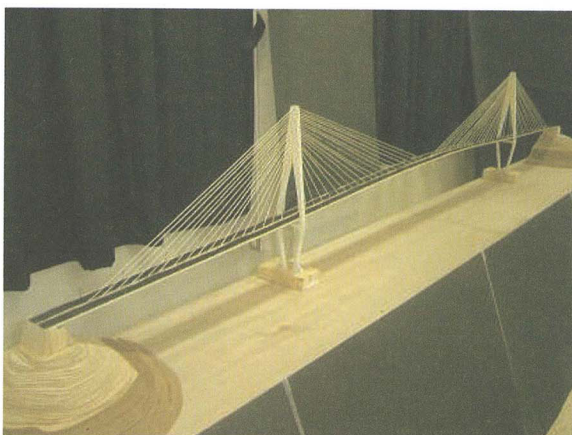


Photo.1 模型写真



Photo.2 模型写真桁下

模型制作は学生が実施した。ケーブルを張り渡していくに従って、主桁である鋼管が主塔部付近で上方向に浮き上がり、それにもないケーブルも大きくなるといふ現象が生じた。すなわち、学生達は斜張橋における主桁座屈やケーブル張力の影響を十分考慮すべきであることを理解でき、模型制作は教育上の効果もあった。

4. まとめ

本論文では2種類の新形式鋼管斜張橋を提案し、その構造特性および景観特性を研究した。得られた主な知見を以下に示す。

1) 2本の鋼管主桁を幅員両端部に配置し、その間に鋼床版を設置した2面吊り斜張橋、および3本の鋼管主桁を用いた1面吊り斜張橋を提案した。それぞれに対して、中央スパン500mの斜張橋モデルを試設計し、静的構造解析を実施し、応力的に実現可能であることを確認した。

2) 本橋の基本的耐風特性を把握するため風洞実験(パネ支持試験)を実施した。2鋼管桁に関しては、無次元風速が4.5付近でねじれフラッターが発生し、実橋換算ねじれフラッター発現風速は約80 m/sと高風速であった。3鋼管桁に関しては、無次元風速約7.0でねじれフラッターが発生し、実橋換算ねじれフラッター発現風速は約100 m/sと高風速であった。

3) CGおよび模型を用いた景観設計を実施した。鋼管主桁を用いた2種類の新形式斜張橋は、周辺環境との調和を図ることができると考えられた。

謝辞: 本研究の実施にあたり井上浩男氏(三井造船株)、羽田大作氏(三井造船株)および吉崎友二氏(セントラル・コンサルタンツ(株)パラグアイ支社、(前)東海大学大学院)に協力いただいた。ここに、謝意を表する。

参考文献

- 1) 中村俊一, 沖本真之, 富永知徳, 竹田哲夫, 日紫喜剛啓: 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, 第17号, pp.1-11, 1998.
- 2) 新原雄二, 林田宏二, 日紫喜剛啓, 富永知徳: コンクリート充填鋼管を用いた2主桁断面複合斜張橋の風応答特性と空力的制振対策, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1085-1094, 2000.
- 3) 田中寛泰, 中村俊一, 井上浩男, 羽田大作, 吉崎友二: 鋼床版を有する鋼管2主桁吊形式橋梁の提案, 第58回土木学会年次学術講演会, 2003.
- 4) 羽田大作, 井上浩男, 中村俊一, 田中寛泰, 吉崎友二: 鋼管3主桁断面新吊形式橋梁の提案, 第58回土木学会年次学術講演会, 2003.
- 5) 保坂鐵矢, 西海健二, 中村俊一: 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,

1565-1573, 1998.

- 6) 東海大学土木工学科, 中村研究室ホームページ, (<http://www.ev.u-tokai.ac.jp/nakamura/index.htm>).
- 7) 本州四国連絡橋公団: 本州四国連絡橋風洞試験要領・同解説, 2001.