

S 字橋の構造デザイン

STRUCTURAL DESIGN OF S-CURVE BRIDGES

一九義和* 石井信行** 篠原修***

Yoshikazu ICHIMARU, Nobuyuki ISHII and Osamu SINOHARA

*工修 アジア航測株式会社 道路・橋梁部 (〒160 東京都新宿区新宿4-2-18)

**東京大学助手 大学院工学系土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

***工博 東京大学教授 大学院工学系土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

The advanced computer technology has made complex structural analysis available for bridge engineers today. They seem to acquire the means of designing bridges to create any form that they want, especially in pedestrian bridges. However, it is also true that some old bridges which were designed economically and rationally during the pre-computer period are highly appraised of their aesthetical aspects. The authors consider that their beauty lies in the meaningful relationship between form and structure. A study was made on curved bridges as examples to understand meaningful relationship, so that a new design method of a bridge would be suggested to combine aesthetics and engineering. Two case studies were made to verify the suggested method, based on the structural design concept, where characteristics of a bridge's alignment was considered as the factor which governs a system of the bridge. Two different systems of S-curve bridges were designed under the same conditions of alignment.

Key Words: bridge, structural design, alignment, aesthetics

1. まえがき

世界最長、最大支間約2000mの明石海峡大橋が瀬戸内の海上で建設中である。更に海外では、支間3000mのメッシナ海峡横断橋が現実のものとして計画されている。一方、橋梁の形態に目を向けてみると、1950年以降の電子計算機の発達に伴う解析技術の飛躍的進歩によって、斜張橋をはじめ、複雑な構造系の解析が容易となり、比較的短支間の一般橋や歩道橋においては、構造用材料の性能の向上とも相俟って、造形的に自由度の高い形態を実現することが可能となった。しかしながら、橋梁が造形において大きな自由度を得た現代にあって、19世紀終盤から20世紀初頭に完成したエッフェル(1832~1923)の手によるガラビ橋や、マイヤール(1872~1940)設計のシュバントバッハ橋(1933)【写真-1】は、構造的合理性及び経済性の追求がなされながらも、形態美において現代の橋梁と同等か、それ以上に評価されている。彼らは技術的制約から構造と形を不可分であると捉えていたが、単純に数字のみを信ずる構造偏重主義であったわけではなく、巧みな造形感覚と芸術的素養を合わせ持っていた。

わが国では、数年前までの表層的な装飾デザインに替わって、構造と形の関係を直接的に表現することを試みる「構造デザイン」が注目されて来ている。欧米においては、その「構造デザイン」を実践する構造デザイナーとして、シュライヒ、カラトラバ、建築分野ではハイテ

ク建築家(意匠家)のフォスター、レンゾ・ピアノ、ロジャース、構造エンジニアのオブ・アラップ等々が知られている。彼らの作品は、解析技術、材料入手の難という制約が少ない分、形態はより多様に、発散的になってきている。その結果、形を決定するプロセスが不明瞭で、構造と形の関係に必然性を見出しにくくなっている。ここに現代の「構造デザイン」が形の発想、表現のヒントでしかなくなってしまうというジレンマを見ることができる。



写真-1 シュバントバッハ橋

2. 目的・対象

本論文では「構造物の形、形式特有の力（モーメント、軸力…）を、構造・形態において表現（視覚化、デフォルメ）する設計を行うこと」を構造コンセプトと呼び、その考えに基づいたデザイン手法を提示することを目的とする。

具体的には、近年景観デザインの分野において好んで用いられる曲線橋を対象とする。曲線橋は、その平面形状から通常の直線橋では発生しない特徴的な力（捻り、フランジの応力勾配など）を持ち、通常は直線橋の構造を基本に、曲線を導入することによって付加的に発生する応力や変形に対して補強を行うという対症療法的設計がされている。しかしながら、この曲線橋のもつ力学的特性を橋梁の形を決定（造形）する要因と捉え、構造コンセプトによる新たなデザイン手法を見いだせる十分な可能性がある。このことが曲線橋を本論文の対象とする理由である。また、曲線橋は人間の歩行特性や交通流の円滑化の観点から、今後も確実に需要が増大することが予想されることもその理由の一つとして挙げられる。

3. 論文構成

本論文は実践的設計法の提案を目的とし、次のような構成をとっている。

第一に、文献調査により曲線橋の構造的力学特性の抽出・整理を行う。そして曲線を含む平面線形を有する梁の断面力及び挙動を既存の構造力学理論によって求め、その結果を図形等によって視覚化することにより、構造的力学特性と形態との関連を導く基礎とする。

第二に、文献調査及び設計者との面接調査により、実在する曲線橋の設計における考え方を整理し、曲線橋の設計法の分析を行う。その結果を基にして、形態が構造決定の拠り所となる設計法の提案をする。

第三に、提案した設計法により試設計を行い、3次元骨組構造解析により構造を照査すると共に形態と構造特性との関係が造形的・視覚的に意図されたものとなっているかを検証する。

4. 曲線橋の特性把握

曲線橋の構造特性の視覚化、造形への応用という観点で文献調査を行い、造形に反映されると思われる事項を抽出した。

4-1 静定・不静定および安定・不安定

直線の梁は支点2つを持つ単純梁が静定であるが、立体的な構造物である曲線橋では、支点が3つの時に静定となる。直橋の構造で平面線形に曲率を導入しただけの曲線橋では支点は4カ所以上あり不静定構造となる。

曲線橋の平面配置を決めるに当たって、桁の重心位置と支点からの力の作用線の釣り合いから曲線橋を2径間連続にすることが構造的に有利になる。また、各支承線上において1点支持とした場合、直橋では橋軸直角方向の転倒を考慮する必要があるが、曲線橋では安定となる。

4-2 支持方法

(1) 単径間曲線橋

曲線橋は1径間のみの場合でも棒部材とみなした死荷重重心が両端を結んだ線の外側にあれば捻りが生ずるので、桁にはそれに対応する捻り剛性が要求される。また、支点部は死荷重および偏心活荷重による捻りモーメントに対処するため、一般には端横桁を設け、2点以上の支承で支持する【図-1】。⁴⁾

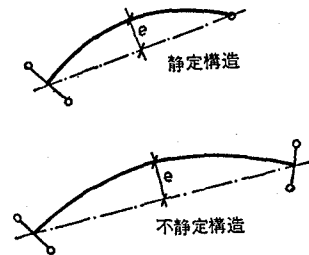


図-1 曲線橋の支持形式⁴⁾

(2) 多径間曲線橋

多径間にわたる曲線橋では捻りに対して剛である棒部材に直角に2個の水平方向固定支承を設け、他の支承はペンデル支柱による1点支持支承を設けるだけで十分である。中間支点で横桁を設けた2点支持をすると、ねじりの変位（回転角）を拘束することになるので桁自体が捻り剛性を備えていれば、回転支承によって変位を許した1点支持が経済的にも合理的であると解釈できる。また反力の面からも2点支持は負反力が生じやすく各支承の分担反力が計算通りにはなにくく、1点支持は支承の分担反力は大きくなるものの負反力が生じにくく荷重の伝達が明確である。また造形上は1点支承を採用することにより水平な桁の浮遊感を強調するデザインが可能

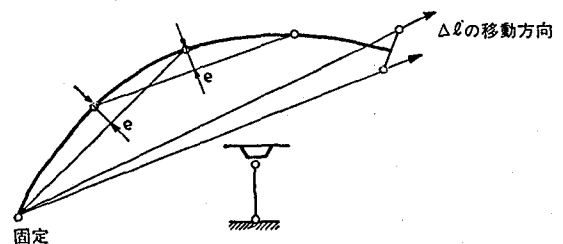


図-2 多径間曲線橋の支持方法の例⁴⁾

となり、交通計画は桁下空間の見通しが得られる（ランプ橋など線形の錯綜する立地条件では特に有効である）【図-2】。⁴⁾

4-3 R橋とS字橋

ここでは曲率半径の中心が片側にある曲線橋をR橋とし、橋長中央付近で平面的に点対称に近くなる曲線橋をS字橋とする。単純形式で比較した場合R橋は転倒に耐えられず不安定となるのに対しS字は桁重心が端部2点を結ぶ線上近傍に存在するため安定性は高い。またS字橋は2径間連続形式の場合には、R橋と比較して死荷重による中間支点上の桁に発生するトルクは小さく、もし平面的に中間支点上において点対称なS字橋ならば理想的にはトルクは0になる。

4-4 曲線T桁橋

レオンハルトは箱桁に対して低い捻り剛度を有するために一般的に曲線橋には適さないT桁について、支承線間の角度 α 【図-3】をパラメーターとした条件を提示している。それによると単純T桁橋は最大支承線間角度 $\alpha=20^\circ$ 、連続T桁橋の場合には各支間内で $\alpha=40^\circ$ 以内とされている。また、桁の捻りモーメントを減少させるために、支承位置を外側桁の軸線よりさらに外に選び、横桁をこの位置まで延長させるという構造を提示している【図-4】。ブリッジ of Rは中空断面の斜張橋形式ではあるがこの考え方を採用している。⁴⁾

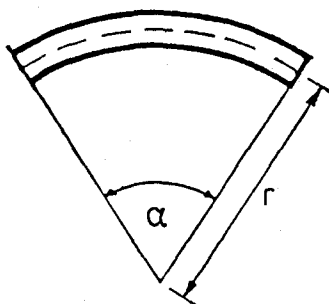


図-3 支承線間の角度⁴⁾

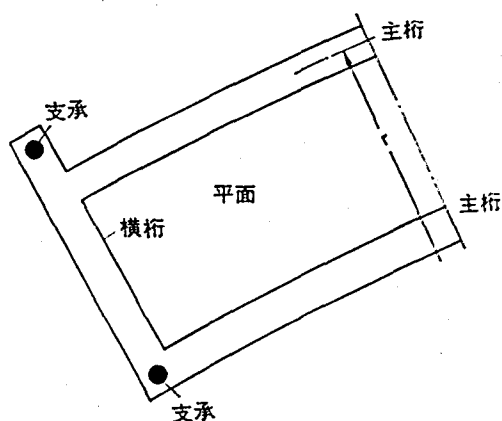


図-4 曲線桁の捻りを低減する支承配置⁴⁾

5. 曲線橋の特性を応用した造形・設計の事例

ここでは形の決定要因の探査および、その形と構造との相関を明らかにすることを主眼として文献の分析を行い、さらにその造形とその形態がもたらす視覚的及び景観的效果について考察する。

5-1 桁のねじれ

Bridge of R

①構造的・特性

橋面中央にケーブルが定着されて橋面上の動線が2分されることがないように、片面吊り形式が採用されている。片面吊りの場合、断面において桁重心と吊りケーブルの作用位置のズレからトルクが発生する。本橋は片面吊りにより発生するトルクを桁の曲線化によって生じる反対向きのトルクで相殺している。また吊り材作用点と主桁重心との位置を近づけ、張り出しを持った非対称断面を構成しトルクを減少させている【図-5】。

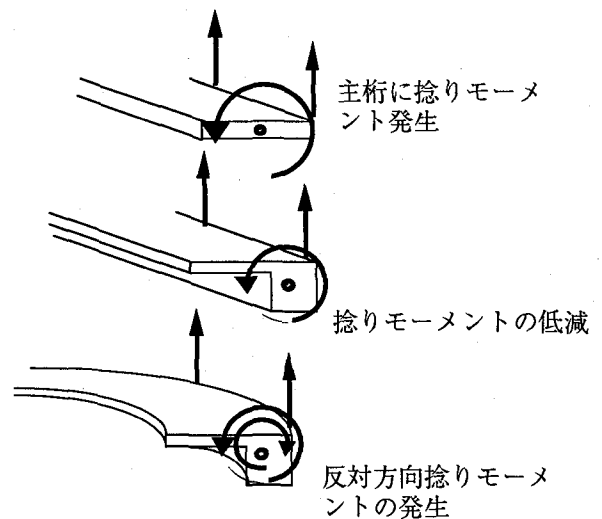


図-5 Bridge of Rの設計思想

②造形的・景観的特徴

外側で吊る曲線橋という構造コンセプトを、ケーブル定着部強調するために用いられた円筒状の金具で表徴している。このコンセプトによれば、タワーを内側ではなく外側に傾かせた方が直感的に自然であり、主塔に限れば転倒モーメントと斜材張力が相殺する方向に働くので構造的に有利になるが、設計者はなるべく鉛直に吊って桁に水平方向の曲げを生じさせないことを意図したと報告されている。造形的には傾いたタワーの下部を大胆に支える形態とすることで視覚的安定性は向上し、また現状で斜材張力に加え傾いたタワー自身の転倒モーメントが同方向に傾いているためタワー下部に相当のモーメントが働いているのに対して構造的にも安定すると考えられる【図-6・図-7】。

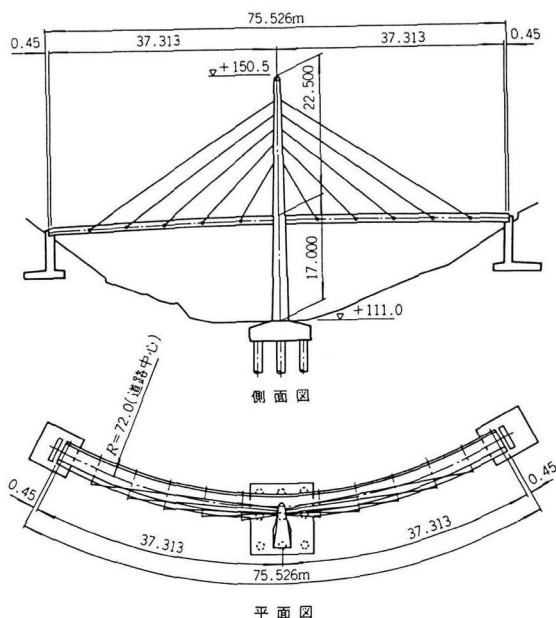


図-6 Bridge of Rの一般図¹³⁾

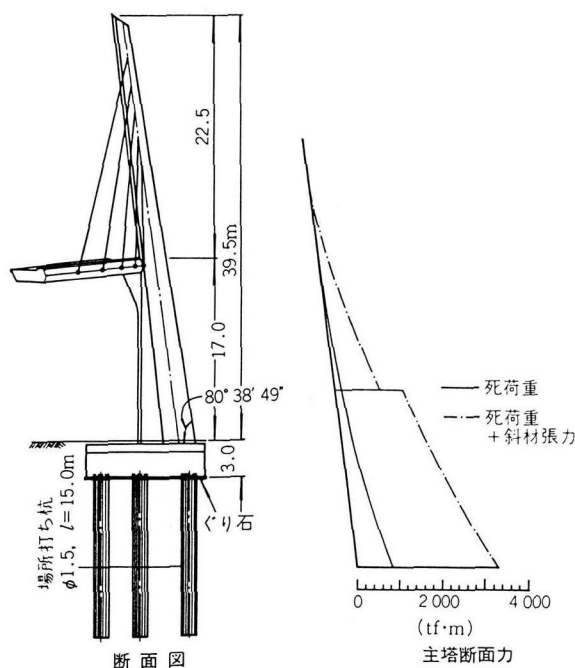


図-7 Bridge of Rのタワー¹³⁾

5-2 アーチリブの橋軸直角方向倒れ

単弦のアーチリブを傾斜させれば、それは非対称構造になりアーチリブの転倒モーメントが発生する。この転倒モーメントを曲線橋の外側への転倒と相殺する方向に働かせてやれば力学的合理性に基づいた造形が可能である。傾斜アーチを多用するデザイナーとしてカラトラバが挙げられる。彼が傾斜アーチを使用するケースは概ね2通りである。一つはGENTIL bruigeあるいはLA

DEVESA footbridge 【写真-2】のように断面構成が非対称である直橋、2つめはURIBITARTE bridgeのように曲線橋（曲率は非常に小さい）に対してである。このように単弦傾斜アーチはその構造的非対称さ故に、造形と結びついた合理的な構造が可能となり、視覚的にも安定感を得ることができる。今後は曲線橋以外に、橋軸方向への幅員変化のある橋への応用も期待できる。

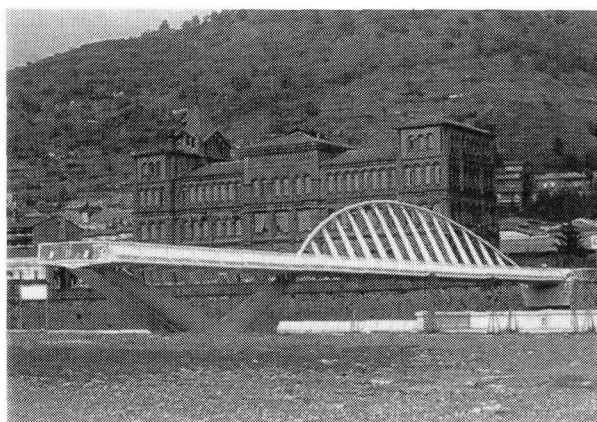


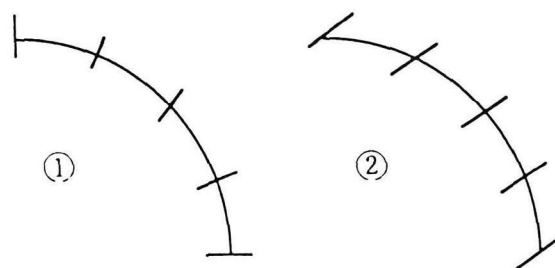
写真-2 LA DEVESA人道橋

5-3 支承（線）

小黑山13号橋

①構造的特性

2ボックスの3径間連続曲線橋である小黑山13号橋は両橋台の支承線の方を概ね弦直角方向とし橋脚を同様に弦直角方向に向け、外側の桁と内側の桁の支間を同程度としている。内外の桁の支間が変わらない点と桁の配置を工夫した結果、鋼重においても高い経済性を得ている【図-8】。



①各支承線がRの中心方向

②各支承線が平行

図-8 支承線の方

②造形的・景観的特徴

通常、曲線橋の支承線は円の中心の方を向いて設計される。この構造の場合、支承線が具現化した橋脚によって求心性を獲得する。それは橋の側面方向からの見

えとしていっそう効果的である。一方支承線が同方向を向く本橋のような構造では橋軸方向からの視点に対して連続する橋脚（垂直壁）が桁の曲線形状と方向性を暗示する。それは前述のBridge of Rおよび後述の葛飾ハープ橋が橋上の歩行体験によって刻々と変化するケーブル曲面を体験できるのに対し、桁下で曲線を感じさせる。

5-4 平面形状（曲線）

（1）横向大橋

①構造的・景観的特徴

地震時慣性力に対し水平面内で両端固定ヒンジとした曲率半径 $R=250\text{m}$ の水平面内アーチ（ライズ比1/5.5）として作用させることで主桁に働く水平力が軸力として橋台に伝達される分、各橋脚に作用する水平力は小さくなり、スレンダーなものとなる。アーチに曲線内側方向から水平力が働き、桁に軸引張がかかることが当然想定されるが、それにはPC鋼材の増加および2軸曲げ部材としての引張鉄筋を配置して対処している。また、この橋は前節でも触れた曲線橋の安定性に関する特性を活かして1点支承の橋脚を実現している【図-9】。

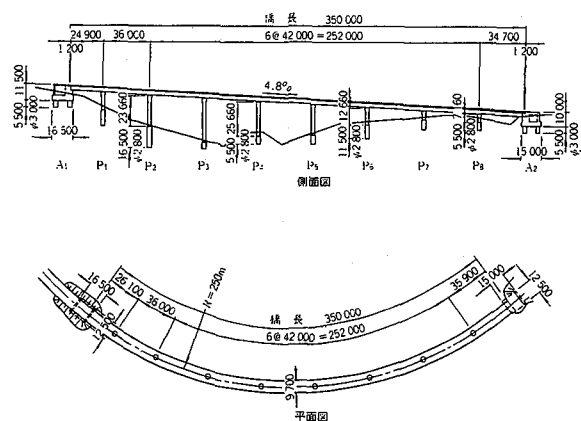


図-9 横向大橋一般図¹²⁾

②造形的・景観的特徴

構造的コンセプトの造形表現したというよりむしろ福島県磐梯朝日国立公園内の山肌保全の観点からエコデザインされた構造と捉えることができる。現況では水平な桁と鉛直に立ち上がる独立1本柱とのコントラストが美しい。脚が六角形断面であることと表面がコンクリートなため、陰翳によって垂直の線が強調される。しかし将来、木々が生き茂り橋脚がその中に埋もれる時には、その湾曲する水平な主桁だけが緑の上をまるで浮遊するような姿を呈するであろう。

（2）葛飾ハープ橋

①構造的・景観的特徴

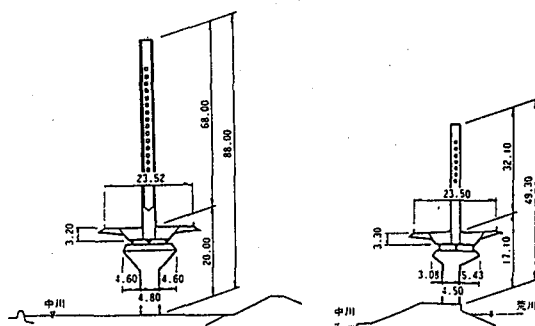
$R=334\text{m}$ の曲率半径を持つS字型曲線斜張橋である。まず補剛桁に関しては吊材が鉛直ではないため常時面外

方向に曲げモーメントが生じている。その結果主塔を中心に桁が常時回転しようとする。捻れは、多数のケーブルによって弾性支持され、鉛直方向変位がかなり拘束されているために比較的小さい。また、主塔の面外曲げを最小にするためにケーブルは点対称配置であり、さらにケーブルプレストレスの調整により死荷重状態では曲げが生じないよう設計されている【図-10】。

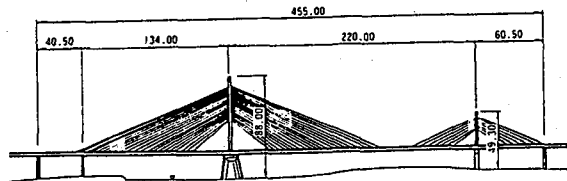
②造形的・景観的特徴

曲線部にさしかかる手前から通過し終わるまで道路線形の変化につれてファン型マルチケーブルが作り出す面への視線入射角が刻々と変化し、高速で走行する車のドライバーは歩行速度では得られないこの橋独特の風景体験をする。また、側面から川越しに臨むとき、非対称に置かれた子塔が造形的アクセントとなっている。

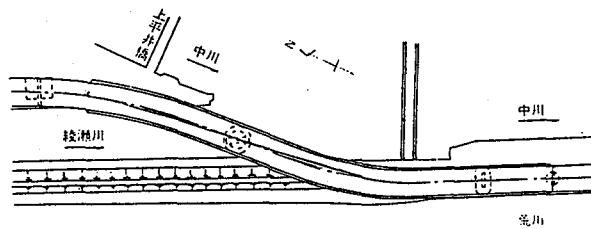
橋は桁橋を含めてすべてそうであるが、構造物に架かるあらゆる荷重を如何にして方向転換して大地に伝えるかでその構造システムが決定される。その力の伝達において平面的に対称なものは対称に、非対称なものは非対称に処理するのが合理的である。その結果、顕になる構造体（アーチ、タワー、ケーブル等）が今までにない形態あるいは見え方をするのである。



塔部断面図



側面図



平面図

図-10 葛飾ハープ橋一般図¹⁰⁾

6. ねじれを発生させる形

ここでは、橋梁構成部材に生じる断面力を視覚的に表現するために、各条件下での捻れモーメント（トルク）図について考察する。

6-1 ねじれを受ける橋の形

文献調査から、桁に捻れが発生する橋は、桁線形に特徴を有する曲線橋（R橋・S字橋）、斜橋【表-1】及び桁の断面形が非対称な形【表-2】の3つに大別された。但し、ここでは風、地震力は考慮していない。

表-1 桁線形によるトルク

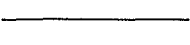
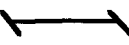
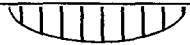
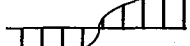
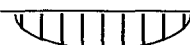
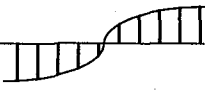
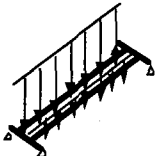
		構造モデル	トルク概形
直橋			
斜橋			
曲線橋	円弧橋		
	s字橋		

表-2 非対称断面構成によるトルク

		構造モデル	トルク概形
片側支点			
断面荷重の偏り			

- (1) R橋：桁線形がある曲率を持って湾曲している時にトルクが発生する。そのトルクの概形は支間半ばで符号が反転する。
- (2) S字橋：桁がS字の平面線形を有する時に発生するトルクは、その概形が支間を通じて同符号となる。
- (3) 斜橋：支承線が橋軸に対して直角でない時にトルクが発生する。そのトルクの概形は支間を通じて同符号となる。
- (4) 片側支点：橋軸線から偏心した支点を有する桁に

発生するトルクの概形は支間半ばで符号が反転する。

- (5) 偏載荷重：非対称桁断面に発生するトルクは、支間半ばで符号が反転する概形を示す。

6-2 トルクを低減する橋の構造と形態

前項で整理した橋の構造と形態によって桁に発生するトルクをそれらの組合せによって低減させることを考察した。

- (1) 片側支点R橋：R橋と片側支点橋のトルク図は同形であることから、それらを相殺させる方向で組み合わせることで桁トルクを低減することが期待できる。
- (2) S字斜橋：S字橋と斜橋のトルク図と同形である。従って、S字橋の支承線に角度を与えることによって桁トルクを低減することが期待できる。
- (3) 片側支点S字橋：片側支点をS字橋の曲線の外側に配置するように支間途中で吊り位置を入れ替えることで最大トルクを低減できる。

7. ねじれから導かれる造形原理

前節までに確認した曲線橋の構造的特性、その景観・造形的特徴、及び桁に発生するトルクの概形を踏まえた上でs字人道橋の設計を行う。形態的に円弧橋の延長として認識されてしまう、S字橋の本来の構造的特性に着目した設計の範（スタンダード）が確立されていないことが、この形式の橋をケーススタディーの対象とした理由である。s字橋のトルクと外側支点による偏心トルクを相殺する方向へ働かせる、という一つの構造コンセプトを設定し、2つの形態（内1つは支承線の斜角によるトルクの影響も利用）が導き出された【表-3】。設計条件は実在するS字人道橋を参考にして、平面線形（曲率半径R=40m、中心角 $\theta=50^\circ$ 、橋長68m、幅員2.5m）と周辺地形を同一とした。

7-1 構造コンセプト

表-3 構造コンセプト

案	A	B
形式	吊り形式s字橋	上路式3連アーチs字橋
構造コンセプト	・外側支点による カウンタートルク	・外側支点による カウンタートルク ・支承線の斜角による カウンタートルク

7-2 造形と構造の融合

P・jグリヨが語った『二点間の距離はスラロームである』（「デザインとは何か」より）をデザインテーマとしている。

(1) A案：スラローム抜重

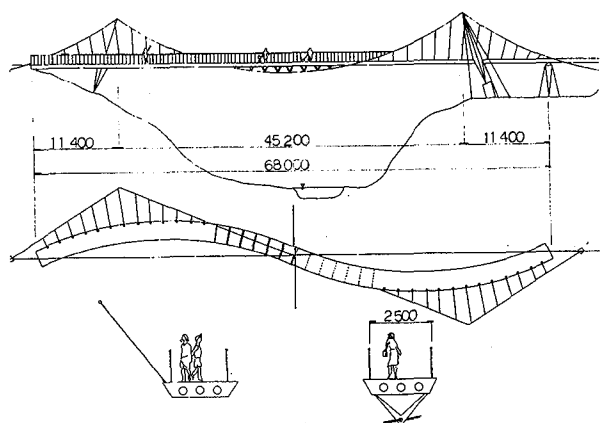


図-11 側面・平面図

開放的な橋上空間と軽快な造形を実現するためにモノケーブル吊り橋を提案する。構造コンセプトに基づく支点配置のS字橋を1本のメインケーブルで吊ろうとすると桁の上か下をケーブルが通過する必然性が生ずる。桁上を通過させると中央部でケーブルが錯綜し煩雑になるので、桁の下を通して持ち上げる形式を採用した。またこの形を採ることで側面方向からの見えにアクセントが生じ、さらに桁軸回りのトルクが表現されることとなった。

メインケーブルからの吊り材を曲線円弧の中心方向に向かう放射状の形としたことでメインケーブルの滑らかな曲線が保たれる。また桁下からの視点に対しては、連続的に変化する中央部の三角形ストラット（支材）のシルエットが特徴となる。この形状に似た形を吊り構造の巨匠フライ・オットーがごく簡単なスケッチに残しているが、本論文の提案は一本のケーブルを桁の下を通してある点で独自性があると考えられる。この形態は直線橋ではもちろんのこと円弧橋ではあり得ない形であり、S字橋ならではのものである【図-11・写真-3】。

(2) B案：スラローム荷重

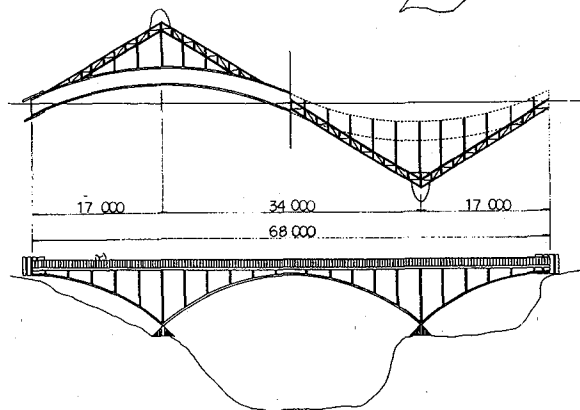


図-12 側面・平面図

開放的な橋上空間を持ちうる上路形式の中で曲線の魅力を表現し得る3径間連続自碇式上路アーチ形式の橋を提案する。アーチと吊りは上下反転の関係にあり構造的には同種のものであるから、A案と同様に外側支点のカウンタートルクを活かした構造が可能である。アーチは平面上平行に配置された2本のパイプとそれらを繋ぐトラス材によって構成され、その上に立てられた三角版垂直壁によって桁を支持する。構造コンセプトが同一であることから形態の造形原理も類似し、A案でケーブルの作る曲面がこの案では支持壁の連続として桁の下に現れている。また、2本のアーチリブを等間隔で平行に配置したため各支点上で斜角を有し、S字橋のトルクを斜橋効果によるトルクで低減することが期待できる。

【図-12・写真-4】

7-3 構造解析による実効性の確認

(1) A案：スラローム抜重

構造コンセプトである外側支点が有効に作用しているかを確認するため、3次元骨組み解析モデル「multi frame」を用いて、桁の曲げモーメント及びトルク、支点反力を照査した。比較として外側にアームを出していない

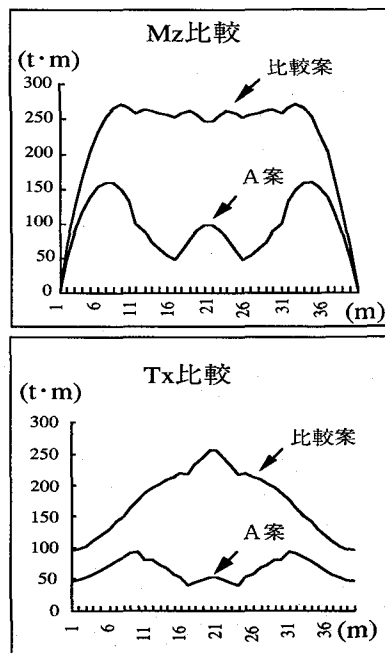


図-13 A案断面応力図

	A案	比較案
モデル		
最大曲げモーメント	157.5	273.7
最大トルク	94.3	255.0
端部支点反力	31.7 -2.2	54.0 -14.4

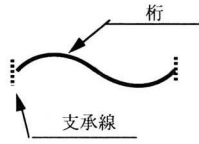
表-4 A案断面力比較表

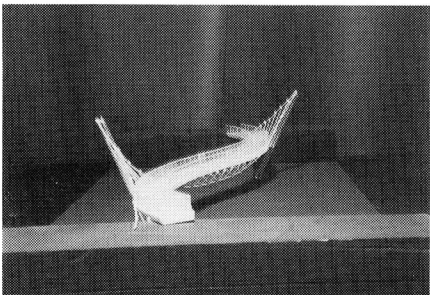
い形式（断面の中央を吊る形式）の解析を同時に行ったところ、A案は比較案に比べて最大曲げモーメント、最大トルク、負反力の発生ともに有効な結果を得た。なお、ケーブルに関しては断面積のほぼ等しいパイプとして換算し、アームは重量のない、極めて剛性の強い仮想部材とした【図-13・表-4】。

(2) B案：スラローム荷重

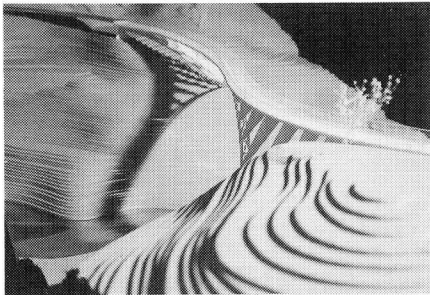
A案と同様の解析を行った。上路アーチ形式の場合、アーチリブ、支持壁、そして桁が剛結されるため、桁に発生するトルクはA案と比較すると小さくなっている。支承線の角度による桁トルクへの影響は支承線を橋軸直角にしたモデルとの比較で、その効果が認められる。しかし、桁の曲げモーメントに関しては若干増加している【図-13・表-5】。

表－5 B案断面力等比較表

	B案	比較案
モデル		
最大曲げモーメント	174.0	170.8
最大トルク	30.5	39.27
端部支点反力	15.8 -4.42	19.9 -13.2



写真－3 スラローム抜重模型



写真－4 スラローム荷重模型

8．本研究の成果

- ①国内外の曲線橋を構造と造形両側面から考察した基礎資料の蓄積
- ②構造コンセプトになりうるトルクの発生要因分析
- ③構造物の形、形式特有の力を表現するための設計法の提示

9．今後の課題

今回例示した設計法ではS字橋の桁に発生するトルクにのみ着目して構造と形態の検討を行ったが、ケーススタディーでも示したように、桁の曲げモーメントや桁の伸縮、また下部工への影響等も検討し、それぞれがどのように関係づけられるべきか議論する必要がある。さらに、それを曲線橋以外のものにも拡張して適用できる論理の構築が望まれる。

参考文献

- 1) Kenneth Frampton, Anthony C. Webster, Anthony Tischhauser; CALATRAVA; bridges; ARTEMIS
- 2) 土木学会関西支部編、橋のなんでも小事典、講談社、1991.
- 3) David P. Billington, ROBERT MAILLART'S BRIDGES, Princeton University Press, New Jersey, 1979.
- 4) F. レオンハルト（成井信、上坂康夫共訳）：コンクリート橋、鹿島出版会、1983.
- 5) 田井戸、山口：鋼曲線橋を設計する際の問題点、橋梁と基礎、1974.
- 6) 河井、松村、吉川：曲線桁の設計に関する2、3の考察、橋梁と基礎、1980.
- 7) 島田静雄：曲線橋設計上の問題点、橋梁と基礎、1969.
- 8) 阪神高速道路公団大坂第一建設部：1箱桁連続S字曲線ゲタ橋の設計について、橋梁と基礎、1967.
- 9) 川瀬：首都高速道路6号線（2期）加平第一ランプの設計、橋梁と基礎、1983.
- 10) 高橋、安藤、山崎：S字型曲線斜張橋上部工の設計、橋梁と基礎、1985.
- 11) 高橋、加藤、大久保、岡田：小黑山13号橋の計画と設計の概要、橋梁と基礎、1987.
- 12) 沓沢、関根、谷、佐々木：押し出し工法による横向1号橋の設計と施工、橋梁と基礎、1990.
- 13) 沖野、稲積：Bridge of "R"（片面吊り曲線斜張橋）の設計と施工、橋梁と基礎、1993.
- 14) 上坂康夫：ドイツの独創的なP C橋の系譜、プレストレスコンクリート、1993.
- 15) P. J. グリヨ（高田秀三訳）：デザインとは何か、彰国社、1969.