

橋梁における材料と形態に関する基礎的研究

A study on relation between material and form in bridges

石井信行*, 富家崇雄 **
Nobuyuki Ishii, Takao Fuke

*工博, 山梨大学大学院講師, 医学工学総合研究部土木環境工学専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

**学士, 山梨大学大学院, 医学工学総合教育部土木環境工学専攻 (同上)

The authors proposed a new methodology of bridge design, which might make the most of characteristics of materials in this paper. Relations between bridge structures and characteristics of materials were studied on wood, steel, and concrete. For wooden bridges, low weather proof, low shear strength, anisotropy, limited dimension, low Young's modulus were selected as characteristics of the material, which could determine either system, form, or the other characteristics of the bridges. Based on these characteristics, a methodology for designing a wooden bridge was proposed citing knitting in the field of architecture and fabric. Wooden knitting system was presented as a basic structure. In order to confirm feasibility of the system, an experimental design of a wooden footbridge was made, and the footbridge showed potentialities of this methodology.

Key Words: Material, Knitting, Structural Design, Wooden Footbridge

キーワード: 材料, 編み物, 構造デザイン, 木歩道橋

1. はじめに

橋梁形態は材料・施工・空間・力学などの因子により大きく左右される。個々の因子は互いに影響を及ぼし合い、これらの因子をどうバランスさせて構造物として具現化するかを橋梁設計と定義できる。また、道路橋示方書は材料・施工・空間・力学などの因子を基に考えられた、設計を行う上で最低限守らなくてはならない規定であると定義できる。

近年、FRP (繊維補強プラスチック) や FRCC (繊維補強セメント) といった新材料を用いた橋梁が実験的に施工されているにもかかわらず、その形態は新材料の特性を活かした形態となっていないのが現状である。これは、多くの橋梁技術者が設計を鋼と従来のコンクリートを対象として書かれた道路橋示方書に依存しており、新しい材料・施工・空間・力学と設計との間に生まれるであろう新たな関係を十分に追求しないまま今日に至っていることが原因と考えられる。また、従来から用いられている構造物用材料についても、材料性能や製造・加工法等が変化していることに対して、必ずしも因子間の関係を多面的に見直しているとは言えない。

そこで、新しい材料を用いた橋梁の可能性を考えるためにも、橋梁に使用されている従来の材料について、どのよ

うな特性に着目すれば、その特性を活かした構造デザインが可能となるのかを再度考察する必要があると考える。橋梁形態に影響を与える因子のうち材料は、木・石、鉄、鋼鉄、コンクリートと橋梁に使用される材料が変遷するにつれて、橋梁形態も大きく変遷してきたという歴史が存在しており、材料について見直すことにより、橋梁形態の新たな展開を期待できると考える。

2. 目的と構成

従来の橋梁用構造材料の材料特性と橋梁形態の関係性を考察し、材料特性を活かした新たな橋梁デザインの方法論を提示することを最終目的とする。そのうち、本研究では木材・鋼材・コンクリートを対象とし、これらのうち木材について新たな橋梁のデザイン方法論を提案し、試設計を行う。

研究の構成は以下のようになっている。まず始めに、橋梁に用いられている木材・鋼材・コンクリートの材料特性の文献調査を行うと同時に、国内外の橋梁の事例調査を行う。次に、材料の文献調査より得られた材料特性と橋梁の事例調査より得られた橋梁形態の関係性を考察し、木橋については、鋼材・コンクリートにおける材料特性と橋梁形態の関係性を参考にしながら、木材の特性を活かした新た

な橋梁デザインの方法論を提示する。最後に、提示した方法論に従い木歩道橋の試設計・解析を行い、提案する構造の妥当性の検証を行う。（図-1）

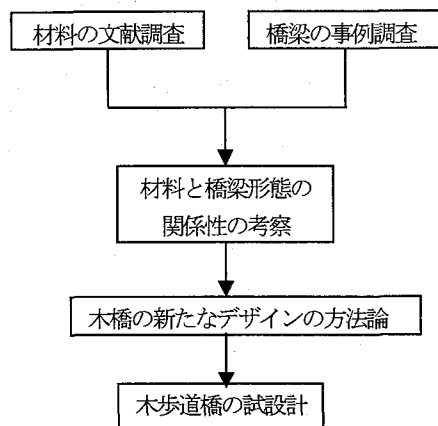


図-1 研究の構成

3. 材料特性と造形の関係性

本章では材料の文献調査と、橋梁の事例調査を踏まえ、材料の特性と橋梁形態の関係性の考察を行う。

事例調査は主に「橋 Bridge in Japan」, 「Structural Engineering International」に掲載されている、材料の特性が橋梁形態に現れていると考えられる橋梁を対象に行った。

3.1 調査対象橋梁

(1) 木橋 (5 橋)

Essing Footbridge, Lao River Bridge, Remseck Footbridge, Thalkirchen Bridge, Traversina Footbridge

(2) 鋼橋 (6 橋)

牛深ハイヤ大橋, 渋谷歩道橋, 新港サークルウォーク, 滝下橋, 千歳橋, MIHO MUSEUM BRIDGE

(3) コンクリート橋 (13 橋)

鮎の瀬大橋, 小田原ブルーウェイブリッジ, 龐大橋, 潮騒橋, ときめき橋, のぞみ橋, 南風原高架橋, 雷電廿六木大橋, ラグーナゲートブリッジ, 横向大橋, Bridge of R, Ganter Bridge, Puente de Osera de Ebro

3.2 木材

(1) 低耐候性

木材は耐候性が低いため、屋根などにより風雨を防ぐ構造が多く存在している。（写真-1）また、断面を分割することにより交換、乾燥を速めることが可能となっている。



写真-1 Remseck Footbridge⁽⁴⁾

(2) 低せん断強度

木材はせん断強度が低いため、曲げ構造として使用されることが少ない。そのため、アーチ・トラス・テンションリボンの各構造形式を多く採用している。

(3) 部材形状の制約

木材は、引張強度以外はコンクリートに近い強度の値を示しているにも関わらず、基本的には棒部材で用いなくてはならないので、部材配置は鋼橋に準じたものになる。しかし、横荷重に対して鋼橋のように横構を配置しようとすると、大断面の部材が一箇所に集まるために効率的に力を伝達する接合が困難になると同時に、鋼橋と比較して主構の断面が厚いことより、接合具配置のための断面欠損による強度の低下の影響が大きくなる。そこで、これらの問題を避けるために横方向にアーチ・タイケーブルを配置し、横荷重に抵抗させる構造を採用する例がある。（写真-2）



写真-2 Lao River Bridge⁽⁵⁾

表-1 材種別の特性値⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

	木材 (スギ E70)		鋼材 (SS400)		コンクリート	
	許容応力度 ヤング係数 (N/mm ²)	比強度 比弾性係数 (MPa/g・cm ³)	強度 ヤング係数 (N/mm ²)	比強度 比弾性係数 (MPa/g・cm ³)	強度 ヤング係数 (N/mm ²)	比強度 比弾性係数 (MPa/g・cm ³)
圧縮	8	24.2	140	18.2	7	3.0
引張	6	18.1	140	18.2	1	0.3
曲げ	10	30.3	140	18.2	8	4.0
せん断	1	3.0	80	18.2	1	0.4
ヤング係数	7	21.2	200	26.0	25	10.9

(4) 寸法の制約

製材は得られる材の長さ・断面が限られていると同時に、剛性が低く、圧縮・引張応力度とも同程度である。また、水分による収縮、低ヤング係数の影響により剛結合よりもピン結合が容易に形成できるため、製材を使用した橋梁はトラス構造が多く存在している。

(5) 低ヤング係数

木材・鋼材・コンクリートのうち、多く使用される材種において、ヤング係数を曲げ許容応力度で割った値は表-1により比較すると、上記の順に0.7,1.4,3.1となり、木材は強度に対するヤング係数が鋼やコンクリートと比較して低いことが分かる。(表-1) によって、断面をヤング係数により決定されることが多い。そのため、製材の得られる断面が小さいことと合わせ、製材を使用した木橋は、ラチストラス・ダブルワーレントラスの各形式を採用して部材を多く配置することにより構造物の剛性を獲得する場合がある。これらの構造は不静定構造となり施工が困難となるが、製材はボルト接合などを現場で孔を明けて行うことが可能であると伴に、ヤング係数が小さくやわらかいため、水分による収縮が発生しても内部応力を容易に開放できる。よって、製材を使用した橋梁は不静定構造に適していると考えられる。

(6) 集成材

集成材を用いた橋梁は、大断面・湾曲材を比較的容易に製作することができる。また、断面が大きいため、鋼板を挿入した剛結合が容易になる。これらの特性を生かしたアーチ構造が多く存在しているが、その他の木材の特性は低減されてしまっている。

3.3 鋼材

(1) 規格化

鋼橋には限られた板厚により作られた鋼板を加工して組み立てた部材、もしくは形鋼・鋼管が使用されるため、経済性を考慮して、トラスやスペーストラスなどの同一形状の部材を多く使用した形態が多く存在している。(写真-3)



写真-3 滝下橋

(2) 薄板

鋼材を板材として使用するには面外方向の剛性が小さい。よって、薄板についてはリブ・ダイアフラムを配置することにより剛性を増すことがある。その際には、構造・施工・腐食の影響により外面をさけ、内面に配置される場

合が多く存在している。

(3) 加工技術の高度化

近年、形鋼においては自動溶接などの加工性の向上により、閉断面の部材が使用されるようになってきている。閉断面の部材は、曲げ剛性・ねじり剛性が大きく、部材同士の接合面積も増えるため、曲げ応力が伝達可能な剛結合が増加している。(図-2) また、閉断面の部材は再塗装・腐食などの維持の面でも開断面の部材より優れた形態となっている。

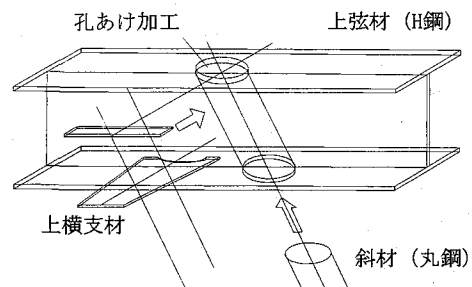


図-2 渋谷歩道橋の上下弦材と斜材の接合方法
(参考文献6より作成)

(4) 高比強度・高比弾性率

鋼材はコンクリートと比較して比強度・比弾性率ともに大きく、長大橋に使用される場合、自重が小さくなり風の影響が大きくなる。よって、オープングレーチングや翼断面を採用することで、風による振動などを低減している。

(5) ケーブル

ケーブルは引張材として用いられた場合には、強度的に最も優れた材料である。しかし、ケーブル自体には剛性はほとんど存在しないので、網目状に配置することによるトラス効果で剛性を大きくするなど、配置による工夫が行われている。

3.4 コンクリート

(1) 低比強度・低比弾性率

コンクリートは鋼材と比較して比強度・比弾性係数ともに小さいため自重の影響が大きく、体積の大きい構造物となる。

(2) 連続体

コンクリートは施工時に流動性を有しているために、連続体を形成するのに適している。その場合、部材同士が剛結合となる不静定構造になる。しかし、コンクリートにはクリープ・乾燥収縮が発生するため、断面を絞るなど、内部応力を開放する部位が必要となる場合がある。

(3) 成形性

コンクリートは施工時に流動性を有しているために、板材を組み立てて部材を構成する他の材料に比べて、3次元の形を作りやすいので、応力が集中しやすい隅角部ではハンチや曲面が用いられた形態となることがある。(写真-4)

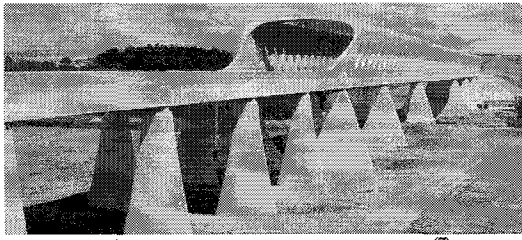


写真-4 Puente de Osera de Ebro⁽⁷⁾

(4) 低ヤング率

コンクリートはヤング係数が小さく、所要の断面剛性を得るためには断面二次モーメントを大きくする必要があるため、中空断面が採用される場合が多い。

(5) 耐候性

コンクリートはアルカリ性であり、正しく施工されていれば表面が侵食されても内部の鉄筋・PC鋼材等は腐食せず、強度の低下が起こりにくい材料である。そのため、橋梁形態を操作して日光・風雨に対する暴露状態をコントロールし、表面の汚れや侵食も取り込んだテクスチャーを創作することが可能である。(写真-5)

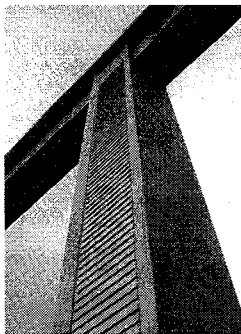


写真-5 雷電廿六木大橋⁽⁸⁾

(6) 内部構造的性

内ケーブルを採用したPC橋は、部材断面外側の形態・寸法を保持したままPC鋼材の偏心量、偏心箇所を変えることにより、断面性能を大きく変更することができるが、ケーブルの取替えが困難であり、また部材の断面寸法にPC鋼材の配置を依存するため、必要な偏心量が確保できないという問題がある。一方、外ケーブルを採用したPC橋は、ケーブルの取替えが容易であり、より大きな偏心量を採用することが可能となるが、デビエータなどの定着部に過大な応力が作用する恐れがある。

4. 木橋の新たなデザイン方法論

3章で行った材料特性と橋梁形態の関係性の考察を基に、従来短所と捉えられていた材料特性を長所とすること、また従来からの長所をより活かすことを方針として、新たなデザイン方法論を提示する。

木橋に着目する理由は、木材が橋梁の構造材として用いるには制限が多いので、材料特性と構造との関係がより明

確になると考えるからである。また、近代木橋は鋼橋・コンクリート橋と比較して歴史が浅く、木材の特性を活かしていると考えられる橋梁が少ないので、従来の木橋との違いが明確になると期待するからである。

4.1 コンセプト

前章に示したように、木材の材料特性として「低耐候性」「低せん断強度」「部材形状の制約」「寸法の制約」「低ヤング係数」を抽出した。また、これらの複数の項目では、接合について考察した。

上の材料特性は構造物にたわみや揺れをもたらす要因となる。たわみは直接構造物の強度に影響を与えるものではないが、過大なたわみは歩行時の快適性を損ね、また、金属を使用した接合具のゆるみなどの原因となる。一方で、鋼材・コンクリートを想定している立体横断施設技術基準では原則としてたわみの許容値を支間長 L の 600 分の 1 としており、強度に対するヤング係数が相対的に小さい木材で同じような部材構成をしてこの値を満たそうとすると大きな断面が必要になる⁽⁹⁾。

そこで、発生が予測されるたわみや揺れを構造システムに織り込むまたは構造システムで制御することが木材の特性を活かした構造デザインの方法論と考えた。

4.2 基本構造

木材は繊維の集合体であることから、構造部材として採用可能な繊維で構成される構造単位を考えてみると、ケーブルと織布が挙げられる。木材を単純に一方方向に連続させることや、さらに連続させた木材を燃えることは困難であると考えられるので、ケーブルを構造単位とするのは適当ではない。一方、織布は部材を交互に重ね合わせることで構造単位を構成するので、木材にも適用可能性があると考える。

木造建築を参照すると、建築家播茂氏が「網代細工の家」「フォレスト・パーク・パビリオン」(写真-6)で網代という技術を利用した木材による構造を設計している。網代とは杉・ひのき・竹などの細い薄板を互い違いにくぐらせて編んだものであり、天井・垣根・笠などに使用されている技法である。播氏の建築では主に屋根としての自重を支える構造として用いられているが、短い部材を編むようにして構造体を構成するという構造単位の可能性は示されている。

そこで、木橋の新たなデザイン方法論における基本構造の単位を編み構造とする。

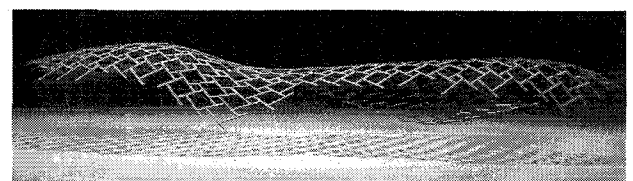


写真-6 フォレスト・パーク・パビリオン⁽¹⁰⁾

4.3 編み方

柔軟性のある繊維を素材とする繊維織物の織り方を参照しながら、部材としての繊維の働きと接合に着目して、強度・剛性の高い木材の編み方を考える。ここでは、橋軸方向に細長い部材を考える。

(1) 繊維織物の織り方

繊維織物には代表的な織り方が3種類ある。(図-3)

① 平織り

縦糸とよこ糸が1本おきに上下する織り方である。織物の中で最も簡単な組織で、縦横に強度が高く、加工も容易である。網代もこの編み方である。

② 朱子織り

縦糸が横糸のうち一方の糸を布の一面に長く浮かせ、縦糸、横糸の交わる点をできるだけ離して配置した織物である。単位面積当りの繊維重量を増やしたい時、変形性を出したい時に適している。

③ 綾織り

縦糸と横糸が交互に交錯せず、斜線がはっきり見える織り方で、平織りより柔軟性に富み、密度の高い厚みのある織物ができる。

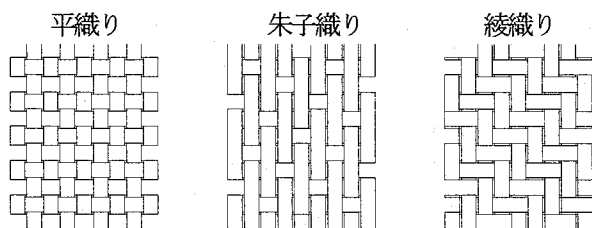


図-3 繊維織物の織り方の例

(2) 編み素材としての木材の特性

木材と繊維の特性の違いが編み方に与える影響を考察する。

① 剛性(縦方向)

木材は繊維と比較してヤング係数が大きいので、縦材の曲率半径は繊維の曲率半径よりも大きくなる。

② 剛性(横方向)

木材はそれ自体で横方向の剛性が存在しているため、繊維織物のように横材を密に配置しなくてもよい。

③ 接合

繊維は半無限に長いのにに対し、木材は搬入等により長さが限られている。そのため、木材は縦材の長さ方向に接合する必要がある。

以上より、木材の編み方として以下の2案が適していると考えられる。

(3) 木材の編み方

1) a案

橋軸方向の強度を優先した案で、横材の間隔を平織りより広めることにより、縦材の曲率半径を大きくすることが可能となっている。橋軸直角方向の強度・剛性は横材の間隔により変えることができる。(図-4)

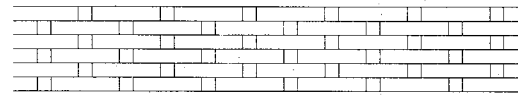


図-4 木材の編み方 (a案)

2) b案

木材を斜めに配置することにより全ての部材が縦材と横材の役割を果たす案で、木材の間に隙間が開き、全ての部材が橋軸に対して斜めに配置しているため橋軸方向の強度はa案と比較して小さいが、配置する角度を変えることにより、縦方向と横方向の強度・剛性を変えることができる。(図-5)

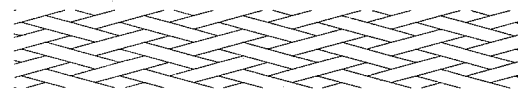


図-5 木材の編み方 (b案)

4.4 縦材の特性

(1) 引張特性

縦材は引張力が作用することにより横材を上下から締め付けるため、交差部において摩擦力が作用し、接合具を使用せずに接合してもよいと考えられる。また、縦材と横材の交差部に作用する力は面内における曲げ、及びせん断だけであり、接合具を使用したとしても縦材と横材が圧着する方向に応力が作用するため追締の必要性は小さくなる。ただし、縦材と横材のめり込みを考慮しなくてはならないと同時に、あらかじめ湾曲している縦材を使用する場合、曲率半径を増す方向に力が働くため、木材の機械的な性質の中で最も小さい繊維と直角方向の引張力が生ずる。(図-6)

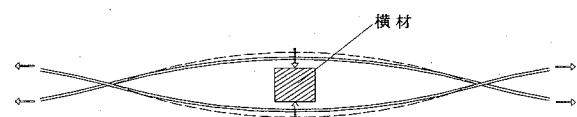


図-6 引張力が作用している縦材の特性 (側面図)

(2) 圧縮特性

木材を織るためには薄い板を使う必要があり、圧縮力が作用する場合、面外方向への座屈が発生しやすい。そのため、個々の縦材については曲率・横材間隔を考慮すると同時に、編み面全体では面外方向への断面二次モーメントの大きなシェルの適用が考えられる。縦材と横材の接合部は引張力が作用する場合の逆で、材同士が広がろうとするため、接合具を使用する必要がある。あらかじめ湾曲している木材を使用する場合、曲率半径が小さくなる方向に力が働くため、繊維に直角方向の圧縮力が作用することを考慮しなくてはならない。(図-7)

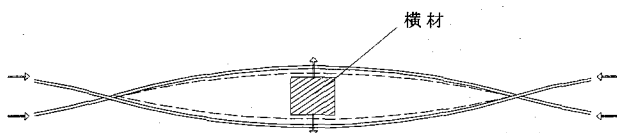


図-7 圧縮力が作用している縦材の特性（側面図）

4.5 横材の特性

横材の役割は縦材の位置を保持すると共に、縦材を湾曲させる。また、縦材に圧縮力が作用する場合、縦材の座屈を防ぐ役割もある。

4.6 斜材の特性

斜材は縦材と横材の中間の役割を果たす。また、湾曲した編み面を作ろうとすると斜材にねじれが発生してしまうため、シェルは形成しにくい。

4.7 縦材の接合

縦材に集成材を使用したとしても、強度を目的とした現場での接着接合は操作・管理が難しいため許されていない。そのため、輸送などにより制限される長さ以上の縦材が必要な場合、縦材は長さ方向に接着以外の方法で接合する必要がある⁽¹⁾。

接合が可能な場所としては縦材と横材の交差部と交差部中間の2箇所が存在している。交差部で接合する場合、縦材は湾曲しており反ろうとするため、反りを許容もしくは拘束した接合が必要となる。長所としては縦材と横材の接合を同時に行える点がある。一方、交差部中間で縦材を接合する場合は変曲点となるため、反りを伴わずに縦材を接合することが可能となる。

5. 木橋の試設計

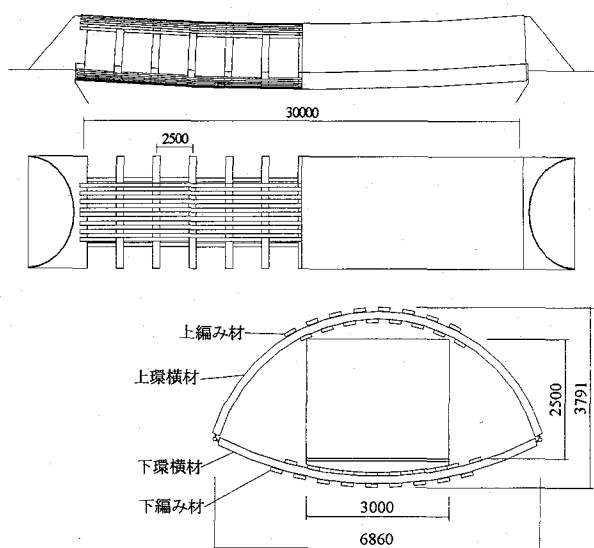


図-8 側面図・平面図・断面図（単位：mm）

4章で抽出した木材の編み構造を活かした木橋の試設

計を行い、構造解析することにより提案した橋梁デザインの方法論の適用性を検証する。設計条件は実存する木歩道橋を参考にし、橋長 30m、有効幅員 3m とする。

なお本試設計では、4章で用いた編み構造の部材名称である縦材・横材を、それぞれが使用されている形状、構造の役割により図-8のように編み材・環横材と新たに定義する。

5.1 構造コンセプト

(1) 構造システム

基本構造は、サグ比を一般的な吊床版橋と比較して小さな 60 分の 1 とした軸引張り桁とする。これにより、桁橋と吊床版橋の中間の構造を持つ構造となり、編み材に座屈の恐れがある圧縮力を発生させないようにしている。また、サグがない状態で発生する環横材の曲げ応力も低減させている。

必要な耐力・耐風性・耐候性を総合的に満足させる構造となるように、湾曲した環横材に編み込まれた編み材は管状の歩行空間を構成するように上下に配置され、橋の両端に立てたタワーから上編み材を、タワーと一体化した橋台から下編み材を吊る。

さらに、木材は強度が小さく横荷重の影響を大きく受けるため、編み面の形態をシェルにすることにより、主構造の剛性を高めるだけではなく、風の抵抗を少なくして風荷重の影響を小さくすることを期待したものである。

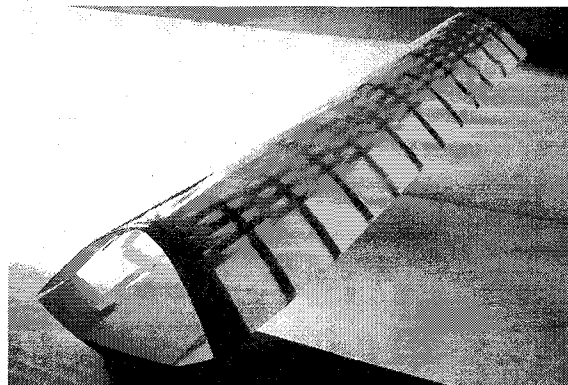


写真-7 外部景観の模型写真

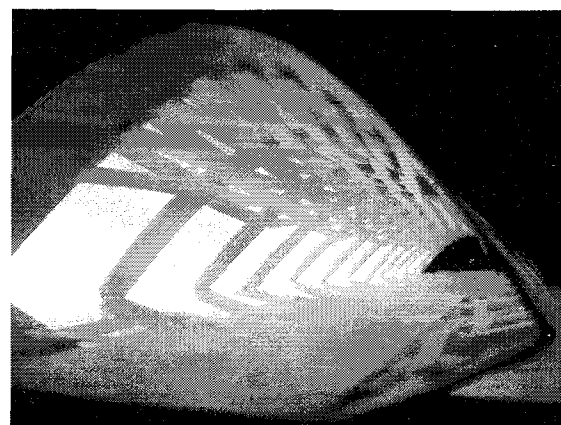


写真-8 内部景観の模型写真

また、耐候性を考慮し、ポリエステル繊維布で断面全てを覆うこととした。橋梁全体をポリエステル繊維布で覆っていることにより外部景観と内部景観で景観は大きく異なっているが、ポリエステル繊維布には透光性があり、また、上編み材は湾曲しているため上編み材の間からポリエステル繊維布を通して光が透過してくるため、木漏れ日が存在しているような内部景観となっている。(写真-7)

(写真-8)

(2) 構造特性

構造特性としては以下の点が挙げられる。

- 1) 編み材に発生する応力を全て引張力にすることで座屈を考慮しない。また、引張力が作用していない場合においても、編み材を強制変位させることにより、編み材と環横材が相互にめり込み、交差部分の全面積が部分圧縮により接する状態になる⁽¹²⁾。これにより、編み材と環横材に弾性接合が期待でき、腐食の影響により発生する木材の断面減少などが起因する接合部のがたを考慮しなくてよい、木材の特性を考慮した構造となっている。
- 2) 木橋に屋根材を掛ける場合、構造材とは別の部材を配置し、その上に屋根材を掛けることが多いが、本構造では上編み材が面になっているため、2次部材を使用しないで直接屋根材を架けることができる。
- 3) 木材の耐候性を考慮して全断面をポリエステル膜で包むため、充腹断面となり風荷重の影響を大きく受ける。各種充腹断面における抗力係数を比較した場合、長方形断面で1.5であるのに対して、長円形断面では0.7になることから、長円形断面に近似可能な木の葉形の断面を使用することにより、風荷重を小さくすることが可能となっている。

5.2 構成部材

(1) 編み材

断面 $250 \times 75\text{mm}$

同一等級構成集成材 E150-F435 (積層数 3 枚)

編み材にはあらかじめ湾曲させた集成材を使用し、上編み材に 16 本、下編み材に 18 本を配置する。下編み材の部材数を上編み材より多くしているのは下編み材に発生する引張力が上編み材で発生する引張力より大きいからである。編み材を構成する集成材の長さは搬入を考慮し、6m 以下としている。

編み材に予め与える曲率半径を環横材固定時の曲率半径よりも大きくしておくことで、編み材の組み込み時に強制的に変形が与えられ、編み材が環横材を両面から圧着する力が生じる。これにより、架設前における引張力が作用しない場合でも部材を固定する程度の圧縮力が作用するため環横材との弾性接合が機能する。また、引張力が作用する場合、編み材が環横材の接する面に圧縮力が作用するため、より大きな摩擦力が発生する弾性接合が期待できると同時に、編み材に作用する曲げモーメントおよび繊維直角方向の引張力を低減することが可能となる。

(2) 環横材

断面 $500 \times 160\text{mm}$

同一等級構成集成材 E95-F315 (積層数 4 枚以上)

上環横材と下環横材には風荷重の影響を小さくするためと同時に、環横材を静定構造とするために湾曲させた集成材を使用する。環横材の間隔は 6m 以下の編み材が環横材同士の間で接合することができるように 2.5m としている。(図-9)

下環横材の曲率半径を小さくすると床版を支える部材の断面が大きくなってしまいうため、下環横材の曲率半径は上環横材より大きくしている。

集成材はラミナ厚が小さいほど曲率半径を大きくすることが可能となる。しかし、ラミナ厚が小さくなると経済的に不利になる。そこで、曲率半径の小さい上環横材の曲率半径は建築限界・ラミナ厚を考慮し湾曲中心に対して約 3.56m の曲率半径としている。

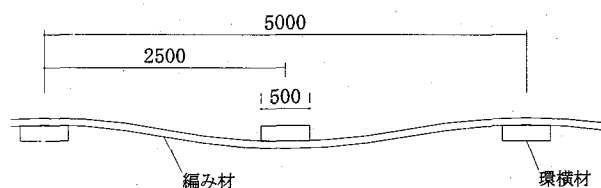


図-9 編み材と環横材の配置縦断面図 (単位: mm)

(3) タワー

タワーは PC 構造とし、上編み材を定着する。橋軸方向の立面形状は環横材と同じ形状になっている。

(4) 屋根材

屋根材には PVC コーティングされたポリエステル繊維布を橋梁全面に使用する。これにより、タワー間で吊り桁を完全に密閉し、風雨が側面から断面内部に入り込まないようにしている。

5.3 接合

(1) 編み材と編み材の接合

編み材同士は変曲点である環横材同士の間で接合することにより、環横材で接合する場合に発生する反りの影響を考慮しなくてもよい。接合具には 102mm シアープレートを使用し、鋼板と木材の 2 面せん断により引張力を伝達させている。(図-10)

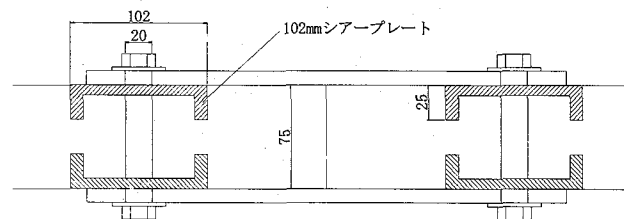


図-10 編み材と編み材の接合部断面⁽¹⁾ (単位: mm)

(2) 環横材と環横材の接合

環横材同士の接合は環横材に発生する曲げモーメント・せん断力を考慮して、橋軸垂直方向の変位に対してピン結合としている。

(3) 編み材と環横材の接合

設計上では編み材と環横材にはめり込みによる弾性接合が常に存在するが、交差部を中心とした回転などのさまざまな動きに対する摩擦力を計測することは困難である。そこで、摩擦への抵抗を編み材と環横材に求められない状態を想定して、ロープを使用することにより編み材と環横材のずれを保つように補助接合している。(図-11)

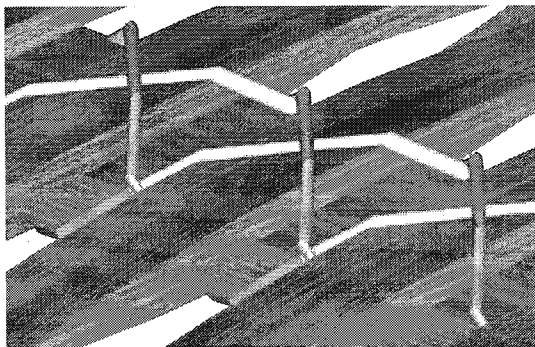


図-11 編み材と環横材の接合

5.4 構造解析

試設計を行った木歩道橋に対して、市販の構造解析ソフトウェア「TDAPⅢ」を使用した3次元骨組構造解析を行い、活荷重載荷時および風荷重載荷時に発生する最大応力度・たわみ、及び編み構造により発生する部分圧縮・せん断応力を求めた。

(1) 全体構造の構造解析

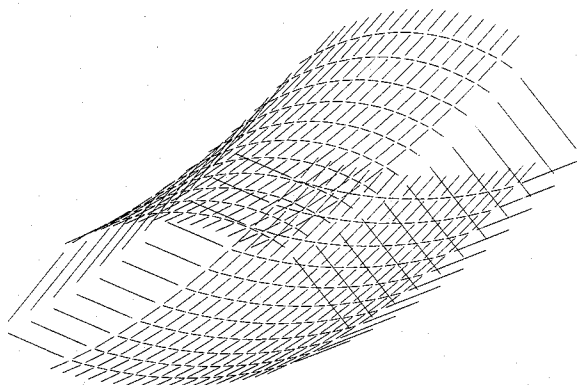


図-12 全体構造のモデル図

以下に荷重条件・最大たわみと活荷重載荷時および風荷重載荷時における各部材の解析結果を示す。(表-2) 許容応力度は湾曲・座屈による許容応力の低減を考慮した値となっている。なお、活荷重と風荷重は道路橋示方書に準拠した値を使用している。活荷重は下編み材に等分布荷重が作用していると仮定して、下編み材と環横材の交点であるモデルの節点に、等分布荷重を比例配分した集中荷重を作用させている。風加重は側面全体に等分布荷重が作用す

ると仮定して、編み材と環横材の交点であるモデルの節点に、活荷重と同様に集中荷重を作用させている。(図-12)

表-2 荷重条件・最大たわみ

死 荷 重	構造材：集成材	: 8kN/m ³
	屋根材：ポリエステル繊維布(0.63mm)	: 6.08N/m ²
	床版：木材(60mm)	: 470N/m ²
活 荷 重	3.5kN/m ²	
風 荷 重	1.943kN/m ²	
最 大 た わ み	活荷重載荷時203mm, 風荷重載荷時61mm	

風荷重は断面形状を長円形断面と仮定した抗力係数を用いて算出した。また、木材は柔らかく、部分圧縮が発生するため編み材と環横材の接合条件を把握することは難しいが、編み材と環横材の接合にはロープ以外の接合具を使用していないため、編み材の回転が可能であると考え、ピン結合と仮定して構造解析を行ない、各最大応力が許容応力内に収まることが確認できた。(表-3)

表-3 全体構造の解析結果(単位: N/mm²)

			圧縮	引張	曲げ	せん断
活 荷 重 載 荷 時	編 み 材	最大応力度	-	10.178	0.175	0.407
		許容応力度	-	11.2	14.4	0.8
	環 横 材	最大応力度	0.073	0.137	0.223	0.332
		許容応力度	6.5	7.6	9.7	0.8
風 荷 重 載 荷 時	編 み 材	最大応力度	-	4.440	0.684	0.268
		許容応力度	-	11.2	14.4	0.8
	環 横 材	最大応力度	0.113	0.027	0.063	0.650
		許容応力度	6.5	7.6	9.7	0.8

活荷重載荷時の編み材の最大引張応力度は橋台につながれている下編み材の最下部に配置されている部材で発生し、環横材の最大せん断応力度は橋台に最も近い上環横材の約2分の1の高さに位置している部材で発生する。また風荷重載荷時の編み材の最大引張応力度は風下側の下環横材の端に配置されている部材の支間中央で発生し、環横材の最大せん断応力度は橋台に最も近い下環横材の最下部付近の風下側の部材で発生する。

(2) 編み構造の構造解析

編み材に発生する引張力により編み材は環横材を局部的に圧縮するため、編み材と環横材には部分圧縮・せん断力が発生する。(図-13) よって全体構造で求めた編み材の最大引張力を使用し、編み材と環横材に発生する部分圧

縮及びせん断力が許容応力内に収まる事を確認した。(表-4)

このことより、編み構造と全体構造により発生する最大せん断応力を足しても許容応力内に収まることが確かめられた。

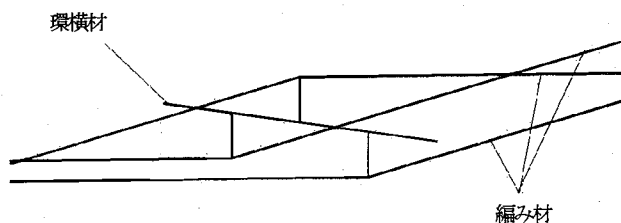


図-13 編み構造のモデル図

表-4 編み構造の解析結果 (単位: N/mm^2)

		部分圧縮	せん断
編み材	最大応力度	0.366	0.303
	許容応力度	3.0	0.8
環横材	最大応力度	0.366	0.286
	許容応力度	3.0	0.8

6. 研究の成果と今後の課題

研究の成果として以下の点が挙げられる。

- ① 木材・鋼材・コンクリートの材料特性と木橋・鋼橋・コンクリート橋の橋梁形態の関係性を考察し、木材を用いた橋梁の新たなデザイン方法論を提示した。
 - ② 提案した新たな橋梁デザイン方法論に従って木材を用いた編み構造を提案し、木材を編むことにより発生する特性を整理した。
 - ③ 編み構造を適用した木歩道橋の具体的形態を提案し、試設計を行い構造の妥当性を示した。
- また、今後の課題として次の点が挙げられる。
- ① 編み材と環横材の圧着接合について実験を行い、強

度・変形等の特性を求める。

- ② ねじりモーメントが編み構造に与える影響を明らかにする。
- ③ 動的解析により耐風性・振動特性を求める。
- ④ 架設方法を検討する。
- ⑤ 編み材の曲率半径をどのように設定すれば構造的に効率的になるかを検討する。
- ⑥ 軸引張り桁の構造・解析、引張部材の接合部の詳細を検討する。

参考文献

- 1) 杉山英男, 木質構造, 共立出版, 2000.
 - 2) 大田孝二, 深沢誠, 鋼と橋, 建設図書, 2000.
 - 3) 社団法人日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, 丸善, 2002.
 - 4) Christian Muller, Laminated Timber Construction, Birkhauser, 2000.
 - 5) Giorgio Bignotti, Giuseppe Mncini, Design of the Lao River Bridge, Structural Engineering International, pp.177-179, 2001.
 - 6) 徳嵩公明, 浅沼真仁, 青島正治, 渋谷歩道橋 (仮称) の設計と施工, 橋梁と基礎, pp.21-25, 2001.
 - 7) Javier Manterola, Antonio Martinez, Jose Luis Lopez Ruiz, High-Speed Railway Bridge over the Ebro River, Structural Engineering International, pp.174-176, 2003.
 - 8) 社団法人土木学会, 雷電廿六木大橋, 1999・橋 1998/1999, pp.33-35, 1999.
 - 9) 国土技術研究センター, 木歩道橋設計・施工に関する技術資料, 2003.
 - 10) Matilda McQuaid, SHIGERU BAN, ファイドン株式会社, 2005.
 - 11) 林知行, ウッドエンジニアリング入門, 学芸出版, 2004.
 - 12) 森園眞子, 山角達也, 村田忠, 異樹種集成材システム開発, 鹿児島県工業技術センター研究報告 No.16, 2002.
- (2005年9月10日受付)