

梁構造の軽量化に着目したクロスウェブ構造モデルの開発と設計

日本大学大学院理工学研究科

○前田 滝作

日本大学理工学部土木工学科 正会員 工博

関 文夫

三井住友建設(株)

遠藤 大輝

1. はじめに

近年、建設された新東名高速道路等の橋梁は、上部工の軽量化と下部構造の縮小化を図った橋梁が多く、中でも、上部工の軽量化は、剛性を保持しながら高強度コンクリートパネルを採用し、維持管理コスト面まで配慮している。ここでは、これらの動向に着眼し、梁構造の構造モデルの開発に取り組んだものである。そのコンセプトは、梁構造の主応力方向に着目して、新しい梁構造のデザインを創出するものである。研究の過程で発想したクロスウェブ構造(写真-1)は、従来の曲げモーメントやせん断力を軸力に変換させたウェブ構造とすることで、上部工の軽量化を図った構造である。本研究では、これらの挙動及び構造特性を把握するため、約7.2mの実際に人が歩ける木製の歩道橋として、材料基礎実験、構造解析、材料調達、材料加工、製作組立、載荷実験という一連のプロセスを行った。ここでは、これらのプロセスの報告、載荷実験を報告するものである。



写真-1 クロスウェブ構造

2. 設計

2.1 デザインコンセプト

クロスウェブ構造を発想するにあたり、次のコンセプトを立てた。梁構造の剛性を保持すること曲げモーメントを軸力に変換すること(トラス構造の軸力挙動)、上部工の重量を減らすこととした。これらのコンセプトに即した構造モデルを発想するために、スチレンペーパーを用いて各種模型を製作し、簡易模型の実験、構造解析を繰り返し行った。

2.2 スチレンペーパーを用いた簡易模型実験¹⁾

材料には、スチレンペーパー(3mm)を用い、橋長は640mmとする。プレストレスには、ビニル系の材料を使用した。

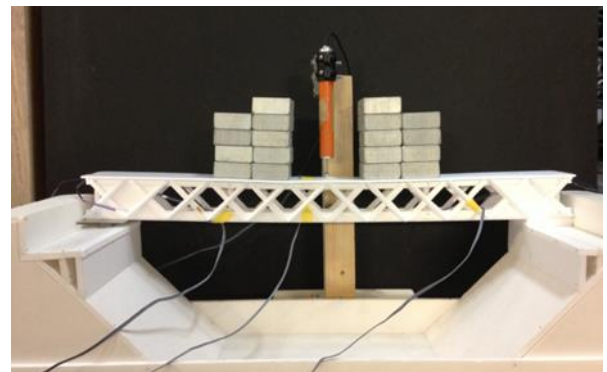


写真-2 スチレンペーパーを用いた簡易模型の実験

簡易の構造モデルをタイプ別に8種類作成し、実験システムを用いて、クロスウェブ構造の挙動を示すデータを測定する。写真-2のように、構造モデルにひずみゲージを圧縮と引張の部材と、中央の下縁と上縁に貼り、構造モデルの中央に変位計、支承部には荷重計を設置し、計6ヶ所で同時に観測を行う。試験結果は、ひずみ-荷重のグラフにまとめて、桁高、補強材の有無、ケーブルの変向部(横桁)の位置についてそれぞれ最適なモデルを検討する。表-1に示す8種類の模型で破壊実験を行う。

表-1 試験体・模型の種類

模型番号	ケーブル	ケーブル(内)	圧縮補強	せん断補強	桁高(高)	桁高(低)
P-1	○		○	○		
P-2		○	○	○		
P-3,R-3			○	○		
R-4				○		
R-5			○			
R-6,H-6						
H-7					○	
H-8						○

※P-2 は、ケーブルの変向部の位置が、P-1 の模型より 100mm 中央に位置している場合。

※桁高は、桁高(低)を 40mm、桁高(高)を 60mm とし、それ以外を桁高 50mm とする。

スチレンペーパーを用いた簡易模型の実験では、構造モデルの特性や挙動を確認することは勿論、事前に橋の全体像を見ることができ、造形特性や施工性を把握することができた。

2.3 材料基礎実験

木製の歩道橋に選んだ木材は、比較的どこのホームセンターでも安価で大量に購入することのできる Spruce Pine Fir 材 (以下 SPF 材) とした。SPF 材はマツ科・モミ科などの針葉樹を指しており、軽量で加工が容易な木材である。

設計データとして表 - 2 の材料物性データを使用した。SPF 材の基本的強度を確認するために、供試体は、長さ 1m の部材を 2 本用いて曲げ破壊試験を行った。図 - 1 より、曲げ破壊強度 $\sigma_{cm} = 47.2 \text{ N/mm}^2$ 、曲げ弾性係数 $E = 10830 \text{ N/mm}^2$ となった。

2.4 構造解析

構造解析は、平面骨組解析プログラム (Ezy- Frame) を利用して解析を行った。

設計荷重は 5kN (男性 5 人程度) とし、図 - 2 に示すように橋長 7.2m、支間長 6.6m、主桁高さ 0.618m、幅員 0.85m とした。SPF 材の構造物性は、表 - 2 を用いた。

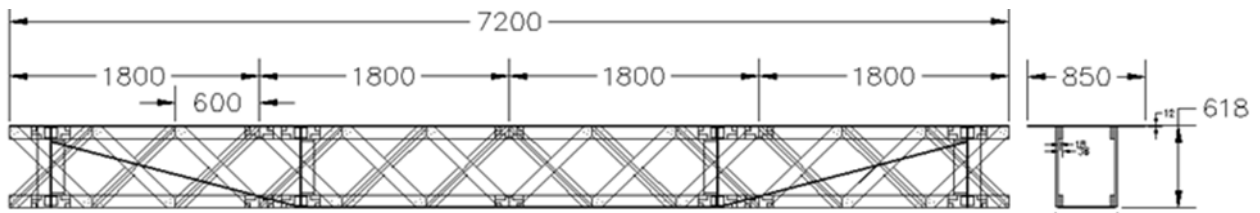


図 - 2 クロスウェブ橋側面図と断面図(単位 : mm)

部材端の拘束条件は 5 つのケースに分けて解析を行った。また、外ケーブルによるプレストレスは、桁端を定着部とし、支間長の 1/4 地点にディビーターを設置し導入した。5 つのケースを表 - 3 に示す。

ケース 1 (図 - 3 のように部材端の拘束条件を全て剛結合にしたモデル) の計算結果を示す。許容応力度は、軸圧縮が $f_c = 12.7 \text{ N/mm}^2$ 、軸引張が $f_t = 36.7 \text{ N/mm}^2$ 、せん断が $f_s = 2.7 \text{ N/mm}^2$ 、曲げ圧縮が $f_m = 15.7 \text{ N/mm}^2$ 、であり、本橋を計算した結果より、安全率を求めると、軸圧縮 $F_s = 2.7$ 、軸引張 $F_s = 6.8$ 、せん断 $F_s = 6.7$ 、曲げ圧縮 $F_s = 2.3$ となる。ウェブ端部では、せん断を補強するために板材を設置している。以下、図 - 4 に軸力図、図 - 5 に曲げモーメント図、図 - 6 にせん断力図を示す。

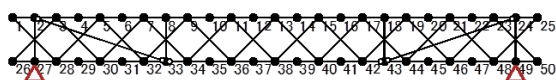


図 - 3 ケース 1 の解析モデル

表 - 2 材料物性データ

使用材料	SPF材	
単位体積重量	γ	4.5 kN/m ³
圧縮強度	σ_c	38 N/m ²
引張強度	σ_t	110 N/m ²
せん断強度	τ	8 N/m ²
曲げヤング係数	E	1.1×10^4 N/m ²

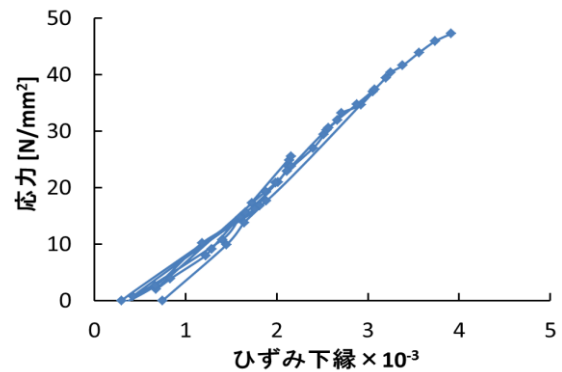


図 - 1 応力ひずみ線図

表 - 3 各ケースの拘束条件

部材端の拘束条件			
	クロスウェブ	ユニット部	橋軸方向の部材
ケース1	剛結合	剛結合	剛結合
ケース2	ピン結合	剛結合	剛結合
ケース3	剛結合	ピン結合	剛結合
ケース4	ピン結合	ピン結合	剛結合
ケース5	ピン結合	ピン結合	ピン結合

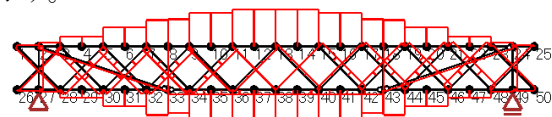


図 - 4 軸力図

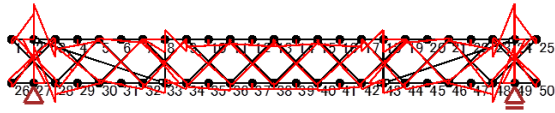


図 - 5 曲げモーメント図

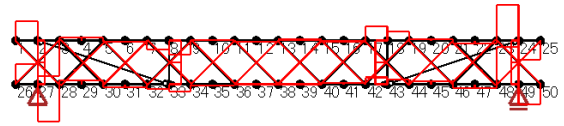


図 - 6 せん断力図

3. 製作

3.1 システム化

本橋は、キャンパスウォッチングの一環で展示することから、簡易に運搬し、組立、解体するために、設計の段階で、システム化した製作方法を考えた。この橋長 7.2m の橋は 4 つのユニットで構成されており、1 ユニットは板状の状態になるまで分解することができる (写真 - 3)。本橋を四等分にすることで、1 ユニットあたりの寸法は最大で 1800mm に留めることができた (図 - 7)。さらに 1 ユニートを板状にすることによって、運搬の際にコンパクトになるので、作業の効率化にも繋がる。板状の部材 4 枚を図 - 8 のように組み合わせると、1 つのユニットが形成される。ユニット同士の接合部にはせん断キーはなくボルト、ナットと鉄のプレートで挟むように繋ぎ合わせ接合している。



写真 - 3 ユニートを板状に分解したもの

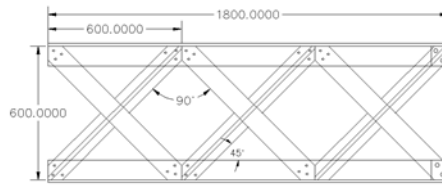


図 - 7 板状になった部材の図面

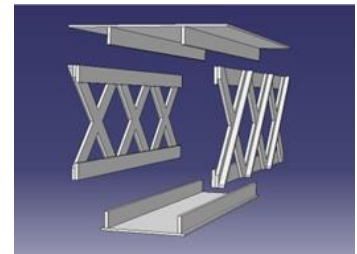


図 - 8 ユニット結合イメージパース

3.2 加工

加工の段階では、効率的に正確な部材を製作するために、写真 - 4 に示すような加工用の型枠ガイドを製作し、加工を進めた。ユニットの接合部で回転させないため、ボルトを 2 点で留める穴を開けた。クロスウェブの圧縮方向の座屈を防止するため、写真 - 5 のように圧縮力が作用する部材に座屈防止リブを備え付けた。さらに、ウェブ端部に大きなせん断力と軸力が発生するため、1.2m のせん断補強パネルで補強した。パネルはクロスウェブの連続した“X”のリズムを損なわないよう考慮し加工した (写真 - 6)。

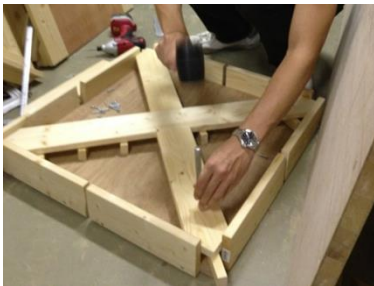


写真 - 4 ガイド



写真 - 5 座屈防止リブ



写真 - 6 せん断補強パネル

3.3 組立

組立は、約 10 名の学生で、3 時間以内の施工、1 時間以内の撤収が可能であることを目標とした。施工者はラチェットとスパナを使用して組立てた。プレストレスを与える材料にはステンレスワイヤーを用い 1/4 地点にディビーターを設置し、橋体中央部にハンドプーラーを設置し、ステンレスワイヤーとハンドプーラーを繋ぎ合わせた。ハンドプーラーによってプレストレス力を約 10kN を与えた。

4. 木製クロスウェブ構造歩道橋の各種実験

4.1 重量測定

クロスウェブ構造の軽量化の効果を把握するために、重量測定を行った。写真 - 7 に示す木製クロスウェブ構造歩道橋のウェブは、0.327kNで、設計上のすべて板構造とのモデルと比較すると約36%の軽量化が図れた。

4.2 載荷実験

橋長7.2m、支間長6.6mの木製歩道橋で載荷実験を行った。計測位置は、次の通りである。変位計は橋長1/2地点、1/4地点と1/8地点に設置した。ひずみゲージはせん断補強パネル、支間長1/8地点の圧縮と引張の部材、支間長1/4地点の圧縮と引張の部材、橋長1/2地点の橋軸上縁と下縁を選定した。荷重は、学生を最大5名(3.5kN)まで載荷した。

木材とボルトなどのなじみによる初期変位は、35mm発生し、これらの変位を除いた変位と荷重の関係を示す(図 - 9)。荷重約3.5Nを載荷したときの変位は最大で6.55mm、荷重を除荷した際に変位は最終的に0.53mmとなった。残留変位が生じるものの使用状態では、線形の履歴を捉えることができた。前述、設計値と比較すると、概ね傾向は合致したが、設計値の約2倍の実測値となった。

図 - 10 は、せん断パネルの斜め引張方向のひずみを示す。荷重約3.5Nを載荷したときのひずみは最大で 50×10^{-6} となった。せん断パネルで斜め方向のひずみが線形で捉えられている。荷重最大時では、応力が 0.56N/mm^2 発生している。

5. まとめ

本研究を通して、ものをつくるための材料実験、基礎設計、詳細設計、加工、製作と一連の流れを勉強することができた。多くの仲間と協力しながら、加工、組立、完成した時の達成感は、計り知れないものがあった。橋の設計プロセスは、地域や架橋位置に配慮しながらコンセプトを立て、創造的に模型を製作し(造形発想)、簡易実験を行い(造形と構造の融合)、数多くの解析を行い(構造発想)、部材を決定していく行為である。その行為では、かたちの美しさを求め続けることが大切だと学んだ。本研究の報告が、これから橋づくりを目指す若者の一助になれば幸いである。

[参考文献]

- 1) 遠藤大輝：クロスウェブの簡易模型を用いた基礎的挙動の研究
- 2) 森徹「木材」市川清志・梅村魁・太田博太郎・小木曾定彰・亀井勇・武基雄・蛭田捨太郎・吉阪隆正・吉武泰水：新訂建築学大系 13, 1978, 彰国社版 pp. 357-367

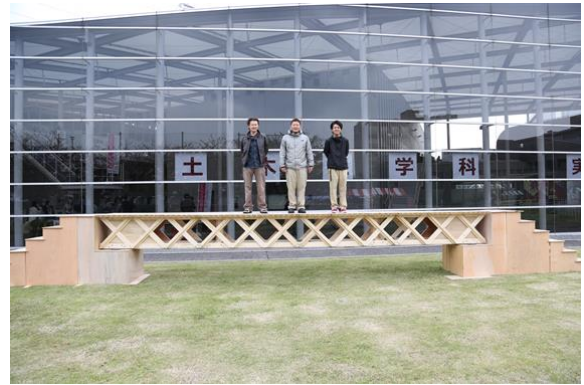


写真 - 7 木製クロスウェブ構造歩道橋

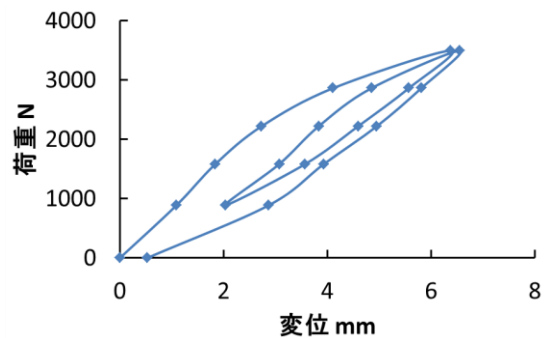


図 - 9 橋長 1/2 地点での荷重 - 変位図

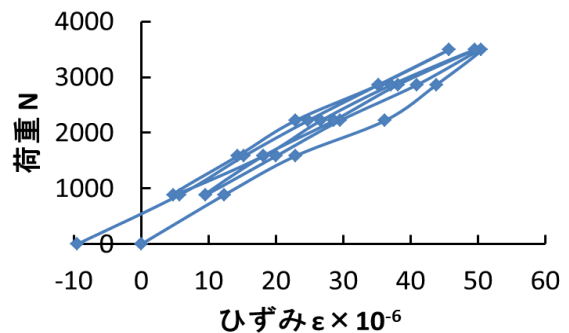


図 - 10 荷重 - ひずみ図

(せん断補強パネル斜め引張方向)