

# 報告 鋼トラスウェブ PC 模型桁の載荷試験

二井谷教治<sup>\*1</sup>・正司明夫<sup>\*2</sup>・二階堂輝幸<sup>\*3</sup>・渡瀬博<sup>\*3</sup>

**要旨**：鋼トラスウェブ PC 橋の構造特性を確認するため、模型桁を製作し静的曲げ載荷試験を行った。実験の結果、本構造形式は各部材とも軸力の卓越するトラス構造としての特性を示すが、桁の変形が進むと初期のトラス構造が変化し、断面力の分担率にも変化が生じる。曲げ性状は、トラス部材を無視した上・下床版コンクリートで構成された断面を持つはりと仮定した場合（以下はりモデル）の挙動に近いものの、構造解析を行う場合は骨組解析（以下トラスモデル）による方が正確であることが確認された。

**キーワード**：合成構造、鋼トラスウェブ、はりモデル、骨組解析

## 1. はじめに

上・下床版をコンクリートとし、腹部を鋼製部材とした合成橋梁は、コンクリートと鋼のそれぞれの特徴を活かした合理的な構造であり、フランスを中心発展してきた。最近わが国では、波形鋼板ウェブ PC 橋が施工され話題を集めている。これは、PC 箱桁のウェブをコンクリートから波形鋼板に置き換える、自重の軽減を計つたものである。同様のタイプの橋梁形式として、ウェブを鋼トラスに置き換えた鋼トラスウェブ PC 橋がある。今のところ、フランスを中心とした欧州で数橋の実績があるが、わが国における施工例はなく、適切な設計・施工指針等も見あたらない。

本研究では、鋼トラスウェブ PC 橋の曲げ性状を把握するため模型供試体を製作し、静的曲げ載荷試験を行った。その結果をもとに、本構造形式の構造特性を報告する。また、数種の解析モデルによる解析値と実験結果とを比較することにより、鋼トラスウェブ PC 橋の構造解析手法についても検討を加える。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体寸法の決定に先立ち、支間 100m、幅員 9m のモデル橋梁を想定し、概略の試設計を行った。供試体断面寸法は、その約 1/5 とし、桁高 1.1m の片側ウェブ模型桁とした。供試体の形状寸法を図-1 に示す。トラス材には H 形鋼を使用し、PC 鋼材は下床版にのみ配置した。供試体に使用した鋼材の一覧を表-1 に示す。

このタイプの橋梁では、格点構造および施工方法が重要なポイントとなる。しかしながら、本実験の場合は、桁としての性状を確認することを主目的としているため、施工性より桁の曲げ破壊時における安全度に重点を置いた格点構造とした。すなわち、図-2 に示すように、トラス材の H 形鋼をプレートをはさんで溶接した構造とし、溶接部を直接上下床版コンクリートに埋め込んだ。コンクリートの設計基準強度は  $f'_{ck} = 40 N/mm^2$  とした。

### 2.2 載荷方法

供試体は、図-1 に示すように支間 10m の単純支持とし、静的曲げ載荷試験を行った。荷重の載荷は油圧ジャッキにより行い、支間中央部に対称 2 点集中載荷した。曲げひび割れが数

\*1 オリエンタル建設（株） 技術研究所主任研究員（正会員）

\*2 オリエンタル建設（株） 技術部主任研究員

\*3 オリエンタル建設（株） 技術部研究員

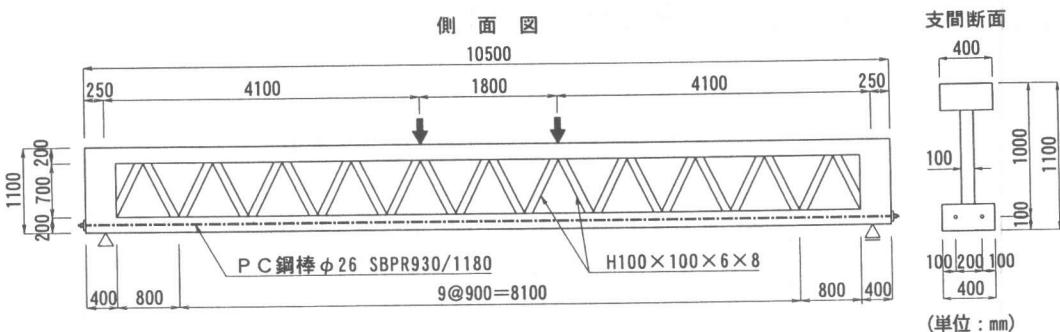


図-1 供試体形状寸法

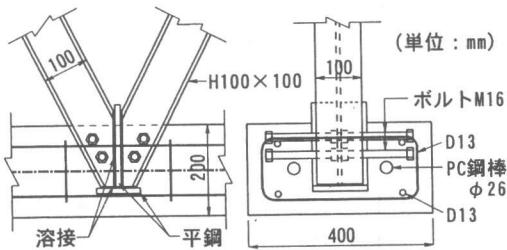


図-2 格点部の構造

表-1 使用材料

材質・記号	
鉄筋	SD345, D13
PC鋼材	SBPR 930/1180, ø26
トラス材	SS400, H100×100×6×8

本発生したところで荷重を一旦除荷し、ふたたび供試体の破壊まで荷重を単調増加した。

測定は、コンクリートおよび各種鋼材のひずみ、たわみを中心に行い、破壊耐力、ひび割れおよび破壊形態などを観察した。

### 3. 解析方法

波形鋼板ウェブPC橋の場合、ウェブの波形鋼板を無視した上・下床版コンクリートで構成された断面を持つはりモデルにより、曲げに対する設計が行われるのが一般的である。鋼トラスウェブPC橋においても、同様の仮定で設計ができるかどうかが興味深いところである。そこで本実験では、供試体の構造解析モデルとして、①はりモデル、②トラスモデル、③FEMの3種類を用いて、供試体の変位量、曲げ破壊耐力等を試算した。

はりモデルは、波形鋼板ウェブPC橋と同様に、上床版および下床版だけで曲げに抵抗するものと仮定する。すなわち、トラスウェブを無視した、上・下床版コンクリートが仮想部材で連結された断面を持つはりとして構造解析を行う。断面内では、上床版上縁から下床版下縁まで平面保持の仮定が成立するものとして、応力度あるいは曲げ破壊耐力の計算を行う。

トラスモデルは、上床版コンクリート、下床版コンクリートおよび鋼トラスで構成された骨組みとして構造解析を行う。応力度の計算は、本モデルで得られた断面力を用いて、各部材ごとに行う。

FEM解析は、材料および幾何学的非線形を考慮した。これら3種類の解析モデルの概略を図-3に示す。解析に用いる材料の物理特性値は、実測値あるいは試験成績表の値とした。上

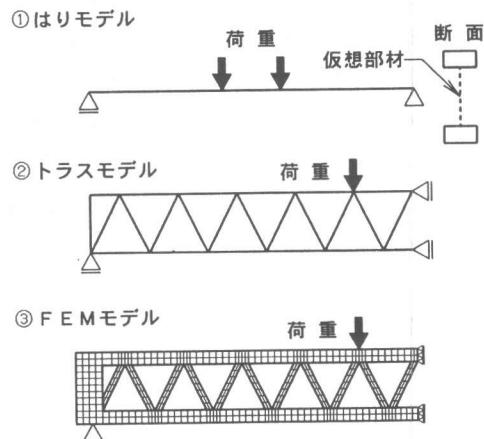


図-3 解析モデル

記3種類による解析値と実験結果とを比較しながら、本構造形式に適した曲げに対する構造解析手法についても検討を加える。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 构の変位

供試体支間中央の、プレストレス導入時のそり量および載荷試験における載荷荷重200kN時のたわみ量を、解析値とあわせて表-2に示す。なお、はりおよびトラスモデルによる解析値は、弾性理論によるものである。プレストレスは下床版の団心に約520kN導入した。プレストレス導入直後のそり量の測定値は、FEM解析による値と一致し、はりおよびトラスモデルによる解析値ともほぼ一致する。載荷荷重200kN時の支間中央のたわみ量測定値は、FEMによる解析値とほぼ一致する。トラスモデルによる解析値も実測値と比較的一致するが、はりモデルによる解析値は、実測値との間に開きが見られる。

載荷試験における、荷重と支間中央のたわみとの関係を図-4に示す。図中にFEMによる解析値も参考として示した。載荷荷重が500kN

表-2 支間中央の変位量 (mm)

	プレストレス導入時	載荷荷重200kN時
解	はり	2.7
析	トラス	2.7
値	FEM	2.5
実測値		2.5
		4.9

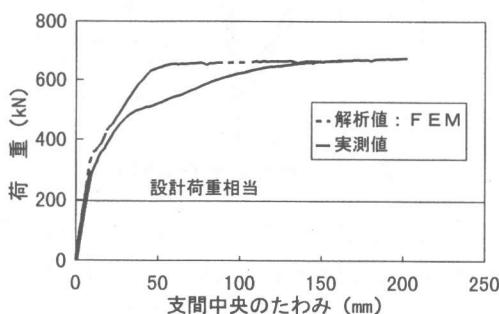


図-4 荷重ーたわみ曲線

程度まで両者は非常によく一致しているが、それ以降は解析値が過小評価となっている。

##### 4.2 断面のひずみ分布

プレストレス導入時および載荷試験における桁断面のひずみ分布も、本構造形式の構造特性を知る重要なデータとなる。そこで、コンクリート、鉄筋およびPC鋼材にひずみゲージを配置して、支間中央断面およびその他の断面のひずみを測定した。

図-5に、プレストレス導入時における支間中央断面のひずみ分布を示す。先述のように、本供試体では外ケーブルは用いず、下床版のみにプレストレスを導入した。ひずみの実測値は、断面内で上縁から下縁まで一直線上に並ぶ。3種類の解析モデルによるひずみの計算値も実測値と同様にほぼ直線となり、その値も一致した。すなわち、本供試体のようなPC鋼材配置の場合、どの解析モデルを用いても精度良くプレストレスの計算ができるといえる。なお、他の断面においてもひずみ分布を測定したが、測定値および解析値とも支間中央断面とほぼ等しい結果となったのでここでは割愛する。

一方、静的曲げ載荷試験時においては、3種類の解析モデルによる解析値に差が見られた。載荷荷重200kN時の各断面のひずみ分布を図-6に示す。はりモデルでは、上床版から下床版まで連続した断面として、平面保持の仮定のもとに解析を行うので、当然ひずみの計算値は上縁から下縁まで一直線となる。ところが、実

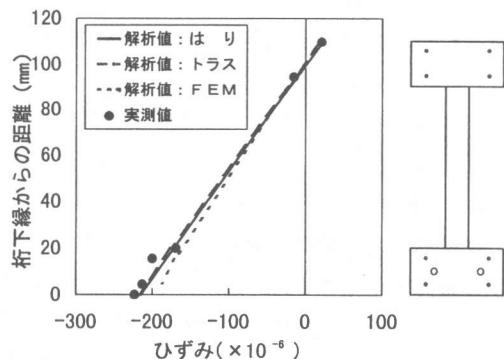


図-5 プレストレス導入時中央断面のひずみ分布

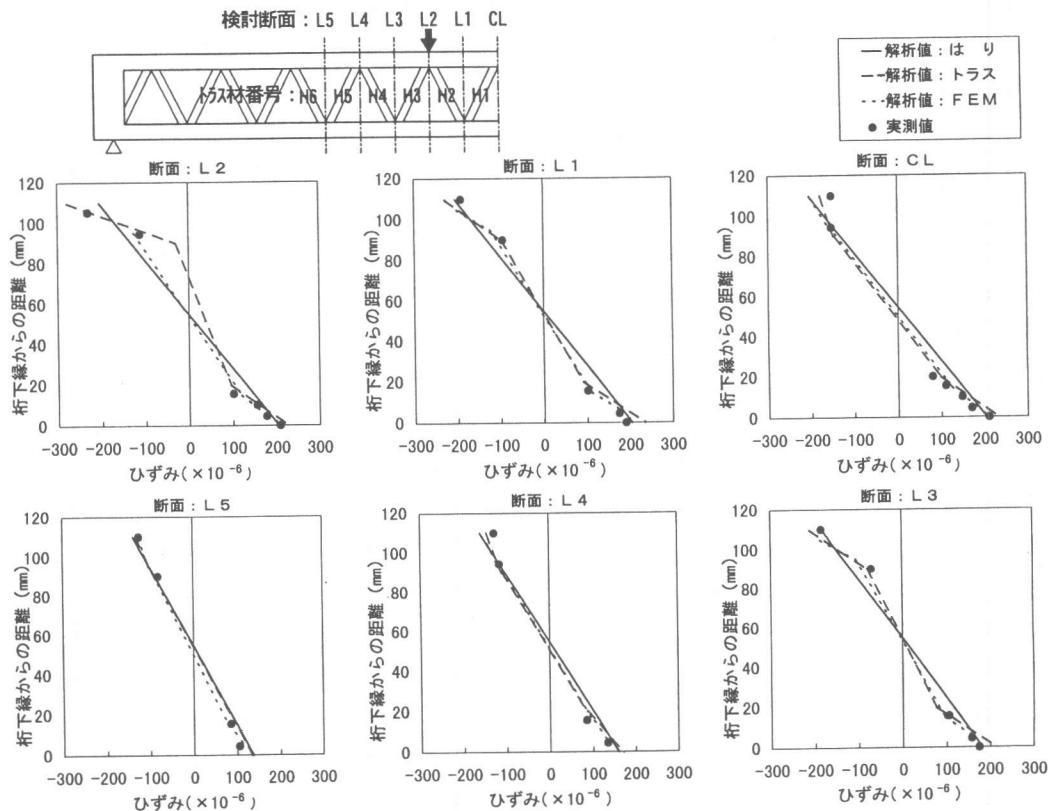


図-6 載荷荷重200kN時の各断面のひずみ分布

測定をみると必ずしも一直線状にはならず、載荷点に近い断面ほどその傾向が顕著になることがわかる。トラスモデルおよびFEMによる解析では、各断面におけるこのようなひずみ分布の傾向を表すことができ、解析値も実測値と非常によく一致している。なお、この時点でひび割れは発生していない。同様の実験により、常時荷重時は、はりモデルとして設計できるとの報告もあるが<sup>1)</sup>、常時荷重時もトラスモデルあるいはFEMによる方が望ましく、簡便さから、トラスモデルにより設計するのが最適であると考えられる。

#### 4.3 トラス部材の性状

載荷試験時の載荷荷重とトラス材であるH形鋼の軸力との関係を図-7に示す。軸力の実験値は、H形鋼の格点間中心断面の上下フランジ表面で測定したひずみの平均値を用い、実降伏強度までヤング係数一定と仮定して計算したも

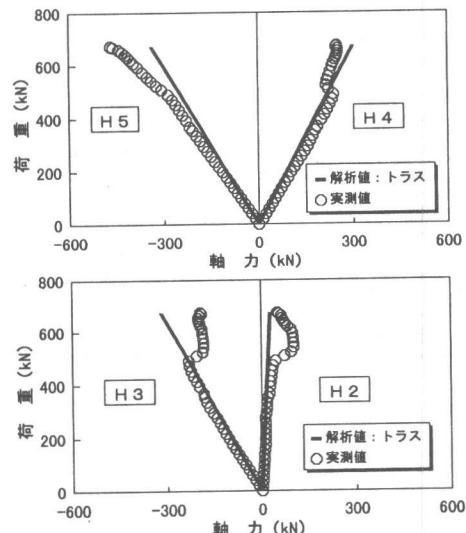


図-7 トラス部材の軸力

のである。ひずみの測定値からみると、最大荷重時でも各H形鋼とも降伏には至っていないものと思われる。一方解析値は、トラスモデルによって各荷重に対するトラス部材の軸力を計算

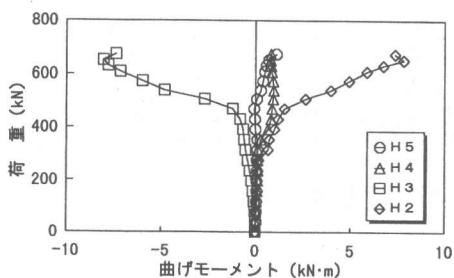


図-8 ト拉斯部材の曲げモーメント

した。なお、図中のト拉斯材番号の対応は図-6に示す。荷重が500kN程度まで解析値と実験値はよく一致するが、それ以上荷重が増加すると軸力の実験値に急激な増減が見られる。これは、図-4からもわかるように、荷重500kNあたりから桁の変形が急激に進み、ト拉斯構造の骨組み形状が変化したことによるものと思われる。

図-8は、H形鋼の上下縁のひずみ差から、作用曲げモーメントを計算したものである。載荷荷重500kNあたりから、載荷点直下のH2およびH3の曲げモーメントが急激に増加している。過大なひび割れ等による桁の変形で、2次力が増加したものと考えられる。ト拉斯モデルによる解析では、ト拉斯部材に曲げモーメントはほとんど発生しない。しかし、上述のように桁が大変形を起こしてくると、解析値よりも大きな軸力あるいは曲げモーメントが作用する可能性があり、ト拉斯部材を設計する際に注意が必要である。

#### 4.4 ひび割れ性状および破壊耐力

載荷試験時における、ひび割れ発生荷重およ

び破壊耐力の解析値と実測値の比較を表-3に示す。解析値は、先に述べた3種類の解析モデルによる値を示した。

ひび割れ発生荷重の解析値は、下床版コンクリートの下縁応力度が、表に示すコンクリートの引張強度の実測値  $f_{ct} = 3.5 \text{ N/mm}^2$  に達する時の荷重とした。なお、有効プレストレスは、プレストレス導入直後と載荷試験開始時の鋼材ひずみの差によって算定した。はりモデルによる破壊耐力は、3章に示した断面を用い、道路橋示方書<sup>2)</sup>の曲げ耐力算定方法に基づいて算定した。ト拉斯モデルによる破壊耐力の算定では、下床版はコンクリートを無視して鋼材のみを考慮した断面によって骨組みを構成した。これは、破壊荷重近くの支間中央部では、下床版の全断面が引張領域に入り、ひび割れが下床版の下縁から上縁に貫通するため、コンクリートは断面剛度にほとんど寄与していないと考えられるためである。このト拉斯モデルによる断面力を上床版、下床版、ト拉斯材の3種類の部材ごとに比較して、クリティカルとなる断面をそれぞれ決定する。上床版は曲げと軸力の作用する鉄筋コンクリート断面として耐力を計算し、下床版は鉄筋およびPC鋼材の合計引張耐力、ト拉斯材のH形鋼は降伏耐力を計算し、これらを断面力の解析値と比較することによって、全体の耐力を算定する方法である。この方法は、一つの耐力算定方法として、ある仮定のもとに試算したものであり、精度や汎用性等について不確実な要素が多いため、参考値として紹介する。

ひび割れ発生荷重の解析値は、3種類の方法

表-3 載荷試験結果一覧表

コンクリート 強度 (N/mm <sup>2</sup> )		ひび割れ発生荷重 (kN)			実測値	破壊耐力および破壊形態 (kN)			実測値
		解 析 値				解 析 値			
圧縮	引張	はり	ト拉斯	FEM	はり	ト拉斯	FEM		
49	3.5	268 (1.05)	256 (1.00)	273 (1.07)	255	562 (0.83) 曲げ圧縮	655 (0.97) 曲げ圧縮	626 (0.93) 曲げ圧縮	676 曲げ圧縮

注1：( )内の数字は解析値の実測値に対する比

注2：ひび割れ発生荷重の実測値は目視による

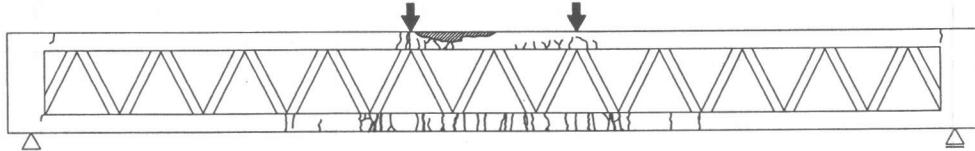


図-9 曲げ破壊時のひび割れ状況

とも実測値とほぼ一致しているが、実測値の方が多少小さくなっている。これは、載荷荷重がトラス部材を介して下床版に伝達されるため、格点近傍に大きな断面力が作用するのと2次力の相乗作用によるためだと考えられる。一方破壊耐力の実測値は、すべての解析値を上回った。トラスモデルによる解析値は、実験値とよく一致している。FEMによる解析値も比較的一致しているが、はりモデルによる解析値は、実測値に対して17%程度の過小評価となつた。これらの結果から本実験の範囲内で考えれば、本構造形式の解析方法としては、常時荷重時と同様に終局時に関しても、はりモデルよりトラスモデルあるいはFEMによる方が正確であると言える。もちろん先述のように、トラスモデルによる終局耐力の算定方法は確立されたものではなく、今後の検討が必要である。また、はりモデルによる解析でも多少の誤差は生じるもの、安全側の評価となる。

終局時の破壊形態は、解析結果および実験結果とも上床版コンクリートの曲げ圧縮破壊であった。図-9に曲げ破壊時の供試体のひび割れ状況を示す。桁端の隅角部に発生したひび割れを除き、曲げひび割れのほとんどは支間中央部に集中している。上床版に着目すると、破壊時には上床版も引張領域に入っていることがうかがえる。また、載荷点の格点近くのひび割れは、格点間のひび割れより上縁近くまで延びているが、格点部の2次力による影響と思われる。次に下床版に着目すると、載荷点直下の格点部のひび割れ本数が多く、破壊時のひび割れ幅も1cm以上とかなり大きい。これも、載荷荷重がトラス部材を介して下床版に伝達されることと、2次力の相乗作用によるためだと考えられ

る。

## 5.まとめ

本実験の範囲内では、次のような結果が得られた。

- (1)鋼トラスウェブPC桁は、各部材とも軸力の卓越するトラス構造としての特性を示す。
- (2)しかし、桁の変形が大きくなると初期のトラス構造の骨組み形状に変化が生じ、断面力の分担率が変化するとともに2次力も増加する。
- (3)したがって、破壊時には、トラス部材に弾性解析値より大きな断面力が作用する可能性があり、設計時に考慮する必要がある。
- (4)曲げ挙動は、はりモデルで近似できるものの、構造解析を行う場合はトラスモデルによる方が正確である。
- (5)曲げひび割れは、そのほとんどが載荷点あるいは載荷点直下の格点間に発生し、破壊時には、格点部のひび割れ幅はかなり大きくなる。

解析時における外ケーブルおよびクリープ・乾燥収縮の取扱い、格点部あるいは床版の設計方法の確立などが今後の課題である。

## 参考文献

- 1)大澤浩二・川上洵・劉新元・佐野ユミ子：鋼トラスウェブPC梁の静的載荷試験、プレストレストコンクリート技術協会第7回シンポジウム論文集, pp.757-760, 1997.10
- 2)社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋編, pp.116-126, 1996.12