

投稿論文 (和文)
PAPERS

高強度コンクリートを有効利用してPC橋を 軽量化する新構造の提案

則武邦具*・島 弘**・河野 清***

本論文では、高強度コンクリートを用いたプレキャスト製のスラブ部材とトラス状ウェブ部材を、プレストレスによる2次応力が発生しないように接合して一体化する新しい構造（スラブトラス構造）を提案し、その力学特性を把握するために、大型模型による載荷試験とせん断伝達機構の載荷試験を行った。さらに、従来の構造との比較設計を行って、本構造が合理的な構造でPC長大橋を軽量化する実用的な構造であることを実証した。

Key Words: high-strength concrete, prestressed concrete, weight reduction, precast concrete, slab-truss structure

1. 緒 言

土木分野におけるコンクリート構造は、プレストレストコンクリート（以下PC）の発明によって飛躍的な発展を遂げてきた。PCは、1928年にフランスの E. Freyssinetによって初めて実用化され、我が国へは1949年頃紹介された。続いて、1958年には片持ち張出し工法（ディヴィダーク工法）がドイツから導入されて以来、長大径間のPC橋が可能となり、これまで様々な形式の大規模なPC橋が建設されている。長大橋の場合、コンクリートの重さは欠点ともなり、今後のPC橋の発展にとって軽量化は重要な課題である。最近になってこの欠点を克服するために様々な創意工夫がなされている。

高強度コンクリートの応用もそのひとつである。PC橋梁でのコンクリートの高強度化^{1)・2)}は、部材の軽量化、スリム化につながり、スパンの長大化が期待できる。すなわち、橋体自重が軽減し、設計断面力の70~85%を占める自重による断面力が減少する。また、橋脚、基礎工など下部構造への負担も軽くなり、構造全体として使用材料の減少につながり経済的となる。

一方、構造物の施工という観点で、近年の若年労働者の不足、熟練技能工の高齢化、建設作業の環境保全といった社会情勢から、施工の合理化、機械化や急速施工が要請されており、その解決策のひとつとして、プレキャストブロック工法^{3)~8)}があげられる。この工法を考えるうえで、部材の軽量化はプレキャストブロックの製作や運搬・架設の効率化につながる。

そこで、本論文では、80MPa~100MPa程度の高強度コ

ンクリートを用いたプレキャスト製の上下床版部材とトラス状ウェブ部材を、プレストレスによる2次応力の発生を低レベルに抑えるように組立てるプレキャストブロック工法による新しい構造を提案するものである。提案にあたっては、本構造の力学特性を把握するため大型模型による載荷試験とせん断伝達機構の載荷試験を行い、さらに、3径間連続形式の実構造で従来の構造との比較設計を行って両者の得失を明らかにし、本提案がPC長大橋の軽量化に有効な構造であることを実証する。

2. 従来の構造を軽量化するうえでの問題点

PC橋の軽量化を意図して、高強度コンクリートを用いたプレキャストブロック工法の適用を考えた場合、従来の構造では次の様な問題点が挙げられる。

(1) PC箱桁構造

PC箱桁構造のウェブ厚さは、曲げ応力度やせん断耐力によってその寸法が決定されているのではなく、PC鋼材の配置間隔やコンクリート打設時の振動締め機の挿入空間、かぶりの規定値などの構造細目によって決定されているのが一般的である。

また、箱桁構造で部材を薄くすると、断面剛性が低下して耐力は大きくできてもその変形も大きくなり、たわみや振動が問題となることもある。

PC箱桁橋をプレキャストブロック工法で架設する場合、各ブロックの重量は25~80tonと大きく、運搬や架設が架橋地点の諸条件に大きく制約されることになる。

また、これらの架設法のほとんどは従来の箱桁断面を橋軸直角方向に分割したプレキャスト部材を組立てる方式であり、プレキャストブロック工法の特長を生かせるように断面構成や構造を考案した例は少ない。

(2) ウェブを鋼にした合成構造

この構造は、鋼製ウェブの橋軸方向剛性が高いために、床版コンクリートに導入するプレストレスの一部が鋼製

* 正会員 徳島大学大学院工学研究科博士課程生産開発工学専攻〔住友建設(株) (〒770 徳島市南常三島町2-1)

** 正会員 工博 徳島大学助教授工学部建設工学科

*** 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科

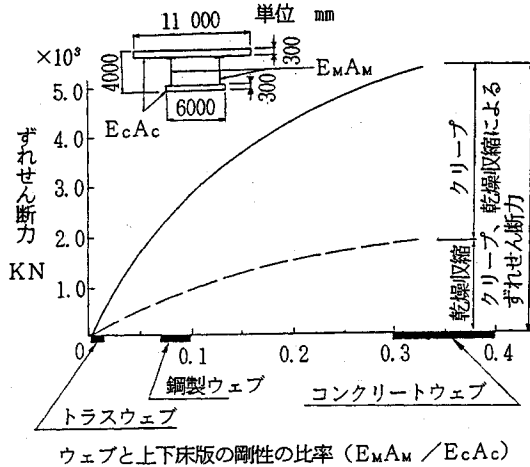


図-1 クリープおよび乾燥収縮によるずれせん断力

ウェブに拘束され、十分なプレストレスが導入できなくなる⁷⁾。加えて、クリープおよび乾燥収縮の進行に伴って導入プレストレスがさらに鋼製ウェブへ移行する。この導入プレストレスの移行により、鋼ウェブとコンクリートの接合部には大きなずれせん断力が発生する(図-1)。

鋼製ウェブのこのような問題を解決する方法として、鋼ウェブを波形状(ブリーツ)に加工して、軸方向の自由な変形を許した構造が提案されている。この構造は、波形ウェブが橋軸方向に自由に変形して剛性がないため、ねじり剛性やせん断剛性をどのように評価するか、あるいは、ねじりモーメントやせん断力が同時に載荷された場合の応力状態をどう考えるかなど、解明されなければならないことも多い。

前記2例のほかに、コンクリートの上下床版を鋼トラスで結合した構造⁸⁾も提案されているが、鋼とコンクリートの異種の部材が接合するトラス格点としての力の伝達はかなり複雑となる。

(3) PCトラス構造

トラス構造は、軸力が卓越する構造であり、引張部材にプレストレスを導入することで全ての部材を圧縮部材として利用でき、小断面の部材を組み合わせることで断面上の贅肉が省け軽量化が図れる。したがって、PC橋のスパンの長大化には比較的有利な構造と言える。過去に施工されたPCトラス橋^{9)~14)}は、トラス構造と床組が非合成である構造が主流である。これは構造解析が容易であるためと思われるが、この全体構造系では床組は抵抗部材とならず、単に荷重の増加にしかならない。また、ねじりに対しては対傾構なども必要である。したが

って、トラス自重はPC箱桁に比べて20%程度重くなっている。

トラス構造は、構成部材が多く各々のトラス部材がプレストレスの導入を相互に拘束するため、2次応力が発生しプレストレスの効率が低下する。まだ実施例は少ないが、Bubiyán橋やSylans, Glacières橋^{15), 16)}などのように床版とトラス部材を合成した構造(以下合成トラス)もあるが、プレキャスト部材が組立てられた後にプレストレスを導入するために大きな2次応力が発生し、部材断面が縮小できず軽量化を妨げている。

また、従来のプレキャストトラス橋では、部材組立て時の施工誤差を吸収するため格点部を場所打ちコンクリートとしているが、その強度はプレキャスト部材と比べて低いため高強度コンクリートの部材を十分に活かさない。

このように、従来のトラス構造では、高強度コンクリートを利用しているにもかかわらず、その特性を活かした軽量化には至っていないのが現状である。

3. 新しい構造の提案

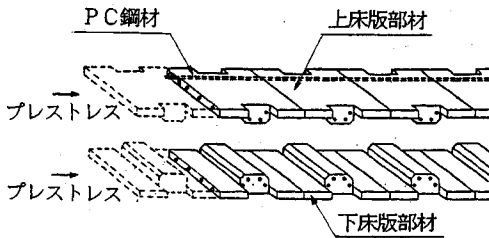
高強度コンクリートを有効利用してPC橋の軽量化をはかるためには次のような構造が考えられる。

- (1) 高強度コンクリートの圧縮強度を十分活かすことで部材断面を縮小でき、しかも全体構造としては断面係数の効率が低い構造とする。
- (2) プレストレスの導入によって発生する2次応力ができるだけ低レベルに抑え、導入したプレストレスの減少量を少なくできる構造とする。
- (3) 高精度化、高品質化が容易に行えるように工場製品でプレキャスト化をはかり、かつ、場所打ち部を必要としない接合構造とする。

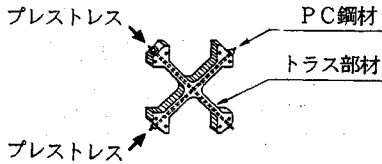
そこで、ここに提案する新しい構造は、トラス構造の弦材、横梁、対傾構および床組を一つの要素に置き換えた上下の床版(スラブ)部材と、ウェブに相当するトラス部材で構成する構造(以下スラプトラス構造)である。各々の部材は高強度コンクリートを用いてプレキャスト部材とし、製作、運搬、架設を考慮して適当なユニットに分割する。以下、プレキャスト部材の組立手順(図-2)と本構造の特徴を記す。

① あらかじめプレキャスト部材(床版、トラス)ごとにプレストレスを導入する(図-2.(i),(ii))。このような手順で組立てるので、各々の部材は無拘束の状態ではプレストレスが導入される。この場合、任意断面の上下床版に導入するプレストレス量は、プレストレスによって生ずる上下床版のひずみが等しくなるような量とする。したがって、構造系が完成した後コンクリートのクリープによって生じる2次応力は、プレキャスト部材の

(イ) 上下床版組立、プレストレス導入



(ロ) トラス部材、プレストレス導入



(ハ) トラス、床版部材組立

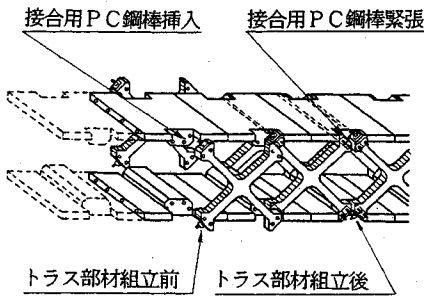


図-2 プレキャスト部材の組立て方法

形成後にプレストレスを導入する従来の方法によるものよりも低レベルに抑えることができる。

② プレキャスト部材間の接合は、直角方向に配置したPC鋼材(図-2.(ハ))のプレストレスによる部材間の摩擦接合である(図-3)。この接合法では、従来の格点部を場所打ちコンクリートとするのに比べて、部材仮受けの支保工なども必要がないので施工が省力化できる。また、組立て後は場所打ちコンクリートの硬化を待つことなく次の架設に進むことができ、プレキャストブロック工法の急速施工が可能となる。接合部は組立て後、遊間部に充填材(無収縮モルタルなど)を注入して隣接トラス部材を一体化させる。

③ 全ての部材は、工場製品のプレキャスト部材とすることで、高強度コンクリートの品質管理を十分行うことができる。また、クリープや乾燥収縮の値を小さくコントロールすることができる。

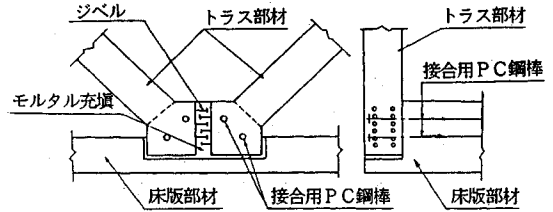


図-3 床版、トラス接合部構造の一例

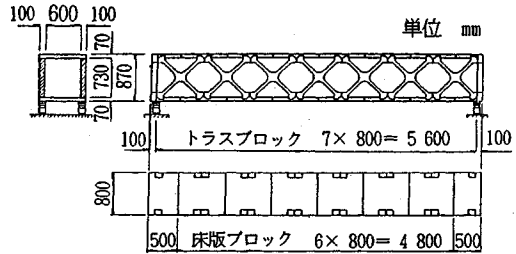


図-4 供試体の形状、寸法

4. 全体模型試験

(1) 供試体

a) 設計

供試体の破壊モードは、集中荷重の偏心荷重によるねじりを加えたせん断破壊を目標とし、トラス部材のPC鋼材の引張降伏が、床版の破壊およびトラス部材の圧縮破壊よりも先行するように設計した。

実験に使用した供試体は、図-4に示すような支間5.6m、構高0.87m、上下に床版を有し、鉛直部材のないダブルワーレントラスタイプの構造形式である。

部材は、幅80cm、厚さ7cmの上床版、下床版の各8ブロック(標準ブロック6、端部ブロック2)、6cm×10cmのトラス部材の片面7ブロック(両面14ブロック)と支点部横桁(場所打ち)から構成されている。組立て方法は、床版およびトラス部材とも相互間に拘束を受けない状態でプレストレスを導入した後、上下床版とトラス部材とを接合し構造物として一体化する。

接合部は、床版とトラス部材をPC鋼棒で締めることによって、そのプレストレスの摩擦で固定する構造とした。すなわち、トラス部材に発生している軸力を接合用PC鋼棒のプレストレスによる摩擦力で一旦床版部に伝え、同様の摩擦力でさらに隣り合ったトラス部材に軸力として伝える構造とした。部材間の摩擦係数 μ は、エポキシ樹脂接着剤を用いた接合の場合一般的には $\mu=1.0$ 程度を期待できる¹⁷⁾が、ここでは安全率を2.0として $\mu=0.5$ で設計する。

また、立体トラスとして行った構造解析ではトラスと床版の結合条件は剛として行っており、トラス部材には

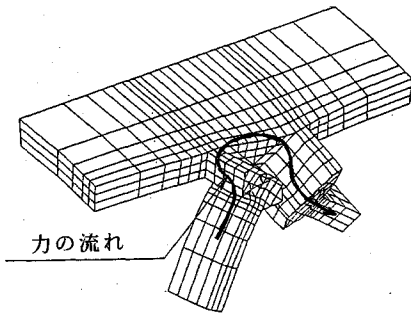


図-5 接合部FEM解析モデル

表-1 モルタル配合表

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	HWRA (kg/m ³)
34	240	706	1392	10.6

局部的に小さな曲げモーメントが発生するが、これに対してはトラス部材に補強筋を配置した。

さらに、接合部付近の応力状態を解析するために、接合部のトラス部材（引張材，圧縮材）と床版部材をとりだしたモデルで3次元FEM解析を行い，その結果から接合部鋼棒の緊張力および局部的な部材の補強を行った（図-5）。

モルタルの設計基準強度は80MPaである。PC鋼材はPC鋼棒（SBPR1080/1230）を使用した。

b) 作製

供試体の各ブロックはモルタルで作製した。実験に使用したモルタルの配合を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメント（比重3.14），細骨材は川砂（比重2.60，吸水率1.90%，粗粒率2.82），混和剤はナフタリン系高性能減水剤（HWRA）（比重1.20）を添加した。上下床版とトラス部材の接合部横締めにはPC鋼棒φ13mm，トラス部材にPC鋼棒φ11mmを配置した。鉄筋はSD295 D6mmを用いた。

供試体は，図-2に示す実構造物と同様の要領で，床版部材，トラス部材ごとにあらかじめプレキャストブロックで作製し，その後組立てる方法をとった。

プレキャスト部材の組立て手順は，まず上下床版を支保工上に並べ，床版のPC鋼棒を緊張した後，プレストレスを導入したトラス部材を床版の接合用切欠き部に側面からはめ込み，接合部PC鋼棒により接合する。その際，接合面にエポキシ樹脂系接着剤を塗布してせん断力の伝達を確実にした。PC鋼棒は緊張後グラウトを注入した。この方法によると，組立て時にはプレキャスト部材の作製誤差を吸収でき，部材組立てが容易に行える。

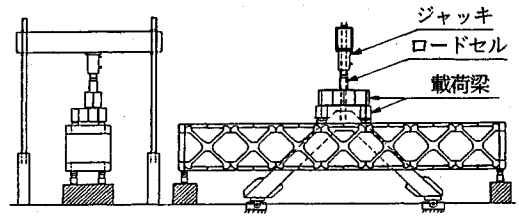


図-6 載荷方法

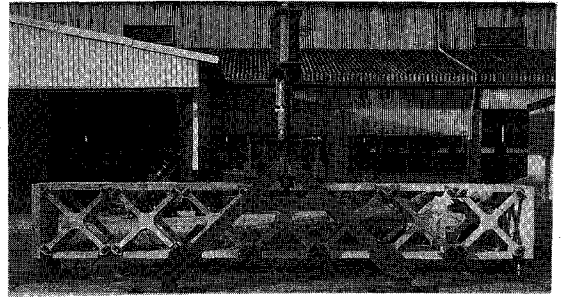


写真-1 載荷装置

(2) 載荷試験

a) 試験装置

図-6および写真-1に示す載荷装置で2点載荷による静的載荷試験を行った。供試体におじりを作用させるため，橋軸方向の載荷梁を橋軸中心からずらして配置することによって偏心載荷させた。

b) 載荷方法

荷重載荷パターンは，最初にひびわれ荷重まで載荷し，一旦除荷した後，ひびわれ荷重を越えて載荷した。弾性挙動，ひびわれ荷重，ひびわれ位置を確認した後除荷し，さらに，最終的に終局荷重状態（引張斜材PC鋼棒の降伏）まで載荷して，終局せん断力，破壊モードを確認した。

c) 計測項目，使用機器および計測方法

載荷試験の計測項目，使用機器および計測方法を以下に示す。

- ・載荷荷重，支点反力 …… 供試体上の油圧ジャッキと供試体支承位置に配置したロードセルで計測。
- ・下床版格点変位 …… 左右のトラスと下床版の格点部に設置した変位計（ダイヤルゲージ）で計測。
- ・床版のコンクリートおよびPC鋼棒のひずみ …… 上下床版の支間中央部のコンクリートひずみと下床版PC鋼棒のひずみを表面に張りつけたひずみ計で計測。
- ・トラス部材のコンクリートおよびPC鋼棒のひずみ …… 引張，圧縮トラス部材のコンクリート表面のひずみ計と最大引張力の作用するトラス部材のPC鋼棒のひずみ計で計測。
- ・トラス，床版接合部およびトラス部材交点の局部ひずみ

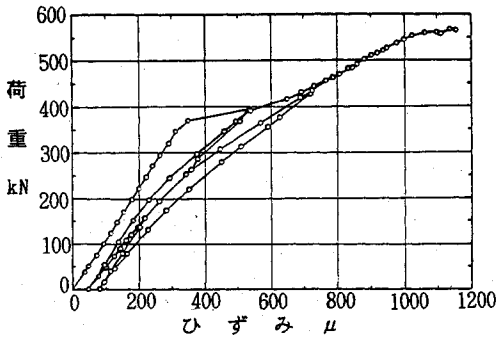


図-7 荷重-ウェブPC鋼棒のひずみ関係

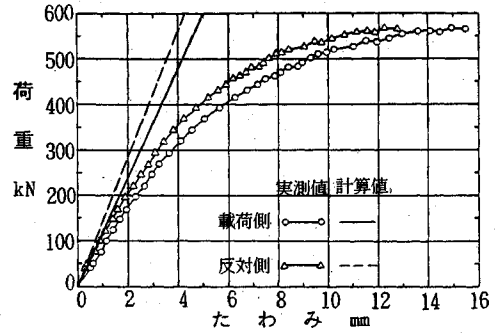


図-9 荷重-たわみ関係

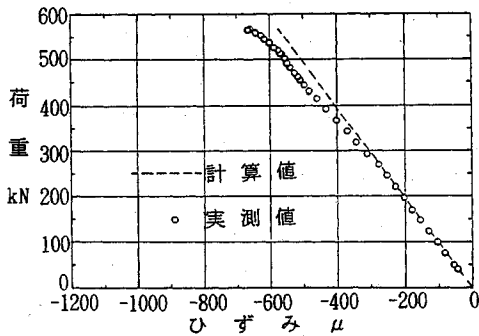


図-8 圧縮トラス材の荷重-モルタルひずみ関係

み コンクリート表面のひずみ計で計測.

(3) 試験結果および考察

a) トラス部材のひずみ

最大引張力が作用するトラス部材におけるPC鋼棒のひずみと載荷荷重との関係を図-7に示す。計測したトラス部材はLOAD=350kNでひびわれを生じた。トラス部材のPC鋼棒は、ひびわれ発生後に引張力のすべてが作用するため応力が急激に上昇し、載荷荷重 560kNで降伏した。このトラス部材の挙動は、PCで補強された通常のウェブのせん断ひびわれの挙動ではなく、トラス部材の純引張に近い性状を示している。

最大圧縮トラス部材における荷重-モルタルひずみ関係を図-8に示す。圧縮トラス部材のひずみは、引張トラス部材にひびわれが生じはじめる荷重レベル (LOAD = 350kN) から値が大きくなり、終局荷重状態では理論値よりかなり大きくなっている。これは、引張トラス部材のひびわれ発生によって剛性が低下したため、トラス部材に作用している軸力が再分配され、圧縮トラス部材に集まったためと考えられる。

上下床版のひずみの実測値は、3次元FEM解析の結果と比べ、上下面の平均応力度ではよく一致しているが、上下面の各々の応力度は異なっている。これは、床版が軸力部材とはいえ、局部的には、曲げの影響を受けてい

るためと考えられる。

b) 変形

支間中央近傍における下床版の断面左右の鉛直変位と荷重の関係を図-9に示す。トラス部材にひびわれが生じはじめた荷重レベル (LOAD=350kN) までは変位量の左右の差は小さい。このねじりによる変位量の差は、上下床版を含むそりねじりを考慮した計算値とよく一致している。

変位量は荷重が比較的小さい段階から計算値より多少大きく、荷重が大きくなるにつれて計算値より大きくなっている。

これは、解析モデルではトラス部材と床版の接合部を完全固定と仮定しているが、現実には、荷重が比較的小さなレベルから接合部に若干の回転が生じていることによるためと思われる。また、荷重が400kN以上では、ひびわれによるトラス部材の剛性の低下および床版接合部のひびわれによる塑性的な回転によって、変形量が急激に大きくなっている。

c) 構造物としての耐力

最大の引張力が生じるトラス部材のPC鋼棒は、降伏荷重の理論値 520kNに対して、実測値 560kNで降伏し、全体構造をトラス構造として解析した理論値とよく一致した。

床版とトラス部材の接合部は、設計荷重状態において大きくずれることなく十分耐力があった。ただし、終局荷重状態においては、床版の接合部近傍にひびわれが発生した。

これは、床版とトラス部材の接合部が摩擦のみに期待した構造であるため、トラス部材の圧縮力が一旦床版の接合部近傍に伝達され、再び、接合部を通して隣接するトラス部材の引張力として伝わることによって、床版接合部に大きな局部応力が生じてひびわれが発生したと考えられる (図-5参照)。

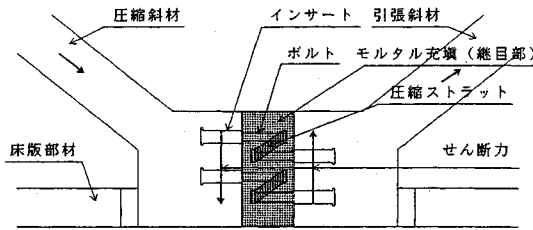


図-10 せん断力伝達機構

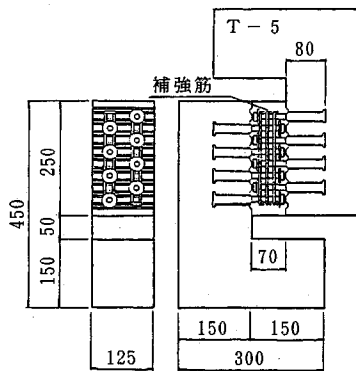


図-11 供試体形状、寸法

表-2 実験条件

供試体	ボルト径 N (本)	ボルト数 q (%)	かさ面積 A _{bc} (cm ²)	打継ぎ面 の状態	継目部の 鉄筋比 p (%)	打継ぎ面 の角度 θ
T-0	M12	8	2.4	直 面	0	0
T-1					2.19	
T-2					10.39	
T-3				凹凸	6.5	
T-4					0	
T-5					4.3	
T-6					0	
T-7	22.5					

5. せん断伝達機構載荷試験

(1) 実験の目的

前章の全体模型載荷試験の結果を反映させて、接合部の構造にトラス部材間で直接せん断力を伝達する機構を付加する。すなわち、隣接したトラス部材をインサートボルトと高強度モルタルで一体化することによって、一方のトラス部材の軸力の鉛直成分(せん断力)を隣り合ったトラス部材へ直接伝達する機構とする(図-10)。

本試験では、トラス部材間のせん断力の伝達機構を明確にするとともに、耐力を定量的に算出するために、ボルト頭部の座金、打継ぎ面コンクリートの処理形状、補強鉄筋量および打継ぎ面の角度をパラメータにとり、それらを組合せた供試体で載荷試験を行った。

(2) 供試体

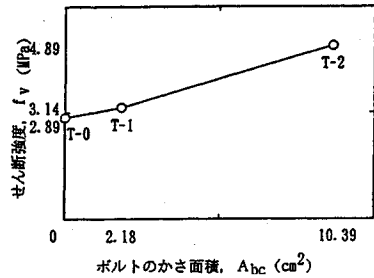


図-12 せん断強度とボルトのかさ面積関係

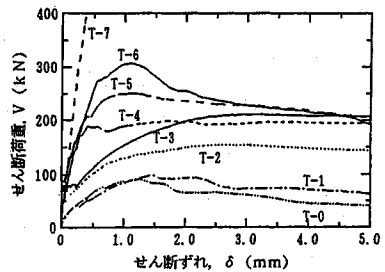


図-13 せん断荷重-せん断ずれ関係

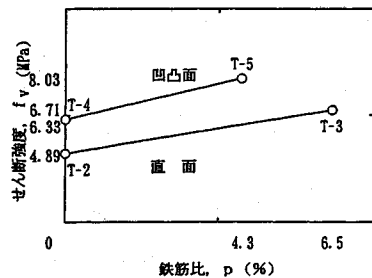


図-14 せん断強度-鉄筋比関係

供試体の形状および寸法を図-11に示す。隣接部材の遊間部(継目部)には高強度モルタルを注入した。

実験要因としては、①ボルト頭部の座金の有無、②打継ぎ面コンクリートの処理、③ボルト直角方向の補強鉄筋の量、④載荷軸方向と打継ぎ面の角度の4項目とし、実験条件を表-2に示す。

供試体および遊間部に使用した高流動の高強度モルタルの設計基準強度は80MPaである。また、ずれ止めとして使用したボルトは、φ12mm(M12)でネジ切り長さ70mmのものを用いた。

(3) 試験結果および考察

a) ボルト頭部の座金かさ面積による影響

かさ面積による効果としてせん断強度とボルト1本当たりのかさ面積の関係を見ると、せん断強度はかさ面積に比例して増加する(図-12)。

b) 打継ぎ面の処理による影響

打継ぎ面を凹凸にすることにより、打継ぎ面の付着強

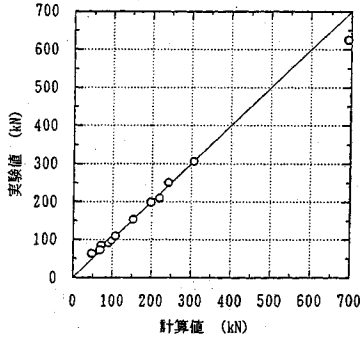


図-15 実験値と計算値の対比

度が増加し、ブロックと継目部のせん断ずれは抑制され一体化する(図-13)。

c) 補強筋による影響

継目部のせん断補強として、ボルトに対して直角方向(載荷軸方向)に補強鉄筋を配置した供試体の破壊性状は、ブロック内のインサート近傍のコンクリートの圧壊であった。また、打継ぎ面の状態と補強鉄筋による影響を表したせん断強度と鉄筋比の関係から、補強鉄筋比の増加は確実にせん断強度の増加につながると考えられる(図-14)。

d) せん断耐力式の提案

せん断耐力 V_u は、ボルトにより受け持たせるもの V_b とコンクリートのひびわれ面でのせん断伝達力 V_c および補強筋によるもの α の累加で表すこととする。

V_b および V_c は、それぞれ、ダウエル効果によるFisherらの提案したスタッ式¹⁸⁾、コンクリート標準示方書(土木学会)のせん断伝達耐力式¹⁹⁾を参考にし、 α については実験結果を基にしてコンクリート強度80MPa程度のモルタルを用いた場合の V_u を求めると次式²⁰⁾を得る。

$$V_u = 1.3N A_b \sqrt{f_c} + 0.098(N-1) A_{b,c} \sqrt{f_c} + \mu(91p + \sigma_n) A_c + 1053q$$

$$(\mu = 0.0085 \sqrt{f_c})$$

N : 各ブロックのボルト本数(本)

A_b : ボルト断面積 (cm²)

f_c : コンクリートの圧縮強度(MPa)

$A_{b,c}$: ボルト頭部、座金によるボルト以外のかさ面積 (cm²)

p : ボルト面積比

σ_n : 垂直圧縮応力(MPa)

q : せん断補強鉄筋比

A_c : せん断面断面積 (cm²)

以上、実験値とこのせん断耐力式による計算値の比は図-15に示すように0.90~1.37の範囲で満足している。

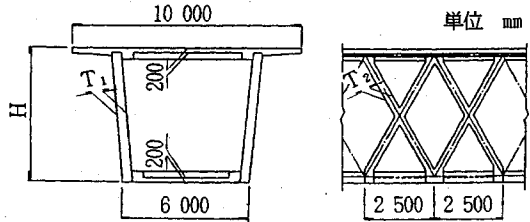


図-16 構造図

表-3 構造主要寸法

検討タイプ	スラブトラス構造			合成トラス構造			
	支間 (m)	50	75	100	50	75	100
橋高 H (m)	3.3	5.0	6.7	3.3	5.0	6.7	
床版厚 t (cm)	上床版	20	20	20	27	27	27
	下床版	20	20	20(30)	27	27	27(35)
断面積 A (m ²)	上床版	2.24	2.40	2.60	3.03	3.18	3.40
	下床版	1.44	1.60	1.80	1.95	2.10	2.32
トラス T _{1,2} (cm)	30×30 (35)	40×40	45×50	40×55	50×60 (70)	60×70 (90)	

() 内は支点上の床版厚およびトラス部材幅

e) 本機構のトラス部材接合部への適用

本機構をトラス部材の接合部へ適用することにより、隣り合ったトラス部材は一体化し、トラス部材の軸力の鉛直成分は直接伝達される。そのため、床版の接合部を経由して伝達される力は、トラス部材の軸力の水平成分と床版の荷重のみとなり、接合部を経由して伝わる力は大幅に低減される。そこで床版接合部にひびわれを生じさせた局部応力を小さな値に抑えることができる。また、本機構を適用することで接合部の塑性的な回転が発生せず、過大な変形を抑えることができる。

6. 実構造物における有効性の検討

(1) 対象とした構造物

a) 設計条件

試設計で対象とした構造は、本論文で提案したスラブトラス構造とBubiyanc橋やSylans, Glacières橋のような合成トラス構造で、その断面力、プレストレス力、使用コンクリート量、PC鋼材量について比較検討する。

断面は標準的な幅員10.0mの道路橋とする。構造形式は上路式の3径間連続橋とする。橋梁の規模としては、構造の適用性を検討するため、中央支間を変えた3タイプ(50m, 75m, 100m)で試設計を行う。なお、側径間では中径間の8割とした。架設は押し出し架設とする。

標準的な構造図を図-16に、主要寸法を表-3に示す。この場合、PC鋼材は全て部材内に配置する。なお、橋軸方向のトラス間隔はプレキャスト部材の製作、運搬を

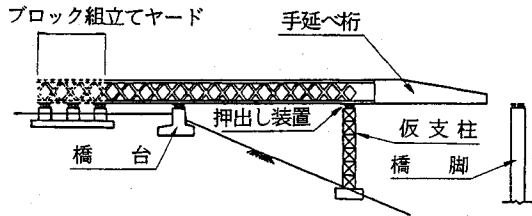


図-17 架設要領図

考慮してすべて2.5 mとする。支点部はトラス部材間を充填して壁構造とする。また、橋軸直角方向の剛性に対しては中間横桁（プレキャスト部材）を25m間隔に配置している。

なお、使用コンクリートは、スラブトラス構造では $f_{ck} = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ (98.0MPa)の高強度コンクリートを、合成トラス構造は床版部の場所打ちを考慮して、実績からも $f'_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ (39.2MPa)とした。設計荷重作用時の許容曲げ圧縮応力度は、高強度コンクリート設計施工指針（案）（土木学会）を参考にして、それぞれ $f'_{cs} = 250 \text{ kgf/cm}^2$ (24.5MPa), $f'_{cs} = 140 \text{ kgf/cm}^2$ (13.7MPa)とした。

b) 架設方法

スラブトラス構造の架設要領を簡略に以下に示す。

プレキャスト部材の組立てを橋台背面の組立てヤードにて行い、上床版、下床版の部材を別々に組立てて橋軸方向のプレストレスを導入した後、あらかじめプレストレスを導入したトラス部材を上下床版の間に配置し、接合用鋼棒で一体化する（図-2参照）。単位押し長は4ブロック（10m）とする。組立て終わった部材は、押し装置により前方へ移動し、順次同じ作業を繰り返しながら押し出す（図-17）。

これに対して合成トラス構造では、プレキャストトラス部材と、場所打ちコンクリートの上下床版とを一体にした後、橋軸方向に並べてプレストレスを導入する。

押し出し架設に際して仮支柱は各径間に1ヶ所設置する。押し出し桁先端には仮支柱支間の1/2の長さの手延べ桁を取り付け、施工時の断面力を低減する方法をとる。

なお、主桁押し出し架設中に支点を通過するトラス部材に大きな圧縮応力が作用するため、トラス部材は架設中の圧縮応力についても許容値に収まるよう寸法を決定した。

(2) 解析結果

a) 断面力

スラブトラス構造の部材断面力の算出にあたっては、部材格点を剛結合とし、各部材に軸力と曲げモーメントおよびせん断力が作用するトラス構造として構造解析を行った。

表-4 主要断面のPC鋼棒配置本数

検討タイプ	スラブトラス構造			合成トラス構造			
	支間(m)	50	75	100	50	75	100
側後間	上床版	24(10)	42(18)	60(26)	(14)	(24)	(38)
	下床版	18	28	42	26	40	62
支点	上床版	24	42	64	22	42	70
	下床版	16(6)	28(12)	44(18)	(16)	(22)	(32)
中後間	上床版	24(10)	42(18)	60(26)	(14)	(24)	(38)
	下床版	20	30	42	32	48	70
トラス		4(2)	6(4)	8(4)	4(2)	6(4)	10(6)

()内は押し出し架設時必要本数により配置

スラブトラス構造では、高強度コンクリートを使用していることおよびプレストレスによる2次応力が発生しないことにより、部材の寸法を大幅に縮小することができ、その結果、自重による断面力が減少した。設計荷重作用時での部材軸力の減少率は、合成トラス構造に比べて支間50mで18%程度、支間100mで25%程度と、支間の長大化につれて大きくなりその差が広がっている。

b) プレストレス量

完成系で算出した断面力と、押し出し施工時の断面力に対して主要断面における必要PC鋼棒(SBPR930/1230)φ32mm(緊張力50t/本)の本数を表-4に示す。

スラブトラス構造のPC鋼材の配置にあたっては、まず、床版部材では任意の設計断面で上下床版に必要な本数を部材の引張力に対して算出する。この時、これに対応して上、または下床版にはほぼ同一ひずみとなるようなPC鋼材を配置して、部材の圧縮応力度の照査を行う。次に押し出し架設中の必要PC鋼材本数も同様の考え方で算出する。

一方、トラス部材でも、引張部材、圧縮部材にかかわらず、同一ひずみになるように、所要のPC鋼材を配置し、部材の引張と圧縮応力度を照査する。また、床版とトラス部材の接合に必要なPC鋼材を配置する。

このような床版およびトラス部材のプレストレス導入は、高い許容圧縮応力度をもつ高強度コンクリートを利用することで可能となる。

一方、合成トラス構造のPC鋼材の配置では、通常の方法で設計断面に所要の本数と架設中に必要な本数を配置する。この場合、架設中に発生する2次応力も考慮して算出する。また、架設鋼材を緊張した状態では完成後に部材圧縮応力度が許容値を越えるため、一部プレストレスを解放する必要がある。

c) プレストレスによる2次応力

スラブトラス構造では、施工時と完成時の構造系の違いから、コンクリートのクリープによってプレストレス

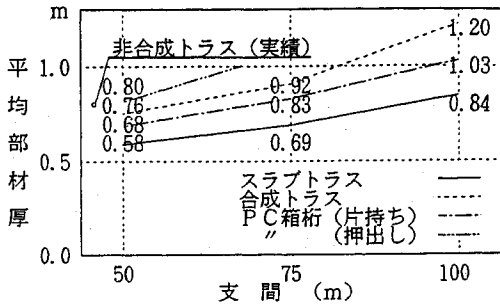


図-18 平均部材厚

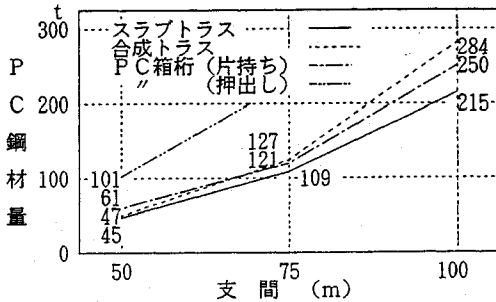


図-19 PC鋼材量

による2次応力は変化する。プレストレスの2次応力の移行量は猪股博士が提案したクリープ理論式²¹⁾で算出した。なお、施工完了からのクリープ量は $\phi=1.5$ とした。しかし、先述のように、上下の床版およびトラス部材はひずみ量の差が極力生じないようなPC鋼材の配置としているので、2次応力は非常に小さい。これに対して、合成トラス構造では1次軸力の25~30%の2次軸力が発生し、2次軸力に対してさらにPC鋼材の配置が必要となった。

(3) 数量比較

a) コンクリート量

使用コンクリート量を橋面積当りの平均部材厚 (m²/m²) で表し、スラブトラス構造と合成構造、非合成トラス構造、およびPC箱桁構造 (片持ち張出し架設と押出し架設) との比較を図-18に示す。スラブトラス構造は他のどの構造よりも平均部材厚が小さく、合成トラス構造と比べると、25~30%と支間の長大化につれて使用コンクリートが減少する。また実績が最も多いPC箱桁構造よりも小さい。

b) PC鋼材量

PC鋼材量の比較を図-19に示す。PC鋼材量は合成トラス構造およびPC箱桁構造に比べて、支間の長大化につれて約5~25%少なくなる。

これは、部材断面の縮小でプレストレスの効率があが

るのに加えて、プレストレスの導入方法に新しい考え方を取り入れたことで、プレストレスの2次応力の発生を抑えることができたためである。

7. 結論

本提案のスラブトラス構造は、大型模型載荷試験、せん断伝達機構載荷試験および実構造物を想定しての比較設計を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 静的集中荷重を受けるスラブトラス構造の応力状態は設計値とよく一致しており、通常のトラス構造として解析できる。また、床版を合成しないトラス構造に比べてねじり剛性の高い構造である。

(2) 本構造は、設計荷重状態および終局荷重状態で、静的荷重に対して十分な耐力を有する。

(3) 摩擦接合によるトラス材と床版の接合構造は、設計荷重状態で十分機能できる構造である。

(4) 摩擦接合に加えて、インサートボルトとモルタル充填による直接せん断接合の2重の接合構造とすることで、信頼性の高いプレキャスト部材の接合が可能である。

(5) 高強度コンクリートの有効利用と2次応力の発生が少ないプレストレスの導入方法により、自重の大幅な軽量化が可能である。

(6) 本構造は、支間50m~100mの範囲で押出し工法が可能で、従来工法に比べて、軽量化、使用材料、プレストレスの有効利用の面で優位性が高い。

以上のことから、本研究で提案したスラブトラス構造が軽量化とプレキャスト化に対して合理的で、かつ実用的な構造であることが実証された。今後さらに本構造を実用化していくためには、トラス部材と床版の接合部における2重接合構造の耐力および施工性の確認が必要であり、現在、大型供試体による2重接合構造の載荷試験を行っている。

最後に、試験立案にあたり、住友建設(株)の熊谷紳一郎氏、佐々木和道氏、大型模型試験の実施にあたっては、徳島大学の福田英二氏、三好誠司氏のご協力に謝意を表します。

参考文献

- 1) 村田二郎・国府勝郎・福澤公夫：最新コンクリート技術選書8巻 高強度コンクリート，山海堂，pp. 89~242, 1987.
- 2) 池田尚治・河野広隆・手塚正道：高強度はPC構造物をどう変えるか，セメント・コンクリート，No.546, Aug., pp. 100~111, 1992.
- 3) W. Müller・J.M. Müller (九州橋梁・構造工学研究会訳) ブロック工法によるPC橋の設計と施工，(財)九州大学出版会，pp. 325~331, 1992.
- 4) Müller, J. : Ten years of experience in precast segmental construction, PCI JOURNAL, pp. 28~61, Jan.

- Feb., 1975.
- 5) 池田哲夫・西山啓伸・高岡司郎・松村泰年・森元峯夫 : プレキャストブロック工法, 日刊工業新聞社, pp.1~27, 1969.
 - 6) P B 研究会 (則久芳行ほか) : プレキャストブロック工法の新しい展開, プレストレストコンクリート, Vol. 32, No.2, Mar., pp. 32 ~42, 1991.
 - 7) Chuah, C., Shima, H., Noritake, K. and Kumagai, S. : Strength and deformational behaviors of studs embedded in high strength prestressed concrete, コンクリート工学年次論文報告集, No.13-2, pp.1033 ~ 1038, 1991.
 - 8) Innovation dans le domaine des structures mixtes : Ponts mixtes métal-béton précontraint, AFPT, Technique générale de la construction, N° 458-Oct, et N° 459-Nov., 1987.
 - 9) 齊藤俊彦・草間一 : 久慈線太田名部橋梁 (PCトラス橋) の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol. 16, No.4, Aug., pp. 5 ~10, 1974.
 - 10) 町田富士夫・宮坂慶男・小須田紀元・小林栄次郎・山本忠夫・末統善・福本善一 : 岩鼻 PC トラスの設計と施工 (1)~ (3), プレストレストコンクリート, (1) 設計編 Vol. 17, No. 3, June, pp. 40~55, 1975. (2) 施工編 Vol. 17, No. 4, Aug., pp. 4 ~14, 1975. (3) 試験編 Vol. 17, No. 5, Oct., pp. 1 ~14, 1975.
 - 11) 松本嘉司・齊藤俊彦・三浦一郎・峯好武 : 安家川鉄道橋 (上路型プレストレストコンクリートトラス橋) の設計・施工, 土木学会論文報告集, No. 264, Aug., pp. 97 ~ 111, 1977.
 - 12) 沢野耕二・岩崎徹・野々村政一 : PCトラス鉄道橋の張出し施工-久慈線横木沢橋梁-, コンクリート工学, Vol. 16, No.8, Aug., pp. 36~43, 1978.
 - 13) 峯好武・石原孜朗 : PCトラス橋の施工, プレストレストコンクリート, Vol. 22, No.3, June., pp. 53~65, 1980.
 - 14) PC橋の新しい構造事例に関する研究報告 : (財) 高速道路調査会, pp. 40~43, 1990年 9月.
 - 15) Boudot, J. et al : Les viaducs de Sylans et des Glacières, IABSE Symposium Paris-Versailles, pp. 493 ~499, 1987.
 - 16) Giacomelli, D. and Greunerat, Y. : Les viaducs de glacières et de Sylans, Travaux, pp. 105~114, Juillet-Août, 1989.
 - 17) プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書 (I) : 建設省土木研究所, (株)プレストレストコンクリート建設業協会, p. 27, 1992年 3月.
 - 18) Fisherら : Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete, AISC Engineering Journal, pp. 55~ 64, April, 1971.
 - 19) 土木学会編 : コンクリート標準示方書 (設計編), pp. 67 ~68, 1992.
 - 20) 福田英二・島 弘・則武邦具・佐々木和道 : インサート・ボルトを用いたプレキャスト部材のせん断接合, コンクリート工学年次論文報告集, 第15巻第 2号, pp. 607~ 612, 1993.
 - 21) 猪股俊司 : プレストレストコンクリートに対するクリープの影響, プレストレストコンクリート, Vol. 18, No.2, Apr., pp. 2~15, 1976.

(1992. 12. 25受付)

PROPOSAL OF NEW STRUCTURES MAKING THE BEST USE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE TO REDUCE THE WEIGHT OF PRESTRESSED CONCRETE BRIDGES

Kunitomo NORITAKE, Hiroshi SHIMA and Kiyoshi KOHNO

This paper proposes a new type of structure, the slab-truss structure, in which precast slabs and truss-shaped web members using high-strength concrete are joined in such a way as to avoid the occurrence of secondary stresses due to prestressing. The mechanical properties of the resulting structure were ascertained by performing loading tests on large-scale models, and on the shear transmission mechanism. Design comparisons with conventional structures showed that the structure proposed here is a rational one, and of practical benefit in reducing the weight of prestressed concrete bridges.