

論文 連続繊維補強材を斜材として用いた PC トラス桁のせん断挙動

濱田 譲*¹ ・ 児島 孝之*² ・ 高木 宣章*² ・ 井上 真澄*³

要旨：筒状連続繊維補強材に膨張モルタルを充填し、ケミカルプレストレスを導入することにより、圧縮強度 150N/mm^2 、ひび割れ強度 27N/mm^2 の高強度部材を製作することができる。本研究では、この部材を斜材として使用したPCトラス桁を製作し、静的載荷試験を行った。その結果、筒状連続繊維補強材を用いたモルタル部材は、トラス部材として十分機能することが確認できた。引張斜材破断後もPCトラス桁は脆性的には破壊せず、耐荷機構が圧縮斜材と床版部材によるタイドアーチ機構に移行してじん性的な破壊性状を示した。

キーワード：筒状連続繊維補強材, PCトラス, 外ケーブル, FEM解析

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、自重の軽減と構造の合理化を図ることを目的として、従来のPC箱桁のウェブを高強度コンクリートトラス部材もしくは鋼トラス部材に置き換えたPC橋の開発が進められている。海外では、すでにX型コンクリートトラスを用いた橋梁が施工された例¹⁾もあるが、これらのトラス部材には工場で製作された高強度プレキャスト部材の使用が有効であると思われる。また、高強度コンクリートを何らかの方法で拘束して部材をさらに高強度化すれば、プレキャスト部材の飛躍的な軽量化により橋梁の施工性が著しく改善されると同時に、トラス部材の小断面化によりプレストレスの導入効率も改善されると考えられる。

本研究では、優れた力学的特性と耐腐食性を有する筒状連続繊維補強材に膨張モルタルを充填して、ケミカルプレストレスを導入した高強度部材を斜材に適用したPCトラス桁の静的載荷試験を行い、せん断耐力および変形性状などについて実験検討した。この場合、筒状連続繊維補強材は型枠としても有効に機能する。

また、PCトラス桁の変形性状、応力状態等、

力学的挙動の把握を目的として、有限要素法(FEM)解析を行い、実験結果との比較検討も行った。

2. 実験概要

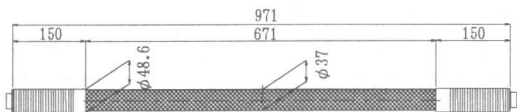
2.1 供試体概要

表-1にPCトラス桁の斜材に使用した筒状連続繊維棒材の特性を、図-1に筒状連続繊維棒材の概要図を示す。本部材は、直径37mm

表-1 筒状連続繊維棒材の特性

繊維の種別	炭素繊維
圧縮強度 (N/mm^2)* ¹	159
曲げ強度 (N/mm^2)* ¹	135
ひび割れ強度 (N/mm^2)	27.5
引張強度 (N/mm^2)	44.1
破断ひずみ (μ)	11400

注) *1: 参考文献2)



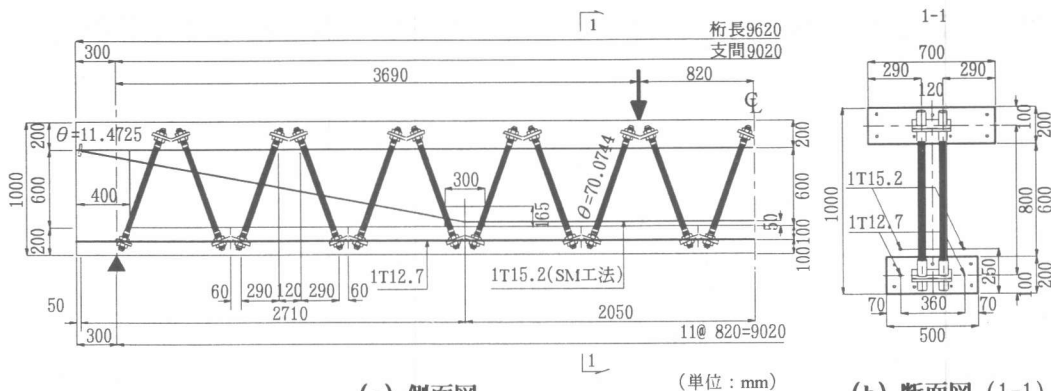
(単位: mm)

図-1 筒状連続繊維棒材概要図

*1 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修 (正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修



(a) 側面図

(単位: mm)

(b) 断面図 (1-1)

図-2 PCトラス桁の形状寸法

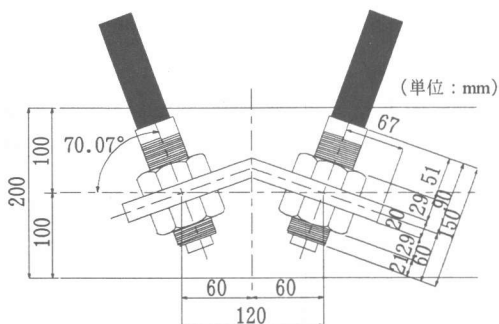


図-3 斜材接合部詳細図

の筒状連続繊維補強材(炭素繊維)を型枠および拘束体として用い、膨張モルタルを充填してケミカルプレストレスを導入しており、圧縮強度は約 150N/mm^2 、内部モルタルのひび割れ強度は約 27N/mm^2 の高強度部材である²⁾。筒状連続繊維補強材の両端には、ねじ切りを設けた鋼管定着体をエポキシ樹脂系接着剤で接着した。膨張モルタルを充填後金属製キャップを締めつけることによりモルタルの膨張を拘束して、ケミカルプレストレスを導入した。鋼管定着体を含めた全長は 971mm とした。

図-2 にPCトラス桁の形状寸法を、図-3 に斜材の接合部詳細図を示す。供試体の桁長およびスパン長は、それぞれ 9620mm および 9020mm とした。斜材の傾斜角は、PCトラス単純道路橋の試設計に基づき約 70° とした。斜材は、2枚の鋼板を所定の角度に溶接して製作した定着プレートに、隣接する斜材、合計4斜材を1枚のプレートにナットで固定して定着

表-2 PC鋼材の詳細

	内ケーブル	外ケーブル
タイプ	ストランド (SWPR 7)	
直径 (mm)	12.7	15.2
本数	2	2
目標プレストレス量 (kN)	91.7	208.7

表-3 各種コンクリートの特性 (材齢 28 日)

コンクリートの種類	普通	軽量
圧縮強度 (N/mm^2)	71.3	58.6
弾性係数 (kN/mm^2)	33.3	23.1
曲げ強度 (N/mm^2)	7.23	5.22
引張強度 (N/mm^2)	3.73	2.42
単位容積質量 (kg/l)	2.35	1.85

した。床板中心位置での斜材定着間隔は、上下床板とも、図-2(b)に示すように 120mm とした。

プレストレスは、内ケーブルと外ケーブルを併用して導入した。表-2に使用したPC鋼材の詳細を示す。内ケーブルには $1\text{T}12.7\text{mm}$ を2本用い、下床版図心にそれぞれを配置した。内ケーブルは、プレテンション方式によりプレストレスを導入した。外ケーブルには、 $1\text{T}15.2\text{mm}$ を2本用いた。スパン中央から 2050mm 離れた下床板(格点部)にそれぞれ偏向装置を設置したが、偏向部にはテフロンシートを挿入して外ケーブルの摩擦を低減した。定着システムには、ねじ式定着体と付着型定着体

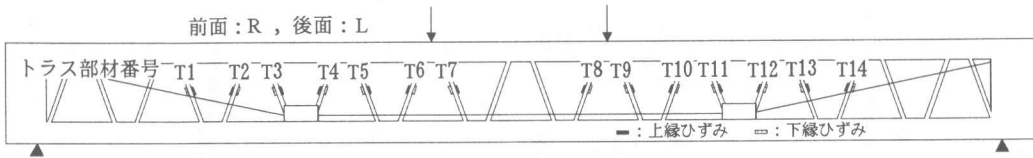


図-4 斜材番号

を併用した外ケーブル用定着システムを用いた。また、本実験では材料・構造の両面からPCトラス桁の軽量化を図ることを念頭に置き、上床版コンクリートおよび下床版コンクリートに普通コンクリートを用いた供試体と軽量コンクリートを用いた供試体の2体製作した。表-3に材齢28日における各種コンクリートの強度特性を示す。

2.2 荷重方法および測定項目

PCトラス桁の荷重方法は、曲げスパン1640mm、荷重スパン9020mmの対称2点荷重による静的荷重とした。下床版に曲げひび割れが発生した後、一旦除荷した。その後、供試体の破壊まで荷重を単調増加し、破壊耐力、ひび割れ状況および破壊モードを確認した。

計測項目は、荷重荷重、供試体変位、そしてコンクリート、各種鋼材、斜材の各ひずみとした。図-4にひずみを計測する斜材の番号を示す。

3. 解析方法

FEM解析モデルを図-5に示す。本解析では、供試体の対称性を考慮し、桁端部からスパン中央までをモデル化した1/2モデルを用い、2次元の弾性解析を行った。支点部分はy軸方向、スパン中央部分はすべてx軸方向の変位を固定した。解析に際して、上下床版コンクリートは2次のアイソパラメトリック4辺形要素に、斜

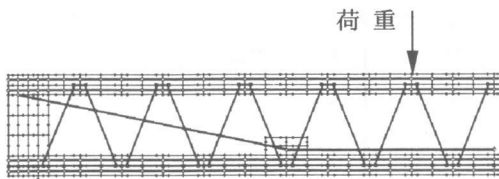


図-5 FEM解析モデル

材は曲げ剛性を考慮した1次のアイソパラメトリックはり要素に、各種PC鋼材は1次のトラス要素にそれぞれモデル化している。また、床版と斜材の接合部においては、定着プレート部品材としてモデル化し、コンクリートとの間に付着要素を挿入している。解析に用いる材料の物理特性値は、実験値を用いた。プレストレスは、内ケーブルには両供試体ともに目標プレストレス量(91.7kN)を、外ケーブルにはプレストレス導入直後と荷重試験直前のPC鋼材のひずみの差から算定した有効プレストレス量(普通:250kN、軽量:192kN)を導入した。

4. 実験結果および考察

4.1 斜材のひずみ

荷重と引張斜材ひずみの関係の例を図-6(a)に示す。各斜材のひずみは、膨張モルタル打設時から荷重試験直前までの軸方向膨張ひずみ(4100 μ)と外ケーブルによるプレストレス導入時の各斜材ひずみを加算した値としている。なお、死荷重により生じる斜材のひずみは考慮していない。引張斜材のひずみは、直接引張試験時とほぼ同様の荷重ひずみ関係が得られた。普通コンクリート、軽量コンクリートを用いた両供試体とも引張力が最大となるデビエータ部の引張斜材(T3もしくはT12)で最初に内部モルタルのひび割れが発生した。引張斜材のひび割れ発生荷重は、普通コンクリートを用いた供試体で132kN、軽量コンクリートを用いた供試体で102kNであった。なお、引張斜材のひび割れ発生荷重は、荷重-引張斜材ひずみ曲線より推定した。その後の荷重の増加により、斜材には多数のひび割れが発生した。試験後の破断した斜材の観察により、内部のモルタルには約30mm間隔で多数のひび割れが生じているこ

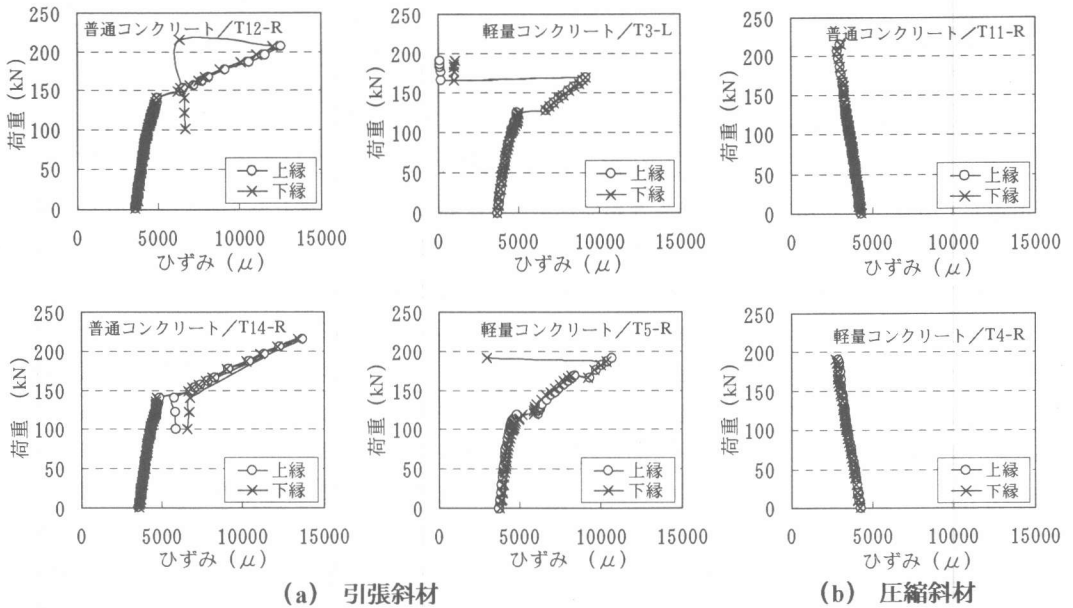


図-6 荷重と斜材ひずみの関係

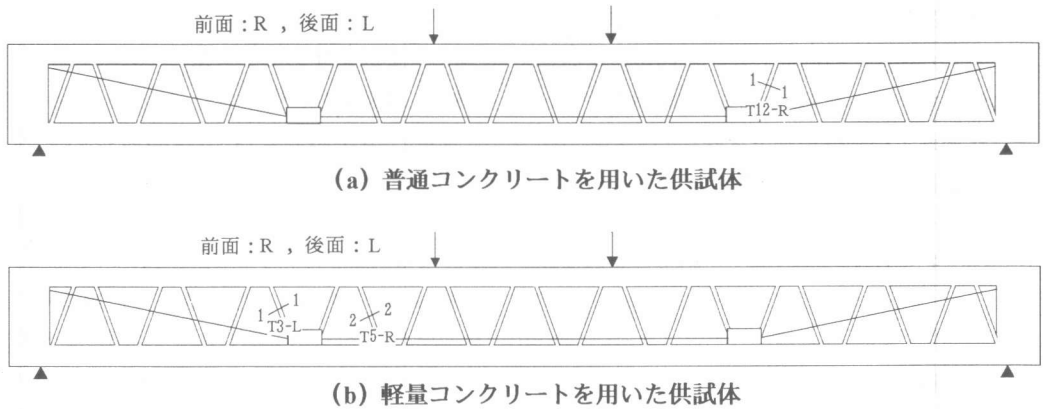


図-7 最大荷重時における引張斜材の破断状況

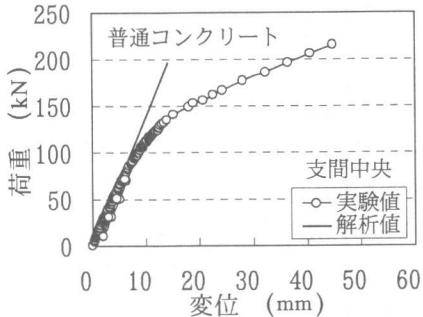
とが確認された。引張斜材の各ひび割れ断面では連続繊維補強材のみで荷重を支持すると考えられる。普通コンクリートを用いた供試体は引張斜材T12-Rが破断し、最大荷重に達した。一方、軽量コンクリートを用いた供試体は最初に引張斜材T3-Lが破断し、一旦荷重が減少したが、荷重は再び増加し、引張斜材T5-Rが破断した時点で最大荷重に達した。図-7に最大荷重時における引張斜材の破断状況を示す。最大荷重時の引張斜材破断ひずみは普通コンクリートを用いた供試体で12800 μ 、軽量コンクリ

ートを用いた供試体で10700 μ であり、斜材の引張強度試験より得られた破断ひずみ11400 μ （表-1参照）に近い値を示した。最大荷重到達後も引張斜材は破断し、載荷終了時にはせん断スパン内の全引張斜材に破断が確認された。

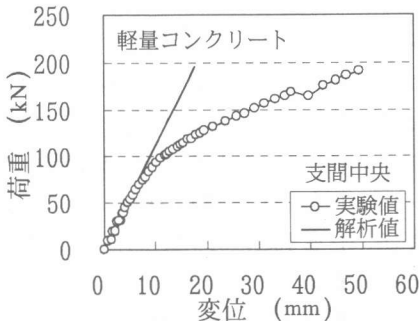
最大圧縮軸力が作用する圧縮斜材の荷重とひずみの関係を図-6(b)に示す。両供試体とも線形的な曲線を示し、最大荷重到達前に破壊する圧縮斜材は観察されなかったが、載荷終了時にはせん断スパンの圧縮斜材で圧壊が確認された。

4.2 変形状

荷重と支間中央たわみの関係を弾性 FEM 解析値とあわせて図-8 に示す。たわみは、両供試体ともに載荷荷重が 100kN 程度まで解析値とほぼ一致するが、それ以降は荷重が大きくなるにつれて解析値より大きくなった。これは、両供試体とも最大引張軸力が作用する斜材に初期ひび割れが発生した後に順次他の引張斜材にもひび割れが発生し、供試体の剛性が徐々に低下していくためである。1 本もしくは 2 本の斜材が破断した時点で各供試体は最大荷重に達するが、最大荷重時の支間中央部のたわみは、普通コンクリートを用いた供試体で 44.7mm、軽量コンクリートを用いた供試体で 49.3mm であった。この時点で変位の計測は終了したが、最大荷重到達後も載荷を続けると、断面力の再分配に伴う他の引張斜材の破断に伴い荷重は低下するものの、供試体は最大荷重の 70%程度



(a) 普通コンクリート



(b) 軽量コンクリート

図-8 荷重-支間中央たわみ曲線

を保持した。これは、引張斜材破断後、耐荷機構が圧縮斜材と上床版部材によるタイドアーチ機構に移行したためであり、本試験の載荷の範囲では、供試体が最終崩壊に至ることはなく、じん性的な破壊性状を示した。

以上より、筒状連続繊維補強材に膨張モルタルを充填した高強度部材は、PCトラス桁の斜材として十分機能することが確認できた。

4.3 外ケーブル増加応力度履歴

荷重と外ケーブル増加応力度の関係を図-9 に示す。増加応力度は、外ケーブルの支間中央部で計測したひずみより算定した。各供試体とも引張斜材にひび割れが発生した後に、外ケーブル応力度の増加量が大きくなっている。最大荷重時における外ケーブルの増加応力度は、普通コンクリートを用いた供試体で約 229N/mm^2 、軽量コンクリートを用いた供試体で約 275N/mm^2 となり、軽量コンクリートを用いた場合の方が大きくなった。これは一般の外ケーブル構造と同じ傾向であり、PCトラス桁でも変形が大きくなれば、外ケーブル増加応力度も大きくなることが確認できた。

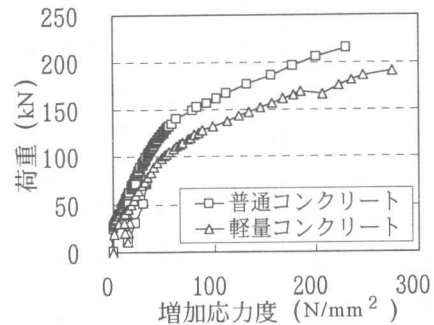


図-9 外ケーブル増加応力度履歴

4.4 ひび割れ性状および破壊耐力

軽量コンクリートを用いた供試体上下床版のひび割れ性状および載荷終了時の斜材破壊状況を図-10 に示す。ひび割れは載荷点付近および支間中央に集中している。また、各供試体と

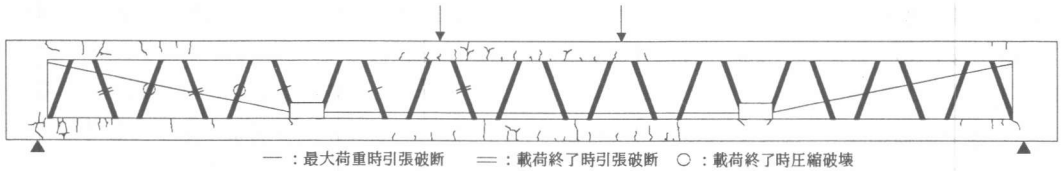


図-10 供試体のひび割れおよび斜材の破壊状況図 (軽量コンクリート)

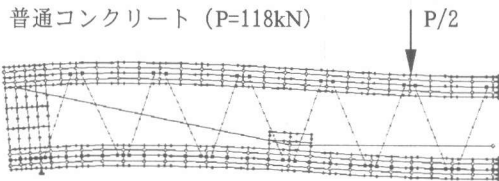


図-11 弾性 FEM 解析による変形モード図

表-4 載荷試験結果

コンクリートの種類	普通	軽量
有効プレストレス量 (kN) : 外ケーブル	250	192
斜材のひび割れ発生荷重 (kN)	132 (190)	102 (140)
最大耐力 (kN)	216	191

注) () : 弾性 FEM 解析値

もせん断スパンの上下床板コンクリートには、上縁からひび割れが発生していることが分かる。図-11 に弾性 FEM 解析による供試体の変形モード図の一例を示す。解析結果においても、せん断スパンの上下床板コンクリートの上縁に引張応力が作用していることが予想される。

表-4にひび割れ発生荷重、最大耐力および外ケーブルの有効プレストレス量を示す。なお、ひび割れ発生荷重については解析値も加えた。解析値は、最大引張軸力を受ける斜材の引張応力が 27N/mm^2 に達するときの荷重である。両供試体ともに、ひび割れ発生荷重の解析値は実験値を大きく上回った。これは、本解析において曲げひび割れ発生にともなう上下床板コンクリートおよび斜材の軟化を考慮していないためであり、今後各材料に非線形性を取り入れる必要がある。

斜材のひび割れ発生荷重および供試体の最大耐力は、普通コンクリートを用いた供試体の方

が大きくなった。これは、普通コンクリートを用いた供試体への外ケーブルによるプレストレス導入量が、軽量コンクリートを用いた供試体よりも高かったためであると考えられる。

5. 結論

- (1)筒状連続繊維補強材に膨張モルタルを充填した高強度部材は、PCトラス桁の斜材として十分機能することが確認できた。
- (2)引張斜材破断後も、PCトラス桁はじん性に富んだ挙動を示した。これは、耐荷機構が圧縮斜材と床版部材によるタイドアーチ機構に移行したためである。

謝辞

本研究は、日鉄コンポジット (株) およびドービー建設工業 (株) と共同で実施している研究の一部を報告するものである。また、軽量コンクリートの使用に関しては太平洋セメント (株)、FEM解析では立命館大学大学院の日比野憲太氏の協力を得た。ここに、関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1)コンクリート標準示方書改訂小委員会PC部会：プレレストコンクリート構造の現況と設計法の動向、コンクリート技術シリーズ5・土木学会、pp.27-49, 1994
- 2)濱田譲，児島孝之，高木宣章，井上真澄：筒状連続繊維補強材を用いたモルタル棒部材に関する実験的研究，連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集，pp.233-238, 1998.5