

# アラミド繊維を緊張材に用いた薄型 PC 板の基礎的研究

## Fundamental Research on Thin Prestressed Concrete Panel using Aramid Fiber Tendons

竹山 忠臣 TADAOMI TAKEYAMA  
 有川 直貴 NAOKI ARIKAWA  
 三加 崇 TAKASHI SANGA  
 浅井 洋 HIROSHI ASAI

埋設型枠などへの用途を目的に、アラミド連続繊維を緊張材とした厚さ 5mm の超薄型 PC 板の基礎実験を行った。実験に使用した専用の緊張装置による引張効率はアラミド繊維系規格強度の 67%であり、応力緩和曲線についても検討した。モルタル強度が  $45\text{N/mm}^2$  以上あれば、本試験体の厚さにプレストレスを導入できた。曲げ試験の結果、PC 板は計算値以上の十分な耐力を保持しており、最終的にはモルタルが圧壊し、アラミド繊維が破断することはなかった。また、アラミド緊張材の配置誤差は PC 板の反りに大きく影響する。

キーワード：アラミド繊維，PC 板，埋設型枠，緊張材

Thin concrete panel prestressed with continuous aramid fiber has been developed for the use of durable permanent form of concrete structures. The aramid fiber tendons were subjected to 67% of standard tensile strength of the fiber by stretching devices developed for the tests and relaxation characteristics of the fibers are examined. In the case that strength of mortar is greater than  $45\text{N/mm}^2$ , the concrete panel having 5mm in thickness could be prestressed. The panel showed greater bending capacity than calculated value and compressive failure of the mortar at compression side is observed without showing any breaking of aramid tendons. In addition, it was observed that the placement error of the tendon greatly influences the warp of the prestressed concrete panel.

**Key Words:** Aramid Fiber , Prestressed Concrete Panel , Form , Tendon

### 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上策の一つとして、低水セメント比や混和材料を使用してコンクリート自体を緻密化する方法がとられている。高強度コンクリートを使用することで構造物を軽量化してコスト縮減が可能な橋梁上部工のような構造物では、コンクリート価格が多少高額となっても全体工事費の縮減に寄与できる。飛来塩分に対する対策などでは、緻密なコンクリートで構成された埋設型枠を用いることで構造物表面に緻密な防塩層を設けることも効果が期待できると考えられる。また、プレストレスを導入することで荷重に対するひび割れ発生を大幅に抑制できると考えられる。プレストレスコンクリート橋の施工では、PC 板<sup>1)</sup>を床版下面に用いて構造部材と埋設型枠の両機能を有し、さらには施工時の足場も兼ねた合理的な部材として使用している。し

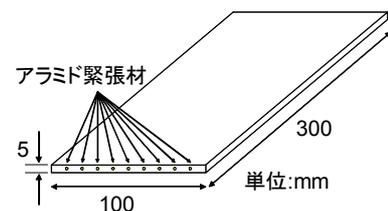


図-1 試験体

かしながら、セメント系材料で構成された埋設型枠の施工性を考えれば、さらなる軽量化が求められる。また、部材厚を小さくすれば PC 鋼材や補強筋のかぶりを確保することが困難となるため、このような埋設型枠には繊維補強コンクリートが用いられている。既往の研究<sup>2)</sup>では、連続繊維を補強材とした厚さ 10mm の埋設型枠の研究が行われているが、連続繊維にプレストレスを与えることでさらに部材厚を薄くすることが考えられる。本研

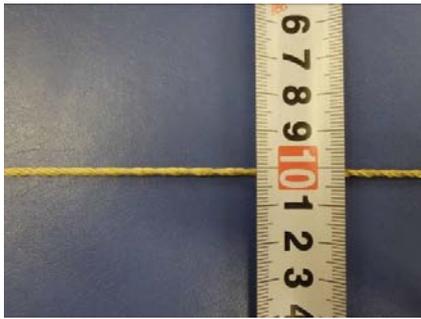


写真-1 アラミド緊張材



写真-2 アラミド緊張材緊張状況

究は連続繊維にアラミド繊維を用い、極薄厚の PC 板製造の可能性や製造時の課題点、および荷重が作用した場合の曲げ挙動、緊張材として用いるアラミド繊維の性質などを明らかにすることを目的としている。

## 2. 実験概要

### (1) 試験体

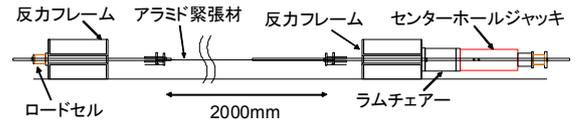
図-1に試験体形状を示す。試験体寸法は幅100mm、長さ300mm、厚さ 5mm のモルタル製であり、緊張材にはアラミド繊維を束ねて撚りを与えた糸（以下、アラミド緊張材）を用いた。アラミド緊張材の配置は試験体断面の厚さ方向の中央（純かぶり 1.65mm）とし、試験体の幅方向には 10mm 間隔で計 9 本配置した。

### (2) 使用材料および使用繊維

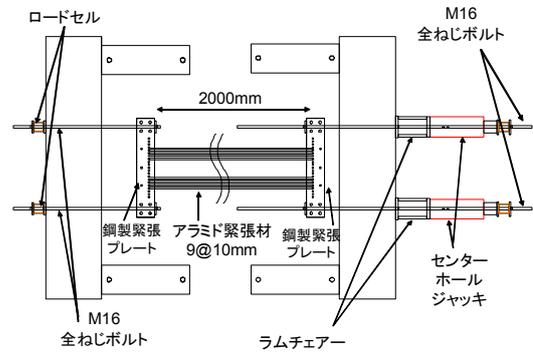
写真-1にアラミド緊張材を示す。糸径1.7mm、断面積 1.201mm<sup>2</sup> であり、メーカー提示の引張耐力は 2.7kN/本（引張強度 2248N/mm<sup>2</sup>）、破断伸度は 6.75% である。モルタルには市販のカルシューム・アルミネート系膨張材をプレミックスした無収縮モルタル（プレミックス粉体）を用いた。かぶりが薄いことからモルタルの充填性を考慮して砂の最大粒径を 1.2mm とした。水粉体比は 0.352 とした。

### (3) 繊維の張力導入方法

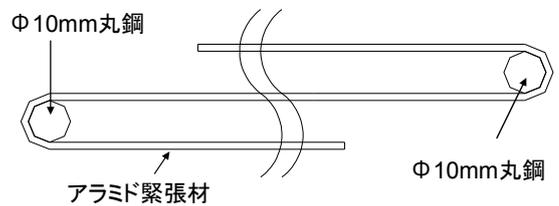
PC 板製作に用いたアラミド緊張材緊張装置を図-2お



側面図



平面図



アラミド緊張材の配置方法

図-2 アラミド緊張材緊張装置

よび写真-2に示す。反力床にフレームを固定して反力フレームとし、片端には高張力全ねじ緊張ボルト（M16）を介して鋼製緊張プレートを固定している。他端は鋼製緊張プレートを設置した高張力全ねじボルトに緊張用センターホールジャッキ（容量 400kN）とセンターホール荷重計（200kN）を介してナット定着している。固定側および緊張側鋼製緊張プレートにはφ 10mm 丸鋼を 10mm 間隔に並べて配置しており、1 本のアラミド緊張材を互い違いに丸鋼に掛けて配置し、緊張材の端部を丸鋼に結び付けて固定した。緊張の際には、全ねじボルトのナットを締め込み、アラミド緊張材のたるみをとってから 2 台のロードセルに均等に荷重がかかるように調整しながら緊張を行った。

### (4) 試験体製作

アラミド緊張材緊張後、型枠を設置し、モルタルを打設した。底版枠の型枠は表面塗装合板とし、厚さ 5mm の合板を側枠として設置して試験体の厚さを調整した。

型枠と繊維の隙間はセメントペーストが流出しないように粘土で埋めた。試験体表面はヘラで平滑に均した後、ポリエチレン製フィルムを空気が巻き込まれないように被せて試験体厚が均一になるように仕上げた。

表-1 試験体一覧

試験体種類	コンクリート物性				試験体厚さ (mm) ※1	緊張材 配置位置 (mm) ※2	偏心量 (mm) ※2	反り量 (mm) ※1	導入材齢 (日)	曲げ ひび割れ 発生荷重 (N)	曲げ耐力 (N)
	導入時		載荷時								
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )							
M59A	19.5	59.2	20.1	67.4	5.97	3.57	0.59	1.96	7	354	982
M59B					5.97	3.19	0.21	1.57		413	1001
M45A	16.6	44.9	18.9	57.0	5.87	3.46	0.53	2.20	3	335	786
M45B					5.74	3.48	0.61	5.21		315	766
M35A	16.9	35.2	-	-	5.81	-	-	-	2	-	-
M35B					5.75	-	-	-		-	-

※1:実測値

※2:計算値（プレストレス導入時の上縁と下縁のひずみから算出した値）

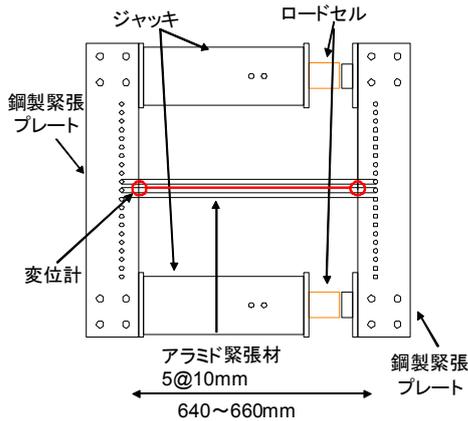


図-3 引張試験

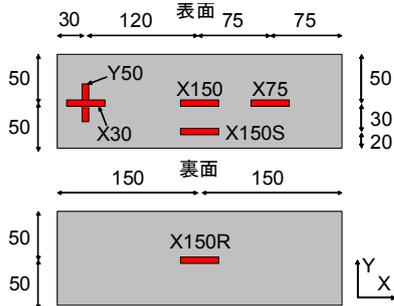


図-5 ひずみゲージ設置位置（詳細図）

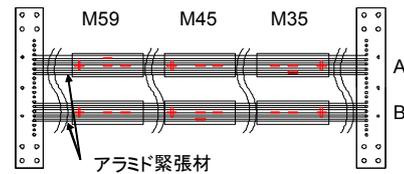


図-4 ひずみゲージ設置位置（全体図）

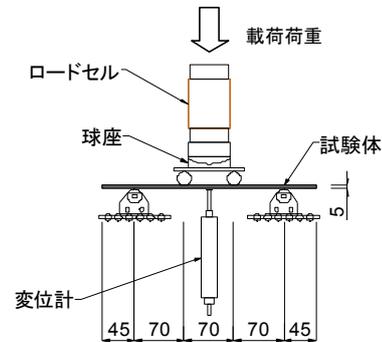


図-6 曲げ試験

（容量200mm）1台で測定した。載荷方法は、平均載荷速度 6.0kN/min でアラミド緊張材が破断するまで単調載荷とした。

### 3. 実験方法

#### （1）緊張装置を用いた繊維の引張試験

アラミド緊張材の引張耐力はメーカーによって測定されているが、定着方法によって引張耐力が異なる。1本のアラミド緊張材を鋼製緊張プレートの丸鋼に交互に掛けて緊張する緊張装置を用いてアラミド緊張材の引張耐力を測定した。引張試験に使用した試験装置を図-3に示す。試験区間を640mm~660mm、試験区間のアラミド緊張材の本数が5本になるように折り返して配置した。鋼製緊張プレート間に油圧ジャッキを挟み込み押し広げる方法で緊張した。試験は3回行った。測定項目は、緊張荷重を2台のロードセル（20kN）で測定し、アラミド緊張材の伸び量を緊張装置の中央に取り付けた変位計

#### （2）プレストレス力導入時のモルタル強度の検討

試験体製作は図-2に示す繊維緊張装置を用いて行った。アラミド緊張材をセンターホールジャッキで緊張装置を使用した引張試験での引張耐力の67%である 21kNまで緊張し、ラムチェアー内の全ねじボルトに設置したナットで定着して荷重を保持した。試験体製作中はアラミド緊張材の荷重の調整は行わず、モルタル打設までの21日間緊張力の変化を測定した。プレストレス導入が可能なモルタル強度を確認することを目的に、モルタルの強度を3水準として図-4に示す配置で6試験体製作した。試験体は2列（図中A、B）に分けて製作しており、2つの列の間で導入ひずみが異なることが予想されたため、ひずみゲージを図のような千鳥配置とした。

PC板試験体の一覧を表-1に示す。モルタルの配合はすべての試験体で同じであり、プレストレス導入時の材

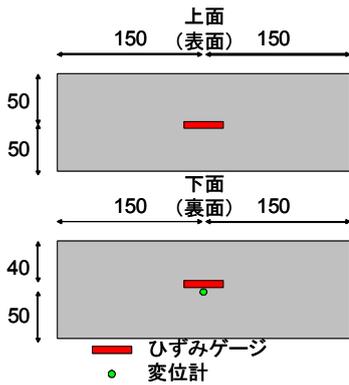


図-7 計測項目 (载荷時)

表-2 引張試験結果

No.	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	緊張材一本当たりの耐力(kN)	メーカーが示す耐力に対する割合	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
1	1366	1.64	0.61	37.4
2	1482	1.78	0.66	14.0
3	1515	1.82	0.67	30.9
平均値	1454	1.75	0.65	27.4

齢が7, 3, 2日の3水準となるようにモルタル打設日を変えて施工した。プレストレス導入時のモルタル強度は59, 45, 35N/mm<sup>2</sup>である。荷重保持期間中の時間の経過に伴う緊張力の変化を測定した。PC板表面には図-5に示す位置にひずみゲージを設置して、プレストレス導入時のモルタルひずみを測定した。試験体軸方向の中央(X150), 端部から75mm(X75), 端部から30mm(X30)の位置のひずみは導入時の軸方向のプレストレス量を推定することを目的としている。裏面のX150Rはアラミド緊張材の配置誤差などに伴う試験体の表と裏のひずみの違いを測定する目的で設置した。X150Sはプレストレス導入方向と直交する試験体幅方向の応力の違いを確認することを目的としている。

(3) 曲げ試験

载荷方法を図-6に示す。打設面を上面(载荷面)とし、等曲げ区間を70mmとした4点曲げ試験とした。支点は、ローラー支点とし、試験体に均等に荷重をかけるため载荷梁上に球座を配置した。

载荷時の計測項目を図-7に示す。試験体の中央でたわみを1点、試験体の上面中央、下面中央でモルタルひずみを1点ずつ測定した。なお、試験体の下面は、たわみを測定するため、軸直角方向に10mmずらした箇所にひずみゲージを設置した。

4. 実験結果

(1) アラミド緊張材の緊張

アラミド緊張材の引張試験の結果を図-8, 表-2に示

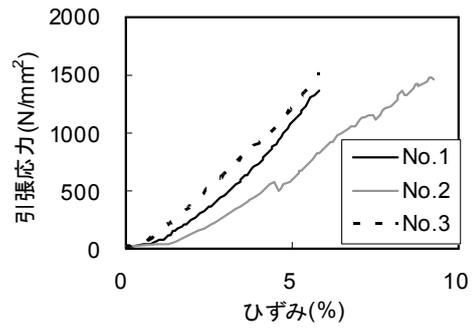


図-8 引張試験結果

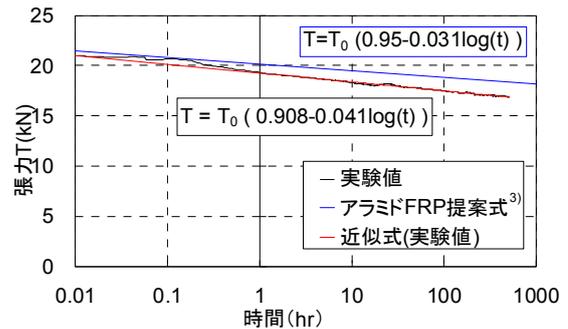


図-9 応力緩和曲線

す。図の中のひずみは、緊張時の伸びを緊張前のアラミド緊張材固定間長で除した値である。すべての試験体で応力とひずみの関係は初期の引張応力度の増加が若干小さく下に凸の形状を示している。アラミド緊張材の応力とひずみの関係は単調载荷において弾性であるが、アラミド緊張材は束ねた繊維に撚りを与えているため引張力が作用すると絞られて伸びが生じる。このような伸びを含めてひずみを算出したため、アラミド緊張材の応力とひずみの関係が下に凸を示したと考えられる。No.2はNo.1, No.3に比べて傾きが小さい。これは荷重の増加に伴ってアラミド緊張材の端部固定部にすべりが生じたためである。アラミド緊張材は鋼製緊張プレートの丸鋼で180°に折り返した部分で破断しており、せん断力が影響したと考えられる。アラミド緊張材の平均引張強度は、メーカーが示す引張耐力の65%であった。なお、ヤング係数は、载荷初期の繊維の絞りの影響を除去するため、引張耐力の90~100%における値を採用した。

A列とB列の繊維に合計21kN(引張試験結果の67%)の張力を与え、緊張側全ねじボルトをナットで固定して持続荷重の変化を測定した結果を図-9に示す。応力緩和曲線は片対数座標においてほぼ直線で示され、式(1)で与えられる。

$$T(t) = T_0(0.908 - 0.041\log(t)) \quad (1)$$

ここに、 $T(t)$ : 緊張後  $t$  時間経過した緊張力  
 $T_0$ : 定着荷重

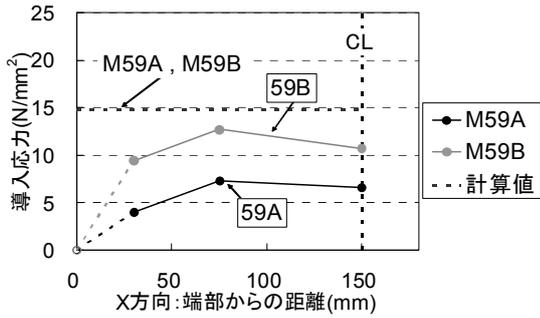


図-10 導入応力M59 (X方向の位置の違い)

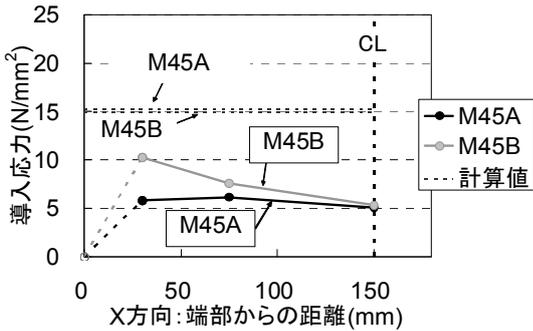


図-11 導入応力M45 (X方向の位置の違い)

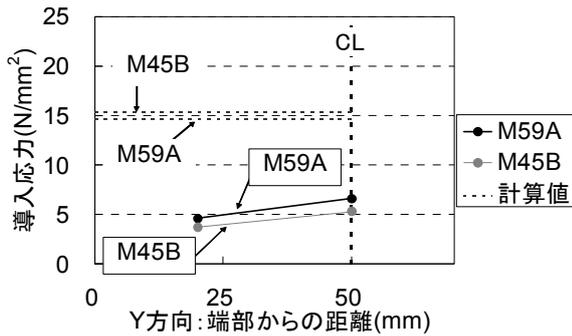


図-12 導入応力 (Y方向の位置の違い)

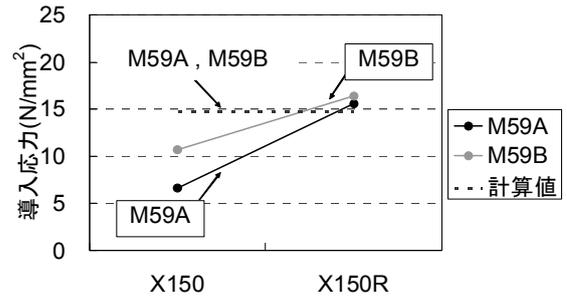


図-13 導入応力M59 (表裏での違い)

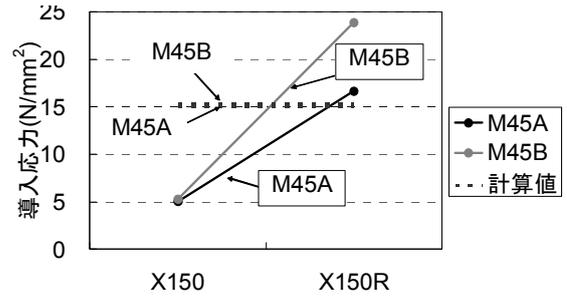


図-14 導入応力M45 (表裏での違い)

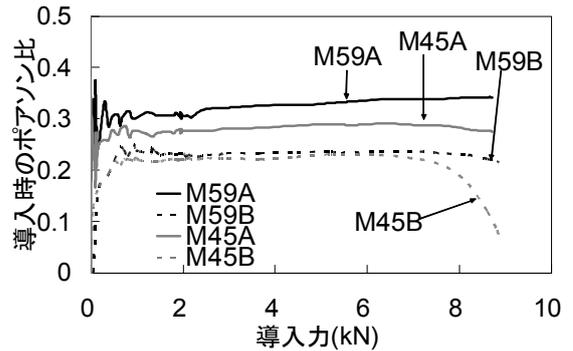


図-15 プレストレス導入時のポアソン比 (X30に対するY50)

アラミドFRP緊張材の応力緩和曲線<sup>3)</sup>を比較して図に追記した(図-9)。アラミド緊張材はアラミドFRP緊張材より若干張力低下が大きく、400時間経過時の緊張力は定着荷重の約80%であった。なお、試験は室内温度環境で行い、室内温度は0.9～9.1℃(平均6.5℃)であった。

## (2) プレストレス導入

プレストレス導入前に試験体上面のシートを除去し、ひずみゲージを取り付けた。M35試験体はモルタル打設後24時間であり、材齢約48時間後に乾燥収縮による軸直角方向のひび割れが認められた。図-10、図-11にプレストレスを導入した際のプレストレス導入方向(軸方向)のPC板上面ひずみと部材端部からの距離の関係、図-12にプレストレス導入方向と直交する試験体の幅方向のPC板上面ひずみと部材端部(幅方向)からの距離

の関係を示す。一般的には、アラミド緊張材とモルタルとの付着が十分得られず、アラミド緊張材のプレストレスをモルタルに伝達できない場合には部材軸方向のモルタルひずみの増加が小さく、モルタルひずみが一定になるまでの部材端部からの距離(定着長)が長くなる。

さらに、付着が得られない場合には、部材中央においてモルタルひずみが計算値に達しない。M59およびM45のモルタルひずみは、いずれも部材中央(X150)で計算値に達していないがX75、X150で導入したプレストレス力に大きな差は見られず、本試験の場合の定着長さは30～75mmの間と考えられる。プレストレス導入後の試験体を観察すると反りが認められ、図-13、図-14に示すように軸方向中央断面の上面ひずみ(X150)と下面ひずみ(X150R)に違いが認められる。表-1に示すように試験体厚が0.74～0.97mm厚く製作され、アラミド緊張材が製作時に下方方向に偏心していることが考えられ

た。表裏の導入された応力から、緊張材の偏心量を算出した結果を表-1に示す。試験体厚さは実測した値を平均した値である。薄型 PC 板では、わずかに偏心するだけで部材の表裏に作用する応力度に大きな影響を与える。

なお、M35は軸直角方向のひび割れが生じたため、偏心量および緊張材の配置位置などの計算値の算出は行っていない。また、図-10および図-11でモルタルひずみが計算値に対して小さい理由として反りの影響によると考えられるが、表裏を平均したひずみから算出した応力度は計算値に対して  $3\text{N/mm}^2$  程度小さい値であった。

プレストレス導入時の軸方向ひずみ (X30) に対する軸直角方向ひずみ (Y50) の比率を図-15に示す。プレストレス導入に伴うポアソン効果による変形であり、アラミド緊張材定着部に付着ひび割れが生じれば比率が大きく変化すると考えられる。図より、M59およびM45は  $0.2 \sim 0.3$  で比較的安定しており、付着ひび割れなどは生じていないことが分かる。M45Bは  $7\text{kN}$  程度よりポアソン比が低下したが、部材端には付着ひび割れが観察できず、反りが大きいことが原因と考えられる。これより、本実験の試験体の場合、 $45\text{N/mm}^2$  以上であれば付着ひび割れが生じないことが確認できた。

プレストレス導入後、曲げ試験を行うまでの27日間、コンクリートの収縮によるプレストレスの減少量を測定した(図-16~図-19、表-3)。部材中央の上下面のひずみを平均すれば約  $1000\mu$  の収縮が生じており、アラミド緊張材のヤング係数を考慮して式(2)で張力の減少量を算出すると  $3\%$  程度であった。

$$\Delta T/T'_0 = \varepsilon' \cdot E_f \cdot A_f / T'_0 \quad (2)$$

ここに、 $\Delta T$  : プレストレス導入から曲げ試験までの間のアラミド緊張材張力減少量、 $T'_0$  : アラミド緊張材プレストレス導入張力、 $\varepsilon'$  : プレストレス導入直後から曲げ試験までの間のモルタルの収縮ひずみ、 $E_f$  : アラミド緊張材のヤング係数、 $A_f$  : アラミド緊張材の断面積

なお、M45Bの張力の減少量が他と比べて若干大きいことが原因と考えられる(表-1)。また、反りは大きいですが、他の試験体と同様、試験体にひび割れは認められなかった。なお、試験は室内温度環境で行い、室内温度は  $0.7 \sim 11.9^\circ\text{C}$  (平均  $5.5^\circ\text{C}$ ) であった

### (3) 曲げ耐力

曲げ試験時のモルタル圧縮強度および曲げ耐力を表-1に示した。M35A、M35Bの曲げ試験時のモルタル物性を示していないのは、プレストレス導入前に、試験体2体ともひび割れが発生したため曲げ試験を行わなかった

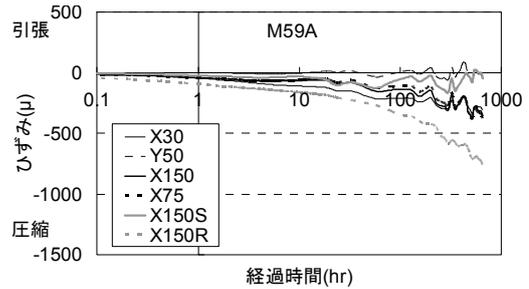


図-16 収縮ひずみ (M59A)

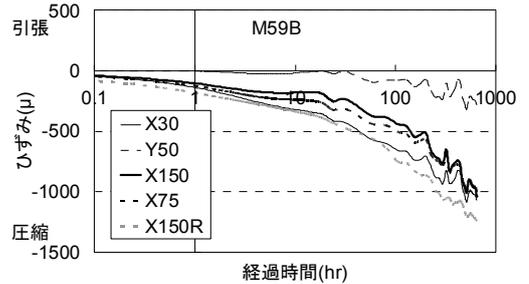


図-17 収縮ひずみ (M59B)

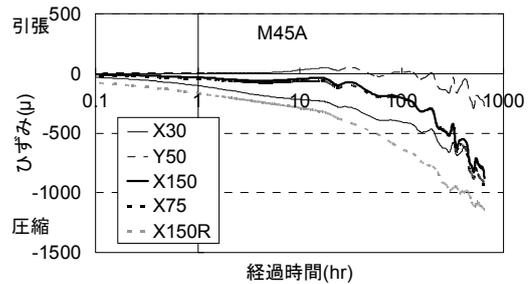


図-18 収縮ひずみ (M45A)

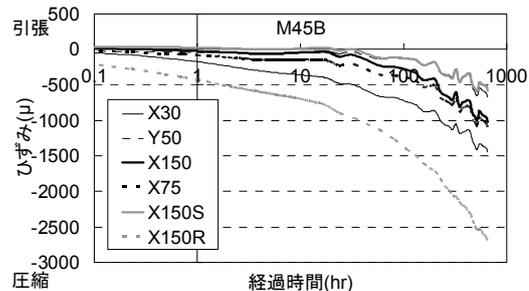


図-19 収縮ひずみ (M45B)

表-3 アラミド緊張材の張力減少量

試験体種類	ひずみ(μ)			アラミド緊張材の応力 (N/mm <sup>2</sup> )		
	上縁	下縁	アラミド緊張材配置位置	導入時	減少量	割合(%)
M59A	-355	-756	-595	811	-16	2.0
M59B	-1042	-1243	-1149		-31	3.9
M45A	-877	-1135	-1029		-28	3.5
M45B	-1024	-2690	-2034		-56	6.9

ためである。図-20、図-21に載荷荷重とたわみの関係、図-22、図-23に載荷荷重とひずみの関係を示す。

計算値は、ファイバーモデルによって算出した値である。モルタルの応力とひずみの関係は、圧縮試験によって測定した結果を用いた。アラミド緊張材は、引張試験によって最大荷重付近で得られたヤング係数（27.4 kN/mm<sup>2</sup>）を有する弾性体とした。各試験体のプレストレス力は、荷重試験までのモルタルの収縮による張力減少を考慮し、8.5kNとした。

いずれの試験体も荷重が 300 ~ 400N で曲げひび割れが等曲げスパン内に発生した。この値はおおむね計算値と一致している。M59は約 700N，M45は約 500N において軸方向のひび割れが繊維に沿って発生した。軸方向ひび割れが生じた後も荷重は低下せず計算値より大きくなる傾向を示した。計算値では圧縮縁モルタルひずみが終局ひずみに達しているが、試験体が箔肉部材であることから、寸法効果の影響<sup>4)</sup>が考えられ、終局ひずみの3倍程度のひずみが生じたと考えられる。試験体は軸方向のひび割れが生じても耐力は低下せず荷重荷重は増加した。M59では荷重荷重が 990N（計算値の約 1.4 倍）、M45では 602N（計算値の 1.3 倍）で試験体上縁が圧縮破壊した。

### 5. まとめ

本研究で、アラミド緊張材を用いた試験体厚さ 5mm の PC 板のプレストレス導入および曲げ耐力を検討し、以下の結果が得られた。

- ① アラミド緊張材を用い厚さ約 5mm の PC 板に平均圧縮応力度 15N/mm<sup>2</sup>のプレストレスを導入するには、モルタルの圧縮強度は 45N/mm<sup>2</sup>以上必要である。
- ② アラミド緊張材の応力緩和曲線は、アラミド FRP 緊張材の値より若干大きく、式 (1) で示される。
- ③ 厚さ 5mm の PC 板では、緊張材のわずかな配置誤差が部材の表裏に作用する応力度を大きく変え、反りの原因となる。
- ④ 超薄型 PC 板は計算値以上の変形性能と曲げ耐力を有する。

### 参考文献

- 1) 池田博之, 水口和之, 浅井洋, 平喜彦: U型コア断面を有するプレキャストセグメント橋の構造特性, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1203-1210, 2003
- 2) 出頭圭三, 小林一輔: 連続繊維強化セメント系複合板の曲げ特性, 土木学会第42回年次学術講演会, pp298-299, 5-130, 1987
- 3) 浅井洋, 中井裕司, 迎邦博, 水谷淳: アラミド製 FRP ロッドの応力緩和特性, 土木学会第 45回年次学術講演会, pp230-231, 5-107, 1991
- 4) 土井至朗, 川又篤, 唐沢智之: 超高強度繊維補強モルタルの曲げ特性における寸法効果, コンクリート工学年次論文集, pp395-400, Vol.28, No.1, 2006

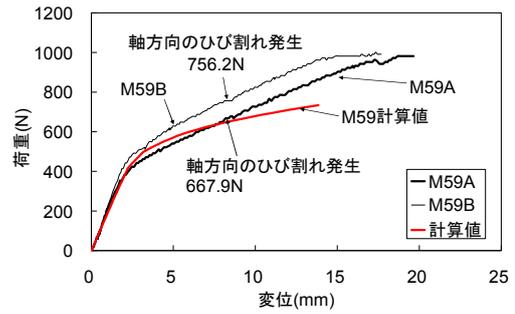


図-20 荷重-変位曲線 (M59)

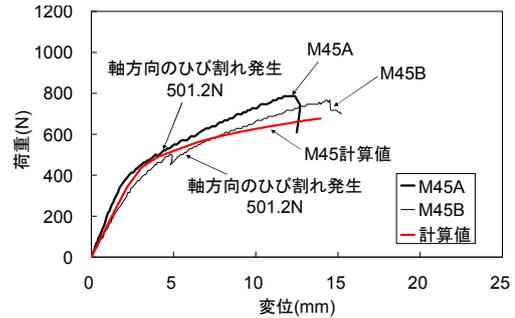


図-21 荷重-変位曲線 (M45)

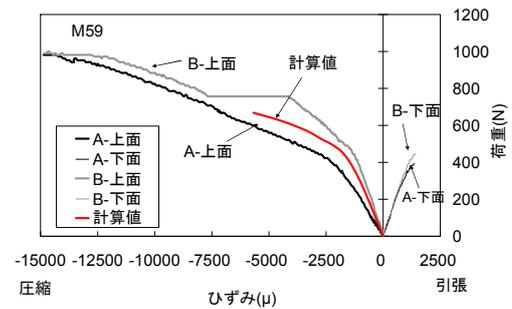


図-22 荷重-モルタルひずみ曲線 (M59)

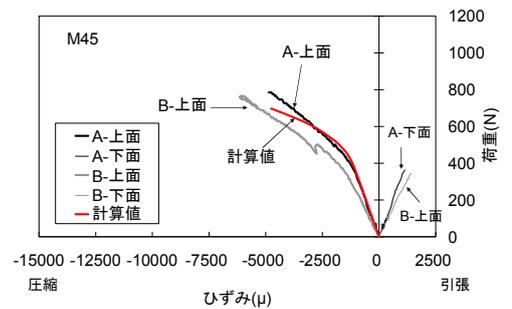


図-23 荷重-モルタルひずみ曲線 (M45)