

アラミド FRP 緊張材の付着定着性能に関する実験的研究

Experimental Study on Anchoring and Bond Properties of Aramid FRP Tendon

三加 崇 TAKASHI SANGA

竹山 忠臣 TADAOMI TAKEYAMA

有川 直貴 NAOKI ARIKAWA

浅井 洋 HIROSHI ASAI

アラミド FRP ロッドは、引張強度が高く腐食しないことから、補強筋や PC 緊張材などで使用されている。

アラミド FRP ロッドの形状は、表面にワインディングを施した異形状と編みこんだ組紐状があり、アラミド FRP 緊張材としては、著者らは異形状を中心に検討してきた。本研究では、少ない本数で高張力とすることを目的として、4 本を束ねた組紐状のアラミド FRP ロッドを用いたアラミド FRP 緊張材を開発した。引張試験により、保証耐力を満足する付着定着性能を有することを確認した。また、アラミド FRP ロッドのすべり量と平均付着応力度は、4 本と 1 本では同じ傾向であった。

キーワード：アラミド FRP ロッド，付着応力度，定着長，緊張

FRP rods made of Aramid fiber have characteristics of high tensile strength and non-corrosion, and are used for reinforcements or PC tendons. These Aramid FRP rods have two types that are winding form and braided form. Bundled cable which consists of four braided Aramid FRP rods was developed for the purpose of higher tensile capacity. The results of tensile tests showed that the developed bundled cable had adhesion anchorage performance satisfying with required tensile capacity as pretensioned tendons. The bundled cable has the same performance in the relation of sliding displacement and mean adhesive stress as single rod.

Key Words: Aramid FRP Rod, Bond Stress, Anchoring Length, Tendon

1. はじめに

コンクリート構造物が劣化する要因のひとつとして塩害がある。海浜に近い構造物や寒冷地で凍結防止剤が散布される構造物では、コンクリート中の塩化物イオン濃度が上昇し、鉄筋が腐食しやすくなる。鉄筋の腐食はかぶりコンクリートの剥落を引き起こし、構造部が加速度的に劣化する。著しい劣化の場合には鉄筋の破断に伴い耐荷力が低下して落橋が懸念される。新設の構造物では、かぶりコンクリートを厚くして鉄筋位置の塩化物イオン濃度の上昇速度を抑制する方法やエポキシ塗装鉄筋やステンレスの使用により鋼材の腐食を抑制する方法がとられている。しかしながら、コンクリートにひび割れが生じたり、塗装被膜が損傷したりするなど完全に鉄筋が腐食しないわけではない。このような問題に対処する方法の一つとして、高性能繊維に樹脂を含浸して成型した連続繊維補強材が開発され使用されてきた。アラミド繊維は高性能繊維の一つであり、塩害の影響を受けない

材料として棒状に加工してリブを設置したり、編み込んで組紐状に加工したりして鉄筋の代替品として使用している（以下、アラミド FRP ロッドと称す）。また、アラミド繊維は、高い引張強度を有していることから、緊張材としても利用されている。アラミド FRP ロッドは、PC 鋼線のようになくさび定着方式では、くさび内面の刃がアラミド FRP ロッド表面に噛み込むことによって繊維が破断して定着効率が低下するため、無収縮モルタルやエポキシ樹脂によって付着定着する方法が用いられている。アラミド FRP ロッドには、直線配置したアラミド繊維の周りに図-1(a)に示すような同種のアラミド繊維で凹凸を設けた異形状と図-1(b)のアラミド繊維を編みこんだ組紐状のアラミド FRP ロッドがある¹⁾。リブ付のアラミド FRP ロッドでは、すでにφ7.4mmのロッドを緊張材として使用した実績はあるが、組紐状のアラミド FRP ロッドを緊張材として使用した実績は少ない。異形状のアラミド FRP ロッドを用いたアラミド FRP 緊張材の直径はφ7.4mmと比較的小さく、多くのロッドを付着定着し

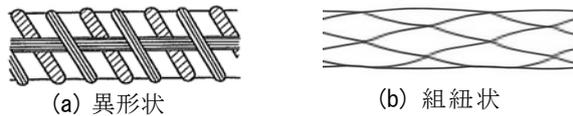


図-1 アラミドロッド形状



写真-1 アラミドロッド

表-1 組紐状アラミドロッドの材料特性

形状	組紐状							異形状
公称直径 (mm)	2.7	5.7	7.8	9.3	11	13.7	15.7	7.88
公称断面積 (mm ²)	5.7	25.5	47.8	67.9	95	147	193	48.8
単位重量 (g/m)	6.4	32	58	84	115	173	226	62
保証耐力 (kN)	7.8	32	60	85	112	172	225	81.4
弾性係数 (kN/mm ²)	68.6							46.0

て大容量化を図ることが困難であった。本研究では、φ15.7mm 組紐状のアラミドFRP ロッドの定着に無収縮モルタルで付着定着した定着体を使用し、緊張材として用いるための引張試験を行って定着性能を確認した。

2. 試験方法

(1) アラミドFRP ロッド

アラミドFRP ロッドは異形状と組紐状の2種類の形状がある。異形状アラミドFRP ロッドは、ロッド軸方向に並行に配置したアラミド繊維を引き揃え、ビニルエステル樹脂で固着した上にアラミド繊維を2層に巻き付けて異形化したものである。組紐状アラミドFRP ロッドは、軸方向に引き揃えた繊維束に樹脂を含浸し、これを組紐状に編み込みながら固着したものであり、本体繊維によって異形化されている。

アラミドFRP 緊張材に使用するアラミドFRP ロッドは、少ない本数で高いプレストレスを導入することを目的として、公称直径 15.7mm、保証耐力 225kN の組紐状アラミドFRP ロッドを対象とした。付着性状の向上を目的として表面には砂を付着させている。組紐状アラミドFRP ロッドの材料特性を表-1に示す。

(2) 試験体

アラミドFRP 緊張材を表-2に示す。試験体は2種類で、No.1はアラミドFRP ロッド1本に付着定着体を取り付けた試験体である。No.2はアラミドFRP ロッド4本を束ね、4本に1対の付着定着体を取り付けた試験体である。

表-2 試験体種

試験体種類	No.1	No.2
アラミドロッド		
公称直径 (mm)	15.7	15.7
本数 (本)	1	4
公称断面積 (mm ²)	193	772
保証耐力 (kN)	225	900
定着体		
外径 (mm)	48.6	95
厚さ (mm)	8	18
断面積 (mm ²)	1020.4	4354.2
材質	S45C	S45CH
無収縮モルタル		
直径 (mm)	32.6	59.0
断面積 (mm ²)	641.7	1962.0

No.1の定着体構造を図-2(a)、No.2の定着体構造を図-2(b)に示す。No.1アラミドFRP 緊張材の定着体は、φ48.6mm、厚さ8mm、全長720mmで材質はS45Cである。No.2のアラミドFRP 緊張材の定着体は、φ95mm、厚さ18mm、全長720mmで材質がS45CHである。定着体は、図-3に示すように、アラミドFRP ロッドを鋼管内の所定の位置に配置し、無収縮モルタルを充填して一体化した構造である。

(3) 荷重方法

図-4に荷重方法を示す。試験体は荷重フレーム内を通して片側には荷重計を配置し、他端には油圧ジャッキを配置している。付着定着体の鋼製鋼管の外周にはネジ加工が施されており、試験体両端でナット定着している。

荷重方法は、油圧ジャッキで押し広げてアラミドFRP 緊張材に引張力を与える方法である。平均荷重速度 40kN/minの単調荷重であり、アラミドFRP 緊張材が破断するまで荷重した。引張試験では、引張荷重とアラミドFRP ロッドが定着体から抜け出す量の他に図-5に示す鋼管表面に50mm 間隔でひずみゲージを設置して定着体のひずみを測定した。



図-2 定着体

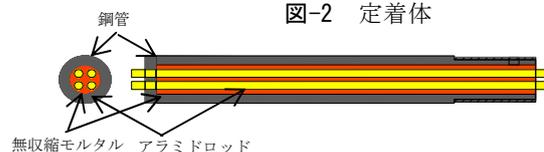


図-3 定着体構造

3. 試験結果

(1) 引張耐力

試験体No.1 (アラミドFRP ロッド1本) の最大引張力は274kNであり、保証耐力225kNに対して1.22倍の張力であった。破壊はアラミドFRP ロッドの破断であり、定着体先端で生じた。試験体No.2 (アラミドFRP ロッド4本) の最大引張力は978kNであり、保証耐力900kNに対して1.09倍の張力であった。破壊は、アラミドFRP ロッドの破断であり、4本のロッドがすべて破断した(写真-2)。1本および4本を束ねたアラミドFRP 緊張材は、本定着構造によって保証耐力以上の引張力を保持できることが示された。

(2) 鋼管ひずみ

載荷荷重と鋼管先端(アラミドFRP ロッド緊張側)からの距離に応じた鋼管ひずみの関係を図-6に示す。鋼管と無収縮モルタルおよびアラミドFRP ロッドが合成断面として一体で挙動している場合の関係を破線で示す。載荷開始直後はすべての測定点のひずみは破線と一致しているが、引張荷重が増加するにつれて定着体先端のひずみから増加が少なくなり順次破線と離れる傾向を示している。これは、引張荷重が作用し始めた初期の段階では、アラミドFRP ロッドと無収縮モルタルの間の付着が健全であり、アラミドFRP ロッドの引張力は合成断面で受け持たれ、先端から50mm位置の鋼管ひずみも比例して増加する。さらに引張荷重が増加するとアラミドFRP

ロッドと無収縮モルタルの間の付着が切れて滑り出し、50mm位置では一体として挙動せずアラミドFRP ロッドが負担する荷重の割合が大きくなり、鋼管が負担する割合が減少するためにひずみの増加が小さくなったためである。負担が増加したアラミドFRP ロッドの引張荷重は、さらに後部でモルタルおよび鋼管に伝達される。載荷荷重の増加に従い、鋼管ひずみが合成断面計算値から乖離する現象が定着体後部に進展する。この現象は、破断前には定着体先端から500mmに達している。

図-6の関係を各載荷荷重における定着体鋼管先端からの距離と鋼管ひずみの関係で表したものが図-7である。

定着体は先端から650mmにおいてナットで定着されている。その前面では鋼管とモルタル、アラミドFRP ロッドが載荷荷重を一体で受け持っており、その計算値を700mmに表示した。この値は、図-6において破線に対応する計算値である。各載荷荷重において鋼管のひずみ分布は先端に近い部分でひずみが小さく、先端からの距離が長くなるに連れてひずみが増加する。合成断面計算値に達するとひずみが一定になり、一体となって荷重を負担していると考えられる。図-6で鋼管ひずみが計算値から乖離する傾向が、載荷荷重が増加するに連れて合成断面計算値に達するまでの長さが長くなる傾向として再度確認される。ここで注目されるのは、計算値に達するまでのひずみの増加割合である。載荷荷重が増加しても鋼管のひずみの増加割合はおおむね同じであり、アラミドFRP ロッドからモルタル、さらには鋼管に伝達される荷

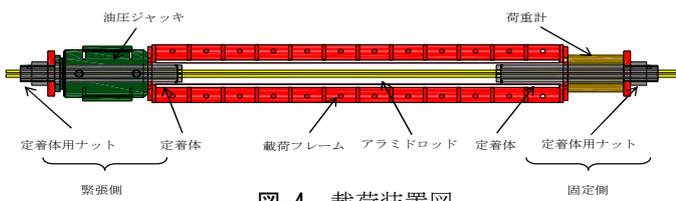


図-4 載荷装置図

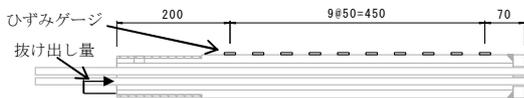
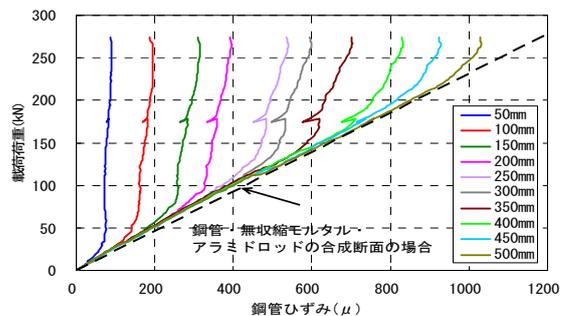


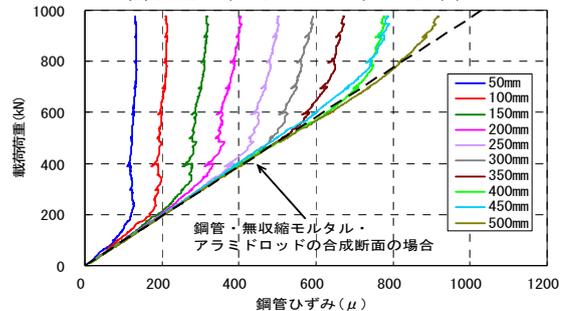
図-5 計測位置



写真-2 アラミドロッド破断状況



(a) No.1 (アラミドロッド1本)



(b) No.2 (アラミドロッド4本)

図-6 鋼管ひずみ

重が同じであることを意味している。試験では鋼管とモルタルとの間ですべりが生じていないことから、アラミドFRPロッドとモルタルとの付着応力度はアラミドFRPロッドに作用する応力度によらず一定の値であると考えられる。

(3) 平均付着応力度

載荷荷重と鋼管ひずみからアラミドFRPロッドとモルタルとの平均付着応力度を算出する²⁾。アラミドFRPロッドに作用する張力は、載荷荷重から鋼管とモルタルが負担する荷重を差し引いた値であり式(1)で算出される。また、そのときのアラミドFRPロッドひずみは式(2)で算出される。

$$P_f(x, P) = P - (A_s \cdot E_s + A_m \cdot E_m) \cdot \varepsilon(x, P) \quad (1)$$

$$\varepsilon_f(x, P) = P_f(x, P) / (A_f \cdot E_f) \quad (2)$$

ここに、 $P_f(x, P)$: 載荷荷重 P における定着体先端から距離 x のアラミドFRPロッドの張力

x : 定着体先端からの距離

P : 載荷荷重

A_s : 鋼管断面積

E_s : 鋼管弾性係数

A_m : 無収縮モルタル断面積

E_m : 無収縮モルタル弾性係数

$\varepsilon(x, P)$: 載荷荷重 P における定着体先端から距離 x の鋼管のひずみ

$\varepsilon_f(x, P)$: 載荷荷重 P における定着体先端から距離 x のアラミドFRPロッドのひずみ

A_f : アラミドFRPロッドの断面積

E_f : アラミドFRPロッドの弾性係数

定着体の区間 $x_i \sim x_j$ の平均付着応力度は、アラミドFRPロッドに作用している張力を表面積で除した値として式(3)により算出した。

$$\tau_{ij} = \left\{ \varepsilon_f(x_i, P) - \varepsilon_f(x_j, P) \right\} \frac{E_f \cdot A_f}{n_f \cdot \phi_f \pi (x_j - x_i)} \quad (3)$$

ここに、 ϕ_f : アラミドFRPロッド公称直径

n_f : アラミドFRPロッド本数

また、定着体先端からの距離 x_i におけるアラミドFRPロッドの移動量は、定着体後端から x_i までの鋼管とアラミドFRPロッドのひずみ差の総和であり、式(4)で算出される。

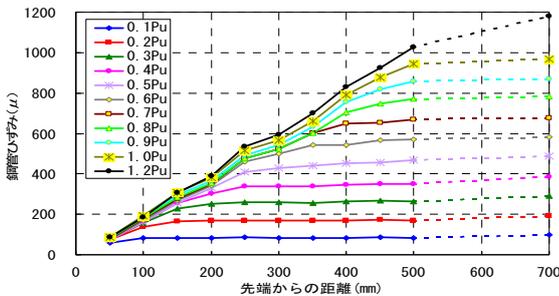
$$s(x_i, P) = \int_{x_i}^L \left\{ \varepsilon_f(x, P) - \varepsilon(x, P) \right\} dx$$

$$\doteq \sum_{x_i}^L \left\{ \varepsilon_f(x, P) - \varepsilon(x, P) \right\} \Delta x \quad (4)$$

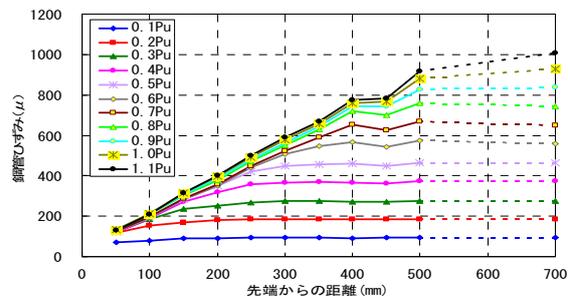
ここに、 L : 定着体の長さ

定着体先端からの距離に応じた100mm区間のアラミドFRPロッドの平均付着応力度と平均移動量の関係を図-8に示す。アラミドFRPロッド1本のNo.1では1.0mmの移動量に対して7.1N/mm² ~ 10.4N/mm²の範囲であった。4本の場合は7.9N/mm² ~ 9.2N/mm²の範囲であり、1本で発生している平均応力度の範囲内であった。

No.1とNo.2の移動量に対する平均付着応力度の全測定区間の平均との関係を図-9に示す。移動量と平均付着応力度の関係は、0.4mm程度まで直線的に増加し、その後は移動量増加に対して平均付着応力度は緩やかに増加する傾向であった。1本と4本では、ほぼ同じ傾向が見られることから、4本の配置の場合では、アラミドFRPロッドの全表面積で付着応力が発生していると考えられる。1本と4本の移動量と平均付着応力度との関係か



(a) No.1 (アラミドロッド1本)



(b) No.2 (アラミドロッド4本)

図-7 鋼管ひずみ分布

ら、式 (5) のようにモデル化した。移動量に対して平均

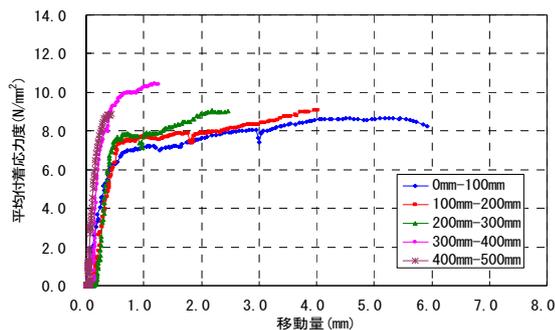
付着応力度の平均となるように設定し、移動量が 0.41mm までは、平均付着応力度 2.15N/mm² から 7.35N/mm² まで直線的に増加し、0.41mm から 5.0mm までは、5.0mm で平均付着応力度が 9.6N/mm² となるバイリニア型のモデルとした。

$$\begin{aligned} \tau &= 13.69s + 2.15 \quad (0 < s \leq 0.41) \\ \tau &= 0.38s + 7.64 \quad (0.41 < s \leq 5.0) \end{aligned} \quad (5)$$

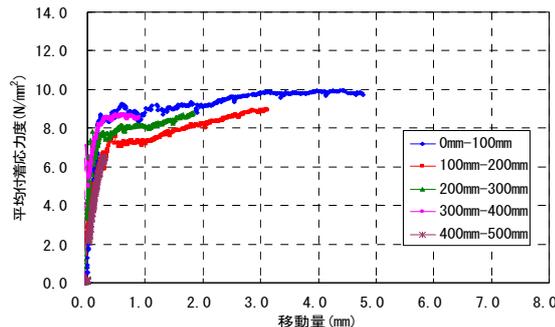
(4) 定着長

定着長は、定着体先端から位置 x_i でアラミドFRP ロッドの移動量を極小としたときに発生する平均付着応力度から、アラミドFRP ロッドに発生する張力を求めて、ひずみを算出する。ひずみと $x_i \sim x_{i-1}$ の長さの積から x_{i-1} の移動量を求める。定着体先端まで繰り返して算出して、アラミドFRP ロッドに発生している張力の合計が、定着したい張力と等しくなる x_i を定着長とした。

No.2試験体の載荷荷重 450kN(0.5Pu) と 900kN(1.0Pu) における鋼管ひずみ分布の計算値と実験値を図-10 に示す。計算値は、式 (5) を用いてアラミドFRP 緊張材に作用している張力から定着体先端から位置 x_i に発生している張力の差が定着体に作用している力で、鋼管と無収縮モルタルの合成断面としてひずみを算出した。計算結果と実験結果のひずみ分布は、比較的良く一致していることから、本構造の平均付着応力度と移動量の関係は、適切に設定されていると考えられる。



(a) No.1 (アラミドロッド 1 本)



(b) No.2 (アラミドロッド 4 本)

図-8 平均付着応力度と移動量の関係

アラミドFRP 緊張材の張力と付着定着するのに必要な定着長の関係を図-11 に示す。保証耐力を定着するために必要な定着長は、No.1およびNo.2ともに685mmであることが分かった。

4. アンカー材への適用

アラミドFRP 緊張材をアンカー材として適用するために、アラミドFRP 緊張材をコンクリート内部に埋め込んだ引抜試験を実施した。

(1) 試験体

試験で用いるコンクリートブロックの大きさは、1.5m×1.5m×1.5m である。鉄筋はD13を250mm間隔で配置した。コンクリートブロック上面の中央に、φ110mmで深さ1,250mmまで削孔して、アラミドFRP ロッドを4本束ねた定着体付きアラミドFRP 緊張材を挿入した。挿

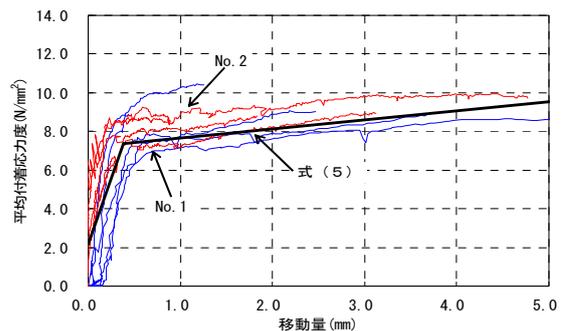


図-9 平均付着応力度と移動量のモデル化

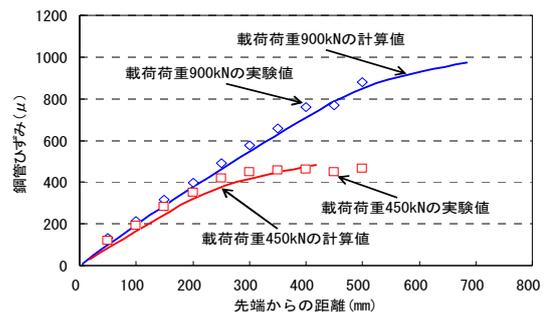


図-10 鋼管ひずみの実験値と計算値

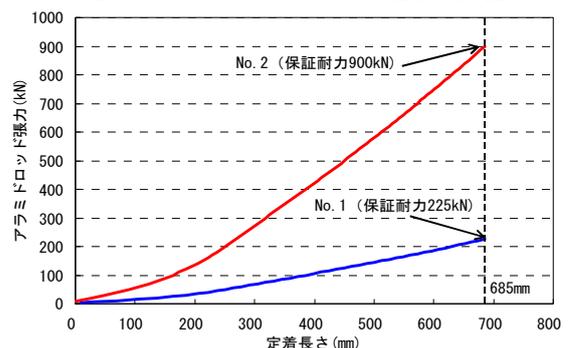


図-11 アラミドロッド張力と定着長の関係

入後に、無収縮モルタルを定着体から250mm高さまで充填した。定着体は、φ95mm、厚さ18mm、で材質がS45CHの鋼管を使用した。アンカー側の定着体の長さは650mmとし、載荷側の定着体は、アンカー側の引抜荷重より高い荷重を保持する目的で全長1,000mmとした。

(2) 試験方法

試験方法を図-12に示す。反力をとるために載荷フレームを設置して、1,600kNの油圧ジャッキを用いて載荷した。載荷手順は、アラミドFRP緊張材に作用する張力の変動による影響を確認するために、保証耐力の0.7Pu(630kN)までを3回繰り返した。その後、破壊まで実施した。計測は、コンクリートのひずみおよびコンクリート表面位置でのアラミドFRPロッドの移動量を測定した。

(3) 試験結果

載荷試験は、削孔箇所に充填した無収縮モルタルが材齢13日(圧縮強度74.2N/mm²)で実施した。

載荷荷重とコンクリート上面におけるアラミドFRPロッドの移動量との関係を図-13に示す。引張試験のアラミドFRPロッドの抜け出し量と自由長350mmの弾性変形量を加算した移動量を併せて示した。0.7Pu(630kN)で3回繰り返した場合、抜け出し量が極端に大きくなっておらず、繰り返しの影響はなかった。最大荷重は、1,004kNでアンカー側のアラミドFRPロッド

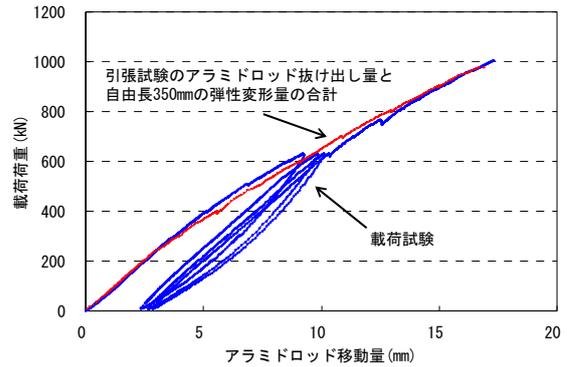


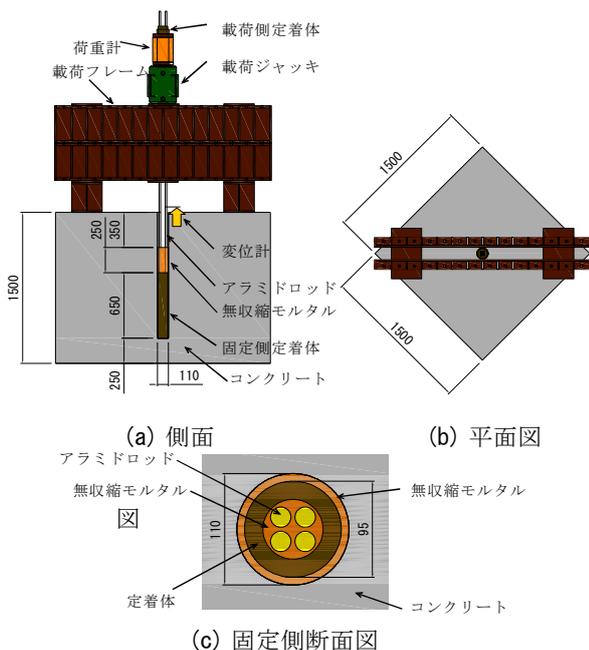
図-13 載荷荷重とアラミドロッド移動量の関係

が3本破断した。最大荷重においてコンクリートブロックに損傷は見られず、引張試験結果を反映した移動量と引抜試験結果による移動量が同等であったことから、定着体の抜け出しはなく、アラミドFRPロッドの付着によって保持されていた。本定着方法で保証耐力以上の荷重を定着できることが明らかとなった。

5. まとめ

本実験によって以下の知見が得られた。

- ① 1本および4本のアラミドFRPロッドを束ねたアラミドFRP緊張材は、本定着構造では保証耐力以上の引張力を保持できる定着性能であった。
- ② アラミドFRPロッドの移動量と平均付着応力度の関係は、1本と4本束ねた場合で同じ傾向を示しており、4本の場合でも、アラミドFRPロッドの全表面積で付着応力が発生していると考えられる。
- ③ アラミドFRP緊張材の保証耐力に必要な本定着構造における定着体の長さは、1本および4本束ねたアラミドFRPロッドの場合、同じ長さで685mmであった。
- ④ アラミドFRP緊張材をアンカーとして使用する場合、本定着構造であれば、0.7Puが繰り返しの作用しても抜け出しが大きくなる傾向はなく、アラミドFRPロッドの付着によって保証耐力を定着できることが分かった。



参考文献

1) 土木学会：コンクリートライブラリー88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)，pp.249～pp.294