

V-34 アラミドテープで曲げ補強した RC 梁の静的耐荷性状

三井建設(株) 正員 三上 浩
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光
 開発土木研究所 正員 佐藤 昌志
 計測技販(株) 正員 佐藤 良一

1. まえがき

平成 7 年 1 月に発生した阪神・淡路大地震後、旧設計指針にて建設された道路・鉄道橋脚の補強工事が盛んに行われている。一般に橋脚の補強工法として、鉄筋コンクリート巻立てや鋼板巻立て工法が採用されてきたが、最近では炭素繊維やアラミド繊維製シートを用いた FRP 巻立て工法も採用されるようになった。著者らは主としてアラミド繊維テープ巻立てによる橋脚のせん断補強効果や靱性能改善効果について静的および動的な観点から検討してきた^{1), 2)}。その結果、アラミド繊維テープ巻立て工法は炭素繊維テープ巻立て工法と同程度の補強効果があることを確認した。一方、FRP テープを橋脚の高さ方向に貼り付けて曲げ補強することも考えられ、炭素繊維テープを用いた場合の曲げ性状や付着性状が種々検討されている^{3), 4)}。しかし、アラミドテープを用いた場合の曲げ補強効果に関する検討例は少ないようである。

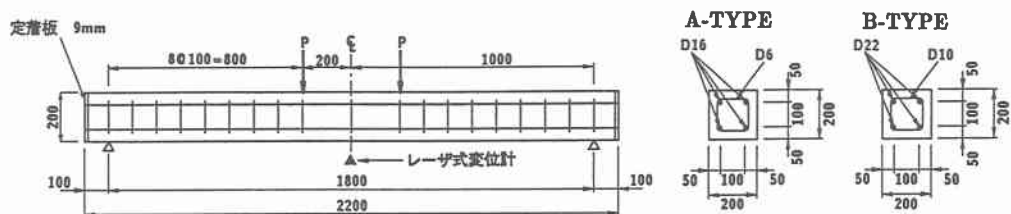
本研究は、主として梁底面にアラミドテープを貼り付けた場合の静的耐荷性状を実験的に検討したものである。アラミドテープを貼り付けて補強する場合、テープの破断あるいは付着破壊によって破壊することが考えられる。特に付着破壊によって破壊する場合には、予想した耐力を大幅に下回る耐力で破壊することがあるため、アラミドテープとコンクリートの付着性能の検討は極めて重要である。本研究では、付着性能を高める方法として、コンクリート表面の処理方法とテープによる付着補強方法に着目して検討した。また、主鉄筋量を変えた梁を製作し、梁の曲げ性状がアラミドテープの曲げ補強効果に与える影響を検討した。さらに、アラミドテープの繊維目付け量を変えた実験を行い、目付け量の影響を合わせて検討している。

2. 実験の概要

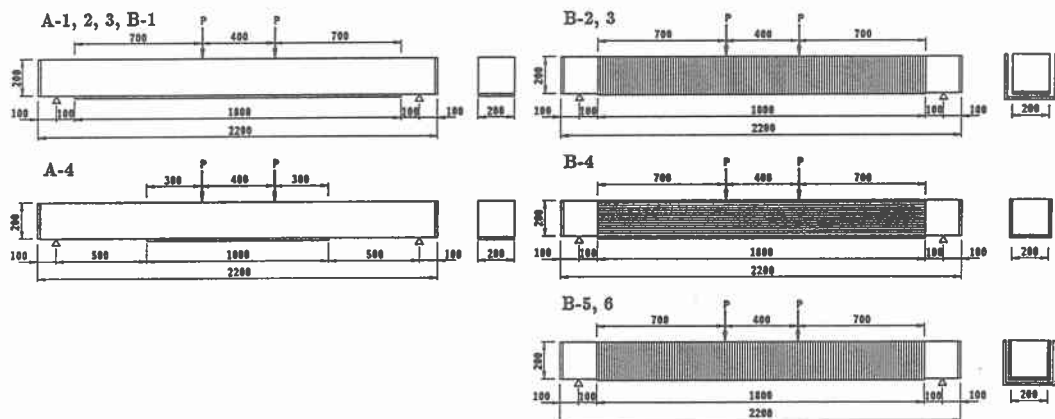
表-1 に試験体の一覧を示す。実験に用いた RC 梁は、主筋に D16 を用いた A タイプ梁 5 体と主筋に D22 を用いた B タイプ梁 7 体の合計 12 体である。A タイプ梁では、底面のみにアラミドテープを貼り付け、表面処理の影響、繊維目付け量およびテープ貼り付け範囲の影響に着目して検討を行った。表面処理方法は無処理とチッピング処理(サンドブラスト)の 2 種類である。また、繊維目付け量は 200 g/m² と 425 g/m² の 2 種類である。なお、A-4 梁は他の梁のアラミドテープ補強範囲が載荷点から支点側に 70 cm までの範囲であるのに対して、

表-1 試験体一覧

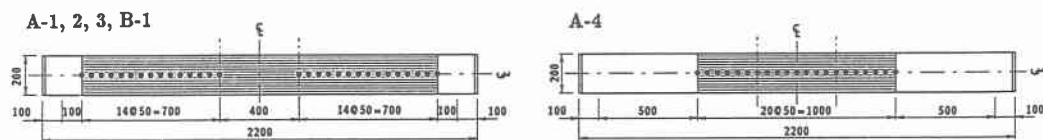
試験体名	主筋	補強方法	目付け量 (g/m ²)	チッピング
A-0	D16	無補強	-	-
A-1	D16	底面	200	あり
A-2	D16	底面	200	なし
A-3	D16	底面	425	あり
A-4	D16	底面(部分)	200	あり
B-0	D22	無補強	-	-
B-1	D22	底面	425	あり
B-2	D22	底面 + コの字	底面 425 コの字 200	あり
B-3	D22	底面 + コの字	各 425	あり
B-4	D22	底面 + 側面	各 425	あり
B-5	D22	底面 + 側面 + コの字	底面, 側面 425 コの字 200	あり
B-6	D22	底面 + 側面 + コの字	各 425	あり



図－１ 試験体の形状、寸法および配筋



図－２ アラミドテープの貼り付け方法



図－３ ひずみゲージの位置

30 cm と小さくしている。B タイプ梁では、B - 1 ～ B - 3 梁で、底面にテープを貼りつけた後に梁の軸直角方向にコの字型にテープを巻き付け（コの字補強）、さらにコの字補強のテープの繊維量を変えてその効果を検討している。一方、B - 4 ～ B - 6 梁では、底面と側面の梁軸方向にテープを貼り付け、さらにその上にコの字補強を行った場合について検討を行った。

表－２ アラミドテープの力学的性質

補強材	目付け量 (g/m ²)	厚さ (mm)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
アラミドテープ	200	0.138	1.29×10 ⁶	25,300
	425	0.293		

表－３ コンクリートの力学的特性

材令	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν
40	219.0 ～ 243.2 (平均 229.3)	1.76 × 10 ⁵ ～ 1.92 × 10 ⁵ (平均 1.81 × 10 ⁵)	0.194 ～ 0.215 (平均 0.201)

図－１に試験体の形状、寸法および配筋を示す。また、図－２にアラミドテープの貼り付け方法を示す。梁の底面の両側はいずれも半径 10 mm の面取りを行っている。表－２、表－３にアラミドテープとコンクリートの力学的特性を取りまとめた。なお、使用した鉄筋は全て SD345 であり降伏強度は 4000 kgf/cm² であった。図－３にアラミドテープの付着特性を検討するために梁の底面に貼り付けたひずみゲージの位置を示す。ひずみゲージは底面のみにテープを貼り付けた A - 1、2、3、4 梁及び B - 1 梁に貼り付けた。なお、B - 1 梁では片側せん断区間のみにゲージを貼り付けている。

3. 実験結果および考察

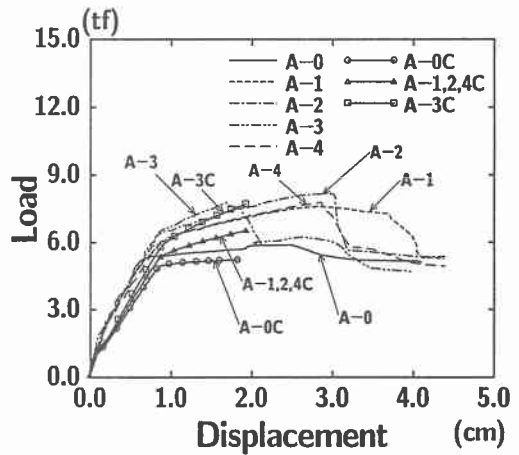
3.1 荷重－変位関係

図－4 に各梁の荷重－変位関係の実測値及び計算値を示す。図－4 (a) に、A タイプ梁の荷重－変位関係を示す。アラミドテープを底面に貼り付けた梁の降伏点荷重は無補強の梁に比べていずれも 1 tf 程度増加している。また、テープを貼り付けた梁の最大耐力はいずれも無補強の梁の耐力に比べて 2 tf 程度増加し、曲げ補強効果が見られる。補強した梁の荷重－変位関係は、鉄筋降伏後ほぼ一定の第 2 勾配を有して荷重および変位が増加した後勾配が徐々に低下し、途中で荷重が大きく低下して無補強の荷重レベルに達し、それ以後は無補強の梁と同様な関係を示している。

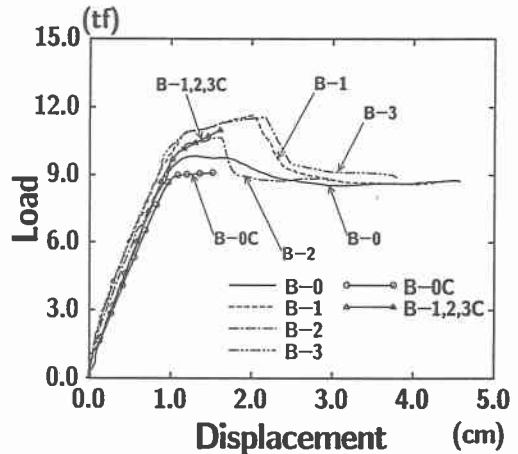
A - 1 梁は、A - 2 及び A - 4 梁が変形量 3 cm 程度で荷重が急激に低下したのに比べてより緩やかに荷重は減少し、無補強の荷重レベルに達したときの変形量は 4 cm 程度であった。一方、A - 3 梁では変形量が 1.7 cm 程度で荷重が急激に低下している。テープの繊維量が同様な A - 1、2、4 梁ではほぼ同等の第 2 勾配を有し、これらより 2 倍程度繊維量が多い A - 3 梁では第 2 勾配が若干大きくなっている。ただし、小さな変形量で荷重が急激に低下したため最大荷重は他の梁と大差がなかった。

図－4 (b) に B - 0 ～ 3 梁の荷重－変位関係を示す。アラミドテープの貼り付けによって、A タイプ梁と同様に降伏点荷重及び最大荷重が無補強の梁に比べて大きく、補強効果が出現していることが分かる。降伏点荷重レベルから最大荷重レベルまでの荷重－変位曲線のなす勾配 (第 2 勾配) は、底面テープの繊維量が 3 体とも同様のためほぼ同等である。すなわち、コの字補強テープの有無や繊維量は第 2 勾配には影響を与えていない。一方、最大荷重時の変形量は B - 1 と B - 3 梁が 2 cm 程度であるのに対して、B - 2 梁は 1.6 cm 程度と小さかったため、補強した梁の中では最も最大荷重が小さくなっている。また、降伏時荷重も B - 2 梁が最も小さく、他と異なった性状を示している。

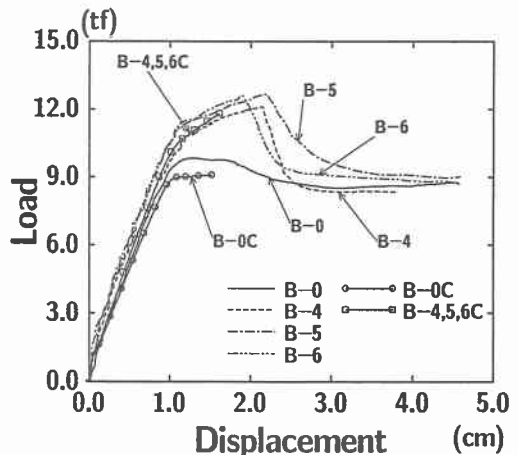
図－4 (c) に B - 0 と B - 4 ～ 6 梁の荷重－変位関係を示す。B - 4 ～ 6 梁ではいずれも無



図－4 (a) 荷重－変位関係 (A タイプ)



図－4 (b) 荷重－変位関係 (B タイプ)



図－4 (c) 荷重－変位関係 (B タイプ)

表－４ 実験結果の一覧

試験体名	実測最大荷重 P_u (tf)	最大荷重時変位 (cm)	計算最大荷重 P_{cal} (tf)	P_u / P_{cal}	実測第2勾配 β_1 (tf/cm)	計算第2勾配 β_2 (tf/cm)	β_1 / β_2	破壊形式
A - 0	5.87	2.47	5.20	1.13	-	-	-	主筋降伏後圧縮破壊
A - 1	7.57	2.83	6.51	1.16	0.825	0.944	0.874	広域的付着破壊
A - 2	8.14	2.94		1.25	0.953		1.089	テープ破断破壊
A - 3	7.75	1.69	7.70	1.01	1.532	1.545	0.992	テープ破断破壊
A - 4	7.77	2.87	6.51	1.19	0.825	0.944	0.874	広域的付着破壊
B - 0	9.82	1.29	9.06	1.08	-	-	-	主筋降伏後圧縮破壊
B - 1	11.65	2.02	10.98	1.06	1.078	1.670	0.646	テープ破断破壊
B - 2	10.65	1.61		0.97	0.684		0.410	コの字補強テープの部分破断 + 底面テープの部分破断
B - 3	11.55	2.18		1.05	0.642		0.384	コの字補強テープの部分剥離破壊
B - 4	12.11	2.15	11.79	1.03	1.426	2.298	0.621	側面テープの部分破断 + 底面テープの破断
B - 5	12.65	2.21		1.07	1.167		0.508	コの字補強テープと側面テープの部分破断 + 底面テープの部分破断
B - 6	12.60	1.90		1.07	1.789		0.779	コの字補強テープと側面テープの部分破断 + 底面テープの破断

補強の梁に比べて降伏時荷重及び最大荷重が大きくなっている。降伏荷重はコの字補強のない B - 4 梁で最も小さく、B - 5 と B - 6 梁は同程度であった。補強した梁はいずれも変形量が 2 cm 程度で荷重が急激に低下し、それ以後は無補強と同様な荷重－変位関係を示している。降伏荷重時から最大荷重時までの第 2 勾配は、補強した 3 梁で大きな差はないものの、B - 6 梁で最も第 2 勾配が大きく、最も小さな変形量で荷重が低下している。なお、最大荷重は降伏荷重の小さい分だけ B - 4 梁が他よりも小さくなっている。

3.2 実測耐力と計算耐力の比較

表－４に、実験結果と計算結果を取りまとめた。荷重－変位関係の計算は使用した材料の特性値を用いて断面分割法によって行った。なお、分割数は解が安定して得られる分割数以上とし、5.0 mm 刻みの 40 分割とした。表中の計算最大荷重はいずれもコンクリートが終局ひずみ (3,500 μ) となった場合の値であり、テープの計算ひずみは破断ひずみ (19,600 μ) に達していない。

最大荷重を実験値と計算値で比較すると、その比率は B - 2 梁を除いて 1.0 以上であり、B - 2 梁でも 0.97 であることから、通常の計算によってアラミドテープで曲げ補強した梁の最大荷重をある程度の精度で予測することが可能であると考えられる。なお、実測耐力と計算耐力の比率は全般的に A タイプ梁で大きく、B タイプ梁で小さい。すなわち、A タイプ梁の計算値は B タイプ梁のそれに比べてより安全側の評価を与えている。これは、B タイプ梁では A タイプ梁と異なり、第 2 勾配の実測値が計算値に比べて小さいことに対応している。すなわち、B タイプ梁では計算で予測される鉄筋降伏後の第 2 勾配が実験では得られていない。これは、A、B タイプ梁で主鉄筋量が異なることに起因していると考えられる。B タイプ梁では、計算した荷重－変位関係から予測されるように、鉄筋降伏後比較的小さな荷重及び変形の進展で梁上縁が圧縮破壊することが予想され、実験においても鉄筋降伏直後にコンクリートの塑性化の影響が表れたためと推察される。

3.3 破壊モード

表－４に示したように、計算上はテープ破断しない梁が、テープ破断によって破壊している場合がみられる。(A - 2、A - 3、B - 1、B - 2、B - 4 ～ B - 6 梁) 特に、A - 3 と B - 2 梁は、計算値と実測値がほぼ一致しており、計算値は実験値を安全側に評価していない。これらは、底面に貼り付けたテープが耐力の向上に余り寄与しないで破断破壊する可能性があることを示唆している。すなわち、引張力以外の力によってテープが破断破壊したものと推察される。

本実験においては、テープとコンクリートの付着性能を向上させるためにコンクリート表面をチップング処理している。しかし、A - 1 と A - 2 梁の比較から、むしろチップングをしない A - 2 梁の方がより高い付着性能を示し、耐力も向上してテープが破断破壊している。また、テープが破断しても耐力が余り向上していない梁が多いことにも、この表面処理方法が影響しているとも考えられる。これはチップングによって生じる凸部とテープとが点接触し、接触面積が小さくなるために付着性能が劣るためと考えられる。また、凸部付近でテープに応力が集中して破断することなども考えられることから、今後は表面処理方法について詳細に検討する必要がある。

3.4 付着特性

テープを貼り付け補強した梁の破壊モードは、圧縮破壊とテープ破断による破壊及びテープの付着破壊に分けられる。付着破壊問題については、文献 4) 等で炭素繊維製テープを用いた場合について検討されているが、アラミドテープの付着問題については検討例が少ない。

表 - 4 に実測第 2 勾配と計算第 2 勾配を比較して示したが、付着が確保されている場合は計算値と実測値は対応すると考えられる。A タイプ梁では、繊維量の多い A - 3 梁を除いて他はほぼ同等な実測第 2 勾配を示し、計算勾配ともほぼ対応している。しかし、A - 1 梁のように変形が大きくなるに従って第 2 勾配が徐々に低下して付着破壊する場合も見られる。一方、A - 3 梁の実測第 2 勾配は計算勾配と同等で、付着破壊はみられずテープ破断によって破壊した。B タイプ梁の実測第 2 勾配と計算値の比は A タイプ梁に比べて小さく、その傾向は特に B - 2、B - 3、B - 5 梁で顕著である。これらの梁はいずれもコの字補強を行っているが、特に B - 2、B - 5 梁のようにコの字補強テープの繊維量が少ない場合は、逆効果となることに留意する必要がある。すなわち、コの字補強テープの剝離や破断が底面テープの剝離あるいは破断に先行して生じないようにする必要がある。対策としては、梁側面の表面処理方法をチップングから粗骨材が出るまでサンダーがけする方法にかえることやコの字補強に方向シートではなくクロスシート（直交する方向に強化繊維が配向されているシート）を使用することなどが考えられる。なお、B - 6 梁でみられるように繊維量が大きなテープでコの字補強した場合には付着改善効果が期待できるものと考えられる。

図 - 5 に底面のみにテープを貼り付けた梁の最大荷重近傍におけるせん断区間のテープのひずみ分布性状を示す。A - 1 と - 4 梁は付着破壊し、A - 2、- 3 梁と B - 1 梁はテープ破断によって破壊している。図より、テープ破断で破壊した B - 1 梁の終局時と A - 3 梁の終局時におけるひずみ分布性状が極めて類似していることが分かる。一方、A - 1、- 2、- 4、梁でも破壊モードは異なるもののひずみ分布性状は互いに類似したものとなっている。B - 1、A - 3 梁はともに目付け量が 425 g/m² のテープを用いてチップングを行っている点で共通している。一方、A - 1、- 2、- 4 梁はともに目付け量が 200 g/m² のテープを用いているが、A - 2 梁はチップングを行っていない。すなわち、これらのひずみ分布性状には、テープの繊維目付け量が大きく影響していることが分かる。

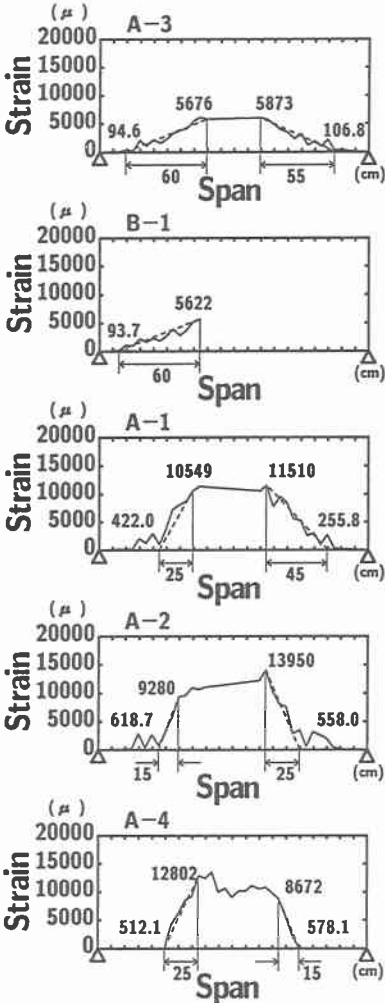


図 - 5 テープのひずみ分布性状

図-5に示すように、

表-5 付着強度

A-3、B-1 梁では、
載荷点からひずみがほぼ 0 に収束する位置までの距離は 55 ～ 60 cm 程度である。すなわち、繊維目付け量が 425g/m^2 のテープの破

試験体名	平均付着抵抗長さ (cm)	平均ひずみ差 (μ)	平均勾配 (μ/cm)	平均引張力 (tf)	平均付着強度 (kgf/cm^2)	破壊形式
A-3	57.5	5774	100	4.36	3.79	テープ破断
B-1	60	5622	94	4.25	3.54	テープ破断
A-1	35	11,029	315	3.92	5.6	付着破断
A-2	20	11,615	581	4.13	10.3	テープ破断
A-4	20	10,737	537	3.82	9.6	付着破断

断近傍における付着抵抗長さは、チップングを行った場合は 55 ～ 60 cm 程度である。一方、繊維目付け量が 200g/m^2 の A-1、-2、-4 梁の終局荷重近傍における付着抵抗長さは、15 ～ 45 cm 程度である。

載荷点におけるテープのひずみを比較すると、表-5 に示すように繊維目付け量が等しい場合には、ほぼ同程度のひずみレベルになっていることが分かる。平均ひずみ差を平均付着抵抗長さで除した値が平均勾配であり、A-3、B-1 梁では約 $100\mu/\text{cm}$ 程度、A-1、-2、-4 梁では、 $300 \sim 600\mu/\text{cm}$ 程度である。平均勾配はチップングをしていない A-2 梁で最も大きくなっている。すなわち、繊維目付け量が大きい場合には載荷点におけるひずみが小さく、かつ付着抵抗長さも長くなるため、平均勾配は目付け量 200g/m^2 に比べて繊維量の比 $1/2.125$ よりも小さく $1/6 \sim 1/3$ 程度になるものと考えられる。一方、平均ひずみ差より求めたテープに作用している引張力を比較すると、繊維目付け量に関わらずほぼ $3.8 \sim 4.4\text{tf}$ 程度であることが分かる。すなわち、本実験の場合にはテープ破断あるいは付着破壊は、載荷点直下のテープに 4.0tf 程度の引張力が作用したときに生じていることが分かる。一方、平均引張力と平均付着抵抗長さより平均付着強度を算出すると、繊維目付け量が 425g/m^2 の場合には 3.5kgf/cm^2 程度、 200g/m^2 の場合にはばらつきが大きいものの $5 \sim 10\text{kgf/cm}^2$ 程度であることが分かる。

4. まとめ

RC 梁をアラミドテープで曲げ補強する場合の、テープの補強範囲、補強方法、コンクリート表面の処理方法、コの字テープによる付着改善方法、テープの繊維目付け量などが静的耐荷性状に与える影響を実験的に検討した。本実験の範囲内で明らかになったことを要約すると、

- (1) チップング処理の付着改善効果は出現せず、逆効果になることも考えられるため、今後より詳細に表面処理方法の影響を検討する必要がある。
- (2) 梁軸直角方向に巻き付けたコの字補強は、十分な繊維量で付着が確保されていないと逆効果になる可能性がある。
- (3) アラミドテープを底面あるいは側面に貼り付けることによって降伏荷重及び終局耐力を向上させることができる。また、断面分割法を用いた通常の計算手法で実験値をある程度の精度で予測できる。
- (4) 平均付着抵抗長さ及び平均付着強度はテープの繊維目付け量に影響されるが、終局付近のテープが載荷点直下で負担する引張力には大差がなかった。

参考文献

- 1) 松岡健一、岸徳光、佐藤昌志、三上浩：水平衝撃荷重載荷による大型 RC 橋脚模型の破壊性状、コンクリート工学年次論文報告集、NO.18、Vol.2、pp.857 - 862、1996。
- 2) 三上浩、佐藤昌志、谷本俊充、松岡健一：アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の靱性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、NO.18、Vol.2、pp.1457 - 1462、1996。
- 3) 緒方紀夫、安藤博文、松田哲夫、小鼻克朗、大野了：炭素繊維による断落しを有する既存 RC 橋脚の耐震補強に関する研究、土木学会論文集、NO.540/Ⅵ-31、pp.85-104、1996.6。
- 4) 浅野靖幸、佐藤靖彦、上田多門、小野定：炭素繊維シートの付着特性について、新素材のコンクリート構造物への利用シンポジウム論文報告集、pp.75 - 80、1996.11。