

繊維ロープ巻付け補強に関する実験的研究（その1：載荷実験）

Experimental study of seismic strengthening method for RC pier used continuous fiber rope

北武コンサルタント株式会社
株式会社 高速道路総合技術研究所
独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
長岡技術科学大学

○正員 坂口淳一 (Junichi Sakaguchi)
正員 塩畑英俊 (Hidetoshi Shiohata)
正員 三田村浩 (Hiroshi Mitamura)
正員 西弘明 (Hiroaki Nishi)
正員 下村匠 (Takumi Shimomura)

1. はじめに

近年、既設鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強工法として、連続繊維を補強材として使用する研究が進められ、実構造物への適用も行われている。連続繊維を用いた補強は、補強後の断面増加が極めて少なく、かつ軽量であるが、その多くはシート状の連続繊維をエポキシ樹脂で固めてFRP化して補強材として使用するものであるため、施工に手間がかかるなどの短所がある。

本研究では、RC橋脚のための連続繊維を用いた新たな耐震補強技術である、繊維ロープ巻付け補強^{1), 2), 3)}に関して検討を行った。本補強工法は、樹脂で固めずに繊維ロープを補強材として用いるものであり、既往の研究^{1), 2)}では、じん性補強に対する効果を有する事はわかっているが、そのメカニズムについては未解明な点が多い。

そこで本研究では、繊維ロープ巻付け補強工法の確立を目的に、柱式橋脚および壁式橋脚を模した鉄筋コンクリート橋脚供試体を製作し、載荷実験を行い、その実験結果を基に、ロープ巻付け補強の補強効果とそのメカニズムについて検討した。

2. 実験概要

2.1 実験パラメータ

本実験の実験パラメータは、以下に示す4項目であり、これらの実験パラメータに従って供試体を製作した。

- ① 柱部の破壊形態と繊維ロープによる補強効果
- ② 断面形状(B/H)と繊維ロープによる補強効果
- ③ 繊維ロープの巻付け間隔による影響
- ④ 繊維ロープの材質による補強効果

実験で用いた供試体 10 体の一覧を表-1 に示す。本実験で用いた供試体は、基準となる無補強の供試体と、ロープ巻付け補強を行った供試体で構成される。

2.2 供試体形状および配筋

供試体の形状および配筋概略図を図-1に、供試体断面図を図-2を示す。本実験では、断面形状1:1の柱式の供試体については、設計計算上、無補強の場合に、曲げ破壊、曲げ降伏後のせん断破壊、曲げ降伏前にせん断破壊の3通りとなるように帯鉄筋の配置間隔を決定した。その結果、柱軸方向鉄筋SD345 D25ctc150mmに対し、帯鉄筋としてSD295 D10を、曲げ破壊型で100mm間隔(図-1(a))、曲げ降伏後のせん断破壊型で200mm間隔、せん断破壊型で300mm間隔で配置することとした。一方、断面形状1:2の壁式供試体については、無補強の場合で曲げ降伏後のせん断破壊となるように、柱軸方向鉄筋SD345 D25ctc150mmに対し、柱帯鉄筋は、SD295 D10を200mm間隔とした(図-1(b))。

なお、軸方向鉄筋の特性値は、材料試験の結果、降伏強度が391.5N/mm²、降伏ひずみが2164 μ 、ヤング係数が180.9kN/mm²であった。

2.3 供試体の補強概要

各供試体の補強方法を、表-1中に示した。繊維ロープによる補強の例として、繊維ロープを柱全高に対して、25mm間隔で巻付けた場合の補強概略図を、図-3に示す。ロープの巻付け方法は、図に示すように、コンクリート中へのロープが食込みを防ぐために供試体柱部の四隅に山形鋼を添えて、柱基部から天端へ向けて、人力によって等間隔で螺旋状に巻付けるものである。

なお、補強に用いた繊維ロープは、供試体No.8がビニロン繊維、それ以外は、アラミド繊維の連続繊維ロープである。断面形状1:2の壁式供試体についても、同様の方法で施工した。

表-1 供試体一覧

No.	断面形状 (H:B)		破壊形態 ^{※1}			ロープの間隔 (mm)			補強方法		
	1:1	1:2	M	MS	S	無補強	25	50	補強	ロープの巻き方 ^{※2}	補強区間
1	○		○			○			アラミドロープ	—	—
2	○		○				○			A	1.5×塑性ヒンジ長
3	○			○		○				—	—
4	○			○			○			B	全長
5	○			○				○		B	全長
6	○				○	○				—	—
7	○				○		○			B	全長
8	○			○			○		ビニロンロープ	B	全長
9		○		○		○			アラミドロープ	—	—
10		○		○			○			B	全長

※1. 破壊形態… M:曲げ破壊型, MS:曲げ降伏後のせん断破壊型, S:せん断破壊型

※2.ロープの巻き方… A:高さ方向に塑性ヒンジ長の1.5倍の範囲に対してロープを巻付ける。
B:柱全長に対して柱部周面にロープを巻付ける。

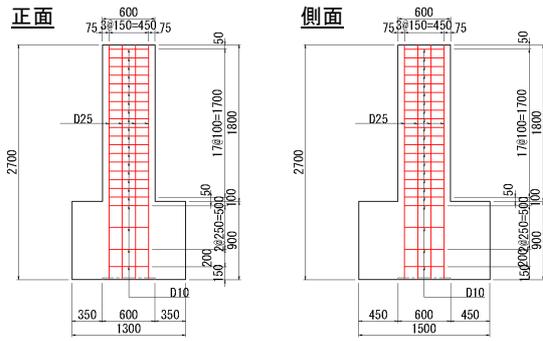


図-1(a) 供試体形状および配筋概略図 (M型, 断面形状 1:1)

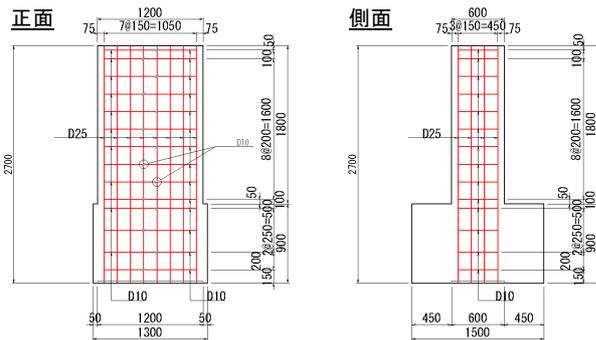


図-1(b) 供試体形状および配筋 (MS型, 断面形状 1:2)

表-2 供試体の耐力

断面形状	1:1			1:2
	曲げ破壊型	曲げ降伏後 せん断破壊	せん断破壊	曲げ降伏後 せん断破壊
供試体No.	No.1,2	No.3,4,5,8	No.6,7	No.9,10
降伏耐力 V_{my}	227.4	227.4	227.4	420.2
終局耐力 V_{mu}	284.6	284.6	284.6	487.0
せん断耐力 V_{yd}	366.4	260.1	224.7	469.1
V_{my}/V_{yd}	0.62	0.87	1.01	0.90
V_{mu}/V_{yd}	0.78	1.09	1.27	1.04

2.4 供試体の降伏耐力および終局耐力

表-2 に、各破壊形態の降伏耐力と終局耐力、せん断耐力を示す。ここに示す曲げ耐力およびせん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾による方法で、材料試験結果を用いて算出したものである。

2.5 載荷方法

載荷は、フーチングを床に固定し、鉛直方向に油圧ジャッキで所定の軸力を加えた後に、図-4に示す載荷サイクルで、正負交番載荷を行った。鉛直方向の荷重は、上部工死荷重反力による軸力を想定し、供試体天端に一定の鉛直荷重を載荷した。鉛直荷重の大きさは、断面形状1:1の柱式供試体で120kN、断面形状1:2の壁式供試体で240kNとした。

正負交番載荷の載荷サイクルは、図-4に示すように、コンクリートにひび割れを導入することを目的に、計算上の降伏耐力の50%の荷重を1サイクル載荷した後、軸方向鉄筋の橋脚基部が、降伏ひずみに達する際の載荷点変位 δy を基準に、定変位の繰返し載荷を行った。

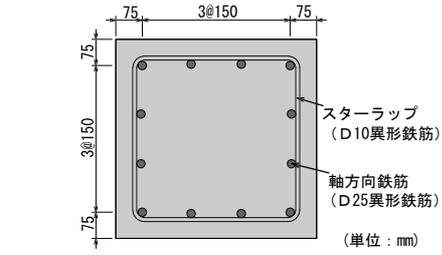


図-2(a) 供試体断面図 (断面形状 1:1)

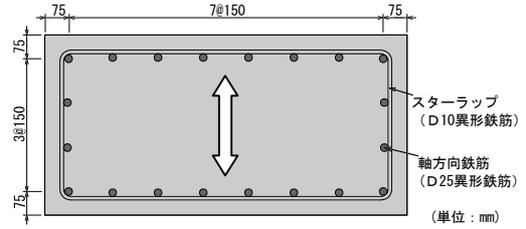


図-2(b) 供試体断面図 (断面形状 1:2)

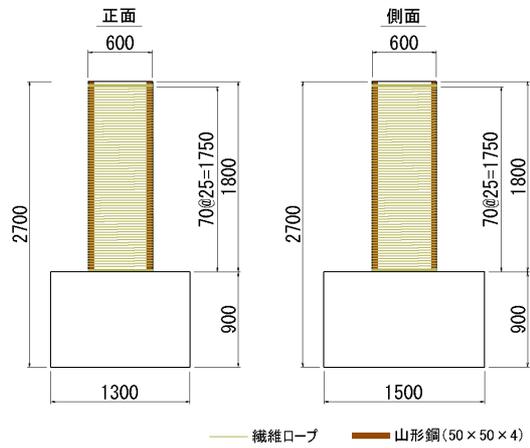


図-3 補強概略図 (繊維ロープ 25mm 間隔巻付け)

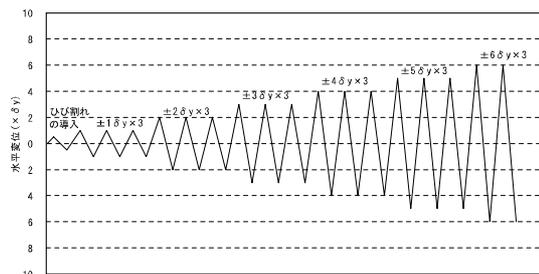


図-4 正負交番載荷の載荷サイクル

2.6 計測項目

本実験の計測項目は、供試体柱部の水平変位、軸方向鉄筋のひずみ、ロープのひずみ、かぶりコンクリートのはらみだし量などである。

柱部の水平変位は、柱両側面について、載荷点に変位計を取り付けて測定した。かぶりコンクリートのはらみ出し量を測定するために、柱正面および背面の中央位置について、柱基部から200mmと400mmの位置に、水平変位計を設置した。ロープのひずみは、供試体柱部正面および背面の中央位置を対象に、柱基部から断面高さの

範囲について、基部から100mm, 150mm, 300mm付近に、繊維ロープに直接ひずみゲージを貼付ける方法で測定した。繊維ロープへのひずみゲージの貼付け方法として、本実験では、ロープにエポキシ樹脂を含浸させて硬化させた上に、ひずみゲージを貼付ける手法を採用した。

3. 載荷試験結果

3.1 損傷状況

1 δy の載荷終了までに、柱全高にわたり、曲げひび割れが発生した。それ以降、載荷点の水平変位の増加とともに、柱側面で斜め方向にひび割れが伸展する。繊維ロープによる補強を行わなかった供試体については、その後、曲げ破壊型と曲げ降伏後のせん断破壊型の供試体については、かぶりコンクリートが剥落するとともに、軸方向鉄筋が座屈することで、耐力が急激に低下した。一方、せん断破壊型の無補強の供試体については、軸方向鉄筋の降伏後に、斜めひび割れが発達し、耐力が急激に低下した。すなわち、無補強状態の供試体においては、曲げ破壊型および曲げ降伏後のせん断破壊型として設計した供試体が曲げ破壊で、せん断破壊型として設計した供試体が曲げ降伏後のせん断破壊型で破壊した。

一方、繊維ロープ巻付けを行った供試体については、のはらみだしが開始した後も、巻付けた繊維ロープが、コンクリートの剥落を防止しすることから、無補強の供試体のような急激な耐力低下ではなく、徐々に耐力が低下する傾向となった。

3.2 載荷荷重-載荷点変位関係

図-5に、載荷試験から得られた載荷荷重-載荷点変位関係の例として、曲げ破壊型の無補強供試体と補強供試体（供試体No.1とNo.2）のものを示す。

図を見てわかるように、無補強の供試体No.1は、6 δy で耐力の低下が開始するのに対して、巻付け補強を行った供試体No.2は、8 δy で耐力の低下が開始し、耐力が低下した後も、急激な耐力低下を生じず、徐々に耐力が低下することが確認できる。

3.3 繊維ロープのひずみ

補強材として巻付けた繊維ロープに貼付けたひずみゲージから得られた、ロープのひずみの履歴曲線の例を図-6に示す。図中では、載荷ステップごとに色分けをして履歴曲線を描いた。

図からわかるように、ロープのひずみは、載荷ステップ4 δy から徐々に増加し始め、各載荷サイクルの載荷点変位のピーク時に、ロープのひずみが極大値をとるような挙動をとることを確認した。

3.4 かぶりコンクリートのはらみだし

供試体柱部の正面および背面表面を標点として、変位計を設置してかぶりコンクリートのはらみだし量を計測した。かぶりコンクリートのはらみだし量の計測結果の例として、供試体No.2の背面側基部から200mmの高さの断面中央位置のかぶりコンクリートのはらみだし量と載荷点変位の関係を図-7に示す。図からわかるように、かぶりコンクリートのはらみだし量は、ある載荷ステップで急激に増加する傾向にあることを確認した。

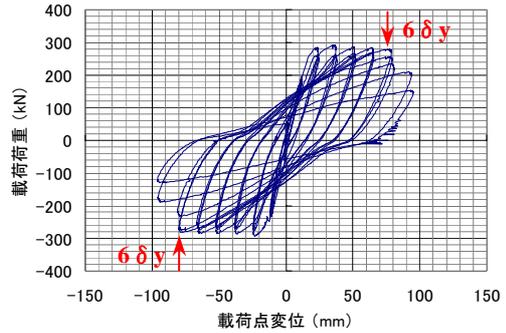


図-5(a) 載荷荷重-載荷点変位関係 (供試体 No.1)

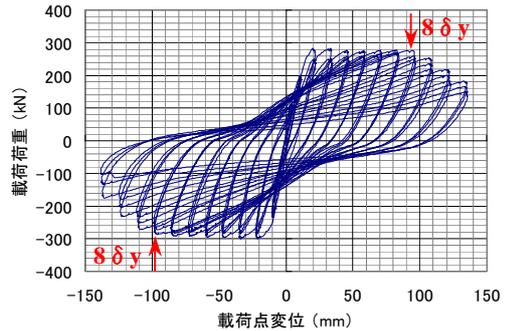


図-5(b) 載荷荷重-載荷点変位関係 (供試体 No.2)

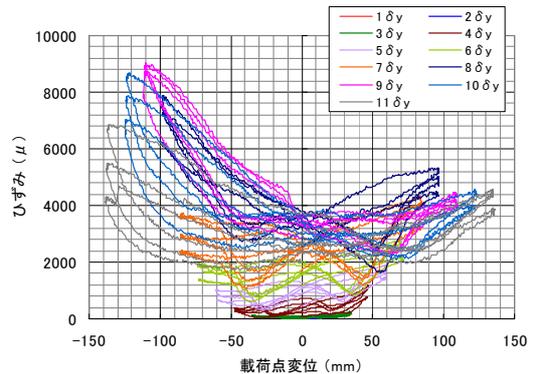


図-6 ロープのひずみ-載荷点変位関係 (供試体 No.2 背面側 基部からの高さ 159mm の中央位置)

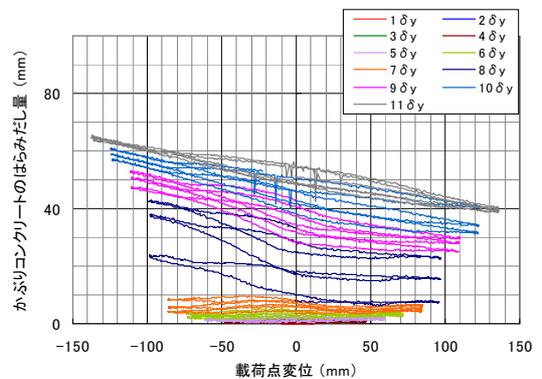


図-7 かぶりコンクリートのはらみだし量-載荷点変位関係 (供試 No.2 背面側 基部からの高さ 200mm の中央位置)

4. 補強のメカニズムに関する検討

耐力の低下点と、かぶりコンクリートのはらみだし量およびロープのひずみの関係を検討する。載荷荷重、かぶりコンクリートのはらみだし量、ロープのひずみと、載荷点変位の関係の包絡線の例として、供試体No.2のものを図-8に示す。それぞれの図中に、荷重-変位関係包絡線（図-8(a)）において、耐力が低下し始める点の変位を青線で示した。

図から、耐力が低下し始める変位で、かぶりコンクリートのはらみ出し量が急増していることがわかる。一方、供試体のはらみだしが開始する以前から、徐々に、ロープにひずみが生じはじめる、すなわちロープに張力が導入され始めていることが確認された。このロープに導入される張力が、かぶりコンクリートのはらみだし、または軸方向鉄筋の座屈開始を抑制するため、ロープ巻付け補強を行った場合、耐力が低下し始める変位が大きくなるものと考えられる。

そして、かぶりコンクリートのはらみだし開始後も、巻付けたロープによってかぶりコンクリートの剥落が防止されるため、軸方向鉄筋の座屈を抑制するとともに、剥落せずに残ったかぶりコンクリートが、圧縮力を伝達する効果があることから、実験で確認されたようなじん性向上の効果が得られるものと考えられる。

また、上述の比較的小さな変位から作用し始めるロープによる拘束は、斜めひび割れの発達を拘束する効果があるため、せん断破壊傾向の供試体の斜めひび割れの発達による耐力の低下を抑える効果があるものと考えられる。このことにより、せん断破壊傾向の供試体に補強を行った場合に、鉄筋の座屈による曲げ破壊モードの破壊へ、破壊形態を移行させることができたと考えられる。

5. まとめ

本研究では、既設の鉄筋コンクリート橋脚を対象とした、新たな耐震補強工法である、繊維ロープ巻付け補強について、その補強効果およびメカニズムの検討を行った。その結論を以下に示す。

- a) 繊維ロープ巻付け補強は、耐力が低下し始める変位を大きくするとともに、耐力が低下し始めた後の耐力の低下を緩やかにすることができる。
- b) 繊維ロープ巻付けを行った場合に、耐力低下が開始する変位が大きくなるのは、ロープに生じる張力により、かぶりコンクリートの剥落が抑制されるためと考えられる。
- c) 繊維ロープ巻付けを行った場合に、耐力低下開始後の荷重-変位関係の下降勾配を緩やかなのは、ロープによって、軸方向鉄筋の座屈を抑制するとともに、剥落せずに留まったかぶりコンクリートが、圧縮力を伝達する効果をもつためと考えられる。
- d) 繊維ロープ巻付け補強により、せん断破壊傾向にある部材を、軸方向鉄筋の座屈による曲げ破壊型へ移行させることができる。

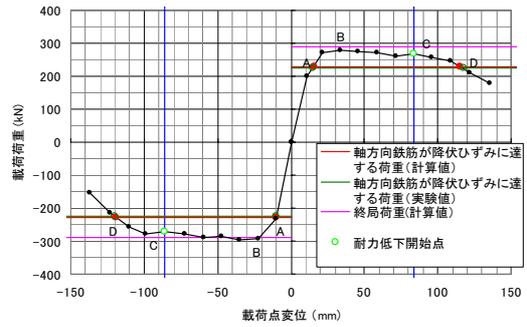


図-8(a) 荷重-変位関係包絡線 (供試体 No.2)

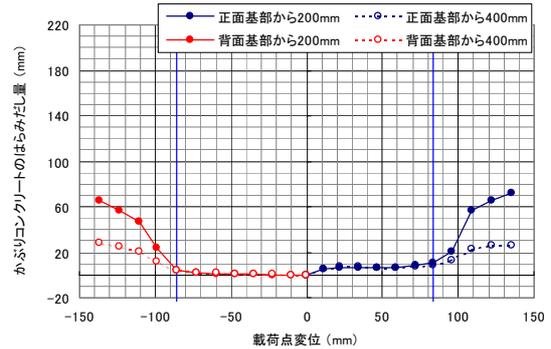


図-8(b) はらみだし量-変位関係包絡線 (供試体 No.2)

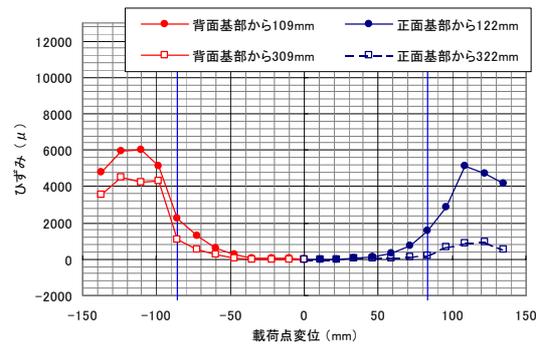


図-8(c) ロープのひずみ-変位関係包絡線(供試体No.2)

参考文献

- 1) 三田村浩, 本間淳史, 下村 匠, 丸山久一: アラミドロープを用いた RC 橋脚の鉄筋段落し部のじん性補強に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1267-1272, 2008.
- 2) 田坂雄治, Nguyen Hung Phong, 下村 匠, 関島謙蔵: アラミドロープを用いた新たな耐震補強工法の開発に向けた実験的研究, 第 64 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), V-487, 2009.9.
- 3) 田坂雄治, Nguyen Hung Phong, 下村 匠, 関島謙蔵: ロープ状連続繊維補強材によるコンクリート部材のせん断補強, 第 60 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), CS16-010, 2005.9.
- 4) 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, pp.83-86, 2008.3.