

論文 既設コンクリート部材の補強における連続繊維ロープの適用

松本 章裕^{*1}・Nguyen Hung Phong^{*2}・下村 匠^{*3}・関島 謙蔵^{*4}

要旨: 連続繊維ロープは、連続繊維を組紐状、より線状などに成形加工した連続繊維単体からなるコンクリート用補強材である。フレキシブルな状態で容易に配筋作業を行うことができ、エポキシ樹脂を含浸・硬化させなくとも補強材として機能するという特長を有する。既設コンクリート部材の外周に連続繊維ロープを巻き付け、その保護を目的とした巻立てコンクリートで被覆する補強方法について検討した。その結果、鉄筋コンクリート柱部材の正負交番載荷時のじん性を向上させることが明らかになり、既設構造物の耐震補強工法として適用できる可能性が示された。

キーワード: 連続繊維ロープ, コンクリート巻立て, せん断補強, 耐震補強

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性向上, 耐震補強のために、鋼材に比べ引張強度, 耐腐食性に優れ, かつ軽量である炭素, アラミド, ガラスなどの連続繊維をコンクリート用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。その多くは連続繊維をエポキシ樹脂で固めたFRPとして補強材として使用するものであり, これまでに連続繊維棒材, 連続繊維シートが代表的な実用例となっている^{1,2,3)}。

一方, それら以外の形態のコンクリート用連続繊維補強材についての研究も行われている。著者らは, 連続繊維ロープ (写真-1, 表-1) の研究を行っている。連続繊維ロープは, さまざまな形状に手作業で容易に加工できるので, 配筋の作業性に優れる。この利点を生かすために, 繊維結合樹脂を用いず繊維単体でコンクリート用補強材として使用することをひとつの目標に研究を進めている。既報^{4),5)}では, 新設時にコンクリート中に埋め込んだ連続繊維ロープを, せん断補強筋として機能させることが可能であることを確認した。

本研究では, 本補強材の作業性, 高耐久性の特長を生かせると考えられる既設構造物の補強への適用について検討する。腐食性環境下における橋脚の RC 巻立て工法の代替工法となることを念頭に置き, 連続繊維ロープを既設構造物の外周に巻きつけた後, コンクリートを巻き立てることを考えた。

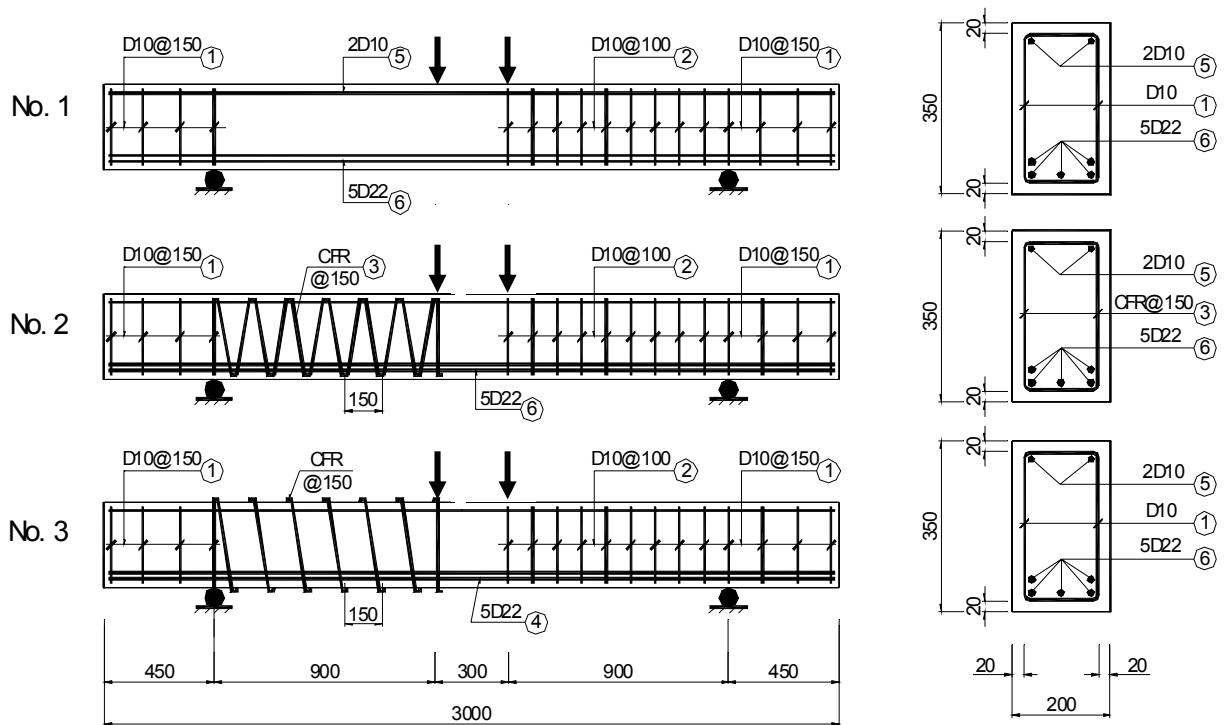


写真-1 連続繊維ロープ

表-1 使用した連続繊維ロープの物性

本論文での実験	はり	柱
ロープの成形状態	組紐	より紐
断面積(mm ²)	5.56	17.19
引張強度(MPa)	2070	1660
弾性係数(MPa)	94400	53300
破断ひずみ(%)	2.2	2.8

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 *2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科博士後期課程材料工学専攻 (正会員)
 *3 長岡技術科学大学 助教授 工学部環境・建設系 工博 (正会員)
 *4 倉測建設コンサルタント(株) 技術開発部長 工博 (正会員)



図－1 供試体概要

本論文では、その基礎的検討として、既存部材への連続繊維ロープの巻き方、定着方法、巻立てコンクリートによる被覆の効果については供試体を用いて試験する。さらに耐震補強としての効果を確認するために、鉄筋コンクリート柱試験体に適用して正負交番荷重を行う。

2. 連続繊維ロープを外周に巻き付けた RC はりの載荷試験

2.1 概要

まず、既存部材の外周に連続繊維ロープを巻き付けただけの場合、コンクリートに埋設した連続繊維ロープと同じ補強効果を発揮するかどうかを検討する。供試体は、既報^{4),5)}においてコンクリート中に埋設してせん断補強効果を検討したはり供試体と同じ諸元のものを用いる。

2.2 供試体

はり供試体の概要を図－1に示す。はりの右側スパンはせん断補強鉄筋によりせん断補強を施し、試験区間の左側スパンでせん断破壊が生じるようにした。基準供試体 No.1 のせん断余裕度の計算値は右側スパン左側スパンでそれぞれ 0.7, 0.3 である。実験に使用した連続繊維ロープ

表－2 使用した鉄筋とコンクリート

主鉄筋の断面積(mm ²)	1935
主鉄筋の降伏強度(MPa)	703
コンクリートの圧縮強度(MPa)	46.7

の物性は表－1に、鉄筋とコンクリートの強度は表－2に示す。

供試体 No.1 は比較用のせん断補強なしの供試体である。

供試体 No.2 は連続繊維ロープを軸方向鉄筋に 150mm ピッチで巻き付け、せん断補強筋としてコンクリート中に埋設した供試体である。ロープ端部は鉄筋に結び付け、この部分のみ樹脂により固定した。供試体 No.1 と No.2 は既報^{4),5)}データである。

供試体 No.3 は、No.1 と同じ既存はりの外周に連続繊維ロープを 150mm ピッチで巻き付けたものである。ロープ巻付け前に試験区間のコンクリートの隅角部は曲率半径 17mm の面取りを行った。ロープ端部ははりに隙間なく 5 回巻き付け、この部分のみ樹脂により固定した。連続繊維ロープの巻付け作業は、特殊な機材を使用せず、人力により行った。

2.3 実験結果

荷重試験では静的単調荷重を行った。図-2に荷重-はり中央のたわみ関係を示す。いずれの供試体もせん断ひび割れ発生荷重（98.1kN、図中の矢印部分）まではほぼ同じ挙動を示した。せん断補強筋がない供試体 No.1 はせん断ひび割れ発生後少し荷重の増加が見られたが、耐荷メカニズムが消失し、終局を迎えた。

供試体 No.2 はせん断ひび割れ発生後、コンクリート中に埋め込まれた連続繊維ロープがひび割れを跨いでせん断力を受け持つことで荷重が増加した。その後ロープが破断し終局となった。部材の最大耐力は No.1 の約2倍に向上した。

供試体 No.3 は、ひび割れ発生後の最大荷重は No.1 と同程度であったが、ピークを超過した後、耐荷力が一定のまま部材の変形が進む区間が見られた。その後ロープが破断し終局となった。最大荷重後は外周に巻き付けた連続繊維ロープが力を受け持っていると考えられる。しかし、ひび割れ発生直後は供試体 No.1 と同じ挙動をしていることから、連続繊維ロープを既設構造物に巻き付けただけでは、コンクリートとの付着がないために、ひび割れ発生後ただちに力を分担することができないと考えられる。

3. 連続繊維ロープ巻立てとコンクリート巻立てを併用した RC はりの載荷試験

3.1 概要

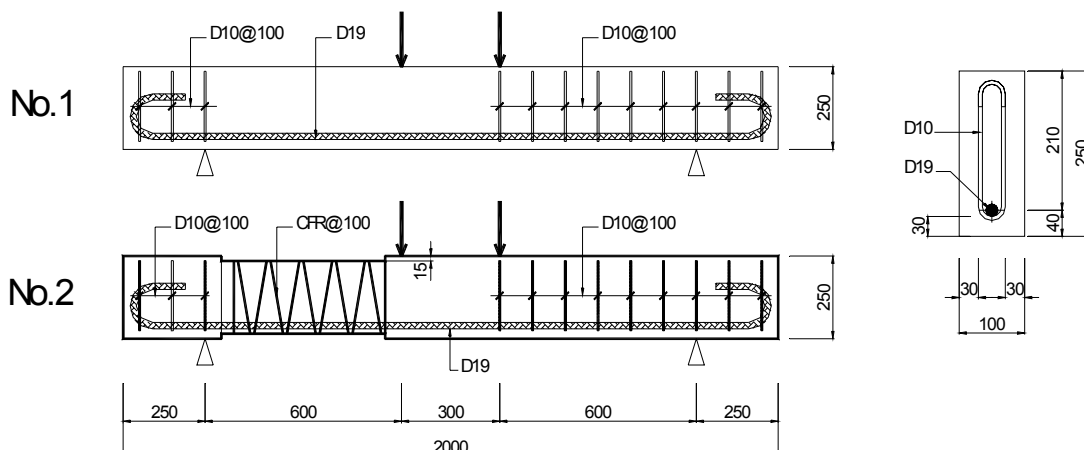


図-3 供試体概要

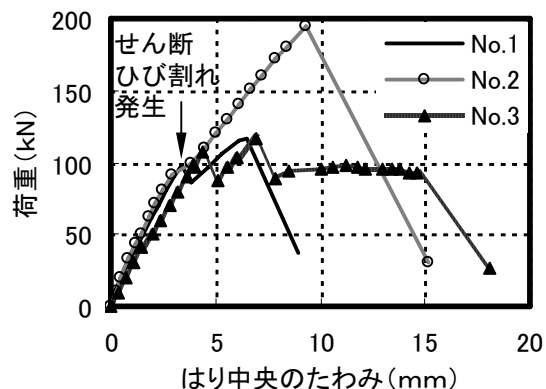


図-2 荷重-はり中央のたわみ関係

2章の実験結果より、既存部材の外周に連続繊維ロープを巻き付けた場合に、コンクリート中に埋設した場合と同等の補強効果を得るためには、コンクリートとロープの間に付着が必要であることが示唆された。また、実構造物に適用することを考えた場合、衝突や環境作用などからロープを保護するために何らかの被覆を施すことが望ましいと考えられる。

そこで、既設部材の外周に連続繊維ロープを巻き付けた後にコンクリートで巻き立てる補強工法を考案し、どのような補強効果が得られるか検討することにした。まず簡単なはり供試体で、実験的検討を行った。

3.2 供試体

供試体の概要を図-3に示す。実験に使用した連続繊維ロープの物性は表-1に、鉄筋とコンクリートの強度は表-3に示す。試験区間は左側スパンとした。本実験シリーズは、せん断

ひび割れ発生荷重と、主鉄筋降伏荷重が近くなるように諸元を決定した。連続繊維補強ロープを、柱部材の鉄筋降伏後のじん性補強に用いることを念頭に置いたためである。供試体 No.1 は比較用のせん断補強なしの供試体である。供試体 No.1 のせん断余裕度の計算値は右側スパン左側スパンでそれぞれ 3.9, 0.9 である。

供試体 No.2 は、連続繊維ロープ巻立てとコンクリート巻立てを併用する供試体である。なお、No.2 は、既存部材の試験区間のコンクリートの断面積を減らしておき、コンクリート巻立て後に No.1 と同じ断面積になるようにした。これは、実験に用いた供試体が小型であるので、巻立てコンクリートによる断面積増加によるコンクリートの分担せん断耐力 V_c の増加が無視できない可能性があるため、実験上の措置として行ったものである。

供試体作製手順は次のようである。母部材のコンクリート打設後、試験区間の表面処理を行ってから養生を行った。養生終了後、隅角部の面取りを行い、連続繊維ロープを巻き付けた。連続繊維ロープは巻付け間隔 100mm とし、載荷点側から巻き始め、支点側に到達すると反転して載荷点側に向かって巻き付け、巻き始めと巻き終わりの部分を結んだ。巻立てコンクリートが定着の役目をするので、樹脂による定着は行っていない。巻付け作業は人力により行った。その後、巻立てコンクリートを打設した。巻立てコンクリートの厚さは 15mm とし、骨材の最大寸法は 10mm とした。

3.3 実験結果

図-4 に荷重-はり中央のたわみ関係を示し、写真-2 に終局時のひび割れ状況を示す。

供試体 No.1, No.2 ともに主鉄筋降伏までは同じ挙動を示した。

供試体 No.1 は、主鉄筋降伏後、せん断ひび割れが 1 本生じて耐荷力を失い終局となった。

一方、供試体 No.2 は、主鉄筋降伏後、複数のせん断ひび割れが発生したが、これらにより部材が終局状態にいたることはなく、大きな変形

表-3 使用した鉄筋とコンクリート

主鉄筋の断面積(mm ²)	286.5
主鉄筋の降伏強度(MPa)	385
既設コンクリートの圧縮強度(MPa)	46.0
巻立てコンクリートの圧縮強度(MPa)	30.6

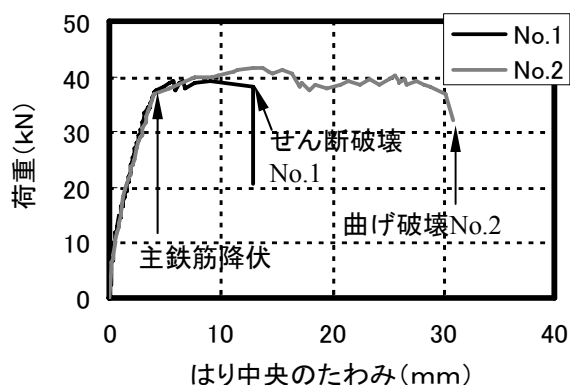
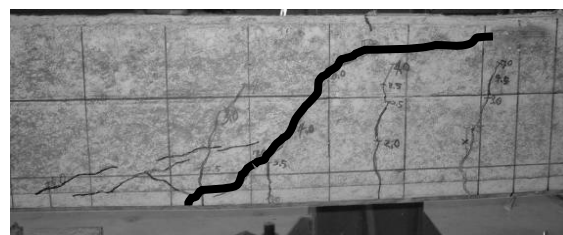
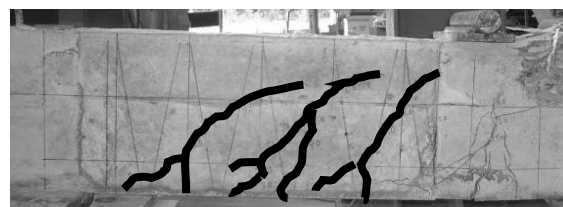


図-4 荷重-はり中央のたわみ関係



No.1 (補強なし)



No.2 (補強あり)

写真-2 ひび割れ状況

をした後、最終的に上部コンクリートが圧縮破壊し、破壊モードは、曲げ引張破壊となった。すなわち、連続繊維ロープとコンクリート巻立てにより部材の破壊モードをせん断破壊から曲げ破壊に移行させることに成功した。

供試体 No.2 においてせん断ひび割れが複数生じたのは、ひび割れ発生後連続繊維ロープがひび割れを跨いで引張力を受け持ったためであると考えられ、巻立てコンクリートが付着の伝達に有効に機能していることを示している。

4. 連続繊維ロープ巻立てとコンクリート巻立てを併用した RC 柱の正負交番載荷試験

4.1 概要

はり供試体の単調載荷試験の結果、連続繊維ロープとコンクリート巻立てを併用する補強工法が有効である可能性が示された。そこで、より実構造物の状況に近い RC 柱供試体に本補強工法を適用し、正負交番載荷試験を行った。

4.2 供試体

図-5に供試体概要を示す。実験に使用した連続繊維ロープの物性は表-1に、鉄筋とコンクリートの強度は表-4に示す。この供試体は著者らが過去に行った連続繊維シート巻立て補強に関する実験⁶⁾に用いたのと同じ諸元であり、無補強の場合、せん断余裕度は0.7であり、曲げ降伏とほぼ同時にせん断破壊する。

連続繊維ロープは、巻付け間隔 100mm とし、載荷点側から巻き始め、フーチング部に到達すると反転して載荷点側に向かって巻き付けた。ロープは人力により巻き付け、端部は結んだだけで樹脂は使用していない。その後、柱周囲に基部から型枠を設置し、巻立てコンクリートを打設した。巻立てコンクリートの厚さは 40mm とし、粗骨材最大寸法 13mm、スランプ 14cm のコンクリートを用いた。締固めはバイブレータ

を用いて型枠外部から型枠に振動を加えることにより行った。

4.3 載荷方法

供試体は鉛直に設置し、水平方向に正負交番載荷した。載荷点は柱基部から 1250mm、反力床から 2250mm の位置とした。

載荷ステップは、正負ごとの降伏荷重時の載荷点変位を 1δ とし、この整数倍を 1 ステップとして繰返し載荷を行った。繰返し回数はステップごとに正負 3 回とした。最大荷重を経験したあと、水平荷重が最大荷重の 8 割まで低下した時点を終局とし、載荷終了とした。

4.4 実験結果

図-6に荷重-載荷点変位関係を示す。本試験では、正負で値の異なる降伏変位を採用して載荷変位を制御したため、正負非対称となった。この供試体は正負 7δ の載荷まで耐えることができた。ただし、値の大きい正側の δ を基準に負

表-4 使用材料の物性

主鉄筋の断面積(mm ²)	2006
主鉄筋の降伏強度(MPa)	384
既設コンクリートの圧縮強度(MPa)	25.2
巻立てコンクリートの圧縮強度(MPa)	26.2

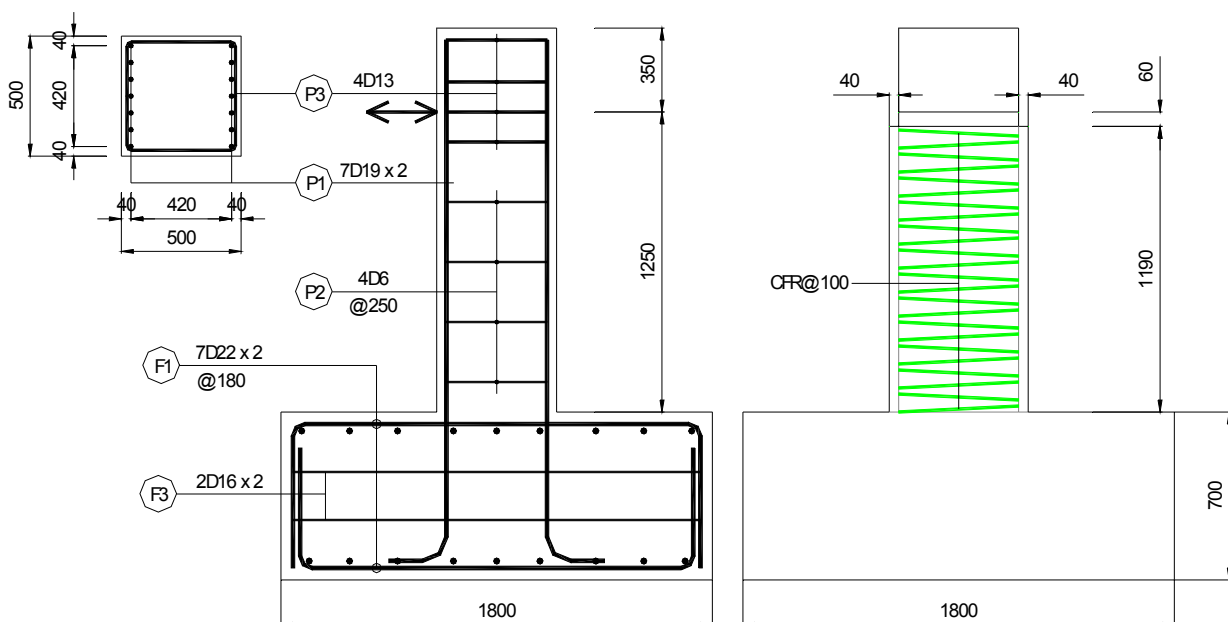


図-5 供試体概要 (左: 配筋図, 右: 補強後の状態)

側の終局変位を計算しなおすと 3δ となった。無補強時には曲げ降伏とほぼ同時にせん断破壊して終局となることから判断すると、本補強工法によりじん性補強の効果があったといえる。終局時にもロープが破断することがなかった。

観察された破壊性状の特徴は、交番载荷が進むにつれ、巻立てコンクリートに大きなひび割れが生じ、既存コンクリートからの部分的な剥離が徐々に進むことである。はり試験の結果とあわせて考えると、本補強工法の補強メカニズムは次のようであると考えられる。

常時および部材の変形が小さい段階では巻立てコンクリートとの付着を介して既存部材から連続繊維ロープに力が伝達されロープが補強材として機能するが、繰返し载荷により巻立てコンクリートが剥離し付着が徐々に消失する。しかし、剥離は部分的であるので、ロープの端部定着は損なわれない。大変形時には、ロープが既存部材のコンクリートの崩落を防ぐことによりじん性補強に寄与するので付着がなくともよい。むしろロープのひずみの集中を防ぐために付着がないほうが望ましいと考えている。

5. まとめ

本論文では、連続繊維ロープを既設コンクリート部材の補強に適用するための基礎的な実験的検討を行った。以下の知見が得られた。

- (1) 連続繊維ロープを既設部材の外周に巻き付けただけでは、付着がないためコンクリート中に埋め込んだ場合と同じ補強効果は得られない。
- (2) 連続繊維ロープを巻き付けた後、コンクリート巻立てを行うことで、ひび割れ発生後にロープがただちに力を受け持つ耐荷メカニズムが実現できる。
- (3) 連続繊維ロープとコンクリート巻立てを併用する補強工法は、既設鉄筋コンクリート柱部材のじん性に補強効果がある。

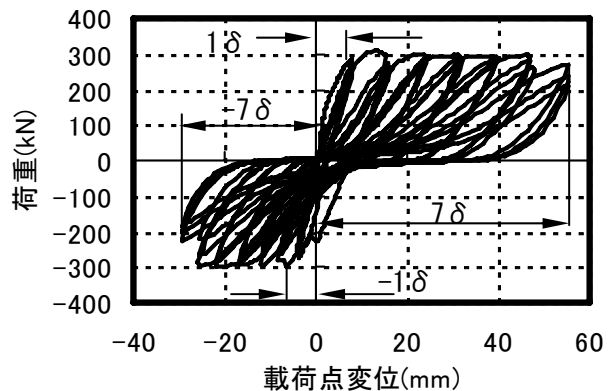


図-6 荷重-载荷点変位関係

謝辞

本研究を進めるにあたり、長岡技術科学大学副学長丸山久一先生のご指導とご助言を得た。実験では、田中泰司助手と中村裕剛技官のご尽力を得た。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会:連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー101, 2000.7
- 2) 日本コンクリート工学協会:連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書, 1997.7
- 3) 日本コンクリート工学協会:連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書(II), 1998.5
- 4) Nguyen Hung PHONG, Takumi SHIMOMURA, Kenzo SEKIJIMA, Kyuichi MARUYAMA : Experimental Study on Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced With Continuous Fiber Rope, Proceedings of the JCI, Vol.27, pp.1441-1446, 2005
- 5) 田坂 雄治, Nguyen Hung PHONG, 下村 匠, 関島 謙蔵:連続繊維ロープによるコンクリート部材のせん断補強, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, pp.465-466, 2005.9
- 6) 新保 学幸, 下村 匠, 丸山 久一:連続繊維シート補強RC柱部材のじん性予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.883-888, 2001