

連続繊維ロープを用いたRC部材のせん断補強

羽田野 英明¹・中島 隆²・YUN Hyun-Do³・内田 裕市⁴・六郷 恵哲⁵

¹正会員 中日本建設コンサルタント株式会社建設技術本部 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-8-6)

E-mail: h_hatano@nakanihon.co.jp

²岐阜大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: p3121017@edu.gifu-u.ac.jp

³Department of Architectural Engineering, Chungnam National University (Daejeon, Republic of Korea)

E-mail: wiseroad@cnu.ac.kr

⁴正会員 岐阜大学教授 総合メディアセンター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: uchida@gifu-u.ac.jp

⁵正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: rk@gifu-u.ac.jp

本論文は、連続繊維ロープを用いたRC棒部材のせん断補強に関する基礎的な研究報告である。RC梁試験体を用いて、連続繊維ロープの巻き付け間隔、コンクリート表面への固定方法、巻き付けたロープの被覆方法を変化させて、破壊試験を行い、連続繊維ロープによるせん断補強効果について検討している。その結果、ロープ巻き付け後にロープにアクリル樹脂などを塗付含浸させてコンクリート表面に固定し、HPFRCCなどを被覆材として用いることで、連続繊維ロープの有する耐力を十分に活用したせん断補強が可能であることを示している。

Key Words : continuous fiber rope, shear reinforcement, acrylic resin, HPFRCC

1. はじめに

わが国において、1980年以前に建設されたRC構造物では、せん断補強鉄筋量が少なく、せん断耐力が不足しているものも少なくない。兵庫県南部地震以後、耐震設計法の改定により、RC部材のせん断補強に関して、各種の補強方法が採用されている。RC梁や柱では、鋼板巻立て、RC巻立て、連続繊維シート巻立てなどの補強工法が採用されている。

このうち、連続繊維シートによる補修補強工法は、指針¹⁾が整備され、

- ・ 軽量であるため既設構造物への付加重量が非常に小さい。
- ・ 重機などを使用せず手作業による施工が可能のため、施工スペースの制約を受けない。
- ・ 短工期での施工が可能である。
- ・ 現場での加工が容易で、複雑な形状をした構造物にも柔軟に対応ができる。

などの特徴から、RC橋脚の耐震補強だけでなく、RC梁補強やRC床版補強など広く利用されている。

なお、補修補強指針¹⁾では、直径0.7~1.0mm/本の連続繊維ストランドを5mm間隔程度以下に、巻付け機を用いて施工する補修・補強についても、部分的に記載しているが、その時点では幅広い研究が進んでおらず、本格的に適用する指針としては十分とはいえないと思われる。一方、連続繊維を直径5mm程度以下のロープ状に加工して、構造物に巻き付け、補修・補強を行う工法は、連続繊維シート巻立て工法に比べて、以下のような特徴が付加され、有効な補修補強工法となることが考えられる。

- ・ ロープ状素材のため、現場での長さ調整など加工性に優れる。
- ・ 軽量で可搬性に優れるため、施工性が良好である。
- ・ 部材ハンチ部などの形状変化や構造物表面の不陸などへの対応性に優れる。

連続繊維ロープを用いた補強に関する研究は、2004年頃より、丸山、関島、下村、三田村らを中心として進められており、2006年から、その研究成果²⁾³⁾が報告されている。これらの成果を受けて一部の材料(アラミド繊維ロープ)に限定して、道路橋の橋脚耐震補強に適用する設計要領⁴⁾に取り入れられた。しかし、連続繊維ロー

プを用いた補強は、現状では、橋脚柱の耐震補強におけるかぶりコンクリートの剥落防止とじん性の向上を目的とし、部材のせん断耐力向上は期待しない構造に限定して適用されている。また、設計要領⁶⁾では、ロープへの樹脂含浸や躯体への接着は行わず、維持管理の観点からポリマーセメントモルタルなどで表面被覆を行っている。

本研究では、連続繊維ロープを用いた補修補強法の適用拡大に向けて、連続繊維ロープをRC部材のせん断補強に適用し、ロープ損傷防止などの維持管理上で必要となる表面被覆材を構造材料として有効利用することを目標とし、コンクリート表面へのロープの固定方法や被覆材の違いが、補強する部材耐力にどのように影響するかを明らかにして、そのせん断耐力の評価式を提案することを目的としている。

2. 実験方法

(1) 試験体概要

載荷実験は、図-1および表-1に示すような梁試験体を用いて実施した。

試験体は、図-1に示すように、左側スパンはスターラップを用いてせん断補強を行い、右側スパンの補強条件を、表-1に示すように変化させて、13種類とした。連続繊維ロープの巻き間隔は、計算上で曲げ降伏が先行する20mmおよび40mmと、せん断破壊が先行する100mmの3種類とした。

試験体N000は、せん断補強を行わない基準試験体であり、試験体S100は、標準的なスターラップを100mm間隔で配置した基準試験体である。

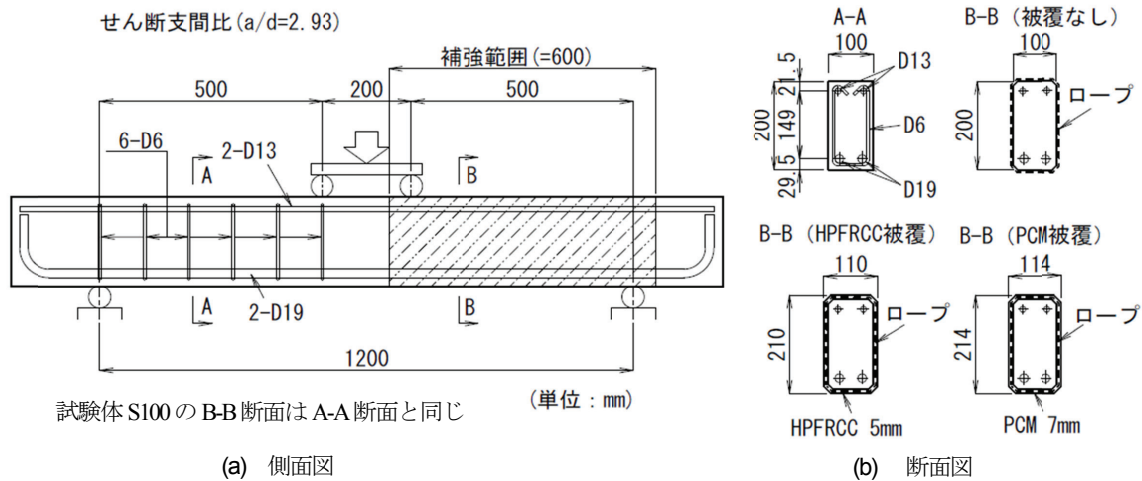


図-1 試験体形状

表-1 補強条件

| 試験体 | ロープ | | 固定材 | | 被覆材 | | 備考 | |
|------------|-----|-----------|-----|----------------------------|--------|----------|-------------|----------|
| | 種類 | 巻き間隔 (mm) | 種類 | 使用量 (g/m ²) | 種類 | 被覆厚 (mm) | | |
| R020 | PE | 20 | — | — | — | — | ロープ巻きの効果確認 | |
| R020Acr | | | 樹脂A | 460 | — | — | — | 樹脂Aの効果確認 |
| R020AcrHpf | | | | | HPFRCC | 5 | 被覆材の影響を確認 | |
| R020AcrPor | | | | | PCM | 7 | | |
| R040Acr | | 40 | 樹脂A | 420 | — | — | 巻き間隔の影響を確認 | |
| R040AcrHpf | | | | | HPFRCC | 5 | | |
| R100Acr | | 100 | 樹脂A | 360 | — | — | | 樹脂Bの効果比較 |
| R100AcrHpf | | | | | HPFRCC | 5 | | |
| R020Pri | | 20 | 樹脂B | 130 | — | — | 樹脂Bの効果比較 | |
| R020PriHpf | | | | | HPFRCC | 5 | | |
| R020Hpf | | 20 | — | — | HPFRCC | 5 | HPFRCCの効果確認 | |
| N000 | | 無し | — | せん断補強を行わない基準試験体 | | | | |
| S100 | | 無し | — | はり全体にスターラップ筋(D6)を配置した基準供試体 | | | | |

PE：超高強度ポリエチレン繊維を用いた連続繊維ロープ

連続繊維ロープは、設計要領⁹⁾で規定しているアラミド繊維に比べて、強度や弾性率などで若干低いが、経済性に優れるPE繊維を編み上げ、巻き付け時の作業性を重視して、樹脂などの含浸処理は行わない素材のままのロープとした。
連続繊維ロープのコンクリート面への固定材について

表-2 材料配合

| 材 料 | W/C (%) | 単 位 量 (kg/m ³) | | | | | | | | | |
|----------|---------|----------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | | 水 | セメント | 膨張材 | 細骨材 | 粗骨材 | ポリマー | 7号珪砂 | 繊維 | 減水剤 | 増粘剤 |
| 普通コンクリート | 45 | 166 | 368 | — | 731 | 1034 | — | — | — | 1.027 | — |
| HPFRCC | 30(W/B) | 380 | 1188 | 76 | — | — | — | 392 | 14.6 | 37.9 | 0.900 |
| PCM | 38 | 222 | 586 | — | 1364 | — | 45 | — | — | — | — |

減水剤：普通コンクリートはAE減水剤(リグニンスルホン酸系)，HPFRCCは高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
セメント：早強セメント 膨張材：エトリンガイト・石灰複合系
繊維：高強度ポリエチレン繊維，繊維径12μm，繊維長12mm，引張強度2600N/mm²，弾性係数88×10³N/mm²

表-3 コンクリート，モルタル強度特性

| 材 料 | 圧縮強度 (N/mm ²) | 曲げ強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) | 材 齢 (日) | 適用部位 |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|------|
| 普通コンクリート | 41 | 4.3 | 3.1 | 31×10 ³ | 27 | はり本体 |
| HPFRCC | 75 | — | 7.4 | 22×10 ³ | 8 | 被覆材 |
| PCM | 48 | — | 3.0 | — | 8 | 被覆材 |

表-4 鉄筋強度特性

| 使用部位 | JIS規格 | 材質 | 鉄筋径 | 降伏強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) |
|----------|-----------|-------|-----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 引張鉄筋 | JIS G3112 | SD345 | D19 | 396 | 574 | 2.0×10 ⁵ |
| 圧縮鉄筋 | JIS G3112 | SD345 | D13 | 380 | 539 | 2.0×10 ⁵ |
| スターラップ鉄筋 | JIS G3532 | SWM-R | D6 | 481 | 600 | 2.0×10 ⁵ |

表-5 連続繊維ロープ強度特性

| 項目 | 特性値 | 備 考 |
|--------|--------------------------|---|
| 引張強度 | 2600N/mm ² 以上 | PE繊維の基本物性 (メーカー公表値) |
| 弾性率 | 79kN/mm ² 以上 | |
| 破断伸度 | 3~5% | |
| 引張強さ | 6.44kN | PE繊維φ3mmクロスロープ ロープ特性値は、樹脂被覆や樹脂含浸を行わない素材ロープの基本物性を示す。 試験方法：JIS L 1013 準用 引張速度：20cm/min 標線間距離：20cm キャプスタンチャック使用 |
| 伸び率 | 15.5% | |
| 断面積 | 4.37mm ² | |
| 引張強度 | 1473N/mm ² | |
| 引張弾性係数 | 8.89kN/mm ² | |

表-6 固定材の材料特性

| 固定材 | 試験項目 | 測定値(N/mm ²) | 試験方法 | 備考 |
|-----|------------|-------------------------|------------|-----------|
| 樹脂A | コンクリート付着強度 | 2.5 | JIS A 6909 | メーカーカタログ値 |
| | 圧縮強度 | 70 | JIS K 7208 | |
| | 圧縮弾性率 | 940 | JIS K 7208 | |
| | 曲げ強度 | 30 | JIS K 7203 | |
| | 引張強度 | 20 | JIS K 7113 | |
| | 引張せん断強度 | 19 | JIS K 6850 | |
| | 引張強度 | 15 | | 本研究での測定 |
| 樹脂B | 引張強度 | 0.8 | | |

は、2種類の樹脂を比較した。樹脂Aは、連続繊維シート補強で用いられるアクリル樹脂系の接着樹脂であり、繊維シートへの含浸性に優れた材料である。また、樹脂Bは、新旧のコンクリート打継面に使用されるコンクリートの接着性を向上させるアクリル樹脂系のプライマー材である。樹脂Bは、引張強度が 0.8N/mm^2 と樹脂Aの引張強度 15N/mm^2 に比べ小さいが、1液タイプのため施工性が良好で、低コストであることから、比較対象とした。

連続繊維ロープの表面被覆材については、ポリマーセメントモルタル（以下、PCMと略称）と、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下、HPFRCCと略称）を比較した。PCMの被覆厚は、試験体表面より7mmとし、HPFRCCの被覆厚は5mmとした。

(2) 材料特性

表-2に試験体のコンクリート配合およびモルタル配合を示す。また、表-3～表-6に材料強度を示す。これらの特性は、すべての試験体で共通である。

表-3に示した引張強度は、普通コンクリートに関しては割裂試験により、HPFRCCに関しては一軸引張試験で求めたものである。

表-5の連続繊維ロープの強度特性は、樹脂などを含浸させない素材ロープの強度特性を示している。

表-6に示した樹脂の材料特性のうち、樹脂Bについては、材料の強度特性等のメーカー値は明らかにされていないため、樹脂Aと同一の試験方法で引張強度を求めた。この引張強度は、JSCE-k521-1999「表面被覆材の酸素透過性試験方法」に規定される遊離塗膜の作成方法に準じて幅28mm×長さ200mm×厚さ1mmの硬化成形物（遊離塗膜）を作製し、固定間距離を50mmとした引張試験に

より求めた。

(3) ロープ補強の施工手順

ロープ補強の施工は、「ロープ巻き付け⇒樹脂固定⇒気中6日養生⇒表面被覆材施工⇒気中8日養生⇒載荷試験」の順に実施した。試験体へのロープの巻き付けは、巻き付け機などを用いず、たるみが生じないように、人力で張力を与えながら実施した。ロープ端部は、ロープ相互を一般的な「ふた結び」にて固定した。試験体表面へのロープの固定は、ロープを巻き終えた後、補強区間全体に樹脂を塗付することで行った。

(4) 載荷方法

載荷実験では、静的単調載荷を行った。荷重は、図-1に示したように、2点載荷とし、荷重をロードセル、供試体の変位を高感度変位計により計測した。荷重の載荷位置の2箇所と、支点位置の2箇所の変位を測定し、支点位置の変位の影響を除いて、載荷位置の変位とした。

3. 実験結果

実験結果の総括として、表-7に各試験体の最大荷重用時の作用せん断力と鉛直変位、および終局時の破壊形態を示す。

(1) ロープ巻きの効果

ロープ補強の基本特性として、図-2(a)に、せん断補強を行わない試験体N000、はり全体にスターラップを100mm間隔で配置した試験体S100、およびロープを

表-7 実験結果の総括

| 試験体 | 最大作用せん断力 (kN) | 最大荷重用時の鉛直変位 (mm) | 終局状態 |
|------------|---------------|------------------|---------------|
| R020 | 59.7 | 13.9 | せん断破壊(斜め引張破壊) |
| R020Acr | 67.2 | 9.7 | 上縁コンクリートの圧壊 |
| R020AcrHpf | 68.0 | 5.6 | 上縁コンクリートの圧壊 |
| R020AcrPor | 67.2 | 6.6 | 上縁コンクリートの圧壊 |
| R040Acr | 57.1 | 9.6 | せん断破壊(ロープ破断) |
| R040AcrHpf | 68.6 | 8.6 | 上縁コンクリートの圧壊 |
| R100Acr | 40.4 | 12.2 | せん断破壊(ロープ破断) |
| R100AcrHpf | 54.3 | 4.9 | せん断破壊(ロープ破断) |
| R020Pri | 60.8 | 13.9 | せん断破壊(斜め引張破壊) |
| R020PriHpf | 68.3 | 11.1 | 上縁コンクリートの圧壊 |
| R020Hpf | 69.7 | 12.9 | 上縁コンクリートの圧壊 |
| N000 | 34.4 | 2.1 | せん断破壊(斜め引張破壊) |
| S100 | 67.3 | 8.2 | 上縁コンクリートの圧壊 |

20mm間隔で巻き付けた試験体R020の載荷試験結果を比較して示す。試験結果は、縦軸に作用せん断力（載荷荷重の1/2）、横軸に荷重載荷点直下の鉛直変位を示している。なお、試験体R020のロープは、人力で巻き付けたままで、コンクリート表面との付着を確保するような処理は行っていない。また、図には、コンクリートが負担するせん断耐力 V_c 、曲げ降伏耐力 V_{my} 、および、 V_c とスターラップが負担するせん断耐力を合計した最大せん断耐力 V_{yd} の計算値を、併せて示している。なお、 V_c の算出においては、後述する式(2)により、せん断支間比の影

響を考慮した。曲げ降伏時のせん断力 V_{my} は、部材の降伏モーメントをせん断力に換算して算出した。スターラップが負担するせん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾の設計せん断耐力算定式により、部材係数 γ を1.0として算定した。

三種類の試験体の破壊状況を、図-3と図-4に示す。せん断補強を行わない試験体N000では、図-3(a)のような斜めひび割れが発生して、せん断破壊（斜め引張破壊）に至った。スターラップによる補強を行った試験体S100では、図-3(b)に示すように引張鉄筋の降伏後に上縁コ

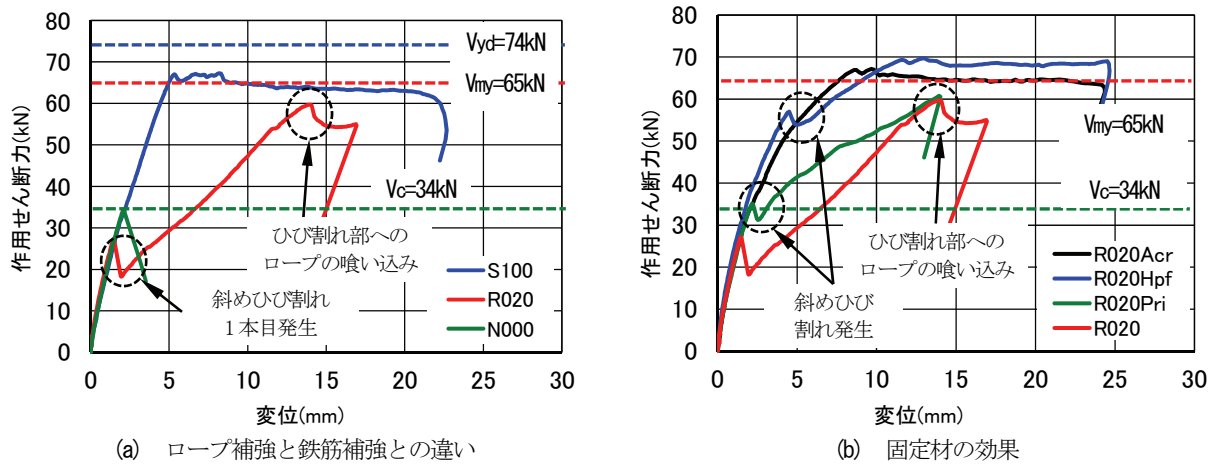


図-2 ロープ補強の効果

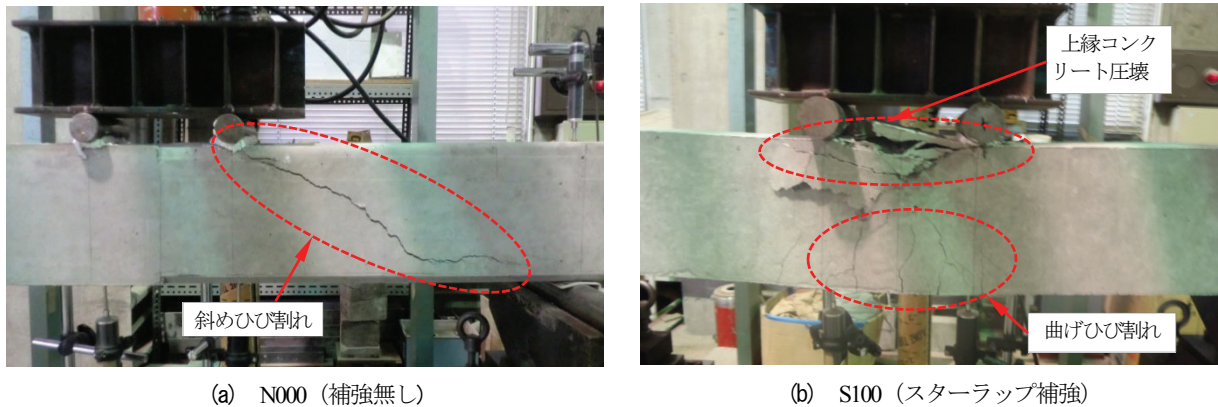


図-3 基準試験体の終局時の破壊状況

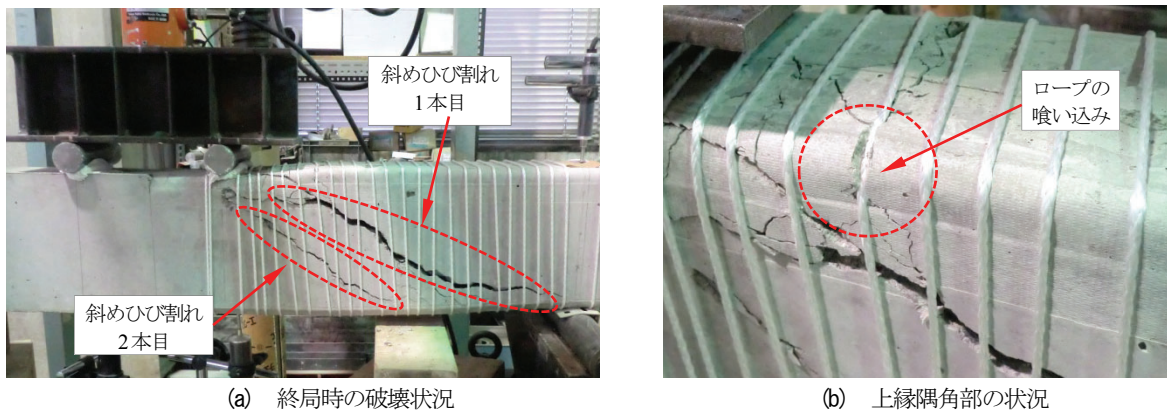


図-4 R020 (ロープ間隔 20mm, 固定材無し, 被覆材無し)

ンクリートが圧壊して終局状態となった。

ロープ補強のみを行った試験体R020では、図-4(a)に示すような1本目の斜めひび割れが発生し、図-2(a)に示すように、一旦、荷重が低下したが、ひび割れの拡大とともにロープ補強の効果が表れ、荷重が上昇するとともに2本目の斜めひび割れが発生した。その後、1本目の斜めひび割れがはり上縁部に進展し、はり上縁の隅角部近傍に発生したひび割れ部に図-4(b)に示すようなロープの喰い込みが発生した時点で、終局状態となった。

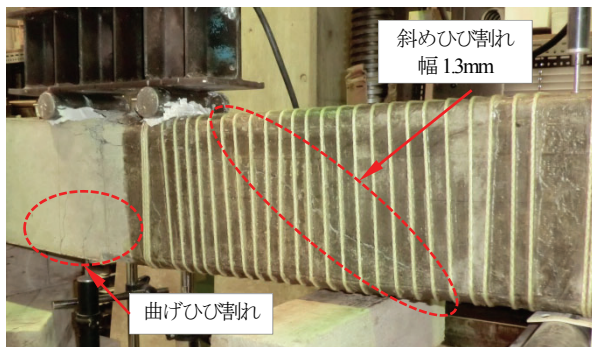
これらの結果より、ロープ補強では、初期の斜めひび割れ発生後にロープが機能するまでの一時的な耐力低下を防ぐために、ロープをコンクリート表面に固定する必要があることがわかった。また、ロープ補強した部材のかぶりコンクリートの剥落を防止し、終局時の靱性を確保するためには、隅角部のひび割れ部へのロープの喰い

込みを防止するような対応、例えば設計要領⁹⁾に示されるようなL形鋼の配置などが必要ことが確認できた。

なお、図-2(a)に示したように、試験体N000の斜めひび割れ発生時のせん断力34.4kNに対し、試験体R020の1本目の斜めひび割れ発生時のせん断力27.1kNであり、N000に対するせん断力の比率が、0.79と低下している。試験体は同一形状・同一材料であり、その違いはロープ巻きの有無のみであり、斜めひび割れによる一時的な荷重低下が発生した他の試験体の結果(R040Acrで30.7kN, R100Acrで34.0kN)を踏まえると、このせん断力の違いは、コンクリートの脆性破壊時の耐力のバラツキに起因すると思われる。

(2) 固定材の効果

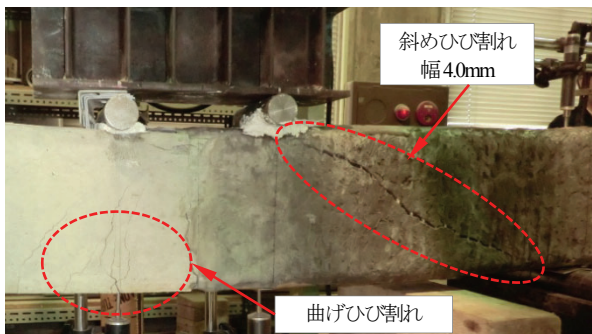
前項で示したように、ロープを用いたせん断補強では、



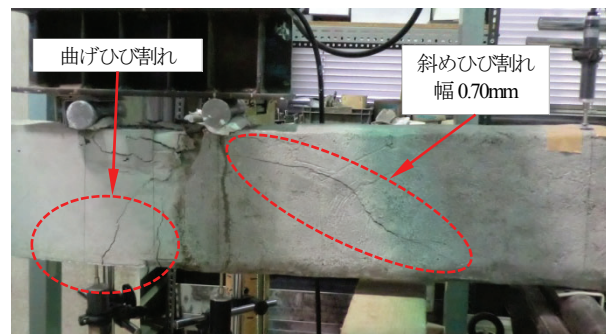
(a) R020Acr (ロープ間隔 20mm+樹脂 A)



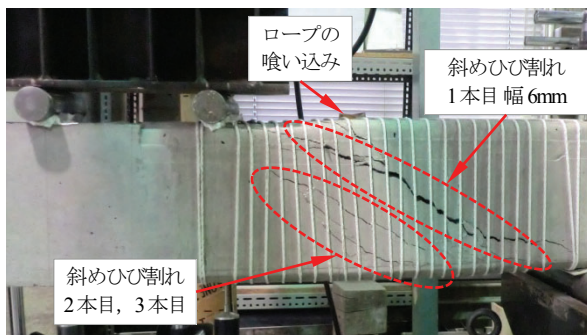
(d) R020AcrHpf(ロープ間隔 20mm+樹脂 A)
HPFRCC 被覆



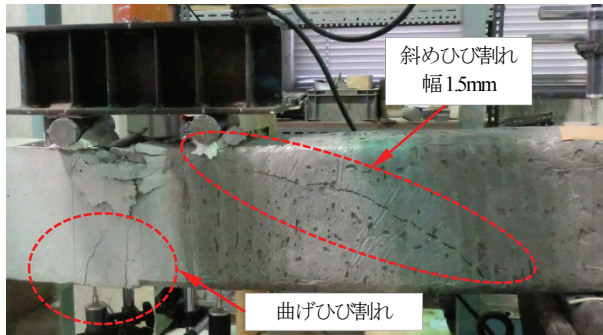
(b) R020Hpf(ロープ間隔 20mm+HPFRCC)



(e) R020AcrPor(ロープ間隔 20mm+樹脂 A)
PCM 被覆



(c) R020Pri(ロープ間隔 20mm+樹脂 B)



(f) R020PriHpf(ロープ間隔 20mm+樹脂 B)
HPFRCC 被覆

図-5 ロープ補強間隔 20mm の終局時の破壊状況

斜めひび割れが発生したと同時にロープ補強効果が発揮できるように、ロープをコンクリート表面に固定することが重要である。この固定材の効果を評価するために、樹脂Aで固定した試験体R020Acr、樹脂Bで固定したR020Pri、および、樹脂による固定処理を行わずHPFRCCで被覆したR020Hpfの載荷試験結果を、図-2(b)に、固定材を用いない試験体R020の結果と比較して示す。図には、コンクリートが負担するせん断耐力 V_c と、曲げ降伏時のせん断力 V_{my} の計算値を併せて示している。また、固定材を用いた三種類の試験体の終局時の破壊状況を、図-5(a)~(c)に示す。

樹脂Aでロープを固定した試験体R020Acrでは、ロープ補強の効果により初期の斜めひび割れは確認されず、図-5(a)のような引張鉄筋の降伏後、変形の進行に伴って斜めひび割れ(最大ひび割れ幅0.3mm)が発生したが、最終的に上縁コンクリートが圧壊して終局に至った。なお、固定材を用いない試験体R020で発生したロープの食い込みについては、樹脂Aを用いたR020Acrでは発生せず、固定材の使用による食い込み防止効果が認められた。

また、HPFRCCで被覆した試験体R020Hpfでは、曲げ降伏する前に、図-5(b)のように斜めひび割れ(最大ひび割れ幅4mm)が発生したが、ロープ補強の効果によりせん断破壊には至らず、引張鉄筋の降伏後、上縁コンクリートが圧壊して終局状態となった。

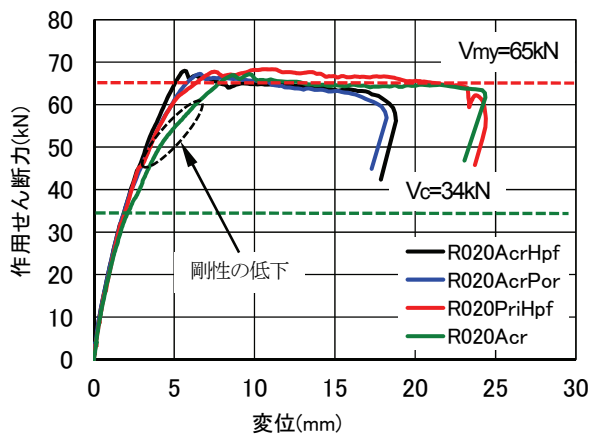
一方、樹脂Bでロープを固定した試験体R020Priでは、R020と同様に、図-5(c)に示すように一本目の斜めひび割れが発生し、そのひび割れの進行とともにロープ補強の効果が図-2(b)のように表れ、荷重が増加した。その後、試験体R020と同様に、はり上縁部への斜めひび割れの進展に伴い隅角部へのロープの食い込みが発生して、終局となるせん断破壊となった。

この結果より、ロープをコンクリート表面に固定することで、ロープによるせん断補強効果が向上し、固定材としては、樹脂Aが適していることが判った。また、HPFRCCの固定効果は、斜めひび割れにより一時的な耐力低下が発生するため、樹脂Aには及ばないものの、終局耐力では樹脂Aと同程度となることから、ある程度の固定効果が発揮できることがわかった。

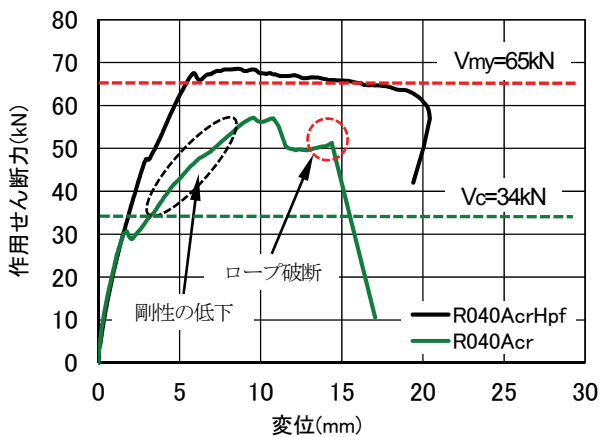
(3) 被覆材の効果

ロープ補強では、連続繊維ロープをコンクリート表面に適切に固定して一体化することにより、その補強効果を得ることができるが、長期耐久性の確保などの観点から被覆などの保護対策が必要である。その被覆材の有無が、荷重-変位関係や最大耐力に及ぼす影響について検討した試験結果を、図-6に示す。図にはコンクリートが負担するせん断耐力 V_c と曲げ降伏耐力 V_{my} の計算値を併せて示している。また、それらの試験体の破壊状況を、図-5、図-7、および図-8に対比して示す。

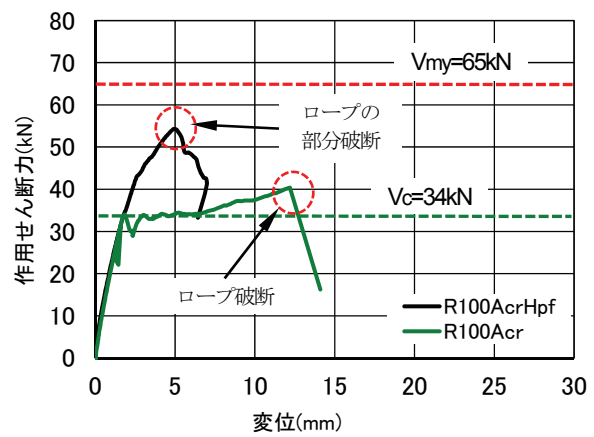
図-6(a)に、ロープ間隔20mmで補強した試験体として、樹脂Aで固定しHPFRCCで被覆したR020AcrHpf、樹脂Aで固定しPCMで被覆したR020AcrPor、および樹脂Bで固定



(a) ロープ間隔 20mm



(b) ロープ間隔 40mm



(c) ロープ間隔 100mm

図-6 被覆材の効果

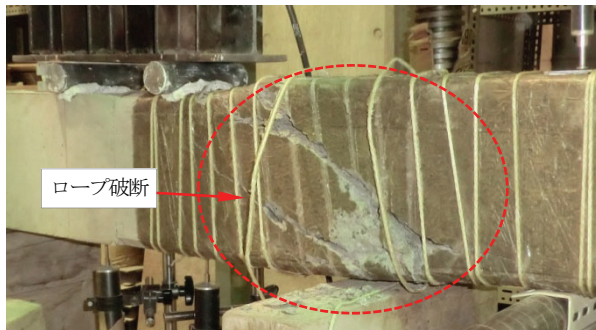
しHPFRCCで被覆したR020PriHpfの結果を、被覆しないR020Acrの結果と比較して示す。図-5(d)～(f)に示すように、いずれの試験体も引張鉄筋降伏後上縁コンクリートが圧壊して、終局状態となっている。また、図-6(a)からわかるように、被覆した三試験体では、被覆しない試験体R020Acrに比べて、コンクリートが負担するせん断耐力 V_c を越える荷重での剛性低下が生じていない。これは、被覆しない試験体では、斜めひび割れの進行に伴い、ロープがコンクリート表面から剥離する範囲が、斜めひび割れ位置を起点として拡大することで、ロープが伸びやすくなり、部材の剛性低下をもたらしたものと考えられる。このことから、被覆材はロープとコンクリート表面との付着機能を保持する機能があると考えられる。

図-6(b)に、ロープ間隔40mmで補強した試験体として、樹脂Aで固定しHPFRCCで被覆した試験体R040AcrHpfの結果を、被覆しないR040Acrの結果と比較して示す。被覆しない試験体R040Acrでは、図-7(a)に示すように、ロープが破断し、せん断破壊となった。一方、被覆した試験体R040AcrHpfでは、図-7(b)に示すように、斜めひび割れは発生したものの、引張鉄筋降伏後上縁コンクリートが圧壊して、曲げ破壊に至った。また、図-6(b)からわかるように、ロープ間隔20mmの場合と同様に、被

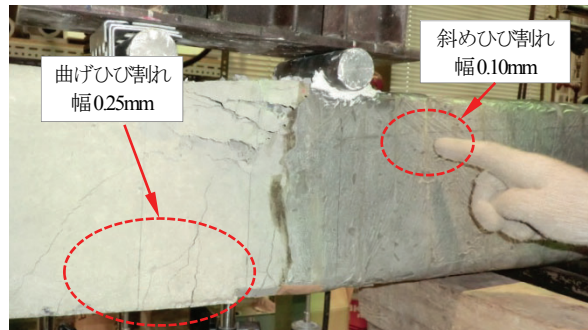
覆した試験体では、被覆しない試験体に比べて、斜めひび割れ発生以降の剛性低下の度合いは小さいことがわかった。

被覆しない試験体R040Acrでは、斜めひび割れ発生後のひび割れ幅の拡大により、コンクリートが受け持つせん断力が低下することで、ロープが受け持つせん断力が増加し、ロープの破断によりせん断破壊に到達したものと考えられる。一方、被覆した試験体R040AcrHpfでは、ロープとコンクリート表面の付着が被覆材により確保されることで、斜めひび割れ発生後のひび割れ幅の拡大が抑制され、コンクリートが受け持つせん断力が低下しないために、せん断破壊が発生せず、最終的に曲げ破壊に至ったものと思われる。

図-6(c)にロープ間隔100mmで補強した試験体として、樹脂Aで固定しHPFRCCで被覆した試験体R100AcrHpfの結果を、被覆しないR100Acrの結果と比較して示す。被覆しない試験体R100Acrでは、図-8(a)に示すような斜めひび割れが発生した後の荷重増加は少なく、変形が大きく進行して、ロープが破断し、せん断破壊した。一方、被覆した試験体R100AcrHpfでは、被覆しない試験体に比べて、斜めひび割れ発生後に剛性の低下が発生したものの、大きな変形の進行はなく、荷重は増加し、図-8(b)に示すように、斜めひび割れ幅の拡大により、ロープの

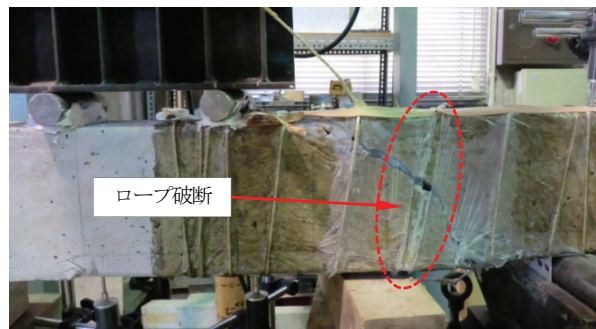


(a) R040Acr(ロープ間隔 40mm+樹脂 A) 被覆無し

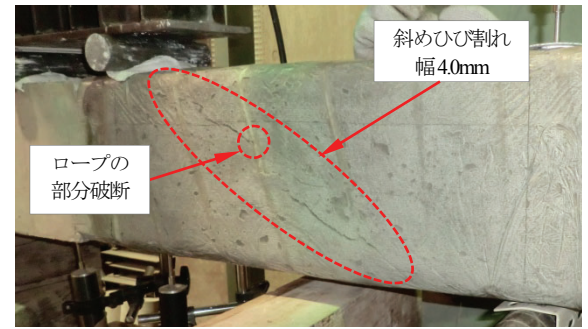


(b) R040AcrHpf(ロープ間隔 40mm+樹脂 A) HPFRCC 被覆

図-7 ロープ間隔 40mm の終局時の破壊状況



(a) R100Acr(ロープ間隔 100mm+樹脂 A) 被覆無し



(b) R100AcrHpf(ロープ間隔 100mm+樹脂 A) HPFRCC 被覆

図-8 ロープ間隔 100mm の終局時の破壊状況

一部が破断した状態となり、最大耐力に到りせん断破壊した。

被覆しない試験体R100Acrでは、斜めひび割れ発生後のひび割れ幅の拡大により、コンクリートが受け持つせん断力が低下することで、ロープが受け持つせん断力が増加し、ロープの破断によりせん断破壊に到ったものと考えられる。一方、被覆した試験体R100AcrHpfでは、ロープとコンクリート表面の付着が被覆材により確保されることで、斜めひび割れ発生後のひび割れ幅の拡大が抑制され、コンクリートが受け持つせん断力が大きく低下せず、荷重の増加とともに、ロープが受け持つせん断力が増加し、最終的にロープの破断により、せん断破壊に到ったものと考えられる。

(4) ロープ補強間隔の効果

これまでに示した載荷試験結果について、ロープ間隔の違いに着目して整理した結果を、図-9に示す。図-9(a)に、被覆材を用いず樹脂Aで固定した三試験体(ロープ巻間隔20mm, 40mm, 100mm)の結果を、図-9(b)に、樹脂Aで固定し、HPFRCCで被覆した三試験体(ロープ巻間隔20mm, 40mm, 100mm)の結果を示す。いずれの図にも、図-1(b)に示したスターラップを100mm間隔で配置した試験体S100の結果、およびコンクリートが負担するせん断耐力 V_c と曲げ降伏耐力 V_{my} の計算値を併せて示している。

図-9(a)から、樹脂Aでロープをコンクリート表面に固定しただけでは、コンクリートが負担するせん断耐力 V_c を上回る荷重に対して、剛性低下の影響が表れ、スターラップを用いた時のようなせん断補強効果は得られないことがわかる。

一方、図-9(b)から、適切なロープ巻き間隔を選定して、ロープ巻き立てを行い、樹脂Aなどでロープをコンクリート表面に固定し、HPFRCCなどで被覆することで、

スターラップを用いた場合と同程度のせん断補強効果が得られることがわかる。

(5) ロープ補強を行ったはり部材のせん断耐力評価

これらの実験結果を踏まえて、ロープ補強を行ったはり部材のせん断耐力の評価について検討を行った。ロープ補強を行ったはり部材のせん断耐力評価は、強度累加式で行った。

$$V_f = V_c + V_r + V_h \tag{1}$$

ここで、

V_f : ロープ補強を行ったはり部材のせん断耐力(N)

V_c : コンクリートが負担するせん断耐力(N)

V_r : ロープが負担するせん断耐力(N)

V_h : 被覆材が負担するせん断耐力(N)

コンクリートが負担するせん断耐力 V_c は、式(2)に示すせん断スパン比の影響を考慮した斜めひび割れ発生荷重算定式⁸⁾を用いることとした。これは、式(2)で求められるせん断耐力が、4種類の試験体の実験で得られた最大荷重や斜めひび割れ発生荷重によく一致していたからである。

$$V_c = 0.2f_c^{\frac{1}{3}}(100p_w)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{10^3}{d}\right)^{\frac{1}{4}}\left(0.75 + \frac{1.4d}{a}\right)b_w d \tag{2}$$

ここで、

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

p_w : 引張鉄筋比= $A_s / (b_w d)$

d : 断面の有効高さ (mm)

a : せん断支間 (mm)

b_w : 断面の幅 (mm)

A_s : 引張鉄筋の断面積 (mm²)

図-2, 図-6, および図-9に示した V_c の値は、式(2)で求めたせん断耐力を示したものである。

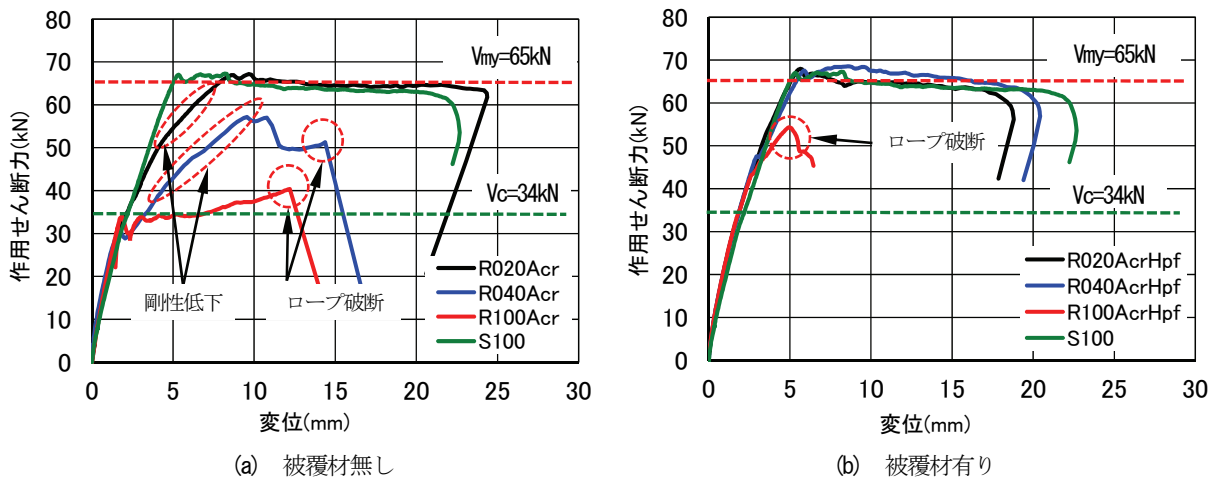


図-9 ロープ補強の効果

表-8 連続繊維ロープ補強効率 K

| 試験体 | ロープ 巻き間隔 (mm) | 固定材 | 被覆材 | 試験結果:せん断耐力 (kN) | | | | 繊維ロープ せん断耐力 (kN) | せん断 補強効率 K | 終局 状態 |
|------------|---------------------|-----|--------|-----------------|--------|--------|--------|------------------------|------------------|----------|
| | | | | 合計 | コンクリート | 被覆材 | ロープ | | | |
| | | | | Vf | Vc | Vh | Vr | | | |
| R020 | 20 | — | — | 59.7 | 33.6 | 0.0 | 26.1 | 98.6 | 0.26 | S |
| R020Acr | | 樹脂A | — | > 67.2 | | 0.0 | > 33.6 | | > 0.34 | |
| R020AcrHpf | | | HPFRCC | > 68.0 | | 11.0 | > 23.4 | | > 0.24 | |
| R020AcrPor | | | PCM | > 67.2 | | 6.2 | > 27.4 | | > 0.28 | |
| R020Pri | | | — | 60.8 | | 0.0 | 27.2 | | 0.28 | S |
| R020PriHpf | | 樹脂B | HPFRCC | > 68.3 | | 11.0 | > 23.7 | | > 0.24 | M |
| R020Hpf | | — | HPFRCC | > 69.7 | | 11.0 | > 25.1 | | > 0.25 | M |
| R040Acr | 40 | 樹脂A | — | 57.2 | 0.0 | 23.6 | 50.8 | 0.46 | R | |
| R040AcrHpf | | | HPFRCC | > 68.6 | 11.0 | > 24.0 | | > 0.47 | M | |
| R100Acr | 100 | 樹脂A | — | 40.4 | 0.0 | 6.8 | 22.0 | 0.31 | R | |
| R100AcrHpf | | | HPFRCC | 54.4 | 11.0 | 9.8 | | 0.44 | | |

Vc: 式(2)より求めたコンクリートが負担するせん断耐力

Vh: 式(4)より求めた被覆材が負担するせん断耐力

Vrd: 式(3)でK=1.0とした時のロープが負担するせん断耐力

「>」付き数値は、下限値であることを示す

終局状態 A:せん断破壊(斜め引張破壊) R:せん断破壊(ロープ破断) M:上縁コンクリート圧壊

ロープが負担するせん断耐力 V_r は、せん断補強鉄筋が負担するせん断耐力の算定式を参考に、トラスモデルに基づく次式による。

$$V_r = K \left[\frac{2T_{rd}(\sin \alpha_r + \cos \alpha_r)}{s_r} \right] z \quad (3)$$

ここで、

K: ロープによる補強効率

T_{rd} : ロープ1本当たりの破断強度 (N)

α_r : ロープが部材軸となす角度

s_r : ロープの配置間隔(mm)

z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離(=d/1.15) (mm)

被覆材が負担するせん断耐力 V_h は、指針⁹⁾のせん断耐力式を準用した式(4)により求めた。

$$V_h = (f_t / \tan \beta_u) \cdot b_w \cdot z \quad (4)$$

ここで、

V_h : 被覆材が負担するせん断耐力(N)

f_t : 被覆材の引張降伏強度 (N/mm²)

β_u : 軸方向と斜めひび割れ面のなす角度 (=45°)

b_w : 被覆材の幅 (mm)

z : 圧縮応力の合力作用位置から引張鋼材図心までの距離 (mm)

式(3)で用いるロープの補強効率Kについては、本実験の結果より算定した。その結果を、表-8に示す。表には、曲げ破壊した試験体における補強効率も示しているが、せん断破壊ではないため、その補強効率は下限値を示していることになる。ロープ補強では、鉄筋によるせん断補強と異なり、ロープが降伏しないため、せん断ひび割

表-9 被覆材の曲げ耐力への影響評価

| 試験体 | 実験結果 | | 計算値 | |
|------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | 最大作用 せん断力 (kN) | R020Acr との比較 | 最大作用 せん断力 (kN) | R020Acr との比較 |
| R020Acr | 67.2 | 1.00 | 65.1 | 1.00 |
| R020AcrHpf | 68.0 | 1.01 | 67.0 | 1.03 |
| R020AcrPor | 67.2 | 1.00 | 67.8 | 1.04 |
| R040AcrHpf | 68.6 | 1.02 | 67.0 | 1.03 |
| R020PriHpf | 68.3 | 1.02 | 67.0 | 1.03 |
| R020Hpf | 69.7 | 1.04 | 67.0 | 1.03 |

れと交差するロープの張力はそれぞれ異なる。したがって、張力が最大のロープが最初に破断するが、その時、他のロープは破断強度に達していない。一方、算定式では、すべてのロープが破断強度に達していると評価しているため、ロープの補強効率は、ロープ破断によりせん断破壊した試験体においても、K=1.0とはならず、0.31~0.46となる。

なお、ロープによるせん断耐力評価で用いた補強効率は、連続繊維シートによる補修補強指針¹⁾を参考にしたものである。連続繊維シートでは、シートの引張剛性とコンクリート強度に応じて、補強効率を0.2~0.8の範囲としている。

ロープによるせん断補強効率は、固定材を用いない試験体R020では0.26、引張強度が低い樹脂Bで固定したR020Priでは0.28と低く、引張強度が高い樹脂Aで固定したR020Acrでは0.34(下限値)と高くなる傾向が見られる。樹脂強度が高いほうが固定の度合いが高ければ、せん断補強効率は、固定の度合いを高めることで、増加

させることができると考えられる。また、ロープ破断により終局した試験体R100AcrとR100AcrHpfとの補強効率の比較より、HPFRCCなどで被覆することにより、さらに固定の度合いを高めることができると考えられる。

本実験結果では、ロープ破断によりせん断破壊した試験体が三体と少ないため、今後、試験体の形状や、ロープ補強のパラメータを変えた試験体による実験での検証や、被覆材が負担するせん断耐力の実験による検証は必要だが、式(1)によりロープ補強を行った部材の耐力評価を行うことが可能と考えられる。なお、ロープによる補強効率 K の設定については、材料特性、補強量、せん断支間比をパラメータにした実験や解析による整理が必要と考えている。

また、被覆材の曲げ耐力に及ぼす影響について、曲げ破壊した試験体の実験結果と計算値との比較を、表-9に示す。計算値は、被覆材により部材断面が増加した影響を、均一なコンクリート断面とみなして曲げ耐力を求めたものである。被覆しない試験体に対する比率に着目すると、計算値では、部材断面の増加による耐力増加は3~4%であり、実験値は1~4%でわずかながら低い耐力となっている。これは、ロープ部を含む断面では、被覆厚がロープ直径分だけ減少していることに起因すると考えられる。これらの比較結果から、被覆材の曲げ耐力に及ぼす影響は、わずかであることがわかる。

4. 結 論

本論文では、連続繊維ロープをRC部材に巻き付けて、せん断補強を行った場合の強度特性について検討し、以下のような特性を明らかにした。

- (1) ロープを用いたせん断補強では、樹脂材などを用いてロープをコンクリート表面に固定し、HPFRCCなどを用いて被覆することで、連続繊維ロープの有する耐力を十分に活用したせん断補強が行うことができる。
- (2) ロープをコンクリート表面に固定する材料としては、連続繊維シート補強に用いるアクリル樹脂が適している。また、HPFRCCは、アクリル樹脂には及ばないものの、固定材としても有効である。
- (3) ロープの巻き付けのみで、ロープをコンクリート表面に固定しない場合には、斜めひび割れが進行してから、ロープの補強効果が発揮されるため、活荷重載荷時などの、常時の使用状態で求められるせん断補強の効果は小さい。
- (4) ロープ補強では、RC部材の圧縮側隅角部において、終局時に発生した斜めひび割れ部にロープが喰い込むような破壊状況が発生する可能性がある。ロー

プ補強した部材の被りコンクリートの剥落を防止し、終局時の靱性を確保するためには、部材の隅角部におけるロープの喰い込みを防止するL形鋼の配置などの対応が必要であるが、ロープを樹脂などで、コンクリート表面に固定することで、このようなロープの喰い込みが防止できる。

- (5) ロープをアクリル樹脂などでコンクリート表面に固定したのみで、HPFRCCなどで被覆しない場合には、せん断補強効果は発揮されるが、斜めひび割れ発生耐力を越えた荷重の載荷で、ロープがせん断力を負担する状態になると、はりの剛性低下が発生する。HPFRCCなどの被覆材は、この剛性低下を防止することができる。
- (6) ロープ補強によるせん断耐力は、ロープによる補強効率を考慮することにより、コンクリートが負担するせん断耐力、ロープが負担するせん断耐力、および被覆材が負担するせん断耐力の総和として評価することができる。

5. 今後の課題

本論文では、せん断耐力が不足している部材に対し、ロープ補強を行うことで、せん断補強が可能であることを示したが、補強しない段階でせん断破壊をする試験体を選定して行っているため、ロープ補強によるせん断補強効果を定量的に評価するには十分とはいえない。今後は、補強後にせん断破壊する試験体を中心として、せん断補強効果を定量的に把握する必要がある。

また、試験体が小型であるために、固定材や被覆材の影響が出やすくなっているものと考えられるため、寸法効果の影響を把握するために、試験体を大型化した場合のせん断補強効果の把握も必要である。

謝辞: 本研究は、韓国との二国間交流事業として、日本学術振興会からの支援を受けて実施したものである。また、本研究の実施にあたり、浅野幸男氏(岐阜大学)、前田徳一氏(東洋紡績(株))、阪口裕紀氏(丸栄コンクリート工業(株))、ならびに大畑卓也氏(JR東海コンサルタンツ(株))から協力と支援をいただいた。CORDOY研究会の関島謙蔵氏(関東学院大学)からは、ロープ補強に関する情報をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会: 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, 2000.3.
- 2) 松本章裕, Nguyen Hung Phong, 下村匠, 関島謙蔵:

- 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1423-1428, 2006.
- 3) 川名俊輔, 下村匠: 連続繊維ロープでせん断補強した鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1525-1530, 2008.
- 4) 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.
- 5) 塩畑英俊, 三田村浩, 渡邊忠朋, 下村匠, 丸山久一: アラミドロープを用いた既設鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.450-463, 2010.3.
- 6) NEXCO: 設計要領第二集橋梁保全編, pp.6.44-6.51, 2011.7.
- 7) 土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書 設計編, pp.132-141, 2008.4.
- 8) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8.
- 9) 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), pp.30-32, 2007.3.
- (2012. 1. 15 受付)

SHEAR REINFORCEMENT OF RC MEMBERS WITH CONTINUOUS FIBER ROPE

Hideaki HATANO, Takashi NAKASHIMA, Hyun-Do YUN, Yuichi UCHIDA
and Keitetsu ROKUGO

In this study, continuous fiber ropes were applied for shear reinforcement of RC members such as beams and columns. The fixing and covering materials for the rope on concrete surface and the rope winding interval were examined. Shear loading tests were conducted to RC beams reinforced with a continuous fiber rope. In order to utilize the capacity of continuous fiber ropes for shear reinforcement of RC members, we proposed a method to fix ropes with acrylic resin and then to cover them with HPFRCC (High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite) on concrete surface.