

10. CFRP ロッドの薄肉コンクリート部材への適用に関する実験的研究

佐川 和昭

1. 目的

UCAS 工法とは Uni-directional Carbon Fibers Assembly System for Construction の略称で、自動配筋ロボットにより連続炭素繊維を自動配筋し、それをコンクリート部材の補強材として用いる新しい建設工法である。この工法はプレキャスト部材へ適用が有用であると考えられ、「プレキャスト埋設薄肉型枠」への適用を視野に入れた研究を進めてきた。その補強材として、連続炭素繊維をロッド状にエポキシ樹脂で硬化させた CFRP「UCAS ロッド」の開発を行ってきた。UCAS ロッドは両端部に U 字型アンカーを有するという特徴を持っており、将来的にはこれを PC 部材の定着部やコンクリート板同士の接合などに利用できるものと期待している。

本研究では、まず、UCAS ロッドの引張試験を行い、コンクリート補強材として設計を行う際に必要な引張強度およびヤング係数などの材料特性を把握した。次に、UCAS ロッドの付着強度試験を行い、コンクリートとの付着特性を把握した。最後に、UCAS ロッドを用いた薄肉コンクリート板の曲げ破壊試験を行い、耐力および変形性状などを把握し、設計手法の検討を行った。

2. 内容

2.1 UCAS ロッドの製作方法

UCAS ロッドの製作に用いた材料の仕様を表-1 に、製作方法を図-1 に示す。

【工程 1】炭素繊維供給部を平行移動させ、炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させながらアンカーに「軸方向繊維」を巻きつけていく。このとき、炭素繊維供給部に内蔵された張力付加部によって炭素繊維に一定張力を付加しながら巻いていく。また、アンカーに接続された伸縮部を制御することにより炭素繊維の束にも一定張力がかかるように巻く。

【工程 2】所定の巻き数を巻き終えた後、炭素繊維供給部を平行移動させながら、アンカーに接続されているモーターを回転させて両端のアンカーを同時に回転させる。そのことにより、軸方向繊維の円周方向に「周方向繊維」が巻かれ、2 本に分かれていた軸方向繊維の束を 1 本にまとめていく。このとき、炭素繊維供給部の移動速度を変化させることで、表面に付着用の節(凹凸)を形成させる。

【工程 3】両端のアンカーに電熱養生装置に接続された電極を接続し、炭素繊維に電流を流すことで炭素繊維を約 70℃ に発熱(約 1.5～2 時間)させ、エポキシ樹脂を硬化させる。

完成した UCAS ロッドを写真-1 に示す。

表-1 材料仕様

材料	製品名	引張強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	備考
炭素繊維	東レ(株) T700S	4.90 × 10 ³	235	カタログ値
エポキシ樹脂	東レ(株) TSプライマー	60.6	3.40	実験値 20℃×7日

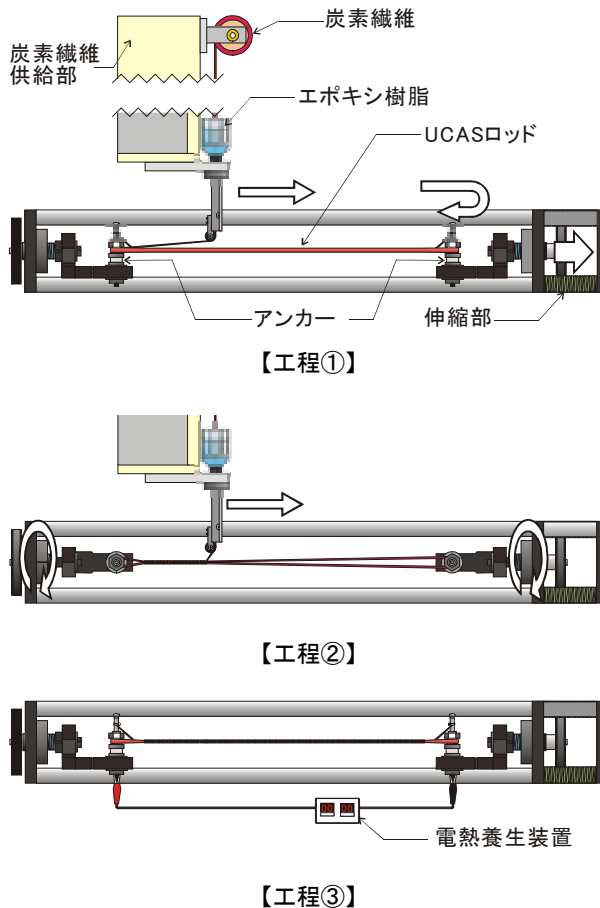


図-1 製作方法

2.2 UCAS ロッドの引張試験

「連続繊維補強材の引張試験方法(案)(JSCE-E531-1995)」に準じて引張試験を行った。UCAS ロッドの製作条件は、炭素繊維のアンカーへの巻き数を 20 巻き、軸方向繊維緊張力を 50N、周方向繊維緊張力を 50N とした。供試体構造図を図-2 に示す。定着用膨張材を用いて鋼管スリーブに UCAS ロッドを定着させて、試験装置に設置した。比較のために、市販品 CFRP ロッド「NACC ロッド」(日鉄コンポジット(株)製)の引張試験も並行して行った。供試体の数は UCAS ロッド 20 体、NACC ロッド 5 体とした。

試験結果を表-1 に示す。保証耐力は平均値から標準偏差の 3 倍を引いた値である。UCAS ロッドの引張強度およびヤング係数は結果にばらつきが少なく、市販品と比べても遜色ない品質を備えていることがわかった。また、荷重-ひずみ関係は、鉄筋のような塑性域は見られず、破断まで直線的であるため、設計の際には注意が必要であることがわかった。



写真-1 UCAS ロッド

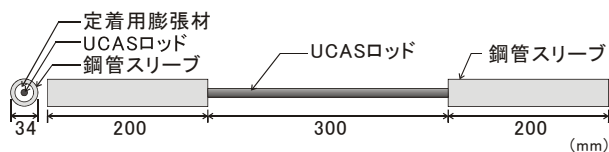


図-2 引張試験 供試体構造図

表-1 引張試験結果

補強材	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
UCAS ロッド	6.5	32.8	76.5	2.14×10^3	138
NACC ロッド	6.2	30.1	54.0	1.91×10^3	91.4

2.3 UCAS ロッドの付着強度試験

「引抜き試験による連続繊維補強材とコンクリートとの付着強度試験方法(案)(JESC-E539-1995)」に準じて付着強度試験を行った。供試体構造図を図-3 に示す。らせん鉄筋で補強した 1 辺 100mm のコンクリートブロックの中央に UCAS ロッドを配置した。付着区間を 50mm とし、それ以外の区間にはビニールホースを巻いて非付着区間とした。比較のために、NACC ロッドおよび鉄筋(SD295 D6)の付着強度試験も並行して行った。供試体数は、各補強材 3 体ずつ計 9 体とした。

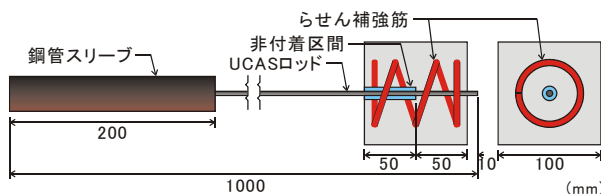


図-3 付着強度試験 供試体構造図

表-2 付着強度試験結果

補強材	試験値		平均値	
	最大引張荷重 (kN)	最大付着応力度 (N/mm ²)	最大引張荷重 (kN)	最大付着応力度 (N/mm ²)
UCAS ロッド	10.8	9.95	10.5	9.64
	9.51	8.77		
	11.1	10.2		
NACC ロッド	17.2	18.2	14.4	15.3
	14.3	15.2		
	11.7	12.4		
鉄筋	9.90	9.85	9.80	9.75
	9.51	9.46		
	10.0	9.94		

試験結果を表-2 に示す。UCAS ロッドおよび鉄筋の結果にはばらつきが少なく、UCAS ロッドのコンクリートとの最大付着応力度は、鉄筋のそれとほぼ同程度であることがわかった。NACC ロッドの結果にはばらつきが見られたが、いずれの場合も鉄筋を上回っていた。よって、UCAS ロッドをコンクリートの補強材として用いた場合、コンクリートにかかる荷重を UCAS ロッド自体に十分に伝達できることがわかった。

2.4 UCAS ロッドを用いた薄肉コンクリート板の曲げ破壊試験

補強材に、NACC ロッド、UCAS ロッドおよび鉄筋の 3 種類を用いて、通常の RC 弾性理論により設計したかぶり厚 10mm の薄肉コンクリート板の曲げ破壊試験を行った。表-3 に供試体タイプを示す。供試体は板厚 h および配筋数 n (配筋ピッチ p) をパラメータとして、NACC ロッド 6 種類、UCAS ロッド 2 種類、鉄筋 3 種類の計 11 種類 (各 2 体ずつ) である。鉄筋は、NACC ロッド 4 本配筋と同等の最大荷重となるように設計し、配筋数を決定した。コンクリートは早強セメントを使用し、材齢 14 日の設計基準強度を 50N/mm² とした高流動コンクリートを使用した。図-4 に供試体構造図 (N50-4) を示す。荷重方法は、スパン 750mm の 3 等分点 2 線荷重とした。

表-4 にひび割れ発生荷重およびコンクリート試験結果を示す。また、表-5 に最大荷重および破壊形態を示す。試験値は 2 体の平均値を示している。いずれの供試体とも理論値とほぼ同じかそれ以上の値を示しており、通常の RC 弾性理論が適用可能であることがわかった。また、CFRP ロッドを用いたコンクリート部材と同等の最大荷重を得るためには、板厚が 50mm の場合、鉄筋は断面積で約 3 倍、質量で約 15 倍の補強が必要であることがわかった。

図-5 に N30-4 と U30-4 の荷重 - たわみ曲線を示す。両者ともにひび割れ発生直後に急激な荷重の低下が見られた。これは板厚 30mm に対して有効高さが 17mm と極端に小さく、ひび割れ断面へ移行する際に補強筋に急激な負担がかかり、付着切れを起こしたためであると考えられる。一方で、板厚 30mm であっても配筋数を 8 本にすれば、ひび割れ発生後の荷重の低下は見られず付着切れを起こすことなく理論値と同様の挙動を示した。また、図-4 に N50-4 と U50-4 の荷重 - たわみ関係を示す。板厚 50mm では両者ともにひび割れ発生後に荷重

が低下することはなく、理論値と同様の挙動を示した。このように、配筋数 4 本の場合、NACC ロッドを用いた薄肉コンクリート板と UCAS ロッドを用いた薄肉コンクリート板が同様の挙動を示したことから、配筋数 8 本の場合でも両者は同様の挙動を示すと考えられる。しかしながら、CFRP ロッドをコンクリートの補強材に用いた場合、CFRP ロッドは鉄筋に比べて高強度である割にはヤング係数が低いために、ひび割れ発生荷重が最大荷重に比べて低く、たわみが大きく、力学的に非経済的なコンクリー

表-3 供試体タイプ

ケース	補強材	供試体タイプ	板厚 h(mm)	配筋数 n(本)	配筋ピッチ p(mm)
CASE I	NACC ロッド	N30-4	30	4	120
		N50-4	50		
		N70-4	70		
		N30-8	30	8	
		N50-8	50		
		N70-8	70		
CASE II	UCAS ロッド	U30-4	30	4	120
		U50-4	50		
CASE III	鉄筋	RC30-8	30	7	70
		RC50-8	50	11	45
		RC70-8	70	14	35

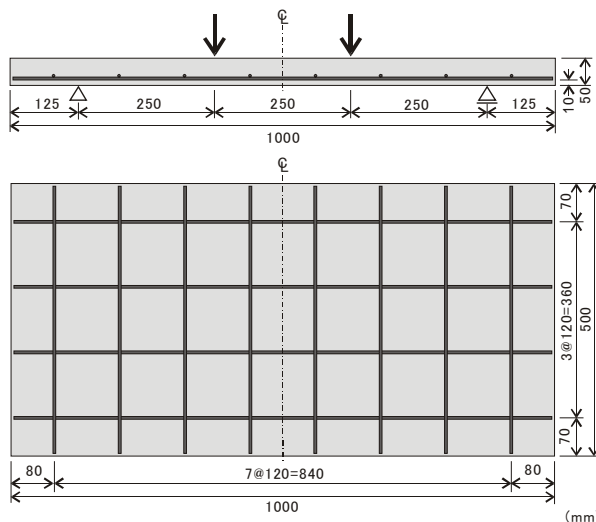


図-4 曲げ破壊試験供試体(N50-4)

表-4 ひび割れ発生荷重

ケース	供試体タイプ	試験値 (kN)①	理論値 (kN)②	①/②	コンクリート試験	
					圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
CASE I	N30-4	2.16	1.98	1.09	53.9	33.2
	N50-4	5.72	5.55	1.03		
	N70-4	11.8	10.9	1.08		
	N30-8	2.39	2.04	1.17	56.2	29.5
	N50-8	6.26	5.82	1.07		
	N70-8	12.3	11.5	1.07		
CASE II	U30-4	3.36	2.18	1.54	62.3	33.4
	U50-4	7.88	6.17	1.28		
CASE III	RC30-4	1.99	2.09	0.95	57.3	30.6
	RC50-4	6.08	6.28	0.97		
	RC70-4	12.2	12.8	0.95		

ト部材となる．そこで，補強材を用いてプレストレスを導入した部材の試算を行った．図-7にU50-4の場合の荷重-たわみ曲線を示す．UCAS ロッド4本全てに引張強度の60%のプレストレスを導入したところ，導入しない場合に比べてひび割れ発生荷重が約6倍に増大し， $P_{max}/P_{cr} \approx 2$ 程度になった．よってUCAS ロッドにプレストレスを導入することで，より経済的なコンクリート部材となることがわかる．

図-8にU50-4のひび割れ状況を示す．せん断破壊した供試体を除いて，側面および下面のひび割れは1ヶ所に集中することなく分散性は良好であった．また，表面が剥離するなどの現象は見られずかぶり厚は十分であったといえる．試験後に供試体をコンクリートカッターで切断し断面を観察したところ，空隙などは全く見られず骨材も十分に詰まっており，コンクリートの充填性は良好であった．

3. 結論

UCASロッドは市販品CFRPロッドと比較しても遜色ない性能を有している．

UCAS ロッドのコンクリートとの付着応力度は，鉄筋のそれとほぼ同等であり，コンクリートの補強材として適用可能である．

UCASロッドを用いた薄肉コンクリート板の設計には，通常のRC弾性理論が原則として適用可能である．ただし，板厚が薄い場合には付着力不足に注意する必要がある．

UCASロッドは高強度の割にヤング係数が低いため，プレストレスの導入を検討する必要がある．

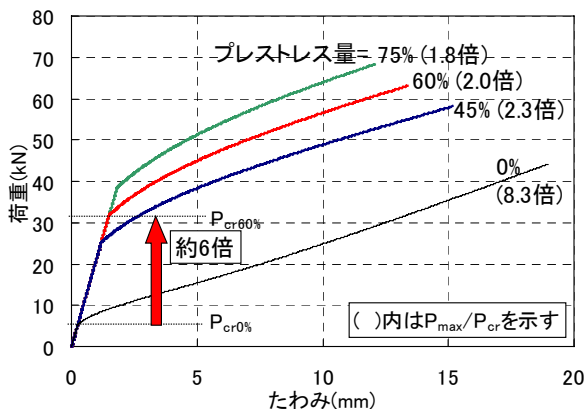


図-7 荷重-たわみ曲線(U50-4)

表-5 最大荷重

ケース	供試体タイプ	試験値 (kN)①	理論値 (kN)②	①/②	破壊形態
CASE I	N30-4	9.37	10.3	0.91	曲げ
	N50-4	40.3	36.1	1.12	曲げ
	N70-4	68.5	70.7	0.97	せん断
	N30-8	21.1	12.8	1.64	曲げ
	N50-8	56.6	46.0	1.23	曲げ
	N70-8	76.8	90.3	0.85	せん断
CASE II	U30-4	11.2	12.0	0.94	曲げ
	U50-4	42.3	42.5	0.99	曲げ
CASE III	RC30-4	13.2	9.92	1.33	曲げ
	RC50-4	44.4	35.0	1.27	曲げ
	RC70-4	84.8	69.7	1.22	曲げ

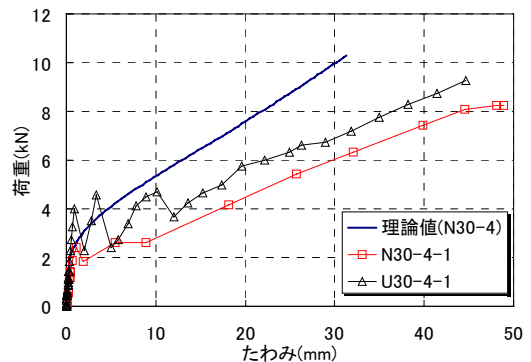


図-5 荷重-たわみ曲線(h=30, n=4)

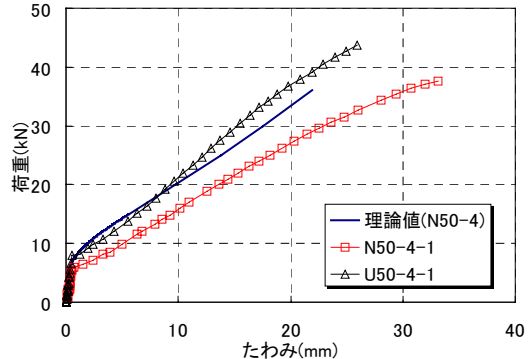


図-6 荷重-たわみ曲線(h=50, n=8)

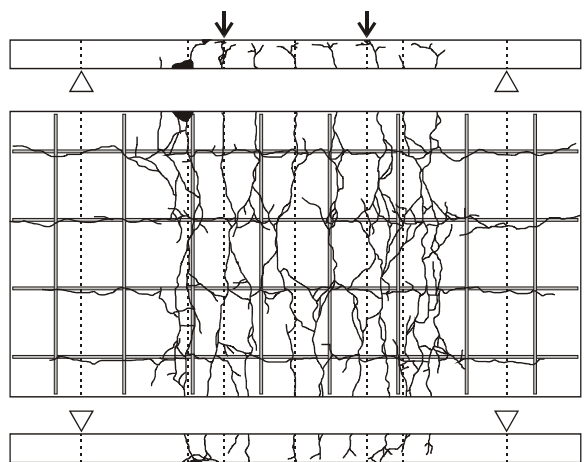


図-8 ひび割れ状況(U50-4)



写真 NACC ロッド

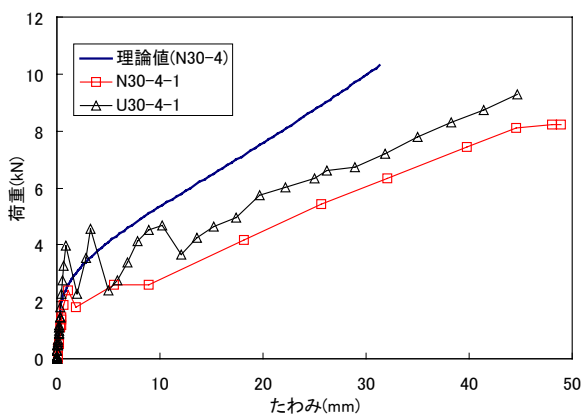


図 荷重-たわみ曲線

表

供試体 タイプ	ひび割れ発生荷重			最大荷重			破壊 形態
	試験値 (kN)①	理論値 (kN)②	①/②	試験値 (kN)①	理論値 (kN)②	①/②	
N30-4	2.16	1.98	1.09	9.37	10.3	0.91	曲げ
N50-4	5.72	5.55	1.03	40.3	36.1	1.12	曲げ
N70-4	11.8	10.9	1.08	68.5	71.7	0.95	せん断
N30-8	2.39	2.04	1.17	21.1	12.8	1.64	曲げ
N50-8	6.26	5.82	1.07	56.6	46	1.23	曲げ
N70-8	12.3	11.5	1.07	76.8	92.3	0.83	せん断
U30-4	3.36	2.18	1.54	11.2	12	0.94	曲げ
U50-4	7.88	6.17	1.28	42.3	42.5	0.99	曲げ
RC30-4	1.99	2.09	0.95	13.2	9.92	1.33	曲げ
RC50-4	6.08	6.28	0.97	44.4	35	1.27	曲げ
RC70-4	12.2	12.8	0.95	84.8	69.7	1.22	曲げ



写真 連続炭素繊維



写真 自動配筋ロボット

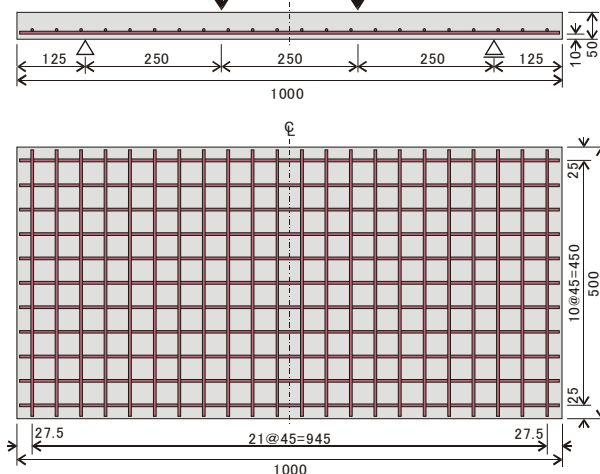


図 曲げ破壊試験供試体(N50-4)