

11 . CFRP の強度特性および CFRP を用いた RC はりのせん断耐力評価に関する研究

鳥巢 陽平

1. 目的

新素材として注目されている CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は、高強度・軽量・耐食性などの特徴を有しており、鉄筋や PC 鋼材の代替としてコンクリート構造物への適用に関する研究が進められている。本研究で対象とする CFRP (図 - 1)は、九州大学で開発した CFRP 製作ロボットを用いて製作される。鉄筋の代替材料として、主筋およびせん断補強筋全てにおいて CFRP を用いた部材の開発を行うために、CFRP の材料強度特性および CFRP せん断補強筋のせん断耐力評価方法を検討することは重要である。

そこで本研究では、初めに CFRP の強度特性を検討するために、CFRP 母材引張試験、U 型アンカー引張試験、U 型アンカー引抜試験および CFRP の曲げ成形部強度試験を実施して、CFRP の材料強度特性を把握する。次に、CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断試験を行い、曲げ成形部強度を基にした CFRP を用いた RC はりのせん断耐力の評価について検討する。

2. 内容

2.1 CFRP の強度特性

2.1.1 ロッド引張試験

「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。試験体は 5 体で、アンカーを切断したロッド両端を鋼管スリーブにより膨張材で定着させた。試験体および試験装置を図 - 2 に示す。試験部の長さは 700mm、鋼管スリーブの長さは 800mm、全長は 2300mm である。定着用膨張材の目標膨張圧は 70 N/mm<sup>2</sup> とし、鋼管スリーブの軸方向および円周方向に貼付したひずみゲージにより測定管理した。その際、ロッドと膨張材間の摩擦係数を 0.23、付着強度を 3.9N/mm<sup>2</sup> とした。載荷はオルセン万能試験機を使用し、載荷速度は毎分 30kN とした。

結果は、試験体 5 体が鋼管スリーブ付近のロッドで破断した。結果を表 - 1 に示す。引張強度の平均値は 1541N/mm<sup>2</sup>、平均値から標準偏差の 3 倍を引いた保証引張強度は 1279N/mm<sup>2</sup>、ヤング率は 117kN/mm<sup>2</sup> であった。なお、ヤング率は最大引張荷重の 20% と 60% の傾きとして算出した。

2.1.2 U 型アンカー引張試験

U 型アンカー耐力向上を目的として、アンカーの形状をパラメータにとった U 型アンカー引張試験を行った。基準とする CFRP ロッドは、全長 2000mm、アンカー内径 35mm、長さ 166mm、層高 18mm、層厚 4.4mm である(図 - 3)。パラメータとしてアンカーの内径、長さ、層高を変化させる(図 - 4)。試験は U 型アンカーに鋼製のピンを通し、ピンを治具で固定し 2.1.1 と同様に引張試験を実施した。各パラメータの試験体につき 5 体の引張試験を行った。

表 - 2 に結果を示す。U 型アンカーの形状を変化させることにより、アンカー耐力は最大で 270kN となり、母材耐力(347kN)に対する比は 78% となった。これは、ロッドは繊維

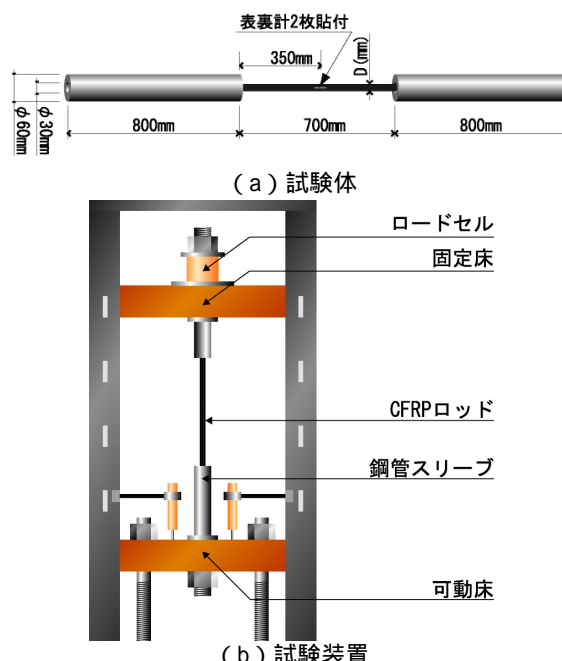


図 - 2 ロッド引張試験

表 - 1 ロッド引張試験結果

No.	直径 (mm)	最大荷重 (kN)	最大応力 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング率 (kN/mm <sup>2</sup> )
1	16.8	351	1591	94
2	17.3	340	1447	121
3	17.1	345	1508	109
4	16.6	361	1665	137
5	17.0	340	1491	125
平均値	17.0	347	1541	117
標準偏差	-	8.8	87.1	-
保証値	-	321	1279	-

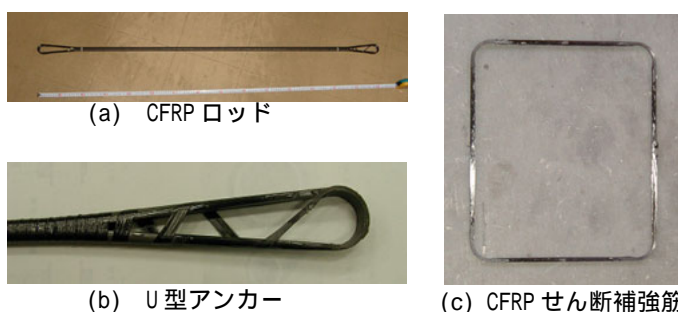


図 - 1 CFRP

の集合体であるため、アンカーは引張力を受けるとアンカー外縁の引張応力が内縁よりも増加し、外縁から繊維が破断し始め、アンカー全体の破壊へと至るためである。

### 2.1.3 U型アンカー引抜試験

「引抜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)(JSCE-E539-1995)」に準じて引抜試験を行った。図 - 5 に試験体を示す。試験体のコンクリートブロック側は、固定床上面に置かれたロードセル上にコンクリートブロックを配置することで固定し、可動床側に鋼管スリーブをナットで固定し載荷装置の荷重を伝達させる。試験体は 5 体とした。

表 - 3 に結果を示す。アンカー引抜試験の試験体耐力は、平均値 310kN、保証値 236kN であった。これは母材引張耐力の 89% であった。母材から破壊したことを考えて、アンカーをコンクリートで覆った場合、アンカーによるくさび効果と、アンカー全体を覆うことによる拘束効果に伴う応力集中の低減によりアンカー部は補強され、母材から破壊すると思われる。また、アンカーをコンクリートで覆ったボステン治具により緊張力を導入する場合、設計上は引抜試験保証値 236kN の 80% 程度の 190kN を導入するとよいと考えられる。

### 2.1.4 CFRP の曲げ成形部強度試験

図 - 6 に試験体概略図を示す。試験体は断面積 11.2mm<sup>2</sup> の 2.2 に示す RC はりのせん断補強筋と同じ規格の矩形 CFRP を 180×180×100mm のコンクリート塊で覆い、両方のコンクリートブロックを開くように荷重を与えた。着目部である試験体の片側はアクリル管を曲げ成形部付近まで配置し、コンクリートとの付着を無くした。曲げ成形部に 4. に示すはりの主筋を模擬した鉄筋(D22)を配置した。なお、試験体数は 3 体とした。

結果を表 - 4 に示す。曲げ成形部強度  $f_{fbk}$  の理論値は式(1)を用いて算出した値であり、直線部強度の 52% である。引張耐力の平均値は 24.9kN であり、実験値と理

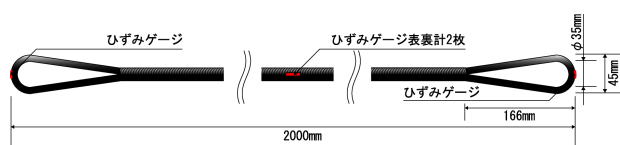


図 - 3 U型アンカー引張試験

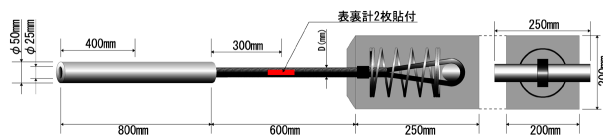
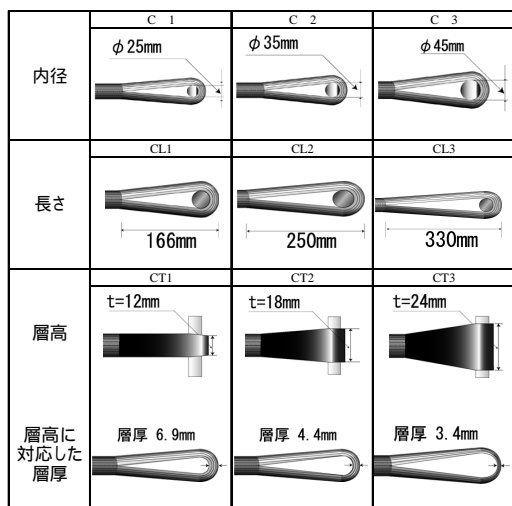


図 - 5 U型アンカー引抜試験

表 - 3 U型アンカー引抜試験結果

No.	直径 (mm)	最大荷重 (kN)	破断部位
1	16.1	312	スリーブ近傍のロッド母材部
2	16.3	310	スリーブ近傍のロッド母材部
3	17.0	340	スリーブ近傍のロッド母材部
4	16.8	300	スリーブ近傍のロッド母材部
5	16.5	290	スリーブ近傍のロッド母材部
平均値	16.5	310	-
標準偏差	-	18.7	-
保証耐力	-	236	-



\*C 2, CL1, CT2は基準供試体と同じ寸法より、同一試験体とする。また、基準の供試体をC 2とする。

図 - 4 U型アンカー引張試験の種類

表 - 2 U型アンカー引張試験結果

試験体	アンカー耐力 (kN)	保証耐力 (kN)	母材耐力に対する比 (%)
C 2(CL1, CT2)	224	179	64.6
C 1	198	141	57.1
C 3	230	-	66.3
CL2	249	223	71.8
CL3	222	184	64.0
CT1	130	114	37.5
CT3	270	234	77.8

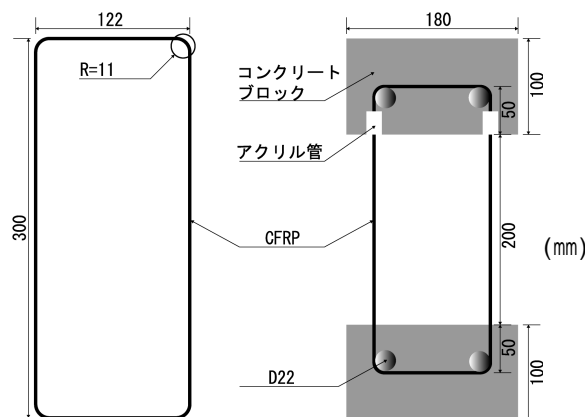


図 - 6 CFRP 曲げ成形部強度試験体

表 - 4 CFRP 曲げ成形部強度試験結果

No.	理論値 (kN)	実験値 (kN)	平均値 (kN)	実験値/理論値	破断箇所
1	26.6	23.3	24.9	0.93	曲げ成形部
2		25.2			曲げ成形部
3		26.1			曲げ成形部

論値の比は 0.93 であった。破断箇所は全ての試験体において CFRP 曲げ成形部であった。

$$f_{fbk} = (0.05r/h + 0.3) f_{fuk} \quad (1)$$

r: 曲げ内半径(mm), h: CFRP 断面高(mm),  $f_{fuk}$ : 直線部強度 (N/mm<sup>2</sup>)

## 2.2 CFRP をせん断補強筋に用いた RC はりのせん断試験

### 2.2.1 試験体および試験方法

試験体は、幅 180mm、高さ 200mm、有効高さ 160mm、長さ 1460mm、スパン 1160mm(a/d=3.0)とする単純 RC はりとした。パラメータは、せん断補強筋種類、せん断スパン比およびせん断補強筋配置間隔である。主鉄筋は、D22 を 3 本、圧縮側に D10 を 3 本配置した。また、せん断補強筋に D6 および CFRP を用いた。各試験体は 3 体ずつ制作した。表 - 5 に試験体概要、表 - 6 に使用材料諸元、図 - 7 に試験体概略図を示す。なお、表 - 6(a)の CF は炭素繊維そのものの力学特性、CFRP はエポキシ樹脂を含む CFRP としての力学的性質である。

### 2.2.2 せん断耐力評価方法

本研究では、コンクリート標準示方書式、連続繊維補強材と鉄筋のヤング係数比を考慮した RC はりのせん断耐力評価および連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)(以下、指針と呼ぶ)によるせん断耐力評価を用いてせん断耐力を評価した。ここで、ヤング係数比を考慮した評価方法とは、コンクリート標準示方書式において、主筋またはせん断補強筋に CFRP を使用している場合、断面積に CFRP と鉄筋のヤング係数比を掛けて主筋およびせん断補強筋の断面積を換算断面積として計算を行う方法であり、指針による評価方法とは、主筋に CFRP を使用している場合は断面積に CFRP と鉄筋のヤング係数比を掛けて評価し、せん断補強筋に CFRP を用いる場合はせん断補強筋の曲げ成形部強度  $f_{fbk}$  を用いて評価する方法である。

### 2.2.3 結果および考察

試験結果を表 - 7 に示す。タイプごとの最大荷重は、No.1-No.3 の平均値とした。この際、S No.2 は破壊挙動が異なったため、また SS No.1 および SCb No.2 は極端に荷重が異なったため平均値から除外した。

S の  $P_{max}$  は 116kN であった。図 - 8 に  $P_{max}$  の実験値と理論値の関係を示す。S および SS のせん断耐力は、示方書での比は 1.36, 1.49 で評価できた。SCa および SCb は、示方書での比は 0.78 と 0.96 と実験値は危険側であった。ヤング係数比でせん

表 - 5 試験体概要

TYPE	コンクリート	a/d	主筋	せん断補強筋配置間隔(mm)	せん断補強筋
S	普通	3	3-D22	-	-
SS				80(d/2)	D6
SCa				120(d/1.3)	CFRP(14回巻き)
SCb					CFRP(14回巻き)

d...有効高さ(mm)

表 - 6 使用材料諸元

#### (a) CFRP

種類	フィラメント束の断面積 (mm <sup>2</sup> )	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
CF	0.46	6.44	4000	230
CFRP		11.2	2300	132

#### (b) コンクリート

種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
普通	35.6	3.09	4.57	28.0	0.22

#### (c) 鉄筋

種類	規格	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D6	SD295	31.7	303	544	175
D10	SD345	71.3	354	502	189
D22	SD345	387	386	565	202

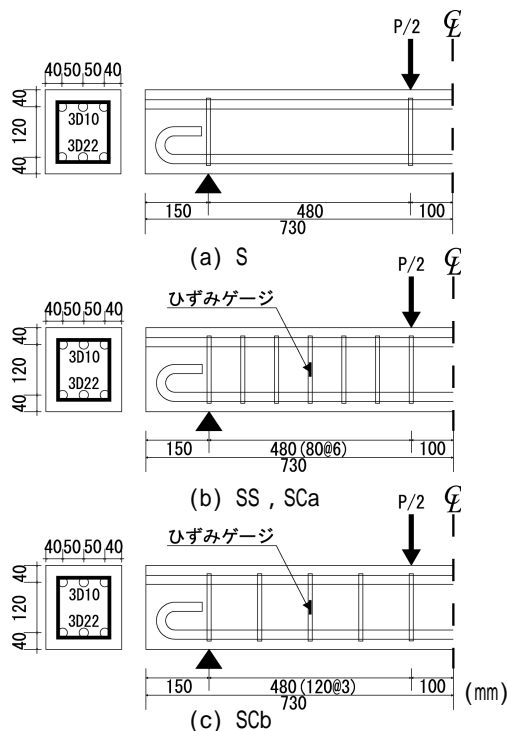


図 - 7 試験体概略図

表 - 7 RC はり試験結果

TYPE	No.	実験値(kN)		理論値(せん断耐力)(kN)				実験値/示方書	実験値/ヤング係数	実験値/指針	破壊形式
		平均値	標準偏差	示方書	ヤング係数	指針	指針				
S	1	121		116	85	-	-	1.36	-	-	斜め引張
	2	123									せん断圧縮
	3	111	116	0	85	0					斜め引張
SS	1	269		227	152	-	-	1.49	-	-	せん断圧縮
	2	226									せん断圧縮
	3	229	116	111	85	67					せん断圧縮
SCa	1	209		208	264	204	178	0.78	1.02	1.17	斜め引張
	2	237									斜め引張
	3	177	116	92	85	179	85	118	85	93	斜め引張
SCb	1	199		197	205	164	147	0.96	1.20	1.34	斜め引張
	2	144									斜め引張
	3	194	116	81	85	119	85	79	85	62	斜め引張

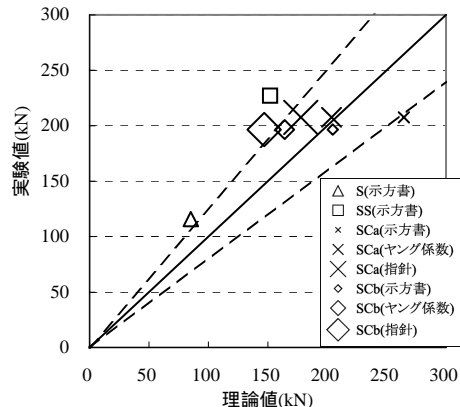


図 - 8 実験値および理論値の比較

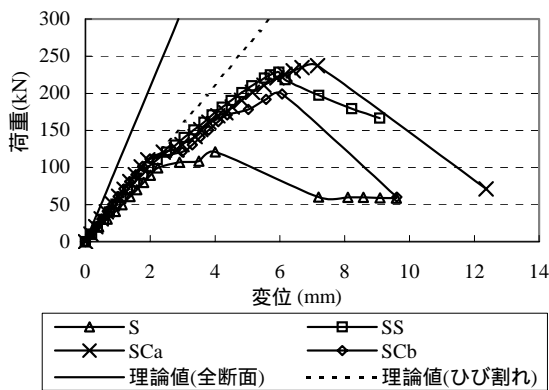


図 - 9 荷重 - 変位関係

断耐力を評価した場合は、その比は 1.02 と 1.20 であった。指針の場合は、その比は 1.17 と 1.34 と実験値をよく評価できた。

2.2.4 変形性状

図 - 9 に試験体中央部の荷重 - 変位関係を各タイプ 1 体ずつ示す。ひび割れ発生荷重の 10-20kN までは全断面有効の挙動を示すが、ひび割れ発生荷重を超えてからは、ひび割れ断面としての挙動を示す。最大荷重まで漸増載荷した後、せん断破壊して急激に荷重が減少した。S No.2 および SS No.1-No.3 は徐々に荷重が減少する破壊で、せん断圧縮破壊と考えられる。その他の試験体は斜め引張破壊であった。

次に、各試験体の剛性を見ると、せん断補強筋が鉄筋である SS と CFRP である SCa および SCb の断面諸元は同じであるが、100-130kN 付近から CFRP せん断補強筋を用いた SCa および SCb は剛性が小さくなっている。これは、せん断補強筋での CFRP の剛性(EA)が鉄筋に比べて小さいことに起因していると考えられる。

2.2.5 ひび割れ状況

写真 - 1 にひび割れ状況を示す。ひび割れは、載荷点と支点を結ぶせん断ひび割れであった。同図(c), (d) に示すように、CFRP せん断補強筋を用いた試験体については、主要なせん断ひび割れが発生した後、破壊と同時に主鉄筋に沿った大きなひび割れが発生して大きな音とともに破壊に至った。終局時の主要なせん断ひび割れのひび割れ幅は、せん断補強筋に鉄筋を用いた試験体に比べて CFRP を用いた試験体のほうが大きいことが確認された。写真 - 2 にせん断補強筋破壊状況を示す。SCa および SCb の CFRP せん断補強筋は曲げ成形部で破断していた。しかし、CFRP せん断補強筋の直線部は破断していなかったため、試験体のせん断破壊と同時に CFRP せん断補強筋の曲げ成形部が破断したと考えられる。

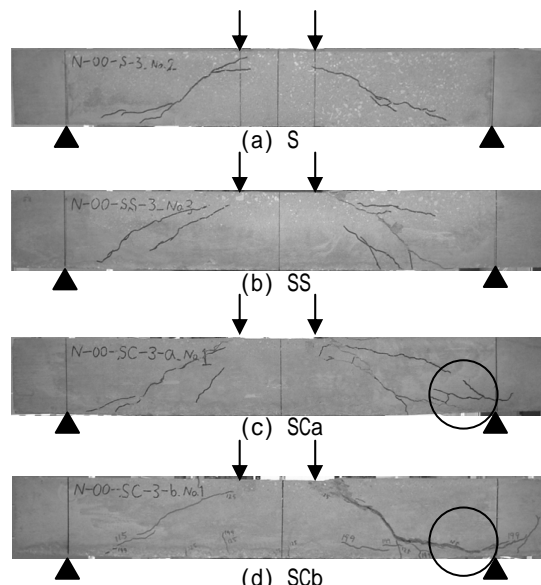


写真 - 1 ひび割れ状況

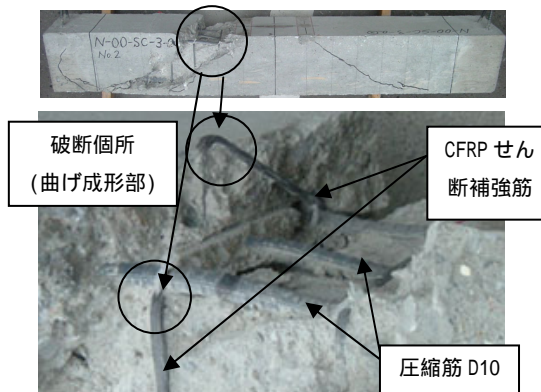


写真 - 2 CFRP 破断状況(SCa)

3. 結論

- (1) 本研究で対象とする CFRP は、引張強度 1541N/mm<sup>2</sup> であり高い引張強度を示した。U 型アンカー耐力は母材の 65% であったが、アンカー部をコンクリートで覆うことで補強できると考えられる。CFRP の強度試験より、CFRP は鉄筋の代替材料として十分な機能を有することが明らかになった。
- (2) CFRP 曲げ成形部強度は理論値の 0.93 であり、破断箇所は曲げ成形部であった。九州大学で製作される CFRP せん断補強筋の曲げ成形部強度は、式(1)によって概ね評価可能である。
- (3) CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価はヤング係数比を考慮した場合、実験値と理論値の比は 1.02 および 1.17、指針では 1.17 および 1.33 と安全側で実験値をよく評価できた。ヤング係数比による評価と指針によりせん断耐力評価は可能である。
- (4) CFRP せん断補強筋の破断箇所は曲げ成形部であり、直線部は破断していなかった。また、CFRP 曲げ成形部強度は式(1)により評価可能であることから、CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力は、CFRP の曲げ成形部強度を基にした指針式によってせん断耐力を評価できる。