

10. CFRP せん断補強筋を用いた鋼繊維補強軽量2種コンクリート RC はりのせん断耐力

田北 翔

1. 目的

近年、コンクリート構造物における自重の軽減、断面および施工の簡略化の必要性が高まっている。その改善手法の一つとして軽量コンクリートや CFRP の適用が検討されている。軽量コンクリートは骨材自体の強度が低いため、普通コンクリート（以下、N）と比較して一部の強度特性が劣るが、鋼繊維など短繊維を混入することにより性能が向上することが確認されている。これまでの研究において軽量コンクリート、鋼繊維および CFRP それぞれのみを用いた RC せん断耐力評価方法は提案されている。しかし、これらの材料を複合的に用いた評価方法は提案されていない。

そこで本研究では、まず CFRP 曲げ成形部強度について、既往の評価式の適用性を確認した。次に、RC はりの曲げせん断試験および FEM 解析を行い、それらの結果および破壊形態から CFRP せん断補強筋を用いた鋼繊維補強軽量2種コンクリート RC はりのせん断耐力評価方法を検討した。なお、本概要では鋼繊維補強軽量2種コンクリートに関する項目のみ記載する。

2. 内容

2.1 既往の RC はりせん断耐力評価方法

RC はりのせん断破壊は斜めひび割れの発生後急激に耐力を失う斜め引張破壊と、荷重点部のコンクリートが圧壊することにより破壊に至るせん断圧縮破壊の2種類が存在する。RC はりのせん断耐力評価方法はコンクリート負担分せん断耐力 V_c とせん断補強筋負担分せん断耐力 V_s との和で表わされる。 V_c は破壊形式ごとに評価式が提案されている。式(1)は斜め引張破壊を対象とした二羽式、式(2)はせん断圧縮破壊を対象としたディープビーム式である。本研究ではこれらの評価式を基に鋼繊維補強および軽量2種コンクリート（以下、SL）の使用による影響を考慮することとした。

$$V_c = 0.20 f_c^{1/3} \cdot (p_v^{1/3}) \cdot (d/1000)^{-1/4} \cdot (0.75 + 1.4d/a) b_w d \quad (1)$$

$$V_c = \frac{0.244 f_c^{2/3} (1 + p_v^{1/2}) (1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w d \quad (2)$$

ここで、 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 p_v : 主鉄

筋比(=100A_s/(b_wd))、d : 有効高さ(mm)、a : はりのせん断スパン長さ(mm)、b_w : ウェブ幅(mm)、r : 支圧板幅(mm)

2.2 RC はり曲げせん断試験概要

表-1 に試験体一覧を示す。 V_c を提案するにあたり、パラメータはコンクリート種類、鋼繊維混入率およびせん断スパン比 a/d とした。図-1 に試験体概略図を示す。ここで、a/d=3 は N と SL とで断面が異なり、左は N (表-1, No.1,2)、右は SL (表-1, No.5,6) の断面である。なお、試験体数は各タイプ3体とした。

表-2 に使用した鉄筋の材料特性を示す。鉄筋は N, a/d=3 (表-1 中 No.1,2) は引張側に D22 を、圧縮側に D10 を3本ずつ配置した。その他の試験体 (表-1 中 No.3~8)

表-1 試験体一覧

No.	Type	コンクリート	鋼繊維混入率	a/d	強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)
					圧縮	引張	
1	N00-3	普通 (N)	0%	3.0	35.6	3.09	28.0
2	N12-3		1.2%		36.8	3.86	30.6
3	N00-4		0%	4.0	42.0	3.18	32.9
4	N12-4		1.2%		41.8	3.82	30.4
5	SL00-3	軽量2種 (SL)	0%	3.0	40.8	1.85	15.8
6	SL12-3		1.2%		43.5	3.55	15.9
7	SL00-4		0%	4.0	39.4	1.84	14.6
8	SL12-4		1.2%		39.6	3.75	15.5

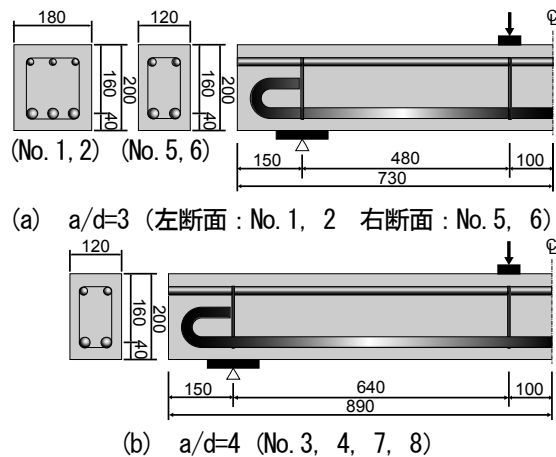


図-1 試験体概略図 (一例, 単位 mm)

表-2 鉄筋の材料特性

No.	種類	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
1,2	D22	71.3	386	565	202
	D10	387	354	502	189
5,6	D25	507	389	547	200
			380	545	200
3,4,7,8	D19	287	407	566	200
			405	583	200
1,2	D6	31.7	303	544	175
			344	486	200
			369	506	200

は引張側に D25 を，圧縮側に D19 を 2 本ずつ配置した。また，支点および荷点に補強筋として D6 を配置した。

2.3 FEM 解析概要

解析プログラムは DIANA ver.9.4 を用いた。解析モデルは対称性を考慮した 1/2 モデルとし，支点および荷点は試験で用いた荷板および支承と同様の幅を剛体として定義した。

図-2 に材料構成則を示す。コンクリートは 4 節点平面応力要素を用い，回転ひび割れモデルを適用した。圧縮域は圧縮強度 f_c まで材料試験の結果を用い，それ以降は線形で 0 まで低下するものとした。引張域は引張強度まで線形で増加するものとし，引張軟化域は表-3 に示す切り欠きはりの 3 点曲げ試験結果を用いた逆解析結果により求めた引張軟化特性モデル式から算出した。同表において， f_t は引張強度， V_f は鋼繊維混入率， G_f は N00 または SL00 における破壊エネルギーを表す。本引張軟化特性を用いることにより，FEM 解析において軽量化および鋼繊維補強の影響を評価可能であると考えられる。鉄筋は図-2(c) のように降伏強度到達後応力一定となるバイリニアモデルとした。また，主筋および圧縮筋とコンクリートとの付着は図-2(d) のように定義し，せん断補強筋とコンクリートとの付着は完全付着とした。

2.4 結果および考察

図-3 に荷重-変位関係の一例を解析結果と比較して示す。ここで，試験において目視により斜めひび割れの発生を確認した荷重を斜めひび割れ荷重と定義した。SL00-4 は N00-4 と比較して斜めひび割れ荷重が低下した。これは軽量化によりコンクリートのせん断強度が低下したためであると考えられる。一方，N12-4 および SL12-4 は N00-4，SL00-4 と比較して斜めひび割れ荷重が増加した。また，斜めひび割れ発生後も荷重が増加し，最終的に荷点の圧壊により荷重が低下するせん断圧縮破壊であった。さらに，最大荷重後も N00-4 および SL00-4 は荷重が急激に低下したのに対し，N12-4 および SL12-4 は徐々に低下した。これらは鋼繊維の架橋効果により最大荷重および靱性が向上したためであると考えられる。図-4 に試験におけるひび割れ状況を示す。N00-4 はせん断スパン内で発生した斜めひび割れが主筋に沿って進展することにより破壊に至ったが，N12-4 は主筋に沿ったひび割れに加えて最大荷重時に圧縮筋に沿ったひび割れが発生した。図-5 に解析の最大荷重時における主応力コンタ

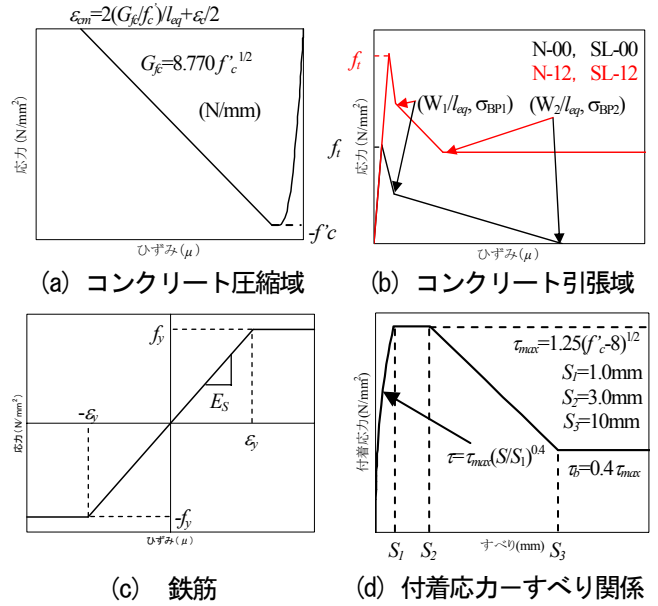


図-2 材料構成則

表-3 引張軟化特性モデル式

Type	σ_{BP1}	W_1	σ_{BP2}	W_2
N00	$f_t/3$	$0.2G_f/f_t$	0	$3.6G_f/f_t$
N12	$(0.25V_f+1/3)f_t$		$(0.13V_f+0.23)f_t$	$(-0.70V_f+3.6G_f)/f_t$
SL00	$f_t/2$	$0.3G_f/f_t$	0	$3.6G_f/f_t$
SL12	$(0.10V_f+1/2)f_t$		$0.4V_f/f_t$	$(-0.15V_f+3.6G_f)/f_t$

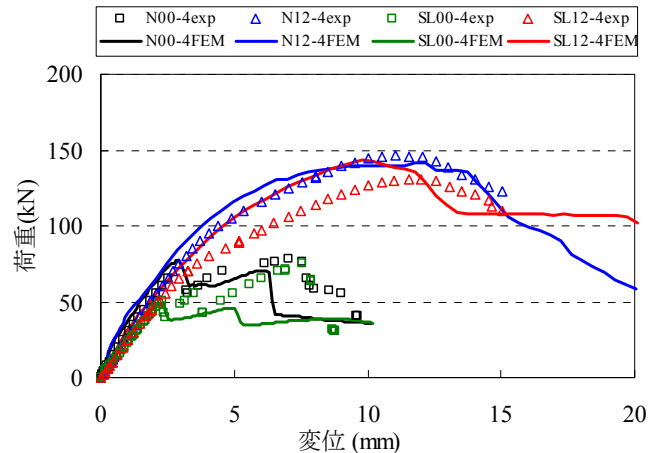


図-3 荷重-変位関係 (一例)

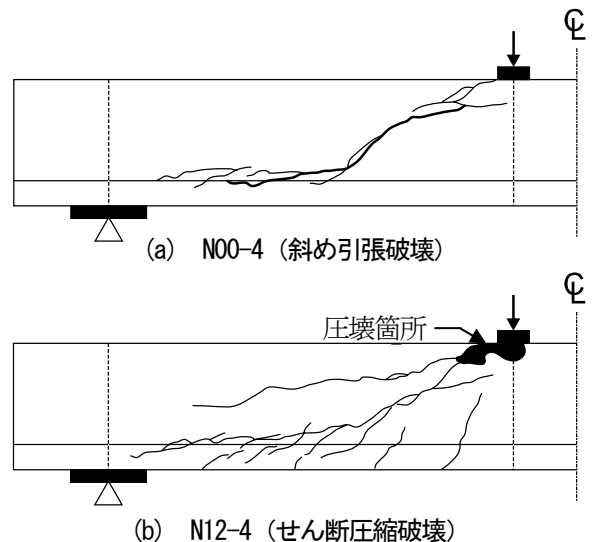


図-4 ひび割れ状況 (一例)

表-4 斜めひび割れ荷重および最大荷重比較

No.	Type	斜め引張破壊							せん断圧縮破壊							破壊形式	
		exp	FEM	cal		exp/ FEM	exp/cal		exp	FEM	cal		exp/ FEM		exp	FEM	
				式(1)	式(3)		式(1)	式(3)			式(2)	式(4)	式(2)	式(4)			
1	N00-3	116	125	116	116	0.93	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	斜め引張	斜め引張
2	N12-3	151	145	116	166	1.04	1.30	0.91	247	229	130	183	1.08	1.90	1.34	せん断圧縮	せん断圧縮
3	N00-4	78.1	77.1	80.2	80.2	1.01	0.97	0.97	-	-	-	-	-	-	-	斜め引張	斜め引張
4	N12-4	100	98.9	80.2	114	1.01	1.25	0.88	143	142	60.0	85.0	1.01	2.39	1.69	せん断圧縮	せん断圧縮
5	SL00-3	76.0	76.1	88.5	65.9	1.00	0.86	1.15	115	76.1	101	75.4	1.50	1.13	1.52	せん断圧縮	斜め引張
6	SL12-3	71.8	82.7	88.5	97.5	0.87	0.81	0.74	133	173	106	114	0.77	1.26	1.17	せん断圧縮	せん断圧縮
7	SL00-4	50.1	49.3	79.1	58.8	1.02	0.63	0.85	73.5	49.3	58.3	43.3	1.49	1.26	1.70	せん断圧縮	斜め引張
8	SL12-4	71.9	71.3	79.1	86.3	1.01	0.91	0.83	125	143	59.5	64.2	0.87	2.09	1.94	せん断圧縮	せん断圧縮

一図を示す。破壊形式によって主応力の分布が異なり、鋼繊維補強時は載荷点から支点に向かって圧縮力が卓越していた。この応力分布の相違により、鋼繊維補強した試験体はひび割れ状況が変化したと考えられる。

表-4 に試験および解析における斜めひび割れ荷重および最大荷重の比較を示す。ここで、斜め引張破壊は全てのタイプにおける斜めひび割れ荷重を、せん断圧縮破壊はせん断圧縮破壊したタイプにおける最大荷重を示す。また、解析における斜めひび割れ荷重はひび割れひずみが急増した荷重とした。同表より、斜めひび割れ荷重の試験値と解析値との比は0.87~1.04 となり、解析は試験における斜めひび割れの発生を再現できた。また、最大荷重に関しても試験と解析との破壊形式が一致したタイプは試験値と解析値が概ね一致していることがわかる。以上の結果から、軽量化および鋼繊維補強が考慮できる引張軟化特性を用いることにより、FEM 解析においても鋼繊維補強軽量2 種コンクリートの挙動を再現可能であることがわかった。

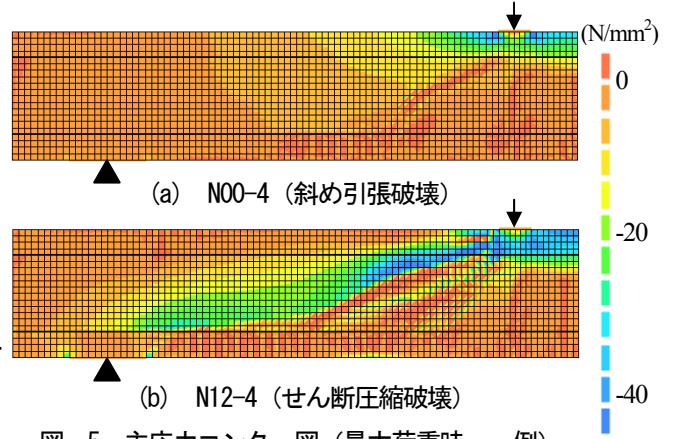


図-5 主応力コンター図（最大荷重時、一例）

表-5 強度評価式

種類	強度評価式	決定係数 R ²	適用範囲	
			混入率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
N	引張 $f_t = (0.084V_f + 0.265) f_c^{2/3}$	0.939	0~1.2	29.4~46.8
	曲げ $f_b = (0.176V_f + 0.406) f_c^{2/3}$	0.943		
	せん断 $f_{cv} = (0.138V_f + 0.398) f_c^{2/3}$	0.960		
SL	引張 $f_t = (0.158V_f + 0.177) f_c^{2/3}$	0.877	31.8~48.8	
	曲げ $f_b = (0.290V_f + 0.225) f_c^{2/3}$	0.564		
	せん断 $f_{cv} = (0.111V_f + 0.296) f_c^{2/3}$	0.812		

$$V_c = \gamma \cdot 0.2 f_c^{1/3} \cdot p_v^{1/3} \cdot (d/1000)^{-1/4} \cdot (0.75 + 1.4d/a) b_w d \quad (3)$$

$$V_c = \gamma \cdot \frac{0.244 f_c^{2/3} (1 + p_v^{1/2}) (1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w d \quad (4)$$

$$\gamma_N = \frac{0.138V_{sf} + 0.398}{0.398} \quad (\text{普通コンクリート}) \quad (5)$$

$$\gamma_{SL} = \frac{0.111V_{sf} + 0.296}{0.398} \quad (\text{軽量2種コンクリート})$$

2.5 せん断耐力評価方法の提案

2.5.1 RC はりせん断耐力評価方法および適用範囲

2.1 に示した式(1)および式(2)はN、鋼繊維無補強を対象としており、鋼繊維補強およびSL の使用による影響は考慮されていない。しかし、コンクリートの引張、曲げおよびせん断強度は軽量化により低下し、鋼繊維補強により改善されることが知られている。そこで、九州大学では鋼繊維補強されたN およびSL における強度評価式を表-5 のように提案している。ここで、軽量化および鋼繊維補強がコンクリートのせん断強度に影響を及ぼすことから、軽量化および鋼繊維補強によるせん断強度の変化率を係数 γ と表わし、式(1)および式(2)に乗じることとした。提案式を式(3)および式(4) に、係数 γ を式(5)に示す。 γ は表-5 から求めたせん断強度を、N、 $V_f=0\%$ のせん断強度で除した値とした。各評価式の適用範囲を a/d と

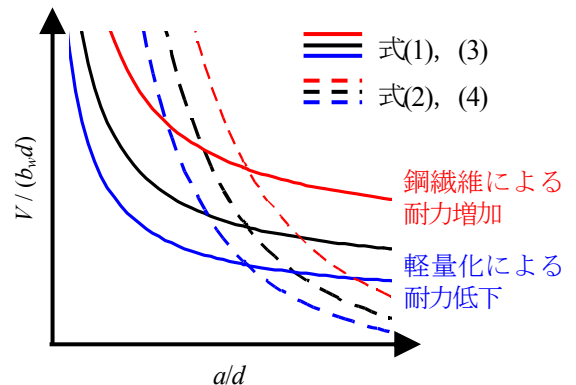


図-6 a/d と耐力の関係

耐力の関係として図-6に示す。N, 鋼繊維無補強の場合、式(1)と式(2)との算定値が同一の値を示す a/d 付近で破壊形式が変化と言われている。ここで、式(1)および式(2)に代えて式(3)および式(4)を適用すると、 γ を乗じたことにより耐力の算定値は増減するが、同様の γ を乗じるため、適用限界となる a/d は変わらない。しかし、これは N, 鋼繊維無補強を対象とした適用限界であり、鋼繊維補強による破壊形式の変化は考慮されていない。そこで、本研究では試験結果に即し、斜め引張破壊した試験体の最大荷重およびせん断圧縮破壊した試験体の斜めひび割れ荷重を式(3)により評価し、せん断圧縮破壊した試験体の最大荷重を式(4)により評価することとした。

2.5.2 提案式の検討

(1) 斜め引張破壊 (式(3)) の検討

斜め引張破壊における最大荷重およびせん断圧縮破壊における斜めひび割れ荷重の比較として、図-7(a)に試験値と式(1)による算定値との比較を示す。なお、同図は本研究による試験結果に加えて、これまでの九州大学におけるはり試験結果も併せて比較した。同図より、軽量化による荷重の低下および鋼繊維補強による荷重の増加が確認でき、式(1)ではうまく評価できないことがわかる。そこで、軽量化および鋼繊維補強によるせん断強度の変化を考慮した式(3)により比較すると図-7(b)のようになり、式(1)と比較して軽量化および鋼繊維補強の影響を評価できることがわかる。平均および変動係数は0.96, 15.0% (データ数 $n=47$) となり、若干繊維補強によるばらつきがあるが、斜め引張破壊の場合は式(3)を用いることにより精度良く評価可能であることがわかった。

(2) せん断圧縮破壊 (式(4)) の検討

せん断圧縮破壊した試験体における最大荷重の比較として、図-8(a)に試験値と式(2)による算定値との比較を示す。同図より、せん断圧縮破壊の場合はせん断スパン比 a/d により傾向が異なり、 $a/d=2$ においては平均0.95, 変動係数15.9%となり、軽量化および鋼繊維補強に関わらず式(2)により評価可能であることがわかる。一方、 $a/d \geq 3$ においては鋼繊維補強による耐力向上が確認でき、鋼繊維混入率が増加すると式(2)による算定値は試験値を安全側に評価することがわかる。そこで $a/d \geq 3$ を対象として式(4)により比較すると図-8(b)のようになり、同図(a)と比較すると N, SL ともに鋼繊維補強時ほどの混入率においても V_{exp}/V_{cal} が一定となり、全てのタイプで安全側

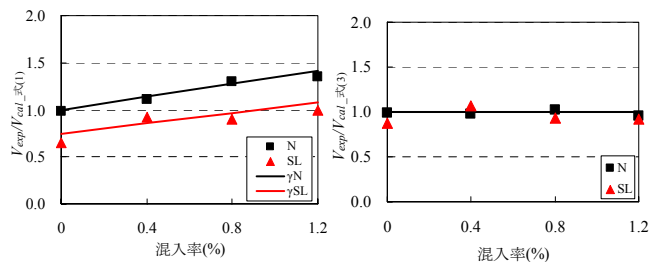


図-7 試験値と算定値との比較 (斜め引張破壊)

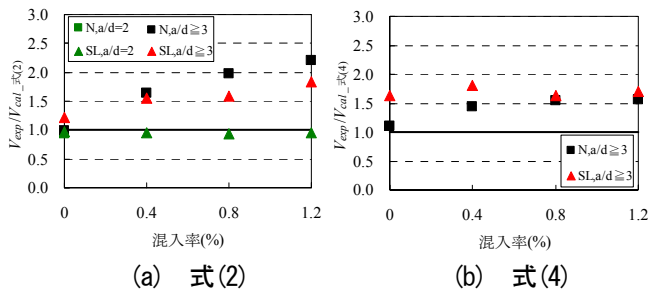


図-8 試験値と算定値との比較 (せん断圧縮破壊)

評価となった。今後、せん断圧縮破壊における軽量化および鋼繊維補強による影響を考慮したせん断耐力評価方法についてさらなる検討が必要である。

3. 結論

本研究では鋼繊維補強軽量2種コンクリート RC はりの曲げせん断試験および FEM 解析を行い、せん断耐力評価方法の提案および鋼繊維補強軽量2種コンクリートを対象とした引張軟化曲線の適用性を検討した。本研究で得られた結果は次の通りである。

- (1) 斜めひび割れ荷重について、軽量化による低下および鋼繊維補強による上昇が確認できた。
- (2) 鋼繊維補強すると、コンクリート種類に関わらず全ての試験体でせん断圧縮破壊した。
- (3) 軽量化および鋼繊維補強が考慮できる引張軟化特性を用いることにより、軽量化および鋼繊維補強の影響を FEM 解析上でも再現できた。
- (4) 二羽式にせん断強度の変化率 γ を乗じることで、斜め引張破壊における最大荷重およびせん断圧縮破壊における斜めひび割れ荷重を精度よく評価できた。
- (5) ディープビーム式にせん断強度の変化率 γ を乗じることで、鋼繊維補強時ほどの混入率においても試験値と算定値との比が一定となり、全てのタイプで安全側評価となった。

今後、せん断圧縮破壊における軽量化および鋼繊維補強による影響を考慮したせん断耐力評価方法についてさらなる検討が必要である。