論文 鋼繊維補強された軽量2種コンクリートの引張軟化特性

崔 智宣*1·山口 浩平*2·日野 伸一*3

要旨:軽量コンクリートは普通コンクリートに比べて引張,せん断強度が低下するため,構造用コンクリートとして鋼繊維などによる補強が必要である。鋼繊維補強により,ひび割れ発生時に鋼繊維とコンクリートの付着により鋼繊維が引張力を負担する架橋効果によって,引張強度,せん断強度および靭性能向上の効果が期待できる。本研究では,切欠きはりを用いた3点曲げ試験を実施し,鋼繊維混入率による靭性能向上効果について検討した。また,多直線近似法による逆解析法から引張軟化特性を検討し鋼繊維混入率を考慮した引張軟化曲線を定式化した。

キーワード: 軽量2種コンクリート,鋼繊維,引張軟化特性,残存引張強度,3点曲げ試験

1. はじめに

近年,超大スパン橋梁,超高層ビルなどの増加に伴い, 自重の軽減,構造物断面の簡略化の必要性が高まってい る。そこで,従来の普通コンクリート(以下,N)に比 べ軽量で,自重の軽減や施工性の向上が期待できる軽量 コンクリートの研究が行われている。軽量コンクリート には軽量1種,軽量2種コンクリート(以下,SL)があ り,軽量1種コンクリートは粗骨材の全てまたは一部に も人工軽量骨材を用いたコンクリート,軽量2種コンク リートは粗骨材に加え細骨材の全てまたは一部にも人工 軽量骨材を用いたコンクリートである。

しかし、Nを軽量化すると引張,せん断強度が低下す るため、短繊維による補強が有効である。SLを短繊維に よって補強すると、ひび割れ発生時に短繊維とコンクリ ートの付着により、短繊維が引張力を負担する。この短 繊維による架橋効果によって引張,せん断強度および靭 性向上の効果が期待できる。しかし、繊維の分散状況お よび発生したひび割れとの位置関係によって異なる架橋 効果を予測することは困難である。これらを得るために は、引張軟化曲線を明らかにし、特に最大強度到達後の 挙動把握が必要である。このことから強度の増大、靭性 の改善を目的に、種々の短繊維を混入したコンクリート の強度特性の適用が検討されている^{1)~3)}。しかしながら、 短繊維を混入した軽量コンクリート、特に SL の破壊力 学特性や引張抵抗の検討は少なく、はり、版部材のせん 断耐力等は評価できていないのが現状である。

そこで本研究では、各種繊維の中でも強度特性に優れ る鋼繊維に着目して、鋼繊維補強された SL の曲げ試験 および多直線近似法による逆解析を行い、鋼繊維混入率 (以下,混入率)による靭性能向上効果や引張軟化特性 について検討して、混入率を考慮した引張軟化曲線を定 式化した。

表-1	使用材料
-----	------

材料種類	記号	性質
普通ポルトランド	C	密度:3.16t/m ³
セメント	C	比表面積:3890cm ² /g
		表乾密度:2.55t/m ³
並通知母社	がえる	吸水率:1.92%
普通种有材	普通5	実績率:71.1%
		粗粒率:2.55
	並通の	表乾密度:2.90t/m ³
普迪租有材	百囲ひ	吸水率:1.92%
		絶乾密度:1.68t/m ³
人工权具细母社	軽量S	24時間吸水率:9.8%
八二牲里种自的		単位容積質量:1.11t/m ³
		実績率:53.7%
		絶乾密度:1.55t/m ³
1 丁权县组母村	叔是C	24時間吸水率:9.7%
八二牲里祖自的	型里U	単位容積質量:0.79t/m ³
		実績率:63.5%
		減水率:19%
高性能AE減水剤	SP	ブリーディング量の比:30%
		(ポリカルボン酸化化合物)
AE助剤	AE	密度:1.06~1.10t/m ³
増粘剤	В	
鋼繊維	F	フックエンド型, 密度:7.85t/m ³



写真-1 鋼繊維(フックエンド型)

*1 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻 (正会員) *2 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助教 博(工) (正会員) *3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

タイプ	コンク	混入率	水セメント比 W/C	スランプ	空気量	単位量 (kg/m ³)							
	リート	(%)	(%)	(cm)	(%)	W	С	S	G	SP	AE	В	F
N-00		0	50.0	20.2	4.5	213	427	870	862	1.08	1.00	0	0
N-04	並活	0.4	50.0	20.0	5.6	213	425	868	859	1.50	0	0	31.3
N-08	百世	0.8	50.0	18.0	6.3	212	423	864	855	2.00	0	0	62.7
N-12		1.2	50.0	18.4	5.0	211	422	860	852	2.40	0	0	94.0
SL-00		0	47.5	22.8	4.6	233	490	542	408	0	0	1.00	0
SL-04	転畳₂種	0.4	47.5	21.9	4.4	232	487	539	406	0	0	1.00	31.3
SL-08	平土 里 4 里	0.8	47.5	20.2	6.3	230	484	535	403	1.63	0	1.00	62.7
SL-12		1.2	47.5	22.0	7.5	228	480	531	400	3.00	0	1.00	94.0

表-2 コンクリート配合





2. 試験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント,粗骨材および細骨材は全て人工軽量骨材, 鋼繊維は**写真-1**のような直径 0.62mm,長さ 30mm のフックエンド型を使用した。

2.2 試験体

表-2 にコンクリート配合を示す。試験体はコンクリート種類, 混入率 *V_{sf}*をパラメータとし, コンクリート種類は N, SL, 混入率は 0, 0.4, 0.8, 1.2 (%) とした計 8 タイプであり, 試験体数はそれぞれ 5 体とした。また, 打設後 28 日間気中養生した。普通骨材の最大寸法は 20mm, 軽量 2 種骨材のそれは 15mm とした。目標スランプは 18cm, 空気量は N 4.5%, SL 5.0%とした。

2.3 試験方法

図-1 に試験体概略図および試験装置を示す。JCI 基準・指針の「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験(JCI-S-002)」⁴⁾に準じて,幅100×高さ100×長さ400mmの角柱試験体を用いた3点曲げ 試験を実施した。切欠きはコンクリートの付着を切るため油を塗布した3.6×30mmの板を,試験体中央に埋め込んで設けた。切欠き上部の破断面をリガメントと呼び,その幅をb,高さをhとする。NとSLのリガメント部はそれぞれh(5体の平均値)は68.84mm,69.21mm,bは101.4mm,101.86mmであった。試験体質量はN,SL それぞれ9.38kg,6.44kgであった。載荷装置(丸鋼棒およ

表-3 強度特性値

カノー	単位容積	上縮 強	引張	曲げ	せん断	ヤング
217	頁里 (t/m ³)	/虹/長 (N/mm ²)	/虹/長 (N/mm ²)	/虹/受 (N/mm ²)	/班/長 (N/mm ²)	休奴 (kN/mm ²)
N-00	2.33	35.2	2.09	—	—	32.7
N-04	2.33	32.7	2.77	5.97	4.43	29.7
N-08	2.31	35.0	3.26	7.81	5.00	30.3
N-12	2.39	36.8	3.86	-		30.6
SL-00	1.65	40.3	1.89	_		14.5
SL-04	1.66	40.7	3.06	4.51	3.89	16.8
SL-08	1.51	25.1	2.46	6.15	3.38	12.7
SL-12	1.56	26.2	2.85	-	_	13.2

表-4 曲げ試験結果

		最大	荷重	初期	結合	有効破壊		
混入率	No.			ルロノ	JF_t			
(%)		(k	P_{max} $P_{0}(N/mm^2)$ (N/mm) N SL N SL N SL 5.0 2.8 4.22 1.42 0.29 0.07 4.5 3.3 3.17 2.21 0.26 0.13 5.0 2.6 4.59 1.59 0.28 0.07 4.5 3.3 3.17 2.21 0.26 0.13 5.0 2.6 4.59 1.59 0.28 0.07 4.8 3.0 3.91 2.04 0.29 0.15 5.1 2.5 4.32 1.63 0.28 0.09 4.9 2.8 4.04 1.78 0.28 0.10 5.3 3.7 2.64 3.21 1.01 0.50 4.7 3.7 4.07 3.38 0.86 0.65 6.0 3.7 3.84 3.52 1.10 0.56 5.6 3.4 3.10 2.86 0.74 0.69					
		N	SL	N	SL	N	SL	
	1	5.0	2.8	4.22	1.42	0.29	0.07	
	2	4.5	3.3	3.17	2.21	0.26	0.13	
0	3	5.0	2.6	4.59	1.59	0.28	0.07	
0	4	4.8	3.0	3.91	2.04	0.29	0.15	
	5	5.1	2.5	4.32	1.63	0.28	0.09	
	平均值	4.9	2.8	4.04	1.78	0.28	$ \begin{array}{c c} 0.09\\ 28 & 0.10\\ 01 & 0.50\\ \end{array} $	
	1	5.3	3.7	2.64	3.21	1.01	0.50	
	2	4.7	3.7	4.07	3.38	0.86	0.65	
0.4	3	6.0	3.7	3.84	3.52	1.10	0.56	
	4	5.6	3.4	3.10	2.86	0.74	0.69	
	5	4.9	3.9	3.30	3.84	1.02	0.34	
	R入率 (%) No. 1 2 3 4 5 平均値 1 2 3 4 5 平均値 1 2 3 0.4 4 5 平均値 1 2 0.8 3 4 4 5 平均値 1 2 3 1 2 3 4 5 平均値 5 平均値 5 平均値 5 7	5.3	3.7	3.39	3.36	0.95	0.55	
	1	4.8	5.1	3.02	2.19	1.33	1.46	
	2	5.7	3.3	4.13	2.09	1.16	0.90	
0.8	3	5.6	4.1	4.23	2.74	1.33	1.15	
	4	5.4	-	5.11	-	1.14	-	
	平均值	5.4	4.2	4.12	2.34	1.24	1.17	
	1	5.6	6.5	3.81	3.02	1.32	1.87	
	2	5.3	6.5	2.94	2.97	1.52	1.85	
1.0	3	6.0	-	3.65	-	1.64	-	
1.2	4	5.0	-	4.94	-	0.95	-	
	5	6.3	-	4.51	-	1.78	-	
	亚均值	5.6	65	3 97	2 99	1 44	1.86	

び載荷板)の質量は 5.16kg であった。強度試験はコンク リート標準示方書⁵⁾ に準じて全タイプ圧縮,割裂引張強 度,静弾性係数試験を実施した。曲げ,せん断強度試験 は混入率 0.4, 0.8%のみ実施した。載荷試験は万能試験 機を使用し,水平方向の拘束を取り除くために両支点と もローラー支持とした。計測項目は荷重,載荷点の変位, ひび割れ開口変位(以下, CMOD)とした。荷重は最大



(a) SL-00 (b) SL-12 写真-2 破壊状況

荷重まで 20 点以上計測した。全試験体とも完全に破断す るまで載荷したが, CMOD はクリップ型変位計の計測限 度から 5mm 程度まで計測した。

3. 結果

3.1 最大荷重および破壊性状

表-3 に強度特性値(3 体の平均値)を示す。圧縮強 度は 40N/mm² で一定になるように配合設計したが, SL-08, SL-12 の場合はそれぞれ 25.1, 26.2N/mm²とかな り小さい値となった。これは打設時の空気量がそれぞれ 6.3, 7.5%と大きくなったためであり,過去の一連の試験 結果からも混入率によるものではないと考えられる。

表-4, 図-2 に曲げ試験で得られた結果(最大荷重 P_{max})を示す。なおサンプリング不良により, N-08 は 4 体, SL-08 は 3 体, SL-12 は 2 体のみを検討データとした。 その他のタイプは 5 体を対象とした。SL-00 の最大荷重 は N-00 の 0.62 倍と非常に小さい。しかし, N-12 は N-00 の 1.14 倍, SL-12 は SL-00 の 2.32 倍となり, 混入率によ る最大荷重の増大は N より SL が顕著であることがわか る。

写真-2に破壊状況の一例を示す。同写真よりひび割れが切欠きから上面に向かいジグザグ状に進展していることがわかる。また同写真(b)よりひび割れ面に鋼繊維が横断していることが確認できる。





3.2 荷重-ひび割れ開口変位(CMOD)関係

図-3 に荷重-CMOD の関係を示す。同図(a)より 繊維なし(N-00, SL-00)は最大荷重に到達後,荷重が 急激に低下する。鋼繊維補強した場合,荷重は一旦低下 するが,Nは混入率0.4,0.8,1.2%の場合それぞれ3.8kN, 4.1kN,5.3kN,SLは混入率0.4,0.8%の場合それぞれ2.1kN, 3.4kNで荷重はほぼ一定となり,ひび割れ幅が徐々に広 がる挙動を呈した。しかし,SL-12は荷重がほとんど低 下せずにひび割れ幅が徐々に広がることがわかる。以上 より,繊維を混入することにより,ひび割れ発生後に架 橋効果が顕著に現れることが確認された。

4. 引張軟化特性

4.1 引張軟化曲線の推定

曲げ試験から得られた荷重-CMOD 関係を用いて,多 直線近似法による逆解析法(JCI-S-001-LEM-K 法)⁴⁾に よって引張軟化曲線を求めた。この推定法におけるひび 割れ進展解析は仮想ひび割れモデルに基づいている。仮 想ひび割れ先端での釣合条件を初期結合応力や応力拡大 係数とし,仮想ひび割れ部の適合条件を設定すれば,あ る仮想ひび割れ長さにおいての外力である荷重と仮想ひ び割れ面に作用する結合応力を算定することができる。

図-4に試験値と解析値の一例を示す。図-5に引張



軟化曲線の一例を示す。同図より,最大結合応力到達後, ひび割れ発生により結合応力が急激に減少していること がわかる。しかし,繊維補強したタイプについてはゼロ までは低下していない。これは架橋効果によるものであ り,ひび割れ発生後の応力低下は混入率が大きいほど小 さく,ある程度の応力を保持しながらひび割れが進展す る。この時の応力は一般に4.3に後述する鋼繊維の 残存引張強度f.と定義される。図-6,表-4に初期結合 応力を示すが,SLはNよりも小さく,混入率の影響は ほとんどないと考えられる。



4.2 有効破壊エネルギー

図-5 に示した引張軟化曲線(解析値)を用いて,仮 想ひび割れ幅 1mm までの面積を「有効破壊エネルギー *G*_f」と定義し,混入率による有効破壊エネルギーを検討 した(表-4,図-7)。同図より混入率増加とともに有効 破壊エネルギーも増大して,SLの混入率による効果が Nより顕著であることがわかった。

4.3 引張軟化曲線のモデル化および残存引張強度

図-5 の引張軟化曲線を単純化するとともに残存引張 強度を定式化するため、東山らの研究¹⁾を参考にモデル 化を検討した。一般に、Nの引張軟化曲線は2直線で、 折曲がり点を軟化開始点応力の1/4とした「1/4モデル」 が多用されている。また、東山らは多直線近似法により 推定された引張軟化曲線の第1折曲がり点応力(σ_{BPl}) が推定値より小さい値となったため、第1折曲がり点を 軟化開始点応力の1/3としたモデルを適用した。しかし 本研究では、Nの第1折曲がり点応力(σ_{BPl})が大きい 値となったため1/2としたモデルとし、SLのそれは混入 率を考慮することとした。図-8 に引張軟化曲線モデル を示す。繊維なし(N-00, SL-00)は2 直線(黒色網掛 け部分)、繊維補強の場合は4直線でモデル化した。

図-9 に引張軟化曲線のモデル化の一例を示す。同図 (a) より繊維なしの場合は N, SL ともモデルとよく一 致している。繊維補強した N, SL については若干の差は 見られるが,解析値を概ね表現できると考えられる。



-1331-

研究者	タイプ	コンク リート	短繊維		引張強度 f_t	(Tana)	W1	G	残存引張強度 f_v	w2	(Tana	W2
101 7618			種類	混入率(%)	(N/mm ²)	OBb1	VV I	O _{BP2}	(σ _{BP2})	VV 2	OBP3	vv 5
	F45-0		ポリプ	0	3.04			0		1		-
東山ら ¹⁾	F45-1	軽量1種	ロピレ	1.0	3.21	$f_t/3$	$0.8G_f/f_t$	$0.lf_t$		3 6G ./f	$0.2f_t$	6 W 2
	F45-2		ン	2.0	3.48			$0.2f_t$	-	$5.00_{f}/J_{t}$	$0.3f_t$	$= 21.6G_f/f_t$
	N-00			0	2.09			0	0	$3.2G_f/f_t$		-
	N-04	普通	নম	0.4	2.77	$f_t/2$	0.4G _f /f _t	$(0.0625V_{sf} + 0.275) f_t$	0.83	3.2G _f /f _t	0.4f _t	(W)
	N-08			0.8	3.26				1.06			$0 \le 2$ = 19.2G /f
	N-12			1.2	3.86				1.35			17.20 f/f
平听九	SL-00		亚門	0	1.89	$f_t/2$		0	0	$2.5G_f/f_t$		Ι
	SL-04	4 3 2 軽量2種		0.4	3.06	$0.7V_{sf}f_t$	$0.4G_f/f_t$		0.61	$2.5G_f/f_t$		(W)
	SL-08			0.8	2.46			$0.5V_{sf}f_t$	0.98		$0.6V_{sf}f_t$	-15C /f
	SL-12			1.2	2.85				1.71			150 j/j t

表-5 引張軟化曲線モデル式および残存引張強度

表-5に引張軟化曲線モデル式の諸値および残存引張 強度を示す。同表には東山らのモデル式の諸値も示して いる。同表より第1折曲がり点応力(σ_{BPI})は東山らの 1/3 モデルに対して、本研究では N の全タイプおよび SL-00 の場合, 割裂引張強度の 1/2 とした 1/2 モデル, SL-04, SL-08, SL-12 の場合は混入率を考慮した0.7Vsff とした。その時の仮想ひび割れ幅(W1)は全タイプ $0.4G_f/f_t$ と一定とした。ここで、 G_f は N-00、SL-00 の破 壊エネルギー(それぞれ図-9(a)の各モデルの面積), f_tは各タイプの割裂引張強度である。第2折曲がり点応 力 (σ_{BP2}) は混入率を考慮して, 東山ら¹⁾, 田口ら²⁾ と 同様に混入率と線形関係を有するようにした。その時の 仮想ひび割れ幅(W2)は繊維なしのW2を用いること とした。第3折曲がり点応力(σ_{BP3})は、Nは0.4 f_t と一 定, SL は混入率を考慮することとした。その時の仮想ひ び割れ幅(W3)は東山らと同様に6W2として第3折曲 がり点以後は一定とした。

次に、本研究では第2折曲がり点応力(σ_{BP2})を残存 引張強度として³⁾求めた。引張強度を考慮した残存引張 強度値と混入率との関係を図-10に示す。ここで、繊維 なしの場合の残存引張強度はゼロであるので、同図の原 点を通る回帰直線とした。その結果、混入率による効果 はNよりSLが顕著であることがわかった。また、SLに 関しては残存引張強度と混入率の関係が $f_v=0.5V_{sf}f_t$ の式 で表現でき、線形関係で表しても実用上問題ないことが 確認された。Nについては線形関係で評価できなかった。 今回は一種類の人工軽量骨材、鋼繊維の範囲においての 結果でありデータ数が少ないため、さらにデータの追加 が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を示す。

- 荷重-CMOD 関係から、繊維を混入することにより、 ひび割れ発生後に架橋効果が顕著に現れた。
- 2) SL-00 の最大荷重は N-00 に比べ小さいが, 混入率に



よる最大荷重の増大はNよりSL が顕著であった。

- 3) 多直線近似法による逆解析法によって引張軟化曲線を求めて有効破壊エネルギーを求めた結果,混入率の増加とともに有効破壊エネルギーも増大した。
- 混入率を考慮した引張軟化曲線を定式化した。残存 引張強度はNよりSLの混入率による効果が顕著で あった。また,SLに関しては,残存引張強度と混入 率の関係がf_v=0.5V_{sf}f_iの式で表現できた。

謝辞本研究は、太平洋マテリアル株式会社、一部は科学研究費若手研究(B)による補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 東山浩士ほか:ポリプロピレン繊維補強軽量コンクリートの引張軟化特性,「材料」, Vol.57, No.1, pp.90-96, 2008
- 2) 田口史雄ほか: PVA 短繊維の架橋効果による RC 梁のせん断耐力向上効果、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.283-288, 2005
- 東山浩士ほか:繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力,構造工学論文集, Vol.54A, pp.703-712, 2008
- JCI 基準・指針: JCI-S-001-2003, JCI-S-002-2003 「切 欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変 位曲線試験方法」, 2003
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書, [規準編], 2005