

20. 鋼繊維補強軽量 2 種コンクリートの力学特性および RC はりのせん断耐力評価

崔 智宣

1. 目的

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おり，軽量コンクリートの研究が行われている．軽量 2 種コンクリート（以下，SL）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．普通コンクリート（以下，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，せん断強度および靱性向上の効果が期待できる．しかし，短繊維補強軽量コンクリートの破壊力学特性や引張抵抗の検討は少なく，はりのせん断耐力は軽量化と繊維補強の二つの要素があるため，現在の算定方法では対応できない状況である．本研究では，各種の補強繊維の中でも強度特性に優れた鋼繊維に着目して，鋼繊維補強による N，SL の強度試験を行い，鋼繊維混入率（以下，混入率）を考慮した各種強度評価式を提案した．また，3 点曲げ試験および多直線近似法による逆解析を行い，混入率による靱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．さらに，コンクリート種類，混入率，せん断補強筋の有・無を対象とした RC はりの載荷試験を行い，提案した強度評価式を用いて，鋼繊維補強軽量 2 種コンクリートはりに対応できるせん断耐力式を提案した．

2. 内容

2.1 強度特性および引張軟化特性

2.1.1 試験概要

表 - 1 に使用材料を示す．粗骨材および細骨材は全て膨張頁岩系の人工軽量骨材を使用し，繊維は直径 0.62mm，長さ 30mm のフックエンド型鋼繊維を使用した．表 - 2 に供試体概要および配合表の一例を示す．供試体は N，SL に，混入率をそれぞれ 0，0.4，0.8，1.2%とした計 8 タイプである．強度試験の供試体数は各タイプ 3 体とし，圧縮，引張，曲げ，せん断強度およびヤング係数について検討した．曲げ試験は各タイプ 5 体とした．なお，骨材の最大寸法は N は 20mm，SL は 15mm とし，目標空気量は N 4.5%，SL 5.0%とした．

2.1.2 強度評価式

今回行った強度試験に加えて，過去に著者らが行った強度試験結果（引張：N - 29（29 はデータ数），SL - 40，

表 - 1 使用材料

材料種類	記号	性質
普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3890cm ² /g
普通細骨材	普通S	表乾密度:2.55g/cm ³ 吸水率:1.92% 実績率:71.1% 粗粒率:2.55
普通粗骨材	普通G	表乾密度:2.90g/cm ³ 吸水率:1.92%
人工軽量細骨材	軽量S	絶対密度:1.68g/cm ³ 24時間吸水率:9.8% 単位容積質量:1.11g/cm ³ 実績率:53.7%
人工軽量粗骨材	軽量G	絶対密度:1.55g/cm ³ 24時間吸水率:9.7% 単位容積質量:0.79g/cm ³ 実績率:63.5%
高性能AE減水剤	SP	フローリックSF500S (ポリカルボン酸化合物)
AE助剤	AE	フローリックAE - 4
増粘剤	B	ビオポリー
鋼繊維	F	フックエンド型，密度:7.85g/cm ³

表 - 2 供試体概要および配合表（一例）

タイプ	コンクリート	混入率 (%)	単位容積質量 (g/cm ³)	水セメント比 (W/C)	単位量 (kg/m ³)								圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
					W	C	S	G	SP	AE	B	F					
N-00	普通	0.0	2.33	50.0	213	427	870	862	1.08	1.00	0	0	35.2	2.09	-	-	32.7
N-04		0.4	2.33	50.0	213	425	868	859	1.50	0	0	31.3	2.77	5.97	4.43	29.7	
N-08		0.8	2.31	50.0	212	423	864	855	2.00	0	0	62.7	3.26	7.8	5.00	30.3	
N-12		1.2	2.39	50.0	211	422	860	852	2.40	0	0	94.0	3.86	-	-	30.6	
SL-00	軽量2種	0.0	1.65	47.5	233	490	542	408	0	0	1.00	0	40.3	1.89	-	-	14.5
SL-04		0.4	1.66	47.5	232	487	539	406	0	0	1.00	31.3	40.7	3.06	4.51	3.89	16.8
SL-08		0.8	1.51	47.5	230	484	535	403	1.63	0	1.00	62.7	25.1	2.46	6.15	3.38	12.7
SL-12		1.2	1.56	47.5	228	480	531	400	3.00	0	1.00	94.0	26.2	2.85	-	-	13.2

曲げ：N - 15, SL - 26, せん断：N - 12, SL - 18) を用いて、各強度をコンクリート標準示方書に従い、 $f = \alpha f_c^{2/3}$ の式で整理した。その際、各種強度と混入率の関係から統計処理して強度評価式を求めた。表 - 3 に強度評価式および適用範囲を示す。強度評価式の V_{sf} の係数は混入率の効果を表すが、SL のそれは N よりもいずれも大きく、混入率の増加による強度の向上効果が顕著であることがわかった。

2.1.3 引張軟化特性

曲げ試験の結果の一例を図 - 1 に示す。なお、サンプリング不良で N-08 は 4 体、SL-08 は 3 体、SL-12 は 2 体のみを検討した。繊維なし (N-00, SL-00) は最大荷重に到達してから荷重が急激に低下した。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 で、SL は混入率 0.4, 0.8% の場合それぞれ 2.1kN, 3.4kN でほぼ一定となり、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ひび割れ幅が徐々に広がる結果となった。以上より、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。図 - 2 に多直線近似法による逆解析法によって算出した引張軟化曲線を示す。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

表 - 3 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 $f_t = (0.068 \times V_{sf} + 0.268) \times f_c^{2/3}$	0.667	0 ~ 1.2	21.7 ~ 45.3
	曲げ $f_b = (0.199 \times V_{sf} + 0.523) \times f_c^{2/3}$	0.456		28.6 ~ 45.3
	せん断 $f_{cv} = (0.170 \times V_{sf} + 0.429) \times f_c^{2/3}$	0.533		32.5 ~ 45.3
SL	引張 $f_t = (0.119 \times V_{sf} + 0.202) \times f_c^{2/3}$	0.805		20.1 ~ 48.0
	曲げ $f_b = (0.258 \times V_{sf} + 0.322) \times f_c^{2/3}$	0.624		25.1 ~ 48.0
	せん断 $f_{cv} = (0.135 \times V_{sf} + 0.306) \times f_c^{2/3}$	0.696		25.1 ~ 47.3

V_{sf} : 混入率, f_c : 圧縮強度

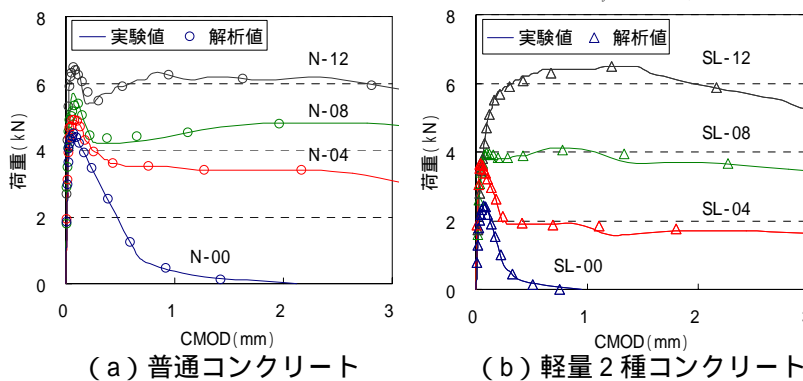


図 - 1 曲げ試験結果

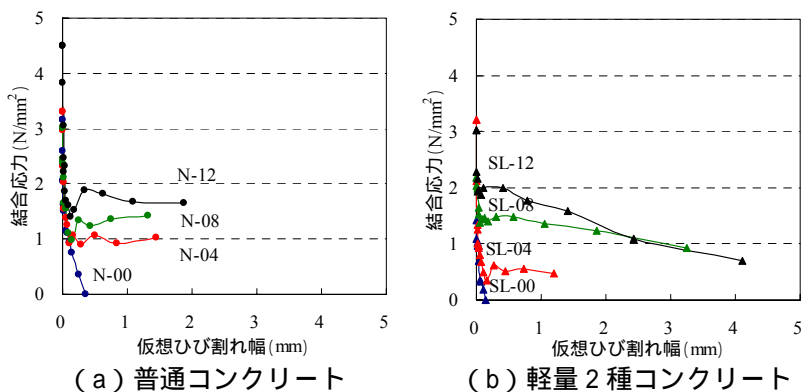


図 - 2 引張軟化曲線

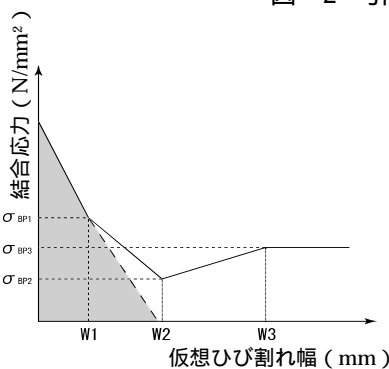


図 - 3 引張軟化曲線モデル

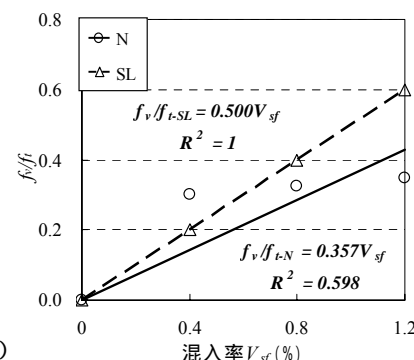


図 - 4 残存引張強度

表 - 4 結果および引張軟化曲線モデル式

タイプ	コンクリート	短繊維		引張強度 f_t (N/mm^2)	最大荷重 (kN)	σ_{BP1}	W1	σ_{BP2}	残存引張強度 f_v (N/mm^2)	W2	σ_{BP3}	W3
		種類	混入率 (%)									
N-00	普通	鋼	0	2.09	4.9	$f_t/2$	$0.4G_f/f_t$	0	0	$3.2G_f/f_t$	$0.4f_t$	$6W2 = 19.2G_f/f_t$
N-04			0.4	2.77	5.3			$(0.0625V_{sf} + 0.275) f_t$	0.83	$3.2G_f/f_t$		
N-08			0.8	3.26	5.4			1.06	$3.2G_f/f_t$			
N-12			1.2	3.86	5.6			1.35	$3.2G_f/f_t$			
SL-00	軽量2種	鋼	0	1.89	2.8	$0.7V_{sf}f_t$	$0.4G_f/f_t$	0	0	$2.5G_f/f_t$	$0.6V_{sf}f_t$	$6W2 = 15G_f/f_t$
SL-04			0.4	3.06	3.7			$0.5V_{sf}f_t$	0.61	$2.5G_f/f_t$		
SL-08			0.8	2.46	4.2			0.98	$2.5G_f/f_t$			
SL-12			1.2	2.85	6.5			1.71	$2.5G_f/f_t$			

拡大係数とし、さらに仮想ひび割れ部の適合条件を設定すれば、ある

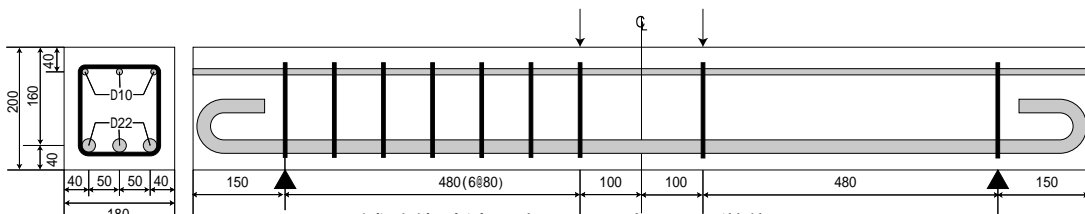


図 - 5 試験体寸法 (左: SS, 右: S, 単位 mm)

仮想ひび割れ長さにおける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 - 3 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。表 - 4 に試験結果および引張軟化曲線モデル式の諸値を示す。ここで、 G_f は N-00, SL-00 の破壊エネルギー (図 - 2 の N-00, SL-00 の面積)、 f_t は割裂引張強度である。最大荷重は、N-00 に比べ、SL-00 は非常に小さいが、混入率の増加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った。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求めた。図 - 4 に残存引張強度 f_v と混入率の関係を示す。図より、混入率による効果は N より SL が顕著であることが確認された。また、SL は残存引張強度と混入率の関係が $f_v = 0.5 V_{sf} f_t$ 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。

表 - 5 試験体

試験体	コンクリート種類	鋼繊維混入率 (%)	せん断補強	V_c	V_s	V_f
N-00-S	普通	0	-	-	-	-
N-00-SS			D6	-	-	-
N-12-S		1.2	-	-	-	-
N-12-SS			D6	-	-	-
SL-00-S	軽量2種	0	-	-	-	-
SL-00-SS			D6	-	-	-
SL-12-S		1.2	-	-	-	-
SL-12-SS			D6	-	-	-

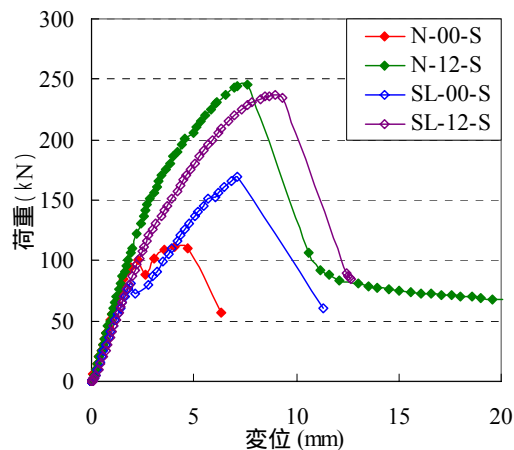


図 - 6 荷重 - 変位関係 (一例)

2.2 RC はりのせん断耐力評価

2.2.1 試験概要および結果

本研究で用いた試験体は図 - 5 に示すように幅 180mm、高さ 200mm、有効高さ 160mm、長さ 1460mm、スパン 1160mm とした RC はりとし、パラメータはコンクリート種類、鋼繊維混入率、せん断補強筋の有・無を対象とした。試験体は表 - 5 に示すようにコンクリートの種類は普通、軽量 2 種コンクリート、繊維は混入率を各々 0, 1.2 (%), せん断補強筋なし・ありとした。S は主鉄筋のみ使用、SS は主鉄筋に加えせん断補強筋使用の場合を示す。試験体数は 3 体とし、2 体以上の結果を用いた。図 - 6 に荷重 - 変位関係の一例を示す。同図より繊維補強なしタイプについては変位 5mm 以内で荷重が若干低下し、せん断ひび割れ発生が見られる。しかし、繊維補強した

表 - 6 試験結果

タイプ	No.	圧縮強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (g/cm ³)	曲げ耐力 (理論値) Pu(kN)	せん断耐力 V		実験値 / 計算値		破壊形式
					理論値 計	実験値 計 平均	計	平均	
N-00-S	1	35.6	2.24	233	121	118	1.01	0.99	斜め引張
	2				123		1.03		せん断圧縮
	3				111		0.93		斜め引張
N-00-SS	1	36.8	2.39	235	-	228	-	1.22	-
	2				226		1.21		せん断圧縮
	3				229		1.23		せん断圧縮
N-12-S	1	32.5	2.35	232	-	274	-	1.18	-
	2				276		1.19		曲げ
	3				280		1.21		曲げ
N-12-SS	1	40.3	1.65	241	266	224	1.15	1.04	曲げ
	2				202		1.36		斜め引張
	3				170		1.15		斜め引張
SL-00-S	1	26.2	1.56	217	141	230	0.95	1.38	斜め引張
	2				225		1.05		斜め引張
	3				222		1.03		斜め引張
SL-00-SS	1	26.2	1.56	217	180	270	1.08	1.24	斜め引張
	2				237		1.42		斜め引張
	3				274		1.65		せん断圧縮
SL-12-S	1	26.2	1.56	217	259	270	1.20	1.24	曲げ
	2				280		1.29		曲げ
	3				-		-		-

場合は荷重低下せず，最大荷重に到達するまで荷重の増加とともに変位が増加する．最大荷重に到達してから，せん断破壊により荷重が低下するが，100kN程度の荷重を持ったまま変位が増加することがわかる．表-6に試験結果を示す．同表より，ほとんどの試験体がせん断破壊したが，N-12-SS，SL-12-SSのタイプはせん断補強筋に加え鋼繊維補強したため，せん断耐力が向上し，曲げ破壊した．

2.2.2 せん断耐力式の提案

コンクリート標準示方書で，RC はりのせん断耐力式はコンクリートが受け持つ V_c とスターラップが受け持つ V_s の和で評価されており，二羽らが提案した算定式が基となっている．本研究では，はりのせん断耐力評価をする際，示方書式の基になっている二羽式を基準とした．式(1)に二羽式を示す．

$$V_c = 0.2 f'_c{}^{1/3} (0.75 + 1.4d/a) (d + p + l) b_w d \quad (1)$$

ここで， V_c ：コンクリートが負担するせん断耐力 (N)

a ：はりのせん断スパン長さ (mm)

d ：はりの有効高さ (mm) b_w ：はりの幅 (mm)

$$d = (l/d)^{1/4} - 1 (d - 1.1) \quad p = (100P)^{1/2} - 1 (0.732)$$

$P = A_s / (b_w \cdot d)$ ：主鉄筋比 (%)

f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

しかし，二羽式はNのみを対象としている式であり，鋼繊維補強軽量2種コンクリートは繊維補強および軽量化の二つを考慮する必要があるため，この式では算定できない．ここで，著者らが提案した強度評価式(表-3)を用いて軽量化および繊維補強に対応できるRC はりのせん断耐力式を検討した．強度評価式は圧縮強度 f'_c および鋼繊維混入率 V_{sf} がわかれば，引張，曲げ，せん断強度を求めることができる式である．二羽式に強度評価式による各タイプのせん断強度の比で表す係数を乗じることで評価した．式(2)に提案する式を示す．

$$V_c = 0.2 f'_c{}^{1/3} (0.75 + 1.4d/a) (d + p + l) b_w d \quad (2)$$

ここで， α は強度評価式から求めたせん断強度と強度評価式から求めたN-00のせん断強度の比とする．

表-6の結果を用いて，実験値と提案式で算定した結果との比較を図-7に示す．N-00-S，SL-00-SSは実験値と計算値がほぼ一致し，N-00-SSは20%程度安全側であった．SL-00-S，SL-12-Sはばらつきが大きいですが，平均するとそれぞれ比が1.15，1.38となり，安全側であることがわかった．N-12-Sは0.88となり危険側となったが，安全係数を考慮した場合，問題ないと考えられる．今回用いたせん断強度評価式はデータ数が少なかったため，更に精度良い強度評価式の検討が必要である．

3. 結論

本研究では強度試験から混入率の各強度への影響度を把握し，混入率を考慮した強度評価式を提案した．次に切欠きはりをを用いた3点曲げ試験を行い，引張軟化特性について検討し，引張軟化曲線モデル式を提案した．その結果，NよりSLの混入率による効果が顕著であることがわかった．さらに，コンクリート種類，混入率，せん断補強筋有無をパラメータとしたRCはり試験を行い，著者らが提案した強度評価式を用いて軽量化および繊維補強に対応したせん断耐力式を提案した結果，実験値と提案式での計算値の比較を行った結果，Nは概ね一致し，安全側であることがわかった．SLは，若干ばらつきが見られるが，平均すると安全側であった．今後さらに精度良い強度評価式の検討が必要であると考えられる．

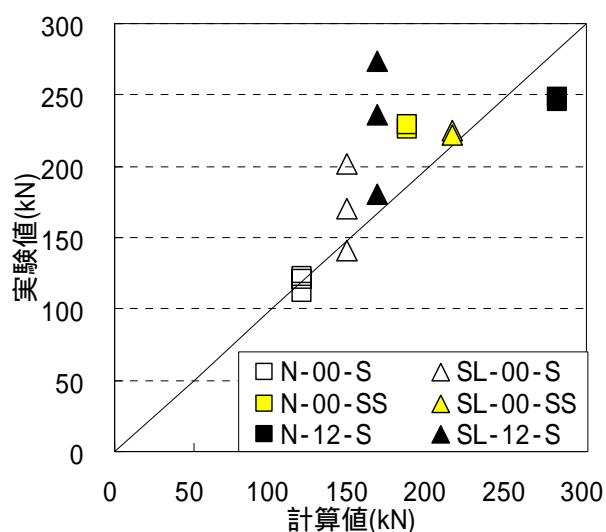


図-7 実験値と計算値の比較