

鋼繊維補強された軽量 2 種コンクリートの強度評価式および引張軟化特性

九州大学大学院 学生会員 ○崔智宣 園田崇智 梶原秀夫
九州大学大学院 フェロー会員 日野伸一 正会員 山口浩平 柴田博之

1. 目的

軽量 2 種コンクリート (以下, SL) とは, 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, 普通コンクリート (以下, N) 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。SL を鋼繊維によって補強すること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, せん断強度および靱性向上の効果が期待できる。

そこで本研究では, 鋼繊維補強による N, SL の強度試験 (圧縮, 引張, 曲げ, せん断強度試験) を行い, 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, 「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)」¹⁾ に準じて, 100×100×400mm の角柱試験体を用いた 3 点曲げ試験 (以下, 曲げ試験) を実施し, 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た。

2. 実験概要

表 - 1 に使用材料を示す。粗骨材および細骨材は全て膨脹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 に示すようにコンクリート種類を N, SL とし, 混入率をそれぞれ 0, 0.4, 0.8, 1.2% とし計 8 タイプとした。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, 計測項目は荷重, 載荷点直下の変位, 切欠き開口変位 (CMOD) 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。

3. 結果および考察

3.1 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²⁾ (引張: N - 29 (29 はデータ数), SL - 40, 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³⁾に従い, $f = \alpha f_c^{2/3}$ 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その適用範囲を示す。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, 混入率増加より強度の向上効果が顕著であることがわかった。

3.2 引張軟化特性

曲げ試験の結果の一例を図 - 1, 平均値を表 - 4 に示す。なお, サンプルング不良で 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,

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	絶乾密度: 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	絶乾密度: 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	(株) フローリック製フローリックSF500S (ポリカルボン酸化合物)
AE助剤	AE	フローリック製AE - 4
増粘剤	B	武田キリン食品 (株) 製 ピオボリー
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)	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	32.7	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	35.0	3.26	7.81	5.00	30.3
N-12		1.2	2.39	50.0	211	422	860	852	2.40	0	0	94.0	36.8	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

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

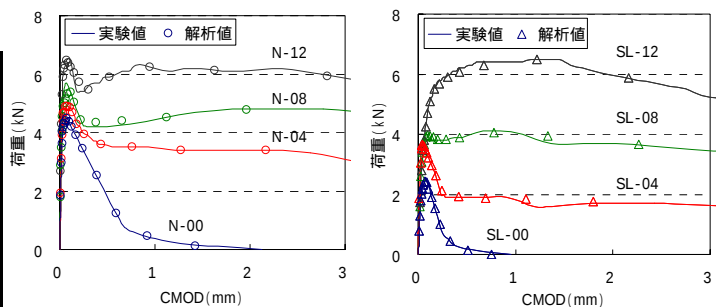
 V_{sf} : 混入率, f_c : 圧縮強度

表 - 4 曲げ試験結果

混入率 %	最大荷重 P_{max} (kN)		初期結合応力 σ_t (N/mm^2)		残存引張強度 f_v (N/mm^2)		有効破壊 エネルギー G_f (N/mm)	
	N	SL	N	SL	N	SL	N	SL
0	4.9	2.8	4.04	1.78	0	0	0.28	0.10
0.4	5.3	3.7	3.39	3.36	0.83	0.61	0.95	0.55
0.8	5.3	4.0	4.10	2.26	0.98	0.98	1.15	1.13
1.2	5.6	6.5	3.97	2.99	1.35	1.71	1.44	1.85

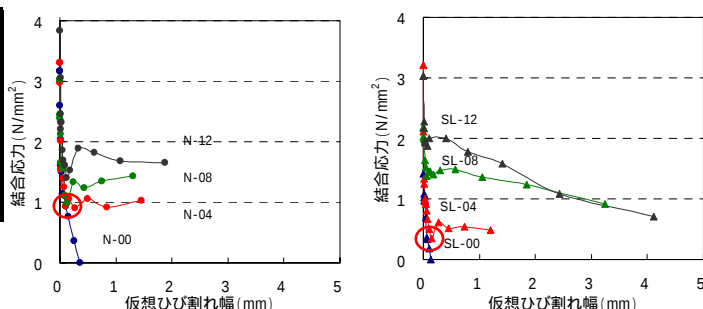
5.3kNで, SLは混入率0.4, 0.8%の場合それぞれ2.1kN, 3.4kNでほぼ一定となり, ひび割れ幅が徐々に広がる挙動を呈した。しかし, SL-12は荷重がほとんど低下せずにひび割れ幅が徐々に広がることからわかる。以上より繊維を混入することにより, ひび割れ発生後に架橋効果が顕著に現れることが確認された。最大荷重は, N-00に比べ, SL-00は非常に小さいが, 混入率の増加による最大荷重の増大はNよりSLが顕著であることがわかった。

図 - 2 に多直線近似法による逆解析法(JCI-S-001)¹⁾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。表 - 4 より初期結合応力はNよりSLが小さいが, 混入率による影響はないと考えられる。図 - 3 に残存引張強度 f_v と混入率の関係を示す。 f_v は最大応力到達後の最小応力値(例えば N-04, SL-04は図 - 2の赤丸部分)の平均値として求めた。さらに, 仮想ひび割れ幅1mmまでの引張軟化曲線の面積を「有効破壊エネルギー」と定義し, 鋼繊維混入率による有効破壊エネルギーを検討した(図 - 4)。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することがわかった。残存引張強度や有効破壊エネルギーについては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。



(a) 普通コンクリート (b) 軽量2種コンクリート

図 - 1 曲げ試験結果



(a) 普通コンクリート (b) 軽量2種コンクリート

図 - 2 引張軟化曲線

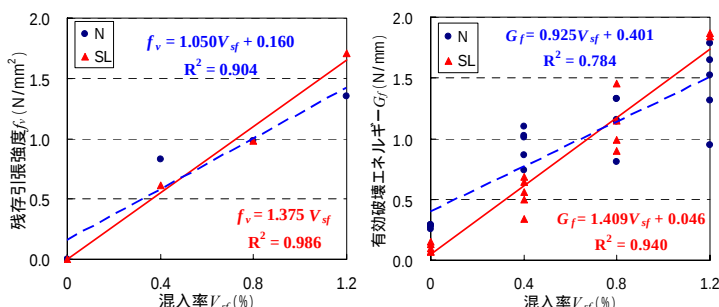


図 - 3 残存引張強度

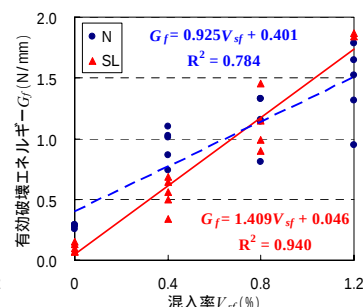


図 - 4 有効破壊エネルギー

4. まとめ

本研究では, 混入率の各強度への影響度を把握し, 強度評価式を提案した。次に引張軟化特性について検討し, 混入率との関係を明らかにした。また, 有効破壊エネルギーや残存引張強度はNよりSLの混入率による効果が顕著であることがわかった。今後, 強度評価式および引張軟化特性を用いてはり・柱・版部材の耐力評価などについて検討する予定である。

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。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) JCI 基準・指針: JCI-S-002-2003「切欠きはりを有いた繊維補強コンクリートの荷重 - 変位曲線試験方法」
- 2) 崔智宣他: 鋼繊維補強された軽量2種コンクリートの繊維混入率を考慮した強度評価式, 土木学会第63回年次学術講演会, V-259, 平成20年9月
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002