

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

九州大学大学院 学生会員 崔智宣 郭勝華 園田崇智  
九州大学大学院 フェロー 日野伸一 正会員 山口浩平 柴田博之

1. 背景および目的

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 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，普通コンクリートを軽量化すると，引張，せん断強度が低下するため，鋼繊維による補強が行われている．軽量 2 種コンクリートを鋼繊維によって補強すると，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．この鋼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．そこで，本研究では，鋼繊維補強による普通，軽量 2 種コンクリートの材料実験を行い，繊維混入率を考慮した強度評価式を提案した．

2. 材料実験

2.1 実験概要

本実験ではコンクリートの種類，鋼繊維混入率をパラメータとした材料実験を行い，圧縮，引張，曲げ，せん断強度，ヤング係数を明らかにした．表 - 1 に材料特性を示す．粗骨材および細骨材は全て人工軽量骨材のアサノライトを使用した．供試体種類および配合表を表 - 2 に示す．実験は圧縮，引張，曲げ，せん断実験を行い，供試体数はそれぞれ 3 本とした．普通骨材の最大寸法は 20mm，軽量 2 種骨材の最大寸法は 15mm とした．目標空気量は N の場合 4.5%，SL の場合 5.0% とした．

2.2 結果

打設後 28 日間水中養生したシリーズ A（以下 A）8 タイプと気中養生したシリーズ B（以下 B）6 タイプの材料実験結果を表 - 3 に示す．同表中の値は N=3 の平均値である．圧縮強度は全タイプ一定となるよう配合設計をした．N を SL にすることで，繊維混入なしの場合の引張およびせん断強度は，A においてそれぞれ 0.8 倍，0.6 倍，B は両方とも 0.7 倍となった．曲げ強度の場合，A は変化がなかったが，B は 0.7 倍となった．ヤング係数は A，B すべて 0.5 倍となった．次に鋼繊維混入による各強度の変化を比較するために 0 と 1.2% の場合を比較した．A は N，SL 両方とも引張，曲げ，せん断強度がそれぞれ 1.5 倍，1.9 倍，1.7 倍となり，繊維混入の影響が明らかである．また，B の引張強度の場合，N は 1.2

表 - 2 供試体種類および配合表

タイプ	コンクリート	混入率 (%)	単位容積質量 (g/cm <sup>3</sup> )	水セメント比 (W/C)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									
					W	C	S	G	SP	AE	B	F		
N-00	普通	0.0	2.39	50.0	213	427	870	862	1.08	1.00	0	0.0		
N-04		0.4	2.43	50.0	213	425	868	859	1.50	0	0	31.3		
N-08		0.8	2.40	50.0	212	423	864	855	2.00	0	0	62.7		
N-12		1.2	2.45	50.0	211	422	860	852	2.40	0	0	94.0		
SL-00	軽量2種	0.0	1.74	47.5	233	490	542	408	0	0	1.00	0.0		
SL-04		0.4	1.71	47.5	232	487	539	406	0	0	1.00	31.3		
SL-08		0.8	1.75	47.5	230	484	535	403	1.63	0	1.00	62.7		
SL-12		1.2	1.76	47.5	228	480	531	400	4.85	0	1.00	94.0		

表 - 1 材料特性

材料種類	詳細	記号	性質
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 3890cm <sup>2</sup> /g
普通細骨材	海砂	普通S	表乾密度: 2.55g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.92% 実績率: 71.1% 粗粒率: 2.55
普通粗骨材	碎石	普通G	表乾密度: 2.90g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.92%
人工軽量細骨材	アサノライト	軽量S	総乾密度: 1.68g/cm <sup>3</sup> 24時間吸水率: 9.8% 単位容積質量: 1.11g/cm <sup>3</sup> 実績率: 53.7%
人工軽量粗骨材		軽量G	総乾密度: 1.55g/cm <sup>3</sup> 24時間吸水率: 9.7% 単位容積質量: 0.79g/cm <sup>3</sup> 実績率: 63.5%
化学混和剤	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 ビオポリ
鋼繊維	ドラミックス	F	密度: 7.85g/cm <sup>3</sup>

表 - 3 結果

シリーズ	タイプ	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> )	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
A	N-00	42.8	3.33	5.50	4.90	29.9
	N-04	42.4	3.63	7.27	5.90	31.2
	N-08	45.3	4.17	10.0	6.40	31.0
	N-12	44.3	4.75	10.8	8.20	30.8
	SL-00	40.1	2.59	5.39	3.12	15.0
	SL-04	33.0	2.79	6.95	4.13	14.5
	SL-08	33.9	3.49	7.62	4.43	14.9
	SL-12	38.4	3.82	9.54	5.18	14.7
B	N-00	39.8	3.1	5.3	4.7	28.1
	N-12	32.5	3.7	8.3	6.2	26.0
	SL-00	40.2	2.1	3.5	3.4	15.2
	SL-12	41.0	4.4	8.9	5.4	17.4
	SL-00	37.7	2.1	3.2	3.3	14.4
	SL-12	37.2	4.3	6.8	5.0	16.0

キーワード 強度評価式，混入率，人工軽量骨材，軽量 2 種コンクリート，鋼繊維

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 Tel : 092-802-3392

表 - 4 強度評価式

タイプ	引張強度 ( $f_t$ )		曲げ強度 ( $f_b$ )		せん断強度 ( $f_{cv}$ )	
	実験式	強度評価式	実験式	強度評価式	実験式	強度評価式
N-00	$f_t = 0.276f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.273f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.485f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.489f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.453f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.447f'_c{}^{2/3}$
N-04	$f_t = 0.285f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.298f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.600f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.579f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.485f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.517f'_c{}^{2/3}$
N-08	$f_t = 0.316f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.323f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.787f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.670f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.504f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.586f'_c{}^{2/3}$
N-12	$f_t = 0.354f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.349f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.838f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.760f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.629f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.656f'_c{}^{2/3}$
SL-00	$f_t = 0.212f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.213f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.335f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.322f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.270f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.285f'_c{}^{2/3}$
SL-04	$f_t = 0.261f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.255f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.469f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.434f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.399f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.343f'_c{}^{2/3}$
SL-08	$f_t = 0.279f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.296f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.553f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.547f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.420f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.400f'_c{}^{2/3}$
SL-12	$f_t = 0.329f'_c{}^{2/3}$	$f_t = 0.338f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.710f'_c{}^{2/3}$	$f_b = 0.659f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.454f'_c{}^{2/3}$	$f_{cv} = 0.458f'_c{}^{2/3}$

倍, SL は 2.0 倍, 曲げ強度の場合 N は 1.6 倍, SL は 2.3 倍, せん断強度の場合 N は 1.3 倍, SL は 1.6 倍となり, この結果からも N よりも SL に対する繊維補強の効果が顕著であることがわかる。

3. 強度評価式

今回行った材料実験(引張, 曲げ, せん断: N-6 (データ数), SL-8)を含め, 過去に九大で行った材料実験(引張: N-18, SL-23, 曲げ: N-7, SL-11, せん断: N-3, SL-3)を用いて, コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>に示されている引張, 曲げ強度および圧縮強度の関係式(以下示方書式)の  $f_t = f'_c{}^{2/3}$  形で求めた式を表-4の実験式として示す。

示方書式  $f_t = 0.23f'_c{}^{2/3}$ ,  $f_b = 0.42f'_c{}^{2/3}$  (N-00の場合)

次に, 混入率による強度評価式を導出するため, 圧縮強度のバラツキを考慮した各強度と繊維混入率の関係を図-1に示し, この結果から強度評価式を求めて以下に提案した。各混入率を代入した強度評価式を表-4に示す。同表より実験式と強度評価式はほぼ一致していることがわかる。

普通コンクリートの場合

混入率 圧縮強度  
 $f_t = (0.063xV_{sf} + 0.273)x f'_c{}^{2/3}$  ( $R^2 = 0.628$ ) 0~1.2(%) 20~50(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_b = (0.226xV_{sf} + 0.489)x f'_c{}^{2/3}$  ( $R^2 = 0.586$ ) 0~1.2(%) 30~50(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{cv} = (0.174xV_{sf} + 0.447)x f'_c{}^{2/3}$  ( $R^2 = 0.588$ ) 0~1.2(%) 30~50(N/mm<sup>2</sup>)

軽量2種コンクリートの場合

混入率 圧縮強度  
 $f_t = (0.104xV_{sf} + 0.213)x f'_c{}^{2/3}$  ( $R^2 = 0.762$ ) 0~1.2(%) 20~50(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_b = (0.281xV_{sf} + 0.322)x f'_c{}^{2/3}$  ( $R^2 = 0.596$ ) 0~1.2(%) 30~50(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{cv} = (0.144xV_{sf} + 0.285)x f'_c{}^{2/3}$  ( $R^2 = 0.908$ ) 0~1.2(%) 30~50(N/mm<sup>2</sup>)

$f_t, f_b, f_{cv}$ : コンクリートの引張, 曲げ, せん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)  $V_{sf}$ : 鋼繊維混入率 (%)

最後に, 圧縮強度とヤング係数の関係を図-2に示す。ヤング係数は軽量化により低下するが, 繊維混入の影響はないと考えられる。

4. まとめ

軽量化により引張, せん断強度は低下する。繊維混入効果は N より SLの方が大きい。また, 混入率を考慮した各強度と圧縮強度との関係を示した強度評価式を提案した。ヤング係数は軽量化により低下するが, 繊維の影響はない。今後, 実験データを増やすとともに, 本提案式のはり・柱・版部材等のせん断耐力評価への適用性について検討する予定である。

謝辞 研究を遂行するにあたり材料提供をしていただきました太平洋マテリアル株式会社に厚く御礼申し上げます。

参考文献 1)土木学会: コンクリート標準示方書 構造性能照査編, 2002

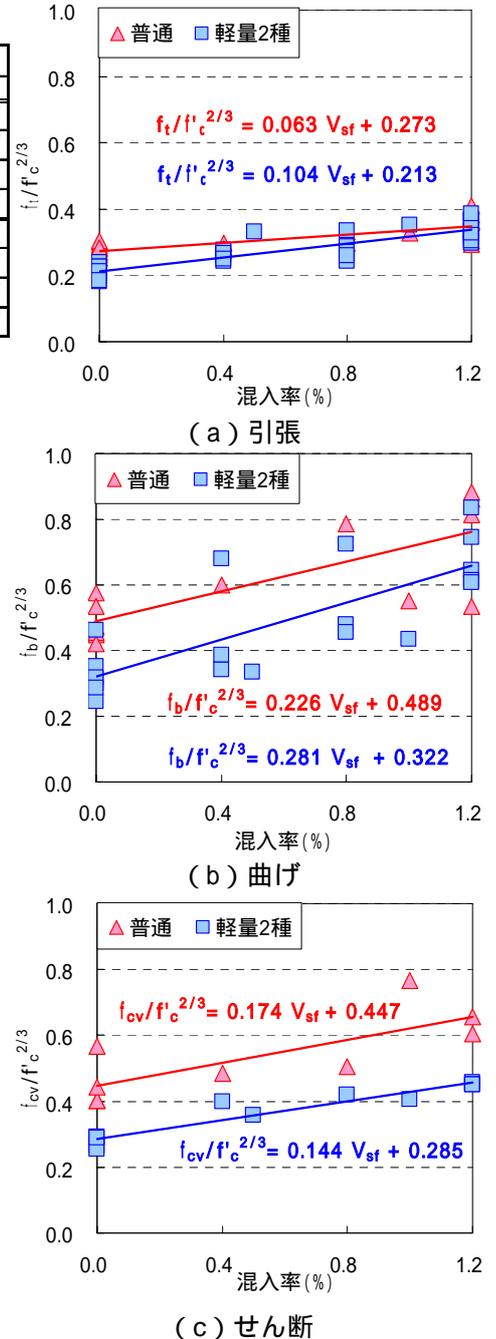


図-1 各強度比 - 混入率の関係

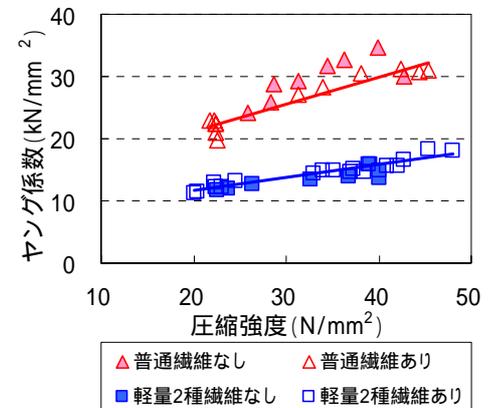


図-2 ヤング係数 - 圧縮強度の関係