

論文 鋼繊維補強された超軽量コンクリートを用いたRCはりのせん断耐力評価

山口 浩平^{*1}・日野 伸一^{*2}・福井 圭太^{*3}・合田 寛基^{*4}

要旨：鋼繊維補強された超軽量コンクリートは、比重 1.5 程度（軽量 2 種）と極めて軽量でかつ従来の軽量コンクリートの短所であった引張強度，せん断強度の低下を鋼繊維補強により普通コンクリートと同等まで強化したコンクリートである。しかしながら，このコンクリートはりのせん断耐力評価は，十分に解明されているとは言えない。そこで，コンクリートの種類および鋼繊維混入率を変化させた RC はりのせん断試験を実施して，軽量化と鋼繊維補強の影響を個別に評価している既往のせん断耐力算定式を組み合わせ，鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力評価法を提案した。

キーワード：軽量骨材，鋼繊維，せん断耐力，RC はり，軽量化

1. はじめに

近年，コンクリート構造物の巨大化，高層化による断面の複雑化，自重や環境負荷の低減から軽くて強いコンクリートが望まれている。その改善策として超軽量コンクリートの適用が検討されている。本研究では軽量 2 種の中で比重 1.5 程度のものを超軽量コンクリートとして位置付けている。この超軽量コンクリートは普通コンクリートに比べ単位容積質量を 3 割程度小さくすることが可能な反面，引張およびせん断強度が低下する。その補強方法として，鋼繊維を混入する方法がある。

しかしながら，RCはりのせん断耐力については，土木学会規定のコンクリート標準示方書¹⁾では軽量コンクリートの単位容積質量に関わらず一律 70%に低減すること，鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案）²⁾では設計曲げ基準強度に応じて 1.1～1.3 の割増係数を乗じることと規定されている。しかし，これでは骨材種類や鋼繊維種類の違いを考慮することができない。また，鋼繊維補強された超軽量RCはりの場合は

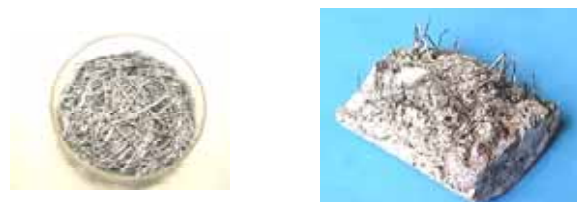
軽量化と鋼繊維混入の二つの要素があるため，現在の算定方法では明確な評価ができない。

そこで本研究では，コンクリート種類，鋼繊維混入率をパラメータとして RC はりのせん断試験を行ない，鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力向上効果を確認するとともに，せん断耐力の評価法を確立することを目的とした。



(a) 粗骨材 (b) 細骨材

図-1 人工軽量骨材



(a) 鋼繊維 (b) 鋼繊維補強コンクリート

図-2 鋼繊維

*1 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門助手 博（工）（正会員）

*2 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）

*3 九州大学大学院 工学府都市環境システム工学専攻

*4 九州工業大学大学院 工学研究科機能システム創成工学専攻助手 工修（正会員）

2. せん断試験概要

コンクリートの種類および鋼繊維混入率を変化させた RC はりのせん断試験を実施した。図-1、図-2 に、それぞれ人工軽量骨材および鋼繊維を示す。

表-1 に試験体種類、表-2 にコンクリート材料および示方配合、表-3 に鋼繊維および鉄筋の諸元、図-3 に試験体一般図を示す。初めに各種類 2 体ずつ計 20 体のはりを両端ヒンジ支点の条件

で行ない、次に N-0.0, SL-0.0, SL-0.4 の 3 種類（各 2 体）を片側ローラー支点に変更した条件で行なった。なお、片側ローラー支点の条件で実施したはり試験体名に「R」を付記した。鋼繊維はインデント型の長さ 30mm の鋼繊維を使用し、混入率は体積比で 0, 0.4, 0.8, 1.2% とした。はりの寸法は、せん断スパンと有効高さの比 2.0, スパン 980mm, 幅 100mm, 高さ 200mm の単純 RC はりとし、載荷方法は静的 2 点線載荷とした。

表-1 試験体種類

試験体名	コンクリート種類	鋼繊維混入率(%)	密度(g/cm ³)
N-0.0	普通	0	2.36
N-1.2		1.2	2.32
L-0.0		0	1.79
L-0.4	軽量 (軽量1種)	0.4	1.85
L-0.8		0.8	1.89
L-1.2		1.2	1.94
SL-0.0	超軽量 (軽量2種)	0	1.54
SL-0.4		0.4	1.64
SL-0.8		0.8	1.67
SL-1.2		1.2	1.71
N-0.0R	普通	0	2.38
SL-0.0R	超軽量 (軽量2種)	0	1.69
SL-0.4R		0.4	1.73

表-3 使用材料

(a) 鋼繊維

種類	直径 mm	繊維長 mm	比重	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	形状
鋼	0.6	30	7.85	980	200	インデント

(b) 鉄筋

呼び名	規格	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
6	SR295	295	440	200
D13	SD345	365	560	

表-2 コンクリート材料および示方配合

(a) コンクリート材料

セメント	高炉セメントB種	密度: 3.04g/cm ³ 比表面積: 3850cm ² /g
普通粗骨材	砕石 (福岡県篠栗町若杉山産)	表乾密度: 2.89 ~ 2.90g/cm ³ 吸水率: 1.92%
普通細骨材	海砂 (博多湾沖産)	表乾密度: 2.55g/cm ³ 吸水率: 1.92% 粗粒率: 2.55 実積率: 71.1%
人工軽量粗骨材	焼成人工軽量骨材 (膨張頁岩)	絶乾密度: 1.25g/cm ³ 吸水率: 9.7%(24h) 単位容積質量: 0.79g/cm ³ 実積率: 63.5%
人工軽量細骨材		絶乾密度: 1.68g/cm ³ 吸水率: 9.8%(24h) 単位容積質量: 1.11g/cm ³ 実積率: 53.7%
化学混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物 (標準形 1種)
	AE助剤	-
	増粘剤	-
短繊維	鋼繊維	密度: 7.85g/cm ³

(b) コンクリート示方配合

試験体名	粗骨材最大 寸法 mm	W/C %	s/a %	air %	W	C	S	G	鋼繊維	高性能AE減水剤	AE助剤	増粘剤			
					kg/m ³										
N-0.0	20	55	45.0	5.0	165	300	788	1098	0	3.00	3.00	0			
N-1.2			60.0		180	327	1013	771	94.2	3.93	3.27				
L-0.0	48	48	49.8		175	365	831	411	0	3.65	3.65	1.00			
L-0.4			51.4		175	365	858	398	31.4	4.38					
L-0.8			53.1		180	375	876	379	62.8	6.00					
L-1.2			55.0		180	375	907	364	94.2	6.75					
SL-0.0			44		44	47.9	170	386	526	425			0	3.86	3.86
SL-0.4						50.3	170	386	552	406			31.4	4.63	
SL-0.8	52.7	170				386	578	386	62.8	6.18					
SL-1.2	55.0	179				407	589	358	94.2	7.33					

3. 材料試験およびせん断試験結果

図-4 に材料試験から得られた強度と混入率の関係を示す。圧縮強度は混入率による顕著な違いは見られない。一方、割裂試験より得られた引張強度は、混入率 1.2%と無混入の比は、普通、軽量、超軽量はそれぞれ 1.39, 1.25, 1.60 と増加傾向にある。同様に曲げ強度は、1.48, 1.80, 2.65 と鋼繊維補強効果が顕著に現れている。

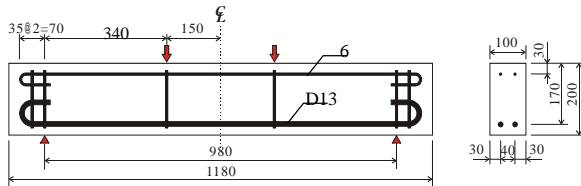
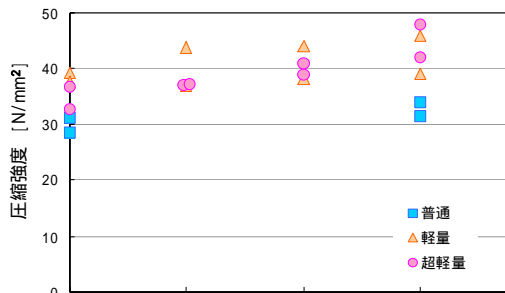
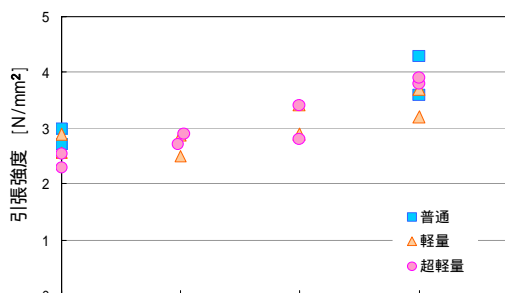


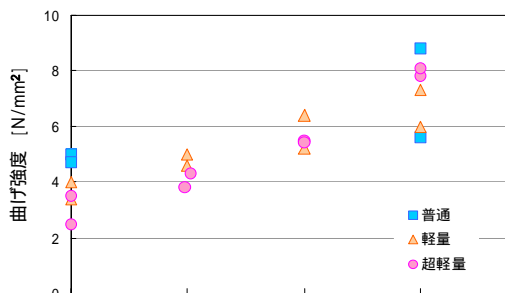
図-3 試験体一般図 (単位: mm)



(a) 圧縮強度



(b) 引張強度



(c) 曲げ強度

図-4 強度と混入率の関係

図-5 にはり試験から得られた最大荷重と混入率の関係を示す。普通、軽量、超軽量コンクリートとも、混入率の増加とともに、最大荷重が増加していることがわかる。図-6 にひび割れ状況の一例として、SL-0.0 (2体目) および SL-1.2 (2体目) を示す。はりの破壊形式については後述するが、SL-0.0 はせん断圧縮破壊、SL-1.2 は斜め引張破壊であった。

4. せん断耐力評価

4.1 算定法の提案

軽量骨材を用いることによる RC はりの耐力低下(軽量項)と鋼繊維補強による RC はりの耐力増加(鋼繊維項)を個別に評価した各算定式の組み合わせにより、鋼繊維補強された超軽量コンクリートはりのせん断耐力評価を試みる。

軽量項を評価する既往研究として、前田らの式³⁾、Eurocode式⁴⁾、舟橋らの式⁵⁾があるが、本算定では、「斜め引張破壊あるいはせん断引張破壊するRC梁のせん断破壊荷重比と単位容積質量の関係は、脆度係数の逆数比(= / N)と単位容積質量の関係とよく対応している。したがって、コンクリートの単位容積質量が小さくなること

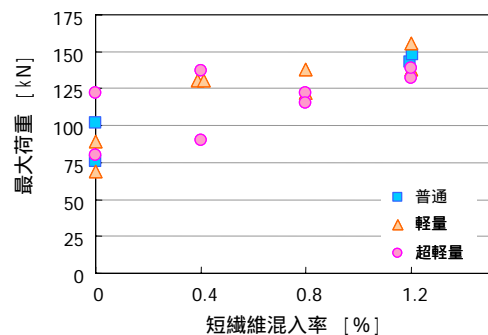


図-5 最大荷重と混入率の関係



(a) SL-0.0



(b) SL-1.2

図-6 ひび割れ状況

表-4 算出式の適用範囲

	軽量項	短繊維項			本試験
	前田式	藤野式	原田式	指針式	
せん断スパン比	2.0, 3.0, 3.6	2.0, 2.5, 3.0	1.0, 1.22, 1.5, 3.5	2.2 - 6.0 (17種類)	2.0
圧縮強度	22.7 - 26.7 N/mm ²	505 - 591 kgf/cm ²	21.8 - 56.8 N/mm ²	165 - 233 N/mm ²	35 N/mm ² 程度
試験体寸法	150 × 240 × 2000mm (d=200mm, ρ _w =1.3%)	150 × 200 × 1800mm (d=175mm, ρ _w =2.2%)	b: 100mm d: 11.5, 27.5, 21.5, 31.0, 39.0mm h: 100, 122, 150, 350mm の組み合わせ	b: 25, 35, 40, 50mm d: 170, 340, 365, 407, 448mm h: 200, 400, 450, 500mm の組み合わせ	150 × 200 × 1380mm (d=170mm, ρ _w =2.3%)
載荷方法	2点集中	2点集中	2点線	1点集中, 2点集中	2点線
使用鋼材	引張: D16 (SD345)	引張: D19 (SD35) 圧縮: 6	引張: D16 (SD35) D22 (SD35) (鉄筋比によって使い分け)	引張: 22 (異形PC鋼棒SBPD930) 21.8 (PC鋼より線SWPR19)	引張: D16 (SD345) 圧縮: 6
使用鋼繊維 混入率	-	鋼繊維 0.5 × 32mm (インデント型カットワイヤー) 混入率: 0, 1, 2%	鋼繊維 0.5 × 0.5 × 30mm (S社製波型異形鋼繊維) 0.5 × 0.5 × 30mm (K社製フラット異形鋼繊維)	鋼繊維 0.2 × 15mm	鋼繊維 ドラミックス 0.6 × 30mm (ベカルト社) 混入率: 0, 0.4, 0.8, 1.2%
単位容積質量	軽量粗骨材: LG0.85, LG1.2 軽量細骨材: LS1.0, LS1.2	-	-	-	軽量2種: 1.6g/cm ³ 程度
破壊形式	斜め引張破壊 せん断圧縮破壊	斜め引張破壊 せん断圧縮 曲げ破壊	斜め引張破壊 せん断圧縮破壊	せん断破壊 (詳細は記載無し)	せん断圧縮破壊 斜め引張破壊
その他	mean式	mean式	mean式 鉄筋比, 載荷版幅	mean式 プレストレスの有無	-

に伴うせん断耐力の低下に、脆度係数の逆数比が大きく影響する。」と考察されている前田らの式を適用する。ここに、脆度係数とは引張強度と圧縮強度の比である。なお、Eurocode式、舟橋らの式についても検討した結果、三者にはそれほど差がなかった。一方、鋼繊維項は、藤野らの式⁶⁾、原田らの式⁷⁾、指針式⁸⁾の3種類を適用する。以下にそれらの式を示す。なお本論文では、これらの式の詳細は参考文献に委ねるとするが、表-4に各式の基になった試験の諸元を示しており、本試験との適用範囲について比較している。ここに、鋼繊維の形状については、各式ともその種類による影響は無視される、と考察されている。

(1) 軽量項

〔前田らの式〕

$$\eta = 0.84(\xi / \xi_N) + 0.32 \quad (1)$$

：脆度による軽量効果を評価した低減係数
 ξ_N : 軽量, 普通コンクリートの脆度の逆数

〔Eurocode 式〕

$$\eta = 0.4 + 0.6(/ 2400) \quad (2)$$

：コンクリートの単位容積質量[kg/m³]

〔舟橋らの式〕

$$\eta = (/ 2300)^{3/2} \quad (3)$$

(2) 鋼繊維項

〔藤野らの式〕

$$\tau_c = V_c / (b_w d) = (1.1 + 1.4d/a) f_{ct} \quad (4)$$

(a/d ≥ 2.0)

$$f_{ct} = 0.05(V_f)^{1/3} (L/D) (1 + 0.57L/b_w)^{1/2}$$

c : せん断強度[N/mm²]

V_c : せん断耐力[N]

b_w : はりの幅[mm]

d : 有効高さ[mm]

a : せん断スパン[mm]

f_{ct} : 引張ひび割れ発生後の擬似塑性領域において、

鋼繊維補強コンクリートが抵抗し得る引張強度[N/mm²]

V_f : 鋼繊維混入率[%]

L : 鋼繊維長さ[mm]

D : 鋼繊維径[mm]

c : 圧縮強度[kgf/cm²]

〔原田らの式〕

$$V_c = \frac{0.25b_w d f_c^{2/3} \{1 + (\sqrt{100} p_w)\} (1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} \quad (5)$$

f_c : 圧縮強度[N/mm²]

a : せん断スパン [m]

p_w : 引張鉄筋比

b_w : はりの幅[mm]

r : 支圧板の長さ[m]

d : 有効高さ[m]

〔指針式〕

$$V_{fd} = (f_{vd} / \tan \beta_u) b_w z / b \quad (6)$$

$$\beta_u = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\tau}{\sigma'_{xu} - \sigma'_{yu}} \right) - \beta_0$$

V_{fd} : 補強用繊維により受け持たれる設計せん断耐力[N]

f_{vd} : 斜めひび割れ直角方向の設計平均引張強度 [N/mm²]

z : $d/1.15$

b : 一般に 1.3 としてよい (本算定では 1.0)

: 設計断面力による平均せん断応力[N/mm²]

$\sigma'_{xu}, \sigma'_{yu}$: 軸方向および軸直角方向の平均圧縮応力[N/mm²]

ϕ : 軸力を受けない場合の斜めひび割れが部材軸から 45 度傾いた直線となす角度 (本算定では $\phi=45$ 度)

なお、鋼繊維補強しない軽量コンクリートの試験体 (L-0.0, SL-0.0) については、土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力算定式¹⁾で計算した後、低減係数 β を乗じて算出した。一方、鋼繊維補強した普通コンクリートの試験体については、 $\beta=1$ として算出した。

4.2 考察

表-5 に、実験値、破壊形式、前述した算定法による計算値

を示す。図-7 に、

実験値と計算値の比と鋼繊維混入率の関係を示す。

同図より、藤野式では安全側の評価を、原田式および指針式では、平均値は 1.0 に近いものの若干危険側の評価を与えていることがわかる。しかしながら、曲げおよび引張

強度の向上が期待できる鋼繊維補強効果の明確でかつ実用上有用な混入率 0.8 ~ 1.2% においては、より狭い範囲で評価が可能であることがわかる。また各々の算定式でばらつきが見られる。これは、斜めひび割れ発生後すぐにせん断破壊に至る斜め引張破壊と、斜めひび割れ発生後も耐力を失わず、最終的に圧縮域のコンクリート圧壊でせん断破壊に至るせん断圧縮破壊という異なった破壊形式によるものと考えられる。

破壊形式に着目すると、せん断圧縮破壊では原田式、せん断圧縮および斜め引張破壊の両せん断破壊形式では指針式および原田式が 1.0 に近くなる傾向が見られる。一方、藤野式はやや過小評価することがわかる。それと、本試験のせん断スパン比 $a/d=2$ の場合、せん断圧縮破壊から斜め引張破壊に遷移する境界付近であるため、このようなばらつきがでたものと考えられる。また、支点条件による影響が考えられたが、支点を片側ローラー支点とした結果と比較しても明確な違いは見られなかった。

しかしながらこのように、コンクリート種類に依らず、既往の算定式を組み合わせた本評価

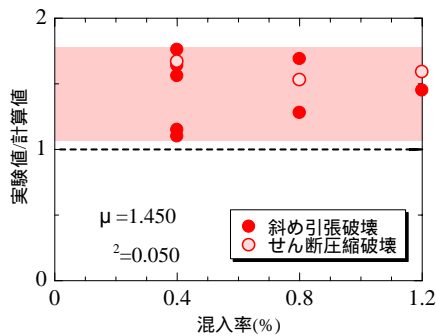
表-5 試験結果およびせん断耐力比較

試験体種類	名称	混入率 (%)	実験値 P(kN)	破壊形式	材料特性			脆度	軽量項前田式	短繊維項によるせん断耐力の算定値			実験値/計算値		
					圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)			藤野式	原田式	指針式 (繊維)	指針式 (コンクリート)	P/(\cdot)	P/(\cdot)
普通	N-0.0	0	75.6	斜引張	28.6	2.7	10.6	1.00	-	102.1	0	102.1	-	0.74	0.74
			102.1	せん断圧	31.3	3.0	10.4	1.00	-	108.5	0	108.5	-	0.94	0.94
			98.7	せん断圧	35.5	2.9	12.2	1.00	-	118.0	0	118.0	-	0.84	0.84
			128.7	曲げ	35.5	2.9	12.2	1.00	-	118.0	0	118.0	-	-	-
	N-1.2	1.2	142.7	曲げ	33.9	4.3	7.9	1.00	74.8	114.4	48.3	114.4	-	-	-
			147.9	曲げ	31.4	3.6	8.7	1.00	72.0	108.7	48.3	108.7	-	-	-
軽量1種	L-0.0	0	89.4	斜引張	39.2	2.9	13.5	0.97	-	126.0	0	126.0	-	0.73	0.73
			69.4	斜引張	37.6	2.6	14.5	0.93	-	122.6	0	122.6	-	0.61	0.61
	L-0.4	0.4	130.7	斜引張	37.0	2.5	14.8	0.92	81.2	121.3	16.0	121.3	1.76	1.18	1.10
			130.7	斜引張	43.9	2.9	15.1	0.90	88.5	135.9	16.0	135.9	1.64	1.07	1.01
	L-0.8	0.8	138.3	斜引張	38.3	2.9	13.2	0.99	82.6	124.1	31.9	124.1	1.69	1.13	0.90
			122.3	曲げ	44.1	3.4	13.0	1.00	88.7	136.3	31.9	136.3	-	-	-
L-1.2	1.2	155.7	曲げ	45.8	3.7	12.4	1.03	90.4	139.8	47.9	139.8	-	-	-	
		138.4	せん断圧	39.1	3.2	12.2	1.04	83.5	125.8	47.9	125.8	1.59	1.06	0.89	
軽量2種	SL-0.0	0	80.3	斜引張	32.7	2.3	14.2	0.94	-	111.7	0	111.7	-	0.76	0.76
			122	せん断圧	36.8	2.5	14.7	0.92	-	120.8	0	120.8	-	1.10	1.10
			132.9	せん断圧	35.5	2.2	16.1	0.87	-	118.0	0	118.0	-	1.30	1.30
	SL-0.4R	0.4	116.3	せん断圧	35.5	2.2	16.1	0.87	-	118.0	0	118.0	-	1.14	1.14
			89.9	斜引張	37.0	2.7	13.7	0.96	81.2	121.3	16.0	121.3	1.15	0.77	0.72
			136.8	せん断圧	37.2	2.9	12.8	1.01	81.5	121.7	16.0	121.7	1.67	1.12	1.05
	SL-0.4	0.4	91.9	斜引張	33.9	2.9	11.7	1.07	77.8	114.4	16.0	114.4	1.10	0.75	0.70
			130.5	せん断圧	33.9	2.9	11.7	1.07	77.8	114.4	16.0	114.4	1.56	1.06	0.99
			121.8	せん断圧	38.9	2.8	13.9	0.95	83.3	125.4	31.9	125.4	1.53	1.02	0.90
	SL-0.8	0.8	115.2	斜引張	40.9	3.4	12.0	1.05	85.4	129.7	31.9	129.7	1.28	0.84	0.75
			132.5	曲げ	42.0	3.8	11.1	1.12	86.5	132.0	47.9	132.0	-	-	-
	SL-1.2	1.2	138.7	斜引張	48.0	3.9	12.3	1.04	92.5	144.3	47.9	144.3	1.45	0.93	0.80

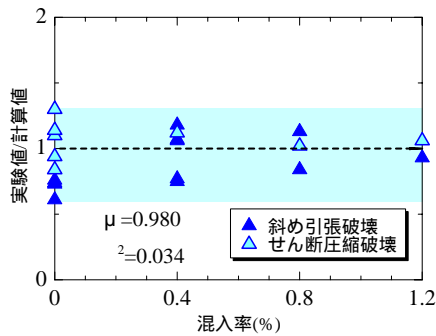
法により，せん断耐力の実験値と計算値の比は 0.960 ~ 1.450 と一定の範囲内でせん断耐力評価ができたことは今後に向けた着実な成果であり，今後はせん断耐力に及ぼす多数の影響因子を考慮した実験データを集積していく必要がある。

5. 結論

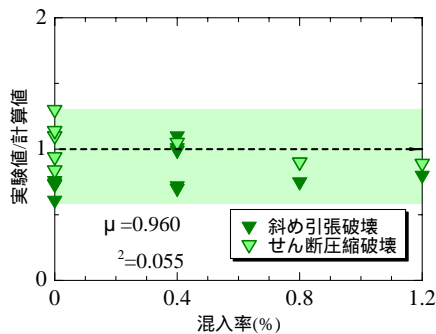
- (1) 鋼繊維補強された超軽量コンクリートにおいて，圧縮強度は混入率による顕著な違いは見られないが，引張，曲げ強度は混入率の増加とともに強度は顕著に増加する。
- (2) 軽量効果と鋼繊維補強効果を個別評価した既往算定式の組み合わせによる本評価法は，一定の範囲内でせん断耐力を評価できる。



(a) 藤野式



(b) 原田式



(c) 指針式

図-7 せん断耐力比と混入率の関係
(μ : 平均, σ^2 : 分散)

- (3) 鋼繊維混入効果の明確でかつ実用上有用な混入率 0.8 ~ 1.2% では，より狭い範囲で評価可能である。

謝辞

本研究の一部は，平成 16-17 年度科研費基盤研究 C (代表：日野伸一) の補助を受けています。また，太平洋マテリアル株式会社に軽量骨材他を提供して頂きました。ここに謝意を表します。

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
- 2) 土木学会：鋼繊維補強コンクリートの設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー50，1983
- 3) 前田拓郎ほか：高品質軽量骨材を用いた RC はりのせん断特性，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol.23，No.3，pp.913-918，2001
- 4) European Committee for Standardization：EUROCODE2，pp.186-190，2004
- 5) 舟橋政司ほか：高性能軽量コンクリートを用いた RC はりのせん断耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.919-924，2001
- 6) 藤野秀夫ほか：鋼繊維補強コンクリートを用いた RC 梁のせん断特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，pp.361-364，1981
- 7) 原田修輔ほか：鋼繊維を用いた鉄筋コンクリートばりのせん断耐荷力，土木学会論文集，第 348 号，V-1，pp.87-93，1984
- 8) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー113，pp.31-34，2004