

G1-9. 鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力評価に関する研究

福井 圭太

1. 目的

近年、コンクリート構造物の巨大化などにより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、コンクリート標準示方書や鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)では一律の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、せん断耐力の評価方法を確立することを目的とした。

2. 内容

2.1 実験概要

供試体は幅 150mm、高さ 200mm、有効高さ 170mm、せん断スパン比が 3.0 の単純 RC はりとし、コンクリート種類、鋼繊維混入率をパラメータとしている。各種類を 2 体ずつ、計 16 体を作成した。使用した鉄筋は D16 (SD345, $f_{sy}=370\text{N/mm}^2$, $f_t=560\text{N/mm}^2$) である。表-1 に供試体概要、表-2 に鋼繊維概要、図-1 に供試体概要図を示す。使用骨材の原料は膨張頁岩、載荷方法は静的 2 点線載荷とした。

2.2 実験結果

表-3 に実験結果を示す。同表より供試体の破壊形式は全てせん断破壊であった。N-00, SL-00 は斜めひび割れ発生と同時に、またはその直後に破壊に至る斜め引張破壊であり、その他の供試体は斜めひび割れが発生して一度荷重が低下するものの耐力を失わず、最終的に載荷点部のコンクリートが圧壊することによって斜めひび割れが貫通し、破壊に至るせん断圧縮破壊であった。また、鋼繊維混入により最大荷重が増加していることがわかる。特に SL シリーズでは鋼繊維無混入の普通コンクリート(N-00)以上の耐力を得ることができ、鋼繊維の補強効果が確認された。

2.3 既往の算定式による検討

本研究では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(繊維項)を個別に評価した各算定式を組み合わせることによ

表-1 供試体概要

Type	コンクリート種類	混入率 (%)	単位容積質量 (g/cm ³)
N-00	普通	0	2.23
N-04		0.4	2.20
N-08		0.8	2.21
N-12		1.2	2.22
SL-00	超軽量 (軽量2種)	0	1.51
SL-04		0.4	1.56
SL-08		0.8	1.50
SL-12		1.2	1.55

表-2 鋼繊維概要

種類	直径 mm	長さ mm	比重	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	形状
鋼	φ0.62	30	7.85	1000	200	フックエンド

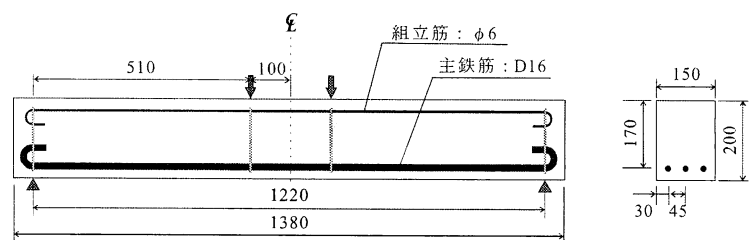


図-1 供試体概要図(単位: mm)

表-3 実験結果

Type	圧縮強度 (N/mm ²)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊形式
N-00A	28.3	70.0	70.0	斜め引張
N-00B	25.9	81.6	81.6	斜め引張
N-04A	22.6	78.4	98.0	せん断圧縮
N-04B	22.4	109.8	111.7	せん断圧縮
N-08A	21.7	112.3	114.3	せん断圧縮
N-08B	22.3	90.2	135.8	せん断圧縮
N-12A	22.4	131.3	137.2	せん断圧縮
N-12B	22.4	137.8	137.8	せん断圧縮
SL-00A	26.4	56.8	62.0	斜め引張
SL-00B	23.8	58.8	69.2	斜め引張
SL-04A	23.1	74.5	81.6	せん断圧縮
SL-04B	22.4	67.9	118.2	せん断圧縮
SL-08A	20.4	66.0	97.3	せん断圧縮
SL-08B	20.1	92.1	92.1	せん断圧縮
SL-12A	22.3	74.5	102.5	せん断圧縮
SL-12B	24.6	103.2	121.5	せん断圧縮

って鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力評価を試みた。

軽量項を評価する方法として以下に示す前田らの式、Eurocodes, 舟橋式などがある。

[前田式]

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

ξ : 軽量コンクリートの脆度の逆数

ξ_N : 普通コンクリートの脆度の逆数

[Eurocodes]

$$\eta = 0.40 + 0.60 \rho_c / 2400 \quad \cdots (2)$$

ρ_c : コンクリートの単位容積質量[kg/m³]

[舟橋式]

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

表-4 軽量項算定式の比較

Type	単位容積質量 (g/cm ³)	脆度	実験値 (kN)	計算値 (kN)	低減係数			実験値/計算値		
					①前田式	②Eurocodes	③舟橋式	①	②	③
SL-00A	1.54	15.4	62.0	62.7	0.867	0.785	0.547	1.14	1.26	1.81
SL-00B	1.49	13.9	69.2	60.6	0.923	0.772	0.520	1.24	1.48	2.20
L-0.0①	1.80	13.5	89.4	121.3	0.942	0.851	0.693	0.78	0.87	1.06
L-0.0②	1.79	14.7	69.4	135.9	0.891	0.847	0.685	0.57	0.60	0.74
SL-0.0①	1.49	14.2	80.3	111.7	0.912	0.773	0.521	0.79	0.93	1.38
SL-0.0②	1.59	14.5	122.0	120.8	0.899	0.796	0.572	1.12	1.27	1.76

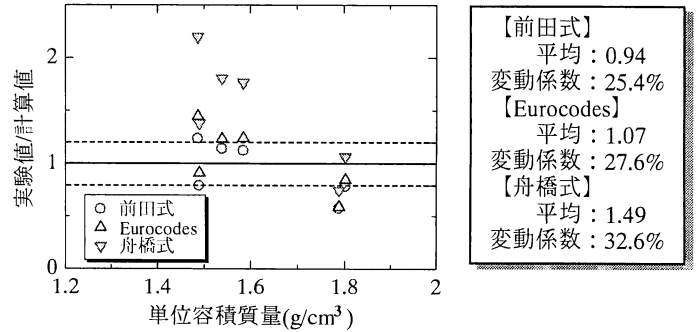


図-2 軽量算定式の比較

表-4, 図-2 に鋼繊維無混入の供試体の実験値とこれらの算定式における計算値との比較を示す。なお、L-0.0, SL-0.0 は昨年度行った $a/d=2.0$ の供試体であり、L は軽量 1 種を示している。同表, 同図より前田式と Eurocodes が精度良く軽量項を評価していることが確認される。本算定では単位容積質量のみで算定することが可能である Eurocodes を軽量項として扱うことにした。

繊維項は以下に示す藤野らの式, 原田らの式, 指針式の 3 つを検討することにした。

[藤野式]

$$\tau_c = V_c / (b_w d) = (1.1 + 1.4d/a) f_{cr} \quad \cdots (4) \quad (\text{但し, } a/d \geq 2.0)$$

$$f_{cr} = 0.05(V_f)^{1/3} (L/D)(1 + 0.57L/b_w) \sigma_c^{1/2} \quad \cdots (5)$$

τ_c : せん断強度[N/mm²], V_c : せん断耐力[N], d : 有効高さ[mm], b_w : 梁のウェブ幅[mm]

a : せん断スパン[mm], L : 鋼繊維長さ[mm], D : 鋼繊維径[mm], V_f : 鋼繊維混入率, σ_c : 圧縮強度[kgf/cm²]

f_{cr} : 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強度[N/mm²]

[原田式]

$$V = 0.2 \cdot b_w \cdot d \cdot f_c^{1/3} (0.75 + 1.4d/a) \cdot (\beta_d + \beta_p + 1) \quad \cdots (6) \quad (a/d \geq 3)$$

$$V = \frac{0.244 f_c^{2/3} \{1 + (100p)^{1/2}\} \cdot (1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} \cdot b_w \cdot d \quad \cdots (7) \quad (a/d < 3)$$

$$\beta_d = (\alpha \times 1/d)^{1/4} - 1, \quad \beta_p = (100p)^{1/2} - 1, \quad \alpha : V_f < 0.2\% \text{ のとき, } \alpha = 1, V_f \geq 0.2\% \text{ のとき } \alpha = 1 + 7(V_f - 0.2)/(1 + V_f)$$

注)式(6)のせん断耐力の単位は[MN], 圧縮強度 f_c は[N/mm²], その他の幾何学的条件は[m]である

式(7)については, p : 引張鉄筋比, r : 載荷版幅[mm]

[指針式]

$$V_{fd} = (f_{vd} / \tan \beta_u) \cdot b_w \cdot z / \gamma_b \quad \cdots (8)$$

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

V_{fd} : 補強用繊維に受け持たれる設計せん断耐力[N]

f_{vd} : 超高強度繊維補強コンクリートの斜めひび割れ直角方向の設計平均引張強度[N/mm²]

β_u : 軸方向と斜めひび割れ面のなす角度($\beta_u < 30$ 度)

β_0 : 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(一般に $\beta_0 = 5$ 度としてよい)

τ : 設計断面力による平均せん断応力 [N/mm²]

σ_{xu}, σ_{yu} : それぞれの軸方向および軸直角方向の平均圧縮応力 [N/mm²]

z : 圧縮応力と合力の作用位置から引張鋼材の図心まで距離で、一般に $d/1.15$ としてよい

γ_b : 一般に 1.3 としてよい

表-5, 図-3 に算定結果を示す。

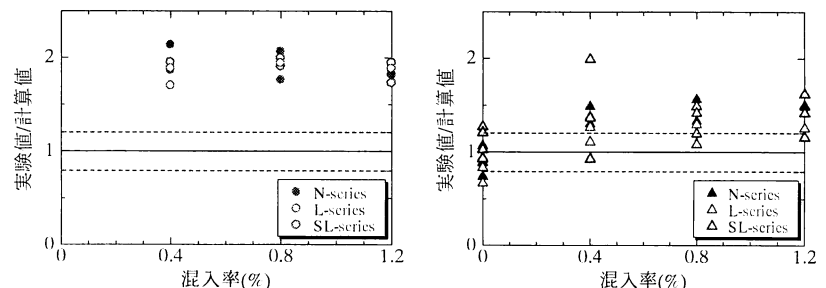
指針式に用いる残存引張強度は図-4 に示すように田口らの実験結果より線形補完した。また、コンクリート分担率は $a/d=2$ の場合は式(7)を、 $a/d=3$ のものはコンクリート標準示方書に規定されているせん断耐力式を用いた。なお、昨年度の供試体において曲げ破壊したものは除いている。同表、同図より藤野式では大幅に安全側を、原田式、指針式は 1.0 に近い値ができていているものの、明確な評価であるとはいえない。繊維が混入されると繊維の架橋効果により、斜めひび割れ発生後も耐力を保持するため、斜め引張破壊からせん断圧縮破壊に移行する傾向がある。藤野式は破壊形式を区別せずに推定した式であり、原田式は斜め引張破壊のせん断耐力を基準とした式である。そして、指針式は β_u を一番安全側の評価を与えるように 45 度として用いているが、実際はそれ以下の角度である。これらのことによりばらつきが生じたものと考えられる。

2.4 せん断耐力式の提案

2.3 より 3 つの算定式の中で平均値が 1.0 に近く、コンクリート分と繊維分を分けて考慮している指針式をもとに鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力式を提案することにした。せん断破壊における斜めひび割れは荷点部、支点部に挟まれる区間を貫通するように入ると仮定し、指針式において重要な要素である β_u を荷点と支点を直線

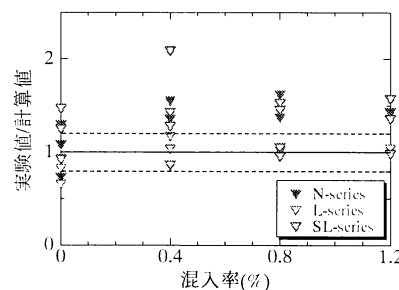
表-5 既往の式による算定結果

Type	a/d	圧縮強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (g/cm ³)	実験値 (kN)	計算値				実験値/計算値			破壊形式	
					低減係数	①藤野式 (kN)	②原田式 (kN)	③指針式 (kN)	①	②	③		
N-0.0①		28.6	2.34	75.6	1.00	-	102.1	0	102.1	-	0.74	0.74	斜引張
N-0.0②		31.3	2.38	102.1	1.00	-	108.5	0	108.5	-	0.94	0.94	せん断圧縮
L-0.0①		39.2	1.80	89.4	0.85	-	126.0	0	126.0	-	0.83	0.83	斜引張
L-0.0②		37.6	1.79	69.4	0.85	-	122.6	0	122.6	-	0.67	0.67	斜引張
L-0.4①		37.0	1.82	130.7	0.85	81.2	121.3	8.0	121.3	1.88	1.26	1.18	斜引張
L-0.4②		43.9	1.87	130.7	0.87	88.5	135.9	8.0	135.9	1.70	1.11	1.05	斜引張
L-0.8①		38.3	1.85	138.3	0.86	82.6	124.1	31.9	124.1	1.94	1.29	1.03	斜引張
L-1.2②	2.0	39.1	1.92	138.4	0.88	83.5	125.8	23.9	125.8	1.88	1.25	1.05	せん断圧縮
SL-0.0①		32.7	1.49	80.3	0.77	-	111.7	0	111.7	-	0.93	0.93	斜引張
SL-0.0②		36.8	1.59	122	0.80	-	120.8	0	120.8	-	1.27	1.27	せん断圧縮
SL-0.4①		37.0	1.60	89.9	0.80	81.2	121.3	8.0	121.3	1.38	0.93	0.87	斜引張
SL-0.4②		37.2	1.67	136.8	0.82	81.5	121.7	8.0	121.7	2.05	1.37	1.29	せん断圧縮
SL-0.8①		38.9	1.65	121.8	0.81	83.3	125.4	16.0	125.4	1.80	1.19	1.06	斜引張
SL-0.8②		40.9	1.68	115.2	0.82	85.4	129.7	16.0	129.7	1.64	1.08	0.96	斜引張
SL-1.2②		48.0	1.73	138.7	0.83	92.5	144.3	23.9	144.3	1.80	1.16	0.99	斜引張
N-00 A		28.3	2.24	70.0	1.00	-	78.9	0	64.2	-	0.89	1.09	斜引張
N-00 B		25.9	2.23	81.6	1.00	-	76.6	0	62.4	-	1.07	1.31	斜引張
N-04 A		22.6	2.20	98.0	1.00	52.6	75.4	12.0	59.6	1.86	1.30	1.37	せん断圧縮
N-04 B		22.4	2.21	111.7	1.00	52.3	75.1	12.0	59.4	2.13	1.49	1.56	せん断圧縮
N-08 A		21.7	2.19	114.3	1.00	64.9	86.1	24.0	58.8	1.76	1.33	1.38	せん断圧縮
N-08 B		22.3	2.24	135.8	1.00	65.8	86.9	24.0	59.3	2.06	1.56	1.63	せん断圧縮
N-12 A		22.4	2.22	137.2	1.00	75.5	92.2	35.9	59.4	1.82	1.49	1.44	せん断圧縮
N-12 B		22.4	2.23	137.8	1.00	75.5	92.2	35.9	59.4	1.83	1.49	1.45	せん断圧縮
SL-00 A	3.0	26.4	1.54	62.0	0.78	-	77.1	0	62.7	-	1.03	1.26	斜引張
SL-00 B		23.8	1.49	69.2	0.77	-	74.4	0	60.6	-	1.20	1.48	斜引張
SL-04 A		23.1	1.55	81.6	0.79	53.1	75.9	12.0	60.0	1.95	1.36	1.44	せん断圧縮
SL-04 B		22.4	1.56	118.2	0.79	52.3	75.1	12.0	59.4	2.86	1.99	2.10	せん断圧縮
SL-08 A		20.4	1.50	97.3	0.78	62.9	84.3	24.0	57.6	1.99	1.49	1.54	せん断圧縮
SL-08 B		20.1	1.50	92.1	0.78	62.5	83.9	24.0	57.3	1.90	1.42	1.46	せん断圧縮
SL-12 A		22.3	1.55	102.5	0.79	75.3	92.1	35.9	59.3	1.73	1.42	1.37	せん断圧縮
SL-12 B		24.6	1.56	121.5	0.79	79.1	95.1	35.9	61.3	1.95	1.62	1.58	せん断圧縮



(a) 藤野式

(b) 原田式



(c) 指針式

【藤野式】
平均：1.90
変動係数：14.0%
【原田式】
平均：1.23
変動係数：22.8%
【指針式】
平均：1.24
変動係数：24.6%

図-3 既往の式による算定結果

を基準とした式である。そして、指針式は β_u を一番安全側の評価

を与えるように 45 度として用いているが、実際はそれ以下の角度である。これらのことによりばらつきが生じたものと考えられる。

2.4 せん断耐力式の提案

2.3 より 3 つの算定式の中で平均値が 1.0 に近く、コンクリート分と繊維分を分けて考慮している指針式をもとに鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力式を提案することにした。せん断破壊における斜めひび割れは荷点部、支点部に挟まれる区間を貫通するように入ると仮定し、指針式において重要な要素である β_u を荷点と支点を直線

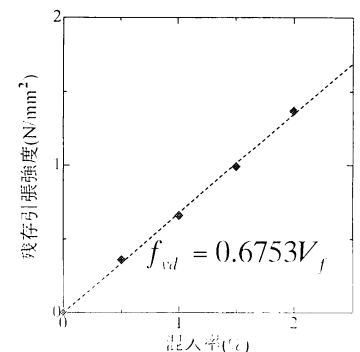


図-4 残存引張強度

で結び、幾何学的に β_u を仮定した。この条件により仮定した β_u は $a/d=2.0$ のときは約 40 度、 $a/d=3.0$ のときは約 25 度となり、実際のひび割れ角度と概ね一致していた。この定義を用いた式を以下に示す。

$$V_{fd} = (f_{vd} / \tan \beta_u) \cdot b_w \cdot z \text{ において}$$

$$\tan \beta_u = \frac{h}{a'} \text{ より } V_{fd} = f_{vd} \cdot \frac{b_w}{h} a' z \quad \cdots (9)$$

$$f_{vd} = 0.6753 V_f \text{ とする}$$

a' : 載荷点部と支点部で挟まれた区間

表-6、図-5 に提案式による算定結果を示す。各々の供試体で精度良く評価できており、特に鋼繊維補強効果が明確に表れる混入率 0.8%~1.2%ではさらに精度良く評価できていることが確認される。

よって、鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力式として以下の式を提案する。

$$V_d = \eta (V_{fd} + V_{cd}) \quad \cdots (10)$$

η : **式(2)** に示す低減係数

V_{fd} : **式(9)** に示す鋼繊維が受け持つせん断耐力

V_{cd} : コンクリートが受け持つせん断耐力 ($a/d < 3$ の場合 : **式(7)**, $a/d \geq 3$ の場合 : コンクリート標準示方書に規定されているせん断耐力式)

3. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ① 鋼繊維補強された超軽量 RC はりのせん断耐力は、軽量項と繊維項を独立させて評価することができる。
- ② 繊維項において、既往の算定式は安全側の評価を与える。これは、繊維による破壊形式の移行、算定式の適用範囲によるものと考えられる。
- ③ 本算定において軽量項として Eurocodes を、繊維項として指針式を用いた組み合わせが最も軽量化かつ繊維補強の影響を考慮している組み合わせである。
- ④ 斜めひび割れ角度として幾何学的条件を用いた式(10)に示すせん断耐力式で算定することで平均 1.09、変動係数 19.3%と精度良く評価が可能になる。特に繊維補強効果が明確な混入率 0.8%~1.2%では平均 0.99、変動係数 10.4%とさらに精度良く評価が可能になる。
- ⑤ 本算定では残存引張強度は既往の値であると仮定しているため、今後は繊維種類、繊維形状を変えて残存引張強度の特性値を求めることが必要であると考えられる。

表-6 提案式による算定結果

Type	a/d	実験値 (kN)	計算値		実験値/計算値	破壊形式		
			低減係数	指針式(kN)				
			繊維	コンクリート				
N-0.0①	2.0	75.6	1.00	0	102.1	0.74	斜引張	
N-0.0②		102.1	1.00	0	108.5	0.94	せん断圧縮	
L-0.0①		89.4	0.85	0	126.0	0.83	斜引張	
L-0.0②		69.4	0.85	0	122.6	0.67	斜引張	
L-0.4①		130.7	0.85	9.6	121.3	1.17	斜引張	
L-0.4②		130.7	0.87	9.6	135.9	1.03	斜引張	
L-0.8①		138.3	0.86	19.2	124.1	1.12	斜引張	
L-1.2②		138.4	0.88	28.8	125.8	1.02	せん断圧縮	
SL-0.0①		80.3	0.77	0	111.7	0.93	斜引張	
SL-0.0②		122	0.80	0	120.8	1.27	せん断圧縮	
SL-0.4①		89.9	0.80	9.6	121.3	0.86	斜引張	
SL-0.4②		136.8	0.82	9.6	121.7	1.27	せん断圧縮	
SL-0.8①		121.8	0.81	19.2	125.4	1.04	斜引張	
SL-0.8②		115.2	0.82	19.2	129.7	0.94	斜引張	
SL-1.2②		138.7	0.83	28.8	144.3	0.96	斜引張	
N-00 A		3.0	70.0	1.00	0	64.2	1.09	斜引張
N-00 B			81.6	1.00	0	62.4	1.31	斜引張
N-04 A			98.0	1.00	25.8	59.6	1.15	せん断圧縮
N-04 B			111.7	1.00	25.8	59.4	1.31	せん断圧縮
N-08 A			114.3	1.00	51.5	58.8	1.04	せん断圧縮
N-08 B	135.8		1.00	51.5	59.3	1.23	せん断圧縮	
N-12 A	137.2		1.00	77.3	59.4	1.00	せん断圧縮	
N-12 B	137.8		1.00	77.3	59.4	1.01	せん断圧縮	
SL-00 A	62.0		0.78	0	62.7	1.26	斜引張	
SL-00 B	69.2		0.77	0	60.6	1.48	斜引張	
SL-04 A	81.6		0.79	25.8	60.0	1.21	せん断圧縮	
SL-04 B	118.2		0.79	25.8	59.4	1.76	せん断圧縮	
SL-08 A	97.3	0.78	51.5	57.6	1.15	せん断圧縮		
SL-08 B	92.1	0.78	51.5	57.3	1.09	せん断圧縮		
SL-12 A	102.5	0.79	77.3	59.3	0.95	せん断圧縮		
SL-12 B	121.5	0.79	77.3	61.3	1.11	せん断圧縮		

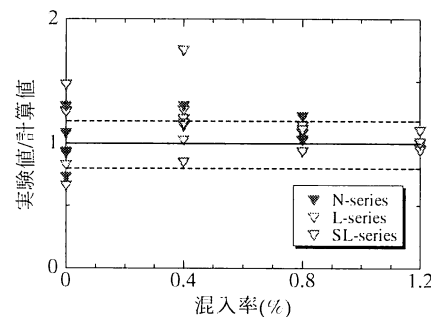


図-5 提案式による算定結果

【全体】
平均 : 1.09
変動係数 : 19.3%
【0.8~1.2%】
平均 : 0.99
変動係数 : 10.4%