

9. 鋼繊維補強軽量2種コンクリートを用いたRC版のせん断耐力

園田 崇智

1. 目的

近年、維持管理が重要となっている反面、新規橋梁ではコスト削減を計った耐久性および耐震性に優れた床版が望まれる。そこで橋梁の上部工の軽量化が求められており、軽量コンクリートの使用が検討されている。軽量コンクリートは、自重の軽減による耐震性の向上、コスト削減が可能であり、新設だけでなく既設床版の打ち替えにも適用可能であると考えられる。また、天然骨材の枯渇に伴い、代替骨材としても人工軽量骨材の使用が注目されている。しかし、粗骨材と細骨材に軽量骨材を用いた軽量2種コンクリート（以下、SL）は普通コンクリート（以下、N）の比重2.3と比較すると比重1.6~1.8程度と非常に軽い、骨材自体の強度が小さいことによるせん断・引張強度の低下が顕著である。このような強度特性の改善方法として短繊維による補強が知られている。本研究では、各種の補強繊維の中でも強度特性に優れる鋼繊維に着目した。

また、普通および軽量RC部材を対象としたせん断耐力式はいくつか提案されているが、鋼繊維補強軽量2種コンクリートを対象としたRC版の押抜きせん断耐力式は著者らの知る限り存在しない。そこで、まず鋼繊維補強によるN、SLの各種強度試験を行い、鋼繊維混入率（以下、混入率）を考慮した各種強度評価式の提案を行う。次にコンクリート種類、混入率をパラメータとしたRC版の載荷試験を行い、破壊メカニズムに則した鋼繊維補強軽量2種コンクリートRC版に適用可能なせん断耐力式を提案することを目的とする。

2. 内容

2.1 強度試験

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。なお、骨材の最大寸法はN20mm、SL15mmとした。

2.1.2 強度評価式

既往の研究においては、特定の混入率のみを対象とした強度評価式は提案されているが、本研究では特定の混入率だけでなく、0~1.2%の任意の混入率においても評価でき

る式を求めることとした。そこで、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-22(22はデータ数)、SL-43、曲げ:N-12、SL-20、せん断:N-13、SL-19)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。表-3に、各強度評価式、決定係数、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の引張、曲げ強度のそれはNよりも大きく、混入率の増加による強度の向上効果が顕著である。

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%
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
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
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系化合物
AE助剤	AE	密度:1.06-1.10g/cm ³
増粘剤	B	グルカン系
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の一例

タイプ	コンクリート種類	混入率 (%)	kg/m ³								スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	SP	AE	B	F		
N-00	普通	0	213	427	870	862	1.08	1.00	0	0	20.7	3.9
N-04		0.4	213	425	868	859	1.50	0	0	31.3	18.1	2.2
N-08		0.8	212	423	864	855	2.00	0	0	62.7	18.5	3.8
N-12		1.2	211	422	860	852	2.40	0	0	94.0	19.1	3.6
SL-00	軽量2種	0	233	490	542	408	0	0	1.00	0	20.0	6.8
SL-04		0.4	232	487	539	406	0	0	1.00	31.3	18.8	7.8
SL-08		0.8	230	484	535	403	1.63	0	1.00	62.7	20.5	7.4
SL-12		1.2	228	480	531	400	3.00	0	1.00	94.0	18.2	4.6

2.2 RC版のせん断耐力評価

2.2.1 試験概要および結果

図-1に試験体概略図を示す。試験体は、表-4に示すようにコンクリート種類，混入率をパラメータとした4タイプを各3体作製した。試験体は辺長1200mm，厚さ100mmであり，鉄筋はD10（SD295A）を14@80で配筋し，有効高さは75mmとした。鉄筋には，版中央から120mmの位置にひずみゲージを貼付した。荷重条件は，試験体の支間長が1000mmと短いことから，四隅の浮き上がり防止装置を設けず，4辺単純支持とした。試験体中央には幅150×長さ150×高さ50mmの荷重版を配置し，油圧ジャッキを用いて漸増荷重した。なお，鉄筋の降伏強度は373N/mm²である。

荷重と荷重面直下のたわみ関係の一例を図-2に示す。鋼繊維無混入の試験体N-00，SL-00は最大荷重に達すると同時に押抜きせん断破壊による急激な荷重低下を呈して耐力を失った。これに対して，N-12，SL-12の最大荷重はN-00，SL-00と比較すると1.2倍程度増加しており，最大荷重に達しても急激な荷重低下は見られず，架橋効果により靱性を有していた。

図-3に荷重-鉄筋ひずみ関係の一例を示す。鉄筋ひずみが最初に急増した点を曲げひび割れ発生とし，ひび割れが発生するまでは，全タイプで同様の傾向を示した。しかし，曲げひび割れ発生以降，N-00，SL-00とN-12，SL-12のひずみに差が生じ始めている。これは鉄筋に生じる引張力の一部を鋼繊維が負担しているため，N-12，SL-12の鉄筋ひずみが小さくなったと考えられる。また，小澤ら¹⁾の研究結果から，本研究における最大荷重の70%程度で起こる鉄筋ひずみの減少は斜めひび割れ発生の契機となる点であると考えられる。従って，同図に示すようにこの時点での荷重を斜めひび割れ荷重と定義する。

図-4に斜めひび割れ荷重/最大荷重-鉄筋ひずみを示す。同図より，全タイプ最大荷重の0.6~0.8割程度で斜めひび割れが生じ始めていることがわかる。また，ばらつきはあるものの斜めひび割れ時において繊維混入タイプは無混入に比べ，N，SL平均して230μ程度ひずみが小さい結果となった。これは，斜めひび割れが生じた時点で鉄筋に生じる引張力が異なることを示す。鈴木ら²⁾は鉄筋に引張力が生じるとダウエル作用は小さくなることを報告しており，引張力を受けた鉄筋のダウエル耐力を，引張力を受けない鉄筋のダウエル耐力と作用引張ひずみをパラメータとした式(1)を提案している。

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V _{df} (%)	圧縮強度f _c (N/mm ²)
N	引張 f _t = (0.060 × V _{df} + 0.267) × f _c ^{2/3}	0.689	0 ~ 1.2	20 ~ 50
	曲げ f _b = (0.151 × V _{df} + 0.575) × f _c ^{2/3}	0.317	0 ~ 1.2	30 ~ 50
	せん断 f _{cv} = (0.148 × V _{df} + 0.385) × f _c ^{2/3}	0.693	0 ~ 1.2	30 ~ 50
SL	引張 f _t = (0.104 × V _{df} + 0.202) × f _c ^{2/3}	0.812	0 ~ 1.2	20 ~ 50
	曲げ f _b = (0.200 × V _{df} + 0.357) × f _c ^{2/3}	0.449	0 ~ 1.2	30 ~ 50
	せん断 f _{cv} = (0.105 × V _{df} + 0.298) × f _c ^{2/3}	0.686	0 ~ 1.2	30 ~ 50

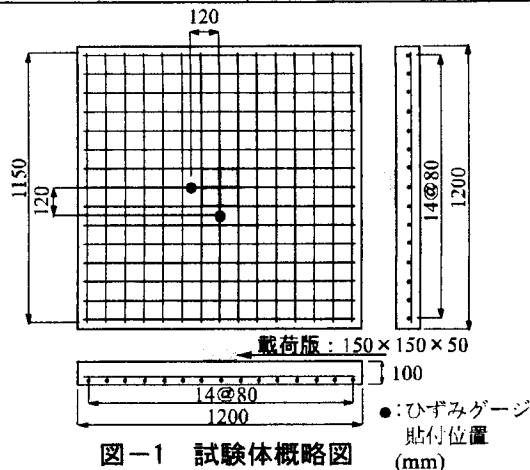


図-1 試験体概略図

表-4 RC版試験体の概要

タイプ	コンクリート種類	混入率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
N-00	普通	0	30.3	2.59	3.08	21.9
N-12		1.2	38.6	4.52	5.09	30.7
SL-00	軽量2種	0	42.0	2.66	3.65	14.9
SL-12		1.2	41.3	3.94	4.89	15.6

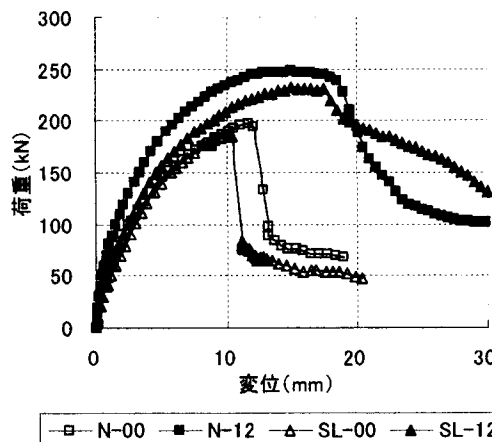


図-2 荷重-たわみ関係一例

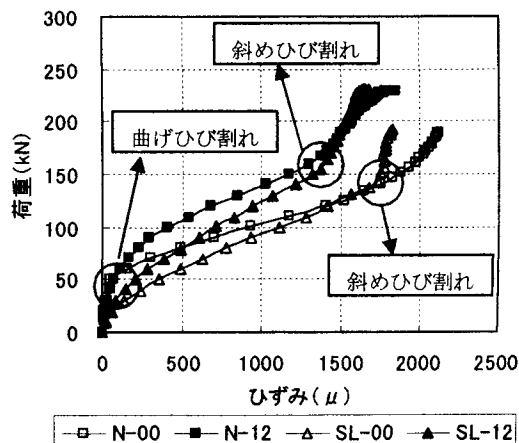


図-3 荷重-鉄筋ひずみ関係一例

$$D_u = D_{u0} \cdot e^{-0.0002 \epsilon} \quad (1)$$

ここで、 D_u ：引張力を受けた鉄筋のダウエル耐力 (tf)、 D_{u0} ：引張力を受けない鉄筋のダウエル耐力 (tf)、 ϵ ：引張力によりせん断面の鉄筋に生じるひずみ量 (μ)

そこで、式 (1) 中の ϵ に上述した鉄筋ひずみの差 230μ を代入し、引張力の差によるダウエル作用の変化率を算出した。その結果、繊維混入タイプは、無混入に比べダウエル作用が 1.05 倍向上するという結果となった。また、本試験結果における最大ひずみ差 447μ を代入しても、そのダウエル作用の変化率は 1.09 であり、非常に小さいことがわかる。

図-5 には、版中央部の切断面一例を示す。同図には、破壊面の角度も併せて示している。破壊面角度の定義は、版上縁から鉄筋位置までのひび割れに沿う直線を引き、水平面となす角度とした。図-6 に破壊面角度のまとめを示す。同図中の数値は繊維補強および軽量 2 種による角度の変化を示しているが、繊維補強することにより角度は大きく、軽量 2 種により小さくなる傾向を示していた。この要因としては、鈴木ら²⁾の報告にもあるように鉄筋の曲率を有する範囲は引張力が大きいほど、せん断面から遠方に及ぶという結果が影響していると考えられる。つまり、繊維混入タイプは、無混入よりも鉄筋に作用する引張力が小さいため、角度が大きくなったと考えられる。軽量化による角度の低下は、コンクリートが内部ひび割れの発生のため軟化し、ダウエル力の反力がとれず、鉄筋の曲率 0 の位置が支点側へと移動し、角度が小さくなったと考えられる。

2.2.2 せん断耐力式の提案

現在、RC 版の押抜きせん断耐力式は、押抜きせん断破壊モデルを仮定し、圧縮域コンクリートのせん断耐力と鉄筋のダウエル作用による剥離効果を考慮した松井ら³⁾が提案した式 (2) が比較的精度良く評価できることが知られている。式中の $\tau_{s,max}$ 、 $\sigma_{t,max}$ には N のみを対象とした強度評価式を適用している。

$$P = \tau_{s,max} \{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + \sigma_{t,max} \{2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \quad (2)$$

ここで、 a 、 b ：載荷板の主鉄筋方向、配力鉄筋方向の周長 (cm)、 x_m 、 x_d ：主鉄筋および配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸 (cm)、 d_m 、 d_d ：主鉄筋および配力鉄筋の有効高さ (cm)、 C_m 、 C_d ：主鉄筋および配力鉄筋からのかぶり厚さ (cm)、 $\tau_{s,max}$ 、 $\sigma_{t,max}$ ：コンクリートの最大せん断応力、最大引張応力 (kgf/cm^2)

しかし、松井式は N を対象とした式であり、鋼繊維補強軽量 2 種コンクリートを評価することはできない。そこで、松井式中の $\tau_{s,max}$ 、 $\sigma_{t,max}$ に本研究で提案した強度評価式を適用して計算した結果を表-5 中の計算値 1、図-7 (a) に示す。計算結果は、過去に著者らが行った試験結果も加え、計 22 体について検証を行った。表中の () 内の値は強度評価式の計算結果である。同表より、SL-12 は危険側評価していることがわかる。計算値 1 は、ダウエル作用の項である $\sigma_{t,max}$ に強度評価式を適用しており、繊維補強による耐力の向上が強度試験と同程度であることを示す。しかし、ダウエル作用への繊維補強効果は未解明であるため、ダウエル作用を過大評価し危険側評価したと考えられる。そこで、次に以下の仮定に基づいた算定式を提案した。提案する

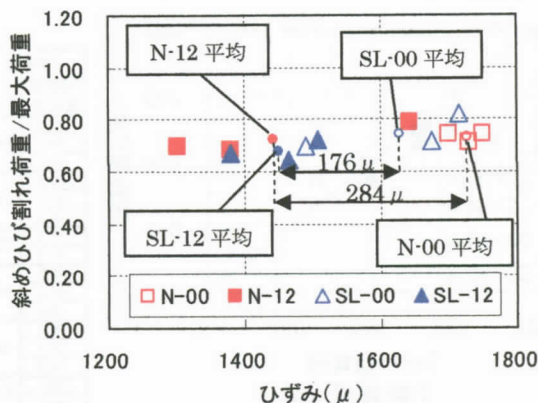


図-4 斜めひび割れ荷重/最大荷重 - 鉄筋ひずみ関係

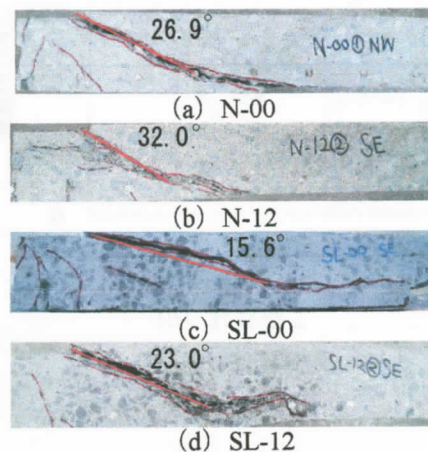


図-5 破壊面角度一例

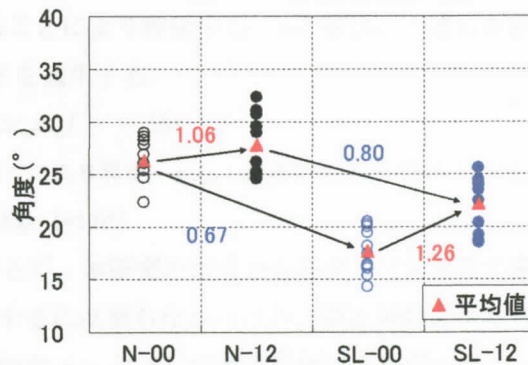


図-6 破壊面角度まとめ

表-5 せん断耐力計算結果

タイプ	No.	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	最大荷重 (kN)	松井式		計算値1		計算値2	
							実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値 (kN)	計算値 (kN)	実験値 (kN)	計算値 (kN)
N-00	1	30.3	2.59 (2.59)	3.08 (3.74)	21.9	189	218	0.87	1.05	180	0.87	1.05
	2					0.90		1.09	0.90		1.09	
	3					0.89		1.09	0.89		1.09	
N-12	1	38.6	4.52 (3.87)	5.09 (6.42)	30.7	248	-	0.93	1.03	265	0.93	1.03
	2					0.87	0.95	0.87	0.95			
	3					0.95	1.04	0.95	1.04			
SL-00A	1	22.6	1.70 (1.61)	-*	11.8	174	-	1.32	1.32	132	1.32	1.32
	2					1.39	1.39	1.39	1.39			
SL-00B	1	47.3	2.33 (2.64)	3.77 (3.90)	16.2	178	-	0.89	0.89	200	0.89	0.89
	2					0.90	0.90	0.90	0.90			
	3					0.85	0.85	0.85	0.85			
SL-00C	1	42.0	2.66 (2.44)	3.65 (3.60)	14.9	187	-	0.99	0.99	189	0.99	0.99
	2					1.02	1.02	1.02	1.02			
	3					0.91	0.90	0.91	0.90			
SL-12A	1	35.2	3.91 (3.51)	-*	14.9	226	-	0.89	1.08	253	0.89	1.08
	2					0.98	1.18	0.98	1.18			
SL-12B	1	45.8	4.75 (4.18)	6.18 (5.43)	16.5	263	-	0.89	1.08	295	0.89	1.08
	2					0.86	1.04	0.86	1.04			
	3					0.86	1.05	0.86	1.05			
SL-12C	1	41.3	3.94 (3.90)	4.89 (5.06)	14.9	232	-	0.83	1.01	278	0.83	1.01
	2					0.83	1.00	0.83	1.00			
	3					0.84	1.01	0.84	1.01			
平均							0.89	0.96	0.96	1.04	0.96	1.04
変動係数							0.02	0.16	0.16	0.12	0.16	0.12

*サンプリング不良

せん断耐力式は式 (3) のように示される。

- (1) 圧縮域のせん断抵抗を示す項である $\tau_{s,max}$ は、強度試験から得られる結果と同程度であるという仮定の下、各タイプ (N-00, N-12, SL-00, SL-12) の強度評価式を適用する。
- (2) 軽量コンクリートを用いる場合、ダウエル作用が低下することが報告されているため、ダウエル作用の項である $\sigma_{l,max}$ には軽量コンクリートの引張強度評価式を適用する。
- (3) ダウエル作用への繊維補強効果は、強度試験と同程度であるかは未解明である。そこで、ダウエル作用に関しては、繊維補強の効果を α という係数を乗じることにより評価する。 α の値は、上述した鉄筋ひずみの差によるダウエル耐力の向上効果として 1.05 を適用する。

$$P = \tau_{s,max} \{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + \alpha \cdot \sigma_{l,max} \{2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{s,max}$: 各タイプ (N-00, N-12, SL-00, SL-12) の強度評価式により算定、 $\sigma_{l,max}$: 繊維無混入タイプ (N-00, SL-00) の強度評価式により算定、 α : ダウエル作用に及ぼす繊維補強係数 (=1.05)

なお、式 (3) は松井式を基に破壊面角度を 45° と仮定しているが、本研究の結果から各タイプで角度が変化することを確認した。本提案式では、破壊面角度を直接適用するには至らなかったが、繊維補強により角度が増加する要因として α を、軽量化により角度が低下する要因を $\sigma_{l,max}$ に SL の強度評価式を適用することによって反映させた。算定結果を表-5 中の計算値 2、図-7 (b) に示す。同表より、コンクリートの種類に関わらず繊維補強コンクリートのせん断耐力を精度良く評価できていることがわかる。

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。さらに、コンクリート種類、混入率をパラメータとした RC 版試験を行い、版のせん断耐力式を提案した。実験値と提案式での計算値の比較を行った結果、鋼繊維補強軽量 2 種コンクリートを概ね評価することができた。しかし、提案した算定方法はいくつかの仮定の下、限られた実験結果との比較であるため、検討すべき課題が残されており、今後検討が必要である。

参考文献

- 1) 小澤尚津雄他: RC スラブの押抜きせん断破壊機構に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.565-570, 1999
- 2) 鈴木基行他: 軸方向鉄筋のダウエル作用に及ぼす引張力の影響に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 426/V-14, pp.159-166, 1991
- 3) 前田幸雄他: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, 第 348/V-1, pp.113-141, 1984.8

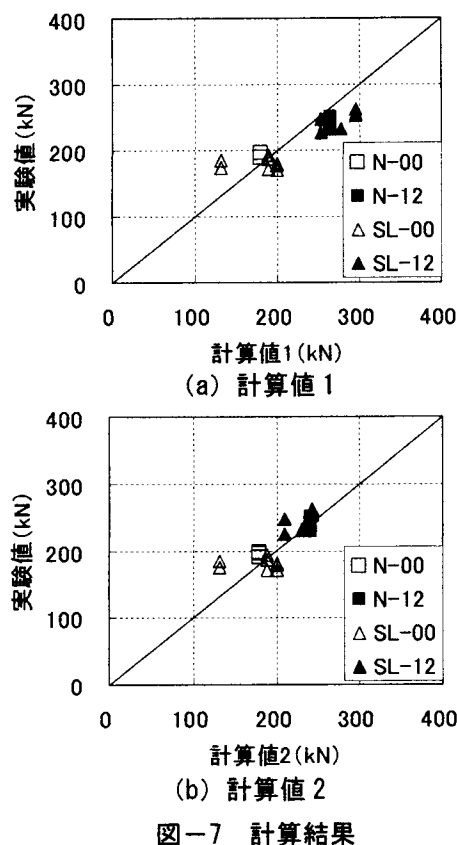


図-7 計算結果