

# 論文 高品質軽量骨材を用いた RC はりのせん断特性

前田 拓郎\*<sup>1</sup> · 日比野 憲太\*<sup>2</sup> · 高木 宣章\*<sup>3</sup> · 児島 孝之\*<sup>3</sup>

**要旨:** 真珠岩を原料とした独立空隙を有する高品質軽量骨材を用い、普通強度(圧縮強度  $24\text{N/mm}^2$ )を対象とした1種および2種軽量骨材コンクリートの基本物性、およびそれらを用いた RC はりのせん断特性について実験検討した。高性能 AE 減水剤とセメント置換材料として石粉を用いることにより、普通強度を有するワーカブルな軽量骨材コンクリートを製造することができる。また、斜め引張あるいはせん断引張破壊する RC はりのせん断耐力は、コンクリートの脆度係数に大きく依存する。

**キーワード:** 高品質軽量骨材, せん断耐力, RC はり, 脆度係数, 石粉

## 1. はじめに

コンクリート構造物の高性能化が積極的に行われている現在、超軽量コンクリートは自重の大幅軽減、耐震性などの面から注目されている材料である。近年、真珠岩などを原料として骨材内部の空隙構造を大幅に改善した高強度用軽量骨材や、フライアッシュ、廃ガラス、スラッジなどの副産物を有効利用した軽量骨材が開発されている<sup>1)</sup>。しかし、従来の軽量コンクリートは、耐凍害性、ポンプ圧送性などに問題点があることが指摘されている。また、構造物の設計では、圧縮強度に比較して引張強度とせん断強度が小さいために、現行の土木学会「コンクリート標準示方書(設計編)」では、せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力式を軽量コンクリートを用いた部材に適用する場合には、一律 70%に低減することが規定されている<sup>2)</sup>。この規定は、新しく開発された高品質軽量コンクリートの構造物への適用を阻害する要因となっている。

本研究では、真珠岩を原料とした独立空隙を有する高品質軽量骨材を用い、普通強度を対象とした1種および2種軽量骨材コンクリートの基本的物性、およびそれらを用いた RC はりの

せん断特性について実験検討した。

## 2. 軽量骨材コンクリートの力学的特性

### 2.1 使用材料

実験要因を表-1に、使用材料を表-2に示す。1種軽量骨材コンクリートでは、密度の異なる2種類のLG0.85とLG1.2の軽量粗骨材を使用した。2種軽量骨材コンクリートでは、粗骨材としてLG0.85の軽量粗骨材を、細骨材として2種類の軽量細骨材(LS1.0とLS1.2)を容積比1:1で混合使用した。また、比較用として普通骨材コンクリートも作製した。軽量コンクリートの示方配合を表-3に示す。圧縮強度  $30\text{N/mm}^2$ 以下の普通強度を有する軽量骨材コンクリートを対象にすると、一般に水セメント比が大きくなる。水セメント比の大きい軽量骨材コンクリートでは、骨材の分離が生じるために

表-1 実験要因

コンクリートの種類	シリーズ名	骨材の種類		石粉置換率(%)
		細骨材	粗骨材	
普通	N	NS	NG	0
軽量1種	L0.85	NS	LG0.85	20,30,40
	L1.2	NS	LG1.2	40,50,60
軽量2種	LL0.85	LS1.0	LG0.85	0,20,40
		LS1.2		

\*1 ピーシー橋梁(株) 工修(正会員)

\*2 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修(正会員)

\*3 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博(正会員)

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>	
石粉	P	炭酸カルシウム, 密度: 2.70g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 4000cm <sup>2</sup> /g
細骨材	NS	野洲川産川砂, 密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> , FM: 2.48, 吸水率: 1.53%
	LS1.0	原料: 真珠岩, 製造方法: 回転造粒型 絶乾密度: 1.00g/cm <sup>3</sup> , 表乾密度: 1.09g/cm <sup>3</sup> , 24時間吸水率: 8.27%
		原料: 真珠岩, 製造方法: 非造粒型 絶乾密度: 1.21g/cm <sup>3</sup> , 表乾密度: 1.44g/cm <sup>3</sup> , 24時間吸水率: 8.70%
粗骨材	NG	高槻産硬質砂岩砕石, 密度 2.69g/cm <sup>3</sup> , FM: 6.71, M.S.: 15mm, 吸水率: 0.66%
	[人工軽量骨材]原料: 真珠岩, 製造方法: 回転造粒型, M.S.: 15mm	
	LG0.85	絶乾密度: 0.87g/cm <sup>3</sup> , 表乾密度: 0.88g/cm <sup>3</sup> , 24時間吸水率: 2.11%
	LG1.2	絶乾密度: 1.23g/cm <sup>3</sup> , 表乾密度: 1.26g/cm <sup>3</sup> , 24時間吸水率: 2.54%
混和剤	普通コンクリート	AE 減水剤: リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体 AE 助剤: アルキルアリルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤
	軽量コンクリート	高性能 AE 減水剤: ポリカルボン酸 Ca 塩, AE 助剤: アニオン系界面活性剤

表-3 軽量骨材コンクリートの示方配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP ×(C+P), %	AE* <sup>2</sup> (A)	スランプ <sup>c</sup> (cm)	空気量 (%)
			W	C	P* <sup>1</sup>	S		G				
						LS1.0	LS1.4					
LL0.85-0	40	48	150	375	—	305	168	217	0.45	0.90	10.3	5.0
LL0.85-20	50	48	150	300	64	305	168	217	0.40	0.83	11.7	5.8
LL0.85-40	66.7	48	150	225	128	305	168	217	0.35	0.80	5.6	5.6
L0.85-20	50	46	165	330	71	794		317	0.56	1.3	6.7	3.6
L0.85-30	57.1	46	165	289	106	797		317	0.80	2.0	17.0	5.3
L0.85-40	66.5	46	165	248	141	798		309	0.75	1.6	12.6	5.9
L1.2-40	66.5	46	165	248	141	782		446	0.62	0.87	9.6	3.5
L1.2-50	79.7	46	165	207	176	782		446	0.55	0.80	8.1	2.4
L1.2-60	100	46	165	165	211	782		446	0.47	0.80	11.1	3.7

注) \*1; P: 石粉, \*2; AE 助剤は 2%希釈溶液を (C+P)1kg 当たり 2cc 使用する時を 1A とする

コンクリートの練混ぜが不可能になることが多い。そこで、コンクリートの流動性を確保し、材料分離抵抗性を高めるために、高性能AE減水剤と石粉を使用した。石粉はセメント置換材料として使用し、置換率は容積百分率で示す。目標スランプは12±2.5cm、目標空気量は5±1.5%とした。軽量骨材は気乾状態で使用し、吸水後5分間で吸水する水量を補正水として加えた。供試体は打設翌日脱型し、所定材齢まで標準水中養生(20±1°C)した。

## 2.2 実験結果および考察

図-1 に軽量骨材コンクリートの圧縮強度と石粉置換率の関係を示す。セメントを石粉で置換するため、置換率の増加に伴い圧縮強度は直線的に低下する。軽量骨材の絶乾密度が小さいほど、また、1種軽量骨材コンクリートより2種軽量骨材コンクリートの方が、同じ圧縮強度

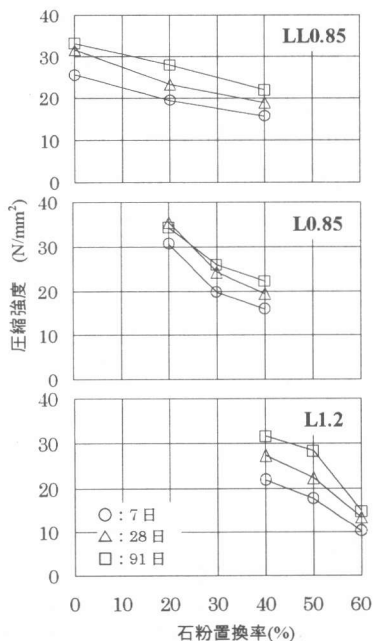


図-1 石粉置換率-圧縮強度

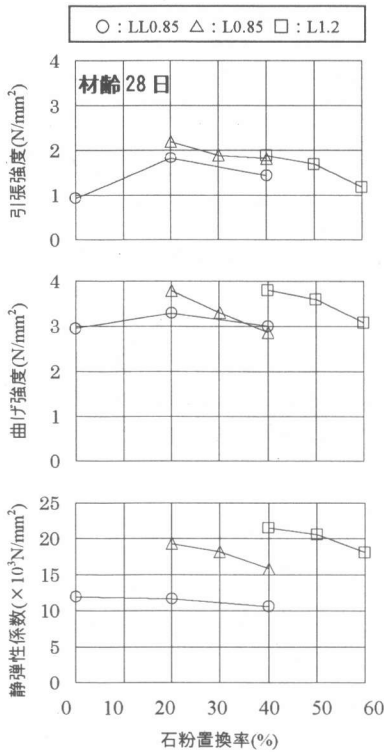


図-2 各種強度と石粉置換率の関係

を得るための石粉置換率は小さくなる。密度の小さい軽量骨材を用いた水セメント比の大きい軽量骨材コンクリートにおいても、高性能 AE 減水剤と石粉を使用することにより、材料分離抵抗性があり、所要のスランプを有するワーカブルなコンクリートを製造することができた。

各種強度と石粉置換率の関係を、図-2に示す。圧縮強度の傾向と同様に、石粉置換率が大きくなると、引張強度、曲げ強度、弾性係数は低下する。しかし、その低下は圧縮強度に比較すると小さい。

2種軽量骨材コンクリート(LL-0.85シリーズ)で石粉置換率0%時の圧縮強度は、石粉でセメントを置換するときより増加するにもかかわらず、引張強度は石粉置換時より小さくなった。これは、石粉を使用していないために、コンクリートの粘性が不足して、骨材が幾分分離する傾向にあったことが原因と考えられる。

### 3. RC はりのせん断試験

#### 3.1 実験概要

実験計画を表-4に示す。コンクリートの単位容積質量がRCはりのせん断耐力に及ぼす影響を検討するために、普通骨材コンクリート(Nシリーズ)、1種軽量骨材コンクリート(L1.2, L0.85シリーズ)、および2種軽量骨材コンクリート(LL0.85シリーズ)を用いたRCはりの曲げせん断試験を実施した。コンクリートの目標圧縮強度は普通強度を対象として $24\text{N/mm}^2$ とし、せん断スパン有効高さ比( $a/d$ )は2.0, 3.0, 3.6の3水準とした。供試体寸法および荷荷条件を図-3に示す。供試体寸法は $150 \times 240 \times 2,000(\text{mm})$ で、軸方向鉄筋にはD16(SD345)を有効高さ200mmの位置に2本配置した。支持スパン1,800mmの対称二点荷荷とした。測定項目を図-4に示す。スパン中央のたわみ、軸方向鉄筋ひずみ、上下縁のひずみ、斜めひび割れ幅を測定した。2章より得られた圧縮強度と石粉置換率の関係から配合を決定した。コンクリートの示方配合を表-5に示す。

表-4 実験計画

a/d	普通	L1.2	L0.85	LL0.85
2	N-2	L1.2-2	L0.85-2	LL0.85-2
3	N-3	L1.2-3	L0.85-3	LL0.85-3
3.6	N-3.6	L1.2-3.6	L0.85-3.6	LL0.85-3.6

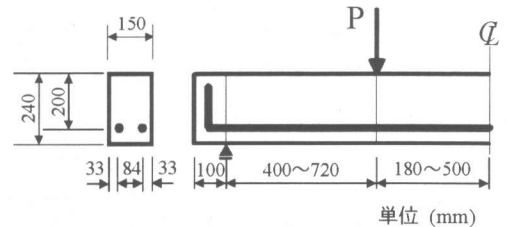


図-3 供試体寸法および荷荷条件

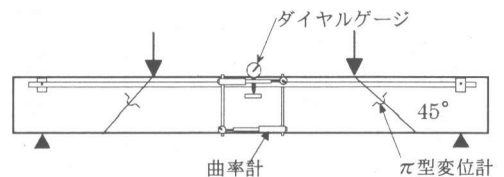


図-4 測定項目

表-5 コンクリートの示方配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤 [cc]*2	高性能 AE 減水剤 [×(C+P)%]	AE 助剤 (A)*3	スラン° (cm)	Air (%)	
			W	C	P*1	S							G
						ASL	KP1						
LL0.85	45.5	48	150	330	38	168	233	305	—	0.4	0.8	12.0	5.5
L0.85	57.1	46	165	289	106	797		317	—	0.8	2	17.0	5.3
L1.2	69.8	46	165	236	150	795		438	—	0.62	0.85	14.5	4.1
N	74.1	53.5	190	256	—	958		862	2560	—	1.75	12.8	5.6

注)\*1 P: 石粉 \*2 :AE 減水剤は 25%希釈液を用いた

\*3 :AE 助剤は Nシリーズでは 1%希釈液を、Lシリーズでは 2%希釈液をセメント 1kg 当たり 2cc 使用する時を 1A とする

3.2 実験結果および考察

載荷試験時 (材齢 28 日) のコンクリートの力学的特性を表-6 に示す。コンクリートの圧縮強度が同じであっても軽量骨材を使用すると、引張強度、曲げ強度、弾性係数は一般に低下する。そのため、Nシリーズの脆度係数( $f_c/f_t$ )が 9.3 であるのに対して、L0.85 と L1.2 シリーズの脆度係数は各々 17.2, 19.7, LL0.85 シリーズでは 23.2 と、Nシリーズより著しく大きくなった。LLシリーズの脆度係数は、圧縮強度がほぼ同じNシリーズの約 2.5 倍であった。

はりのせん断試験結果を表-7 に示す。表中のせん断破壊荷重の計算値[ $P_{u2}$ ]は、土木学会「コンクリート標準示方書(設計編)」<sup>2)</sup>に規定されているせん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力式のもとになった式(1)を用いた。

図-5 に、 $a/d=3.6$  の供試体におけるせん断破壊荷重の実験値と計算値との比較を示す。 $a/d=3.6$  の供試体は全て、斜め引張破壊した。式(1)は、普通骨材コンクリートを用いた RC はりを対象としているため、N シリーズでは  $a/d$  にかかわらず、せん断破壊荷重の実験値は安全側の値となった。しかし、Lシリーズで斜め引

表-6 コンクリートの力学的特性

配合名	単位容積 質量 (kN/m <sup>3</sup> )	圧縮 強度 ( $f_c$ )	引張 強度 ( $f_t$ )	曲げ 強度 ( $f_b$ )	弾性 係数	$f'_c/f_t$
LL0.85	12.1	26.5	1.14	1.89	12100	23.2
L0.85	16.4	22.7	1.32	2.34	16700	17.2
L1.2	17.6	26.7	1.36	3.39	21300	19.7
N	23.1	26.7	2.88	5.05	35500	9.3

注) 強度の単位(N/mm<sup>2</sup>)

$$V_{cr} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vc} \cdot \left( 0.75 + 1.4 \frac{d}{a} \right) b_w \cdot d \quad (1)$$

ここで、 $f_{vc} = 0.20^3 \sqrt{f'_c}$ ,  $\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$  (d:m),

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_w}, \quad p_w = A_s / (b_w \cdot d),$$

d: 有効高さ, a: せん断スパン

$b_w$ : はり幅,  $A_s$ : 引張鉄筋の断面積

張破壊あるいはせん断引張破壊した RC はりの実験値は、計算値の約 70~80%となった。Lシリーズの脆度係数は N シリーズの約 2 倍であり、かなり大きくなった。そのため、耐荷機構が引張強度に依存する斜め引張破壊およびせん断引張破壊する供試体では、脆度係数の差が顕著に破壊荷重に影響を及ぼしたものと考えられる。また、脆度係数が最も大きい 2 種軽量骨

表-7 せん断試験結果

供試体名	曲げひび割れ発生荷重(kN)		斜めひび割れ発生荷重 実験値[ $P_{ver}$ ](kN)	せん断破壊荷重(kN)		$P_{u1}P_{u2}$	破壊形式
	実験値[ $P_{cr1}$ ]	計算値[ $P_{cr2}^{*1}$ ]		実験値[ $P_{u1}$ ]	計算値[ $P_{u2}$ ]		
LL0.85-2	9.80	12.9	42.0	94.6	85.2	1.11	せん断圧縮
LL0.85-3	4.90	8.59	39.2	80.9	71.5	1.13	せん断圧縮
LL0.85-3.6	7.35	7.16	37.8	37.8	66.9	0.57	斜め引張
L0.85-2	9.80	15.8	63.7	125	80.9	1.55	せん断圧縮
L0.85-3	2.45	10.6	54.9	54.9	67.9	0.81	せん断引張
L0.85-3.6	7.35	8.8	49.0	49.0	63.5	0.77	斜め引張
L1.2-2	19.6	23.1	61.8	61.8	85.4	0.72	せん断引張
L1.2-3	14.7	15.4	44.1	54.7	71.7	0.76	せん断引張
L1.2-3.6	14.7	12.8	48.5	48.5	67.1	0.72	斜め引張
N-2	34.3	35.3	73.5	95.7	85.4	1.12	せん断引張
N-3	29.4	23.5	71.1	88.2	71.6	1.23	せん断引張
N-3.6	22.1	19.6	68.6	71.1	67.0	1.06	斜め引張

注) \*1  $P_{cr2} = 2I_g \cdot f_y / (y_1 \cdot a)$ ,  $y_1$ : 中立軸から引張縁までの距離

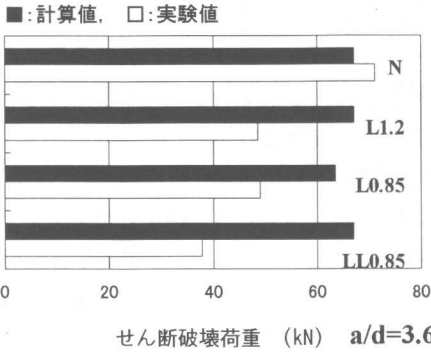


図-5 せん断破壊荷重の実験値と計算値

材コンクリートを用いたLLシリーズの実験値は、計算値の約60%とかなり危険側の値となった。

また、せん断圧縮破壊した供試体は、最終的な耐荷機構がコンクリートの圧縮強度に依存するため、圧縮強度がほぼ同じであれば、コンクリートの種類にかかわらず、実験値は計算値を上回る結果となった。

図-6に、斜め引張破壊あるいはせん断引張破壊したRCはりのせん断破壊荷重の実験値と計算値の比 $\eta_p (=P_{u1}/P_{u2})$ と単位容積質量の関係を示す。最新のfib Recommendation<sup>3)</sup>では、軽量骨材を用いたコンクリート部材のせん断破壊荷重を、単位容積質量をパラメータとした式(2)に示す $\eta_p$ をせん断耐力算定式に乗じることにより算定している。

$$\eta_p = 0.40 + 0.60 \cdot \rho / \rho_0, \quad \rho_0 = 2200 \quad (2)$$

$\eta_p$ は単位容積質量に依存しており、fibの考え方に近い結果となった。また、式(2)中の $\rho_0$ を大きくすると実験値に近づくものの、LLシリーズでの実験値は予測値をかなり下回る結果となった。

図-7に、コンクリートの脆度係数、ヤング係数、単位容積質量をパラメータとした要因分析結果を示す。横軸に単位容積質量、縦軸にNシリーズの実験結果に対する各シリーズのパラメータの比を示す。ただし、脆度係数は、逆数 $\xi (=1/(f'_c/f_c))$ の比を用いている。各パラメータとも、単位容積質量の低下に伴い減少する。斜め引張破壊あるいはせん断引張破壊するRC

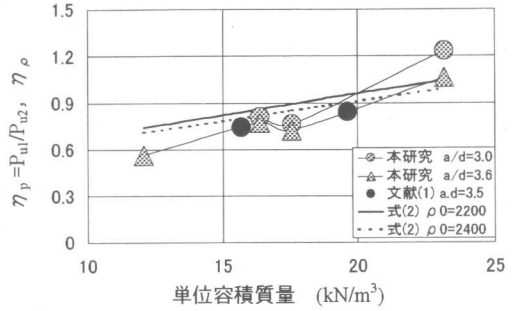


図-6 fib Recommendationの提案式と実験結果

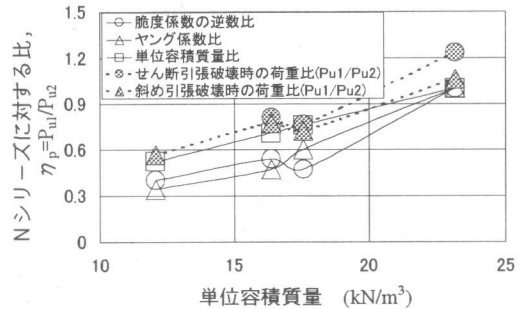


図-7 各種パラメータによる要因分析

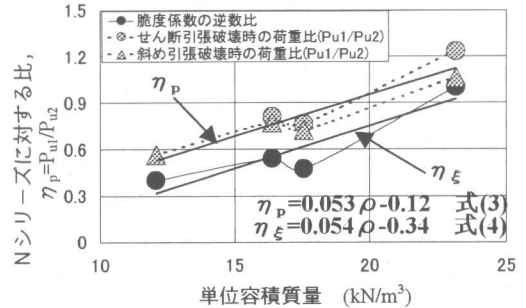


図-8 脆度係数比による要因分析

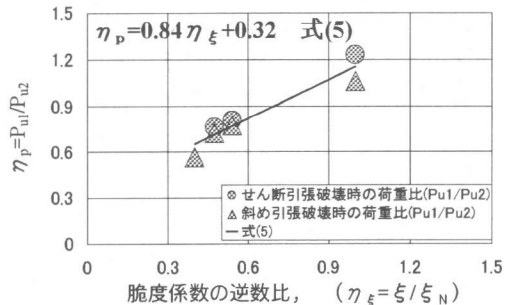


図-9  $\eta_p - \eta_\xi$ の関係

はりのせん断破壊荷重比 $\eta_p$ と単位容積質量の関係は、脆度係数の逆数比と単位容積質量の関

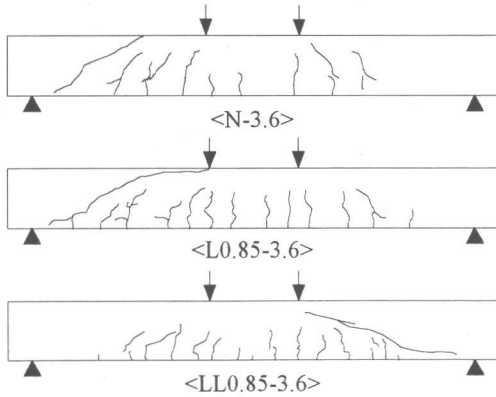


図-10 ひび割れ状況図

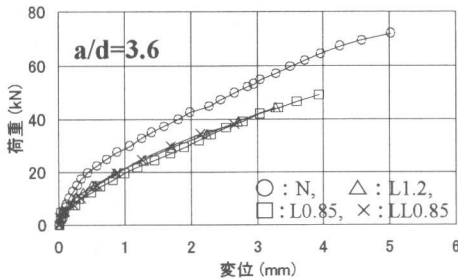


図-11 荷重変位曲線

係によく対応していることがわかる。このことは、コンクリートの単位容積質量が小さくなること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していることを示している。

図-8に、 $\eta_p$  および脆度係数の逆数比と、単位容積質量の関係を示す。 $\eta_p$ に関する直線近似式(式(3))と脆度係数の逆数比 $\eta_\xi (= \xi / \xi_N)$ に関する直線近似式(式(4))を比較すると、両式の勾配はほぼ一致していることが確認できる。そこで、 $\eta_p$ と $\eta_\xi$ の関係を図-9に示す。 $\eta_p$ と $\eta_\xi$ には線形関係がある。両者の関係を直線近似すると式(5)が得られる。

$$\eta_p = 0.84\eta_\xi + 0.32, \quad \eta_\xi = \xi / \xi_N \quad (5)$$

$\xi_N$  : 普通骨材コンクリートの  $1/(f' / f_t)$

現行の土木学会「コンクリート標準示方書(設計編)」<sup>2)</sup>では、式(1)を軽量コンクリートに適用する場合、一律70%に低減することが規定されている。しかし、軽量骨材を用いたRCはりが斜め引張破壊あるいはせん断引張破壊する時の

破壊荷重は、コンクリートの脆度係数に依存する。そのため、コンクリートの脆度係数に応じた低減係数、例えば式(5)をせん断耐力算定時に用いることが推奨される。

斜め引張破壊した  $a/d=3.6$  の供試体のひび割れ状況図を図-10に示す。軽量骨材コンクリートを用いたRCはりの曲げひび割れ分散性は、普通骨材コンクリートより良好な結果となった。

荷重-変位曲線を図-11示す。軽量骨材コンクリートの曲げ強度は普通骨材コンクリートに比較して小さいため、曲げひび割れ発生荷重は小さい結果となった。また、弾性係数が小さいため、初期剛性は普通骨材コンクリート供試体より小さく、たわみは大きくなった。

#### 4. 結論

本実験で得られた結果を、以下に示す。

- 1) 骨材密度が小さいので、高性能AE減水剤とセメント置換材料として石粉を用いることにより、普通強度を有するワーカブルな軽量骨材コンクリートを製造することができる。
- 2) 斜め引張破壊あるいはせん断引張破壊するRCはりのせん断耐力は、コンクリートの脆度係数に大きく依存する。そのため、軽量骨材コンクリートを用いたRCはりのせん断耐力は、式(5)に示す脆度係数を考慮した低減係数を用いて求めることが推奨される。

#### 参考文献

- 1) 二羽淳一郎, 岡本享久, 前堀伸平: 高品質軽量コンクリートの構造部材への適用, 日本コンクリート工学協会, Vol.38, PP3-9, 2000.12
- 2) 土木学会「平成8年度版コンクリート標準示方書(設計編)」, P63, 1996
- 3) Joost Walraven, "Design of Structures with Lightweight Concrete: Present Status of Revision of EC-2", Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp57-70, June 2000