

論文 人工超軽量骨材コンクリート RC はりに関する基礎研究

北村周郎*¹・尼崎省二*²

要旨：本研究は、絶乾密度 0.6~0.9kg/l の人工超軽量骨材を構造コンクリート用骨材として適用することを目的とし、細・粗骨材ともに人工超軽量骨材を使用したコンクリートの基礎的な諸物性を検討するとともに、超軽量 RC はり供試体を作製し、同程度の圧縮強度を有する普通 RC はり供試体との曲げ挙動の比較検討を行った。その結果、超軽量 RC はりは変形性状が普通 RC はりとは異なるとともに、脆性的な曲げ破壊をするが、超軽量 RC はりに横拘束筋を配置することによって靱性は改善された。

キーワード：人工超軽量骨材, 超軽量コンクリート, 破壊性状, 横拘束筋

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は、超大スパン橋梁、多層高架道路橋、超高層ビルなど巨大化、高層化が進んでいる。それに伴いコンクリート構造部材の断面は複雑化するとともに、自重も膨大なものになりつつあり、軽くて強いコンクリートが望まれている。コンクリートは本来、耐久性、経済性に優れた構造材料であるが、比強度が小さいという難点がある。現在、一般的な人工軽量骨材の密度は小さいものでも 1.2kg/l 程度であり、それを使用した軽量コンクリートの密度も 1.5kg/l 程度である。

本研究では、最近新たに開発された膨張粘土を造粒・焼成した人工超軽量細骨材および真珠岩を主体とする原料を微粉碎、混合・造粒した人工超軽量粗骨材を用いた、密度 1.0~1.3kg/l のコンクリート供試体を作製し、その基礎的な物性を調べ

た。そして構造用軽量コンクリート骨材としての適用性、RC はり供試体の破壊性状、および横拘束筋による靱性の改善について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

超軽量コンクリートの使用材料を表-1 に示す。人工超軽量細骨材は、絶乾密度 0.6~0.9kg/l、表-1 に示すように、N1~N3 に分球されたものである。人工超軽量粗骨材は、絶乾密度 0.88kg/l のものを用いた。これらは内部に無数の微小独立気泡を有し、外形は球形に近く粒度の調整も比較的容易である。

セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤は、分離低減剤、高性能 AE 減水剤、および AE 助剤を使用した。

表-1 超軽量コンクリートの使用材料

使用材料		記号	物性または成分
セメント		C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
超軽量骨材	細骨材	N1	粒径：5.0~2.5mm、絶乾密度：0.65kg/l、24h吸水率：7.0%
		N2	粒径：2.5~1.2mm、絶乾密度：0.68kg/l、24h吸水率：6.0%
		N3	粒径：1.2~0.6mm、絶乾密度：0.86kg/l、24h吸水率：5.3%
	粗骨材	G	粒径：15~5.0mm、絶乾密度：0.88kg/l、24h吸水率：4.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系の複合体
	AE 助剤	AE	アルキルアリルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤
	分離低減剤	SFCA	水溶性セルロースエーテル

*1 立命館大学 理工学研究科 環境社会工学専攻 (正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

2.2 超軽量コンクリートの配合

超軽量コンクリートの配合を表-2 に示す。単位水量を一定とし、水セメント比を 30~50% に変化させた。人工超軽量細骨材は JIS A 5002 (構造用軽量コンクリート骨材) に示されている粒度分布 (図-1) に最も近くなるように N1:N2:N3 = 0.15:0.17:0.68 で混合し、使用した。締め固め可能で材料分離を抑制するために、表-1 に示す混和剤を用いて、フレッシュコンクリートのスランプフローを $50 \pm 5\text{cm}$ 、空気量を $5 \pm 1\%$ に調整した。なお、人工超軽量骨材は絶乾状態で使用し、24 時間吸水量に相当する水を補正水として単位水量に加えた。

2.3 超軽量コンクリートの諸物性 (実験 1)

超軽量コンクリートの諸物性を調べるためのコンクリート供試体を作製し、打設の翌日脱型後、試験材齢まで水中養生とした。

試験は、圧縮、引張、曲げ強度、静・動弾性係数を各種 JIS に準じ行い、弾性波伝播速度は、飽和増幅式による超音波試験器を用いて測定した。また、コンクリート密度は、圧縮強度試験用供試体を水槽から取り出した直後に表面の水分をふき取った状態の質量から算出した。

2.4 超軽量 RC はりの曲げ載荷試験 (実験 2)

超軽量コンクリートの部材としての挙動を調べるための超軽量 RC はり供試体は、図-2 に示すように、高さ 240mm × 幅 150mm × 長さ 2000mm の単鉄筋長方形断面とした。主鉄筋には、SD295A の D16 の異形鉄筋を 2 本、スターラップには $\phi 9$ の丸鋼を 100mm 間隔で使用した。

超軽量コンクリートは、応力ひずみ曲線の応力下降域の最大負勾配が大きく、急激な破壊を生じると考えられる。超軽量 RC はりの靱性を改善させるため、スパン中央部に $\phi 9$ の丸鋼を 100mm 間隔で配置したスターラップ型、 $\phi 6$ の丸鋼を図-3 のように加工したスパイラル型、およびそれらの併用型 (スターラップ型 + スパイラル型) を図-4 に示すように横拘束筋として配置した。超軽量 RC はりの配合は表-2 の WC30 を使用した。また、同断面、同程度の圧

表-2 超軽量コンクリートの配合

供試体名	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)	AE (A)*	SFCA (g)
		W	C	S	G			
WC30	30	175	583	211	285	1.1	2.5	300 ~ 600
WC40	40		438	229	307			
WC50	50		350	239	320			

*1%希釈液をセメント1kg当たり2ml使用したものを1Aとする

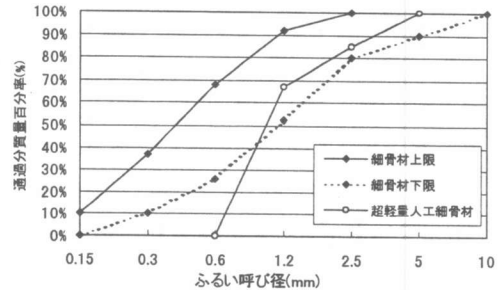


図-1 人工超軽量細骨材の粒度分布

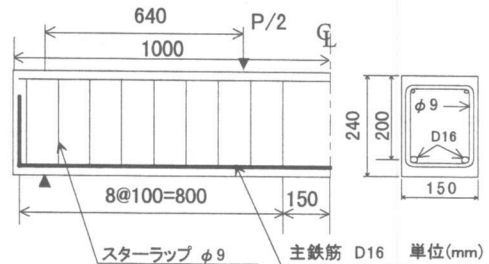


図-2 RC はり供試体図

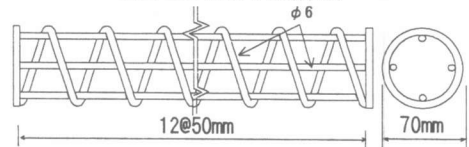


図-3 スパイラル型横拘束筋

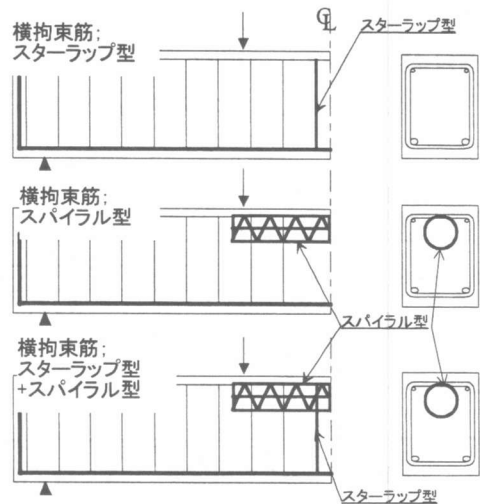


図-4 横拘束筋配筋図

縮強度を有する普通 RC はりとして、横拘束筋の無いはりと、スターラップ型横拘束筋を配置したはりを作製した。

材齢 48 時間で脱型し、2 週間散水養生の後、試験材齢まで室内保管とし、せん断スパン有効高さ比 3.2 で荷重した。荷重中の計測項目は、はり中央のたわみ、曲げスパン圧縮縁での圧縮ひずみ、曲げスパン引張縁での引張ひずみとし、目視によって各荷重段階におけるひび割れの進展を観察した。超軽量 RC はりの曲げひび割れ発生モーメント (M_{cr})、降伏曲げモーメント (M_y)、および終局曲げモーメント (M_u) は、式(1)～式(3)より算出した。

$$M_{cr} = \frac{I_g \cdot f_b}{y_t} \quad \dots(1)$$

$$M_y = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{x}{3} \right) \quad \dots(2)$$

$$M_u = A_s \cdot f_y \cdot d \left(1 - \frac{0.59 p \cdot f_y}{f'_c} \right) \quad \dots(3)$$

ここで、 I_g は全断面を有効にした時の中立軸に関する断面 2 次モーメント、 y_t は、はり下縁より中立軸までの距離である。

3. 実験結果および考察

3.1 超軽量コンクリートの諸物性

超軽量コンクリートの諸物性を表-3 に示す。水セメント比の低下とともに圧縮強度、伝播速度、静・動弾性係数は増加している。圧縮強度は密度 1.3kg/l 程度で 30MPa 程度得ることができた。ft/fc'=1/11~1/17, fb/fc'=1/7 程度となっており、従来の軽量コンクリートと同程度の値で

ある。

静弾性係数は 9~13Gpa で、コンクリート標準示方書による設計基準強度と骨材の全部を軽量骨材とした場合の静弾性係数と比較すると小さくなっている。静弾性係数は圧縮強度および密度と密接な関係があり²⁾、コンクリート強度が一定のとき密度の関数となることから、本研究での超軽量コンクリートの密度は、示方書のものより小さいと推察できる。また、超軽量コンクリートの静弾性係数と動弾性係数の関係は、 $E_c/E_d=1.15\sim 1.0$ である。

伝播速度は、3300~3700m/s で、動弾性係数と密度を用いた棒の弾性波速度 (式(4)) によく一致している。

$$V_c = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad \dots(4)$$

超軽量コンクリートの供試体破壊面は、普通コンクリートと異なり、全ての骨材が破壊していた。超軽量コンクリートは、普通コンクリートのような界面ひび割れからモルタルひび割れに進展して破壊するのではなく、骨材の破壊からコンクリート全体が破壊するものと考えられる。したがって、超軽量コンクリートは、モルタル強度が骨材強度を上回った時点からコンクリートの強度は増進しないと考えられ、長期強度は望めないと推察できる。

同程度の圧縮強度を有する、超軽量コンクリートおよび普通コンクリートの応力ひずみ曲線を図-5 に示す。ここでは、最大応力時までのひずみを示している。超軽量コンクリートの最

表-3 超軽量コンクリートの物性

	単位	WC30	WC40	WC50
密度 ρ	kg/l	1.28	1.15	1.11
圧縮強度 f'_c	MPa	31.5	27.0	18.9
引張強度 f_t	MPa	2.80	1.78	1.81
曲げ強度 f_b	MPa	4.86	4.09	3.08
静弾性係数 E_c	GPa	12.3	9.65	9.14
動弾性係数 E_d	GPa	13.6	10.6	9.81
伝播速度 V_c	m/s	3630	3510	3300
ft/fc'	-	1/12	1/15	1/12
fb/fc'	-	1/7	1/7	1/7

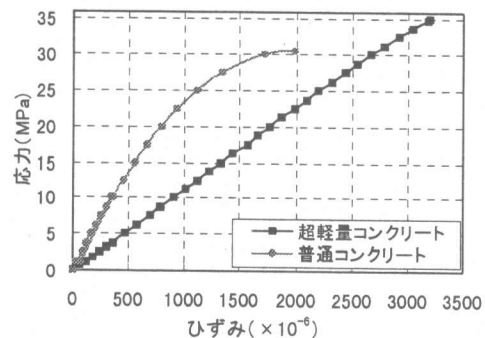


図-5 応力-ひずみ曲線

大応力時のひずみは、 3000×10^{-6} 程度で、普通コンクリートのそれが 2000×10^{-6} 程度であるのに比べ大きい。また、超軽量コンクリートの応力ひずみ曲線は、普通コンクリートに比べて、立ち上がりの勾配が小さく、直線的傾向を示している。一般に骨材のヤング係数 E_a はモルタルのヤング係数 E_m よりも大きい、軽量コンクリートでは、 $E_a < E_m$ であり、骨材の強度がモルタル強度より低い³⁾。これが、超軽量コンクリートの応力ひずみ曲線の勾配が普通コンクリートに比べ小さく直線的になった原因であると考えられる。

3.2 超軽量コンクリート RC はりの性状

はり供試体のコンクリートの物性（NRC：普通 RC はり、LRC：超軽量 RC はり）を表-4 に示す。養生条件が異なるため、引張・曲げ強度ともに、表-3 の値に比べ小さい。これは、供試体を乾燥状態におくと、骨材中の水分によって、内部の乾燥が遅れ、引張応力が発生したこと⁴⁾が原因と考えられる。

各はりの M_{cr} 、 M_y 、 M_u の計算値および実測値を表-5 に示す。超軽量 RC はりの M_{cr} の実測値/計算値が、普通 RC はりに比べて小さいのは、超軽量コンクリートの引張・曲げ強度が小さいためと考えられる。また、 M_y 、 M_u の実測値/計算値は両はりとも同程度の値である。

図-6 に曲げモーメントと圧縮縁ひずみの関係を示す。主鉄筋降伏時の圧縮縁ひずみは、普通

RC はりで、 $1000 \sim 1300 \times 10^{-6}$ であるのに対し、超軽量 RC はりでは、 $1700 \sim 2000 \times 10^{-6}$ と 1.6 倍程度となっているのは、超軽量コンクリートの静弾性係数が普通コンクリートに比べ小さいためと考えられる。また、ひび割れ発生時のコンクリートの引張縁ひずみは、両はりとも $150 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度であった。

各はりの曲げモーメントと曲げ剛性（はり中央部の縁ひずみから算出）との関係を図-7 に、曲げモーメントとたわみの実測値と計算値（曲げ剛性より算出）との関係を図-8 に示す。超軽量 RC はりは、ひび割れ発生前後で、普通 RC はりほどの勾配の変化が見られておらず直線的な傾向を示している。曲げ剛性が、ひび割れの発生前後で普通 RC はりほどの差がみられないためと考えられる。超軽量 RC はりの主鉄筋降伏時のたわみは 8mm 程度であるのに対して、普通 RC はりでは 6mm 程度となっており、普通 RC はりに比べ大きくなっている。これは、超

表-4 はり供試体のコンクリートの物性

	単位	NRC	LRC
圧縮強度 f_c'	MPa	30.5	36.1
引張強度 f_t		1.76	0.90
曲げ強度 f_b		4.85	2.33
静弾性係数 E_c	GPa	28.3	12.5

表-5 各はりの実測値

	NRC			LRC		
	実測値	計算値	実測値/計算値	実測値	計算値	実測値/計算値
$M_{cr}(kN \cdot m)$	6.27	8.03	0.78	2.35	4.48	0.52
$M_y(kN \cdot m)$	28.4	25.4	1.12	27.3	24.2	1.12
$M_u(kN \cdot m)$	31.5	26.5	1.19	28.1	26.9	1.04

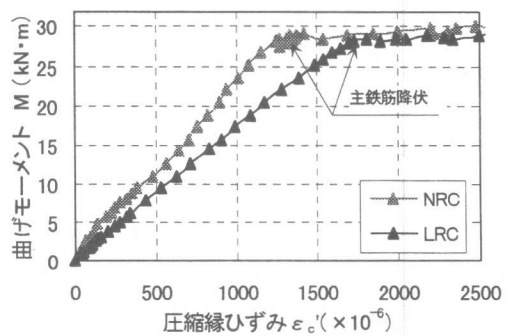


図-6 曲げモーメント-圧縮縁ひずみ図

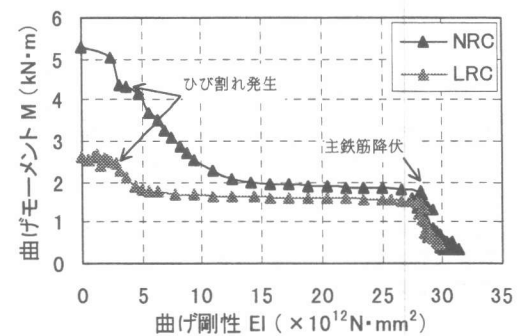


図-7 曲げモーメント-曲げ剛性図

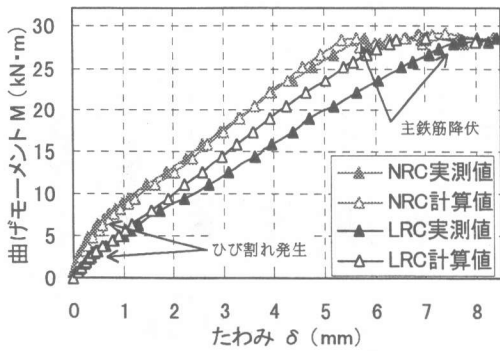


図-8 曲げモーメント-たわみ図

軽量コンクリートの弾性係数が普通コンクリートに比べ小さく、後述するようにひび割れの発生数が普通 RC はりに比べて多いため、曲げ剛性が小さくなったことが原因であると考えられる。また、たわみの計算値は、普通 RC はりでは実測値とよく一致しているが、超軽量 RC はりでは実測値の方が大きい。超軽量 RC はりのせん断スパンに多くのひび割れが発生したために、計算に用いた曲げ剛性が、超軽量 RC はり全体の曲げ剛性を過大評価したためと考えられる。

超軽量 RC はりと普通 RC はりの破壊後のひび割れ状況を図-9 に示す。破壊性状は両はりともにかぶりコンクリートの圧潰による曲げ破壊であるが、超軽量 RC はりは、かぶりコンクリートの破壊領域が普通 RC はりに比べ大きい。これは、普通 RC はりのひび割れの進展は、骨材により阻止されるが、超軽量 RC はりは、モルタル部だけでなく、骨材自体にもひび割れが発生し、それらが連結するために、かぶりコンクリートの剥落領域が大きくなったと考えられる。また、超軽量 RC はりは、曲げひび割れが低荷重で進展し、普通 RC はりに比べひび割れ間隔が小さく、せん断スパンには多くのひび割れが発生している。これは、超軽量コンクリートの引張・曲げ強度およびせん断強度が小さいためであると考えられる。

3.3 横拘束筋を用いた RC はりの挙動

各はり (st はスターラップ型横拘束筋, sp は

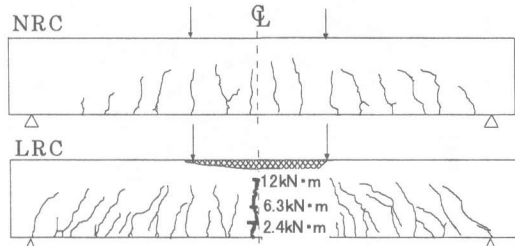


図-9 はりのひび割れ図

スパイラル型横拘束筋を有するはり) の M_y , M_u を表-6 に示す。超軽量 RC はりが横拘束筋により、最大耐力の増加がしていないのは、横拘束筋の位置が影響したためと思われる。

横拘束筋による各はりのたわみの変化を図-10 に示す。主鉄筋降伏までの性状は、ほぼ一定の勾配を示し、横拘束筋の有無、種類による差異は無い。最大荷重後に一時的に曲げモーメントが低下しているのは、かぶりコンクリートが剥落したためである。たわみの靱性率を図-11 に示す。靱性率は、構造物が外力を受けた場合に耐力の低下が始まる限界の変位量 (δu)、および最大耐力の 80% の変位量 ($0.8 \delta u$) と降伏時の変位 (δy) との比によって求めた。

超軽量 RC はりは、横拘束筋によって、靱性は改善しているが、普通 RC はり程の靱性は得られていない。また、スターラップ型超軽量 RC はりは、たわみ 40mm 程度で急激に耐力が減少するが、スパイラル型超軽量 RC はりには見られていない。これは、スターラップ型横拘束筋は、スパイラル型に比べ拘束領域が大きく、引張側にあるコンクリートも含めて拘束しているためと考えられる。

普通 RC はりの靱性率は横拘束筋を配置する

表-6 各はりの実測値

供試体名	M_y (kN·m)	M_u (kN·m)
NRC	28.4	31.7
NRC-st	29.7	34.5
LRC	28.1	28.6
LRC-st	27.5	28.9
LRC-sp	28.6	29.9
LRC-sp+st	28.7	29.5

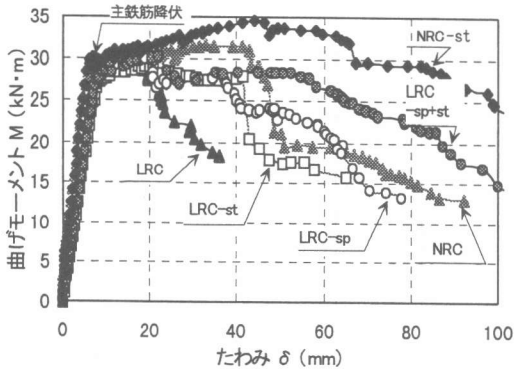


図-10 曲げモーメント-たわみ図

ことによって増加しているが、超軽量 RC はりは、横拘束筋を配置しても $\delta u / \delta y$ は増加していない。超軽量 RC はりの $0.8 \delta u / \delta y$ は、併用型、スパイラル型、スターラップ型の順に増加している。本研究での横拘束筋では超軽量 RC はりの最大耐力の増加はみられないが、変形能力を付与する効果があると考えられる。超軽量 RC はりに併用型横拘束筋を使用すると横拘束筋の無い普通 RC はりと同程度の靱性を得ることができる。

超軽量 RC はりは、横拘束筋の配置によっても、普通 RC はりの靱性は得られていないため、今後、横拘束筋の配置位置・間隔、形状等を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようである。

- (1) 超軽量コンクリートの最大応力時のひずみは 3000×10^{-6} 程度で、普通コンクリートの 2000×10^{-6} 程度に比べ大きく、静弾性係数はコンクリート標準示方書の値より小さい。
- (2) 超軽量 RC はりは、コンクリートの曲げ・引張強度が小さいためひび割れ発生荷重が小さく、ひび割れ発生によるたわみの勾配の変化は、普通 RC はりに比べ小さく、また、曲げ剛性より算出したたわみの計算値より大きくなる。

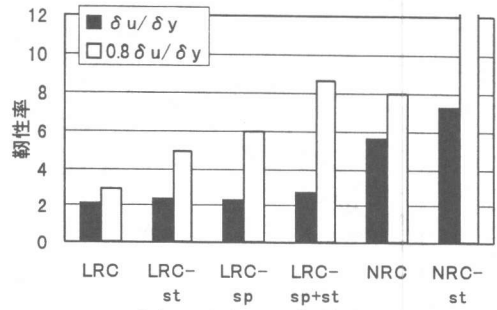


図-11 たわみの靱性率

- (3) 超軽量 RC はりに横拘束筋を配筋すると、併用型、スパイラル型、スターラップ型の順で変形能力が改善する。

謝辞

本研究の実施に当たりご協力頂いた(株)内外セラミックス、(株)太平洋セメントに厚くお礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 岡本享久, 早野博幸, 柴田辰正: 超軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, 1998.1, pp48-52
- 2) Neville, A.M.: Properties of Concrete (後藤幸正, 尾坂芳夫監訳: コンクリートの特性), 技報堂出版, 1979
- 3) 岡田清: 最新コンクリート工学, 国民科学社, 1986.3,
- 4) 岡田清, 西林新蔵, 千葉静夫: 人工超軽量骨材コンクリート-土木構造物への応用- 1969.8.30