

論文 超軽量コンクリートと高強度せん断補強筋を用いた柱部材の構造性能に関する実験研究

松本 至^{*1}・熊澤 敬輔^{*2}・松崎 育弘^{*3}・中野 克彦^{*4}

要旨：超軽量コンクリートを用いた構造部材，特に軸力を負担する柱部材は，超軽量コンクリートの材料特性から，普通コンクリートに比べ引張，せん断強度が小さいため，脆性的破壊に至るとして懸念されている。そこで著者らは，単位容積質量 $1.2\sim 1.5\text{t/m}^3$ 程度の超軽量コンクリートを柱部材に適用し，曲げ，せん断実験を行い，従来の RC 柱部材と比較することで超軽量コンクリートを用いた柱部材の構造性能を検討した。結果として，高軸力を負担する柱部材においても，コア部分を十分にせん断補強筋することで従来の RC 柱部材とほぼ同等の構造性能を発揮することが確認された。

キーワード：超軽量コンクリート，高軸力，せん断補強，拘束効果

1. はじめに

近年，都市部における職住接近，土地の有効利用等の要望により鉄筋コンクリート造の高層集合住宅，高層オフィスビルが増加してきている。建物が高層化するにあたり主体構造物の下層階においては，軸力及び層せん断力の増大を伴う。そこで，建物の重量の軽量化，特に主体構造物の軽量化が重要な課題となっている。著者等はその解決策として，高強度材料の使用による部材断面の縮小化および超軽量コンクリートの使用による部材重量の軽量化に関して研究を進めている。一般的に，超軽量コンクリートの利用は以前から考えられてきたが，吸水率等による施工性の問題や脆性的な材料特性から懸念されてきた。一方，人工軽量骨材の性能改善により近年再び着目を集めている。しかし，超軽量コンクリートを用いた場合，従来のコンクリートに比べ引張，せん断強度が劣るため，主体構造物，特に軸力を負担する柱部材においては，脆性的な破壊を生じやすいことが未だに懸念

されている。そこで本論文では，

第1シリーズ：せん断補強量による影響

第2シリーズ：軸力による影響

に関して，それぞれ気乾比重 $1.2\sim 1.5\text{t/m}^3$ 程度の超軽量コンクリートを柱部材に適用し，曲げ，せん断実験を行い，従来の普通コンクリートを用いた柱部材と比較することで超軽量コンクリートを用いた柱部材の構造性能を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 試験体

(1) 第1シリーズ

表-1 に試験体および計算結果一覧，図-1 に試験体配筋図を示す。試験体総数は6体であり，普通コンクリート(以下 RC)を用いた試験体3体を比較試験体とし，それに対応した超軽量コンクリート(以下 SL)を用いた試験体3体を計画した。試験体は実大の1/3スケールを想定し，断面寸法 $b \times D = 300 \times 300\text{mm}$ ，せん断スパン 450mm(せん断スパン比

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻
 *2 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻
 *3 東京理科大学教授 工学部建築学科 工博
 *4 東京理科大学助手 工学研究科建築学

(正会員)

(正会員)

(正会員)

a/D=1.5), 主筋 12-D13 (SD295A, 主筋比 $P_g=1.7\%$), せん断補強筋 D6, D10 (SD295A), コンクリート強度 ($F_c=30\text{MPa}$) とした。変動要因は, コンクリート種類を 2 種類 (SL, RC), せん断補強筋比を 3 水準 ($p_w=0.13, 0.60, 1.19\%$) である。 $p_w=0.13\%$ 試験体はせん断破壊先行型, $p_w=0.60\%$ および $p_w=1.19\%$ 試験体は曲げ降伏および曲げ降伏後のせん断破壊を想定した。

(2) 第2シリーズ

表-2 に試験体および計算結果一覧, 図-2 に試験体配筋図を示す。SL を用いた試験体 5 体を計画した。断面寸法 $b \times D=350 \times 350\text{mm}$, せん断スパン 525mm ($a/D=1.5$), 主筋 12-D16 (SD390, $P_g=1.9\%$), コンクリート強度 ($F_c=50\text{MPa}$) とした。変動要因は, せん断補強筋降伏強度を 2 水準 ($w\sigma_y=868, 1344\text{MPa}$), せん断補強筋間隔を 2 水準 (40, 90cm), 軸力比を 3 水準 ($N/b \cdot D \cdot \sigma_B=0.30, 0.45, 0.60$) とした。全試験体とも曲げ降伏および曲げ降伏後のせん断破壊を想定した。

2.2 コンクリートの材料特性

図-3 に本実験で用いた超軽量人工骨材を用いたコンクリートの材料試験結果を示す。人工超軽量骨材は, 真珠岩系を主原料とした

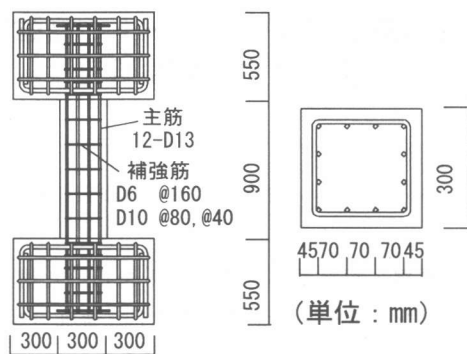


図-1 試験体配筋図(第1シリーズ)

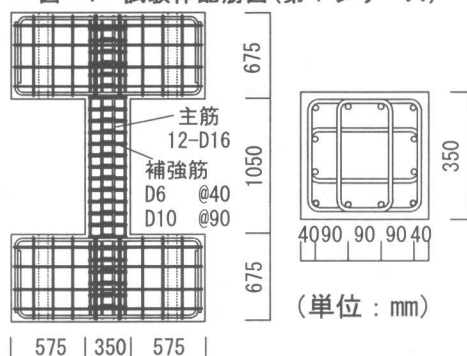


図-2 試験体配筋図(第2シリーズ)

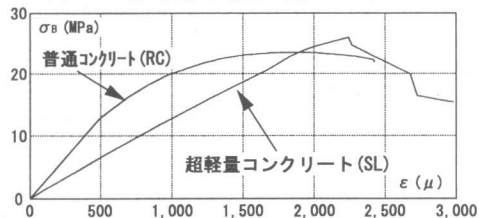


図-3 コンクリートの材料試験結果

表-1 試験体および計算結果一覧(第1シリーズ)

No.	コンクリート			軸力比	主筋(SD295A)		せん断補強筋(SD295A)			計算値		
	σ_B (MPa)	σ_t (MPa)	E_c (GPa)		配筋	$s\sigma_y$ (MPa)	配筋	$w\sigma_y$ (MPa)	p_w (%)	$Q_{mu}^{(1)}$ (kN)	$Q_{su}^{(2)}$ (kN)	$\tau_{bu}^{(3)}$ (MPa)
SL-1	28.8	2.26	12.7	0.20	12-D13 $P_g=1.7\%$	370	2-D6@160	350	0.13	241	158	3.44
SL-2							2-D10@80	366	0.60	241	310	4.74
SL-3							2-D10@40		1.19	241	447	6.16
RC-1	27.0	1.85	20.1			374	2-D6@160	318	0.13	242	149	3.51
RC-2	27.1	1.85	20.2				2-D10@80	367	0.60	242	306	4.59
RC-3	29.9	1.94	21.1				2-D10@40		1.19	242	455	6.26

1) 曲げ強度: 多段配筋曲げ終局強度式 2) せん断強度: 終局強度型耐震設計指針式 (非靱性式)

3) 付着割裂強度: 終局強度型耐震設計指針

表-2 試験体および計算結果一覧(第2シリーズ)

No.	コンクリート			軸力比	主筋 (SD390)		せん断補強筋 (SPR785, SBPD1275/1420)			計算値			
	σ_B (MPa)	σ_t (MPa)	E_c (GPa)		配筋	$s \sigma_y$ (MPa)	配筋	$w \sigma_y$ (MPa)	pw (%)	$Q_{mu}^{(1)}$ (kN)	$Q_{su}^{(2)}$ (kN)	$\tau_{bu}^{(3)}$ (MPa)	
SL-①	50.3	1.59	19.8	0.30	12-D16 Pg=1.95%	401	4-D10@90	868	0.9	617	780	7.86	
SL-②	50.8	2.14	19.2	0.45						591	782	7.90	
SL-③	56.7	2.05	19.7	0.30						638	854	8.20	
SL-④	61.8	2.43	19.3	0.45			4-D6@40	1344		758	871	8.56	
SL-⑤	60.1	2.30	20.1	0.60						610	866	8.44	

1) 曲げ強度: 多段配筋曲げ終局強度式

2) せん断強度: 終局強度型耐震設計指針式 (非靱性式)

3) 付着割裂強度: 終局強度型耐震設計指針

造粒型骨材であり、最大径が 15mm (5~15mm), 絶乾比重が 0.9, 吸水率が 2~5%程度のものである。本骨材を用いた超軽量コンクリートの気乾単位容積質量は 1.2~1.5t/m³ 程度であった。SL の圧縮時の応力度-歪み度関係は、ほぼ比例的な関係であり、最大圧縮応力度に達すると脆性的に破壊に至った。弾性係数は RC の約 0.5 倍程度となっている。

2. 3 実験方法

図-4 に荷重装置図、図-5 に荷重履歴を示す。荷重は建研式加力により行い、一定軸力 ($N = \eta \cdot \sigma_B \cdot b \cdot D$) を保ち、正負交番繰り返し荷重とした。荷重は変形制御で行い、最終変形に至った時点若しくは軸力保持が不可能となった時点で荷重を終了した。変位は上下スタブ区間の相対変位とした。

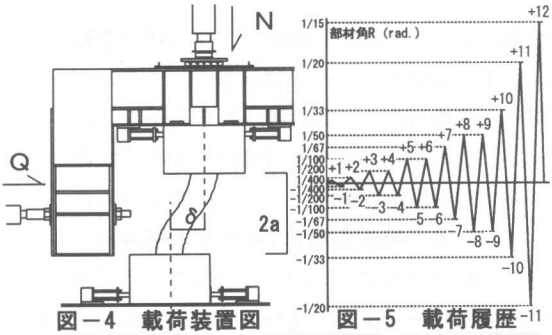


図-4 荷重装置図

図-5 荷重履歴

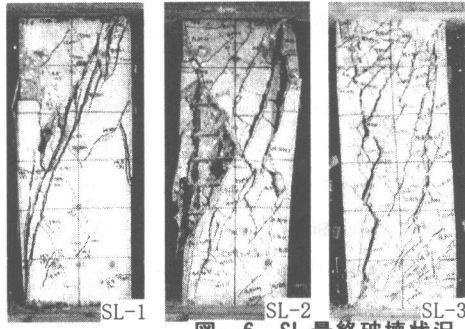


図-6 SL 最終破壊状況

3 実験結果

3. 1 第 1 シリーズ

(1) 破壊性状および変形性状

表-3 に実験結果一覧、図-6 に SL 最終破壊状況、図-7 に RC 最終破壊状況、図-8 にせん断補強筋比 (pw) 別荷重 (Q) - 変位 (delta) 曲線 (包絡線) を示す。なお、せん断力 (Q) は全て、軸力による付加モーメント (P - delta 効果) を考慮した値である。

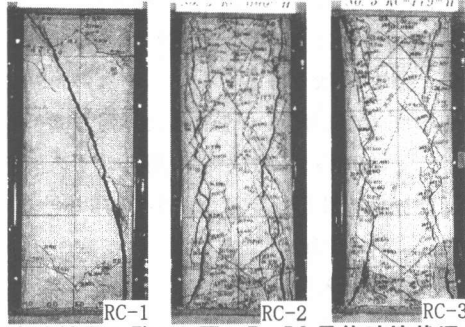


図-7 RC 最終破壊状況

表-3 実験結果一覧

No.	曲げひび割れ発生時		せん断ひび割れ発生時		曲げ降伏時 ¹⁾		せん断補強筋降伏		最大耐力時		破壊 ²⁾ モード
	cQmc (kN)	delta (mm)	cQsc (kN)	delta (mm)	cQy (kN)	delta (mm)	cQsy (kN)	delta (mm)	Qmax (kN)	delta (mm)	
SL-1	118	1.58	151	2.30	—	—	173	4.40	186	3.55	S
SL-2	118	1.34	195	3.59	—	—	213	10.20	242	6.87	S
SL-3	138	1.81	207	4.03	273	8.55	179	23.10	273	8.55	F→B
RC-1	78	0.95	186	3.18	—	—	269	7.83	265	7.81	S
RC-2	78	0.99	186	3.39	—	—	—	—	267	8.90	S
RC-3	88	1.07	197	3.73	269	8.70	—	—	269	8.70	F→B

1) 最外縁鉄筋が材料試験における降伏歪み度に達した点

2) S: せん断破壊 F: 曲げ破壊 B: 付着割裂破壊 (被りコンクリートの剥離)

(I) せん断補強筋比 pw=0.13% 試験体

SL-1 は、部材角 1/200rad. 付近において、加力点を結ぶせん断ひび割れが突如発生し、せん断斜張力破壊により最大

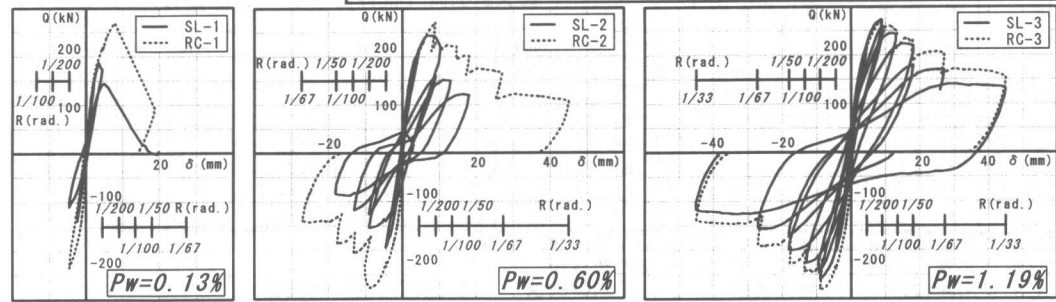


図-8 せん断補強筋比別荷重 (Q) - 変位 (delta) 曲線

耐力に至った。破壊経過は、RC-1 と同様な傾向を示しているが、SL では斜張力によるひび割れが複数発生し、最大耐力にも差がみられる。なお、SL-1 の破断面は骨材が割り裂かれており割裂面が平滑であることが確認された。

(Ⅱ) セン断補強筋比 $p_w=0.60\%$ 試験体

SL-2 は $1/130\text{rad}$. 付近で加力点を結ぶ斜張力ひび割れが顕著となり最大耐力に至ると共に脆性的破壊を示した。RC-2 は $1/100\text{rad}$. 付近で柱頭部に大きなせん断ひび割れが発生すると共に、被りコンクリートの剥離が生じ、最大耐力に至った。その後、付着割裂破壊の様相を示しながら耐力低下した。

(Ⅲ) セン断補強筋比 $p_w=1.19\%$ 試験体

SL-3 は $1/100\text{rad}$. に向かうサイクルで、複数のせん断ひび割れが発生した後、曲げ降伏し、主筋に沿った付着ひび割れが多数発生し、付着割裂破壊に至った。RC-3 も $1/100\text{rad}$. 付近で曲げ降伏と被りコンクリートの剥離が生じ、付着ひび割れの進展により耐力低下した。限界変形角（耐力が最大耐力の 80% まで低下した時の変形角）は SL-3 で約 $1/50\text{rad}$. RC-3 で約 $1/33\text{rad}$. であった。

(2) まとめ

超軽量コンクリートを用いた柱部材において、せん断補強量が少なく、せん断力の負担をコンクリートに依存する場合は、普通コンクリートを用いた柱部材と比べ脆性的な破壊を生じやすいが、十分にせん断補強を行った場合は、従来の RC 柱部材とほぼ同等の構造性能を発揮することが確認された。

3. 2 第2シリーズ

第2シリーズにおいては、十分にせん断補強を行った超軽量コンクリートを用いた柱部材の高軸力下における構造性能を検討する。

(1) 破壊性状および変形性状

表-4 に実験結果一覧を示す。なお、せん断力 (Q) は全て、軸力による付加モーメント ($P-\delta$ 効果) を考慮した値である。

(I) 軸力比の違いによる影響

それぞれ軸力比別に図-9 に荷重 (Q) - 変位 (δ) 曲線 (包絡線)、図-10 に部材角 $1/100\text{rad}$. における破壊状況、図-11 に最終破壊状況を示す。軸力比 0.30 の SL-③ は $1/100\text{rad}$. 付近で試験体全体にせん断ひび割れが分散して発生し、最大耐力に至った。その後 $1/50\text{rad}$. 付近から被りコンクリートに沿ったひび割れが顕著になり付着割裂破壊の様相を示しながら徐々に耐力低下した。軸力比 0.45 の SL-④ は $1/100\text{rad}$. 付近で圧縮による縦方向のひび割れが柱頭部の主筋に沿って発生し、その後せん断ひび割れが分散して多数発生し耐力が低下した。 $1/50\text{rad}$. 以降は被りコンクリートが剥離し、コア部分のみの性状となったが、十分にせん断補強を行っているため耐力低下は緩やかとなった。軸力比 0.60 の SL-⑤ は $1/200\text{rad}$. で被りコンクリートに沿った割裂ひび割れが顕著になり耐力が低下し、 $1/33\text{rad}$. 付近から主筋の座屈が著しくなりせん断補強筋が座屈を拘束できなくなり破断を伴って急激に耐力低下した。軸力の違いにより破壊経過に大きな差が見られたが、軸

表-4 実験結果一覧

No.	曲げひび割れ発生時		せん断ひび割れ発生時		端部圧縮破壊開始		最大耐力時		曲げ降伏時 ¹⁾		限界変形角 ²⁾	破壊 ³⁾ モード
	cQmc	δ	cQsc	δ	cQsc	δ	Qmax	δ	cQy	δ	Ru	
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(rad.)	
SL-①	316	1.99	527	4.68	510	4.40	617	10.50	607	8.52	1/41	F→S
SL-②	380	2.58	611	5.26	602	4.66	642	10.52	603	5.28	1/63	F→S
SL-③	295	1.93	520	5.25	590	6.58	622	15.72	600	6.99	1/17	F→B
SL-④	368	2.21	640	6.58	468	3.04	674	10.48	644	5.26	1/19	FC
SL-⑤	532	3.52	635	10.50	228	1.31	635	10.50	607	5.25	1/20	F→S

1) 最外縁鉄筋が材料試験における降伏歪みに達した点
2) 耐力が最大耐力の80%まで低下した時の部材角
3) S: セン断破壊 F: 曲げ破壊 B: 付着割裂破壊 FC: 曲げ圧縮降伏破壊

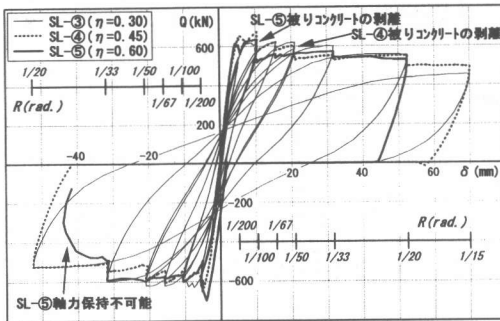


図-9 軸力比別荷重(Q)－変位(δ)曲線

力比が 0.45 を超えると被りコンクリートが早期に剥離するため、コア部分のみの抵抗性能となり、変形性状は、せん断補強筋がいかにコア部分を拘束するか依存する。図-12 に各試験体のせん断補強筋歪み分布、図-13 に軸方向歪み度と部材角の関係を示す。超軽量コンクリートは普通コンクリートに比べ弾性係数が小さいため、軸力が高くなるほど、コア部分の膨らみが顕著となり、コア部分を拘束しているせん断補強筋の負担が増す。また、歪み分布は柱端部に集中するのではなく、歪みの増大する領域は試験体全体に広がっており、破壊状況も損傷が試験体全体に確認される。最終破壊時においても、SL-③は拘束効果を維持し続けたため、軸方向の歪みを抑制し急激な耐力低下は生じなかった。一方、SL-④、⑤はせん断補強筋が降伏することで、拘束効果を維持できなくなり、せん断補強筋が降伏し始めた 1/33rad. (SL-④)、1/50rad. (SL-⑤) 付近から急激に軸方向の歪みが増大している。

(Ⅱ)せん断補強筋間隔の影響

図-14 にせん断補強筋間隔別荷重(Q)－変位(δ)曲線(包絡線)、図-15 に最終破壊状況を示す。第1シリーズにおいて、せん断補強筋比 pw を変動要因とし比較検討した結果、十分にせん断補強を行う(pw を大きくする)ことで RC 部

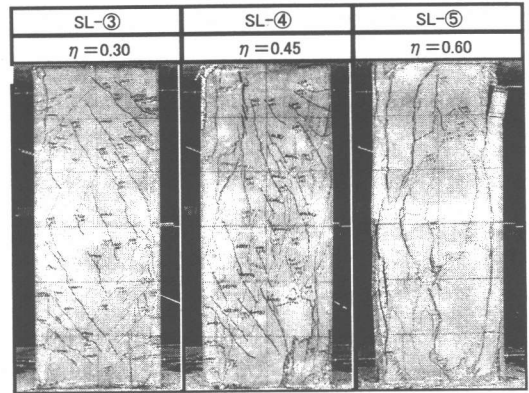


図-10 破壊状況(部材角 1/100rad.)

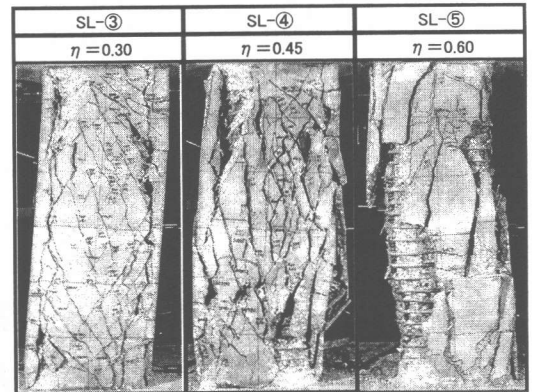


図-11 最終破壊状況

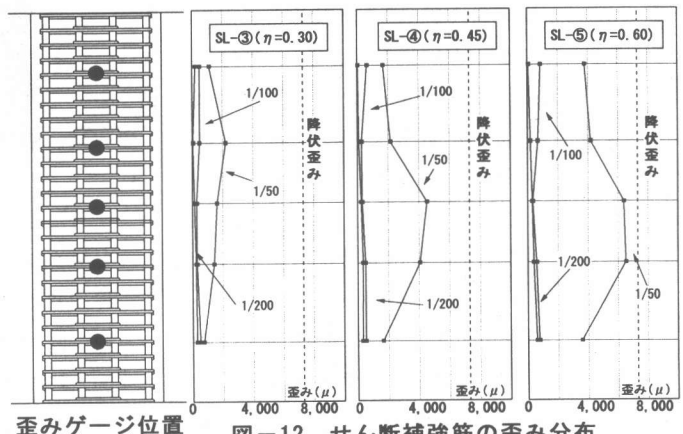


図-12 せん断補強筋の歪み分布

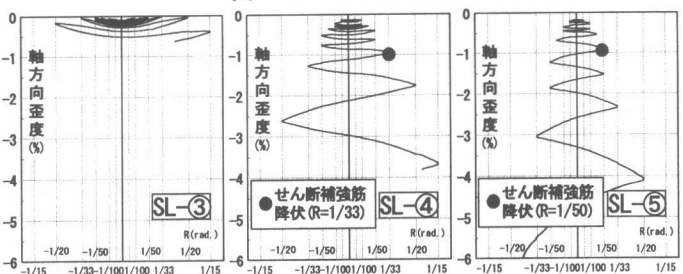


図-13 軸方向歪み度と部材角の関係

材と同等の靱性能を有することを確認した。しかし、第2シリーズにおいて、SL-①、③はせん断補強筋比($p_w=aw/bx$)が一定であるが、破壊状況、履歴性状には大きな差が確認された。せん断補強筋断面、補強筋間隔ともに大きい SL-①は、被りコンクリートが剥離した後、コア部分のみの性状となり急激に耐力低下した。一方、せん断補強筋断面、補強筋間隔ともに小さい SL-③は、被りコンクリートが剥離した後も、耐力を維持していた。図-16 にせん断補強筋降伏応力度に対する実応力度の比(σ/σ_y)と部材角の関係を示す。SL-①は試験体全域に歪みが大きくなっており、1/50rad.以降急激に応力度が増大し拘束効果を期待できなくなっている。一方、SL-③は補強筋の歪みが小さい値で抑制されており、応力度関係においても負担が小さくなっている。このことより、補強筋断面を大きくすることだけではコア部分、主筋の座屈の拘束効果向上に不十分であることを確認した。図-17 に SL, RC 別にせん断余裕度と限界変形角の関係を示す。RC に関しては参考文献(2)の試験体を引用した。補強筋間隔の小さい試験体は RC と同等に評価できるが、補強筋間隔の大きい試験体は限界変形角 1/50rad.程度までは確保しているが、RC の分布より劣る結果となった。

(2) まとめ

超軽量コンクリートを用いた柱部材において、軸力が高くなると、被りコンクリートの剥離後はコア部分を支えるせん断補強筋の拘束効果に依存する。また、拘束効果の向上には、せん断補強筋比を大きくすることが重要であり、特にせん断補強筋間隔を小さくすることが有効である。

4. 結論

超軽量コンクリートを用いた柱部材において、せん断補強筋を十分に配筋することで、従来の RC 柱部材とほぼ同等の構造性能を発揮することが確認された。また、コア部分を

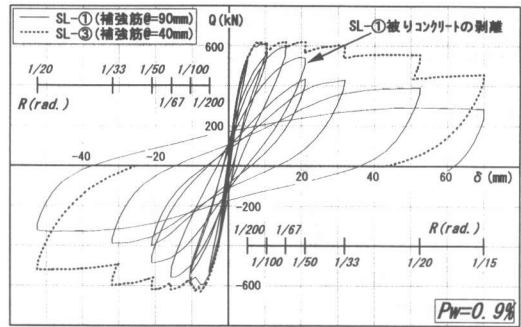


図-14 補強筋間隔別荷重(Q)－変位(δ)曲線

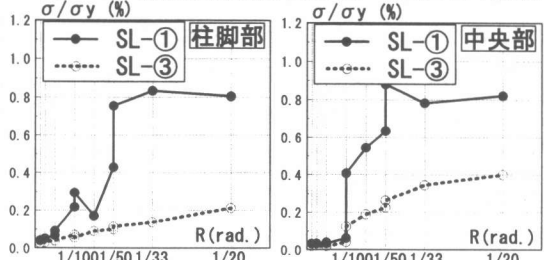


図-16 補強筋 σ/σ_y と部材角の関係

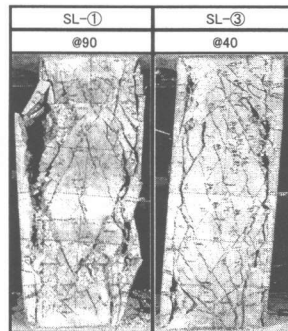


図-15 最終破壊状況

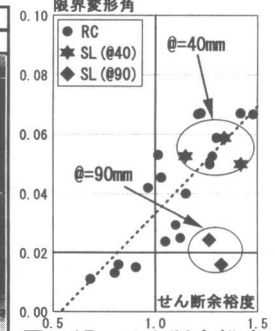


図-17 せん断余裕度と限界変形角関係

十分に補強することで、せん断補強筋の拘束効果を維持し、高軸力下においても耐力を維持できることを示した。せん断補強に関し、せん断補強筋比を大きくすることは靱性能の向上につながり、補強筋間隔を小さくすることが有効であることを確認された。

謝辞 本研究を行うにあたり、清水建設、太平洋セメント、東京鐵鋼株式会社、高周波熱錬株式会社の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松崎育弘他：超軽量人工軽量骨材を用いたRC柱のせん断実験，日本建築学会大会学術講演梗概集(1999年)，C-2，pp. 857~858
- 2) 松崎育弘他：高強度コンクリートと高強度せん断補強筋を用いた柱部材の構造性能に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(2000年)，C-2，pp. 195~198