

論文 繊維補強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

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

要旨: 超軽量コンクリートの脆性的特性の改善策として、ビニロン繊維を混入した繊維補強超軽量コンクリートは、ひび割れ発生以降も引張強度を維持することで大きな引張靱性を有するという特性を持つ。本論文では、気乾比重が $1.2 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$ 程度の繊維補強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、超軽量コンクリートを用いた柱部材と比較することで構造性能を検討した。結果、繊維補強により、ひび割れの分散によるひび割れ幅の抑制効果、せん断補強効果、高軸力下での被りコンクリートの剥離抑制効果が確認され、ビニロン繊維補強の有効性を報告している。

キーワード: ビニロン繊維、超軽量コンクリート、せん断補強効果、高軸力、引張靱性

1. はじめに

コンクリートはひび割れ発生以降、急激に強度が低下する脆性的材料である。この脆性的な材料特性を改善する方法として、繊維補強に関する研究を進めており、ビニロン繊維をモルタル中に混入した高靱性型セメント系複合材料はひび割れ発生以降もコンクリートの引張強度を維持し、大きな引張靱性を有することを確認している(文献 1, 2)。しかし、繊維を混入するにあたり、練り混ぜ方法、施工方法等の問題点があり、特に、練り混ぜ時に骨材が繊維を切断してしまう恐れがあるため、骨材の使用が難しいと考えられている。一方、鉄筋コンクリート造建物の高層化が進み、建物重量の軽量化、特に主体構造物の軽量化が重要な課題となってきたなか、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。しかし、超軽量コンクリートを用いた場合、普通コンクリートに比べ引張、せん断強度が劣るため、脆性的な破壊を生じやすいことが懸念されている。

このことから、骨材形状が比較的丸い人工軽量骨材を使用することにより練り混ぜを可能とし、超軽量コンクリートにビニロン繊維を混入することにより脆性的破壊性状を改善できるものと考えられる。そこで本論文では、

第1シリーズ: 繊維による補強効果

第2シリーズ: 高軸力下での性状

の2シリーズに関し、超軽量コンクリートにビニロン繊維を体積比で 1.0% 混入し、気乾単位容積質量 $1.2 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$ 程度の繊維補強超軽量コンクリートを柱部材に適用し、曲げ、せん断実験を行うことで、繊維補強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 に試験体変動要因・計算結果一覧、図-1 に試験体配筋図を示す。計算値は従来の RC 部材に用いられている式を準用した。試験体総数は 6 体であり、超軽量コンクリート(以

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

下SL)を用いた試験体3体を比較試験体とし、それに対応する繊維補強超軽量コンクリート(以下PVASL)を用いた試験体3体を計画した。試験体は実大の約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 $a/D=1.5$)、主筋12-D13(SD295A、主筋比 $P_g=1.7\%$)、せん断補強筋D6(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(PVASL、SL)、せん断補強筋比を3水準($p_w=0.13, 0.60, 1.19\%$)である。 $p_w=0.13\%$ の試験体はせん断破壊先行型、 $p_w=0.60, 1.19\%$ の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に試験体変動要因・計算結果一覧、図-2に試験体配筋図を示す。繊維補強超軽量コンクリートを用いた試験体6体を計画した。試験体は実大の約1/3スケールを想定し、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($w\sigma_y=868, 1344$)、せん断補強筋間隔を2水準(40, 90cm)、

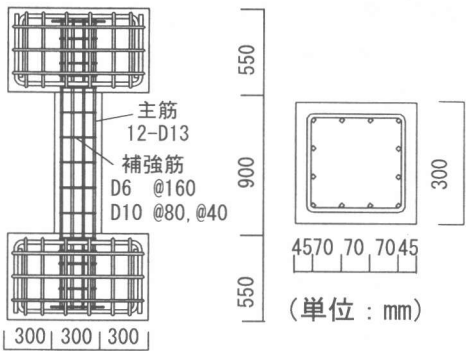


図-1 試験体配筋図(第1シリーズ)

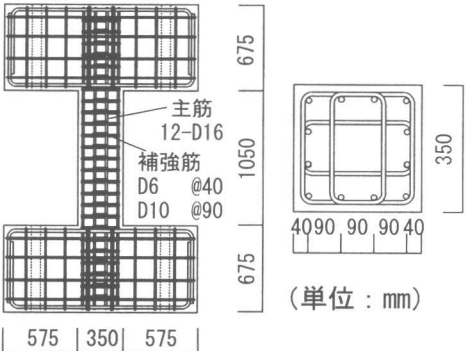


図-2 試験体配筋図(第2シリーズ)

軸力比を4水準($N/b \cdot D \cdot \sigma_u=0.00, 0.30, 0.45, 0.60$)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。

表-1 試験体変動要因・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	σ_t	E_c		配筋	$s \sigma_y$	配筋	$w \sigma_y$	p_w	$Q_{mu}^{(1)}$	$Q_{su}^{(2)}$	$Q_{bu}^{(3)}$
	(MPa)	(MPa)	(GPa)			(MPa)		(%)	(kN)	(kN)	(kN)	
PVASL-1	37.5	1.30	11.9	0.20	12-D13 Pg=1.7%	367	2-D6@160	328	0.13	281	178	4.53
PVASL-2							2-D10@80	310	0.60	281	303	5.90
PVASL-3							2-D10@40		1.19	281	468	7.66
SL-1	28.8	2.26	12.7			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	6.14

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 試験体変動要因・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	σ_t	E_c		配筋	$s \sigma_y$	配筋	$w \sigma_y$	p_w	$Q_{mu}^{1)}$	$Q_{su}^{2)}$	$\tau_{bu}^{3)}$
	(MPa)	(MPa)	(GPa)			(MPa)		(MPa)	(%)	(kN)	(kN)	(MPa)
PVASL-①	53.4	4.17	18.9	0.30	12-D16 Pg=1.95%	401	4-D10@90	868	0.9	628	794	8.10
PVASL-②	58.0	3.74	20.1	0.45						701	810	8.45
PVASL-③	54.5	3.24	18.3	0.00						188	844	8.04
PVASL-④	51.5	4.08	21.7	0.30			4-D6@40	1344		621	827	7.82
PVASL-⑤	58.2	3.75	20.1	0.45						704	860	8.32
PVASL-⑥	57.4	3.90	18.2	0.60						569	857	8.26

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

2. 2 コンクリートの材料特性

表-3 に第 1 シリーズにおけるコンクリート調合表、図-3 に材料試験結果（応力度－歪み度関係）を示す。引張特性は文献(3)の試験方法により求め、圧縮特性は JIS A 1108 に準じて求めた。人工超軽量骨材は、真珠岩系を主原料とした造粒型骨材であり、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。本骨材を使用し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 程度である。なお、ピニロン繊維（クラテック RF1500）は長さ 30mm、直径 0.4mm (比重 1.3g/cm³、引張強度 880MPa、ヤング係数 29.4GPa) のものを使用し、体積比で 1.0% 混入した。引張試験結果は、SL は最大引張応力度以降、急激に応力度が減少しているが PVASL では最大引張応力度以降も 0.8% 程度まで強度を維持し、その後も緩やかに応力度が低下する性状を示し大きな引張靱性を有している。圧縮試験結果は、PVASL、SL とも弾性係数には差がなく、 σ - ϵ 関係はほぼ比例的な関係である。また、PVASL、SL 共、最大圧縮応力度に達すると脆性的に破壊に至り、圧縮靱性は乏しく繊維による影響はみられなかった。

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も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。

3 実験結果

3. 1 第 1 シリーズ

第 1 シリーズにおいては、せん断補強筋比 (pw) 別に SL 試験体と PVASL 試験体を比較し、ピニロン繊維による補強効果を検討する。

表-3 コンクリート調合表

	Vf	W/C	S/a	単位使用量 (kg/m ³)					
	vol. (%)	(%)	(%)	水	セメント ¹⁾	普通砂	軽量砂	粗骨材 ²⁾	減水剤
PVASL	1.0	42.5	58	170	400	128	241	237	3.2
SL	—	42.4	48.0	140	330	178	202	326	2.3

W/C: 水セメント比 S/a: 粗骨材率 Vf: ピニロン繊維の体積混入率
1) 早強セメント 2) 人工軽量骨材

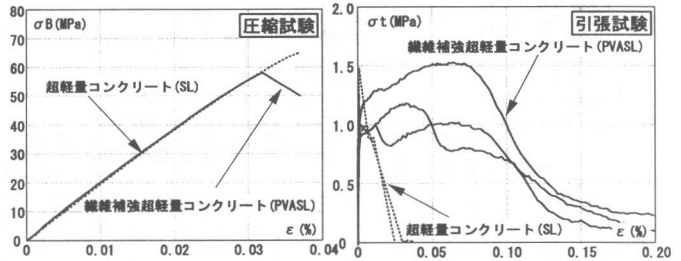


図-3 材料試験結果 (σ - ϵ 関係)

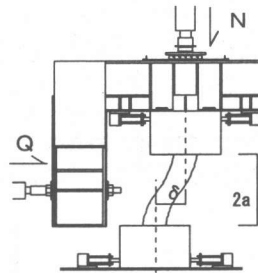


図-4 荷重装置図

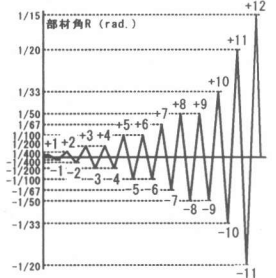


図-5 荷重履歴

(1) 破壊性状および変形性状

表-4 に実験結果一覧、図-6 にせん断補強筋比 (pw) 別荷重 (Q) - 変位 (δ) 曲線 (包絡線)、図-7 に SL 最終変形角時の PVASL 破壊状況、図-8 に SL 最終破壊状況を示す。なお、せん断力 (Q) は全て、軸力による付加モーメント (P - δ 効果) を考慮した値である。

(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耐力に至った。PVASL-1 は 1/200rad. 付近で同様に加力点を結ぶ斜張力ひび割れが発生したが、開口幅は極めて小さく、その後このひび割れに沿ってひび割れが細かく分散し、1/100rad. まで耐力を維持したが、斜張力ひび割れが口開き急激に耐力低下した。

(II) せん断補強筋比 pw=0.60% 試験体

SL-2 は 1/130rad. 付近で加力点を結ぶ斜

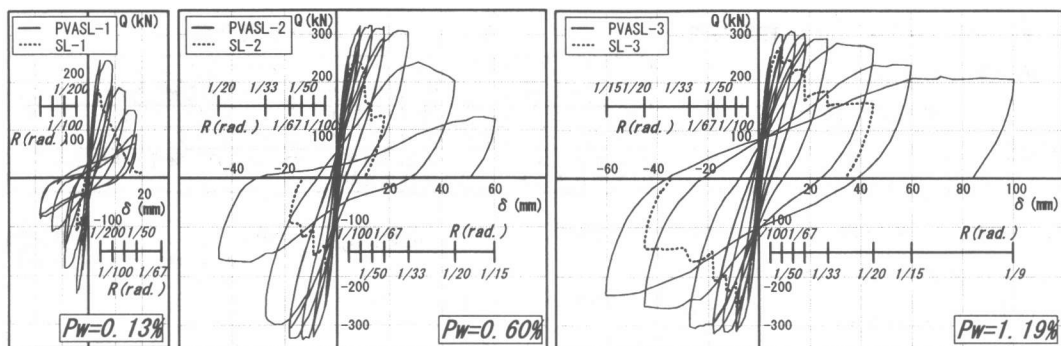


図-6 セン断補強筋比別荷重(Q)－変位(δ)曲線

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		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)	δ (mm)	cQsc (kN)	δ (mm)	cQy (kN)	δ (mm)	cQsy (kN)	δ (mm)	Qmax (kN)	δ (mm)	
PVASL-1	121	1.35	220	3.52	—	—	233	4.04	246	4.53	S
PVASL-2	136	1.61	253	4.46	317	8.96	—	—	317	8.96	F→B
PVASL-3	91	0.96	254	4.57	301	8.26	—	—	308	12.80	F
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

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)

張力ひび割れが顕著となり最大耐力に至ると共に、急激に耐力が低下し1/50rad.付近で脆性的破壊に至った。一方、PVASL-2は1/100rad.付近で曲げ降伏した後、ひび割れが分散することで一つのひび割れが卓越することがなく1/40rad.付近まで耐力を維持した。その後、被りコンクリートの剥離が生じ、付着割裂の様相を示しながら徐々に耐力低下した。

(Ⅲ) セン断補強筋比 $p_w=1.19\%$ 試験体

SL-3は1/100rad.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、曲げ降伏した。その後、繰り返し载荷により主筋に沿った付着ひび割れが多数発生し、付着割裂破壊の様相を示しながら徐々に耐力低下した。これに対し、PVASL-3は1/100rad.付近で曲げ降伏し、1/33rad.程度まで耐力を維持した後、柱端部の圧縮破壊により緩やかに耐力低下を示した。破壊状況を1/20rad.で比較すると、PVASL-3は繊維による被りコンクリートの剥離抑制効果が見られ、1/9rad.時においても被りコンクリートの剥離は生じなかった。

(2) まとめ

引張靱性のあるビニロン繊維を混入した繊維補強超軽量コンクリートを柱部材に適用した場合、ひび割れ幅の抑制効果、被りコンクリートの剥離抑制効果の向上により変形状、破壊性状が改善されることが確認された。

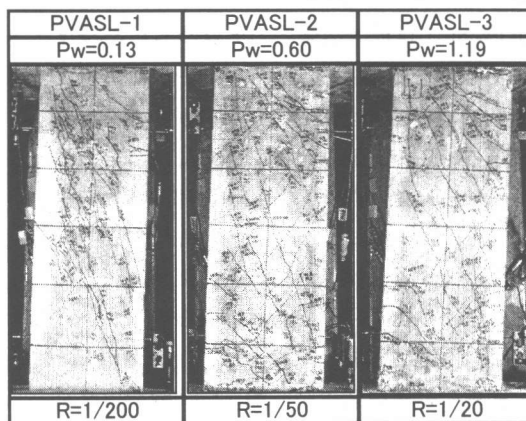


図-7 SL 最終変形角時の PVASL 破壊状況

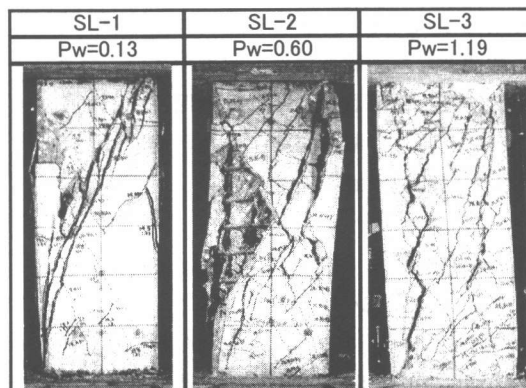


図-8 SL 最終破壊状況

表-5 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		曲げ降伏時 ¹⁾		最大耐力時		限界変形角 ²⁾	破壊 ³⁾ モード
	cQmc	δ	cQsc	δ	cQsc	δ	cQy	δ	Qmax	δ	Ru	
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(rad.)	
PVASL-①	375	2.64	548	5.24	548	5.24	635	7.52	662	15.69	1/15以上	F
PVASL-②	469	3.14	683	8.50	571	4.29	635	5.28	704	10.53	1/39	F→S
PVASL-③	67	0.84	147	2.65	—	—	249	6.01	355	52.55	1/15以上	F
PVASL-④	344	2.39	527	4.74	581	5.97	614	8.06	656	15.73	1/15以上	F
PVASL-⑤	397	2.63	638	5.28	638	5.28	647	5.56	726	15.68	1/15以上	FC
PVASL-⑥	565	4.03	592	5.30	423	2.63	574	5.28	640	8.54	1/20	F→S

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) 耐力が最大耐力の80%まで低下した時の部材角

3) S:せん断破壊 F:曲げ破壊 FC:曲げ圧縮降伏破壊

3. 2 第2シリーズ

第2シリーズにおいては、高強度せん断補筋を用い、十分にせん断補強を行った繊維補強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に関して検討する。

(1) 破壊性状および変形性状

表-5に実験結果一覧、図-6に軸力比(η)別荷重(Q)-変位(δ)曲線(包絡線)、図-7に軸力比0.60試験体の履歴性状、図-8に部材角1/50rad.における破壊状況を示す。PVASL-④は、1/200rad.付近において曲げ降伏し、その後、繊維の補強効果により一つのせん断ひび割れが卓越することなく、試験体1D区間における曲げひび割れが目立った。部材角1/15rad.に至っても被りコンクリートの剥離やひび割れ幅の増大がほとんど確認されず、良好な履歴性状を示し曲げ破壊に至った。PVASL-⑤は PVASL-④に比べ、軸力が高いことにより曲げ耐力が高くなっている。1/200rad.付近において曲げ降伏を起こし、その後、せん断ひび割れが多数分散して発生するものの、1/50rad.まで耐力を維持し続けた。1/50rad.以降に、主筋に沿った付着ひび割れが顕著となり、被りコンクリートの剥離により急激に耐力低下したが、コア部分のみの性能となっても、せん断補強筋の拘束効果によりコア部分の膨らみを抑制し耐力を維持していた。PVASL-⑥は高軸力であるため、曲げひび割れが発生する前に部材端部の圧縮破壊が

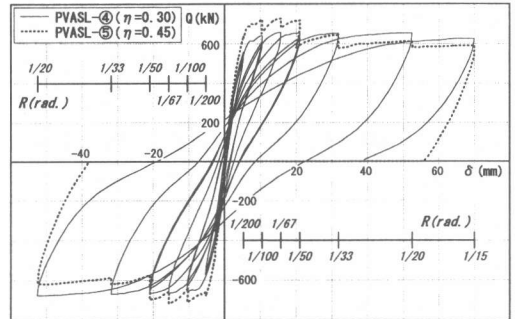


図-6 軸力比別荷重(Q)-変位(δ)曲線

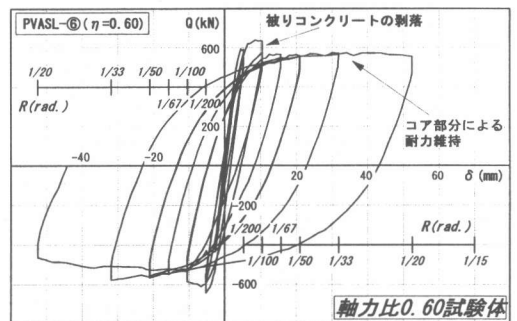


図-7 軸力比0.60試験体の履歴性状

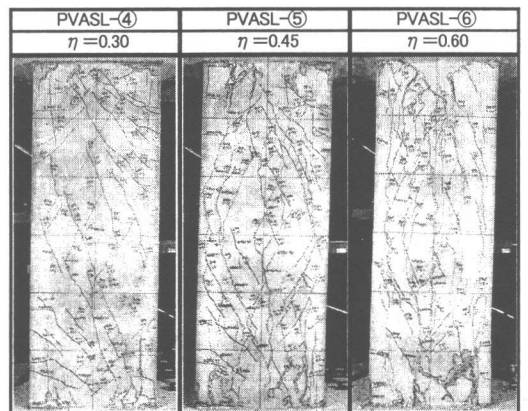


図-8 破壊状況 (部材角 1/50rad.)

生じ、 $1/100\text{rad}$. 付近から被りコンクリートおよび主筋に沿った付着ひび割れが顕著となり被りコンクリートの剥離により急激に耐力低下した。その後、コア部分のみの性能により $1/20\text{rad}$. まで耐力を維持したが、繰り返し載荷によりコア部分の膨らみを拘束していたせん断補強筋が降伏し、軸方向変位が急激に増し、補強筋の破断を伴い急激に耐力低下し、軸力保持不可能となった。

(2) 繊維による補強効果

図-9 にせん断補強筋の歪み分布を示す。繊維補強超軽量コンクリートの弾性係数は従来のコンクリートの 0.5 倍程度であるため、高軸力負担下では、普通コンクリートに比べ軸方向の圧縮変位が大きいと、主筋の座屈、コア部分の膨らみが顕著になり、補強筋の負担が大きくなる。PVASL-④、⑤は繊維のせん断補強効果により補強筋の負担が軽減され、歪みは小さい値に抑制されているが、PVASL-⑥は被りコンクリートが剥離した $1/100\text{rad}$. 以降、補強筋歪みが増大している。図-10 にせん断ひび割れ幅とせん断補強筋歪みの関係を示す。なお、ひび割れ幅は図-5 に示した載荷履歴の折り返し時にクラックスケールにより測定し、せん断補強筋の歪みは測定したひび割れが横切る位置の歪みを用いた。また、データは $1/50\text{rad}$. までの測定結果を用いている。PVASL-④、⑤はせん断補強筋の歪みが 1500μ 以下、ひび割れ幅が 0.2mm 以下の範囲に分布が集中している。PVASL-⑥は歪みが大きい値となっているが、ひび割れ幅は 0.2mm 以下に抑えられており、全試験体とも繊維によるひび割れ幅の抑制効果がみられる。

(3) まとめ

繊維補強超軽量コンクリートを用いた柱部材に関し、高軸力を負担する場合においても被りコンクリートの剥離抑制効果および、せん断補強効果により、せん断補強筋の歪みを抑え、せん断ひび割れの分散発生とひび割れ幅の抑制の向上が確認された。

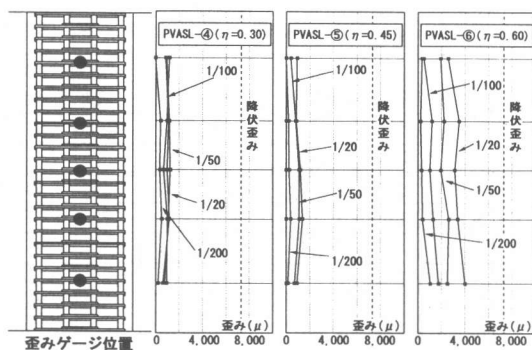


図-9 せん断補強筋の歪み分布

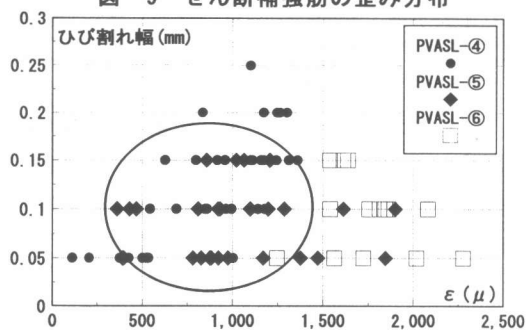


図-10 ひび割れ幅とせん断補強筋歪み関係

4. 結論

超軽量コンクリートと比べ、大きな引張靱性を有するビニロン繊維を混入した繊維補強超軽量コンクリートを柱部材に適用した場合、超軽量コンクリートと比較し、変形性状、破壊性状が大きく改善されることを明らかにした。特にビニロン繊維の効果として、ひび割れの分散によるひび割れ幅の抑制効果、せん断補強効果、高軸力下での被りコンクリートの剥離抑制効果が確認された。

謝辞 本研究を行うにあたり、安藤建設技術研究所、(株)クラレ、清水建設、太平洋セメントの協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 笠原美幸他：高靱性型セメント系複合材料を用いた柱部材の構造性能に関する実験研究，コンクリート工学年次講演会論文集，vol. 22, No. 3, pp. 385~390, 2000. 7
- 2) 蔵谷幸憲他：高靱性型セメント系複合材料を用いた梁部材の構造性能，コンクリート工学年次講演会論文集，vol. 21, No. 3, pp. 511~516, 1999. 7
- 3) 佐藤幸博他：高靱性型セメント系複合材料の基本的力学特性，コンクリート工学年次講演会論文集，vol. 21, No. 3, pp. 1435~1440, 1999. 7