

論文 高靱性型セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性能に関する実験的研究

藤原 徳郎*¹ 松崎 育弘*² 磯 雅人*³ 福山 洋*⁴

要旨：モルタル中に PVA 繊維を体積比で 1.5%混入¹⁾することで、大きな引張靱性を有する高靱性型セメント系複合材料を梁²⁾および柱³⁾部材に用いた場合、損傷が低減され、靱性能を大幅に改善することができる。そこで本報では、高靱性型セメント系複合材料を用いたデバイスの構造性能を明らかにすることを目的とした。本実験では、せん断スパン比、主筋の材質を変動させ、さらにシャキーおよびスリーブを導入した壁柱形状のデバイスの曲げせん断実験を行うことで、剛性および曲げ耐力を調節することができること、等価粘性減衰定数を大きくできること等を明らかにしている。

キーワード：デバイス、高靱性型セメント系複合材料、シャキーおよびスリーブ

1. はじめに

地震国である我が国では、地震に対する建造物の構造形式として耐震構造が主に用いられてきたが、近年、地震力を制御し建物に伝達されるエネルギーを意図的に低減させる制震構造が導入され、注目されている。1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災によって、建造物の多くが倒壊し人的被害を引き起こしたが、この震災により改めて制震構造のもつ機能の重要性が叫ばれている。

制震デバイスのエネルギー吸収機構として一般的には、低降伏点鋼制震パネルや粘弾性ダンパー、アンボンドブレースなどが挙げられ、実用化に至っているが、鉄筋コンクリート部材による制震デバイスに関しての研究はほとんど例がない。

一方で、著者らはここ数年に亘り、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（以下 PVA-HPFRCC）を用いた梁、柱に関しての研究を進めており、普通コンクリートに比べて脆性的な性状を改善すること

ができることを確認している。

そこで、本実験では、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を用いた制震デバイスの基礎研究を行い、その構造性能を明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

2. 1 試験体

表-1 に試験体一覧、図-1 に試験体配筋図を示す。試験体は、実大の 1/3 のスケールを想定しており、その総数は 6 体である。全試験体とも、断面寸法は $B \times D = 200 \times 450\text{mm}$ とし、破壊モードは曲げ降伏を想定している。

変動要因は、コンクリートを 2 種類（普通コンクリート、高靱性型セメント系複合材料）、せん断スパン比を 3 水準 ($a/D=1, 0.67, 0.5$)、主筋の径および材質を 3 水準（2 - D19[SD490]、2 - D19[SD345]、4 - D16[SD200]）、シャキーおよびスリーブの有無としている。なお、せん断スパン比は、試験区間長さを $h=900, 600, 450\text{mm}$ と設定する

- | | | | |
|-----|-------------|-------------------|-------|
| * 1 | 東京理科大学大学院 | 工学研究科建築学専攻 | (正会員) |
| * 2 | 東京理科大学教授 | 工学部建築学科 工博 | (正会員) |
| * 3 | 東京理科大学大学院 | 工学研究科建築学専攻 工修 | (正会員) |
| * 4 | 独立行政法人建築研究所 | 構造研究グループ 上席研究員 工博 | (正会員) |

表-1 試験体一覧

NO	試験体名	断面 (mm×mm)	コンクリート			主筋		せん断補強筋			せん断スパン比	要素 (シヤキー、スリーブ)
			種類	σ_b (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	径	材質 σ_y (N/mm ²)	径	材質	間隔 (mm)	σ_y (N/mm ²)	
1	PVA-(490-900)E	200×450	PVA	41.9	15.4	2-D19	SD490	D10	SD295	80	366	1
2	PVA-(490-900)			40.8	16.7							
3	RC-(490-900)		普通	34.3	25.2							
4	PVA-(490-600)E			43.4	15.7					40		
5	PVA-(345-600)E		PVA	44.7	15.5	4-D16	SD200	Φ6	SWI-200	80		0.67
6	PVA-(200-450)E			44.0	15.3					40		
										1843	0.5	

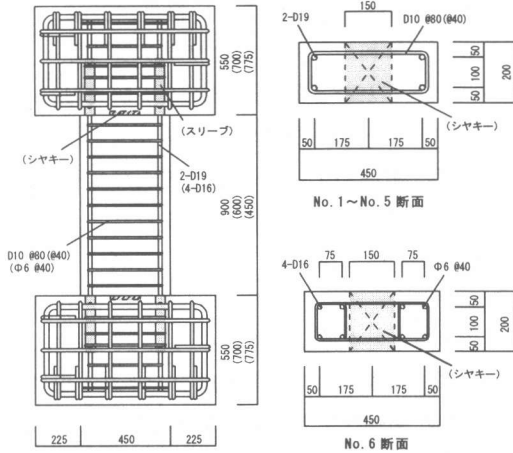


図-1 試験体配筋図

ことで変動させている。No.2 試験体と No.3 試験体では、コンクリートの種類による影響を考察する。No.1 試験体と No.4, 5 試験体と No.6 試験体では、せん断スパン比を変動させることにより剛性を高め、また、主筋の径および材質を変動させることにより曲げ耐力を調節する。これは、図-2 のデバイスの考え方に示すように、デバイスの剛性をフレーム架構よりも高め、かつ曲げ耐力を小さくすることで、デバイスにエネルギー吸収材としての機能をもたせることを意図としている。No.1 試験体と No.2 試験体では、シヤキーおよびスリーブの有無による効果を検討する。図-3 のシヤキーおよびスリーブに示すように、シヤキーはスタブと試験区間との接合面にせん断抵抗要素として設け、スリーブは抜け出し変位を抑制する目的で用いている。

図-4 に文献¹⁾の方法から算出した $\sigma-\epsilon$ 関係(引張)、表-2 に PVA-HPFRCC の調査表を示す。PVA-HPFRCC は、最大強度時以降も 1%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た。

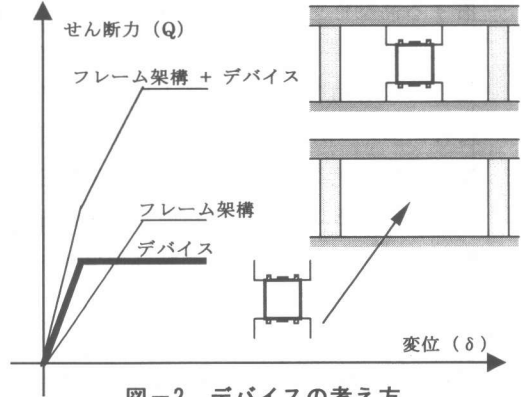


図-2 デバイスの考え方

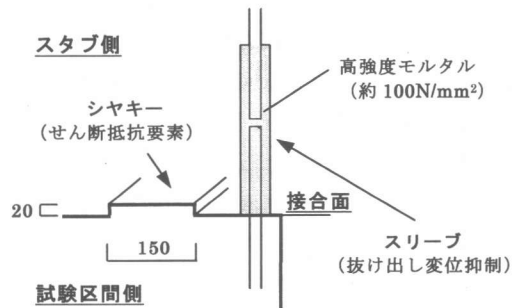


図-3 シヤキーおよびスリーブ

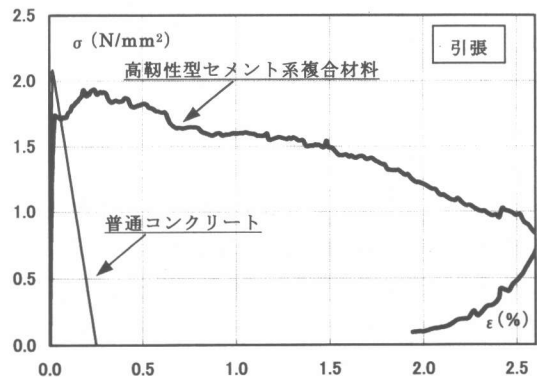


図-4 $\sigma-\epsilon$ 関係 (引張)

表-2 PVA-HPFRCC の調査表

繊維名	水セメント比 W/C (%)	体積混入率 V_f (%)	所要量			
			水 W (kg)	セメント C (kg)	砂 S (kg)	繊維 F (kg)
PVA(U-2)	45	1.5	45	100	40	1.93

2. 2 実験方法

図-5 に加力装置図, 図-6 に载荷履歴を示す。加力は建研式加力装置によって正負交番繰り返し载荷を行った。加力の制御は変形制御とし、変位 δ は上下スタブ間の相対変位とした。なお、柱梁フレーム架構内中央部に用いるデバイスの軸力に関しては、本実験では安定した加力を行うことを目的として、常時 50kN 入力されるように油圧ジャッキにより自動制御することにした。

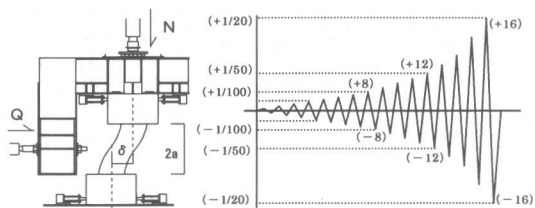


図-5 加力装置図

図-6 载荷履歴

3. 実験結果および検討

3. 1 破壊性状

表-3 に実験結果および計算値一覧を示す。写真-1 の試験体破壊状況から分かるように、高靱性型セメント系複合材料を使用した試験体 (No.3 以外) では、非常に細かいせん断ひび割れが分散して発生している。要素 (シャキーとスリーブ) を導入した No.1, 4~6 試験体では、シャキー端部からのひび割れが多くみられたが、図-7 の①のひび割れ幅一部材角関係から分かるように、そのひび割れ開口幅はとても小さく、シャキーのない No.2 試験体とほとんど変わらない。図-8 の②の

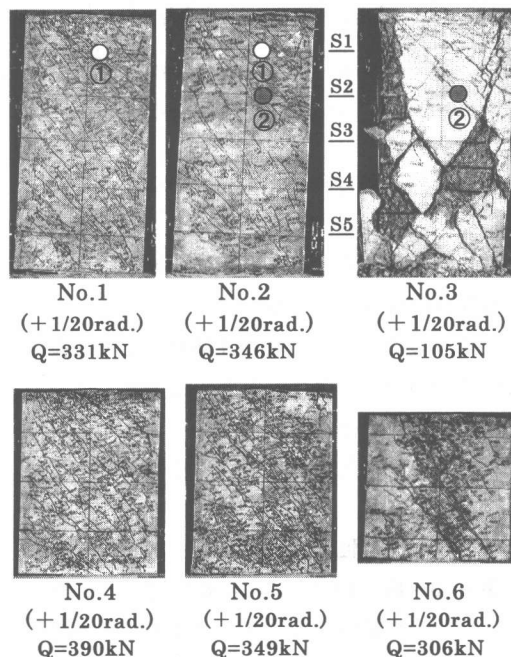


写真-1 試験体破壊状況

表-3 実験結果および計算値一覧

NO	試験体名	各特異点の実験結果および破壊モード									計算値	
		曲げひび割れ発生荷重		せん断ひび割れ発生荷重		部材降伏		最大耐力		破壊モード	曲げ耐力	せん断耐力
		Q_{mc} (kN)	δ_{mc} (mm)	Q_{sc} (kN)	δ_{sc} (mm)	Q_y (kN)	δ_y (mm)	Q_{max} (kN)	δ_{max} (mm)			
1	PVA-(490-900)E	60	0.7	153	2.2	287	6.2	344	36.1	F	296	324
2	PVA-(490-900)	83	0.9	137	1.8	298	7.3	351	42.8	F	296	320
3	RC-(490-900)	69	0.4	129	1.1	294	6.8	318	11.3	F→B	296	297
4	PVA-(490-600)E	98	0.7	178	1.5	427	7.1	446	13.5	F	444	468
5	PVA-(345-600)E	59	0.2	183	1.5	302	4.6	347	37.6	F	305	431
6	PVA-(200-450)E	47	0.2	187	1.1	281	2.8	347	45.0	F	286	615

*注1 破壊モード (F:曲げ降伏 B:付着破壊) *注2 曲げ耐力: 曲げ終局強度式 (No.6: 多段配筋の曲げ終局強度式) *注3 せん断耐力: 広沢修正式

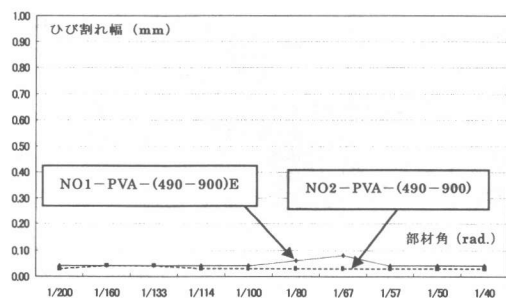


図-7 ①のひび割れ幅-部材角関係

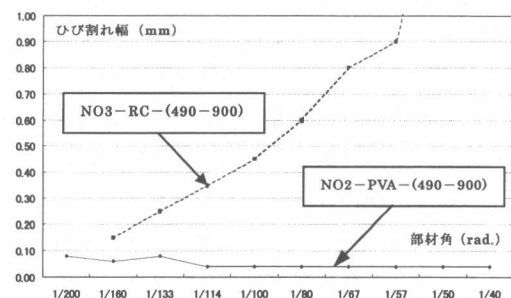


図-8 ②のひび割れ幅-部材角関係

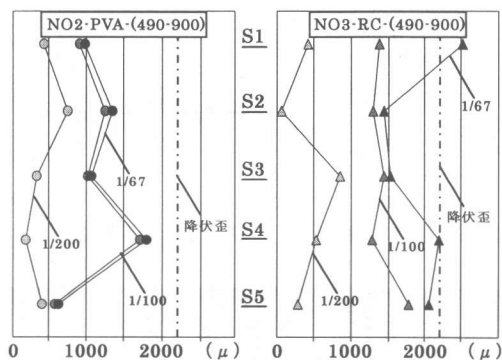


図-9 セン断補強筋歪み分布

ひび割れ幅一部材角関係から分かるように、No.3 試験体に比べて、高靱性型セメント系複合材料を使用した No.2 試験体のせん断ひび割れ開口幅は極めて小さい。

これらのことから、高靱性型セメント系複合材料を用いてシヤキーを導入しても、ひび割れ開口幅に大きな影響はなく、また、普通コンクリートに比べ損傷を大きく低減できることが分かった。

3. 2 変形状

図-10～図-13 に各試験体の $Q-\delta$ 曲線を示す。全試験体ともスリップ性状を示す結果となったが、高靱性型セメント系複合材料を使用した試験体では、曲げ降伏後も極めて良好な履歴性状を示した。No.3 試験体は、曲げ降伏後に徐々に耐力低下し、部材角 $1/20$ (rad.) にてコンクリートの剥離、剥落が特に顕著となり大きく耐力低下した。このことから、高靱性型セメント系複合材料を使用することで変形状が改善され、極めて良好な履歴性状が得られることが明らかとなった。

図-9 に No.2, 3 試験体のせん断補強筋歪み分布を示す。なお、せん断補強筋の歪みゲージの計測位置は、写真-1 の試験体破壊状況に記した S1～S5 である。No.3 試験体に比べて、No.2 試験体の歪みが抑制されていることから、高靱性型セメント系複合材料を使用することでせん断補強効果が発揮され、変形状を改善することができることが分かった。

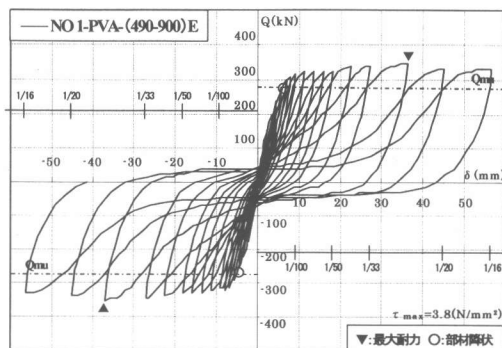


図-10 No. 1 $Q-\delta$ 曲線

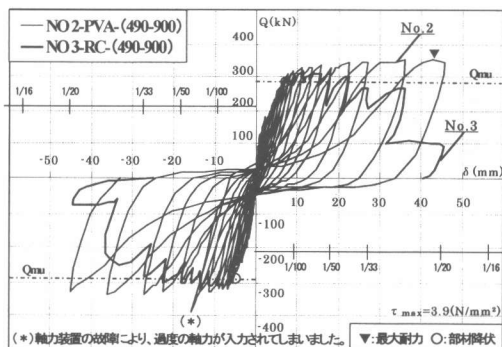


図-11 No. 2, 3 $Q-\delta$ 曲線

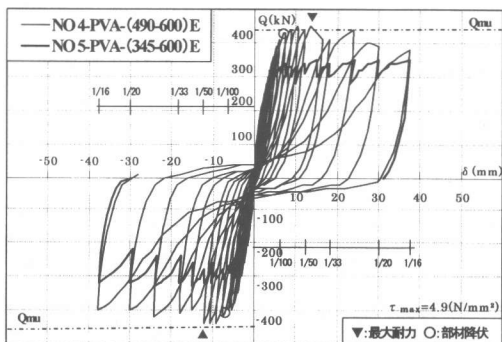


図-12 No. 4, 5 $Q-\delta$ 曲線

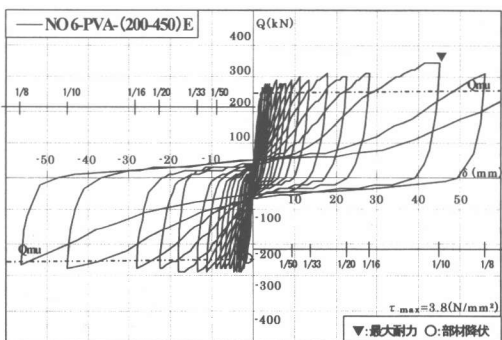


図-13 No. 6 $Q-\delta$ 曲線

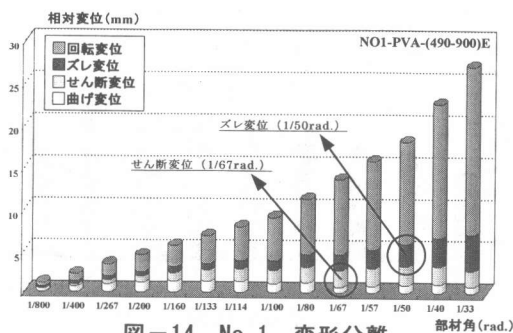


図-14 No. 1 変形分離

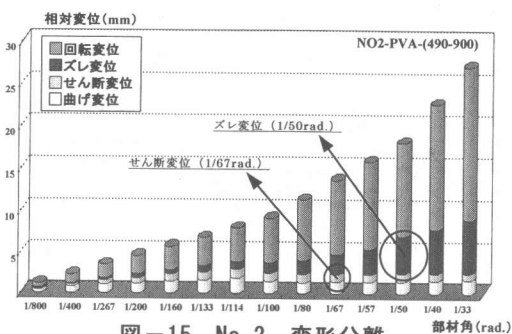


図-15 No. 2 変形分離

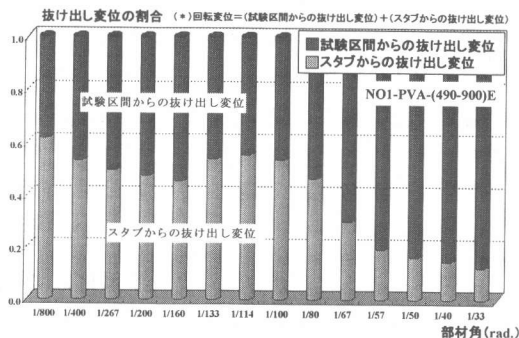


図-16 No. 1 抜け出し変位の割合

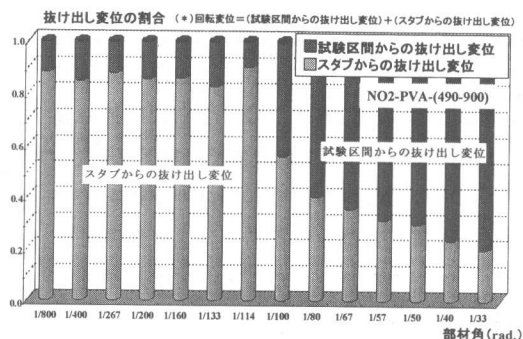


図-17 No. 2 抜け出し変位の割合

3. 3 変形分離

全試験体ともスリップ性状を示したが、変形分離によりシャキーおよびスリーブの効果について検討を行う。図-14、図-15にNo.1、No.2試験体の変形分離(変位計および主筋の歪みゲージより算出)を示す。No.1試験体は、シャキーおよびスリーブの導入により、No.2試験体に比べ、変形成分が変化している。No.1試験体では、No.2試験体に比べてズレ変位の割合が小さく、また、せん断変位の割合が大きい。要素を組み込んだNo.1試験体では、シャキーがせん断抵抗要素として機能し、ズレ変位を抑制しており、それに伴うシャキー端部からのひび割れが顕著であるため、せん断変位が大きくなったものと思われる。その他の変形成分については大きな変化はなく、抜け出し変位抑制を目的としたスリーブの効果は、変形分離ではみられなかった。

図-16、図-17にNo.1、No.2試験体の抜け出し変位の割合を示す。これは、変形分離における回転変位を試験区間からの抜け出し変位とスタブからの抜け出し変位(スリーブ

内主筋に添付した歪みゲージの伸び量より算出)に分類し、その割合を示している。要素のないNo.2試験体では、部材降伏した部材角1/100(rad.)まで、スタブからの抜け出し変位がほとんどであるが、スリーブを導入したNo.1試験体では、その割合が小さい。

このことから、変形分離では分からなかったスリーブによる抜け出し変位抑制が、スタブからの抜け出し変位抑制という効果として発揮されていることが分かる。No.1、No.2試験体の変形分離における回転変位に大きな変化がみられなかったのは、スリーブによってスタブからの抜け出し変位を抑制することはできるが、その分、試験区間からの抜け出し変位が大きくなったからであると思われる。

3. 4 剛性および曲げ耐力

図-18にNo.1、4、5、6試験体の剛性と曲げ耐力を示す。No.1試験体よりせん断スパン比が小さいNo.4試験体では、No.1試験体に比べて剛性、曲げ耐力が大きい。No.4試験体とせん断スパン比は同じであるが、主筋の材質を変動させたNo.5試験体では、No.1試

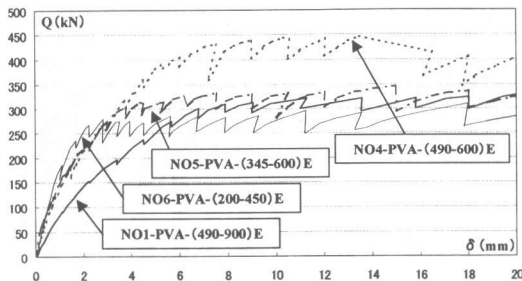


図-18 剛性と曲げ耐力

験体に比べて剛性が高く、曲げ耐力は等しい。最もせん断スパン比が小さく、低降伏点鋼を使用した No.6 試験体では、さらに剛性は高く、曲げ耐力は No.1 試験体とほぼ等しい。

これらのことから、せん断スパン比および主筋の材質を変動させることにより、剛性および曲げ耐力を調節することができ、前述した図-2 のデバイスの考え方で示したように、エネルギー吸収としての機能を発揮することができることを明らかにした。

3. 5 等価粘性減衰定数

図-19 に No.1, 2, 6 試験体の等価粘性減衰定数を示す。シヤキーおよびスリーブを導入した No.1 試験体では、要素のない No.2 試験体に比べ、やや等価粘性減衰定数大きい。これは、前述した図-14、図-15 の変形分離から分かるように、シヤキーがせん断抵抗要素としての機能を発揮し、より良好な復元力特性を得ることができたからと考えられる。それほど大きく等価粘性減衰定数が向上しなかったのは、スリーブがスタブからの抜け出し変位のみを抑制し、それに伴う試験区間からの抜け出し変位を抑制することができなかったためであると思われる。

多段配筋で低降伏点鋼を使用し、それを特殊補強筋により一筆書きに拘束した No.6 試験体は、No.1 試験体に比べてさらに等価粘性減衰定数大きい。これは、多段配筋によるダボ効果、特殊補強筋による拘束効果が発揮されているからと考えることができる。

これらのことから、スリーブによる抜け出

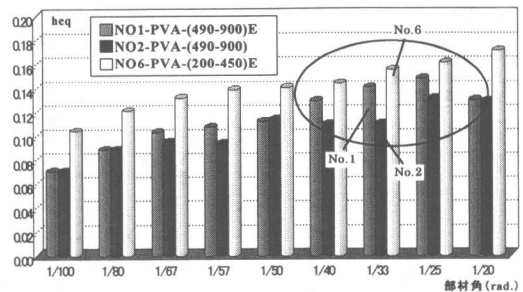


図-19 等価粘性減衰定数

し変位抑制については課題が残ったが、シヤキーの導入、多段配筋によるダボ効果、特殊補強筋による拘束効果により、等価粘性減衰定数が向上することを明らかにした。

4. まとめ

本実験により、鉄筋コンクリート部材によるデバイスのエネルギー吸収材としての可能性を示す以下の知見を得た。

①高靱性型セメント系複合材料を用いることで、せん断ひび割れの分散および開口幅の抑制、せん断補強効果を得ることができる。

②せん断スパン比および主筋の材質を変動させることにより、剛性および曲げ耐力を調節することができ、エネルギー吸収としての機能を発揮することができる。

③シヤキーの導入、多段配筋によるダボ効果、特殊補強筋による拘束効果により、等価粘性減衰定数を向上させることができる。

謝辞 本研究は日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」(委員長:小谷俊介 東京大学教授)のエフェクタ部会(主査:藤田隆史 東京大学教授)に設置された「セメント系複合材料WG」(主査:松崎育弘 東京理科大学教授)における研究の一環として実施されたものである。関係各位に深甚なる謝意を表す。

また、国土技術政策総合研究所の諏訪田晴彦氏には、本実験に当たり多くの労力を裂いて頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, pp1435~1440, 1999.7
- 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) 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