

# 論文 PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による短スパンはりのせん断挙動に関する実験的研究

閑田徹志<sup>\*1</sup> 渡辺茂雄<sup>\*2</sup> Li, Victor C.<sup>\*3</sup>

**要旨:** 引張ひずみが数パーセントに達するような極めて靱性に富む FRC (高靱性 FRC) を用いた鉄筋補強部材の基礎的なせん断挙動を明らかにするため、短スパンはりのせん断実験を実施した。実験の結果、高靱性 FRC 部材は、鉄筋コンクリート部材と比較してせん断耐力および変形性能が大きく向上し、せん断スパン比が小さな部材でも靱性を容易に確保できる見通しが得られた。

**Keyword:** 短繊維補強セメント複合材料, 短スパンはり, せん断, 高靱性

## 1 はじめに

短繊維補強セメント複合材料 (以下, FRC) の研究の進歩により、引張ひずみが数パーセントに達するような極めて靱性に富む高靱性 FRC (もしくは Engineered Cementitious Composite, ECC と呼ばれる) が開発され、新しい構造材料として注目を集めている[1,2]。高靱性 FRC を鉄筋補強した部材(以下 R/ECC 部材)では、耐震壁やつなぎばりに見られるようなせん断による破壊が卓越する条件でも、鉄筋コンクリート部材 (以下 RC 部材) では得られない靱性に富む挙動を示すことが期待されている。

本研究は、R/ECC 部材のせん断挙動について基礎的な検討を行うことを目的とし、短スパンはりのせん断加力実験を実施する。実験では、セメント材料の種類、せん断スパン比、およびせん断補強筋量をパラメータとして、RC 部材と比較することにより R/ECC 部材の優れたせん断変形性能を明らかにすることを旨とする。

## 2 実験計画

### 2.1 試験体

試験体は Fig. 1 に示すようなはりで、大野式

の加力方式により荷重を行う。せん断破壊を曲げ破壊に先行させるため、全試験体について D13 高強度鉄筋により補強筋比 4% の曲げ補強を施す。実験要因は、1)セメント材料種類 (高靱性 FRC およびプレーンコンクリート)、2)せん断スパン比  $M/QD$  (1 および 0.5)、3)せん断補強筋比  $p_w$  (0 および 1%) の 3 種類である。

これらの実験パラメータを組み合わせることにより合計 6 体の試験体を設計する。実験では、これら実験要因の影響について検討するとともに、 $M/QD$  および  $p_w$  の組み合わせにより、所定のせん断破壊モード (せん断引張破壊もしくはせん断圧縮破壊) によってせん断耐力が決まるよう試験体を設計して、この破壊モードの影響も検討できるように計画する。破壊モードは、建築学会の終局強度型耐震設計指針[3]に示されるせん断強度式 A 法をもとに、高靱性 FRC の引張強度を等価なせん断補強筋として考慮した次式を用いて、アーチ作用の負担せん断力  $V_a > 0$  のときせん断引張破壊、 $V_a = 0$  でせん断圧縮破壊と判定する。

$$V = V_t + V_a \quad (1)$$

$$V_t = b_j r (p_w \sigma_{wy} + \sigma_t) \cot \phi \quad (2)$$

<sup>\*1</sup> 鹿島技術研究所 主任研究員 Ph.D (正会員)

<sup>\*2</sup> 株式会社アルテス 技術部長 (正会員)

<sup>\*3</sup> ミシガン大学建設環境工学科 先端建設材料研究所 所長・教授 Ph.D

$$V_u = \tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B / 2 \quad (3)$$

ここに、

$$\cot \phi = \min. \left( 2.0, j_t / (D \tan \vartheta), \sqrt{v \sigma_B / (p_w \sigma_{wy} + \sigma_t)} - 1 \right)$$

$$\tan \theta = \left\{ \sqrt{[(L/D)^2 + 1]} - L/D \right\}$$

$$\beta = \left\{ (1 + \cot^2 \phi) (p_w \sigma_{wy} + \sigma_t) \right\} / (v \sigma_B)$$

$$v = 0.7 - \sigma_B / 2000$$

上式中で、 $\sigma_B$  はコンクリートの圧縮強度、 $\sigma_{wy}$  はせん断補強筋の強度、 $p_w$  はせん断補強筋比、 $\sigma_t$  は高靱性 FRC の引張強度、さらに、 $b$ ,  $j_t$ ,  $D$ ,  $L$  は、それぞれ部材の幅、主筋中心間距離、全せい、内法長さである。また、R/ECC 部材のせん断耐力評価への(1)~(3)式の適用性については、実験結果をもとに4章で検討を行う。

このようにして設計した試験体の概要を Table 1 に示す。Table 1 にあるように、実験では RC 試験体 2 体および R/ECC 試験体 4 体の合計 6 体を加力する。RC 試験体はせん断スパン比を 1 とし、同一のせん断スパン比の R/ECC 試験体とせん断性状を比較する目的で行う。R/ECC 試験体については、せん断補強筋の有無の他にせん断スパン比を 1.0 から 0.5 に変化させて実験を行う。

試験体は、Fig. 1 にあるように幅 150 およびせい 200 mm の断面を有し、全長 1500 (M/QD=1) または 900 mm (同 0.5) である。コンクリートは 10 mm 直径の豆砂利を用いた呼び強度 21 MPa の調合 (水セメント比 62%, 単位水量 181 kg/m<sup>3</sup>) を使用する。高靱性 FRC は新たに開発したビニロン繊維補強セメント複合材料で、繊維長 12 mm で直径 40 $\mu$ m のビニロン繊維を使用した。このビニロン繊維の機械的性能は、カタログ値で引張強度 1250 MPa, 弾性係数は 22 $\times 10^3$  MPa である。高靱性 FRC の

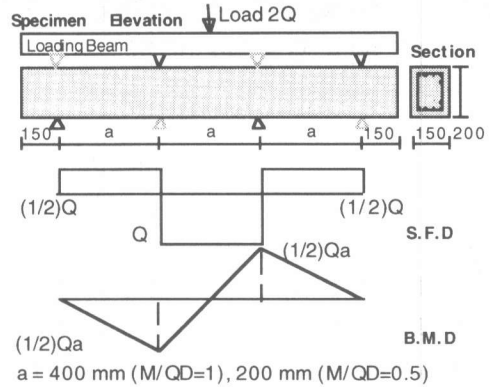


Fig. 1 Schematic of specimen

Table 1 Outline of specimen

Beam specimen	Cement material	<sup>1</sup> M/QD	<sup>2</sup> $p_w$ (%)	Failure mode
ECC-1-1	ECC	1	1	shear comp.
ECC-1-0	ECC	1	0	shear tens.
ECC-0.5-1	ECC	0.5	1	shear comp.
ECC-0.5-0	ECC	0.5	0	shear tens.
RC-1-1	concrete	1	1	shear comp.
RC-1-0	concrete	1	0	shear tens.

<sup>1</sup> Shear span to depth ratio <sup>2</sup> Trans. reinf. ratio

調合は、水セメント比 45%, 砂セメント比 37%, 繊維混入量は体積比で 2% とし、引張強度 2.5MPa, 引張ひずみ能力 1% と特に引張ひずみ能力において従来の FRC の性能を大きく超えるよう設計した。

Fig. 2 には、試験体の配筋を ECC-1-1 (または RC-1-1) を例にとって示した。補強筋は、曲げ補強用に D13 の SD490 を、また、せん断補強には D6 の SD345 を用いた。また、Fig. 2 に●で示す点では補強筋にひずみゲージを貼付してひずみを計測した。

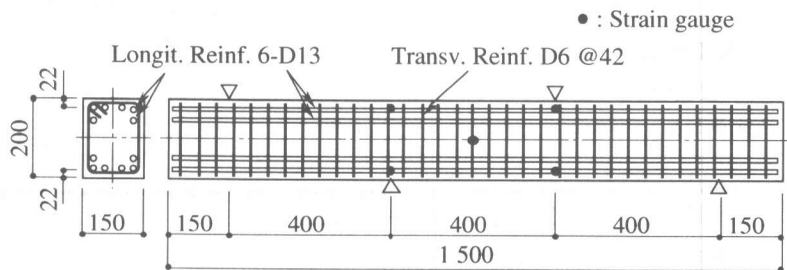


Fig. 2 Re-bar arrangement of specimen

## 2.2 加力方法

加力は 1000kN 曲げ試験機を用い、正荷重と負荷重の間の荷重が 0 となる時点で、支持点および載荷点を移動させることにより繰り返し交番載荷を行う。しかし、この支持点・載荷点の移動に時間を要するため、多くのサイクルでの繰り返し載荷を避け、原則的にコンクリートせん断ひび割れの発生時およびせん断補強筋の降伏時の 2 回だけ繰り返し、その後部材角が 1/50 になるまで単調載荷することにした。  $p_w = 0\%$  の試験体については、  $p_w = 1\%$  の試験体に準じて 2 回目のサイクルのピークを決定した。

## 3 実験結果

### 3.1 材料試験結果

高靱性 FRC の力学性能を確認するため、引張、圧縮、曲げの各試験を実施した。Fig. 3(a) および(b)に一軸での引張および圧縮試験から得られた高靱性 FRC の応力-ひずみ曲線をそれぞれ示す。同図(a)の曲線より、本研究で用いた FRC が鉄筋のような疑似降伏棚を有する引張応力-ひずみ関係を有し、1%を超えるような引張ひずみに耐えることが分かる。また、Fig. 3 (b)から、引張性状とは異なり高靱性 FRC の圧縮性状は通常のコンクリートと類似であることが分かる。Table 2 は各はり試験体に対応する高靱性 FRC およびコンクリートの材料試験の結果をまとめたものである。Table 2 の値は 3 体の供試体の平均であり、終局引張ひずみ  $\epsilon_{cu}$  はひずみの増加に対して応力が連続的に減少し始める点で定義した。Table 2 にあるように高靱性 FRC の引張性能のばらつきが大きかった

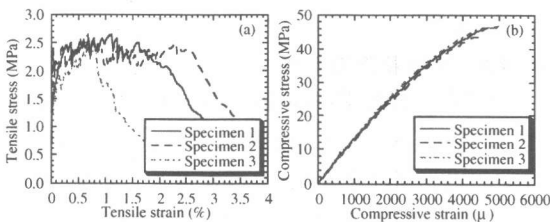


Fig. 3 Stress-strain relation of ECC

が、先に述べた目標性能を満足している。また、Table 3 には鋼材の材料試験結果を示す。

### 3.2 せん断実験結果

各試験体のせん断力-変位の関係を Fig. 4(a)~(f) に示す。Fig. 4 の横軸に示す変位は加力点の位置で測定した値である。Fig. 4(a) によれば、ECC-1-1 試験体は、Fig. 4(b) の RC-1-1 試験体と比較して、せん断補強筋の降伏時に剛性の低下が見られないことが分かる。また、RC-1-1 では、コンクリート表面に圧壊ひびわれによるポップアウトが観察され、せん断圧縮破壊したと考えられるが、ECC-1-1 では明確な圧壊の兆候は観察されなかった。Fig. 4(c) の ECC-1-0 試験体では、変位が 2 mm を越えた辺りから剛性(勾配)がほとんど 0 に近く、最大せん断力に達するまで大きな変形能力を示した。これとは対照的に、Fig. 4(d) に示す RC-1-0 試験体では、低いせん断荷重と小さな変位の時点で脆性的にせん断破壊した。  $M/QD = 0.5$  の試験体である ECC-0.5-1 ( $p_w=1\%$ ) および ECC-0.5-0 ( $p_w=0\%$ ) では、Fig. 4(e) および Fig. 4(f) に表すように、せん断補強の量が大きく違うにも関わらず、双方とも類似の履歴曲線を示した。これら  $M/QD = 0.5$  の試験体では、せん断圧縮で破壊するものと予想されたが、ECC-1-1 の場合と同様に高

Table 2 Mechanical property of cement material

Beam specimen	Elastic modulus $E_c$ (GPa)	Uniaxial tension		Uniaxial compression		Flexural Modulus of rupture (MPa)
		Tensile Strength $\sigma_{peak}$ (MPa)	Ultimate tens. strain $\epsilon_{cu}$ (%)	Comp. strength $\sigma_b$ (MPa)	Ultimate comp. strain $\epsilon_c$ (%)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
ECC-1-1	13.0	3.57	3.34	41.2	0.451	7.85
ECC-1-0	12.8	2.61	1.40	45.7	0.484	8.08
ECC-0.5-1	12.8	3.38	1.21	40.1	0.406	9.19
ECC-0.5-0	13.4	3.38	1.21	41.6	0.384	8.71
RC-1-1	23.9	2.55	-	30.5	0.192	-
RC-1-0	24.4	2.31	-	33.6	0.220	-

Table 3 Mechanical property of re-bar

Re-bar		Yielding stress (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Strength (MPa)
Transverse reinforcement	D6	364	194	406
Longitudinal reinforcement	D13	563	192	708

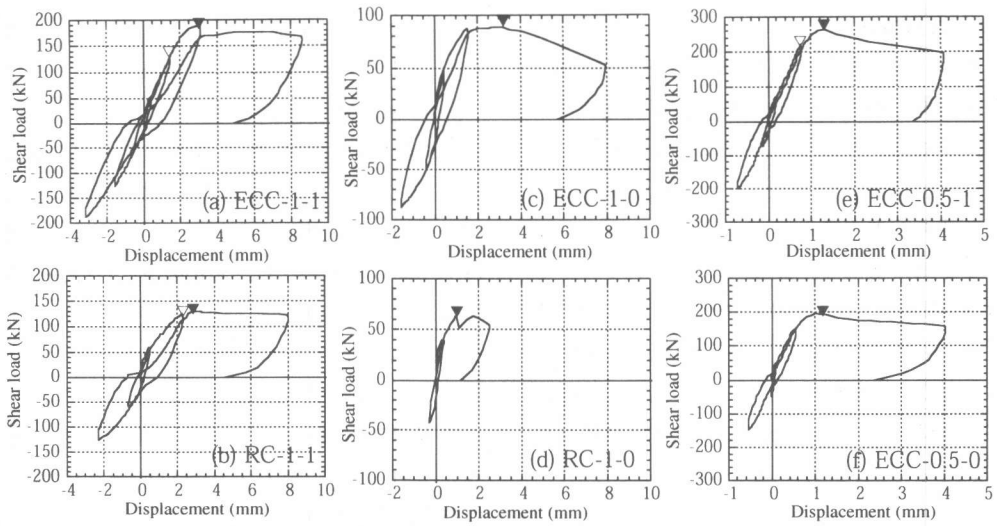
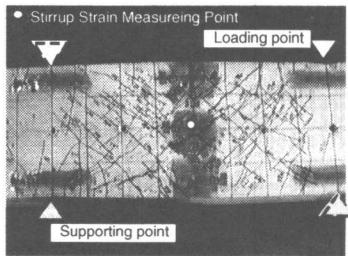
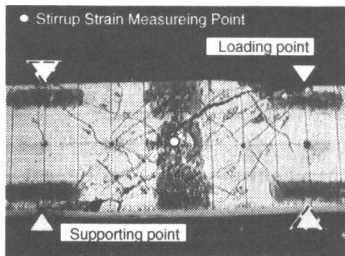


Fig. 4 Load-displacement curve in shear beam test ( $\nabla$ : trans. reinf. yielding,  $\blacktriangledown$ : peak point)



(a) ECC-1-1



(b) RC-1-1

Fig. 5 Specimen surface after loading test

靱性 FRC に圧壊の兆候は見られなかった。はりせん断実験における最大耐力点での性能を各試験体毎に Table 4 にまとめておく(表中、終局せん断応力  $\tau_u$  はせん断耐力  $Q_u$  を断面積で除して求めた)。

破壊後の試験体表面のひびわれ発生状況は、コンクリートと高靱性 FRC との間で大きく異なる結果となった。Fig. 5(a)および(b)に ECC-1-1 と RC-1-1 の試験体表面をそれぞれ示す。図中

Table 4 Summary of loading test result

Specimen	Ult. Shear Capacity $Q_u$ (kN)	Ult. Shear Stress $\tau_u$ (MPa)	Ult. Disp. $\delta_u$ (mm)	Ult. Rot. Angle $R_u$ (rad. $\times 10^{-3}$ )
ECC-1-1	186	6.20	3.04	7.60
ECC-1-0	89.4	2.98	3.17	7.91
ECC-0.5-1	262	8.73	1.32	6.60
ECC-0.5-0	193	6.44	1.19	5.95
RC-1-1	128	4.27	2.91	7.28
RC-1-0	62.7	2.09	0.974	2.44

(Values are at peak point)

に、正載荷の加力点および支点を実線の三角形で、また、負載荷の場合を破線の三角形で示した。Fig. 5(a)と(b)の比較から、高靱性 FRC の方がひびわれの発生密度が明らかに高いことがわかる。高靱性 FRC は、先に述べたように、で微細な引張りひび割れを多数発生させることで高い引張りひずみ能力を発揮するが、同材料を圧縮せん断破壊するような部材へ用いた場合でも同様のひび割れが生じることを表している。

## 4 考察

### 4.1 実験要因の影響

各試験体の荷重-変位包絡線をまとめて示したのが Fig. 6 である。図中で、白抜きの三角形( $\nabla$ )はせん断補強筋が降伏した点を、また、黒い三角形( $\blacktriangledown$ )は最大耐力点(本研究でいう“終局”)とはこの点を意味することに示す。

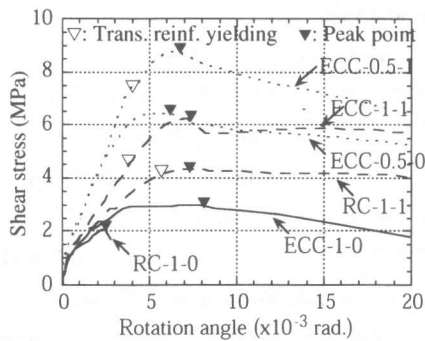


Fig. 6 Load-displacement envelop curve

Table 5 Effect of experimental parameter

Parameter (1)	Condition (2)	Improvement (%)		Comparison (5)
		$Q_u$ (3)	$F_u$ (4)	
Using ECC	$p_w=0\%$	42.6	225	RC-1-0 and ECC-1-0
	$p_w=1\%$	45.3	4.47	RC-1-1 and ECC-1-1
Using Trans. Reinf.	M/QD=1	108	-3.95	ECC-1-0 and ECC-1-1
	M/QD=0.5	35.6	19.9	ECC-0.5-0 and ECC-0.5-1
Decreasing M/QD	$p_w=0\%$	116	-24.8	ECC-1-0 and ECC-0.5-0
	$p_w=1\%$	40.9	-13.2	ECC-1-1 and ECC-0.5-1

また、実験要因が構造性能に与える影響をまとめたものがTable 5である。まず、第一の要因である高韌性 FRC の効果であるが、Table 5から耐力および変形性能の向上に大きく寄与することができると言える。高韌性 FRC を用いることにより、耐力については支配モードに関わらず 40%程度向上し、せん断引張の場合には変形性能もさらに 200%程度大幅に改善される。

次に、第二の要因であるせん断補強筋を高韌性 FRC と組み合わせることによる効果は、せん断スパン比により異なることが分かった。M/QD=1 の場合には変形性能の向上には大きな変化はないが、耐力が 2 倍程度に大きく向上すること、および M/QD=0.5 の場合には耐力・変形とも若干の向上が見られることが分かる。これは、M/QD=0.5 の場合には、強いアーチ機構でせん断荷重に抵抗できるため、せん断補強筋によるトラス機構の増強は効果が薄かったためと考えられる。

第三の要因である M/QD の影響は興味深い結果を含んでいる。Table 5を見ると、M/QD が 1 から 0.5 へ減少することにより、せん断耐力は

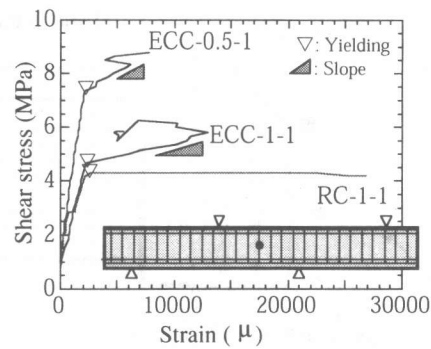


Fig. 7 Strain behavior in transverse reinforcement

41~116%向上し、せん断補強筋がない場合の方が向上の幅は大きい。変形性能は、せん断スパン比の減少により 20%程度小さくなるが、Fig. 6の結果を見ると、M/QD=0.5 の試験体は、せん断補強筋の有無に関わらず、1.0 の試験体と同様のかかなり韌性に富む挙動を示している。一般に、RC 部材では M/QD<1 程度の短スパンでは変形性能を向上させることは必ずしも容易ではないと言われており、せん断補強筋なしであっても、高韌性 FRC を用いることで耐力と変形性能を確保できる可能性があるとの結果は注目値する。

#### 4.2 鉄筋付着の検討

高韌性 FRC では、数多くの微細ひび割れが発生し、マクロに見ると伸び能力が鉄筋の降伏点を大きく上回ることから、R/ECC における鉄筋の付着性状は RC の場合と大きく異なることが予想される。Fig. 7は、このような鉄筋付着性状を表したもので、はり中央部でのせん断補強筋ひずみと試験体の平均せん断応力の関係を FRC-1-1, RC-1-1, および FRC-0.5-1 の 3 試験体について比較している。RC-1-1 では、せん断補強筋の降伏後、勾配がほとんど 0 となり、せん断力の増加なしにひずみが大きく増加しているのに対して、ECC-1-1 および ECC-0.5-1 では正の剛性を保持していることが分かる。このことは、鉄筋は高韌性 FRC から抜け出しておらず、両者のひずみ挙動に大きなずれがないことを表していると考えられる。したがって、少なくとも鉄筋の降伏後ある程度のひずみまで

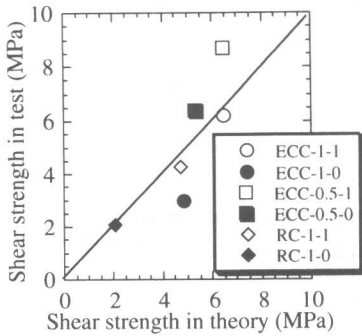


Fig. 8 Comparison of shear load resistance between test and theory

は、鉄筋と高靱性 FRC はマクロに見ると一体となって挙動をしており、見かけ上は完全付着であると考えてよい可能性がある。

しかし、補強筋ひずみが 1% (10000  $\mu$ ) の辺りでせん断力が増加しているにも関わらず、ひずみが減少したあと再び増加するような不規則な動きをしていることが Fig. 7 から分かる。このようなひずみの緩和が起こった領域は、ひずみの値から判断すると、Fig. 3(a) に示した引張応力-ひずみ曲線の疑似降伏棚の終点に近づいていることが考えられ、付着が劣化している兆候とも思われる。このような R/ECC に関する鉄筋付着についての研究例は少なく、今後の重要な課題としてさらなる検討が必要である。

#### 4.3 せん断耐力式の適用性

先に述べたように、(1)~(3)式は、アーチ・トラス近似によるせん断耐力式を一部改良し繊維補強による効果を考慮して簡易に評価しようとするものである。これらの式を用いてせん断耐力を算定し、実験値との比較を行った結果が Fig. 8 である。(1)~(3)式の評価は Table 6 の値を入力して行った。Fig. 8 で、算定値は RC の実験値を精度よく再現している。R/ECC のせん断耐力については、実験値と算定値は概略では一致しているが、50%程度の大きな誤差を含む試験体があることが分かる。従って、(1)~(3)式に用いたような簡単な近似では耐力を高い精度で予測することは難しいことが分かった。精度のよい耐力予測式の確立は今後の課題である。

Table 6 Parameter in analysis

Parameter	R/ECC	R/C
$p_w$	0.01, 0	0.01, 0
$j_i$ (mm)	133	133
D (mm)	200	200
b (mm)	150	150
L (mm)	200, 400	400

## 5 まとめ

本研究では、高靱性 FRC と鉄筋を組み合わせた部材 (R/ECC 部材) の基礎的なせん断性状を明らかにするために、短スパンはりのせん断実験を

実施した。その結果次の結論が得られた。

1. 高靱性 FRC を用いることで、せん断耐力および変形性能を大きく向上させることが可能であり、せん断引張破壊が支配的な場合にその効果はより大きい。
2. 高靱性 FRC を用いることで、RC では靱性確保が容易ではない  $M/QD < 1$  のような短スパンのはりであっても変形性能に富む挙動とすることができる。
3. R/ECC における鉄筋付着は、鉄筋が降伏した後も鉄筋の抜け出しがなく、ある程度のひずみまでは完全付着と見なせる可能性がある。

## 参考文献

- [1] High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 2), A. E. Naaman and H. W. Reinhardt Ed., RILEM Proceedings 31, 1995
- [2] 蔵谷, 福山他, 高靱性型セメント系複合材料を用いたはり部材の構造性能, コンクリート工学年次大会論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 511-516, 1999
- [3] 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990

注) 本論文の結果の概要は既発表\*であるが、ここでは実験結果の詳細について記述し、鉄筋付着等の新たな検討を加えて再構築した。

\*Kanda, T. et al., Application of Pseudo Strain Hardening Cementitious Composites to Shear Resistant Elements, Proceedings of FRAMCOS-3, pp.1477-1499, 1998