

## 論文 押出成形 HPFRCC の引張性状と塩害照査の一例

西松 英明<sup>\*1</sup>・宮里 心一<sup>\*2</sup>・林 承燦<sup>\*3</sup>・六郷 恵哲<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究では、押出成形により作製した複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（押出成形-HPFRCC と略記する）の引張試験を行ない、0.2%、0.5%、1.0%の引張ひずみ時におけるひび割れ幅をマイクロスコープにより観察した。その結果、押出成形-HPFRCC の引張終局ひずみは平均値で1.2%であり、最大ひび割れ幅はひずみの増加に伴い増大し、1.0%までのひずみにおける最大ひび割れ幅は0.15mm以下となることが確認された。また、これらの結果をもとに押出成形-HPFRCC のひび割れ幅を考慮した塩害劣化予測を例示した。

**キーワード**：押出成形、短繊維補強、HPFRCC、引張ひずみ、ひび割れ幅、拡散係数

## 1. はじめに

押出成形法はセメント系材料の工業的な製造方法の一つであり、外装用パネル、型枠材、床板などの製造に広く利用されている。その特徴として、キャストニングなどに比べ一貫した連続生産が可能であり、かつ緻密な製品が得られることが挙げられる。しかしながら、得られる製品は脆弱的な性質を有するため、用途の拡充を図る上では高靱性化が求められる。

近年、補修材や補強材などへの用途を目的とした HPFRCC に関する研究が数多く為されている。押出成形されたセメント系材料においても、短繊維を混入し、複数の微細なひび割れの発生を利用した高靱性化に関する配合設計、開発がなされてきた<sup>1)</sup>。これら押出成形-HPFRCC の用途として、その優れた構造特性を活かし、かつ施工時の合理化を図るため、永久型枠など表面被覆材用途への適用が検討されている。これまで当研究では、押出成形-HPFRCC を表面材に用いた RC 複合体の曲げひび割れ部における耐久性評価を検討してきた。その結果、押出成形-HPFRCC により被覆された RC 複合体では、RC のみの供試体に比べ、ひび割れが複数に分散し、

ひび割れ幅が小さく抑制されることから、劣化因子の進入が抑制され高い耐久性を有することが確認されている<sup>2) 3)</sup>。

現状、土木学会において HPFRCC の特性を有効に構造物へ適用する目的で設計・施工指針(案)の策定が進められており、引張性能(強度・ひずみ・ひび割れ幅)による設計用材料特性値の設定、これら特性値を考慮した構造性能照査、および使用時にひび割れ幅を考慮した塩害照査に関する検討がなされている。

押出成形-HPFRCC においても、HPFRCC の特性を有効かつ適切に構造物へ適用していく上では、引張り試験を行ない、引張性能を定量的に把握する必要がある。しかしながら、これまで押出成形-HPFRCC において引張り試験を行ない、引張応力-ひずみ曲線の計測、ならびにひび割れ性状の観測を行った報告例は少ない。

本研究では、押出成形-HPFRCC において引張試験を行ない、引張ひずみ発生時のひび割れ幅を測定し、ひび割れ幅の変化について観察を行った。さらに、本結果をもとに拡散セル実験から得られた押出成形-HPFRCC の塩化物イオン拡散係数を用い、ひび割れ幅を考慮した場合の劣

\*1 倉敷紡績(株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 金沢工業大学 環境・建築学部 助教授 工博 (正会員)

\*3 (株)デーロス メンテナンス事業本部 工博 (正会員)

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表－1 使用材料および配合例 [質量比]

セメント	珪石粉	ビニロン	パルプ	増粘剤
1.00	0.60	0.05	0.01	0.01

\* ビニロン : 4vol%, W/C=0.5

表－2 基本物性

項目	試験方法 (供試体寸法)	単位	測定値*
密度	アルキメデス法	g/cm <sup>3</sup>	1.88
圧縮強度	JIS K 6811 (15×15×30mm)	N/mm <sup>2</sup>	76.0
曲げ強度	JIS A 1408 (80×15×250mm)	N/mm <sup>2</sup>	28.0 (12.4)

\*測定値は繊維配向方向の値  
括弧内の値は繊維配向直角方向の値

化予測について一例を示す。

## 2. 押出成形-HPFRCC について

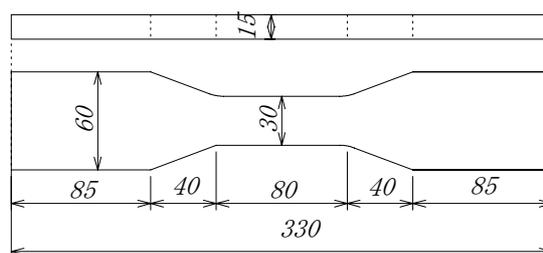
押出成形-HPFRCC の使用材料および配合を表－1に示す。補強繊維には、ビニロン繊維(繊維長 6mm, 繊維径 0.04mm)を用いた。パルプ、増粘剤は押出成形助剤として添加した。押出成形において、各原料種はミキサー内で混合した後、ニーダーを用いて混練を行った。混練後の原料生地は粘土状となり、押出に適当な可塑性および流動性が得られる。押出成形にはスクリー型の押出機を用いた。原料生地は、スクリーにて圧縮され、真空スペースで十分に締め固められながら押出機先端に取り付けられた金型の形状どおりに押出成形された。本試験では、金型に W250mm×T15mm の平板形状を取付け成形した後、約 60℃で1日間の蒸気養生を行い作製した。表－2に押出成形-HPFRCC の基本物性を示す。

## 3. 押出成形-HPFRCC の引張性状

### 3.1 実験概要

供試体の形状を図－1に示す。ここで、押出成形-HPFRCC は、断面を 60×15mm, 長さ 330mm に切断後、写真－1に示すサンプルホルダー内に固定したままサンプル作製機を用い、ダンベル型形状となるよう切削加工を施した。

単位(mm)



図－1 供試体形状



写真－1 ダンベル型供試体を切削加工するために用いるサンプルホルダー



写真－2 引張試験装置<sup>4)</sup>

一軸引張試験装置<sup>4)</sup>を写真－2に示す。本試験に用いた装置は鋼製フレーム中で、上下の掴み具により供試体の肩部を掴んで引張力を伝達させる構造となっている。

引張試験における载荷は建研式付着試験装置を用い、上面に取り付けたロードセルにより荷重を検出した。また、変位を供試体に直接取り付け付けた高感度変位計(検長 80mm)により測定した。また、ひび割れ幅の観察は、引張ひずみ 0.2%, 0.5%, 1.0%の各段階で载荷を停止し、マイクロスコープを用いて観察した。観察区間は検長区

間の両端部を除く約 60mm とし、測定箇所は比較的ひび割れ幅が大きくなると考えられる供試体側面付近の領域とした。写真-3には、ひび割れ幅計測に用いた画像データの例を示す。

### 3.2 実験結果

表-3, 図-2, 図-3, 図-4に押出成形-HPFRCCの引張試験結果, および引張ひずみ0.2, 0.5, 1.0%の各段階におけるひび割れ幅測定結果を示す。

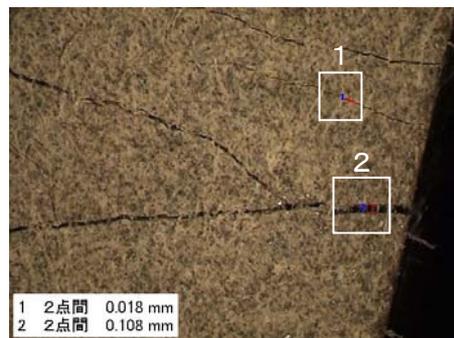
#### (1) 押出成形-HPFRCCの引張性能

本実験において実施した全ての供試体は検長内で破壊が生じることが確認され、切削加工により作製したダンベル型供試体を用いて引張試験を確実に行うことができた。また、表-3, 図-2に示すように、押出成形-HPFRCCのすべての供試体において脆性的な破壊に至らず、初期ひび割れ発生後においても引張応力を伝達し複数の微細なひび割れを生じながら、擬似ひずみ硬化挙動を示すことが確認された。引張強度は平均値で $9.5\text{N/mm}^2$ となり、引張ひずみの平均値は1.2%となった。なお、図-2ではひずみ0.2%, 0.5%, 1.0%時で荷重の操作を数分間止めた状態でひび割れ観察を行ったため、その間供試体のひずみは増加し、荷重は低下している。

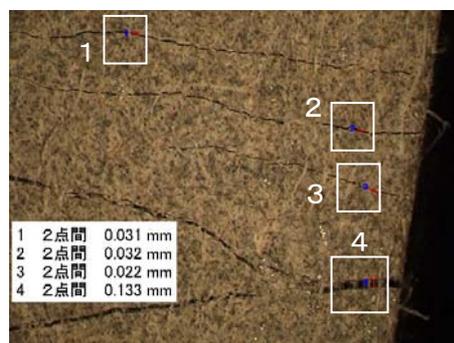
#### (2) 引張ひずみとひび割れ幅

図-3に引張ひずみと平均ひび割れ幅の関係を示す。これによると、押出成形-HPFRCCでは0.2%までの引張ひずみにおいて平均0.05mm程度のひび割れ幅が発生し、引張ひずみ1.0%では平均値で0.06mmであり、引張ひずみが増加して

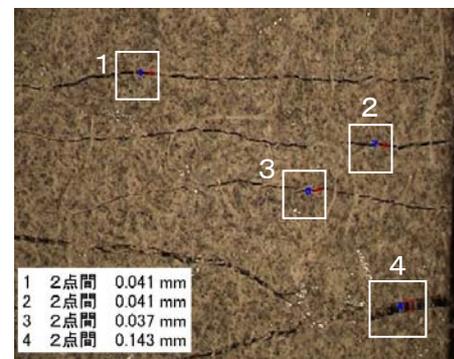
も大きな変動は見られなかった。写真-3からもわかるように、0.2%以降において新たに微細



(a) ひずみ 0.2% 時



(b) ひずみ 0.5% 時



(c) ひずみ 1.0% 時

写真-3 ひび割れ計測画像

表-3 基本物性

	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	終局ひずみ (%)	ひずみ 0.2%時			ひずみ 0.5%時			ひずみ 1.0%時		
			ひび割れ幅(mm)		ひび割れ本数 (本)	ひび割れ幅(mm)		ひび割れ本数 (本)	ひび割れ幅(mm)		ひび割れ本数 (本)
			最大値	平均値		最大値	平均値		最大値	平均値	
1	9.1	1.0	0.08	0.04	1	0.05	0.05	1	0.07	0.04	3
2	9.7	1.3	0.08	0.08	4	0.10	0.06	4	0.13	0.06	7
3	9.4	0.9	0.05	0.04	3	0.13	0.07	4	0.14	0.07	5
4	9.7	1.5	0.13	0.07	—	0.08	0.08	2	0.08	0.06	3
5	10.5	1.3	—	—	8	0.13	0.04	10	0.14	0.04	12
6	9.1	1.3	0.11	0.03	4	0.12	0.06	5	0.14	0.05	8
平均値	9.5	1.2	0.09	0.05	4	0.10	0.06	4	0.12	0.06	6
偏差	0.6	0.4	0.03	0.02		0.03	0.01		0.03	0.01	

なひび割れの数が増加し、ひび割れ幅の上限が一定の値になっている。一方、図-4に示す、引張ひずみと最大ひび割れ幅の関係では、引張ひずみ増加に伴い、ひび割れ幅が増加する傾向がみられる。最大ひび割れ幅は、引張ひずみ 1.0% 時において、0.15mm 以下程度となることが確認できた。しかしながら、各供試体において、ひび割れ幅、ひび割れ本数のばらつきは比較的大きくなることから、今後は確率的手法を用いた検討が必要となるものと考えられる。さらに、供試体厚みや試験装置間での影響に関する検討についても今後の課題となる。

#### 4. ひび割れ幅を考慮した塩害照査への検討

本章では、3章の結果をもとにひび割れの許容を前提とした押出成形-HPFRCC における塩害劣化予測に関し、一例を示す。

##### (1) ひずみとひび割れ幅の関係 (STEP1)

図-4より、ひずみをパラメータとし、最大ひび割れ幅を算定する式を導くと、式(4.1)が得られる。

$$\begin{aligned} W_{\max} &= 0.35 \times \varepsilon \quad (0 \leq \varepsilon \leq 0.2) \\ W_{\max} &= 0.10 \times (\varepsilon - 0.2) + 0.07 \quad (0.2 < \varepsilon \leq 0.5) \\ W_{\max} &= 0.04 \times (\varepsilon - 0.5) + 0.12 \quad (0.5 < \varepsilon \leq 1.0) \end{aligned} \quad (4.1)$$

##### (2) 最大ひび割れ幅と塩化物イオン拡散係数の関係 (STEP2)

図-5に久保田らによる塩化物イオン拡散係数と最大ひび割れ幅の関係を示す<sup>5)</sup>。これは、予めひび割れを導入した押出成形-HPFRCC 供試体を用い、拡散セル法を用いた塩化物イオン浸透性試験から得られた結果である。また、図中には、前田ら<sup>6)</sup>によるひび割れを有する普通モルタル (W/C=0.40, 0.50)、塚原ら<sup>7)</sup>によるひび割れを有するコンクリート (W/C=0.50) の結果も加えてある。これらの値を用い、押出成形-HPFRCC における最大ひび割れ幅とひずみの積で整理した塩化物イオン拡散係数の関係を図-6に示す。これより (STEP1) で得られた最大幅を用いて、塩化物イオンの拡散係数を算出すると式(4.2)となる。

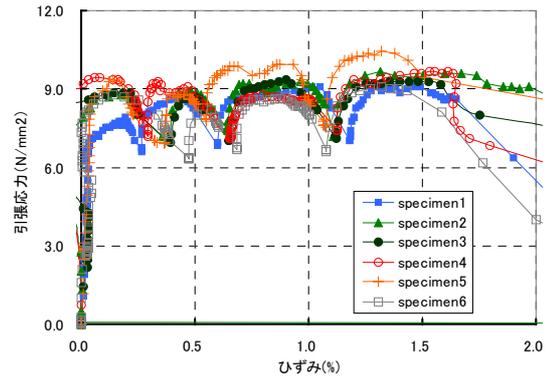


図-2 引張荷重とひずみの関係

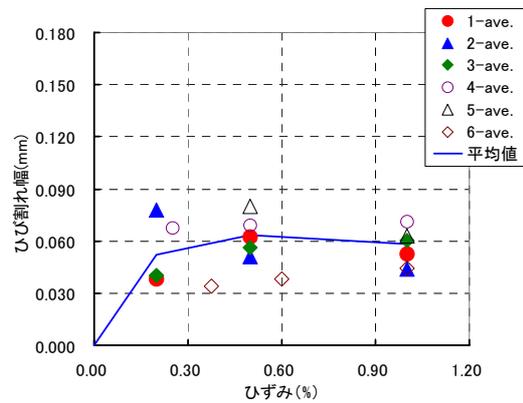


図-3 引張ひずみと平均ひび割れ幅の関係

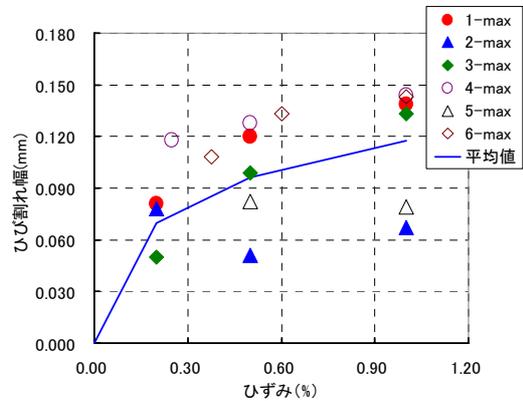


図-4 引張ひずみと最大ひび割れ幅の関係

$$D_d = D_k + a \log(\varepsilon \cdot w^2) \quad (4.2)$$

ここで、 $D_d$  は塩化物イオン拡散係数の設計値 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $D_k$  は材料により定まる係数で、ひび割れのない HPFRCC の塩化物イオン拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )に相当する。また、 $a$  は HPFRCC 中における塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れと引張ひずみの影響を表す定数で材料により定まる値である。 $\varepsilon$  は引張ひずみの算定値、 $w$  は最大

ひび割れ幅の特性値(mm)を示す。これより、微細ひび割れが生じた押出成形-HPFRCC の拡散係数は概ね 1.0~2.0cm<sup>2</sup>/年程度の値をとることが確認された。

### (3) 塩化物イオンの浸透予測 (STEP3)

塩化物イオンの浸透予測には、式 (4.3) に示す Fick の拡散式を用いて、押出成形-HPFRCC 内部の塩化物イオン浸透を予測する。本報告では、表面塩化物イオン量を 4.5kg/m<sup>3</sup> (海岸から 100m の距離に相当する)、鉄筋腐食の開始時期に関しては、鉄筋位置における塩化物イオン量が 1.2kg/m<sup>3</sup> に達する時点で腐食が開始することとした。

$$C(x,t) = 1.3 \times 4.5 \times \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_d \times t}} \right] \quad (4.3)$$

ここで、C(x,t)は塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)、x はかぶり深さ(mm)を、t は供用期間を示す。

### (4) 検証事例

かぶり 5cm の全面が押出成形-HPFRCC により被覆されているとし、部材に生じるひずみを 0.12%と仮定した場合のケース (図-7) について、上記 (STEP1) から (STEP3) の検討事項をもとに塩害劣化予測を行う。

ひずみを 0.12%とした場合、式 (4.1) より押出成形-HPFRCC には最大ひび割れ幅 0.04mm となる複数微細ひび割れが生じると算定される。また、最大ひび割れ幅が 0.04mm の場合の塩化物イオン拡散係数は、式 (4.2)、および図-6 から 1.37cm<sup>2</sup>/年であることが算出される。

図-8 は式 (4.3) を用い、最大ひび割れ幅が 0.04mm 生じた押出成形-HPFRCC のかぶり 5cm における塩化物イオン濃度と供用年数の関係を示す。また、図中には、ひび割れ無しの押出成形-HPFRCC、ひび割れ無しのコンクリート

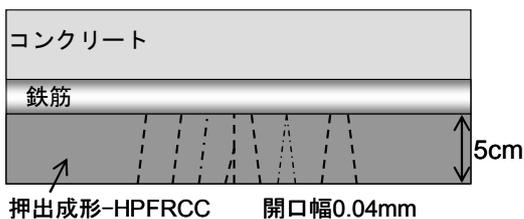


図-7 対象部材

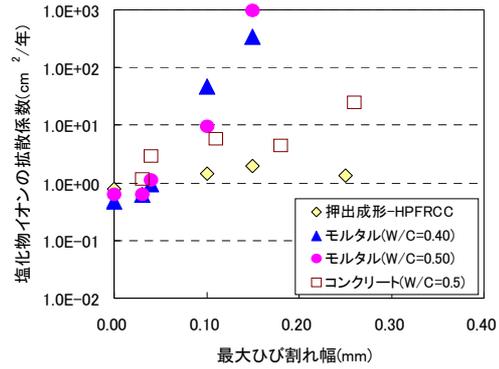


図-5 塩化物イオン拡散係数とひび割れ幅

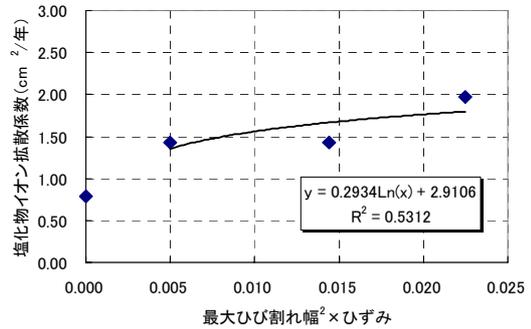


図-6 塩化物イオン濃度の算定

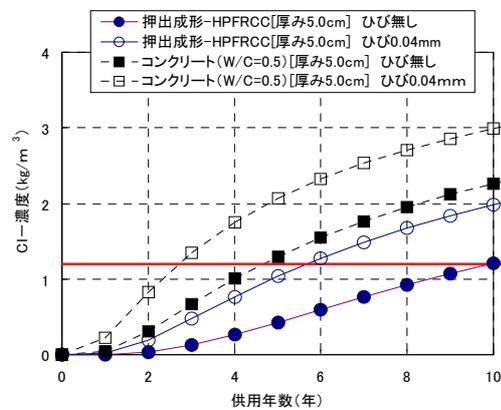


図-8 塩化物イオン濃度と供用年数の関係

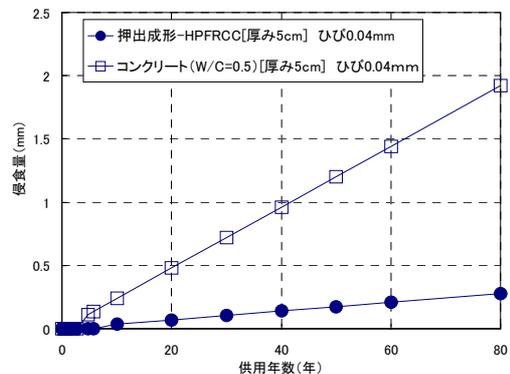


図-9 腐食量と供用年数の関係

(W/C=0.5), および最大ひび割れ幅が 0.04mm 生じたコンクリート (W/C=0.5) のかぶり 5cm における塩化物イオン濃度と供用年数の関係も示す。これによると, かぶり位置 5cm の位置における塩化物イオン量が  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$  に達し, 鉄筋腐食が開始するまでの期間は, ひび割れのない押出成形-HPFRCC の約 10 年に比べ, ひび割れが 0.04mm 生じた場合では 5.7 年と短くなるが, ひび割れ無しのコンクリート (W/C=0.5) の 4.7 年より長く, 最大ひび割れ幅が 0.04mm 生じたコンクリート (W/C=0.5) のおよそ 2 倍の時間を要することが予測される。

次に鉄筋腐食量と供用期間の関係を図-9 に示す。最大ひび割れ幅が 0.04mm 生じた押出成形-HPFRCC, および最大ひび割れ幅が 0.04mm 生じたコンクリート (W/C=0.5) の腐食速度は, それぞれ  $0.0035\text{mm}/\text{年}$ ,  $0.0240\text{mm}/\text{年}$  とした<sup>2)</sup>。ひび割れ部における腐食速度を比較した場合, 押出成形-HPFRCC では, 80 年後においても鉄筋腐食量は 0.3mm 程度とコンクリート (W/C=0.5) の場合の 1/6 程度に抑制されることが確認された。押出成形-HPFRCC では, ひび割れ幅が狭く, また深さも浅くなることから, 酸素透過量も抑制され腐食速度が低下するものと考えられる。以上の結果より, ひび割れを考慮した押出成形-HPFRCC の塩害照査の一例を示すことができた。

## 5. まとめ

本実験において, 押出成形-HPFRCC 供試体について以下のことを明らかにした。

- (1) 押出成形-HPFRCC においてダンベル型供試体を用いた引張試験を行った結果, 引張強度は平均値で  $9.5\text{N}/\text{mm}^2$ , 引張ひずみは平均値で 1.2% の値が得られた。
- (2) 押出成形-HPFRCC において引張ひずみ 0.2%, 0.5%, 1.0%発生時のひび割れ幅を測定し, ひび割れ幅の変化について観察を行った結果, 平均ひび割れ幅はひずみが増加しても一定の値となり, 引張ひずみ 1.0%において 0.06mm となった。また, 最大ひび割れ幅は ひずみの増加に伴って

増大し, ひずみ 1.0% において 0.12mm となることが確認された。

- (3) 上記結果をもとに, ひび割れを許容する場合の塩害劣化予測について検討を行った結果, かぶり 5cm の全面が押出成形-HPFRCC により被覆されているとし, 部材に生じるひずみを 0.12%と仮定したケースにおいて, 押出成形-HPFRCC の鉄筋腐食量は 80 年後において 0.3mm 程度であり, 同ひび割れ幅を有するコンクリート (W/C=0.5) の 1/6 程度に抑制されることが確認された。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会:高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書(II), 2004
- 2) 西松英明ほか:高靱性押出材料により被覆された鉄筋コンクリートの耐塩害性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.331-336, 2005.6
- 3) 西松英明ほか:押出成形された高靱性繊維セメント複合材料により被覆された鉄筋コンクリートの中性化に対する耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.413-418, 2006.7
- 4) 森山守ほか:複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性能と試験装置, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.311-316, 2006.7
- 5) 久保田憲ほか:押出成形された HPFRCC 板の拡散セル法による塩化物イオン拡散係数, 土木学会年次学術講演会, Vol.61, No.5, pp.713-714, 2006
- 6) 前田聡ほか:ひび割れを有するコンクリート中への塩化物イオン拡散に関する基礎的研究, 土木学会年次学術講演会, Vol.57, No.5, pp.1343-1344, 2002
- 7) 塚原ほか:塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.573-578, 2002