

# 論文 SHCC の鉄筋防食性能に与えるセメント量と繊維種類の影響

鈴木雅人\*1・六郷恵哲\*2・小林孝一\*3

**要旨:** 本研究では、SHCCの補修材としての性能を検討することを目的として、セメント量、繊維種類の異なる配合のSHCC 供試体を作製し、各配合の力学性能を確認した。そのうえで物質侵入抵抗性試験、鉄筋防食性能試験を行った。物質侵入抵抗性試験では、SHCCには微細ひび割れを通じて塩分が侵入し、ひび割れ面の塩分量にひび割れ幅が与える影響はなかったことを確認した。鉄筋防食性能試験では、SHCC内の鉄筋の腐食面積は、ひび割れ本数とモルタルマトリックスの水セメント比に大きく依存することを確認した。

**キーワード:** SHCC, セメント量, 繊維種類, 鉄筋防食性能

## 1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下 SHCC)<sup>1)</sup>は、一軸引張応力下において、疑似ひずみ硬化挙動を示し、複数微細ひび割れを形成する材料である。そのひび割れ幅は数  $10\mu\text{m}$  と微小であるため、高い鉄筋防食性能を持つことが期待され、鉄筋腐食が生じたコンクリート部材用の補修材としての適用が検討されている<sup>2)</sup>。しかし SHCC のひび割れ性状は、そのモルタルマトリックスの配合や用いる繊維の種類、量、さらにはモルタルマトリックスと繊維との付着性状によって異なる。SHCC 中に侵入する劣化因子は、ひび割れを通じて内部に移動するため、SHCC の配合が物質侵入抵抗性および鉄筋防食性能に与える影響は大きいものと考えられる。

本研究では、まず、セメント量、繊維種類などが異なる配合の SHCC 供試体を作製し、各配合の力学性能を確認した。そのうえで物質侵入抵抗性試験、鉄筋防食性能試験を行い、SHCC の補修材としての性能の検討を行うことを目的とした。

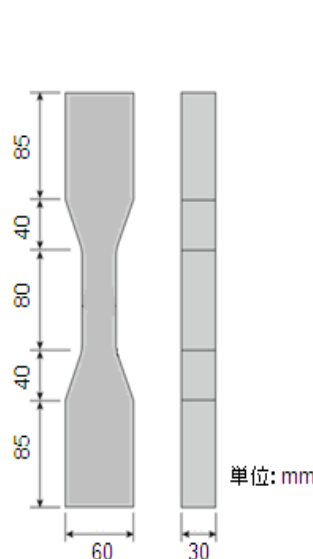


図-1 ダンベル供試体



図-2 一軸引張試験器

## 2. SHCC の力学性能に関する検討

### 2.1 供試体概要

供試体は図-1 に示すダンベル型供試体を用いた<sup>1)</sup>。

表-1 配合表

名称	W/C	W/P	S/P	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )							体積比(%)	
				セメント	水	石灰石微粉末	骨材	増粘剤	減水剤	PE繊維	PVA繊維	
PE-0	0.29	0.29	0.31	1264	371	0	200	195	0.9	28.2	1.5	0
PE-300	0.38	0.29	0.31	964	371	300	200	195	0.9	25.9	1.5	0
PE-600	0.56	0.29	0.31	664	371	600	200	195	0.9	17.0	1.5	0
PEPV-0	0.29	0.29	0.31	1264	371	0	200	195	0.9	28.1	0.75	0.75
PEPV-300	0.38	0.29	0.31	964	371	300	200	195	0.9	18.3	0.75	0.75
PEPV-600	0.56	0.29	0.31	664	371	600	200	195	0.9	12.6	0.75	0.75
PVA-0	0.29	0.29	0.31	1264	371	0	200	195	0.9	5.8	0	1.5
PVA-300	0.38	0.29	0.31	964	371	300	200	195	0.9	4.4	0	1.5
PVA-600	0.56	0.29	0.31	664	371	600	200	195	0.9	3.8	0	1.5

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

\*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科教授 博(工) (正会員)

表-2 繊維の種類

繊維種類	長さ (mm)	直径 ( $\mu\text{m}$ )	引張強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	弾性係数 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
PVA	12	40	1600	$4.0 \times 10^4$
PE	12	12	2580	$7.3 \times 10^4$

供試体は打設後1日で脱型し、その後1か月間、室温20℃に保たれた恒温室内で水中養生した。

## 2.2 使用材料および配合

表-1に使用した配合を示す。繊維は高強度ポリエチレン（以下、PE）繊維、高強度ポリビニロン（以下、PVA）繊維、PE繊維とPVA繊維の併用（以下、PEPV繊維）の3種類を使用した。用いた繊維の概要を表-2に示す。またモルタルマトリックスのW/Cの影響を確認するためセメントの一部を石灰石微粉末で $1\text{m}^3$ 当たり0, 300, 600 (kg)置換した。以上より計9種類の供試体を作製した。

## 2.3 実験概要

### 2.3.1 一軸引張試験

図-2の実験器具を用いて引張試験を行った。ひずみが0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0%のところ、マイクロSCOPE（倍率50倍）により供試体のひび割れを画像としてパソコンに取り込み、80mmの検長内のひび割れ本数とひび割れ幅を計測した。供試体ごとに計測したひび割れの平均を求め平均ひび割れ幅とした。また、ひび割れ位置を計測し平均ひび割れ間隔の算定に用いた。

## 2.4 結果および考察

表-3に一軸引張試験の結果を示す。紙面の都合上、割愛した応力-ひずみ曲線より、PVA-0以外、SHCCの疑似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特性が認められたが、PVA-0の供試体のみはひび割れ発生強度が引張強度と一致し、じん性が小さく疑似ひずみ硬化特性が認められなかった。

石灰石微粉末の置換量が増加するほど、ひび割れ発生強度と引張強度が低下し、終局ひずみが大きくなった。これは石灰石微粉末を置換すると、セメン

表-3 一軸引張試験結果

配合	一軸引張試験		
	ひび割れ発生強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	引張強度( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	終局引張ひずみ(%)
PE-0	6.47	7.17	0.90
PE-300	5.09	6.57	1.19
PE-600	5.02	5.66	2.29
PEPV-0	6.65	7.45	0.85
PEPV-300	5.20	6.69	1.20
PEPV-600	4.70	7.05	5.93
PVA-0	7.11	7.11	0.02
PVA-300	5.61	5.83	0.29
PVA-600	4.15	6.61	4.03

トの希釈効果によってモルタルマトリックス強度が低下したためであると考えられる。

石灰石微粉末置換量が0,  $300\text{kg}/\text{m}^3$ の場合、終局引張ひずみがPE繊維とPEPV繊維を用いた供試体で同程度であったが、それらよりもPVA繊維を用いた供試体は低い値となった。PVA繊維を用いた場合には、繊維の引張強度がPE繊維よりも小さいため、マトリックス強度が相対的に大きく、マトリックスのひび割れ発生時、ひび割れ幅の拡大時に繊維の破断が容易に発生したことがじん性の低下につながったためであると考えられる。

表-4に2.3.1に従って試験を実施した際に、終局引張りひずみに達する直前に最後に測定できたひび割れ性状を示す。ここで、平均ひび割れ間隔とは、両端のひび割れ間の距離をひび割れ本数で除したものである。終局引張ひずみ1.0%以上の供試体のうち、PVA繊維を用いた供試体はPE繊維、PEPV繊維を用いた供試体よりも平均ひび割れ幅が大きくなった。これはPE繊維に比べてPVA繊維の弾性係数が小さいため、ひび割れ部での繊維のマトリックスからの抜け出しと伸びが大きくなったためであると考えられる。さらにPVA-600は石灰石微粉末の置換量が多いために繊維とマトリックスの付着が弱く、繊維の抜け出し量と伸びが大きくなったと考えられる。またPVA-600の供試体はひび割れ本数が少なく

表-4 ひび割れ性状結果

名称	ひび割れ本数 (本)	平均ひび割れ幅 (mm)	最大ひび割れ幅 (mm)	平均ひび割れ間隔 (mm)
PE-0	30	0.06	0.13	2.22
PE-300	15	0.04	0.05	0.77
PE-600	24	0.05	0.10	0.99
PEPV-0	26	0.05	0.16	1.00
PEPV-300	18	0.06	0.18	3.06
PEPV-600	61	0.07	0.17	1.32
PVA-0	3	0.04	0.04	1.55
PVA-300	7	0.03	0.06	1.63
PVA-600	17	0.16	0.19	4.72



写真-1 切り欠き導入



写真-2 乾湿繰返し試験器

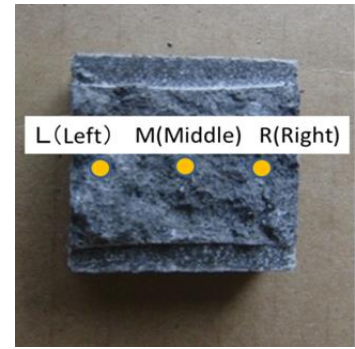


図-3 測定位置

ひび割れ間隔が大きい。これはひび割れ発生個所での繊維の抜け出しと伸びが大きくなり、新しいひび割れが発生しないためと考えられる。

### 3. ひび割れへの塩分浸入に関する検討

#### 3.1 実験概要

用いた配合は表-1と同様である。ただし石灰石微粉末置換量 600kg の配合は使用せず、一方、繊維を混入していない  $W/C=0.3$ ,  $C/S=0.5$  のモルタル (M 配合) を用いた。配合ごとに 2.1 節と同様のダンベル型供試体を 10 体ずつ作製し、図-2 の一軸引張試験器でひび割れ導入を行った。なお、ひび割れ発生箇所をある程度制御するため、あらかじめ写真-1 のように深さ 2~3mm の切り欠きを導入した。また普通モルタル供試体はひび割れ導入時の破断をさけるために、直径 5mm 程度の FRP 棒を埋め込んだ。それぞれの供試体に導入されたひび割れは、SHCC の各配合の平均ひび割れ幅が 0.016~0.024mm の範囲、M 配合は 0.09~0.25mm の範囲にあった。

その後、恒温室内に設置した乾湿繰返し装置 (写真-2) 内で濃度 3% の NaCl 溶液に 3 日間浸漬し、4 日間乾燥させるサイクルに 1 ヶ月間、あるいは 6 ヶ月間それぞれ 3 体ずつ曝した。以後 1 ヶ月間繰返し試験を行ったものを 1 か月測定、6 ヶ月のものを 6

ヶ月測定と呼ぶ。供試体は乾湿繰返し装置内に打設面が横になるように配置した。その後、一軸引張載荷にて供試体をひび割れ面にて完全に破断させた上で、蛍光 X 線分析装置 (写真-3) を用いてひび割れ面の表面近傍における塩化物イオン量を測定した<sup>3)</sup>。測定位置は供試体ひび割れ面の右部 (R)、中央部 (M)、左部 (L) の 3 箇所である (図-3)。

#### 3.2 実験結果および考察

図-4 に 1 ヶ月測定の塩化物イオン量を示す。測定位置 L, R は M に比べて塩化物イオン量が多い傾

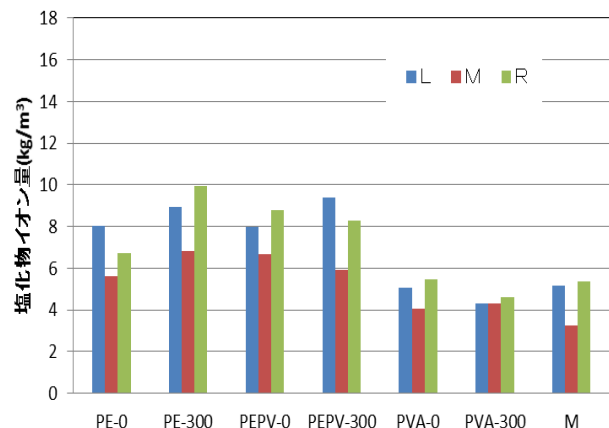


図-4 1ヶ月測定塩化物イオン量結果



写真-3 蛍光 X 線分析装置

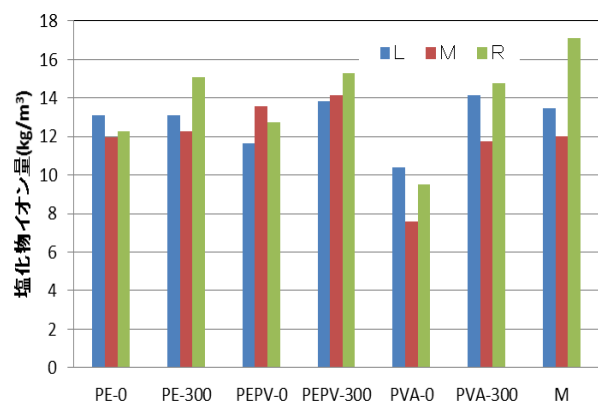


図-5 6ヶ月測定塩化物イオン量結果

表-5 切り出し供試体ひび割れ性状

配合	ひび割れ本数	ひび割れ幅(mm)		平均ひび割れ間隔 (mm)
		平均	最大	
PE-0	6~15	0.018~0.031	0.023~0.112	6.3~26.2
PE-300	3~11	0.018~0.032	0.020~0.064	7.0~20.3
PEPV-0	15~27	0.024~0.030	0.041~0.081	5.0~7.9
PEPV-300	8~33	0.017~0.036	0.020~0.102	4.0~16.7
PVA-0	6~15	0.020~0.037	0.020~0.110	1.0~18.8
PVA-300	4~12	0.020~0.033	0.029~0.143	10.3~22.5
M	1~3	0.022~0.325	0.023~0.633	0~61

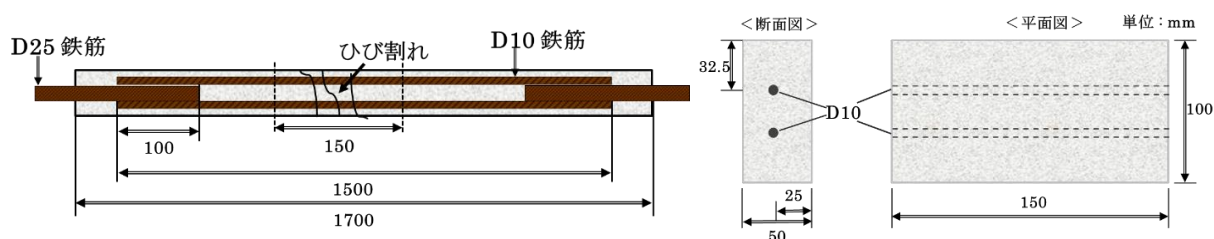


図-6 供試体概要

向が見られた。これは L と R は供試体表面に近い  
ため、塩水が到達しやすく、塩化物イオン量が侵入し  
やすいためであると考えられる。

配合同士で比較すると PE 繊維, PEPV 繊維を用  
いた供試体の方が PVA 繊維, M 配合よりも塩化物  
イオン量が大きくなった。PE 繊維を用いた供試体  
ではひび割れが発生した箇所繊維が抜け、その抜  
けた箇所に塩化物イオンが蓄積したため塩分量が多  
くなった可能性がある。ただし、図-5 に示すように、  
6 ヶ月測定時の塩化物イオン量は、ほぼすべての供  
試体で塩化物イオン量は高い値となっている。その  
ため、繊維の有無と種類、石灰石微粉末置換量の影  
響は見られない。

いずれにせよ、ひび割れ幅が極めて小さくとも、  
そのひび割れを通じて塩分は内部に浸入することが  
明らかとなった。

#### 4. 鉄筋防食性に関する検討

##### 4.1 実験概要

配合は 3.1 節と同じものを用いた。供試体概要を  
図-6 に示す。はり部材を 1 配合につき 2 体ずつ作製  
し、一軸引張荷重にてひび割れを導入した。ひび割  
れ導入後、はり部材 1 体につき長さ 150mm の寸法  
で供試体を 2 体切り出して供試体とした。

塩分の浸透を供試体上下面 (100×150mm の面)  
からに限定するため、エポキシ樹脂を供試体側面 4  
面に塗布した。鉄筋腐食を促進するために、3.1 節  
と同様の濃度 3% の NaCl 溶液による乾湿繰返し環  
境下にさらした。期間は 2 ヶ月、6 ヶ月の 2 種類で

ある。所定の乾湿繰返し期間が経過した後、供試体  
内部の鉄筋の腐食状況、塩分浸透度を確認するため、  
供試体を鉄筋と平行方向に割裂させ、断面に硝酸銀  
水溶液を噴霧し、断面の色の変化から塩分浸透部分  
を調査した。

その後、鉄筋をはり出し、鉄筋の腐食面積をプ  
ラニメーターにより測定した。

##### 4.2 実験結果および考察

表-5 に供試体のひび割れ性状を示す。図-7 に 2  
ヶ月測定時の最大塩分浸透深さを示す。PEPV 繊維を  
用いた供試体は他の SHCC の供試体より最大塩分  
浸透深さが大きかった。これは PEPV 繊維を用いた  
供試体は、他の SHCC 供試体と比べてひび割れ幅は  
同程度であったが、ひび割れ本数が多いこと、ひび

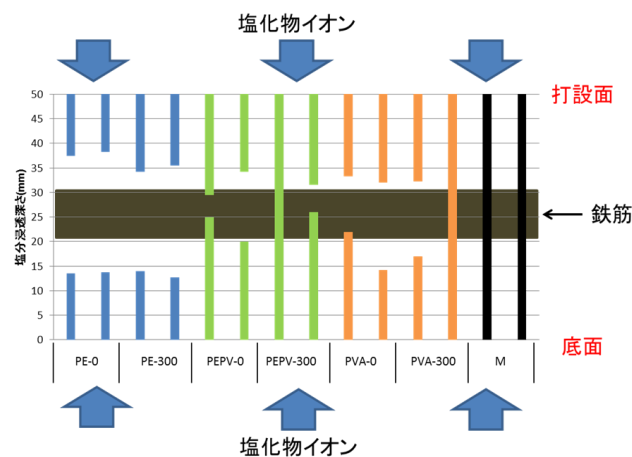


図-7 2ヶ月測定供試体最大塩分浸透深さ

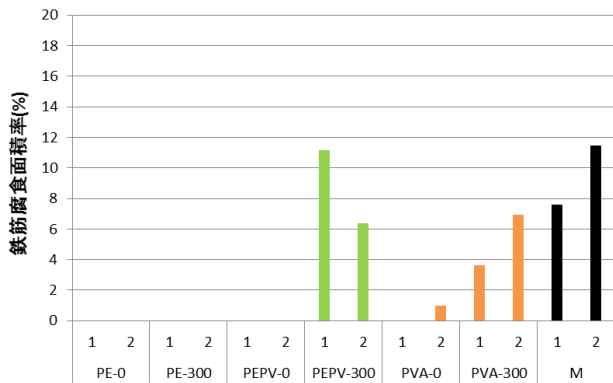


図-8 2ヶ月測定供試体腐食面積率

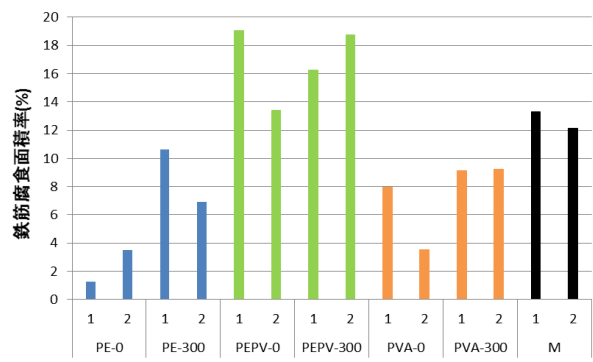


図-9 6ヶ月測定供試体腐食面積率

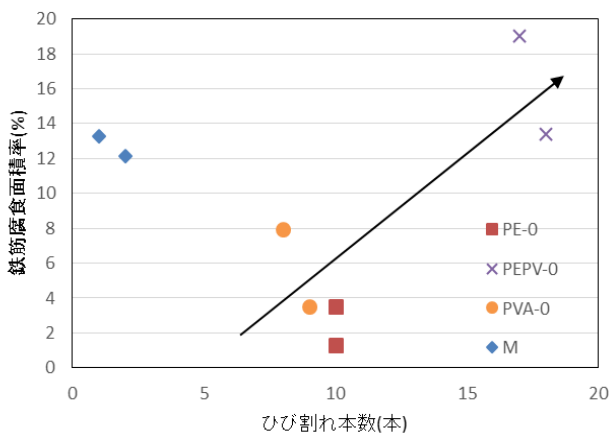


図-10 6ヶ月測定供試体のひびわれ本数と腐食面積率の関係

割れ間隔が狭いことが理由に考えられる。ひび割れ同士の結合や相互作用が多くなり、塩分が浸透しやすい状況であったと考えられる。また PVA-300 の供試体では、全面に塩分浸透していた供試体も存在した。これは、この供試体の最大ひび割れ幅が全供試体中で最も大きい値であった。

図-8 に 2ヶ月測定 の腐食面積率を示す。PEPV-300 の供試体は腐食面積が大きく、モルタル供試体よりもその値は大きかった。これは図-7 に示すように PEPV-300 の供試体が複数箇所から塩化物イオンが侵入しているため広い範囲で鉄筋が錆びたためと考えられる。モルタル供試体はすべての鉄筋に腐食が生じていた。これは図-7 に示したように M 配合では塩分は鉄筋位置まで到達しているためである。

図-9 に 6ヶ月測定 の腐食面積率を示す。全ての配合で腐食が生じている。PEPV 繊維を用いた供試体とモルタル供試体は PE 繊維、PVA 繊維を用いた供試体より大きい値となった。またはつり出した鉄筋を比べても、PEPV 繊維を用いた供試体とモルタル供試体の鉄筋には、積層錆が生じているなど、腐食度が大きい。一方 PE 繊維、PVA 繊維を用いた供試体の鉄筋はさびてはいるが、表面が変色してい

る程度であり、腐食度は小さい。

PE 繊維、PVA 繊維を用いた供試体では、石灰石微粉末置換量  $300 \text{ kg/m}^3$  の方が 0 より大きい値となった。これは置換量  $300 \text{ kg/m}^3$  の供試体の方が水セメント比が大きいためであると考えられる。

図-10 に 6ヶ月測定供試体のひび割れ本数と鉄筋腐食面積率の関係を石灰石微粉末量別に示す。なお、6ヶ月測定 の時点では、すべての供試体において塩分は鉄筋位置に達していた。SHCC 供試体はモルタル供試体と比較すると、ひび割れ本数は多いが、鉄筋腐食面積率は小さく、鉄筋防食性能が高い。しかし、PEPV 供試体のようにひび割れ本数が、多くなりすぎるとモルタル供試体よりも鉄筋腐食面積率は大きくなった。これは、モルタル供試体では局部腐食が生じたのに対して PEPV 繊維を用いた供試体では広範囲で腐食が生じたためであると考えられる。

SHCC 供試体ではひび割れ本数が増加するにつれて、鉄筋腐食面積率も大きくなった。また、置換量 300 の供試体は置換量 0 の供試体と比較すると、ひび割れ本数の増加に伴う鉄筋腐食面積率の増加率が大きい。これは、鉄筋防食のためには SHCC のモルタルマトリックスの水セメント率が重要であることを示している。

#### 4. まとめ

本研究では、SHCCの補修材としての性能を検討することを目的として、繊維種類、セメント量などが異なるSHCC供試体を作製し、SHCCの力学性能を確認した。その後、物質侵入抵抗性試験、鉄筋防食性能試験を行った。

① SHCCには微細ひび割れを通じて塩分が侵入し、ひび割れ面の塩分量にひび割れ幅が与える影響はなかった。

② SHCC内の鉄筋の腐食面積は、ひび割れ本数に大きく依存する。

③ SHCC内の鉄筋の腐食面積は、モルタルマトリックスの水セメント比に大きく依存する。

#### 謝辞

本研究で、西松建設 LE ANH DUNG 氏には岐阜大学院工学研究科社会基盤工学専攻在籍中に、熱心

かつ丁寧なご指導受け賜りました。ここに感謝の意を示します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，2007.3
- 2) Koichi Kobayashi, Takashi Iizuka, Hoshito Kurachi, Keitetsu Rokugo : “Corrosion protection performance of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites as a repair material”. *Cement & Concrete Composites*, vol 32: pp 411-420, 2010
- 3) 金田尚志, 魚本健人：塩化物測定用ポータブル型蛍光 X 線分析装置の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp. 1095-1100, 2007