論文 ひび割れを有する SHCC の塩分侵入抵抗性と鉄筋防食性能

小島 雄太*1・LE ANH DUNG *1・六郷 恵哲*2・小林 孝一*3

1.はじめに

従来,塩害などにより劣化したコンクリート構造物の 補修材としてポリマーセメントモルタル(以下 PCM) や,エポキシ樹脂系の補修材が多く使われている。

一方,ひずみ硬化型セメント複合材料(以下 SHCC) 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。通常,

SHCC はマルチプルクラック特性により,塩分侵入抵抗 性が高いとされ,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。他の補修材に 比べて安価であり,優れた塩分透過抑制をもつことから 今後の利用拡大が期待される。このような優れた材料特 性を有する SHCC の利用を拡大するためには,上記のよ うな性能を確保したうえで,使用目的に適した配合を使 い分けることが重要である。

本研究では、じん性の確保と施工性の向上の両立を目 指して、繊維混入率、W/C などが異なる4種類の配合の SHCC 供試体を作成し、供試体内部へのひび割れを通じ た塩分浸透、供試体内部の鉄筋に対する防食性を調査す る2種類の実験を行う。得られた結果からひび割れを有 した SHCC の補修材としての塩分侵入抵抗性、鉄筋防食 性能について検討を行う。

2. 塩分侵入抵抗性に関する実験

2.1 使用材料および配合

SHCC の配合を表-1 に示す。B 配合, C 配合は必要最 小限の引張じん性を確保した上で,セメント量を低減し, かつ,ワーカビリティーを改善するため,A 配合のセメ ントの 25%を石灰石粉で置換し,単位水量を減少させた 上で,繊維混入量も減少させた。E 配合は市販のプレパ ックド材料で,結合材の一部としてフライアッシュを含 んでおり,繊維は PE と PVA の混合である。また繊維を 混入していない以外はA 配合と同一の O 配合も用意し, ひび割れ幅をコントロールするため,繊維補強プラスチ ック(FRP)棒を埋め込んだ。

2.2 実験概要

配合ごとに一軸引張試験用のダンベル型供試体を 10 本ずつ作製した。供試体の寸法を図-1に示す。本実験で は微細ひび割れ部への塩分浸透性を調査するため,ひび 割れ発生位置を可能な限り制御することを目指した。そ こで 28 日間水中養生後,供試体の中央にコンクリート カッターで深さ 3mm の切欠きの導入を行った。切欠き 導入後,一軸引張試験機で数本のひび割れ導入を行った。 切欠きおよびひび割れの導入後の供試体を写真-1 に示 す。ひび割れ導入後 20℃の恒温室内で 10%の NaCl 溶液 に打設面を上として 1, 2, 4, 11 ヶ月間浸漬した。その

配合	W/C	単位量(kg/m ³)									
	(%)	水	セン	シト	石灰	石粉	珪砂	高性能AE滤	咸水剤	増粘剤	PE
Α	30	371	12	1264)	395	28.2		0.9	14.6
В	40	340	900		300		462	20		0.6	9.7
С	40	321	8	851		34	595	18.8		0.6	7.3
0	30	371	12	264	()	395	28.2		0.6	0
ᇑᄉ	水結合材	砂結	結合材		単位量(kg/m³)						
昭合	比(%)	比(比(%)		水		合材	骨材	繊維(1.9vol%)		%)
Е	28.5	31	9 32		8	1149		367	21.8		

表-1 配合一覧

*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)



図-1 ダンベル供試体



写真-1 切欠きおよびひび割れ導入



写真-2 蛍光 X 線分析測定位置

後,一軸引張試験機にて供試体を完全に引張破断させた 上で,蛍光 X 線分析装置¹⁾を用いて,**写真-2**のように, ひび割れの破断面の浸漬時の上部(a),内部(b),下部 (c)の3点において全塩分量を測定した。

2.3 実験結果および考察

ひび割れ幅の測定方法は既往の研究²⁾³⁾と同様である。 **表-2**にひび割れ導入結果を示す。Aおよび E 配合は複数の ひび割れが確認されたが,他の配合は 1~2 本程度のひび割 れ本数となった。これはダンベル供試体に切欠き導入を行 ったため、切欠き導入箇所を中心としてひび割れが発生し たためである。

図-2 に各配合の測定位置別の Cl 量を示す。O 配合は繊維が混入されてない以外は A 配合と同じものであるが, 図-2 より O 配合は A 配合や他の配合より塩化物イオン量が小さい。これは繊維を混入している配合は,ひび割

表-2 導入ひび割れ幅

	フ៶ブ実しわ	ひび割れ幅(mm)				
供試体名		平均	最大	合計		
	平载(平)	(mm)	(mm)	(mm)		
^	2~8	0.010~	0.019~	0.035~		
~	2.00	0.032	0.063	0.063		
В	1~1	0013~	0.017~	0.019~		
Б	1.4	0.352	0.670	0.703		
C	1~3	0.013~	0.015~	0.022~		
0	1.03	0.071	0.071	0.081		
F	4~16	0.021~	0.030~	0.140~		
E	4.010	0.049	0.088	0.459		
0	1	0.149~	0.149~	0.149~		
	1	0.278	0.278	0.278		

れ断面から繊維の抜け出し跡を通じて塩化物が浸入,蓄 積されたと考えられる。測定位置における違いを見てみ ると,内部(b)は上部(a),下部(c)に比べて塩化物 イオン量が小さい傾向が見られた。これは本研究の塩水 浸漬試験は供試体全体を浸漬させており,上部,下部か ら塩水が浸透したためであると考えられる。また上部の 方が下部よりわずかに塩化物イオン量が大きい。ここで 用いた SHCC は富配合であるが,粘性が極めて高いため に打設時に数十秒間の振動を加えている。これにより生 じたブリーディングの影響により供試体の上面の方が より水セメント比が高くなっていたため,塩化物イオン が浸透しやすかった可能性がある。

このように、SHCC のひび割れが微細であっても内部 まで塩分は浸透しており、これは毛細管現象によって塩 水が浸入したためであると考えられる。毛細管現象が起 きる際の液面の高さは式(1)に表される。

$$h = \frac{2T\cos\theta}{\rho g b} \tag{1}$$

- h : 毛細管現象により吸引された:液体高さ(m)
- T : 液体の表面張力[N/m]
- θ :液体との接触角[•]
- ρ : 液体の密度[kg/m³]
- g : 重力加速度[m/s²]
- b : 空隙の幅

本実験で使用したダンベル型供試体の高さは 30mm であり,水の表面張力を 72[mN/m],水の密度を 998[kg/ m³],重力加速度を 9.8[m/s²]としてひび割れの幅を求め ると,b=0.49mmとなり,幅0.49mm以下のひび割れで 供試体下面から上面まで水が浸透することがわかる。な お,塩水の表面張力は水よりわずかに高く,温度により 密度も変化するが,あくまで簡易的な計算であるため液 体は水として計算した。微細ひび割れを生じる SHCC の ひび割れは0.49mm以下であるので上面まで塩水が容易 に浸透する。

既住の研究 ^{2) 3)} で SHCC は塩分侵入抵抗性が高い結 果となっているが,そのほとんどが硝酸銀水溶液を噴霧 によって塩分浸透範囲を計測している。硝酸銀噴霧によ って塩分が浸透していると判定されるためには,塩分浸 透領域がある程度大きな幅を持っている必要があると 考えられる。一方,本研究では,蛍光 X 線分析を用い, ひび割れの表面から数 100µm 程度の深さまでの範囲の 全塩分量を測定している。しかし,SHCC は W/C が非 常に低いため,毛細管現象によってひび割れ内を進んだ 塩分がそこからさらに拡散によって供試体内部に浸透 するのは,大変困難であると考えられる。そのため,塩 分が侵入した領域はひび割れのごく近くに限られ,硝酸 銀噴霧による方法では塩分の侵入が計測できなかった ものと考えられる。

また最大ひび割れ幅と塩化物イオン量の関係を図-3 に、合計ひび割れ幅と塩化物イオン量の関係を図-4に示 す。ここでは繊維無混入のO配合の結果は除外している。 最大ひび割れ幅と塩化物イオン量の間には相関が見ら れなかったが、合計ひび割れ幅と塩化物イオン量の間で は、浸漬期間 2 ヶ月以外は極めて高い相関が見られた。 なお、繊維を混入していない O配合のデータは SHCC とは異なった傾向を示している。合計ひび割れ幅とは平 均ひび割れ幅とひび割れ本数の積に等しく、SHCCの場 合には、ひび割れが拡大する前に次のひび割れが発生し、 発生したひび割れの幅が限定されているため、一般のコ





ンクリートとは異なり,最大ひび割れ幅よりも合計ひび 割れ幅が重要である。O配合のみ他の配合と傾向が異な るのは,前述のように侵入した塩分量が少ないこと,お



図-4 浸漬期間ごとの合計ひび割れ幅と塩化物イオン量の関係(回帰式は0配合以外のもの)



表-3 普通コンクリートの配合

導入ひび割れ幅 表−4

平均

NaCl

30.5

ひび割れ幅(mm)

最大

(mm)

0.084

0.080

0.062

0.072

0.123

0.099

0.066

0.074

0.082

0.072

0.104

0.09

0.257

0.050

0.037

0.042

0.849

0.814

0.287

0.33

合計

(mm)

0.574

0.989

1.353

0.946

1.432

0.816

0.444

0.748

0.462

0.281

0.798

0.211

0.784

0.667

0.616

0.435

0.877

1.224

0.437

0.330

AE減水剤

1.02

粗骨材

920

ひび割れ

本数(本)

(mm)14 0.041 0.043 23 0.041 33 A4 22 0.043 29 0.049 Β1 0.051 Β2 16 B3 9 0.049 Β4 18 0.042 11 0.042 C2 8 0.035 19 0.042 C3 C4 6 0.035 14 0.056 E2 23 0.029 E3 0.056 11 E4 15 0.029 2 NC1 0.439 2 NC2 0.612 NC3 4 0.109 NC4 0.330

図-6 一軸引張載荷装置

よび,幅の大きなひび割れが1本しか発生していないこ とによるものであると考えられる。

3. 鉄筋防食性能に関する実験

3.1 使用材料および配合

使用材料および配合は表-1のA, B, C, E 配合と同 じもの、および W/C=55%、単位水量 180kg/m³の普通 コンクリート(配合 NC)を用いた。配合を表-3に示す。 また鉄筋腐食の速度を増大させる目的で全ての配合に NaCl を 30.5kg/m³混入した。SHCC はモルタルである ので,通常の s/a のコンクリートに換算すると,およそ Cl⁻12kg/m³に相当する。なお、偽凝結などの悪影響は生 じなかった。供試体概要を図-5に示す。はり部材を1配 合につき2体ずつ作製し、28日の湿布養生後、図-6に 示す一軸引張載荷にて数本のひび割れを導入した後除 荷し、長さ200mmの寸法で2か所から切り出して供試 体とした。供試体は梁部材のひび割れの局所化が生じて いない部分から切り出したため、供試体の B2 と供試体 C2のみ全長が 200mm ではなく 150mm となっている。 3.2 実験概要

供試体切断面の鉄筋が腐食するのを防ぐため、エポキ

シ樹脂を供試体切断面2面に塗布し、鉄筋腐食を促進す るために,酸素と水(水蒸気)が常に供給される ASR 促進室(35~40℃, RH100%)で劣化促進を行った。そ の後供試体を取り出し、鉄筋をはつり出した。はつり出 した鉄筋に OHP フィルムをあてがって鉄筋の腐食箇所 のトレースを行い、プラニメーターを用いて腐食面積を 計測した。得られた腐食面積と表面積より、鉄筋腐食面 積率を算出した。また鉄筋を 60℃のクエン酸水素二アン モニウム 10%溶液に約 24 時間浸漬し、除錆を行った。 除錆後の鉄筋の質量を計測し、D10鉄筋の公称単位質量 から質量残存率を算定した。

3.3 実験結果および考察

ひび割れ導入後に切出し供試体のひび割れ幅を2.3と 同様の方法により測定した。結果を表-4に示す。繊維混 入率 1.5%の A 配合よりも, 1.0%の B 配合の方がひび割 れ本数は大きくなった。配合によってひび割れ分散性が 異なり、ひび割れ導入時には微細ひび割れの幅が配合間 で同一となるように変位制御にて載荷を行なった結果 として、導入されたひずみレベルが異なるためでもある が、無筋のダンベル型供試体を用いた前章での結果と異 なり,本章での供試体には引張鉄筋が配置されているた め、繊維量が小さく水セメント比が大きな配合でもひび



供試体タ	腐食面	積(cm²)	腐食面積率(%)		
供試体石	鉄筋1	鉄筋2	鉄筋1	鉄筋2	
A1	4.8	0.8	8.3	1.4	
A2	11.2	9.8	19.0	16.6	
B1	28.8	27	52.5	49.2	
B2	11.4	18.2	25.5	40.7	
C1	5	3.5	11.5	8.0	
C2	10	10	17.0	17.0	
E1	18.6	8.5	31.6	14.5	
E2	17.2	19	29.3	32.3	
NC1	45.5	39.2	76.6	65.7	
NC2	42	51.2	70.4	87.1	

表-6 促進期間 11 ヶ月における 鉄筋の腐食面積と腐食面積率









図-7 促進期間における腐食面積率(回帰式は0配合以外のもの)

割れの局所化が生じにくかったためであると考えられ る。しかしひび割れ幅は B 配合の方が大きい結果となっ た。

鉄筋の腐食面積率の結果を表-5,表-6に、合計ひび割れ 幅と腐食面積率の関係について図-7,図-8に示す。ただし NCについては回帰式からは除外している。

腐食面積率はNCが最も高い。これはW/Cが55%と高 くセメント硬化体が粗な構造になっており,さらにひび割 れが0.5mm程度と大きいため,水分や酸素が容易に侵入 し,鉄筋を腐食させやすい状態であったためと考えられる。 一方SHCCのA配合はW/Cが低く,ひび割れ幅も0.05m m以下と微細であるため,腐食因子を侵入させにくいため 腐食面積率は他の配合に比べて小さい結果となった。また E配合は結合材内にフライアッシュが大量に含まれるた め,実質の水セメント比は50%程度になる。そのため腐 食が促進され,腐食面積率が大きくなったものと思われ る。B配合の腐食率が高くなった結果については,最大 ひび割れ幅が0.1mm程度とSHCCとしては大きく,水 や酸素が容易に侵入したためだと思われる。

セメントの一部を石灰石粉で置換した配合であるBお よびC配合はA配合よりも腐食が進行している結果とな った。これはセメントを石灰石粉で置換して W/C が高 い影響であると考えられる。 合計ひび割れ幅と腐食面積率は促進期間2ヶ月において はNC以外では配合の種類の依存せずに相関が見られるが 促進期間11ヶ月では相関は見られない。初期にはひび割れ を通じた塩分や酸素,水分の侵入により腐食速度が律速さ れるのに対し,長期材齢ではそれ以外にマトリックス中へ 拡散したこれらの物質の影響を受けるため,ひび割れ幅が 腐食に与える影響が相対的に小さくなったものと考えられ る。配合別に結果を示した図-8からは,同一配合,同一材 齢であれば,腐食面積率はおおむねひび割れに依存するこ とがわかる。

鉄筋の質量残存率について図-9に示す。腐食面積率が大きいものほど鉄筋の質量も減少しており、いずれの配合も 促進期間が進むほど残存質量も小さくなっている。促進期 間11ヶ月では普通コンクリートは20%以上も質量が減少 しているのに対し、SHCCのA配合は5%程度の減少にと どまっており、この配合が高い鉄筋防食性能を有している ことがわかる。セメントを石灰石粉で置換したB,C,E 配合は10%程度の減少率であり、A配合よりは鉄筋防食性 能が劣るが、普通コンクリートに比べると防食性が高いと 言える。しかしセメントの一部を石灰石粉で置換した配合 がA配合よりも鉄筋の質量減少が大きいのは、石灰石粉置 換によって W/C が大きくなっているためであると考えら れる。





図-9 促進期間における質量残存率

4. まとめ

本研究では、 SHCC の塩分侵入抵抗性と鉄筋防食性能 を明らかにするため、数種類の供試体で検討を行った。

- (1) SHCC はひび割れ幅の範囲が限定されるため、塩 分浸透量は最大ひび割れ幅ではなく合計ひび割れ幅に 影響を受ける。
- (2) 蛍光 X 線分析を行った結果, SHCC の微細ひび割 れを通じて塩化物イオンが浸透していることが明らか になった。
- (3) W/C が大きい配合ほどコンクリートが粗な構造になっており,鉄筋腐食に必要な水分や酸素が外部から侵入しやすいため,鉄筋の腐食面積率は大きくなった。
- (4) 配合が同じであれば鉄筋の腐食は合計ひび割れ幅に 依存する。
- (5) SHCCにも塩化物イオンが浸透するが、普通コンク

リートレ比較して水レ酸素を得しておけ

リートと比較して水と酸素を侵入させにくいため、高い 鉄筋防食性能を有している。

なお、本研究ではひび割れの破断面の塩化物量を測定 したが、塩分のマトリックス内への浸透深さも検討する 必要があると考える。また、本研究でひび割れ導入のた めに与えたひずみは鉄筋降伏ひずみを上回る大きなも のである。したがって、実際の構造物の外力や収縮によ って生じるよりも多くのひび割れが生じ、さらに多量の 塩分の混入された非常に過酷な条件で検討を行ってい ることになる。

参考文献

- 金田尚志,石川幸宏,魚本健人:ポータブル型 蛍光X線分析装置を用いたコンクリートの分析, コンクリート工学年論文集, Vol28, No1, pp1793-1798, 2006.
- Koichi Kobayashi, Takashi Iizuka, Hoshito Kurachi and 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.
- LE Anh-Dung, 六郷恵哲, 小林孝一: HPFRCC の 鉄筋防食性能に与えるセメント量と繊維混入率の 影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 253-258, 2013.