

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）や樹脂系の材料が多く使われているが、近年ではひずみ硬化型セメント複合材料（以下 SHCC）が用いられることがある。SHCC はひび割れが多数発生するものの、それらは微細であるため、通常のコンクリートよりも塩分浸透抵抗性に優れており、塩分の浸透性あるいは鉄筋防食性能は、ひび割れの幅や本数といったひび割れ性状やマトリックスモルタルの水セメント比の影響を受けることなどが明らかにされている^{1) 2)}。一方、これら研究では、ひび割れを一軸引張で導入しており、また鉄筋に塑性変形が生じるまで荷重して除荷した後に残留するひび割れを対象として試験が実施されており、また同一かぶりの供試体のみで検討がなされている。

本研究ではセメント量、かぶり、曲げ荷重による変位などの異なる SHCC 供試体を作製し SHCC 補修材としての性能のうち、塩分浸透抵抗性、鉄筋防食性能について検討を行うことを目的とした。

2. 実験概要

配合を表-1 に示す。PE-25 は PE-0 と同一水粉体比で単位セメント量を低減させ、施工に適したワーカビリティを確保するため、セメントの 25% を石灰石粉で置換した。これら配合に加えて市販のプレミクスタイプの PCM を用いた。

供試体を図-1 に示す。供試体の中には D10 鉄筋を配筋し、SHCC の配合毎にかぶりが 2 種類、後述するように供試体に与える曲げ荷重変位が 3 種類、劣化期間が 3 種類の全 12 種類、合計 24 体の供試体を作製した。なお PE-0、PE-25 については 2 種類のかぶりの部材を 1 体

ずつ上記に加えて作製し、3. で述べる荷重試験に用いた。また NM と PCM についてかぶり 25mm の供試体のみ各 3 体用意し、4. の劣化促進試験のみに用いた。圧縮試験用に $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を各配合で 3 本ずつ用意し、SHCC の材料特性評価のため、ダンベル型供試体を 1 配合につき 5 体作製した。

供試体は打設後 1 日で脱型し、20℃ の養生室内で湿布養生した。

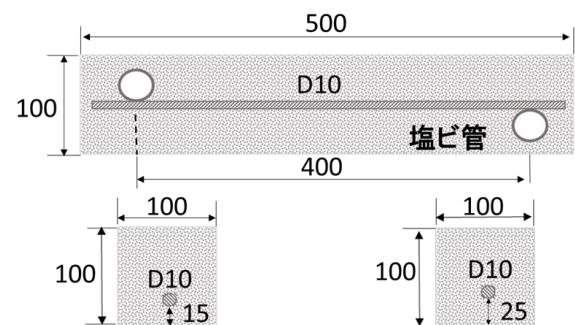


図-1 供試体概要 (mm)

曲げ荷重による複数微細ひび割れの発生状況を確認するために、SHCC 供試体のみ曲げ荷重試験を実施した。荷重スパン 400mm の 1 点集中荷重を行い、部材中央のたわみが 1mm、3mm、5mm となった時点でひび割れ幅、ひび割れ本数を測定した。測定にはマイクロスコープ（倍率 50 倍）を用いた。結果を表-2 から表-4 に示す。たわみ 3mm までは複数微細ひび割れが比較的分散して発生していたが、表-4 に示すようにたわみ 5mm まで荷重すると PE-0-15 以外では目視で確認出来るような大きな局所化ひび割れ（図-2）が発生した。この結果を踏まえ、この後の劣化促進試験では、たわみ 1mm と 3mm を与えた状態で実施することにした。

表-1 配合表

配合	W/C	単位量(kg/m ³)						
		水	セメント	石灰石粉	珪砂 7 号	高性能 AE 減水剤	増粘剤	PE 繊維
PE-0	0.30	378	1260	0	210	28.2	0.89	9.7
PE-25	0.40	378	945	315	190	25.9	0.67	9.7
NM	0.55	273	496	0	1229	0	0	0

表-2 曲げ載荷による平均ひび割れ幅(mm)

	PE-0-15	PE-0-25	PE-25-15	PE-25-25
たわみ 1mm	0.032	0.037	0.037	0.037
たわみ 3mm	0.036	0.068	0.042	0.055
たわみ 5mm	0.060	0.070	0.069	0.069

表-3 曲げ載荷によるひび割れ本数(本)

	PE-0-15	PE-0-25	PE-25-15	PE-25-25
たわみ 1mm	12	33	40	28
たわみ 3mm	41	44	66	49
たわみ 5mm	55	56	65	72

表-4 曲げ載荷による最大ひび割れ幅(mm)

	PE-0-15	PE-0-25	PE-25-15	PE-25-25
たわみ 1mm	0.041	0.082	0.074	0.086
たわみ 3mm	0.082	0.823	0.103	0.143
たわみ 5mm	0.366	1.478	1.695	0.757



図-2 たわみ 5mm 時の載荷におけるひび割れ

SHCC, NM, および PCM の供試体を約 1 か月養生した後, 載荷スパン 400mm の一点集中曲げ載荷にて, たわみが 1mm もしくは 3mm に達するまで載荷し, ひび割れを導入した. 一旦除荷した後, 供試体の塩ビ管にボルトを通し I 型鋼に設置し, ナットを締めることにより, 部材中央に再びたわみ 1mm もしくは 3mm を導入した. ひび割れ導入後, 供試体上のひび割れ本数やひび割れ幅をマイクロスコープで計測した. その後 20℃の室内でロの字型に組んだ塩ビ板を置き, 周りをシリコンや接着剤で固定することにより 250×102×50(mm)の貯水槽とし, 濃度 3%の NaCl 溶液を 3 日間溜め, NaCl 溶液を抜き, 供試体を 4 日間乾燥させる乾湿繰返しを行った(図-3). 乾湿繰返し試験の溶液を貯留する際に, NM や PCM などひび割れが大きな供試体は断面のひび割れから塩水が漏出し, 3 日間溶液を貯留するのが困難であったため, 断面のひび割れ箇所のエポキシを塗布し, 漏出を防いだ.

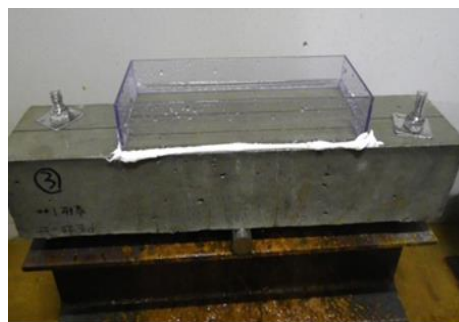


図-3 乾湿繰返し試験の様子

PCM と NM 供試体については乾湿繰返し期間 2 か月, SHCC 供試体については同じく 2 ヶ月, 4 ヶ月, 12 ヶ月の時点でボルトを緩め, 供試体を I 型鋼から外し, 貯水槽の固定のためのシリコンも綺麗に取り除いた. その後, 長さ 500mm の供試体を 150+200+150mm にコンクリートカッターで切断して, 鉄筋に平行に割裂し, 供試体の割裂面に霧吹きで硝酸銀溶液を噴霧し(図-3), 塩分の浸透深さを計測した.

本研究では(i)3 つに切断した供試体それぞれにおける最大浸透深さ, (ii)ひび割れ発生箇所以外でマトリクス浸透深さ 3 か所(中央の 200mm の供試体のみ), (iii)ひび割れからの最大浸透幅, の 3 種類を調べることにした. 塩分浸透箇所を調べた後, 供試体を解体して鉄筋をはつり出し, 鉄筋の腐食面積を計測した.



図-3 硝酸銀発色による変化

3. ひび割れ性状および劣化促進試験結果

3.1 ひび割れ性状

ひび割れ本数及びひび割れ幅をマイクロスコープで測定した結果を表-5 に示す. 表-5 は乾湿繰返し期間 2 か月, 4 か月 12 ヶ月の供試体それぞれ 2 体(NM と PCM は 2 か月のみで各 3 体ずつ)の平均値を示す. 配合に注目し, 比べてみると PE-0 の方が PE-25 よりもひび割れ本数が多い傾向にあった. 本来であれば PE-25 で

表-5 ひび割れ性状

	平均ひび割れ幅 (mm)	最大ひび割れ幅 (mm)	合計ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ本数 (本)
PE-0-15 1mm	0.022	0.038	0.510	23
PE-0-15 3mm	0.027	0.059	1.162	43
PE-0-25 1mm	0.028	0.045	0.302	11
PE-0-25 3mm	0.035	0.232	0.968	28
PE-25-15 1mm	0.024	0.043	0.385	16
PE-25-15 3mm	0.031	0.161	0.899	30
PE-25-25 1mm	0.022	0.037	0.334	15
PE-25-25 3mm	0.032	0.140	0.723	23
PCM		0.215		1
NM		0.383		1

はセメントの一部を石灰石粉で置換したことにより水セメント比が大きくなり、ひび割れ発生強度が小さくひび割れの生じやすい配合であると予想したのだが本研究では逆の結果になった。PE-0はマトリックスの強度が高いため、繊維の抜け出しが小さく、このような傾向になった可能性があるが、原因については今後の検討課題である。

3.2 最大浸透深さ

浸漬期間 12ヶ月の最大浸透深さを図-4に示す。曲げ載荷によるひび割れが供試体の中央で多く発生しているため、ほとんどの供試体で中央において最大浸透深さが深くなったが、12ヶ月の供試体においては、中央だけではなく左右の供試体においても最大浸透深さが10cmに達しているものもあり、長期的に持続荷重を受けたSHCC供試体においても塩分が浸透してしまうと考えられる。

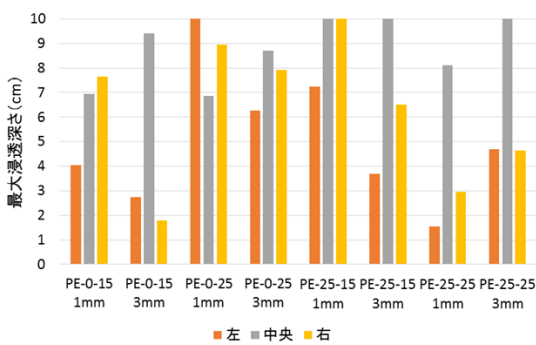


図-4 浸漬期間 12ヶ月における最大浸透深さ

3.3 最大浸透深さとひび割れ性状の関係

浸漬期間 12ヶ月の合計ひび割れ幅と最大浸透深さの関係を図-5に示す。一般のコンクリートでは塩分浸透深さは最大ひび割れ幅と相関が強いが、SHCCの場合には示した通り塩分浸透深さと合計ひび割れ幅との関係があると言

える。これはSHCCによる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、個別のひび割れ幅の影響が小さいと考えられる。そのため、SHCCにおける塩分浸透深さは供試体に与えたひずみや合計ひび割れ幅と強い相関を持つことが指摘される。

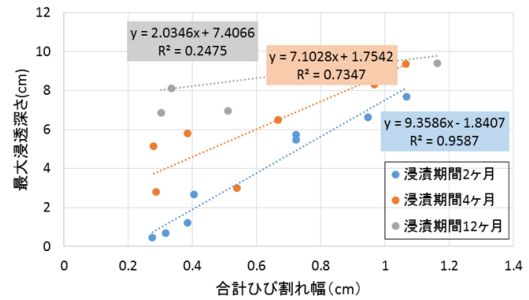


図-5 合計ひび割れ幅と最大浸透深さの関係

3.4 腐食面積率

浸漬期間 2ヶ月、4ヶ月および12ヶ月の中央供試体における鉄筋の腐食面積と腐食面積率の結果を図-6に示す。

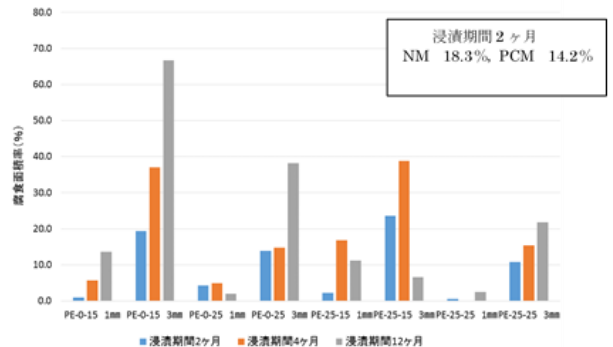


図-6 浸漬期間 2ヶ月、4ヶ月および12ヶ月の腐食面積率

浸漬期間 2 ヶ月においてひび割れが 1 本しか生じていない NM と PCM の腐食面積が大きくなったが、PE-0-15 のたわみ 3mm と PE-25-15 のたわみ 3mm の供試体も同程度の値となった。SHCC は図-3 に示したように、供試体の軸方向に沿って広い範囲にひび割れが発生し鉄筋に塩分が達している。これら供試体はひび割れ本数や合計ひび割れ幅が他の供試体と比べて大きかったことが腐食面積の大きくなった原因と考えられる。

3.5 腐食面積率とひび割れ性状の関係

配合別に検討したものを図-7, 8 に示す。PE-0 および PE-25 のそれぞれにおいて腐食面積率は合計ひび割れ幅と相関があることが分かる。この理由は 3.3 と同様 SHCC による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、個別のひび割れ幅の影響が小さいと考えられる。また PE-25 は最大ひび割れ幅との相関がみられた。PE-25 は PE-0 よりひび割れ本数が少なく、かつ微細なひび割れなので合計ひび割れ幅ではなく最大ひび割れ幅が腐食面積率に関係してきたからだと考えられる。

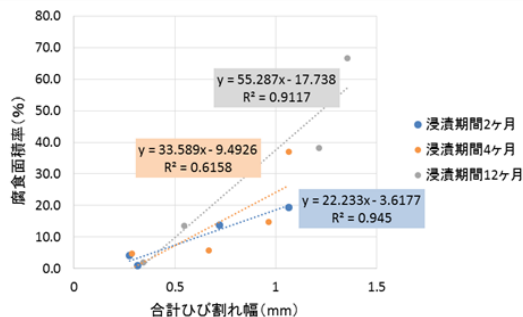


図-7 合計ひび割れ幅と腐食面積率の関係 (PE-0)

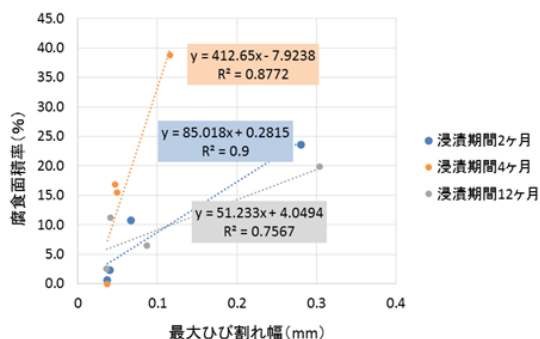


図-8 最大ひび割れ幅と腐食面積率の関係 (PE-25)

3.6 質量減少率

浸漬期間 2 ヶ月, 4 ヶ月および 12 ヶ月の中央

供試体における鉄筋の質量減少量と質量減少率の結果を図-9 に示す。どの浸漬期間においてもたわみが大きい供試体の方が質量減少率が大きい傾向があったが、配合による差はほとんどなかった。

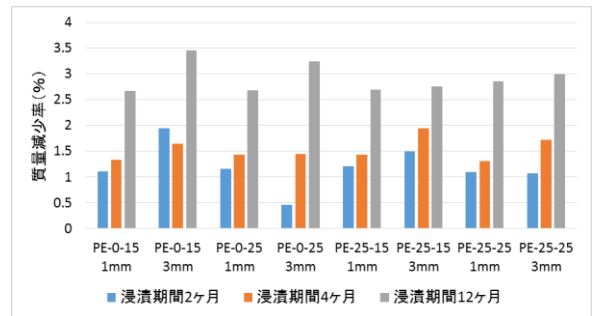


図-9 浸漬期間 2 ヶ月, 4 ヶ月および 12 ヶ月の質量減少率

4. まとめ

本研究では SHCC で供試体を作製し、曲げ載荷でひび割れを導入し I 型鋼に設置することで持続的に荷重を与え、供試体を NaCl 溶液に浸漬させると乾燥させることを繰り返す乾湿繰り返し試験を行い、塩分浸透抵抗性と鉄筋防食性能の検討を行った。以下のような結果を得た。

- ① 曲げ載荷によるひび割れが供試体の中央で多く発生しているため、ほとんどの供試体で中央において最大浸透深さが深くなった。
- ② SHCC の場合、塩分浸透深さは合計ひび割れ幅と関係があると考えられる。
- ③ 腐食面積率と合計ひび割れ幅の相関を調べてみると、相関がみられた。また PE-25 に関しては最大ひび割れ幅との相関がみられた。
- ④ SHCC は複数の微細ひび割れが発生し、複数箇所で塩分が浸透していき、質量減少率は配合やかぶりに関係なくほぼ同程度だった。

参考文献

- 1) LE Anh-Dung, 六郷恵哲, 小林孝一: HPRCC 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 年 7 月
- 2) 小島雄太, DUNG LE ANH, 六郷恵哲, 小林孝一: ひび割れを有する SHCC の塩分侵入抵抗性と鉄筋防食性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No.1, pp.922-927, 2014 年 7 月