

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420458

研究課題名(和文) 大面積補修に適した高耐久・高靱性な吹付け繊維補強モルタルの開発

研究課題名(英文) Fiber reinforced mortar with high durability and high ductility for shotcreting

研究代表者

小林 孝一 (KOBAYASHI, Koichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20283624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：吹付け施工に適した高耐久のSHCCの開発を目指して、種々の検討を実施した。用いた繊維はポリプロピレン(PE)とポリビニルアルコール(PVA)の2種類、用いた水セメント比は3種類であり、一軸引張りひび割れ、もしくは曲げひび割れを導入した供試体に、浸漬、乾漆繰り返しなどの作用で塩化ナトリウムを与えた。その結果、吹付け施工したSHCCは耐久性に優れ、その内部に配置された鉄筋を防錆する性能が高いことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：SHCC test specimens having different mixes such as fiber percentage, W/C, etc., were produced with the objective of achieving both high toughness and high flowability, so chloride penetration into the SHCC through cracks and the reinforcement corrosion prevention performance were investigated. It was found that even though the cracks were very narrow, chloride ions penetrated into the SHCC through the cracks. In the case of SHCC whose cracks have narrow range of widths, the results showed a high correlation between the total crack width and the quantity of chloride ion. It was also found that the corrosion rate of the rebar is high in SHCC with a high water cement ratio.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：繊維補強コンクリート 耐久性 鉄筋腐食 ひび割れ 吹付け施工

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 鉄筋コンクリート(以下 RC)は本来、極めて耐久性の高い構造形式であるが、海洋環境における RC 構造物の塩害劣化が問題となるようになって久しい。塩害は、耐荷性能を始めとする RC 構造物の諸性能を低下させる、代表的な劣化機構であるが、沿岸環境のみならず、凍結防止剤の散布量の増加に伴い内陸の道路構造物においても問題となっている。

(2) 塩害によって劣化した RC 構造物を補修する際には PCM(ポリマーセメントモルタル)による断面修復工法が用いられることが多いが、この工法については補修を実施しても短い期間で再劣化が生じるケースが非常に多いのが現状である。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下 SHCC)を用いた吹付け断面修復工法を提案する。従来の SHCC に関する技術開発は、その高い引張り靱性を有効に活用することを指向したものが多かったが、申請者らは、SHCC の微細ひび割れ特性が耐久性上有利であると考え、その鉄筋保護性能に着目した検討を行ってきた。その結果、

基本的にモルタルであり、母材コンクリートとの親和性が高い。予想通り、ひびわれが発生していても物質透過抵抗性が高い。たとえ劣化が発生しても、繊維架橋による高靱性のおかげで、劣化に起因するひび割れの発生・拡大が抑制され、その後の劣化が加速されることが無い。という SHCC のユニークな特徴を明らかにしてきた。

(2) 本研究はこれまでに申請者らによって実施されてきた先駆的な取組みをさらに発展させ、経済性や施工性に関する視点も加えて、供用中の劣化構造物に対して吹付けにより迅速な施工が可能な SHCC を用いた補修工法の実用化、商品化を目指すものである。

(3) SHCC が優れた断面修復材料として機能するためには、以下の検討を行い、これら特性を兼ね備える配合の開発を行う。

・優れた施工性：繊維がマトリックス中で良好に分散するためには、高い粘性をマトリックスに付与する必要がある。一方、吹付けによる施工性を向上させるためには、ポンプ圧送を容易にするため高い流動性も併せ持つ必要がある。レオロジー的検討を実施することにより、適切な粘性と流動性の組み合わせの範囲を明らかにし、これらの両立を達成できる配合を決定する。

・高い経済性：繊維量の低減、および、2 種類の繊維を用いることを境界条件とし、かつ、ここにあげた他の特性を著しく減ずること

のない配合の選定を行う。これにより現在既に補修用の PCM と遜色の無いレベルにある HPRCC の経済性をさらに向上させる。

・高い物質透過抵抗性と鉄筋保護性能：新たに開発する SHCC の物質透過抵抗性、鉄筋保護性能について、ひずみ(ひび割れ)レベル毎に検討し、SHCC による補修の設計手法を提案する。

### 3. 研究の方法

(1) 現在、通常の SHCC の配合は、水/結合材比 0.3 以下、砂(珪砂)/結合材比が 0.3 程度の極めてバインダーリッチな配合となっている。また、繊維にも高性能なポリエチレン繊維を用いている。その結果、この HPRCC は引張り荷重下での終局の直前までひび割れ幅が 0.02mm 程度に抑制され、また終局引張りひずみが数%という、非常に高い引張靱性を発揮することができる。

(2) ただし、SHCC の高い物質透過抵抗性に期待して補修材料として用いる場合には、構造物の常時使用状態においてのみ複数微細ひび割れが発生すればよく、その後の部材降伏が起こるような大変位下で例えひび割れ幅の拡大が生じるとしても、通常の使用状態における耐久性には影響を与えないと考えられる。言い換えると、現在の SHCC は、耐久性面から見るとかなりのオーバースペックであると考えられる。

(3) そこで、ここでは期待された物質透過抵抗性および鉄筋保護性能を達成するために必要な SHCC のひび割れ特性を明らかにする。繊維量や繊維種類を変えることで複数微細ひび割れの幅をある程度制御することが可能であるため、この方法でいくつかの種類の供試体を作成し、ひび割れを SHCC に導入した上で塩水浸漬繰返し試験や塩水の Ponding 試験を実施して、ひび割れの発生した SHCC への塩分浸透性、鉄筋保護性能を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1) 繊維混入率を通常の 1.5%、およびその半分の 0.75%まで低減させたもの W/C を 0.3 と 0.4 の 2 種類とし、以上の組み合わせにより 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 種類の実験を行なった。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なった。その結果、以下の結果が得られた。

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。

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。

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。

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。

SHCC にも塩化物イオンが浸透するが、普通コンクリートと比較して水と酸素を侵入させにくいいため、高い鉄筋防食性能を有している。

ここ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、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。

(2) 次に、SHCC の補修材としての性能を検討することを目的として、繊維種類が PE、PVA、PE と PVA を混合したものの 3 種類、セメントの一部を石灰石微粉末にて置換することによって変えた 3 種類の水セメント比、以上の組み合わせによって 9 種類の異なる SHCC 供試体を作製し、SHCC の力学性能を確認した。その後、供試体に一軸引張りひずみを導入し、物質侵入抵抗性試験、鉄筋防食性能試験を行った。その結果、以下の結果が得られた。

SHCC には微細ひび割れを通じて塩分が侵入するが、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。

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。

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。

(3) さらに、セメントの一部を石灰石粉で置換し、W/C や鉄筋のかぶり、曲げ載荷による変位が異なる SHCC 供試体を対象に、曲げ変形を与えた状態で NaCl 溶液を用いた 3 日浸漬と 4 日乾燥を繰り返す乾湿繰り返し試験を実施した。乾湿繰り返し 2 か月と 4 か月の時点で塩分浸透深さの計測と供試体内部の鉄筋腐食率の計測を行った。この結果を用いてひび割れを有した SHCC の補修材としての性能を検討し、以下のような結果を得た。

PCM、NM と比べると SHCC の方が塩分最大浸透深さが小さくなり、既往の研究通り SHCC の方が塩分浸透抵抗性に優れているという結果を得た。

最大浸透深さに影響する因子はかぶりと変位であると考えられる。

マトリックスへの塩分浸透深さは水セメント比の大きな SHCC の方が硬化体組織が粗な構造になるため、大きくなる傾向にあった。

SHCC の場合、塩分浸透深さや鉄筋の腐食面積は合計ひび割れ幅及びひび割れ本数と良い相関がある。

同じひび割れ本数、合計ひび割れ幅だった場合水セメントの小さな SHCC の方が腐食面積が小さくなり、鉄筋防食性能に優れている。

(4) 最後に、吹付け施工の影響を検討するために、PE 繊維と PVA 繊維の 2 種類、セメントの一部を石灰石粉で置換し W/C の異なるものを 2 種類の計 4 種類の SHCC 配合を水平面吹付けと鉛直面吹付けの異なる施工方法で母材コンクリートに吹付け施工し、計 8 種類の積層型の供試体を作製した。これらの供試体を対象に曲げひび割れを導入し、塩化物水溶液を用いた乾湿繰り返し試験を実施した。2 ヶ月間および 4 ヶ月間経過時に、塩分浸透抵抗性として塩分浸透深さと塩分量を、鉄筋防食性能として腐食面積率と質量減少率を測定した。これらの結果を用いて吹付け施工した SHCC の曲げひび割れ発生時の補修材としての性能を検討し、以下のような評価を得た。

配合や浸漬期間の違いに関係なく、すべての供試体で塩分最大浸透深さが 100mm となり、供試体最下部まで塩分が到達していた。

浸漬期間 2 ヶ月において、PE 繊維を用いた配合で塩分量が極めて小さくなった。これは、ひび割れ本数が多く、ひび割れ幅が小さいためである。しかし、浸漬期間 4 ヶ月では他との差が縮小した。

浸漬期間 4 ヶ月の水平面吹付けで腐食面積率および質量減少率が高くなった。また、浸漬期間が長いほうが繊維種類や石灰石粉置換量等の影響を受けやすい。

水平面吹付けの方が鉛直面吹付けよりも鉄筋の腐食面積や腐食減量が大きい。

SHCC では鉄筋の腐食面積が拡大しても、断面の減少はなく、表面で薄く腐食が進んでいる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Koichi Kobayashi, Dung Le Ahn, and Keitetsu Rokugo: Effects of crack properties and water-cement ratio on the chloride proofing performance of cracked SHCC suffering from chloride attack, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 69, pp. 18-27, 2016. 5

原勇澄, 小島雄太, 六郷恵哲, 小林孝一: 曲げひび割れを導入した SHCC の塩分浸透抵抗性と鉄筋防食性能、*コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集*, 第 15 巻, pp. 59-64, 2015 年 10 月

鈴木雅人, 六郷恵哲, 小林孝一: 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、*コンクリート工学年次論文集*, Vol. 37, No.1, pp. 937-942, 2015

年7月

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

〔学会発表〕(計3件)

Masato SUZUKI, Koichi KOBAYASHI, and Keitetsu ROKUGO, The Effect of W/C Ratio and Fiber Type on the Reinforcement Corrosion Prevention Performance of SHCC, Advances in Construction materials -Proceedings of ConMat'15 (Proceedings of the Fifth International Conference on Construction Materials), 19th-21st Sep. 2015, Whistler, Canada, pp. 1139-1149, 2015.

Yuta Kojima, Le Anh Dung, Keitetsu Rokugo, and Koichi Kobayashi, Chloride Proofing and Rebar Corrosion Proofing Performances of SHCC Having Cracks, Proceedings of SHCC3 - 3rd International RILEM Conference on Strain hardening Cementitious Composites, 3rd-5th Nov. 2014, Dordrecht, Netherlands, pp. 61-68, 2014.

Masato Suzuki, Le Ahn Dung, Keitetsu Rokugo and Koichi Kobayashi: The Effect of Cement Quantity and Fiber Type on the Reinforcement Corrosion Resisting Performance of SHCC, Proceedings of the 6th International Conference of Asian Concrete Federation, 21-24th Sep. 2014, Seoul, South Korea, pp. 1114-1117, 2014.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 孝一 (KOBAYASHI, Koichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 20283624

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

六郷 恵哲 (ROKUGO, Keitetsu)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 40127155