

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360170

研究課題名(和文)高靱性コンクリートを用いた局所破壊型ならびに高弾性変形型衝撃吸収部材の開発

研究課題名(英文)Development of local-failure type and high-deformable type structural members made of HPFRCC

研究代表者

六郷 恵哲 (ROKUGO, Keitetsu)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40127155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)の魅力的な適用について研究した。

EPS粒子を混入した軽量HPFRCCを提案した。山岳地帯の砂防工事に用いられる投下型のコンクリートブロックを模した立体十字型の供試体を軽量HPFRCC等で作製し、供試体そのものを落下させるという特徴ある衝撃試験を行った。落下する供試体の耐衝撃性能を高めるうえでは、鉄筋を配置することと質量が小さいことが重要であった。

骨材のアルカリシリカ反応により長期にわたって膨張するHPFRCCを開発した。この材料に鉄筋を配置して膨張を拘束しケミカルプレストレスを導入し、ひび割れ強度の大きなRC部材が得られた。

研究成果の概要(英文)：New attractive applications of HPFRCCs (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) were investigated.

Lightweight HPFRCCs containing EPS (Expanded Polystyrene) particles were proposed. Unique specimen-drop tests were performed on six-legged specimens made of lightweight HPFRCCs etc. assuming concrete blocks that are drop-deposited to form an erosion control structure in the mountains. The steel-bar reinforcement and the reduction of mass of specimens were beneficial for enhancing the impact resistance performance of falling specimens.

Long-term ASR(Alkali-Silica Reaction)-expansive HPFRCCs were developed. Chemical prestress was introduced into this material by restraining the ASR expansion using reinforcing bars. Reinforced ASR-expansive HPFRCC beams showed higher cracking strength due to the chemical prestress.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 繊維補強 高靱性 破壊 衝撃吸収

1. 研究開始当初の背景

普通のコンクリートは、圧縮力に抵抗し、鉄筋防食性能や耐火性能に優れた建設材料ではあるが、引張力に安定して抵抗できず脆性的な破壊挙動を示すことが短所であり、衝撃作用を受ける部材への適用には限界がある。

この脆性的な挙動を改善する目的で、各種の短繊維補強コンクリートが開発されている。それらの中で、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(高靱性コンクリート、HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)は、微細なひび割れを発生させながら引張力に抵抗し、1~2%の引張ひずみを生じる靱性に富んだ材料である。HPFRCCのひび割れ幅が0.05mm前後と小さいことを活かし、止水材料や鉄筋防食性能に優れた補修材料としての利用が広がっているが、靱性の利用方法については十分に確立していない。

ミシガン大学のVictor C. Li教授らのグループにより、1990年代にHPFRCC(ECCとよばれる)が提案され、研究が世界へ広まった。わが国では、土木学会から2007年3月にHPFRCCの設計施工指針(案)が出版された。実構造物へのこの材料の適用例は、わが国が最も多く、施工あるいは製造できる企業も増えている。現在は、HPFRCCの特徴を生かした利用のアイデアと適用例を増やすことが求められている。

2. 研究の目的

衝撃作用を受ける部材にHPFRCCを利用する方法を提案するなどして、HPFRCCの利用の可能性を広げることを目的とし、下記の研究を行った。

- (1) 軽量HPFRCCの開発と投下型の衝撃吸収部材への適用
- (2) HPFRCCの配合改良ならびに鉄筋防食性能の評価
- (3) 新しいアイデアによる構造部材へのHPFRCCの適用

3. 研究の方法

それぞれの研究の方法について、特徴ある点や工夫した点に焦点を当てて述べる。

- (1) 軽量HPFRCCの開発と投下型の衝撃吸収部材への適用

①HPFRCC薄肉部材の衝撃破壊性状の解明
はり(寸法600×150×30~100mm)、板(寸法300×300×50mm)およびブロック(寸法600×250×150mm)の3種類の供試体をHPFRCCおよび普通コンクリートを用いて作製して、変形性能、復元性能および耐衝撃性能について検討した。はりでは、材料、部材高さや使用する鉄筋径の違いが、静的変形性能および復元性能に与える影響を検討した。板では、材料、補強材料の違いや表面加工の有無が、供試体表面の衝撃破壊性

状に与える影響について検討した。

- ②発泡スチロール(EPS)を組み込んだ軽量HPFRCC部材の開発

HPFRCCに粒径数mmのEPS粒子を体積で45%混入した材料(以下HPFRCC+EPS)、HPFRCC、モルタルの3種類の材料を対象として、圧縮試験ならびに一軸引張試験を行うとともに、これらの材料を用いて作製したはり(寸法600×150×55~100mm)の曲げ試験を行った。はりの曲げ試験では、材料の種類、部材厚さ、鉄筋の有無、内部EPSブロックの有無、EPS粒子混入の有無が、部材質量、曲げ耐荷性能ならびに曲げ変形性能に及ぼす影響について検討した。

- ③投下型コンクリート部材への軽量HPFRCCの適用

山岳地域の砂防工事においてヘリコプターで運搬・投下して用いられる部材への利用を想定して、HPFRCC、HPFRCC+EPS、普通コンクリートの3種類のコンクリートを用いて立体十字供試体(断面寸法105×105mm、縦横高さ各525mm)を作製し、供試体そのものを落下させる試験(最大高さ1,600mm)を行った。材料の種類、鉄筋の有無、EPS粒子混入の有無、部材質量が供試体の破壊性能ならびに耐衝撃性能に及ぼす影響について検討した。

- (2) HPFRCCの配合改良ならびに鉄筋防食性能の評価

- ①セメント量や繊維混入量を削減したHPFRCCの開発

高強度PE繊維または中強度PE繊維(引張強度と弾性係数が高強度PE繊維の2/3程度)を用い、繊維混入率を1.0%または1.5%としたHPFRCCによりダンベル型供試体を作製し、引張試験用を行った。それらのHPFRCCの引張性能(ひずみ硬化挙動と複数微細ひび割れ挙動)に及ぼす6ヶ月までの材齢の影響と、水中(20℃)ならびに気中(湿度80%程度)の養生条件の違いの影響とについて検討した。

- ②繊維混入量の少ないHPFRCCの開発と鉄筋防食性能

セメントの25%を石灰石粉で置換した配合や、繊維混入率(体積比で0.75%、1.0%と1.5%)を変えたHPFRCCを作製した。HPFRCCのみで作製したRCはり(寸法50×100×1700mm)と、普通コンクリートの母材をHPFRCCにより断面修復した積層RCはり(寸法80×100×1700mm)を作製した。RCはりの鉄筋をジャッキで引張り、はりにひび割れを導入した。供試体(長さ150mm)をRCはりから切り出し、塩水散布を行った。供試体から鉄筋を取り出し、腐食表面積を計測した。

- (3) 新しいアイデアによる構造部材へのHPFRCCの適用

- ①HPFRCCと繊維ロープを用いたRC部材

のせん断補強

スターラップによるせん断補強がない部分をもつ RC はりを作製し、高強度ポリエチレン (PE) 製の連続繊維ロープ (巻き間隔 20mm, 40mm, 100mm) を巻き付けた。連続繊維ロープのコンクリート面への固定には 2 種類の樹脂を用いた。連続繊維ロープの表面被覆材については、ポリマーセメントモルタルと HPFRCC とを用いて比較した。RC はりの曲げ載荷試験を行い、荷重変位曲線を計測した。

②膨張型 HPFRCC への鉄筋配置によるプレストレス導入

HPFRCC に ASR (アルカリシリカ反応) 膨張が顕著に現れるように、ペシマムを考慮して反応性骨材の粒径を 0.6mm 以下、水セメント比を 50% とした。この HPFRCC を用いて、鉄筋 2D6 を配置した単鉄筋ならびに複鉄筋 (拘束鉄筋比 2.11%) の小型 RC はり (寸法 60×100×400mm) を作製し、膨張量が目標水準 (0.05%, 0.1%, 0.15%) となるまで、60% の NaOH 溶液中で促進養生した。RC はりの曲げ試験を行い、荷重変位曲線を計測した。

4. 研究成果

研究で得られた主な成果について述べる。

(1) 軽量 HPFRCC の開発と投下型の衝撃吸収部材への適用

①HPFRCC 薄肉部材の衝撃破壊性状の解明
薄肉部材を HPFRCC および普通コンクリートにより作製し、静的ならびに衝撃破壊性状について検討した。HPFRCC はりでは、鉄筋を併用することで、普通コンクリート供試体と比較して、薄い断面でも、高い耐荷力および変形性能や復元性能を確認できた。HPFRCC 板供試体では、繊維の架橋効果により普通コンクリート供試体よりも、衝撃試験後のひび割れ幅が抑制された。補強材や表面の凹凸加工との組み合わせにより、ひび割れ幅の抑制が可能であった。

②発泡スチロール (EPS) を組み込んだ軽量 HPFRCC 部材の開発

HPFRCC に粒径数 mm の EPS 粒子を体積で 45% 混入した材料 (HPFRCC+EPS) を提案した。本研究で用いた HPFRCC+EPS は、みかけの密度は 1.1g/cm³ となり、HPFRCC に比べ圧縮強度は約 1/6、引張強度は約 1/3 となったが、引張力下で複数微細ひび割れ挙動を示した。小さな供試体質量でより大きな耐荷性能と安定した変形性能を確保するには、HPFRCC+EPS に鉄筋を配置して鉄筋の定着を確実にすることが有効なことを明らかにした。

③投下型コンクリート部材への軽量 HPFRCC の適用

繊維長を通常の 12mm から 20mm に変更し、細骨材を除き、マトリックスの粘性を高めることにより、引張終局ひずみが 3% と大

きくかつバラツキの少ない HPFRCC+EPS (密度 1.2g/cm³) が得られた。立体十字型の供試体を作製し、供試体そのものを落下させる試験を行った結果、落下する供試体の耐衝撃性能を高めるうえでは、鉄筋を配置することが重要であり、質量が小さいことも有効なことが明らかとなった。

(2) HPFRCC の配合改良ならびに鉄筋防食性能の評価

①セメント量や繊維混入量を削減した HPFRCC の開発

製造コストの削減を目指して、セメントの半分を石灰石粉で置き換え、高強度 PE 繊維とともに中強度 PE 繊維を用いて HPFRCC を作製した。いずれの条件でも、HPFRCC のひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特性を確認した。高強度 PE 繊維を用いた HPFRCC で、繊維混入率を 1.5% から 1.0% に減らすことが可能なことを明らかにした。

②繊維混入量の少ない HPFRCC の開発と鉄筋防食性能

引張性能の確保と施工性の向上の両立を目指して、セメントの一部を石灰石粉で置換し繊維混入率を減少させた配合の HPFRCC を開発し、その鉄筋防食性能を明らかにした。繊維混入率を小さくすると、引張変形性能は低下するが、引張強度と終局時の平均ひび割れ幅への影響は殆どないことを確認した。繊維混入率を 0.75% とし、石灰石粉を用いた HPFRCC でも優れた鉄筋防食性能を有することを明らかにした。

(3) 新しいアイデアによる構造部材への HPFRCC の適用

①HPFRCC と繊維ロープを用いた RC 部材のせん断補強

HPFRCC と高強度ポリエチレン (PE) ロープとを併用した RC 棒部材のせん断補強方法を提案した。ロープ巻き付け後にロープにアクリル樹脂を塗付含浸させてコンクリート表面に固定し、HPFRCC などを被覆材として用いることで、連続繊維ロープの有する耐力を十分に活用したせん断補強が可能であることを明らかにした。

②膨張型 HPFRCC への鉄筋配置によるプレストレス導入

骨材の ASR により長期にわたって膨張する HPFRCC を開発し、その適用の一例として、この材料に鉄筋を配置して膨張を拘束しケミカルプレストレスを導入した。鉄筋補強した HPFRCC はりの曲げ載荷試験では、導入されるケミカルプレストレスによりひび割れ荷重が増加することを確認した。ケミカルプレストレスが導入されたはりでは、本実験の範囲では、乾燥収縮後も膨張が残存すること、亜硝酸リチウムを含浸することで ASR 膨張を制御できることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計31件)

1. 藤代勝, 三田村浩, 坂田昇, 内田裕市, 六郷恵哲: HPFRCC 吹付けと U リブ内のモルタル充填を併用した鋼床版下面補強工法の開発, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.1, pp.86-96, 2015.3, 査読有.
2. Hideaki Hatano, Keitetsu Rokugo et al.: Securing Bridge Girder-End Gap during Earthquake Using Large-deformation Blocks, Proceedings of the 2nd Joint Seminar of Japan and Indonesia, Environmental Sustainability and Disaster Prevention (ESDP-2015), pp.167-176, Denpasar, 2015.3, 査読無.
3. 高田浩夫, 恩田陽介, 藤代勝, 小林孝一, 浅野幸男, 六郷恵哲: ASR により長期にわたり膨張する HPFRCC の引張性能と鉄筋配置により導入したケミカルプレストレス, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.4, pp.356-369, 2014.11, 査読有.
4. 林承燦, 大久保仁人, 新家一秀, 六郷恵哲: 若材齢時に振動を受ける鋼板と超速硬 HPFRCC との付着強度試験方法の提案とエポキシプライマーの粘性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.310-315, 2014, 査読有.
5. 松島雄平, 大久保仁人, 藤代勝, 六郷恵哲: 投下型コンクリートブロックへの軽量 HPFRCC の適用と供試体落下試験による耐衝撃性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1123-1128, 2014, 査読有.
6. 吉田幸司, 関雅樹, 加藤千博, 六郷恵哲: 東海道新幹線大規模改修工事コンクリート橋はね出し部対策の開発概要と保護モルタルの仕様, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1423-1428, 2014, 査読有.
7. 小島雄太, LE Anh-Dung, 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, 査読有.
8. 田中僚, 佐藤あゆみ, 浅野幸男, 六郷恵哲: 小型棒状試験片を後成形したダンベル型供試体による各種断面形状の HPFRCC と UFC の引張性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.298-303, 2014, 査読有.
9. Takumi Kojima, Kousuke Tanabe, Yousuke Onda, Hiroo Takada, Keitetsu Rokugo: Development of Long-Term ASR-Expansive SHCC and Chemical Prestress Caused by Restraining Its Expansion Using Rebars, Proceedings of the 6th International Conference of Asian Concrete Federation, Seoul, pp.681-684, 2014.9, 査読有.
10. Masato Suzuki, Le Ahn Dung, Keitetsu Rokugo, 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, Seoul, pp.1114-1117, 2014.9, 査読有.
11. Yuichi Uchida, Minoru Kunieda, Keitetsu Rokugo: FRCC-Design and application in Japan, Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications, FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop, pp.58-68, 2014.7, 査読有.
12. Keitetsu Rokugo, Hiroo Takada, Yousuke Onda, Masaru Fujishiro, Koichi Kobayashi, Yukio Asano: Chemical Prestressing of Steel Bar-Reinforced Concrete Beams Using SHCC that Retains ASR Expansion for a Long Time, Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on SHCC (SHCC3-Delft), pp.43-50, 2014, 査読有.
13. Masahito Ohkubo, Masaru Fujishiro, Yuhei Matsushima, Keitetsu Rokugo: Specimen-Drop Tests for Evaluating Impact Resistance of Concrete Blocks Made of Lightweight SHCC, Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on SHCC (SHCC3-Delft), pp.373-380, 2014, 査読有.
14. Masaru Fujishiro, Keitetsu Rokugo, Yuhei Matsushima, Takato Nakano: Flexural Load-Bearing Performance of Lightweight SHCC Members Incorporating Polystyrene Foam, Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on SHCC (SHCC3-Delft), pp.425-432, 2014, 査読有.
15. Hiroo Takada, Keitetsu Rokugo, Kosuke Tanabe, Yukio Asano: Cracking Properties and Length Change Behavior of SHCCS Utilizing ASR Expansion, Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on SHCC (SHCC3-Delft), pp.17-24, 2014, 査読有.
16. Yuta Kojima, Le Anh Dung, Keitetsu Rokugo, Koichi Kobayashi: Chloride Proofing and Rebar Corrosion Proofing Performances of SHCC Having Cracks, Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on SHCC (SHCC3-Delft), pp.61-68, 2014, 査読有.
17. 六郷恵哲: 高性能な繊維補強コンクリー

- トの魅力的な性質と適用の可能性, 繊維と工業, Vol.69, No.4, pp.96-99, 2013.4, 査読有.
18. 六郷恵哲, 林承燦: 高靱性な繊維補強セメント複合材料を用いた吹付け工法による補修と新設, コンクリートテクノ, Vol.32, No.5, pp.69-76, 2013.5, 査読有.
 19. 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, 査読有.
 20. 高田浩夫, 田邊幸佑, 浅野幸男, 六郷恵哲: ASR の膨張を有効利用した HPFRCC のひび割れ性状と長さ変化挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.247-252, 2013, 査読有.
 21. 松島雄平, 中野昂人, 藤代勝, 六郷恵哲: 発泡スチロールを組み込んだ軽量 HPFRCC 部材の曲げ耐荷性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.259-254, 2013, 査読有.
 22. Le Anh Dung, Koichi Kobayashi, Keitetsu Rokugo: An Experimental Study on Corrosion Protection Performance of HPFRCCs with Fine Cracks, Proceedings of Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT3), e174, Kyoto, 2013, 査読有.
 23. Koichi Kobayashi, Keitetsu Rokugo: Mechanical Performance of Corroded RC Member Repaired by HPFRCC Patching, Construction and Building Materials, Vol.39, pp.139-147, 2013.2, 査読有.
 24. Hideaki Hatano, Hyun-Do Yun, Takuya Ohata, Takashi Nakashima, Yuichi Uchida, Keitetsu Rokugo: Shear Reinforcement of RC Beams with Continuous Fiber Rope, Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8), 2013.3, 査読有.
 25. Ryo Tanaka, Hiroo Tanaka, Yukio Asano, Koichi Kobayashi, Keitetsu Rokugo: Uniaxial Tension Test Method Using SHCC Prisms Molded into Dumbbell Shape, Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8), 2013.3, 査読有.
 26. 羽田野英明, 中島隆, YUN Hyun-Do, 内田裕市, 六郷恵哲: 連続繊維ロープを用いた RC 部材のせん断補強, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.271-282, 2012.10, 査読有.
 27. 六郷恵哲: <総論>高性能な繊維補強コンクリートの開発と将来展望: コンクリート工学, Vol.50, No.5, pp.404-409, 2012.5, 査読有.
 28. 田中僚, 高田浩夫, 浅野幸男, 六郷恵哲: 棒状供試体を後成形したダンベル型供試体による HPFRCC の一軸引張試験方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.232-237, 2012, 査読有.
 29. 前田徳一, LE Anh-Dung, 浅野幸男, 六郷恵哲: 高強度ならびに中強度の PE 繊維を用いた HPFRCC の引張性能に及ぼす材齢と養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.256-261, 2012, 査読有.
 30. 中島隆, 松島雄平, YUN Hyun-Do, 六郷恵哲: HPFRCC 薄肉部材の静的ならびに衝撃破壊性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1249-1254, 2012, 査読有.
 31. Seok Joon Jang, Hyun Do Yun, Zhong Jie Yu, Keitetsu Rokugo: Flexural Performance and Cracking Behavior of Reinforced Stain-hardening Cement Composite Beams, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1291-1296, 2012, 査読有.
- [図書] (計 1 件)
- ① Keitetsu Rokugo and Tetsushi Kanda Editors: Strain Hardening Cement Composites: Structural Design and Performance, Springer, 78pp., 2012.11. ISBN:978-94-007-4835-4
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 六郷 恵哲 (ROKUGO, Keitetsu)
 岐阜大学・工学部・教授
 研究者番号: 40127155