

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06307

研究課題名(和文) 建築物の耐震性向上のための地球環境配慮型高流動・高靱性コンクリートの開発

研究課題名(英文) Development of Environment-Friendly High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Concrete Using Recycled Aggregate for Seismic Performance Improvement of Reinforced Concrete Buildings

研究代表者

渡部 憲 (WATANABE, Ken)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：10384934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地球環境に配慮した、鉄筋コンクリート建築物の耐震性向上技術の提案を目的として、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの開発を行った。また、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート製RC梁試験体の載荷試験および数値解析を行い、性能向上メカニズムの解明を目指した。その結果、再生骨材を使用した高流動高流動高靱性コンクリートの調合、力学特性およびこのような材料を使用した鉄筋コンクリート部材の性能向上メカニズムが明らかとなり、鉄筋コンクリート建築物の耐震性向上に大きく貢献可能となる成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed high-fluidity ductile-fiber-reinforced concrete using recycled aggregate (high-fluidity R-DFRC) for proposing seismic performance improvement technology of reinforced concrete (RC) buildings considering the global environment. In addition, we carried out loading test and numerical analysis on high-fluidity R-DFRC RC beam specimens and aimed to elucidate the performance improvement mechanism. As a result, the mix proportions, mechanical properties of high-fluidity R-DFRC, and the performance improvement mechanism of RC members using such materials are clarified. These results will greatly contribute to improving the seismic performance of RC buildings.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：構造材料 繊維補強コンクリート

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究動向

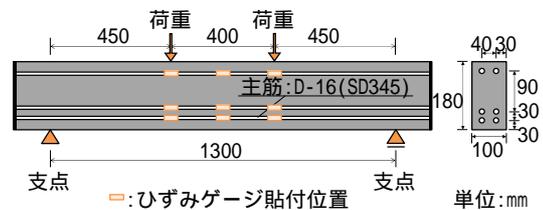
鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)建築物の主材料であるコンクリートは、圧縮強度と比較して引張強度が低く、打設後の硬化過程における発熱や収縮の影響でひび割れが生じる。このような欠点を改善するため、短繊維をコンクリートに混入した繊維補強コンクリートの開発が行われてきた。最近になって、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回る性能を有する「高靱性セメント複合材料(以下、DFRCC(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite)と略記)」が開発された。DFRCCとは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料で、引張応力下あるいは曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料である。

ところで現在、生産活動を実施するにあたり、地球環境問題に対する取り組みは重要な課題である。コンクリートの分野においても、天然骨材採取に伴う環境破壊や天然骨材資源の枯渇問題から、解体コンクリート塊から取り出した再生骨材を使用して再びコンクリートを製造する、再生骨材コンクリートの研究が活発に実施されている。

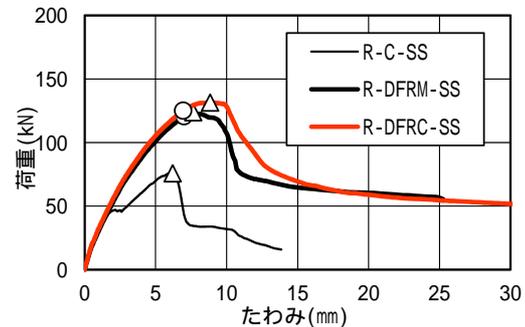
(2) 着想に至った経緯

このような背景から、筆者は、コンクリートのリサイクルをより積極的に推し進める上で、再生骨材の新たな有効利用技術を開発しておく必要があると考え、再生細骨材を使用したモルタルベースのDFRCC(以下、R-DFRM)について一連の検討を行った^{例えば、}。その結果、低品質な再生細骨材を使用した場合でもDFRCCは実現可能であること等を明らかにした(科学研究費補助金:若手研究(B)、課題番号:17760462、代表者:渡部 憲)。なお、現在開発されているDFRCCは、短繊維を混入した、粗骨材を使用しない繊維補強モルタルであり、大量のセメントを使用するため、一般的なコンクリートと比較して、フレッシュ時の流動性等の施工性が劣る、収縮ひずみが大きくなる、コスト高となる等の問題を抱えている。DFRCCへの粗骨材の混入は、収縮ひずみの低減、セメント量の低減、コスト低減に大きく寄与すると思われるが、フレッシュ時の流動性のさらなる低下や硬化時のひび割れ分散性の低下をまねく。このような理由から、粗骨材を使用した高靱性コンクリート(以下、DFRC(Ductile Fiber Reinforced Concrete)と略記)に関する研究はほとんどない。しかし、筆者らの検討によれば、再生細・粗骨材を使用した高靱性コンクリート(以下、R-DFRCと略記)の実現は可能である。図1に、せん断補強筋の無いRC梁試験体の載荷試験結果を示す。最大荷重(図1(b)中の印)に注目すると、コンクリートを使用したR-C-SS試験体の最大荷重は75.9kNであった。一方、R-DFRMを使用

したR-DFRM-SS試験体の最大荷重は124kN、R-DFRCを使用したR-DFRC-SS試験体の最大荷重は132kNであり、コンクリートを使用した場合と比較して、最大荷重が大幅に(1.7倍程度)上昇した。また、R-C-SS試験体では主筋が降伏することなく最大荷重をむかえ、せん断破壊に至ったが、R-DFRM-SSおよびR-DFRC-SS試験体では、せん断補強筋が無いにもかかわらず、主筋降伏(図1(b)中の印)が先行し、その後、最大荷重をむかえた。このような材料をRC建築物に積極的に適用していくことは、RC建築物の耐震性を著しく向上させるのみでなく、耐久性の向上にも大きく寄与する。残された重要な課題の一つは、施工性改善(特に、フレッシュ時の流動性改善)である。



(a) 試験体概要



(b) 荷重 - たわみ関係

図1 RC梁試験体の載荷試験結果

2. 研究の目的

本研究では、地球環境に配慮した、RC建築物の耐震性向上技術の提案を目的として、高流動R-DFRMおよびR-DFRCの開発を行う。また、高流動R-DFRMおよびR-DFRC製RC梁試験体の載荷試験および数値解析を行い、性能向上メカニズムを解明する。

(1) 本研究の特色・独創的な点

これまで、優れた力学特性を有しているにもかかわらず、一般的なコンクリートと比較してフレッシュ時の流動性が劣る等の理由から、RC建築物の耐震要素としての利用が進まなかったDFRCCの流動性を著しく改善しようとする点である。また、再生細骨材を使用したモルタルベースのR-DFRMのみでなく、再生細・粗骨材を使用したコンクリートベースのR-DFRCにおいても、流動性を著しく改善しようとする点である。なお、現在、DFRCに関する検討はほとんどなく、R-DFRCに関する検討は筆者らの研究^{例えば、}のみである。

(2)本研究の予想される結果と意義

高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合、力学特性およびこのような材料を使用した RC 部材の性能向上メカニズムが明らかとなり、RC 建築物の耐震性向上や、コンクリート打込み時の省力化に大きく貢献する。また、再生細・粗骨材の利用もさらに促進され、地球環境保全への貢献にもつながる。

3. 研究の方法

(1)調合および力学特性に関する検討

高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合および力学特性を明らかにする。

調合検討：使用材料は、骨材を再生細骨材（表乾密度 2.52~2.58g/cm³、吸水率 3.01~4.57%）および再生粗骨材（最大寸法 10 mm、表乾密度 2.58g/cm³、吸水率 3.34%）とする。セメントを普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）とする。繊維を PVA（径 0.2 mm、長さ 18 mm、密度 1.30g/cm³）および鋼繊維（径 0.55 mm、長さ 30 mm、密度 7.85g/cm³）とする。混和材料をフライアッシュ 種（密度 2.28~2.33g/cm³）、分離低減剤および高性能 AE 減水剤とし、フライアッシュのセメント置換率は 20%とする。

水結合材比を 40~60%、繊維体積混入率を 2~4%、繊維体積混合比（PVA：鋼繊維）を 5：5~10：0 として、高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合を、試し練りにより決定する。目標スランプフローは、高流動 R-DFRM で 75 cm、高流動 R-DFRC で 65 cm とする。

強度試験：材齢 28 日における圧縮および曲げ試験を行う。圧縮用試験体は、100 × 200mm 円柱、曲げ用試験体は、100 × 100 × 400mm 角柱とする。

(2)長期性状に関する検討

水結合材比を 40~60%、繊維体積混入率を 3%とした高流動 R-DFRM および R-DFRC の強度発現および収縮特性を明らかにする。

強度発現試験：材齢 7、28 および 91 日における圧縮および曲げ試験を行う。圧縮用試験体は、100 × 200mm 円柱、曲げ用試験体は、100 × 100 × 400mm 角柱とする。

収縮試験：乾燥開始材齢を 7 日とした収縮試験を行う。試験体は、100 × 100 × 400mm 角柱とする。

(3)RC 梁試験体の載荷試験および数値解析

水結合材比を 40~60%、繊維体積混入率を 3%とした高流動 R-DFRM および R-DFRC 製 RC 梁試験体の載荷試験および数値解析を行い、性能向上メカニズムを解明する。

RC 梁試験体の載荷試験：RC 梁試験体の寸法および載荷方法は、前掲図 1(a)と同様であるが、せん断破壊を先行させるため、主筋を D-16(SD490)とする。

RC 梁試験体の数値解析：高流動 R-DFRM および R-DFRC の材料特性を導入した FEM 解析を行う。

4. 研究成果

本研究の範囲において、以下の知見が得られた。

(1)調合および力学特性に関する検討

表 1 に示す高流動 R-DFRM のスランプフローは、73.4~74.0cm となり、目標スランプフロー75cm を概ね達成できた。また、表 1 に示す高流動 R-DFRC のスランプフローは、63.0~68.0cm となり、目標スランプフロー65cm を概ね達成できた。

表 1 に示す高流動 R-DFRM および R-DFRC は、十分なひび割れ分散性および優れた曲げ靱性を有していることがわかった。

上記 および より、高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合および力学特性が明らかとなった。

表 1 高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合

DFRCC 種類	水結合材比 (W/B) (%)	細骨材率 (vol. %)	細骨材結合材比 (%)	繊維体積混入率 (vol. %)	繊維体積混合比 (PVA : 鋼繊維)
高流動 R-DFRM (モルタル)	40	-	40	3	7:3
	50		65		10:0
	60		90		
高流動 R-DFRC (コンクリート)	40	85	40	3	7:3
	50		65	2	7:3
				3	5:5
					7:3
60	90	10:0			
					7:3

(2)長期性状に関する検討

高流動 R-DFRM および R-DFRC は、材齢 91 日においても、十分な曲げ靱性およびひび割れ分散性を有していることがわかった（一例として、図 2 および 3）。なお、曲げ靱性は、曲げ試験によって得られた、曲げ応力 - たわみ関係のたわみ 7.5 mm での曲げ靱性係数（たわみ 7.5 mm までの平均曲げ応力）として評価した。また、ひび割れ分散性は、曲げ試験時に確認された、試験体スパン中央部 100 mm に発生したひび割れ本数で評価した。

水結合材比を定めれば、高流動 R-DFRM および R-DFRC の材齢 91 日までの圧縮強度発現が推定可能となった。また、圧縮強度を定めれば、高流動 R-DFRM および R-DFRC の曲げ強度発現が推定可能となった。

乾燥材齢半年における収縮ひずみの大きさは、高流動 R-DFRM で 3115~3658 μ、高流動 R-DFRC で 2262~2898 μ となっており、一般的なコンクリート（800 μ 以下）と比較して、非常に大きな値となることがわかった。

図 4 に示す通り、高流動 R-DFRM に鋼繊維および再生粗骨材を混入し高流動 R-DFRC とすることで、収縮ひずみを大幅に低減可能であることがわかった。

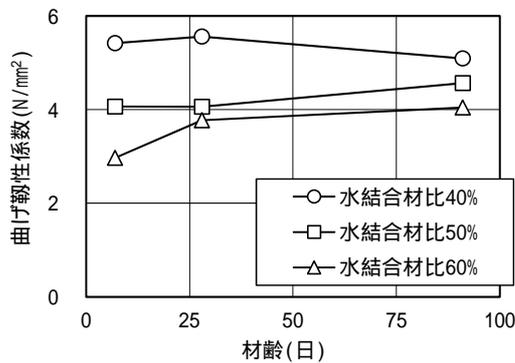


図2 高流動 R-DFRC の曲げ靱性係数 (繊維体積混入率 3%、PVA7:鋼繊維 3)

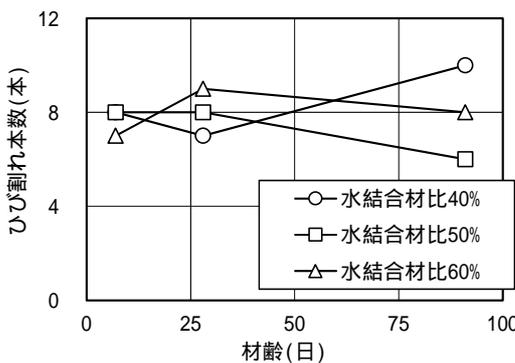


図3 高流動 R-DFRC のひび割れ本数 (繊維体積混入率 3%、PVA7:鋼繊維 3)

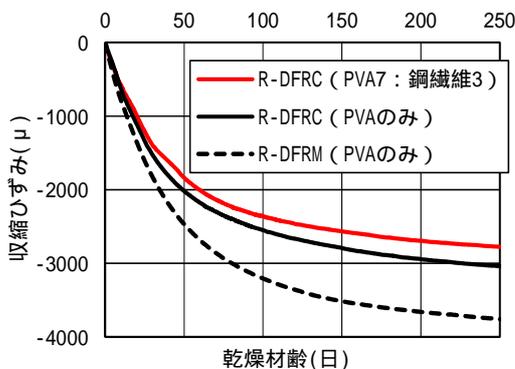


図4 収縮ひずみの経時変化 (水結合材比 50%、繊維体積混入率 3%)

(3) RC 梁試験体の載荷試験および数値解析

表2に示す通り、一般的なコンクリートを使用した場合の計算せん断耐力(計算せん断耐力は、高流動 R-DFRM および R-DFRC の圧縮強度を、文献等に示される式に代入して算出)と比較して、高流動 R-DFRM および R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重は大幅に増加することがわかった。

表2および図5に示す通り、水結合材比を50%とした高流動 R-DFRM 製 RC 梁試験体の最大荷重は、材齢の経過に伴い増加し、その傾向を、本解析においても評価できることがわかった。

表2および図6に示す通り、水結合材比を40%とした高流動 R-DFRM 製 RC 梁試験体の最

大荷重(載荷材齢 56 日)は、水結合材比を50%とした場合(載荷材齢 56 日)と比較して低下し、その傾向を、本解析においても評価できることがわかった。

材齢および水結合材比の相違に伴う高流動 R-DFRM 製 RC 梁試験体の最大荷重の変動は、R-DFRM の材料特性(主として圧縮強度、引張強度、引張終局ひずみ)の相違を把握すれば、概ね、解析的に説明できることがわかった。

表2および図7に示す通り、水結合材比の低下に伴い、高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重が増加する傾向を、本解析においても、概ね評価できることがわかった。

表2および図8に示す通り、同一水結合材比であれば、RC 梁試験体の最大荷重は、高流動 R-DFRC > 高流動 R-DFRM となることを、圧縮強度、引張強度および引張終局ひずみの相違に着目することにより把握できることがわかった。

以上、高流動 R-DFRM および R-DFRC の調査、力学特性およびこのような材料を使用した RC 部材の性能向上メカニズムが明らかとなり、RC 建築物の耐震性向上や、コンクリート打込み時の省力化に大きく貢献可能となる成果が得られた。また、再生細・粗骨材の利用もさらに促進され、地球環境保全への貢献にもつながる成果が得られた。

今後、高流動 R-DFRM および R-DFRC の収縮ひずみ低減に関する検討が急務である。

表2 RC 梁試験体の最大荷重

DFRC 種類	水結合材比 (W/B) (%)	載荷材齢 (日)	最大荷重 (kN)		計算せん断耐力 (kN)
			実験	解析	
高流動 R-DFRM (モルタル)	40	56	94.6	111	58.7
		28	90.0	98.4	40.6
	50	56	96.3	112	45.9
		91	103	117	54.5
高流動 R-DFRC (コンクリート)	40	56	93.6	89.8	40.0
		56	121	143	60.9
	60	105	129	49.6	
	60	95.3	106	40.2	

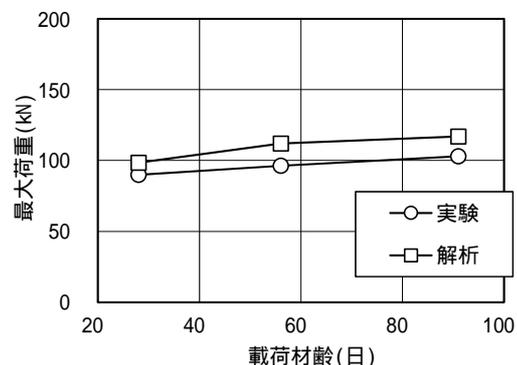


図5 載荷材齢の相違が RC 梁試験体の最大荷重に及ぼす影響 (高流動 R-DFRM、水結合材比 50%)

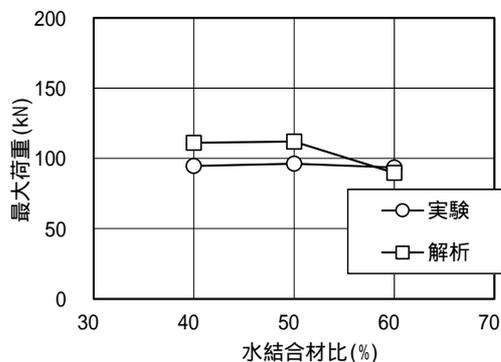


図6 水結合材比の相違が RC 梁試験体の最大荷重に及ぼす影響 (高流動 R-DFRM、載荷材齢 56 日)

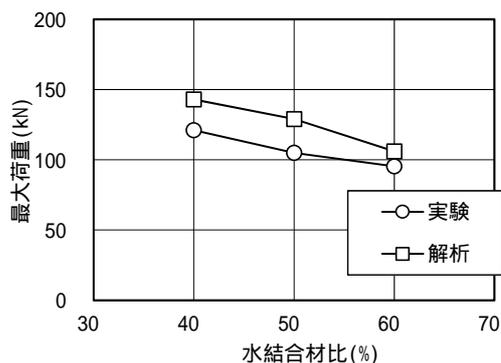


図7 水結合材比の相違が RC 梁試験体の最大荷重に及ぼす影響 (高流動 R-DFRC、載荷材齢 56 日)

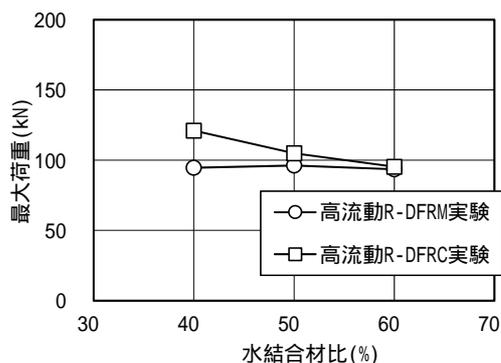


図8 DFRCC 種類の相違が RC 梁試験体の最大荷重に及ぼす影響 (載荷材齢 56 日)

< 引用文献 >

高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会:高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、128pp.、2002.1
 渡部 憲、大岡 督尚、白都 滋:再生細骨材を用いた繊維補強セメント複合材料の材料特性、コンクリート工学、第44巻、第3号、pp.11-18、2006.3
 堀越 哲郎、斉藤 忠、V. C. Li: PVA 繊

維を用いた高靱性コンクリートに関する研究、高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集、pp.55-60、2003.12
 中村 允哉、渡部 憲:再生骨材を使用した高靱性コンクリートの材料特性、コンクリート工学年次論文集、第33巻、第1号、pp.335-340、2011.7
 中村 允哉、渡部 憲、白都 滋、山田友也:再生骨材を使用した高靱性コンクリート製 RC 梁の破壊挙動、コンクリート工学年次論文集、第34巻、第1号、pp.358-363、2012.7
 日本建築学会関東支部:鉄筋コンクリート構造の設計 学びやすい構造設計、日本建築学会関東支部、pp.275-290、2002.1

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

白鳥 有平、渡部 憲:水結合材比の相違する再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート製 RC 梁のせん断耐力に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、第40巻、第1号、2018.7(掲載決定)、査読有
 丸山 裕生、渡部 憲:再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの強度発現、コンクリート工学年次論文集、第40巻、第1号、2018.7(掲載決定)、査読有
 渡辺 健、渡部 憲:再生骨材を使用した高流動繊維補強コンクリートの力学特性、コンクリート工学年次論文集、第39巻、第1号、pp.271-276、2017.7、査読有
 白鳥 有平、渡部 憲:再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料製 RC 梁のせん断耐力に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、第39巻、第1号、pp.241-246、2017.7、査読有
 Maruyama, Y., Watanabe, K. and Ohtsu, N.: Fundamental Study on Strength Development of High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composites Using Recycled Fine Aggregate, the Proceedings of the 27th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.132-138, June 2017、査読有
 大津 直人、渡部 憲:再生細骨材を使用した高流動繊維補強モルタルに関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、第38巻、第1号、pp.357-362、2016.7、査読有

[学会発表](計10件)

飯島 友貴、渡部 憲、白鳥 有平:水結合材比の相違する再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料製 RC 梁の破壊挙動(その1)実験概要および結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.117-118、2017.8

白鳥 有平、渡部 憲、飯島 友貴：水結合材比の相違する再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料製 RC 梁の破壊挙動(その 2)解析概要および結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.119-120、2017.8

丸山 裕生、渡部 憲：再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料の曲げ強度発現、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.115-116、2017.8

増島 夏熙、渡部 憲、渡辺 健、大瀧 諄：再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(その 1)実験概要およびフレッシュ試験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.109-110、2017.8

大瀧 諄、渡部 憲、渡辺 健、増島 夏熙：再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(その 2)圧縮破壊挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.111-112、2017.8

渡辺 健、渡部 憲、大瀧 諄、増島 夏熙：再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(その 3)曲げ破壊挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.113-114、2017.8

渡辺 健、渡部 憲、大津 直人：再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料(その 1)繊維補強モルタルの実験概要およびフレッシュ試験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.317-318、2016.8

大津 直人、渡部 憲、渡辺 健：再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料(その 2)繊維補強モルタルの強度試験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.319-320、2016.8

丸山 裕生、渡部 憲、大津 直人：再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料(その 3)圧縮強度発現、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.321-322、2016.8

白鳥 有平、渡部 憲、大津 直人：再生細骨材を使用した高流動高靱性セメント複合材料(その 4)) RC 梁の適用性、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.323-324、2016.8

渡辺 健 (WATANABE, Ken)

飯島 友貴 (IIJIMA, Tomoki)

大瀧 諄 (OHTAKI, Jun)

増島 夏熙 (MASUJIMA, Natsuki)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 憲 (WATANABE, Ken)

東海大学・工学部建築学科・教授

研究者番号：10384934

(2) 研究協力者

大岡 督尚 (OHOKA, Tokunao)

白都 滋 (HAKUTO, Shigeru)

大津 直人 (OHTSU, Naoto)

白鳥 有平 (SHIRATORI, Yuhei)

丸山 裕生 (MARUYAMA, Yumi)