

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：32644
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：18K04442
研究課題名（和文）建築物の耐久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収縮低減

研究課題名（英文）Shrinkage Reduction of Environment-Friendly High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Concrete Using Recycled Aggregate for Durability Improvement of 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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地球環境に配慮した、RC建築物の耐久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収縮ひずみ低減に関する検討を行った。また、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート（収縮ひずみ低減対策有）製RC梁試験体の載荷試験および数値解析を行い、RC部材への適用性について検討を行った。その結果、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート（収縮ひずみ低減対策有）の調合、力学特性およびこのような材料のRC部材への適用性が明らかとなり、RC建築物の耐久性向上に大きく貢献する成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートは、RC建築物の耐震性を大きく向上させる可能性を有する材料である。しかし、一般的なコンクリートと比較して、収縮ひずみが非常に大きくなるという問題を抱えていた。収縮ひずみが大きくなるほどひび割れ幅の増大が懸念され、RC建築物の耐久性の確保が問題となる。今回、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの収縮ひずみ低減手法等が明らかとなり、RC建築物の耐久性向上に大きく貢献する成果が得られた。今後、解体コンクリート塊から製造される再生骨材の利用も更に促進され、地球環境保全への貢献にもつながると期待される。

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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の学術的背景

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、打込み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。

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)。

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している。そのため、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更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、細骨材のみでなく粗骨材も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。図1.1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、コンクリート製R-C-SS試験体の最大荷重は75.9kNであった。一方、R-DFRM製R-DFRM-SS試験体の最大荷重は124kN、再生細・粗骨材を使用したDFRC(以下、R-DFRCと略記)製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。

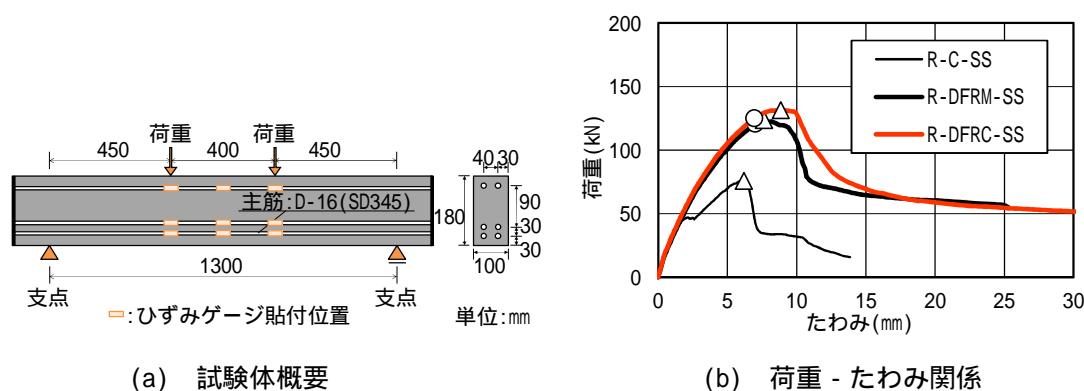


図1 RC梁試験体の載荷試験結果

(2) 研究課題の核心をなす学術的「問い」

R-DFRC普及のため、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。そこで筆者は、流動性を著しく改善した高流動R-DFRCについて一連の検討を行った^{例えば}。

その結果、スランプフロー65cmの高流動R-DFRC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:基盤研究(C) 課題番号:15K06307、代表者:渡部 憲)。また、当該研究の中で、高流動R-DFRMおよびR-DFRCの収縮特性についても検討を行った。その結果、粗骨材混入による乾燥収縮ひずみ低減効果も明らかとなった。しかし、高流動R-DFRCの乾燥材齢半年における乾燥収縮ひずみの絶対値は3000 μ 程度であり、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った。収縮ひずみが大きいほど、ひび割れ幅の増大が懸念される。即

ち、高流動 R-DFRC の収縮ひずみ低減に関する検討が急務である。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的

本研究では、地球環境に配慮した、RC 建築物の耐久性向上技術の提案を目的として、高流動 R-DFRC の収縮ひずみ低減に関する検討を行う。

(2) 本研究の学術的独自性と創造性

流動性を著しく改善した高流動 R-DFRC の収縮ひずみを低減しようとする点であり、RC 建築物の耐久性向上に大きく貢献する。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。現在、高流動 R-DFRC に関する検討は、筆者らの研究^{例えば}のみである。

3. 研究の方法

(1) 調合および力学特性に関する検討

収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合および力学特性を明らかにする。

使用材料は、骨材を再生細骨材（表乾密度 2.51~2.55g/cm³、吸水率 3.66~4.43%）および再生粗骨材（最大寸法 10 mm、表乾密度 2.53~2.54g/cm³、吸水率 3.68~3.71%）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 2.28~2.30g/cm³）、膨張材、収縮低減剤、分離低減剤および高性能 AE 減水剤とする。膨張材は、石灰系（LB、密度 3.14g/cm³）およびカルシウム・サルフォ・アルミネート系（CSA、密度 2.93g/cm³）の 2 種類を、単独または混合使用する。

表 1 に、高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合概略を示す。調合は、水結合材比を 40~60%、繊維体積混入率を 3%、繊維体積混合比（PVA：鋼繊維）を高流動 R-DFRM で 10：0、高流動 R-DFRC で 7：3 として、試し練りにより決定する。目標スランブフローは、高流動 R-DFRM で 75 cm、高流動 R-DFRC で 65 cm とする。フライアッシュのセメント置換率は 20% とする。膨張材は単位量で使用し、単位膨張材量を 0~120kg/m³ とする。収縮低減剤は水置換で使用し、使用量を結合材質量に対して 0~2% とする。

強度試験は、材齢 28 日における圧縮および曲げ試験とする。圧縮試験体は 100 × 200mm 円柱、曲げ試験体は 100 × 100 × 400mm 角柱とする。

表 1 高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合概略

DFRC 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)	単位膨張材量 (kg/m ³)	膨張材混合比 (LB:CSA)	収縮低減剤 (結合材質量 × %)
高流動 R-DFRM (モルタル)	40	-	40	3	10:0	0.80	10:0	0
	50		65			0.40, 80, 120	10:0, 5:5, 0:10	0, 2
	60		90			0.80	10:0	0
高流動 R-DFRC (コンクリート)	40	85	40	3	7:3	80	10:0	0
	50		65			0.40, 80, 120	10:0, 5:5, 0:10	0, 2
	60		90			80	10:0	0

(2) 長期性状に関する検討

収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRM および R-DFRC の収縮ひずみ低減効果を明らかにするため、水結合材比を 50%、繊維体積混入率を 3% とした高流動 R-DFRM および R-DFRC の乾燥収縮試験を、乾燥開始材齢 7 日として行う。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

収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRC の RC 部材への適用性を明らかにするため、水結合材比を 50%、繊維体積混入率を 3% とした高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の載荷試験および数値解析を行う。RC 梁試験体の載荷試験では、RC 梁試験体の寸法および載荷方法を、前掲、図 1(a) と同様とし、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では、各種強度試験により得られた高流動 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

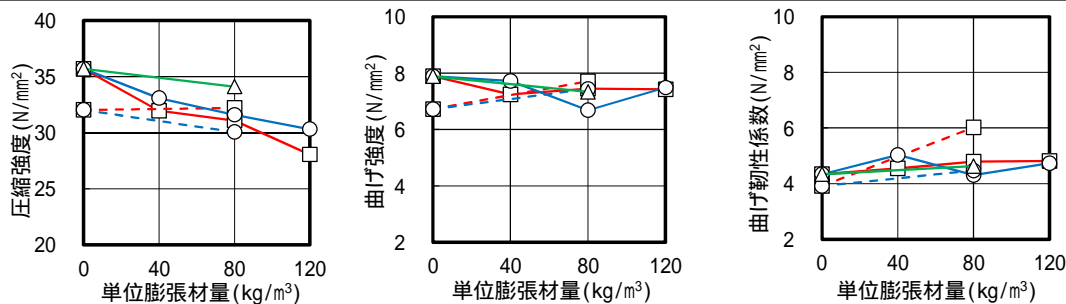
前掲、表 1 に示す収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRM のスランブフローは 68.0~

75.5cmとなり、目標スランプフロー75cmを概ね達成できた。また、前掲、表1に示す収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRC のスランプフローは 62.5~69.0cm となり、目標スランプフロー65cmを概ね達成できた。

収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRM および R-DFRC の各種力学特性は、単位膨張材量、膨張材種類および収縮低減剤の影響を受けることがわかった（一例として、図2および3）。なお、曲げ靱性係数は、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7.5mmまでの平均曲げ応力である。収縮ひずみ低減のためには、より多くの膨張材の使用が有効であると思われるが、圧縮強度を最優先とするのであれば、単位膨張材量を 80kg/m³程度までとすることが妥当である。

以上より、収縮ひずみ低減対策を施した高流動 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。

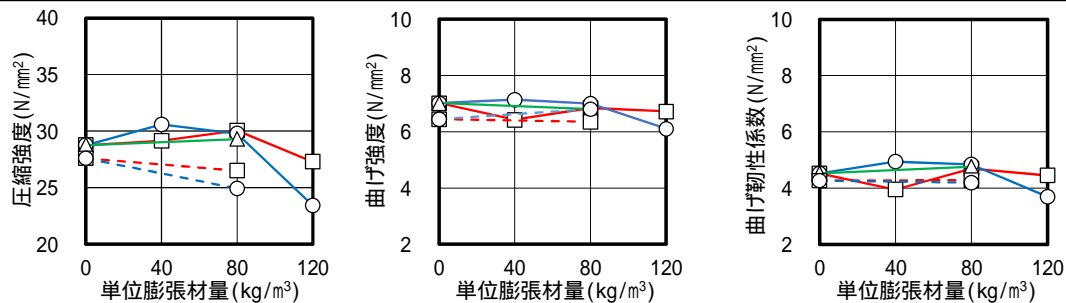
赤線：膨張材LB、青線：膨張材CSA、緑線：LBとCSA併用(5:5)、実線：収縮低減剤無、破線：収縮低減剤有



(a) 圧縮強度 (b) 曲げ強度 (c) 曲げ靱性係数

図2 単位膨張材量の相違が各種力学特性に及ぼす影響（高流動 R-DFRM、水結合材比 50%）

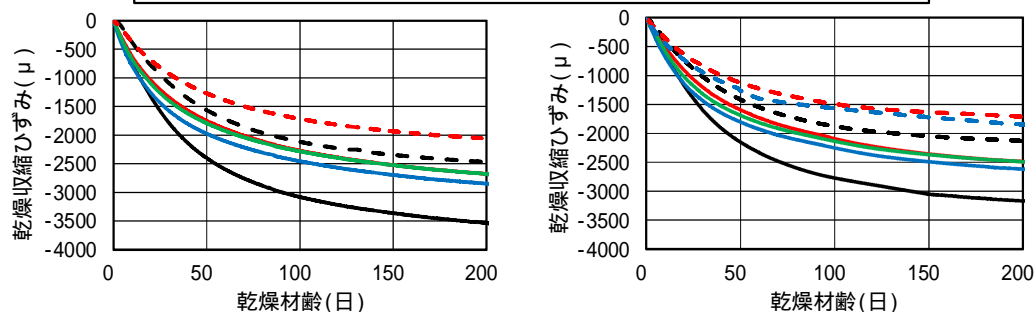
赤線：膨張材LB、青線：膨張材CSA、緑線：LBとCSA併用(5:5)、実線：収縮低減剤無、破線：収縮低減剤有



(a) 圧縮強度 (b) 曲げ強度 (c) 曲げ靱性係数

図3 単位膨張材量の相違が各種力学特性に及ぼす影響（高流動 R-DFRC、水結合材比 50%）

黒線：収縮低減対策無、赤線：膨張材LB(80kg/m³)、青線：膨張材CSA(80kg/m³)
緑線：LBとCSA併用(5:5、80kg/m³)、実線：収縮低減剤無、破線：収縮低減剤有



(a) 高流動 R-DFRM (b) 高流動 R-DFRC

図4 乾燥収縮ひずみの経時変化（水結合材比 50%）

(2) 長期性状に関する検討

図4に示す通り、高流動 R-DFRM の乾燥収縮ひずみは、収縮ひずみ低減対策を施すことにより乾燥材齢半年で 679~1466 μ (19.5~41.9%)低減できることがわかった。また、高流動 R-DFRC の乾燥収縮ひずみは、収縮ひずみ低減対策を施すことにより乾燥材齢半年で 545~1445 μ (17.4~46.2%)低減できることがわかった。なお、高流動 R-DFRC において最も乾燥収縮ひずみを低減できたのは、膨張材 LB と収縮低減剤を同時使用した場合で、材齢半年の乾燥収縮ひずみの絶対値

は 1684 μ であるが、一般的なコンクリート（800 μ 以下）と比較して 2 倍程度となっている。しかし、DFRCC の特徴である複数ひび割れ特性（ひび割れ分散性）を踏まえれば、耐久性上問題となるひび割れの生じる可能性は低いと考えられる。

以上より、収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRM および R-DFRC の収縮ひずみ低減効果が明らかとなった。

(3) RC 梁試験体の載荷試験および数値解析

表 2 および図 5 の載荷試験結果によれば、水結合材比を 50%とした高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重は単位膨張材 LB 量の増加に伴い上昇し、収縮ひずみ低減対策を施していない場合で 105kN、単位膨張材 LB 量を 40kg/m³とした場合で 117kN、単位膨張材 LB 量を 80kg/m³とした場合で 124kN となることがわかった。また、水結合材比を 50%、単位膨張材 LB 量を 80kg/m³とした高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重(124kN)は、水結合材比を 40%とした収縮ひずみ低減対策を施していない高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重(121kN)と同程度以上まで上昇することがわかった。

表 2 および図 5 の FEM 解析結果によれば、単位膨張材 LB 量の増加に伴う高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重の上昇は確認できなかった。一因として、単位膨張材量の増加に伴う高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重の上昇は、硬化過程において膨張が主筋により拘束されたことによる梁試験体内部の高流動 R-DFRC の力学特性の変化によるものと考えられることが、パラメータ解析等により示唆された。

以上より、収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRC の RC 部材への適用性が明らかとなった。

表 2 高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重
(収縮低減剤無)

試験体	水結合材比 (%)	最大荷重 (kN)	
		載荷試験	FEM 解析
収縮低減対策無 (水結合材比40%)	40	121	143
収縮低減対策無	50	105	129
膨張材LB量40kg/m ³		117	129
膨張材LB量80kg/m ³		124	132

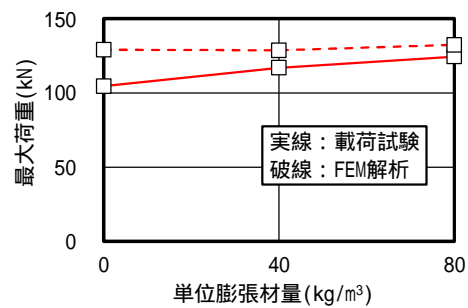


図 5 単位膨張材 LB 量の相違が RC 梁試験体の最大荷重に及ぼす影響
(高流動 R-DFRC、水結合材比 50%、収縮低減剤無)

以上、収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRM および R-DFRC の調合、力学特性およびこのような材料の RC 部材への適用性が明らかとなり、RC 建築物の耐久性向上に大きく貢献する成果が得られた。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、収縮ひずみ低減対策を施した高流動 R-DFRC 製 RC 梁試験体の最大荷重上昇メカニズムの解明および更なる収縮ひずみ低減のための検討が必要である。

< 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
- 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
- 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、pp.309-314、2018.6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 安西拓巳, 渡部 憲	4. 巻 第42巻, 第1号
2. 論文標題 再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの収縮ひずみ低減	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 173 - 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Anzai, T. and Watanabe, K.	4. 巻 30
2. 論文標題 Effect of Expansive Additive on Mechanical Properties of High-Fluidity Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composite Using Recycled Fine Aggregate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 the Proceedings of the 30th International Offshore and Polar Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 3103 - 3110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 渡部 憲, 安西拓巳	4. 巻 Vol. 27, No. 407
2. 論文標題 環境配慮型高流動・高靱性コンクリート	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan	6. 最初と最後の頁 182 - 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 安西拓巳, 渡部 憲	4. 巻 第43巻, 第1号
2. 論文標題 収縮ひずみ低減対策が再生骨材を付した高流動高靱性コンクリート製RC梁のせん断耐力に及ぼす影響用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Anzai, T., Watanabe, K. and Sato, H.	4. 巻 31
2. 論文標題 Relationship Between Strength Properties and Restrained Expansion Strain of High-fluidity Ductile-fiber-reinforced Concrete Using Recycled Aggregate with Expansive Additive	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 the Proceedings of the 31th International Offshore and Polar Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 安西拓巳, 渡部 憲, 飯島友貴
2. 発表標題 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収縮ひずみ低減 (その1) 強度試験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯島友貴, 渡部 憲, 安西拓巳
2. 発表標題 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収縮ひずみ低減 (その2) 拘束膨張試験および自由膨張収縮試験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤英和, 渡部 憲, 安西拓巳
2. 発表標題 再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートへの膨張材の適用性 (その1) 強度試験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安西拓巳, 渡部 憲, 佐藤英和
2. 発表標題 再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートへの膨張材の適用性 (その2) 拘束膨張試験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大岡 督尚 (OHOKA Tokunao)		
研究協力者	白都 滋 (HAKUTO Shigeru)		
研究協力者	飯島 友貴 (IIJIMA Tomoki)		
研究協力者	安西 拓巳 (ANZAI Takumi)		
研究協力者	佐藤 英和 (SATO Hidekazu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------