

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06311

研究課題名(和文) 材料分離および乾燥収縮を合理的に考慮できるコンクリートの調合設計法の確立

研究課題名(英文) Establishment of mix design method of concrete considering reasonably segregation and drying shrinkage

研究代表者

寺西 浩司 (TERANISHI, KOHJI)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：30340293

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)：材料分離および乾燥収縮を合理的に考慮できるコンクリートの調合設計法の確立を最終的な目的とした各種の検討を行った。材料分離に関しては、スランプ試験や円筒貫入試験における材料分離のメカニズム、コンクリートの分離度合いに対する使用材料や調合の影響、分離度合いが構造体コンクリートの各種品質に及ぼす影響などを明らかにした。また、乾燥収縮に関しては、複合理論に基づく乾燥収縮予測式に必要な各種セメントの入力値データを整備した。このほかに、外部環境が乾燥収縮に及ぼす影響、収縮ひび割れの幅が人の印象に及ぼす影響などについても明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Various investigations with a goal of establishing the mix design of concrete considering reasonably segregation and drying shrinkage were conducted. Regarding segregation, the mechanism of segregation occurring during slump test and cylinder penetration test, the effects of materials and mix design on segregation degree of concrete and the effect of segregation degree on various properties of concrete in structures were clarified. Regarding drying shrinkage, the data for various types of cement to input into the prediction equation of drying shrinkage based on composite model were prepared. The effect of external environment on drying shrinkage and the effect of shrinkage crack width on impression were also clarified.

研究分野：工学

キーワード：材料分離 乾燥収縮 ひび割れ ブロッキング 構造体コンクリート 骨材 調合 複合理論

1. 研究開始当初の背景

コンクリート工事の施工品質を確保するためには、フレッシュコンクリートの流動性を適切に設定するとともに、材料分離を抑制することが極めて重要であり、そのためには、より積極的・合理的に材料分離を制御できるような調合設計法を構築する必要がある。しかし、現状では、材料分離のメカニズムや定量評価に関する研究はほとんど進展しておらず、このことが合理的な調合設計法を確立するうえでの障壁となっている。したがって、材料分離を考慮できる合理的な調合設計法を構築するためには、その理論的根拠を得るために、これらのことに関しても研究を進める必要がある。

一方、現在の調合設計法は、コンクリートの乾燥収縮についても、積極的に制御できるようにはなっていない。ただし、そのような状況にあっても、骨材品質や骨材量、骨材寸法がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関しては、これまでの研究によりかなり解明されている。そして、それらの研究は、コンクリートを骨材とセメントペーストから成る 2 相材料と考えて各相の影響を検討するという点で、上記の材料分離に関する検討とアプローチが類似している。したがって、材料分離を合理的に考慮できる調合設計法を検討する際には、乾燥収縮を合理的に考慮できる調合設計法についても併せて検討すれば、効率的に研究を実施できるものと考えられる。

2. 研究の目的

材料分離および乾燥収縮を合理的に考慮できるコンクリートの調合設計法の確立を最終的な目的とし、次の事項に関して具体的な検討を行った。

I. 材料分離に関する検討

(1) コンクリートの材料分離現象のメカニズムを検討し、さらに、分離度合いを評価するための標準試験方法を確立する。

(2) コンクリートの分離度合いに対する使用材料および調合条件の影響を検討する。

(3) 分離度合いが構造体コンクリートの各種品質に及ぼす影響を検討する。

II. 乾燥収縮に関する検討

(1) 複合理論を基盤としてコンクリートの乾燥収縮に関する検討を行う。

(2) 外部環境が構造体コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を検討する。

(3) 乾燥収縮ひび割れが美観(人の印象)に及ぼす影響を検討する。

3. 研究の方法

I. 材料分離に関する検討

(1) 材料分離現象のメカニズムおよび分離度合いを評価するための試験方法に関する検討
①突固めがスランプコーン内のコンクリートのレオロジー一定数分布に及ぼす影響の検討：コンクリートが材料分離しているか否かは一般的にスランプ試験により判断される。この

ことを踏まえ、まず、スランプ試験における分離メカニズムの解明を試みた。スランプ試験では、通常、突固めにより粗骨材が沈降し、そのことにより、スランプコーン内のコンクリートの高さ方向のレオロジー一定数が不均一化するものと考えられる。本研究では、このことがスランプ試験における分離挙動に大きな影響を及ぼすものと考えた。そして、表 1 に実験ケースを示すように、突固め回数などを変化させ、スランプ試験を行うとともに、高さ方向の粗骨材量の分布を調べた。また、スランプコーン内のコンクリートにおける高さ方向のレオロジー一定数の分布を求めた。

表 1 実験ケース

記号	コンクリートの状態	スランプ (cm)	突固め回数 (回)
N18-25	健全	18	25
N18-0			0
N21-25		21	25
N21-0			0
S18-25	分離	18	25
S18-0			0
S21-25		21	25
S21-0			0

②ペーストの流動性に対する粉体の粒子形状および粒度の影響の検討：コンクリートの分離抵抗性に対しては、マトリックスセメントペーストの流動性が大きな影響を及ぼすものと考えられる。このことを踏まえ、各種ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石粉の計 11 種類の粉体を試料とし、これらの粉体を用いたペーストの流動性に対する粉体の粒子形状、粒度分布などの影響を検討した。

③円筒貫入試験で得られる分離評価値に対する使用材料および調合条件の影響の検討：コンクリートの分離度合いは、円筒貫入試験の試験値である流入モルタル値により定量評価できる可能性が高い。また、流入モルタル値とウェットスクリーニングモルタルのフロー値の間に高い相関が見られることから、マトリックスモルタルの流動性質がコンクリートの分離抵抗性に対して支配的な影響を及ぼすものと考えられる。そこで、要因および水準を表 2 に示すように広範に設定した実験を実施し、これらのことを検証した。

表 2 実験要因とその水準

要因	水準
水セメント比 (%)	45, 50, 55, 60, 65
細骨材容積 (L/m ³)	218, 238, 258, 278, 298, 318
粗骨材容積 (L/m ³)	298, 338, 378, 398, 418
粗骨材種類	春日井産硬質砂岩砕石、菅島産かんらん岩砕石、藤原産石灰岩砕石、フェロニッケルスラグ粗骨材、揖斐川産川砂利
AE減水剤添加率(C×%)	0.3, 0.5, 0.7, 1.1, 1.5, 1.9

(2) コンクリートの分離度合いに対する使用材料および調合条件の影響の検討

コンクリートの分離度合いに対する使用材料および調合条件の影響を検討するために、非鉄スラグ骨材 (フェロニッケルスラグ細骨

材または銅スラグ細・粗骨材)を混合し、表3に示す要因と水準を適宜組み合わせた計37ケースのコンクリートを試料として、円筒貫入試験や模擬粗骨材沈降試験などを行い、分離度合いを評価した。

表3 実験要因とその水準

要因	水準
水セメント比(%)	40, 50, 60
セメント	普通ポルトランドセメント(N) 高炉セメントB種(B)
ベース細骨材	砕砂(C), 陸砂(S)
非鉄スラグ細骨材 (置換細骨材)	フェロニッケルスラグ細骨材: FNS1.2(OS), FNS5(HS), FNS5(YS) 銅スラグ細骨材: CUS2.5(MS), CUS2.5(SS)
非鉄スラグ細骨材 の混合率(%)	0, 15, 30, 50, 100

(3) 分離度合いが構造体コンクリートの各種品質に及ぼす影響の検討

材料分離したコンクリートを打ち込むと構造体コンクリートの各種品質がどのように低下するかを定量的に検討した研究はほとんど報告されていない。そこで、図1に示すような、コンクリートの流動を阻害する鉄筋を配置した壁試験体に、表4に示すような、様々な種類やワーカビリティのコンクリートを打ち込んだ。そして、ブロッキングや粗骨材沈降などの分離現象の度合いを調べた。また、それらが構造体コンクリートの力学的性質、乾燥収縮、水和熱、表層品質などの部材内での分布状況にどのような影響を及ぼすのかを検討した。

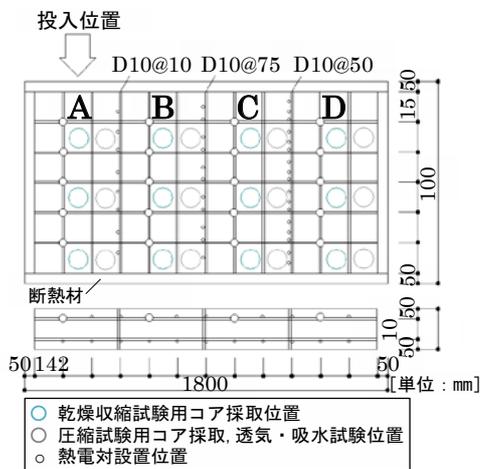


図1 壁試験体

表4 実験ケース

記号	コンクリート種別	目標スランブ(cm)	目視による分離状況	
N18	普通コンクリート	18	健全	
S18			分離	
N23		23	健全	
P60	高流動 コンクリート	粉体系 増粘剤系		60*
V60				
M18	構造躯体用モルタル	18		

*スランブフロー

II. 乾燥収縮に関する検討

(1) 複合理論を基盤とした乾燥収縮に関する検討

①各種セメントを用いたセメントペーストの乾燥収縮ひずみおよび弾性係数の把握：複合理論を基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式を有効に活用するためには、セメント種類ごとのセメントペーストの乾燥収縮ひずみや弾性係数の値を入力値データとして予め整備しておく必要がある。しかし、現時点では、この入力値は、限られた種類のセメントに対してしか用意されていない。これらのことから、本研究では、調査を同一とし、様々な種類のセメントを用いたセメントペーストの乾燥収縮ひずみおよび弾性係数を測定し、乾燥収縮予測式の入力値データとして利用できるように整理した。

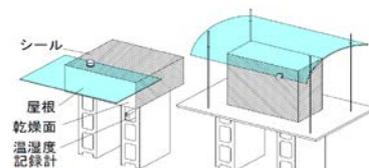
②レディーミクストコンクリートの乾燥収縮制御を目的とした骨材のスクリーニングに関する検討：全国各地のレディーミクストコンクリート工場(生コン工場)からコンクリートの標準配合表を入手した。そして、複合理論に基づく乾燥収縮予測式により、生コン工場や呼び強度、スランブごとに、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを所定値以下に制御できるような、骨材の乾燥収縮ひずみの値を計算した。また、それらの結果を踏まえ、レディーミクストコンクリートに使用する骨材のスクリーニング値を提示した。さらに、提示した値に対応するような骨材の各種特性値についても併せて検討した。

(2) 外部環境が構造体コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響の検討

RC構造物の合理的なひび割れ抑制対策を策定するためには構造体コンクリートの乾燥収縮ひずみを知る必要があるが、この値は、外部環境やその他の様々な要因により変化する。このことから、本研究では、表5に示すような実験ケースを設定し、図2に示す試験体を用いて、実環境下の異なる位置で乾燥収縮試験を行った。そして、外部環境の温湿度や降雨などがコンクリートの内部湿度および乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を調べた。

表5 実験ケース

記号	試験体設置場所	方位	屋根	乾燥面
C-D	恒温恒湿室	-	-	有
C-S				無
R-D	室内	-	-	有
E-D				
S-Dr				
S-D				
N-Dr				
N-D				
U-Dr				
U-D				
U-S				



(a) 上面以外 (b) 上面
図2 試験体(屋根有りの場合)

(3) 乾燥収縮ひび割れ的美観（人の印象）への影響に関する検討

建築物の美観の低下が補修や建替えの直接的な動機となるケースも多いと推察されるため、美観の観点からの補修が必要な RC 構造物のひび割れ幅の限度についても明確にしておく必要があるものと考えられる。このことから、本研究では、幅の異なる収縮ひび割れのサンプルを現実に近い形で提示し、人々が好ましくないと感じるひび割れ幅の限度を、表 6 に示す要因および水準で行ったアンケートにより調査した。

要因	水準
ひびわれ幅(mm)	0.1、0.3、0.5、1以上
観察距離(m)	0.5、1.0、2.0、4.0
観察順序	至近距離から離れていく 遠距離から近づいていく

4. 研究成果

1. 材料分離に関する検討結果

(1) 材料分離現象のメカニズムおよび分離度合いを評価するための試験方法

①突固めがスランブコン内のコンクリートのレオロジー定数分布に及ぼす影響： 3. I. (1)

(1) ①に示した実験の結果から、(1)コンクリートの材料分離の有無にかかわらず、粗骨材は、スランブ試験で突固めを行わないと沈降せず、突固めを 25 回行うとスランブコン内で著しく沈降する（図 3）、(2)突固めを 25 回行うと、コンクリートの降伏値はスランブコン内の下部ほど大きくなる。また、材料分離したコンクリートの場合は、その傾向がより顕著になる（図 4）、などの知見を得た。

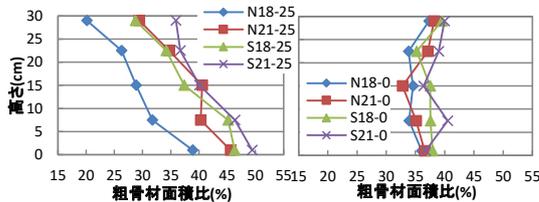


図 3 スランブコン内の粗骨材面積比の分布

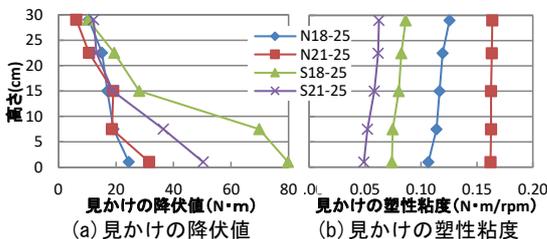


図 4 スランブコン内の見かけのレオロジー定数（補正值）の分布（突固め 25 回）

②ペーストの流動性に対する粉体の粒子形状および粒度の影響： 3. I. (1) ②に示した実験の結果から、フロー試験（JIS R 5201）においてペーストが流動を開始する水粉体体積比（拘束水比）は、粉体の粒径が大きいほど、また、フライアッシュ（FA）のように、粒子形状が丸みを帯びているほど低くなる（図 5）、などの知見を得た。

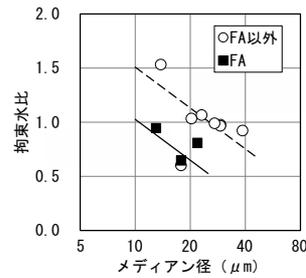


図 5 拘束水比と粉体のメディアン径の関係

③円筒貫入試験で得られる分離評価値に対する使用材料および調合条件の影響： 3. I. (1) ③に示した実験の結果から、(1)コンクリートの分離抵抗性に対しては、マトリックスモルタルに関わる要因が大きな影響を及ぼし、粗骨材に関わる要因は大きな影響を与えない、(2)使用材料や調合条件を様々に変化させた場合でも、マトリックスモルタルの流動性質がコンクリートの分離抵抗性に支配的な影響を及ぼすといえる（図 6）、などの知見を得た。

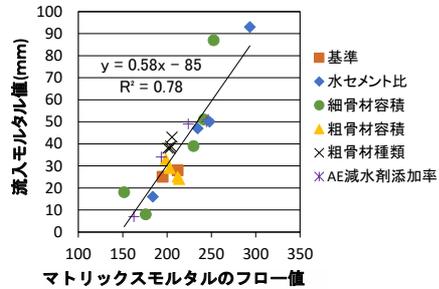


図 6 流入モルタル値とモルタルのフロー値の関係

(2) コンクリートの分離度合いに対する使用材料および調合条件の影響

3. I. (2) に示した実験の結果から、コンクリートに非鉄スラグ骨材を混合した場合であっても、通常通りの調合設計を行えば、骨材とマトリックス間の分離に対する抵抗性は、天然骨材を用いた場合とほぼ同程度に確保される（図 7）、などの知見を得た。

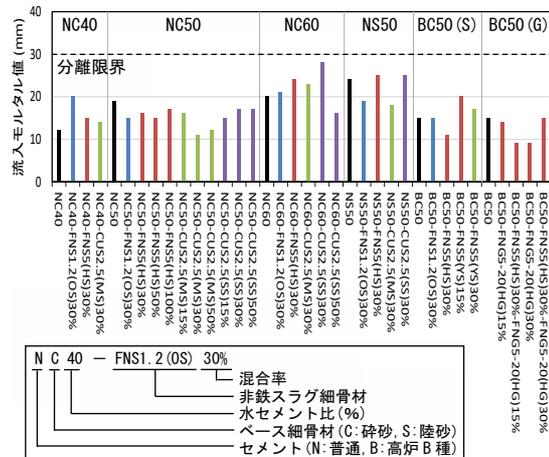


図 7 非鉄スラグ骨材コンクリートの流入モルタル値

(3) 分離度合いが構造体コンクリートの各種品質に及ぼす影響

3. I. (3) に示した実験の結果から、(1)普通コンクリートの分離抵抗性が低いと、あき間

隔が 35~40mm 程度以下の狭い鉄筋間を通過する際の粗骨材のブロッキングに対する抵抗性が顕著に低下する(図 8)。また、粗骨材の沈降に対する抵抗性も同時に低下する、(2)スランプフロー試験で材料分離の明確な様相が観察されない場合でも、高流動コンクリートが、間隔の狭い鉄筋間を通過する際の粗骨材のブロッキング、および粗骨材の沈降に対する十分な抵抗性を保持していないことがある(図 8)、(3)粗骨材とモルタル間の分離により、構造体コンクリートの水和熱に伴う温度上昇量、ヤング係数および乾燥収縮ひずみ(図 9)に部材内で大きな差が生じることがある。一方で、圧縮強度および表層品質に大きな差は生じない、などの知見を得た。

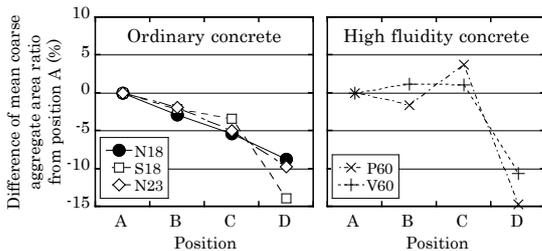


図 8 粗骨材面積比の水平方向の分布

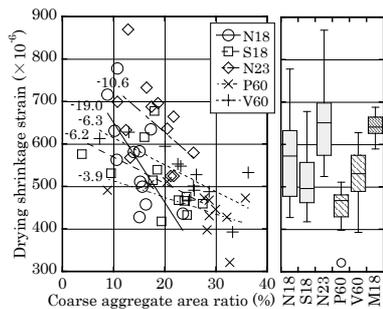


図 9 乾燥収縮ひずみと粗骨材面積比の関係

II. 乾燥収縮に関する検討結果

(1) 複合理論を基盤とした乾燥収縮に関する検討の結果

①各種セメントを用いたセメントペーストの乾燥収縮ひずみおよび弾性係数： 3. II. (1) ①に示した実験の結果(図 10)を基に、早強ポルトランドセメント(H)、普通ポルトランドセメント(N)、中庸熱ポルトランドセメント(M)、低熱ポルトランドセメント(L)、高炉セメントB種(BB)、フライアッシュセメントB種(FB)、シリカフェームセメント(SF)および普通エコセメント(E)を用いたセメントペーストの乾燥収縮ひずみおよび弾性係数の予測に必要な入力値データを整理した。こ

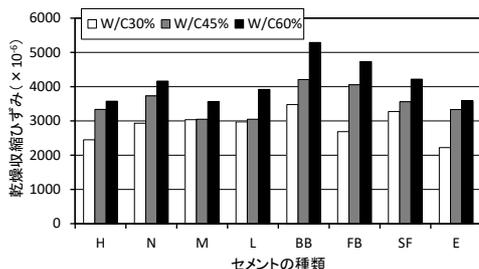


図 10 セメントペーストの乾燥収縮ひずみ

れらのデータを利用すれば、複合理論を基盤とした予測式によりコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測できる。

②レディーミクストコンクリートの乾燥収縮制御を目的とした骨材のスクリーニングに関する検討結果： 3. II. (1) ②に示した検討の結果から、(1)乾燥収縮ひずみ 170×10^{-6} 以下をスクリーニング値として骨材を選定すれば、レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10^{-6} 以下に概ね制御できる(図 11)、(2)一般に使用されている骨材の少なくとも半数以上は、乾燥収縮ひずみが 170×10^{-6} 以下であり、スクリーニング値を満足することができる、(3)使用する細骨材と粗骨材の乾燥収縮ひずみの平均値がスクリーニング値 (170×10^{-6}) 以下であれば、コンクリートの乾燥収縮ひずみを 800×10^{-6} 以下に制御できる、(4)上記(1)に対応する骨材特性値のスクリーニング値は、細骨材および粗骨材の気乾含水率 1.2% 以下および 0.7% 以下、粗骨材の比表面積 $6.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 以下となる、などの知見を得た。

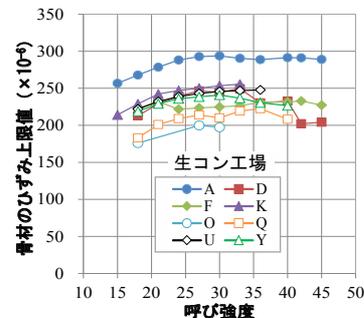
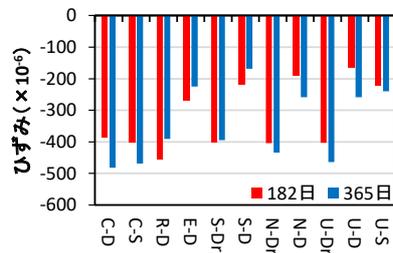


図 11 骨材のひずみ上限値と呼び強度の関係

(2) 外部環境が構造体コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

3. II. (2) に示した実験の結果(図 12)から、(1)構造体コンクリートの乾燥収縮ひずみに対しては、雨がかりの有無が支配的な影響を与える、(2)雨がかりのない部位の構造体コンクリートの乾燥収縮ひずみに方位による差異は見られない、などの知見を得た。



実験ケース

図 12 試験体表面のひずみ

(3) 乾燥収縮ひび割れの美観(人の印象)への影響

3. II. (3) に示した調査の結果から、(1)幅が大きいほど、また、観察距離が近いほど、人々は、そのひび割れを好ましくないと感じる(図 13)、(2)美観の観点から補修が必要となるひび割れ幅の限度としては 0.35 mm が一つの目安となる。また、常時の視認距離が遠い部位

では、このひび割れ幅を 0.059mm/m の割合で緩和することも可能と考えられる (図 14)、などの知見を得た。

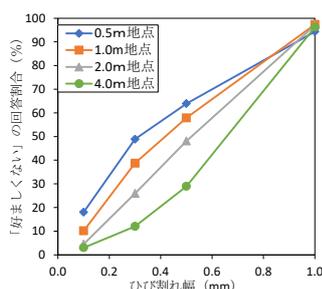


図 13 「好ましくない」の回答割合とひび割れ幅の関係

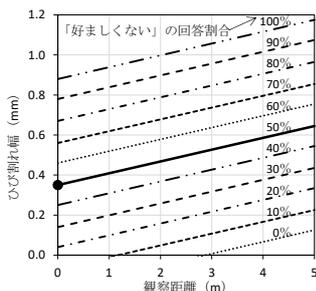


図 14 重回帰分析の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 17 件)

- ① 寺西浩司, 丹羽大地: 材料分離が構造体コンクリートの各種品質に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.749, pp.923-933, 2018.7, 査読有
- ② 北真都香, 寺西浩司, 佐藤晴香, 加藤領一, 松本千鶴: 外部環境がコンクリートの内部湿度および乾燥収縮に及ぼす影響, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.56, pp.61-64, 2018.2, 査読無
- ③ 松本千鶴, 寺西浩司, 佐藤晴香, 加藤領一: 外部環境がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響 (その 1. 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.219-220, 2017.8, 査読無
- ④ 佐藤晴香, 寺西浩司, 加藤領一: 外部環境がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響 (その 2. 測定結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.221-222, 2017.8, 査読無
- ⑤ 丹羽大地, 寺西浩司: 突固めがスランプコンクリート内のコンクリートのレオロジー定数分布に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.269-270, 2017.8, 査読無
- ⑥ 長江遥, 寺西浩司, 丹羽大地, 津坂知輝: 材料分離が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響 (その 1. 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.299-300, 2017.8, 査読無
- ⑦ 牧智也, 寺西浩司, 丹羽大地, 津坂知輝, 長江遥: 材料分離が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響 (その 2. 充填状況および粗骨材量分布), 日本建築学会大会学術

講演梗概集, A-1, pp.301-302, 2017.8, 査読無

- ⑧ 津坂知輝, 寺西浩司, 丹羽大地, 長江遥: 材料分離が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響 (その 3. 構造体コンクリートの品質), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.303-304, 2017.8, 査読無
- ⑨ 加藤領一, 寺西浩司, 佐藤晴香: 鉄筋腐食に伴うひび割れの発生パターンに対する鉄筋位置の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.781-782, 2017.8, 査読無
- ⑩ 丹羽大地, 寺西浩司: スラグ骨材を用いたモルタルおよびコンクリートの流動性および分離抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.61-66, 2017.7, 査読有
- ⑪ 寺西浩司, 佐藤晴香: 各種セメントを用いたセメントペーストの乾燥収縮ひずみ, 名城大学総合研究所紀要, No.22, pp.109-112, 2017.3, 査読無
- ⑫ 丹羽大地, 寺西浩司: スラグ骨材を用いたモルタルおよびコンクリートのワーカビリティ, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.55, pp.53-56, 2017.2, 査読無
- ⑬ 津坂知輝, 寺西浩司, 丹羽大地: 非鉄スラグ骨材を用いたコンクリートの基礎的性質 (その 1. スラグ骨材を用いたモルタルのレオロジー定数), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.97-98, 2016.8, 査読無
- ⑭ 丹羽大地, 寺西浩司, 鹿毛忠継: 非鉄スラグ骨材を用いたコンクリートの基礎的性質 (その 2. 非鉄スラグ骨材を用いたコンクリートのワーカビリティ), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.99-100, 2016.8, 査読無
- ⑮ 加納千智, 寺西浩司, 佐藤晴香: 各種セメントを用いたセメントペーストの乾燥収縮ひずみおよび弾性係数, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.173-174, 2016.8, 査読無
- ⑯ 加古俊太郎, 寺西浩司, 丹羽大地: 混和剤がセメントペーストの流動性に及ぼす影響に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.251-252, 2016.8, 査読無
- ⑰ 佐藤晴香, 寺西浩司: レディーミクストコンクリートの乾燥収縮制御を目的とした骨材のスクリーニングに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.543-548, 2016.7, 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺西 浩司 (TERANISHI KOHJI)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号: 30340293