

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04694

研究課題名（和文）広範な空隙率を持つ性能設計対応型ポーラスコンクリートの静弾性係数推定法の提案

研究課題名（英文）Proposal of an equation for estimating the static modulus of elasticity of porous concrete with wide range of voids for performance-based design

研究代表者

齋藤 俊克（SAITO, Toshikatsu）

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：70547819

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：複合則を適用した普通コンクリートの静弾性係数推定式として、コンクリートをマトリックス相と粒子相から成る二相系複合材料として取り扱うHashin-Hansen式が提案されている。一方、ポーラスコンクリートはマトリックス相、粒子相及び空隙相から成る三相系複合材料であることから、著者らは空隙相を考慮する空隙補正係数を同式に導入した静弾性係数推定式を提案している。その際、粒子相成分の粗骨材の静弾性係数として推定値を用いており、更なる検討が必要であった。本研究では、静弾性係数が既知の粗骨材を用いた場合の圧縮性状を明確にし、提案した推定式並びに空隙補正係数について検討して、その有用性を明らかにしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近では、ポーラスコンクリートの強度改善に関する研究が進展し、高強度領域での構造部材としての利用も期待される。そのためには、ポーラスコンクリートの圧縮性状の詳細な解明が必要であり、その一つが静弾性係数である。なお、コンクリートの静弾性係数は、鉄筋コンクリート構造物の構造計算時に構造部材の変形能や剛性を評価するために用いられる。本研究の成果は、ポーラスコンクリートの調合設計条件から、その静弾性係数の推定を可能にする手法を提供するものであり、ポーラスコンクリートの構造部材としての利用に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The Hashin-Hansen's equation introduced from the law of mixture is established for estimating the static modulus of elasticity of the ordinary cement concrete as a two-phase composite material. Based on that equation, the authors proposed the formula introducing the correction coefficient of voids for estimating the static modulus of elasticity of porous concretes as a three-phase composite. However, the proposed formula was established by using the estimated value of the static modulus of elasticity of the coarse aggregate. This research defines the compressive properties of the porous concretes using coarse aggregates with the known value of the static modulus of elasticity, and then the applicability of the proposed formula and the correction coefficient of voids for the formula are discussed. The test results show that the sufficient correlation between the estimated and measured values of the static modulus of elasticity of the porous concretes are recognized.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：ポーラスコンクリート 結合材 静弾性係数 推定式 Hashin-Hansen式 空隙補正係数 圧縮強度 単位容積質量

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、建設業界では、エコマテリアルとしての観点から、ポーラスコンクリートの水質浄化ブロック、屋上緑化基盤、浸透樹・側溝、河川護岸ブロック、排水性道路舗装、吸音壁などへの利用に関して様々な研究報告がある^{引用文献①, ②}。又、最近では、ポーラスコンクリートの強度改善に関する研究が進展し、高強度領域での構造部材としての利用も期待される。そのためには、ポーラスコンクリートの圧縮性状の詳細な解明が必要である。一般に、コンクリートの静弾性係数は、鉄筋コンクリート構造物の構造計算時に構造部材の変形能や剛性を評価するために用いられるものであり、調合設計条件から静弾性係数を推定することができれば、ポーラスコンクリートの構造部材としての利用に寄与するものと考えられる。一方、その調合設計時から利用できる、複合則を適用した普通コンクリートの静弾性係数の推定式として、コンクリートをマトリックス相と粒子相(骨材)から成る二相系複合材料として取り扱う Hashin-Hansen 式(式1)が提案されている^{引用文献③}。

$$E_c = \frac{(1-V_g)E_m + (1+V_g)E_g}{(1+V_g)E_m + (1-V_g)E_g} E_m \quad (式1)$$

ここに、 E_c : 複合材料の静弾性係数、 E_m : マトリックス相の静弾性係数、 E_g : 粒子相の静弾性係数、 V_g : 粒子相の体積分率

しかし、Hashin-Hansen 式では、コンクリートの空気量は関数式の変数として取扱われておらず、これは、一定の空気相がマトリックス相に均一に存在することを前提としているためである。ポーラスコンクリートは、普通コンクリートに比べて、多くの空隙を含んでおり、特に、その特性を生かす目的で、空隙量は調合設計時の変数として取り扱われる。従って、複合則を適用する場合、ポーラスコンクリートは、マトリックス相、粒子相及び空隙相からなる三相系複合材料として取り扱う必要がある。

そこで、申請者は、Hashin-Hansen 式を基本式として、マトリックス相を一定量の空気を含むセメントモルタル、粒子相を粗骨材とし、空隙率を考慮したポーラスコンクリートの静弾性係数推定式(式2)を提案している^{引用文献④}。

$$E_c = \frac{(1-V_g)E_m + (1+V_g)E_g}{(1+V_g)E_m + (1-V_g)E_g} E_m \cdot C_v \quad (式2)$$

ここに、 E_c : ポーラスコンクリートの静弾性係数 (GPa)、 E_m : 結合材としてのセメントモルタルの静弾性係数 (GPa)、 V_g : 粗骨材の体積分率 (m^3/m^3)、 E_g : 粗骨材の静弾性係数 (GPa)、 C_v : 空隙補正係数

しかしながら、(式2)のポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の提案においては、粒子相成分の粗骨材の静弾性係数として推定値を用いており、更なる検討が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、「広範な空隙率を持つ性能設計対応型ポーラスコンクリートの静弾性係数推定法の提案」を目的に、次のことを明らかにする。

(1) 静弾性係数が既知の粗骨材の使用

粗骨材に静弾性係数が既知の硬質砂岩砕石及び石灰岩砕石を使用し、幅広い空隙率及び水セメント比としたポーラスコンクリートの圧縮性状を明らかにすることで、静弾性係数に及ぼす材料構成の基本的な影響を検討すると共に、空隙量をパラメータとする空隙補正係数算定式を提案する。

(2) 結合材組成及び養生条件の影響

シリカフュームの利用及び水中(20°C)養生期間を変化させることにより、同一調合における結合材の静弾性係数を変化させ、ポーラスコンクリートの静弾性係数に及ぼす結合材(マトリックス相)の影響を詳細に検討する。

(3) 静弾性係数推定法の提案

ポーラスコンクリートの静弾性係数推定法を一般的なコンクリートつまり空隙率0%のコンクリートから大きな空隙率のポーラスコンクリートまで広く適応可能にするために、(1)、(2)で実施した実験水準の空隙率0%のコンクリート(無空隙ポーラスコンクリート)における静弾性係数を測定する。

又、(1)及び(2)と無空隙ポーラスコンクリートの静弾性係数測定結果から、Hashin-Hansen 式を基本式とする静弾性係数の構成則を明確にして、広範な空隙率を持つポーラスコンクリートの静弾性係数推定法を提案する。

3. 研究の方法

ポーラスコンクリート及びその結合材として用いるセメントモルタルについて圧縮試験を行い、得られた試験結果から複合則理論を適用した解析を遂行する。

まず、以下に、供試体の概要を示す。

(1) 基礎的実験水準のポーラスコンクリート (パターン I)

結合材：セメントモルタル (水セメント比：22.5, 25.0, 30.0%)，粗骨材：硬質砂岩碎石 (静弾性係数：55.2 GPa) 及び石灰岩碎石 (静弾性係数：70.5GPa)，目標空隙率：10, 15, 20, 25, 30%，養生：水中 (20℃) 養生 (材齢 28, 56, 84, 168 及び 365d)

(2) 結合材組成及び養生条件の異なるポーラスコンクリート (パターン II)

セメント：普通ポルトランドセメント，シリカフェーム (SF) プレミックスセメント，高炉 (BFS) セメント B 種，混和材：フライアッシュ (FA) II 種，結合材：セメントモルタル (水結合材比：15.0, 20.0, 22.5, 25.0 及び 30.0%)，粗骨材：硬質砂岩碎石及び石灰岩碎石，目標空隙率：10, 15, 20, 25, 30%，養生：水中 (20℃) 養生 (材齢 28, 56, 84, 168 及び 365d)

(3) 無空隙ポーラスコンクリート (パターン III)

結合材：セメントモルタル (水結合材比：22.5, 25.0, 30.0%)，粗骨材：石灰岩碎石及び石灰岩碎石，目標空隙率：0%，養生：水中 (20℃) 養生 (材齢 28, 56, 84, 168 及び 365d)

パターン I 及びパターン III の実験から，ポーラスコンクリートの静弾性係数に及ぼす材料構成の基本的な影響を検討すると共に，静弾性係数推定における空隙量をパラメータとする空隙補正係数算定式を検討する。

次に，パターン II 及びパターン III の実験から，ポーラスコンクリートの静弾性係数に及ぼす各種調合要因の影響を検討する。

以上の結果から，複合則を適用したポーラスコンクリートの静弾性係数推定法を構築することで，その調合からポーラスコンクリートの静弾性係数を推定することが可能となり，性能設計の一助とできる。なお，ポーラスコンクリートの品質管理には供試体が用いられることから，供試体の単位容積質量及び圧縮強度を算定因子とする静弾性係数推定式並びに，供試体の圧縮試験を効率良く行うためのアンボンドキャッピングの適用性についても検討する。

4. 研究成果

(1) 複合則を適用した静弾性係数推定式の提案

ポーラスコンクリートの空隙相は応力伝達に寄与しないため，その増加は静弾性係数の低下をもたらす。従って，前述の Hashin-Hansen 式 (式 1) で算出される静弾性係数に対して，空隙相の増加に伴う減少を空隙補正係数として考慮できれば，ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定式を導くことができると考える。空隙補正係数は，ポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値と無空隙ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値を用いて次式 (式 3) で表している。

$$C_v = \frac{E_p}{E_0} \quad (\text{式 3})$$

ここに， C_v ：空隙補正係数， E_p ：ポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値 (GPa)， E_0 ：(式 1) による無空隙ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値 (GPa)

なお，(式 3) は，空隙率の変化によってポーラスコンクリートの静弾性係数が変化する程度を表す指標であることから，空隙率のみを影響因子とする空隙補正係数算定式を導いている。その際，(式 2) の Hashin-Hansen 式の項では，マトリックス相，換言すれば，結合材の静弾性係数が変数として用いられており，結合材の空気量の影響はすでに考慮されていることから，空隙補正係数の算定に用いる空隙率には，結合材の空気量を除いた値を用いることが妥当であるとしている。

そこで，次式に示すポーラスコンクリートの全空隙率から結合材の空気量を減じた値を補正空隙率 (V_v) とし，空隙補正係数の算定に用いる空隙率としている。

$$V_v = V_t - V_{vm} \quad (\text{式 4})$$

ここに， V_v ：補正空隙率 (%)， V_t ：ポーラスコンクリートの全空隙率 (%)， V_{vm} ：ポーラスコンクリートの単位体積に占める結合材の空気量 (%)

図-1 には，(式 3) で得られる空隙補正係数と (式 4) で得られる補正空隙率の関係を示す。

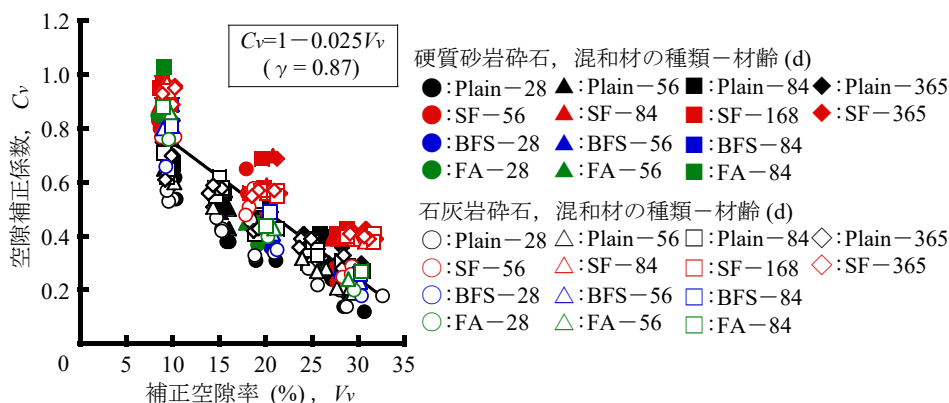


図-1 (式 3) で得られる空隙補正係数と (式 4) で得られる補正空隙率の関係

ポーラスコンクリートの空隙補正係数と補正空隙率の間には高い相関性が認められ、それらの関係は図中の実験式で表される。

なお、無空隙ポーラスコンクリートの空隙補正係数は1であるとして、(式3)で得られる空隙補正係数と(式4)で得られる補正空隙率の関係は、次の一次関数式で表されるとしている。

$$C_v = 1 - AV_v \quad (\text{式5})$$

ここに、 C_v : 空隙補正係数, V_v : 補正空隙率(%), A : 実験定数

この一般式(式5)で近似して得られたものが図中の実験式であり、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定に用いる空隙補正係数算定式として、次に示す(式6)が提案できる。

$$C_v = 1 - 0.025V_v \quad (\text{式6})$$

ここに、 C_v : 空隙補正係数, V_v : 補正空隙率(%)

次に、(式6)で算出される空隙補正係数を用いて、(式2)を適用して求めたポーラスコンクリートの推定値と実測値の関係を図-2に示す。なお、その関係を原点を通る直線で近似し、太実線で表示している。ポーラスコンクリートの静弾性係数推定値と実測値の間には高い相関性が認められ、その関係は図中の実験式で表すことができる。

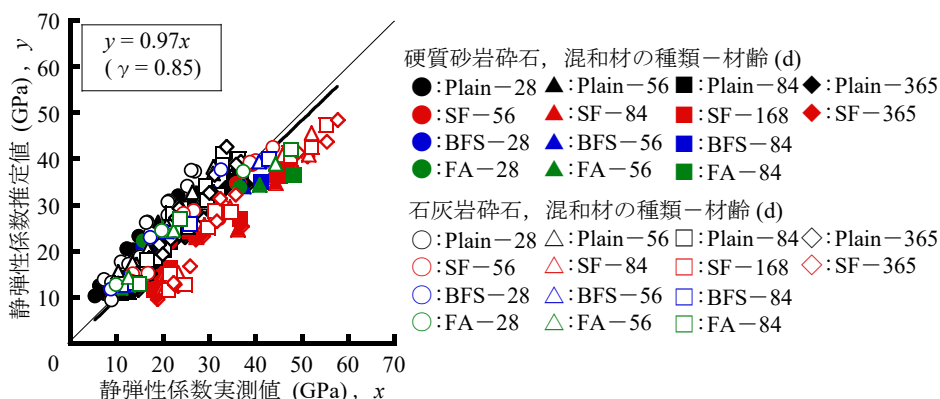


図-2 (式2)を適用して求めたポーラスコンクリートの推定値と実測値の関係

以上のことから、提案した(式6)で算出される空隙補正係数を導入した静弾性係数推定式(式2)は、広範な強度領域のポーラスコンクリートに適用するといえる^{引用文献⑤}。

(2) 普通コンクリートの推定式を基本式とした静弾性係数推定式の検討

ポーラスコンクリートの空隙率の変化は単位容積質量の変化として現れること、普通コンクリートと同様に、ポーラスコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の間には相関性が認められることから、単位容積質量及び圧縮強度を算定因子として用いた普通コンクリートの静弾性係数推定式としての日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に示されているNew RC式^{引用文献⑥, ⑦}及び同規準1991年度版の推定式^{引用文献⑧}(以下、それぞれ、AIJ-New RC式及びAIJ-1991式)のポーラスコンクリートへの適用性について検討し、それらの推定式はポーラスコンクリートに対しても適用性が認められることを報告^{引用文献⑨}している。更に、AIJ-New RC式、及びAIJ-1991式を基本式とするポーラスコンクリートの性能を考慮した静弾性係数推定式(式7)を提案^{引用文献⑩}した上で、各種混和材係数についても検討している^{引用文献⑪, ⑫}。

$$E = k_1 \times k_2 \times 17.1 \times (\gamma/2.1)^{1.5} \times (f_c/20)^{0.4} \quad (\text{式7})$$

ここに、 E : 静弾性係数 (GPa), f_c : 圧縮強度 (MPa), γ : 単位容積質量 (t/m^3), k_1 : 粗骨材岩種係数 (硬質砂岩=1.0, 石灰岩=1.2), k_2 : 混和材係数 (SF, BFS=0.95, FA=1.1)

図-3には、本研究に用いたポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値と(式7)による推定

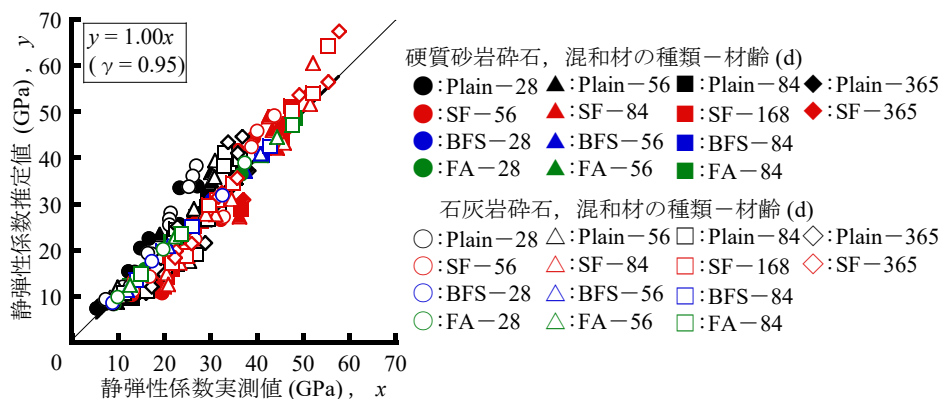


図-3 ポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値と(式7)による推定値の関係

値の関係を示す。ポーラスコンクリートの静弾性係数推定値とその実測値の関係を表す直線近似式の傾きは 1.00, 及びその相関係数は 0.95 であることから, 精度のよい推定が可能であるといえる。

(3) 圧縮強度試験用供試体の載荷下端面へのアンボンドキャッピングの適用性の検討

ポーラスコンクリートの両端面を同時にセメントペーストキャッピングすることは困難であり, 上端面のみキャッピングを行う普通コンクリートに比べて, 下端面分の作業量及びキャッピング材料の硬化時間が必要であるなど, 圧縮強度試験用供試体の作製に手間がかかる。そこで, ポーラスコンクリート供試体の上端面(打込み面)をセメントペーストキャッピングとし, その下端面をアンボンドキャッピングとする圧縮強度試験方法の適用性を検討している。

図-4 及び図-5 には, ポーラスコンクリートの圧縮強度及び変動係数と全空隙率の関係を示す。アンボンドキャッピングを適用した場合でも, 供試体寸法にかかわらず, 圧縮強度の変動係数は 11% 以下にあり, セメントペーストキャッピング供試体とアンボンドキャッピング供試体との強度差はわずかであると考えられる。これらのことから, ポーラスコンクリートの圧縮強度試験用供試体の載荷下端面へのアンボンドキャッピングが適用出来るものと考えられる^{引用文献⑬}。

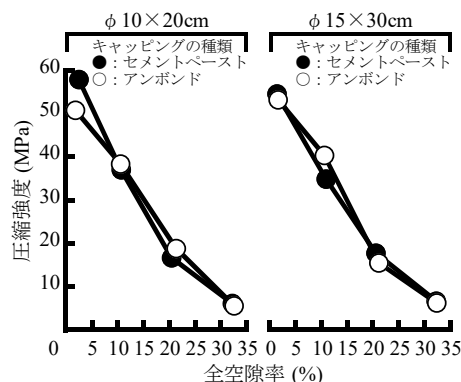


図-4 ポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率の関係

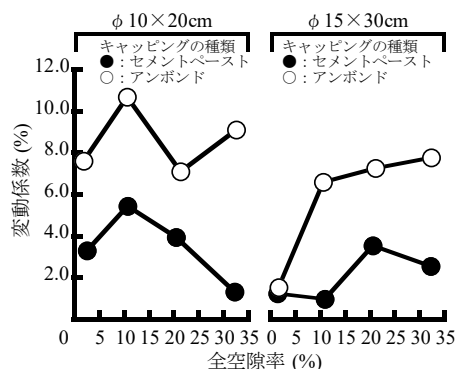


図-5 ポーラスコンクリートの変動係数と全空隙率の関係

<引用文献>

- ① 日本コンクリート工学協会編：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書, 231pp., 2003. 5
- ② 日本コンクリート工学協会編：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 343pp., 2015. 6
- ③ Torben C. Hansen: Theories of Multi-Phase Materials Applied to Concrete, Cement Mortar and Cement Paste, The Structure of Concrete and Its Behavior under Load, Proceedings of an International Conference London, Cement and Concrete Association, pp. 16-23, 1965. 9
- ④ 齋藤俊克, 出村克宣: 複合則を適用したポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 81, No. 723, pp. 825-832, 2016. 5
- ⑤ 齋藤俊克, 出村克宣, 中田善久: ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式と空隙補正係数, 材料, Vol. 68, No. 10, pp. 773-778, 2019. 10
- ⑥ 国土開発技術研究センター: 平成 4 年度高強度コンクリート分科会報告書, pp. 4-25-1~4-25-14, 1993. 3
- ⑦ 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 60, No. 474, pp. 1-10, 1995. 8
- ⑧ 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, p. 39, 1991
- ⑨ 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣: 普通コンクリートの各種静弾性係数推定式のポーラスコンクリートへの適用, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 1445-1450, 2019. 6
- ⑩ 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣: 普通コンクリートの推定式を基本式としたポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 1312-1317, 2020. 6
- ⑪ 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式における粗骨材岩種の係数およびシリカフュームの混和材係数の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol. 74, pp. 139-146, 2021. 3
- ⑫ 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式における高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの混和材係数の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol. 75, pp. 195-201, 2022. 3
- ⑬ 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの圧縮強度試験用供試体の載荷下端面へのアンボンドキャッピングの適用性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 1, pp. 1013-1018, 2021. 6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣	4. 巻 42
2. 論文標題 普通コンクリートの推定式を基本式としたポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の検討	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 1312-1317
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 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣	4. 巻 74
2. 論文標題 ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式における粗骨材岩種の係数およびシリカフェームの混和材係数の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 139-146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.74.139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣	4. 巻 41
2. 論文標題 普通コンクリートの各種静弾性係数推定式のポーラスコンクリートへの適用	5. 発行年 2019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 1445-1450
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 齋藤俊克, 出村克宣, 中田善久	4. 巻 68
2. 論文標題 ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式と空隙補正係数	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 773-778
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.68.773	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣	4. 巻 73
2. 論文標題 ポーラスコンクリートの静弾性係数推定への日本建築学会New RC式の適用性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 163-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14250/cement.73.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣
2. 発表標題 ポーラスコンクリートの圧縮性状に及ぼすセメントの種類及び粗骨材岩種の影響
3. 学会等名 第83回日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣
2. 発表標題 セメントの種類及び粗骨材岩種がポーラスコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣
2. 発表標題 ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす材齢の影響
3. 学会等名 第82回日本建築学会東北支部研究報告会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武田昌也, 齋藤俊克, 出村克宣
2. 発表標題 水中養生したポーラスコンクリートの材齢と圧縮強度の関係
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤俊克, 出村克宣, 中田善久
2. 発表標題 複合則を適用したポーラスコンクリートの静弾性係数の推定
3. 学会等名 第46回セメント・コンクリート研究討論会
4. 発表年 2019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

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