

令和元年6月14日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06589

研究課題名(和文)性能設計を可能とする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の構築

研究課題名(英文) Proposal of an equation for estimating the static modulus of elasticity of porous concrete by applying the law of mixture for performance-based design

研究代表者

齋藤 俊克 (SAITO, Toshikatsu)

日本大学・工学部・専任講師

研究者番号：70547819

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)：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式が提案されている。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いることから、複合則を適用する場合、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。

本研究では、空隙相を考慮するための空隙補正係数を見出し、Hashin-Hansen式に空隙補正係数を導入したポーラスコンクリートの静弾性係数推定式を提案している

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。

研究成果の概要(英文)：Hashin-Hansen's equation based on the law of mixture is well known as an equation for estimating the static modulus of elasticity of the ordinary cement concrete as a two-phase composite material having the binder and particle phases. On the other hand, the porous concrete is three-phase composite material consisted of the binder, coarse aggregates and voids phases.

The equation for estimating the static modulus of elasticity of the porous concretes is proposed by applying the law of mixture introducing the correction coefficient of the voids.

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 静弾性係数 Hashin-Hansen式 空隙補正係数

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 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、浸透桝・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<sup>1),2)</sup>。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、調査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、その調査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<sup>3)</sup>。

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

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、空隙量は調査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。

### 2. 研究の目的

本研究では、「性能設計を可能とする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の構築」を目的に、次のことを明らかにする。

#### (1) ポーラスコンクリートの静弾性係数推定における複合則理論の適応性の検討

水セメント比や目標空隙率を変化させた汎用的な調査のポーラスコンクリートについて、Hashin-Hansen 式から算出される推定静弾性係数と供試体の圧縮試験結果から得られる実測静弾性係数の関係から複合則理論が適応可能かを検討する。

#### (2) ポーラスコンクリートの静弾性係数に及ぼす各種調査要因(結合材及び骨材)の影響

結合材をセメントモルタルと、岩種又は産地の異なる静弾性係数が既知の粗骨材を用いることにより、構成材料の静弾性係数を変化させることで、ポーラスコンクリートの静弾性係数に及ぼす各種調査要因の影響を検討する。

#### (3) 複合則を適応したポーラスコンクリートの静弾性係数推定法の構築

(1),(2)の検討結果から、三相系複合材料であるポーラスコンクリートの静弾性係数の推定式を構築するための空隙パラメータを見出し、Hashin-Hansen 式を基本式とする構成則を確立して、性能設計を可能とする複合則を適応したポーラスコンクリートの静弾性係数の推定法を構築する。

### 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) 結合材をセメントモルタルとしたポーラスコンクリート(パターン )

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(静弾性係数が未知): 硬質砂岩砕石, 目標空隙率: 10, 15, 20, 25, 30%, 養生: 温水(70 )養生(JCI-SE4)

#### (2) 静弾性係数が既知の粗骨材を用いたポーラスコンクリート(パターン )

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(静弾性係数が既知): 硬質砂岩砕石及び石灰岩砕石, 目標空隙率: 10, 15, 20, 25, 30%, 養生: 温水(70 )養生(JCI-SE4)

#### (3) 同一調査における結合材の静弾性係数を変化させたポーラスコンクリート(パターン )

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(静弾性係数が既知): 石灰岩砕石及び石灰岩砕石, 目標空隙率: 10, 15, 20, 25, 30%, 養生: 水中(20 )養生(材齢 28d)

マトリックス相及び複合材料の静弾性係数をパターン の実験から求め、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 式における粒子相の静弾性係数を逆算し、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定における複合則理論の適応性を検討する。

次に、パターン 及びパターン 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査要因の影響を検討する。

以上の結果から、複合則を適応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、その調査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。

#### 4. 研究成果

##### (1) ポーラスコンクリートの静弾性係数推定における複合則理論の適応性の検討

ポーラスコンクリートは、セメントモルタル相、粗骨材相及び空隙相から成る三相系複合材料であり、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ことになる。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。Hashin-Hansen 式に空隙補正係数の項を導入するにあたり、本研究では、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とすることから、ポーラスコンクリートの全空隙率から結合材としてのセメントモルタルの空気量を差し引いた値を補正空隙率 ( $V_v$ ) として、次式を空隙補正係数の算定式として提案する。

$$C_v = 1.08e^{-0.05V_v} \quad (1)$$

ここに、 $V_v = V_t - V_m$

$C_v$ : 空隙補正係数,  $V_v$ : 補正空隙率 (%),  $V_t$ : ポーラスコンクリートの全空隙率 (%),  $V_m$ : 結合材としてのセメントモルタルの空気量 (%)

又、セメントモルタルを結合材とするポーラスコンクリートの静弾性係数推定式として、次式が提案できる。

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

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

粗骨材の静弾性係数を 66.9GPa とし、式 (1) 及び式 (2) を適用して、ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値を求めた。

図-1 には、ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値と実測値の関係を示す。図中に示した近似式から明らかなように、ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値はその実測値よりも若干大きな値を与える傾向にある。基本式として適用した Hashin-Hansen 式は、理論上、粗骨材の体積分率が 0.5 を超えると静弾性係数の推定値が大きな値となることが指摘されており<sup>4),5)</sup>、本研究において、粗骨材の体積分率は 0.59 ~ 0.6 の範囲にあるため、ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値が若干大きくなるものと推察される。

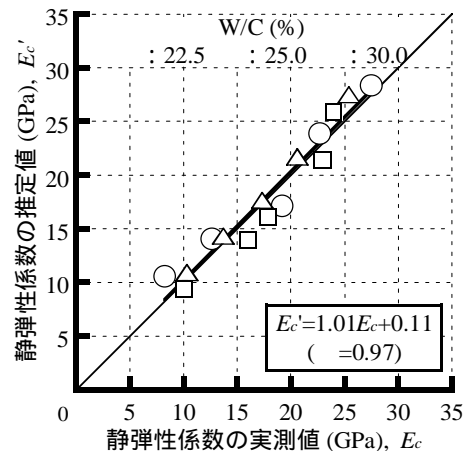


図-1 ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値と実測値の関係

##### (2) ポーラスコンクリートの静弾性係数に及ぼす各種調査要因 (結合材及び骨材) の影響

(1) においては、空隙補正係数と補正空隙率の関係を一定の係数を持つ指数関数式で表している。しかし、ポーラスコンクリートが必要な空隙を持たない場合、空隙による補正は不必要であり、式 (2) の空隙補正係数は 1 であるべきと考える。その場合、式 (1) に適用される補正空隙率は 0 (ゼロ) であるが、(1) の式 (1) では、空隙補正係数が 1 よりも若干大きな値として算出される。そこで、図-2 においては、新たに、空隙補正係数の新たな算定式として、次のような一次関数式を適用した。

$$C_v = 1 - AV_v \quad (3)$$

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、次式が提案できる。

$$C_v = 1 - 0.03V_v \quad (4)$$

ここに、 $C_v$ : 空隙補正係数,  $V_v$ : 補正空隙率 (%)  
次に、式 (4) で算出される空隙補正係数を用い、式 (2) を適用して求めたポーラスコンクリ

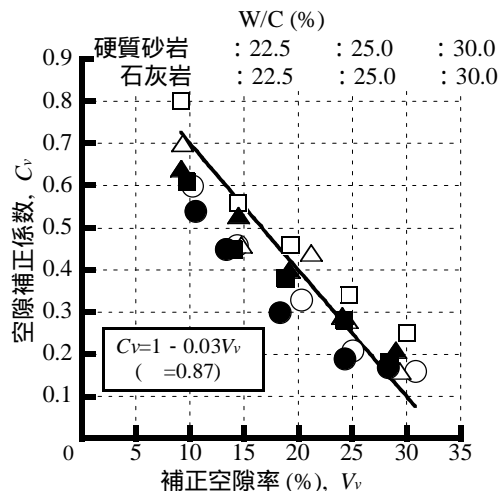


図-2 ポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値を用いて求めた空隙補正係数と補正空隙率との関係

ートの静弾性係数の推定値と実測値の関係を図-3に示す。図中の近似式に対して、実験値は±5GPa程度のばらつきが認められるものの、ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値と実測値の間には高い相関性が認められ、図中に示す通り、それらの関係は次式で表される。

$$E_c = 1.09E_p \quad (r = 0.94) \quad (5)$$

ここに、 $E_c$ ：式(4)の $C_v$ を用いて、式(2)で算出されるポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値 (GPa)、 $E_p$ ：ポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値 (GPa)、 $r$ ：相関係数

式(5)によれば、静弾性係数の推定値は実測値よりも若干大きな値を与える傾向にある。前述のとおり、基本式として適用した Hashin-Hansen 式は、理論上、粗骨材の体積分率が 0.5 を超えると静弾性係数の推定値が大きな値となることが指摘されており、本研究において、粗骨材の体積分率は 0.57~0.59 の範囲にあることに起因するものと考えられる。

しかし、式(5)は、 $E_p = E_c / 1.09$ と変形でき、式(4)の $C_v$ を用いて、式(2)で推定した値を更に精度よく補正するために式(5)を用いることができる。なお、本研究で用いた調査は、実用上のポーラスコンクリートの空隙率並びに、低強度から高強度の圧縮強度が得られる範囲を広く網羅し、使用した粗骨材の静弾性係数も比較的幅の広い領域を持っている。従って、提案したポーラスコンクリートの静弾性係数の推定に用いる新たな空隙補正係数算定式並びに、静弾性係数の推定式は、実用的な調査で製造されるポーラスコンクリートの静弾性係数の推定に用いることができるものと考えられる。

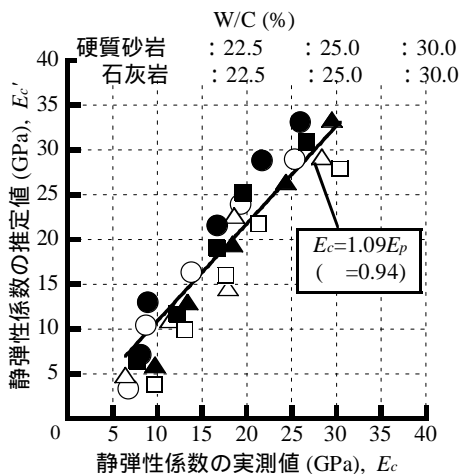


図-3 ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値と実測値の関係

### (3) 性能設計のための圧縮性状の検討

図-4及び図-5には、ポーラスコンクリートの寸法 10×20cm としたコア供試体と成形供試体の同一水セメント比における全空隙率及び圧縮強度の関係を示す。

図-4に示すように、コア供試体の全空隙率は、成形供試体に比べて小さい傾向にあり、同一水セメント比とした場合には、全空隙率の小さいコア供試体は、成形供試体のそれよりも圧縮強度が優れることが示唆される。しかし、図-5に示すように、コア供試体の圧縮強度は成形供試体のそれよりも小さい傾向にある。これは、同一水セメント比の場合、コア供試体の全空隙率は小さいものの、採取されたコア供試体においては、供試体側面近傍の粗骨材が切断され、側面近傍組織の力学的性質が低下することによる影響が卓越するためと推察される。

一方、表-1に示す普通コンクリートの静弾性係数に関する日本建築学会の「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<sup>6)</sup>及び同規準の1991年度版の推定式<sup>7)</sup>(以下、それぞれ、AIJ-New RC 式及び AIJ-1991 式)、ACI

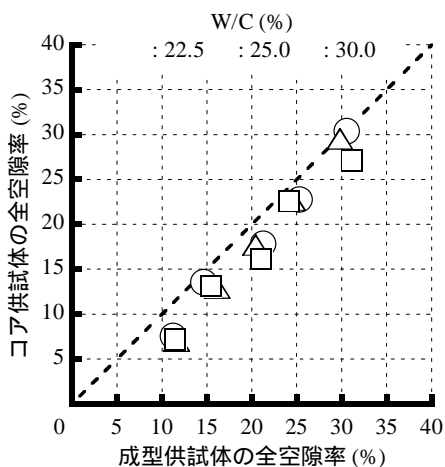


図-4 コア供試体と成形供試体の同一水セメント比における全空隙率の関係

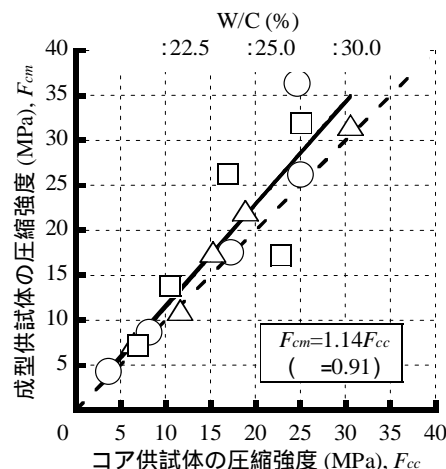


図-5 ポーラスコンクリートの成形供試体及びコア供試体の圧縮強度の関係

表-1 普通コンクリートに関する各種静弾性係数推定式

推定式	数式
AIJ-New RC 式	$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times (\gamma / 2.4)^2 \times (f_c / 60)^{(1/3)}$
AIJ-1991 式	$E = 21000 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times \sqrt{f_c / 20}$
ACI-363 式	$E = (40000 \times f_c^{0.5} + 1000000) \times (\gamma / 2.346)^{1.5}$
CEB-FIP 式	$E = \times 21500 \times (\sigma_{28} / 10)^{(1/3)}$

ここに、 $E$ ：静弾性係数(MPa)、 $k_1$ ：硬質砂岩：1.0、石灰岩：1.2、 $k_2$ ：混和材を使用しない場合：1.0、 $\gamma$ ：単位容積質量( $t/m^3$ )、硬質砂岩：1.0、石灰岩：1.2、 $f_c$ ：圧縮強度(MPa)、 $\sigma_{28}$ ：28d 圧縮強度(MPa)

(American Concrete Institute) の 363 委員会が示す推定式<sup>8)</sup>(以下, ACI-363 式), 及び CEB (Euro-International Committee for Concrete) と FIP (International Federation for Pre-stressing) が示す推定式<sup>9)</sup>(以下, CEB-FIP 式) のポーラスコンクリートへの適用性を検討した。なお, 各推定式の  $f_c$  はポーラスコンクリートの圧縮強度の実測値とし, 各推定式のは調合設計時の単位容積質量とした。

図-6 にはポーラスコンクリートの静弾性係数推定値と実測値の関係を各推定式別に示す。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の「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 式及び同規準の 1991 年度版の推定式は, ポーラスコンクリートに対しても適用できるものと推察される。

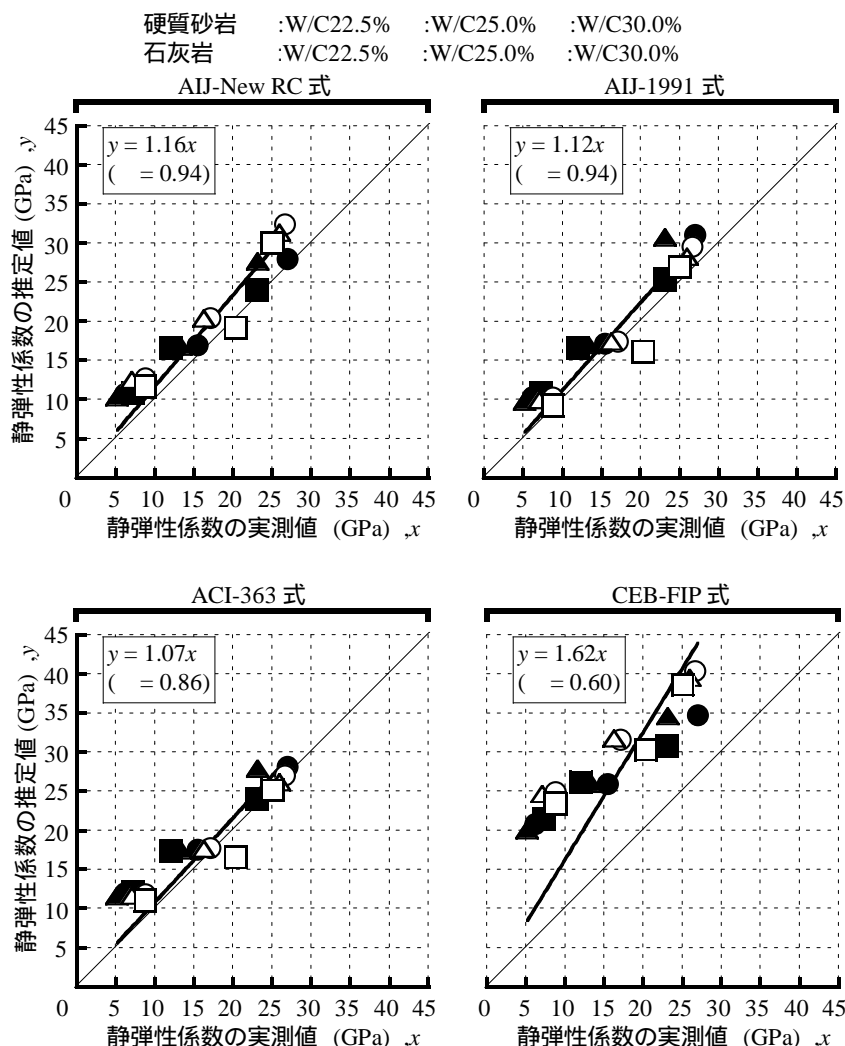


図-6 ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値と実測値の関係

< 引用文献 >

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

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

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

趙 力采, 小林一輔: コンクリートの弾性係数における複合特性, コンクリート・ジャーナル, Vol.12, No.7, pp.27-34, 1974.7

川上英男: コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材と境界層の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.529-534, 2000.6

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

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

ACI Committee: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI Journal,

## 5 . 主な発表論文等

### [ 雑誌論文 ] ( 計 2 件 )

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, 査読有, Vol.41, No.1, 2019.6, 印刷中

齋藤俊克, 出村克宣 : ポーラスコンクリートの空隙率及び圧縮強度に及ぼす型枠のせき板効果の影響, セメント・コンクリート論文集, 査読有, Vol.70, pp.290-296, 2017.3

### [ 学会発表 ] ( 計 3 件 )

齋藤俊克, 出村克宣 : ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす型枠のせき板効果に関する一考察, 2018 年度日本建築学会大会 ( 東北 ), 2018/9/4-6, 東北大学

Toshikatsu Saito, Katsunori Demura : Influence of wall effect of specimen mold on voids distribution and compressive strength of porous concretes, The 13th Korea Japan Joint Symposium on Building Materials & Construction, 2017/8/17, 韓国 Hanbat 大学 校

齋藤俊克, 出村克宣 : ポーラスコンクリートの空隙率に及ぼす型枠のせき板効果に関する一考察, 2016 年度日本建築学会大会 ( 九州 ), 2016/8/24-26, 福岡大学

## 6 . 研究組織

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、研究者個人に帰属されます。