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

齋藤 俊克* 出村 克宣* 中田 善久**

An Equation for Estimating Static Modulus of Elasticity of Porous Concrete and Correction Coefficient of Voids

by

Toshikatsu Saito*, Katsunori Demura* and Yoshihisa Nakata**

The Hashin-Hansen's equation introduced from the low of mixture is established for estimating the static modulus of elasticity of the cement concrete as a two-phase composite material. In previous study, the authors proposed an estimating formula of the static modulus of elasticity of porous concretes based on the Hashin-Hansen's equation with a correction coefficient of voids. However, the proposed formula was introduced by using the estimated value of the static modulus of elasticity of the coarse aggregate. This paper 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 estimating formula of the static modulus of elasticity of porous concretes and the equation for the correction coefficient of voids are discussed. The porous concretes using cement mortars as a binder and coarse aggregates of crushed hard sandstone and limestone are prepared with the water-cement ratios of 22.5, 25.0 and 30.0%, and the percentage of target voids of 10, 15, 20, 25 and 30%. The porous concrete specimens are cured under 24h-20°C -90%(RH)-moist+ 24h-70°C -hot water+1h-20°C-water and subjected to the total voids test and compression test for measuring the static modulus of elasticity. The cement mortar specimens are prepared by same procedures and measured for the static modulus of elasticity. The test results show that the correlation between the estimated and measured values of the static modulus of elasticity of the porous concretes are recognized. In conclusion, the applicability of the previously proposed formula for estimating the static modulus of elasticity of porous concretes is recognized. And the equation of the correction coefficient of voids is newly proposed.

Key words:

Porous concrete, Estimating equation, Static modulus of elasticity, Low of mixture, Hashin-hansen's equation, Correction coefficient of voids

1 緒 言

近年、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、屋上緑化、河川護岸、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静弾性係数について明確にする必要がある。

一方、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³⁾。趙らは、これまでに提案されている多くの理論式について、それらの適合性を検討し、コンクリートの複合特性を考慮した場合、その弾性係数推定式として、Hashin-Hansen 式が有用であることを明らかにしている⁴⁾。

ポーラスコンクリートは、Fig. 1 に示すように、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

Fig. 1 Model of concrete and porous concrete.

取り扱われる。従って、ポーラスコンクリートは、マトリックス相、粒子相およ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と考え、著者らは、Hashin-Hansen 式を基本式とし、それに空隙相を考慮するための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⁵⁾。しかし、その提案にあたっては、粗骨材の静弾性係数として推定値を用いていることから、更に詳細な検討を重ねる必要があるとした。

† 原稿受理 平成 31年 1月 7日 Received Jan. 7, 2019 ©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 日本大学 工学部 建築学科 〒963-8642 郡山市田村町徳定
Dep. of Architecture, College of Engineering, Nihon University Tamura-machi, Koriyama, 963-8642.

** 日本大学 理工学部 建築学科 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台
Dep. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon University, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308.

そこで, 本研究では, 静弾性係数が既知の硬質砂岩砕石および石灰岩砕石を粗骨材として用いたポーラスコンクリートの圧縮性状を明らかにした上で, 既報⁵⁾で提案した静弾性係数推定式並びにそれに用いる空隙補正係数について検討することを目的としている。

2 使用材料

2・1 セメント

セメントとしては, JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定される普通ポルトランドセメントを使用した。その性質を Table 1 に示す。

2・2 骨材

細骨材としては, 阿武隈川産川砂を, 粗骨材としては, 硬質砂岩砕石および石灰岩砕石を使用した。Table 2 および Table 3 には, それらの性質を示す。なお, 本研究で用いた粗骨材の圧縮強度および静弾性係数は, 大林らの研究⁶⁾で得られた値である。

2・3 練混ぜ水および混和剤

練混ぜ水としては, 水道水を使用した。又, 混和剤としては, ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を使用した。その性質を Table 4 に示す。

Table 1 Physical properties and chemical compositions of ordinary portland cement.

Density (g/cm ³)	Blaine specific surface (cm ² /g)	Setting time (h·min)		
		Initial set	Final set	
3.16	3300	1·55	3·17	
Compressive strength of mortar (MPa)				
3d	7d	28d		
31.1	46.2	61.4		
Chemical compositions (%)				
MgO	SO ₃	ig. loss	Total alkali	Chloride ion
1.80	2.01	1.90	0.56	0.023

Table 2 Properties of fine aggregate.

Size (mm)	Density (g/cm ³)	Water absorption (%)
≤2.5	2.57	2.32

Table 3 Properties of coarse aggregate.

Type	Size (mm)	Density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Solid content (%)
Hard sandstone	5~20	2.72	0.58	59.1
Limestone	5~20	2.70	0.39	60.4

Type	Compressive strength (MPa)	Static modulus of elasticity (GPa)
Hard sandstone	148.2	55.2
Limestone	103.5	70.5

Table 4 Properties of air-entraining and high-range water-reducing admixture.

Appearance	Density (g/cm ³)	Alkaline content (%)	Chloride ion content (%)
Dark reddish- brown liquid	1.040~ 1.060	0.9	<0.01

Table 5 Mix proportions of cement mortars as binder.

W/C (%)	Cement : fine aggregate (by mass)	AE-WRA* (%)	Flow	Air content (%)
22.5		1.05	238	2.1
25.0	1:0.63	0.80	248	2.2
30.0		0.40	237	2.0

Note, *: air entraining and high-range water-reducing admixture content to cement by mass

3 試験方法

3・1 結合材の試験

本研究では, 結合材をセメントモルタルとしている。JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に従って, 結合材のフロー値が 230 ± 20 となるように, 高性能 AE 減水剤添加率を調整した。なお, 平岩らは, 結合材のフロー値が 230 程度であれば表面性状が良好で, 均質なポーラスコンクリートを作製することが出来ると報告⁷⁾していることから, 同様のフロー値とした。又, 本研究においても, 3・2 節で作製する供試体の外観を観察し, 締固めによる結合材の垂れが生じることなく, 粗骨材が均一に分布した組織が形成されることを確認している。

結合材の試験においては, Table 5 に示す調合の供試モルタルを練り混ぜ, 寸法 $\phi 10 \times 20$ cm に成形した。なお, 練り混ぜた供試モルタルについては, JIS A 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) に規定のモルタル用空気量測定器を用いて空気量を測定した。その後, JCI-SE4 [温水法 (70°C) によるコンクリートの促進強度試験方法] に従い, 24h 湿空 [20°C, 90% (RH)], 24h 温水 (70°C) および 1h 水中 (20°C) 養生を行って供試体を作製し, 圧縮強度の測定を行った。その際, コンプレッソメータを用いて供試体の縦ひずみを測定し, 最大荷重の 1/3 に相当する応力と 50×10^{-6} の時の応力を結ぶ線分のこう配から得られる割線静弾性係数を静弾性係数として算出した。

3・2 供試体の作製

JCI-SPO1-1 [ポーラスコンクリートの供試体の作り方 (案)] に従って, Table 6 および Table 7 に示す調合で, ポーラスコンクリートを練り混ぜ, 振動数 3200rpm のテールパイプレーターを用いて, 寸法 $\phi 10 \times 20$ cm に成形し, セメントモルタル供試体と同様の養生を行って, 各調合の供試体 3 個を作製した。ここで, 目標空隙率とは, 所要の連続空隙が得られるように調合設計時に想定した空隙率⁸⁾である。なお, 3・3 節の空隙率試験を行った後に, 供試体上下面についてキャッピングを行い, 3・4 節の圧縮試験に供した。又, 空隙率および圧縮試験においては, 3 個の供試体の平均値を求めた。

3・3 空隙率試験

Table 6 Mix proportions of porous concretes using hard sandstone.

W/C (%)	Target voids (%)	Mix proportions by mass (kg/m ³)				AE- WRA* (%)
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	
22.5	10	94	418	263	1553	1.05
	15	80	356	223	1553	
	20	66	291	183	1553	
	25	51	228	143	1553	
	30	37	164	103	1553	
25.0	10	101	406	255	1553	0.80
	15	86	344	216	1553	
	20	70	283	178	1553	
	25	55	221	139	1553	
	30	40	159	100	1553	
30.0	10	115	382	240	1553	0.40
	15	98	324	204	1553	
	20	80	266	167	1553	
	25	62	208	131	1553	
	30	45	150	94	1553	

Note, *: air entraining and high-range water-reducing admixture content to cement by mass

Table 7 Mix proportions of porous concretes using limestone.

W/C (%)	Target voids (%)	Mix proportions by mass (kg/m ³)				AE-WRA* (%)
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	
22.5	10	92	408	257	1563	1.05
	15	77	345	217	1563	
	20	63	281	177	1563	
	25	49	218	137	1563	
	30	34	154	97	1563	
25.0	10	99	396	248	1563	0.80
	15	83	334	211	1563	
	20	68	272	171	1563	
	25	53	212	133	1563	
	30	37	149	94	1563	
30.0	10	112	373	234	1563	0.40
	15	94	315	198	1563	
	20	77	257	162	1563	
	25	59	199	125	1563	
	30	42	140	88	1563	

Note, *: air entraining and high-range water-reducing admixture content to cement by mass

JCI-SPO2-1 [ポーラスコンクリートの空隙率試験方法 (案)] に準じて空隙率試験を行い、供試体の全空隙率を算出した。

3・4 圧縮試験

JCI-SPO5 [ポーラスコンクリートの静弾性係数試験方法 (案)] に従って、供試体の圧縮試験を行った。その際、セメントモルタルの試験と同様に、コンプレッソメータを用いて供試体の縦ひずみを測定し、静弾性係数を算出した。なお、その測定に当り、音野、国枝らは、コンプレッソメータの固定箇所を改良することが必要と報告している⁹⁾。本研究においては、コンプレッソメータ固定用ネジが当たる部分のコンクリート表面を紙やすりで平滑にした上で、寸法40×10×2mmのアルミニウム板を接着し、その板を介してコンプレッソメータを供試体に固定した。なお、圧縮試験において、ポーラスコンクリートは、圧縮応力-ひずみ曲線の最大応力を示した後に若干の応力低下を示して破壊に至っているが、その間、コンプレッソメータの脱落等は認められなかった。

4 試験結果および考察

Table 8 には、結合材の圧縮強さおよび静弾性係数を示す。当然のことながら、結合材の圧縮強さおよび静弾性係数は、水セメント比の小さいものほど大きい傾向にあ

る。

Table 9 には、硬質砂岩砕石又は石灰岩砕石を粗骨材としたポーラスコンクリートの全空隙率を示す。全空隙率の値は、目標空隙率に対しておおむね±10%の範囲にある。このことは、供試体において材料分離が生じていないことを示唆するものとする。

Fig. 3 には、ポーラスコンクリートの応力-ひずみ曲線を粗骨材の種類および水セメント比 (22.5, 25.0 および 30.0%) 別に示す。又、Fig. 4 および Fig. 5 には、ポーラスコンクリートの圧縮強度および静弾性係数と全空隙率の関係を粗骨材の種類別に示す。粗骨材の種類および水セメント比にかかわらず、ポーラスコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、全空隙率の増加に伴い減少する傾向にある。これは、ポーラスコンクリートの空隙部分は応力を負担しないことに起因するものである。

Fig. 6 には、ポーラスコンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係を粗骨材の種類別に示す。圧縮強度の増加に伴って、ポーラスコンクリートの静弾性係数は増大し、そ

Table 8 Compressive strength and static modulus of elasticity of cement mortars as binder.

W/C (%)	Compressive strength σ_c (MPa)	Static modulus of elasticity E_m (GPa)
22.5	94.7	29.8
25.0	92.7	27.7
30.0	83.0	24.4

Table 9 Total voids of porous concretes using hard sandstone or limestone as a coarse aggregate.

W/C (%)	Target voids (%)	Total voids (%)	
		Hard sandstone used	Limestone used
22.5	10	10.9	11.2
	15	14.9	13.9
	20	20.8	18.7
	25	25.4	24.7
	30	31.1	28.6
25.0	10	10.0	9.9
	15	15.3	15.1
	20	21.7	19.7
	25	24.9	24.5
	30	29.7	29.3
30.0	10	9.8	10.3
	15	15.0	14.5
	20	19.8	19.3
	25	25.0	24.5
	30	30.4	28.7

Fig. 3 Compressive stress-strain curves for porous concretes with hard sandstone and limestone.

Fig. 4 Total voids vs. compressive strength of porous concretes using hard sandstone or limestone.

Fig. 5 Total voids vs. static modulus of elasticity of porous concretes with hard sandstone or limestone.

これらの間には高い相関性が認められ、その関係は粗骨材の種類別に図中の実験式で表される。これは、普通コンクリートにおける静弾性係数と圧縮強度の関係やポーラスコンクリートにおける既往の研究¹⁰⁾と同様の傾向にある。

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い、その静弾性係数を推定するための Hashin-Hansen 式は、式 (1) で表される。それを基本式として、既報⁵⁾において、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、式 (2) を提案している。なお、Fig. 5 に示したように、ポーラスコンクリートの静弾性係数は、全空隙率の増加に伴って減少する傾向にあるため、その影響因子として空隙補正係数 (C_v) を導入している。

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

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

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

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)

Fig. 6 Compressive strength vs. static modulus of elasticity of porous concretes.

C_v : 空隙補正係数

ここで、ポーラスコンクリートは、所要の連続空隙が得られるように、粗骨材間の空隙を結合材で充てんして製造される。そこで、粗骨材間の空隙すべてを結合材で充てんしたものを無空隙ポーラスコンクリートと定義すれば、その静弾性係数は、式 (1) を用いて、結合材の静弾性係数、粗骨材の体積分率および静弾性係数から算出される。一方、ポーラスコンクリートは所要の空隙率を持つため、空隙率が変化すれば、その静弾性係数も変化する。

従って、式 (2) における空隙補正係数は、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で表すことができる。

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

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ため、ポーラスコンクリートの空隙率を影響因子とする空隙補正係数の算定式を検討する。但し、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。従って、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考えられる。

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する。

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

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 (%)

以上のことから、同一結合材を用いたポーラスコンクリートについて、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が明らかになれば、空隙補正係数は、ポーラスコンクリートの全空隙率および結合材の空気量から算定できることになる。

式 (3) の適用にあたり、Table 8 に示した静弾性係数を持つセメントモルタルをマトリックス相、粗骨材を粒子相として、Table 6 および Table 7 に示した単位粗骨材量を持つ無空隙ポーラスコンクリートの静弾性係数を式 (1) により算出すれば、骨材の種類および水セメント比別に Table 10 の値が得られる。

Table 10 Estimate value of static modulus of elasticity of voids-less porous concretes.

Type of coarse aggregate	W/C (%)	Estimate value of static modulus of elasticity (GPa)
Hard sandstone	22.5	42.1
	25.0	40.6
	30.0	38.2
Limestone	22.5	48.1
	25.0	46.4
	30.0	43.5

これらの推定値と本研究におけるポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値を用いて式 (3) から求めた空隙補正係数と、補正空隙率との関係を Fig. 7 に示す。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。

Fig. 7 Correction value of voids vs. correction coefficient of voids for porous concrete approximated by Eq.(3).

なお、既報⁵⁾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、換言すれば、無空隙ポーラスコンクリートの場合、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 (4) で算出される補正空隙率は0 (ゼロ) であるが、既報で提案した空

隙補正係数算定式では1よりも若干大きな値が算出される。そこで Fig. 7 においては、新たに、空隙補正係数の算定式として、次のような一次関数式を適用した。

$$C_v = 1 - AV_v \quad (5)$$

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。

$$C_v = 1 - 0.03V_v \quad (6)$$

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、式 (2) を適用して求めた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 Fig. 8 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。

$$E_c = 1.09E_p \quad (\gamma = 0.94) \quad (7)$$

ここに、 E_c : 式 (6) 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)

γ : 相関係数

Fig. 8 Experimental values vs. estimated values of static modulus of elasticity of porous concretes.

式 (7) 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。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いる^{4),11)}。本研究においても、Table 6 および 7 から算出される粗骨材の体積分率は0.57 および 0.59 であることに起因して、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と考える。しかし、式 (7) は、 $E_p = E_c / 1.09$ と変形でき、式 (6) の C_v を用いて、式 (2) で得られる静弾性係数を補正するために式 (7) 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、既報で提案した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する。

5 結 言

本研究を結論づければ、次の通りである。

- (1) 粗骨材の種類および水セメント比にかかわらず、ポーラスコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、全空隙率の増加に伴い減少する傾向にある。又、普通コンクリートと同様、圧縮強度の増加に伴って、ポーラスコンクリートの静弾性係数は増大し、それらの間には高い相関性が認められる。
- (2) 既往の研究において、粗骨材の静弾性係数としてその推定値を用いた検討結果をもとに、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式として、式 (2) を提案している。本研究において、静弾性係数が既知の 2 種類の粗骨材を用いて製造したポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値を用いて検討した結果、式 (2) は、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式として適用できることが確認できた。

なお、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式に用いる空隙補正係数については、その算定式として次式が提案できる。

$$C_v = 1 - 0.03(V_t - V_{vm})$$

ここに、 C_v : 空隙補正係数

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 (%)

- (3) 本研究で提案している推定式により得られる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は次式で表される。

$$E_c = 1.09 E_p \quad (\gamma = 0.94)$$

ここに、 E_c : 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)

γ : 相関係数

なお、本研究の成果は、次の条件のポーラスコンクリートを対象としている。

結合材 : 水セメント比 22.5~30.0% のセメントモルタル

粗骨材 : 静弾性係数 55.2~66.9 GPa

目標空隙率 : 10~30%

本研究は、科学研究費助成事業基盤研究 C「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」(課題番号 : 16K06589, 研究代表者 : 齋藤俊克) の助成を受けた。ここに記して、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Japan Concrete Institute, "Report of technical committee on establishment of design and practical method of porous concrete" (2003).
- 2) Japan Concrete Institute, "Report of technical committee on establishment of construction and quality control standards for performance-based design of porous concrete" (2015).
- 3) T. 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).
- 4) R. Cho and K. Kobayashi, "The elastic modulus of concrete as a two-phase composite material", Concrete Journal, Vol.12, No.7, pp.27-34 (1974).
- 5) T. Saito and K. Demura, "Proposal of an equation for estimating the static modulus of elasticity of porous concrete by applying the law of mixture", Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.723, pp.825-832 (2016).
- 6) K. Obayashi, Y. Nakata, S. Otsuka, N. Haruyama, T. Saito and A. Miyata, "Study on the stress-strain curve of concrete from the point of view of the two-phase composite material (part.4) relation between estimate and experimental value of the static elastic modulus of coarse aggregate", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, CD-ROM, pp.651-652 (2014).
- 7) T. Hiraiwa, K. Tanaka, Y. Tanigawa and H. Mori, "Fundamental study on mix proportion of porous concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.23, No.1, CD-ROM, pp.121-126 (2001).
- 8) T. Saito and K. Demura, "Proposal of mix design system of vinylon fiber-reinforced porous concretes", Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.75, No.657, pp.1947-1953 (2010).
- 9) T. Otono, M. Kunieda, T. Yoshida and K. Rokugo, "Surface displacement distribution on porous concrete under compressive loading and its application", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.25, No.1, CD-ROM, pp.1163-1168 (2003).
- 10) T. Yoshida, M. Kunieda, Z. Ozawa and K. Rokugo, "Quality improvement of porous concrete painted penetrating sealer", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.27, No.1, CD-ROM, pp.1255-1260 (2005).
- 11) H. Kawakami, "Effects of constituents and interface on elastic modulus of concrete", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.22, No.2, CD-ROM, pp.529-534 (2000).