

論文 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

武田 昌也*1・齋藤 俊克*2・出村 克宣*3

要旨：本研究では、目標空隙率 10～30%としたポーラスコンクリートの圧縮強度および静弾性係数を明らかにした上で、その静弾性係数推定式として、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に示される New RC 式および同規準 1991 年度版の推定式の適用性を検討すると共に、それらの推定式を基本式とした新たなポーラスコンクリートの静弾性係数推定式について検討している。その結果、日本建築学会の二つの式ともポーラスコンクリートの静弾性係数推定式としての適用性は高いと推察され、それらの推定式を基本式とした、ポーラスコンクリートの新たな静弾性係数推定式を提案している。

キーワード：ポーラスコンクリート、静弾性係数、推定式、圧縮強度、単位容積質量、空隙率、材齢

1. はじめに

ポーラスコンクリートは大きな空隙率を持つことが特徴であり、その調合設計や性能評価にあたっては空隙率が主要な因子として取り扱われる。また、当然のことながら、ポーラスコンクリートであっても、空隙率の変化は単位容積質量の変化として現れる。一方、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¹⁾。

そこで、著者らは、その算定因子として単位容積質量および圧縮強度を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^{2,3)}および同規準 1991 年度版の推定式⁴⁾（以下、それぞれ、AIJ-New RC 式および 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、前報⁵⁾において、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している。

そこで、本研究では、これらの推定式を基本式として、ポーラスコンクリートの基本性能をもとにした新たな静弾性係数推定式の検討を行うことを目的としている。前報においては、比較的低強度領域の実験データに基づく検討であったことから、ポーラスコンクリートの水中養生期間を 365d までの長期間とすることによって高強度領域のデータを得た上で、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式の適用性を再度検証した上で、新たな静弾性係数推定式について検討している。

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碎石をそれぞれ表乾状態で使用した。それらの性質を **Table 2** および **Table 3** に示す。なお、本研究で用い

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)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3270	1-55	4-00	31.1	46.9	62.9
Chemical Compositions (%)						
MgO	SO ₃	ig. loss		Total Alkali	Chloride Ion	
1.57	2.05	1.99		0.55	0.024	

Table 2 Properties of Fine Aggregate.

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

Note, *: Density in saturated surface-dry condition.

Table 3 Properties of Coarse Aggregate.

Size (mm)	Density* (g/cm ³)	Water Absorption (%)	Solid Content (%)
5~20	2.72	0.58	59.1
Compressive Strength (MPa)		Static Modulus of Elasticity (GPa)	
148.2		55.2	

Note, *: Density in saturated surface-dry condition.

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻（学生会員）

*2 日本大学 工学部建築学科准教授 博士（工学）（正会員）

*3 日本大学 工学部建築学科教授 工博（正会員）

た粗骨材は、大林らの研究⁶⁾で用いたものと同じものであり、粗骨材の圧縮強度および静弾性係数は、その研究成果として得られた値である。

2.3 練混ぜ水および混和剤

練混ぜ水としては、上水道水を使用した。また、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。

3. 試験方法

3.1 結合材としてのセメントモルタルの試験

JIS R 5201 (セメントの物理試験方法)に従って、結合材としてのセメントモルタルのフロー値が 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、ポーラスコンクリートに使用する結合材のフロー値が 230 程度であれば表面性状が良好で、下部にペーストが垂れない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⁾しており、本研究においても、材料分離が生じないことを確認している。次に、Table 5 に示す調合の供試モルタルを練り混ぜ、寸法 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ に成形した。その際、モルタル用空気量試験器を用いて空気量を測定した。その後、1d 湿空 [20℃, 90% (RH)] 養生した後、27d, 55d, 83d および 364d 水中 (20℃) 養生を行って、セメントモルタル供試体を作製した。養生後の供試体については、JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法)に準じて、圧縮試験を行った。圧縮試験時には、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 に相当する応力と縦ひずみ 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 に示す調合のポーラスコンクリートを練り混ぜ、振動数 3200rpm のテーブルバイブレターを用いて、寸法 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ に成形した。その後、1d 湿空 [20℃, 90% (RH)] 養生した後、27d, 55d, 83d および 364d 水中 (20℃) 養生して供試体を作製し、後述の空隙率試験後に上下の載荷面にキャッピングを行った。

3.3 空隙率試験

JCI-SPO2-1 [ポーラスコンクリートの空隙率試験方法 (案)] の「7.1 容積法を用いる場合」に準じて、養生後の供試体の空隙率試験を行い、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

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 : 0.63	1.1	227	1.7
25.0		0.8	229	1.5
30.0		0.4	232	1.6

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

Table 6 Mix Proportions of Porous Concretes.

W/C (%)	Target Voids (%)	Mix Proportions (kg/m³)				AE-WRA* (%)	Age (d)			
		Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate		28	56	84	365
							Total Voids (%)			
22.5	10	94	418	263	1553	1.1	10.8	10.5	10.4	9.4
	15	80	356	223	1553		15.8	16.1	15.0	14.8
	20	66	291	183	1553		21.0	20.5	20.0	20.6
	25	51	228	143	1553		27.1	27.0	24.8	24.3
	30	37	164	103	1553		28.6	30.4	30.7	30.5
25.0	10	101	406	255	1553	0.8	10.8	10.5	9.3	10.4
	15	86	344	216	1553		16.2	16.4	15.5	14.7
	20	70	283	178	1553		21.4	21.0	19.6	20.8
	25	55	221	139	1553		27.4	27.1	26.1	24.4
	30	40	159	100	1553		30.8	28.6	29.1	28.1
30.0	10	115	382	240	1553	0.4	10.2	10.3	10.5	10.1
	15	97	324	204	1553		16.4	16.4	15.9	15.3
	20	80	266	167	1553		19.3	19.9	20.5	19.8
	25	62	208	131	1553		27.0	26.3	26.4	24.5
	30	45	150	94	1553		28.9	29.3	30.3	28.4

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

した。なお、音野らは、ポーラスコンクリートの静弾性係数を測定する際、表面の凹凸によって、コンプレッソメータの固定が難しいことから、供試体の固定箇所を改良することが必要と報告⁸⁾している。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

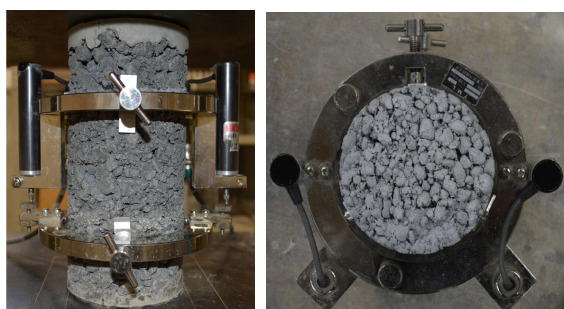


Photo 1 Appearance of Improved Compressometer.

Table 7 Compressive Strength and Static Modulus of Elasticity of Cement Mortars as Binder.

Age (d)	W/C (%)	Compressive Strength (MPa)	Static Modulus of Elasticity (GPa)
28	22.5	101	32.0
	25.0	93.0	31.6
	30.0	83.3	25.3
56	22.5	103	34.0
	25.0	98.0	32.5
	30.0	83.7	30.5
84	22.5	105	37.0
	25.0	101	34.1
	30.0	91.6	32.6
365	22.5	105	40.3
	25.0	101	35.8
	30.0	94.7	33.7

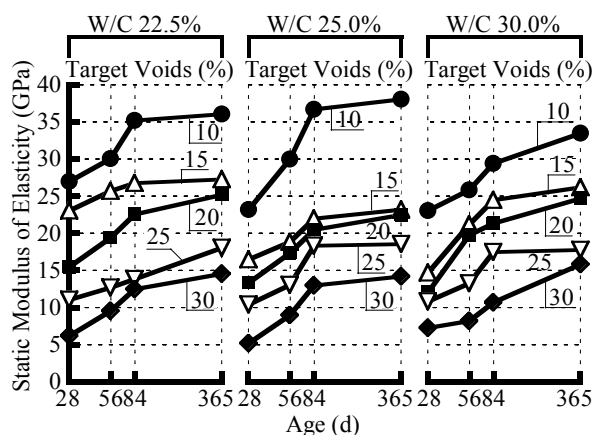


Fig.2 Age vs. Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.

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。Photo 1 には、供試体の固定箇所を改良したコンプレッソメータの外観を示す。

4. 試験結果および考察

Table 7 には、結合材としてのセメントモルタルの圧縮強さおよび静弾性係数を示す。当然のことながら、結合材としてのセメントモルタルの圧縮強さおよび静弾性係数は、水セメント比が小さく、材齢の長いものほど大きい傾向にある。

Fig.1 および Fig.2 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材齢の関係を示す。結合材としてのセメントモルタルと同様に、目標空隙率にかかわらず、水セメント比が小さく、長期材齢のポーラスコンクリートほど、その圧縮強度および静弾性係数は大きい傾向にある。

Fig.3 および Fig.4 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示す。水セメント比および材齢にかかわらず、全空隙率の増加に伴い、ポーラスコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は減少する傾向にある。しかし、水セメント比が大きいもの

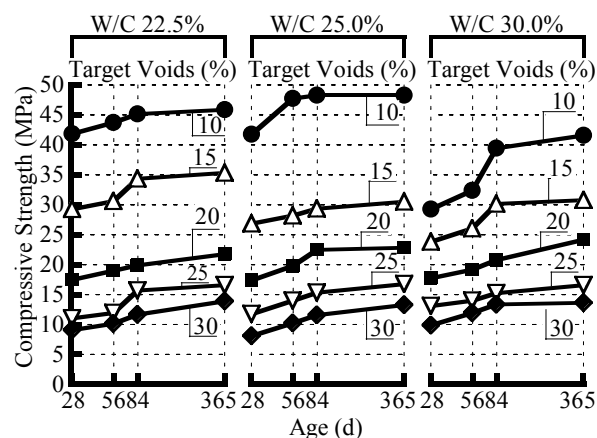


Fig.1 Age vs. Compressive Strength of Porous Concretes.

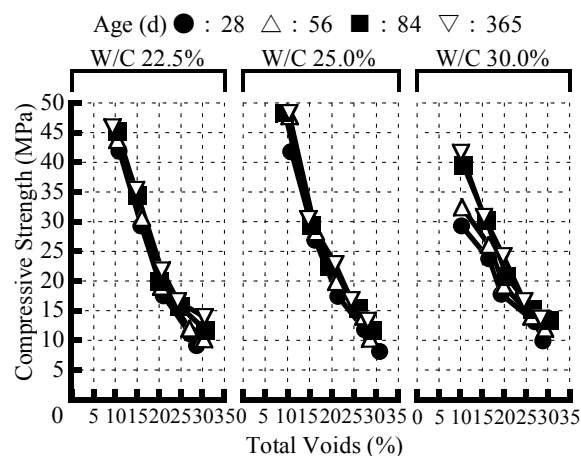


Fig.3 Total Voids vs. Compressive Strength of Porous Concretes.

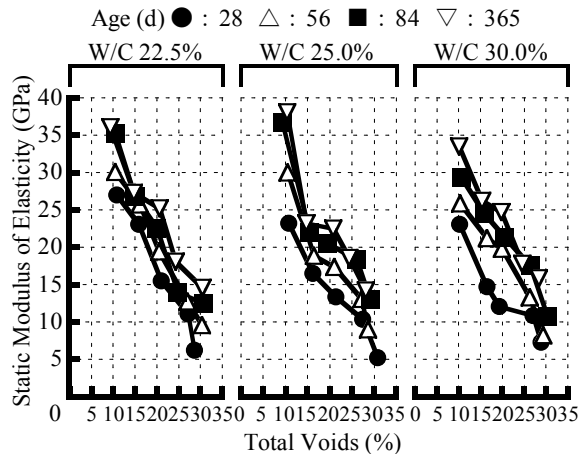


Fig.4 Total Voids vs. Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.

ほど、空隙率の増加に伴うそれらの減少の程度が小さい傾向にある。

Fig.5 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示す。普通コンクリートと同様に、ポーラスコンクリートの静弾性係数は、圧縮強度の増加に伴って増大する傾向にあり、それらの間には高い相関性が認められ、その関係は図中に示す次のような実験式で表すことができる。

$$E = 1.47 \sigma_c^{0.82} \quad (1)$$

ここに、 E ：静弾性係数 (GPa)

σ_c ：圧縮強度 (MPa)

次に、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式の適用性について検討した。なお、これらの推定式は次の通りである。

AIJ-New RC 式

$$E = k_1 \times k_2 \times 33.5 \times (\gamma / 2.4)^2 \times (f_c / 60)^{(1/3)} \quad (2)$$

W/C (%)—Age (d)
 ●: 22.5—28 ▲: 25.0—28 ■: 30.0—28 ○: 22.5—56 △: 25.0—56 □: 30.0—56
 ●: 22.5—84 ▲: 25.0—84 ■: 30.0—84 ○: 22.5—365 △: 25.0—365 □: 30.0—365

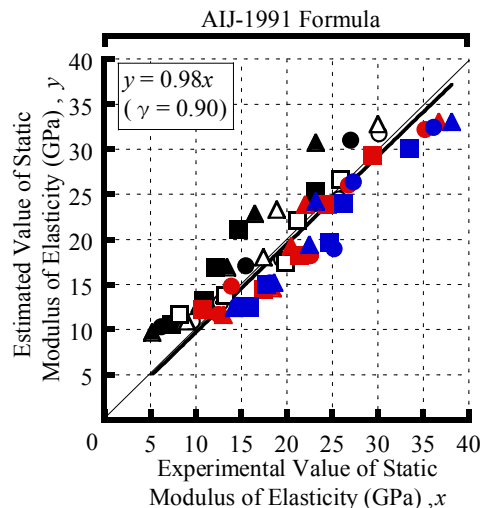
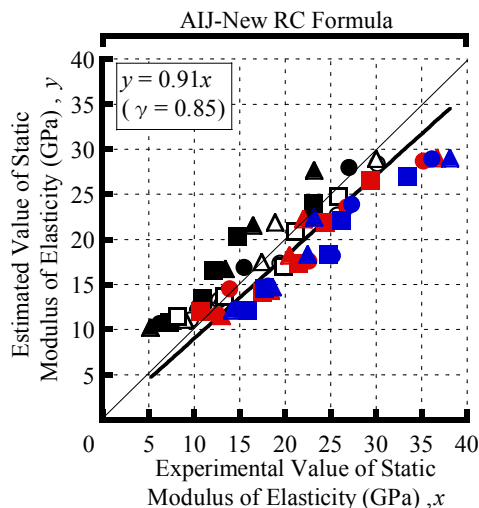


Fig.6 Experimental Values vs. Estimated Values of Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes by AIJ-New RC Formula and AIJ-1991 Formula.

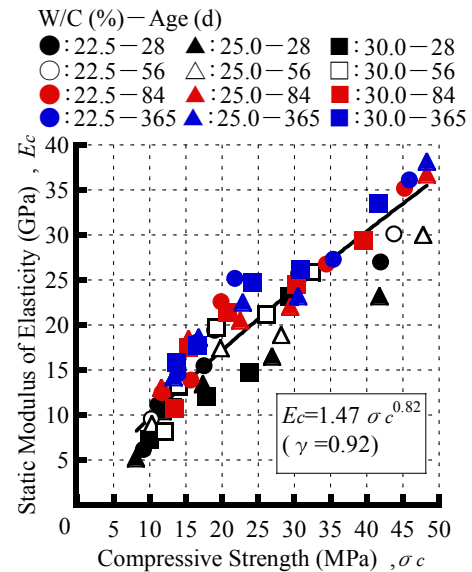


Fig.5 Relationship between Compressive Strength and Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.

AIJ-1991 式

$$E = 21.0 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times \sqrt{f_c / 20} \quad (3)$$

ここに、 E ：静弾性係数 (GPa)

k_1 ：硬質砂岩：1.0

k_2 ：混和材を使用しない場合：1.0

γ ：単位容積質量 (t/m³)

f_c ：圧縮強度 (MPa)

Fig.6 には、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式で算出した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。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。また、各推定式の f_c は圧縮強度の実測値とし、各推定式の γ は調査設計

時の単位容積質量とした。**Fig.7**には、静弾性係数の算定に用いたポーラスコンクリートの調査設計時の単位容積質量と目標空隙率の関係を示す。

AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式で算出したポーラスコンクリートの静弾性係数推定値は、実測値に比べて AIJ-New RC 式では 0.91 倍、AIJ-1991 式では、0.98 倍の値を与えるものの、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式の相関係数は、それぞれ、0.85 および 0.90 であり、これらの推定式の適用性は高いと推察される。

そこで、これらの推定式を基本式とし、ポーラスコンクリートの新たな静弾性係数推定式について検討する。なお、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式は、次のような基本型で表される。

$$E = E_0 \times (\gamma_i / \gamma_0)^a \times (f_i / f_0)^b \quad (4)$$

ここに、 E ：静弾性係数 (GPa)

γ_i, f_i ：単位容積質量および圧縮強度の実測値

f_0 ：代表的な圧縮強度の基準値

E_0, γ_0 ：代表的な圧縮強度の基準値を持つコンクリートの静弾性係数および単位容積質量

a, b ：単位容積質量および圧縮強度に係る指数

AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式において、式 (4) の f_0, E_0, γ_0, a および b は次のように設定されている。

AIJ-New RC 式： $f_0 = 60\text{MPa}$, $E_0 = 33.5\text{GPa}$, $\gamma_0 = 2.4$,
 $a = 2$, $b = 1/3$

AIJ-1991 式： $f_0 = 20\text{MPa}$, $E_0 = 21.0\text{GPa}$, $\gamma_0 = 2.3$,
 $a = 1.5$, $b = 1/2$

なお、AIJ-New RC 式においては、粗骨材の岩種および混和材使用の有無による係数が設定されている。

ここで、 f_0, E_0 および γ_0 は、普通コンクリートの実測値から得られる基準値であることから、ポーラスコンクリートについてのこれらの値を次のように設定した。

- 1) ポーラスコンクリートの圧縮性状を考慮すれば、AIJ-New RC 式が対象とするような高強度領域を包含することはないものと考え、代表的な圧縮強度の基準値 (f_0) を AIJ-1991 式と同様、20MPa とした。
- 2) 式 (1) より、圧縮強度が 20MPa である場合の静弾性係数 (E_0) を 17.1GPa と算出した。
- 3) **Fig.3** より、水セメント比および材齢にかかわらず、圧縮強度 20MPa は全空隙率 20% 近傍で得られているため、空隙率の代表値を 20% とし、**Fig.7** に示した実験式より、単位容積質量の基準値 (γ_0) を 2.1 t/m³ と算出した。なお、目標空隙率 20% で調査した全てのポーラスコンクリートの全空隙率の平均値は 20.4% (標準偏差: 0.6%)、圧縮強度の平均値は 20.2MPa (標

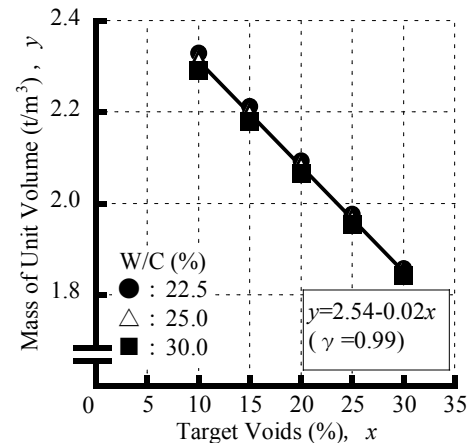


Fig.7 Target Voids vs. Mass of Unit Volume of Porous Concretes.

準偏差: 2.1MPa) であった。

また、AIJ-New RC 式においては、広範囲な強度レベルに適合するよう³⁾、単位容積質量の指数 a を 2 としているが、本研究では AIJ-1991 式と同様の 1.5 とし、上述のように設定した値を用いて回帰分析を行い、実測値と推定値に高い相関が認められた指数 b の値として 1/1.4 を得て、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式として、式 (5) を導いた。なお、粗骨材の岩種による係数については、普通コンクリートと異なる値とすることは不合理であること、本研究では、硬質砂岩を使用していることおよび混和材に関する検討は行っていないことから、粗骨材の岩種および混和材使用の有無による係数の項を持たない推定式としている。

$$E = 17.1 \times (\gamma / 2.1)^{1.5} \times (f_c / 20)^{1/1.4} \quad (5)$$

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/m³)

Fig.8には、式 (5) で算出した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示す。式 (5) で算出される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 0.99、およびその相関係数は 0.92 である。このことより、式 (5) による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については、**Fig.6** に示した AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式による推定結果に比べて精度のよい結果が得られている。

以上のことから、本研究の限りでは、式 (5) 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ものと推察される。なお、粗骨材の岩種および混和材使用の有無による影響の検討や、式 (4) における単位容積質量および圧縮強度に係る指数 a および b の評価については、今後の課題としたい。

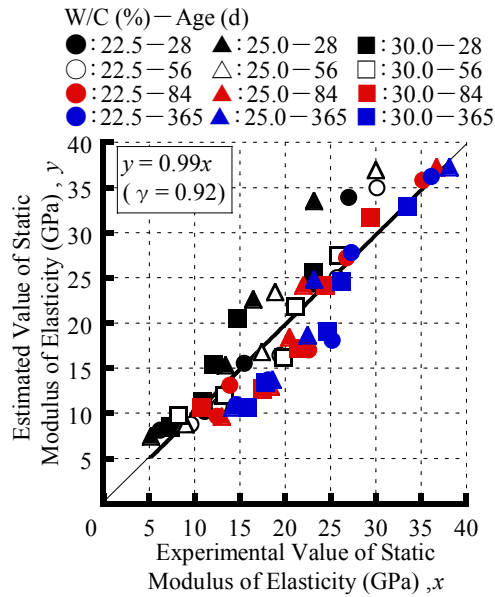


Fig.8 Experimental Values vs. Estimated Values of Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes by Eq (5).

5. 結論

本研究で得られた試験結果を総括すれば、以下の通りである。

- (1) 目標空隙率にかかわらず、水セメント比が小さく、長期材齢のポーラスコンクリートほど、その圧縮強度および静弾性係数は大きい傾向にあるが、それらの値は全空隙率の増加に伴い減少する。
- (2) 水セメント比および材齢にかかわらず、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。
- (3) AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式で算出したポーラスコンクリートの静弾性係数推定値は、実測値に比べて AIJ-New RC 式では 0.91 倍、AIJ-1991 式では、0.98 倍の値を与えるものの、その適用性は高いと推察される。
- (4) 本研究の限りでは、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 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として次式が提案できる。

$$E = 17.1 \times (\gamma / 2.1)^{1.5} \times (f_c / 20)^{1/1.4}$$

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)

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業基盤研究 C「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構築」(課題番号: 19K04694, 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) 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの圧縮強度, 静弾性係数および動弾性係数の関係, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.251-256, 2015.3
- 2) (財) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 大林賢人ほか: 二相複合材料の観点から見たコンクリートの応力-ひずみ曲線に関する検討 (その 4) 粗骨材の静弾性係数の実験値と推定値の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.651-652, 2014.9
- 7) 平岩 陸, 田中清人, 谷川恭雄, 森 博嗣: ポーラスコンクリートの調合設計法に関する規礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.121-126, 2001.6
- 8) 音野琢也, 国枝 稔, 吉田知弘, 六郷恵哲: 圧縮力を受けるポーラスコンクリートの表面変位分布の計測とその応用, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1163-1168, 2003.6