

論文 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

武田 昌也*1・齋藤 俊克*2・出村 克宣*3

要旨: 本研究では、静弾性係数の異なる 2 種類の岩種の粗骨材を用いて、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、普通コンクリートに対して提案されている各種静弾性係数推定式の適用性を検討することを目的としている。その結果、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高い相関性が認められ、本研究の限りでは、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」に示される New RC 式および同規準の 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。

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, 空隙率, 粗骨材岩種

1. はじめに

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ており、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。なお、普通コンクリートについては、いくつかの静弾性係数推定式が提案されており、その算定因子として圧縮強度および単位容積質量が用いられる。

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、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普通コンクリートと同様に相関性が認められる¹⁾ことから、ポーラスコンクリートの単位容積質量および圧縮強度を静弾性係数推定のための算定因子として取扱うことができるものとする。

そこで、本研究では、静弾性係数の異なる 2 種類の岩種の粗骨材を用いて、幅広い空隙率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、普通コンクリートに対して提案されている静弾性係数推定式のポーラスコンクリートへの適用性を検討することを目的としている。なお、本研究では、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²⁾および同規準の 1991 年度版の推定式³⁾ (以下、それぞれ、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式)、ACI (American Concrete Institute) の 363 委員会が示す推定式⁴⁾ (以下、ACI-363 式)、および CEB

(Euro-International Committee for Concrete) と FIP (International Federation for Pre-stressing) が示す推定式⁵⁾ (以下、CEB-FIP 式) を対象としている。

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。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

Table 1 Physical Properties and Chemical Compositions of Ordinary Portland Cement.

Blaine Density (g/cm ³)	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

*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)

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°C, 90% (RH)] および 27d 水中 (20°C) 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

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 : 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.

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ーターを用いて、寸法 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ に成形した。その

Table 6 Mix Proportions of Porous Concretes Using Hard Sandstone and Limestone.

Type	W/C (%)	Target Voids (%)	Mix Proportions (kg/m ³)				AE-WRA* (%)
			Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	
Hard Sandstone	22.5	10	94	418	263	1553	1.1
		20	66	291	183	1553	
		30	37	164	103	1553	
	25.0	10	101	406	255	1553	0.8
		20	70	283	178	1553	
		30	40	159	100	1553	
	30.0	10	115	382	240	1553	0.4
		20	80	266	167	1553	
		30	45	150	94	1553	
Limestone	22.5	10	92	408	257	1563	1.1
		20	63	281	177	1563	
		30	34	154	97	1563	
	25.0	10	99	396	248	1563	0.8
		20	68	272	171	1563	
		30	37	149	94	1563	
	30.0	10	112	373	234	1563	0.4
		20	77	257	162	1563	
		30	42	140	88	1563	

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

後、1d 湿空 [20℃, 90% (RH)] および 27d 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、全空隙率および連続空隙率を算出した。

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、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⁾しており、本研究においても治具を介してコンプレッソメータを供試体に固定した。

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、水セメント比の小さ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全空隙率および連続空隙率と目標空隙率の関係を示す。水セメント比にかかわらず、ポーラスコンクリートの連続空隙率および全空隙率は、目標空隙率の増加に伴い増大する。また、ポーラスコンクリートの同一調合における全空隙率は連続空隙率に比べて若干大きい。なお、ポーラスコンクリートの用途に寄与する空隙は連続空隙であるため、目標空隙率とは、所要の連続空隙率が得られるように調合設計時に想定した空隙率である。本研究においては、これまでに提案した調合設計法⁹⁾に準じて調合を決定しており、いずれの調合においても、目標空隙率とほぼ同様の連続空隙率が得られている。

Fig.3 には、ポーラスコンクリートの応力-ひずみ曲線の水セメント比 (22.5, 25.0 および 30.0%) 別に示す。硬質砂岩砕石および石灰岩砕石を粗骨材としたポーラスコンクリートの縦ひずみは、応力の増加に伴って増大する傾向にある。また、目標空隙率の小さいポーラスコンクリートほど、応力-ひずみ曲線の勾配は大きい。

Fig.4 には、ポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率の関係を示す。水セメント比および粗骨材岩種にかか



Photo 1 Appearance of Improved Compressometer.

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

W/C (%)	Compressive Strength (MPa)	Static Modulus of Elasticity (GPa)
22.5	101	32.0
25.0	93.0	31.6
30.0	83.3	25.3

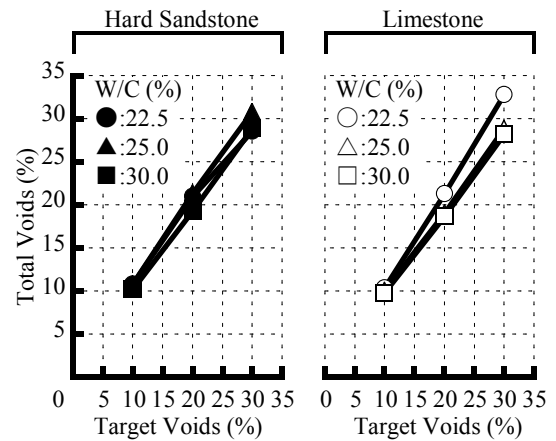


Fig.1 Target Voids vs. Total Voids of Porous Concretes.

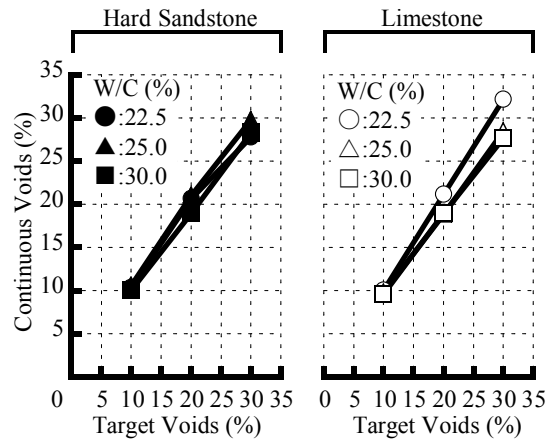


Fig.2 Target Voids vs. Continuous Voids of Porous Concretes.

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は減少する傾向にある。一方、水セメント比が 22.5% から 30.0% に増加しても、結合材としてのセメントモルタルの圧縮強さの低下に比べて、ポーラスコンクリートの圧縮強度の著しい低下は認められない。ポー

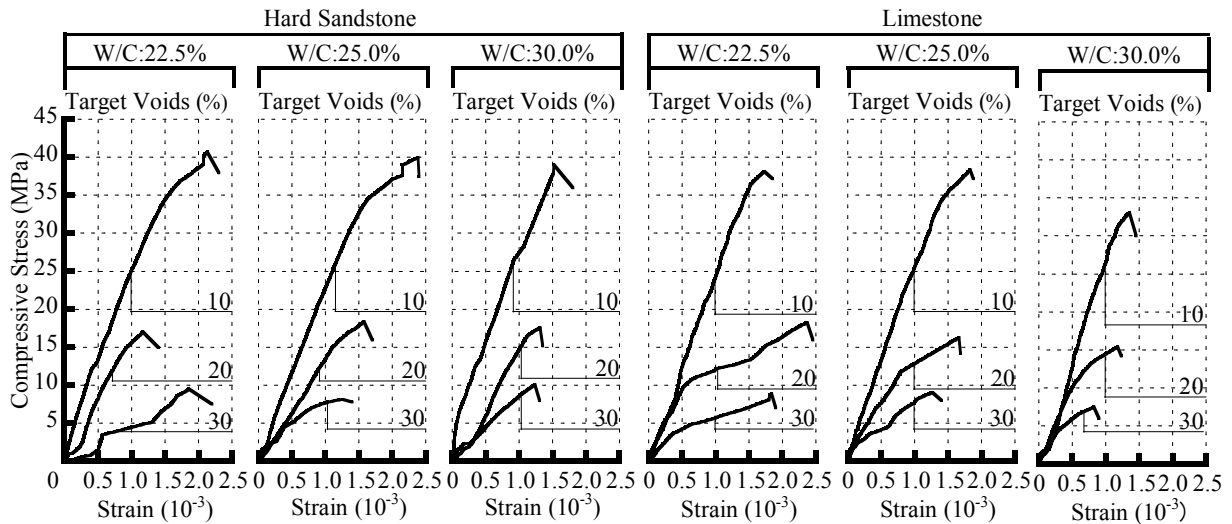


Fig.3 Compressive Stress-Strain Curves for Porous Concretes.

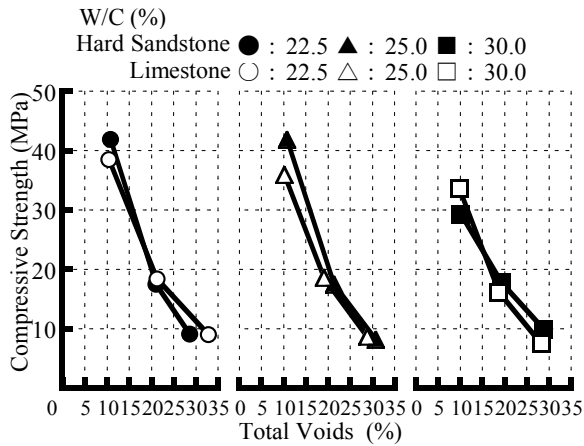


Fig.4 Total Voids vs. Compressive Strength of Porous Concretes.

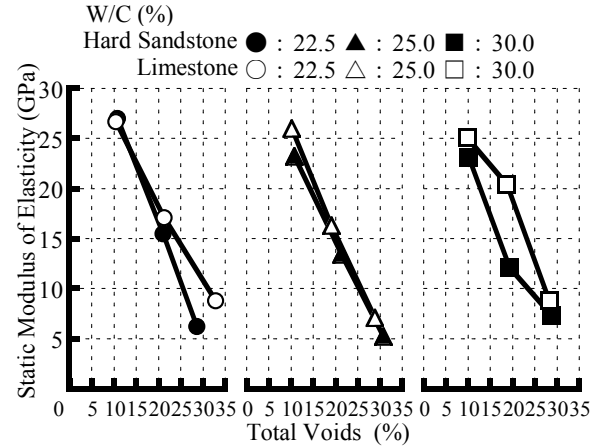


Fig.5 Total Voids vs. Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.

ラスコンクリートは、粗骨材が結合材を介して点接着した組織を有しているため、セメントモルタルの性能低下の影響が少ないものと考えられる。また、一部のものを除き、硬質砂岩砕石を粗骨材としたポーラスコンクリートの圧縮強度は、石灰岩砕石を粗骨材としたものよりも若干大きい傾向にある。これは、硬質砂岩の圧縮強度が石灰岩に比べて大きいためと推察される。

Fig.5には、ポーラスコンクリートの静弾性係数と全空隙率の関係を示す。圧縮強度と同様に、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。一方、全空隙率が10%程度のポーラスコンクリートの静弾性係数は、水セメント比が大きくなると若干小さくなる傾向にあるが、その他のものでは、水セメント比の違いによる明確な傾向が認められない。

また、石灰岩砕石を粗骨材としたポーラスコンクリート静弾性係数は、硬質砂岩砕石を粗骨材としたものよりも若干大きい傾向にある。これは、石灰岩の静弾性係数が硬質砂岩に比べて大きいためと推察される。

Fig.6には、ポーラスコンクリートの静弾性係数と圧縮

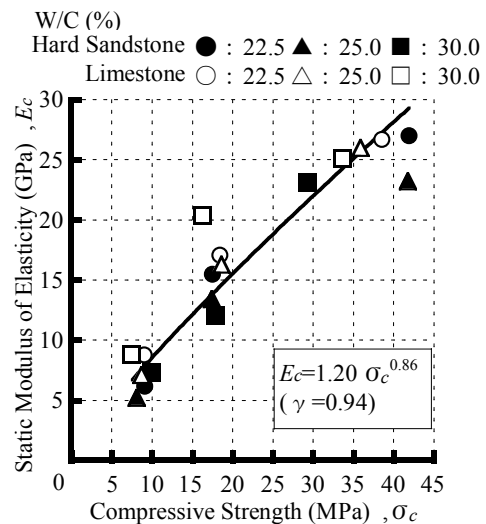


Fig.6 Relationship between Compressive Strength and Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.

強度の関係を示す。水セメント比にかかわらず、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る。また、ポーラスコンクリートの

静弾性係数と圧縮強度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すことができる。

以上の試験結果より得られ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用いて、Table 8 に示す普通コンクリートに関する各種静弾性係数推定式の適用性を検討した。なお、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

Table 8 Equations for Estimating Static Modulus of Elasticity of Ordinary Cement Concrete.

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

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， α ：硬質砂岩：1.0，石灰岩：1.2， γ ：単位容積質量(t/m^3)， f_c ：圧縮強度(MPa)， σ_{28} ：28d 圧縮強度(MPa)

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上の単位容積質量と目標空隙率の関係を示す。

Fig.8 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。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。

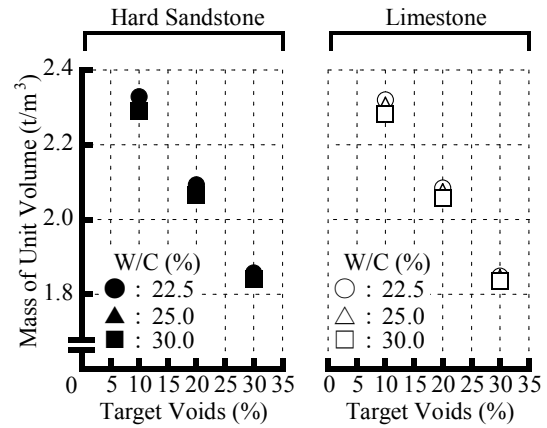


Fig.7 Target Voids vs. Mass of Unit Volume of Porous Concretes.

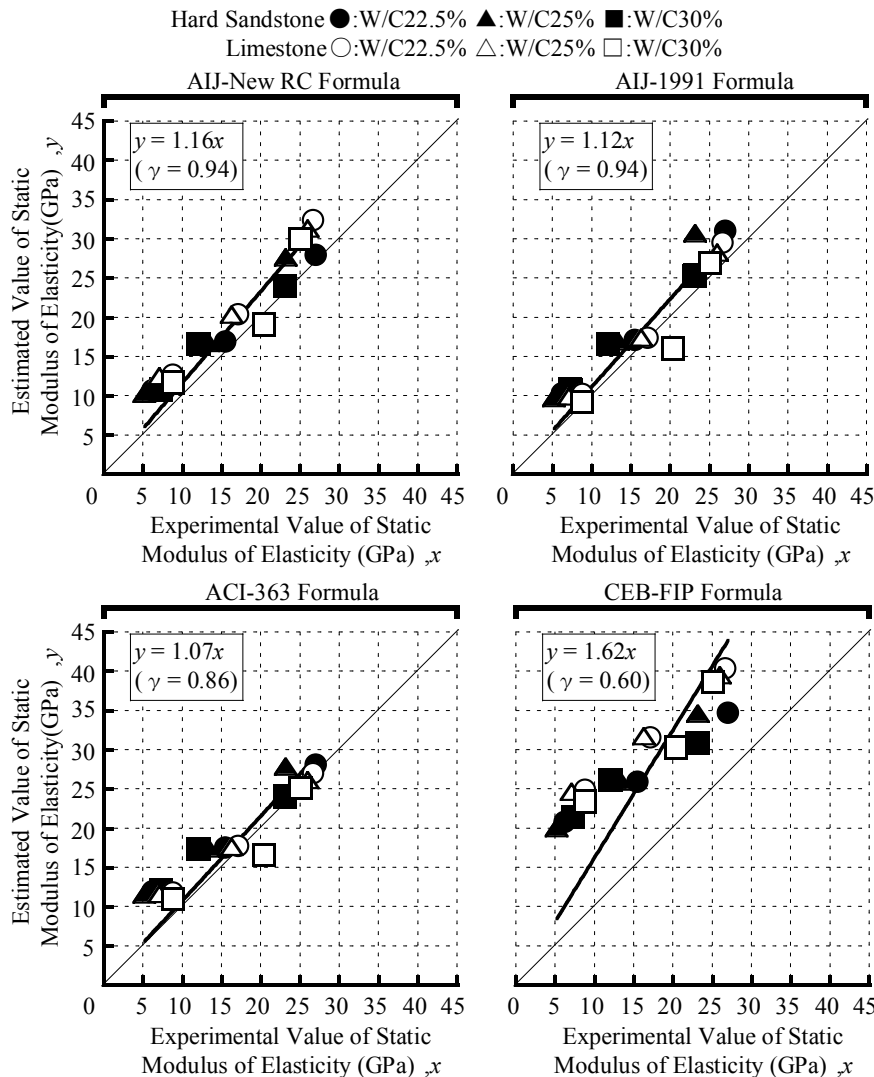


Fig.8 Experimental Values vs. Estimated Values of Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.

AIJ-New RC 式で算出されるポーラスコンクリートの静弾性係数とその実測値の関係を表す直線近似式の傾きは 1.16 および相関係数は 0.94 であり、AIJ-New RC 式はポーラスコンクリートに対する適用性を有するものと考えられる。

AIJ-1991 式で算出されるポーラスコンクリートの静弾性係数とその実測値の関係を表す直線近似式の傾きは 1.12 および相関係数は 0.94 であり、AIJ-New RC 式に比べて、若干精度良くポーラスコンクリートの静弾性係数が推定されている。これは、AIJ-1991 式は、AIJ-New RC 式に比べて低強度領域の普通コンクリートを対象としており、本研究においては、普通コンクリートに比べて、低強度のポーラスコンクリートが多いことに起因するものと考えられる。

ACI-363 式で算出されるポーラスコンクリートの静弾性係数とその実測値の関係を表す直線近似式の傾きは 1.07 であり、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式に比べて小さい値であるが、その相関係数は 0.86 であり、相関性が若干低い傾向にある。また、その実測値に比べて、ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値は、低強度領域においては大きく、高強度領域においては小さく算出されている。

CEB-FIP 式で算出されるポーラスコンクリートの静弾性係数とその実測値の関係を表す直線近似式の傾きは 1.62 および相関係数は 0.60 であり、ポーラスコンクリートの静弾性係数の推定値は、その実測値に比べて相当に大きく算出されている。これは、CEB-FIP 式は他の推定式と異なり、コンクリートの単位容積質量が推定式のパラメーターに組み込まれていないためと推察される。

以上のことから、本研究の限りでは、AIJ-New RC 式および AIJ-1991 式は、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式としても適用できるものと推察される。

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) 水セメント比の増加に伴う結合材としてのセメントモルタルの圧縮強さの低下の程度に比べて、ポーラスコンクリート圧縮強度の低下の程度は小さい傾向にある。
- (2) ポーラスコンクリートの圧縮強度は、使用する粗骨材の圧縮強度が大きいものほど、その静弾性係数は、使用する粗骨材の静弾性係数が大きいものほど大きい傾向にある。
- (3) 水セメント比にかかわらず、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。
- (4) 本研究の限りでは、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 式および同規準の 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。

謝辞

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。

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) 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
- 4) ACI Committee : State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACI Journal, Vol.81, No.4, pp.364-411, 1984.7-8
- 5) CEB : CEB-FIP Model Code 1990, Th. Telford Ltd., 1993
- 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査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, No1, pp.1163-1168, 2003.6
- 9) 齋藤俊克, 出村克宣: ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの調査設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.657, pp.1947-1953, 2010.11