

# 論文 応力増加速度および供試体寸法を変化させて試験したポーラスコンクリートの圧縮性状

田中 秀暉\*1・齋藤 俊克\*2・出村 克宣\*3

**要旨:** 本研究では、目標空隙率と供試体寸法を変化させたポーラスコンクリートについて、異なる応力増加速度で試験した時の圧縮性状を明らかにしている。その結果、それらの圧縮性状は、同一供試体寸法の場合、JCI-SPO5 [ポーラスコンクリートの静弾性係数試験方法 (案)] の応力増加速度範囲  $0.6 \pm 0.4 \text{MPa/s}$  ではほぼ一定であるが、供試体寸法が大きくなると小さくなる。一方、供試体寸法にかかわらず、JCI-SPO5 の試験方法で測定されるポーラスコンクリートの静弾性係数については、式(1)に示した武田らが提案する静弾性係数推定式によって推定できる。

**キーワード:** ポーラスコンクリート, 圧縮強度, 静弾性係数, 応力増加速度, 供試体寸法, 空隙率, 推定式

## 1. はじめに

ポーラスコンクリートの圧縮試験方法としては、日本コンクリート工学会 (JCI) 「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」<sup>1)</sup>が策定し、後継委員会である「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」<sup>2)</sup>が改正した JCI-SPO5 [ポーラスコンクリートの静弾性係数試験方法 (案)] が広く知られている。その圧縮試験載荷時の応力増加速度は  $0.6 \pm 0.4 \text{MPa/s}$  の範囲と規定されており、一般的なコンクリートの圧縮強度試験である JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) の引用である。

一方、普通コンクリートを対象とした既往の研究では、 $0.6 \pm 0.4 \text{MPa/s}$  の範囲では圧縮強度に及ぼす応力増加速度の影響はあまり認められないと報告されている<sup>3), 4)</sup>。しかし、ポーラスコンクリートは内部の組織構造が普通コンクリートとは異なり不均質であるため、圧縮性状に及ぼす応力増加速度の影響が大きいことが考えられる。

そこで本研究では、目標空隙率および供試体寸法を変化させたポーラスコンクリートについて、JCI-SPO5 に規定の範囲の  $0.2, 0.6$  および  $1.0 \text{MPa/s}$  並びに、規定より速い  $1.5 \text{MPa/s}$  の応力増加速度で圧縮試験を行い、その圧縮性状に及ぼす試験時の応力増加速度の影響を明らかにする。また、本研究においては、同一調合であっても、応力増加速度および供試体寸法の違いにより得られる圧縮強度および静弾性係数が異なることが想定されるため、武田らが提案している日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に示される New RC (AIJ-New RC 式) を基本式とするポーラスコンクリートの静弾性係数推定式<sup>5), 6)</sup>に及ぼす試験条件の影響についても検討する。

## 2. 使用材料

### 2.1 セメント

セメントとして 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

細骨材として阿武隈川産川砂 (粒径:  $2.5 \text{mm}$  以下), 粗骨材として硬質砂岩碎石 (粒径:  $5 \sim 20 \text{mm}$ ) を使用した。それらの性質を **Table 2** および **Table 3** に示す。

### 2.3 練混ぜ水および混和剤

練混ぜ水として上水道水を使用した。また、混和剤と

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

| Density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Blaine<br>Specific<br>Surface<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Setting Time<br>(h-min) |              | Compressive<br>Strength of Mortar<br>(MPa) |      |      |
|---------------------------------|---|-------------------------|--------------|--|------|------|
|                                 |   | Initial<br>Set          | Final<br>Set | 3d   | 7d   | 28d  |
| 3.16                            | 3260  | 2-13                    | 3-33         | 30.6                                       | 46.3 | 63.1 |
| Chemical Compositions (%)       |   |                         |              |  |      |      |
| MgO                             | SO <sub>3</sub>                                       | ig. loss                | Total Alkali | Chloride Ion                               |      |      |
| 1.56                            | 2.10  | 2.15                    | 0.53         | 0.021                                      |      |      |

**Table 2 Properties of Fine Aggregate.**

| Size<br>(mm) | Density*<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Water Absorption<br>(%) |
|--------------|----------------------------------|-------------------------|
| $\leq 2.5$   | 2.57                             | 2.64                    |

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

**Table 3 Properties of Coarse Aggregate.**

| Size<br>(mm) | Density*<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Water<br>Absorption<br>(%) | Solid<br>Content<br>(%) |
|--------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 5~20         | 2.72                             | 0.56                       | 59.5                    |

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 名誉教授 工博 (フェロー会員)

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 4 Properties of Air-Entraining and High-Range Water-Reducing Admixture.**

| Density (%) | Alkaline Content (%) | Chloride Ion Content (%) |
|-------------|----------------------|--------------------------|
| 1.040~1.060 | 0.9                  | <0.01                    |

### 3. 試験方法

#### 3.1 供試体の作製

結合材としてのセメントモルタルの調合を、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て Table 5 のように決定した。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、材料分離が生じないポーラスコンクリートを製造することが出来ると報告<sup>7)</sup>しており、本研究においても、そのことを確認している。

JCI-SPO1-1 [ポーラスコンクリートの作り方 (案)] に従って、セメントモルタルを結合材とし、目標空隙率 0, 10, 20 および 30% とした 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を用いて、寸法 φ10×20cm および φ15×30cm に成形した。その後、JCI-SE4 [温水法 (70℃) によるコンクリートの促進強度試験方法] に従って、24h 湿空 [20℃, 90% (RH)], 24h 温水 (70℃), 1h 水中 (20℃) 養生を行って供試体を作製し、空隙率試験後に上下の載荷面にキャッピングを行った。

なお、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り、目標空隙率 0% とは、調合上で粗骨材間を完全に結合材で充填したもので、普通コンクリートを想定している。

**Table 5 Mix Proportions of Binder.**

| W/C (%) | Cement : Fine Aggregate (by mass) | AE-WRA* (%)              |
|---------|-----------------------------------|--------------------------|
| 22.5    | 1 : 0.63                          | 1.1                      |
| Flow    | Air Content (%)                   | Compressive Strength (%) |
| 230     | 2.0                               | 77.8                     |

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/m <sup>3</sup> ) |        |                |                  | AE-WRA* (%) |
|---------|------------------|--------------------------------------|--------|----------------|------------------|-------------|
|         |                  | Water                                | Cement | Fine Aggregate | Coarse Aggregate |             |
| 22.5    | 0                | 122                                  | 540    | 340            | 1564             | 1.1         |
|         | 10               | 93                                   | 413    | 260            | 1564             |             |
|         | 20               | 64                                   | 286    | 180            | 1564             |             |
|         | 30               | 36                                   | 159    | 100            | 1564             |             |

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

#### 3.2 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)] に従って、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。

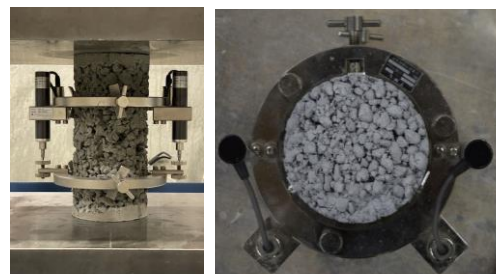
#### 3.3 圧縮試験

JCI-SPO5 に準じて、供試体の圧縮試験を行った。その際、供試体寸法別に Table 7 に示す応力増加速度を用いた。Table 7 には、比較のために荷重速度も示している。また、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している<sup>8)</sup>。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ポーラスコンクリート表面に寸法 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。その結果、圧縮試験において、供試体が破壊に至るまで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。

**Table 7 Stress Rates and Loading Rates at Compression Test.**

| Specimen Size (cm) | Stress Rate (MPa/s) | Loading Rate (kN/s) |
|--------------------|---------------------|---------------------|
| φ 10×20            | 0.2                 | 1.6                 |
|                    | 0.6                 | 4.7                 |
|                    | 1.0                 | 7.8                 |
|                    | 1.5                 | 11.8                |
| φ 15×30            | 0.2                 | 3.5                 |
|                    | 0.6                 | 10.6                |
|                    | 1.0                 | 17.7                |
|                    | 1.5                 | 26.5                |



**Photo 1 Appearance of Improved Compressometer.**

#### 4. 試験結果および考察

##### 4.1 ポーラスコンクリートの空隙率

Fig.1 および Fig.2 には、各応力増加速度での試験に供した3個の供試体の全空隙率および連続空隙率の平均値と目標空隙率の関係を示す。当然のことながら、供試体寸法にかかわらず、いずれの調合のポーラスコンクリートにおいても、全空隙率は連続空隙率よりも若干大きい。また、供試体寸法にかかわらず、ポーラスコンクリートの全空隙率および連続空隙率の値は、目標空隙率に対して、概ね±3%の範囲にある。本研究においては、これまで提案した調合設計法<sup>9)</sup>に準じて調合を決定しており、供試体寸法が異なっても、目標空隙率とほぼ同様の連続空隙率が得られている。

##### 4.2 ポーラスコンクリートの圧縮強度

Fig.3 および Fig.4 には、ポーラスコンクリートの圧縮強度と応力増加速度および全空隙率の関係を示す。なお、JCI-SPO5 に規定されている応力増加速度 (0.2~1.0MPa/s) の範囲は図に示した灰色のエリアである。目標空隙率および供試体寸法にかかわらず、ポーラスコンクリートの圧縮強度は、一部のものを除いて、応力増加速度 0.2~1.0MPa/s の範囲ではほぼ一定であるが、1.5MPa/s で増大する傾向にある。一方、供試体寸法および応力増加速度にかかわらず、目標 (全) 空隙率の大きいものほど、ポーラスコンクリート内に占める欠陥としての空隙の割合が大きくなったためと考えられる。更に、同一の目標空隙

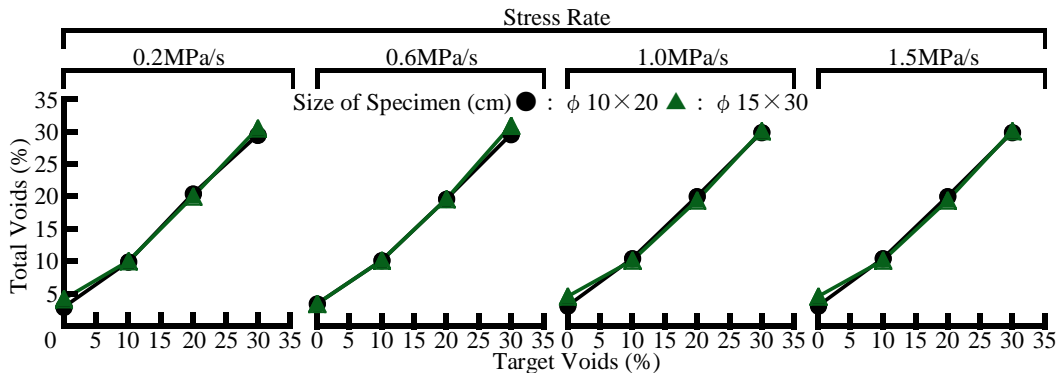


Fig.1 Target Voids vs. Total Voids of Porous Concretes.

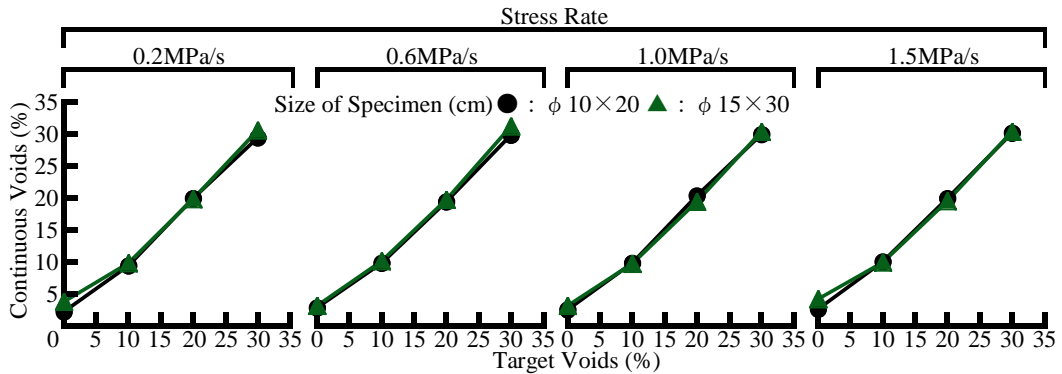


Fig.2 Target Voids vs. Continuous Voids of Porous Concretes.

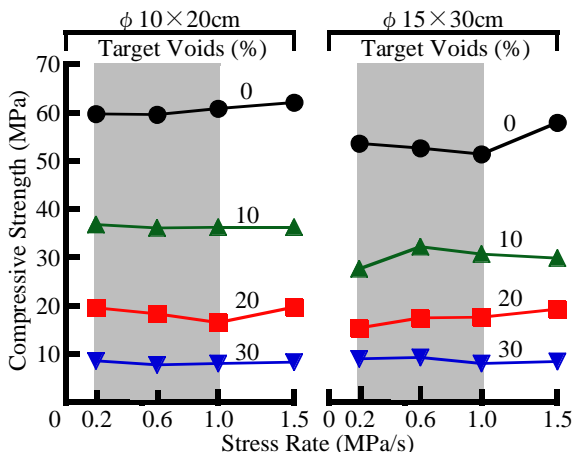


Fig.3 Stress Rate at Compression Test vs. Compressive Strength of Porous Concretes.

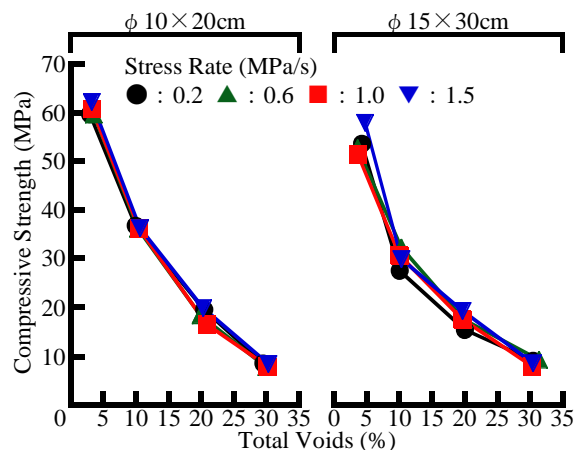
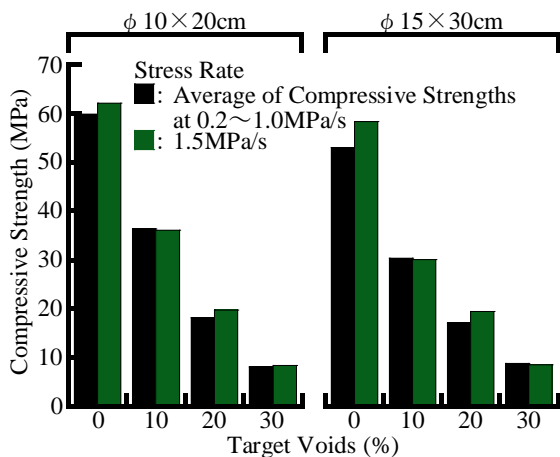


Fig.4 Total Voids vs. Compressive Strength of Porous Concretes.

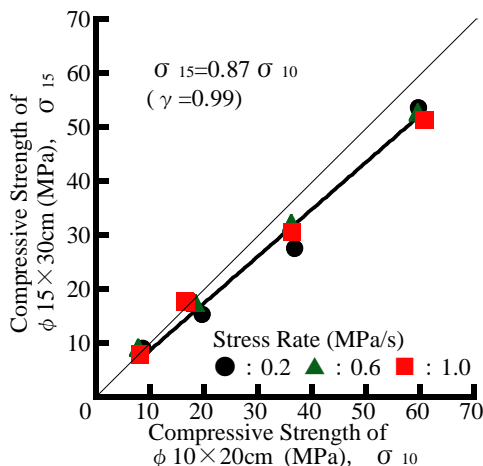
率および応力増加速度の場合には、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$  のポーラスコンクリートの圧縮強度は $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のもののそれと比べて小さく、これは、供試体寸法が大きいほど、内部に占める欠陥の絶対量が多くなるためと考えられる。

**Fig.5** には、ポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率および目標空隙率の関係を供試体寸法別に示す。なお、JCI-SPO5 に規定の応力増加速度  $0.2 \sim 1.0\text{MPa/s}$  の範囲では、圧縮強度の変化がほとんど認められなかったことから、その範囲での試験結果の平均値と  $1.5\text{MPa/s}$  での圧縮強度を比較している。前述した通り、供試体寸法にかかわらず、いずれの目標空隙率においても、一部のものを除き、応力増加速度  $0.2 \sim 1.0\text{MPa/s}$  で得られる平均値に比べて、応力増加速度  $1.5\text{MPa/s}$  で試験したポーラスコンクリートの圧縮強度は大きいことが確認できる。

**Fig.6** には、応力増加速度  $0.2 \sim 1.0\text{MPa/s}$  の範囲で得られた、供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  と  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のポーラスコンクリートの圧縮強度の関係を示す。供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  と  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のポーラスコンクリートの圧縮強度の間には高い相関性が認められる。ただし、本研究の



**Fig.5 Target Voids vs. Compressive Strengths of Porous Concretes.**



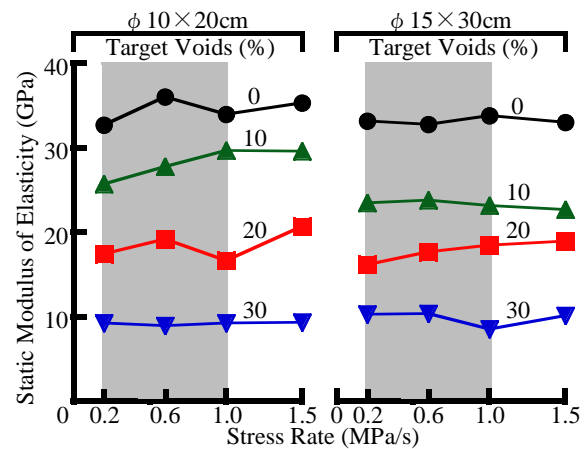
**Fig.6 Relation between Compressive Strength of  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  and  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  of Porous Concretes Tested by Stress Rates of  $0.2 \sim 1.0\text{MPa/s}$ .**

限りでは、供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  のポーラスコンクリートの圧縮強度は、供試体寸法  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のもののその  $0.87$  倍の値を与える。

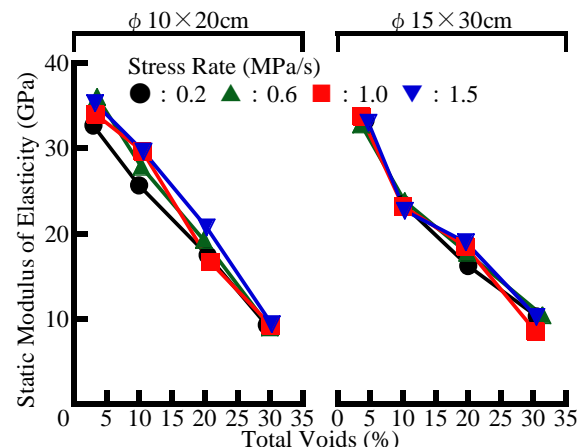
### 4.3 ポーラスコンクリートの静弾性係数

**Fig.7** および **Fig.8** には、ポーラスコンクリートの静弾性係数と応力増加速度および全空隙率の関係を示す。目標空隙率および供試体寸法にかかわらず、ポーラスコンクリートの静弾性係数は、一部のものを除いて、応力増加速度  $0.2 \sim 1.0\text{MPa/s}$  の範囲ではほぼ一定であるが、 $1.5\text{MPa/s}$  で増大する傾向にある。一方、供試体寸法および応力増加速度にかかわらず、目標（全）空隙率の大きいものほど、ポーラスコンクリートの静弾性係数は小さい。更に、同一の目標空隙率および応力増加速度の場合には、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$  のポーラスコンクリートの静弾性係数は  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のもののそれと比べて小さい。これらのことは、前述の圧縮強度と同様の現象であると考えられる。

**Fig.9** には、ポーラスコンクリートの静弾性係数と目標空隙率の関係を示す。なお、圧縮強度と同様に、応力増加速度  $0.2 \sim 1.0\text{MPa/s}$  での試験結果の平均値と  $1.5\text{MPa/s}$  での静弾性係数を比較している。供試体寸法にかかわらず、いずれの目標空隙率においても、一部のものを除き、



**Fig.7 Stress Rate at Compression Test vs. Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.**



**Fig.8 Total Voids vs. Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.**

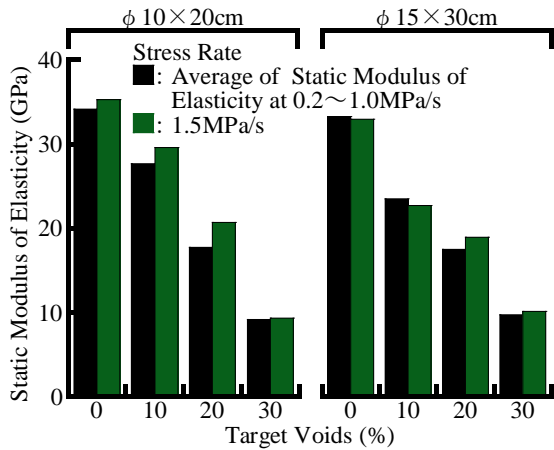


Fig.9 Target Voids vs. Static Modulus of Elasticity of Porous Concretes.

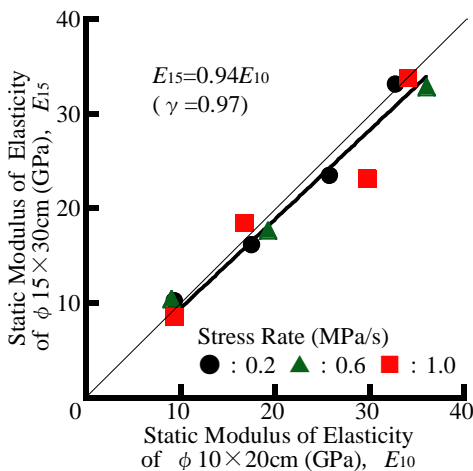


Fig.10 Relation between Static Modulus of Elasticity of  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  and  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  of Porous Concretes Tested by Stress Rates of 0.2 ~ 1.0MPa/s.

応力増加速度 0.2~1.0MPa/s で得られる平均値に比べて、応力増加速度 1.5MPa/s で試験したポーラスコンクリートの静弾性係数は大きいことが確認できる。

Fig.10 には、応力増加速度 0.2~1.0MPa/s の範囲で得られた、供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  と  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のポーラスコンクリートの静弾性係数の関係を示す。供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  と  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のポーラスコンクリートの静弾性係数および圧縮強度の間には高い相関性が認められる。ただし、本研究の限りでは、供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  とした場合のポーラスコンクリートの静弾性係数は、供試体寸法  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のもののその 0.94 倍の値を与える。

#### 4.4 静弾性係数推定式の適用性の検討

武田らは、AIJ-New RC 式を基本式として、圧縮強度、単位容積質量、粗骨材岩種係数および混和材係数を変数とする次式のようなポーラスコンクリートの静弾性係数推定式<sup>5), 6)</sup>を提案している。

$$E = k_1 \times k_2 \times 17.1 \times (\gamma/2.1)^{1.5} \times (f_c/20)^{(1/1.4)} \quad (1)$$

ここに、 $E$  : 静弾性係数 (GPa)

$k_1$  : 粗骨材岩種係数 (硬質砂岩 : 1.0)

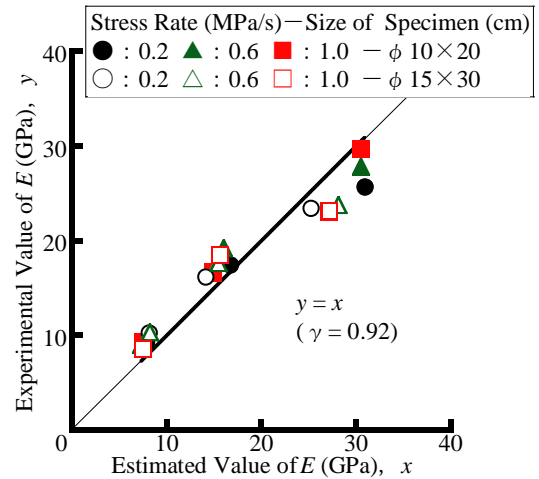


Fig.11 Relation between Estimated Values and Experimental Values of Static Modulus of Elasticity ( $E$ ) of Porous Concretes Tested by Stress Rates of 0.2~1.0MPa/s.

$k_2$  : 混和材係数 (使用しない場合 : 1.0)

$\gamma$  : 単位容積質量 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )

$f_c$  : 圧縮強度 (MPa)

これまで述べた考察の通り、ポーラスコンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、JCI-SPO5 の応力増加速度範囲  $0.6 \pm 0.4\text{MPa/s}$  (本研究の 0.2~1.0MPa/s) では、同一供試体寸法であればほぼ一定であるものの、供試体寸法が大きくなると小さくなる傾向があり、供試体寸法が  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  の圧縮強度および静弾性係数は、供試体寸法  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のそれらの 0.87 および 0.94 倍の値を与え、その倍率に差異が生じている。

そこで、このような影響が推定式による推定値に及ぼす影響について検討を試みた。

Fig.11 には、応力増加速度 0.2~1.0MPa/s の範囲で得られた、供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  および  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のポーラスコンクリートの圧縮強度を用いて式(1)で算出した静弾性係数の推定値と、応力増加速度 0.2~1.0MPa/s の範囲で得られる静弾性係数の実測値との関係を示す。なお、ポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の適用対象外である目標空隙率 0%の値は除いている。ポーラスコンクリートの静弾性係数の実測値と推定値の間には、高い相関性が認められる。従って、寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  または  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  供試体を用い、JCI-SPO5 の試験方法で測定されるポーラスコンクリートの静弾性係数については、目標空隙率および供試体寸法にかかわらず、武田らが提案する静弾性係数推定式<sup>5), 6)</sup>によって推定可能と考える。

#### 5. 結論

本研究の結果を総括すれば、次の通りである。

- (1) 本研究の限りでは、JCI-SPO5 に規定の応力増加速度の範囲 ( $0.6 \pm 0.4\text{MPa/s}$ ) であれば、目標空隙率にかかわらず、同一供試体寸法で得られる圧縮強度およ

- び静弾性係数はほとんど一定値である。しかし、それ以上の応力増加速度とした場合には、圧縮強度および静弾性係数の測定値は大きくなる傾向にある。
- (2) 応力増加速度にかかわらず、寸法  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  および  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  の供試体を用いたポーラスコンクリートの圧縮試験において、供試体寸法が大きいものが小さい圧縮強度および静弾性係数を示す。なお、本研究の限りでは、応力増加速度  $0.6 \pm 0.40\text{MPa/s}$  の範囲で得られる供試体寸法  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  のポーラスコンクリートの圧縮強度および静弾性係数に比べて、供試体寸法  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  のそれらは 0.87 および 0.94 倍の値を与える。
- (3) 供試体寸法にかかわらず、JCI-SPO5 の試験方法で測定されるポーラスコンクリートの静弾性係数については、式(1)に示した武田らが提案する静弾性係数推定式によって推定可能と考える。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会編：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，日本コンクリート工学会，p.231，2003.5
- 2) 日本コンクリート工学会編：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，日本コンクリート工学会，p.343，2015.6
- 3) 鈴木澄江，小山善行，陣内 浩，早川光敬：圧縮試験における荷重速度がコンクリートの圧縮強度と変形性状に及ぼす影響に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.636，pp.201-207，2009.2
- 4) 小山善行，鈴木澄江，早川光敬，陣内 浩：圧縮試験における荷重速度と強度レベルがコンクリートの強度・変形性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.409-414，2009.6
- 5) 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
- 6) 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ェ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
- 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
- 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合設計法の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.657，pp.1947-1953，2010.11