

# 論文 湿度・温度による乾燥を受けたコンクリートの力学的特性および応力-ひずみ曲線式に関する検討

別府 克俊\*1・篠野 宏\*1・丸山 一平\*2

**要旨**：本研究では、収縮量の異なる粗骨材を使用した2種類のコンクリートとモルタルに対して1軸圧縮試験を行い、実験結果および既往の研究を基に、コンクリートの新たな応力-ひずみ曲線式を提案することを試みた。実験に用いたコンクリートおよびモルタルは、材齢91日まで20℃で封緘養生を行った後に様々な湿度・温度で乾燥させたものであり、今回提案する式は、湿度・温度そして骨材の影響（骨材の収縮量）が考慮されたものとなる。既往の研究として既に高い精度を示す Popovics 式をベースとし、乾燥条件および骨材の影響を考慮できるようにした本研究の提案式は、実験結果と比較したところ比較的良好な近似曲線を表すことができた。

**キーワード**：乾燥、圧縮試験、圧縮軟化域、各種骨材、Popovics 式

## 1. はじめに

近年、建築構造物の長寿命化が望まれており、長期間供用した際の構造物の力学的特性を把握することは重要な課題となっている。乾燥は長期供用時にコンクリートの力学的特性へ影響を及ぼす要因の1つであり、これまで乾燥が及ぼす強度・ヤング率への影響に関して多くの知見が得られている<sup>1)2)</sup>。しかし、乾燥や加熱による圧縮軟化域の変化については十分な検討が行われていない。

一方、一軸圧縮応力が作用したときのコンクリートの応力-ひずみ関係に関する研究も、古くから多くの研究者によって行われている。コンクリート強度、粗骨材、載荷時の応力状態、載荷方法など、様々な要因による影響が指摘されており<sup>3)</sup>、応力上昇域から圧縮強度に達した以降の、圧縮軟化域も含めた応力-ひずみ曲線式が複数提案されている<sup>4)5)6)</sup>。これらの代表的な近似式となる Popovics 式<sup>4)</sup>は、水セメント比が大きい普通コンクリートの応力-ひずみ曲線を高い精度で表現することが可能であり、一方で、水セメント比が小さい脆性的な普通コンクリートやコンファインドコンクリートの圧縮軟化域は十分に近似できないことが指摘されている。谷川ら<sup>5)</sup>は Popovics 式を改良し、普通コンクリートだけでなくコンファインドコンクリートに対しても高い精度で近似できる式を提案しているが、この式には長期供用時の力学的特性に影響を与える湿度および温度の変化による乾燥の影響が考慮されていない。また、コンクリートに収縮量が異なる粗骨材を用いたときの、圧縮軟化域への影響を考慮した応力-ひずみ曲線式についても、まだ十分な検討が行われていない。

以上の状況を背景に、本研究では長期供用時にコンクリートの力学的特性に影響を与える乾燥・加熱の影響と

粗骨材の物性を考慮した応力-ひずみ曲線式の提案を目的とし、Popovics 式をベースとして工学式の検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び調合

本研究ではセメント、骨材、混和剤について、表-1に示される材料を使用して実験を行った。G1, G2の20℃RH60%環境下での乾燥収縮ひずみはそれぞれ  $28 \times 10^{-6}$ 、 $159 \times 10^{-6}$ 、超音波伝搬速度から算出した体積弾性率<sup>7)</sup>は71GPa, 41GPaとなる。また、G1, G2は粒径を5~10mm, 10~15mm, 15~20mmにふるい分けたものを等量混合して使用した。

モルタルとコンクリート試験体の調合を表-2に示す。調合はペースト、粗骨材、細骨材、あるいはペースト、細骨材の体積比を同一のものとした。スランブは12~15cm、空気量は  $4.0 \pm 0.2\%$  (コンクリート)、 $6.4 \pm 0.2\%$  (モルタル) を目標としており、単位水量と単位粗骨材絶対容積を一定とするためにスランブの調整はEX60(増粘剤)を用いて行った。また、モルタルの調合はコンクリートの調合から粗骨材を除いたものとなるが、EX60をコンクリートと同じ量で添加すると流動性が極端に高くなり分離気味になってしまうため、モルタルではEX60の添加量をセメント量の0.5%に低減した。

### 2.2 試験体作成および測定項目とその方法

圧縮試験に通常採用される $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の試験体では、各乾燥・加熱条件下で平衡状態に達するのに1~2年程度かかることが確認されている<sup>8)</sup>。本研究では1年以内に実験を終了するために $\phi 5 \times 10 \text{cm}$ を採用し、その代わりに試験体数を各乾燥条件につき5体とした。

\*1 名古屋大学 大学院環境学研究科 (学生会員)

\*2 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授・博士 (工学) (正会員)

表-1 使用材料

材料	記号	名称	表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	実積率(%)
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.14	-	-
細骨材	S	大井川水系産陸砂	2.57	2.51	68.3
粗骨材	G1	秩父産石灰砕石	2.71	0.24	62.3
	G2	硬質砂岩砕石	2.64	0.89	62.5
混和剤	AE	AE 減水剤 (高機能タイプ) 標準系 I 種 チューポール EX60	-	-	-

表-2 試験体の調合とフレッシュ試験結果

記号	調合							スラン プ (cm)	簡易ブリー ディング量 (g/cm <sup>2</sup> )	空気量 (%)	練上り 温度 (°C)
	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
			W	C	S	G	AE				
M	55	-	256	468	1365	-	2.3	24.5	0.183	6.5	20.0
C-G1		47	160	291	853	1009	2.9	15.5	0.071	3.6	19.8
C-G2		47	160	291	853	979	2.9	13.5	0.076	3.9	20.0

試験体打設後、材齢91日まで20°Cで封緘養生を行い、脱型と研磨をした後に20°C RH80%、RH60%、RH40%、RH20%の乾燥条件下、そして40°C (RH13~19%)、50°C (RH8~11%)、60°C (RH5~7%)、70°C (RH3~5%)、80°C (RH2~3%)、90°C (RH1~2%)の加熱条件下で質量の変化がなくなるまで約150日間乾燥させた。

乾燥終了後、試験体をアルミバッグに入れ外気と同じ温度になるまで放置した後、1軸圧縮試験を行った。載荷はHi-ACTIS-1000(marui社製)をポストピーク域まで載荷可能に改造した試験機(全自動)で行い、ひずみは試験体の変形を全長で除して求めた。

### 3. 実験結果および考察

図-1は、コンクリート(C-G1, C-G2)とモルタル(M)の各乾燥・加熱条件下における(a)強度 $F_c$  (b)ヤング率 $E_c$  (c)圧縮強度時ひずみ $\varepsilon_c$ を示しており、図-2は封緘状態における圧縮強度 $F_{co}$ 、ヤング率 $E_{co}$ 、圧縮強度時ひずみ $\varepsilon_{co}$ に対する比(a) $F_c/F_{co}$ (b) $E_c/E_{co}$ (c) $\varepsilon_c/\varepsilon_{co}$ を示している。

本研究で実施した実験結果については既往の研究にて既に考察が行われているが<sup>9)</sup>、応力-ひずみ曲線式を立式する上で各乾燥・加熱条件と粗骨材の影響を考慮することは必要不可欠であるため、全試験体を通して簡単な考察を再度行う。

#### 3.1 圧縮強度

C-G1の封緘状態における強度は他のものよりも比較的小さく、M、C-G2では封緘状態から80%RHにて強度が増加している。80%RH~40%RHまでの強度低下傾向はコンクリート、モルタル共に明白なものとなっているが、M、C-G1では40%RHで強度最小値を示し、C-G2

では20%RHで最小値を示している。また、C-G1では強度低下が最も顕著に示されているが、これはG1(石灰石)の収縮が非常に小さいため、骨材とモルタルとの間の収縮ひずみのギャップが大きくなり、骨材まわりに多くのマイクロクラックが発生したことが原因と考えられる。

40%RH、20%RH~90°Cまでの強度増加傾向は全ての試験体で確認することができ、それらの強度はC-G2では40°C、Mでは50°C、C-G1では60°Cで最大値を迎えている。また、最大値以降の加熱条件下ではいずれの試験体においても強度が低下する傾向が確認された。

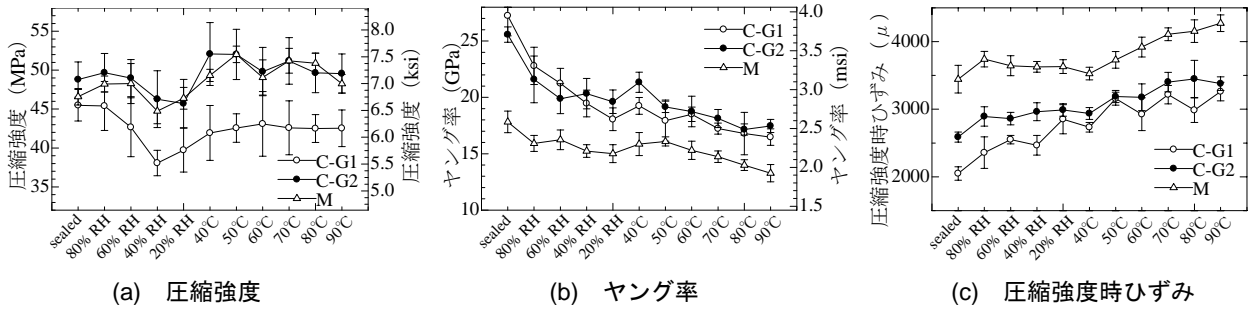
#### 3.2 ヤング率

モルタルは封緘状態で18GPaと低いヤング率を示しており、いくつかの乾燥条件では値が増加している場合もあるが、乾燥につれてヤング率は徐々に減少している。封緘状態のコンクリートのヤング率は25~28GPa程であり、40%RHまででヤング率は大幅に減少し、40%RH~90°Cでは徐々に減少していく。

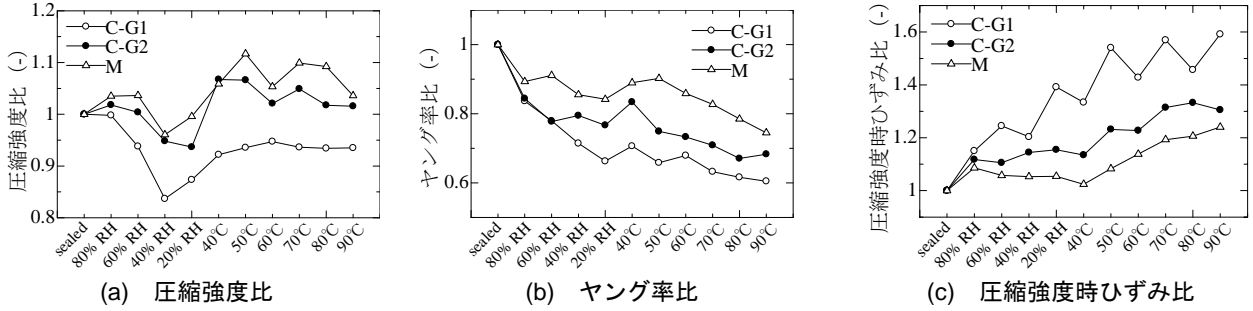
収縮が小さい骨材を用いたC-G1では、ヤング率比が最も小さな値となっている。これは3.1節の考察と同様に、G1の収縮が小さいことからコンクリートとモルタル間のひずみの差が他の試験体よりも大きくなったことが原因と考えられる。

#### 3.3 圧縮強度時ひずみ

圧縮強度時のひずみはモルタルが最も大きく、C-G1が最も小さいものとなった。また、いずれの試験体においても乾燥が厳しくなるほど強度時のひずみは増大し、変化の割合はモルタルが最も小さく、C-G1が最も大きいものとなった。圧縮強度時ひずみの変化は、乾燥により試験体内部に生じた微細ひび割れによるものと考えら



図一 圧縮強度・ヤング率・圧縮強度時ひずみの測定結果



図二 各乾燥条件下の測定結果と封緘状態の測定結果の比

れる<sup>10)</sup>。収縮が小さく、体積弾性率が大きい骨材を用いるほど、微細ひび割れが試験体内部に多数発生することから<sup>11)</sup>、図-2(c)に示される結果になったと推察される。

#### 4. 応力-ひずみ式の提案

3章における実験結果および考察から、Popovics式<sup>4)</sup>をベースとして新たな応力-ひずみ曲線式を提案する。

##### 4.1 湿度・温度、骨材の影響

Popovics式は以下の(1)式で示される。

$$f = f_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{n}{n-1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^n} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$ : ひずみ、 $\varepsilon_0$ : 圧縮強度時ひずみ、 $f$ : 応力(MPa)、 $f_0$ : 圧縮強度 (MPa)、 $n$ : 実験定数。

湿度および温度によって乾燥を受けた各試験体の実験結果と Popovics 式から求めた応力-ひずみ図を図-3に示す。図-3では全乾燥条件から一部を抜粋して示しており、応力-ひずみ図は各乾燥・加熱条件下において試験体5体のうち最も平均的な挙動のものを示した。また、ばらつきの少ない封緘状態およびばらつきの多い高温加熱条件下(80°C)については、5体全ての挙動を示す。Popovics式は封緘状態においてC-G1、C-G2ともに良好な近似曲線を示しており、C-G2においては、20°C条件下であればいずれの湿度条件においても精度の高い近似曲線を示している。一方、C-G1では20°C条件下であったとしても乾燥が進むにつれて実験値と離れた近似曲線を示している。また、C-G1、C-G2ともに40°C~80°CではPopovics式と実験値の差は大きくなる。ゆえに、コンクリート内部の損傷が大きいものほど応力-ひずみ関係に

対する近似曲線の精度が低いことから、乾燥および骨材・モルタル間の収縮差によって生じる微細ひび割れの損傷は、応力-ひずみ曲線の重要なパラメータであると考えられる。本研究ではその損傷をヤング率で評価し、Popovics式をヤング率および強度から求める式に改良する。

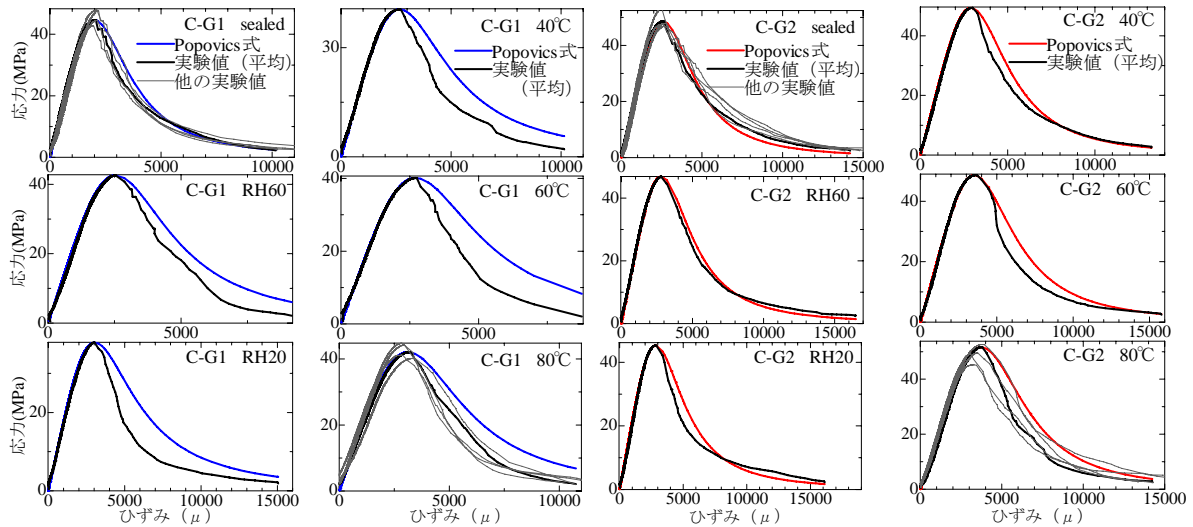
##### 4.2 Popovics式の傾向

本研究では(1)式で示される Popovics 式に対し、以下の(2)式のように $n$ を実験定数 $n_1$ 、 $n_2$ に分けて考察を行う。

$$f = f_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \frac{n_1}{n_1-1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^{n_2}} \quad (2)$$

図-4は $n_1$ 、 $n_2$ を変化させたときの挙動を示しており、左図(a)は $n_2=4$ 、右図(b)は $n_1=4$ に固定している。図-4(a)より、 $n_1$ が $n_2$ より比較的小さい値になる場合、圧縮強度がひずみの小さい領域で上昇する傾向があり、 $n_2$ に近い値、または $n_2$ より大きな値になると、 $n_1$ が大きくなるほど応力-ひずみ関係がひずみの大きい領域へ移動することが確認できる。また $n_2$ の値も、 $n_1$ より比較的小さい値になると圧縮強度がひずみの大きい領域で上昇し、 $n_2$ の値が大きくなるほど、圧縮軟化域での応力-ひずみ関係が下降していくことが図-4(b)から確認できる。

図-5は(1)式の $n_1$ を固定し、 $n_2$ を変化させたときの、応力上昇域における応力-ひずみ関係から求めたヤング率を示している。図-4(b)における応力上昇域からも確認できるが、図-5から、(2)式ではコンクリートのヤング率が $n_1$ に依存していることが確認できる。また、 $n_1=2$ のときに $n_2=2$ のヤング率が他と比べて低い値になっているが、これは図-4(a)にて前述したように、 $n_1=2$ が $n_2=4$ 、



(a) C-G1

(b) C-G2

図-3 1軸圧縮実験より得られた各乾燥条件・骨材別コンクリート試験体の実験値とPopovics式の比較

6, 8より比較的小さい値であるため、 $n_2=4, 6, 8$ の圧縮強度が上昇かつひずみの小さい領域に移動し、ヤング率が増加したことが原因であると考えられる。この傾向は $n_1=4, 6, 8$ でも確認されたが、図-5より、この傾向は $n_1$ の値が小さいほど顕著に現れることが示された。

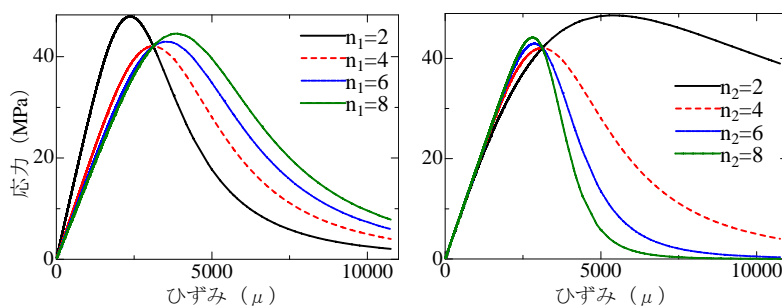
#### 4.3 Eと $n_1$ , $n_1$ と $n_2$ の関係

##### (1) $n_1$ と $n_2$ の関係

図-3(a)のC-G1 sealedを例として、 $n_1$ を変化させたときの $n_1$ 既知から最小2乗法で求めた $n_2$ との組み合わせと、そのときの応力-ひずみ曲線を図-6に示す。図-6では、 $n_1$ 値を大きくすると応力-ひずみ関係がひずみの大きい領域へ移動するため、 $n_2$ 値を大きくして圧縮軟化域の上昇を抑えたとしても、 $n_1$ 値が大きい場合は実験値との近似精度が低くなることを示している。また同時に、 $n_1$ 値が $n_2$ 値より比較的小さい値になる場合、4.2節にて前述しているが、応力上昇域における近似精度が低くなることが確認できる。以上の事から応力-ひずみ関係の近似には $n_1$ ,  $n_2$ の組み合わせが重要であり、また、応力上昇域には $n_1$ が、圧縮軟化域では $n_2$ の影響が大きいと考えられる。

図-7は各乾燥条件の圧縮強度および圧縮強度時ひずみの平均値を、(2)式に与えたときの $n_1$ とヤング率の関係を示している(図-6と比較するために $n_2=3.5$ に固定)。RH60%, 80%, 封緘状態のような乾燥が進んでいない試験体では、ヤング率に対して $n_1$ が極端に大きくなる。また、図-6中の $n_1=4.5$ は図-7のsealedにおける $n_1$ とヤング率の関係から実験値のヤング率を代入して求めたものとなるが、図-6から、 $n_2=3.5$ のときは圧縮軟化域、応力上昇域ともに精度良く近似するためには $n_1=3.0$ 程度になる必要がある。つまり、 $n_1$ をヤング率から適切に求めれば応力上昇域の近似精度は高くなるが、同時に、圧縮軟化域の近似精度が低くなることを確認できる。したがって、応力-ひずみ曲線式の精度を決めるパラメータは主に $n_2$ であり、 $n_1$ の値が低すぎる、または大きすぎる場合は応力上昇域に影響を与えてしまうが、 $n_1$ の値がある一定の範囲に収まる場合は、いかなる大きさであっても $n_1$ の値は応力-ひずみ曲線式の精度に影響はないものと考えられる。

図-8に、各乾燥・加熱条件下の試験体において最小2乗法を誤差が十分小さくなるまで収束計算を行い、応



(a)  $n_2 = 4$ のときの $n_1$ の変化

(b)  $n_1 = 4$ のときの $n_2$ の変化

図-4  $n_1$ ,  $n_2$ の変化とPopovics式の関係

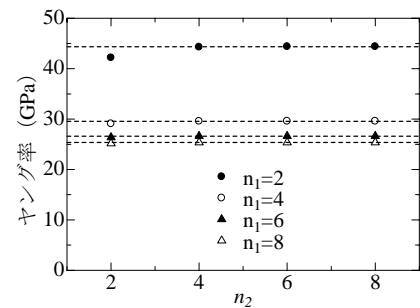


図-5 ヤング率の変化

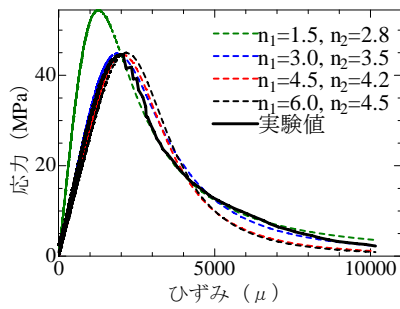


図-6  $n_1$ の値と近似精度

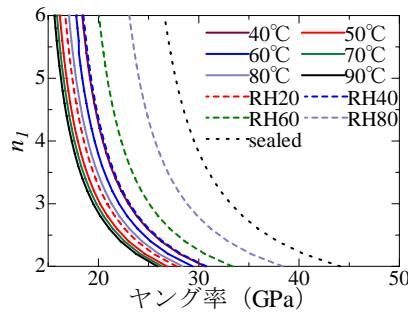


図-7 各乾燥条件のヤング率と  $n_1$

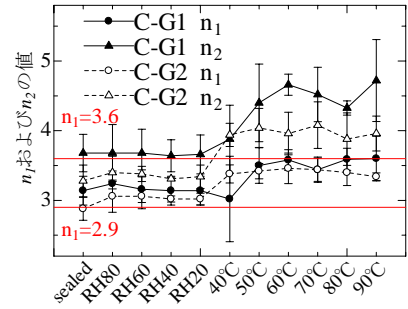


図-8 応力-ひずみ関係を忠実に表す  $n_1$ ,  $n_2$ の組み合わせ

力上昇域、圧縮軟化域を忠実に表すようにした  $n_1$ ,  $n_2$  の組み合わせを示す。図-8 に示される  $n_1$ ,  $n_2$  の組み合わせでは、C-G1, C-G2 ともに  $n_1$  の値がいずれの乾燥条件下であっても2.9から3.6の間に収まることが確認できる。ゆえに本研究では、 $n_1$  の値が2.9から3.6の間に収まれば  $n_2$  の値を決める上で  $n_1$  の値は応力-ひずみ曲線式に影響しないものとした。したがって、今後の考察では簡略のため、図-8 に示される各乾燥・加熱条件下の全試験体から平均して求めた(3)式の  $n_1$  を用いて検討を行う。

$$n_1 = 3.3 \quad (3)$$

## (2) $n_2$ と $E$ の関係

$n_1=3.3$  に固定し、各乾燥・加熱条件下の C-G1, C-G2 に対して圧縮軟化域の挙動を忠実に表す  $n_2$  を最小2乗法から求めた結果を図-9 に示す。 $n_2$  に関して、値は異なるが C-G1, C-G2 ともに類似した傾向を見ることが出来る。次に、封緘状態のときの  $n_2$  ( $n_{20}$ ) とヤング率  $E_{co}$  に対する各乾燥・加熱条件下における  $n_2$  およびヤング率  $E_c$  の比の関係を図-10 に示す。図-10 より、 $n_2/n_{20}$  と  $E_c/E_{co}$  の関係に対して、C-G1, C-G2 ともに同一の直線で線形近似できることが確認できる。このときの直線を以下に

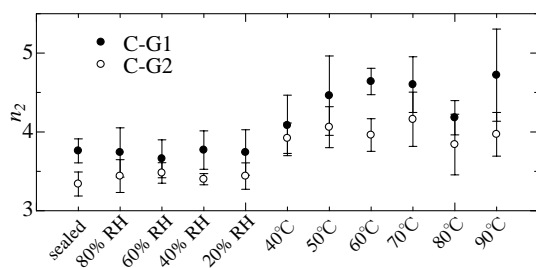


図-9 C-G1, C-G2 の  $n_1=3.3$  のときの  $n_2$

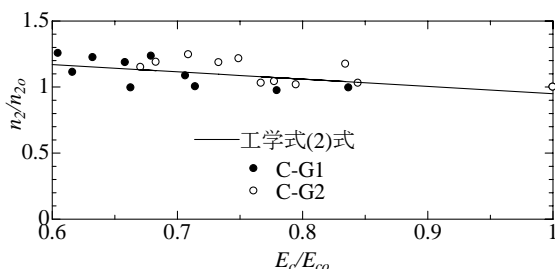


図-10 C-G1, C-G2 の  $n_2/n_{20}$  と  $E_c/E_{co}$  の関係

示す。

$$\frac{n_2}{n_{20}} = -0.55 \times \frac{E_c}{E_{co}} + 1.5 \quad (4)$$

ここで、 $n_{20}$  は C-G1, C-G2 において異なる値となっており、これは骨材種類によって変化するものと考えられる。本研究では、収縮の小さい骨材 G1 (石灰岩) と収縮の大きい骨材 G2 (砂岩) の2種類のみを対象にしているため、今回の検討ではこれらの平均値を  $n_{20}$  とした。

$$n_{20} = 3.6 \quad (5)$$

封緘状態の  $E_{co}$  を求めることができれば、(4), (5)式からヤング率  $E_c$  に応じて  $n_2$  を求めることができる。

## 4.4 実験結果と近似曲線の比較

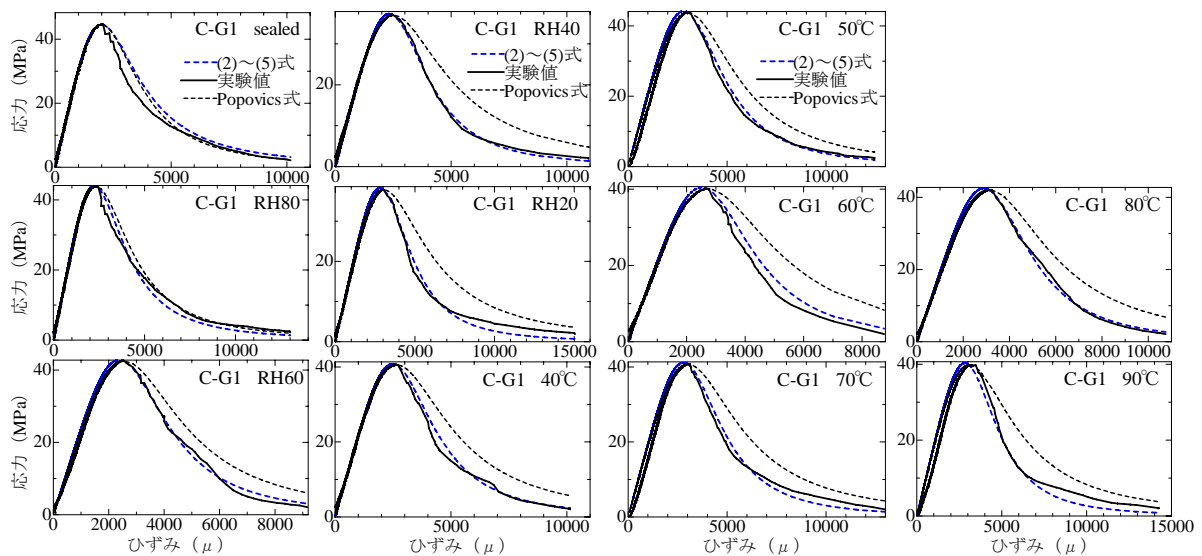
図-11 に本研究の一軸圧縮実験によって得られた各乾燥条件下の C-G1, C-G2 の応力-ひずみ関係 (図-3 に示したものと同様) と、(2)~(5)式を用いて得られた応力-ひずみ曲線を比較した結果を示す。本研究で提案した応力-ひずみ曲線式は、C-G1, C-G2 共にいずれの乾燥条件下においても精度の高い近似曲線を示すことができた。しかし、今回提案した近似式では  $n_1$  とヤング率の関係や、乾燥に応じた  $n_1$  の変化について相関を見出す事ができなかった。今後はさらなる検討が必要である。

## 5. 結論

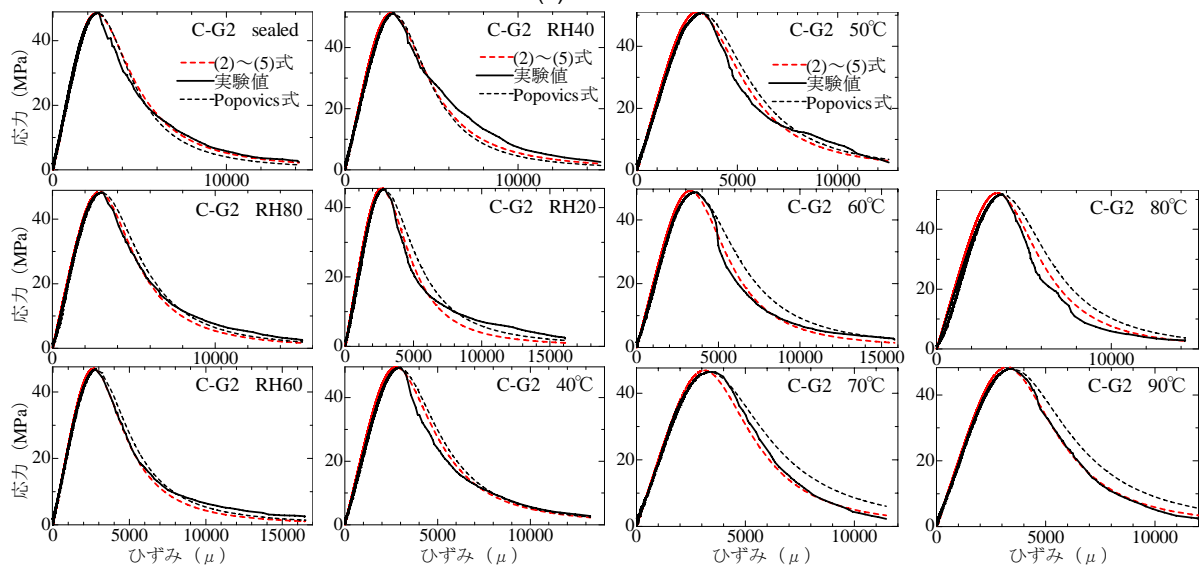
本研究では Popovics 式におけるパラメータ  $n$  を  $n_1$ ,  $n_2$  に分け、ヤング率および  $n_1$ ,  $n_2$  の関係を求めることにより、各骨材、各乾燥・加熱条件下において比較的精度の高い近似結果を示すことができた。

## 参考文献

- 岸谷孝一, 嵩英雄, 押田文雄, 奥野享: 20~300°C の高温に長期間さらされたコンクリートの性状に関する研究—その2 高温暴露期間および含水状態の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.57, pp.319-320, 1982.8
- 岡島達雄, 志村欣一: コンクリートの強度およびヤング係数と水分の関係, 日本建築学会学術講演梗概



(a) C-G1



(b) C-G2

図-11 1軸圧縮実験より得られた各乾燥条件・骨材別コンクリート試験体の実験値と(2)～(5)式の比較

- 集, Vol.A, pp.799-800, 1989.9
- 3) 渡辺建, 二羽淳一郎, 横田弘: 圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.725/V-58, 197-211, 2003.2
  - 4) Popovics, S.: A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, No.5, Vol3, pp.583-599, 1973.
  - 5) 谷川恭雄, 畑中重光, 小坂義夫: 高ひずみ域に至るまでのコンクリートの応力度-歪み度曲線の表示式, セメント技術年報, vol.34, pp.242-245, 1980.
  - 6) 六車熙, 渡辺史夫, 岩清水隆, 光枝良: 横補強による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1983
  - 7) 三木幸蔵: わかりやすい岩石と岩盤の知識, 鹿島出版会, pp.128-129, 1978
  - 8) 金津努, 松村卓郎, 西内達雄: 高温下に長期間暴露したコンクリートの力学的性質の変化, 電力中央研究所報告, U95037, 1996.3
  - 9) 篠野宏, 丸山一平: 湿度・温度による乾燥を受けたモルタル・コンクリートの力学的特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, 講演番号 1143, 2013.8
  - 10) 閑田徹志, 市川禎和, 紺谷修, 武田三弘, 大塚浩司: 高温および低湿度環境下におけるコンクリート物性の変化と損傷の定量化に関する実験検討, 日本建築学会構造系論文集, No.615, pp.15-22, 2007.5
  - 11) 篠野宏, 丸山一平: 骨材種類・粒径が乾燥を受けるコンクリート中のひずみ分布と骨材周辺のひび割れに及ぼす影響の評価, セメント技術大会講演要旨, Vol.66, pp.210-211, 2012