

## セメントフリーフライアッシュGPコンクリートの圧縮応力ひずみ関係

(一財)電力中央研究所 正会員 工修 ○柴山 淳  
 (一財)電力中央研究所 工博 菊地 道生  
 (一財)電力中央研究所 工博 山本 武志

Abstract : Mechanical properties of heat cured cement free fly ash geopolymer concrete, i.e. the compressive strength, modulus of elasticity, strain at peak strength, Poisson' s ratio, and compressive stress-strain relationship were investigated experimentally. Experimental results showed that the modulus of elasticity of fly ash geopolymer concrete was lower than ordinal Portland cement concrete and the compression softening behavior was brittle. In addition, based on the experimental results, practical formulas for predicting modulus of elasticity and strain at peak strength from uniaxial compressive strength were proposed. Further, constitutive models for compressive stress-strain relationship was proposed.

Key words : Geopolymer concrete, Fly ash, Stress-strain model, Modulus of elasticity

## 1. はじめに

近年、セメントを使用せずフライアッシュ（以下、FA）などの産業副産物を、アルカリ刺激剤によって反応させ製造するジオポリマー（以下、GP）コンクリートが、環境負荷低減の観点から注目されている。従来の一般的なGPコンクリートは、アルカリ刺激剤として水ガラスを使用し、反応促進のために蒸気養生を施して製造されており、海外ではPCa部材としての実用化例がある。水ガラスは、強度確保の点において重要である一方、日本国内ではコンクリート原材料として高価であることに加え、配合によってはコンクリートが急結する可能性があることから、従来法は経済性と施工性などに問題を有している。そこで著者らは、従来法の問題を低減し、国内においてPCa部材として実用化することを目指し、蒸気養生を施し、かつ水ガラスを使用せず、実用可能な強度を有するFA-GPコンクリートを製造する技術の開発に取り組み、圧縮強度などの基礎的力学性能について検証を行ってきた<sup>1)</sup>。このFA-GPコンクリートを実用化するためには、より詳細な力学特性を明らかにし、それらを的確に評価できる手法を確立することが望まれる。そこで本研究では、FA-GPコンクリートの力学特性の解明に資する基礎的検討として、圧縮載荷試験を行い、圧縮応力ひずみ関係の特性を明らかにするとともに、圧縮応力ひずみ関係のモデル化を試みた。

## 2. 圧縮載荷試験計画

直径100mm、高さ200mmの円柱試験体を用いて、圧縮軟化域の計測まで含めた圧縮載荷試験を行った。実験変数は、圧縮強度に差を出すために、調査と蒸気養生時間とした。

### 2. 1 材料・調合および打設

使用粉体は、フライアッシュ(FA)、高炉スラグ微粉末(GGBS)、シリカフューム(SF)の3種類である。FAは分級処理を施していない原粉、GGBSは、JIS A 6206における高炉スラグ微粉末4000、SFはJIS A 6207に適合する品である。アルカリ刺激剤としては、水ガラスを用いず純薬のNaOHのみを使用した。水は水道水とし、骨材として珪石砕砂および珪石砕石 (Gmax=20mm) を用いた。表-1に、調合条件を示す。水粉体比W/Pは、30%または36%とした。強制二軸ミキサーを用いて、あらかじめNaOHを水に溶解し作製したNaOH水溶液と各種材料を練り混ぜたのち、円柱型枠に打設した。

表-1 FA-GPコンクリートの調合条件

	W/P [%]	s/a [%]	Unit content [kg/m <sup>3</sup> ]						
			FA	GGBS	SF	W	NaOH	S	G
WP30	30	44	432	115	29	174	76	668	863
WP36	36	46	375	100	25	181	79	733	864

## 2. 2 養生

打設直後の試験体を蒸気養生槽内に設置し、20℃において2時間保持したのち、20℃/hの速度で80℃まで昇温し、4時間または8時間保持した。そののち、10℃/hの速度で20℃まで降温し、槽内から取り出し脱型した。脱型後の試験体は、試験材齢まで20℃環境において水中養生を行った。

## 2. 3 載荷および計測方法

高剛性試験装置を使用し、単調の中心軸圧縮試験を行った。載荷は変位で制御し、載荷速度は縦ひずみ増分を10  $\mu$ /sとなるように制御した。載荷にあたり、載荷板と載荷側コンクリートの間に球座をセットした。計測項目は、荷重、コンクリートの縦および横ひずみ、載荷板間変位とした。コンクリートの縦ひずみおよび横ひずみはひずみゲージを用いて計測した。なお、最大強度時ひずみ以降の縦ひずみは、試験装置に設置した高分解能変位計から算出した。載荷は、材齢が1日、7日、14日、28日の4つの段階で行い、各材齢ごとに3体ずつの試験体を用いた。

## 3. 圧縮載荷試験結果

### 3. 1 実験結果概要

表-2 実験結果概要

Specimen	W/P [%]	Curing		Compressive strength				Modulus of elasticity			
		Temp. [°C]	Length [h]	1day [MPa]	7days [MPa]	14days [MPa]	28days [MPa]	1day [GPa]	7days [GPa]	14days [GPa]	28days [GPa]
WP30C4	30	80	4	38.0		39.3	39.8	21.3		19.4	20.7
WP36C4	36	80	4	23.4		25.0	25.2	10.6		10.8	10.2
WP30C8	30	80	8	49.8	49.7	50.5	50.7	24.5	25.8	26.4	26.0
WP36C8	36	80	8	37.3	43.1	42.6	43.4	21.5	22.6	22.3	22.0
			Min	23.4		25.0	25.2	10.6		10.8	10.2
			Max	49.8	49.7	50.5	50.7	24.5	25.8	26.4	26.0
			WP36C8 / WP36C4	1.6		1.7	1.7	2.0		2.1	2.2

試験を行った4つの材齢における圧縮強度と弾性係数を表-2に示す。空欄は、実験データの信頼性が低いと判断したため、結果から除外したものである。弾性係数は、最大圧縮強度の1/3の応力度の点とひずみが50  $\mu$ の点を結んだ直線の勾配で評価している(以下、これを単に弾性係数と呼ぶ)。表-2から明らかなように、養生時間が長いほど、かつ水粉体比が低いほど圧縮強度、弾性係数が高くなる結果となった。とくに、圧縮強度が低いWP36C4と、同じ水粉体比で養生時間を倍としたWP36C8を比較すると、圧縮強度には1.6~1.7倍の、弾性係数には2.0~2.2倍の違いが確認された。また、水粉体比と養生時間が異なるWP30C4とWP36C8を比較すると、圧縮強度および弾性係数は概ね近い値を示した。

一般に、ポルトランドセメントを用いたコンクリート(以下、OPCコンクリート)の場合、蒸気養生後も、材齢経過に伴い圧縮強度は増大することが知られている<sup>2)</sup>。一方、本研究で用いたFA-GPコンクリートの場合、蒸気養生後の材齢経過に伴う圧縮強度の増大量はわずかであり、これは既往の報告と一致する結果である<sup>3)</sup>。ジオポリマーは、アルカリ刺激によるFAなど粉体の溶解に伴い、生成物が析出することによって硬化するものであり、FAの溶解は70℃程度以上の高温下において顕著であると、既往の報告より推察される<sup>2)</sup>。したがって、80℃の蒸気養生によってFAが概ね反応したのちの常温養生では、FAの未反応部が少ない上にFAの溶解反応が緩慢となるため、材齢経過に伴う圧縮強度の増大量がわず

かであったと考えられる。

### 3. 2 圧縮応力ひずみ関係

図-1に材齢28日における圧縮応力ひずみ関係を、図-1の縦軸と横軸を圧縮強度 $f_{cm}$ および、圧縮強度時のひずみ $\epsilon_{cm}$ で基準化したグラフを図-2に示す。図-2において、最大圧縮強度までの応力上昇域における勾配は、非常に強い直線性を示した。また、水粉体比が高い試験体は、応力上昇域に、水粉体比が低い試験体に比べて若干の曲線性をもつ傾向を示した。一方、養生時間が応力上昇域の勾配に対して与える影響については確認されなかった。圧縮強度以降のポストピークの挙動は、いずれの試験体に関しても、応力の急激な減少傾向を示した。圧縮強度の80%低下時のひずみは、水粉体比および養生時間によらず、圧縮強度発現時のひずみの1.05~1.15倍程度であり、その減少傾向を明確に表している。一般に、OPCコンクリートにおいては、圧縮強度が高いほど、圧縮軟化挙動はぜい性的になることが知られているが、図-1に示すように、WP36C4試験体のように圧縮強度が25MPa程度であっても、FA-GPコンクリートではポストピークの圧縮軟化挙動は顕著であった。図-3は、水粉体比30%で養生時間が8時間の試験体の4つの材齢における応力ひずみ関係を表しており、材齢が進んでも、応力ひずみ曲線にはほとんど変化がないことが分かる。この傾向は、いずれの試験体においても同様の結果が見られた。次に、各試験体の軸圧縮応力と直交するコンクリートの横ひずみとの関係を、図-4に示す。横ひずみは、膨らむ方向をマイナスとしている。横ひずみは、圧縮応力の増加に伴い増加する傾向を示した。とくに、圧縮強度が高いほど、最大強度までの横ひずみの増加傾向には線形性が強くなる結果となった。

## 4. 各材料特性に関する考察

### 4. 1 ポアソン比

実験から得られた圧縮強度とポアソン比の関係を図-5に示す。ポアソン比は、圧縮強度の増加に伴い増加する傾向を示している。圧縮強度40MPa付近に、水粉体比と養生時間が異なる2つの種類の試験体のデータが集中している。これは、ポアソン比が水粉体比と養生時間の違いにかかわらず、コン

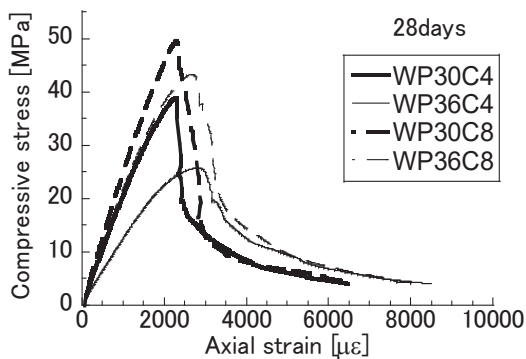


図-1 圧縮応力-縦ひずみ関係

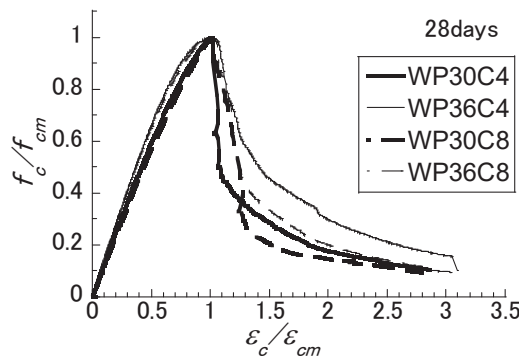


図-2 基準化圧縮応力-縦ひずみ関係

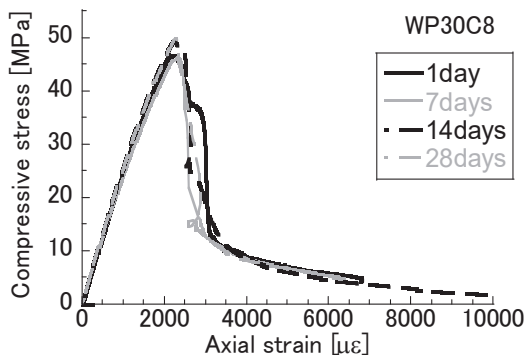


図-3 材齢別の圧縮応力-縦ひずみ関係

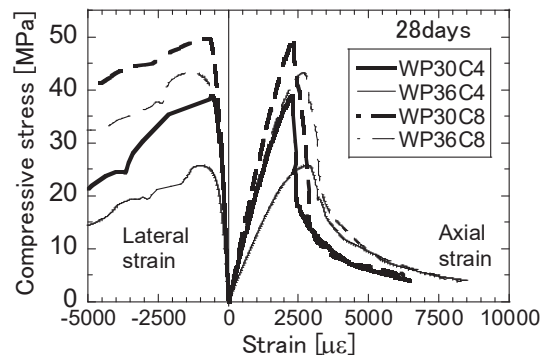


図-4 圧縮強度と横ひずみおよび縦ひずみの関係

クリートの圧縮強度と密接に関連していることを示している。表-3において、本実験で得られたポアソン比を、コンクリートの圧縮強度の範囲別に平均値を算出し、野口ら<sup>4)</sup>のOPCコンクリートのポアソン比の推奨値と比較した。圧縮強度が36MPa以下では、推奨値より低く、36MPaから60MPaの範囲では、推奨値より高い結果となった。本実験では、圧縮強度25MPaから35MPaの範囲の実験データがなく、かつ、圧縮強度25MPa近傍のポアソン比にばらつきが大きいことが、このような比較結果になったことに関連すると考えられる。しかしながら、上述のように圧縮強度の増加に伴いポアソン比も増大する傾向は普通コンクリートと同様であったがゆえに、普通コンクリートと同様にFA-GPコンクリートのポアソン比は圧縮強度を変数とした定式化を行うことが妥当であると推測される。

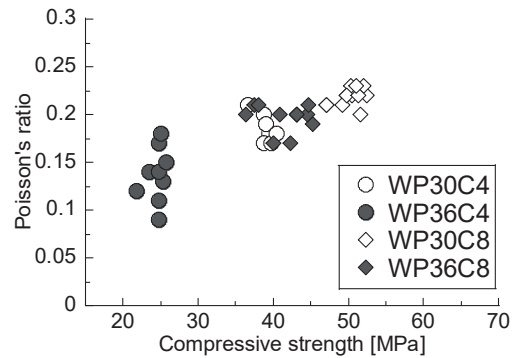


図-5 圧縮強度とポアソン比の関係

表-3 ポアソン比の比較

圧縮強度	実験結果	OPCコンクリート
$f_{cm} \leq 36\text{MPa}$	0.136	0.167
$36\text{MPa} < f_{cm} \leq 60\text{MPa}$	0.205	0.180
$60\text{MPa} \leq f_{cm}$		0.200

#### 4. 2 弾性係数

図-6に、材齢28日の圧縮強度と弾性係数の関係を示す。図-6には、OPCコンクリートの弾性係数をコンクリートの圧縮強度で評価するNewRC式<sup>5)</sup>およびfib Model Code 2010式<sup>6)</sup>、Noushini et al.<sup>2)</sup>が提案したFA-GPコンクリートの弾性係数評価式を合わせて示した。図示したOPCコンクリートの弾性係数を評価する2つの式は、実務でも広く用いられており、信頼性が高い評価式である。図-6から明らかのように、既往のOPCコンクリートの弾性係数評価式をFA-GPコンクリートにそのまま適用すると過大評価となる。よって、FA-GPコンクリートの弾性係数は、OPCコンクリートと比して概して低くなる傾向が確認された。また、図-6に示した圧縮強度が20MPa~50MPa程度の範囲でのFA-GPコンクリートの圧縮強度に対する弾性係数の増加傾向は、OPCコンクリート用の両式と比べて、傾きが急であった。Noushini et al.が提案したFA-GPコンクリート用の評価式は、本研究の実験結果を概ね捉えているが、圧縮強度に対する弾性係数の増加傾向が実験結果より緩やかであり、とくに圧縮強度50MPa近傍での弾性係数を小さめに評価している。また、実験結果の傾向を俯瞰して、圧縮強度の $1/2 \times 10^3$ 倍で弾性係数を評価する計算結果も図示している。図-6から分かるように、本研究での条件設定下では、弾性係数を圧縮強度の $1/2 \times 10^3$ 倍で評価できることが示された。

これまで、圧縮強度の1/3の応力度の点から算出した弾性係数について述べてきた。次に、圧縮強度の応力度の点と原点とを結ぶセカントモジュラス( $E_{sec}$ )について考察する。図-7において弾性係数とセカントモジュラスの比 $k$ について、fib Model Code 2010に記載のOPCコンクリートの場合と比較した。 $k$ は以下の式で求まる。

$$k = \frac{E_c}{E_{sec}} \tag{1}$$

ここで、 $E_c$  : 圧縮強度の1/3の応力の点を用いて求まる弾性係数、 $E_{sec}$  : 最大強度と最大強度時のひずみを用いて求まるセカントモジュラスである。

図-7から、fib Model Code 2010ではOPCコンクリートの場合、圧縮強度の増加に伴い $k$ が減少していくのに対して、FA-GPコンクリートの $k$ は、fib Model Code 2010の値より小さく、かつ圧縮強度によらず $k$ は1.0~1.5倍の範囲に集中する傾向を示した。



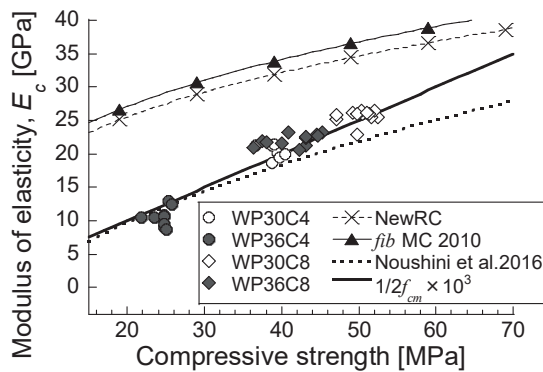


図-6 圧縮強度と弾性係数の関係

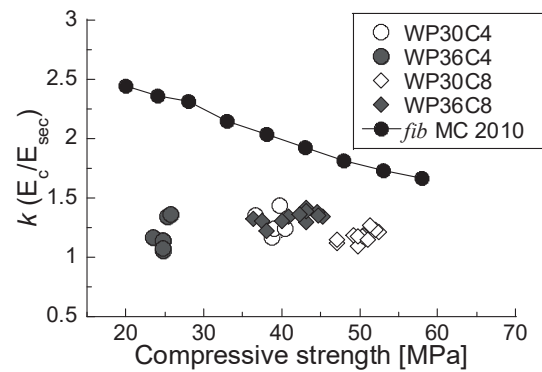


図-7 圧縮強度とkの関係

### 4. 3 圧縮強度時のひずみ

図-8に、材齢28日の圧縮強度と圧縮強度時ひずみ $\epsilon_{cm}$ の関係を示す。図-8の黒丸は、*fib Model Code 2010*に記載されているOPCコンクリートの強度ごとの圧縮強度時のひずみを示している。また、図-8の実線は、本実験結果の圧縮強度時ひずみを評価する以下の提案式を表す。

$$\epsilon_{cm} = 4.55 \times 10^{-3} \times (f_{cm})^{-1/6} \tag{2}$$

図-8より、FA-GPコンクリートの圧縮強度と圧縮強度時ひずみの関係は、右肩下がりとなっている。この傾向は、OPCコンクリートでは圧縮強度が増加するに連れて圧縮強度時ひずみも増加する関係と明確に異なる。式(2)は、圧縮強度が増加するに連れて圧縮強度時ひずみが減少していく傾向を表現している。圧縮強度と圧縮強度時ひずみの傾向は、OPCコンクリートとFA-GPコンクリートとで異なることが明らかになったが、圧縮強度時ひずみは2000 $\mu$ から3000 $\mu$ の範囲におさまっており、圧縮強度時のひずみの値そのものは、OPCコンクリートとの間に大きな乖離は見られなかった。

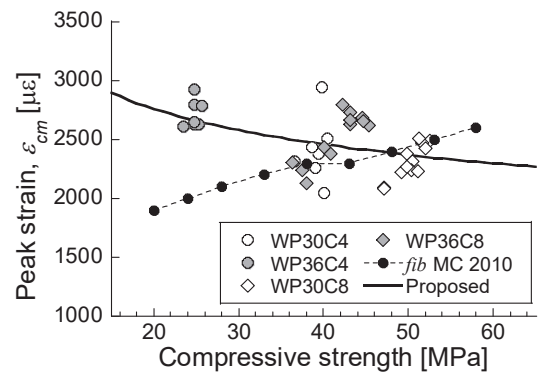


図-8 圧縮強度と圧縮強度時ひずみの関係

### 4. 4 圧縮応力ひずみ関係のモデル化

これまで述べてきたように、FA-GPコンクリートは圧縮応力上昇の勾配に直線性が強く、かつ弾性係数と圧縮強度を用いたセカントモジュラスとの比がOPCコンクリートに比べて小さい。さらに、圧縮軟化挙動がOPCコンクリートよりも顕著に起こるという性質をもっていることが明らかとなった。そこで、本研究ではこれらを表現できる、FA-GPコンクリートの圧縮応力ひずみ関係のモデル化を試みた。Popovics<sup>7)</sup>が提案した拘束されていないプレーンコンクリート用の式を基本として、FA-GPコンクリート用に修正したのが以下の式である。

$$a = \left( \frac{25}{f_{cm}} \right) - 0.05 \text{ if } \epsilon_c \leq \epsilon_{cm} \tag{3}$$

$$a = 2.0 \text{ if } \epsilon_c \geq \epsilon_{cm} \tag{4}$$

$$\frac{f_c}{f_{cm}} = \frac{n \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cm}} \right)}{n - 1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cm}} \right)^{na}} \tag{5}$$

$$n = \left( \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \right) \tag{6}$$

ここで、 $f_c$ : コンクリート応力,  $f_{cm}$ : コンクリートの圧縮強度,  $\epsilon_c$ : コンクリートひずみ,  $\epsilon_{cm}$ : コンクリートの圧縮強度時ひずみである。

これまでに、圧縮強度と弾性係数および圧縮強度時ひずみの関係について評価式を提案した。つまり、圧縮強度がわかれば、これらの式を用いてFA-GPコンクリートの応力ひずみ関係が求められることになる。図-9に応力ひずみ関係の実験値とモデルによる計算値の比較を示す。モデルは、応力上昇域を良好に、また圧縮軟化域においては圧縮強度が80%低下した時点までを良好に表現できている。

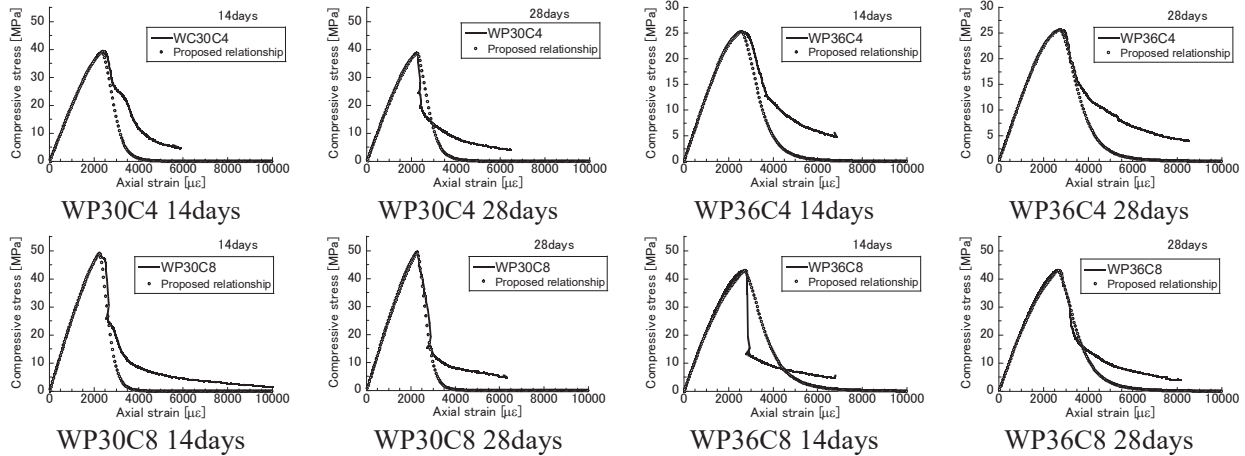


図-9 圧縮応力ひずみ関係のモデル化

## 5. まとめ

本研究では、FA-GPコンクリートの力学特性の解明に資する基礎研究として、圧縮載荷試験を行い、圧縮応力ひずみ関係の特性を明らかにするとともに、圧縮応力ひずみ関係のモデル化を試みた。FA-GPコンクリートは、蒸気養生後の材齢1日で圧縮強度および弾性係数がおおよそ発現した。また、弾性係数がOPCコンクリートに比べて低く、その値は圧縮強度の $1/2 \times 10^3$ 倍で概ね推定できることを示した。さらに、FA-GPコンクリートの圧縮軟化挙動は圧縮強度にかかわらず、顕著であることが分かった。実験結果を踏まえ、Popovics式を修正し、応力上昇域と圧縮強度から80%低下した時点まで良好に表現できる圧縮応力ひずみ曲線の評価モデルを提案した。

謝辞：本実験の実施にあたり、(株)セレス、吉沢技研計測(株)の斎藤智弥氏、(株)鹿倉企画の鹿倉学氏のご協力を頂いた。ここに記し、謝意を示す。

### 参考文献：

- 1) 菊地道生ら：結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，2283-2288，2016.
- 2) Amin Noushini et al.：Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete, Cement and Concrete Composites 73(2016) 136-146.
- 3) Young-Keun Cho et.al.：Effect of Na2O content, SiO2/Na2O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer, Construction and Building Materials, Vol.145, pp.253-260, 2017.
- 4) 野口貴文ら：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第472号，11-16，1995年6月
- 5) (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，建設省総合技術開発プロジェクト(鉄筋コンクリート造建物の超軽量・超高御層化技術の開発)，1993.3
- 6) Federation Internationale du Beton: fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2013.
- 7) S.Popovics: A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973.