

## ジオポリマーの研究動向の調査と基礎実験結果

### - アルカリ水比がジオポリマーモルタルの圧縮強度に与える影響 -

Researches Trend and Experimental Results about Fundamental Characteristics of Geopolymer

- Influence of the Molar Ratio of Alkali Metals to H<sub>2</sub>O on Compressive Strength of Geopolymer Mortar -

恩田 陽介 YOSUKE ONDA

佐々木 亘 WATARU SASAKI

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

環境負荷低減に資する建設材料技術のひとつにジオポリマーがある。ジオポリマーモルタルの開発にあたって、ジオポリマーの研究開発の動向を調査し、その特徴をとりまとめた。次いで、水ガラスの成分比率がジオポリマーモルタルの流動性および圧縮強度に与える影響について実験を行った。実験の結果、流動性に与える水ガラスの成分比率や単位量の影響は小さいこと、アルカリ金属と水分子のモル比と圧縮強度の関係に与える水ガラスの成分比率や単位量の影響は小さいこと、ジオポリマーモルタルの強度発現性に与える養生温度の影響はセメント系材料で一般的に用いられる積算温度では評価が難しく、高い温度依存性を有していると考えられることなどがわかった。

キーワード：ジオポリマー、ジオポリマーモルタル、圧縮強度、積算温度

Geopolymer is one of construction materials that contribute to reduce environmental impacts. In the development of geopolymer mortar, we investigated the trend of studies on geopolymer and summarized characteristics of geopolymer. Additionally, we examined the influence of component proportion of water glass on fluidity and compressive strength of geopolymer mortar. The followings are obtained; 1) The component proportion and unit quantity of water glass had a small influence on the fluidity of geopolymer mortar. 2) The component proportion and unit quantity of water glass had a small influence on the relationship between the molar ratio of alkali metals and H<sub>2</sub>O and compressive strength of geopolymer mortar. 3) The strength development of geopolymer mortar has higher temperature dependency than cementitious materials, but does not show any significant dependency on accumulated temperature commonly used to cementitious materials.

**Key Words:** geopolymer, geopolymer mortar, compressive strength, accumulated temperature

#### 1. はじめに

2015年に開催された気候変動枠組条約第21回締約国会議において、2020年以降の温暖化対策の国際枠組みを定めたパリ協定が採択された<sup>1)</sup>。我が国では、パリ協定を踏まえた地球温暖化対策計画が閣議決定された<sup>2)</sup>。これに対応すべく、日本建設業連合会が、温室効果ガスの一つであるCO<sub>2</sub>排出量削減対策が重要であるとの認識のもと、1996年に「建設業の環境自主行動計画」を策定している<sup>3)</sup>。建設業界全体の積極的な取り組みにより、

2012年度目標「施工段階におけるCO<sub>2</sub>排出量の原単位で1990年度比13%削減」を達成し、「2020年までに施工段階におけるCO<sub>2</sub>排出量の原単位で1990年度比20%削減」、「2030年までに同25%削減」の達成に向けた活動がなされている。

コンクリート構造物の建設においては、CO<sub>2</sub>削減策として、使用するセメントの使用量の削減、コンクリートの耐久性の向上、高性能化、リサイクル材料の使用など、設計、材料、施工、維持管理、解体段階でさまざまな対策が検討されている。また、材料製造、施工および輸送

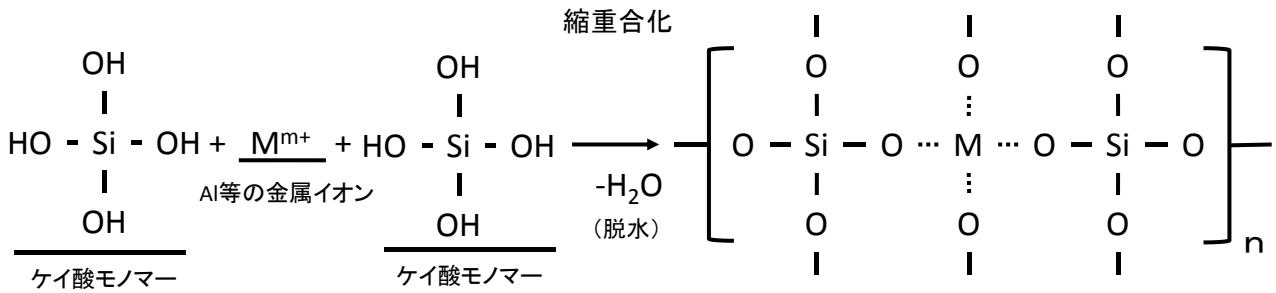


図-1 ジオポリマーの硬化概念図<sup>10), 11)</sup>

表-1 水ガラスの JIS 規格

	JIS1号	JIS2号	JIS3号
外観	水あめ状の無色ないしわずかに着色した液体		
比重 (15°CBe)	-	54以上	40以上
SiO <sub>2</sub> (%)	35~38	34~36	28~30
Na <sub>2</sub> O (%)	17~19	14~15	9~10
Fe (%)	0.03以下	0.03以下	0.02以下
水不溶分 (%)	0.2以下	0.2以下	0.2以下

に関する CO<sub>2</sub> の排出割合は、それぞれ、71%、23%、および 6%であり、材料関連の 30%削減は、全体で 21%の削減に相当するとする報告<sup>4)</sup>もある。特に、ポルトランドセメントの製造には原料として他産業で発生した廃棄物や副産物が利用され、最終処分場への負担軽減に大いに貢献しているが、その一方で、製造時のエネルギー由来の CO<sub>2</sub> 以外に、原料由来の CO<sub>2</sub> 排出が避けられない<sup>5)</sup>。

このため、近年では、ポルトランドセメントの一部または大部分を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物で置換したコンクリートの利用拡大を目的とした研究活動が盛んになっている<sup>6)</sup>。著者らも、混和材による環境負荷低減<sup>7)</sup>、ASR 抑制<sup>8)</sup>、耐塩害性<sup>9)</sup>等を図る研究開発や、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートの地下連続壁や PC 床版等への適用を進めてきた。

また、結合材にセメントを使用しないコンクリートとして、ジオポリマーを用いたコンクリートの研究開発が進められている。ジオポリマーとは、活性フィラーとケイ酸アルカリ溶液からなる結合材であり、ジオポリマーの硬化反応は、ポルトランドセメントの水和反応とは異なる。ジオポリマーは、活性フィラーに含まれるケイ素やアルミニウム等の金属イオンがケイ酸アルカリ溶液と接することで、脱水を伴いながら縮重合化することにより硬化する(図-1)<sup>10), 11)</sup>。1970年代にフランスの材

料学者 Davidovits がメタカオリン(粘土の焼成物であり、無機質、シリカやアルミニウムを含む)をケイ酸アルカリ性溶液と混合し、無機重合による固化体を得る手法を発見した<sup>10)</sup>。そこから、ケイ酸ポリマーの重合化による結合材をジオポリマーと命名し、これによる固化体の製造方法をジオポリマー法としたことからジオポリマーの研究は始まっている。

本稿では、ジオポリマーの研究の動向を調査し、その特徴を取りまとめるとともに、ジオポリマーモルタルの基礎的性質に対する水ガラスの成分比率の影響に関して実験を行った。

## 2. ジオポリマーの研究動向に関する調査

本章では、ジオポリマーの既往研究を調査し、とりまとめた。なお、本章で用いた図表は、既往文献を元に著者らが再作成したものである。

### (1) 使用材料および配合

ジオポリマーの主要な構成材料はケイ酸アルカリ溶液と活性フィラーで、セメントコンクリートと同様に、これに骨材を混合し、モルタルおよびコンクリートを製造できる<sup>12)</sup>。

#### a) ケイ酸アルカリ溶液

使用されるケイ酸アルカリ溶液は、ケイ酸ナトリウ

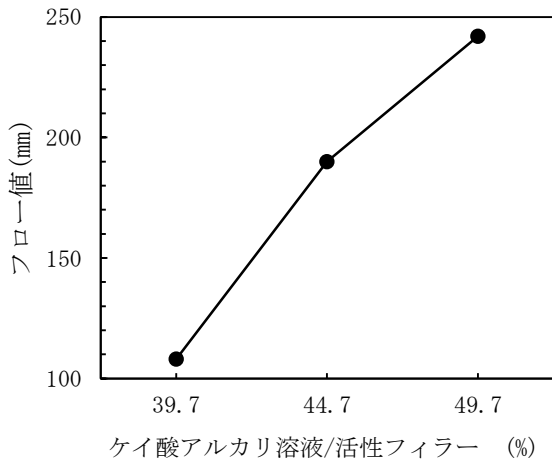


図-2 ジオポリマーモルタルのフロー (文献<sup>14)</sup>より再作図)

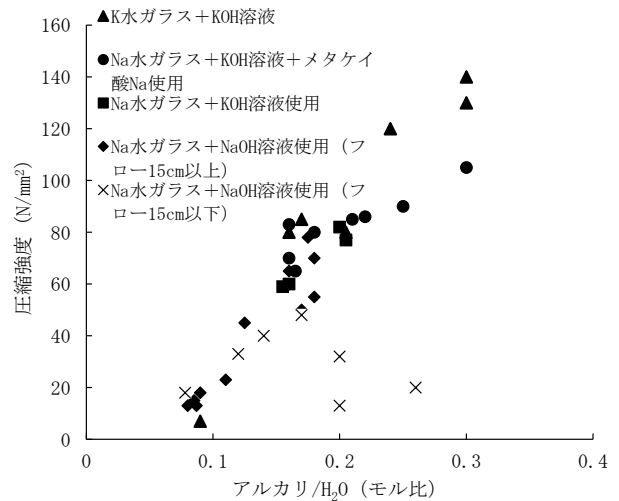


図-3 ジオポリマーモルタルの強度 (文献<sup>13)</sup>より再作図)

ム水溶液（以下、水ガラス）やケイ酸カリウム水溶液であるが、特に水ガラスを使用した研究が多い。水ガラスは  $\text{SiO}_2$  と  $\text{Na}_2\text{O}$  がさまざまな比率で混合している液体で、JIS K 1408 では、表-1 に示す混合比率が 1～3 号として規格化されている。 $\text{SiO}_2$  と  $\text{Na}_2\text{O}$  以外の成分はほとんどが水である。

また、アルカリ源として  $\text{NaOH}$  や  $\text{KOH}$  等<sup>13)</sup>も併せて用いられることが多い。ジオポリマー中の  $\text{Na}$  や  $\text{K}$  等のアルカリ金属原子の総量と  $\text{H}_2\text{O}$  分子の総量のモル比（以下、アルカリ水比）は、ジオポリマーの強度に影響を与える主要な要因であるとされる<sup>13)</sup>。詳しくは後述するが、アルカリ水比を高くするとジオポリマーの強度が高くなると報告されている。

これ以降においてはケイ酸アルカリ溶液とは水ガラスやケイ酸カリウム水溶液を水で希釈し、アルカリ源を添加したものを指す。

#### b) 活性フィラー

活性フィラーには、主にアルミナやシリカを含む粉体が用いられる。使用される活性フィラーとして、前述のメタカオリンのほか、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等がある<sup>14)</sup>。また、主にコスト面の改善等を目的に、不活性フィラー（強度発現に寄与しない鉱物粉体や廃棄物粉体等）の利用もされている<sup>11)</sup>。

#### c) 骨材

ジオポリマーと組み合わせて用いる骨材には、一般のセメントモルタルやセメントコンクリートに用いられ

ているものがそのまま使用可能である。骨材によってはアルカリシリカ反応の発生が懸念されるが、アルカリ環境下で骨材から溶出するシリカがジオポリマーの材料である水ガラスの成分と同じであるため、生成されたシリカが材料として固化反応に寄与し、セメントコンクリートのように膨張性の生成物が生成しないとする報告もある<sup>15)</sup>。

### (2) ジオポリマーの品質

ジオポリマーの流動性および可使時間、強度発現性、収縮、耐久性に関する一般的な見解を、以下に述べる。

#### a) 流動性および可使時間

ジオポリマーの流動性は、セメントモルタルやセメントコンクリートと同様な試験方法により確認されている。たとえば、一宮ら<sup>14)</sup>は、図-2 に示すように、活性フィラーの質量に対するケイ酸アルカリ溶液の質量を変化させ、モルタルフローとの関係を調べている。これによれば、活性フィラーに対するケイ酸アルカリ溶液の質量比を高くすることで、ジオポリマーモルタルのフロー値も大きくできることがわかる。

ジオポリマーモルタルの可使時間は、セメントに比べ短い傾向にあるが、原田ら<sup>16)</sup>は活性フィラーに用いる高炉スラグ微粉末の粒度をで調整することで可使時間を長くすることができることを確認している。

#### b) 強度発現性

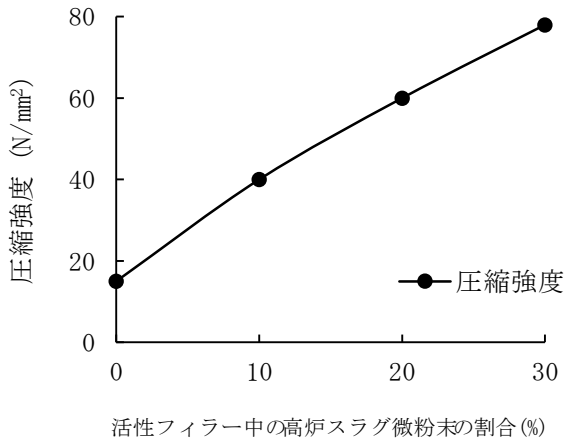


図-4 圧縮および曲げ強度と高炉スラグ微粉末置換率の関係 (文献<sup>14)</sup>より再作図)

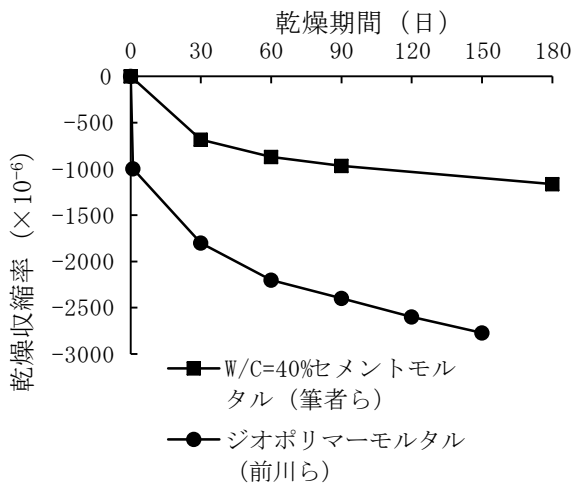


図-5 ジオポリマーモルタルとセメントモルタルの収縮 (文献<sup>18)</sup>より再作図)

上原ら<sup>13)</sup>は、図-3に示すとおり、ケイ酸カリウムと水酸化カリウムを組み合わせたケイ酸アルカリ溶液を用いたジオポリマーモルタルを80℃の電気炉で6時間養生を行った試験体から最大圧縮強度140N/mm<sup>2</sup>の固化体を得ている。その結果からジオポリマーモルタルの圧縮強度がアルカリ水比と相関が高いことを見出している。また、一宮ら<sup>17)</sup>は、フライアッシュをベースとし一部を高炉スラグ微粉末で置換した活性フィラーを用いて、ジオポリマーモルタルを作成し、昇温速度13.3℃/h、最高温度60℃にて3時間保持、降温速度13.3℃/hの蒸気養生を行い、その後材齢7日で圧縮強度試験を実施している。その結果、図-4に示すように高炉スラグ微粉末の置換率を高くするとジオポリマーモルタルの圧縮強度が高くなることを確認している。

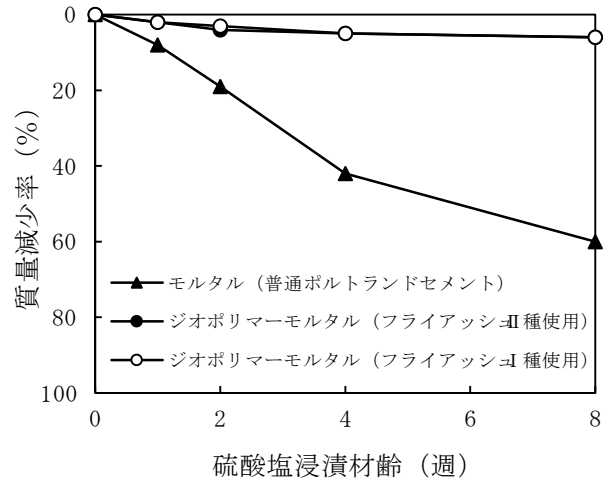


図-6 ジオポリマーの耐硫酸塩性 (文献<sup>16)</sup>より再作図)

なお、ジオポリマーの強度発現には、蒸気養生が必要であるとする報告<sup>14)</sup>がある。

#### c) 収縮

ジオポリマーは脱水を伴う縮重合反応によって硬化するため、硬化時の収縮が大きい<sup>11)</sup>。一例として、前川ら<sup>18)</sup>が実施したジオポリマーモルタルの乾燥集収縮試験の結果と、筆者らが実施したセメントモルタルの乾燥収縮試験の結果<sup>19)</sup>を比較すると、図-5に示すとおり、ジオポリマーモルタルの収縮率は乾燥約150日で約2700×10<sup>-6</sup>と、セメントモルタルの約2.5倍の大きさとなっている。この収縮が硬化に伴うものか単に乾燥に伴うものかは明らかではないが、いずれにせよ、ジオポリマーはセメントに比べて収縮の大きい材料であり、実用化を図るうえで大きな課題の一つであると考えられる。

#### d) 耐久性

セメント系材料がCaを主体とし、SiやAlを含んでいる材料であるのに対して、ジオポリマーはSiやAlを主成分としている。そのため、Caを有していないジオポリマーでは、Caに起因する劣化現象に対して高い抵抗性を持つ。たとえば、原田ら<sup>15)</sup>は5%の硫酸溶液にジオポリマーモルタルを浸漬し、その質量変化からジオポリマーモルタルの耐硫酸性を評価している。その結果では、図-6に示すように、セメントモルタルに比べ、ジオポリマーモルタルの質量変化は小さく、ジオポリマーモルタルが高い耐硫酸抵抗性を有していることを示している。また、同文献においてアルカリ骨材反応に対しても有効であると報告されている。その他、上原ら<sup>20)</sup>は、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートについて、アルカリ水比が大きいほど、活性フィラー中の高炉スラグ微粉末の割合

表-2 使用材料

材料		記号	物性等
ケイ酸アルカリ溶液	水	W	上水道水
	水ガラス	JIS1号相当	Wg1 密度1.58g/cm <sup>3</sup> , SiO <sub>2</sub> 32.4%, Na <sub>2</sub> O15.5%
		JIS3号相当	Wg3 密度1.40g/cm <sup>3</sup> , SiO <sub>2</sub> 29.1%, Na <sub>2</sub> O9.4%
		JIS規格外品	Wg5 密度1.32g/cm <sup>3</sup> , SiO <sub>2</sub> 25.6%, Na <sub>2</sub> O7.07%
アルカリ源		AL	NaOH 純度95%以上
活性フィラー	フライアッシュ I 種	FA	密度2.44g/cm <sup>3</sup> , 比表面積5950cm <sup>2</sup> /g
	高炉スラグ微粉末	BS	密度2.9g/cm <sup>3</sup> , 比表面積4380cm <sup>2</sup> /g
細骨材	砕砂	S	密度2.63g/cm <sup>3</sup>

表-3 配合

配合	アルカリ水比	ケイ酸アルカリ溶液 / 活性フィラー	単位量 (単位: kg/m <sup>3</sup> )								
			ケイ酸アルカリ溶液					活性フィラー		S	
			W	Wg1	Wg3	Wg5	AL	FA	BS		
WG1	0.196	0.50		100							
WG3	0.162	0.50	99		100			46	441	49	1507
WG5	0.148	0.50				100					
WG3-0.1	0.188	0.50	83		112			50	441	49	1504
WG5-0.1	0.186	0.50	67			127		51	441	49	1500

が大きいほど、塩化物イオンの侵入に対する抵抗性は高いことを確認している。なお、中性化については、セメントコンクリートの評価に使用されるフェノールフタレイン溶液による試験方法では評価が難しいと報告されている<sup>15), 21)</sup>。

### 3. ジオポリマーモルタルの基礎実験

文献調査の結果より、使用されるケイ酸アルカリ溶液は、粘性が高い JIS 1 号相当の水ガラスを水で希釈して用いる場合<sup>14)</sup>や、粘性が小さい JIS 2 号の水ガラスを希釈せず用いる場合<sup>18)</sup>等、研究者により様々であることがわかった。しかし、ケイ酸アルカリ溶液中に存在する水ガラス中の水もしくは別途加えた水は、ジオポリマーの流動性や強度発現に影響を与えられられる。しかし、水ガラスを構成する成分の比率がジオポリマーモルタルの強度発現に与える影響は必ずしも明らかになっていない。そこで、成分比率の異なる水ガラスを用いてジオポリマーモルタルを製作し、その比率がジオポリマーモルタルの流動性や圧縮強度に与える影響について検討を行った。また、養生温度が圧縮強度発現性に与える影響についても併せて確認した。

#### (1) 使用材料および配合

使用材料を表-2 に示す。ケイ酸アルカリ溶液は水ガラス、水およびアルカリ源を用いて作製した。水ガラスは JIS 1 号相当品、3 号相当品および JIS 規格外品を使用し、成分比率がジオポリマーモルタルの圧縮強度に与える影響を検討した。アルカリ源には NaOH を用いた。活性フィラーにはフライアッシュ I 種と高炉スラグ微粉末の 2 種類を用いた。なお、高炉スラグ微粉末は文献<sup>13), 14)</sup>を参考に高炉スラグ微粉末 4000 とし、置換率を 10%とした。

ジオポリマーモルタルの配合を、表-3 に示す。WG1, WG3 および WG5 は、各材料の単位量は一定とし、成分比率の異なる水ガラスを用いたものである。アルカリ水比の計算にあたって、水ガラスの成分は表-2 に示した SiO<sub>2</sub> および Na<sub>2</sub>O の他はすべて H<sub>2</sub>O であると仮定した。水については、本実験では上水道水を使用した計算上は H<sub>2</sub>O が 100%であるとした。アルカリ源として使用した NaOH についても、計算上は純度 100%であるとした。

活性フィラーに対するケイ酸アルカリ溶液の質量比はジオポリマーの流動性に影響があると報告されている



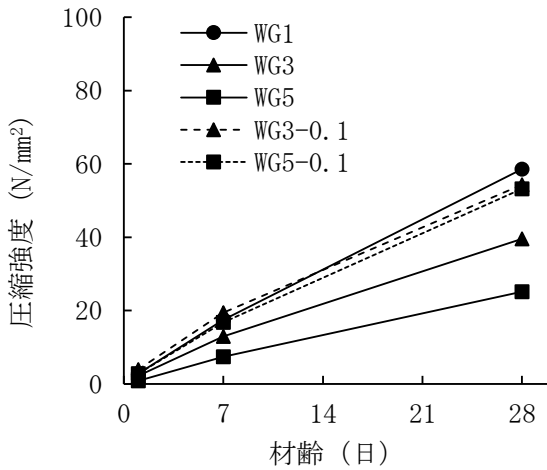


図-7 圧縮強度試験結果 (20°C養生)

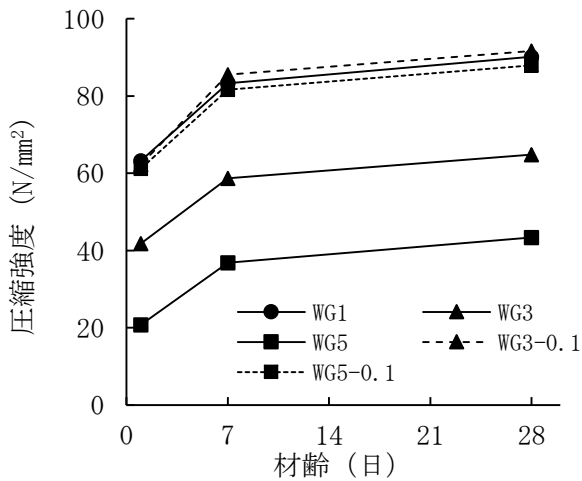


図-8 圧縮強度試験結果 (50°C養生)

指標である。今回の実験では、いずれの配合においても活性フィラーに対するケイ酸アルカリ溶液の質量比を0.5とし、モルタルフローへの影響を確認した。

(2) ジオポリマーモルタルの作製および試験の方法

ジオポリマーモルタルの練混ぜ手順は、次の通りである。はじめに、水、水ガラスおよびアルカリ源を混合し、ケイ酸アルカリ溶液を作製した。その後、活性フィラーと細骨材を30秒間空練りした後、ケイ酸アルカリ溶液を添加し、60秒間練り混ぜた。かき落としを行った後、再度60秒間練り混ぜて排出した。

フロー試験は JIS R 5201 に準拠し、練上がり直後にモルタルフロー (15打) を測定した。

圧縮強度試験の供試体は、φ50×100mmの型枠を使用し、2層に分けて詰め込み、各層振動・締固めを行って作製した。供試体は封緘状態とし、室温が20°Cと50°C

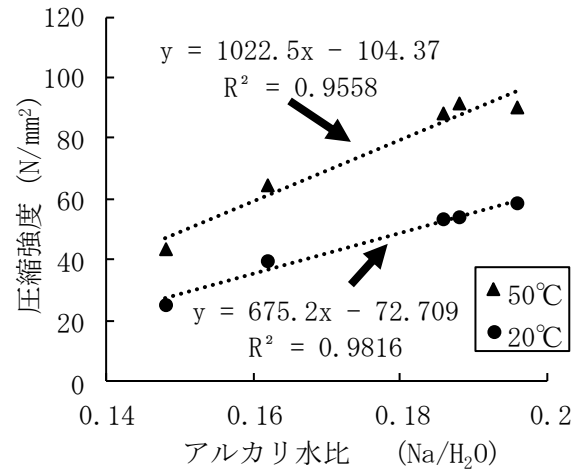


図-9 圧縮強度とアルカリ水比の関係

の恒温室で養生を行なった。試験は、JIS A 1108に準拠して実施し、試験材齢は1, 7, 28日とした。

(3) フロー試験結果

活性フィラーに対するケイ酸アルカリ溶液の質量比を一定とした結果、モルタルフロー (15打) は116~128mmの範囲となり、配合によらず同程度であった。水ガラスの成分比率や単位量の影響は小さいことが確認された。

(4) 圧縮強度試験結果

20°Cおよび50°Cの試験体による圧縮強度試験の結果を、それぞれ、図-7および図-8に示す。単位量を一定とし成分比率の異なる水ガラスを使用したWG1, WG3およびWG5の各材齢における圧縮強度を比較すると、その大小関係は、養生温度や材齢に関わらずWG1 > WG3 > WG5となった。一方、アルカリ水比をWG1と同程度となるよう調整したWG3-0.1やWG5-0.1の圧縮強度は、いずれの養生温度でもWG1と同程度の値が得られた。

図-9は、各養生方法における材齢28日の圧縮強度について、アルカリ水比で整理したものである。この図より、養生温度毎にアルカリ水比が大きくなるほど圧縮強度も直線的に大きくなることが確認できるが、水ガラスの成分比率の影響は小さいようである。すなわち、既往の文献<sup>13)</sup>でジオポリマーモルタルの圧縮強度とアルカリ水比には相関関係が認められることが報告されているが、このアルカリ水比は、使用した水ガラスの成分比率によらず、ジオポリマー中のケイ酸アルカリ溶液としてのアルカリ水比と考えてよいことがわかった。

今回の実験結果ではアルカリ水比を0.195とした配合で約80N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度が得られている。この値は図-

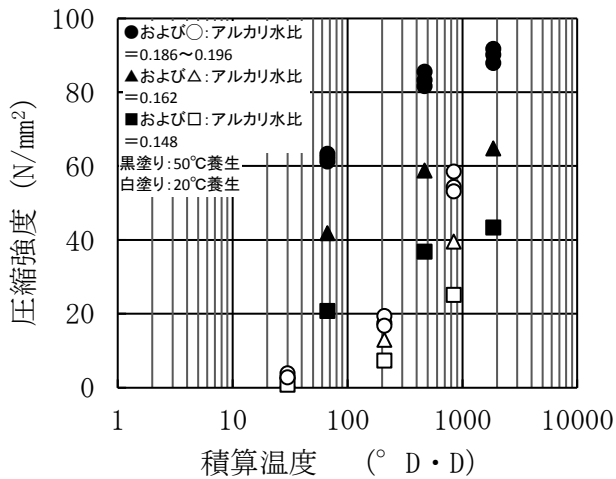


図-10 積算温度による圧縮強度の整理

3と比較すると、おおむね同程度の圧縮強度を示している。しかし、図-3では養生方法を80°Cの電気炉に入れ6時間保持するとしており、本実験の養生方法とは異なる。本実験では、20°Cまたは50°Cの養生室にて、各材齢の圧縮強度試験の直前まで養生を行っており、文献<sup>13)</sup>と比較すると、養生温度は低く、養生期間は長い。50°Cで養生した材齢28日の圧縮強度は図-3と同程度となったが、20°Cで養生した材齢28日の圧縮強度は50°Cの約58~65%の圧縮強度しか得られていない。本研究の範囲内においては、50°Cによる養生がジオポリマーの強度発現に有効であると考えられる。

本実験において、50°C環境で養生した試験体の材齢1日における圧縮強度は、20°C環境での材齢28日の圧縮強度とほぼ一致していた。セメントモルタルやコンクリートにおいて、一般に、圧縮強度発現に与える温度の影響は積算温度により整理することが可能である。そこで、今回の実験で得られた圧縮強度を積算温度で整理したものが図-10である。図中にプロットされている点のうち、白塗りの点は20°C養生によるものであり、黒塗りの点は50°C養生によるものである。同じ条件では積算温度が大きくなるほど圧縮強度も大きくなっているが、養生温度が異なると、積算温度と圧縮強度の関係は全く異なっており、50°C養生では直線的であるのに対し、20°C養生では加速的に強度が増進している。したがって、ジオポリマーモルタルの強度発現にあたる温度の影響をセメント系材料と同様の手法による積算温度で整理することは難しいことがわかった。このことは、ジオポリマーモルタルの強度発現性が、セメント系材料のそれに比べて高い温度依存性を有していることを示しているものと考えられる。

#### 4. まとめ

本論文では、ジオポリマーの研究動向を調査し、その特徴を取りまとめるとともに、調査結果を踏まえ、ジオポリマーの主要な材料の一つである水ガラスに着目し、ジオポリマーモルタルの流動性および圧縮強度に与える水ガラスの成分比率の影響について実験的に確認した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 流動性については、活性フィラーに対するケイ酸アルカリ溶液の質量比の影響が大きく、水ガラスの成分比率や単位量の影響は小さい。
- ② 圧縮強度はアルカリ金属と水分子のモル比（アルカリ水比）が大きくなると直線的に大きくなるが、使用した水ガラスの成分比率の影響は小さい。
- ③ 強度発現を促進するには養生温度を高くすることが有効であるが、一般のセメントコンクリートと同様な手法による積算温度では養生温度の影響を評価できない。

#### 参考文献

- 1) 環境省：国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）及び京都議定書第11回締約国会合（COP/MOP11）の結果について、<http://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/>, (2016.6現在)
- 2) 環境省：地球温暖化対策計画（案）, <https://www.env.go.jp/press/102259/29516.pdf>, (2016.6現在)
- 3) 一般社団法人日本建設業連合会：「建設施工段階のCO2排出量」について, <http://www.nikkenren.com/kankyou/co2.html>, (2016.6現在)
- 4) 堺孝司, 尾島克宏, 草薙悟志, 入谷祥王：交通渋滞差差点における鉄筋コンクリート地下道建設による交通便益に関する研究, 土木学会論文集 G, Vol. 63, No. 1, pp. 40-50, 2007. 2
- 5) 一般社団法人セメント協会：セメント産業における環境対策, <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jg1.html>, (2016.6現在)
- 6) 国立研究開発法人土木研究所他：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書, 第471号, 2016.1
- 7) 例えば, 斯波明宏, 谷口秀明, 樋口正典：早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートの諸特性, 三井住友建設技術開発センター報告, Vol.

- 11, pp. 37-42, 2013. 10
- 8) 例えば, 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究, 三井住友建設技術研究所報告, Vol. 6, pp. 91-96, 2008. 11
- 9) 例えば, 谷口秀明, 渡辺博志, 手塚正道, 藤田学: 塩害暴露試験によるコンクリートの塩分浸透性の評価プレストレストコンクリート-その2: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, プレストレストコンクリート, Vol. 55, No. 1, pp. 45-51, 2013. 1
- 10) Davidovits J: Geopolymer Chemistry & Applications, Institut Geopolymere, 2008.
- 11) 池田攻: ジオポリマーバインダーによる鉱物質粉体の常温固化と材料化, 資源と素材, Vol. 114, No. 7, pp. 497-500, 1998.
- 12) 上原元樹, 束原実, 横川勝則: ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの作製, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol. 64, V-369, pp. 735-736, 2009. 9
- 13) 上原元樹: ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 4, pp. 41-46, 2008. 4
- 14) 一宮一夫, 津郷俊二, 原田耕司, 池田攻: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 575-580, 2011. 7
- 15) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻: ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1937-1942, 2011. 7
- 16) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻: ジオポリマーの諸特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1894-1899, 2012. 7
- 17) 一宮一夫, 原田耕司, 津郷俊二, 池田攻: 活性ファイラーにフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの耐酸性と高温特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 2005-2010, 2013. 7
- 18) 前川明弘, 三島直生, 畑中重光: ジオポリマーを結合材として使用したポーラスコンクリートの基礎物性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 2224-2229, 2014. 7
- 19) 佐々木亘, 谷口秀明, 樋口正典: 乾燥を受ける早強コンクリートのひび割れ抵抗性に影響を与える配合要因に関する検討, 三井住友建設技術開発センター報告, Vol. 12, No.4, pp. 41-46, 2014. 10
- 20) 上原元樹: セメントを用いない低炭素材料であるジオポリマーの開発, 第296回鉄道総研月例発表講演要旨, pp. 1-4, 2016. 1
- 21) 南浩輔, 松林卓, 舟橋政司: ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1957-1962, 2013. 7