

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

上原 元樹*

Preparation and Properties of Environmentally Conscious Concrete Using Geopolymer Method

Motoki UEHARA

Environmentally conscious mortar and concrete (unit weight in dry condition = 1.75t/m³) was prepared using geopolymer method from fly ash, alkali silicate solution, and artificial lightweight aggregate (ALA). These compressive strength establishes a linear relation with alkali/H₂O (mole ratio) of alkali silicate solution. Geopolymer materials are affected by low strength of ALA in terms of mechanical properties as well as the hardening materials of ordinary cement, whereas geopolymer lightweight mortar and concrete are excellent for chemical durability such as alkali-aggregate reaction resistance or the acid resistance. Potassium increases the fluidity of the fresh geopolymer mortar and concrete, and its high fluidity enables creation of hardened paste with higher strength under high alkaline concentrations.

キーワード：石炭灰，ジオポリマー，人工軽量骨材，環境負荷，二酸化炭素，軽量コンクリート

1. はじめに

1.1 背景

近年、地球規模で温暖化が急速に進行しており、二酸化炭素排出量の削減は各産業における重要なテーマとなっている。特に、セメントを生産する際に排出される二酸化炭素量は1トンのセメントを生産する際に、およそ同量の二酸化炭素を大気中に放出することから膨大な量となる¹⁾。このポルトランドセメントの生産による地球規模での二酸化炭素の排出量は年間13.5億トンと、大気中に放出される全体の二酸化炭素排出量の約7%にも及んでいる²⁾。そこで、近年、二酸化炭素の発生を抑制する新材料としてジオポリマー法による硬化体が注目されるようになった。これは1978年、Davidovits³⁾がメタカオリンをアルカリ性溶液と混合して、無機重合させることにより、硬化体を作製できることを見だし、この無機珪酸ポリマーによるバインダー物質をジオポリマー、これによる硬化体の作製法をジオポリマー法と名づけたことから始まる。一方、産業廃棄物の有効利用の観点から、メタカオリンと同様にSiO₂、Al₂O₃成分を多く含む非晶質であることから、大きな反応性を有する石炭灰を使用したジオポリマー硬化体の研究も行われている⁴⁾。ただし、ジオポリマー硬化体の作製事例の多くが、セラミック材料を対象にしており、土木材料に使用できるようなモルタル・コンクリートの作成例は少ない。また、石炭灰の性質は、その産出国により大きく異なり、特に日本で一般的に入手できる石炭灰でのモルタル・コンクリート作

成例が無く、有効な配合条件など明確になっていない。

一方、軽量化や工事費低減の観点から軽量骨材を使用した軽量コンクリートが広く使われているが、軽量骨材は化学的反応性に富むため、耐アルカリ骨材反応性及び凍結融解抵抗性が小さく、それによる劣化事例も認められている⁵⁾。このような背景から、本研究では普通ポルトランドセメントを用いずに石炭灰を原料としたジオポリマーモルタル・コンクリートの作製を試み、特に化学的高耐久性が期待できるジオポリマー法の軽量コンクリートへの適用、その配合条件・諸特性を検討した。

1.2 ジオポリマーとは

ジオポリマーは、1978年にDavidovitsにより提唱された無機ポリマーで、近年、普通セメントを使用しないことによる二酸化炭素低減効果から注目を集めるようになった。その構造は天然ゼオライトの構造と類似し、アルミノケイ酸塩の3次元構造である。このジオポリマー硬化体は、メタカオリンや石炭灰など、Si、Alを含む非晶質物質と、水酸化ナトリウムや水酸化カリウム等のアルカリ性溶液、ケイ酸アルカリ溶液を混合し、以下の反応により生じる。

- ① 水酸基による出発物質からのSiとAlの溶出
- ② 出発物質から溶出した陽イオンとモノマーとの縮合
- ③ モノマーの重縮合によるポリマー構造の形成

しかし、これらの3段階は互いに重複し、ほとんど同時に起こる。それゆえ、個々のステップを独立に検討することは困難である。以上のように、ジオポリマー硬化体は、普通セメントの硬化反応である、いわゆる水和反応とは異なり、生じる硬化体の性質も普通セメントのそれとは全く異なるものである。

* 材料技術研究部 コンクリート材料

特集：材料技術

2. 実験

2.1 試料調製

2.1.1 出発物質

出発物質である石炭灰には、四国電力(株)製 JIS A 6201 I種 ファイナッシュを用いた。表1にその主要成分の化学組成を示す。細骨材・粗骨材には、膨張性頁岩を破碎・焼成した人工軽量骨材、太平洋マテリアル(株)製太平洋アサノライトを用いた。なお、用いた人工軽量骨材は、配合を正確に決定するため絶乾状態とした。また、比較用に JIS強度用標準骨材(ケイ砂)もモルタル作成時に用いた。アルカリ源として、水酸化ナトリウム (NaOH)、水酸化カリウム (KOH)、無水メタケイ酸Na (関東化学製試薬) を、ケイ酸Na水溶液 (Na水ガラス) として日本化学工業(株)製ケイ酸Na1号を用いた。また、Si成分として、SiO₂粉末 (東ソーシリカ(株)製、NIPGEL-200) を用いた。

2.1.2 ジオポリマーモルタルの作製方法

以下に示す2通りの方法でモルタルを作製した。

従来法は Davidovits 他、過去に一般的に用いられている手法である。所定濃度のNaOH溶液あるいは、KOH溶液とケイ酸Na溶液 (1号Na水ガラス) を2倍希釈した物を混合し、ケイ酸アルカリ溶液を作成する。石炭灰、細骨材、無水メタケイ酸Na粉末をモルタルミキサーで1分間攪拌混合後、このケイ酸アルカリ溶液を所定量加えて3分間攪拌した。作製したモルタルは、フロー試験後、50φ×100mmのソノモールドに充填密封し、所定の温度・時間、電気炉中で保持して硬化体を作製した。なお、この従来法では、用いた試薬において、ケイ酸Na溶液にはH₂O、Na及びSiが、NaOH及びKOH溶液にはNaやK、H₂Oが含まれるため、Si量、K量、Na量、H₂O量を独立して調整することが難しい。そこで、各組成の成分比と、ジオポリマー硬化体の性質との相関を明らかにするために、以下の新たな手法を用いた。

新作製法はNaOH、KOH粉末をイオン交換水で溶解させた溶液に、Si成分としてSiO₂微粉末を溶解させ、ケイ酸アルカリ溶液を作製する手法である。この方法では、Na及びK量はNaOH粉末、KOH粉末量として、H₂O量はイオン交換水の量、Si量はSiO₂微粉末量として、各成分を個々に定量出来るため、所定の濃度のアルカリケイ酸溶液を作成することが可能である。なお、モルタルミキサーでの攪拌法等は従来法と同様の手法で行った。

2.1.3 ジオポリマーコンクリートの作製方法

コンクリートは従来法に準じて作製した。細骨材、石炭灰、無水メタケイ酸Na粉末を1分間、ミキサーで攪拌

表1 出発物質に用いた石炭灰の主要成分の組成

| 成分 | mass% |
|--------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 52.46 |
| Al ₂ O ₃ | 27.49 |
| Fe ₂ O ₃ | 7.92 |
| CaO | 4.97 |
| TiO ₂ | 1.44 |
| K ₂ O | 1.26 |
| MgO | 0.80 |
| Na ₂ O | 0.75 |
| P ₂ O ₅ | 1.71 |
| SO ₃ | 0.52 |

混合後、所定濃度のケイ酸Na溶液とNaOH溶液あるいはKOH溶液の混合溶液を所定量加えて2分間攪拌した。その後、そのまま攪拌しながら粗骨材を徐々に加えて2分間攪拌した後、攪拌混合物を100mmφ×200mmのソノモールド、あるいは100×100×400mmの鋼製型枠に充填し、80°C・6時間、電気炉中で保持してコンクリート供試体を作製した。

2.2 分析方法

(株)リガク製RAD-IX X線ディフラクトメータにより、出発物質及びジオポリマー硬化体の生成相の検討を行った。また、出発物質及びジオポリマー硬化体の構造を検討するため、日本電子(株)製CMX270 InfinityPlusにより、²⁹Si、²⁷Alの固体核磁気共鳴 (NMR) スペクトルを測定した。

作製したモルタル及びコンクリートの強度あるいは静弾性係数は、JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A1103「コンクリートの割裂引張強度試験方法」及びJIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて行った。なお、測定は、養生・脱型直後とした。フロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」のフロー試験に準じて行った。凍結融解抵抗性試験はJIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」A法に準拠して行なった。クリープ試験・乾燥収縮試験は、JIS原案「コンクリートの圧縮クリープ試験方法」に準拠して行なった。硬化コンクリートの空気量測定に用いる供試体の作製は、ASTM C 457「リニアトラバース法」に準拠して行った。また、供試体の気泡組織の測定は、リニアトラバース法との相関が確認されている画像解析法により行なった。アルカリ骨材反応抵抗性はASTM C 1260に準じて行った。

3. 結果

3.1 配合条件と圧縮強度の関係

ジオポリマー硬化体の配合は、ジオポリマー溶液におけるSi成分、アルカリ成分 (Na,K) 及びH₂O量、あるいは粉体と溶液比と複雑であり、これら量比と硬化体強度との相関は明らかではない。そこで、まず従来法で、種々の配合の軽量モルタルを作製し、その配合と圧縮強度との相関を検討した。その結果を図1から図3に示す。なお、養生温度及び時間は予備試験の結果から80°C、8時間とし、作製した軽量モルタルの気乾単位容積質量は、1.7~1.8g/cm³と普通モルタルの2.3g/cm³と比較しておよそ20%の軽量化となった。なお、図1及び図3のアルカリは使用した溶液中に含まれるNa及びKのモル値の総和を表し、H₂O及びSiも各総量をモル値換算したものである。図1~2に示されるように、圧縮強度はSi/アルカリ (モル比) が0.2~0.4の間で最適な範囲がある

ようだが、その相関は明確ではない。同様に、水/石炭灰粉末（質量比）と圧縮強度の関係も、その他の成分組成の影響のため、必ずしも明確ではなく、溶液量が少ないとき、強度が大きくなる傾向は認められるものの、強度を決定する支配的要因ではないことが分かった。したがって、実用的には施工性の低下が認められない範囲内

で、それを小さくするのが望ましいものと考えられる。一方、図3から圧縮強度が、各種アルカリ活性溶液・ケイ酸Na溶液・メタケイ酸Na中のアルカリ成分の総和と水量のモル比、すなわち、アルカリ/H₂O（モル比）と強い相関があることがわかった。なお、軽量骨材を使用した場合、圧縮強度が90N/mm²、アルカリ/H₂O（モル比）が0.2までは、JIS標準骨材を使用したものと同様の相関を示すが、それ以上の濃度では、圧縮強度の増加量がアルカリ/H₂O（モル比）に対して小さくなった。一方、JIS標準骨材を使用した場合、アルカリ量/H₂O=0.3でおよそ140N/mm²と、高アルカリ領域まで、ほぼ直線関係を維持することが確認された。ただし、アルカリ成分としてNaのみを使用した場合、高アルカリ領域において、凝結時間が早くなり、流動性が低下することから、試料作製が困難となり、極端に強度が低下する事例が認められた（図3で高アルカリ領域における×で表された試料）。

そこで、K、Naのアルカリ種の相違、Si/アルカリ（モル比）などが、試料の流動性や圧縮強度に与える影響を検討するため、各成分濃度を自由に決定できる、新作製法で所定濃度のK、Na及びSiを含有する溶液を作製し、モルタルの圧縮強度と流動性（フロー）の検討を行った。その結果、図4に示されるように、新作製法でも図3から想定される圧縮強度と大きな差異はなく作製法として問題がないことが分かった。ここで、アルカリ種としてK成分が多いと、若干強度が大きくなるものの、その差

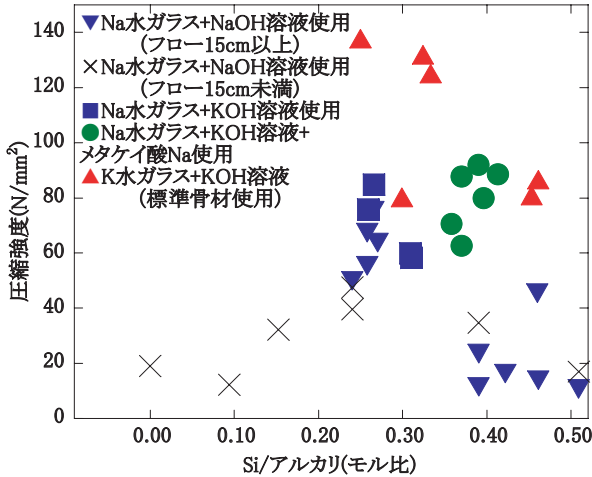


図1 Si/アルカリ（モル比）と圧縮強度の関係

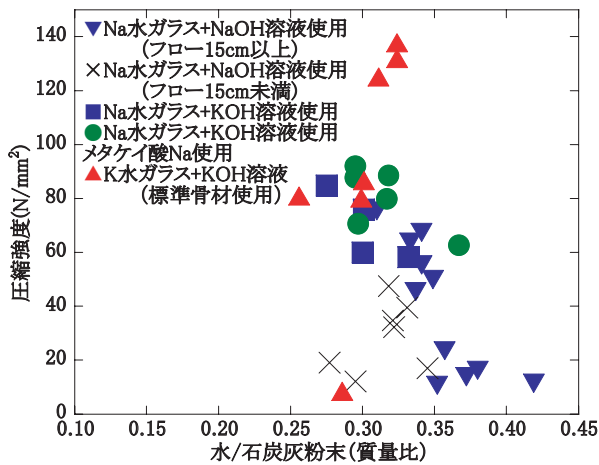


図2 水/石炭灰粉末（質量比）と圧縮強度の関係

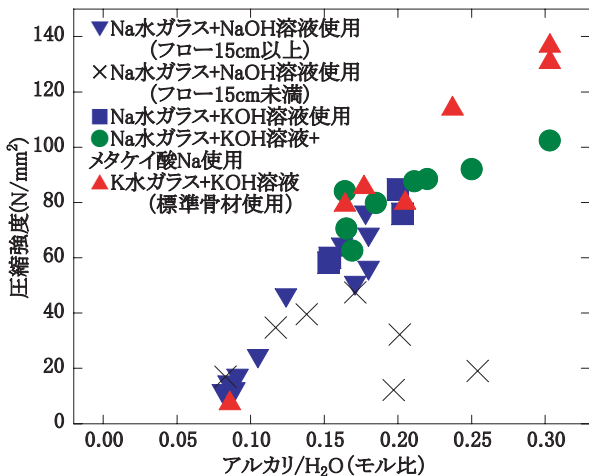


図3 アルカリ/H₂O（モル比）と圧縮強度の関係

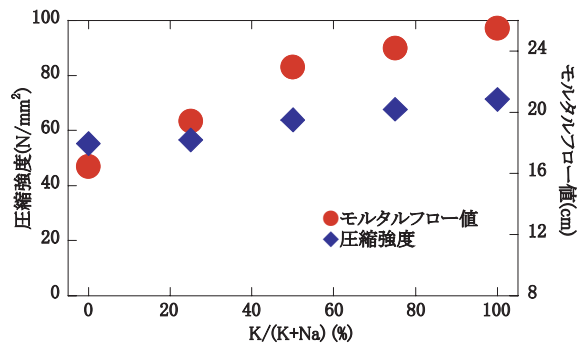


図4 K/(K+Na)とフロー値、圧縮強度との関係（アルカリ/H₂O（モル比）=0.15、Si/アルカリ量=0.38）

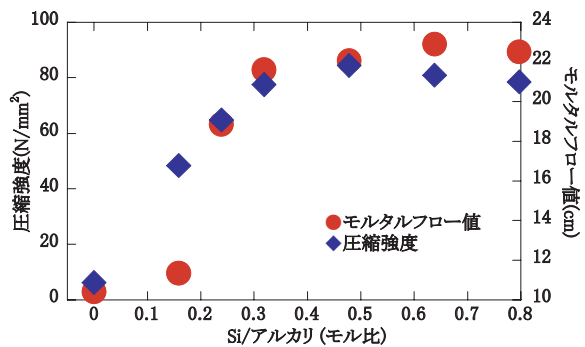


図5 Si添加量とフロー値、圧縮強度との関係（アルカリ/H₂O（モル比）=0.15）

特集：材料技術

は小さかった。一方、流動性に関しては、K量が多い場合、明らかにフロー値が大きくなること、KとNaの割合とフロー値にはほぼ直線関係が成り立つことが確認された。これは、Kを使用した場合、石炭灰から溶出したAlイオン及びSiイオンとアルカリ溶液中のKイオンが化合物を作らず沈殿物が生じないのに対して、Naを使用した場合、高アルカリ領域でNa化合物が沈殿し、それが流動性を阻害するためと推察される。一方、Si成分は、その添加量が少ないと、流動性・強度とも極端に小さくなるが、Si/アルカリ比0.32以上の添加で流動性及び強度ともほとんど変わらないことがわかった(図5)。

3.2 ジオポリマー硬化体の微細構造

図6は出発物質である石炭灰及びジオポリマー硬化体の粉末X線回折図である。図6に示されるように、石炭灰に含まれる結晶質物質(ムライト、石英)のピークに変化は認められず、新たな結晶質物質も生じなかった。したがって、本法で作製したジオポリマー硬化体は非晶質物質であることが分かる。しかし、ハローの位置は、アルカリ/H₂O(モル比)が大きいとき高角度側に移動し、一方、K, Naの成分比に対して変化は認められなかった。したがって、ジオポリマー硬化体の非晶質構造は、アルカリ種に対して、変化が小さく、アルカリ量に応じて変化するものと推察される。

そこで、ジオポリマー硬化体の非晶質構造を明らかにするため、作製した硬化体の²⁷Al及び²⁹SiのNMRスペクトルを測定した。図7は出発物質及び硬化体の²⁹Si NMRスペクトル図である。²⁹Si NMRスペクトルのピークはQⁿで表される。QはSiO₄四面体を、nは縮重度を表し、n個のO原子が隣接するSiによって共有されている

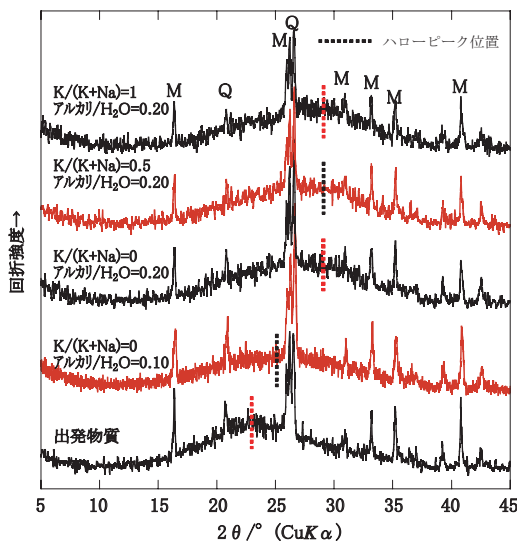


図6 出発物質、アルカリ量、アルカリ種の異なるジオポリマーペースト部のX線回折図 (M:ムライト, Q:石英)

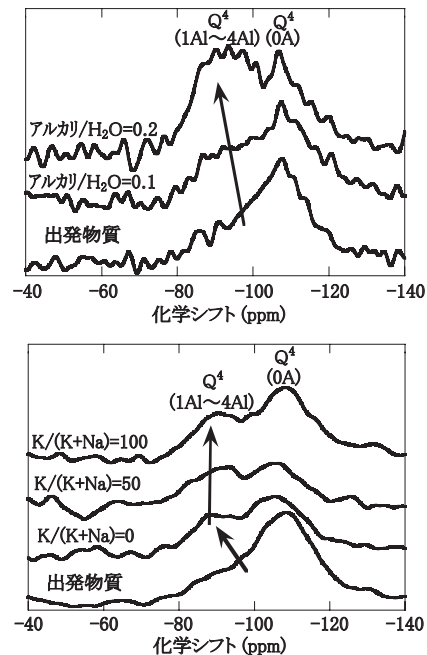


図7 出発物質(石炭灰)及びジオポリマーセメントペーストのNMRスペクトル

ことを表す。4つの酸素が全て共有されているゼオライトや石英のような3次元構造はQ⁴で表される。また、SiO₄四面体にO原子を共有して1個のAlO₄四面体が結合するとQ⁴(1Al)、順に2,3,4個結合した場合をQ⁴(2~4Al)と表し、NMRスペクトルはAl結合量に応じて低磁場シフトする。図7を見ると生成物のアルカリ濃度が高いとき、出発物質と比較すると、Q⁴(0Al)のスペクトル強度が減少しQ⁴(1Al)~Q⁴(4Al)が増加する傾向が認められた。なお、生成物のAlが4配位であることは、²⁷Al NMRスペクトルにおいて6配位のAlが認められず、4配位のAlのみ認められたことから確認されている。一方、KとNaの成分比による顕著な差は、NMRスペクトルの化学シフト位置において認められなかった。このことから、KやNaのアルカリ種の相違に対して、ジオポリマー硬化体の非晶質構造に大きな変化はなく、その構造変化は主にアルカリ濃度に依存すること、アルカリにより石炭灰から溶出したAlやSiが重合することで、Q⁴(0Al)構造がQ⁴(1Al)~Q⁴(4Al)構造に変化し、アルカリ濃度が高いとき、より重合が進んだアルミノ珪酸塩物質が生じることが分かった。

3.3 アルカリ骨材反応抵抗性

軽量骨材はアルカリ骨材反応における抵抗性が小さく、その劣化事例が報告されている⁵⁾。一方、ジオポリマー軽量コンクリートは、そもそもアルカリ量が多いこと、二次製品として使われ、アルカリ量そのものは管理されることを想定すると、外的アルカリ成分によるアルカリ骨材反応による影響が問題となる。そこで、アルカ

リ骨材反応性試験促進モルタルバー法 (ASTM C 1260) に準じて、モルタル供試体 (4cm × 4cm × 16cm) を作製し、80°C、1M-NaOH 溶液中に浸漬し、その膨張量を測定した。図8はその結果である。本手法では、14日経過時、膨張量が0.1%以下だと無害と判定される。本試験では、普通セメント使用モルタル、ジオポリマーモルタルともに、14日経過時に膨張量は0.1%以下であり、判定では無害とされるものであった。ただし、軽量骨材では、生じたアルカリシリカゲルが骨材空孔へ逸散し、モルタルでの膨張量が小さくなるため、普通骨材での判定基準をそのまま適用することはできない。しかし、図8の同一試験条件下における、膨張量比較において、ジオポリマーモルタルの膨張量が明らかに小さく、アルカリ骨材反応による膨張が生じにくいことがわかる。したがって、ジオポリマー硬化体のアルカリ骨材反応に対する抵抗性は大きいものと推察される。

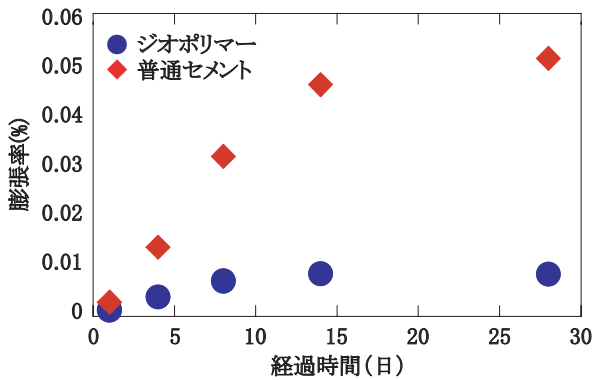


図8 人工軽量骨材を使用したモルタルにおけるアルカリ骨材反応試験 (ジオポリマーモルタル：アルカリ/H₂O(モル比)=0.15,Si/アルカリ(モル比)=0.32 普通セメントモルタル：W/C=50%，セメント量 600g, 骨材量 800g)

3.4 耐酸性試験

図9は10%硫酸溶液に浸漬したモルタル (5cm φ × 10cm) の写真である。本試験では60°Cで作製した比較的低強度 (31N/mm²) のジオポリマーモルタルを使用した。早強セメントモルタルは、セメント中のカルシウムが反応して石膏が生じ、表面から崩壊したが、ジオポリマーモルタルに大きな変化は認められなかった。また、浸漬前の圧縮強度は31.2N/mm²であったが、4ヶ月浸漬後もほとんど変わらず30.5N/mm²であり、酸に対する耐性が大きいことが分かった。しかし、図9に見られるように、その断面を観察したところジオポリマーモルタル内部 (表面から2cm程度) に硫酸が浸透したと考えられる黄色の痕跡が認められた。この領域で石炭灰中に少量存在するCaと反応したと考えられる石膏が極少量認められたことから、ジオポリマー硬化体そのものは酸との反応性が無く劣化生成物を生じないが、硫酸成分そのものは、少量ながら浸透するものと推察される。

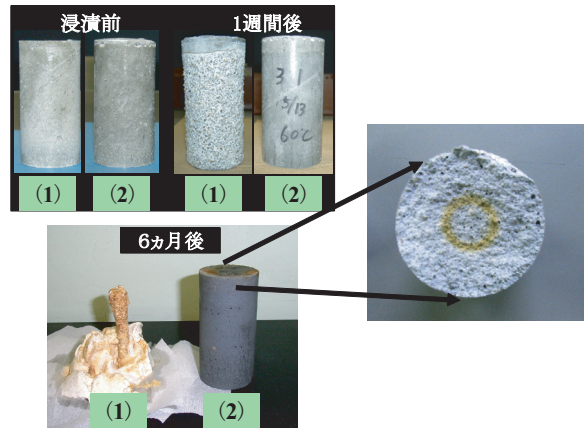


図9 10%H₂SO₄溶液浸漬による耐酸性試験
(1) 圧縮強度 75N/mm² の早強セメントモルタル
(2) 圧縮強度 31N/mm² のジオポリマーモルタル

のは、少量ながら浸透するものと推察される。

3.5 ジオポリマー軽量コンクリートの作製及び硬化性状

石炭灰及び骨材の配合は表2の値を基準にし、加えるケイ酸アルカリ溶液の配合を種々変えてジオポリマー軽量コンクリートを作製した。その結果、作製したコンクリートの圧縮強度は、高アルカリ領域において、60～70N/mm²で強度が頭打ちとなるが、それより低アルカリ領域では、モルタルでの試験と同様にアルカリ/H₂O(モル比)に圧縮強度が依存することがわかった。ここで、例えばまくらぎでの使用を考慮した場合、JIS E 1202「ポストテンションまくらぎ」において、プレストレス導入時に39.2N/mm²、28日経過時に49.1N/mm²の圧縮強度を必要とすると規定されている。実験の結果からジオポリマー硬化体の1日強度と28日強度の差が普通セメントのそれと比較して小さいことが分かっているため、1日強度が50Mpa以上となるよう想定し、図10の結果から、アルカリ/H₂O(モル比)=0.18でジオポリマーコンクリート供試体を作製した。詳細な配合は、表2に示す。また、表3は表2の配合で作製したコンクリートの諸特性及び凍結融解試験の結果を表したものである。表3から圧縮強度と比較して、引張強度、静弾性係数が小さかった。一般的に40N/mm²以上の圧縮強度において、普通骨材を使用したものと比較して、軽量骨材を使用したコンクリートの引張強度、静弾性係数が小さくなることが知られている⁶⁾。本試料でも圧縮強度及び引張強度試験後の供試

表2 ジオポリマーコンクリートの代表配合例

| 単位量 kg/m ³ | | | | | | | スランブ フロー cm |
|-----------------------|-----|-----|-----|------|------|----|-------------------|
| FA | C | S | KOH | M-Na | 水ガラス | 加水 | |
| 545 | 384 | 591 | 53 | 24 | 157 | 46 | 69 × 68 |

FA:石炭灰, C:粗骨材 (人工軽量骨材), S:細骨材 (人工軽量骨材), 水ガラス: JIS1種のケイ酸Na溶液を2倍希釈, M-Na:メタケイ酸Na

特集：材料技術

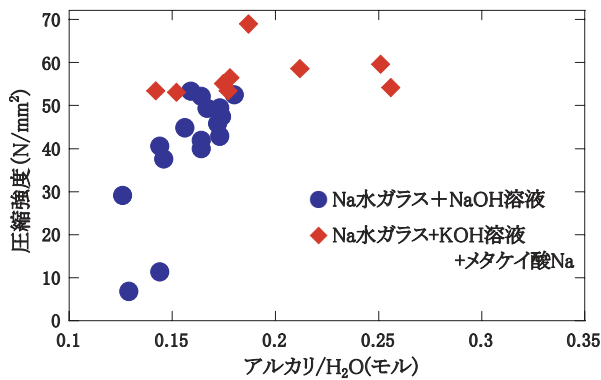


図10 ジオポリマーコンクリートにおけるアルカリ/H₂O (モル) と圧縮強度の関係

体断面を観察すると、全ての粗骨材がその断面で破壊しており、コンクリートの破壊は骨材界面ではなく軽量骨材自身から生じていた。また、クリープ係数は0.73と一般的な値と比較して小さかった。これは、クリープ歪みそのものは、一般的な値であるが、弾性歪みが大きいことに起因している。なお、これらの結果は、粗骨材に同様の人工軽量骨材を使用し、蒸気養生を施した比較的高強度の早強セメント軽量コンクリートの例と一致している^{6, 7)}。したがって、これらの結果は人工軽量骨材そのものの性質に強く依存しており、早強セメント高強度軽量コンクリートと同様に、クリープによるプレストレスの損失はコンクリートの弾性変形に伴うものが大きくなるものと考えられる。一方、凍結融解試験の結果は、AE剤など使わないプレーンな状態に関わらず耐久性指数が87.3と十分に耐凍結融解性を有するものであった。これは、ジオポリマー硬化体が練り混ぜ時の粘性のため、特にAE剤を用いない状態で、空気量約4%、気泡間隔係数約200 μ mと微細な空気を必要量含むためと考えられる。

表3 アルカリ/H₂O (モル比) =0.18* で作製したジオポリマー軽量コンクリート (気乾単位容積質量 1.75t/m³) の諸特性

| 試験名 | 試験結果 | |
|----------------|--------|------------------------|
| | 強度試験 | 圧縮強度 |
| 静弾性係数 | | 15.3KN/mm ² |
| 割裂引張試験 | | 4.0N/mm ² |
| クリープ試験 | クリープ歪み | 576 μ (載荷 130 日) |
| | 乾燥収縮歪み | 201 μ (載荷 130 日) |
| | クリープ係数 | 0.73 (載荷 130 日) |
| 凍結融解試験 | 耐久性指数 | 87.3 |
| 硬化コンクリートの空気量測定 | 空気量 | 4.2% |
| | 気泡間隔係数 | 209 μ m |

* 配合は表2

4. まとめ

普通セメントを使用せず、石炭灰とケイ酸アルカリ溶液及び人工軽量骨材から約1.75t/m³の気乾単位容積質量のジオポリマー軽量モルタル・コンクリートを作製し、その配合条件及び諸性質を検討した。その結果、

- (1) アルカリ溶液の Si/アルカリ (モル比) が 0.32 以上のとき、ジオポリマーモルタルの圧縮強度は約 140N/mm² まで、アルカリ/H₂O (モル) と直線関係が成り立つことがわかった。しかし、人工軽量骨材を使用した場合、その低骨材強度のため、モルタルで約90N/mm²、コンクリートで約60N/mm²以上で、アルカリ/H₂O (モル) に対して圧縮強度の増加量が小さくなった。
- (2) アルカリ溶液において、K成分が多いと硬化体そのものの構造に大きな変化はないが、高アルカリ領域における施工時の流動性が改善し、結果として高強度のモルタル・コンクリートが作製できることが分かった。
- (3) ジオポリマー硬化体の化学的耐久性は大きく、酸抵抗性及び、軽量骨材を使用したモルタル・コンクリートで問題となるアルカリ骨材反応抵抗性、凍結融解反応抵抗性も大きいことが分かった。

文献

- 1) Roy, D. M., "Alkali-Activated Cements, Opportunities and Challenges" Cement and Concrete Research, Vol.29 (2), pp.249-254, 1999.
- 2) Malhotra, V. M., "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology", ACI Concrete International, Vol.24 (7), p.22, 2002.
- 3) Davidovits J., "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology" presented at the Geopolymer International Conference, Saint-Quentin, France, June 30 to July 2, 1999, pp.1-40.
- 4) Feng D., Mikuni A., Hirano Y., Komatsu R. and Ikeda K., "Preparation of Geopolymeric Materials from Fly Ash Filler by Steam Curing with Special Reference to Binder Products", Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol.113[1], pp.82-86, (2005)
- 5) 松田芳範, 津吉毅, 石橋忠良, 軽量骨材コンクリートを用いた実構造物の調査報告, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.4, pp.183-188, 2004
- 6) 津田久嗣, 田中浩, 岸上信彦, 串田守可: 軽量コンクリートの製品への適用確認試験報告 (第1報), クリモト技報 No.43, pp.28-32, 2000
- 7) 津田久嗣, 田中浩, 岸上信彦: 軽量コンクリートの製品への適用確認試験報告 (第2報), クリモト技報 No.45, pp.26-31, 2001