

論文 パーライト原石粉末を用いたジオポオリマーに関する研究

岩間 祐樹*1・李 柱国*2

要旨: 非結晶質石英を有するパーライトを用いてジオポリマー(GP)を作製した時、珪酸ソーダと苛性ソーダを併用すれば強度が高くなったが、作製した GP は吸水劣化を示した。パーライトは Si に富んでいるが、ジオポリマーの反応に必要な Al や Ca の提供が不十分のためであると考えられる。本研究では、フライアッシュとアルミン酸ナトリウムを使用することにより吸水劣化の問題を解決した。この場合に SiO_2/Al_2O_3 のモル比を 4.5 以下とすれば、吸水劣化を生じず 10MPa 以上の圧縮強度を有する GP を作製することができる。

キーワード: ジオポリマー, パーライト, 力学性能, 吸水劣化

1. はじめに

アルカリ骨材反応はコンクリート劣化の原因の一つであり、「安全と認められる骨材の使用, コンクリート中のアルカリ総量の抑制, 抑制効果のある混合セメントの使用, 低アルカリ形セメントの使用」などの対策が必要である。反応性を有する骨材の原石として安山岩, 流紋岩, 真珠岩, 黒曜石などがあげられる。黒曜石や真珠岩は 1000°C 近い高温熱処理により発泡体を形成し, 軽量骨材として利用されている。そこで, これらの岩石の省エネルギーで付加価値がより高い利用方法が期待されている。

近年, 廃棄物や副産物を主原料としたジオポリマー(GP)は, 低酸素結合材として注目されている¹⁾。GP とは, セメントクリンカーを使用せず, フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の活性フィラーまたは不活性フィラーを添加した混合物がアルカリ溶液の環境で縮重合反応を生じ, 硬化させたものである。GP の CO_2 排出単位は, GP が普通ポルトランドセメント(OPC)の 2 割程度で, GP コンクリートがポルトランドセメントコンクリートの 3~6 割である²⁾。

パーライト原石粉末を用いた GP 硬化体の研究は報告されているが, 使用可能なアルカリ溶液および硬化体の

耐久性はまだ明らかになっていない³⁾。GP は, 一般に活性フィラー(AF)とケイ酸ソーダ, 苛性ソーダの水溶液の少なくとも 1 種類のアルカリ溶液(AS)を用いて作製される。本研究では, パーライト原石を用いた建材の開発を目的とし, まず一般的な方法でパーライトのみを用いた硬化体を作製し, 必要な NaOH 濃度を検討し硬化体の性能(強度, 耐水性)を考察した。次に GP 硬化体の吸水劣化を防止するために, AF と AS の合理的な構成の検討を行った。

2. 珪酸ソーダと苛性ソーダの単体や混合水溶液を用いたパーライト硬化体の作製と性能

2.1 使用材料

今回の実験に使用した材料を表-1 に示す。パーライト粉末(PP)は, 粒状パーライト原石(粗粒率 0.67, 粒子の最大寸法 0.3mm)を, 比表面積が $6000\text{cm}^2/\text{g}$ 前後になるまでボールミルで粉砕したものである。パーライト原石の XRF 分析結果を表-2 に示す。 SiO_2 と Al_2O_3 は主な酸化物である。

一方, 市販の苛性ソーダ(濃度 48%)をイオン水で所要の 4 種類のモル濃度(10, 14, 16, 18 mol/L)まで希釈した。アルカリ溶液として, 4 種類の苛性ソーダ水溶液(NH と略記)のいずれかまたは NH と JIS 2 号珪酸ソーダ(WG と略記)の混合溶液を使用した。ここに, WG と NH を 4:1 の体積比で混合したアルカリ溶液を wn41, 1:4 の体積比で混合したものを wn14 と記す。また, 上水で洗浄した海砂をモルタルに使用した。海砂の表乾密度は $2.57\text{g}/\text{cm}^3$, 吸水率は 1.36%, 実積率 66.7%, F. M. 2.90 であった。

2.2 試験体の作製と養生

パーライト粉末の使用を節約するため, パーライト GP モルタルの強度に与えるアルカリ溶液の影響についての検討には, 小さい供試体を用いた。モルタルの調合を表-3 に示す。使用材料を計量し, 粉体と砂をプラスチックビーカーに入れ, 1 分間手混ぜを行った。その後, アル

表-1 パーライト GP の使用材料

材料	材料名と記号	モル濃度 (mol/L)	質量濃度 (%)	比重 (g/cm^3)
アルカリ溶液 (AS)	苛性ソーダ水溶液 (NH)	10	30	133
		14	39	142
		16	43	145
	珪酸ソーダ (WG)	JIS2 号, SiO_2 : 28.82%, Na_2O : 22.79%, 比重: $1.46\text{g}/\text{cm}^3$		
活性フィラー (AF)	パーライト原石粉 (PP)	密度: $2.37\text{g}/\text{cm}^3$, ガラス質率: 87% 比表面積 (ブレン値): $5500\sim 6500\text{cm}^2/\text{g}$		

表-2 パーライトの XRF 分析結果 (mass%)

成分	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	TiO_2	Others
PP	75.43	0.38	14.04	0.60	4.52	4.58	0.11	0.0	0.34

*1 山口大学大学院 創成科学研究科 大学院生 (学生会員)

*2 山口大学大学院 創成科学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

カリ溶液を加え、均一になるまで手混ぜを行った(約2分間であった)。練り混ぜた後、寸法が2×2×10cmの耐熱硬質塩化ビニール型枠に装入してテーブルバイブレータで30秒間締め固めた。さらに、試験体の上面をラップで封緘して80°Cの乾燥炉に入れ24時間養生した。その後、試験体の温度が室温になるまで室内に放置し、脱型した。封緘の状態ですらに20±3°C、R.H.60±5%の気中常温養生を24時間行った。強度の試験結果は、供試験体の寸法の影響を受けると考えられる。パーライト GP モルタルの強度を明らかにするために、NH のモル濃度がそれぞれ10、16および18 mol/Lであったシリーズ wn01 の試料を使って、セメントの強さ試験(JIS R 5201)に用いられる標準供試体(4×4×16cmの角柱試験体)を作製した。試料はモルタルミキサーにて粉体の混合を1分間行い、細骨材を加え1分間混合し、アルカリ溶液を加え、2分間練り混ぜた。試験体作製時のテーブルバイブレータによる締め固め時間は60秒であった。また、試験体は20°Cの気中に7日間封緘養生した。

2.3 測定項目と方法

2.3.1 強度試験

2×2×10cmの小角柱試験体の場合、1本の角柱試験体を2つに切断して圧縮強度を測定した。2つの試験片の寸法は2×2×5cmであった。圧縮強度の測定は、JIS R 5201(付属書2 セメントの試験方法—強さの測定)に規定される圧縮強さ試験用器具の上部加圧板と小角柱試験体の間に2×2×2cmの鋼製ブロックを入れ、万能試験機を用いて行った。圧縮強度は4つの試験片の平均値であった。

一方、4×4×16cmの標準角柱試験体の場合、まず万能試験機を使用して3点法で曲げ試験を行った。次に曲げ試験後の折片を使い圧縮強度を測定した。曲げ強度は3つ、圧縮強度は6つの結果の平均値であった。

2.3.2 SEM 分析と X 線回折分析

18 mol/L の NH を用い、WG と NH の体積比が 1:4 であったパーライト GP ペースト硬化体(細骨材を使わなかったもので、wn14-NH18 と略記)に対して、走査型電子顕微鏡(SEM)によって内部構造を観察し、元素分析(以下、EDS と記す)を行った。また、パーライト GP の化学組成を検討するために、wn14-NH18 および 18mol/L の NH のみを用いた GP ペースト(wn01-NH18 と略記)に対して、X 線回折分析(XRD)を行った。XRD 分析の条件として X 線出力は 45kV、200mA、入射スリットが 1.25 度、スキャンスピードは 5 度/分、ステップ幅は 0.005 度、スキャン範囲は 5~60 度であった。

2.4 実験結果および考察

2.4.1 モルタルの強度およびアルカリ溶液の影響

小角柱試験体を用いた圧縮強度の測定結果を図-1 に示す。シリーズ wn41 に比べ、シリーズ wn01 のほうが圧

縮強度は高かった。しかし、シリーズ wn14 の圧縮強度は最も高かった。この結果により、最適な NH 割合は存在していることがわかった。NH の役割によって、NH の割合が少ないと AS のアルカリ度が低下し、その PP への刺激が十分ではなくなるため、PP の元素溶出は少なくなり、反応生成物が減少して低強度になると推察している。しかし、WG は GP の縮重合反応に必要な Si⁴⁺を提供できるため、WG の適宜添加で AS の刺激能力を大きく低下しなければ、GP の強度が向上すると考えられる。

図-2 は、標準角柱試験体より測定した GP モルタルの曲げ強度と圧縮強度を示すものである。小角柱供試体の結果と比べると、同じ調合であっても試験体の寸法の影響により圧縮強度は低くなった。NH のモル濃度の増加に伴い、曲げ・圧縮強度は共に増加することが認められた。図-1 と図-2 の結果によって総合的に判断すると、普通コンクリートの最小設計基準強度である 18N/mm² 以上の強度をもつパーライト GP 硬化体を作製するために、NH のモル数を 14 以上とすることが必要である。

2.4.2 パーライト硬化体の SEM と XRD 分析の結果

パーライト、wn14-NH18 および wn01-NH18 の XRD 結果を図-3 に示す。同図に示すように、パーライトの XRD チャートに、15-35deg.の範囲にブロードピークは見られ、曹長石、石英などの結晶化合物を表すピークもある。したがって、パーライトは非結晶質の SiO₂ を含むが、結晶物があるものと考えられる。一方、シリーズ wn14-NH18 と wn01-NH18 では、20-40deg.の範囲にブロードピークが見られ、ブロードピークの頂上は約 28deg.の位置にある。XRD のピークの位置よりパーライト中の一部の結晶物は GP 中にも見られた。即ち、パーライトは完全に溶けて反応しなかった。3 シリーズの XRD の 5-10deg.の位置にあるピークより、パーライト中の Albite の一部が反

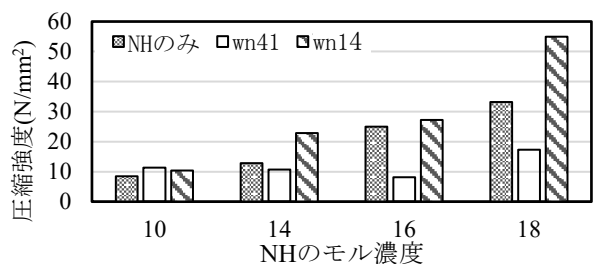


図-1 小角柱供試体の強度に及ぼすアルカリ溶液の影響

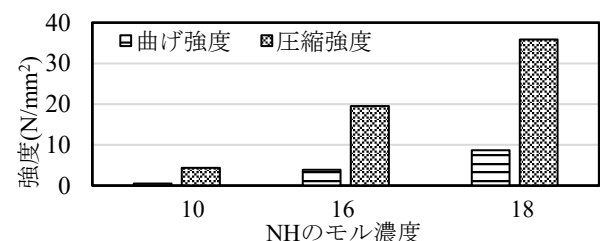
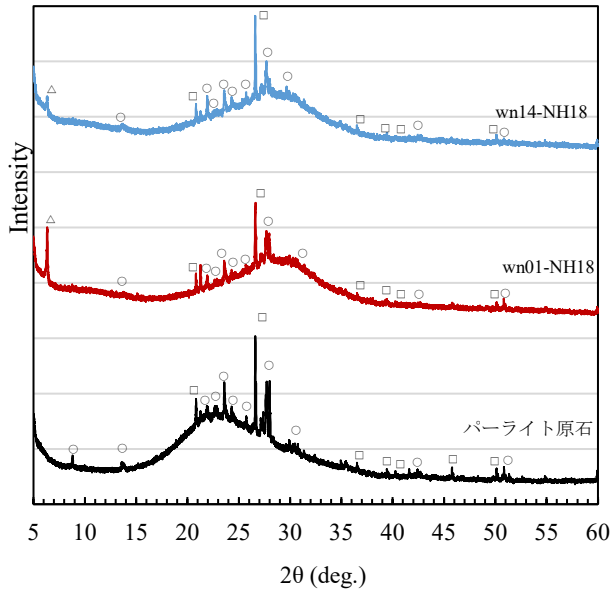


図-2 標準角柱供試体の強度に及ぼすアルカリ溶液の影響



○: Albite 曹長石 (Na, Ca)Al(Si, Al)₃O₈,
 □: Quartz 石英 SiO₂
 △: Faujasite-Na (Na, Ca, Mg)₂(Si, Al)₁₂O₂₄ · 15H₂O

図-3 パーライト原石と硬化体のXRD分析

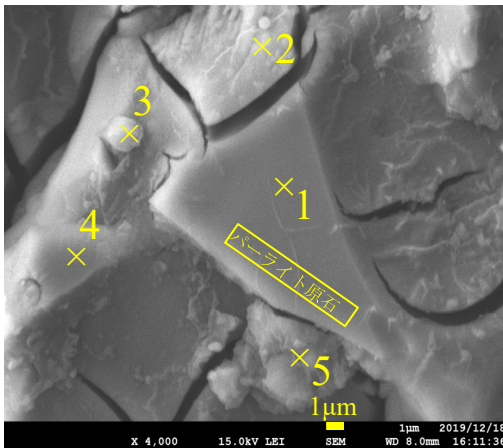


図-4 シリーズ wn14 硬化体のSEM写真

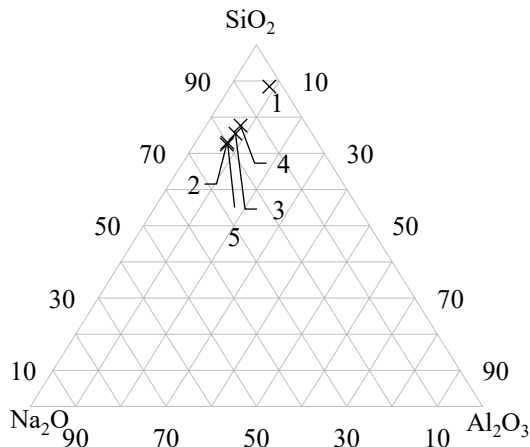


図-5 EDS分析結果によるパーライト硬化体の酸化物の分布図

応してゼオライトが合成されたと考えられる。しかし、Al³⁺を含有する Albite の多くは GPに残っている。

図-4 に、シリーズ wn14-NH18 硬化体の SEM 写真を示す。EDS 分析の結果より、画像中央にある粒子は反応しきれないパーライトである。また、EDS 分析の結果に基づいて作成した Al₂O₃-SiO₂-Na₂O の三角図を図-5 に示す。この図によって、Si の含有量が多い Na₂O · SiO₂ ゲルが主に生成された可能性がある。

2.4.3 パーライト GP モルタルの吸水劣化

表-3 に示す 3 シリーズの GP モルタルを水に 1 日浸漬すると、図-6 に示すようにモルタルは膨張を生じ亀裂が見られた。

GP の硬化反応は N-A-S-H ゲルを生じ、反応には Si, Na, Al が必要である。パーライトの非晶質成分が主に石英である。したがって、パーライトと AS 中の珪酸ソーダは Si を提供する。しかし、表-2 よりパーライトの Al 含有量は相対的に少なく、また AS で刺激しても結晶性鉱物は Al を溶出しにくい。そのため、上記のパーライト硬化体中の N-A-S-H の生成は少ないと考えられる。一方、上記の硬化体の吸水膨張現象とアルカリ骨材反応(ASR)のメカニズムから、アルカリシリカゲル(Na₂O · SiO₂)が生成されたと推測している。

3. パーライト GP 硬化体の吸水劣化対策の検討

3.1 パーライトとフライアッシュの併用

フライアッシュ (FA) は、アルカリ溶液に Si⁴⁺や Al³⁺を溶出するため、よく活性フィラーとして使われている。パーライトの Al³⁺の溶出不足を補うために、パーライト粉末の一部を FA で代替し、アルカリ溶液 wn14 を用いて、モルタルを作製し強度と耐水性を考察した。

表-3 GP モルタルの調査

シリーズ	WG:NH*	NH モル濃度	AS/AF**	S/AF**	養生
wn01	0:1	10, 14, 16, 18	0.625	2.0	80℃ 24 時間
wn41	4:1				
wn14	1:4				

[注]AS: アルカリ溶液,AF: 活性フィラー,S: 海砂,*: 体積比,**: 質量比

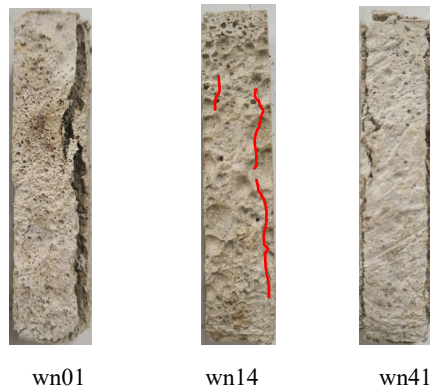


図-6 水中浸漬による硬化体の劣化状況

3.1.1 実験概要

モルタルの調合を表-4に示す。用いたFAは、JIS II種で密度が2.29g/cm³、比表面積が4392cm²/gであった。また、FAの化学組成を表-5に示す。

モルタルの練混ぜと試験体の作製は、2.2節に述べた標準供試体の作製方法と同じであった。4×4×16cmの角柱試験体は、80℃24時間の気中養生の後、20±3℃、R.H.60±5%の気中養生を1日行われた。

3.1.2 実験結果および考察

PPとFAを活性フィラーとしたGPモルタルの曲げと圧縮強度を図-7に示す。同図に示すように、FAの代替率は高いほど、GPモルタルの強度は小さい傾向が見られた。この結果より、高温と強アルカリ条件下のFAのAl³⁺溶出の活性度はPPより低いことがわかった。FAの代替率を適当に設定すれば、強度上で実用性のあるGP硬化体を作製できる。しかし、シリーズFP11-wn14とFP37-wn14のGPモルタルは、水に1日浸漬した後に亀裂を生じた。したがって、FAを併用してもパーライトGP硬化体の吸水劣化問題を解決できない。

3.2 アルミン酸ナトリウム水溶液の使用

活性フィラーを変えてもパーライトGPの吸水劣化問題を解決できなかったため、アルミン酸ナトリウム水溶液

表-4 PPとFAを活性フィラーとしたGPモルタルの調合

シリーズ	WG:NH*	FA:PP**	NHモル濃度	AS/AF**	S/AF**
FP37-wn14	1:4	3:7	18mol/L	0.625	2.0
FP11-wn14	1:4	1:1			

[注] *:体積比, **:質量比

表-5 用いたフライアッシュの化学組成 (mass%)

成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Others
FA	57.4	3.91	26.06	5.57	0.81	1.62	1.10	0.51	1.49	1.53

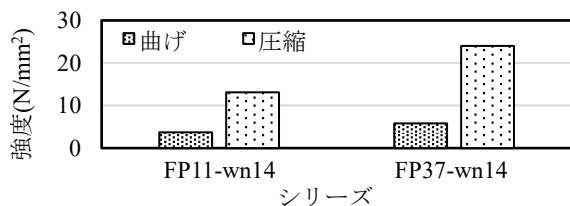


図-7 FAを添加したパーライト硬化体の強度

表-6 アルミン酸ソーダを添加したGPモルタルの調合

シリーズ	AN:NH*	FA:PP**	AS/AF**	S/AF**	吸水劣化
AH10	A 1:0	0:1	0.625	2.0	無
AH41	B 4:1				無
AH31	C 3:1				無
AH21	D 2:1				無
AH11	E 1:1				有
FP37-AH10	1 1:0	3:7	0.625	2.0	無
FP37-AH41	2 4:1				無
FP37-AH11	3 3:1				有
FP37-AH12	4 1:2				有
FP11-AH10	5 1:0	1:1	0.625	2.0	無
FP11-AH41	6 4:1				無
FP11-AH11	7 1:1				無
FP11-AH12	8 1:2				有

[注] *:体積比, **:質量比

液(ANと略記)を混合した新たなアルカリ溶液を使って、吸水劣化の防止方法を検討した。

3.2.1 実験概要

用いた市販品のアルミン酸ナトリウム水溶液の比重は1.49g/cm³で、成分がAl₂O₃(20.02%)、Na₂O(18.90%)である。NHは、パーライトの溶出性を考え18mol/Lのものを使用した。ANとNHの体積比およびFAの代替率を変えさせて、2.2節に述べた方法で10シリーズのモルタル(表-6を参照)を練り混ぜ、4×4×16cmの角柱試験体を作製した。80℃24時間の気中養生と20±3℃、R.H.60±5%の1日気中養生を行った後、万能試験機で曲げと圧縮強度を測定した。水中浸漬試験は2cm×2cm×10cmの小角柱を使い、20±3℃の水中に1日浸漬した。

3.2.2 実験結果および考察

(1) 強度

図-8に、パーライト粉末だけを活性フィラーとし、ANとNHをASとしたGPモルタルの曲げ強度と圧縮強度を示す。AS中のANの割合が増加すると、モルタルの強度は増加する傾向が見られた。ANのみを使用した場合(シリーズAH10, A)の強度は最も高かった。NHを使用しない場合でも、ANによるアルカリ性の環境においてパーライトの非晶質石英からSi⁴⁺溶出は可能であり、ANは多くのAl³⁺イオンを提供するため、N-A-S-Hゲルの生成が増加し強度が高くなると考えられる。

一方、図-9と図-10は、FAがそれぞれ30%と50%の

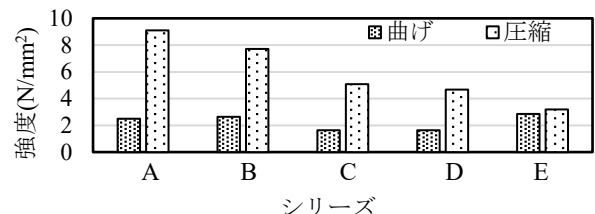


図-8 パーライトGPの強度に及ぼすANの混合比の影響

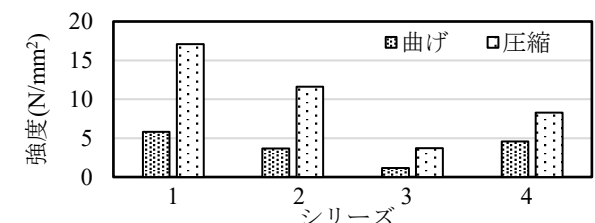


図-9 FP37シリーズの強度に及ぼすアルカリ溶液の影響

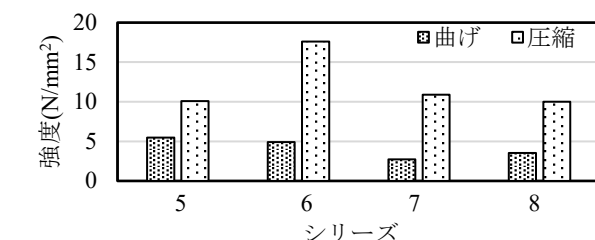


図-10 FP11シリーズの強度に及ぼすアルカリ溶液の影響

パーライトを代替した GP モルタルの曲げと圧縮強度の試験結果を示すものである。同図に示すように、FA を添加した GP モルタルの強度は、パーライトを単独に使った場合より増加した。図-9 と図-10 より、AN の割合が減少すると GP モルタルの強度が低下する傾向が見られたが、シリーズ3 とシリーズ5 は例外であった。シリーズ1 と6 の強度は FA の代替率がそれぞれ30% と50% の場合に最大であった。現在、理由が不明である。N-A-S-H ゲルの生成反応に必要な Al, Si はアルカリ溶液の AN と活性フィラー(PP, FA)に提供される。FA と PP の Al, Si イオンの溶出能力は、FA と PP の特性に依存し、AS のアルカリ度の影響も受ける。AS のアルカリ度は NH の割合の減少によって低下するため、AN が多い AS の FA と PP への刺激能力が低く、FA と PP のイオンの溶出が少なくなると考えられる。しかし、AN が多い AS は Al を多く提供する。したがって、N-A-S-H ゲルの生成量がこれらの要因の複合効果に影響されると思われる。詳細な化学分析による硬化機構の解明は今後の課題である。

(2) 水中浸漬の劣化状況

各シリーズの硬化体の吸水劣化有無を表-6 に記入した。また、図-11 に、吸水劣化を生じた4シリーズの硬化体の劣化状況を示す。同図に示すように、シリーズAH11 の強度は小さく、水中に浸漬すると表面にひび割れが生じた。AN の割合が多いシリーズAH21, AH31 およびAH41, AH10 は劣化を生じなかった。18モルのNHの割合が大きい場合、ASの強アルカリの刺激より、パーライトから多くのSiが溶出するが、割合が少ないANからのAl提供が不足になるため、N-A-S-H ゲルの生成反応に余剰したSiはアルカリシリカゲル(Na₂O・SiO₂)を生じる。これは、シリーズAH11の吸水劣化の原因であろうと推測している。

一方、シリーズFP37-AH11, FP37-AH12, FP11-AH12の試験体は、吸水により表面にひび割れが生じた。強アルカリ刺激によりパーライトから溶出されるSiの量に対してFAとANから供給されるAlが相対的に不足であ



図-11 AN を使用した硬化体の水中浸漬による劣化状況

るとき、N-A-S-H ゲルの生成反応に余剰した Si によってアルカリシリカゲル(Na₂O・SiO₂)が生成されて吸水による劣化が生じると考えられる。また、シリーズFP11-AH11 は吸水劣化を生じなかったことより、FA の代替率の増加に伴って、吸水劣化に与える NH 割合の影響は小さくなることがわかった。これは、FA から Al イオンの溶出が増加するためであると推測している。

したがって、FA と AN を添加すると共に、AN と NH の割合を適当にすれば、パーライト GP 硬化体の吸水劣化問題を解決できる。吸水劣化有無、圧縮強度と SiO₂/Al₂O₃ モル比の関係を表-7, 図-12 に示す。これらの図表より SiO₂/Al₂O₃ モル比を 4.5 以下にして、パーライトを用いた GP 硬化体を作製すれば、10N/mm² 以上の圧縮強度が得られ、吸水劣化が生じないことが認められた。

(3) SEM と XRD 分析

図-13 に FP11-AH41 の SEM 写真を示す。また EDS 分析の結果に基づいて作成した Al₂O₃-SiO₂-Na₂O の三角図を図-14 に示す。SEM 画像より多くの未反応の FA 粒子が確認された。高温養生を行っても FA は十分に反応しないことが分かった。また、図-13 の下図に示すようにパーライト粒子と FA の表面が反応して粒子が連結している。なお、図-5 と図-14 比較すると、FA と AN を使用した GP の成分が Al₂O₃ 側に移動している傾向がみられ、N-A-S-H ゲルが生成したと考えられる。

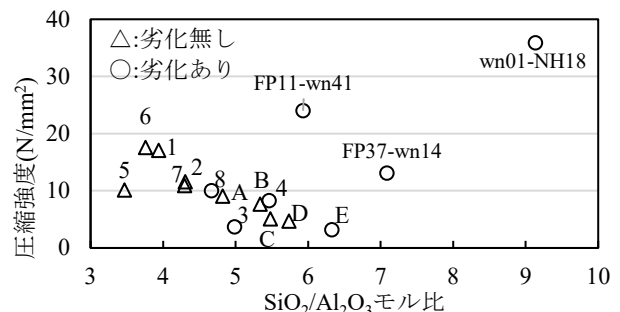


図-12 SiO₂/Al₂O₃モル比が強度、吸水劣化に及ぼす影響

表-7 各シリーズの圧縮強度、SiO₂/Al₂O₃モル比及び吸水劣化状況

シリーズ	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ (モル比)	圧縮強度 (N/mm ²)	吸水劣化
wn01-NH18	9.14	35.9	有
FP37-wn14	7.09	13.1	有
FP11-wn14	5.93	24	有
AH10	A 4.82	9.1	無
AH41	B 5.34	7.7	無
AH31	C 5.48	5.07	無
AH21	D 5.74	4.68	無
AH11	E 6.33	3.18	有
FP37-AH10	1 3.94	17.1	無
FP37-AH41	2 4.31	11.6	無
FP37-AH11	3 4.99	3.72	有
FP37-AH12	4 5.46	8.29	有
FP11-AH10	5 3.47	10.1	無
FP11-AH41	6 3.76	17.6	無
FP11-AH11	7 4.30	10.9	無
FP11-AH12	8 4.67	10	有

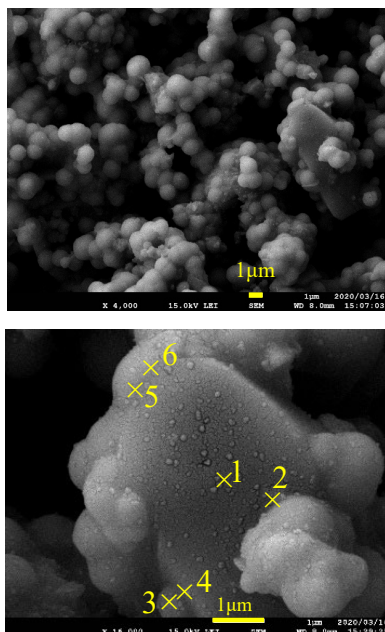


図-13 FP11-AH41のSEM写真
(上×4000, 下×16000)

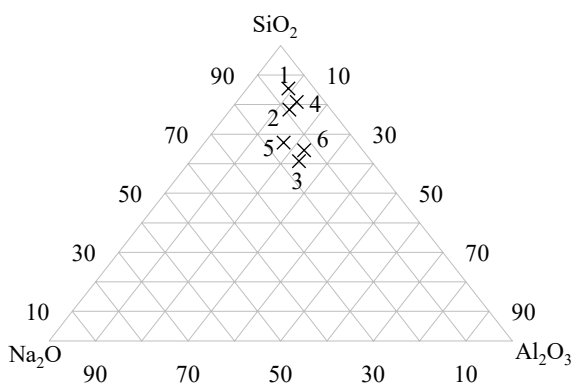


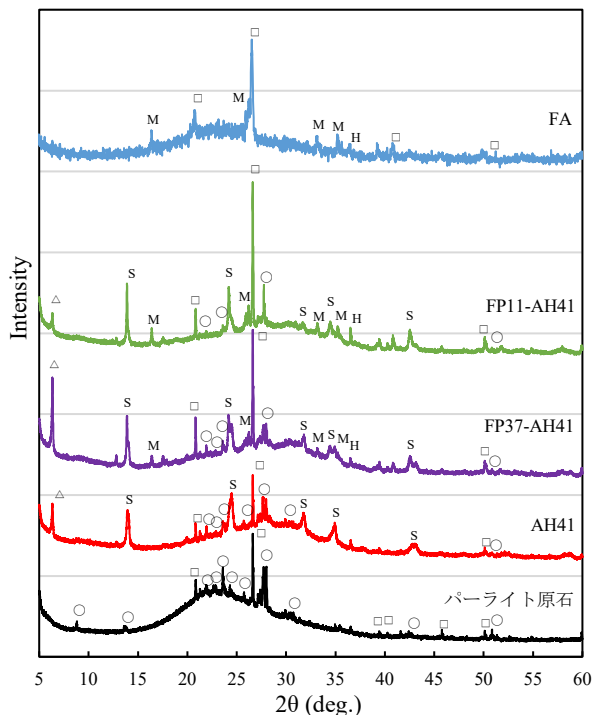
図-14 FP11-AH41のEDS分析結果による 酸化物の分布図

原料であるパーライト原石粉末、FA および GP 硬化体の AH41, FP37-AH41, FP11-AH41 の XRD 結果を図-15 に示す。3 シリーズの GP 中で 25-35deg.の範囲にブロードピークが見られ、ブロードピークの頂上は 28deg.の位置にある。また、3 シリーズの GP に Faujasite (ゼオライトの 1 種)が生じたことが分かった。

4. まとめ

本研究ではパーライト原石粉末を用いて GP を試作し、強度と耐水性について実験的考察を行った。主に以下の知見を得た。

- 1) 高温養生をすれば、珪酸ソーダと苛性ソーダの使用で硬化体を作製できるが、苛性ソーダのモル濃度を 14 以上とする必要がある。
- 2) パーライト原石粉末、珪酸ソーダおよび苛性ソーダを用いて作製した GP 硬化体は水中浸漬により膨張劣化が見られた。



- : Albite 曹長石 (Na,Ca)Al(Si,Al)₃O₈
- : Quartz 石英 SiO₂
- M: Mulite ムライト Al₆O₁₃Si₂
- S: Sodalite 方ソーダ石
- H: Hemaite ヘマタイト Fe₂O₃
- △: Faujasite-Na (Na, Ca, Mg)₂(Si, Al)₁₂O₂₄ · 15H₂O

図-15 パーライト原石、FA および GP の XRD 分析結果

- 3) パーライト原石粉末と FA を併用し、珪酸ソーダと苛性ソーダを使用し作製した硬化体は吸水劣化が改善されなかった。
- 4) 珪酸ソーダの代わりにアルミン酸ソーダを用いると、パーライト原石粉末だけを使用した硬化体の吸水劣化は抑えられたが、十分な強度は得られなかった。
- 5) アルミン酸ソーダを使うとともにパーライト原石粉末の一部を FA で代替すると、硬化体の吸水劣化が防止され、圧縮強度は 10N/mm² 以上となる。この時、SiO₂/Al₂O₃ モル比を 4.5 以下とする必要がある。

謝辞

本研究に際し、山口大学総合技術部 牧原 貴之様のご支援を得ました。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017.9
- 2) 李柱国：ジオポリマーコンクリートの環境影響に関する定量的考察，「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集，pp.43-50, 2016.6
- 3) S. T. Erdogan: Properties of Ground Perlite Geopolymer Mortars, J. Mater. Civ. Eng., 27 (7), 04014210, 2015