天然ゼオライトを混和したポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性

秋田大学　学生会員　○佐川奈津子
秋田大学　学生会員　梅原善隆
秋田大学　正会員　徳重英信

1. はじめに

天然ゼオライトは微細な細孔構造を有しており，その細孔を利用した水質浄化やイオン交換機能など様々な性能を発揮する材料である。ゼオライトは吸水率の高い骨材であり，このような骨材を用いると耐久性が低くなると言われている。しかし，既往の研究[1)]で天然ゼオライトを混和したポーラスコンクリート及びモルタルに凍結融解試験を実施した結果，凍害劣化の抑制効果が明らかになった。本研究では，実験条件をより厳しいものに変え，天然ゼオライトを用いたポーラスコンクリートの劣化挙動を明らかにすることを目的とし，実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料，配合および供試体

セメントは普通ポルトランドセメント(C:密度 3.15 g/cm^3)，粗骨材には**表 1** に示す天然ゼオライトおよび砕石，細骨材には天然ゼオライトおよび砕砂を用いた。また混和剤にナフタレンスルホン酸系の高性能減水剤(SP)，天然樹脂酸塩の AE 剤(AE)を使用した。配合は**表 2** に示す通りであり，ポーラスコンクリート(PC)においては水セメント比を 28 %として，粗骨材の種類，骨材ペースト比(p/a)を変化させた。モルタル(CM)は水セメント比を 50 %として，細骨材の種類，AE 剤の有無を変化させた。供試体寸法は**図 1** に示すφ150×110 mm の円柱供試体である。養生は標準養生であり，材齢 14 日で測定を行った。

表 1　使用骨材の物理的性質

骨材	密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粒径 (mm)	産地
ゼオライト粗骨材(ZG)	1.90	20.8	5.0～15.0	秋田県能代市二ツ井
ゼオライト細骨材(ZA)	1.92	19.5	1.2～2.5	
砕石(CG)	2.67	0.86	5.0～20.0	秋田県仙北市西木
砕砂(S)	2.67	1.46	～5.0	

表 2　供試体の配合

供試体名	骨材	W/C (%)	p/a (%)	単位量(kg/m^3) W	C	S	AE (kg/m^3)	SP (kg/m^3)	目標空気量 (%)	SP添加率 (%)	AE添加率 (%)
CM-AE	砕砂	50.0		261	522	1371	0.05	0.0	6.0	0.00	0.01
CM-nAE				261	522	1504	0.00	0.0	1.0	0.00	
ZCM-nAE	ゼオライト			261	522	1081		10.4		2.00	
CPC-30-28	砕石	28.0	30.0	76	270	1438			30		
CPC-36-28			36.0	93	322	1472			25		
ZPC-30-28	ゼオライト		30.0	74	263	994			30		
ZPC-36-28			36.0	87	310	978			30		

2.2 スケーリング試験および内部ひずみ

スケーリング試験および内部ひずみの測定は RILEM CIF 試験に準じて行った。スケーリング試験は，凍結融解 7 サイクルごとに供試体の試験面(底面)をブラシでこすり，はがれ落ちた欠片をろ過し，乾燥質量を測定した。ひずみおよび内部温度の測定は，カールソンタイプの埋込み型ひずみゲージと熱電対を用いて行った。凍結融解時の温度環境はスケーリング試験，内部ひずみともに供試体内部温度を –30(–40) ℃～+30 ℃で 1 サイクル/日とし，水位は供試体高さの下半分としている。これは供試体内部が水で飽和された状態であると，劣化が激しいという報告[2)]を基に設定した。

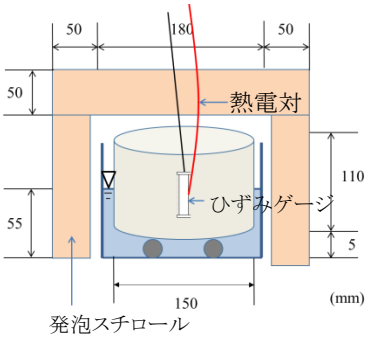

図 1　供試体寸法

3. 実験結果および考察

3.1 スケーリング量

スケーリング試験の結果を**図 2** に示す。CPC-30-28 は，14 サイクルで供試体側面にひび割れが発生し，28 サイクルで破壊に至ったため測定を終了した。これは単位セメント量が少なくペースト厚さが薄くなったため，ひび割れが発生した後に進展し，破壊するまでの時間が短くなったものと考えられる。CPC-30-28 と同じ p/a である ZPC-30-28 は 42 サイクル時点で CPC-36-28 と同程度のスケーリング量を示した。ポーラスコンクリート供試体中で最も劣化が軽度であ

キーワード:ポーラスコンクリート，天然ゼオライト，凍結融解，モルタル，ひずみ，スケーリング
連絡先:〒010-8502　秋田県秋田市手形学園町 1-1　秋田大学工学資源学部　tel:018-889-2367　fax:018-837-0407

ったものは，ZPC-36-28 であり，水位を供試体底面から 5 mm 程度とした既往の研究結果 [1]と比較した場合，p/a の増加とともにスケーリング発生量が低下する傾向は同様であったが，スケーリングの量は約 7 倍となった。これはポーラスコンクリート空隙中の飽水度が強く影響した [2]ことが考えられる。

3. 2 内部ひずみ

凍結融解作用時の供試体自体の変形挙動を内部ひずみとして測定した結果を**図 3～6** に示す。なお，全ての値はコンクリートの線膨張係数による変形を差し引いている。AE 剤無添加のモルタル（CM-nAE）は，10 サイクルで 200×10^{-6} 程度のひずみを残留（**図 3**）した。一方の AE 剤添加モルタル（CM-AE）とゼオライトを骨材に使用して AE 剤無添加のモルタル（ZCM-nAE）は 10 サイクル経過時でひずみは残留せず，ゼオライト自体の細孔構造にエントレインドエアと同様な効果が期待される。ポーラスコンクリートはすべての配合においてひずみが残留している。各サイクルの残留ひずみ（**図 4**）は，ゼオライトを骨材として用いた供試体はサイクルの経過とともに残留ひずみが増加している傾向が読み取れる。一方，砕石を骨材として用いたものは最大ひずみを残留した後に減少傾向を示した。これにより凍結融解による内部挙動がクリープひずみを含んでいると考えられる。

凍結融解 3 サイクル目における 0 ℃以下の ZPC-30-28 のひずみの経時変化を**図 6** に示す。温度降下時，0 ℃付近（領域 A）での膨張が見られ，ポーラスコンクリートの粗大空隙中の水分相変化時の膨張によるものと考えられる。その後，氷晶の線膨張係数により収縮挙動（①）へと変化し，最低温度付近（領域 B）では–2 ℃程度の降下で 100×10^{-6} 程度の膨張となった。これは未凍結水が化学ポテンシャルの差異によって氷晶に移動し，氷晶成長が膨張挙動へ影響したことなどが考えられる。温度上昇時（②）では氷晶の線膨張係数の影響により膨張挙動へ転じた。

また，温度降下時には氷晶が硬化体より先に収縮するためにポーラスコンクリート空隙内に空間が生じ，未凍結水が流れ込み凍結することで再び空隙が氷で満たされた状態になることが考えられる [3]。融解時には収縮していた氷が膨張し，その膨張圧が硬化ペーストを膨張変形させ，これらの変形がポーラスコンクリートの劣化要因となったとも考えられる。

4. まとめ

天然ゼオライト粗骨材を用いたポーラスコンクリートは，設置環境により変化する飽水度により劣化の度合いが大きく異なる結果となった。この劣化挙動と劣化抑制因子として，空隙中の水分凍結の影響を詳細に検討する必要があるが，ゼオライト中の細孔構造が強く影響しているものと考えられる。

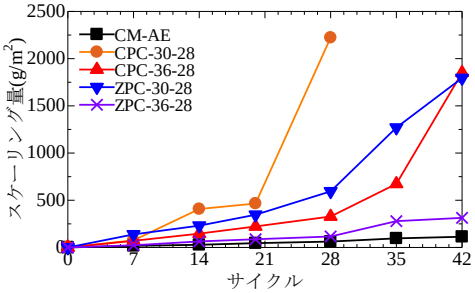

図 2　スケーリング試験結果

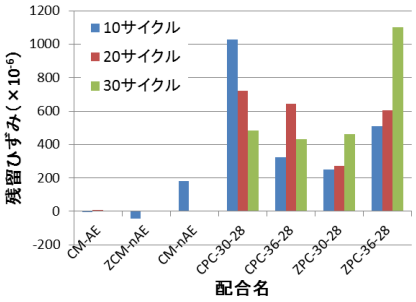

図 3　配合毎の残留ひずみ

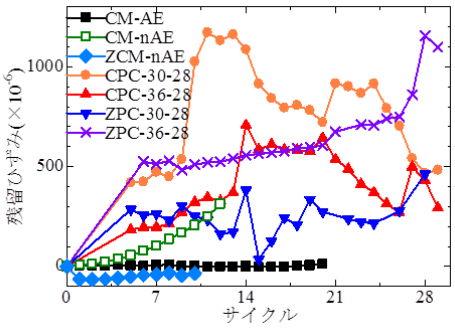

図 4　配合毎の残留ひずみ 2

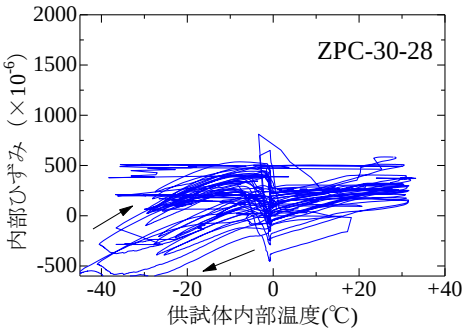

図 5　内部ひずみ（ZPC-30-28）

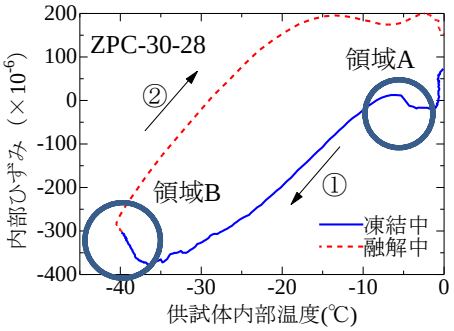

図 6　3 サイクル目での凍結融解挙動

参考文献：1)徳重ほか：凍結融解を受ける天然ゼオライトを用いたポーラスコンクリートのスケーリングと変形挙動，セメント・コンクリート論文集，Vol.67，pp.434-440(2012)
2)中村ほか：ポーラスコンクリートの凍結融解における吸水特性とスケーリング劣化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31,No.1,1171-1176(2009)
3) V.P.Grübl: Über die Rolle des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe, Beton, J-31,H.2,pp.54-58(1981)