

論文 ポーラスコンクリートのアルカリ骨材反応特性

小林隆芳*¹・長岡誠一*²・君島健之*³

要旨：本研究では、ポーラスコンクリートのアルカリ骨材反応特性を把握するために、アルカリ骨材反応促進試験を行い、ポーラスコンクリートにおいてはアルカリ骨材反応による過度な膨張が発生しないことを確認した。一方で、普通コンクリートと同様にアルカリ骨材反応によるアルカリシリケートゲルの生成が認められたことから、ポーラスコンクリートではゲルの吸水による膨張が起きても、特徴である空隙の存在により膨張が吸収され、コンクリート自体の膨張量が低減されたと推測できる。

キーワード：ポーラスコンクリート、アルカリ骨材反応、アルカリシリケートゲル

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、数多くの優れた特性を有しており、環境負荷を低減させるためや動植物等生物との共生を図るために、様々な分野において適用されてきている。また、適用範囲の拡大とともに、これまであまり問題とされていなかった特性、例えば耐久性などについても徐々に明らかになってきている。しかしながら、これまでのポーラスコンクリートの適用範囲においては考慮する必要がなかったためか、アルカリ骨材反応に対しては全く検討されていないようである¹⁾。

普通コンクリートを対象とした既往の報告によると、アルカリ骨材反応による膨張は、AE剤により空気を連行することで低減することが示されている²⁾。また、アルカリ骨材反応によりアルカリシリケートゲルが生成し吸水膨張を起こしても、空気泡に吸収されることも示されている³⁾。ポーラスコンクリートの空隙は、AE剤により導入される気泡とは異なり、そのほとんどが連続しており、大きさも異なるが、一般のコンクリートに比べてその量は多いことから、ポーラスコンクリートにおいてもアルカリ骨材反応による膨張は緩和されると考えられる。

一方、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張が緩和されても、ミクロな領域、すなわちセメントペーストあるいはモルタルと粗骨材の界面においては、ひび割れや付着切れが発生し、強度低下等の損傷が生じることなども考えられる。また、ポーラスコンクリートではセメントペーストあるいはモルタルの露出面積が大きいいため、反応に必要なアルカリが溶出し、反応性骨材を使用してもアルカリ骨材反応自体が抑制される可能性も考えられる。

本研究では、ポーラスコンクリートのアルカリ骨材反応による膨張特性を明らかにすることを目的に、反応性骨材を使用してアルカリ骨材反応促進試験を行い、ポーラスコンクリートのアルカリ骨材反応挙動に関する検討を行った。

2. 試験概要

2.1 試験項目および試験方法

試験項目は、アルカリ骨材反応による膨張量測定および超音波を用いたミクロ領域の破壊診断とした。膨張量測定は、打設の翌日に脱型した10×10×40cm 供試体の側面にコンタクトゲージを添付し、ホイットモア試験機を用いたポーラスコンクリートの長さ変化測定として行っ

* 1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 研究員 (正会員)

* 2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 主任研究員 (正会員)

* 3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 所長 (正会員)

た。破壊診断は、供試体両端面にセメントペーストでキャッピングを行い、超音波伝播速度測定として行った。なお、供試体の養生は JCI「コンクリートの潜在反応性試験方法(案)」⁴⁾に準じて行った。促進養生期間は 6 ヶ月間とし、基長測定から 20 日、40 日、60 日、以降 30 日毎に測定を行った。

さらに、反応性骨材を使用したポーラスコンクリートのアルカリ骨材反応メカニズムを考察するために、促進養生終了後の供試体で骨材周辺に生成するアルカリシリケートゲルや骨材の反応リムの目視観察を行うとともに、水溶性アルカリと不溶残分の化学分析を行った。なお水溶性アルカリ分析は、土木研究センター「コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法(案)」⁵⁾に、不溶残分分析は、セメント協会「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告」⁶⁾に記載されている方法に準じて行った。

2.2 要因の組合せ

アルカリ反応性骨材を使用したポーラスコンクリートの膨張特性を把握するために、表-1 に示す要因に着目して実験を行った。シリーズ I では、アルカリ骨材反応性試験で有害判定(以下、区分 B)の骨材を 13mm ふるいでふるい分けを行い、粗骨材径の違いが膨張量に及ぼす影響を検討した。また、アルカリ骨材反応性試験で無害判定(以下、区分 A)の骨材との比較も行った。さらに、2 種類のセメントを使用して、

表-1 着目要因と水準

シリーズ	粗骨材	セメント	NaOH	空隙率
I	3 種類	2 種類	2 水準	---
II	---	---	---	5 水準

セメントの違いが膨張量に及ぼす影響を検討した。添加する水酸化ナトリウム量は、2.4kg/m³と 4.8kg/m³の 2 水準とし、アルカリ添加量の膨張量に及ぼす影響も併せて検討した。シリーズ II では、ポーラスコンクリートの空隙率を 5 水準変化させ、空隙率がアルカリ骨材反応による膨張量に及ぼす影響を検討した。

2.3 使用材料およびコンクリート配合

実験に使用した材料を表-2 に、シリーズ I におけるポーラスコンクリートの配合を表-3 に、シリーズ II における配合を表-4 に示す。また、比較対象として用いた普通コンクリートの配合を表-5 に示す。なお、シリーズ I ではポーラスコンクリートの空隙率は 25%とした。また、シリーズ II では添加する水酸化ナトリウム量は 4.8kg/m³とした。シリーズ I および II のポーラスコンクリートでは高性能 AE 減水剤量でフレッシュ性状の調整を行った。また、比較対象とした普通コンクリートでは、粗骨材として区分 B の 20~13mm(5GB)と区分 A の 13~5mm(6GA)を砕石 2005 の粒度範囲に入るように混合して使用し、セメントは普通ポルトランドセメントとした。

表-2 使用材料

材料	種類	記号	物性値等
セメント	普通ポルトランドセメント	NC	密度 3.15g/cm ³ , R ₂ O 0.58%
	高炉セメント B 種	BB	密度 3.04g/cm ³
粗骨材	古銅輝石安山岩(区分 B) S _C :775mmol/l, R _C :170mmol/l	20~13mm	5GB 表乾密度 2.69g/cm ³ , 実績率 58.2%
		13~5mm	6GB 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実績率 58.0%
	硬質砂岩(区分 A) S _C :43mmol/l, R _C :152mmol/l	20~13mm	5GA 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実績率 58.1%
		13~5mm	6GA 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実績率 58.0%
細骨材	川砂	S	表乾密度 2.60g/cm ³
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	AE 減水剤	AE	リガニンスルホン酸系

3. 試験結果

3.1 膨張量測定結果

(1) シリーズ I

使用骨材の種類別にコンクリートバーの膨張量を図-1に示す。区分Bの骨材を主として使用した普通コンクリートでは、促進養生期間120日で判定基準⁴⁾の 1000×10^{-6} 以上の膨張を示し、180日で膨張量は 1200×10^{-6} を超えている。また、促進養生開始から20日経過時点で、コンクリート表面に微細なひび割れを確認した。ポーラスコンクリートでは、区分Bの骨材を使用した場合、区分Aの骨材を使用した場合に比べ膨張を示す傾向が認められるが、180日経過時点でも過度な膨張は認められなかった。また、目視観察においてはセメントペーストのひび割れ等も確認できなかった。さらに、区分Bの骨材を使用した場合、骨材径の違いによる影響は認められず、膨張量に差はほとんど見られなかった。

コンクリートバーの膨張に及ぼすセメント種類の影響を図-2に示す。ポーラスコンクリートでは、区分Bの骨材を使用しても膨張が小さ

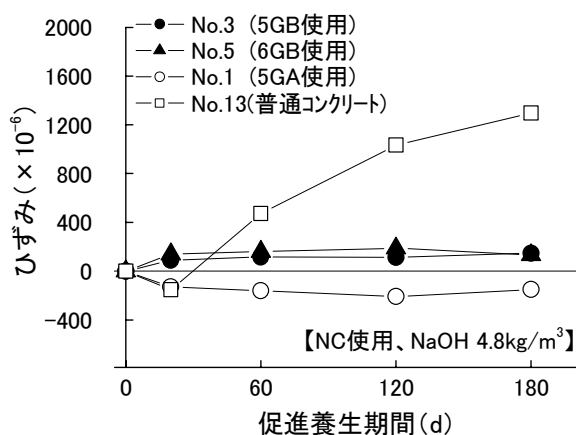


図-1 骨材の種類別の膨張量

く明確ではないが、セメントに高炉セメントB種を使用すると、普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べ、さらに膨張量が少なくなる傾向がうかがえる。

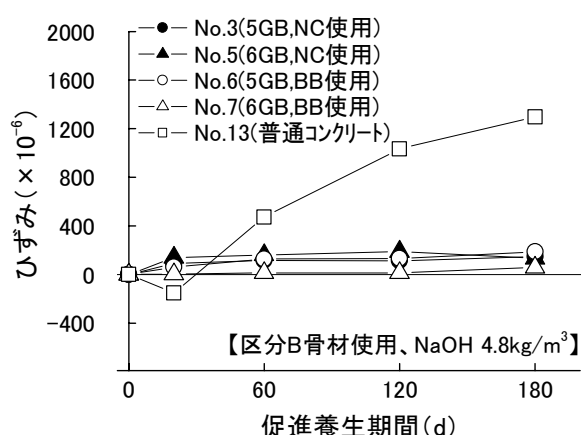


図-2 膨張に及ぼすセメント種類の影響

表-3 ポーラスコンクリート配合(シリーズ I)

No.	W/C (%)	セメント種類	骨材種類	NaOH量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)			R ₂ O (kg/m ³)
					W	C	G	
1	28	NC	5GA	4.8	75	268	1512	6.4
2			5GB	2.4				4.0
3				4.8				6.4
4			6GB	2.4				4.0
5				4.8				6.4
6	28	BB	5GB	4.8	74	263	1512	---
7			6GB	4.8				---

表-4 ポーラスコンクリート配合(シリーズ II)

No.	W/C (%)	材料種類	NaOH量 (kg/m ³)	空隙 (%)	単位量(kg/m ³)			R ₂ O (kg/m ³)
					W	C	G	
8	28	NC・5GB	4.8	5	172	616	1512	8.4
9				10	149	532	1512	7.9
10				15	126	449	1512	7.4
11				20	102	365	1512	6.9
12				25	75	268	1512	6.4

表-5 普通コンクリート配合

No	W/C (%)	NaOH量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)					R ₂ O (kg/m ³)
			W	NC	S	5GB	6GA	
13	55	4.8	170	309	804	687	295	6.6

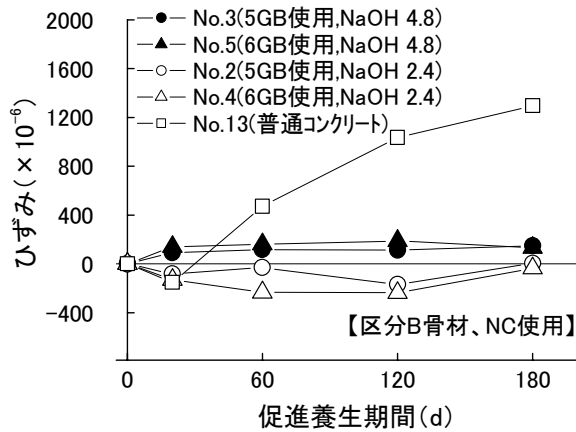


図-3 膨張に及ぼすアルカリ添加量の影響

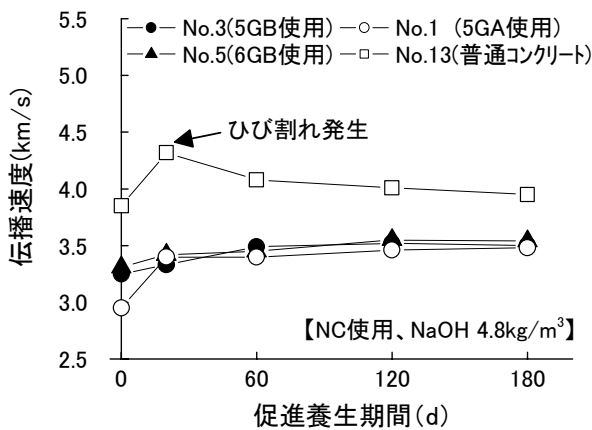


図-5 超音波伝播速度に与える骨材径・反応性骨材有無による影響

コンクリートバーの膨張に及ぼすアルカリ添加量の影響を図-3に示す。骨材の種類に関係なく、ポーラスコンクリートにおいてもアルカリ添加量が増加すると膨張量が若干増大する傾向がうかがえる。しかし、添加水酸化ナトリウム量が 2.4kg/m^3 での膨張量は、区分Aの骨材を使用したものとほぼ同等(図-1参照)であり、 4.8kg/m^3 とした場合でも膨張量は判定基準の 1000×10^{-6} に比べてかなり小さいため、ポーラスコンクリートでは区分Bの骨材を使用してアルカリ添加量を多くしても、アルカリ骨材反応による有害な膨張は生じないものと推察される。

(2) シリーズII

空隙率を変化させた場合の膨張量測定結果を図-4に示す。本ポーラスコンクリートにおいては、空隙率の変化に伴って単位セメント量が

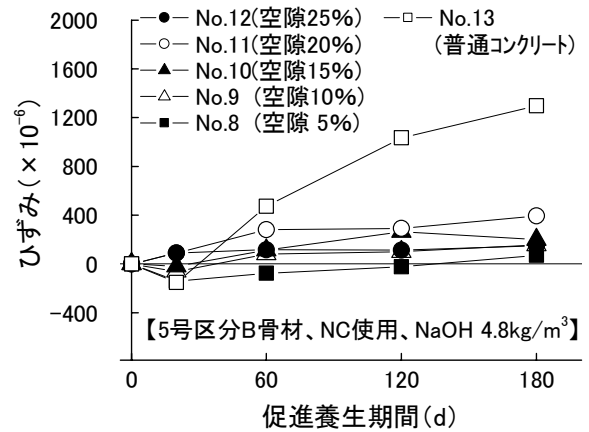


図-4 膨張に及ぼす空隙率の影響

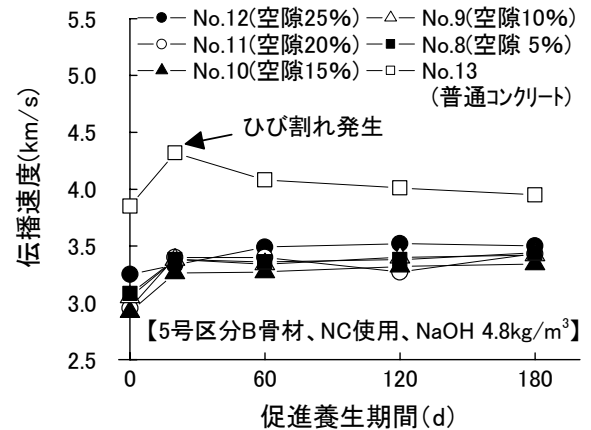


図-6 超音波伝播速度に与える空隙率の影響

変化しており、アルカリ添加量が一定であっても、アルカリ総量は空隙率の減少に伴って多くなっている。しかしながら、空隙率を5%まで小さくしても過度な膨張は認められず、空隙率と膨張量の間にも相関が認められなかった。したがって、空隙が5%以上確保されているようなポーラスコンクリートにおいては、区分Bの骨材を使用してもアルカリ骨材反応による有害な膨張は生じないものと考えられる。

3.2 超音波診断結果

超音波伝播速度測定結果の一例を図-5に、空隙率による比較を図-6に示す。区分Bの骨材を主として使用した普通コンクリートでは、コンクリート表面に微細なひび割れが発生した時期から超音波伝播速度は大幅に低下している。

一方、ポーラスコンクリートでは超音波伝播

速度の低下は全く認められない。どの程度のマイクロクラックまで超音波伝播速度の測定によって検出できるのかは、測定機の時間分解能等に影響されるため明らかではないが、少なくともポーラスコンクリートにおいては、超音波伝播速度を低下させるほどのひび割れは生じていないことが明らかである。図-6に示したように空隙率を変化させた場合も同様の傾向であり、ポーラスコンクリートにおける超音波伝播速度は安定しており、区分Bの骨材を使用しても、5%以上の空隙が存在すれば、コンクリートの微視的な破壊も起こらないものと考えられる。この様な傾向は、セメント種類やアルカリ添加量を変えた場合も同様であった。

3.3 化学分析結果

促進試験終了後、10×10×40cm 供試体の中央部から2cm厚さの試料を抜き出し、全量微粉砕したものを用いて水溶性アルカリ量を測定した。測定結果をセメントペーストに対する水溶性アルカリ量として表-6に示す。なお、計算に当たっては不溶残分を全て骨材と見なした。

測定結果より、骨材径および空隙率に関係なく、ポーラスコンクリート中の水溶性アルカリ量は普通コンクリートと同等もしくはそれ以上の値となっている。このことは、ポーラスコンクリートにおいても水溶性アルカリの流出がないことを示しており、反応に寄与するアルカリは十分に保持されていたと考えられる。

3.4 供試体観察結果

化学分析に用いたものと同様の試験片を温度20℃、湿度100%の湿潤箱内で一週間保存した後、粗骨材とセメントペーストの界面におけるひび割れ観察、骨材周辺のアルカリシリケートゲルおよび骨材の反応リムの目視観察を行った。区分Bの骨材を使用したポーラスコンクリートの骨材周辺を接写した代表例を写真-1に、区分Aの骨材を使用したものを写真-2に、普通

表-6 水溶性アルカリ量測定結果

シリーズ	骨材種類	NaOH量 (kg/m ³)	空隙率 (%)	セメントペーストに対する 水溶性アルカリ量(kg/m ³)		
				Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O
I	5GB	2.4	25	0.58	0.29	0.77
		4.8		0.81	0.20	0.94
	6GB	2.4		0.48	0.24	0.64
		4.8		0.85	0.15	0.95
II	5GB	4.8	5	0.53	0.17	0.64
			10	0.60	0.20	0.73
			15	0.63	0.17	0.74
			20	0.60	0.13	0.69
			25	0.81	0.20	0.94
普通コンクリート		4.8	---	0.60	0.18	0.72

コンクリートの代表例を写真-3に示す。

目視による観察では、普通コンクリートでひび割れが確認されたが、ポーラスコンクリートでは、いずれの供試体においてもひび割れは確認されず骨材の剥離も認められなかった。

骨材周辺を接写した結果より、同じ空隙率のポーラスコンクリートにおいて、使用骨材の種類により明らかな相違が見られる。すなわち、写真-2のように区分Aの骨材を使用したものでは、アルカリシリケートゲルや骨材の反応リムが見られないのに対し、例えば写真-1の空隙率25%のように区分Bの骨材を使用したものでは、アルカリシリケートゲルと思われる透明な析出物が確認でき、骨材断面に明らかな反応リムが認められる。これは空隙率5%においても同様であり、明確な反応リムは見られないものの白色不透明に変色したゲルの生成が認められる。一方、写真-3に示した普通コンクリートでは、ゲルの析出だけでなく骨材とモルタル部の剥離(写真右下)が見られ、ゲルの吸水膨張によりコンクリートにひび割れが生じている。

この様な現象は、ポーラスコンクリートでは見られないことから、アルカリ骨材反応により生じたアルカリシリケートゲルが吸水膨張しても、

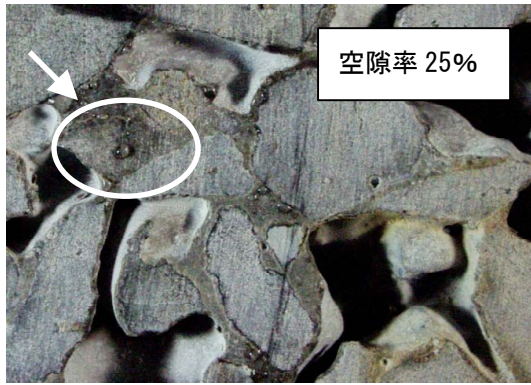


写真-1 ポーラスコンクリート(区分 B 骨材)

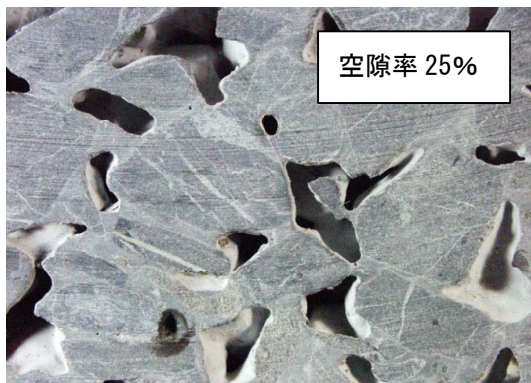


写真-2 ポーラスコンクリート(区分 A 骨材)

写真-3 普通コンクリート

空隙の存在により膨張圧が吸収されるため、有害な膨張に至らないと推察される。言い換えると、区分 B の骨材を使用した場合、有害な膨張を示さないものの、ポーラスコンクリートでもアルカリ骨材反応は生ずることが明らかである。

4. まとめ

- (1) ポーラスコンクリートにおいても、条件が整えばアルカリ骨材反応は生じ、アルカリシリケートゲルの生成や骨材の反応リムが認められた。空隙の存在により膨張が吸収されコンクリート自体の膨張量が低減されたと考えられる。
- (2) ポーラスコンクリートでは、アルカリ骨材反応が生じて、ひび割れの発生や、超音波伝播速度の低下につながる過度な膨張は起こらなかった。
- (3) ポーラスコンクリートでは、アルカリ骨材反応による膨張量が小さいため、骨材径、セメント種類および空隙率が膨張量に及ぼす影響はきわめて小さかった。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，p.90，2003.5
- 2) McCoy, W.J. and Caldwell, A.G. : New Approach to Inhibiting Alkali-Aggregate Expansion, Journal of The American Concrete Institute, pp.693-706, May.1951
- 3) Jensen, A.D. et al. : Studies of Alkali-Silica Reaction -Part II Effect of Air-Entrainment on Expansion, Cement and Concrete Research, Vol.14, pp.311-314, Sep.1984
- 4) 日本コンクリート工学協会：アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書，235p., 1989.7
- 5) 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発 土木構造物に関する研究成果 附属資料 3.3, pp.159-160, 1989.5
- 6) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-18, pp.353-411, 1969.12