

論文 カナダ法を援用したポーラスコンクリートのアルカリシリカ反応特性に関する一検討

坂本 英輔*1・杉原 大祐*2

要旨: 本研究では、ポーラスコンクリート（以下、POC と略記）にカナダ法を援用し、POC のアルカリシリカ反応の基礎特性とその抑制策として亜硝酸リチウムの効果を検討するとともに、供試体条件がカナダ法の結果に及ぼす影響について検討した。その結果、POC にカナダ法を援用した場合、有害となるほどのアルカリシリカ反応による膨張が生じる場合があることが確認された。また、カナダ法において、コンクリートでは、直径が大きい、または型枠で供試体を作製した場合は、危険側の評価になるが、POC においては供試体の直径や作製方法が膨張率に及ぼす影響は小さいことが明らかになった。

キーワード: ポーラスコンクリート、アルカリシリカ反応、カナダ法、亜硝酸リチウム、圧縮強度

1. はじめに

POC は、粗骨材同士をセメントペーストやモルタルによって連結させたおこし状のコンクリートである。その内部には連続もしくは独立した空隙を持っており、それらの空隙によって得られるさまざまな性能を活用し、社会基盤材料として道路舗装、河川護岸、法面保護などに幅広く用いられている¹⁾。国内にも長期間供用されている POC 構造物もあり、現場で考える多様な POC の耐久性に関する検討を進める必要がある。耐久性の一つである POC のアルカリシリカ反応については、既往の研究が少なく^{2), 3)}、アルカリシリカ反応性試験方法も確立されていないのが現状である。POC の骨材には、一般的に単一粒度の砕石が用いられることが望ましく、普通コンクリートに用いられるコンクリート用砕石と同様に様々な岩種の骨材が用いられている。既往の調査では、日本各地にはアルカリシリカ反応性骨材が分布していると考えられている。そのような現状から、筆者らは、POC においてもアルカリシリカ反応特性に関するデータを蓄積し、アルカリシリカ反応性試験方法を確立することが重要であると考え、既報⁴⁾では、POC のアルカリシリカ反応性試験方法として、JIS A 1804 および JCI AAR-3 を援用した試験方法について検討した。

本研究では、POC にカナダ法を援用し、POC のアルカリシリカ反応の基礎特性およびその抑制策として亜硝酸リチウムの効果を実験的に検討するとともに、供試体の直径や作製方法といった供試体条件がカナダ法の結果に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

本研究では、2 シリーズの実験を実施した。シリーズ I では、POC にカナダ法を援用し、POC のアルカリシリカ

反応の基礎特性およびその抑制策として亜硝酸リチウムの効果を検討した。シリーズ II では、シリーズ I での結果を受け、供試体条件がカナダ法の結果に及ぼす影響について検討した。

2.1 実験の要因および水準

表-1 に実験の要因および水準を示す。シリーズ I では、反応性骨材と反応性のない骨材（以下、普通骨材と略記）の比較による基礎特性の把握と亜硝酸リチウムの有無による効果について検討した。なお、反応促進装置の促進槽の容量および亜硝酸リチウムの溶出を考慮し、反応性骨材・亜硝酸リチウム無し、普通骨材・亜硝酸リチウム無し、反応性骨材・亜硝酸リチウム有りの 3 回の実験を行った。また、比較用にコンクリート供試体も作製した。シリーズ II では、シリーズ I での結果を受け、吸水膨張率の把握と試料の種類、供試体の直径および作製方法がカナダ法の結果に及ぼす影響について検討した。なお、シリーズ II の POC は、設計空隙率 22.5% に固定した。両シリーズともに、測定項目はコンタクトゲージを

表-1 実験の要因および水準
(a) シリーズ I

要因	実験水準
骨材の種類	普通骨材, 反応性骨材
設計空隙率(%)	15, 22.5, 30
亜硝酸リチウム	無, 有*

[註]*: 反応性骨材のみ検討

(b) シリーズ II

要因	実験水準
試料の種類	POC, コンクリート
供試体の直径(mm)	φ100, φ50
供試体の作製方法	型枠, コア採取*

[註]*: 供試体の直径50mmのみ検討

*1 広島工業大学 工学部建築工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 (一財) 建材試験センター西日本試験所 主査 修士 (工学) (正会員)

表-2 使用材料の特性値

材料	種類	特性値
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16 g/cm ³ , 総アルカリ量:0.55%(シリーズI), 0.47%(シリーズII)
細骨材	砕砂	表乾密度:2.61 g/cm ³ , 吸水率:3.08%
粗骨材 (6号砕石)	普通骨材(石灰石)	粒径:5~13 mm, 表乾密度:2.69 g/cm ³ , 吸水率:0.37%, 実積率:60.0%
	反応性骨材(安山岩)	粒径:5~13 mm, 表乾密度:2.59 g/cm ³ , 吸水率:0.87%, 実積率:58.1%
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

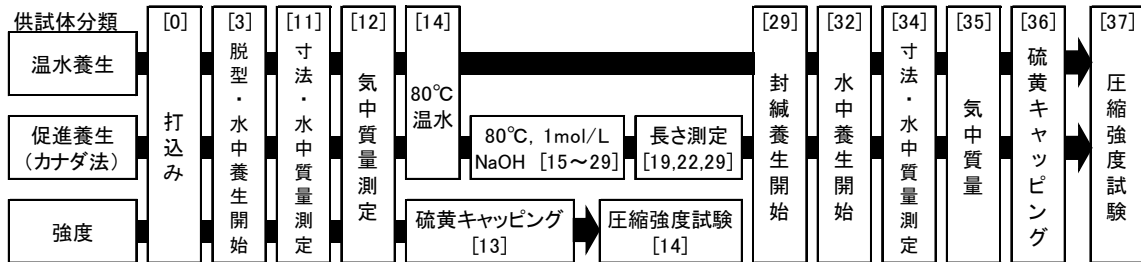


図-1 実験のフロー(鉤括弧内はシリーズIでの材齢)

用いた長さ測定と養生前後の空隙率や密度および圧縮強度である。

2.2 使用材料および調査表

表-2 に使用材料の特性値を示す。使用材料は既報⁴⁾と同様であり、普通骨材(岩種:石灰石)および反応性骨材(岩種:安山岩)は、あらかじめJISA 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(化学法)」、JISA 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)」およびJIS A 1804の試験を実施し、アルカリシリカ反応性の確認を行ったものを使用した。なお、亜硝酸リチウムの添加量は、設定した総アルカリ量に対してLi/Naのモル比が0.8となるよう設定した。表-3 に調査表を示す。シリーズIでは、全ての調査を使用し、シリーズIIでは、POCではNo.5、コンクリートではNo.2の調査を使用した。

2.3 実験方法

(1) シリーズI

図-1に実験のフローを示す。「強度」用供試体は、温水養生や促進養生(カナダ法)を行う直前の圧縮強度を得るためのものである。「温水養生」用供試体は、「促進養生(カナダ法)」用供試体と温度履歴が同じ供試体であり、水酸化ナトリウム溶液による影響を比較するためのものである。

本来、カナダ法は、φ50mmで長さ150mm以上のコンクリートコアに推奨される促進試験であるが、本研究では、プラスチック製型枠を使用して作製したφ100×200mmのPOC供試体に援用することにした。POCとの比較用のコンクリート供試体は、内径51mmの塩ビ管をシリコンでコンパネに接着した自作型枠により作製した。

表-3 調査表

(a) POC

No.	骨材の種類	亜硝酸リチウム	W/C (%)	設計空隙率 (%)	単位質量(kg/m ³)			LiNO ₂ 添加量 (kg/m ³)	
					W	C	G		
1	普通	無	25	15	110	442	1582	0	
2				22.5	77	309			
3				30	44	177			
4	反応性			有	15	119	474		1474
5					22.5	85	342		
6					30	52	209		
7		15	119		474				
8		22.5	85		342				
9			30	52	209		8.9		
								6.4	
								3.9	

[註] W/C:水セメント比, W:水, C:セメント, G:粗骨材, LiNO₂:亜硝酸リチウム

(b) コンクリート

No.	骨材の種類	亜硝酸リチウム	W/C (%)	空気量 (%)	単位質量(kg/m ³)				LiNO ₂ 添加量 (kg/m ³)
					W	C	S	G	
1	普通	無	55	4.0	175	317	894	922	0
2	反応性							866	
3			有						

[註] W/C:水セメント比, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, LiNO₂:亜硝酸リチウム

そのため、コンクリート供試体の寸法はφ51×200mmであるが、便宜的に供試体直径をφ50mmと表現する。

練混ぜには、POCでは65Lの揺動式オムニミキサを使用し、コンクリートでは60Lの2軸強制練ミキサを用いた。過去の練混ぜ実績から決定した調査を用いて、練混ぜおよび打込みを行った。締固めは、2層各層を突き棒で締固め、木槌で叩いた後、ハンマドリルで振動を与え、小手で仕上げた。なお、設計空隙率によって、突き回数および振動時間を変化させた。POC供試体、φ50mmコンクリート供試体ともに10体ずつ作製した。

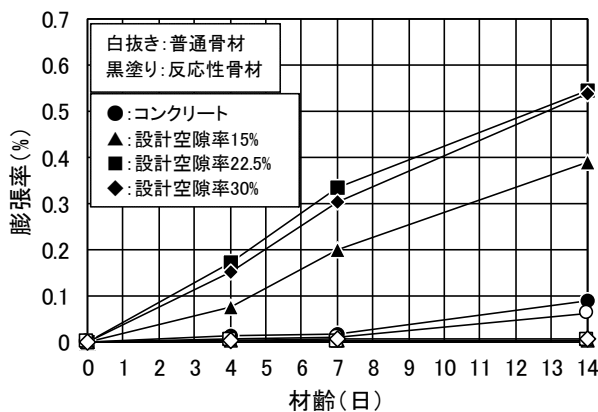
材齢3日で脱型した後、水中養生を行った。その後、材齢11日で供試体の直径、高さおよび水中質量を、材齢12日に気中質量を測定した。なお、φ50mmコンクリート供試体は、水中養生終了後に端面を研磨した。次に、

POCではJCIの「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」¹⁾に基づき容積法により空隙率を算出し、コンクリートでは密度を算出した。10体の供試体を、POCでは空隙率が、コンクリートでは密度がそれぞれ偏らないように、「強度」用4体、「温水養生」用3体、「促進養生(カナダ法)」用3体に分類した。

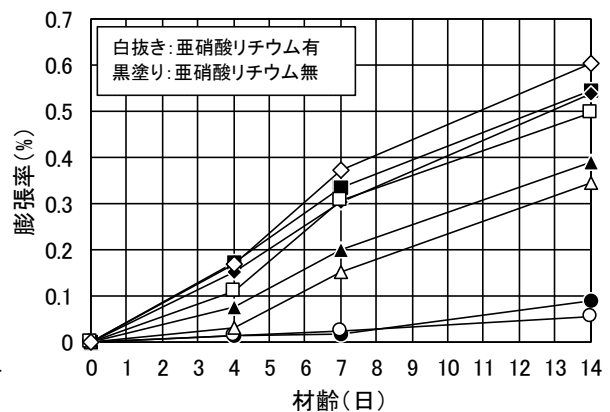
「強度」用供試体は、材齢13日にPOCのみ硫黄キャッピングし、材齢14日で圧縮強度試験を行った。「温水養生」用供試体は、材齢14日に温度 $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ の温水槽に沈め、温水養生を材齢29日まで行った後は封緘養生とした。材齢32日に水中養生を開始し、材齢34日に供試体の直径、高さおよび水中質量を、材齢35日に気中質量の測定を行った。その後、材齢36日にPOCのみ硫黄キャッピングし、材齢37日で圧縮強度試験を行った。「促進養生(カナダ法)」用供試体は、材齢14日に供試体にステンレスバンドを100mm間隔で装着し、温度 $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ の温水に沈め24時間保存した。材齢15日に温水から取り出し、初期長さを測定し、 $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ で $1\pm 0.01\text{mol/l}$ の水酸化ナトリウム溶液で満たされた反応促進装置(写真-1参照)にて養生を開始した。長さの測定は水酸化ナトリウム溶液浸漬後4, 7, 14日で行った。促進養生が終了した材齢29日に促進槽から取り出した後は封緘養生とし、それ以降は「温水養生」用供試体と同様である。



写真-1 カナダ法に用いた反応促進装置



(a) 基礎特性の把握



(b) 亜硝酸リチウムの効果

図-2 膨張率と材齢の関係(シリーズI)

(2) シリーズII

POCとコンクリートともに、 $\phi 100\times 200\text{mm}$ 供試体を20体と $\phi 51\times 200\text{mm}$ 供試体を10体作製した。材齢10日にコアドリルを用いて $\phi 100\times 200\text{mm}$ 供試体のうち10体から $\phi 50\times 200\text{mm}$ のコア供試体を採取した。シリーズIIでは、吸水膨張の程度を把握するため、「温水養生」用供試体にもステンレスバンドを装着し初期長さの測定を行った。これ以降から材齢29日までシリーズIと同様である。材齢29日に長さ測定をした後、封緘養生とし、材齢30日に水中養生を開始し、材齢33日に供試体の直径、高さおよび水中質量、材齢34日に気中質量の測定を行った。その後、材齢35日にPOCのみ硫黄キャッピングし、材齢36日で圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果

3.1 シリーズI

図-2に膨張率と材齢の関係を示す。図-2(a)によれば、コンクリートとPOCともに、反応性骨材は、普通骨材と比べて膨張率が大きくなっている。POCでは、その差が非常に大きい、コンクリートにおいては小さい。またPOCでは、空隙率が小さな設計空隙率15%においては膨張率が小さくなっている。これは、空隙率が大きい場合、セメントペーストの膜厚が薄くなることから、骨材内やセメントペーストと骨材との界面に生じるアルカリシリカ反応によるひび割れによって、骨材の割れや付着切れが発生しやすくなるためと考えられる(写真-2参照)。ここで、ASTMC 1260の「測定材齢14日での膨張率が0.1%未満の場合を無害」とする判定基準を用いると、POCにおいては、反応性骨材を使用した場合、もっとも膨張率が小さい供試体においても膨張率が0.4%程度となっている。このことから、POCにおいても、有害となるほどのアルカリシリカ反応による膨張が起きる可能性があることが分かる。一方、コンクリートについては、膨張率が0.087%となり、反応性骨材を用いた供試

体においても無害と判定される結果となった。これは、コア供試体に適用する試験方法を型枠で作製した供試体に適用したことが原因と考えられるため、供試体条件がカナダ法の結果に及ぼす影響をシリーズIIで検討することとした。

次に、図-2 (b) によれば、亜硝酸リチウムによる抑制効果は小さく、設計空隙率 30%においては逆に膨張率が增加している。圧縮強度試験後の供試体に、リチウムイオン含有量の大小を相対的に示す指標となる呈色反応試薬 TDI⁵⁾ を塗布したところ、設計空隙率 30%の供試体のみ、全く変色せず、その他の供試体は薄く呈色した。この結果から、水酸化ナトリウム溶液中に亜硝酸リチウ

ムが溶出したため、本来の亜硝酸リチウムの抑制効果が発揮されなかったと考えられる。以上のことから、カナ

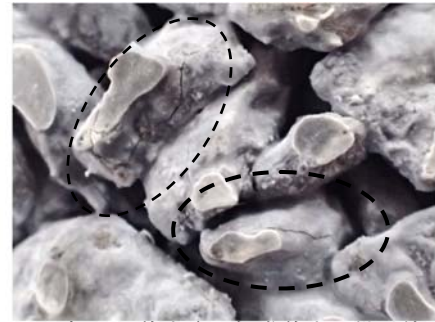
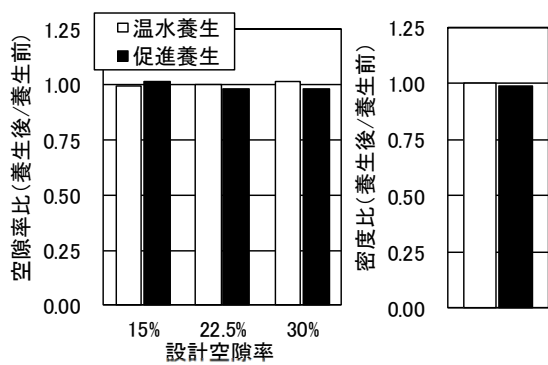
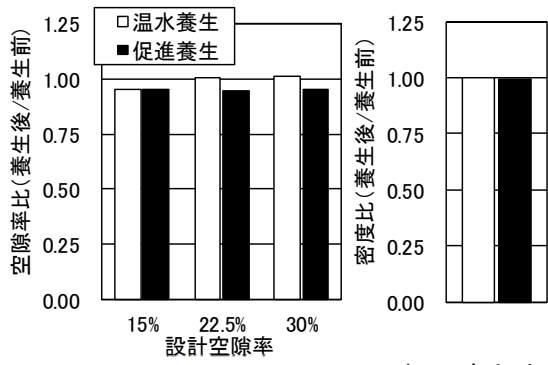


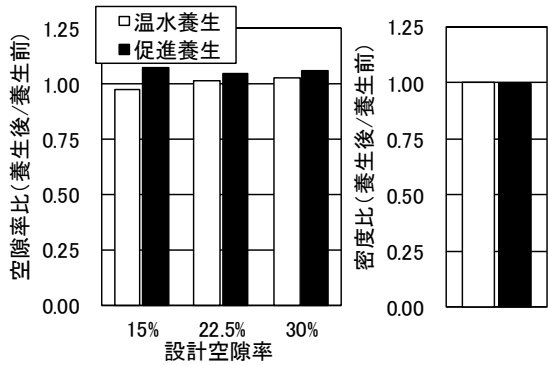
写真-2 養生後の促進養生用供試体 (シリーズI: 反応性骨材・設計空隙率 22.5%)



(a) 反応性骨材・亜硝酸リチウム無し

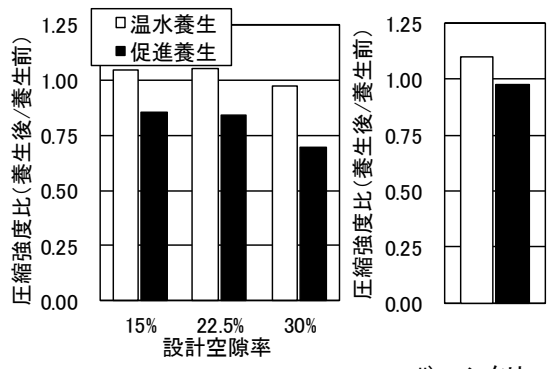


(b) 普通骨材・亜硝酸リチウム無し

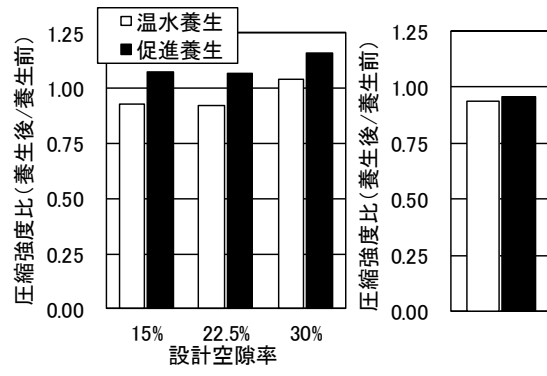


(c) 反応性骨材・亜硝酸リチウム有り

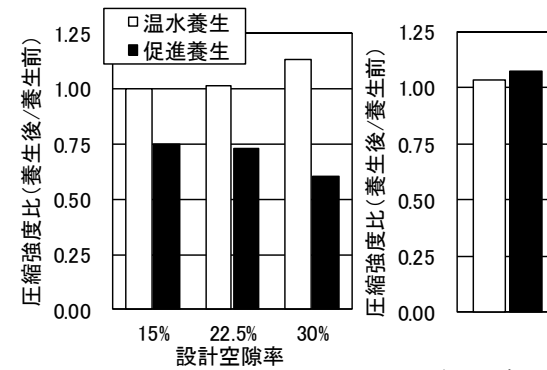
図-3 空隙率比および密度比(シリーズI)



(a) 反応性骨材・亜硝酸リチウム無し



(b) 普通骨材・亜硝酸リチウム無し



(c) 反応性骨材・亜硝酸リチウム有り

図-4 圧縮強度比(シリーズI)

ダ法は、抑制物質が溶液中に溶出するような場合、その抑制効果を評価する試験方法としては適さないと言える。

図-3にPOCの空隙率比およびコンクリートの密度比を示す。空隙率比および密度比とは、温水養生および促進養生の各養生後の空隙率および密度を各養生前のそれと除したものである。同図によれば、POCの温水養生では空隙率比の変化が小さく明確な傾向はなく、コンクリートでは密度比にほとんど変化がない。POCの促進養生においては、図-3(a)の「反応性骨材・亜硝酸リチウム無し」ではほとんど変化がなく、図-3(b)の「普通骨材・亜硝酸リチウム無し」では低下傾向を示し、図-3(c)の「反応性骨材・亜硝酸リチウム有り」では増加傾向を示した。既往の研究結果によれば、アルカリシリカ反応により膨張ひずみが増加すると、圧縮強度は低下し、空隙率は増加する³⁾と報告されている。図-2の膨張率の結果を踏まえ、既往の研究結果を当てはめると、「反応性骨材・亜硝酸リチウム無し」では空隙率比は増加傾向を示し、「普通骨材・亜硝酸リチウム無し」では空隙率比が変化しないことになるが、前述した通り、本実験の範囲ではそうはならなかった。この理由については不明であるため、今後、地道にデータを蓄積して詳細を分析する必要がある。

図-4に圧縮強度比を示す。圧縮強度比とは、養生後の温水養生用および促進養生用の供試体の圧縮強度を強度用のそれと除したものである。図-4(b)を除くと、温水養生では、圧縮強度比が微増傾向を示し、促進養生では、圧縮強度比が低下傾向を示した。これは、温水養生では、温水で養生することにより水和反応が促進して強度増進したためであり、促進養生では、水和反応の強度増進よりも、アルカリシリカ反応によって生じる膨張による組織の脆弱化の影響が大きかったためと考えられる。なお、図-4(b)は、普通骨材を使用しているため、養生方法によらず、圧縮強度比は増加傾向を示すと考えられるが、温水養生供試体では低下傾向を示している。この原因は不明であるため、再実験も含め、今後の検討課題である。

図-5に膨張率（養生材齢14日）と圧縮強度比の関係を示す。なお、骨材の種類および亜硝酸リチウムの有無によらず、プロットはコンクリートとPOCで分けている。同図によれば、コンクリートとPOCともに、骨材の種類や亜硝酸リチウムの有無によらず、膨張率が大きいほど圧縮強度比が小さくなるのが分かる。これは、前述した既往の研究結果³⁾と同様の傾向であったと言える。

3.2 シリーズII

図-6に膨張率と材齢の関係を示す。図-6(a)は、温水養生の膨張率すなわち吸水膨張率を示している。試料の種類によらず、吸水膨張率は最大でも0.009%と非常

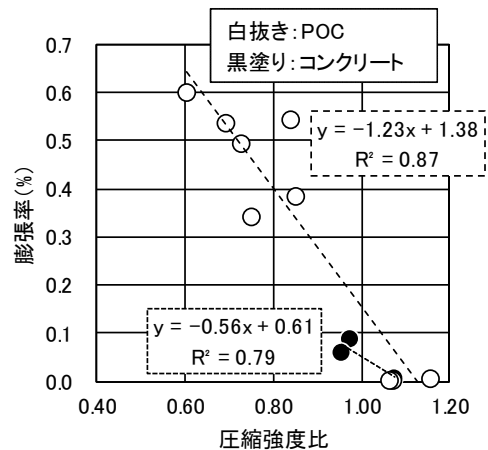
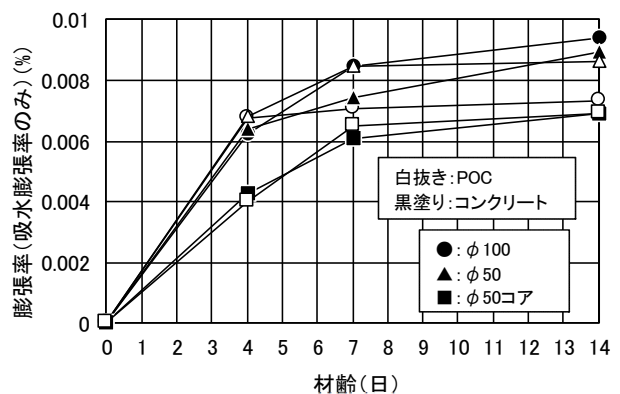
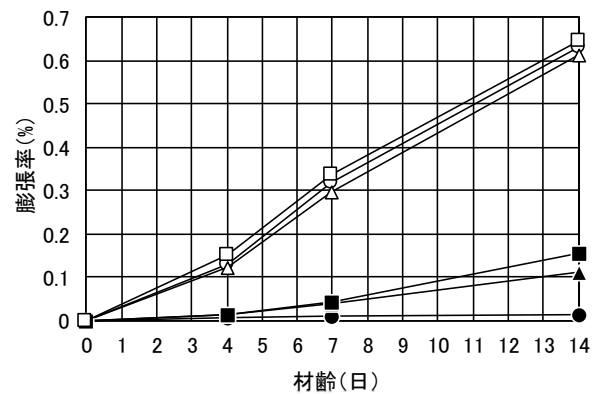


図-5 膨張率と圧縮強度比の関係(シリーズI)



(a) 温水養生(80±2°Cの温水)



(b) 促進養生(80±2°Cの1±0.01mol/l NaOH)

図-6 膨張率と材齢の関係(シリーズII)

に小さく、膨張率に及ぼす影響は小さいことが分かる。図-6(b)によれば、コンクリートにおける膨張率の大小関係は、φ100mm < φ50mm < φ50mm コアとなっている。これは、供試体の直径が小さいほど、また供試体側面に骨材の断面が露出するコアほど、供試体内部まで水酸化ナトリウム溶液が浸透しやすいためと考えられる。既往の研究では、コア直径が小さいほど膨張率が大きくなることが指摘されており⁶⁾、型枠で作製した供試体でも同様のことが言えると思われる。一方、POCについては、供試体の直径や作製方法が膨張率に及ぼす影響はほとんどないことが分かる。これは、POCでは、セメント

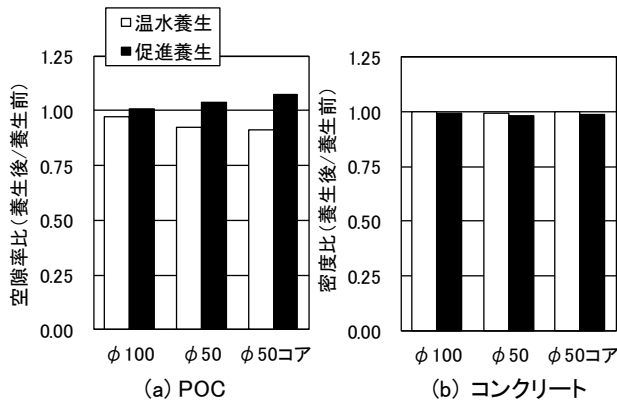


図-7 空隙率比および密度比(シリーズII)

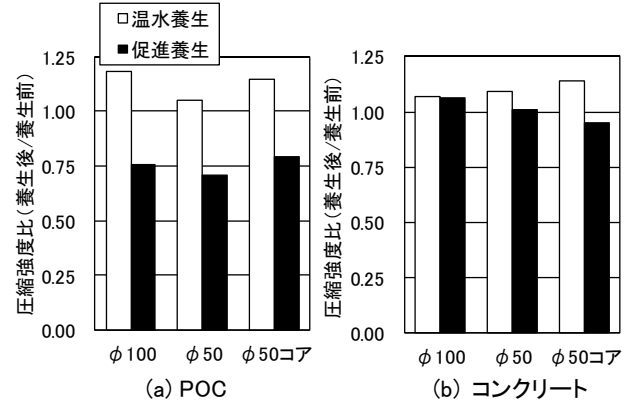


図-8 圧縮強度比(シリーズII)

量が多いうえに、セメントペーストが薄く、連続空隙を介して容易に内部まで水酸化ナトリウムが浸透するためと考えられる。

図-7に空隙率比および密度比を示す。図-7(a)のPOCでは、促進養生のφ50mmやφ50mmコアにおいて、空隙率比が増加傾向を示しており、既往の研究結果³⁾と同様の傾向を示した。なお、温水養生では低下傾向にある。一方、図-7(b)のコンクリートでは、温水養生と促進養生ともに、密度比にほとんど変化がない。

図-8に圧縮強度比を示す。図-8(a)のPOCの圧縮強度比は、図-6の膨張率の結果を踏まえると、温水養生では、水和反応の促進により強度増進したため増加傾向を示し、促進養生では、水和反応による強度増進とアルカリシリカ反応の膨張の程度によって生じる強度低下の関係によって傾向が決まるためと考えられる。図-8(b)のコンクリートの結果においてもPOCと同様の理由であると考えられる。

4. 結論

本研究では、POCにカナダ法を援用し、アルカリシリカ反応の基礎特性とその抑制策として亜硝酸リチウムの効果を検討するとともに、供試体条件がカナダ法の結果に及ぼす影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 反応性骨材を使用した場合、有害となるほどのアルカリシリカ反応による膨張が起きる可能性がある。
- (2) カナダ法は、抑制物質が溶液中に溶出するような場合、その抑制効果を評価する試験方法としては適さない。
- (3) コンクリートとPOCともに、骨材の種類や亜硝酸リチウムの有無によらず、膨張率と圧縮強度比には相関がある。
- (4) 試料の違いによらず、吸水膨張率は非常に小さく最大で0.009%程度であった。

- (5) カナダ法において、コンクリートでは、直径が大きい、または型枠で供試体を作製した場合は、危険側の評価になるが、POCにおいては供試体の直径や作製方法が膨張率に及ぼす影響は小さい。

謝辞

本研究の一部は、平成31年度科研費補助金(基盤研究(C)代表者:三重大学・畑中重光)の助成を受けたものである。本研究を進めるにあたり、建材試験センター西日本試験所の松原竜馬氏、田辺天使氏、広島工業大学卒業生の杉之原袈維君、峯尾剛志君、高崎俊一郎君のご助力を得た。また、庄野宏氏(広島工業大学教授)からは貴重なご助言を頂いた。太平洋セメント株式会社からはセメントを、株式会社フローリックからは高性能AE減水剤を、福德技研株式会社からは亜硝酸リチウムをそれぞれ提供して頂いた。ここに付記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 2015.6
- 2) 小林隆芳, 長岡誠一, 君島健之:ポーラスコンクリートのアルカリ骨材反応特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1443-1448, 2004
- 3) 阿部和宏, 半井健一郎:アルカリ反応性骨材を用いたポーラスコンクリートの性能評価, 土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度), pp.1089-1090, 2013
- 4) 坂本英輔, 杉原大祐:ポーラスコンクリートのアルカリシリカ反応特性に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1459-1464, 2019
- 5) 江良和徳:リチウム内部圧入によるアルカリシリカ反応の抑制について, コンクリート工学, Vol.50, No.2, pp.155-162, 2012
- 6) 中川裕之, 平賀由起, 真鍋良輔, 松島学:促進養生条件および採取コア径のASR膨張に与える影響, コンクリート工学, Vol.39, No.1, pp.913-918, 2017