

V-21

道内産碎石のアルカリシリカ反応性と混和材の添加効果

北海道工業大学	稲田徹也
北海道工業大学	角所伸治
北海道立工業試験場	高橋 徹
北海道立工業試験場	勝世敬一
北海道工業大学 正会員	犬塚雅生
北海道立工業試験場	長野伸泰

1. はじめに

わが国では、数年前まで、アルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリートの被害は一部の事例を除いてほとんど報告されていなかったが、昭和 50 年代後半阪神地区でコンクリート構造物に特異なひびわれが見受けられ、その後の調査で、このひびわれが ASR に起因すること、同様な被害が全国的に認められることなどが明らかとなり、社会的に大きな問題となった。

これらの事態に対処するため、建設省では昭和 61 年度にコンクリート構造物の耐久性向上を目的とした 4 項目のアルカリ骨材反応暫定対策についての通達をだし、それに対応してコンクリート関連の多くの規準、規格類の改訂が行われた。また同時に、建設省の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」などにより、土木構造物の被害状況やわが国で使用されているコンクリート用骨材のアルカリシリカ反応性に関する実態調査、ASR 試験方法、ASR の発生機構、その抑制対策および補修技術など ASR に関する多くの検討がなされている。

一方、北海道の骨材のアルカリシリカ反応性に関しては洪ほか¹⁾および中井²⁾、また、反応性のある骨材を用いた場合の抑制対策に関しては中井・大橋³⁾により検討されているほかにはあまり報告されていない。

本報告は、主としてコンクリート用に利用されている道内産の碎石を対象とし、碎石中の反応性シリカ鉱物の同定・定量、化学法およびモルタルバー法などによりアルカリシリカ反応性を検討した結果である。また、一部の碎石について、セメントアルカリ濃度の低減やフライアッシュ・高炉スラグなど混和材添加による膨張抑制効果についても検討した。

2. 実験

2. 1 材料

1) 供試用碎石

アルカリシリカ反応性試験に供する骨材と

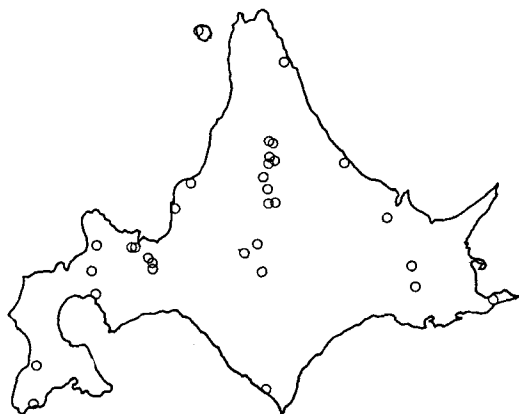


図 1 碎石試料産出位置図

Alkali-Silica Reactivity of Pit Gravels from Hokkaido District

by Tetsuya INADA, Shinji KAKUSHO, Tohru TAKAHASHI
Keiichi KATSUSE, Masao INUZUKA and Nobuhoro NAGANO

して、砕石場で採取しているコンクリート骨材用砕石 32 試料を用いた。岩種としては安山岩 22 試料 (No.1 ~ 22)、玄武岩 3 試料 (No.23 ~ 25)、輝緑岩 3 試料 (No.26 ~ 28)、かんらん岩 1 試料 (No.29)、輝緑凝灰岩 1 試料 (No.30)、砂岩 2 試料 (No.31 ~ 32) で、各砕石の産出地は図 1 に示すように全道各地に広がっている。

2) セメントおよび混和材

使用したセメントは JIS R 5210 に規定するポルトランドセメントの低アルカリ形で、セメントの全アルカリ量は $R_2O=0.31\%$ ($Na_2O=0.13\%$ 、 $K_2O=0.27\%$) である。

また、セメント置換用の混和材として、ブレン値約 $3800\text{cm}^2/\text{g}$ のフライアッシュおよび $4000\text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグを用いた。

2. 2 砕石のアルカリシリカ反応性試験

1) 砕石中のシリカ鉱物に関する検討

砕石のアルカリシリカ反応性を判断する上で重要と考えられるシリカ鉱物の同定は、安・丸嶋⁴⁾と同様、りん酸処理および粉末 X 線回折法によって行った。また、シリカ鉱物のうち反応性があると思われるクリストバライト (Cri)、トリディマイト (Tri) の定量は、それらの合成物を標準試料、アルミナを外部標準試料として粉末 X 線回折法により行った。

2) 砕石のアルカリシリカ反応性試験

JIS A 5308、付属書 7 および付属書 8 に従い化学法とモルタルバー法により砕石のアルカリシリカ反応性を調べた。

化学法での溶解シリカ量の測定は吸光光度法によった。

モルタルバー法は $R_2O=0.31\%$ のポルトランドセメント・低アルカリ形を用い、強化用アルカリ 1N-NaOH 水溶液を練り混ぜ水に加え、セメントに対しアルカリ量 $R_2O=1.20\%$ に調整した。打設 24 時間後、基長を測定し、直ちに、 $40\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 95% 以上で貯蔵し、2 週、4 週、8 週、3 ヶ月、6 ヶ月目にそれぞれ膨張量を測定した。なお、有効ゲージ長は約 130mm である。

2. 3 モルタルの膨張抑制方法に関する検討

1) アルカリ濃度と膨張量の関係

一般に使用されている市販の普通ポルトランドセメントの R_2O は 0.6 ~ 0.7% であることが知られている。また、建設省のアルカリ骨材反応抑制対策として低アルカリ形ポルトランドセメントの使用やコンクリート中のアルカリ総量 (Na_2O 換算) を $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に抑制する方法が規定されている。

モルタル中のアルカリ量とモルタルバーの膨張量との関連性を調べるため、前項の試験で著しく膨張した砕石 2 試料について、セメント重量に対する R_2O 濃度を 0.31% (低アルカリ形ポルトランドセメントをそのまま使用) のほか、強化用アルカリを加え 0.60、0.90、1.20% と変えて膨張量を測定した。

2) 混和材添加によるモルタル膨張量の抑制効果

高炉スラグ、フライアッシュ、シリカヒュームなどセメント混和材を添加すると、ASR による膨張が抑制されることから、セメントの一部を高炉スラグおよびフライアッシュで置換し、その抑制効果を検討した。

混和材置換率は、それぞれ内割でフライアッシュ 10、20、30%、高炉スラグ 30、45、60%、また、アルカリ量は総結合材 (セメント+混和材) 重量に対し 1.20% とした。なお、混和材中にもアルカリ分が含まれているが、一般に反応に寄与しないと考えられているので無視した。

3. 実験結果

3. 1 砕石のアルカリシリカ反応性

1) 砕石中のシリカ鉱物に関する検討

砕石中のシリカ鉱物の同定、定量結果を表 1 に示す。

Cri あるいは Tri を含む砕石が 32 試料中 14 試料認められた。これらは大部分が安山岩 (No. 1 ~ 13 までの 13 試料) で、1 試料は No. 23 の玄武岩である。Cri、Tri のいずれかあるいは両者の含有量は <1 ~ 20% の範囲で、No. 12 試料は 1% 以下と最も低い値を示した。

10 試料の砕石 (安山岩 6、玄武岩 1、輝緑岩 1、砂岩 2) には、シリカ鉱物として石英のみが認められ、8 試料 (安山岩 3、玄武岩 1、輝緑岩 2、かんらん岩 1、輝緑凝灰岩 1) の砕石には、Cri、Tri 石英などのシリカ鉱物はほとんど認められなかった。

2) 化学法による試験結果

図 2 に化学法の試験結果を示す。有害および潜在的有害と判定された砕石は 14 試料 (安山岩 12、玄武岩 1、砂岩 1) で、安山岩および玄武岩 13 試料は Cri、Tri のいずれかあるいは両者が認められた No. 1 ~ 12 および No. 23 試料である。砂岩はシリカ鉱物として石英のみが認められた No. 31 試料である。

無害と判定された 18 試料 (安山岩 10、玄武岩 2、輝緑岩 3、かんらん岩 1、輝緑凝灰岩 1、砂岩 1) のうち、Cri および Tri を含んでいるのは No. 13 試料のみで、シリカ鉱物として石英が認められた砕石が 9 試料、シリカ鉱物がほとんど認められなかった砕石が 8 試料である。

また、図 2 (b) に示すように鉱物組成と溶解シリカ量 (Sc) の間にはきわめてよい相関が認めら

表 1 シリカ鉱物の定量結果

No	岩種	シリカ鉱物含有量 (Wt%)				No	岩種	シリカ鉱物含有量 (Wt%)			
		Cr	Tr	Qz	C+T			Cr	Tr	Qz	C+T
1	Ad	8	0	4	8	17	Ad	0	0	29	0
2	Ad	1	5	1	6	18	Ad	0	0	30	0
3	Ad	3	4	3	7	19	Ad	0	0	0	0
4	Ad	1	3	2	4	20	Ad	0	0	7	0
5	Ad	1	1	3	2	21	Ad	0	0	<1	0
6	Ad	6	1	2	7	22	Ad	0	0	0	0
7	Ad	4	2	2	6	23	Bs	5	0	<1	5
8	Ad	0	20	2	20	24	Bs	0	0	28	0
9	Ad	15	0	3	15	25	Bs	0	0	0	0
10	Ad	5	0	2	5	26	Da	0	0	3	0
11	Ad	3	8	14	11	27	Da	0	0	<1	0
12	Ad	<1	0	21	<1	28	Da	0	0	<1	0
13	Ad	1	5	6	6	29	Pr	0	0	<1	0
14	Ad	0	0	26	0	30	Sa	0	0	0	0
15	Ad	0	0	16	0	31	Sn	0	0	27	0
16	Ad	0	0	45	0	32	Sn	0	0	25	0

(*) Cr: Cri, Tr: Tri, Qz: 石英, C+T: Cri+Tri

Ad: 安山岩, Bs: 玄武岩, Da: 輝緑岩, Pr: かんらん岩, Sa: 輝緑凝灰岩, Sn: 砂岩

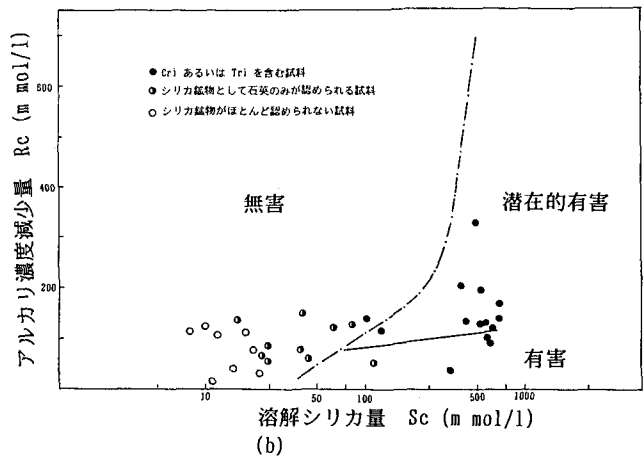
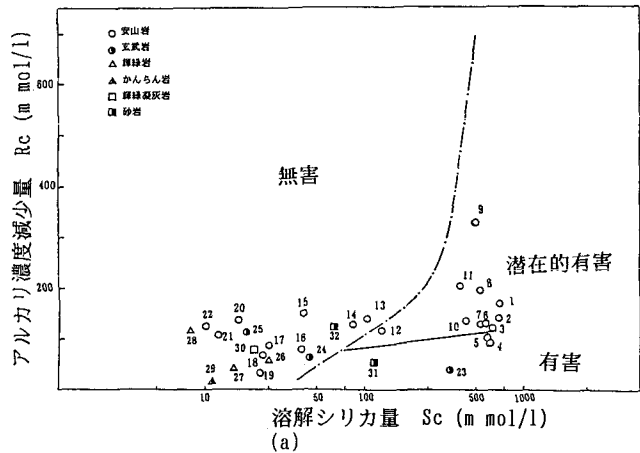


図 2 砕石試料の化学法試験結果

れ、Cri および Triを含む場合には Sc:100 mmol/l 以上、Cri や Tri が含まれておらず石英が含まれている場合には Sc:20~100 mmol/l、シリカ鉱物がほとんど含まれていない場合には Sc:20 mmol/l 以下である。

3) モルタルバー試験結果

図3に 20 試料の碎石のモルタルバー法試験結果を示す。

6ヶ月で 0.1% 以上の有害な膨張を示した碎石は、9 試料（安山岩 No.1 ~ 5、8、12、13 の 8 試料、玄武岩 No.23 の 1 試料）で、すべて Cri あるいは Tri を含んでいた。このうち、8 試料は化学法でも有害ないし潜在的有害と判定されたもので、それらは1~3ヶ月の間に急激に膨張し、それ以降はほとんど膨張を示さない試料である。他の 1 試料は無害と判定されている No.13 試料で、膨張した他の試料に比べ、膨張速度が遅く、長期にわたり膨張を続けている。また、判定基準の膨張量をわずかに越える 0.11% の膨張を示した No.12 試料は、Cri の含有量が非常に低い碎石である。

6ヶ月での膨張量が 0.10 %の許容膨張量以内で無害と判定された 11 試料（安山岩 8、玄武岩 1、輝緑岩 1、かんらん岩 1）のうち10 試料は、Cri、Tri などが認められず、化学法でも無害と判定された試料であるが、No.9 試料は Cri が含まれ、化学法でも潜在的有害と判定された試料である。

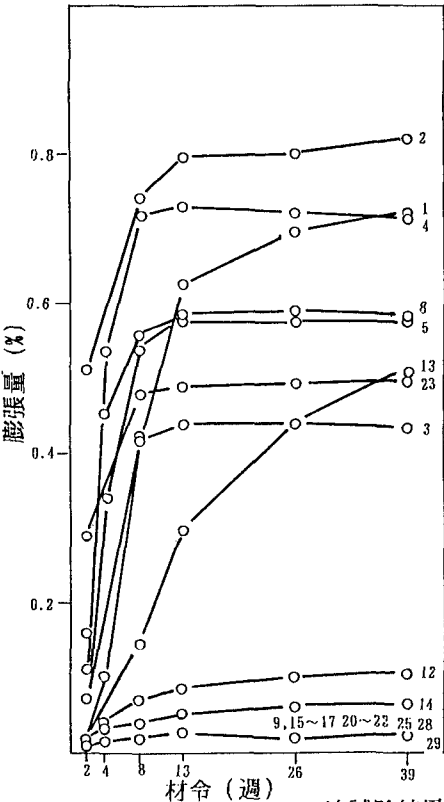


図 3 モルタルバー法試験結果

表2 碎石の試験結果

No	岩種	シリカ鉱物含有量(Wt%)				化学法(mmol/l)				モルタルバー	
		Cr	Tr	Qz	C+T	Sc	Rc	S/R	判定	膨張量(%)	判定
1	Ad	8	0	4	8	703	172	4.1	有害	0.70	有害
2	Ad	1	5	1	6	693	142	4.9	有害	0.80	有害
3	Ad	3	4	3	7	636	123	5.2	有害	0.44	有害
4	Ad	1	3	2	4	619	942	6.6	有害	0.73	有害
5	Ad	1	1	3	2	592	104	5.7	有害	0.58	有害
6	Ad	6	1	2	7	575	133	4.3	有害		
7	Ad	4	2	2	6	535	131	4.1	有害		
8	Ad	0	20	2	20	532	198	2.7	有害	0.59	有害
9	Ad	15	0	3	15	496	333	1.5	有害	0.03	無害
10	Ad	5	0	2	5	434	138	3.1	有害		
11	Ad	3	8	14	11	398	207	1.9	有害		
12	Ad	<1	0	21	<1	127	118	1.1	有害	0.10	有害
13	Ad	1	5	6	6	102	143	0.7	無害	0.44	有害
14	Ad	0	0	26	0	84	130	0.7	無害	0.06	無害
15	Ad	0	0	16	0	41	153	0.3	無害	0.03	無害
16	Ad	0	0	45	0	40	82	0.5	無害	0.04	無害
17	Ad	0	0	29	0	25	87	0.3	無害	0.03	無害
18	Ad	0	0	30	0	23	68	0.3	無害		
19	Ad	0	0	0	0	22	35	0.6	無害		
20	Ad	0	0	7	0	16	138	0.1	無害	0.03	無害
21	Ad	0	0	<1	0	12	107	0.1	無害	0.03	無害
22	Ad	0	0	0	0	10	126	0.1	無害	0.04	無害
23	Bs	5	0	<1	5	345	41	8.4	有害	0.50	有害
24	Bs	0	0	28	0	45	63	0.7	無害		
25	Bs	0	0	0	0	18	115	0.2	無害	0.03	無害
26	Da	0	0	3	0	25	57	0.4	無害		
27	Da	0	0	<1	0	15	43	0.4	無害		
28	Da	0	0	<1	0	8	116	0.1	無害	0.03	無害
29	Pr	0	0	<1	0	11	16	0.7	無害	0.04	無害
30	Sa	0	0	0	0	20	80	0.3	無害		
31	Sn	0	0	27	0	113	61	1.9	有害		
32	Sn	0	0	25	0	64	124	0.5	無害		

4) 碎石の鉱物組成とアルカリシリカ反応性

表2に各試料のシリカ鉱物含有量とアルカリシリカ反応性試験結果を示す。

シリカ鉱物の鉱物組成と溶解シリカ量 (Sc) の間にはきわめてよい相関が認められ、化学法で有害ないし潜在的有害と判定された 14 試料中 13 試料に反応性シリカ鉱物が認められた。またモルタルバー法で有害と判定された 9 試料のすべてに反応性シリカ鉱物が認められ、シリカ鉱物の鉱物組成とアルカリシリカ反応性の試験結果はよく一致した。なお、反応性シリカ鉱物を含む試料のうち無害と判定されたものは化学法およびモルタルバー法で各 1 試料である。

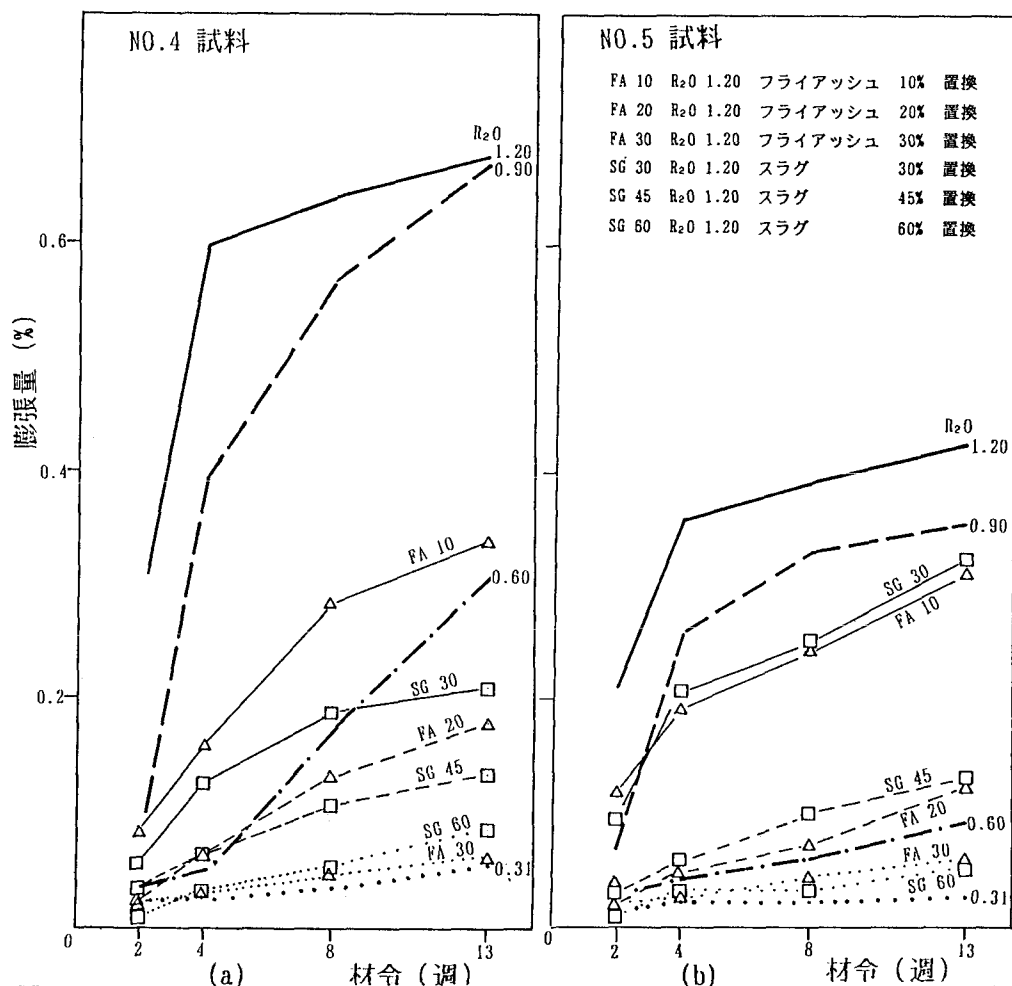


図 4 セメントアルカリ濃度および混和材添加がモルタルバー膨張量に与える影響

3. 2 モルタルの膨張抑制方法

1) アルカリ濃度の減少による膨張抑制効果

図 4 は No.4 および No.5 試料の材令-膨張量曲線である。両試料ともアルカリ濃度の減少とともに膨張量は低下する。

アルカリ濃度が高い場合 ($R_2O=1.20$ 、 0.90%) には比較的初期に膨張し、それらの膨張量に大差はみられないが、 $R_2O=0.6\%$ の場合にはゆっくり膨張し、 $R_2O=1.20\%$ の半分以下の膨張にとどまる。しかし 3 ヶ月で No.4 試料では 0.3% 、No.5 試料では 0.1% の膨張を示していることから許容膨張量の範囲内に

と定めるにはセメントのアルカリ量を $R_2O=0.31\%$ 程度まで下げる必要がある。

2) 混和材添加による膨張抑制効果

図4に混和材添加試料の膨張量曲線を示す。

No.4 試料では、フライアッシュ置換率 10% で無添加時の膨張量の約 50%、20% で約 26%、30% で約 9% に、高炉スラグの場合には置換率 30% で無添加時の膨張量の約 31%、45% で約 20%、60% で約 13% にそれぞれ低下する。また、No.5 試料もフライアッシュ置換率 10% で無添加時の膨張量の約 73%、20% で約 30%、30% で約 15% に、高炉スラグ置換率 30% で約 76%、45% で約 31%、60% で約 13% にそれぞれ低下し、両試料ともフライアッシュ、高炉スラグなどの混和材を添加することによる膨張抑制効果がみられた。

使用するセメントのアルカリ量が高い条件下でこれらの骨材を用いる場合は、フライアッシュで 30% 以上、高炉スラグで 60% 以上の混和材置換率とする必要がある。

4. まとめ

以上、北海道産砕石のアルカリシリカ反応特性および高反応性骨材を用いた際の混和材添加によるモルタルの膨張抑制効果について検討した結果を以下にまとめる。

1) 北海道で産出する砕石 32 試料を対象に、アルカリシリカ反応性を検討した。化学法では 32 試料中 14 試料が有害ないし潜在的有害と判定され、モルタルバー法では 20 試料中 9 試料が有害な膨張を生じた。

2) 反応性シリカ鉱物 (Cri、Tri) の含有量をX線回折法により測定し、アルカリシリカ反応性との関係を調べた。化学法で有害ないし潜在的有害と判定された 14 試料中 13 試料、モルタルバー法で有害と判定された 9 試料のすべてに反応性シリカ鉱物が認められ、よい一致を示した。なお、反応性シリカ鉱物を含む試料のうち無害と判定されたものは化学法およびモルタルバー法で各 1 試料である。

3) 反応性の高い 2 試料を用いて、セメント中のアルカリ量がモルタル膨張量に与える影響を調べた。従来、モルタルの膨張量を許容値以下とするためには、アルカリ濃度 0.6% 以下のセメントを用いる方法が規定されているが、本試験では $R_2O=0.6\%$ では許容値を越える膨張を示した。 $R_2O=0.31\%$ では No. 4 試料で 0.05%、No.5 試料で 0.03% とそれぞれ 3 ヶ月目まで膨張量が抑制されている。

4) 混和材添加による膨張抑制効果について検討した。総結合材量に対し $R_2O=1.2\%$ の高アルカリ濃度条件下でも、セメントの混和材置換率をフライアッシュでは 30% 以上、高炉スラグでは 60% 以上により、膨張を抑制することができる。

参考文献

- 1) 洪ほか：札幌近郊の安山岩砕石のアルカリシリカ反応の可能性について、第6回コンクリート工学年次講演会論文集 249-252 1984
- 2) 中井：北海道における ASR 反応性骨材の実態について、開発土木研究所月報 No.425 35-40 1988
- 3) 中井・大橋：高炉スラグ粉末のアルカリ骨材反応に対する抑制効果について、土木試験所月報 No. 417 1-11 1988
- 4) 安・丸嶋：りん酸法を応用したアルカリ骨材反応に関する 2、3 の検討、セメント技術年報 39 31 6-319 1985