

# 研究展望

## アルカリ・シリカ反応とその防止対策

### ALKALI-SILICA REACTION AND ITS PREVENTIVE MEASURES

川村 満紀\*・榎場 重正\*\*

By Mitsunori KAWAMURA and Shigemasa HASABA

#### 1. まえがき

アルカリ骨材反応に関する最初の文献<sup>1)</sup>は、すでに1923年にみられるようであるが、本格的な研究活動の発端は、1938年における Stanton によるアメリカ合衆国カリフォルニアにおけるアルカリ骨材反応によるコンクリート舗装の異常膨張の発見である<sup>2)</sup>。この発見が、その後のアルカリ骨材反応に関する研究活動にとって大きな刺激となったことは、図-1 (CEMBUREU が1977年に行った文献調査結果<sup>1)</sup>) にみられる1940年から1944年までの5年間における急激な文献の数の伸びより明らかである。1960年代には、アルカリ骨材反応に関する研究活動は、多少下火になるが、図-1より明らかのように、1970年代に入ると、再び研究発表件数は急激な増加を示すことになる。1970年代におけるアルカリ骨材反応に関する研究活動の復活の原因は、セメント中のアルカリ量の増加、コンクリートの配合におけるセメント量の増加、使用実績のある良質な骨材の枯渇等に起因するアルカリ骨材反応による被害コンクリート構造物の増加によるとされている<sup>3)</sup>。表-1は、CEMBUREUの調査結果に基づいて、1975年までに10以上の研究報告が行われた国を列挙したものである。表-1より、アルカリ骨材反応という現象は、かなり地域依存性の強いものであることがわかる。しかし、上述のような諸原因により、1970年頃より、西ドイツ、南アフリカ、英国においてかなり多数のアルカリ骨材反応

によって被害を受けたコンクリート構造物が発見されている。一方、わが国においても、1950年に藤井<sup>4)</sup>によってアルカリ骨材に関する解説が発刊されて以来、アルカリ骨材反応に関する事例研究<sup>5)~9)</sup>、解説<sup>10)</sup>および基礎研

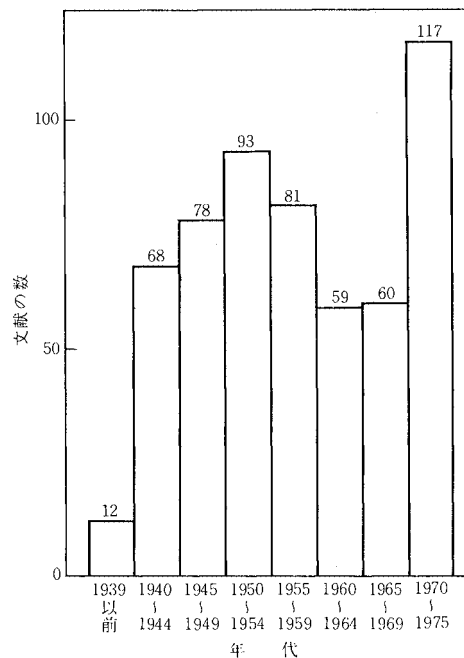


図-1 年代別の文献数

表-1 主要国における1975年までの文献の数

国名	米 国	デンマ ー ク	オー ス ト ラ リ ア	カナ ダ	西 ド イ ッ	英 国	ソ 連
文献の数	345	54	41	32	32	21	10

\* 正会員 工博 金沢大学教授 複合材料応用研究センター  
(〒920 金沢市小立野2-40-20)

\*\* 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木工学科  
(同上)

究<sup>11)~13)</sup>がみられるが、特に最近、わが国においても、この反応に起因する被害コンクリート構造物の数は、決して少なくないことが認められつつある。このようにアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化は、必ずしもある特定の地域に限って生ずる現象ではないという認識のもとで、1974年より約2年に1回の割合で国際会議が開催されてきたので<sup>14)</sup>、1976年以後の文献の数はかなり膨大なものであろう。

アルカリ骨材反応において研究の対象となる事項は、反応性骨材の判定に関する岩石学的な解明、セメントクリンカー中のアルカリの存在形態およびアルカリ骨材反応のメカニズム等に関連するセメント化学および物理化学的な取扱い、アルカリ骨材反応の予防策および被害コンクリート構造物の補修に関連するコンクリート工学上の諸問題等多岐にわたっている。本稿では、アルカリ骨材反応のなかでも、それによる被害の発生例も多く、現在世界的に最も活発な研究活動が続けられているアルカリ・シリカ反応に関する上述のような諸テーマについて、1975年以後において新しく提案された事項および新しく解明された事実に重点を置いて、研究の現状を述べる。

## 2. アルカリ骨材反応の分類と反応性岩石

### (1) アルカリ・シリカ反応

1940年において、Stantonによって報告されたアルカリ骨材反応による被害コンクリート中の反応性骨材は、オパール質シリカを含有するチャートであった<sup>2)</sup>。このような熱力学的に準安定なシリカと、おもにセメントの水和反応により供給されるアルカリイオンおよび水酸基イオンとの間に生ずる化学反応によって生成されるアルカリ・シリカゲルは、周囲より水を吸収することによって、コンクリート内部において、局部的な膨張圧を発生する。この膨張圧がコンクリート構造物におけるひびわれの発生および強度の低下をもたらす。このような反応は、その後発見された、これとはまったく異なる反応機構をもつアルカリ炭酸塩岩反応に対して、アルカリ・シリカ反応といわれている。さらに、格子欠陥をもつ石英や潜晶質石英も反応性であることが確認されるに伴い、上述のような反応は、“古典的 (Classical)” アルカリ・シリカ反応と呼ばれることもある<sup>15)</sup>。古典的アルカリ・シリカ反応に関与する反応物質は<sup>3)</sup>、トリジマイト、クリストパライト、オパール、火山ガラスおよび玉髄である。厳密に言えば、火山ガラスはシリケートであるが、その反応の基本は、他のシリカ鉱物とよく似ているのでアルカリ・シリカ反応を起こす反応物質の1つとされている<sup>16)</sup>。これらの反応物質を含有する可能性のある岩石としては、流紋岩およびその凝灰岩、安山岩お

よびその凝灰岩、石英安山岩およびその凝灰岩、頁岩、砂岩、チャート、レータイト、玄武岩 (アイスランド)、ガラスの石基をもつすべての岩石が挙げられる<sup>17), 103)</sup>。

石英は、熱力学的に安定なシリカ鉱物であるが、必ずしも非反応性ではないことが確認された<sup>16)</sup>。あるシリカ鉱物が反応性であるか否かは、程度の問題であるので、物理化学的には、潜晶質石英のように大きな比表面積をもつ石英は、反応性であることは十分理解できる。しかし、かなり粗な石英粒子を含むチャートにおいてもアルカリ反応が発生したことが報告されている<sup>101)</sup>。このような中程度または粗な石英粒子の反応性は、石英の結晶格子欠陥に起因するようである<sup>18), 101)</sup>。しかし、岩石学的手法によって、このような石英粒子の反応性を決定することはかなり困難なようである<sup>19)</sup>。石英が関係する反応性岩石は珪岩、泥質岩、シルト岩、グレイワケ、砂岩、スレート、千枚岩、花崗岩である。

### (2) アルカリ炭酸塩岩反応

本反応は、1957年 Swenson によって初めて報告されたものである<sup>20)</sup>。この反応を示す岩石は、ある種のドロマイト質石灰岩である。本反応による膨張は、ドロマイト結晶自身に起因するという点は、アルカリ・シリカ反応における膨張の発生のメカニズムと根本的に異なる。

### (3) アルカリ・シリケート反応

この反応は、カナダのノバスコシア地方において発生したコンクリートの膨張およびひびわれの原因を究明するために、1965年より開始された調査研究において発見されたものである<sup>15), 21)~23)</sup>。ノバスコシア地方におけるコンクリート構造物の劣化の原因となっている岩石は、グレイワケ、粘土質岩および千枚岩であることが判明した。これらの岩石を含むコンクリートの劣化状況は、膨張が非常に緩慢であること、反応環が形成されている反応性骨材粒子はまれであること、過大な膨張を示すコンクリートにおいて滲出するゲルの量が少ないという点において、古典的なアルカリ・シリカ反応においてみられる現象とは大きく相違している。Gillott ら<sup>15)</sup>は、従来のアルカリ・シリカ反応と様相を異にするこの反応のメカニズムを解明するための実験において、これらの岩石の X 線回折図に現われる 10 Å におけるピークが、その岩石を 38°C の 2 N の NaOH 溶液に浸漬することによって、12.6 Å に移行することを見出した。この X 線回折ピークは、パーミキュライトによるものであり、ピークの移行によって示される層構造の底面間隔の拡大は、パーミキュライトの層間に存在する物質がアルカリ溶液による処理過程において除去されたあとに、水分子を吸着することによるものであると推察した。結局 Gillott ら<sup>24)</sup>は、通常粘土によくみられるこのようなパーミキュライトの膨張がコンクリート中の岩石の膨張を惹起した

という結論を下した。これらの結果より、ノバスコチア地方のコンクリートの劣化現象は、古典的アルカリ・シリカ反応によって説明することのできないものであり、アルカリ・シリケート反応と呼ばれている。しかし、両者は、本質的に同一であるとする意見<sup>25)</sup>もあるとともに、パーミキュライトを含まない高膨張性のグレイワケの発見<sup>18)</sup>によって、アルカリ・シリケート反応の存在は、必ずしも確定したものとはされてはいないようである。

### 3. セメント中のアルカリと細孔溶液中のアルカリ

ポルトランドセメントクリンカー中に存在するほとんどのアルカリは、もともと粘土原料中の長石、雲母および粘土鉱物等に含まれていたものである。種々の形で存在するクリンカー中のアルカリ化合物の化学組成およびそれらの分布状態は、粘土の品質、原料の混合割合、燃料の種類および組成、加熱および冷却速度等によって支配される。したがって、クリンカーの $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比は大幅に変動する。おもに燃料より供給される過剰の $\text{SO}_3$ の存在の下では、硫酸ナトリウム、硫酸カリウム、複塩(K, Na)  $\text{SO}_4$ が形成されるとともに、アルカリはアルミン酸塩およびシリケート相にも入り、種々のアルカリ化合物の固溶体が形成される<sup>26), 27)</sup>。硫酸アルカリは、低い温度まで液体状態であるため、他のクリンカー鉱物を覆うような形で、アリットおよびベリット粒の表面に存在する<sup>27), 28)</sup>。

アルカリ・シリカ反応は、コンクリートの細孔溶液中の成分と骨材中の反応物質との間の化学反応であるので、細孔溶液中のアルカリおよび水酸基の濃度が反応生成物が形成されるに要する時間および反応生成物の化学組成を支配する。したがって、セメントクリンカー中に存在するアルカリが解離される速さは、アルカリ・シリカ反応において重要な意味をもっている。アルカリ硫酸塩およびそれらの複塩は急速に液相中に溶出するが、アルミン酸塩、フェライト相およびシリケート相に存在するアルカリの解離は緩慢である。

この点に関して、McCoy<sup>30)</sup>がASTM C 114に従ってアメリカ合衆国において製造されたType I, IIおよびIIIの各セメントの水溶性アルカリ量を測定した結果によると、水溶性アルカリ量の全アルカリ量に対する比率は10%から60%までの変動を示す。さらに、1年間水和反応させた後においても、かなり多量の非水溶性アルカリが残存していることが明らかになっている<sup>30)</sup>。これらの結果より、アルカリ骨材反応に関して問題となるセメントのアルカリ量の限度値は、全アルカリ量よりはむしろ水溶性アルカリ量に基づいて議論されるべきものであるという意見もある。クリンカーより解離されたこ

れらのアルカリは、細孔溶液中に存在する以外に水和生成物の構造内部に取り込まれたり、アルカリ・シリカ反応のような他の反応によって消費される<sup>27), 29)</sup>。アルカリ・シリカ反応は、本質的にアルカリ量の多いセメントを使用して作られたコンクリートの細孔溶液中の高い水酸基イオン濃度によって引き起こされるものであり、ナトリウムやカリウムによるものではない。したがって、コンクリートの細孔溶液中のアルカリおよび水酸基の挙動を明らかにすることは、アルカリ・シリカ反応のメカニズムを解明するために非常に重要である。高アルカリセメントを使用したセメント硬化体を高圧の下で圧搾することによって得られた溶液のアルカリイオン濃度は、28日後において約0.70 Mであったことが報告されている<sup>31), 32)</sup>。一方、低アルカリセメントは、0.2 M程度のアルカリイオン濃度しか示さない<sup>26)</sup>。

### 4. アルカリ・シリカ反応における反応生成物と反応機構

2. で述べたように、アルカリ・シリカ反応によるコンクリートのひびわれ発生および強度低下は、反応によって生成されるゲルの吸水による膨張に起因することが明らかになって以来、まず反応生成物の化学組成とその物理的特性が研究の対象となってきた。それと同時に、反応生成物がコンクリート中で形成される過程およびそれとコンクリートの膨張との関係について、いくつかの考え方が提起されている。

#### (1) 反応生成物の化学組成と物理的性質

アルカリ・シリカ反応によって劣化した実際のコンクリート構造物において生成されたゲルの化学組成については、Idorn<sup>33), 34)</sup>による調査例がある。Idornの報告には、文献からのものも含めて19の調査例が挙げられている。19例のゲルのうち、極端にCaO量の高い2例を除いて、ほとんどのゲルのCaO量は少ない(0.4~7.0モル%)。表一2は、わが国における実在のアルカリ・シリカ反応による被害コンクリート構造物内部に存在するゲルの化学組成を示すものである<sup>34)</sup>。これらの調査結果より、明

表一2 わが国における実際のコンクリート構造物より得たゲルの化学組成

成分 (モル百分率)	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>	G <sub>4</sub>		G <sub>5</sub>	
				G <sub>41</sub> *	G <sub>42</sub> *	G <sub>51</sub> **	G <sub>52</sub> **
CaO	5	3	46	44	3	32	40
SiO <sub>2</sub>	78	75	46	48	81	64	58
eqv.Na <sub>2</sub> O	17	22	8	9	16	5	3

\* 同一のコンクリートによって建造されたコンクリート構造物(施工後6年)であるが、環境条件が異なる(G<sub>41</sub>:構造物全体が大気中にばく露、G<sub>42</sub>:ほとんどの部分は地中に埋設され、一面のみ大気にばく露、使用されている反応性骨材:古銅輝石安山岩)。

\*\* 同一構造物(施工後6年)における採取場所が異なる。

かなように実在の被害コンクリート構造物において存在するゲルの  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  比および  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  比は、ほとんど純粋のアルカリ・シリカゲルに近いものからけい酸カルシウム水和物に近いものまで広い範囲にわたっている。

アルカリ・シリカ反応のメカニズムの解明のみならず、被害コンクリート構造物の将来の挙動を予測するためにも、アルカリ・シリカ反応による反応生成物の化学組成と物理的性質の関係は、明らかにされるべき重要な課題の1つである。しかし、この問題についての現在までの報告は、きわめて少ない。人工的に合成された  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  系の粘性は含水量に対してきわめて鋭敏であること<sup>36),37)</sup>および化学組成のわずかな変化および膨張の拘束条件の相違によってゲルの膨張挙動が激変<sup>37),38)</sup>することが明らかにされている。このようなアルカリ・カルシウム・シリカゲルのもつ特異な性質は、非平衡状態にあるゲルの分子構造の多様性によるものであり、さらに実在の被害コンクリート構造物においてみられる複雑な現象はこのようなゲルの特異性によるものであるとされている<sup>37),38)</sup>。一方、EPMA 分析の普及に伴って実際のモルタル中において生成されるゲルの化学組成に関する研究が進められつつあるが<sup>35)</sup>、その報告の数もそれほど多くない<sup>39)~42)</sup>。セメントペースト中に埋め込まれたオパール粒子は、8か月後においてその界面より  $150\ \mu\text{m}$  までの領域は、わずかな量のアルカリを含んだけい酸カルシウム水和物 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  モル比=0.7) に変化したという事実<sup>39)</sup>、および実在の被害コンクリート構造中のゲルは高カルシウムのアルカリ・カルシウム・シリカゲルが多い(表-2参照)ことより、アルカリ・シリカ反応によって生成されるゲルの膨張におけるカルシウムの役割についての研究が必要とされている。

## (2) アルカリ・シリカ反応機構

通常、反応性骨材を含有するモルタル供試体表面より、アルカリ・シリカゾルが滲出するのが容易に観察される。この事実は少なくとも反応の初期においては反応性シリカ粒子が高アルカリ溶液によって溶解されることを示唆している。しかし、多数の研究者による被害コンクリート中の反応粒子に関する岩石学的調査、たとえば、Idorn<sup>40),41)</sup>による薄片観察結果は、ほとんどすべての反応粒子は、コンクリート中で、もとの幾何学的形状を保持しながら、骨材粒子の内部は組織およびシリカの結晶度に応じて、局所的な選択性の反応が進行し、粒子全体が溶解することなくアルカリ・シリカゲルに変化し、その後生成ゲルは流動体となり、その周辺へ移動することを示している。このように、複雑な内部組織をもつ反応性骨材粒子における反応過程は単純ではない。Powers & Steinoer<sup>43),44)</sup>は、コンクリート中に存在する均質で、

密な反応性粒子を想定して、アルカリ・シリカ反応機構に関する1つの仮説を提案した。Powers らの仮説によると、反応は粒子表面より内部に向かって進行するに従って、ゲル層の厚みは、未反応核を消費しながら増大する。このとき、反応が進行し続けるためには、セメントペーストの細孔溶液中の各種のイオンは、増大し続けるゲル層を通して、反応位置まで移動しなければならない。Powers らは、反応性粒子を取り巻くセメントペースト中の  $\text{Ca}^{2+}$  イオンと  $\text{Na}^+$  イオンの濃度によって、両者のゲル層を移動する相対的な速さが異なるために、膨張性の高アルカリのゲルが生成されることもあれば、非膨張性の高カルシウムのゲルが生成されることもあると考える。さらに、Verbeck & Gramlich<sup>45)</sup>は、1つのモデル実験の結果に基づいて、反応に関与するカルシウムとアルカリの競合関係において、カルシウムは、反応性シリカ粒子表面のごく近傍の水酸化カルシウムより供給され、そのことが生成ゲルの化学組成の重要な決定因子となると主張する。

1970年代に入って、まずコンクリート中の細孔溶液の  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  の各イオン濃度を定量的に確定することが、アルカリ・シリカ反応のメカニズムの解明にあたって重要であるという認識の下で、Diamond<sup>26),32)</sup>は、Longuet<sup>31)</sup>の実験結果に基づいて、高アルカリセメントを使用したコンクリート中の細孔溶液のアルカリイオン濃度は、28日までに  $0.7\ \text{M}$  にも達するが、カルシウムイオン濃度は  $0.002\sim 0.003\ \text{M}$  ときわめて低いという事実を明らかにした。初期材令における細孔溶液中のカルシウム濃度がきわめて低く、さらに数か月後には、 $\text{Ca}^{2+}$  イオンは消失するという事実は、Powers & Steinoerの理論にとって有利なものではない。一方、被害コンクリート中における高カルシウムゲルの存在(前節参照)およびコンクリート中における反応性骨材粒子内部へのカルシウムの活発な侵入という事実<sup>35),41),42),46)</sup>は、表面拡散による  $\text{Ca}^{2+}$  イオンのゲル中への侵入を想定する Powers らの仮説にとって有利なものである。この矛盾の解決は今後に残された問題とされている。

## 5. アルカリ・シリカ反応による膨張

### (1) 膨張のメカニズム

アルカリ・シリカ反応によって生成されたアルカリ・シリカゲルの吸水によってコンクリート内部において発生する膨張圧は、セメントペーストが半透膜の役割を果たすことによって発生する浸透圧であるとする考え方<sup>45)~48)</sup>と反応骨材粒子自体の膨張によるものであるとする考え方<sup>49)~51)</sup>がある。しかし、これら2つの考え方は互いに対立するものではなく、アルカリ・シリカゲルの膨張は、本質的には浸透圧によるものであるが、反応した

シリカ粒子がセメントペースト相（またはモルタル相）に及ぼす圧力は純粋に力学的なものであると理解すべきであるとされている。すなわち、ゲルにおいては、水はその化学ポテンシャルを低下させるような方向に移動するために、吸水現象が生ずるが、半透膜は必要ではなく、ゲル自身が半透膜の役割を果たしていると考えてよい<sup>16), 50)</sup>。ゲル自身がある程度の剛性をもっているので十分な膨張圧を支持することが可能なのである<sup>51)</sup>。

## (2) 化学反応と膨張

アルカリ・シリカ反応による膨張は、反応生成物であるアルカリ・(カルシウム)・シリカゲルの吸水膨張によるということは、かなり以前より知られていたが、化学反応過程と膨張過程の関係があまり明確でなかった。この点について、オパール骨材を含むモルタルの細孔溶液の組成の変化と、モルタルの膨張挙動との関係よりDiamondら<sup>46)</sup>は次のような事実を明らかにした。すなわち、アルカリ・シリカ反応によるコンクリートの劣化過程は、(I) 化学反応によるゲルの形成および(II) ゲルが細孔溶液を吸収することによって膨張する物理化学的過程の2つの過程より成り、これらの過程は同時に進行するのではなく、(I)の過程が十分進んだ後に、(II)の過程が始まる<sup>46)</sup>。このとき、各種イオンまたは溶液が骨材粒子内部に侵入するメカニズムについては、Powersらの溶液中のイオンの拡散およびゲル中の表面拡散説<sup>43)</sup>、Frenchのクロマトグラフ効果を仮定する説<sup>52), 53)</sup>およびDiamondの溶液自体が流入するという考え方<sup>46)</sup>がある。しかし、この問題は反応性シリカ鉱物の内部組織と深い関係にあり、Hirsch<sup>54)</sup>は、大きな空隙から中程度の大きさの空隙においては、各種イオンは水を付随したまま移動し、小さい空隙または結晶格子欠陥に沿う移動は、部分的に水をもたない状態で拡散すると考えている。

## (3) モルタルのアルカリ・シリカ膨張に影響を及ぼす諸要因

アルカリ・シリカ反応は、高アルカリの下では必ず生ずるが、その反応によるコンクリートやモルタルの膨張は、ある条件の組合せにおいてのみ生ずる。さらに、反応および膨張に影響する要因も多く、それらは互いにかみ合うことによって、非常に複雑な膨張発生条件が構成される。

### a) アルカリ量と膨張

アルカリ量がモルタルの膨張に及ぼす影響について検討したVivian<sup>55)</sup>の実験結果によると、アルカリ量が多くなると膨張量が低下し、ある限度値以下のNaOH添加量においてのみ膨張が発生している。これは多量のアルカリを混入すると反応は急速に起こるが、反応生成ゲルが流動化するためと考えられている<sup>55), 56)</sup>。このように

反応過程の初期において、すでにゲルの粘性が小さいのは、生成ゲルの $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比が高いためであろう<sup>36), 56)</sup>。

### b) 水量と膨張

モルタルの膨張量はモルタル内部においてゆるく保持されている水の量（自由水）との間に直線関係が成り立つ<sup>57)</sup>。乾燥状態におけるモルタルの細孔溶液中の $\text{OH}^-$ イオン濃度は、湿潤状態に置かれたモルタル中よりも高いので、反応性骨材は乾燥状態においてより強く化学的な作用を受けているはずであるが、その膨張量は小さい。乾燥雰囲気中に置かれている間、膨張しないモルタル供試体をその後、湿気中にさらすとほとんど瞬間的に膨張することが確かめられている<sup>58), 59)</sup>。このことは、乾燥雰囲気中でもアルカリ・シリカ反応は進行することによって含水量の小さいアルカリ・シリカゲルが生成され、それが高湿度条件にさらされると吸水膨張することを示している。しかし、ある限度値（80%～85% R.H.）以下の湿度においては、アルカリ・シリカ膨張は生じることはない<sup>59)</sup>。したがって、被害コンクリート構造物の内部の平衡湿度状態が明らかになれば、その構造物において、将来活発な反応が生ずるか否かがわかる。

### c) 反応性骨材量と膨張

Stanton<sup>2)</sup>は、モルタルの膨張量は反応性骨材量とともに増加するが、ある限度量以上においては、膨張量は減少することを明らかにした。この限度量は“ペシマム量 (Pessimism Percentage)”と呼ばれている。しかし、膨張量-反応性骨材量の関係を示す曲線は、反応性骨材の種類によって大きく異なる<sup>60)</sup>。オパールは、5～10%においてペシマムをもつ鋭い曲線を示すが<sup>61)</sup>、安山岩の曲線は一般に平坦であり、ペシマムを示さないものもある。アルカリ・シリケート反応を示す岩石もペシマムをもつことはなく、骨材量とともに膨張量は増加する<sup>21)</sup>。しかし、ペシマム量はアルカリ量の関数でもあるので、デンマークフリントでは等膨張曲線を描くことができる<sup>64)</sup>。

### d) 反応性骨材の粒度と膨張

同一の反応性骨材を使用したモルタルの膨張量-骨材量曲線は、骨材の粒度によって大きく変化する<sup>62)</sup>。骨材の粒子径が $53\ \mu\text{m}$ 以下では、反応は生ずるが、いずれの骨材量においても膨張は生じない。しかし、粒子径 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ のオパール骨材を使用したモルタルにおいても、2か月後に大きな膨張が生じたという報告<sup>63)</sup>もある。

### e) 温度の影響

温度の膨張量に及ぼす影響に関する報告はきわめて少ない。オパール骨材を使用したモルタルでは、 $40^\circ\text{C}$ までの温度範囲では高温におけるほど反応および膨張は加速されるが、膨張圧は、モルタルがまだ大きな塑性変形能をもっている段階で生ずるので損傷は小さい<sup>46), 59)</sup>。し

かし、ノバスコチア地域に産出する反応性骨材においては、38℃以上で急激に大きな膨張量を示す骨材と、64℃まで温度上昇とともに膨張量は大きくなるが、温度変化に対してあまり鋭敏でない骨材がある<sup>21)</sup>。

## 6. ポズランおよび高炉スラグによるアルカリ・シリカ反応の防止効果と機構

アルカリ・シリカ膨張の防止材としての種々のポズランや高炉スラグの有効性は、かなり以前より確認されていることであり<sup>65)</sup>、最近、英国のセメント・コンクリート協会より発行されたアルカリ・シリカ反応の危険を最小限度に止めるための指針<sup>66)</sup>においても、高炉スラグやフライアッシュ中のアルカリは、ガラス構造に含まれるものであり、アルカリ・シリカ反応を促進するものではないとして、ポルトランドセメントの一部分を高炉スラグ(50%以上)およびフライアッシュ(25%以上)によって置換することを推奨している。しかし、すべてのポズランが膨張を抑制することができるのではなく、Pepper and Mather<sup>65)</sup>は①膨張の低減に対して有効なポズランとして、珪藻土、焼成粘土および頁岩、火山および人工ガラス、凝灰岩、フライアッシュ、高炉スラグ、②膨張の低減に効果のないポズランとして、粉末石英、非焼成珪藻土、特殊なフライアッシュ、十分に焼成されていないカオリン、モンモリロナイト粘土を挙げている。ここでは、フライアッシュ、高炉スラグおよびシリカフェームのアルカリ、シリカ膨張の抑制効果およびそのメカニズムに関する研究の現状について述べる。

### (1) フライアッシュ

フライアッシュのアルカリ・シリカ膨張抑制効果については、次のような問題が指摘される。1つは、5%程度の少量のフライアッシュの添加は、かえってアルカリ・シリカ膨張を増加させるように作用することである<sup>65)</sup>。しかし、この点については、Hobbsはコンクリートの単位アルカリ量が $3 \text{ kg/m}^3$ 以下であれば、有害なアルカリ・シリカ膨張が生じないという原則<sup>68)</sup>がセメント量の5%をフライアッシュで置換するときにも成り立つことを確認する<sup>67)</sup>ことによって、上述の結果を否定している。2つ目は、アルカリ・シリカ膨張抑制効果におけるフライアッシュの役割に関する問題である。Hobbsはフライアッシュの膨張低減効果は、セメントの一部分をフライアッシュで置換することによって、その添加量に相当するセメントからのアルカリ量が減少する効果(希釈材としての役割)によるものであるとする<sup>68)</sup>。一方、フライアッシュはコンクリート中における化学反応によってアルカリ・シリカ反応に影響を及ぼすという見方もある<sup>69)</sup>。しかし、アルカリ・シリカ膨張に大きな影響を及ぼすと考えられるフライアッシュの粉末

度およびアルカリ・シリカ反応に寄与するフライアッシュ中のアルカリ量は、フライアッシュの種類によって大きく変動する。低石灰フライアッシュについては、粗粒のフライアッシュやアルカリ量の高いものでは、膨張抑制効果は小さく、低アルカリ量の細粒フライアッシュにおいて、アルカリ・シリカ膨張は大きく抑制される<sup>68)</sup>。しかし、これら種々のフライアッシュを使用したモルタルのひびわれ発生材令とアルカリ量の関係より、フライアッシュは、0.2%のアルカリ量をもつものとして取り扱うことを提案している<sup>68)</sup>。高石灰フライアッシュを含む広範囲の化学組成をもつ17種類のアメリカ合衆国産フライアッシュのアルカリ・シリカ膨張抑制効果に関する調査結果によると、フライアッシュのアルカリ量とモルタルの膨張量との間には関係はなく、フライアッシュのCaO量と膨張量との間の相関性が強いようである<sup>70)</sup>。フライアッシュには、細孔溶液よりアルカリを除去したり、またはそれ自体より細孔溶液中にアルカリを解離することのない不活性なもの<sup>71)</sup>とかなり多量のアルカリを解離するもの<sup>80)</sup>とがある。このことがフライアッシュのアルカリ・シリカ膨張の抑制効果の有無と関係があることは確かなようである<sup>80)</sup>。

### (2) 高炉スラグ

高炉スラグのアルカリ・シリカ膨張の抑制効果を否定する報告はないようである。Hobbsは、高炉スラグのアルカリ・シリカ膨張抑制効果は、フライアッシュに比べて大であり、高炉スラグのアルカリ量を考慮に入れることなく、高炉スラグセメントコンクリート中の単位アルカリ量を $3 \text{ kg/m}^3$ 以下にすれば、アルカリ・シリカ反応による損傷は生じないとしている<sup>68)</sup>。一方、一般に高炉スラグよりポズランの方がアルカリ・シリカ膨張の抑制効果は大であるとする報告<sup>59)</sup>もある。

### (3) シリカフェーム

シリカフェームは、アルカリ・シリカ膨張を抑制する効果を有するポズランの1つとして期待されているが、それに関する報告<sup>71), 72)</sup>は数少ない。5%および10%のシリカフェームの添加によって、6か月におけるモルタルの膨張量は、それぞれ、約1/10および1/20まで減少したと報告されている。一方、5%のシリカフェームを混入したモルタルは、長期においてその膨張速度が急に増加し、4か月程度では、シリカフェームの混入によるアルカリ・シリカ膨張の抑制効果はほとんど認められないという報告<sup>72)</sup>もある。20%程度のシリカフェームの混入によって、アルカリ・シリカ膨張はほとんど抑制されることは確かであるが、シリカフェームの種類によっても膨張抑制効果は異なるようである。

### (4) ポズランおよび高炉スラグによるアルカリ・シリカ膨張抑制のメカニズム

反応性骨材を含有するコンクリートやモルタルのアルカリ・シリカ膨張がポゾランの混入によって抑制されるメカニズムについては、以下のような考え方がある。

(a)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の低減：アルカリ・シリカ反応が進行するためには、結晶性の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が存在する必要がある。ポゾランを添加すると  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が消費されるために膨張が低減される<sup>73)~76)</sup>。(b) アルカリイオン濃度の低減：一般に、ポゾランは大きな比表面積をもっているため、アルカリイオンがその表面に吸着され、細孔溶液中のアルカリイオンが低下し、カルシウム含有量の高い非膨張性のゲルが生成される<sup>41)</sup>。(c)  $\text{OH}^-$  イオン濃度の低減：焼成した粘土等では、ポゾランとの表面反応によって  $\text{OH}^-$  イオン濃度が減少するために反応が生じにくくなる<sup>77)</sup>。(d) 物理的効果：ポゾランを添加すると、必要水量が増加するために、コンクリートのポロシチーが変化し、局部的に膨張圧が緩和される<sup>77)</sup>。(e) 各種イオンおよび水の移動速度の低下：ポゾランや高炉スラグの添加によってセメントペーストの組織が緻密となり、水の移動速度および  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  の拡散速度が低下する<sup>78)</sup>。しかし、現在においては、すべてのポゾランや高炉スラグによるアルカリ・シリカ膨張の抑制効果のメカニズムに対して、全体として統一した説明を与えることは困難である。

## 7. アルカリ・シリカ反応に関する試験法の問題点

アルカリ・シリカ反応に関する試験は、反応性骨材を適切に判定するための試験、反応を抑制するのに有効なポゾランを選択するための試験およびセメントのアルカリ量を評価する試験より成る。これまでのアルカリ骨材反応の試験法に関する研究は、最も多くの困難な問題を有する骨材の反応性の判定法に関するものが主体である。アルカリ反応性を有する骨材を判定する方法として、岩石学的試験に基づいて骨材中にコンクリートに損傷をもたらすに十分な量の有害なシリカ鉱物が含有しているか否かを調査する方法、骨材をかなり苛酷な条件下で化学的処理を施すことによって短時間にその骨材のアルカリ反応性を判定する方法（化学的方法）および骨材を使用して作成したモルタルまたはコンクリートのアルカリ・シリカ反応による膨張挙動より有害な反応性の有無を判断するモルタルパー法（またはコンクリート・プリズム法）がある。

### (1) 岩石記載学的検査法

規格化された岩石学的検査法は、ASTM C 295のみである。しかし、この規格では、試料採取法、コアー試料の検査法は詳細に説明されているが、岩石のアルカリ反応性の有無の判断のための基準は与えられていない。

岩石記載学的調査は、岩石のアルカリ反応の潜在性を判断するための重要な手法の1つではあるが、岩石学的手法のみによって、その岩石の反応性を予測することは不可能である<sup>19)</sup>。岩石学の専門家にとっても、アルカリ反応性岩石を同定する方法としては、岩石の組成および組織の注意深い検査およびアルカリ反応性が、すでに確認されている他の岩石との比較以外に方法はないようである。Dolar-Matuani は、骨材の反応性の判定の難易度に応じて、アルカリ反応性岩石および鉱物を4つに分類している<sup>17)</sup>。

岩石学的調査法に対して、次のような問題点が指摘される。(a) 同一のシリカ鉱物でも、有害の場合と無害の場合がある<sup>81)</sup>。(b) ベシマム量が存在するので、有害物質の量が、本調査法によって発見することが非常に困難な程度に少量であるときに、より危険である<sup>19),81)</sup>。(c) 厳密に検査すると、完全に有害反応性を否定できる骨材は比較的少ないので、本調査の結果による安易な判断は、混乱をまねくおそれがある<sup>82)</sup>。

### (2) 化学的方法

アルカリ反応性骨材の化学的判定法としては、ASTM C 289 および DIN 4226 において指示されている試験法<sup>83)</sup>がある。前者は、150~300  $\mu\text{m}$  に粉碎した岩石と1規定の  $\text{NaOH}$  溶液を反応させたときの溶解シリカ量と低下した  $\text{OH}^-$  イオン濃度を測定することによって、その岩石のアルカリとの反応性を判定しようとするものである。後者は、ドイツの北部地域におけるオパール含有砂岩および多孔性のフリント骨材に起因するアルカリ・シリカ反応によるコンクリートの損傷に対する予防策として基準化されたものである（ドイツ法）。ドイツ法においては、反応性のオパール成分の量は、 $\text{NaOH}$  溶液中で溶解した骨材粒子をふるい分けによって棄却し、そのときの損失重量によって評価し、多孔性フリントの量は、反応性および非反応性フリント間の密度の差違に基づいた物理的方法によって求められる。ASTM 法とドイツ法の反応条件は、表—3 に示すようであり、両者間でかなりの相違がみられる。ドイツ法については、ふるい分けによってアルカリ溶解性成分の量を求めるので、同一反応性シリカ量においても、オパールが単独粒子として存在するときと他の鉱物の接着物質として存在

表—3 ASTM 法とドイツ法の比較

	ASTM 法	ドイツ法
温度	80±1.0℃	90±2℃
NaOH 溶液の濃度	1.000±0.001 N	4~32 mm 粒子→10% 1~4 mm 粒子→4%
時間	24 時間	60 分
試料の量	25 g/25 ml	1 g/2.5 ml
粒度	0.15~0.3 mm	1 mm 以上

するときとは、アルカリ溶液に溶解する量が異なることおよび1 mm以下の骨材を無視することによって誤差が生ずるという問題点が指摘されている<sup>88)</sup>。しかし、ドイツでは、1974年におけるこの基準の導入によって、アルカリ・シリカ反応によるコンクリート構造物の損傷は、著しく減少したと報告されている<sup>84)</sup>。一方、ASTM法の問題点をまとめると次のようである。(a) 化学法における温度および圧力条件は、実際のコンクリート内部におけるものとは異なるので、化学法によって得られた結果は、必ずしもアルカリ・シリカ膨張の程度を示す指標とはならない<sup>90), 82), 85)</sup>。たとえば、英国におけるフリントを含有する骨材に対するASTM法の結果は、有害と判定するが、実際には支障なく使用されてきた<sup>82)</sup>。(b) 反応性シリカ成分以外にい<sup>46), 59)</sup>。ているときは、誤った結果を与える。(c) アルカリ低下の割合を決定するために、指示薬としてフェノールフタレンを使用すると終点の判定が不明確であり、さらに得られる値は溶解シリカ濃度に依存する<sup>86)</sup>。しかし、このような化学分析法における問題点は、ASTM法の判定の基準となる限界線は、モルタルバー試験の結果および現場の経験に基づいたものであることを考慮して、議論すべきである。(d) 限界線近くの値が得られる骨材では、判定が困難である。(e) 骨材によっては、試験値の再現性が悪い<sup>87)</sup>。

### (3) 膨張試験法

実際に使用するべき骨材を用いて作成したモルタルまたはコンクリートの膨張挙動より、その骨材の有害なアルカリ・シリカ膨張性の判定結果を得るためには、かなり長期間の膨張試験が必要である。膨張試験に要する時間を短縮するために、種々の促進法が採用されている。規格化されている膨張試験法としては、ASTM C 227、ASTM C 342およびCAN 3-A 23.1-M 77 (カナダ)の3つが挙げられるが、最近、試験に要する時間をさら

に短縮するために、一層苛酷な促進条件下で膨張試験を行う試みとして、デンマーク法<sup>88)</sup>およびオートクレーブ法<sup>89)</sup>が提案されている。その他、アルカリ・炭酸塩岩反応性の判定試験法の1つであるロック・シリンドー法 (ASTM C 586) は、アルカリ溶液中に浸漬した岩石円柱体の膨張量を直接判定するものであるが、この方法をシリカ質骨材に適用する試みもある<sup>90), 91), 95)</sup>。しかし、ロック・シリンドー法の古典的アルカリ・シリカ反応性骨材への適用は、不可能とされている<sup>90), 95)</sup>。これら各試験法の試験条件および限度値をまとめると表一4のようである。一般によく使用されるASTM C 227には、次のような問題点があるとされている。(a) 実際のコンクリートとの関連性が不十分である。特に、カナダのグレイワケのように、膨張が非常に遅れて発生する岩石、および、炭酸塩岩に対しては、コンクリート・プリズム法が望ましい<sup>81), 92)</sup>。(b) 有害膨張の有無を判定する限度値の設定に問題がある。すなわち、遅延性の膨張挙動を示す岩石では、6か月以後における膨張が大きい<sup>82), 92)</sup>。(c) 規格では、 $\text{Na}_2\text{O}$ 等価百分率0.8%以上のセメントの使用を勧めているが、0.6%以下の低アルカリセメントにおいても有害な膨張による被害が生じた例がある<sup>83)</sup>。(d) ベシマム量はコンクリート中の全骨材量の1%程度であるとされているので、本規格に従うと合格となる骨材でも、実際のコンクリート製造時に他の骨材と混合されたために、全骨材中の反応性骨材の含有率が低下し、反応性骨材量がベシマム量に近づくことによって膨張が増大する可能性がある<sup>82)</sup>。(e) 実際のコンクリート構造物が受ける乾燥・湿潤の繰返しは、本規格が設定している常時湿潤状態の条件よりもアルカリ・シリカ反応を助長するので、本規格の条件は危険側となる可能性がある<sup>82)</sup>。(f) モルタル・バーの膨張量のばらつきが非常に大きくなり、試験の再現性の悪い場合がある<sup>85)</sup>。いずれにしても、現在においては、古典的アルカリ・シリ

表一4 各膨張試験法における促進条件と限度値

試 験 法	促 進 条 件	限 度 値
モルタルバー法 (ASTM C 227) 供試体寸法 : 2.5×2.5×25 cm	温度 : 37.8 °C 湿度 : 100 % r.h.	0.05 % (3カ月) 0.10 % (6カ月)
モルタルバー法 (ASTM C 342) 供試体寸法 : 2.5×2.5×25 cm	(55±1.7°C, 100 % r.h., 1週)→(55±1.7°C, 乾燥炉, 1週)→ 23±1.7°C (乾燥・湿潤の繰返し)	0.200 % (1年)
コンクリート・プリズム法 <sup>102)</sup> (CSA CAN A 231-M 77) 供試体寸法 : 7.5×7.5×35 cm	23±2°C, 湿気室	0.03 % (材令関係なし) 0.02 % (標準条件, 3カ月) 0.04 % (乾燥条件, 3カ月)
デンマーク法 <sup>88)</sup> (モルタルバー法) 供試体寸法 : 4×4×16 cm	50 °C, 飽和 NaCl 溶液中に浸漬	長さ測定期間 : 8週
オートクレーブ法 <sup>89)</sup> (モルタルバー法) 供試体寸法 : 1×1×4 cm	(100 °C, 蒸気養生, 4時間)→(150 °C, 10 % KOH 溶液浸 漬, 6時間) オートクレーブ処理	—
ロック・プリズム法 <sup>103)</sup> 供試体寸法 : 3×6×30 mm	2N NaOH 溶液中に浸漬	—



カ反応を示す反応性骨材には、ASTM C 227 の適用が望ましいが、コンクリートとモルタルとでは膨張挙動が異なること、アルカリ骨材反応による劣化度の評価は、膨張によるだけでなく、ひびわれの程度も考慮すべきであること<sup>92),94)</sup>およびコンクリートにおいても供試体の寸法が劣化度に大きく影響すること<sup>91)</sup>を銘記すべきである。一方、カナダでは、砂岩およびグレイワケのように遅延膨張性の骨材に対しては ASTM C 227 の適用性が良くないので、CSA, CAN 3 A 23.1-M 77 のコンクリート・ブリズム法が採用されているが、この規格で採用されている限度値(表-4 参照)は低過ぎるようである。また、この種の岩石では、長期にわたって膨張が継続するために、判定結果を得るのに長期間の膨張試験が必要である。これらの欠点を克服するために、拡散が支配的と考えられるアルカリ・シリカ反応による膨張曲線における主膨張領域では、膨張量と時間の平方根( $\sqrt{t}$ )との間に直線関係が成立することに着目し、膨張量- $\sqrt{t}$  関係の直線の勾配と終局膨張量との間の相関性の良いことを利用した Rate 法が提案されている<sup>90)</sup>。

表-4 より明らかなように、試験時間の短縮化を目的としたオートクレーブ法およびデンマーク法は、実際のコンクリートが置かれている環境条件とはかなり異なった苛酷な促進条件を設定するので、前者においては、明らかに反応物質を含む岩石が、この試験条件下では十分膨張しないことおよびこの急速試験で反応性と認められても、実際のコンクリート中では必ずしも有害反応が生ずるとはいえないことが欠点として挙げられている<sup>89)</sup>。

## 8. アルカリ・シリカ反応によって劣化したコンクリート構造物に関する事例研究と補修対策

アルカリ・シリカ反応による被害コンクリート構造物の劣化状況、管理体系および補修対策に関する調査例および研究は、比較的少ないようである。実際にコンクリート構造の劣化の原因となっている反応性骨材は、多種多様であり、古典的アルカリ・シリカ反応性骨材に属さない反応性骨材に起因する被害例もかなり多いようである<sup>87),101)</sup>。さらに、アルカリ・シリカ反応によるコンクリート構造物の劣化は、環境条件によって大きく影響される。したがって、構造物の劣化の進行を緩和するための管理体系および補修対策は、地域および構造物の種類によってかなり異なる。

### (1) アルカリ・シリカ反応によって劣化したコンクリートの諸性質

劣化したコンクリート構造物の将来における劣化の進行度合の予測および補修対策のために必要な基礎資料を得るために行われた最近の調査結果をまとめると次のよ

うである。(a) 強度：アルカリ・シリカ膨張により発生したひびわれの圧縮強度に及ぼす影響は予想外に小さく、またある程度の残存引張強度も得られている<sup>96)</sup>。(b) 弾性および時間依存性変形：被害程度のひどいコンクリートの弾性変形および9か月間のクリープひずみは、それぞれ健全なコンクリートの約3倍および2.5~4倍となる<sup>96)</sup>。(c) 超音波伝播速度：被害コンクリート構造物内部のひびわれ発生の程度を推定するために測定された超音波伝播速度は著しく低い値を示す<sup>96),97)</sup>。(d) コンクリートコア-供試体の膨張挙動：コンクリートコア-採取後供試体の急速な膨張がみられる<sup>84)</sup>。これは、コア-採取作業中の吸水およびコンクリート中の圧縮応力の解放によると考えられている<sup>84)</sup>。(e) コンクリートダムにおける揚圧力の上昇：アルカリ・シリカ膨張によりひびわれが発生したコンクリートダムでは、コンクリートの強度よりもむしろ揚圧力の上昇が重要な問題となる。英国の調査例<sup>97)</sup>では、被害ダムの一部における内部揚圧力は、設計値を超過していたと報告されている。

### (2) アルカリ・シリカ反応による被害コンクリート構造物の特徴

実際のコンクリート構造物のアルカリ・シリカ反応による劣化状況の観察より得られる情報は、被害コンクリート構造物の管理および補修にあたって有用である。最近の調査結果をまとめると次のようである。(a) 劣化部分のコンクリート中のアルカリ量が異常に高い<sup>96)</sup>。これは、コンクリート表面からの水分の蒸発によって、内部における水分の移動に伴うアルカリの濃縮によると考えられている<sup>97)</sup>。(b) 被害の度合とモルタル中のアルカリ量との間には、相関性はみられない<sup>96)</sup>。このことは、アルカリ・シリカ反応によるコンクリートの劣化においては、アルカリ量よりもむしろ環境条件がより重要であることを意味している。すなわち、日射を受ける時間の長い場所、風雨にさらされている面<sup>84)</sup>、湿度および温度の繰返し変化の大きい部分において、コンクリートの損傷が著しい<sup>97),99)</sup>。(c) 大きくて、マッシュな断面は、特に被害を受けやすい<sup>98)</sup>。(d) 排水設備に欠陥をもつ部分において、被害が著しい。

### (3) 補修法

一般に、コンクリート構造物において、目視によってアルカリ・シリカ反応が発見されるときは、すでに長年月が経過している場合が多い。このようなときは、構造物における被害状況の推移(たとえばひびわれ幅および長さの進展状況)の監視および将来における被害コンクリートの膨張挙動の予測に必要な情報(たとえばコンクリートコア-供試体の吸水膨張の測定等)を収集することによって、補修法を決定することが望ましい。補修の目的は、構造物の耐力と機能の回復およびコンクリート

の膨張の緩和（または停止）に分けられる。前者については、構造物の種類および劣化状況によって補修対策は千差万別であるが、はりや柱の連続性を回復するためにプレストレスト補強鋼線を柱の中にエポキシモルタルグラウトによって定着した例<sup>96)</sup>、ダムにおいては、内部揚圧力を低減させるためのグラウトの実施および内部揚圧力の上昇に抵抗するためのプレストレスト補強用鋼線によるブロックの定着の例<sup>97)</sup>が報告されている。後者については、現在においては外部からの水分の侵入を遮断することが、将来における膨張またはひびわれの進展を緩和するための唯一の方法と考えられるので、鉄筋の腐食防止という目的を含めて、ひびわれ内部へのエポキシ樹脂<sup>96)</sup>、<sup>98)</sup>または他の材料<sup>100)</sup>の注入が行われている。しかしエポキシ樹脂を注入したひびわれの再開<sup>96)</sup>、<sup>99)</sup>およびけい酸ナトリウムを使用する場合の施工時期の問題<sup>100)</sup>が指摘されている。一方、塗料によるコンクリート表面の被覆においては、表面における完全な不透水性膜の形成が必要であり、不完全な被覆および十分に乾燥されていないコンクリート表面のコーティングは、コンクリート内部に水分を閉じ込める危険性があることが強調されている<sup>98)</sup>。最近では、シラン系材料の注入および含浸が目目されている<sup>99)</sup>。

## 9. 劣化コンクリート構造物の管理

いったんアルカリ・シリカ反応によって劣化したコンクリート構造物の将来における劣化の進行を最小限度に止めるためには、系統的な管理体系の確立が重要である。そのためには、コンクリート構造物の劣化度がある程度定量的に評価することによって、合理的で、経済的な管理が可能となる。Blightら<sup>96)</sup>は、被害コンクリート構造物から得たコンクリート片の研磨面の観察より、コンクリート構造物のアルカリ・シリカ反応による劣化度を5段階表示することによって、1つの管理法を提案している。前述のように、被害の著しいコンクリート構造物は排水系統に欠陥をもつものが多いので、欠陥のある排水溝および目づまりの修復等の管理に注意を払うべきことが強調される。

## 10. アルカリ・シリカ反応に対する予防策

反応性骨材の適切な判定のための試験法の確立以外に、アルカリ・シリカ反応の予防策として、提案されている方策をまとめると次のようである<sup>66)</sup>、<sup>98)</sup>。

(a) コンクリート中のアルカリ量を制限するために、 $\text{Na}_2\text{O}$  等価百分率 0.6 % 以下のセメントおよび高炉またはフライアッシュセメントの使用、さらにアルカリ・シリカ反応を受けやすい環境条件下では、コンクリートの単位アルカリ量が限度値以下となるような配合設計が勧

められる<sup>66)</sup>。(b) セメント以外からのアルカリの混入（たとえば、海より採取した骨材からの  $\text{NaCl}$ 、混和剤からのアルカリ、コンクリート構造物の外部からのアルカリの吸収）を防止する<sup>66)</sup>。(c) 密実で、高品質のコンクリートを作るために、入念な施工および適切な施工管理が重要である<sup>98)</sup>。(d) セメント量を低減させるために、コンクリートの目標強度は高くなりすぎないように注意するとともに、なるべく最大寸法の大きな骨材を使用する<sup>98)</sup>。(e) 熱を加えることによる促進養生は禁物である。(f) 不透水性のコンクリート構造物とするために、熱応力および乾燥収縮によるひびわれの発生を防止する。(g) AE 剤を使用する。(h) 排水路（溝）の設計において、雨水や地下水が効率的に流下するような配慮を払う。(i) 排水系統の施工が設計図どおり行われているか否かの現場監督を強化する。(j) 排水系統の維持管理に努める。

## 11. むすび

アルカリ・シリカ反応に関して、約 40 年間にわたって行われてきた研究の内容は、反応および膨張の機構、および膨張量やひびわれ発生状況に影響を及ぼす諸因子について、モルタルを使用した室内実験に基づいて検討したものが主体である。したがって、現在までのアルカリ・シリカ反応に関する研究の実績は、現場における技術者が遭遇する問題の解決に十分対処できるものではない。たとえば、反応性骨材を含むモルタルにおける反応および膨張の機構は、ある程度明らかになってきたが、実際のコンクリートでは、コンクリート中に数パーセントの反応物質が存在するだけで、コンクリート構造物にきわめて重大な損傷を引き起こすメカニズムさえも不明である。さらに、Stanton の発見した古典的アルカリ反応性骨材に加えて、その後の新たなアルカリ反応性シリカ鉱物の発見に伴う反応性骨材の多様化が問題の解決を一層困難にしている。このような現状において、最近、アルカリ・シリカ反応および膨張に関する基礎研究の新たな展開、反応性骨材を適切に判定するための簡易試験法の確立およびボゾランや高炉スラグの膨張抑制材としての利用を旨とした研究および被害コンクリート構造物の補修法および管理法に関する研究が必要とされている。

## 参考文献

- 1) CEMBUREAU : Alkali-Aggregate (Alkali-Silica & Alkali-Silicate) Reactivity in Concrete, Bibliography, p. 76. 1977.
- 2) Stanton, T.E. : Expansion of Concrete through Reaction Between Cement and Aggregate, Proc. ASCE, Vol. 66, pp. 1781~1811, 1940.
- 3) 川村満紀・伽場重正 : アルカリ・シリカ反応のメカニズム, コンクリート工学, Vol. 22, No. 2, pp. 6~15, 1984.
- 4) 藤井光蔵 : アルカリ骨材反応とコンクリートの過度膨張,

- コンクリートパンフレット, 第3号, p.60, 1950
- 5) 近藤泰夫・北川欣一: アルカリ・骨材反応に関する研究, セメント技術年報, Vol. 5, pp. 379~398, 1951.
  - 6) 村田清逸・関 慎吾・藤木洋一: アルカリ骨材反応を起こしたコンクリートの一例, セメント・コンクリート, No. 220, pp. 7~13, 1965.
  - 7) 西 晴哉・水上国男・今井友宏・江藤清光: 安山岩のアルカリ骨材反応, セメント技術年報, Vol. 36, pp. 120~123, 1982.
  - 8) 川村満紀・竹本邦夫・榎場重正: 我国におけるアルカリ骨材反応の2,3の実例, セメント技術年報, Vol. 37, pp. 136~139, 1984.
  - 9) 福島正人・二村誠二: コンクリート用砕石のアルカリ骨材反応性, セメントコンクリート, No. 438, pp. 8~15, 1983.
  - 10) 有泉 昌: コンクリート用骨材の問題点, 粘土科学, Vol. 19, No. 2, pp. 41~55, 1979.
  - 11) 榎場重正・川村満紀・岡田光芳: アルカリ骨材反応に関する基礎的研究, 材料, Vol. 26, No. 290, pp. 1078~1084, 1977.
  - 12) 川村満紀・榎場重正・竹本邦夫: アルカリ骨材反応に関する基礎的研究, 第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol. 1, pp. 145~148, 1979.
  - 13) 榎場重正・川村満紀・竹本邦夫: アルカリ・シリカ反応によるコンクリートの膨張特性と反応機構, セメント・コンクリート, No. 408, pp. 8~15, 1981.
  - 14) 川村満紀: 第6回コンクリートにおけるアルカリに関する国際会議—研究と実際, コンクリート工学, Vol. 22, No. 1, pp. 70~71, 1984.
  - 15) Gillott, J. E., Duncan, M. A. G. and Swenson E. G. : Alkali-Aggregate Reaction in Nova Scotia IV. Character of the Reaction, Cem. and Concr. Res. Vol. 3, No. 5, pp. 521~535, 1973.
  - 16) Diamond, S. : A Review of Alkali-Silica Reaction and Expansion Mechanisms—2, Reactive Aggregates, Cem. and Concr. Res., Vol. 6, No. 4, pp. 549~560, 1976.
  - 17) Dolar-Mantuani, L. : Practical Aspects of Identifying Alkali-Reactive Aggregate by Petrographic Methods, Proc. of the 4th Int. Conf. on the Effects of Alkalies in Cement and Concrete, pp. 267~280, 1978.
  - 18) Dolar-Mantuani, L. : Petrographic Aspects on Silicious Alkali Reactive Aggregates, Proc. Symp. on Alkali-Aggregate Reaction, Protective Measures, Reykjavik, Iceland. pp. 87~100, 1975.
  - 19) Dolar-Mantuani, L. : Petrographic Investigation on Alkali-Reactive Silicate Rocks in Several Structures, Proc. Symp. on the Effect of Alkalies on the Properties of Concrete, London, pp. 203~217, 1976.
  - 20) Swenson, E. G. : A Reactive Aggregate Undected by ASTM Tests, ASTM Bull. 226, pp. 48~50, 1957.
  - 21) Duncan, M. A. G., Gillott J. E. and Swenson E. G. : Alkali-Aggregate Reaction in Nova Scotia I. Summary of a Five-Year Study, Cem. and Concr. Res., Vol. 3, No. 1, pp. 55~69, 1973.
  - 22) Duncan, M. A. G., Gillott, J. E. and Swenson, E. G. : Alkali-Aggregate Reaction in Nova Scotia II. Field and Petrographic Studies, Cem. and Concr. Res., Vol. 3, No. 2, pp. 119~128, 1973.
  - 23) Duncan, M. A. G., Gillott, J. E. and Swenson, E. G. : Alkali-Aggregate Reaction in Nova Scotia. III, Laboratory Studies of Volume Change, Cem. and Concr. Res., Vol. 3, No. 3, pp. 233~245, 1973.
  - 24) Gillott, J. E. : Clay in Engineering Geology, pp. 107~113, Elsevier, 1968.
  - 25) Mather, B. : A Discussion of the Paper A Review of Alkali-Silica Reaction and Expansion Mechanisms, Cem. and Concr. Res., Vol. 6, No. 6, pp. 813~814, 1976.
  - 26) Diamond, S. : A Review of Alkali-Silica Reaction and Expansion Mechanisms, I Alkalies in Cements and in Concrete Pore Solutions, Cem. and Concr. Res., Vol. 5, No. 4, pp. 329~345, 1975.
  - 27) Skalny, J. and Klemm, W. A. : Alkalies in Clinker : Origin, Chemistry, Effects, Proc. of the Fifth Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/1, 1981.
  - 28) Skalny, J. and Maycock, J. N. : Scanning Electron Microscopy of Industrial Cement Clinkers, Journal of the Amer. Ceram. Soc., Vol. 57, No. 6, pp. 253~256, 1974.
  - 29) Bhatt, M. S. Y. and Greening, N. R. : Interaction of Alkalies with Hydrating and Hydrated Calcium Silicate, Proc. 4th Int. Conf. on Effects of Alkalies in Cement and Concrete, pp. 87~112, 1978.
  - 30) McCoy, W. J. : Effect of Hydration on Water Solubility of Alkalies in Portland Cement, Proc. 4th Int. Conf. on Effects of Alkalies in Cement and Concrete, pp. 35~45, 1978.
  - 31) Longuet, P., Burglen, L. and Zelwer, A. : la Phase Liquide du Ciment Hydraté, Pev. des Matériaux de Construction et des Travaux Publics, Ciments et Betons, No. 676, pp. 35~41, 1973.
  - 32) Diamond, S. : Long-Term Status of Calcium Hydroxide Saturation of Pore Solutions in Hardened Cements, Cem. and Concr. Res. Vol. 5, No. 6, pp. 607~616, 1975.
  - 33) Idorn, G. M. : Studies of Disintegrated Concrete-Part 1, Progress Report N<sub>2</sub>, Committee on Alkali Reactions in Concrete, Danish, Nat. Inst. of Build. Res. and Acad. of Tech. Sci., pp. 27~30, 1961.
  - 34) 川村満紀・竹本邦夫・榎場重正: 未発表資料.
  - 35) Kawamura, M., Takemoto, K. and Hasaba, S. : Application of Quantitative EDXA Analyses and Microhardness Measurements to the Study of Alkali-Silica Reaction Mechanisms, Proc. 6th Int. Conf. ALKALIS IN CONCRETE, Copenhagen, pp. 167~174, June, 1983.
  - 36) Vail, J. G. : Soluble Silicates-Their Properties and Uses, pp. 79~89, Reinhold Publishing Corp., New York, 1952.

- 37) Struble, L. J. and Diamond, S. : Unstable Swelling Behavior of Alkali Silica Gels, *Cem. and Concr. Res.*, Vol. 11, No. 4, pp. 611~617, 1981.
- 38) Struble, L. J. and Diamond, S. : Swelling Properties of Synthetic Alkali Silica Gels, *J. of Amer. Ceram. Soc.*, Vol. 64, No. 11, pp. 652~655, Nov. 1981.
- 39) Thawlow, N. and Knudsen, T. : Quantitative Microanalyses of the Reaction Zone between Cement Paste and Opal, *Proc. Symp. on Alkali-Aggregate Reaction-Preventive Measures*, pp. 189~203, 1975.
- 40) Knudsen, T. and Thawlow, N. : Quantitative Microanalyses of Alkali-Silica Gel in Concrete, *Cem. and Concr. Res.*, Vol. 5, No. 5, pp. 443~454, 1975.
- 41) Poole, A. B. : Electron Probe Microanalyses of Reaction Zones at Cement/Opal Interfaces, *Proc. Symp. on the Effect of Alkalies on the Properties of Concrete*, London, pp. 163~175, 1976.
- 42) 川村満紀・竹本邦夫・柳場重正 : EPMA および超微小硬度測定によるアルカリ・シリカ反応機構の解明, 第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 33~36, 1982.
- 43) Powers, T. C. and Steinouer, H. H. : An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction-Part 1, *Journal of A. C. I.*, Vol. 51, pp. 497~514, Feb., 1955.
- 44) Powers, T. C. and Steinouer, H. H. : An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction-Part 2, *Journal of A. C. I.*, Vol. 51, pp. 785~811, April, 1955.
- 45) Verbeck, G. and Gramlich, C. : Osmotic Studies and Hypothesis Concerning Alkali-Aggregate Reaction, *Proc. ASTM*, Vol. 55, pp. 1110~1131, 1955.
- 46) Diamond, S., Barneyback, R. S. and Struble, L. T. : On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reactions, *Proc. 5 th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, S 252/22, 1981.
- 47) Baker, A. F. and Poole, A. B. : Cement Hydrate Development at Opal-Cement Interfaces and Alkali-Silica Reactivity, *Q. J. Eng. Geol.* Vol. 13, pp. 249~254, 1980.
- 48) Hansen, W. C. : Studies Relating to the Mechanisms by Which the Alkali-Aggregate Reaction Produces Expansion in Concrete, *J. of A. C. I.* Vol. 15, No. 3, pp. 213~227, 1944.
- 49) Vivian, H. E. : Studies in Cement-Aggregate Reaction XV. The Reaction Product of Alkalies and Opal, *C. S. I. R. O., Bulletin No. 256*, pp. 60~82, 1950.
- 50) Dent Glasser, L. S. : Osmotic Pressure and the Swelling of Gels, *Cem. and Concr. Res.*, Vol. 9, No. 4, pp. 515~517, 1979.
- 51) Dent Glasser, L. S. and Kataoka, N. : The Chemistry of Alkali-Aggregate Reactions, *Proc. 5 th. Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, S252/23, 1981.
- 52) French, W. J. : The Role of Solvent Migration in Alkali-Silicate Reactivity, *Proc. Symp. on the Effect of Alkalies on the Properties of Concrete*, London, pp. 177~190, 1976.
- 53) French, W. J. : Reaction between Aggregates and Cement Paste—An Interpretation of the Pessimism, *Q. J. Eng. Geol.*, Vol. 13, pp. 231~247, 1980.
- 54) Hirsch, D. and Wolff, G. : Diffusion and Ionenaustausch bei der Alkali-kiesel Säurereaction, *Cem. and Concr. Res.*, Vol. 4, No. 4, pp. 609~621, 1974.
- 55) Vivian, H. E. : Studies in Cement-Aggregate Reaction X II. The Effect of Amount of Added Alkalies on Mortar Expansion, *C. S. I. R. O Bulletin*, No. 256, pp. 31~47, 1950.
- 56) Krogh, H. : Examination of Synthetic Alkali-Silica Gels, *Proc. Symp. on Alkali-Aggregate Reaction, Protective Measures*, Reykjavik, Iceland, pp. 131~163, 1975.
- 57) Vivian, H. E. : Studies in Cement-Aggregate Reaction X I, The Effect on Mortar Expansion of Amount of Available Water in Mortar, *C. S. I. R. O. Bulletin*, No. 256, pp. 21~30, 1956.
- 58) Vivian, H. E. : Studies in Cement-Aggregate Reaction V II -The Effect of Storage Conditions on Expansion and Tensile Strength Changes of Mortar, *C. S. I. R. O. Bulletin*, No. 256, pp. 585~595, 1956.
- 59) Lenzner, D. and Luelwig, V. : The Alkali Aggregate Reaction with Opaline Sand Stone from Schleswig-Holstein, *Proc. 4 th Int. Conf. on Effects of Alkalies in Cement and Concrete*. pp. 11~34, 1978.
- 60) Hobbs, D. W. : Expansion of Concrete due to Alkali-Silica Reaction : An Explanation, *Magazine of Concr. Res.*, Vol. 30, No. 105, pp. 215~220, 1978.
- 61) Locher, F. W. and Sprung, S. : Causes and Mechanism of Alkali-Aggregate Reaction, *Beton*, Vol. 23, No. 7, pp. 303~306, No. 8, pp. 349~353, 1973.
- 62) Vivian, H. E. : Studies in Cement Aggregate Reaction X I X. The Effect on Mortar Expansion of the Particle Size of the Reactive Component in the Aggregate, *C. S. I. R. O. Bulletin*, No. 256, pp. 488~494, 1956.
- 63) Diamond, S. and Thawlow, N. : A Study of Expansion due to Alkali-Silica Reaction as Conditioned by the Grain Size of the Reactive Aggregate, *Cem. and Concr. Res.*, Vol. 4, No. 4, pp. 591~607, 1974.
- 64) Bredsdorff, P., Poulsen, E. and Spøhr, H. : Experiments on Mortar Bars Prepared with Selected Danish Aggregates, *Progress Report I<sub>2</sub>, Committee on Alkali Reactions in Concrete*, Danish Inst. of Build. Res. and Acad. of Tech. Sci. p. 82, 1966.
- 65) Pepper, L. and Mather, B. : Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing Excessive Expansion of Concrete due to Alkali-Aggregate Reaction, *Proc. ASTM*, Vol. 59, pp. 1178~1202, 1959.
- 66) Cement and Concrete Association : Minimising the Risk of Alkali-Silica Reaction-Guidance Notes, p. 8, Sept., 1983.

- 67) Hobbs, D.W. : Possible Influence of Small Addition of p. f. a., g. b. f. s. and Lime Stone upon Expansion Caused by the Alkali-Silica Reaction, Magazine of Concr. Res., Vol. 35, No. 122, pp. 55~58, 1983.
- 68) Hobbs D.W. : Influence of Pulverized Fuel Ash and Granulated Blastfurnace Slag upon Expansion Caused by the Alkali-Silica Reaction, Magazine of Concr. Res., Vol. 34, No. 119, pp. 83~94, 1982.
- 69) Gaze M.E. and Nixon, P.J. : The Effect of pfa upon Alkali-Aggregate Reaction, Magazine of Concr. Res., Vol. 35, No. 123, pp. 107~110, 1983.
- 70) Dunstan, E.R. : The Effect of Fly Ash on Concrete Alkali-Aggregate Reaction, Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 3, No. 2, pp. 101~104, 1981.
- 71) Asgeirsson, H. and Gudmundsson, G. : Pozzolanic Activity of Silica Dust, Cem. and Concr. Res., Vol. 9, No. 2, pp. 249~252, 1979.
- 72) Perry, C. and Gillott, J.E. : The Feasibility of Using Silica Fume to Control Concrete Expansion due to Alkali-Silica Reaction, Oral Presentation at First Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Minerals By-Product in Concrete, Montebello, Canada, 1983.
- 73) Mather, B. : Discussion of paper by A.D. Conrow Proc. ASTM, Vol. 52, p. 1226, 1952.
- 74) Chatterji, S. : The Role of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in the Breakdown of Portland Cement Concrete due to Alkali-Silica Reaction, Cem. and Concr. Res., Vol. 9, No. 2, pp. 185~188, 1979.
- 75) Tang Ming-shu and Han Su-fen : Effect of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  on Alkali-Silica Reaction, Proc. 7 th Int. Congress on the Chemistry of Cement, Vol. II, pp. 94~99, Paris 1980.
- 76) Tang Ming-Shu, et al. : The Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali-Silica Reaction and Its Mechanism, Cem. and Concr. Res., Vol. 13, No. 2, pp. 171~176, 1983.
- 77) Diamond, S. : Mechanisms of Alkali-Silica Reaction and Expansion - A Review and Reassessment, Unpublished Paper.
- 78) Bakker, R.F. : About the Cause of the Resistance of Blastfurnace Cement Concrete to the Alkali-Silica Reaction, Proc. 5 th. Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/29, 1981.
- 79) Diamond, S. : Effects of Two Danish Flyash on Alkali Contents of Pore Solutions of Cement-Flyash Pastes, Cem. and Concr. Res., Vol. 11, No. 3, pp. 383 ~ 394, 1981.
- 80) Diamond, S. and Lopez-Flores, F. : Comparative Studies of the Effects of Lignitic and Bituminous Flyashes in Hydrated Cement Systems, Proc. Symposium N Material Research Society Annual Meeting, Effects of Flyash Incorporation in Cement and Concrete, Ed. by S. Diamond, 1981.
- 81) Diamond, S. : Chemical Reactions Other than Carbonate Reactions, Chapter 40 in Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP 169 B, ASTM, pp. 708~721, 1978.
- 82) Sims, J. : Application of Standard Testing Procedures for Alkali Reactivity, Part 1, Concrete, Vol. 15, No. 10, pp. 27~29, Part 2, Vo. 15, No. 11, pp. 29~32, 1981.
- 83) DIN 4226, Vorbeugende MaBnahmen gegen Schädigende Alkalireaktion in Beton, Beton, Vol. 24, No. 5, pp. 179~185, 1974.
- 84) Lenzner, D. and Ludwig, V. : Zum Erkennen Von Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonbauwerken, Zement-Kalk-Gips, No. 8, pp. 401~410, 1979.
- 85) Heck, W.J. : Study of Alkali-Silica Reactivity Tests to Improve Correlation and Predictability for Aggregate, Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 15, No. 1, pp. 47~53, 1983.
- 86) Dent Glasser, L.S. and Kataoka, N. : Some Observations on the Rapid Chemical Test for Potentially Reactive Aggregates, Cem. and Concr. Res. Vol. 11, No. 2, pp. 191~196, 1981.
- 87) Brandt, M.P., Oberhölster, R.E. and Westra, W.B. : A Contribution to the Determination of the Potential Alkali Reactivity of Tygerberg Formation Aggregates, Proc. of the Fifth Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/11, 1981.
- 88) Jensen, A.D., Chatterji, S. Christensen, P. and Thaulow, N. : Studies of Alkali-Silica Reaction-Part 1 A comparison of Two Accelerated Test Methods. Cem. and Concr. Res., Vol. 12, No. 5, pp. 641~647, 1982.
- 89) Tang Ming-Shu, Han Su-fen and Zhen Shi-hua : A Rapid Method for Identification of Alkali Reactivity of Aggregate, Cem. and Concr. Res., Vol. 13, No. 3, pp. 417~422, 1983.
- 90) Grattan-Bellew, P.E. : A Review of Test Methods for Alkali-Expansivity of Concrete Aggregate, Proc. of the Fifth Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/11, 1981.
- 91) Grattan-Bellew, P.E. : Study of Expansivity of a Suite of Quartzwackes, Argillites and Quartz Arenites, Proc. 4 th. Int. Conf. The Effects of Alkalies in Cement and Concrete, pp. 113~140, 1978.
- 92) Grattan-Bellew, P.E. : Re-evaluation of Standard Mortar Bar and Concrete Prism Tests for Alkali-Aggregate Reactivity, Matériaux et Constructions, Vol. 16, No. 94, pp. 243~250, 1983.
- 93) Stark, D. : Alkali-Silica Reactivity : Some Reconsiderations, Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 2, No. 2, pp. 92~94, 1980.
- 94) Dahms, J. : Influences on the Alkali-Aggregate Reaction under Field Conditions, Proc. Symp. on the Effect of Alkalies on the Properties of Concrete, London, pp. 277~290, 1976.
- 95) Grattan-Bellew, P.E. : Evaluation of Miniature Rock

- Prism Test for Determining the Potential Alkali-Expansivity of Aggregates, *Cem. and Concr. Res.*, Vol. 11, No. S. 5/6, pp. 699~711, 1981.
- 96) Blight, G. E. and McIver, J. R. : The Effects of Alkali-Aggregate Reaction on Reinforced Concrete Structures Made with Witwatersrand Quartzite Aggregate, *Proc. of the Fifth Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction*, S 252/15, 1981.
- 97) Coombes, L. H. : Val de La Mare Dam Jersey. Channel Islands, *Proc. Symp. on the Effect of Alkalies on the Properties of Concrete*, London, pp. 357~370, 1976.
- 98) Flanagan, J. C. : Alkali-Aggregate Reaction : Practical, Preventive and Remedial Measures, *Proc. of the Fifth Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction*, S 252/17, 1981.
- 99) Semmelink, C. J. : Field Survey of the Extent of Cracking and Other Details of Concrete Structures Showing Deterioration due to Alkali-Aggregate Reaction in the South Western Cape Province, *Proc. of the Fifth Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction*, S 252/19, 1981.
- 100) Roberts, J. A. and Vivian, H. E. : Studies in Cement-Aggregate Reactions X X I V, The Restoration of Cracked Mortar Which as Deteriorated Through Alkali-Aggregate Reaction. *C. S. I. R. O. Bulletin*, No. 256, pp. 100~104, 1956.
- 101) Buck, A. D. : Alkali Reactivity of Strained Quartz as a Constituent of Concrete Aggregate, Cement, Concrete, and Aggregate, Vol. 5, No. 2, pp. 131~133, 1983.
- 102) Canadian Standard Association : Alkali-Aggregate Reaction-Concrete Materials and Methods of Concrete Construction, CSA CAN 3 -A 23.1-M 77. Appendix B 3.5-CSA test method A 23.2-M 77, p. 123, 1977.
- 103) Dolar-Mantuani, L. : *Handbook of Concrete Aggregates — A Petrographic and Technological Evaluation*, p. 345, Noyes Publications, 1983.

(1984. 5. 1・受付)