世界各国におけるアルカリシリカ反応性岩石 (その1)

脇坂 安彦*

Alkali-Silica Reactive Rocks in the World (Part 1)

Yasuhiko WAKIZAKA*

1. はじめに

1940年にアメリカの STANTON¹⁾は、セメント中のアルカリ成分とある種の骨材が反応してコンクリートに膨脹を来すことを発見した。反応はセメントペースト中の水酸化ナトリウムなどと骨材中のシリカ成分との間に生じ、反応によって膨脹性のゲルが生成される。これは当初、アルカリ骨材反応²⁾と呼ばれていた。

1957年にはカナダの SWENSON³⁾が、シリカ成分を含まないドロマイト質石灰岩がセメント中のアルカリと反応してコンクリートを膨脹させていることを報告した。また、1973年には同じくカナダの DUNCAN⁴⁾⁻⁶⁾は、骨材中のパーミキュライトによってコンクリートが膨脹する現象を報告している。前者はアルカリ炭酸塩岩反応と呼ばれ、後者は GILLOTT⁷⁾によってアルカリシリケート反応^{*1}と名付けられている。このような新しい反応の発見に伴って STANTON の発見した反応はアルカリシリカ反応と呼ばれて区別され、アルカリ骨材反応の用語は3つの反応を総称して呼ぶときに用いられることが多い。

アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化は、アルカリシリケート反応を除いて、その後世界各国で発見されている。我が国においても、1951年⁸⁾、1965年⁹⁾にアルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化が報告され、1983年以降は多数の事例が報告されている。我が

国における劣化事例は、1例¹⁰⁾を除いてすべてアルカリシリカ反応によるものである。

このように、現在では世界的にアルカリ骨材反応はコンクリートを打設する際に考慮しなければならない問題となってきた。そこで、ここで特に我が国のコンクリート構造物の劣化の一因として問題となっているアルカリシリカ反応を起こす岩石には、どのようなものがあるかを国別に概観してみたい。反応性のある岩石の調査は文献調査により行い、主に Journal of American Concrete Institute, ASTM の proceedings, Highway Research Board の Proceedings, 第8回までのアルカリ骨材反応に関する国際会議の議事録を参照した。

なお、本資料は市川ほか¹¹⁾として印刷したものの一部を構成し直したものである。ここでは紙数の関係上、本文を(その1)、(その2)に分割することにし、(その1)ではアルファベット順にアメリカからイギリスまでの9か国について記することにする。

2. アルカリシリカ反応性のある鉱物および岩石

STANTON¹⁾が報告した劣化コンクリートで反応の原因となっていたのは、頁岩およびチャート中に含まれていたオパールであった¹²⁾。オパールのほかにアルカリシリカ反応を起こす、すなわちアルカリシリカ反応性がある鉱物として知られているものには、玉ズイ¹³⁾、火山ガラス^{13),14)}、隠微晶質シリカ(石英)¹⁴⁾、トリディマイト¹⁵⁾、クリストバライト^{16),17)}、ひずんでいる石英¹⁷⁾がある。ひずんでいる石英とは、GOGTE¹⁸⁾の波動消光をする石英と同義であると考えられる。

反応性がある岩石は以上のような鉱物がある程度^{*2}以

* 建設省土木研究所地質化学部地質研究室 Geology Division, Department of Geology and Chemistry, Public Works Research Institute, Ministry of Construction

*1 アルカリシリケート反応は、DUNCANらが報告をしたカナダのNova Scotia地方以外では発見されていない。

現在では、アルカリシリケート反応はパーミキュライトが関与した反応ではなく、反応速度の遅いアルカリシリカ反応であるとの見解がなされている。

*2 岩石が反応性を示すようになる反応性鉱物の含有量は、反応性鉱物の粒径や形態、反応性鉱物以外の鉱物組合せによって変化するため、一義的には決められない。

上含んでいるものである。このため反応性岩石は多岐にわたっており、各国ごとに特徴がある。

3. 世界各国のアルカリシリカ反応性岩石

(1) アメリカ

アメリカではSTANTON¹⁾の報告以来、多数のアルカリ骨材反応に関する報告が公表されてきている。特に研

究が活発に行われていたのは、1940年代、50年代で、劣化構造物の実態、反応性の試験方法および反応の抑制方法に関する多くの報告が出されている。

STANTON^{1),19)}がCalifornia州で記載したコンクリートの劣化の原因はオパールを含んだチャート、頁岩であった¹²⁾が、翌年には安山岩、流紋岩質岩²⁰⁾や千枚岩²⁾のようにオパールを含まない岩石が原因となったアルカ

表-1 アメリカでアルカリ骨材反応によって劣化した構造物と劣化の原因となった岩石

構 造 物	所 在 地	反 応 性 岩 石	文 献
道路の舗装	California州, Salinas Valley	Oro Fino Creek産細骨材 (チャート, 頁岩含有) * ¹⁾	STANTON ¹⁾
King City橋	Monterey郡 King City	* ¹⁾	STANTON ¹⁹⁾
Southern Pacific Main Line橋	Ventura郡	Oro Fino Creek産細骨材* ¹⁾	STANTON ¹⁹⁾
舗道, 構造物	Los Angeles, Vetura, Santa Barbara, San Luis Obispo, Monterey 郡	いずれも4~15%の頁岩、チャート質頁岩、チャートを含んでいる* ¹⁾	STANTON ¹⁹⁾
Parkerダム	Colorado川	安山岩, 流紋岩質斑岩	MEISSNER ²⁰⁾
Buck電力プラント	Virginia	千枚岩	KAMMER & CARLSON ²⁾
Clear Fork Creek橋, Cortright Creek橋, Summit Creek橋, Laughing Water Creek橋	Washington州	安山岩* ²⁾ , その他の溶岩	TREMPER ²¹⁾
Geneダム, Copper Basinダム	Colorado川	Parkerダムと同じ骨材	BLANKS & MEISSNER ²²⁾
Friantダム	California	安山岩* ³⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
Coolidgeダム	Arizona	流紋岩質および安山岩質火山岩* ³⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
Stewart Mountain ダム	Arizona	流紋岩質および安山岩質火山岩* ³⁾ , 玉ズイ質チャート* ⁴⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
道路の舗装	California, Bradley	オパール質チャートおよび頁岩* ³⁾ , 流紋岩質および安山岩質火山岩* ⁴⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾ STANTON ¹²⁾
街路の舗装	Nebraska, Kimball	流紋岩および軽石* ³⁾ , 玉ズイ質・オパール質チャート, 凝灰質石灰岩* ⁴⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
道路の舗装と構造物	Washington州	安山岩* ³⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
American Fallダム	Idaho	安山岩および流紋岩* ³⁾ , 玉ズイ質チャート* ⁴⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
アンダーパス	Idaho, Idaho Falls	黒曜岩* ³⁾ , 流紋岩, 安山岩, 珪質石灰岩* ⁴⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
Owyheeダム	Oregon	安山岩および流紋岩* ³⁾ , 玉ズイ質チャート* ⁴⁾	McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾
コンクリート舗装	Indiana	ドロマイト質石灰岩* ⁵⁾ , 石灰岩* ⁵⁾ , チャート	SLATE ²⁴⁾
Tuscaloosaこう門, ダム	Warrior川, Alabama	玉ズイ質チャート	MATHER ²⁵⁾
5件の構造物		オパール, 珪岩と石英の混合物 (チャート含有, 非含有), 花崗片麻岩の3タイプ	BUCK & MATHER ²⁶⁾

*¹⁾ : STANTON¹²⁾およびSTANTON *et al.*¹⁴⁾は、これらの骨材に含まれていたオパールが反応の原因だとしている。

*²⁾ : COOMBS²⁷⁾はClear Fork Creek橋に使われていた2種の安山岩の中のガラスと脱ガラス化した物質が反応していると考えている。

*³⁾ : McCONNELL *et al.*²³⁾によると骨材の反応性をmajor control している岩型である。

*⁴⁾ : McCONNELL *et al.*²³⁾によると骨材の反応性をminor control している岩型である。

*⁵⁾ : SLATE²⁴⁾は言及していないが、これらの骨材によってアルカリシリカ反応ではなく、アルカリ炭酸塩岩反応が生じていた可能性も考えられる。

表-2 アメリカ各地のアルカリ骨材反応, セメント骨材反応の状況と反応性岩石・鉱物 HIGHWAY RESEARCH BOARD²⁸⁾より作成

報告機関	AAR* ¹ CAR* ²	反 応 性 岩 石	反 応 性 鉱 物	報告機関	AAR* ¹ CAR* ²	反 応 性 岩 石	反 応 性 鉱 物
Alabama	あり	—	—	Rhode Island	なし	—	—
Arizona	あり	— 安山岩	—	South Dakota	なし	—	—
Arkansas	なし	—	—	Tennessee	なし	—	—
California	あり	なし	—	Texas	— 可能性	—	—
Delaware	なし	—	—	Utah	あり	玄武岩, チャート	—
Florida	あり	—	—	Virginia	あり	—	—
Georgia	あり	—	—	West Virginia	なし	千枚岩, チャート, 砂岩	—
Idaho	あり	—	—	Wisconsin	なし	—	—
Illinois	なし	—	—	District of Columbia	なし	—	—
Indiana	—	—	—	Missouri	なし	—	—
Kansas	あり	—	—	Missouri River Division Lab. Corps of Eng.	なし	—	—
Kentucky	あり	—	—	North Pacific Division Lab. Corps of Eng.	あり	川砂利中の珪岩とガラス質火山岩類	オパール, 玉ズイ, 火山ガラス
Louisiana	なし	—	—	South Atlantic Division Lab. Corps of Eng.	あり	—	玉ズイ (オパール)
Maryland	なし	—	—	South Pacific Division Lab. Corps of Eng.	あり	—	オパール質チャート, 玉ズイ質チャート, 流紋岩, 安山岩
Massachusetts	なし	—	—	Southwestern Division Lab. Corps of Eng.	なし	—	—
Michigan	なし	—	—	Waterways Experiment Station Corps of Eng.	あり	あり	玉ズイ
Minnesota	なし	—	—	Bureau of Reclamation Department of Interior	あり	あり	オパール, チャート, 珪質石灰岩, 玉ズイ, 酸性中性火山岩類 (安山岩, 流紋岩, 凝灰岩)
Missouri	可能性	—	—	National Sand and Gravel Association	あり	あり	—
Nebraska	あり	—	オパール	Oregon	あり	—	—
New Hampshire	なし	—	—	Pennsylvania	なし	—	—
New Jersey	あり	—	—				
North Carolina	なし	—	—				
North Dakota	なし	—	—				
Ohio	なし	—	—				
Oklahoma	なし	—	—				
Oregon	あり	—	—				
Pennsylvania	なし	—	—				

*1: アルカリ骨材反応 (Alkali-Aggregate Reaction)。

*2: セメント骨材反応 (Sement-Aggregate Reaction)。

*3: 現在、沸石はアルカリ骨材反応を起す鉱物とはみなされていない。

り骨材反応が発見されている。実際にコンクリートにアルカリシリカ反応を生じさせた骨材をまとめると表-1のようになる。劣化したコンクリート構造物のほとんどはダム、橋梁、道路の舗装である。反応の原因となった骨材は、オパールや玉ズイを含んだ堆積岩と火山岩類が主体をなしている。表-2はHIGHWAY RESEARCH BOARD²⁸⁾が各州のアルカリ骨材反応とセメント骨材反応^{*3}を示す骨材をアンケートによって調査したものである。表に記載されていない州は回答がなかったものであるが、回答があった州の中では、アルカリ骨材反応が生じている州は約1/3あることがわかる。表にはアルカリ骨材反応とセメント骨材反応を起こす岩石、鉱物が区別されていないが、反応性岩石として挙げられているものにはチャートが多い。

表-3はアルカリ骨材反応の岩石記載学的試験方法についての総説、AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) の耐久性コンクリートの基準およびASTM C 295(コンクリート用骨材の岩石記載学的試験の標準手法)に記載されている反応性岩石をまとめたものである。ACIやASTMに記載されているものの中には、必ずしもアメリカ国内で反応を起こしたものでない岩石も含まれているようである。

^{*3} Kansas州のKaw川やRepublican川のsand-gravelを使ったコンクリートにみられる劣化を起こす反応で、アルカリ骨材反応とは別のものである。

以上のように、アメリカでアルカリシリカ反応を起こした岩石や起こす可能性のある岩石は、堆積岩類と火山岩類が主体をなしているが、花崗岩質岩や変成岩類にも反応性があり、多岐にわたっている。また、同じ岩類に属するいろいろな岩型の岩石に反応性があり、反応性骨材の岩型は非常に多様である。これはアメリカ大陸の地質が大陸核を構成しているようなものから、変動帯に属するようなものまで多種多様にわたっているからであろう。

(2) アルゼンチン

アルゼンチンでは、1958年に舗装の劣化が見つかったことを機会にアルカリ骨材反応の系統的な研究が行われるようになった³¹⁾。GIOVAMBATTISTA *et al.*³¹⁾によるとアルゼンチンの北東地域では、ソレアイト質玄武岩、Uruguay川の砂利、Parana川の砂およびオパールと玉ズイでセメントされた砂岩に潜在的に反応性がある。オパールと玉ズイでセメントされた砂岩(ベシマム^{*4}を持つ)によるコンクリートの劣化には、電気モーターの基

^{*4} 反応性骨材のうちのあるものは、その骨材のみで作ったモルタルはあまり膨脹せず、非反応性の骨材と混合してモルタルを作ると、ある特定の混合比で膨脹量が最大値を持つ。このような現象をベシマムと呼んでいる。そして、最大の膨脹量になる反応性骨材の割合はベシマム量と呼ばれる。

表-3 アメリカにおける総説および基準類に記載された反応性岩石

1) McCONNELL <i>et al.</i> ²³⁾ 珪質岩類: オパール質チャート(オパール), 玉ズイ質チャート(玉ズイ), 珪質石灰岩(玉ズイ, オパール) 火山岩類: 流紋岩, 石英安山岩, 安山岩とそれらの凝灰岩(火山ガラス, 脱ガラス化したガラス, トリディマイト) 変成岩類: 千枚岩(イライト?) その他: オパール, 玉ズイ, トリディマイトの脈・包有物・粒子を含んでいる岩石 ( ) は岩石中に含まれている反応性物質を示す。
2) MIELENZ ¹⁷⁾ 泥岩, 頁岩, 3%以上の玉ズイ質チャートを含む石灰岩・ドロマイト・大理石, チャート, ノバキュライト, 砂岩, 珪化した蛇紋岩, スレート, 千枚岩, 流紋岩, 石英安山岩, 粗面安山岩, 安山岩
3) ACI COMMITTEE 201 ²⁹⁾ オパール質チャート, 玉ズイ質チャート, 石英質チャート, 珪質石灰岩, 珪質ドロマイト, 粘土質岩, グレイワック*, 珪岩, 珪質頁岩, オパール質コンクリーション, 千枚岩, 片岩*, 花崗岩質片麻岩, 流紋岩・石英安山岩・安山岩とそれらの凝灰岩 *印はアメリカ以外で反応性が認められている岩石
4) ASTM C 295-79 ³⁰⁾ チャート, ガラス質~隠微晶質酸性火山岩類, 人工珪質ガラス, ある種の粘土質岩, 千枚岩, 変成グレイワック, グレイワック・千枚岩・片岩・片麻岩・片麻岩質花崗岩・脈状石英・珪岩・砂岩などのように高度に変成をした石英を含む岩石

礎ブロック(1977年にクラック発生), 国際空港のコンクリート(1978年に劣化)および500kV変電所のコンクリート(1984年にクラック発生)がある。これらのコンクリートに含まれていた細骨材中の玉ズイには, ASTM C 227(セメントと骨材の組合せによる潜在的アルカリ反応性に対する標準試験方法(モルタルバー法))によると反応性はなかった。

BATIC *et al.*³²⁾は5種類のガラス質火山岩類(全岩の SiO_2 : 65.80~76.42%)が ASTM C 227で膨張し有害であると報告している。

以上のようにアルゼンチンでは, オパール質, 玉ズイ質砂岩やガラス質火山岩類に反応性がある。

(3) オーストラリア

オーストラリアでのアルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化は, COLE *et al.*³³⁾が最初に報告している。劣化していたのは Victoria のダムで, 原因となっていた骨材はシルト岩である。

次に SHAYAN and LANCUCKI³⁴⁾は西部オーストラリア, Perth の Cause-way 橋(1944~51年に建設)に, 15年前にアルカリ骨材反応によって map-cracking^{*5}が生じたことを報告している。骨材は変粗粒玄武岩である。また, SHAYAN *et al.*³⁵⁾はこの変粗粒玄武岩と2種類の川砂利, 2種類の変玄武岩, 角閃石片岩, 砂岩, 花崗岩および石灰岩について ASTM C 289(骨材の潜在的反応性に対する標準試験方法(化学法)), モルタルバー試験およびコンクリートプリズム試験を実施している。その結果, 反応性があるのは2種類の川砂利と変粗粒玄武岩であると結論している。

THAULOW *et al.*³⁶⁾は Queensland 北部の Lucinda Bulk Sugar Terminal の栈橋にクラックが生じ, アルカリシリカ反応を起こしていると述べている。反応性骨材は流紋岩質凝灰岩であるとされている。

CARSE and DUX³⁷⁾はアルカリシリカ反応を起こした100件の構造物の調査を行っている。構造物のほとんどは蒸気養生を行った高強度のプレストレストコンクリートの橋梁の桁である。鉄筋コンクリートは3件含まれていた。これらのうち, Townsville 港湾施設と Herbert 川橋では酸性凝灰岩が反応性骨材で, Brinagee Creek 橋と Aitken 橋(Townsville)では流紋石英安山岩質凝灰岩中

の細粒シリカ(0.005mm)が反応性成分であるとされている。また, Sandy Creek 橋(Warwick)では川砂利(変珪岩, チャート, 砂岩, スレート, その他)と川砂(珪岩, チャート, 石英, 長石)が使用されており, これらの中のひずんだ石英(波動消光角 $16^\circ \sim 23^\circ$)が反応の原因とされている。

このようにオーストラリアで反応性岩石とされているのは, シルト岩, 変粗粒玄武岩, 酸性(流紋岩質, 流紋石英安山岩質)凝灰岩およびひずんだ石英を含んだ岩石である。

(4) ベルギー

VAN GEMERT³⁸⁾によると, ベルギーで最初にアルカリ骨材反応による劣化が見つかったのは1980年である。劣化していたのは1976年に建設されたプレストレスト軽量コンクリートである。この発見以来, 多くの事例が見つかっている。例えば, Rotselaar の道路コンクリートおよび Namur のオフィスビルのアルカリシリカ反応による劣化などである。

SOERS and MEYSKENS³⁹⁾は建設後6~28年経過している18件の構造物(道路の舗装, 海洋構造物, 建築物, 軽量コンクリート橋梁の現場打ちコンクリート, 部材, プレストレストの柱, マストのプレキャストコンクリート)が, アルカリシリカ反応によって劣化していることを報告している。これらの原因となった骨材はすべてアルカリシリカタイプで, アルカリシリケートやアルカリ炭酸塩岩タイプはないとされている。彼らはベルギー国内を図-1に示すような5地域に分け, それぞれの地域の反応性骨材として次のようなものを挙げている。

B 地域: 石炭紀の珪質石灰岩。このミクライト質石

図-1 ベルギーにおける反応性骨材の分布
SOERS and MEYSKENS³⁹⁾を改変。

*5 アルカリシリカ反応を起こしたコンクリートには, 亀甲状の不規則なクラックが特徴的に生じる。(鉄筋コンクリートの場合には, クラックは主鉄筋方向のものが卓越する)。この亀甲状のクラックはmap-cracking, random-crackingまたはpattern-crackingなどと呼ばれている。

灰岩は隠微晶質石英と層状鉱物を含んでいる。

C, D 地域: 沖積堆積物と海底の砂利, 砂に含まれているチャート, 玉ズイ, オパールおよび微晶質〜隠微晶質石英。オパールと多孔質な風化チャートの反応性が高い。

E 地域: 石英閃緑岩組成の斑状火山岩類。隠微晶質石英が反応の原因である。

他の一部の地域: 古生代と現世の細粒セリサイト質砂岩。

以上のほかに, 第四紀と現世堆積物中のひずんだ石英に反応性があるとされている。

(5) ブラジル

CAVALCANTI⁴⁰⁾は北東ブラジルの Moxotó ダムに多数のクラックがあることを報告している。クラックは1980年以降に発生し, 徐々に幅を広げている。また, コアにはシリカゲルと骨材の reaction rim が認められ, アルカリシリカ反応による劣化と判断されている。骨材はひずんだ石英を含んだ黒雲母-角閃石花崗岩が使用されていた。

(6) カナダ

カナダで最初にアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化を報告したのは, SWENSON³⁾である。東部カナダにある橋梁の道路面が劣化しており, 骨材として千枚岩, 玉ズイ質砂岩, 玉ズイ質石灰岩が含まれていた。

次の報告は DOLAR-MANTUANI⁴¹⁾によるもので, 粘土質岩を含んだ Lady Evelyn 湖ダム (Montreal 川) が劣化している。この間, PRICE⁴²⁾は珪質頁岩に反応性があることを述べている。

1973年には既述のように DUNCAN らによって Nova Scotia 地方のグレイワッケ, 粘土質岩および千枚岩を含んだコンクリートがアルカリシリケート反応⁷⁾によって劣化していることが報告された⁴⁾⁻⁶⁾。

DOLAR-MANTUANI^{43), 44)}は石英の反応性を判定する方法として, GOGTE¹⁸⁾の波動消光角による方法を発展させている。波動消光角が15°以下のものは非反応性とされている⁴⁴⁾。

GRATTAN-BELLEW⁴⁵⁾は骨材のコンクリートブリズムテスト, モルタルバーテスト, ロックシリンドertest および岩石記載学的試験の結果を報告している。コンクリートブリズムテストでは石英ワッケと長石質石英アレナイトが膨脹するとされている。また, 骨材の孔隙率 (P) と隠微晶質物質の量 (M) の比 (P/M) が0.12を境にして膨脹, 非膨脹が分かれる (0.12よりも小さい

と膨脹する) ことを述べている。

カナダをいくつかの地方に区分し, 地方毎の骨材の反応性が GRATTAN-BELLEW⁴⁶⁾によって述べられている。Appalachia 地方では珪岩と流紋岩を骨材とした New Glasgow の橋が膨脹をしている。同地方の Nova Scotia, Malay Fall では1925年に建設された水力発電ダムのコンクリートが劣化している。骨材は長石質珪岩 (石英粒83%, 隠微晶質物質15%, 長石2%) であった。Montreal 地方ではチャートを含んだ石灰岩でできたパティオスラブが膨脹とポップアウト^{*6)}を示している。Canadian Shield では, Sudbury 地域の小さなダムがクラックを示している。ピットの粗骨材は花崗岩 (10%), ノーライト (10%), 珪岩 (80%) から構成されている。これらはわずかしこ膨脹しないものに分類される。British Columbia 地方ではいくらかの潜在的に有害な骨材が認定されているが, 膨脹した例はない。

HOUDE *et al.*⁴⁷⁾は正珪岩質砂岩を骨材とした鉄道橋の脚がアルカリシリカ反応によってクラックを発生させていることを報告している。

GRATTAN-BELLEW⁴⁸⁾は花崗岩, 花崗閃緑岩およびグラノファイアー中の石英の波動消光角, 微晶質石英量とコンクリートブリズムの膨脹量との関係を検討している。そして, 波動消光角, 微晶質石英量と膨脹量との間には良い相関があることを述べている。また, DOLAR-MANTUANI⁴⁴⁾が示した波動消光角の15°は骨材の反応性, 非反応性を区分するために適当でないとしている。

KATAYAMA and FUTAGAWA⁴⁹⁾は New Brunswick のアルカリシリカ反応を起こした構造物に, reaction rim が認められるスレート, シルト岩および砂岩が含まれていることを報告している。反応部分は隠微晶質〜微晶質石英の集合体であるとされている。

HOOTON and ROGERS⁵⁰⁾は次の骨材を使った構造物でアルカリ反応が認められるとしている。

- (i) 27%の粘土質岩, グレイワッケ, 砂岩を含んだ珪質な砂利。
- (ii) 7.4%のチャートを含んだ珪質砂。
- (iii) 75%の粘土質岩, グレイワッケ, 砂岩を含んだ珪質な砂利。
- (iv) 5%の玉ズイを含んだ石灰岩の碎石。
- (v) 2.5%のチャートを含んだ珪質砂。
- (vi) 98%の粘土質岩, グレイワッケ, 砂岩を含んだ変堆積岩の碎石。

*6 ポップアウトとは, コンクリート表面に局所的な膨脹圧が生じて表面部が剝離する現象である。浅い円錐状のくぼみが形成されることが多い。

表 - 4 Hydro Québec (カナダ) のダムのアルカリ骨材反応の状況 RAPHAËL *et al.*⁽⁵¹⁾より作成。

ダ ム 名	骨 材	ダ ム の 状 態	アルカリ骨材反応の現われ
Farmers	粗骨材：閃緑岩、花崗岩、モンゾナイト片麻岩、細骨材：砕砂-石英65%，長石10%，鉄マグネシウム5%	表面は不良。内部は良好。アルカリ骨材反応が顕著。	シリカゲルの浸出。薬理を示す岩石内部にクラックがある。他の岩石は健全である。
Mercier	粗骨材：大理石45%，変グレイワック50%，砂利5%，細骨材：石英70%，カリ長石25%，鉄マグネシウム3～4%	良好。アルカリ骨材反応の部分的な形跡。	花崗岩にreaction rim。石英粒子は強く割れている。コンクリートに有害な影響はない。
Rawdon	粗骨材：珪岩、斜長岩、粘土質ドロマイト質石灰岩を含んだ花崗岩質礫、細骨材：砕砂-石英、長石	ある部分は良好で、他は不良。アルカリ骨材反応の部分的な形跡。	花崗岩と珪岩にreaction rim。石英粒子の一部は多角形化している。
Beauharnois	粗骨材：Postdam砂岩、細骨材：Postdam砂岩	全構造物がアルカリ骨材反応を受けている。表面コンクリートはより劣化している。	粗骨材にreaction rimとマイクロクラックがある。境界の脱色がみられる。
Les Cèdres	粗骨材：ドロマイト質石灰岩80%，珪岩16%，細骨材：砕砂-石英、長石	コンクリートは良好であるが、珪岩の周辺にアルカリ骨材反応の形跡がある。	珪岩にマイクロクラック。2次的なクラックはシリカゲルで充填されている。ドロマイト質岩はアルカリ骨材反応の影響を受けていない。
Grand Mère	粗骨材：石英閃緑岩75%，花崗岩10%，珪岩15%，細骨材：石英閃緑岩、砕砂	良好な状態。外部にアルカリ骨材反応の形跡はない。	顕微鏡でごく一部にアルカリ骨材反応が認められる。コンクリートに有害な影響はない。
La Gabelle	粗骨材：苦鉄質の包有物を含んだ砂岩、細骨材：珪質砂	表面コンクリートの大部分は不良。内部は良好。	石英は波動消光をする。顕微鏡で reaction rim がみられる。コンクリートに有害な影響はない。
Shawinigan	粗骨材：片麻岩、細骨材：花崗岩質砂	表面コンクリートの一部は良好。その他は劣化している。一部にシリカゲルの浸出。	2つのタイプの部分的な反応がある。アルカリシリカとアルカリシリケート反応の rim が骨材にある。コンクリートに有害な影響はない。

表 - 5 カナダの反応性岩石 ROGERS⁽⁵²⁾を改変。

(1) 顕生代			
岩 型	時 代	分 布 地	
安山岩と関連火山岩類		British Columbia	
珪岩		British Columbia, Albertaのロッキーマウンテン	
オパール質頁岩／珪質頁岩		Saskatchewan, Manitoba	
サブグレイワック	上部シルル系	Ellesmere島	
含玉ズイチャート	デボン系, シルル系	北Ontarioの氷河中, 南Ontarioの砕石場および氷河中	
珪質, わずかに珪質な石灰岩	中部オルドビス系	QuebecのSt. Lawrence Lowlands南, 東部Ontario	
ドロマイト質石灰岩, 石灰質ドロストーン	中部オルドビス系	南Ontario, Hudson Bay Lowlands	
砂岩, 正珪岩	カンブリア系	東Ontario, 南西Quebec	
流紋岩質凝灰岩		Quebec市の南東	
千枚岩		南東Quebec	
千枚岩, グレイワック, シルト岩, 粘土質岩, 片岩, 珪化凝灰岩, 脱ハリガラス, 珪岩		New Brunswick, Nova Scotia, Newfoundland	
流紋岩		Nova Scotia	
(2) 先カンブリア時代			
岩 型	時 代	分 布 地	
ひずんだ石英を伴った花崗岩, 花崗片麻岩			
砂岩, 石英ワック, アルコース, グレイワック, 粘土質岩	Huronian累層群	中部Ontario, 西Quebec	
繡状鉄鉱層中のチャート			

これらのうち (i)~(iv) を使った多くの構造物で、(v) を使った 30 年経過した構造物の一部で、また (vi) を使った 20 年経過したダムの一部でアルカリ反応が認められている。

RAPHAËL *et al.*⁵¹⁾ は Hydro Québec の水力発電施設のうち 8 箇所の調査を行っている。調査の結果は表-4 のようにまとめられる。確実にアルカリ骨材反応を起こしているのは Beauharnois ダムで、骨材として Postdam 砂岩が使用されている。彼らは 8 つのダムのうち 2 つがアルカリ骨材反応を起こしているとしているが、もう 1 つは不明である。GRATTAN-BELLEW⁴⁶⁾ によると、Postdam 砂岩はチャートを伴った石英粒子から構成されている。

ROGERS⁵²⁾ はカナダで反応性があるといわれている岩石を表-5 のようにまとめている。この表にはアルカリシリケート反応を起こす岩石 (New Brunswick ほかの千枚岩など) およびアルカリ炭酸塩岩反応を起こす岩石 (南 Ontario ほかのドロマイト質石灰岩など) も含まれている。これらを除いたアルカリシリカ反応性がある岩石は、珪岩、頁岩、グレイワッケ、砂岩、チャートなど圧倒的に堆積岩類が多いことがわかる。

(7) キプロス

POOLE⁵³⁾ は Dhekelia の防波堤のコンクリートにクラック、シリカゲルや骨材の reaction rim があり、アルカリシリカ反応が起こっていると述べている。反応性骨材は石灰質砂岩だとされている。

SIMS and POOLE⁵⁴⁾ は石灰質オパール質シルト岩がコンクリートにアルカリ骨材反応を起こしていることと、キプロスでは塩基性~超塩基性火成岩、チャート、炭酸塩岩とシルト岩に反応性があることを述べている。

(8) デンマーク

NIELSEN⁵⁵⁾ は水道施設と道路橋にアルカリシリカ反応によるクラックが生じていることを報告している。

MøRUP⁵⁶⁾ は 1976 年に建設された水泳プールが、1981 年にアルカリ骨材反応で劣化したことを報告している。このプールでは水に塩を混ぜている。骨材はフリントである。

CHRISTENSEN *et al.*⁵⁷⁾ はモルタルバーの膨脹速度が、フリントのタイプによって異なっていることを述べている。速度が最大なのはオパール質フリントで、密度の高い玉ズイ質フリントの速度は最低である。そして、オパール質の殻を持った玉ズイ質フリント速度は、これらの中間であるとされている。また、CHRISTENSEN

*et al.*⁵⁸⁾ はコンクリートプリズムの膨脹量は、オパール質フリントの量と相関していることを述べている。

このように、デンマークの反応性骨材はフリントが主体をなしているようである。

(9) イギリス

イギリスで最初にアルカリシリカ反応による構造物の劣化が発見されたのは、Jersey の Val de la Mare ダムで、1971 年のことである^{59), 60)}。このダムのコンクリートにはオパールと玉ズイを含んだ閃緑岩とコウ斑岩が使用されていた⁵⁹⁾。

PALMAR⁶¹⁾ は 23 件のアルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化を認めている。ほとんどのケースで反応性シリカは 1~5 mm 大のチャートまたはフリントであった。1 件だけ反応性骨材が人工ガラスであった。PALMAR⁶¹⁾ は、また、イギリスにはアルカリ骨材反応のうちアルカリシリカ反応のみが存在し、アルカリ炭酸塩岩反応は存在しないと述べている。

NIXON and BOLLINGHAUS⁶⁰⁾ はアルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートが 50 件あると述べている。彼らはアルカリシリカ反応を起こしている骨材のタイプを次の 2 つに分けている。

- (i) チャート、フリントを含んだ石英砂。これらのうちチャート、フリントがアルカリと反応する。
- (ii) Trent Valley の砂と砂利。少量のチャートを含み、残りは珪岩と石英である。チャートと珪岩がアルカリと反応する。

以上のチャートとフリントには隠微晶質石英と玉ズイが含まれており、オパールは含まれていないとされている。これら 2 つのタイプのほかにアルカリシリカ反応性を持っている骨材には、人工ガラスと Scotland の Lowland 地方のグレイワッケとフェルサイトがあるとされている。

POOLE and AL-DABBAGH⁶²⁾ および AL-DABBAGH⁶³⁾ は、フリントの色が微細なクラックや不純物の濃度を反映しており、アルカリ反応性と関係していると考えている。そして、ゲルパット法^{*7}を実施し、クリーム色/茶色のフリントは灰色/黒色のフリントよりも反応性が高いという結果を得ている。

NIXON and GILLSON⁶⁴⁾ は Burton-on-Trent の Drakelow Power Station で、1982 年にアルカリシリカ反応が発見されたことを報告している。反応性骨材は

^{*7} 骨材をセメントペースト中に埋め込んで作った供試体を、Ca(OH)₂、NaOH、KOH の混液に漬け、骨材の反応性を見る方法。

表-6 イギリスの岩石、鉱物のアルカリシリカ反応性 BRITISH CEMENT ASSOCIATION⁷⁰⁾より作成。

1) 反応性が報告されているもの

チョーク、チャート、閃緑岩と微閃緑岩（オパール、玉ズイの脈があるもの）、フリント、オパールまたはオパール質シリカ、石英（ひずんだ石英、微晶質～隠微晶質石英）、変成または変珪岩

2) 反応性の可能性があるもの

玉ズイまたは玉ズイ質シリカ、クリストバライト、グレイワッケ、堆積性または正珪岩、流紋岩、砂岩、火山ガラス

3) 反応性が報告されていないもの

角閃岩、安山岩、アルコース、玄武岩、角礫岩、礫岩、粗粒玄武岩、ドロマイト、長石、斑レイ岩、片麻岩、花崗岩と微花崗岩、グラニュライト、グリットストン、ホルンフェルス、石灰岩、大理石、片岩、スレート、閃長岩と微閃長岩、粗面岩、トリディマイト、凝灰岩

チャート、極細粒の結晶質シリカを含んだ砂岩およびひずんだ石英を含んだ砂岩であった。

SIMS⁶⁵⁾は南東および中央イングランドには、チャート（フリント）と変成珪岩が分布しており、ASTM C 289で有害または潜在的有害となることを報告している。

FRENCH⁶⁶⁾は10年間に300件のコンクリート構造物を調査し、そのうち40%がアルカリ骨材反応を起こしていたと述べている。彼は反応性物質を、

- (i) チャート（フリントを含む）と珪質鉄岩
- (ii) グレイワッケと関連したシルト岩、粘土質岩
- (iii) 低変成粘土質岩
- (iv) ガラスと脱ガラス化したガラスを含む細粒酸性火山岩
- (v) 変成珪岩

の5つに区分している。

JONES and POOLE⁶⁷⁾は南西イングランドで2箇所、中部イングランドで1箇所のアルカリシリカ反応を受けた構造物からコアを採取し、いずれも反応性骨材が細骨材中のチャートであることを報告している。

WEST and SIBBICK⁶⁸⁾はコンクリート道路14件のうち2件がアルカリシリカ反応を起こしており、粗骨材は白亜紀のフリントであったことを報告している。このフリントの色は黒色から灰色を通してクリーム色、白色へ変化し、白色に近いものの方が多孔質（吸水率が高い）で、反応性が高いとされている。

HOBBS⁶⁹⁾は1931～75年に建設された100～300件の構造物にアルカリシリカ反応によるクラックが生じていることを報告している。中でもクラックの発生は1969～71年に建設された構造物で多くなっている。反応性骨材は、

- (i) Bristol 湾、Wight 島沖および Wareham の海砂中のチャート（隠微晶質石英および玉ズイが含まれているが、どちらが反応の原因かは不明）

(ii) Trent Valley の砂と砂利

(iv) Jersey の碎石と海砂利の混合物（反応性シリカはオパールを伴った玉ズイである。）

の3種であるとされている。

以上のように、イギリスでは1971年のアルカリシリカ反応による構造物の劣化の発見以来、多くのアルカリシリカ反応の事例が報告されてきている。このような状況の中で BRITISH CEMENT ASSOCIATION⁷⁰⁾は、1987年までのイギリス国内での報告から表-6のような反応性骨材に関するとりまとめを行っている。イギリスで反応性骨材の主体をなしているのは、チャート、フリントなどの堆積岩類であることがわかる。

4. お わ り に

本編ではアメリカはじめ9か国のアルカリシリカ反応性岩石について見てきた。反応性岩石の岩型はそれぞれの国の地質を反映しており、特色がある。各国の反応性岩石の比較等は、(その2)で日本も含めて残りの国々（アイスランド～ザンビアの11か国およびその他）の反応性岩石について述べた後に行いたい。

参 考 文 献

- 1) STANTON, T. E. (1940a) : Influence of cement and aggregate on concrete expansion. Engineering News Record, Feb. 1, pp. 59-61.
- 2) KAMMER, H. A. and CARLSON, R. W. (1941) : Investigation of causes of delayed expansion of concrete in Buck Hydroelectric Plant. Jour. ACI, Proc. 37, pp. 665-671.
- 3) SWENSON, E. G. (1957) : A reactive aggregate undetected by ASTM tests. ASTM Bulletin, 226, pp. 48

- 50.
- 4) DUNCAN, M. A. G., SWENSON, E. G., GILLOTT, J. E. and FORAN, M. R. (1973a) : Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia. I. Summary of a five-year study. *Cement and Concrete Research*, 3, pp. 55-69.
  - 5) DUNCAN, M. A. G., GILLOTT, J. E. and SWENSON, E. G. (1973b) : Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia. II. Field and petrographic studies. *Cement and Concrete Research*, 3, pp. 119-128.
  - 6) DUNCAN, M. A. G., SWENSON, E. G. and GILLOTT, L. E. (1973c) : Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia. III. Laboratory studies of volume change. *Cement and Concrete Research*, 3, pp. 233-245.
  - 7) GILLOTT, J. E. (1975) : Practical implications of the mechanisms of alkali-aggregate reactions. *Symp. Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures*, Reykjavik, pp. 213-230.
  - 8) 近藤泰夫・北川欣一 (1951) : アルカリ・骨材反応に関する研究. セメント技術年報, 5, pp. 379-398.
  - 9) 村田清逸・関 慎吾・藤木洋一 (1965) : アルカリ骨材反応を起したコンクリートの一例. セメント・コンクリート, 220, pp. 7-13.
  - 10) 藤原 靖・松岡康則・金子誠二・内藤隆史 (1985) : アルカリ骨材反応に関する研究. 大成建設技術研究所報, 18号, pp. 57-65.
  - 11) 市川 慧・平野 勇・脇坂安彦・小林茂敏・河野広隆・森濱和正・森田良美 (1990) : 日本産岩石のアルカリシリカ反応性. 土木研究所資料, 261p.
  - 12) STANTON, T. E. (1941) : Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Discussions. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 67, pp. 1402-1418.
  - 13) RHOADES, R. (1942) : Discussion of a paper by Stanton, Porter, Meder and Nicol : California experience with the expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Jour. ACI, Proc.* 38, pp. 236/7-236/11.
  - 14) STANTON, T. E., PORTER, O. J., MEDER, L. C. and NICOL, A. (1942) : California experience with the expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Jour. ACI*, 13, pp. 209-236.
  - 15) HORN BROOK, F. B., INSLEY, H. and SCHUMAN, L. (1943) : Report of committee C-1 on cement, Appendix. *Proc. ASTM*, 43, p. 218.
  - 16) LANDGREN, R. and SWEET, S. (1952) : Investigation of durability of Wyoming aggregates. *Proc. HRB*, 31, pp. 202-217.
  - 17) MIELENZ, R. C. (1954) : Petrographic examination of concrete aggregate. *Proc. ASTM*, 54, pp. 1188-1218.
  - 18) GOGTE, B. S. (1973) : An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali-aggregate reactions. *Engineering Geology*, 7, pp. 135-153.
  - 19) STANTON, T. E. (1940b) : Expansion of concrete through reaction between cement and aggregates. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 66, pp. 1781-1811.
  - 20) MEISSNER, H. S. (1941) : Cracking in concrete due to expansive reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam. *Jour. ACI, Proc.* 37, pp. 549-568.
  - 21) TREMPER, B. (1941) : Evidence in Washington of deterioration of concrete through reactions between aggregates and high alkali cements. *Jour. ACI*, 37, pp. 673-686.
  - 22) BLANKS, R. F. and MEISSNER, H. S. (1946) : The expansion test as a measure of alkali-aggregate reaction. *Jour. ACI, Proc.* 42, pp. 517-539.
  - 23) McCONNEL, D., MIELENZ, R. C., HOLLAND, W. Y. and GREENE, K. T. (1947) : Cement-aggregate reaction in concrete. *Jour. ACI*, 19, pp. 93-123.
  - 24) SLATE, F. O. (1949) : Chemical reactions of Indiana aggregate in disintegration of concrete. *Proc. ASTM*, 49, pp. 954-961.
  - 25) MATHER, B. (1952) : Cracking of concrete in the Tascaloosa Lock. *Proc. HRB*, 31, pp. 218-233.
  - 26) BUCK, A. D. and MATHER, K. (1978) : Alkali-silica reaction products from several concretes : Optical, Chemical, and X-ray diffraction data. *Proc. 4th CEACC*, pp. 73-85.
  - 27) COOMBS, H. A. (1942) : Expansion of concrete due to reaction between andesitic aggregates and cement. *American Journal of Science*, 240, 288-297.
  - 28) HIGHWAY RESEARCH BOARD (1958) : Results of 1953 questionnaire on cement-aggregate or alkali-aggregate reaction in concrete. *Highway Research Board Research Report*, 18-C, The Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.12-17.
  - 29) ACI COMMITTEE 201 (1977) : Guide to durable concrete. *Jour. ACI*, pp. 573-609.
  - 30) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (1979) C 295-79 : Standard Practice for petrographic examination of aggregates for concrete.
  - 31) GIOVAMBATTISTA, A., BATIĆ, O. R. and TRAVERSA, L. P. (1987) : Reactivity of alkalis and sandstones cemented with opal and chalcedony. *Proc. 7th ICAAR*, pp. 408-412.
  - 32) BATIĆ, O. R., CORTELEZZI, C. R., SOTA, J. D., MAIZA, P. J., PAVLICEVIC, R. and IASI, R. (1987) : Behavior of volcanic glasses reacting with portland cement alkali. *Proc. 7th ICAAR*, pp. 484-488.
  - 33) COLE, W. F., LANCUCKI, C. J. and SANDY, N. J. (1981) : Products formed in an aged concrete. *Cement and Concrete Research*, 11, pp. 443-454.
  - 34) SHAYAN, A. and LANCUCKI, C. J. (1987) : Alkali-aggregate reaction in the Canseway Bridge, Perth. *Western Australia. Proc. 7th ICAAR*, pp. 392-397.
  - 35) SHAYAN, A., DIGGINS, R., RITCHIE, D. F. and WESTGATE, P. (1987) : Evaluation of Western Australian aggregates for alkali-reactivity in concrete. *Proc. 7th ICAAR*, pp. 247-252.

- 36) THAULOW, N., HOLM, J. and ANDERSEN, K. T. (1989) : Petrographic and chemical analysis of the Lucinda Jetty prestressed concrete roadway. Proc. 8th ICAAR, pp. 573-581.
- 37) CARSE, A. and DUX, P. (1989) : Alkali-silica reaction in Australian concrete structures. Proc. 8th ICAAR, pp. 25-30.
- 38) VAM GEMERT, D. (1989) : Alkali-aggregate reaction in Belgium : Concrete highway and office building. Proc. 8th ICAAR, pp. 43-49.
- 39) SOERS, E. and MEYSKENS, M. (1989) : Petrographical research on alkali-aggregate reactions in concrete structures in Belgium. Proc. 8th ICAAR, pp. 463-468.
- 40) CAVALCANTI, A. J. C. T. (1987) : Alkali-aggregate reaction at Moxotó Dam, Brazil. Proc. 7th ICAAR, pp. 168-172.
- 41) DOLAR-MANTUANI, L. M. M. (1969) : Alkali-silica reactive rocks in the Canadian Shield, Highway Research Record, No. 268, pp. 99-117.
- 42) PRICE, G. C. (1961) : Investigation of concrete materials for the South Saskatchewan River Dam. Proc. ASTM, 61, pp. 1155-1179.
- 43) DOLAR-MANTUANI, L. M. M. (1975) : Petrographic aspects on siliceous alkali reactive aggregates, Symp. Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures, Reykjavik, pp. 87-100.
- 44) DOLAR-MANTUANI, L. M. M. (1981) : Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali-reactive rocks. Proc. 5th ICARC, s252/36, 12p.
- 45) GRATTAN-BELLEW, P. E. (1978) : Study of expansivity of a suite of quartzwackes, argillites and quartz arenites. 4th ICEACC, pp. 113-140.
- 46) GRATTAN-BELLEW, P. E. (1981a) : Canadian experience of alkali-expansivity in concrete. Proc. 5th ICARC, s252/6, 13p.
- 47) HOUE, J., LACROIX, P. and MORNEAU, M. (1987) : Rehabilitation of railway bridge piers heavily damaged by alkali-aggregate reaction. Proc. 7th ICAAR, pp. 163-167.
- 48) GRATTAN-BELLEW, P. E. (1987) : Is high undulatory extinction in quartz indicative of alkali-expansivity of granitic aggregates ? Proc. 7th ICAAR, pp. 434-439.
- 49) KATAYAMA, T. and FUTAGAWA, T. (1989) : Alkali-aggregate reaction in New Brunswick, Eastern Canada—Petrographic diagnosis of the deterioration. Proc. 8th ICAAR, pp. 531-536.
- 50) HOOTON, R. D. and ROGERS, C. A. (1989) : Evaluation of rapid test methods for detecting alkali-reactive aggregates. Proc. 8th ICAAR, pp. 439-444.
- 51) RAPHAËL, S., SARKAR, L. and AITCIN, P.-C. (1989) : Alkali-aggregate reactivity—Is it always harmful ? Proc. 8th ICAAR, pp. 809-814.
- 52) ROGERS, C. A. (1989) : Alkali-aggregate reactivity in Canada. Proc. 8th ICAAR, pp. 57-63.
- 53) POOLE, A. B. (1975) : Alkali-silica reactivity in concrete from Dhekelia, Cyprus. Symp. Alkali-Aggregate Reaction, Preventive Measures, Reykjavik, pp. 101-111.
- 54) SIMS, I. and POOLE, A. B. (1980) : Potentially alkali-reactive aggregates from the Middle East. Concrete, May, pp. 27-30.
- 55) NIELSEN, A. (1983) : Service life prediction and alkali-silica reactions. Proc. 6th ICAC, pp. 411-418.
- 56) MØRUP, H. (1983) : A swimming pool deteriorated by alkali-aggregate reactions. Proc. 6th ICAC, pp. 435-440.
- 57) CHRISTENSEN, P., CHATTERJI, S., THAULOW, N. and JENSEN, A. D. (1983a) : Alkali-silica reactivity of various Danish flint types. Proc. 6th ICAC, 315-319.
- 58) CHRISTENSEN, P., CHATTERJI, S., JENSEN, A. D. and THAULOW, N. (1983b) : Preliminary investigation of alkali-silica reactivity of density separated coarse aggregate. Proc. 6th ICAC, pp. 105-109.
- 59) GUTT, W. and NIXON, P. J. (1979) : Alkali aggregate reactions in concrete in the UK. Concrete, May, pp. 19-21.
- 60) NIXON, P. J. and BOLLINGHAUS, R. (1983) : Testing for alkali reactive aggregates in the UK. Proc. 6th ICAC, pp. 329-336.
- 61) PALMER, D. (1981) : Alkali-aggregate reaction in Great Britain—The present position. Concrete, March, pp. 24-27.
- 62) POOLE, A. B. and AL-DABBAGH, I. (1983) : Reactive aggregates and the products of alkali-silica reaction in concretes. Proc. 6th ICAC, pp. 175-185.
- 63) AL-DABBAGH, I. (1987) : Flint characteristics and alkali-silica reactivity. Proc. 7th ICAAR, pp. 413-417.
- 64) NIXON and GILLSON, I. P. (1987) : An investigation into alkali-silica reaction in concrete bases at an electricity substation at Drakelow Power Station, England. Proc. 7th ICAAR, pp. 173-177.
- 65) SIMS, I. (1987) : The importance of petrography in the ASR assessment of aggregates and existing concretes. Proc. 7th ICAAR, pp. 358-367.
- 66) FRENCH, W. J. (1987) : A review of some reactive aggregates from the United Kingdom with reference to the mechanism of reaction and deterioration. Proc. 7th ICAAR, pp. 226-230.
- 67) JONES, T. N. and POOLE, A. B. (1987) : Alkali-silica reaction in several U. K. concrete : The effect of temperature and humidity on expansion, and the significance of ettringite development. Proc. 7th ICAAR, pp. 446-450.
- 68) WEST, G. and SIBBICK, R. G. (1989) : A mechanism for alkali-silica reaction in concrete roads. Proc. 8th ICAAR, pp. 95-100.
- 69) HOBBS, D. W. (1989) : Cracking and expansion due to alkali-silica reaction in the United Kingdom. Proc. 8th ICAAR, pp. 31-36.
- 70) BRITISH CEMENT ASSOCIATION (1988) : The diag-

nosis of alkali-silica reaction. 36p.

出典名の正式名称

Jour. ACI : Journal of the American Concrete Institute
 Proc. ASTM : American Society for Testing and Materials, Proceedings
 Proc. HRB : Highway Research Board, Proceedings
 4th ICEACC : 4th International Conference on Effects of Alkalies in Cement and Concrete, Purdue University
 Proc. 5th ICARC : Proceedings of the 5th International

Conference on Alkali-Reaction in Concrete, Cape Town
 Proc. 6th ICAC : Proceedings of the 6th International Conference on Alkalies in Concrete, Research and Practice, Copenhagen
 Proc. 7th ICAAR : Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Grattan-Bellow ed. Concrete Alkali-Aggregate Reactions. Noyes Publications, Park Ridge
 Proc. 8th ICAAR : Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto

(1990年2月20日受付, 1990年3月22日受理)

『応用地質 Q&A』

Q: 地すべりや斜面の安定性に地震が及ぼす影響をどのように評価したらよいのでしょうか。また、地すべり等の対策工を設計する際に、地震力をどのように考えたらよいのか教えてください。

A: 地すべりや斜面崩壊を発生させる誘因の1つとして、地震が挙げられます。近年では、1984年9月14日に発生した長野県西部地震によって誘発された御岳山の大崩壊や松越地区の地すべりをはじめとする多数の地すべりや斜面崩壊が記憶に新しいところです。このような地震が斜面の安定性に及ぼす影響について定量的に評価するためには、安定解析による方法が一般的であると考えられます。そこでここでは、まず地すべりや斜面崩壊に対して行われる安定解析の中に導入される地震力の考え方を2, 3の安定解析手法について示し、次に、対策工の設計時における地震力の考え方について簡単に述べてみたいと思います。

1. 安定解析の手法

1) 簡便法

現在最も一般的に用いられている安定解析法は、(1)式で示される「簡便法」(Fellenius法)とよばれるものです。

$$F_s = \frac{\sum \{cl + (W \cos \theta - u) \tan \phi\}}{\sum W \sin \theta} \quad (1)$$

ここに、 F_s : 安全率 c : すべり面の粘着力, ϕ : すべり面の内部摩擦角, W : 各スライスの重量, θ : すべり面の傾斜角, u : 間隙水圧, l : すべり面の長さ。

(1)式において地震による水平震度 k_h をすべりを加速する方向に、鉛直震度 k_v を鉛直上向きに作用させると、(2)式ようになります。

$$F_s = \frac{\sum \{cl + \{(W - k_v \cdot W) \cos \theta - k_h \cdot W \cdot \sin \theta - u\} \tan \phi\}}{\sum \{(1 - k_v) \cdot W \sin \theta + k_h W \cos \theta\}} \quad (2)$$

しかしながら通常は鉛直震度 k_v を無視して k_h のみを考慮した(3)式が用いられる場合が多いようです。

$$F_s = \frac{\sum \{cl + (W \cos \theta - k_h \cdot W \sin \theta - u) \tan \phi\}}{\sum W (\sin \theta + k_h \cos \theta)} \quad (3)$$

図-1 地震力を考慮した場合の安全率の変化
 (建設省土木研究所急傾斜地崩壊研究室, 動土質研究室による)