

ASRの発生プロセスと反応粒の迅速目視特定

DISCOVERY OF ASR PROCESS IN CONCRETE AND RAPID TEST METHOD WITH EYE-JUGMENT FOR ASR AGGREGATE

安田 稔* 山田一彦** 三宅淳一***

By

Minoru YASUDA, Kazuhiko YAMADA and Jun-ichi MIYAKE

1. はじめに

アルカリ骨材反応(AAR)に基づくコンクリートの劣化問題は、半世紀に及ぶ歴史と研究によって、アルカリシリカ反応(ASR)またはアルカリカーボネート反応(ACR)などに起因して生じることが明らかとなっている。ところが、わが国においては、ACRを発生し易いドロマイト系の鉱脈が少ないことから、AARと言えばその殆どがASR現象の事であつて、ACRによる被害の例は見受けられないと言われている。そこで本文は主としてASRに関し論述する。

このASRに関しては、既に多くの研究によって①現場発生の実態、②発生メカニズム、③反応生成物の特定、④反応性岩種の特定、⑤ASR反応の抑制方法、⑥劣化コンクリートの補修方法、などの殆どが解明あるいは解決されている。また、⑦反応性骨材の判定方法についても多種多様な方法が確立され、なおかつ新たな提案がなされている。

然しながら、長年月を経過するコンクリート中でなによりASRが遅延発生するかのプロセスや、ポゾラン材の混和がなぜASRの発生を抑制するかのメカニズムについては、いまだに十分な解明がないのが現状である。

また、ASR骨材の判定方法についても、高度な岩石学的鑑定のほか、実際的には、複雑かつ繊細な分析行程を要する化学法や、長期間の培養と精密計測を伴うモルルバー法、などからの微量の溶解現象や膨張挙動から反応の潜在性を判定しているのが現状で、砂の有機不純物の判定方法に見られるような、迅速かつ簡便な合理的手法は確立されていない。

そこで、コンクリートにおけるASRの発生の実態とその背景を考究した結果、長年にわたるセメントの水反応和によって、コンクリート中に多量蓄積する遊離石灰(水酸化カルシウム; $\text{Ca}(\text{OH})_2$)をキーワードとして、ASRの発生プロセスを展開すると、理路整然と論証できることから、「ASRの発生は遊離石灰に誘発され」かつその環境では「骨材粒は白色の遊離石灰に

包含され目視診断が可能」との仮説創案に到達し、その立証を「成熟コンクリートのアルカリ環境模擬ペースト」と「ASRが陰陽の骨材」を用い行つた。

以下にこれら仮説の創案、その立証方法、立証結果とその考察、その他諸提言を順次論述する。

2. ASR発生プロセスの創案

前述のようにASR問題の根本をなすところの発生プロセスや迅速簡便なASR骨材の特定法が不十分な現状から、それらを解明あるいは立案しようとして、ASR発生の実態と背景を考究し、以下の仮説創案に到達した。

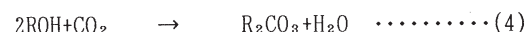
ただし、ASRの発生メカニズムについては(1)式のよう、ASR骨材(SiO_2)が水酸化アルカリ金属(ROH ; NaOH , KOH)により融解されるとの前提条件に立脚した。



2. 1. 創案したASRの発生プロセス

ASRの発生プロセスの検討に当たっては、まずASRの発生実態に関連文献と自社研究ならびにその背景をセメント・ソーダ・コロイド・水ガラス・グラウトなどの関連化学や遊離石灰との大量遭遇、などを糧に次のように推察した。

1) セメントに含まれているアルカリ金属(Na , K ; R)は、そのクリンカー焼成時に恐らくは酸化(R_2O)し介在すると考えられるが、この R_2O はコンクリート製造の加水時に一旦は(2)式のよう、水酸化するものの、セメントの急結防止に添加されている硫酸分(SO_3)や気中・水中の二酸化炭素(CO_2)などと直ちに(3)(4)式のよう、に反応し、中性化状態で介在すると考えた。



従って、(3)(4)式のとうな中性状態においては、例い高活性のASR骨材であっても、永遠にアルカリ融解されないと考えた。

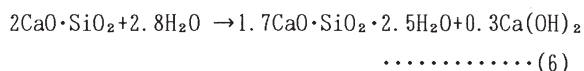
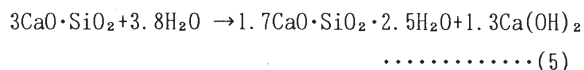
若し、ASRが発生するとすれば、コンクリート中で何んらかの化学的变化が生じるものと考え検討してみると、大きな変化としては遊離石灰の大量発生に限られた。

2) 他方、実際にASR現象を生じるコンクリートにおいては、10年前後を経過する時点でASRが多発しており

* 電源開発(株)建設部設計室 主幹 (104 東京都中央区銀座6-15-1), ** 同室 課長代理, *** 同社 総合技術試験所 課長代理

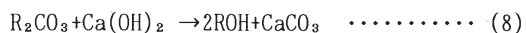
、さらに38℃培養のモルタルバー中でも数カ月後にASR膨張が生じ始めている。

この空白の時間帯にコンクリート中で何が生じるかと言えば、(5)(6)¹⁾式に示すセメントの水和反応が進行し、多量の遊離石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; C_3S や C_2S の存在率にもよるが28% 前後といわれている) が蓄積というか、その飽和に他ならない。



そしてこの飽和時期とASRの発生時期とは符合すると考えた。

3) この $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (アルカリ土金属) は、アルカリ金属塩を(7)(8)式のように苛性化する潜在力を持っており、例えば苛性ソーダの製造に応用されてきた。



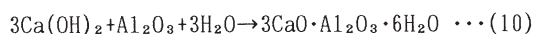
従って、コンクリート中はある意味において密室状態であることから、 CO_2 が侵入できないために(7)(8)式のようにアルカリ金属塩を苛性化し、その水酸化アルカリ (ROH) が(1) 式のようにASR 骨材を融解すると考えた。

4) なお、セメントの水和による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成速度は、配合・温度・湿分などの影響もあって明確には特定しづらいが、10年経過後でも水和率は約70% 程度と言われている。しかしながら、加水の段階から $\text{Ca}(\text{OH})_2$ をそれなりに発生するわけであり、その時点からASR 現象が発現するとも考えられるが、それはつぎの二象から否定されたと考えた。

まず、①初期に発生する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、コンクリート中にフリー状態で介在する CO_2 や SO_3 などと(3)(4)式に示したように反応し、中性化状態で存在するためアルカリ金属塩を苛性化するには至らないが、それらの反応終息後に発生する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、アルカリ金属塩からも(7)(8)式のように CO_2 や SO_3 をしだいに奪いはじめ、アルカリ金属塩を苛性化するという長がい道程を経るため遅延発生すると考えた。

次に、②もし骨材が初めから融解したととも $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が飽和に近い状態にないと、骨材粒にリム (カルシウム-シリケートゲルの包含) が形成されずらいため、コンクリートの膨張は生じないと考えた。

5) 一方、モルタルやコンクリートに、アルカリ金属をセメントよりも格段に多く含むフライアッシュを当量混和すると、(9)(10)(11) 式 (矢印の左辺は仮定) のようなボゾラン反応のためか、ASR 性膨張が抑制されるという事実²⁾ がある。



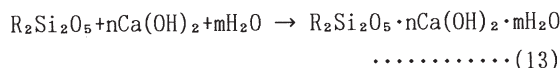
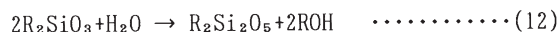
このようにボゾラン材は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を反応消費するためアルカリ金属塩の苛性化を妨げ、それに伴って骨材の融解もされずらくなることから、「ボゾラン材は ASR を間接抑制する」とのプロセスが考えられた。

以上の1)~5)の仮想諸現象には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が共通のキーワードとなってASR に関与しており、セメントの水和反応で生成する「 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がASR を誘発する」と仮説した。

2. 2. 仮説したASR 骨材粒への白色ゲル包含現象

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ が大量介在する中で骨材がASR 現象を生じれば、その過程でASR 粒を特定できるものと次のように考えた。

1) まず、ASR 骨材(SiO_2)が(1) 式のようにアルカリ融解され、それが(12)式のように加水分解し、その表面に負($^-$)のシリカイオンが滲出すると、正($^+$)のカルシウムイオンを解離しながら、飽和状態で介在する白色で結晶質の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がイオン結合するため、骨材表面が例えば(13)式のようなカルシウム-シリケートゲルで白色に固着包含 (リム形成) される考えた。



2) そして、白色包含ゲルがしだいに骨材表面を積層すると、目視診断が容易になると想像した。当然それに起因して、モルタルやコンクリートが膨張したり、破壊されたりするとも考えた。

3) また、高温培養すれば左述したように、水酸化アルカリの状態が高まったり、そのイオン活動も活達となって、骨材の融解やイオン結合が促進され、その診断を速められると考えた。

以上、1)~3)の仮想現象から「ASR 骨材を迅速に目視診断できる」と仮説した。

3. 仮説の立証方法

2章の論理からASRの発生現象は、成熟し遊離石灰が多量蓄積するところの、コンクリートのアルカリ環境を模擬する試薬の中でも発生すると考え、そのペースト状の試薬を推定処方して立証を行なった。

1) まず、成熟コンクリートのアルカリ環境を特定するための前提条件として、標準的と考えられるコンクリートの配合を表1のように設定した。ただし、 R_2O の量はASTMやJISのモルタルバー法におけるセメントと同様に1.2%とした。

次に前表1のコンクリートが成熟した場合のアルカリ環境を表2のように推定した。すなわち、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の発生量は、10年経過後においてもセメント鉱物の全てが水

表1 設定コンクリートの配合(省骨材)

材料	単位量(kg/m ³)	記 事
C	300	セメント
W	180	水:W/C=0.65
R ₂ O	3.6	アルカリ金属

表2 成熟コンクリートの推定アルカリ環境

エキス	単位量(kg/m ³)	重量比	記 事
Ca(OH) ₂	60	0.667	遊離石灰
W	90	1.000	自由水
R ₂ O	3.6	0.400	Na ₂ O, K ₂ O

和しないと考え、推定理論値の約70%とし、Wはセメントの水和消費と固着水を差し引いて90kg/m³とした。なお、R₂Oの内比はNa₂:K₂Oが0.55:1.00と1.00:0.55の二種とした。また、R₂OはROHで代用しCa(OH)₂も含めその純度補正を加えた。

2) 骨材は各地から求め、現場・モルタルバー法・化学法のいずれかで陽性のもの15種と陰性のもの9種を用いた。岩種としては安山岩・チャート・玄武岩の三種をもちいた。これらの骨材は立証試験の各フェズで適宜用いた。なお、骨材の性状は検討考察の都合から次の4章に併記する。

3) 仮説の立証は、ASRの発生事象を検討考察しながら、表3に示すようにI～Vのフェズに分け実施した。

フェズIはJISやASTMのモルタルバー法に近い培養温度での10~20mm骨材粒への白色ゲルの包含性を、フェズIIはIの立証時に白色ゲルの包含が急性の場合と延性の場合のゲル性状を、フェズIIIはIの培養条件下での2.5~5mm骨材粒への白色ゲルの経時包含性を、フェズIVはIIIでASRの発生速度が最も遅かった骨材番号13の高温培養の効果を、フェズVは80℃・6時間培養時の擬陽性骨材のASR発現挙動を、それぞれ調べたものである。

なお、これらの立証方針は、各フェズの検討内容から明らかなように、反応延性粒に照準を合わせ仮説と試薬の妥当性を追及した。

4) ASR現象の観測方法は、①カップまたはボトルに骨材を適量投入し、次に骨材が埋没するまで試薬を満しながら攪拌し、水分が蒸発しないように封緘後、40~80℃で培養した。②骨材粒への白色ゲルの包含性はシャワーや水中シェクによる水洗後に観察または定量した。③ペーストのゲル化現象の観測は、流動性・貫入性・破壊

表3 立証試験のフェズとその検討内容

項 目	骨材番号	検 討 内 容
フェズ I	1~9	40℃培養後の10~20mm砕石への白色ゲルの固着性
フェズ II	7~8	40℃・14日間培養後の骨材に固着した白色包含ゲルおとび培養後ペーストの性状
フェズ III	10~16	40℃培養時の2.5~5mm砂への白色ゲルの固着包含速度の定量
フェズ IV	13	40~80℃培養の2.5~5mm反応延性砂における白色ゲルの包含速度への温度差影響
フェズ V	17~24	80℃・6h培養における2.5~5mm擬陽性砂のASR発現挙動

性あるいはボトル等のシェク時における骨材の揺動性・反響性などから行なった。

4. 立証結果とその考察

成熟コンクリートのアルカリ環境(雰囲気)を模擬するペースト状の試薬とASR性が陰陽の各種骨材を用い、試験のフェズを5段階に分け、創案仮説を試験し検討考察した。

4. 1. フェズI; 40℃培養砕石への白色ゲル包含性

用いた骨材の性状を表4に、その10~20mm砕石粒の培養結果を表5および写真1に示す。

これによれば、Ca(OH)₂が多量介在する試薬中での培養では、モルタルバー法に近い温度域であっても、3~14日という短期間にASRと考えられる白色ゲルの骨材包含現象が顕著に発現した。そしてその包含現象はASRが陽性の粒子に限定され、陰性の粒子には生じなかった。

この短時間発現の理由は、2.2.節でも触れたように、Ca(OH)₂の介在に起因して、ペースト中のROHが高度に苛性化され続けられるため、ASR骨材の融解が促進され、カルシウム-シリケートゲルの形成が早まったためと考えられる。

従って、40℃のモルタルバー法と同じような温度域においても、Ca(OH)₂が多量介在する本試薬によれば、比較的短時間でASR粒を目視特定できるといえる。なお、その包含状態よく観察して見ると、粒子によっては、写真1の一部からも明らかなように、ゲルが固着しない部分もあって、必ずしも反応性が一様でないことまでも診

断できた（後節写真2参照）。

表4 フェズⅠに用いた骨材の性状

骨材 番号	実害例 の有無	C- 227 の判定	骨 材 産 地	骨 材 岩 種	骨 材 産 状
1	無	陰	関 東	砂 岩	砕 石
2	無	陰	関 東	混 種	砂 礫
3	無	陰	関 東	混 種	砂 礫
4	有	陽	東 北	混 種	砂 礫
5	有	陽	四 国	安山岩	砕 石
6	有	陽	中 部	チャート	砕 石
7	有	陽	四 国	安山岩	砕 石
8	有	陽	北 陸	安山岩	砕 石
9	有	陽	中 国	チャート	砕 石

表5 40℃培養石への白色ゲルの固着包含状況

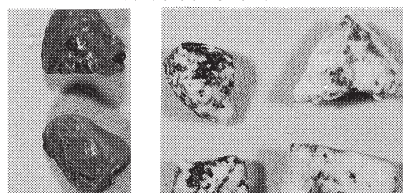
骨材 番号	骨材の白色ゲル固着包含の速度						試薬 診断 結果
	骨材培養日数					固着個数 (n /10)	
	1 d	2 d	3 d	7 d	14d		
						14 d	
1	無包	無包	無包	無包	無包	0/10	14dで陰
2	無包	無包	無包	無包	無包	0/10	14dで陰
3	無包	無包	無包	無包	無包	0/10	14dで陰
4	薄包	薄包	厚包	厚包	厚包	6/10	3dで陽
5	薄包	薄包	薄包	厚包	厚包	10/10	7dで陽
6	点包	点包	微包	厚包	厚包	10/10	7dで陽
7	薄包	薄包	薄包	厚包	厚包	10/10	7dで陽
8	微包	微包	微包	薄包	厚包	10/10	14dで陽
9	微包	微包	微包	厚包	厚包	10/10	7dで陽

4. 2. フェズⅡ；40℃・14 日間培養ゲル等の性状

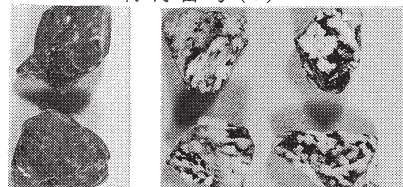
フェズⅠで白色包含現象が急性の骨材番号7と延性の骨材番号8に固着したゲル性状と、その培養後ペーストの性状などの分析・解析の結果を表6に示す。これは40℃で14日間培養した場合の値であって次のようなことがいえる。

白色包含ゲルの性状は、①その化学組成において、水分が23.6~26.9%、シカリが13.9~17.5%、カルシウムが50.1~52.1%の割合となっており、カルシウム-シリケート

骨材番号(7)



骨材番号(8)



(培養前) (40℃・14日培養後)

写真1 ASR 粒への白色ゲルの固着包含状況

のゲル形成に十分な比率となっている。②そのゲルのx線回折チャートには、当然のこととして消石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)が強く、方解石(CaCO_3)が微弱に表われ、さらに示差熱分析からは、方解石の分解と考えられる約850℃の重量減少が約8%も観測されたことから、14日間の培養中や作業中にかなりの CO_2 がペースト中に侵入したことが明らかとなり、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が CO_2 を炭酸化消費し、 ROH の活性を持続するという2.2.節の仮説や4.1.節の考察を裏づけることができた。③なお、ゲル成分において骨材間の格差や Na_2O と K_2O との比の影響は少ない結果となっている。

他方、培養後ペースト中にもシリカが0.4%と、微量ではあるが拡散存在し、長時間培養すればその存在率が高まることを示唆している。

なお、参考までに行なった骨材のx線回折分析の結果は、白色包含現象が遅れたものの方が、斜長石の存在率が若干少なく、その遅延理由の一因が示唆される。

従って、これらのゲルは、過去に発表されている実コンクリートのASRゲル成分^{3) 4)}とほぼ同様であって、典型的なASRゲルと判定される。すなわち $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が多量介在する試薬の中でも、ASR現象が着実に発生することを立証することができた。

4. 3. フェズⅢ；40℃培養砕砂へのゲル固着速度

このフェズでは、立証例を増すために、骨材を表7のように新たに求め、また骨材寸法を2.5~5 mmの粗砂状とし、ゲル固着による砂粒の膨張量などを定量した。その40℃培養時のゲル形成速度は、表8に示すとうりとなった。

これによれば、①陰性粒の一部の初動挙動において一旦わずかに膨張するものもあるが、その後は安定した。②陽性粒は全てのもが経時的に増量し、主としてゲルの固着によるものであるが、培養14日において体積の増加率は25.8~52.2%、重量の増加率は13.6~29.2%となってお

り、驚異的な増量現象を示めすことから、コンクリートのASRによる膨張破壊の事端が垣間見られる。③また、骨材間格差がゲル形成の量や速度に見られ、特に陰陽の判定に要した時間は、約3~10日とかなりのずれがある。④なお、包含速度について、10~20 mmの碎石の場合と対

表7 フェーズⅢに用いた骨材の性状

骨材 番号	実害例 の有無	C- 227 の判定	C- 289 の判定	骨 材 産 地	骨 材 岩 種	骨 材 産 状
10	無	陰	陰	関 東	混 種	砂 礫
11	無	陰	陰	関 東	混 種	砂 礫
12	無	陰	陰	北 陸	玄武岩	碎 石
13	有	陽	陽	四 国	安山岩	石 石
14	有	微 陽	陽	東 北	安山岩	石 石
15	有	微 陽	陽	東 北	安山岩	石 石
16	有	陽	微 陽	九 州	安山岩	石 石

表8 40℃培養砕砂の白色ゲル包含速度

骨 材 番 号	測定 項目	骨材の培養日数				試薬 診断 結果
		0d	3d	7d	14d	
10 (陰)	体増 (%)	0	6.0	5.3	5.7	14dで陰
	重増 (%)	0	2.2	1.8	1.8	14dで陰
11 (陰)	体増 (%)	0	1.7	0.2	-0.1	14dで陰
	重増 (%)	0	0.3	0.2	-0.1	14dで陰
12 (陰)	体増 (%)	0	0.4	0.3	-0.1	14dで陰
	重増 (%)	0	0.5	0.4	0.2	14dで陰
13 (陽)	体増 (%)	0	1.1	3.3	25.8	14dで陽
	重増 (%)	0	0.5	2.0	13.6	14dで陽
14 (陽)	体増 (%)	0	13.0	17.6	25.8	3dで陽
	重増 (%)	0	6.6	10.2	17.6	3dで陽
15 (陽)	体増 (%)	0	11.2	22.2	52.2	3dで陽
	重増 (%)	0	6.4	12.5	29.5	3dで陽
16 (陽)	体増 (%)	0	7.1	13.6	27.2	3dで陽
	重増 (%)	0	3.8	7.6	13.8	7dで陽

表6 40℃・14 日培養碎石の固着包含白色ゲル性状

骨 材 番 号		7 (急性型)		8 (遅性型)	
Na ₂ /K ₂ O 比		1.34	0.55	1.34	0.55
培 養 後 の 液 成 分	SiO ₂	1.12	0.52	0.55	0.52
	Al ₂ O ₃	ND	ND	ND	ND
	Fe ₂ O ₃	0.01	0.02	0.01	0.02
	CaO	63.9	63.3	66.8	62.4
	MgO	0.37	0.36	0.38	0.38
	Na ₂ O	2.39	1.51	2.41	1.54
	K ₂ O	1.59	2.46	1.66	2.42
	LOI	24.3	26.9	23.6	25.6
	SiO ₂	15.8	17.5	13.9	15.0
	Al ₂ O ₃	ND	ND	ND	ND
白 色 包 含 固 着 ゲ ル の 成 分 等	Fe ₂ O ₃	0.04	0.05	0.08	0.10
	CaO	51.1	50.1	52.1	50.2
	MgO	0.30	0.30	0.31	0.31
	Na ₂ O	2.25	1.69	2.60	1.75
	K ₂ O	1.47	2.71	1.39	2.34
	合 計	95.26	99.25	93.98	95.39
	方解石	Tr	Tr	Tr	Tr
	消石灰	S	S	S	S
	一 次 TDA	430	431	431	429
	一 次 T G	11.5	11.2	11.9	11.4
骨 材	二 次 TDA	848	839	848	843
	二 次 T G	7.9	8.8	7.9	8.7
	石 英	Tr	Tr	Tr	Tr
	クリスト*	VW	VW	VW	VW
	磁 鉄 鉱	Tr	Tr	Tr	Tr
	斜 長 石	VS	VS	S	S
	輝 石	Tr	Tr	Tr	Tr

注) * はクリストバライト。

比して見ると、この砕砂の方がかなり早まっている。

これらの、膨張現象がなぜ生じたかの理由は、すでに各章節で述べた通りであるが、その時間格差の発生は、岩石の化学組成とその鉱物組成に起因する活性度にあるものの、いちがいに決めつけられない、それはパイレックスのように純度が高く活性が高いと、ペーストのゲル化は進むが、粒子の表面が徐々に融解しシリカイオンが

ペースト中に拡散するため、カルシウムが十分に付着するいとまがないためである。

以上のように、骨材に10~40%という大きいオーダで、固着包含するゲルの定量からも、ASR の陰陽を特定することができるといえる。すなわち、通常の骨材物理試験の設備と技術から十分に定量診断できる。

4. 4. フェズⅣ； 40~80℃ 培養砕砂のASR 挙動

このフェズでは、フェズⅢで反応が最も遅延した骨材番号13を用い、また培養温度を 40~80℃に変化させ、反応延性骨材の高温挙動を検討考察したものである。その培養試験結果を表9に示す。

表9 40~80℃培養時の延性反応骨材のASR 発生挙動

骨 材	測定項目	培養 温度 (°C)	骨材の培養時間			試薬 診断 結果
			6h	1d	3d	
13	白色ゲルの包含性	40	—	微包	薄包	3 d で不
		60	簿包	厚包	—	1 d で陽
		80	厚包	厚包	—	6 h で陽
	体積増加率 (%)	40	—	—	1.0	3 d で不
		60	2.2	19.3	—	1 d で陽
		80	22.6	34.0	—	6 h で陽
	重量増加率 (%)	40	—	—	0.8	3 d で不
		60	1.1	9.8	—	1 d で陽
		80	11.6	16.5	—	6 h で陽
	ペーストのゲル化	40	ゾル	ゾル	ゾル	3 d で不
		60	ゾル	ゾル	軟ゲル	1 d で陽
		80	ゾル	軟ゲル	硬ゲル	6 h で陽

その結果によれば、ASR の発生速度は温度の影響を著しく強く受け、発生時間は温度の上昇につれ幾何級数的に短縮された。

すなわち、40℃培養時の診断に7~14日も要した反応延性型の骨材であっても、80℃では6 時間以内に目視・定量できるまでに反応が早まった。その理由としては、高温下では一般に言われるように、アルカリ金属イオンの活動が高まるためと考えられるが、最も効果したのは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の炭酸化力が高まって、 R_2O の水酸化状態を、より高めたためと推察される。なお、アルカリ金属の水酸化度とシリカの融解度との関係は、リニアに相関すると推察されるが、その論拠をいるに至っていない。

従って、高温培養すれば、例い反応延性型の骨材であ

っても、短時間のうちに白色ゲルの固着包含現象やペーストのゲル化現象などを顕著に呈することから、成熟コンクリートのアルカリ環境模擬試薬を用いれば、全てのASR 骨材をわずか数時間で目視特定することができると言える。

4. 5. フェズⅤ； 80℃培養擬陽性砕砂のASR 挙動

このフェズでは、表10に示すようにモルタルバー法が陰性、化学法が陽性のいわゆる擬陽性の骨材を80℃で6 時間培養し、そのASR 発現挙動を検討考察したものである。その試験結果を表11および写真2 に示す。

表10 フェズⅤに用いた骨材の性状

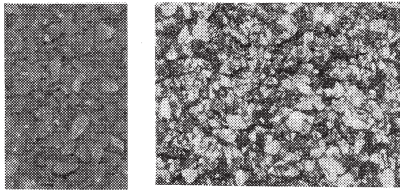
骨材 番号	C- 227 の判定	C- 289 の判定	骨 材 産 地	骨 材 岩 種	骨 材 産 状
17	陰	陰	北 陸	玄武岩	砕 石
18	陰	陰	関 東	混 種	砂 礫
19	陰	陰	関 東	混 種	砂 礫
20	陰	—	四 国	安山岩	砕 石
21	陰	陽	東 北	安山岩	砕 石
22	陰	陽	東 北	安山岩	砕 石
23	陰	陽	九 州	玄武岩	砕 石
24	陰	陽	九 州	玄武岩	砕 石

表11 80℃・6時間培養時の擬陽性骨材のASR 発生状況

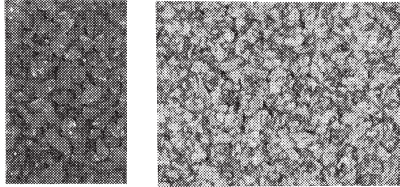
骨材 番号	培養温 度(°C)	体積増加 率 (%)	重量増加 率 (%)	ペースト のゲル化	試薬診 断結果
17	80	-0.5	0.1	—	陰
18		-0.4	-0.5	—	陰
19		-0.1	0.0	—	陰
20		19.1	10.1	微弱	陽
21	80	19.1	10.5	微弱	陽
22		35.1	19.4	微弱	陽
23		14.2	7.6	微弱	陽
24		3.9	2.1	—	微 陽

表11によれば、擬陽性骨材の場合でも6 時間の培養で14.2~35.3%の膨張と7.6~19.4%の増量が定量され、十分に診断できる値をしめしたが、骨材番号24に限っては、反応粒の存在は極めて少数であって、6 時間培養時の定

骨材番号(22)



骨材番号(23)



(培養前) (80℃・6時間培養後)

写真2 擬陽性粒への白色ゲルの固着包含状況

量値からは診断が困難で、目視によらなければならない結果となっている。

また、写真2によれば、白色ゲルで包含される粒子と包含されない粒子が混在し、それなりに擬陽性状態を考察することができた。すなわち、ASR 発生現象の強弱は、粒子の活性度とその混在率によるものと考えられるが、写真2はその混在率を明確に捉えている。従って、表10の増加率は、粒子の活性度と混在率との積になって、表われたものと考えられる。

そこで、これら骨材の擬陽性状態を考えて見るとこの場合は、化学法のときは少数でも反応粒があれば、必ず融解が生じて陽性を示し易いが、モルタルバー法のときは、少数の粒子が膨張しても、規定の膨張値に達しずらいと考えることができる。また、モルタル中の $C_3A \cdot (OH)_2$ の炭酸化を十分に防止すれば、アルカリ金属の水酸化が高まって、あるいわ陽性に現われたかもしれない。

以上のことから、成熟コンクリートのアルカリ環境模擬試薬の中では、擬陽性骨材といえども多様の実態を短時間で象示することから、その背景解明が容易となろう。

5. 結語と提言

2章に創案展開した「遊離石灰のASR 誘発仮説」および「ボゾラン材のASR 間接抑制仮説」ならびに「ASR 骨材の迅速目視診断の可能性」は、3章の手法と4章の試験によって立証されたことから、コンクリートのASR に関し次のように論述できよう。

1) ASR の発生は、セメントの水和反応で多量発生する「遊離石灰($Ca(OH)_2$)によって誘発される」といえる。従って、「ASR の遅延発生プロセスも解明された」といえよう。

2) ASR 骨材の判定は、成熟コンクリートのアルカリ

環境(雰囲気)模擬ペースト中で、高温培養した場合に、「骨材粒が白色ゲルで固着包含される現象」または「培養時ペーストのゲル化現象」から、目視しによって短時間で行なうことができる。

3) また、粒子個々の反応性も白色ゲルの固着包含の有無からASR 粒を特定することが可能となり、またその強弱の特定もできることから、ASR にまつわる疑問とその解明に資することができよう。

4) ボゾラン材のASR 抑制プロセスは、ボゾラン反応によって遊離石灰が反応消費されるためといえる。従って、「ボゾラン材はASR を間接抑制する」といえる。

他方、仮説展開とその立証を通して、次のような諸提言ができよう。

5) (1) 式のように骨材がアルカリ融解し、(12)式のように加水分解すると、そのたびに水酸化アルカリ金属が再生され、あたかも半触媒的に繰返し骨材をアタックするため、少量のアルカリ金属でも大量の骨材を融解すると想像される。

6) 骨材粒へのシリケート-カルシウムゲルの固着包含する積層現象と遊離石灰の有限発生の状態からみて、反応性の高い大粒が適量(カルシウムとの反応当量)混在する場合ほど、コンクリートに強いダメージを与え易いと推察される。

7) この試薬は、フライアッシュも容易に融解することから、ASR 現象とボゾラン反応現象とは同類と想像される。従って、ボゾラン反応の前段で、その融解にアルカリ金属が関与するのではないかとの見方もできよう。また、高反応性の骨材を微粉砕し混和すれば、ASR 現象を抑制するともいえよう。

8) また、コンクリートに介在するアルカリ金属の変遷経緯が仮説どうりと考ええると、セメントの凝結や水和などにアルカリ金属が関与することが示唆される。

6. あとがき

以上のように、全く新しい観点から、ASR の発生プロセス・ボゾラン材のASR 抑制メカニズム・ASR 骨材の目視診断方法を展開あるいは提案したが、仮定や推定も含まれており、さらに詰めるべき諸点も考えられるものの、実際に典型的かつ顕著なASR 現象を容易に発現させることに成功した。

その方法は、単に成熟コンクリートのアルカリ環境(雰囲気)をカップまたはボトルに再現し、骨材を高温培養するという極めて簡単なことであって、戸惑いを禁じない。

なお、現実にはASR が発生しているアルカリ環境(エキス)に関し、いままで何にゆえに検討されなかったのか、極めて不可解であるが、恐らくはアルカリ金属の介在形

態・遊離石灰の大量発生とその苛性化力・水酸化アルカリ金属の中性化速度・パイレックスの特異挙動などの解釈が、それを阻んできたものと想像される。

今後は、ASR 問題に関し新しい観点から貢献できれば幸いと考えており、特にASR 骨材の「試薬式の迅速目視診断方法」については、その試験方法や判定基準の詳細を詰めながらマニュアル化を図り、コンクリートの安定性や耐久性の向上に供したい。

最後に、本文を草稿するに当たり、仮説の立証と手法の開発に携わった大城薫君および福島英晃君ならびに吉田健次君に対し、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤井欽二郎、結合水の状態と性質、セメント・コンクリート、No. 469、Mar. (1986)
- 2) 安田稔、他、コンクリートの耐久性向上におけるフラッシュの効果、第一回石炭会議予稿集、平成3 年9 月
- 3) A. K. Mullick, et al, Reaction Products of Alkali-Silica Reaction-A Microstructural Study, Concrete Alkali-Aggregate Reaction, Proceedings of The 7th International Conference, 1986, Ottawa Canada
- 4) A. Shayan, et al, Alkali-Aggregate Reaction in The Causeway Bridge, with 3)