

ISSN 0386-5878

土木研究所資料 第4281号

土木研究所資料

骨材のアルカリシリカ反応性に関する 長期屋外暴露試験結果

平成26年3月

独立行政法人土木研究所
材料資源研究グループ 新材料チーム
基礎材料チーム

Copyright © (2014) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

骨材のアルカリシリカ反応性に関する 長期屋外暴露試験結果

地質監		脇坂 安彦
新材料チーム	上席研究員	西崎 到
	総括主任研究員 ^{※1}	守屋 進
	研究員	百武 壮
基礎材料チーム	上席研究員	渡辺 博志
	主任研究員	古賀 裕久
	交流研究員 ^{※2}	松本 健一
	交流研究員 ^{※3}	山田 宏

※1 2012年3月まで

※2 2011年3月まで

※3 2012年3月まで

要 旨：

我が国の様々な地域から収集された94種類の粗骨材を用いて作製され、23年以上屋外に暴露されていたコンクリート供試体を調査し、アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるひび割れ等の発生状況を調べた。その結果、化学法またはモルタルバー法による試験で「無害」の骨材を用いた場合でも、長期的にはASRによると見られるひび割れが生じる場合があること、アルカリ量を Na_2O 当量で 3kg/m^3 としても、特に反応性の高い物質を含む骨材では、ASRによると見られるひび割れが生じる場合があることなど、ASR抑制対策の効果と限界に関する知見を得た。

キーワード：アルカリシリカ反応，暴露試験，化学法，モルタルバー法，コンクリート

まえがき

アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるコンクリートの膨張は、コンクリート構造物の主要な劣化要因の一つである。我が国では、1980年代前後に、ASRや塩害により著しく劣化したコンクリート構造物の存在が報道で取り上げられるなどして広く知られるようになり、コンクリート構造物の耐久性が社会問題となった。

そこで、1985年から、当時の建設省が中心となって建設省総合開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」（以下、耐久性総プロ）が実施され、産学からも多くの研究者が参加して、新たに建設する構造物でASRの発生を抑制するための対策などについて検討が行われた。検討結果は、1986年の旧建設省の通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」などとして実務に反映された。また、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートにも通達を基に同様の規定が取り入れられた。

暫定対策が運用されるようになった1987年以降に竣工したコンクリート構造物では、ASRによる劣化の発生率が大幅に低下したものと考えられている。国土交通省（旧建設省）では、例えば、土木コンクリート構造物に対する実態調査（1999年実施）や道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）に基づく調査（2003年実施）など行って劣化実態を調査しているが、抑制対策を取った構造物でASRによる劣化が生じたと見られる事例はほとんどなかった。

ただし、これらの調査は主に目視観察によって行われており、劣化が軽微な構造物については、ASRの可能性について、十分には検討されなかったおそれもある。また、一方で、既往の研究報告等から、抑制対策を適用しても、ASRが生じた事例があることも明らかになっている。

このように現在の新設構造物におけるASR抑制対策は大きな効果を発揮しているものの、ASRの発生を完全に防止できるものではない。しかし、ASRの抑制をさらに確実にすることは必ずしも容易ではなく、対策に大きなコストが発生することも考えられる。抑制対策の合理的な改善方法を検討するためには、現行の対策を取った場合でもASRが発生する場合やその割合について、データを集めることが求められる。

土木研究所では、耐久性総プロの検討において、我が国の様々な地域から収集した碎石を用いて1987年にコンクリート供試体を作製し、屋外に暴露していた。そこで、今回、この供試体を調査し、暴露から23年以上が経過した供試体におけるASRの発生状況を調査し、抑制対策の有効性について考察した結果を報告する。また、長期暴露試験の結果のみでは十分に明らかにできなかったペシマム条件の影響について補足実験を行った結果を報告する。

目 次

I	骨材の反応性に関する長期暴露試験	
	1. 調査の背景	3
	2. 暴露供試体の製作及び暴露条件	4
	3. 調査方法	7
	4. ASR による膨張有無の判定方法	11
	5. 骨材の岩種と長期暴露試験結果	16
	6. 骨材のアルカリシリカ反応性試験結果についての考察	23
	7. アルカリ量総量規制値に関する考察	32
	8. 長期暴露試験結果のまとめ	36
	参考文献	37
II	ペシマム条件に関する補足実験	
	1. 検討の目的	41
	2. 実験方法	43
	3. 実験結果と考察	48
	4. ペシマム条件に関する補足実験結果のまとめ	51
	参考文献	52
	付録	
	1. 主要な調査結果	55
	2. 代表的なひび割れ状況	61
	3. 超音波伝播速度測定結果	68
	4. 骨材の岩石学的調査結果	71
	5. 暴露供試体のアルカリ量測定結果	104

I 骨材の反応性に関する長期暴露試験

1. 調査の背景

アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるコンクリートの膨張は、コンクリート構造物の主要な劣化要因の一つである。我が国では、1980年代前後に、ASRや塩害により著しく劣化したコンクリート構造物の存在が報道で取り上げられるなどして広く知られるようになり、コンクリート構造物の耐久性が社会問題となった。

そこで、1985年から、当時の建設省が中心となって建設省総合開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」（以下、耐久性総プロ）が実施され、産学からも多くの研究者が参加して、新たに建設する構造物でASRの発生を抑制するための対策などについて検討が行われた。検討結果は、1986年の旧建設省の通達「アルカリ骨材反応暫定対策について」などとして実務に反映された。また、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートにも通達を基に同様の規定が取り入れられた。ASRの抑制対策については、その後も見直しがなされているが、その骨格部分は、現在まで大きくは変更されていない。

暫定対策が運用されるようになった1987年以降に竣工したコンクリート構造物では、ASRによる劣化の発生率が大幅に低下したものと考えられている。国土交通省（旧建設省）では、例えば、土木コンクリート構造物に対する実態調査（1999年実施）¹⁾や道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）に基づく調査（2003年実施）²⁾など行って劣化実態を調査しているが、抑制対策を取った構造物でASRによる劣化が生じたと見られる事例はほとんどなかった。ただし、これらの調査は主に目視観察によって行われており、劣化が軽微な構造物については、ASRの可能性について、十分には検討されなかったおそれもある。

一方で、既往の研究報告等から、抑制対策を適用しても、ASRが生じた事例があることも知られている。例えば、上田ら³⁾は、モルタルバー法で「無害」と判定された骨材を使用した構造物でASRによる変状が生じた事例を報告している。また、尾花、鳥居⁴⁾も、化学法またはモルタルバー法で「無害」と判定された骨材を使用した構造物でASRによる変状が生じた事例を報告している。

このように現在の新設構造物におけるASR抑制対策は大きな効果を発揮しているものの、ASRの発生を完全に防止できるものではない。しかし、ASRの抑制をさらに確実にすることは必ずしも容易ではなく、対策に大きなコストが発生することも考えられる。抑制対策の合理的な改善方法を検討するためには、現行の対策を取った場合でもASRが発生する場合やその割合について、データを集めることが求められる。

土木研究所では、耐久性総プロの検討において、我が国の様々な地域から収集した粗骨材（砕石）を用いて1987年にコンクリート供試体を作製し、屋外に暴露していた。今回、この供試体を調査し、暴露から23年以上が経過した供試体におけるASRの発生状況を調査し、抑制対策の有効性について考察したので、その結果を報告する。

2. 暴露供試体の製作及び暴露条件

2.1 暴露供試体の製作

(1) 使用骨材

供試体に用いられた粗骨材の産地及び岩種を表-2.1.1, 表-2.1.2 に示す。当初, 供試体は 100 種類の粗骨材を用いて製作されていたが, 銘板等の不備もあり, 使用骨材を確認できたのは 94 種類であった。細骨材は, いずれの供試体でも反応性のない石灰石砕砂が使用されていた。そこで, 以降の記述では, 特に断りのない限り, 骨材は粗骨材を指すものとする。

使用骨材は, 全国(北海道, 沖縄を除く)の砕石場の位置の調査, 地質図上での岩体の確認をした上で, 比較的反応性が高いと考えられる岩種を中心に, それ以外の岩種も含まれるように収集された骨材から選定されていた。なお, 砂利は, 一般に多様な岩種から構成され, 岩種と膨張の関係を明確にすることが困難なため, 選定の対象とされなかった。また, 収集の結果, 事前に調査したものと異なる岩種であったり, 複数岩種が混合していたりした場合もあった。また, 砕石場の操業停止などにより, 入手できない場合もあった。特にチャートは, 採石場からはほとんど収集できなかった。

このような事情から, 地域によって選定された骨材の量に差があり, ASR による劣化事例が報告されている骨材でも, 暴露供試体には用いられていないものがある。例えば, 北陸地方の砂利や東海地方のチャートは暴露供試体に用いられていない。

(2) 供試体の製作方法, 数量

供試体の形状を図-2.1.1 に, コンクリートの配合を表-2.1.3 に示す。供試体は, 骨材の種類ごとにコンクリートのアルカリ量が Na_2O 当量で 3kg/m^3 または 5kg/m^3 のものが 2 体ずつ(合計 4 体)あり, アルカリ量は練混ぜ水に水酸化ナトリウム水溶液を混入して調整されていた。

コンクリートの打設は, 2 層打ちで, 締固めは棒状バイブレータを用いて行われていた。養生は 24 時間まで湿布養生で, その後は屋外にて水中養生が行われていた。しかし, 養生方法等の詳細については記録が残されておらず, 養生期間は明確ではなかった。

2.2 暴露条件

(1) 暴露方法

暴露場所は, 茨城県つくば市にある土木研究所内で, 日射や降雨を妨げるものがない草地であった。供試体は図-2.2.1 のように約 1/3 の部分を土中に埋めて設置されていた。適宜, 除草を行ったが, 時期によっては供試体が隠れる程度まで草が生育している場合もあった。

(2) 暴露期間

供試体は, 1987 年から屋外暴露されていた。暴露から 23 年以上が経過した 2010~2012 年の間に種々の調査を行った。調査を行った時期に幅があるが, 暴露開始から長期間経過していることもあり, この期間中の ASR の進行は顕著ではなく, 供試体の劣化程度は変化していないものと仮定して以降の検討を行った。

表-2.1.1 使用骨材の産地

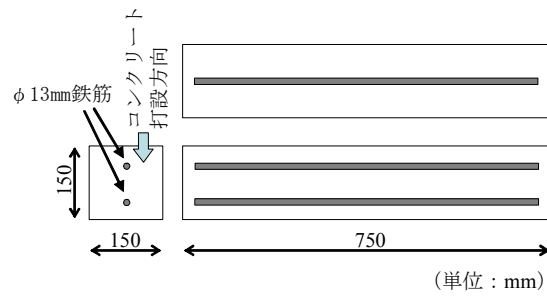
産地の区分	産地の数
東北	30
関東	1
中部	2
近畿	13
中国	19
四国	9
九州	20
(合計)	94

※産地の区分は、旧建設省（国土交通省）の機関の管轄区分によるものである。
 ※北海道及び沖縄県の骨材は含まれていなかった。

表-2.1.2 使用骨材の岩種

岩種による分類		試料の数
深成岩	カンラン岩	1
	花崗岩	1
半深成岩	細粒ハンレイ岩	4 (3)
	斑状安山岩	1
火山岩	玄武岩	5
	安山岩	36
	デイサイト	15
	流紋岩	6
火山砕屑岩	変成玄武岩質火山砕屑岩	1
	安山岩質火山砕屑岩	2
	デイサイト質火山砕屑岩	4
堆積岩	砂岩	12
	頁岩	1
	粘板岩	3
	石灰石	1
変成岩	ホルンフェルス	1
(合計)		94 (93)

※細粒ハンレイ岩の1試料は、アルカリ量 3kg/m^3 の供試体のみが存在し、アルカリ量 5kg/m^3 のものはなかった。これは、供試体製作時にコンクリートに用いる骨材が不足したためである。このため、骨材の反応性について検討する際には、これを除く 93 試料を対象に検討した。アルカリ量 3kg/m^3 での反応性を検討する場合は、94 試料を対象とした。



※鉄筋（丸鋼）の位置は、その中心がコンクリート表面から約40mm程度の場合が多かった。ただし、供試体によって位置が大きく異なる場合もあった。これは、コンクリート打設時の振動で位置がずれたものと考えられた。ただし、鉄筋がコンクリート表面に露出している事例や、かぶり不足により内部の鉄筋が顕著に腐食していると見られる事例はなかった。

図-2.1.1 供試体の形状

表-2.1.3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				空気量 (%)
		W	C	S	G	
50	44	177	354	780	803~1114	4.5

※セメントは、普通ポルトランドセメント（アルカリ量はNa₂O当量で0.56%）を使用した。
 ※細骨材は、秩父産石灰石砕砂を使用した。
 ※単位粗骨材量は、使用する粗骨材の密度により異なる。
 ※AE剤をセメントの0.25%使用した。



図-2.2.1 暴露状況

3. 調査方法

3.1 調査の概略

長期暴露試験の前後に行った調査の方法を一覧にして、表-3.1.1に示した。

3.2 コンクリート供試体製作時の調査

製作時には骨材の岩種の判定，反応性を有する鉱物等の有無の判定および，骨材のアルカリシリカ反応性試験が行われていた。

骨材の岩種は，肉眼で骨材を観察した結果に，粉末 X 線回折による分析，薄片試料の偏光顕微鏡観察を行った結果を加味して判定されていた⁵⁾。

化学法，モルタルバー法による骨材のアルカリシリカ反応性試験は，建設省暫定案⁶⁾によって行われていた。この暫定案では，化学法の試験結果に基づく判定は ASTM C 289 の判定曲線により行うこととされている。本報では，今後の実務への反映を考慮して，現行の JIS A 1145 の判定方法で試験結果を再判定した結果を主に報告した。また，必要に応じて，ASTM で「潜在的有害」に分類される場合について言及した。

3.3 暴露後の調査

供試体の外観を観察し，ひび割れの有無やひび割れ幅を記録した。ひび割れ幅は，クラックゲージを用いて測定し，供試体各面の中央付近で最もひび割れ幅の大きい位置の測定結果を代表値とした。

ひび割れ幅については，供試体の 2 側面が交差する角部で，大きなひび割れが観察される場合が少なくなかった。しかし，このような位置のひび割れには局所的に開口しているものが多く，ひび割れ幅を精度良く測定することが困難である上に，その値が供試体全体の劣化程度を適切に表現する指標とはなりがたいものと考えられることから，各面の中央付近でのひび割れ幅を採用した。

超音波伝播速度の測定は，供試体に生じた ASR による劣化の程度を定量的に評価する試みの一つとして行った。測定には，28kHz の超音波を用いて超音波伝播速度を測定できる装置を用い，図-3.3.1 のように発振子，受振子を設置して透過法で行った。暴露期間中に気中であつた部位と土中であつた部位の二箇所測定し，測定結果の平均値を用いた。

一部の代表的な供試体について，薄片試料を作製し偏光顕微鏡による ASR 発生状況の観察を行った。観察結果として，ASR の進行状況，ASR の原因となっている反応性鉱物等の種類などの情報を得た。ASR の進行状況は，既往研究における分類⁸⁾を参考に表-3.3.1 に示す k1~k4 の 4 段階で表現した。

硬化コンクリートのアルカリ量の測定は，アルカリ量 3kg/m^3 と 5kg/m^3 の供試体の取り違えがないことを確認することを主目的とし，アルカリ量 3kg/m^3 でも ASR によるひび割れが生じたと疑われた供試体を対象に行った。なお，得られたアルカリ量測定結果の平均値等を表-3.3.2 に示す。暴露後のアルカリ量は，当初計画した値の半分程度となっており，アルカリの一部が暴露期間中に供試体外部に溶出したことも疑われた。また，いくつかの供試体の切断面を観察した限りでは，供試体の表面付近より内部の方で ASR による劣化の

程度が大きいようにも見られた。

ただし、今回、暴露期間中の ASR による劣化の進行やアルカリ量の推移は不明であり、暴露中のアルカリ溶出が膨張量に与えた影響を詳細に検討するには到らなかった。

表-3.1.1 調査の方法

項目	方法	対象	備考
岩種の判定 (肉眼観察)	肉眼での観察に加え、粉末 X 線回折、薄片の顕微鏡観察の結果も加味して検討 ⁵⁾ 。	全ての骨材	暴露前に実施。
骨材のアルカリシリカ反応性試験 (化学法, モルタルバー法)	建設省暫定案 ⁶⁾ による。	全ての骨材	暴露前に実施。
供試体の外観観察	肉眼での観察による。ひび割れ幅の測定はクラックゲージによる。	全ての供試体	期間中に複数回実施。 ひび割れ幅は暴露後の2012年に測定。 ※付録2に詳細を示す。
超音波伝播速度の測定	透過法で測定した (図-3.3.1 参照)。	全ての供試体	暴露後の2010年に測定。 ※付録3に詳細を示す。
偏光顕微鏡観察	観察結果は表-3.3.1 の分類法により、整理した。	合計 9 供試体 (骨材 9 種類)	暴露後の2010~2012年の間に実施。 ※付録4に詳細を示す。
硬化コンクリート中のアルカリ量の測定	コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法 (案) ⁷⁾ に準じて行った。	合計 56 供試体 (骨材 14 種類)	暴露後の2010年に測定。 ※付録5に詳細を示す。

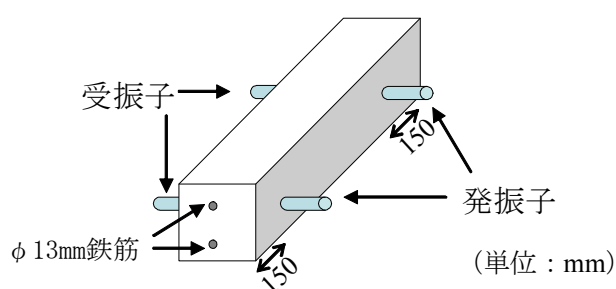


図-3.3.1 超音波伝播速度の測定位置

表-3.3.1 薄片資料の観察結果に基づく ASR の進行状況の分類 (Katayama et al. ⁸⁾に基づく)

分類	反応の程度
(k1) 潜在的	反応リム, ASR ゲルの滲出が認められる。
(k2) 軽微	ASR ゲルが骨材中のひび割れを満たしている。
(k3) 中程度	ASR ゲルがセメントペースト中のひび割れを満たしている。
(k4) 顕著	ASR ゲルがセメントペースト中の空隙を満たしている。

表-3.3.2 暴露後のアルカリ量測定結果

製作時の 計画値 (kg/m ³)	測定し た供試 体数	測定結果 (kg/m ³)		
		平均	最小	最大
3.00	28	1.55	0.85	2.33
5.00	28	2.20	1.21	2.72

※測定方法や結果の詳細は、付録5に示す。

※測定試料は、主として暴露中に地中にあった部位から採取したが、気中にあった部位から採取した場合も数試料あった。両者の差は必ずしも一定していないが、平均では気中部の方が、地中部より 0.2kg/m³程度大きかった。

4. ASR による膨張有無の判定方法

4.1 判定方法に関する検討の概要

ASR によるコンクリートの膨張を把握するには、ダイヤルゲージ、コンタクトゲージなどを用いて長さ変化を測定するのが一般的である。しかし、本報で報告する供試体では、長さ変化測定のために取り付けられていた標点の多くが暴露期間中に失われており、長さ変化を測定することができなかった。また、暴露期間中の調査結果も散逸しており、製作時のものを除くと信頼できる記録がなかった。

このため、今回の調査では、暴露後の供試体の調査結果のみから ASR による膨張が生じているかどうかを判定する必要があり、判定は主に外観観察の結果に基づいて行った。この方法の有効性については、一部の供試体を対象に行った薄片試料の観察結果や超音波伝播速度の測定結果から確認した。

また、超音波伝播速度の測定結果から、ひび割れ状況と膨張量の関係を考察した。なお、ひび割れが生じた供試体の切断面を観察した結果、深さ方向へのひび割れの進展はわずかであった。このため、コンクリート表面で測定できるひび割れ幅は、ASR の進行の程度を定性的に比較することには使用できるものの、ひび割れ幅から供試体断面の平均的な膨張量を定量的に推定することは困難と考え、ここでは行っていない。

4.2 外観観察及び薄片試料の観察に基づく分類

暴露後の供試体を観察した結果、供試体に生じたひび割れの状況は、表-4.2.1 に示す 3 種類に分類することができた。このうち、マップ状ひび割れ (c3, 図-4.2.1) については、外観からも ASR によるものとの疑いが強いものと考えたが、単独ひび割れ (c2, 図-4.2.2) や角部限定ひび割れ (c1, 図-4.2.3) については、ひび割れ幅も小さく、ひび割れの特徴のみから ASR かどうか判断するのは必ずしも容易ではなかった。

そこで、使用骨材が異なり、ひび割れの状況が異なる供試体 9 体から薄片試料を作製し、偏光顕微鏡観察を行って外観観察結果と比較した (図-4.2.4)。その結果、マップ状ひび割れが生じた供試体では、薄片試料でも顕著な ASR の進行が認められ、ひび割れは ASR によって生じたものと確認できた。

単独ひび割れが生じた供試体についても、マップ状ひび割れに移行する前の状態であると考えられることや、いくつか切断面を観察した供試体で鋼材に腐食が生じていないことを確認したことから、ASR によって生じたものである可能性が高いものと考えた。なお、供試体表面で観察できるひび割れは、ひび割れ幅が比較的大きい事例でも、表面から数 10mm の範囲で止まっている場合が多かった (図-4.2.5)。

一方、ひび割れが認められなかった供試体でも、薄片試料を見ると、ASR ゲルが骨材中に認められるなど、ASR の形跡は認められる場合があり、表-3.3.1 の k2 程度までの進行状況であれば供試体表面では、ひび割れが生じていない場合もあると考えられた。

角部限定ひび割れが認められた供試体は、一供試体しか薄片試料の観察を行っていないが、ひび割れが認められなかった供試体との違いが明確ではなかった。角部限定ひび割れはひび割れ箇所が限定的であり、ASR によるひび割れかどうか、外観や薄片試料の観察結果では判断できなかった。

4.3 ひび割れ形態と超音波伝播速度

外観観察の結果、同一の骨材を使用した供試体で、アルカリ量 3kg/m^3 ではひび割れが認められず、 5kg/m^3 ではひび割れが認められるような骨材が 24 種類あった。そこで、これらの供試体に着目して、ひび割れ状況と超音波伝播速度の関係を調べた。

具体的には、外観上ひび割れが生じていないアルカリ量 3kg/m^3 の供試体 2 体で得られた超音波伝播速度の平均値を 100 として、ひび割れが認められたアルカリ量 5kg/m^3 の供試体 2 体の超音波伝播速度をそれぞれ表した。その結果を図-4.3.1 に示す。

供試体によってばらつきが大きいですが、ひび割れ状況ごとに平均値をとると、角部限定ひび割れでは 101、単独ひび割れでは 98、マップ状ひび割れでは 96 となった。なお、ひび割れが生じていない供試体では、アルカリ量 3kg/m^3 と 5kg/m^3 の供試体で超音波伝播速度の平均値に違いはなかった。

ASR による膨張と超音波伝播速度の低下の関係について検討した結果には、例えば迅速法 (JIS A 1804) 制定時の資料⁹⁾があり、それによると超音波伝播速度の 5% の低下が長さ変化 1000μ に対応するとされている。また、 $\phi 100\text{mm}$ のコンクリートコアを用いた中川ら¹⁰⁾の実験でも同様な関係が見られている。

既往の研究とは、モルタル・コンクリートの別や供試体の形状、超音波伝播速度の測定条件などが異なるので一概には比較できないが、仮に今回の測定条件でも膨張量と超音波伝播速度の間に同様な関係が成り立つと仮定すると、マップ状ひび割れが生じた供試体ではおおよそ 1000μ の膨張が生じているものと推察される。また、単独ひび割れが生じている供試体でも、膨張量は少ないものの ASR による影響が生じていると考えられる。

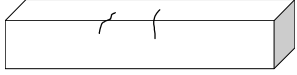
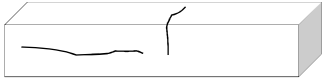

一方、アルカリ量 5kg/m^3 で角部限定ひび割れが生じた供試体の超音波伝播速度は、アルカリ量 3kg/m^3 でひび割れが生じていない供試体の超音波伝播速度と同等であり、今回の調査の範囲では、角部限定ひび割れが生じた供試体の内部に ASR による微細なひび割れ等が生じていることは考えにくかった。また、仮に生じていたとしても、超音波伝播速度が低下していないことから、コンクリートの物性にはほとんど影響が生じていないと考えられる。

4.4 膨張有無の判定に関する検討のまとめ

外観観察結果、薄片試料の観察結果及び超音波伝播速度の測定結果から、単独ひび割れ (c2) またはマップ状ひび割れ (c3) が生じた供試体では、ASR による膨張が生じているものと判定した。一方、ひび割れが無い供試体、または角部限定ひび割れ (c1) が認められた供試体については、ASR による膨張が生じていないものと判定した。ただし、参考のため、角部限定ひび割れが生じた場合とひび割れが無い場合は区別して、以降の整理を行う。

なお、今回の暴露試験では、骨材およびコンクリート中のアルカリ量の条件が同じ供試体が 2 体ずつ存在するが、その 2 体のひび割れ状況は必ずしも同一ではなかった。そこで、骨材の ASR 反応性を議論するにあたっては、同一条件の 2 体のうち、より顕著なひび割れが生じた供試体のひび割れ状況を採用して検討を行った。

表-4.2.1 観察されたひび割れ状況による分類

ひび割れ状況	説明	模式図
(c1) 角部限定ひび割れ	供試体の角部に限定した局所的な（一面での長さがおおよそ 50mm 未満）ひび割れが一本，または複数ある。	
(c2) 単独ひび割れ	供試体の長軸方向に一本，または複数のひび割れがある。同時に，長軸直角方向にもひび割れが認められる場合もあるが，各ひび割れは単独に存在しており，マップ状ひび割れには到っていない。	
(c3) マップ状ひび割れ	供試体の長軸方向および長軸直角方向の複数のひび割れが交差したマップ状ひび割れとなっている。	

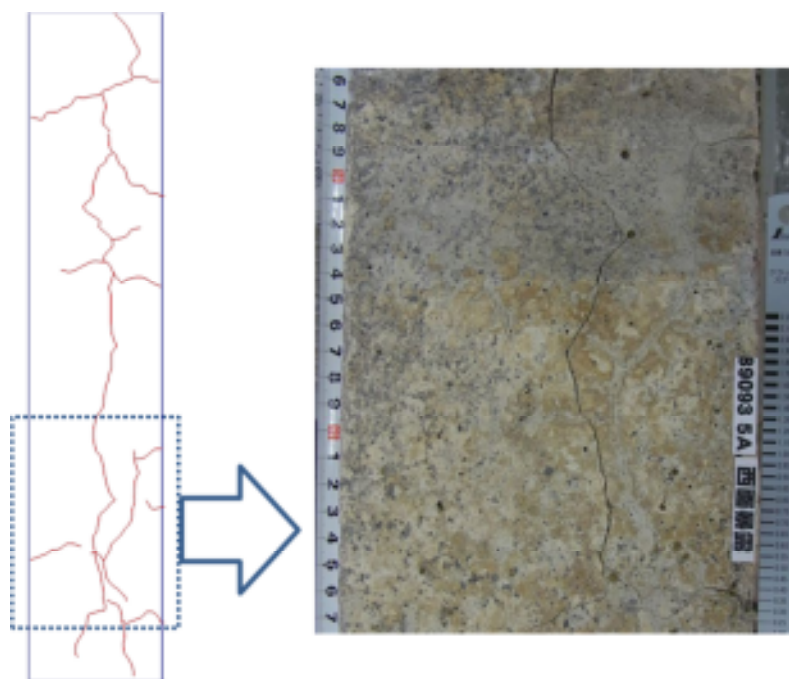


図-4.2.1 マップ状ひび割れ(c3)の例

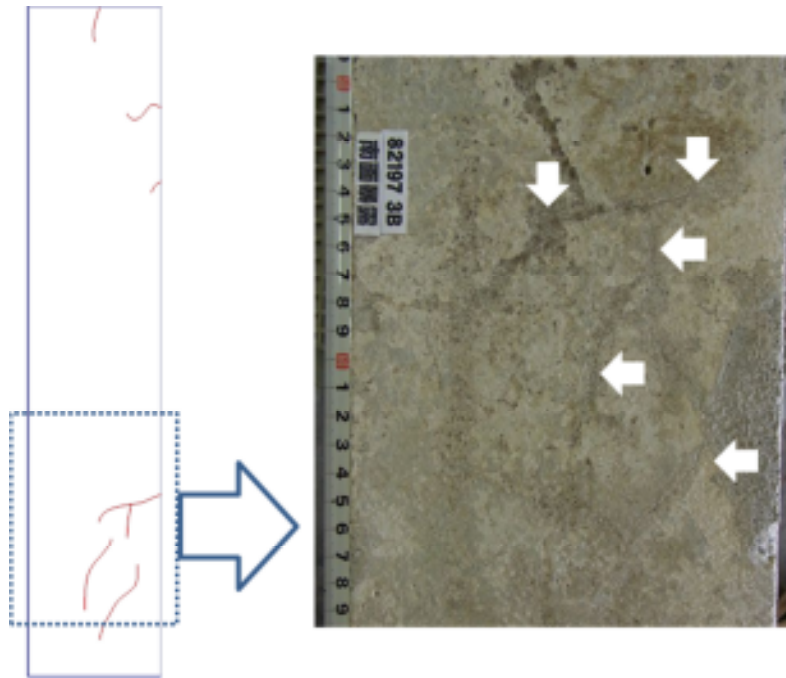


図-4.2.2 単独ひび割れ (c2) の例

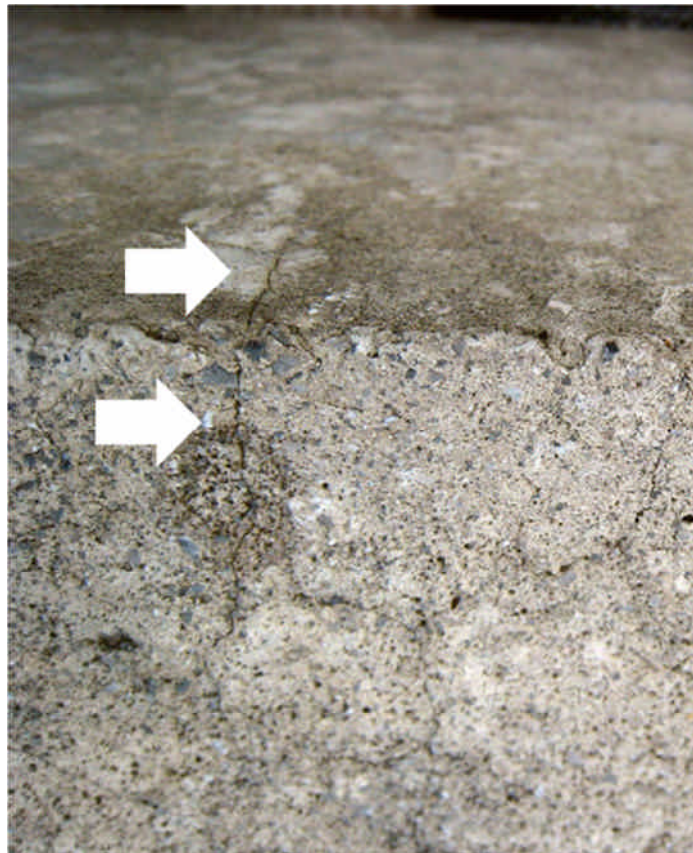


図-4.2.3 角部限定ひび割れ (c1) の例

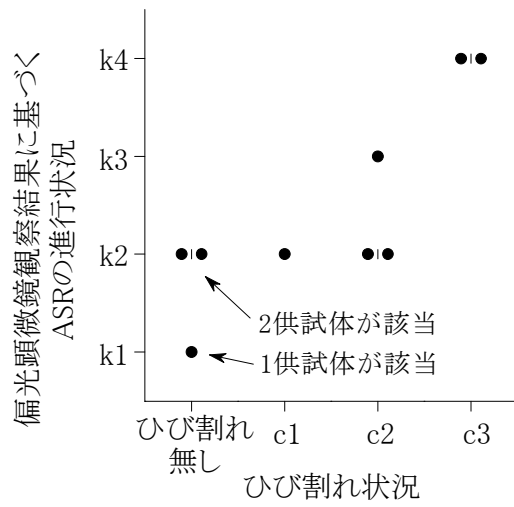


図-4.2.4 薄片試料の観察結果に基づく ASR の進行状況とひび割れ状況の関係

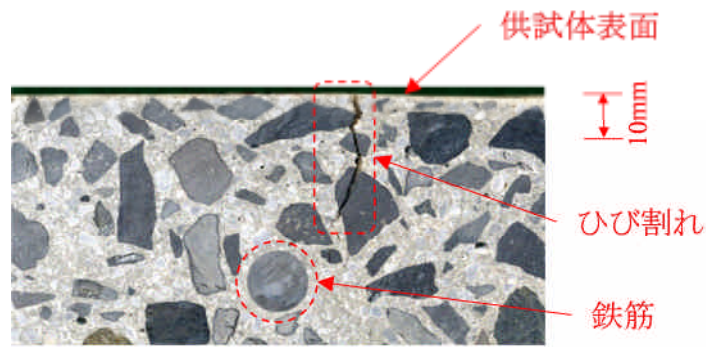


図-4.2.5 マップ状ひび割れが生じ、局所的に0.75mmと大きいひび割れ幅が認められた供試体の切断面

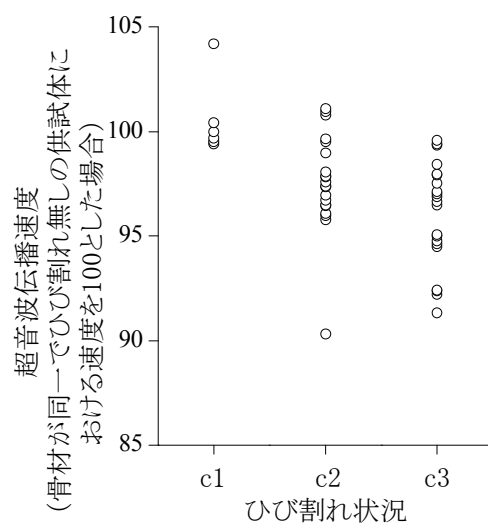


図-4.3.1 ひび割れ状況と超音波伝播速度の関係

5. 骨材の岩種と長期暴露試験結果

5.1 既往の研究結果と課題

耐久性総プロでは、北海道、沖縄県を除く全国約 1,000 箇所の採石場から各地域の代表的な岩種が含まれるように選定した 367 箇所に加え、採石場では不足した各地域の代表的岩種を補足するため、露頭 104 箇所から試料を収集して調査している。調査結果として、化学法で 596 試料、モルタルバー法で 300 試料の試験結果がある¹¹⁾。試験結果を整理して得た結論として、わが国の骨材の反応性の大小については、表-5.1.1 に示す知見が得られており、広く参考にされている。

一方、その後に行われた研究で、反応性鉱物として隠微晶質または微晶質の石英を含む骨材で ASR による膨張が長期にわたってゆるやかに継続する、いわゆる遅延膨張性の ASR による劣化事例が報告されている^{8), 13), 14)}。遅延膨張性を有する骨材は、化学法やモルタルバー法で必ずしも適切に反応性を評価できない。このため、従来は無害と考えられてきた岩種の骨材にも、長期には ASR を引き起こすものが一定程度含まれているおそれがあるが、現状では明確でない。そこで、以降、長期暴露試験の結果を岩種ごとに整理し検討する。

今回の暴露試験では、同一の骨材を用いた場合、アルカリ量 3kg/m^3 とした供試体の方がアルカリ量 5kg/m^3 とした供試体よりも顕著なひび割れが生じた事例はなかった(表-5.1.2)。したがって、骨材の反応性の有無を検討する際には、アルカリ量 5kg/m^3 の供試体に着目して整理した。

今回の供試体で、コンクリート体積 1m^3 当たり 5kg のアルカリ量は、セメント量の 1.4% に相当し、この点ではモルタルバー法(セメント量の 1.2%) や、コンクリート供試体を用いた RILEM の試験方法¹⁵⁾(セメント量の 1.25%, 単位セメント量 440kg/m^3) の条件とも比較的近く、妥当な水準であると考えられる。なお、アルカリ量 3kg/m^3 でも ASR によるひび割れが生じた骨材については、7 章で詳細に検討する。

5.2 火山岩・火山砕屑岩

火山岩については、Katayama & Kaneshige がわが国の 80 試料の骨材について検討した結果に基づき、中新世よりも古い火山岩では、続成作用の影響で火山ガラス、クリストバライト、トリディマイトなどの高い反応性を有する鉱物等の再結晶化により反応性が低下し、化学法で測定される Sc が低下することを指摘している¹⁶⁾。また、耐久性総プロで収集された骨材の調査でも、中新世よりも古い火山岩・火山砕屑岩では、火山ガラス、クリストバライト、トリディマイトが含まれていないことが確認されており¹¹⁾、表-5.1.1 も地質年代によって区分されている。

そこで、火山岩・火山砕屑岩については、地質年代で試料を分類し、化学法の試験結果と暴露供試体のひび割れ状況を併せて図-5.2.1 に示した。図中には、JIS A 1145 および ASTM C 289 における試験結果の判定基準も示した。まず、漸新世よりも新しい火山岩に着目すると、化学法の試験結果は Sc が大きいものと小さいものに二分されており、Sc が 100mmol/L 前後の試料はほとんどなかった。また、Sc が 100mmol/L 未満の試料は 48 試料中 10 試料と比較的少なかった。

漸新世よりも新しい火山岩で Sc が 100mmol/L 以上と大きい骨材は、反応性の高い鉱物等としてクリストバライト、トリディマイト、火山ガラスのうちいずれか、もしくは複数を有しており¹¹⁾、ASTM の判定基準では、「潜在的有害」と判定されるものが比較的多かった。Sc が 100mmol/L 以上と大きい骨材では、暴露供試体で表-4.2.1 の c2 または c3 に該当するひび割れ状況となった骨材の割合が、38 試料中 23 試料と大きかった。なお、Sc が 100mmol/L 未満の骨材を含めると、漸新世よりも新しい火山岩で c2 または c3 に該当するひび割れ状況となった骨材の割合は、48 試料中 25 試料であった。

これに対し、中新世よりも古い火山岩に着目すると、Sc が 100mmol/L 未満となるものがほとんどで、暴露供試体で c3 に該当するひび割れが生じた試料が、18 試料中 2 試料と少なかった。このように、長期暴露試験の結果でも、漸新世よりも新しい火山岩は他の岩種と比較して ASR を生じさせるおそれが高いこと、中新世よりも古い火山岩は ASR を生じさせるおそれが低いことが再確認された。

しかし、数としては少ないが、中新世よりも古い火山岩でも ASR によるひび割れが生じた骨材があった点は、注意が必要と考えられる。これらはいずれも化学法では「無害」と判定される骨材であり、また、モルタルバー法でも「無害」と判定されていたので、長期暴露試験を行う前は、ASR を生じさせないと考えられた骨材であった。これらの骨材は、化学法の試験結果で Sc が 30mmol/L 程度と比較的小さく、遅延膨張性の ASR が生じていた可能性がある。参考までに、火山岩類・火山砕屑岩類について地質年代で区分して整理した結果を、図-5.2.2 に示す。

なお、本研究で薄片試料の観察などを行った範囲では、ひび割れ性状で c2、c3 のひび割れが生じた供試体では、ASR の形跡が認められており、ASR によるひび割れであると考えているが、化学法で測定される Rc が大きい火山岩類の骨材の多くにはスメクタイトが含まれていた¹¹⁾ので、その吸水膨張により暴露供試体にひび割れが生じた場合があることも完全には否定できない。この点については、今後の検討課題である。

5.3 堆積岩・変成岩

暴露試験で検討されていた堆積岩は、その多くが砂岩であった。砂岩を中心とする堆積岩は、新しい火山岩ほどではないものの、反応性を有する骨材がある程度あると考えられてきた。なお、表-5.1.1 中では堆積岩は古第三紀よりも古いものに限定されているが、これは、新しい堆積岩はコンクリート用骨材としての物理的品質を満たすことが困難なため、検討の対象から除外されたものである。

堆積岩、変成岩について、化学法の試験結果と暴露供試体のひび割れ状況を併せて図-5.3.1 に示す。図-5.3.1 で、ASR による膨張が生じた堆積岩は 17 試料中 8 試料であり、発生の割合としては、漸新世よりも新しい火山岩と同程度であった。ただし、マップ状ひび割れ (c3) に到っている骨材は比較的少なく、ASR による膨張の程度としては、漸新世よりも新しい火山岩と比較するとやや軽微であると考えられる。c2 または c3 に該当するひび割れが生じている骨材には、化学法、モルタルバー法でその反応性が確認できるものもあるが、化学法、モルタルバー法ともに「無害」と判定された骨材もあった。

なお、変成岩はホルンフェルスの一試料のみであり、発生割合を検討することはできないが、ASR によるひび割れが生じていた。

5.4 深成岩・半深成岩

深成岩，半深成岩について，化学法の試験結果と暴露供試体のひび割れ状況を併せて図-5.4.1 に示す。深成岩・半深成岩は，従来は反応性がほとんどないと考えられている骨材であるが，c2 に該当するひび割れが認められた骨材が1 試料あった。化学法，モルタルバー法ともに「無害」と判定されていた骨材であった。

5.5 骨材の岩種ごとの長期暴露試験結果のまとめ

長期暴露した供試体のひび割れ状況を骨材の岩種ごとに整理した結果，ASR による膨張が生じた骨材の割合は，漸新世よりも新しい火山岩（特に，Sc が 100mmol/L 以上のもの），堆積岩で比較的多く，中新世よりも古い火山岩及び火山砕屑岩，深成岩及び半深成岩では少なかった。この点で，骨材の岩種ごとの反応性の違いについては，従来からの知見を裏付けるものであった。骨材の岩種ごとに整理した結果を図-5.5.1 に示す。

ただし，堆積岩で約半数の試料に ASR によるひび割れが生じたことや，中新世よりも古い火山岩・火山砕屑岩，半深成岩の試料で化学法，モルタルバー法ともに「無害」と判定される骨材でも ASR によるひび割れが生じたものがあったことは，これまで考えられていたよりも多くの骨材で ASR による膨張が生じうることを示唆していた。

骨材のアルカリシリカ反応性試験結果と，暴露供試体のひび割れ状況の関係については，次章でさらに検討する。

表-5.1.1 わが国の骨材の反応性の特徴（耐久性総プロ）¹²⁾

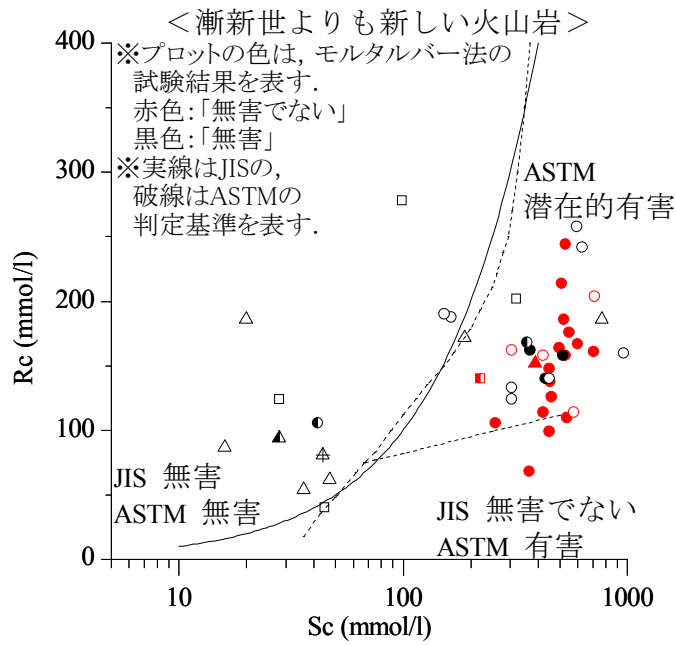
分類	岩種
反応性のおそれのある岩石をほとんど含まない	深成岩類 中新世よりも古い火山岩類
岩型によっては反応性のある岩石を含むおそれがある	古第三紀よりも古い堆積岩類 変成岩類
反応性のおそれのある岩石が高率で含まれる	漸新世よりも新しい火山岩類

※この表の検討では火山砕屑岩は、堆積岩類ではなく、火山岩類に含めて検討されている。

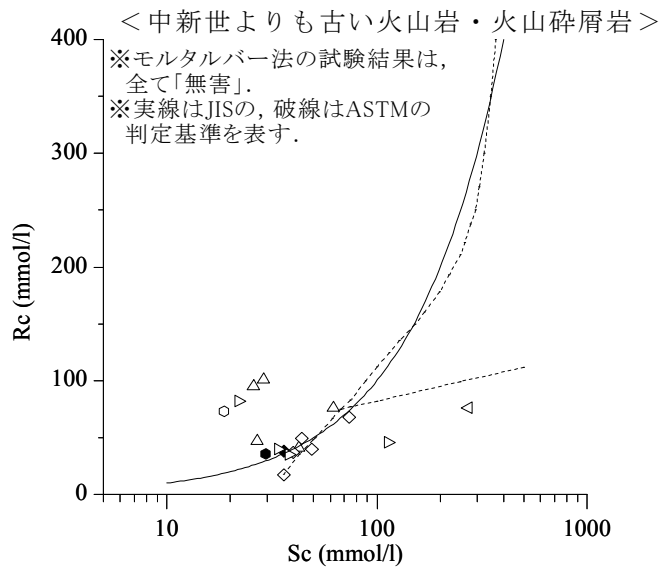
表-5.1.2 アルカリ量によるひび割れ状況の違い

ひび割れ状況		該当する試料 (骨材) の数
アルカリ量 3kg/m ³	アルカリ量 5kg/m ³	
c3	c3	2
c2	c3	4
	c2	4
c1	c3	4
無し	c3	15
	c2	8
	c1	1
	無し	55
(合計)		93

※アルカリ量3kg/m³の供試体が存在し、アルカリ量5kg/m³の供試体が無い骨材1試料では、ひび割れは生じていなかった。

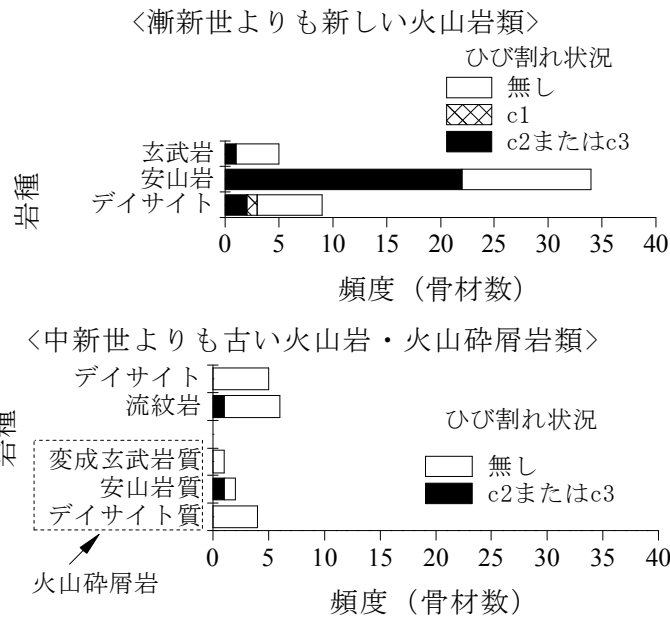


	無し	c1	c2	c3
玄武岩	□		■	
安山岩	○, ◯		●, ◐	●, ●
デイサイト	△	▴	▲	▲



	無し	c1	c2	c3
デイサイト	△			
流紋岩	◇			◆
変成玄武岩質火山碎屑岩	◁			
安山岩質火山碎屑岩	◯			●
デイサイト質火山碎屑岩	▷			

図-5.2.1 火山岩、火山碎屑岩のアルカリシリカ反応性試験結果と暴露供試体のひび割れ状況の関係（アルカリ量 5kg/m³）



※図中に示さないものとして、地質年代が推定できなかった骨材が、安山岩に2試料、デイサイトに1試料あった。
 図-5.2.2 地質時代で区分した火山岩、火山碎屑岩の暴露供試体のひび割れ状況 (アルカリ量 5kg/m^3)

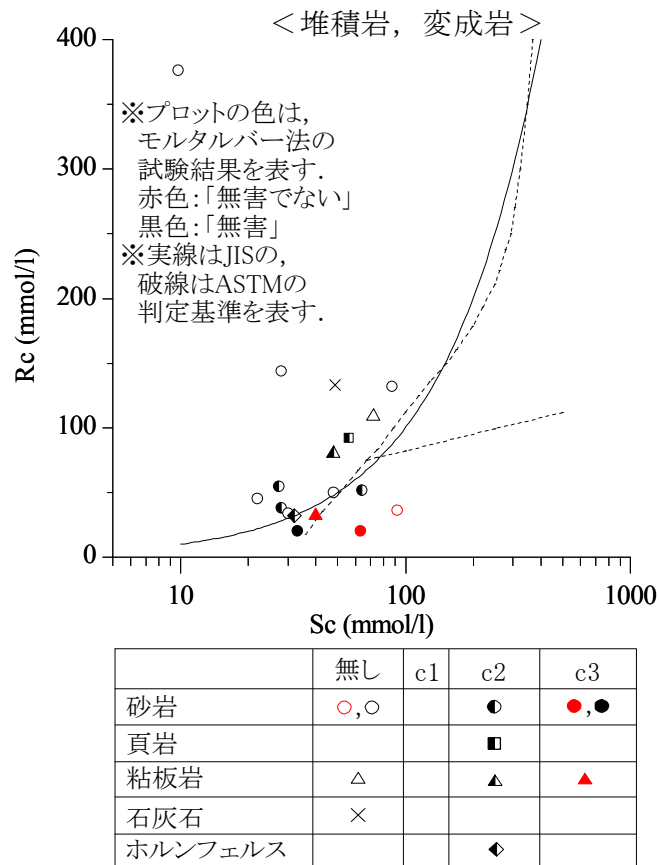


図-5.3.1 堆積岩, 変成岩のアルカリシリカ反応性試験結果と暴露供試体のひび割れ状況の関係 (アルカリ量 5kg/m^3)

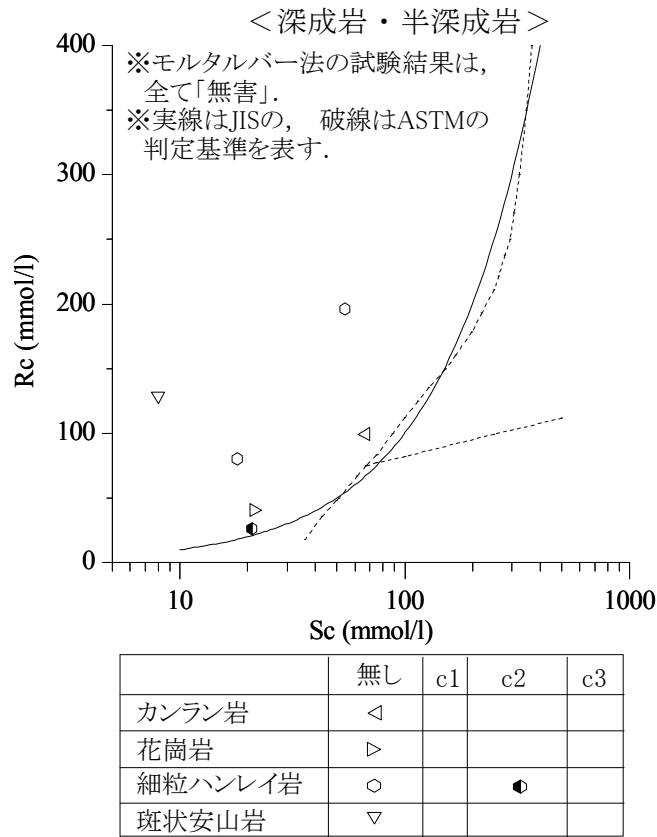


図-5.4.1 深成岩・半深成岩のアルカリシリカ反応性試験結果と暴露供試体のひび割れ状況の関係（アルカリ量 5kg/m^3 ）

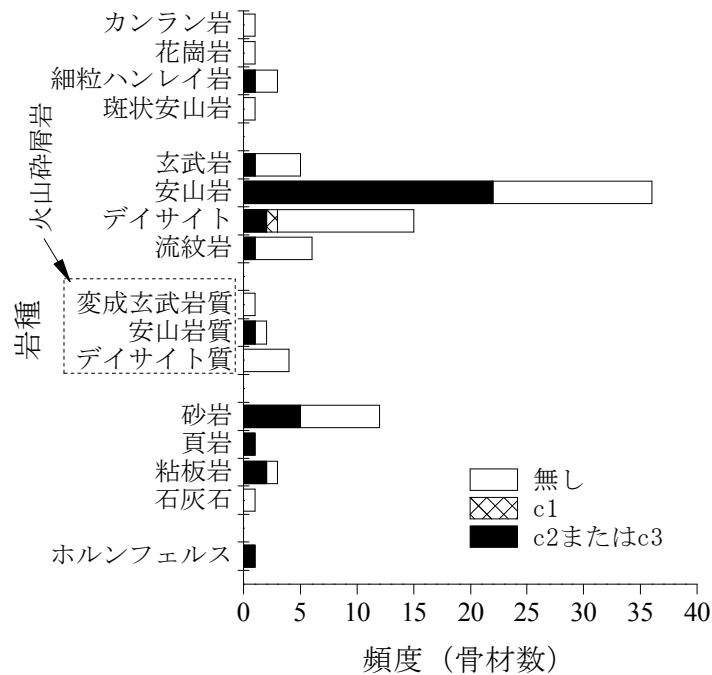


図-5.5.1 骨材の岩種と ASR 発生状況（アルカリ量 5kg/m^3 ）

6. 骨材のアルカリシリカ反応性試験結果についての考察

現在の ASR 抑制に関する規定では、化学法またはモルタルバー法の試験の結果、無害と判定された骨材を用いることで、コンクリート中のアルカリ量に関わらず、ASR 抑制対策とすることができる。そこで、各試験法の結果とアルカリ量 5kg/m^3 の暴露供試体の ASR 発生状況を比較した。

なお、ポルトランドセメントの全アルカリ量は Na_2O 当量で 0.75%以下に規制されていることから、一般的なコンクリートの配合でアルカリ量が 5kg/m^3 を超える場合は考えにくいこと、今回の暴露供試体の結果では、アルカリ量 5kg/m^3 の方が 3kg/m^3 の場合よりひび割れ状況が顕著であったことなどから、アルカリ量 5kg/m^3 の暴露供試体で検討した結果は、骨材の ASR による膨張の可能性を一般的なコンクリートの条件と同等か、より厳しい条件で評価しているものと考えられる。

6.1 化学法の試験結果とアルカリ量 5kg/m^3 の供試体での膨張の有無

化学法の試験結果は、前章で骨材の岩種ごとに整理して図-5.2.1、図-5.3.1 および図-5.4.1 に示した。これらの結果を判定結果に応じて整理して、図-6.1.1 に示す。なお、本報では、 Sc が 10mmol/L 未満または Rc が 700mmol/L 以上の場合も Sc が Rc と同じか大きい場合は「無害でない」と判定した。前章では、火山岩について地質年代に応じて整理したが、図-5.2.1 から、 Sc の大小によって分類することで骨材の反応性の大きさを適切に評価でき、かつ地質年代に応じた分類と概ね同等な結果が得られること、一部に地質年代が不明な骨材も存在することから、図-6.1.1 では、 Sc の大小によって分類した。

化学法では、今回調査した 93 試料中 54 試料で「無害でない」との判定結果であった。特に、 Sc が 100mmol/L 以上の火山岩・火山砕屑岩では、そのほとんどが「無害でない」と判定されていた。これらの骨材では、反応性の高い鉱物等としてクリストバライト、トリディマイト、火山ガラスのいずれか、もしくは複数を有していたが、暴露供試体ではひび割れが生じていない場合も半数近くあった。この理由については、後述するモルタルバー法の試験結果とあわせて本章のまとめ部分で考察するが、ペシマム条件の影響が考えられる。

堆積岩・変成岩では、化学法で「無害でない」と判定された骨材 6 試料のうち 5 試料で ASR によるひび割れが生じており、化学法で「無害でない」と判定される骨材は、ASR を生じさせるおそれが高い骨材であることが確認された。一方、「無害」と判定された骨材 12 試料中にも、ASR によるひび割れが生じたものが 4 試料あった。

火山岩・火山砕屑岩でも Sc が 100mmol/L 未満のものや深成岩・半深成岩では、化学法で「無害でない」と判定された骨材が合計 7 試料とあったが、これらの試料には ASR によるひび割れが認められたものがない。一方、「無害」と判定された合計 25 試料中の 5 試料では、ASR によるひび割れが認められた。すなわち、化学法の判定結果と暴露供試体のひび割れ状況が合致していない。これらの骨材の Sc は $28\sim 44\text{mmol/L}$ と比較的小さかった。ひび割れが生じた原因となった反応性鉱物等について、詳細には調査を行っていないが、微晶質または隠微晶質石英による遅延膨張性の ASR が生じたおそれがある。

このように、化学法による判定の結果は、火山岩・火山砕屑岩で Sc が 100mmol/L 以上の骨材や、堆積岩・

変成岩の骨材については、反応性を比較的良く検出しているものの、火山岩・火山砕屑岩で Sc が 100mmol/L 未満の骨材や深成岩・半深成岩の骨材で遅延膨脹性の ASR が生じたと見られる骨材については、反応性を適切に検出することができなかった。

6.2 モルタルバー法の試験結果とアルカリ量 5kg/m³の供試体での膨張の有無

モルタルバー法の試験結果についても、化学法の場合と同様な整理を行って、図-6.2.1 に示した。

モルタルバー法の試験では、「無害でない」と判定される骨材が化学法よりも少なく、93 試料中の 28 試料であった（化学法では、93 試料中 54 試料）。この 28 試料中では、その 75%に相当する 21 試料で表-4.2.1 の c2 または c3 に該当するひび割れが生じており、モルタルバー法で「無害でない」と判定される骨材は、ASR を生じさせるおそれが高い骨材であることが確認された。

しかし、モルタルバー法で「無害でない」と判定された骨材の岩種に着目すると、28 試料のうち 25 試料までは、Sc が 100mmol/L 以上の火山岩・火山砕屑岩であり、それ以外の岩種（火山岩・火山砕屑岩以外の岩種も含め全て Sc は 100 未満であった）では、モルタルバー法で「無害でない」と判定された骨材が合計 3 試料とわずかであった。モルタルバー法で「無害」と判定された骨材合計 63 試料中にも ASR によるひび割れが生じていたものが 16 試料あり、その割合は約 25%と少なくなかった。特に砂岩を主体とする堆積岩において、モルタルバー法は、化学法と比較して反応性を検出できた試料の数が少なかった。

この原因としては、化学法と同様に、遅延膨脹性の ASR が生じたと見られる骨材については、反応性を適切に検出することができなかったものと考えられる。なお、今回の供試体においてアルカリ量 5kg/m³は、セメント量の 1.4%に相当し、モルタルバー法と比較するとわずかに大きい。このアルカリ量の違いが影響した可能性も否定できない。

6.3 モルタルバーの長期的な膨張性状に関する検討

化学法、モルタルバー法による判定について検討した結果、これらの試験方法で「無害」と判定される骨材でも、暴露供試体では ASR による膨張が生じたと見られるものがあり、化学法やモルタルバー法の試験の範囲内では、Sc が小さく、いわゆる遅延膨脹性を示す骨材について、その反応性を必ずしも十分には検出できないことが確かめられた。特にモルタルバー法では、化学法で Sc が 100mmol/L 未満の骨材の多くが「無害」と判定された。そこで、モルタルバー法の判定基準や、促進養生期間を変更することによって、いわゆる遅延膨脹性骨材についてより適切に評価できないか検討した。

モルタルバー法の判定基準に関しては、近年、表-6.3.1 に示すように試験期間中の膨張傾向なども考慮して判定する方法の提案がある¹⁷⁾。そこで、暴露供試体に用いた骨材について、表-6.3.1 の判定区分に当てはめて分類し図-6.3.1 に示した。

図-6.3.1 を図-6.2.1 と比較すると、Sc が 100mmol/L 以上の火山岩・火山砕屑岩については、暴露供試体においてひび割れが生じた骨材を無害なものとして判定するリスクが若干低下していた。しかし、それ以外の岩種では、JIS A 1146 で「無害」とされた骨材のほとんどが「E 無害」と判定されており、JIS A 1146 による判定をほとんど改善できなかった。

また、今回暴露供試体に用いた骨材については、モルタルバー法で材齢1年までの促進養生試験結果があった。

そこで、材齢1年での膨張量の大小に応じて骨材を分類し、図-6.3.2に示した。材齢26週以降に急速に膨張率が増加した骨材も認められたが、それらの骨材を用いた暴露供試体でひび割れが生じているとは限らず、モルタルバーの材齢1年までの膨張傾向と暴露供試体のひび割れ状況の関係は必ずしも明確ではなかった。隠微晶質または微晶質の石英が反応性鋳物と考えられる Sc100mmol/L 未満の火山岩・火山砕屑岩や、深成岩・半深成岩については、JIS A 1146の促進養生期間を材齢1年まで延長しても、判定の精度を改善することはできなかった。

6.4 骨材のアルカリシリカ反応性試験結果についての検討のまとめ

化学法、モルタルバー法の試験結果とアルカリ量 $5\text{kg}/\text{m}^3$ の暴露供試体のひび割れ状況の調査結果をまとめて、表-6.4.1に示す。

Scが100mmol/L以上の火山岩・火山砕屑岩については、化学法では、そのほとんどが「無害でない」と判定された。一方、モルタルバー法では、「無害」と「無害でない」で判定が分かれていた。今回の暴露供試体に関しては、モルタルバー法の試験結果とひび割れ状況の関係が良いようにも見える。

ただし、化学法で Sc, Rc がともに大きく、ASTMで「潜在的有害」と判定される骨材は、その使用率が100%より少ない場合にかえって膨張量が大きくなるようなペシマム条件を有している骨材であることが知られている⁹⁾。今回の長期暴露試験でも、Scが100mmol/L以上の火山岩・火山砕屑岩骨材の多くが、「潜在的有害」の範囲にあったが、使用割合は100%で一定なので、ペシマム条件については十分に把握できない点に留意が必要である。すなわち、今回の長期暴露試験でひび割れが生じなかった骨材でも、他の無害な骨材と混合して使用した場合などに、ASRが生じるおそれを否定できない。この点については、第II部で追加実験を行って検証している。

砂岩を主体とする堆積岩・変成岩については、化学法とモルタルバー法で「無害でない」と判定された試料の数に差異があり、化学法の方が、暴露供試体のひび割れ状況との関係がやや良好であった。また、堆積岩・変成岩の骨材では、Scが100mmol/L以上の火山岩・火山砕屑岩と比較すると最大ひび割れ幅が小さい傾向があったが、その中でもひび割れ幅が大きい骨材については、化学法で「無害でない」と判定されていた。

Scが100mmol/L未満の火山岩・火山砕屑岩や深成岩・半深成岩については、化学法、モルタルバー法の試験結果と、暴露供試体でASRによる膨張が生じる割合の間に関係は認められなかった。これらの骨材については、化学法やモルタルバー法の試験によって反応性を評価することが困難であった。ただし、Scが100mmol/L未満の火山岩・火山砕屑岩や深成岩・半深成岩でASRによるひび割れが生じたものは、その最大ひび割れ幅は、他の岩種と比較すると小さい傾向があった。

これらの結果を受けて、モルタルバー法の試験データを整理し、途中の膨張速度の推移を考慮した判定基準を用いた場合や、促進養生期間を1年まで延長した場合について検討した。しかし、JIS A 1146による判定結果と暴露供試体の状況の間の関係が良好でなかった堆積岩、Scが100mmol/L未満の火山岩・火山砕屑岩や深成岩・半深成岩について、判定結果を改善することはできなかった。

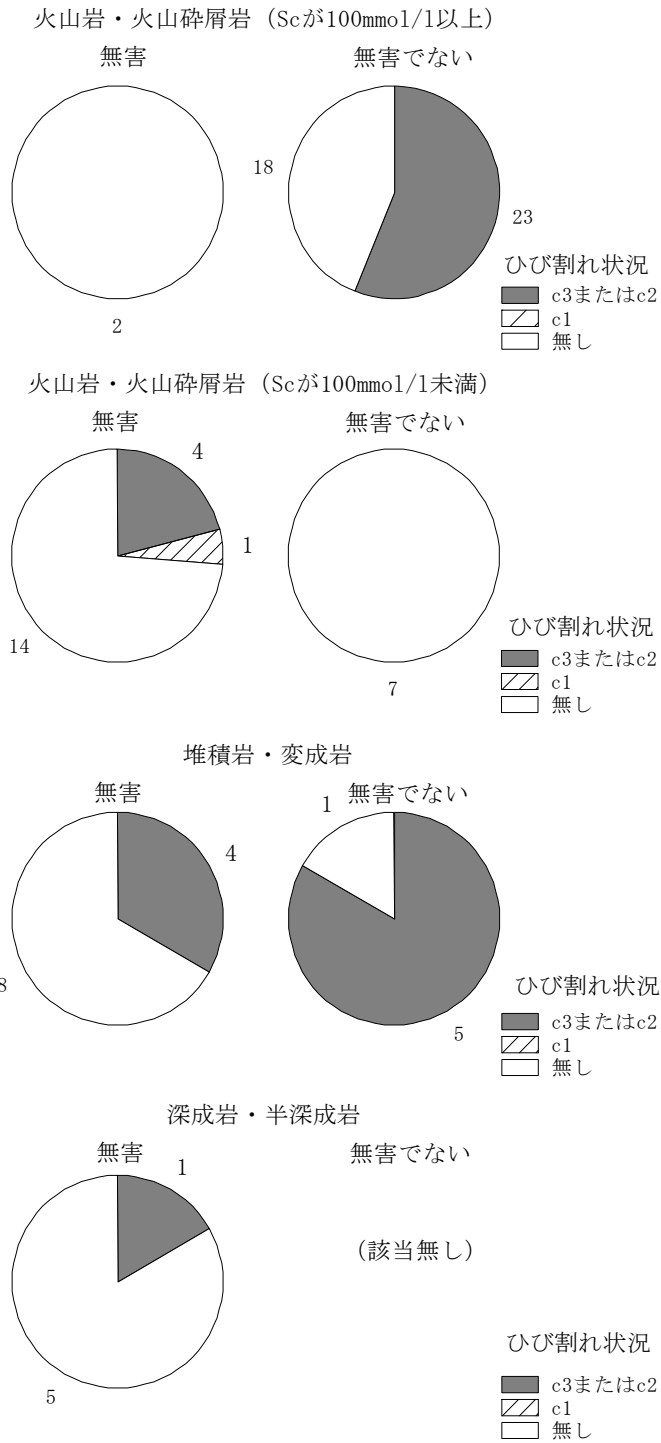
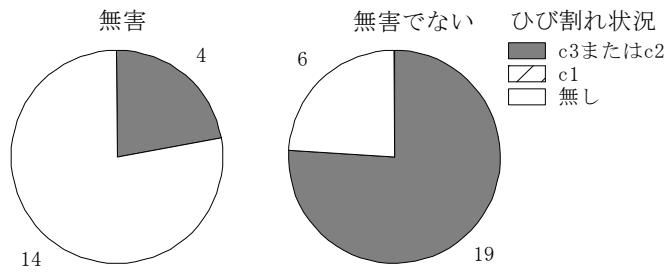
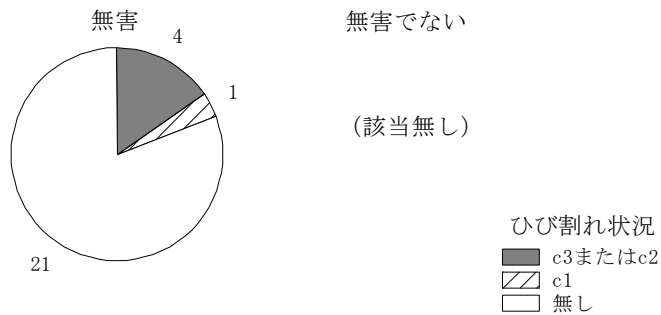


図-6.1.1 化学法による判定結果と暴露供試体のひび割れ状況の関係 (アルカリ量 5kg/m³)

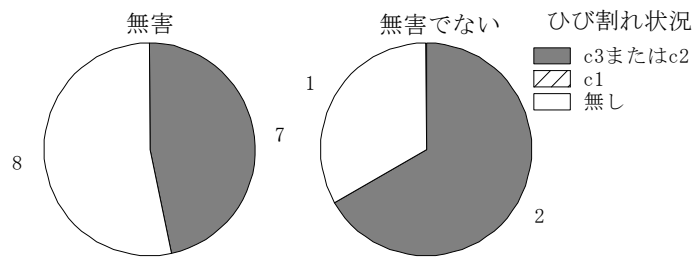
火山岩・火山砕屑岩 (Scが100mmol/1以上)



火山岩・火山砕屑岩 (Scが100mmol/1未満)



堆積岩・変成岩



深成岩・半深成岩

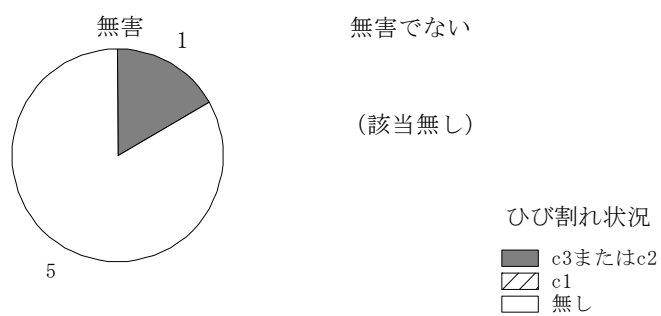


図-6.2.1 モルタルバー法による判定結果と暴露供試体のひび割れ状況の関係 (アルカリ量 5kg/m³)

表-6.3.1 膨張率を考慮した判定区分（モルタルバー法）¹⁷⁾

区分	説明
「E 有害」骨材	膨張率が 26 週で 0.10%以上，もしくは膨張率が 26 週で 0.05%以上～0.10%未満であっても 13 週から 26 週までの膨張の増加割合が 8 週から 13 週までの増加割合に対し大きい骨材
「準有害」骨材	膨張率が 26 週で 0.05%以上～0.10%未満かつ 13 週から 26 週までの膨張の増加割合が 8 週から 13 週までの膨張の増加割合に対し小さい骨材
「E 無害」骨材	膨張率が 26 週で 0.05%未満の骨材

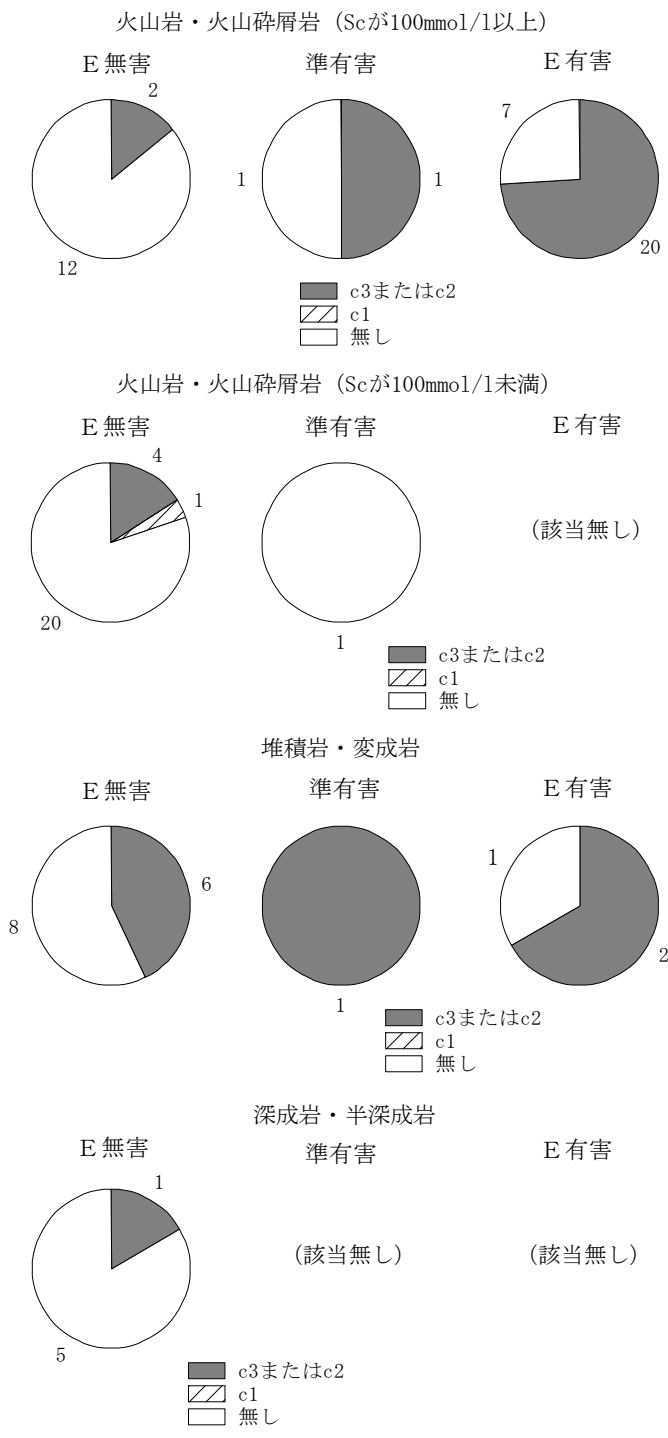


図-6.3.1 膨張率を考慮したモルタルバー法判定区分と暴露供試体のひび割れ状況の関係 (アルカリ量 5kg/m³)

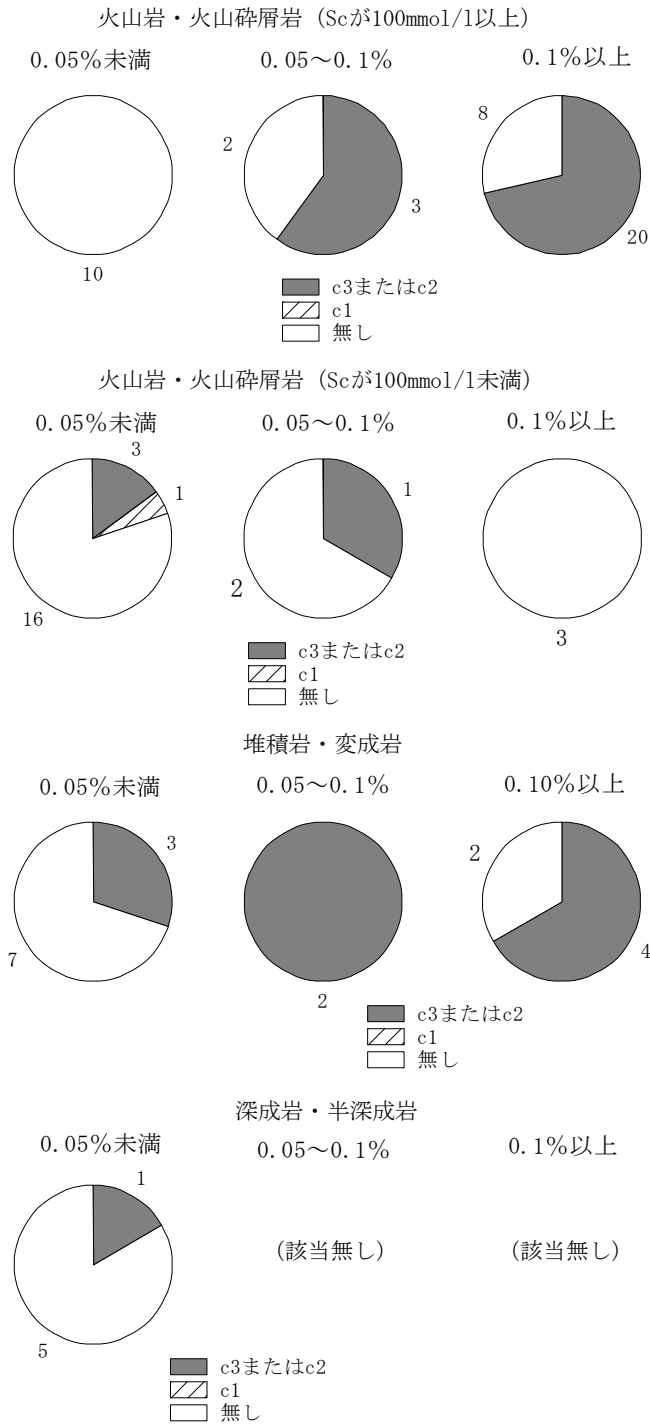


図-6.3.2 モルタルバーの促進養生期間 1 年での膨張率と暴露供試体のひび割れ状況の関係 (アルカリ量 5kg/m³)

図-6.4.1 骨材のアルカリシリカ反応性試験結果と暴露供試体のひび割れ状況・最大ひび割れ幅（アルカリ量 5kg/m³）

岩種	化学法 試験結 果	モルタ ルバー 法試験 結果	ひび割れ状況・最大ひび割れ幅							合計
			ひび 割れ 無し	0.2mm 未満	0.2mm 以上, 0.3mm 未満	0.3mm 以上, 0.4mm 未満	0.4mm 以上, 0.5mm 未満	0.5mm 以上, 0.6mm 未満	0.6mm 以上, 0.7mm 未満	
火山岩・ 火山砕屑岩 Scが100mmol/L 以上	無害 無害で ない	無害 無害で ない	2 12 6	0 1 1	0 1 6	0 1 5	0 1 4	0 0 1	0 0 2	2 16 25
火山岩・ 火山砕屑岩 Scが100mmol/L 未満	無害 無害で ない	無害 無害	15 7	3 0	1 0	0 0	0 0	0 0	0 0	19 7
堆積岩・ 変成岩	無害 無害で ない 無害で ない	無害 無害 無害で ない	8 0 1	4 2 0	0 1 0	0 0 2	0 0 0	0 0 0	0 0 0	12 3 3
深成岩・ 半深成岩	無害	無害	5	1	0	0	0	0	0	6

※ひび割れ無しは、角部限定ひび割れ（c1）が生じている供試体も含む。

7. アルカリ量総量規制値に関する考察

7.1 アルカリ量 3kg/m^3 の供試体でも ASR が生じた骨材の特徴

現行の抑制対策では、コンクリート中のアルカリ総量を 3kg/m^3 以下に規制することで ASR が抑制できると考えられている。しかし、長期暴露供試体の観察を行ったところ、アルカリ量 3kg/m^3 の供試体でも表-4.2.1 の c2 または c3 に相当するひび割れが生じた供試体が 13 体あり、骨材としては 10 種類であった。これらについて、骨材の岩種や採取した地域、薄片試料の観察結果、ひび割れ状況、化学法の試験結果などを表-7.1.1 に示した。

アルカリ量 3kg/m^3 でも ASR が生じた骨材は、火山岩が 8 試料（うち、安山岩が 7 試料、玄武岩が 1 試料）と多く、漸新世よりも新しい火山岩 48 試料の 17% に相当していた。これらの骨材は、いずれも Sc が 100mmol/L 以上と大きく、反応性を有する物質として、火山ガラス、クリストバライト、トリディマイトなどの存在が認められた。なお、クリストバライトは火山ガラスからの変質物と思われるものが、玄武岩骨材の石基部分にも含まれていた。

一方、砂岩、細粒ハンレイ岩も 1 試料ずつあった。これらの骨材では、隠微晶質または微晶質石英が反応していた。すなわち、反応性の高い鉱物等が含まれていない骨材でも、割合としては小さいが、長期的にはアルカリ量 3kg/m^3 のコンクリート中で ASR を生じさせるおそれがあることが確認された。

アルカリ量 3kg/m^3 の供試体でも ASR が生じた 10 種類の骨材について、化学法・モルタルバー法の試験結果を図-7.1.1 に示した。細粒ハンレイ岩の 1 試料は、化学法で「無害」と判定される骨材であった。また、安山岩の 1 試料と細粒ハンレイ岩の 1 試料は、モルタルバー法で「無害」と判定される骨材であった。

なお、化学法の試験結果では反応性が高いと見られてもアルカリ量 3kg/m^3 の供試体ではひび割れが認められなかった骨材も多数ある。そこで、表-7.1.2 に示す一部の供試体で薄片試料の観察を行った。表-7.1.2 中の“87T04”は表-7.1.1 の“87T15”と、表-7.1.2 中の“89096”は表-7.1.1 の“89093”と、同一の県内にあつて碎石場間の距離が比較的近かつたのでこれらを選定した。その結果“87T04”や“89096”でも、火山ガラス、クリストバライト、トリディマイトなど、反応性の高い鉱物等が確認されたが ASR の進行状況は k2 までにとどまっていた。反応性の高い鉱物等を含む骨材でもアルカリ量 3kg/m^3 のコンクリートで ASR の発生状況に差が生じた理由は、明確にはできなかった。

7.2 アルカリ量 3kg/m^3 と 5kg/m^3 の供試体のひび割れ程度の比較

暴露した供試体の調査結果から、コンクリート中のアルカリ量を 3kg/m^3 以下に規制した場合でも、ASR に起因するひび割れが発生するおそれがあることが確認された。しかし、ひび割れが生じた場合であっても、膨張の程度が抑制されていれば、アルカリ量総量規制に一定の効果があつたと考えることができる。

アルカリ量 3kg/m^3 と 5kg/m^3 の供試体のひび割れ状況については、すでに表-5.1.2 で概略の比較を行い、アルカリ量 3kg/m^3 の方が顕著なひび割れ状況になっている場合はないことを示したが、表-7.1.1 に示した

最大ひび割れ幅でも、アルカリ量 3kg/m^3 の方が小さい場合が多く、アルカリ量の抑制には一定の効果が認められる。

7.3 アルカリ量 3kg/m^3 の供試体でも膨張が生じた骨材についてのまとめ

アルカリ量が 3kg/m^3 となるように調整したコンクリート供試体について調査した結果、94 種類の骨材のうち 10 種類では、ASR による膨張が生じていると判定された。骨材の岩種としては漸新世よりも新しい火山岩が 8 試料と多く、漸新世よりも新しい火山岩 48 試料の 17% に相当した。また、化学法による試験結果で Sc が 100mmol/L 以上となった 43 試料の 19% に相当した。

一方で、アルカリ量が 3kg/m^3 で ASR による膨張が生じた骨材には、反応性物質として隠微晶質または微晶質石英を含む砂岩、細粒ハンレイ岩も 1 試料ずつあった。化学法による試験結果で Sc が 100mmol/L 未満となった 51 試料の 4% に相当した。

このように、コンクリート中のアルカリ量を 3kg/m^3 に抑制しても ASR による膨張の発生を完全には防げないことが確認され、特に反応性の高い鉱物を有し、化学法の試験結果で Sc が大きい骨材では、アルカリ量を 3kg/m^3 に抑制していても膨張が生じる割合が比較的大きかった。

今回の暴露供試体では、アルカリ量を 3kg/m^3 の供試体のひび割れの程度はアルカリ量 5kg/m^3 の供試体と同じか軽微なものであり、アルカリ量を 3kg/m^3 以下に抑制することによる膨張抑制効果はある程度認められた。

表-7.1.1 アルカリ量 3kg/m^3 の供試体で c2 または c3 に該当するひび割れが生じた骨材

記号	岩種	地域	化学法		モルタルバー法	薄片試料の観察結果*	ひび割れ状況** ※()内は、最大ひび割れ幅 (単位: mm)			
			Sc (mmol/L)	Rc (mmol/L)			3A	3B	5A	5B
82033	砂岩	東北	63	20	無害でない	供試体 3B, 進行状況 k3, 隠微晶質または微晶質石英	c1	c2 (0.1)	c3 (0.25)	c3 (0.3)
82078	安山岩	東北	356	168	無害		c2 (0.1)	c1	c1	c2 (0.1)
82127	細粒ハンレイ岩	東北	21	26	無害	供試体 3A, 進行状況 k2, 隠微晶質または微晶質石英	c2 (0.1)	c1	c2 (0.1)	c1
82183	安山岩	東北	247	70	無害でない		c1	c2 (0.2)	c1	c2 (0.15)
82197	安山岩	東北	528	244	無害でない		c1	c2 (0.1)	c2 (0.15)	c3 (0.25)
82228	安山岩	東北	258	106	無害でない	供試体 3A, 進行状況 k2, クリストバライト, トリディマイト, 火山ガラス	c1	c2 (0.15)	c3 (0.3)	c3 (0.35)
87T15	安山岩	中国	366	68.4	無害でない	供試体 3A, 進行状況 k4, クリストバライト, 火山ガラス	c3 (0.3)	c3 (0.3)	c3 (0.5)	c3 (0.5)
88003	玄武岩	四国	220	140	無害でない	供試体 3A, 進行状況 k2, ガラス, クリストバライト	c2 (0.1)	c2 (0.1)	c2 (0.2)	c2 (0.1)
88007	安山岩	四国	451	138	無害でない		c2 (0.2)	c1	c3 (0.3)	c3 (0.4)
89093	安山岩	九州	549	176	無害でない	供試体 3A, 進行状況 k4, トリディマイト, 火山ガラス	c3 (0.25)	c3 (0.4)	c3 (0.5)	c3 (0.6)

* 薄片試料の観察結果は、観察した供試体、進行状況、反応性を有する物質の順に記した。実施していない場合は空欄とした。

** 供試体は、アルカリ量 3kg/m^3 、 5kg/m^3 のものが2体ずつあったので、便宜的に、3A、3B、5A、5Bと記号を付けて整理した。

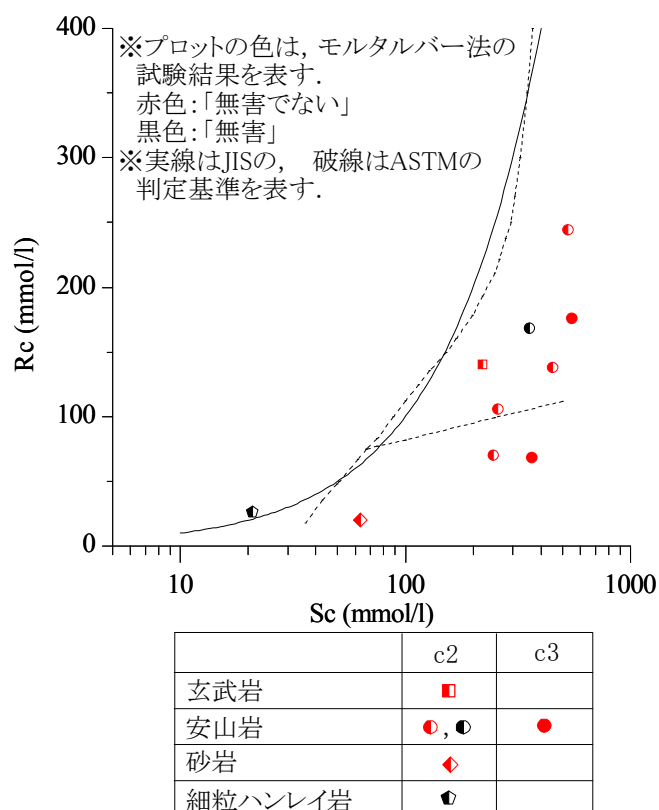


図-7.1.1 アルカリ量 3kg/m^3 の暴露供試体で ASR ひび割れが生じた骨材のアルカリシリカ反応性試験結果

表-7.1.2 アルカリ量 3kg/m^3 の供試体でひび割れ無しの骨材 (薄片試料の観察を行ったもの)

記号	岩種	地域	化学法		モルタルバー法	薄片試料の観察結果*	ひび割れ状況** ※()内は、最大ひび割れ幅 (単位: mm)			
			Sc (mmol/L)	Rc (mmol/L)			3A	3B	5A	5B
82181	デイサイト	東北	28	94	無害	供試体 3A, 進行状況 k1, 隠微晶質または微晶質石英	無し	無し	c1	c2 (0.1)
87T04	安山岩	中国	537	110	無害でない	供試体 3A, 進行状況 k2, トリディマイト	無し	無し	c2 (0.2)	c3 (0.1)
89096	安山岩	九州	710	161	無害でない	供試体 3A, 進行状況 k2, クリストバライト, 火山ガラス	無し	無し	c2 (0.25)	c3 (0.2)

8. 長期暴露試験結果のまとめ

我が国の 94 種類の粗骨材を用いて作製され、屋外に 23 年以上暴露されていたコンクリート供試体の調査を行った。主に、アルカリ量 5kg/m^3 の暴露供試体に着目して検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) ASR による膨張が生じた骨材の割合は、漸新世よりも新しい火山岩で多く、ついで堆積岩で比較的多いなど、化学法による試験結果などに基づく従来の知見とおおむね合致していた。
- (2) 一方で、従来ほとんど反応性を有しないと考えられてきた中新世よりも古い火山岩や、深成岩・半深成岩でも、暴露供試体では ASR によるひびわれが生じた骨材があり、遅延膨張性の ASR が生じたものと考えられた。
- (3) 化学法・モルタルバー法による骨材の反応性の判定結果は、反応性の高い鉱物等を含む骨材、すなわち化学法で Sc が 100mmol/L 以上の火山岩・火山砕屑岩を用いた暴露供試体のひび割れ状況と関係が認められた。一方で、Sc が 100mmol/L 未満の火山岩・火山砕屑岩や、深成岩・半深成岩などを用いた暴露供試体の状況とは合致しなかった。堆積岩を用いた暴露供試体の結果に関しては化学法の判定結果が暴露供試体の結果と比較的よく合致していた。
- (4) モルタルバー法の判定基準について、膨張の途中経過を分析したり、促進養生期間を 1 年としたりして検討したが、判定結果と暴露供試体のひび割れ状況の関係を改善することはできなかった。

次に、アルカリ量 3kg/m^3 の暴露供試体に着目して検討した結果、以下の知見を得た。

- (5) コンクリート中のアルカリ量を 3kg/m^3 とした供試体でも、94 種類の骨材のうち 10 種類では ASR による膨張が生じた。特に、反応性の高い鉱物等を有し、化学法による測定で Sc が 100mmol/L 以上の火山岩・火山砕屑岩では、その 19% で ASR による膨張が生じており、Sc が 100mmol/L 未満の骨材 (4%) と比較して、ASR による膨張が生じる割合が大きかった。

このように、暴露供試体のひび割れ状況を観察した結果から種々の有益な知見が得られた。ただし、長期暴露試験で用いられた骨材は、わが国の ASR 反応性を有する骨材の全てを網羅したものではなく、たとえば、チャートや、砂利などは含まれていない。得られたデータの活用にあたっては、留意が必要である。

参考文献

- 1) 古賀裕久, 河野広隆, 渡辺博志: コンクリート構造物の健全度に関する実態調査結果, 土木技術資料, Vol.42, No.12, pp.58-63, 2000.
- 2) 河野広隆, 古賀裕久: 道路橋に見るアルカリ骨材反応の実態, 土木技術資料, Vol.47, No.12, pp.66-71, 2005.
- 3) 上田洋, 松田芳範, 石橋忠良: アルカリ反応性の観点から見た骨材の現状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.607-612, 2001.
- 4) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008.
- 5) Wakizaka, Y.: Reactivity of rocks and minerals in alkaline solution, Journal of Research, Public Works Research Institute, Vol.34, pp.15-28, 1998.
- 6) 成田信之, 蒔田実, 中野正則, 桑原啓三, 平野勇, 脇坂安彦, 片脇清, 守屋進, 小林茂敏, 河野広隆, 石井良美: アルカリシリカ反応の調査と対応に関する建設省暫定案, 土木研究所資料, No.2375, pp.107-159, 1986.
- 7) コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法 (案), 建設省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, 土木研究センター, pp.159-160, 1989.
- 8) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y. Zaha K. and Yamato, T.: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.862-873, 2008.
- 9) JIS A 1804 : 1992 (コンクリートの生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (迅速法)) 解説, 1992.
- 10) 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: 超音波法による ASR 既存膨張率の算定, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1709-1714, 2010.
- 11) 市川慧, 平野勇, 脇坂安彦, 守屋進, 小林茂敏, 河野広隆, 森濱和正, 森田良美: 日本産岩石のアルカリシリカ反応性, 土木研究所資料, No.2840, pp.81-126, 1990.
- 12) 脇坂安彦, 守屋進, 河野広隆, 森濱和正, 石井良美: 我が国におけるアルカリ反応性骨材の特徴と分布, 土木技術資料, Vol.30, No.12, pp.24-29, 1988.
- 13) Katayama, T., Sarai, Y., Higashi, Y. and Honma, A.: Late-expansive alkali-silica reaction in the Ohnyu and Furikusa headwork structures, Central Japan, Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1086-1094, 2004.
- 14) 西政好, 池田隆徳, 佐川康貴, 林建佑: 遅延膨張性骨材による ASR 劣化事例および骨材の ASR 反応性検出法の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.935-940, 2010.
- 15) Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Method for aggregate combination using concrete prisms,

- RILEM TC 106-3, Materials and Structures, Vol.33, pp.283-293, 2000.
- 16) Katayama, T. and Kaneshige, Y.: Diagenetic changes in potential alkali-aggregate reactivity of volcanic rocks in Japan – a geological interpretation, Gratten-Bellwe, P. E. ed., Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Noyes Publications, Park Ridge, pp.489-495, 1987.
 - 17) 古賀誠, 木野淳一, 松田芳範: アルカリシリカ反応の抑制対策について, SED, No.34, pp.138-143, 2010.

II ペシマム条件に関する補足実験

1. 検討の目的

第I部に示した長期暴露試験では、我が国の様々な地域から収集された94種類の粗骨材を用いて作製され、23年以上屋外に暴露されていたコンクリート供試体を調査し、アルカリシリカ反応（以下、ASR）によるひび割れ等の発生状況を調べた。化学法（JIS A 1145）やモルタルバー法（JIS A 1146）による試験の結果「無害」と判定される骨材にも、長期暴露供試体ではASRによると見られるひび割れが生じている場合があった。

表-1.1に示すように、化学法、モルタルバー法ともに「無害」と判定される骨材は39種類あったが、そのうち6種類では、ASRによると見られるひび割れが生じていた。その理由の一つとして、反応性を有する物質が微晶質・隠微晶質石英の場合は、反応速度が遅く、化学法、モルタルバー法では、十分反応性が評価できないおそれがあると考えられた。

また、表-1.1を見ると、化学法では「無害でない」、モルタルバー法では「無害」と判定結果が分かれる場合もある。化学法とモルタルバー法の判定結果が分かれた場合、現在のJISの規定では、モルタルバー法による判定を優先させてよいものとされている。一方で、既往の研究から、化学法で溶解シリカ量（Sc）、アルカリ濃度減少量（Rc）がともに大きく、ASTM C 289の判定図で「潜在的有害」と判定される骨材は、その使用率が100%より少ない場合にかえって膨張量が大きくなるようなペシマム条件を有している骨材であることが知られている。今回、長期暴露試験に用いた骨材のうち、Scが100mmol/L以上の火山岩・火山細屑岩骨材の多くが、この「潜在的有害」の範囲にあったが、使用割合は100%で一定なので、ペシマムの影響については考慮できていない。

そこで、今回の暴露供試体に用いた骨材のうち、ASTM 化学法の判定で「潜在的有害」に該当し、今回、JIS 化学法で「無害でない」、モルタルバー法で「無害」と判定がわかれたような骨材を中心に、補足実験を行って、化学法、モルタルバー法の判定の妥当性について検討した。

表-1.1 骨材のアルカリシリカ反応性試験結果と暴露供試体のひび割れ状況・最大ひび割れ幅（アルカリ量 5kg/m³）

岩種	化学法 試験結 果	モルタ ルバー 法試験 結果	ひび割れ状況・最大ひび割れ幅							合計
			ひび 割れ 無し	0.2mm 未満	0.2mm 以上, 0.3mm 未満	0.3mm 以上, 0.4mm 未満	0.4mm 以上, 0.5mm 未満	0.5mm 以上, 0.6mm 未満	0.6mm 以上, 0.7mm 未満	
火山岩・ 火山砕屑岩 Scが100mmol/L 以上	無害 無害で ない 無害で ない	無害 無害 無害で ない	2 12 6	0 1 1	0 1 6	0 1 5	0 1 4	0 0 1	0 0 2	2 16 25
火山岩・ 火山砕屑岩 Scが100mmol/L 未満	無害 無害で ない	無害 無害 無害で ない	15 7	3 0	1 0	0 0	0 0	0 0	0 0	19 7
堆積岩・ 変成岩	無害 無害で ない 無害で ない	無害 無害 無害で ない	8 0 1	4 2 0	0 1 0	0 0 2	0 0 0	0 0 0	0 0 0	12 3 3
深成岩・ 半深成岩	無害	無害	5	1	0	0	0	0	0	6

※ひび割れ無しは、角部限定ひび割れ（c1）が生じている供試体も含む。

※第I編に掲載したものと同一表を再掲した。

2. 実験方法

2.1 概要

長期暴露試験の供試体を解体して製造した再生粗骨材を試料として、モルタルバー法 (JIS A 1146) に準じた試験を行った。反応性を有する骨材の使用量によって膨張量が異なるペシマム性を検討するため、再生粗骨材を粉砕した試料とセメント強さ試験用標準砂 (ケイ砂) を混合した試料を用いた。

2.2 検討対象

検討対象は、暴露試験に先だって行われた化学法、モルタルバー法の試験結果と、長期暴露試験後の供試体のひび割れ状況などを総合的に考慮して選定した。骨材の試験結果からペシマムの影響を受けることが疑われるものを中心に、比較のため、影響がないと考えられる骨材についても選定した。

選定した骨材の概略を表-2.2.1 に示す。ここでは、骨材を次の3種類に分類して考察する。

- ・あらゆる試験結果が反応性の高さを示しており、明らかに高反応性の骨材：87T15, 89093
- ・ペシマムの影響によって反応性試験の結果が影響を受けうる骨材：82077, 82078, 82011, 82015, 86014, 87S14
- ・ペシマムの影響が考えにくい骨材：82033, 85S36, 87O10, 87O16

2.3 試験に用いる再生粗骨材の採取

(1) 製造方法

試験に用いる再生粗骨材の採取方法は、既往の文献 1), 2)を参考にした上で、土木研究所が所有する装置等にあわせて計画した。

再生粗骨材は、アルカリ量 5kg/m^3 の暴露供試体から採取した。アルカリ量がセメント量の 1.4% に相当し、この点ではモルタルバー法 (セメント量の 1.2%) に近いいため、再生粗骨材を採取する際に除去できなかった硬化セメントペーストが多少あっても、実験結果への影響が生じにくいと考えたためである。

まず、暴露供試体 (15×15×80cm) のうち、天端の部分 (15×15×20cm 程度、別の実験のために保管) を除いて粗粉砕した。粉砕には、カッターやジョークラッシャーを用いた。次に、この粗粉砕した試料を 200℃ の乾燥炉で約 1 日間加熱乾燥し、徐冷した。その後、ロサンゼルス試験機に 5~10kg の試料と鉄球 12 個を投入して 1000 回転させ、すりもみによりモルタル部分を除去した。最後に水洗して、再生粗骨材を得た。

(2) 採取した再生粗骨材の性状

図-2.3.1 に製造した再生粗骨材の例を示す。また、採取した再生粗骨材の密度吸水率を、暴露前に行われていた試験結果と比較して表-2.3.1 に示す。再生粗骨材は、暴露前の試験結果と比較すると、吸水率がやや大きくなっているものが多いが、これは、骨材表面に付着しているセメントペーストが完全には除去できないためと考えられる。

さらに、骨材の同一性を確認するため、化学法によるアルカリシリカ反応性の試験を行った。その際は、

製造した再生粗骨材に付着したペースト部分を塩酸で溶解させて除去した上で試験に用いた。試験結果を、表-2.3.2 に示した。再生粗骨材の S_c の試験結果は、暴露前に行われた試験の結果と、おおよそ合致していた。なお、表-2.3.2 を見ると、再生粗骨材は R_c がやや大きくなった。この原因の一つとして、酸を用いても再生粗骨材に付着したペーストを完全には除去できていなかったことが考えられる。

2.4 モルタルバー法

前節のように採取した再生粗骨材を粉砕して、モルタルバー法 (JIS A 1146) に準じた試験を行った。ただし、ペシマムの影響を考慮するため、再生粗骨材を粉砕した試料を 100%、76%、50%、25%と使用割合を変えて用いた。再生粗骨材試料と混合する砂は、セメント強さ試験用標準砂 (ケイ砂) を用いた。ペシマム性が考えにくい4種類の骨材は、使用割合 25%のケースを省略した。

なお、本報告書の執筆時点では、材齢 13 週までのデータしか得られていない。今後も、継続して測定する予定である。

表-2.2.1 選定した骨材

記号	産地の 区分	岩種	骨材のアルカリシリカ反応性 (暴露前)		暴露供試体のひび割れ状況**			
			化学法*	モルタルパー 法	3A	3B	5A	5B
87T15	中国	安山岩	無害でない	無害でない	c3	c3	c3	c3
89093	九州	安山岩	無害でない (P)	無害でない	c3	c3	c3	c3
82077	東北	安山岩	無害でない (P)	無害	無し	無し	c3	c3
82078	東北	安山岩	無害でない (P)	無害	c2	c1	c1	c2
82011	東北	安山岩	無害でない (P)	無害	無し	無し	無し	無し
82015	東北	デイサイト	無害でない (P)	無害	無し	無し	無し	無し
86014	近畿	安山岩	無害でない (P)	無害	無し	無し	無し	無し
87S14	中国	安山岩	無害でない (P)	無害	無し	無し	無し	無し
82033	東北	砂岩	無害でない	無害でない	c1	c2	c3	c3
85S36	中部	砂岩	無害でない	無害	無し	無し	c2	c2
87O10	中国	デイサイト	無害	無害	無し	無し	無し	無し
87O16	中国	デイサイト	無害	無害	無し	無し	c2	c3

* 化学法の試験結果はJISに準じて判定したが、ASTMの判定図にあてはめた場合、潜在的有害に分類されるような骨材では、(P)を付した。

** 暴露供試体のひび割れ状況の分類については、第I部を参照。なお、供試体は、アルカリ量3kg/m³、5kg/m³のものが2体ずつあったので、便宜的に、3A、3B、5A、5Bと記号を付けて整理した。着色したセルの供試体を解体し、再生粗骨材を製造した。



左 : 82015

右 : 89093

図-2.3.1 再生粗骨材の外観の例

表-2.3.1 骨材の密度吸水率試験結果

記号	暴露前		暴露後 (再生粗骨材)	
	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
87T15	2.68	1.30	2.56	2.97
89093	2.62	1.72	2.48	4.31
82077	2.67	1.86	2.52	3.61
82078	2.60	3.16	2.53	3.60
82011	2.17	10.00	2.19	8.11
82015	2.69	0.47	2.35	5.32
86014	2.45	3.60	2.43	2.95
87S14	2.70	1.42	2.61	2.99
82033	2.66	0.84	2.57	2.26
85S36	2.61	0.95	2.55	2.27
87O10	2.65	1.08	2.53	2.98
87O16	2.62	0.54	2.59	1.46

表-2.3.2 骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）結果

記号	暴露前		暴露後 (再生粗骨材)	
	Sc (mmol/L)	Rc (mmol/L)	Sc (mmol/L)	Rc (mmol/L)
87T15	366	68.4	594	128
89093	549	176	305	187
82077	518	158	168	198
82078	356	168	355	282
82011	958	160	578	320
82015	772	186	741	286
86014	626	242	418	302
87S14	304	133	141	244
82033	63	20	21	90
85S36	64	52	33	115
87O10	62	76	26	116
87O16	25	59	64	46

3. 実験結果と考察

3.1 明らかに高反応性の骨材

材齢 13 週までの平均膨張率を、図-3.1.1 に示した。これらの骨材では、すでに平均膨張率が 0.050%以上なので、この時点で「無害でない」と判定できる。また、平均膨張率が最大となったのは 2 試料とも、再生粗骨材の使用率が 75%の場合であったが、100%の使用でも、平均膨張率は 0.050%以上であった。

3.2 ペシマムの影響が考えられる骨材

材齢 13 週までの平均膨張率を、図-3.2.1 に示した。該当する 6 種類の骨材のうち、3 試料ではすでに平均膨張率が 0.050%以上のケースが有り、この時点で「無害でない」と判定できる。これら 3 種の骨材は、再生粗骨材の使用率が 50%または 25%の場合に膨張率が最大となっており、ペシマム条件の影響が顕著だった。なお、平均膨張率が 0.050%以上のケースがある 3 種の骨材は、いずれも長期暴露試験では、ひび割れが認められなかったものであった。長期暴露試験の供試体では、試験する骨材を 100%使用していたために、ASR によるひび割れが生じなかったことが考えられる。

したがって、これらの骨材については、他の骨材と混合使用した場合に、その組合せや混合率によっては、ASR による顕著な膨張が生じるおそれがあることを否定できない。材齢 13 週の時点でも、すでに 6 試料中 3 試料で「無害でない」と判定できるので、このような骨材は反応性が高い骨材として十分な注意が必要と考えられる。

3.3 ペシマムの影響が考えにくい骨材

材齢 13 週までの平均膨張率を、図-3.3.1 に示した。いずれの骨材でも、平均膨張率が 0.050%未満なので、材齢 14 週の時点では反応性が明確ではなかった。全体に膨張率が小さいこともあり、ペシマムの影響も明確ではなかった。

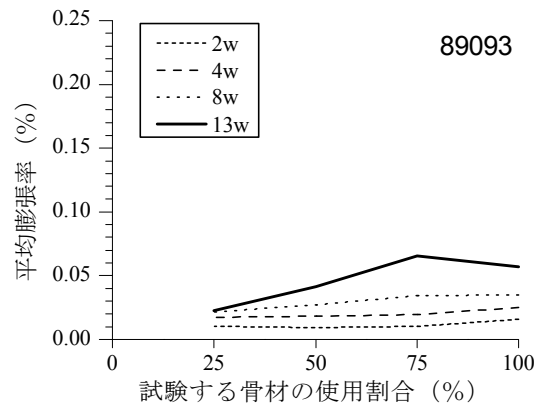
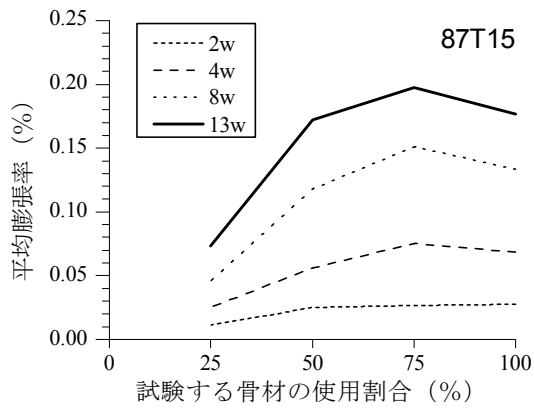


図-3.1.1 モルタルバー法の試験結果 (明らかに高反応性の骨材)

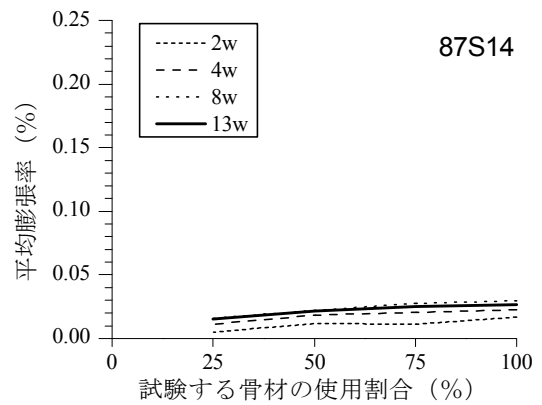
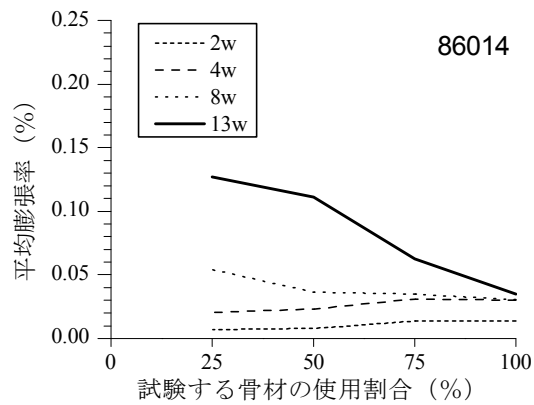
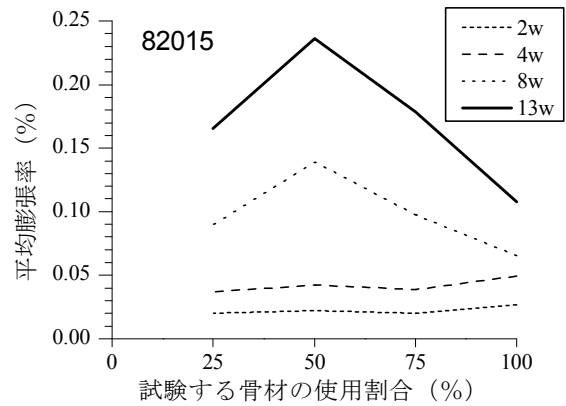
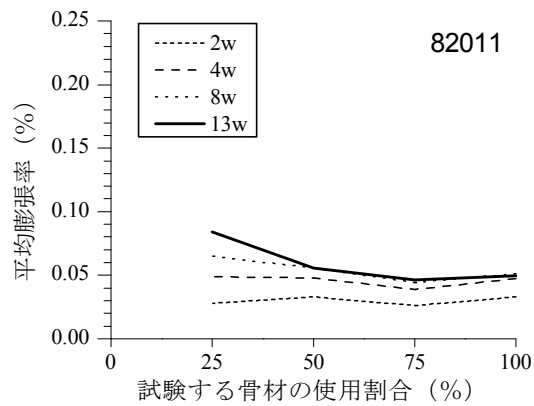
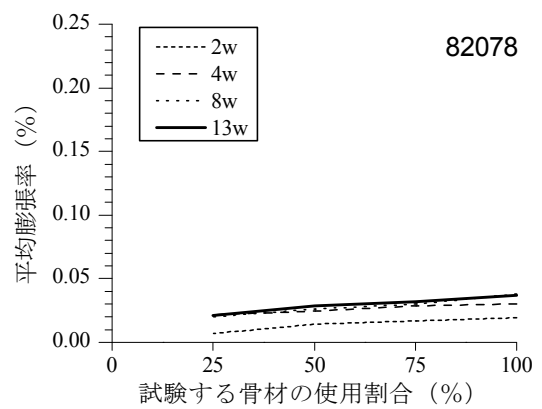
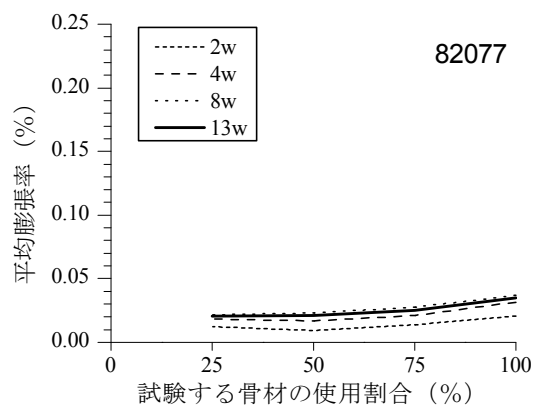


図-3.2.1 モルタルバー法の試験結果 (ペシマムの影響が考えられる骨材)

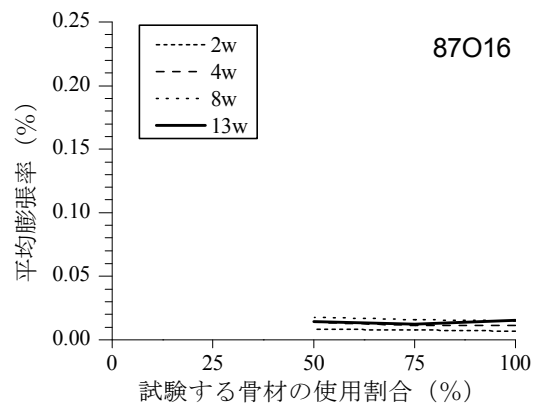
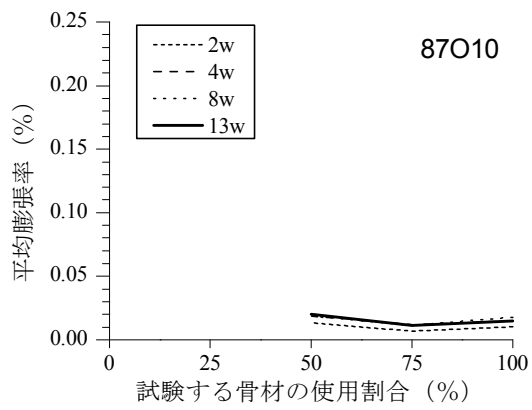
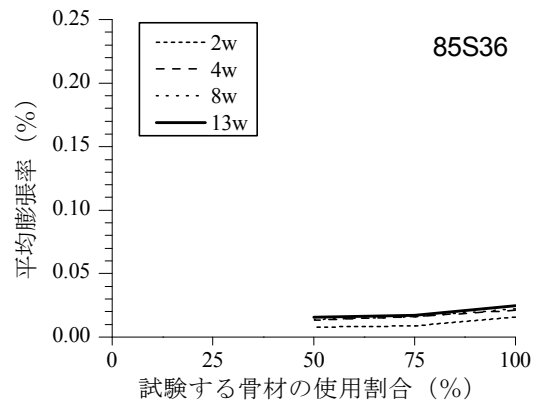
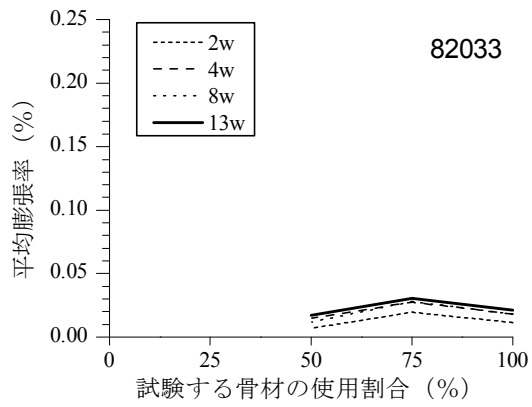


図-3.3.1 モルタルバー法の試験結果 (ペシマムの影響が考えにくい骨材)

4. ペシマム条件に関する補足実験結果のまとめ

第I部でまとめた長期暴露試験のコンクリート供試体は、いずれも骨材を100%使用して作製されていた。そのため、長期暴露後の供試体にASRによると見られるひび割れが生じていない骨材でも、いわゆるペシマム条件があると考えられるような骨材については、検討が必ずしも十分ではなかった。また、このような骨材では、化学法で「無害でない」、モルタルバー法で「無害」と判定結果が分かれている場合も少なくなかった。

そこで、暴露後の供試体から粗骨材を取りだした再生粗骨材と、セメント強さ試験用標準砂を単独または混合使用したモルタル供試体を製作して、JISモルタルバー法の促進環境で促進養生した。その結果、材齢13週までの試験結果から、以下の知見を得た。

- (1) Sc, Rc がともに比較的大きくペシマムの影響が疑われる骨材で、暴露試験前の試験結果が化学法で「無害でない」、モルタルバー法で「無害」と一致しなかった6種類の骨材のうち3種類では、材齢13週の平均膨張率が0.050%以上となったケースがあった。
- (2) (1)の3種類の骨材は、これを50%または25%混合して用いたケースで、膨張率が最大になっていた。暴露試験前に行われたモルタルバー法の試験や、長期暴露試験の供試体では、試験する骨材を単独で用いているので、骨材に反応性があることを正しく評価できていなかったおそれがある。

なお、化学法、モルタルバー法、長期暴露試験の結果が一致して高い反応性を示しているような2種類の骨材では、材齢13週の時点で、試験する骨材を単独で用いたケースでも膨張量が0.050%以上となっていた。一方、ペシマムの影響が考えにくい4種類の骨材では、いずれのケースでも膨張量が0.050%未満であった。これらの試験結果から、今回行った補足実験は再生粗骨材を用いたものであるが、反応性の有無を概ね適切に評価できていると考えた。

今後、現時点で膨張率の小さい供試体が膨張することも考えられるので、継続して試験を行っていく予定である。

これらの結果から、ペシマムを有すると考えられる骨材（例えば、ASTM C 289の判定図で潜在的有害に該当するような骨材）の反応性を、モルタル等の膨張量から評価するにあたっては、評価する骨材の使用割合を50%以下程度にした供試体も製作するなど、慎重な検討が必要と考えられる。

現状のJISの規定では、化学法で「無害でない」と判定された骨材でも、モルタルバー法で「無害」と判定された場合、後者を優先してよいとの規定があるが、ペシマムについて十分な留意がないままこの規定を適用すると危険側の判断になるので、注意が必要である。

参考文献

- 1) 岩月栄治, 森野奎二: 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1229-1234, 2003.
- 2) 黒田泰弘: 反応性骨材を用いたコンクリートからの高品質再生骨材の製造, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.421-426, 2007.

付録

1. 主要な調査結果
2. 代表的なひび割れ状況
3. 超音波伝播速度測定結果
4. 骨材の岩石学的調査結果
5. 暴露供試体のアルカリ量測定結果

1. 主要な調査結果

骨材の反応性に関する主要な調査結果をまとめて表形式で示す。各項目の内容や記号等について、以下に補足する。

(1) 記号

骨材を他の骨材と区別するために用いた記号である。なお、最初の2文字が、産地の区分を表しており、以下の通りである。

82 :	東北	87 :	中国
83 :	関東	88 :	四国
85 :	中部	89 :	九州
86 :	近畿		

(2) 参照用 No.A

これらの骨材について過去に報告した土木研究所資料 No.2840（日本産岩石のアルカリシリカ反応性）の附表-1でいう“*No.*”である。この土木研究所に示した暴露前の試験結果（化学法、モルタルバー法）は、この土木研究所資料で報告されたデータを引用したものである。

(3) 参照用 No.B

これらの骨材について過去に報告した *Journal of Research, Vol.34 (Reactivity of Rocks and Minerals in Alkaline Solution, 以下、所報 Vol.34 という)* の巻末に示された一覧表でいう“*No.*”である。この土木研究所に示した骨材の岩種は、原則としてこの所報 Vol.34 で報告されたデータを引用したものであり、前項に示した土木研究所資料 No.2840 とは若干の違いがある。土木研究所資料の公表後にさらに調査、検討した上で所報 Vol.34 が執筆されているので、その判定結果を採用したものである。

略号のうち最初の二文字が岩種を表しており、その意味は次の通りである。なお、着色したセルの骨材については、所報 Vol.34 の巻末にはデータが無かったので、土木研究所資料 No.2840 での岩種判定結果を採用した。

An :	安山岩	Hr :	ホルンフェルス
Bs :	玄武岩	Pr :	カンラン岩
Cs :	粘板岩	Rh :	流紋岩
Dc :	デイサイト	Sc :	変成玄武岩質火山砕屑岩
Dl :	細粒ハンレイ岩	Sh :	頁岩
Gr :	花崗岩	Ss :	砂岩

(4) X線回折による鉱物組成

これらの骨材について過去に報告した土木研究所資料 No.2840（日本産岩石のアルカリシリカ反応性）のデータを引用した。なお鉱物等の略号は次の通りである。

B :	黒雲母	Il :	イライト
C :	方解石	LA :	低温型アルバイト（斜長石）
Ch :	緑泥石	M :	モンモリロナイト
Cr :	クリストバライト	Ms :	白雲母
D :	ドロマイト	Ol :	かんらん石
E :	輝石	Or :	正長石
Gl :	ガラス	P :	黄鉄鋼
HA :	高温型アルバイト（斜長石）	Q :	石英
Hb :	角閃石	T :	トリディマイト
Hl :	ヒューランダイト		

(5) 化学法

これらの骨材について過去に報告した土木研究所資料 No.2840（日本産岩石のアルカリシリカ反応性）のデータを引用した。Sc, Rc の単位は、mmol/L である。なお、判定は、ASTM の判定図によるもので略号の意味は次の通りである。

I :	無害
P :	潜在的有害
D :	有害

(6) モルタルバー法

これらの骨材について過去に報告した土木研究所資料 No.2840（日本産岩石のアルカリシリカ反応性）のデータを引用した。

(7) ひび割れ状況

長期暴露後に行った観察の結果、ひび割れ状況を分類した結果を示す。記号については、第 I 部を参照されたい。なお、空欄はひび割れが無いことを、NA は供試体が存在しないことを、それぞれ意味する。

(8) ひび割れ幅

長期暴露後に行った観察の結果、測定したひび割れ幅の最大値（単位：mm）を示す。測定については、第 I 部を参照されたい。ひび割れ状況 c1 のものは、角部にしかひび割れが存在しないため、ここでいうひび割れ幅の記録がない。

付表-1.1 主要な調査結果の一覧

記号	参照用 No.A	参照用 No.B	X線回折による鉱物組成	化学法			モルタル バー法	ひび割れ状況				ひびわれ幅				
				Sc	Rc	判定	判定	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B	
82003	438	Dc-048	Q>HA>>C>Or,Ch	20	186	I	I									
82011	439	An-044	Cr,HA>>Q,T	958	160	P	I									
82015	444	Dc-067	HA, T>>Q>>M, Il	772	186	P	I									
82028	449	An-045	HA>Cr>M	594	258	P	I									
82031	451	An-080	HA>T,Q>E	448	99.1	D	D	c1	c1	c2	c3	-	-	0.2	0.45	
82032	452	*1	HA>Q>Ch>Il	29.7	35.7	I	I			c3	c2			0.1	0.15	
82033	453	Ss-072	-	63	20	D	D	c1	c2	c3	c3	-	0.1	0.25	0.3	
82054	465	Dc-051	HA>Q>>M>HI?	308	192	P	I									
82068	481	Cs-022	Q>LA,Ms>>Or?,Ch,Hb?	40	32	I	D			c3	c2			0.3	0.2	
82077	487	An-085	HA,T>>>M	518	158	P	I			c3	c3			0.4	0.35	
82078	488	An-048	HA,T>Q>E>C>>M	356	168	P	I	c2	c1	c1	c2	0.1	-	-	0.1	
82119	505	Hr-003	Q>HA>Il,Ch,Or	32	32	I	I			c2	c2			0.1	0.1	
82127	511	DI-009	HA>Q,Hb,B>>>Ch	21	26	I	I	c2	c1	c2	c1	0.1	-	0.1	-	
82150	518	Cs-025	-	48	80	I	I			c1	c2			-	0.1	
82164	519	Bs-008	HA>>Q>E,M	99	278	I	I									
82165	520	Pr-003	HA>>Or>Ch>Q?	8	129	I	I									
82179	521	An-049	HA>>Q,M	508	214	P	D			c3	c3			0.3	0.25	
82181	522	Dc-022	HA>Q>M>>Hb,Il,Ch?	28	94	I	I			c1	c2			-	0.1	
82183	523	An-087	HA>Cr>E?	247	70	D	D	c1	c2	c1	c2	-	0.2	-	0.15	
82197	524	An-088	HA>Cr>Q>>M	528	244	P	D	c1	c2	c2	c3	-	0.1	0.15	0.25	
82227	527	An-090	HA>>>Cr?,E	430	140	P	I	c1	c1	c3	c2	-	-	0.35	0.2	
82228	528	An-091	HA>>>>E?	258	106	P	D	c1	c2	c3	c3	-	0.15	0.3	0.35	
82233	531	An-094	HA>>Cr,Q,E>M	497	164	P	D	c1	c1	c3	c3	-	-	0.5	0.65	
82298	539	Dc-055	Q>LA>Ch>>Il	36	54	I	I									
82302	541	An-096	HA>>Cr,E>>>M	448	140	P	I									
		*1	andesitic pyroclastic rocks													

(前ページからの続き, 2/4)

記号	参照用 No.A	参照用 No.B	X線回折による鉱物組成	化学法			モルタル バー法	ひび割れ状況				ひびわれ幅			
				Sc	Rc	判定	判定	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B
82341	547	Ss-079	Q>LA,C>Or,Ch>Il	27.4	54.5	I	I			c2	c1			0.15	-
82347	549	An-098	HA>>>T>>>M	368	162	P	I			c2	c3			0.15	0.25
82369	552	An-099	HA>>Q,Cr>>>M	522	186	P	D			c3	c3			0.25	0.35
82392	557	An-104	HA>>E?>M	41.5	106	I	I			c1	c2			-	0.2
82408	565	Dc-024	Q>>LA,Or>>>Ch,Il	44	81	I	I			c1	c1			-	-
83N03	430	An-072	-	420	114	P	D	c1	c1	c3	c3	-	-	0.45	0.4
85S11	357	An-064	HA>T>>E	305	124	P	I								
85S36	360	Ss-063	-	64	52	D	I			c2	c2			0.15	0.15
86014	280	An-059	HA>T>>Or>M,Il	626	242	P	I								
86019	281	*2	Q>LA>Or>C>Ch,Il	22	82	I	I								
86026	282	Bs-004	HA>>Cr>E>Q,Gl?	44.5	40.6	I	I								
86027	283	DI-003	C>LA,E>Q>Ch>Il	54.2	196	I	I								
86031	287	DI-004	-	18	80	I	I								
86036	289	Ss-048	Q>LA>>C>Ch, Ms	33	20	I	I			c2	c3			0.2	0.1
86052	297	Dc-037	Q>>C,LA,Or,Ch>Il,P	42.5	41.1	I	I								
86056	298	Rh-013	Q>LA>Or>>Ch,Il,?	43.9	49.1	I	I								
86058	300	Rh-014	Q>LA,Or>>C>Ch,Il	49	40	I-D	I								
86065	305	Sc-011	Q>Hb>LA,Ch>C>>Il	272	75.8	D	I								
86066	306	Rh-015	Q>LA,Or>>Il,Ch	40	37	I	I								
86086	311	*3	C>>>D, Q	48.6	133	I	I								
86100	318	Ss-052	Q>LA>Or>>Ch,C,Il	22	45.1	I	I								
87H37	197	Rh-005	Q>LA,Or>>Il	36	17	I-D	I								
87H39	198	Gr-003	Q>LA>Or>Hb>Ch>B	21.3	40.6	I	I								
87H58	205	Sh-016	-	56	92	I	I			c2	c2			0.1	0.1
		*2	dacitic pyroclastic rocks												
		*3	limestone												

(前ページからの続き, 3/4)

記号	参照用 No.A	参照用 No.B	X線回折による鉱物組成	化学法			モルタル バー法	ひび割れ状況				ひびわれ幅					
				Sc	Rc	判定	判定	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B		
87S14	240	An-054	HA>>E>>>M?, Gl	304	133	P	I										
87S24	243	Dc-032	Q,HA>>>Il?	388	152	P	D				c2	c3				0.15	0.25
87S30	244	Rh-010	Q>HA>Or>Ch, Hb, ?	74	67.9	I-D	I										
87S32	245	*4	Q>LA>Or>>Ch, Il	34	40	I	I										
87S35	246	*5	Q>>LA>>Or, C>Il, Ch	113	45.6	D	I										
87T04	271	An-053	HA>>E>>Cr>Il,M?	537	110	D	D				c2	c3				0.2	0.1
87T15	272	An-042	HA>Q>>E>Il,Cr>Ch	366	68.4	D	D	c3	c3	c3	c3	c3	0.3	0.3	0.5	0.5	
87T17	274	*6	Q, LA>>C, Or>Il, Ch	38	35	D	I										
87Y19	257	Ss-045	-	28	38	I	I				c2	c2				0.15	0.15
87Y27	263	*7	-	67.1	99.1	I	I										
87Y34	264	*8	Q>LA>C>Ch, Or?>Il, P	18.8	73.3	I	I										
87Y43	270	*9	-	9.8	376	I	I										
87O10	157	Dc-064	Q>>LA>>Il, Ch	62	76	I	I										
87O16	161	Rh-003	Q>>LA>Or>>Il>Ch,?	36	38	I	I				c2	c3				0.1	0.1
87O40	177	Dc-003	Q>HA>>Ch,Il,Or	26	95	I	I										
87O42	178	Dc-025	Q>HA>Ch>Il, Hb	27	47	I	I										
88003	88	Bs-003	HA>Ol>E	220	140	P	D	c2	c2	c2	c2	c2	0.1	0.1	0.2	0.1	
88007	93	An-034	HA>>E>>M,(Gl)	451	138	P	D	c2	c1	c3	c3	c3	0.2	-	0.3	0.4	
88010	97	An-036	HA>>E,(Gl)	228	56	D	D										
88011	98	An-037	HA>E>T>Q>M,(Gl)	598	167	P	D				c3	c3				0.25	0.25
		*4	dacitic pyroclastic rocks														
		*5	dacitic pyroclastic rocks														
		*6	dacitic pyroclastic rocks														
		*7	peridotite														
		*8	andesitic pyroclastic rocks														
		*9	sandstone, slate														

(前ページからの続き, 4/4)

記号	参照用 No.A	参照用 No.B	X線回折による鉱物組成	化学法			モルタル バー法	ひび割れ状況				ひびわれ幅				
				Sc	Rc	判定	判定	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B	
88012	99	An-038	HA>Cr>>E,M	511	114	D	D									
88039	120	DI-001	Ch>E,LA,Q>Hb	14	20	I	I			NA	NA			NA	NA	
88046	122	Ss-025	Q>LA>Or>>Ch,Il,?	28	144	I	I									
88049	126	Ss-027	Q>LA>Ch>Il	48	50	I	I									
88091	142	Ss-032	Q>LA>Or>>Ch,Il,?	87	132	I	I									
89014	8	Dc-010	Q>>LA,C>>Ch,Il	29	101	I	I									
89030	14	An-004	HA>>T>>M	163	188	I	I									
89031	15	Dc-001	HA>Q>Or>Hb>M,E?,Gl?	189	172	P-I	I									
89040	19	Dc-002	Q>HA>Or>>Ch	47	62	I	I									
89053	23	Dc-011	Q>HA,Ch>>Hb,Il	16	87	I	I									
89064	32	An-012	HA>>E>>M	152	190	I	I									
89068	33	Bs-005	HA>>>Or?>>Il	28	124	I	I									
89069	34	An-052	HA>T>Q>E?>>M	422	158	P	D									
89072	36	An-014	HA>>Cr>E?>M	305	162	P	D									
89074	38	An-016	HA>E>Cr>>Q>>Il,M?	528	158	P	D			c3	c3			0.4	0.4	
89075	39	An-017	HA>>E>Or?	458	126	P	D			c3	c3			0.35	0.3	
89079	42	Bs-001	HA>>E>>M	319	202	P	I									
89086	46	An-010	HA>>E>Q>Or>>M,Gl?	447	148	P	D			c3	c2			0.3	0.35	
89088	47	Ss-008	Q>LA>Or>>C>Ch,Il	30	34	I	I									
89093	52	An-024	HA>T>E>Q>>M,Or?	549	176	P	D	c3	c3	c3	c3	0.25	0.4	0.5	0.6	
89096	53	An-007	HA>Q>Cr,E>Or>>M,Il	710	161	P	D			c2	c3			0.25	0.2	
89097	54	An-025	HA>T>Cr>E>M	714	204	P	D									
89122	74	Cs-002	Q>>LA>>C, Il, Ch	72	109	I	I									
89129	80	Ss-088	Q>LA>>Il>C>Ch	92	36	D	D									
89132	84	An-033	HA, T>>E, Or>Hb>M	576	114	P-D	D									

2. 代表的なひび割れ状況

本報告書では、暴露供試体のひび割れ状況について、角部限定ひび割れ (c1) から、マップ状ひび割れ (c3) の3つに分類して報告した。しかし、同一の状況に分類される場合でも、供試体によって、ひび割れの程度に大きな差があると感じられる場合もあった。

第I部中では、その違いを表現する手法として、最大ひび割れ幅を用いた箇所もある。しかし、ASRが生じた供試体には多数のひび割れが複雑に入っている場合もあり、最大ひび割れ幅を正確に把握することも必ずしも容易ではなかった。また、ひび割れ幅は、局所的に増減していること、供試体表面では開口しているが、ひび割れ深さは小さいものがほとんどであることなど、供試体全体の評価に用いるには限界もあると考えられる。

そこで資料として、特にアルカリ量 3kg/m^3 でもひび割れが生じた代表的骨材について、作成したひび割れ図を示した。以下に、各骨材について簡単な説明を加える。

82033 : アルカリ量 3kg/m^3 でもひび割れが生じた事例のうち唯一の堆積岩 (砂岩) なので、例として示した。

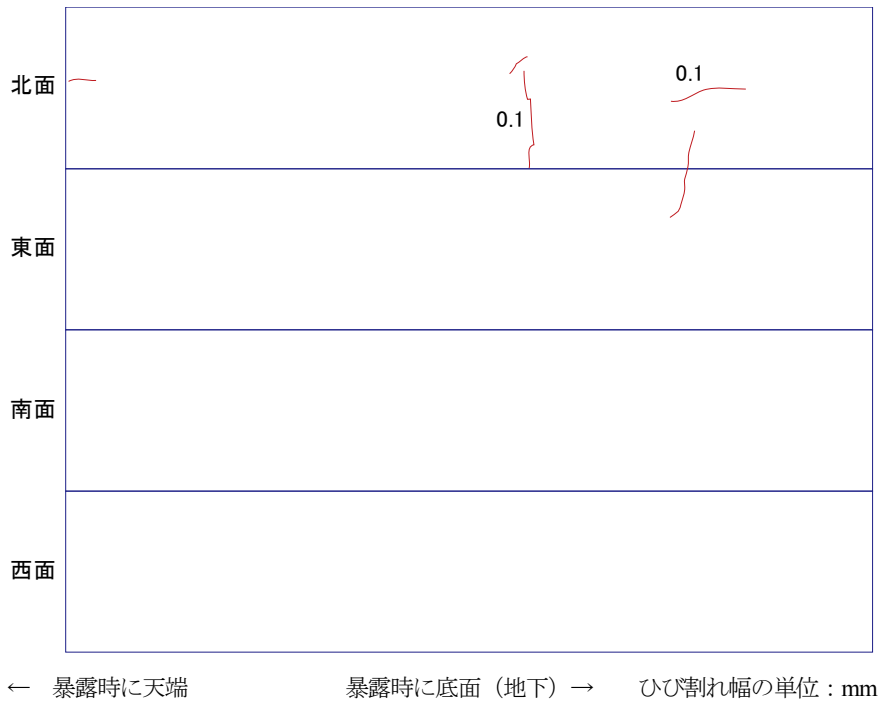
82078 : アルカリ量 3kg/m^3 と 5kg/m^3 でほとんどひび割れ状況が変わらない骨材の例として示した。ただし、ひび割れの程度は、他の骨材と比較して軽微であった。

82183 : アルカリ量 3kg/m^3 と 5kg/m^3 で、最大ひび割れ幅が逆転しているため、ひび割れ状況を示した。しかし、ひび割れ幅最大の位置は限定的であり、アルカリ量の違いによってひび割れの程度に違いがあるとは言えなかった。

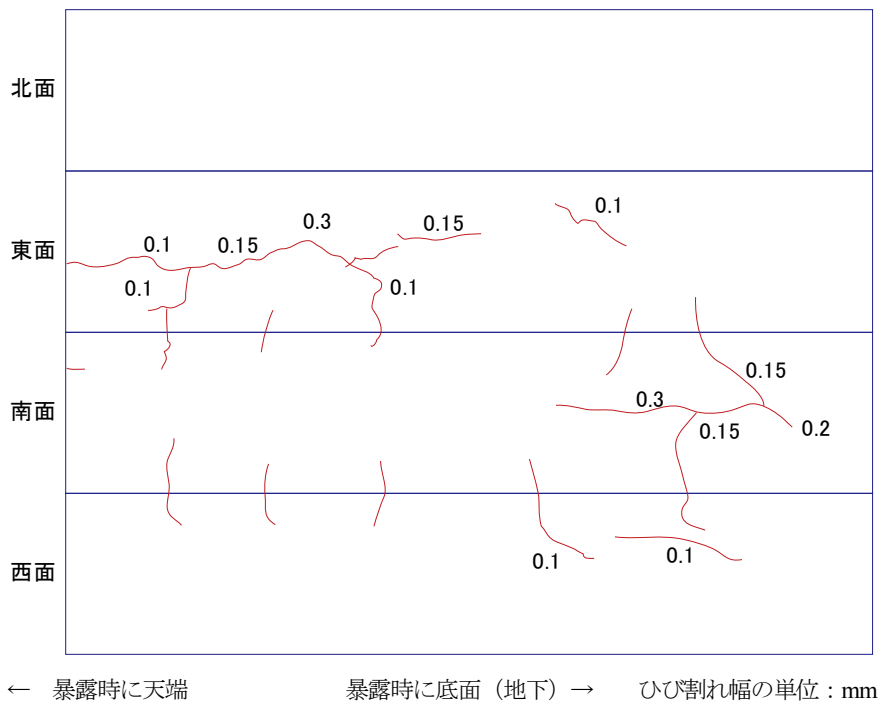
82197 : アルカリ量 3kg/m^3 の供試体 3B は、第I部中で写真等を例示したものである。アルカリ量の違いによってひび割れ状況に違いがあった。

87T15 : アルカリ量 3kg/m^3 の供試体でも、ひび割れ状況 c3 と判定した事例である。しかし、ひび割れの本数や範囲は、アルカリ量 5kg/m^3 の供試体と比較すると少なかった。

89093 : アルカリ量 3kg/m^3 の供試体 3B は、最大ひび割れ幅 0.4mm で、アルカリ量 3kg/m^3 でも生じたひび割れとしては最も顕著なものであった。また、アルカリ量 5kg/m^3 の供試体 5A は、最大ひび割れ幅 0.5mm と、最大ひび割れ幅で評価するとその差はわずかである。しかし、ひび割れの本数やひび割れが入っている範囲には顕著な違いがあった。

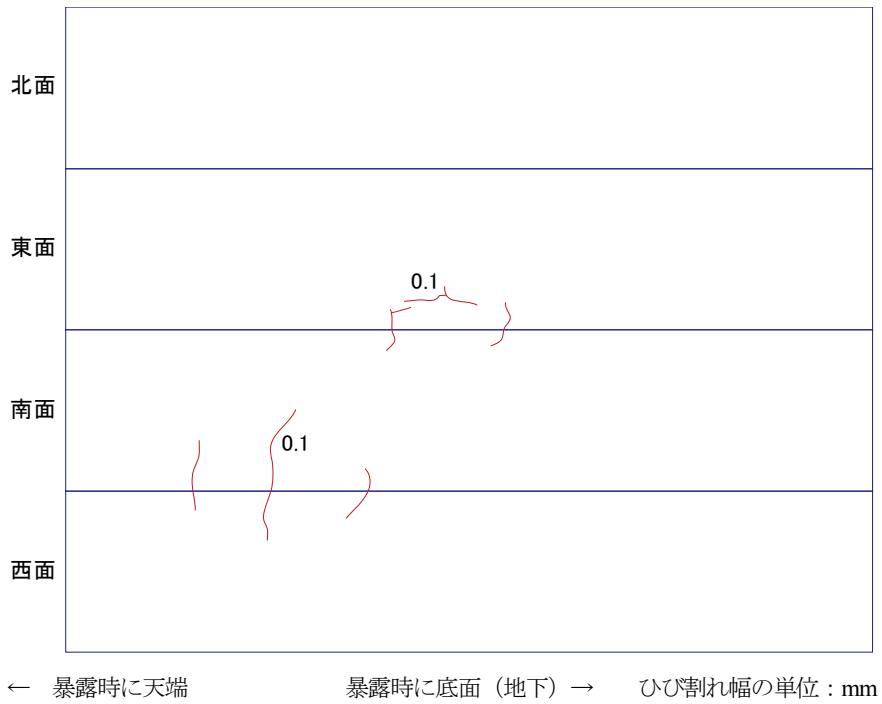


82033 3B ひび割れ状況 c2

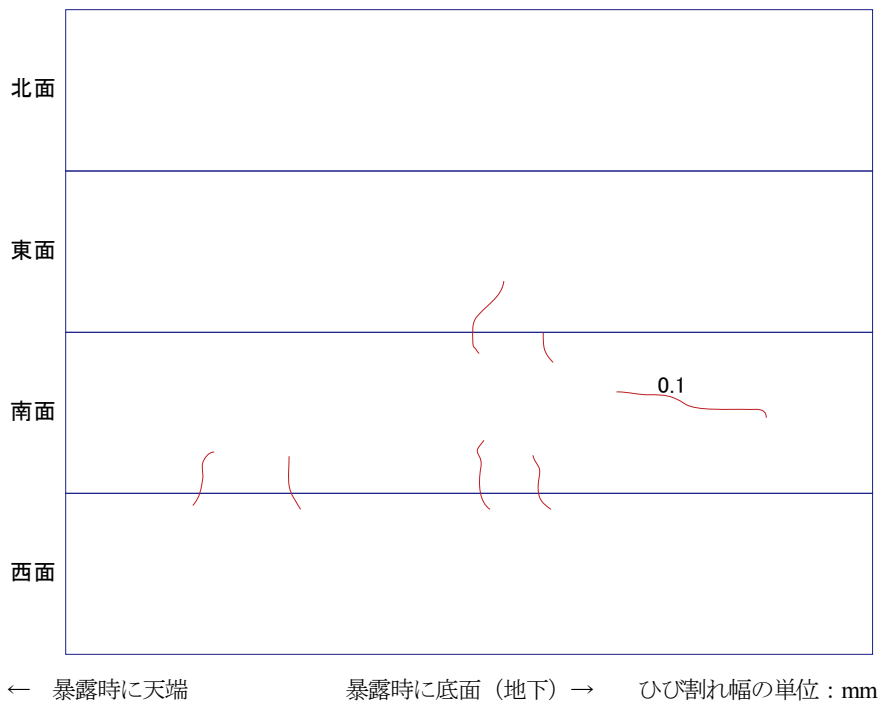


82033 5B ひび割れ状況 c3

付図-2.1 ひび割れ状況の例 (82033)

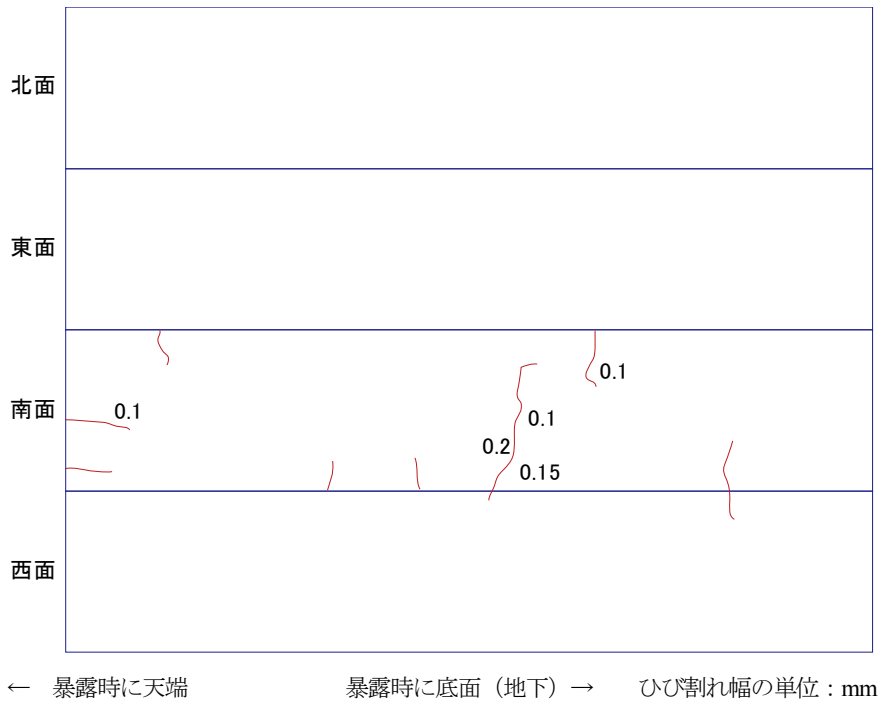


82078 3A ひび割れ状況 c2

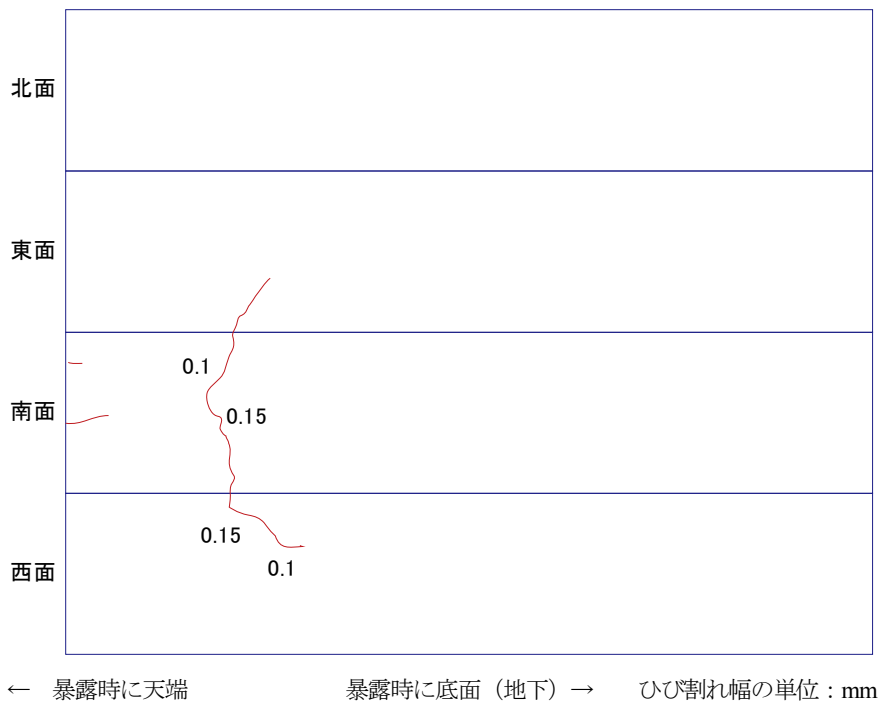


82078 5B ひび割れ状況 c3

付図-2.2 ひび割れ状況の例 (82078)

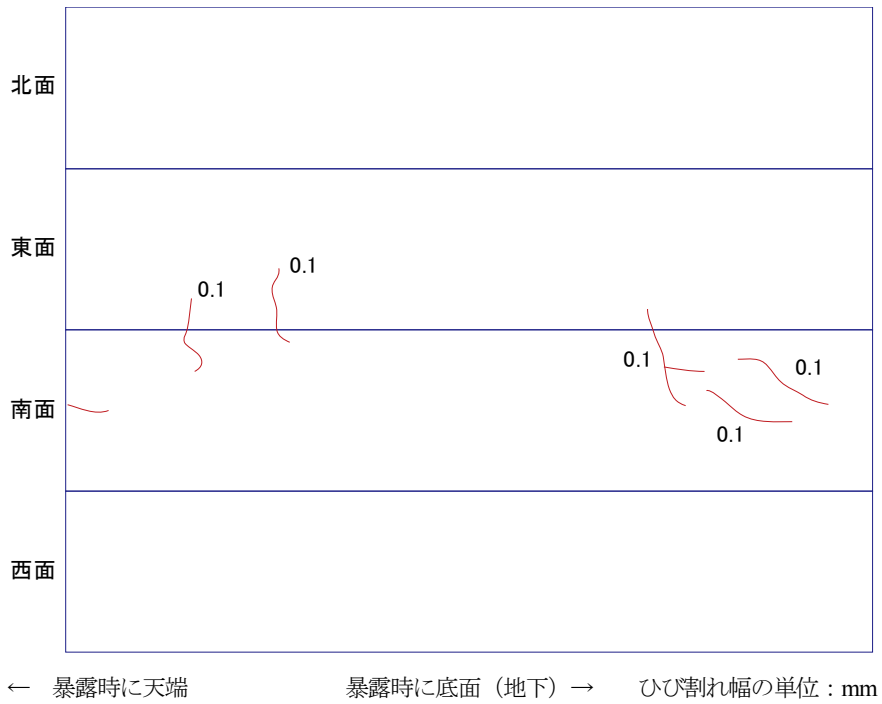


82183 3B ひび割れ状況 c2

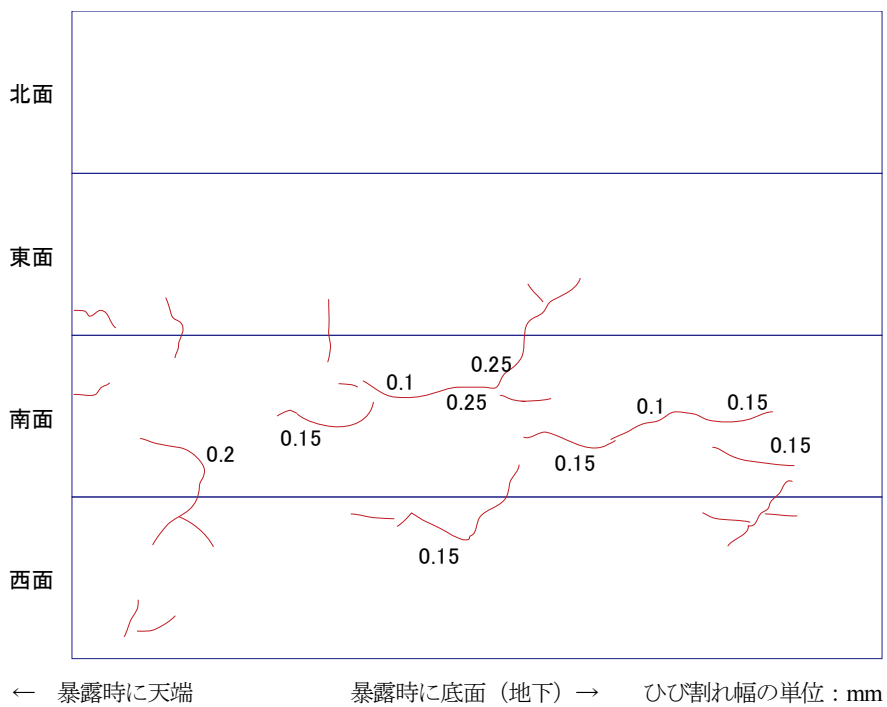


82183 5B ひび割れ状況 c3

付図-2.3 ひび割れ状況の例 (82183)

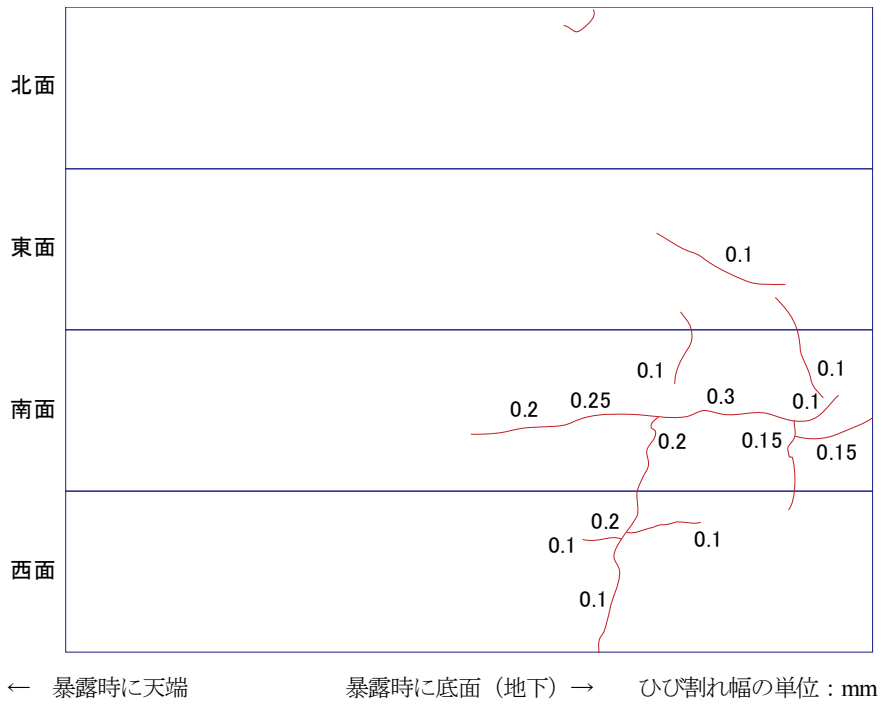


82197 3B ひび割れ状況 c2

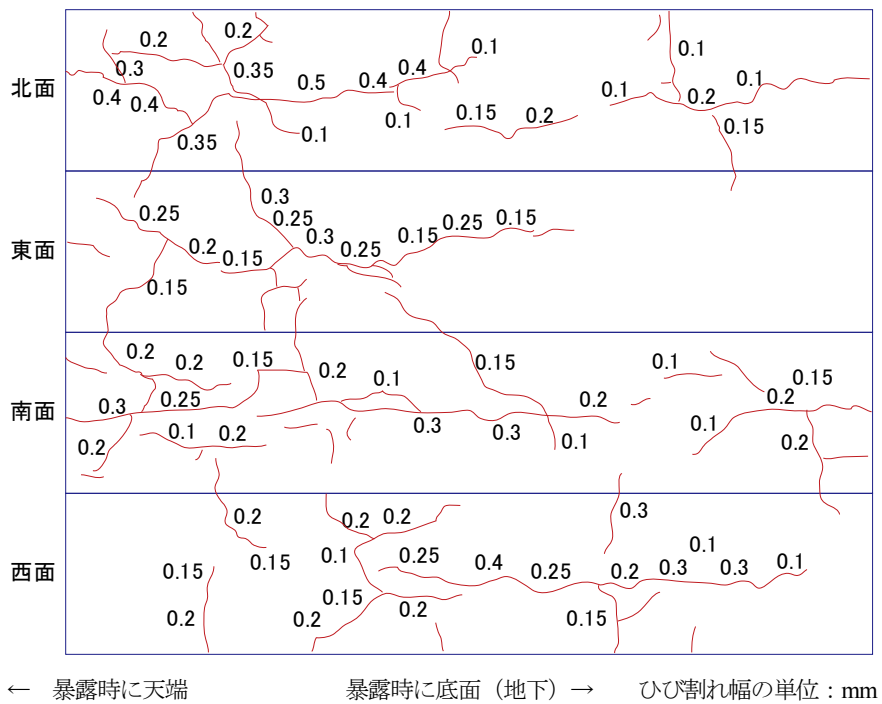


82197 5B ひび割れ状況 c3

付図-2.4 ひび割れ状況の例 (82197)

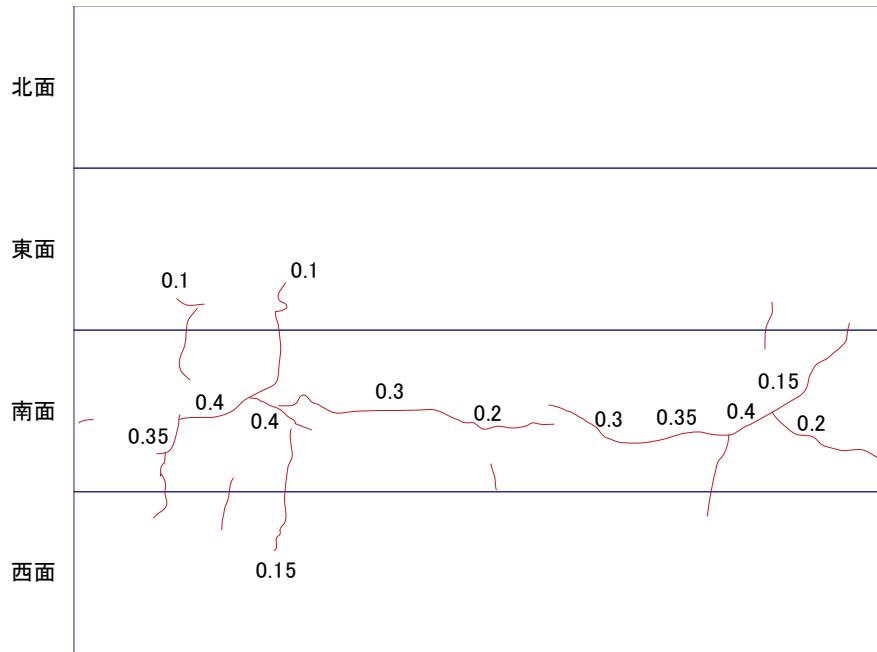


87T15 3B ひび割れ状況 c2



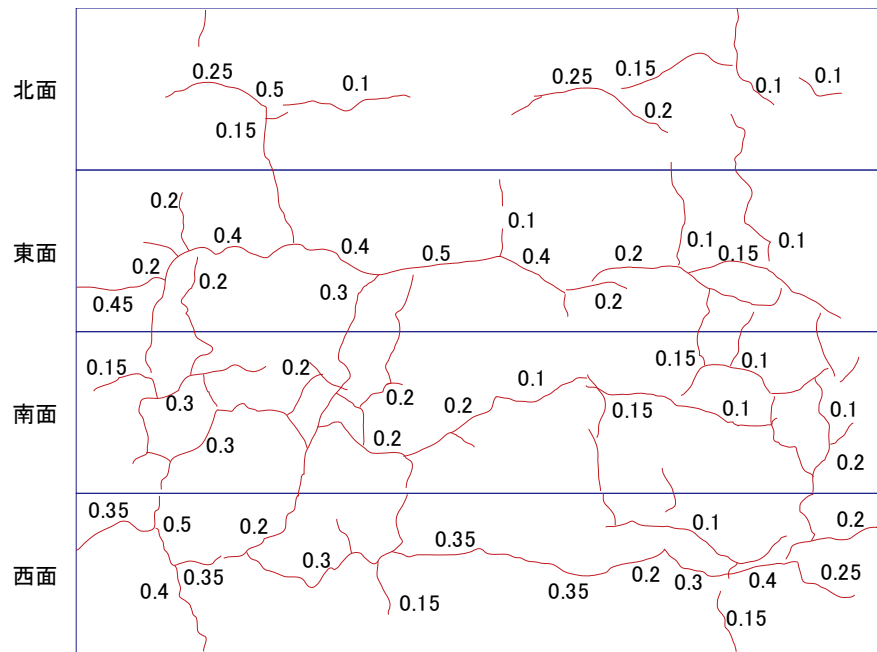
87T15 5A ひび割れ状況 c3

付図-2.5 ひび割れ状況の例 (87T15)



← 暴露時に天端 暴露時に底面（地下） →

89093 3B ひび割れ状況 c3



← 暴露時に天端 暴露時に底面（地下） →

89093 5A ひび割れ状況 c3

※ひび割れ幅の単位は mm

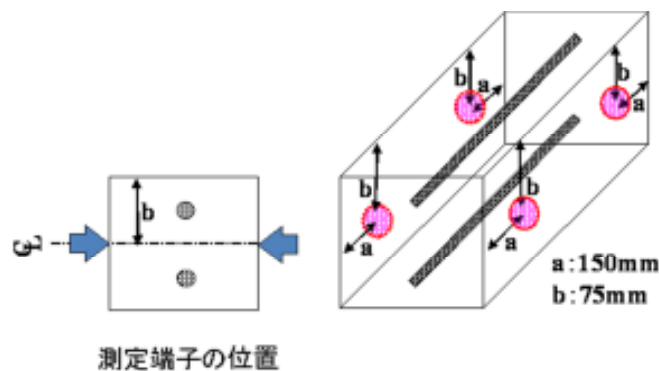
付図-2.6 ひび割れ状況の例 (89093)

3. 超音波伝播速度測定結果

暴露供試体の超音波伝播速度を測定した結果を示す。なお、測定位置は、下図に示すように、供試体の天端から 150mm または、下端から 150mm の位置である。

次ページ以降に測定結果を示す。

超音波伝播速度の値そのものは、使用骨材による違いが大きかった。このため、伝播速度の絶対値から評価を行うことは断念した。



付図-3.1 超音波伝播速度の測定位置

付表-3.1 超音波伝播速度測定結果 (1/3)

記号	ひび割れ状況				超音波伝播速度(m/sec)							
					上面側より150mm				下面側より150mm			
	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B
82003					4176	4278	4011	4129	4307	4215	4205	4222
82011					3926	3977	3815	4174	4109	4131	3952	4294
82015					4112	3768	4106	4111	4316	3958	4265	4255
82028					4480	4235	4295	4220	4434	4532	4433	4382
82031	c1	c1	c2	c3	4261	4322	4216	4051	4443	4529	4215	4185
82032			c3	c2	4853	4856	4512	4856	5062	5025	4633	4645
82033	c1	c2	c3	c3	4386	4576	4313	4428	4608	4592	4413	4375
82054					4213	4254	4213	4225	4374	4427	4397	4326
82068			c3	c2	4496	4666	4231	4157	4698	4725	4257	4237
82077			c3	c3	4451	4407	4459	4402	4593	4643	4399	4374

(前ページから続き, 2/3)

記号	ひび割れ状況				超音波伝播速度(m/sec)							
					上面側より150mm				下面側より150mm			
	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B
82078	c2	c1	c1	c2	4384	4420	4360	4413	4653	4499	4618	4471
82119			c2	c2	4425	4493	4369	4377	4669	4544	4375	4370
82127	c2	c1	c2	c1	4768	4693	4702	4814	4793	4790	4555	4549
82150			c1	c2	4309	4369	4326	4423	4619	4448	4494	4520
82164					4461	4539	4311	4450	4581	4575	4585	4556
82165					4430	4394	4476	4380	4440	4455	4413	4578
82179			c3	c3	4280	4155	4215	4137	4447	4533	4435	4434
82181			c1	c2	4280	4345	4343	4345	4454	4568	4454	4575
82183	c1	c2	c1	c2	4060	4028	4065	4070	4099	4214	4235	4236
82197	c1	c2	c2	c3	4418	4396	4376	4405	4573	4477	4411	4510
82227	c1	c1	c3	c2	4255	4258	4228	4314	4495	4519	4366	4272
82228	c1	c2	c3	c3	4017	4045	4271	3994	4075	4299	3869	4028
82233	c1	c1	c3	c3	4405	4332	4187	4105	4514	4510	4374	4579
82298					4307	4291	4191	4260	4558	4489	4359	4332
82302					4383	4282	4203	4209	4389	4442	4398	4369
82341			c2	c1	4682	4813	4802	4698	4929	4803	4578	4867
82347			c2	c3	4426	4349	4424	4363	4594	4559	4508	4549
82369			c3	c3	4537	4516	4208	4391	4569	4553	4425	4511
82392			c1	c2	4672	4676	4744	4676	4841	4821	4761	4541
82408			c1	c1	4018	3957	4042	4137	4207	4236	4202	4417
83N03	c1	c1	c3	c3	4707	4804	4457	4628	4998	4913	4590	4468
85S11					4209	4238	4235	4239	4391	4370	4448	4332
85S36			c2	c2	4285	4446	4397	4372	4555	4607	4457	4531
86014					4114	4161	4287	4230	4522	4475	4532	4472
86019					4281	4527	4506	4532	4532	4516	4640	4509
86026					4233	4240	4389	4221	4514	4624	4435	4418
86027					4697	4674	4735	4697	4891	4979	4814	4915
86031					4516	4603	4605	4547	4678	4699	4847	4637
86036			c2	c3	4695	4766	4663	4519	4860	4857	4548	4554
86052					4438	4537	4551	4506	4582	4681	4611	4541
86056					4689	4657	4596	4658	4759	4723	4779	4866
86058					4594	4620	4518	4503	4745	4668	4556	4661
86065					4739	4728	4804	4683	4703	4799	4832	4742
86066					4567	4399	4493	4459	4571	4642	4586	4450
86086					4592	4652	4875	4764	4705	4863	4897	4967
86100					4436	4450	4268	4408	4654	4638	4520	4581
87H37					4983	4364	4370	4452	5313	4535	4543	4592
87H39					4341	4510	4415	4449	4522	4526	4603	4579
87H58			c2	c2	4151	4265	4301	4324	4505	4532	4496	4487
87S14					4434	4437	4455	4456	4659	4631	4726	4653
87S24			c2	c3	4160	4133	4006	3827	4432	4491	4418	4329
87S30					4368	4404	4377	4514	4624	4643	4645	4607

(前ページから続き, 3/3)

記号	ひび割れ状況				超音波伝播速度(m/sec)							
					上面側より150mm				下面側より150mm			
	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B	3A	3B	5A	5B
87S32					4665	4550	4666	4636	4769	4581	4693	4707
87S35					4369	4356	4424	4329	4535	4534	4534	4532
87T04			c2	c3	4438	4498	4385	4404	4544	4604	4419	4379
87T15	c3	c3	c3	c3	4416	4471	4183	4148	4319	4359	4284	4441
87T17					4449	4501	4492	4288	4650	4651	4585	4531
87Y19			c2	c2	4631	4412	4498	4344	4691	4767	4509	4518
87Y27					4257	4379	4251	4242	4368	4429	4326	4411
87Y34					4269	4441	4293	4292	4466	4496	4487	4464
87Y43					4405	4398	4268	4370	4526	4471	4555	4416
87O10					4544	4384	4354	4370	4648	4624	4462	4457
87O16			c2	c3	4644	4636	4546	4522	4872	4843	4744	4641
87O40					4602	4445	4388	4327	4656	4674	4640	4575
87O42					4565	4671	4582	4489	4672	4752	4669	4700
88003	c2	c2	c2	c2	4754	4728	4575	4613	4949	5036	4773	4730
88007	c2	c1	c3	c3	4799	4769	4480	4238	4889	4956	4696	4616
88010					4526	4537	4568	4532	4739	4785	4722	4655
88011			c3	c3	4562	4494	4390	4279	4929	4902	4760	4643
88012					4186	4288	4436	4421	4419	4470	4683	4601
88039			NA	NA	4767	4816	NA	NA	4972	4973	NA	NA
88046					4238	4263	3935	4221	4325	4431	4259	4362
88049					4227	3820	4001	3984	4381	4180	4305	4281
88091					4091	4319	4306	4294	4512	4449	4506	4502
89014					4088	4106	4327	4259	4430	4389	4502	4426
89030					3983	3946	3960	4087	4139	4105	4208	4135
89031					4196	4177	4196	4164	4383	4448	4400	4351
89040					4281	4361	4289	4259	4463	4517	4531	4486
89053					4557	4470	4477	4423	4730	4620	4695	4635
89064					4493	4454	4290	4463	4747	4678	4506	4695
89068					4126	4141	4117	4267	4277	4311	4418	4262
89069					4387	4297	4337	4141	4537	4454	4436	4426
89072					4627	4468	4566	4349	4611	4743	4778	4765
89074			c3	c3	4377	4550	4093	4108	4600	4611	4284	4254
89075			c3	c3	4524	4521	4337	4312	4617	4201	4372	4581
89079					4376	4298	4390	4485	4675	4762	4575	4798
89086			c3	c2	4383	4391	4163	4302	4597	4637	4396	4408
89088					4585	4450	4484	4311	4642	4607	4727	4628
89093	c3	c3	c3	c3	4414	4312	3853	3980	4493	4433	4137	4126
89096			c2	c3	4436	4396	4397	4294	4602	4623	4457	4431
89097					4257	4240	4172	4150	4323	4419	4365	4410
89122					4060	4208	4330	4240	4430	4420	4355	4462
89129					4015	4491	3925	4171	4234	4619	4246	4055
89132					4317	4279	4388	4257	4494	4432	4522	4469

4. 骨材の岩石学的調査結果

ASR が生じたおそれのある供試体の一部で、岩石学的調査を実施した。その目的は、使用されている骨材の岩種を確認することと、供試体表面に生じたひび割れが、ASR によるものであることを確認することである。アルカリ量 3kg/m^3 でも ASR によると見られるひび割れが生じたものを中心に、診断を確定させるために行った。対象とした供試体を以下に示す。

(1)	87T15	3A	ひび割れ状況 c3	進行状況 k4
(2)	89093	3A	ひび割れ状況 c3	進行状況 k4
(3)	82033	3B	ひび割れ状況 c2	進行状況 k3
(4)	82127	3A	ひび割れ状況 c2	進行状況 k2
(5)	88003	3A	ひび割れ状況 c2	進行状況 k2
(6)	82228	3A	ひび割れ状況 c1	進行状況 k2
(7)	87T04	3A	ひび割れ 無し	進行状況 k2
(8)	89096	3A	ひび割れ 無し	進行状況 k2
(9)	82181	3A	ひび割れ 無し	進行状況 k1

岩石学的調査は、アルカリシリカ反応が生じたコンクリートの調査に通じたコンサルタントが行った。その際、調査者には骨材の産地やコンクリートの配合等に関する情報は提供せず、試料のみからの調査を依頼した。

暴露供試体における ASR の程度を例示するため、次ページ以降に調査結果の抜粋を示す。

(1) 87T15 3A

付表-4.1.1 粗骨材岩種の構成割合 (87T15 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
安山岩 1	46	斑状組織を示す。色調は明灰色ないし桃灰色。明瞭な反応リム、ASR ゲルの滲出、明瞭な割れを伴う顕著な ASR を生じている粒子が、多数存在する。
安山岩 2	31	斑状組織を示す。色調は暗灰色。ASR ゲルの滲出、微細な割れを伴う比較的軽微な ASR を生じている粒子が、少数存在する。
泥質片岩	20	泥質岩起源の変成岩。黒雲母を多く含み、明瞭な片理を持つ。色調は紫灰色ないし紫黒色、暗灰色。ASR を生じている粒子は認められない。
斑れい岩	3	苦鉄質組成の深成岩。中粒。色調は中色質。ASR を生じている粒子は認められない。
流紋岩	tr	斑状組織を示す。色調は灰色。ASR を生じている粒子は認められない。

tr ; trace amount(微量)

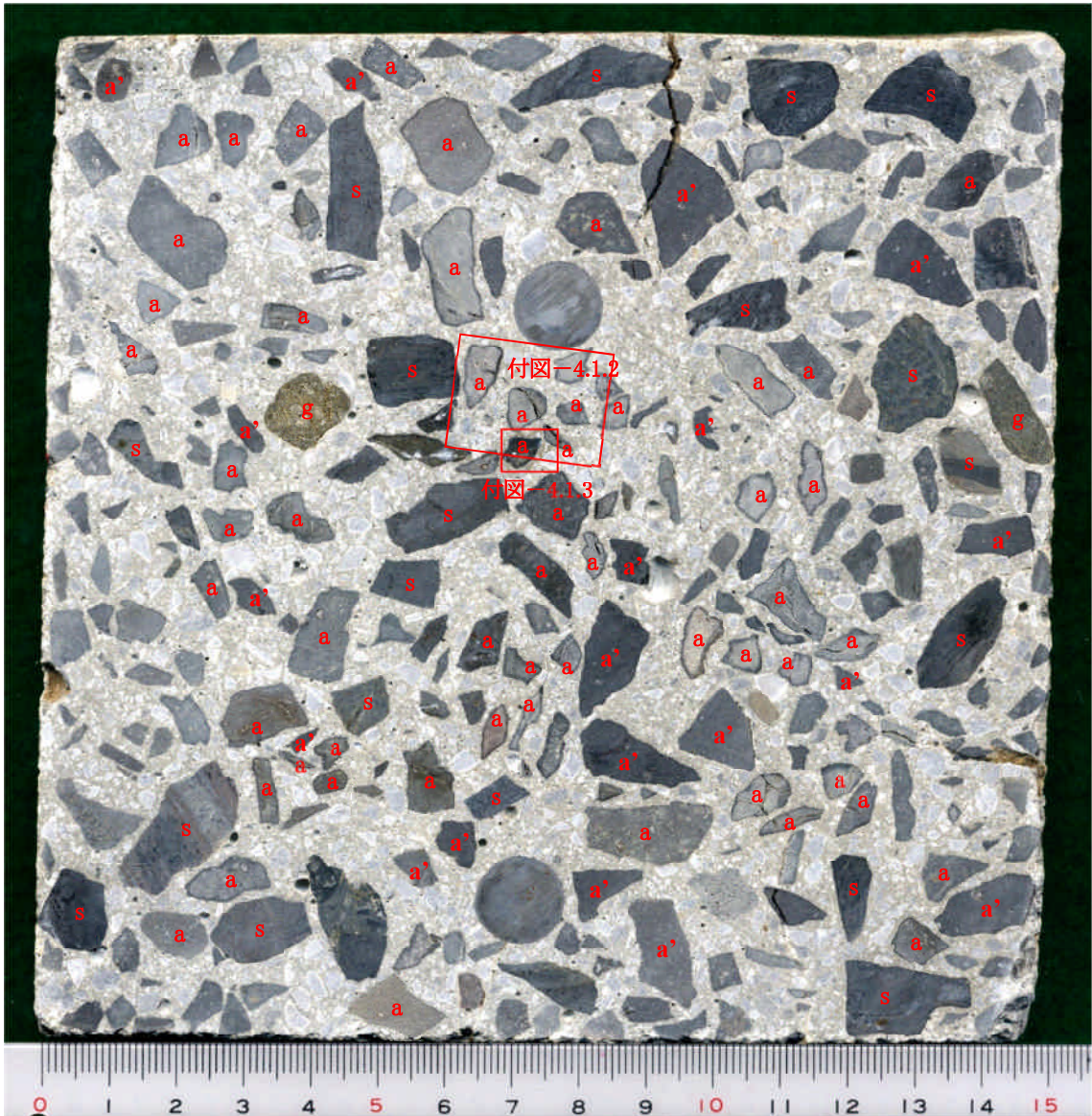
付表-4.1.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (87T15 3A)

項目 岩石名	構成鉱物													
	ASR 反応性鉱物			石英 (粗粒・細粒)	斜長石	黒雲母	白雲母	単斜輝石	斜方輝石	かんらん石	堇青石	電気石	アパタイト	鉄チタン鉱物 不透明鉱物
	クリストバライト	ガラス	隠微晶質石英											
安山岩 1	○	△	—	t r	◎	t r	—	○	○	t r	—	—	—	△
安山岩 2	—	◎	—	t r	◎	—	—	○	○	—	—	—	—	△
泥質片岩	—	—	○	◎	○	○	△	—	—	—	t r	t r	t r	△

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr 微量 —確認されない

付表-4.1.3 ASR の程度 (87T15 3A)

	反応の程度→			
	潜在的	軽微	中程度	顕著
	反応リム ゲル/ゲル滲出	骨材粒子内のゲル に充填されたひび 割れ形成	セメントペーストへのゲル に充填されたひび 割れ進展	ゲルのセメントペースト中 の気泡充填
安山岩 1	*****	*****	*****	***
安山岩 2	*****	***	*	
泥質片岩				

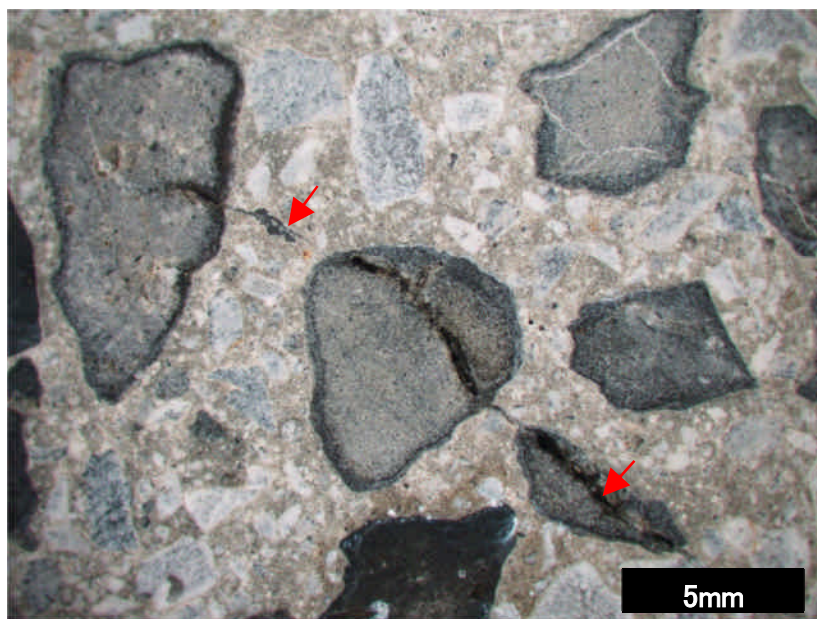


付図-4.1.1 供試体切断面 (87T15 3A)

※ スケールの単位は cm。

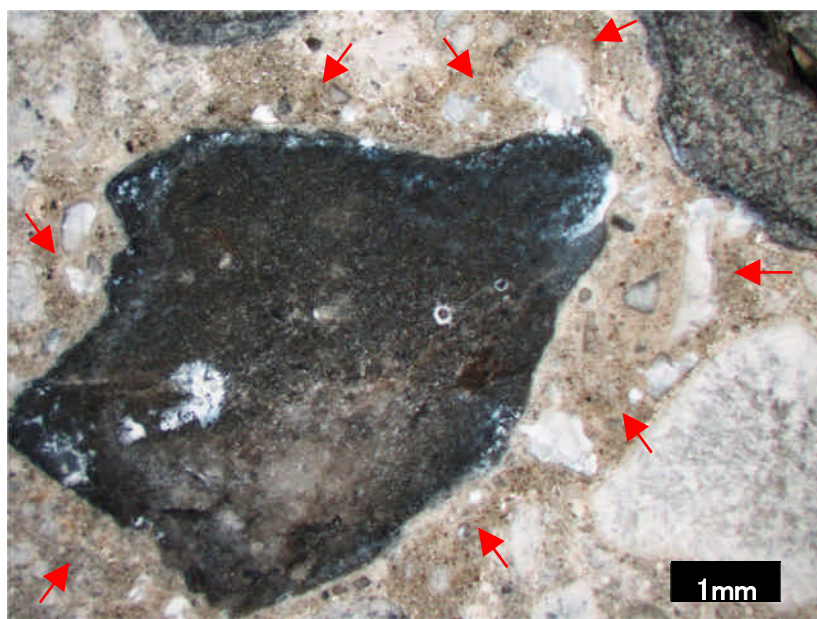
粗骨材

- a : 安山岩 1
- a' : 安山岩 2
- s : 泥質片岩
- g : 斑れい岩



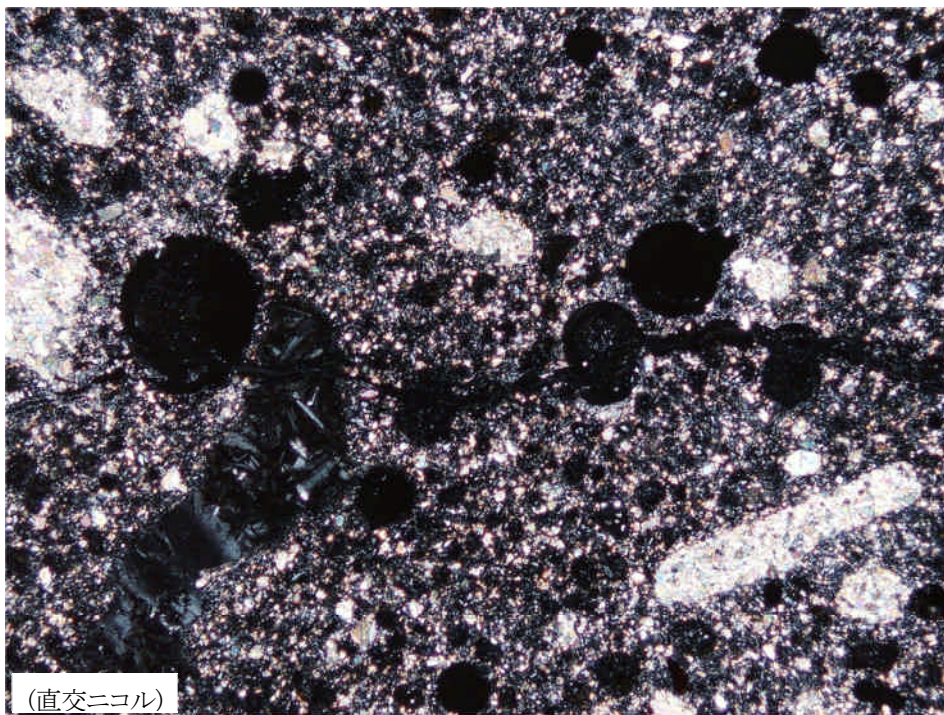
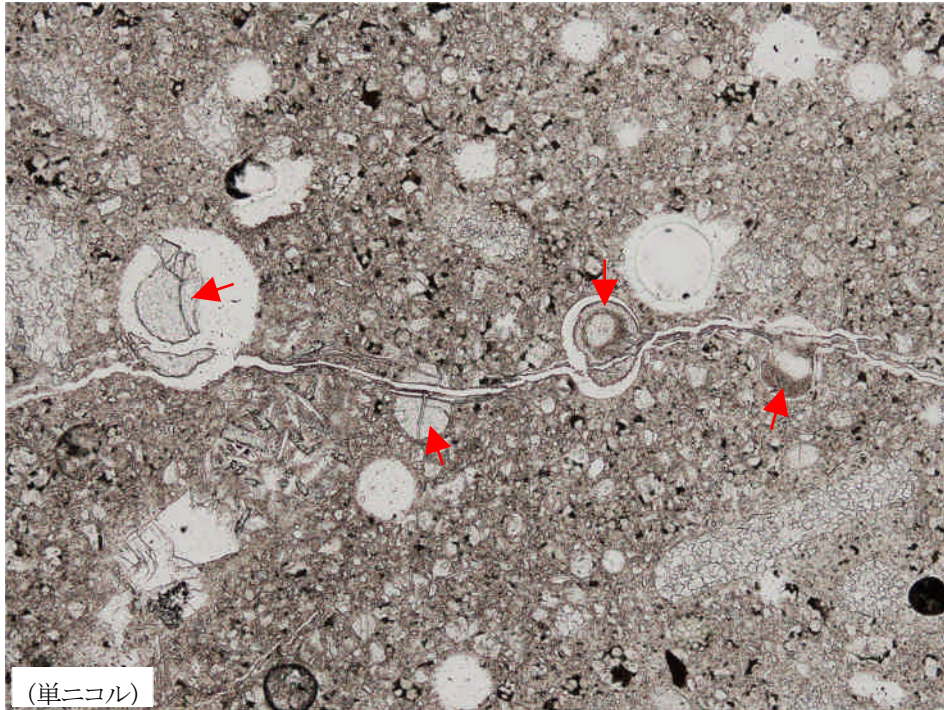
安山岩 1 の反応リムおよび、セメントペーストを介して複数の反応性骨材粒子を貫き繋ぐひび割れ(矢印)。

付図-4.1.2 供試体切断面拡大 (87T15 3A)

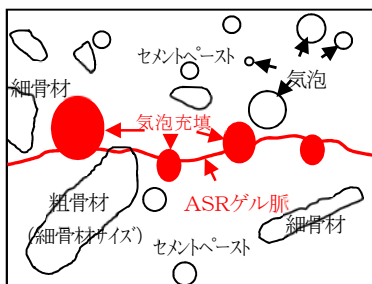


安山岩 1 から切断面に滲出した透明な ASR ゲル(矢印)。

付図-4.1.3 供試体切断面拡大 (87T15 3A)



0.5mm



モルタル部分の偏光顕微鏡写真。本供試体は試料間の比較で ASR の発生が最も顕著であり、ASR ゲルに充填されたひび割れ (ASR ゲル脈) が高密度に分布する。ASR ゲルのセメントペースト中の気泡への浸入あるいは充填も、しばしば観察される。

付図-4.1.4 偏光顕微鏡写真 (87T15 3A, モルタル部分)

(2) 89093 3A

付表-4.2.1 粗骨材岩種の構成割合 (89093 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
安山岩	100	斑状組織を示す。色調は灰色。反応リム、ASRゲルの滲出、微細な割れを伴うASRを生じている粒子が、多数存在する。

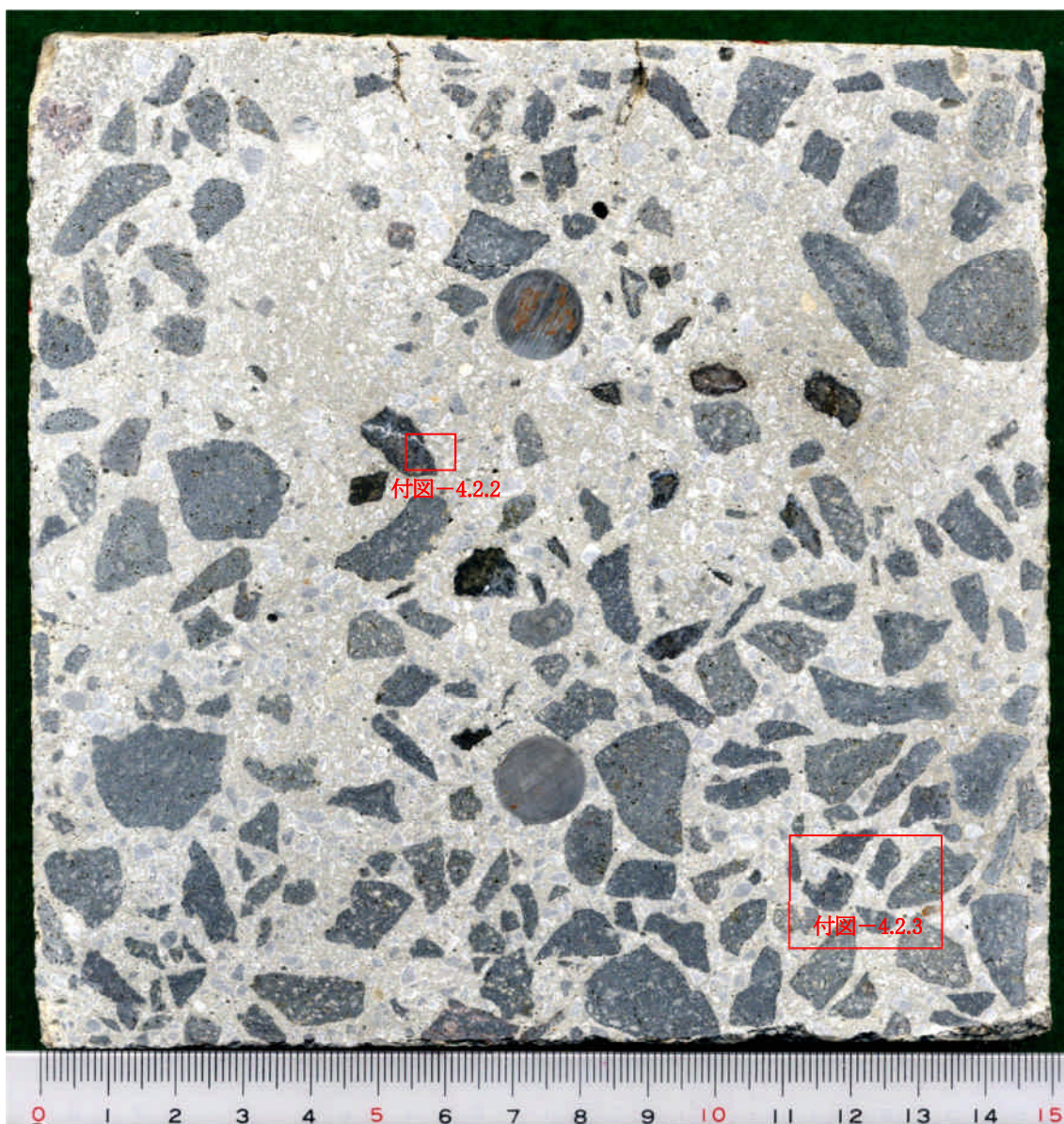
付表-4.2.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (89093 3A)

項目 岩石名	構成鉱物								
	ASR 反応性鉱物		石英	斜長石	黒雲母	単斜輝石	斜方輝石	アパタイト	鉄チタン 鉱物
	トリ ディ マイ ト	ガラ ス							
安山岩	◎	△	△	◎	tr	△	△	tr	△

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr微量 —確認されない

付表-4.2.3 ASR の程度 (89093 3A)

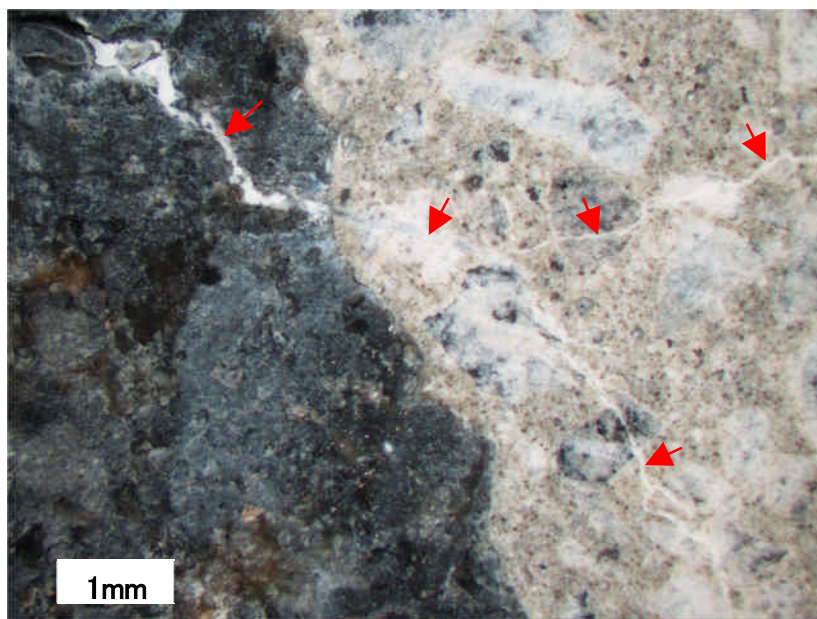
	反応の程度→			
	潜在的	軽微	中程度	顕著
	反応リム ゲル/ゲル滲出	骨材粒子内のゲル に充填されたひび 割れ形成	セメントペーストへのゲル に充填されたひび 割れ進展	ゲルのセメントペースト中 の気泡充填
安山岩	*****	*****	*****	*



付図-4.2.1 供試体切断面 (89093 3A)

※ スケールの単位は cm。

粗骨材：安山岩



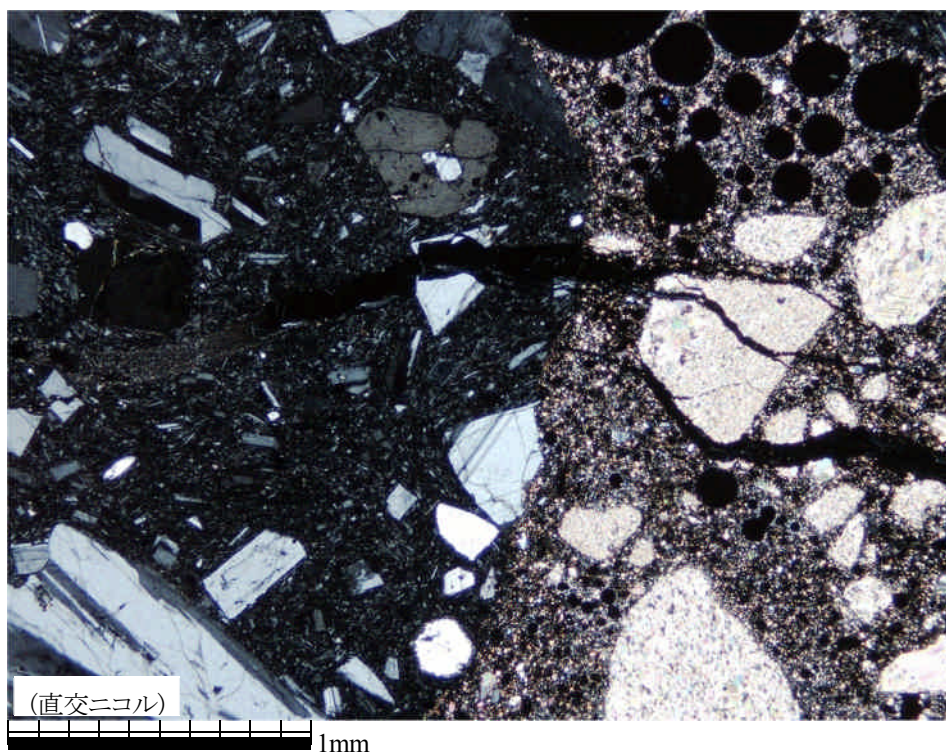
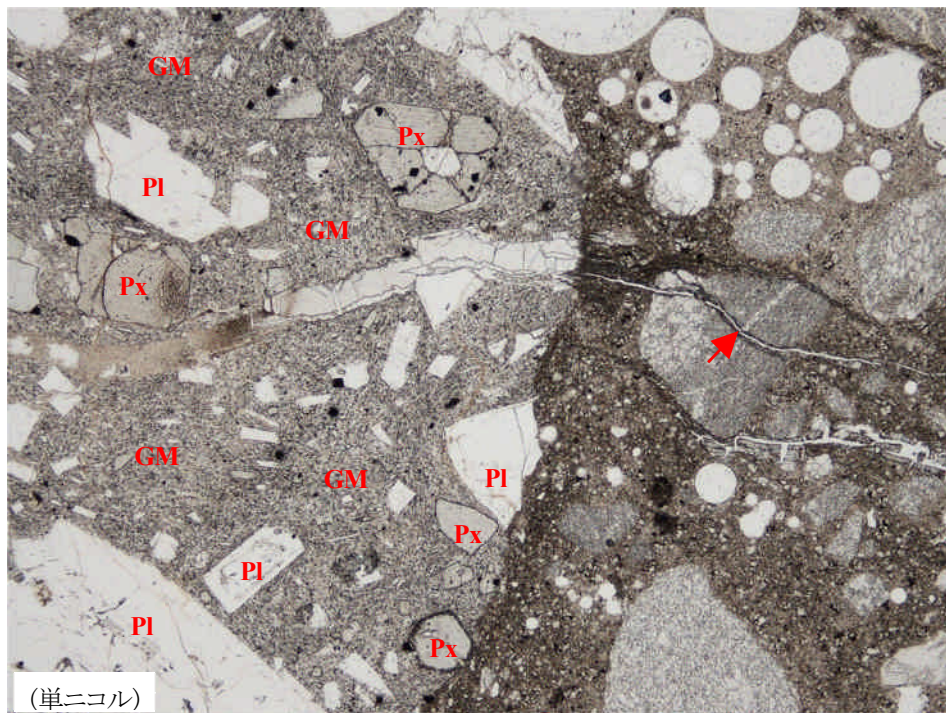
粗骨材粒子を貫き、セメントペーストへ進展した ASR ゲルに充填された微細なひび割れ (矢印)。

付図-4.2.2 供試体切断面拡大 (89093 3A)



供試体周縁部では、骨材粒子に認められる、ASR による変状は不明瞭となる。

付図-4.2.3 供試体切断面拡大 (89093 3A)



コンクリート薄片の偏光顕微鏡写真。ASR ゲルに充填されたひび割れ (ASR ゲル脈) が安山岩の粗骨材粒子を貫き、セメントペーストに進展している。安山岩は斜長石 (PI) や輝石 (Px; 斜方輝石と単斜輝石) などの斑晶と、その粒間の石基 (GM) から構成される。ASR ゲルを伴うひび割れは安山岩を出た所で、非反応性の細骨材粒子 (石灰岩) にも生じているように見える (矢印) が、ひび割れの延長にたまたまあったため、ついでに割れたものと考えられる。

付図-4.2.4 偏光顕微鏡写真 (89093 3A, 安山岩)

(3) 82033 3B

付表-4.3.1 粗骨材岩種の構成割合 (82033 3B)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
砂質片岩	94	中粒～細粒の砂質岩起源の変成岩。黒雲母の集合体を点紋状に含む。色調は灰～暗灰色、一部に灰褐色。ASRを生じている粒子がある。
泥質片岩	3	泥質岩起源の変成岩。色調は黒色。ASRを生じている粒子がある。
輝緑岩	2	苦鉄質組成の完晶質火成岩で、変質の著しい岩石。細粒。色調は灰緑色。ASRを生じている粒子は認められない。
安山岩	1	斑状組織を示す。色調は灰色。ASRを生じている粒子がある。

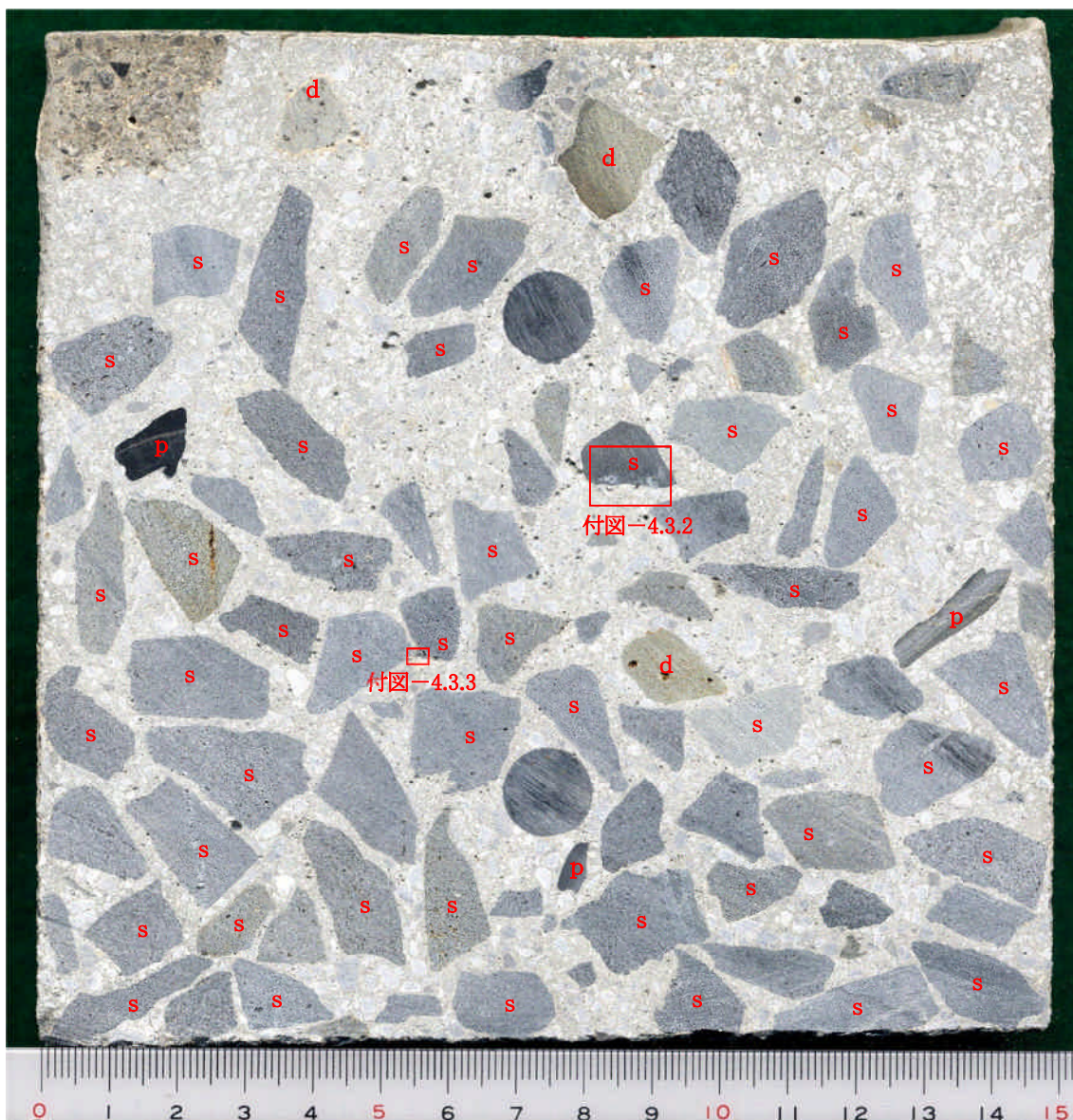
付表-4.3.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (82033 3B)

項目 岩石名	構成鉱物																	
	ASR 反応性鉱物			石英 (粗粒・細粒)	斜長石	白雲母	黒雲母	単斜輝石	斜方輝石	緑泥石	電気石	アパタイト	スフェーン	ジルコン	スピネル	方解石	スメクタイト	不透明鉱物
	隱微晶質石英	微晶質石英	クリストバライト															
砂質片岩	○	-	-	◎	○	○	△	-	-	t r	t r	t r	t r	t r	t r	t r	-	t r
泥質片岩	◎	-	-	◎	○	◎	△	-	-	○	t r	t r	t r	t r	-	-	-	○
輝緑岩	t r	-	-	△	○	◎	-	-	-	◎	-	t r	△	-	-	-	-	△
安山岩	-	○	t r	t r	◎	-	-	○	○	-	-	t r	-	-	-	-	△	△

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 t r微量 -確認されない

付表-4.3.3 ASR の程度 (82033 3B)

	反応の程度→			
	潜在的	軽微	中程度	顕著
	反応阻 ゲル/ゾル滲出	骨材粒子内のゲル に充填されたひび 割れ形成	セメントペーストへのゲル に充填されたひび 割れ進展	ゲルのセメントペースト中 の気泡充填
砂質片岩	*****	*****		
泥質片岩	*****	*****	***	
輝緑岩				
安山岩	*****	*****	***	



付図-4.3.1 供試体切断面 (82033 3B)

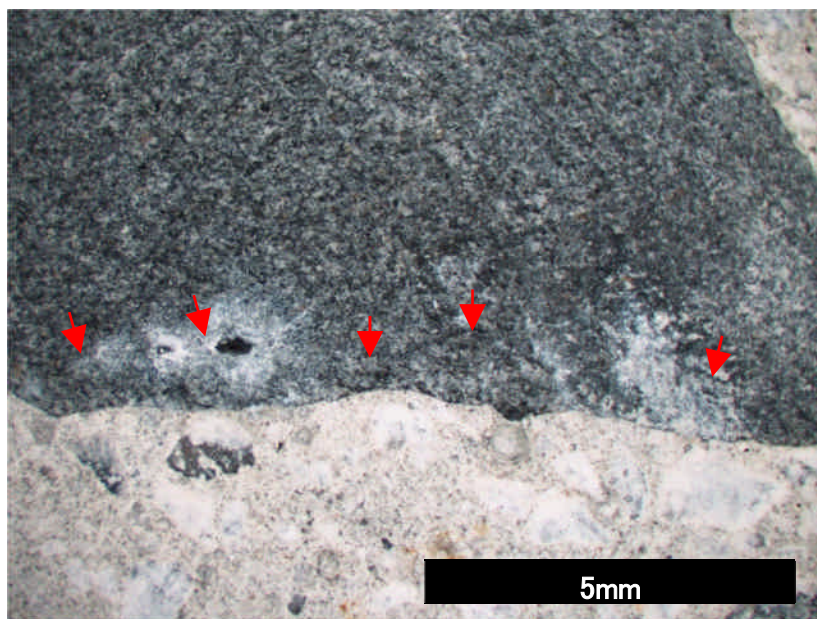
※ スケールの数字は cm。

粗骨材

s : 砂質片岩

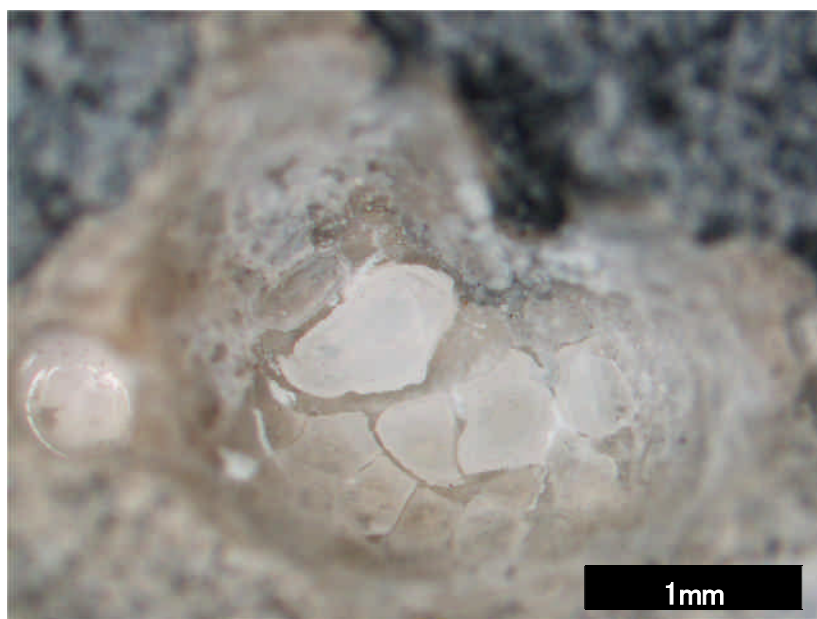
p : 泥質片岩

d : 輝緑岩



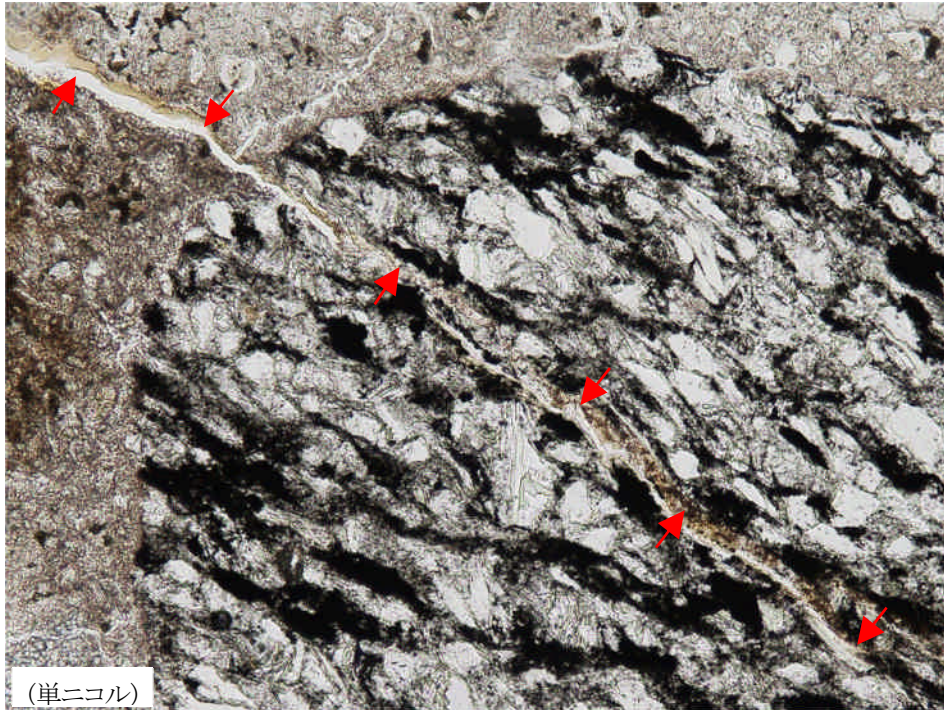
砂質片岩に生じた微細なひび割れ（矢印）と、ひび割れに沿って滲出した白色の ASR ゲル。

付図-4.3.2 供試体切断面拡大（82033 3B）

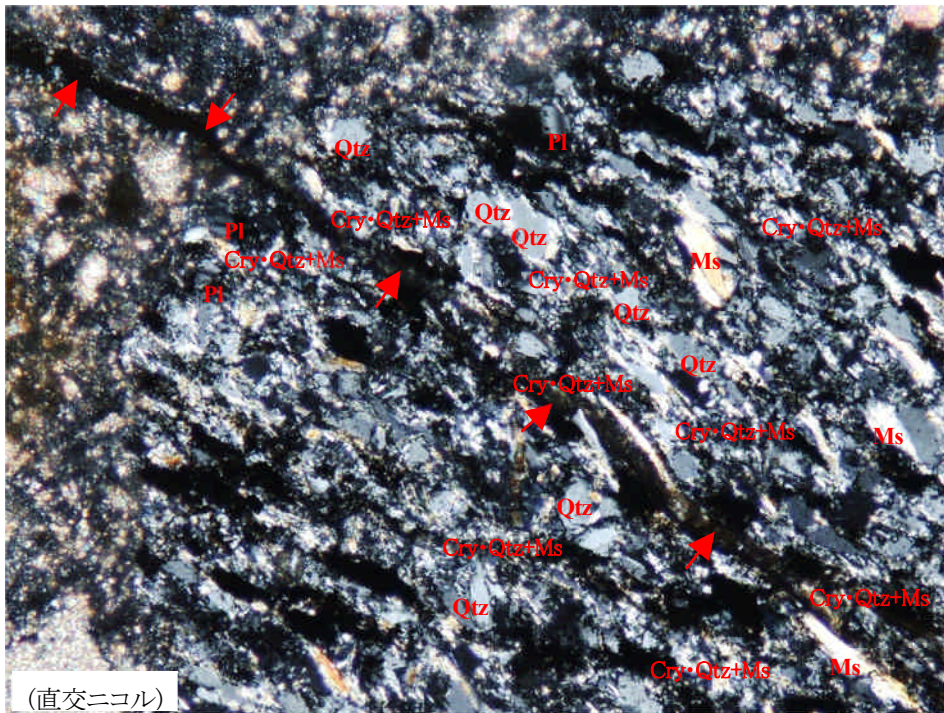


粗骨材粒子に接する気泡に浸入した ASR ゲル。気泡内への浸入は、粗骨材粒子に隣接する気泡に、ごくまれに見られる。

付図-4.3.3 供試体切断面拡大（82033 3B）

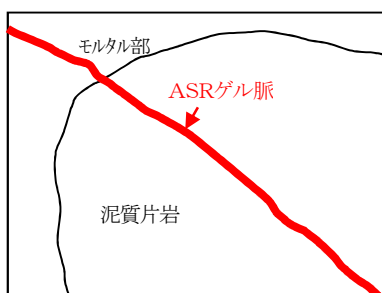


(単ニコル)



(直交ニコル)

0.1mm



コンクリート薄片の偏光顕微鏡写真。ASR ゲルに充填されたひび割れ (ASR ゲル脈; 矢印) が、泥質片岩の骨材粒子からセメントペースト (モルタル部) に進展している。泥質片岩は原岩 (泥岩・頁岩など) の砕屑粒子から残存するシルトサイズ以下の石英 (Qtz)・斜長石 (Pl)・白雲母 (Ms) など、変成作用などにより生成した隠微晶質ないし微晶質な石英 (Cry-Qtz)・白雲母 (Ms)・黒雲母などから構成される。

付図-4.3.4 偏光顕微鏡写真(82033 3B, 泥質片岩)

(4) 82127 3A

付表-4.4.1 粗骨材岩種の構成割合 (82127 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
苦鉄質片岩	100	苦鉄質岩起源の変成岩。色調は緑～濃緑色。弱い片理を持つが、火成岩組織の残存した部分も見られるなど、組織は不均質である。ASRを生じている粒子がある。

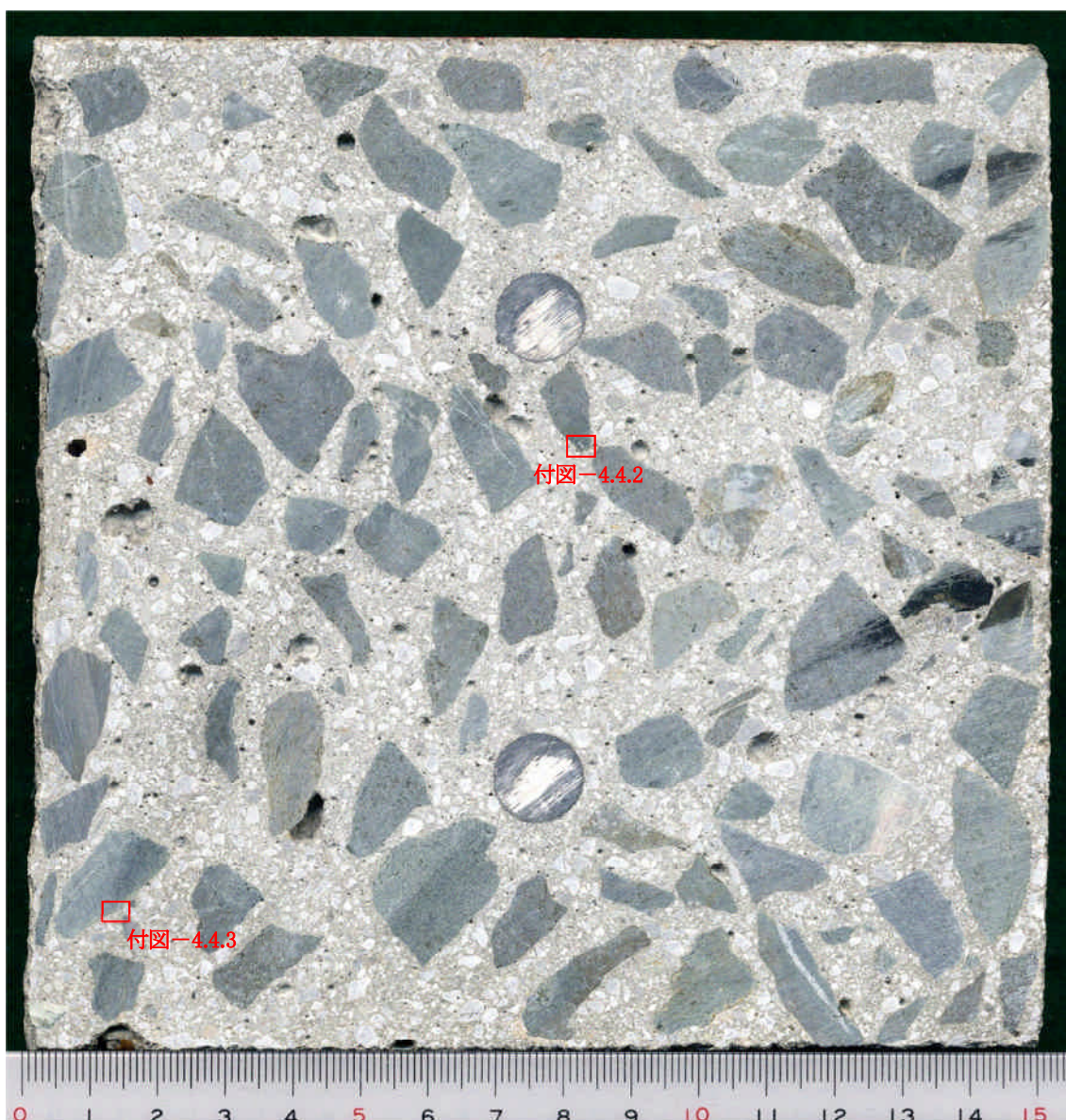
付表-4.4.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (82127 3A)

項目 岩石名	構成鉱物											
	ASR 反応性鉱物 隠微晶質石英 微晶質石英	石英 (粗粒～細粒)	斜長石	角閃石	黒雲母	緑れん石	緑泥石	電気石	アパタイト	スフェーン	方解石	不透明鉱物
苦鉄質片岩	△	△	◎	◎	○	△	t r	t r	t r	t r	t r	t r

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr微量 —確認されない

付表-4.4.3 ASR の程度 (82127 3A)

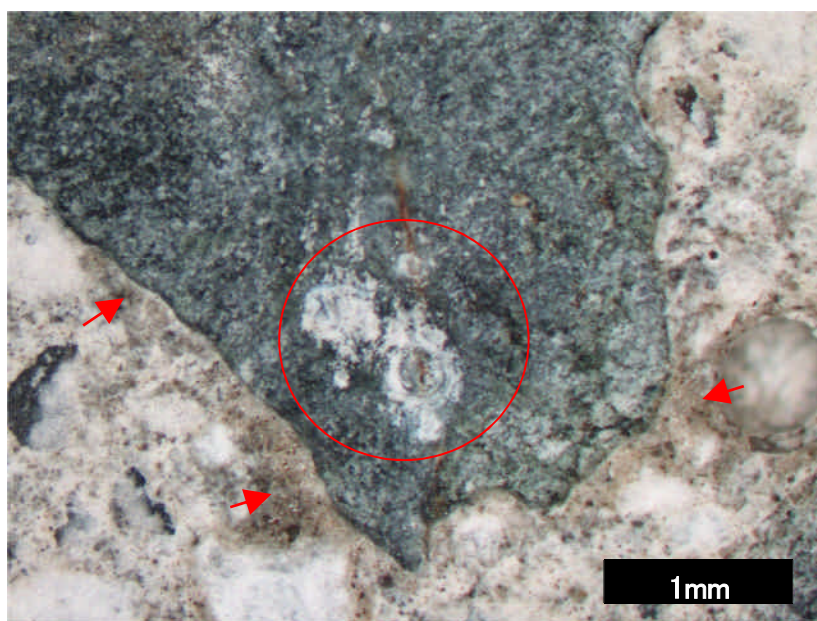
	反応の程度→			
	潜在的	軽微	中程度	顕著
反応による ゲル/ゲル滲出		骨材粒子内のゲルに充填されたひび割れ形成	セメントペーストへのゲルに充填されたひび割れ進展	ゲルのセメントペースト中の気泡充填
苦鉄質片岩	*****	**		



付図-4.4.1 供試体切断面 (82127 3A)

※ スケールの数字は cm。

粗骨材：苦鉄質片岩



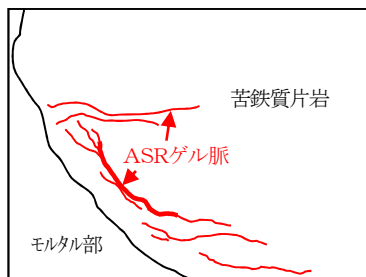
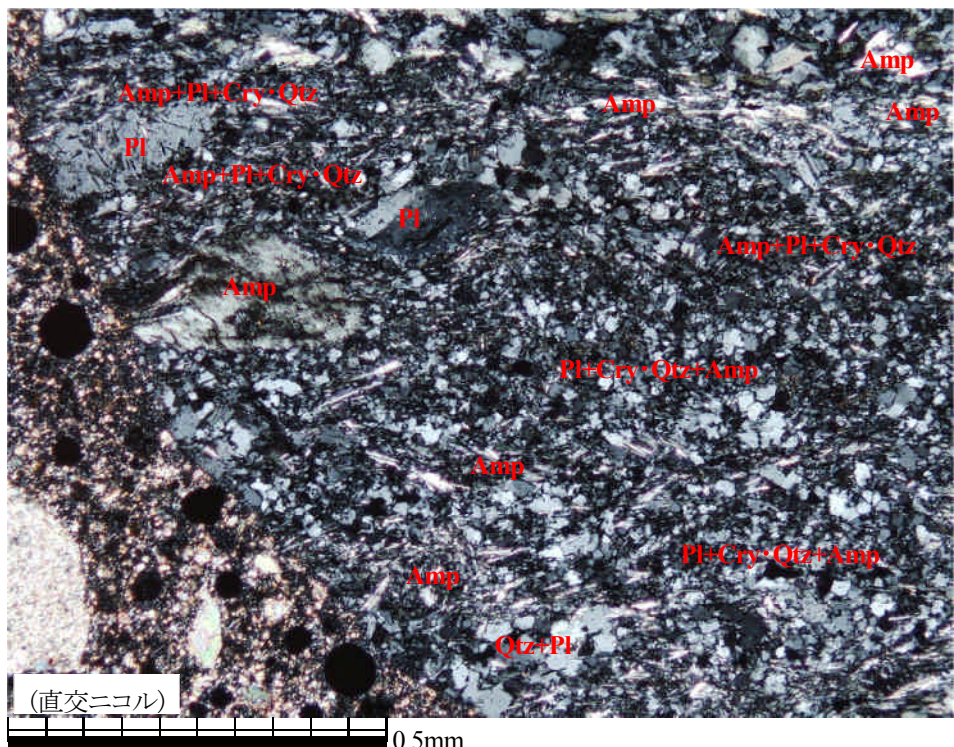
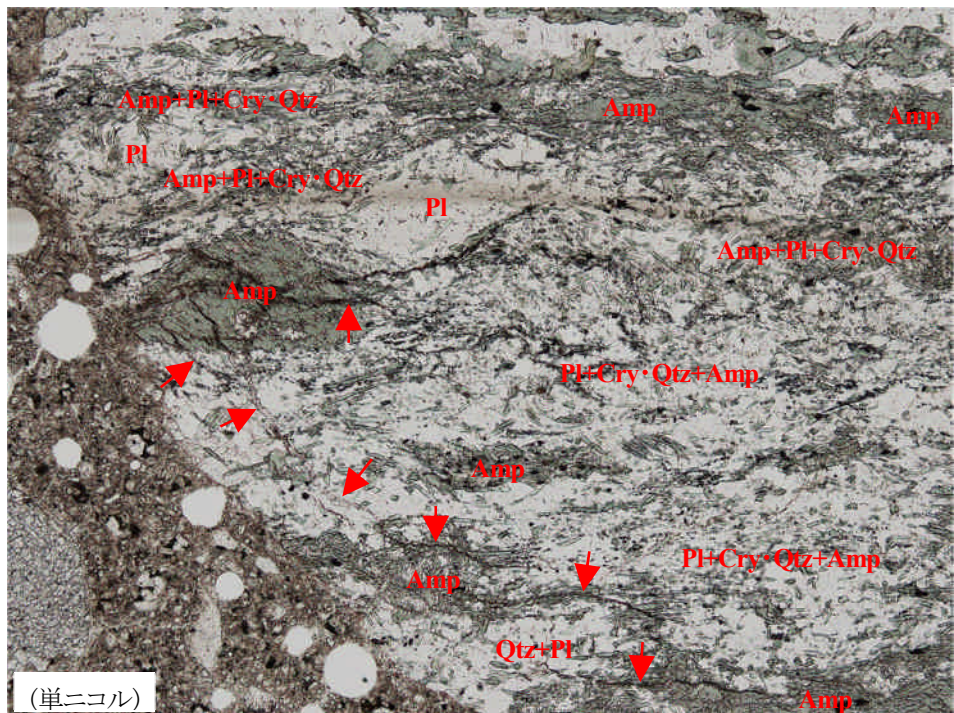
粗骨材とセメントペーストとの界面付近から滲出した透明で濡れたような外観の ASR ゲル (矢印), ならびに粗骨材の切断面から噴き出した白色の ASR ゲル (円内)。

付図-4.4.2 供試体切断面拡大 (82127 3A)



粗骨材から切断面に少量滲出し, 濡れたように見える透明な ASR ゲル (矢印)。

付図-4.4.3 供試体切断面拡大 (82127 3A)



コンクリート薄片の偏光顕微鏡写真。ASR ゲルに充填されたひび割れ (ASR ゲル脈；矢印) が骨材粒子内に生成。苦鉄質片岩は角閃石(Amp)・斜長石(Pl)・隠微晶質ないし微晶質な石英(Cry・Qtz)・石英(Qtz)などから構成される。隠微晶質ないし微晶質で、角閃石に富む薄層と斜長石・石英に富む薄層の分化がわずかに生じている。原岩の苦鉄質火成岩より残留した斜長石と角閃石の粗粒結晶も見られる (写真左上)。

付図-4.4.4 偏光顕微鏡写真 (82127 3A, 苦鉄質片岩)

(5) 88003 3A

付表-4.5.1 粗骨材岩種の構成割合 (88003 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
玄武岩	100	斑状組織を示す。色調は暗灰、灰褐色。一部の粒子に ASR ゲルの滲出が認められる。

付表-4.5.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (88003 3A)

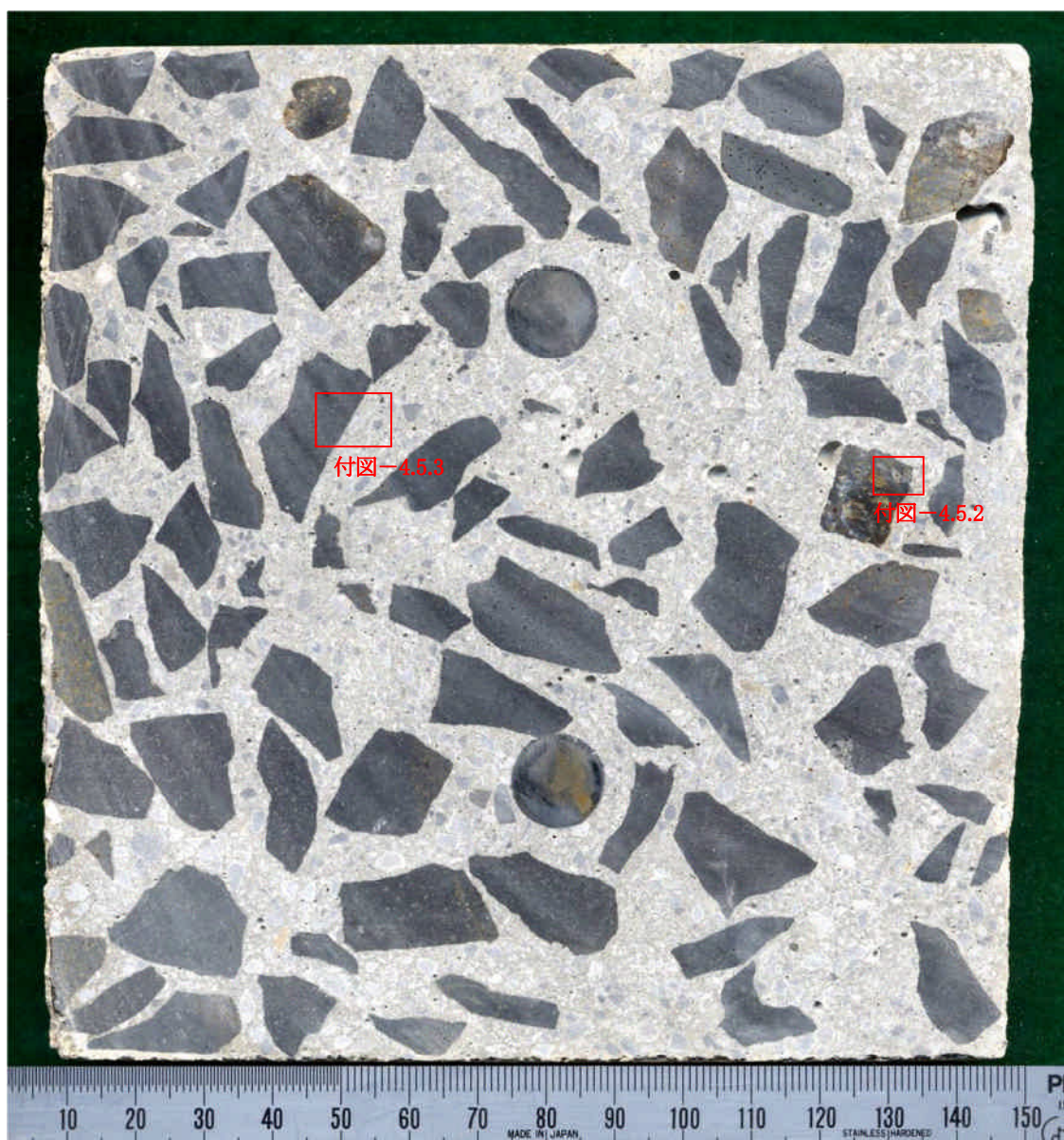
項目 岩石名	構成鉱物										
	ASR 反応性鉱物			斜長石	カンラン石	単斜輝石	石英	炭酸塩鉱物	粘土鉱物 (スメクタイト)	褐鉄鉱	不透明鉱物
	ガラス	クリストバライト	オパール								
玄武岩 (粗骨材)	◎	○	△	◎	◎	○	t r	t r	△	△	△

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr 微量 —確認されない

付表-4.5.3 ASR の程度 (88003 3A)

反応の程度 岩石名	潜在的	軽微	中程度	顕著	顕微鏡による コアの ASR 判定
	反応性 ゲル/ゾル滲出	骨材粒子内の ゲルに充填さ れたひび割れ 形成	セメントペーストへ のゲルに充填 されたひび 割れ進展	ゲルのセメント ペースト中の気 泡充填	
玄武岩 (粗骨材)	○	△			軽微～潜在的

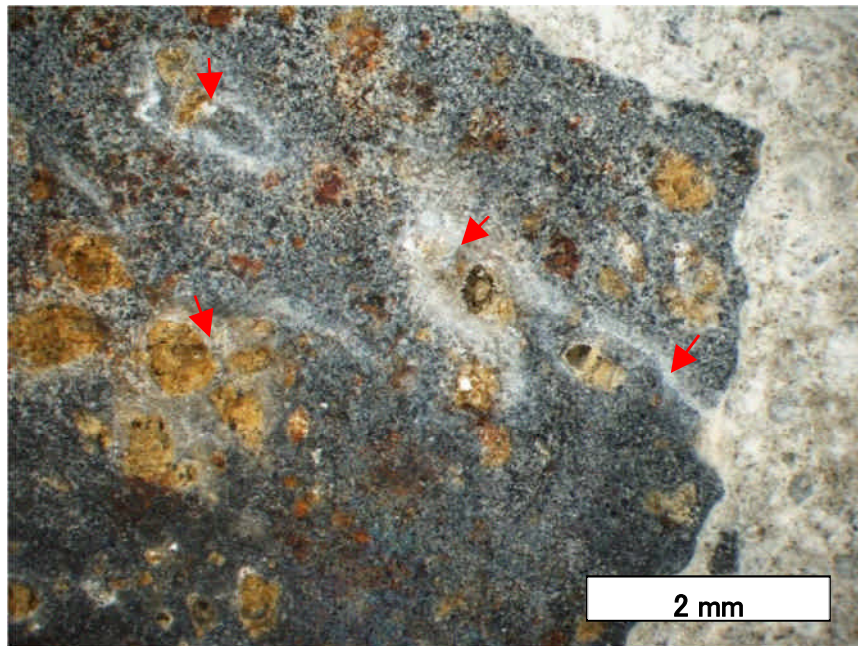
骨材粒子中で対象とする反応の見られる頻度を、◎:大、○:中、△:小、空欄:なし、で評価した。



付図-4.5.1 供試体切断面 (88003 3A)

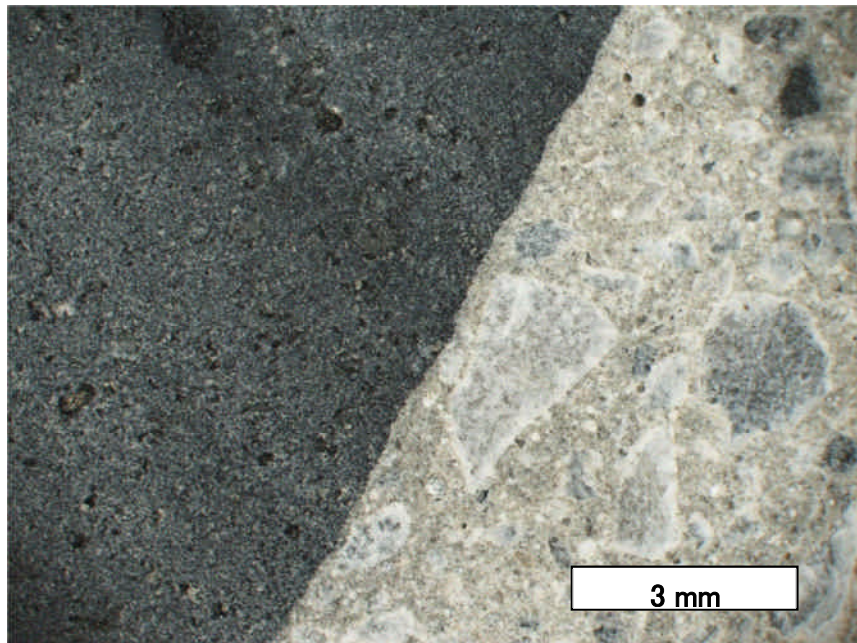
※ スケールの数字は mm

粗骨材：玄武岩



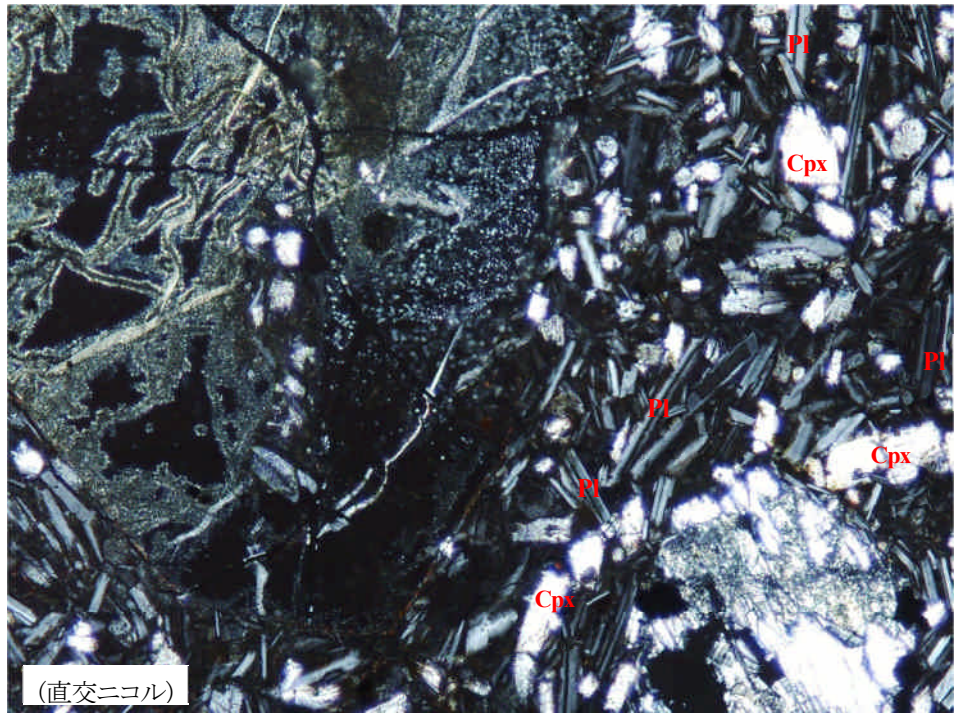
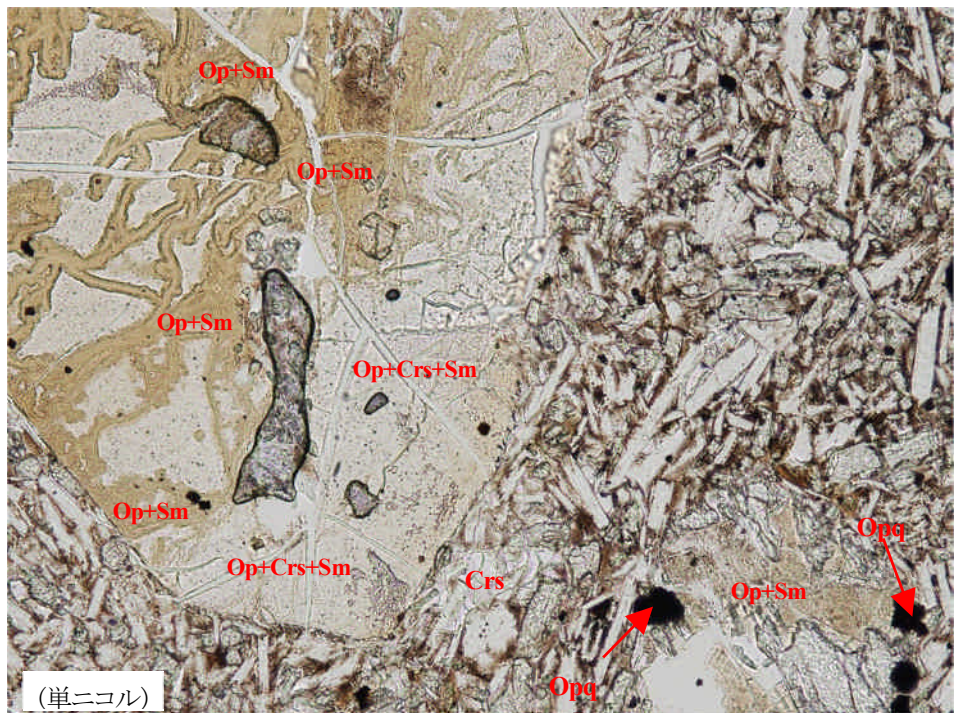
粗骨材粒子内の変質した斑晶鉱物から ASR ゲル(矢印)の滲出が認められる。

付図-4.5.2 供試体切断面拡大 (88003 3A)



実体顕微鏡下では変状の認められない骨材粒子も多い。

付図-4.5.3 供試体切断面拡大 (88003 3A)



0.1mm

変質したカンラン石斑晶を中心に拡大。カンラン石が変質し、粘土鉱物(Sm)、オパール(Op)、クリストバライト(Crs)が生成しこのような部分から ASR ゲルが滲出する。石基は細粒で長柱状の斜長石(Pl)、短柱状の単斜輝石(Cpx)、不透明鉱物(Opq)および、粒間を埋めるガラス(単ニコルで褐色、直交ニコルで暗黒の部分)から構成されている。

付図-4.5.4 偏光顕微鏡写真 (88003 3A, 玄武岩)

(6) 82228 3A

付表-4.6.1 粗骨材岩種の構成割合 (82228 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
安山岩	100	斑状組織を示す。色調は灰, 灰褐, 桃灰, 暗灰色。ASRを生じている粒子がある。

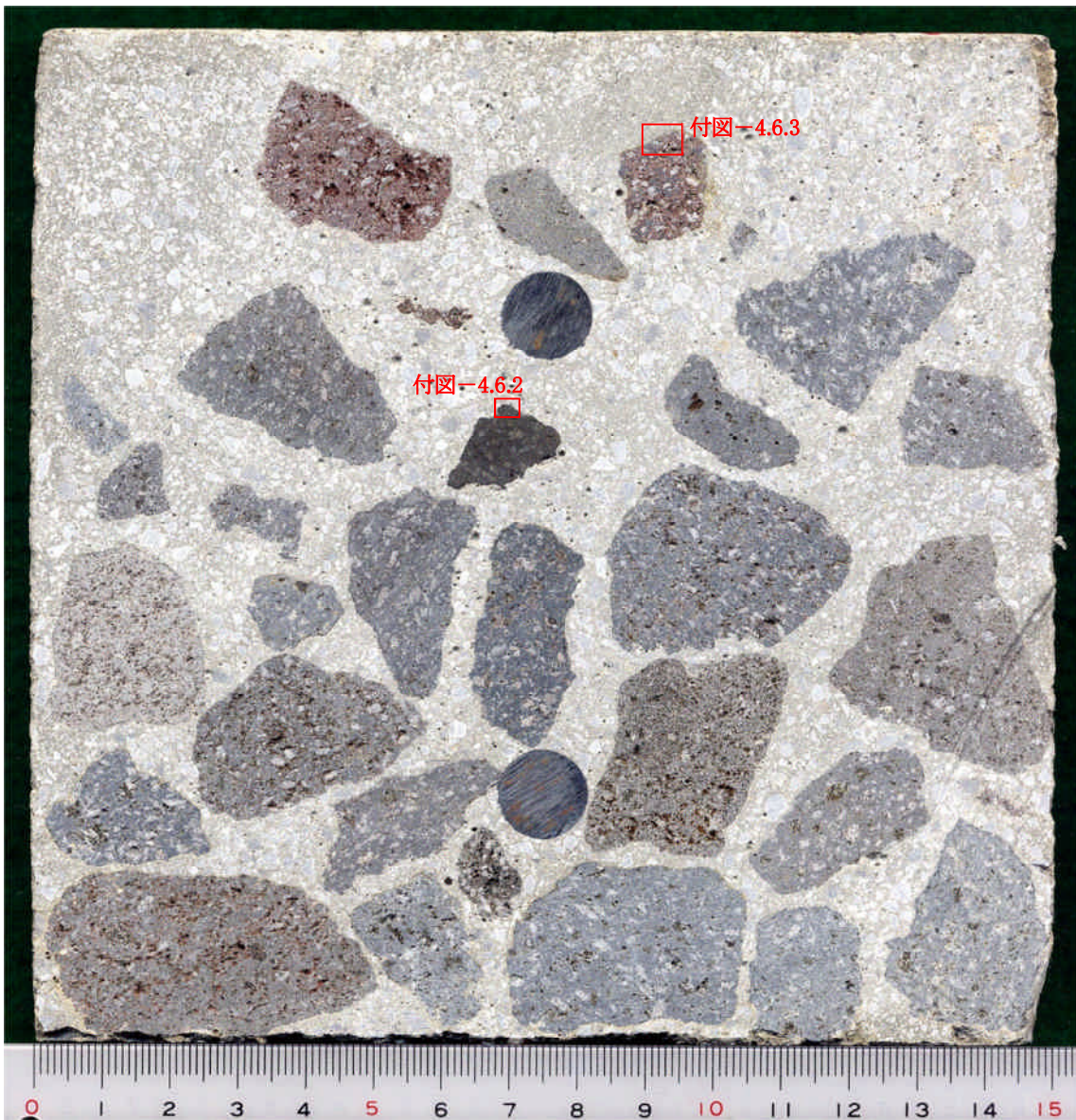
付表-4.6.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (82228 3A)

項目 岩石名	構成鉱物										
	ASR 反応性鉱物			斜長石	斜方輝石	単斜輝石	かんらん石	角閃石	黒雲母	アパタイト	不透明鉱物
	クリストバライト	トリデイマイイト	ガラス								
安山岩	◎	○	◎	◎	△	△	t r	t r	t r	t r	△

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr微量 —確認されない

付表-4.6.3 ASR の程度 (82228 3A)

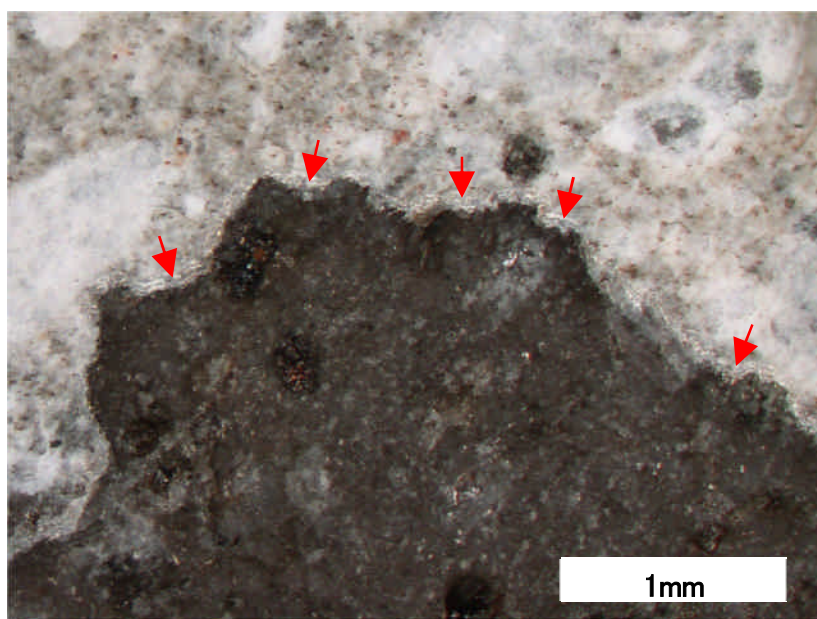
項目	反応の程度→			
	潜在的	軽微	中程度	顕著
	反応のみ ゲル/ゲル滲出	骨材粒子内のゲル に充填されたひび 割れ形成	セメントペーストへのゲル に充填されたひび 割れ進展	ゲルのセメントペースト中 の気泡充填
安山岩	*****	*****		



付図-4.6.1 供試体切断面 (82228 3A)

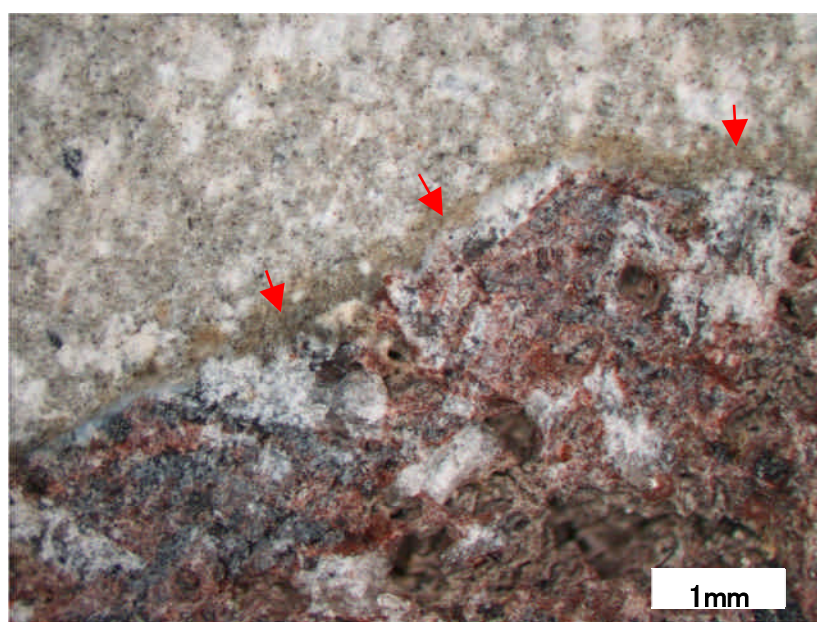
※ スケールの数字は cm。

粗骨材：安山岩



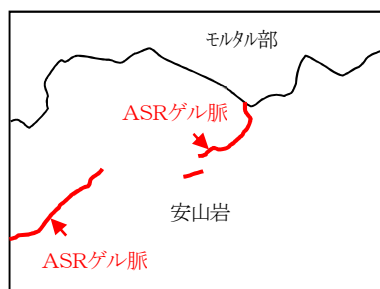
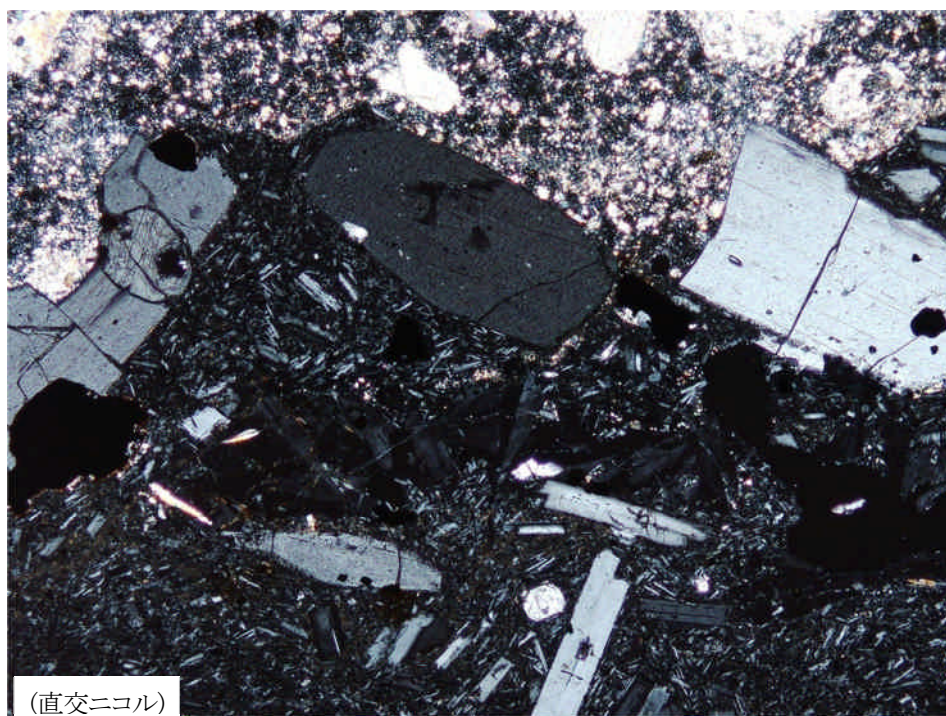
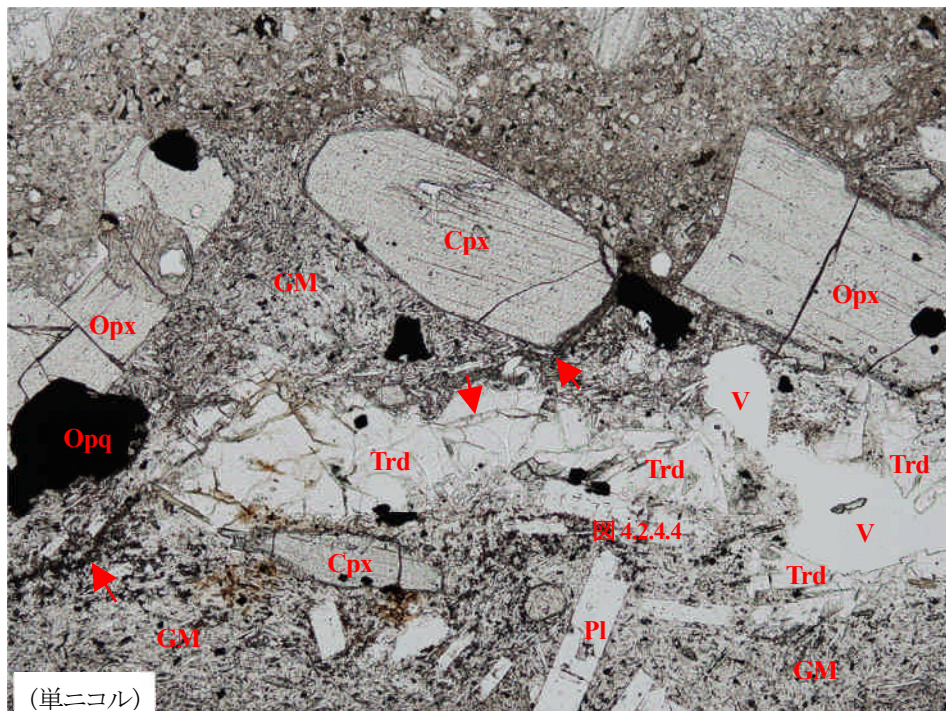
粗骨材とセメントペーストとの界面付近に滲出した、透明で光沢のある ASR ゲル (矢印)。

付図-4.6.2 供試体切断面拡大 (82228 3A)



粗骨材から切断面に滲出し、濡れたように見える透明な ASR ゲル (矢印)。

付図-4.6.3 供試体切断面拡大 (82228 3A)



0.5mm

コンクリート薄片の偏光顕微鏡写真。ASR ゲルに充填されたひび割れ (ASR ゲル脈; 矢印) が、安山岩の骨材粒子内に形成され、軽微な ASR が発生している。安山岩は斜長石(Pl), 単斜輝石(Cpx), 斜方輝石(Opx), 不透明鉱物(Opq) などの斑晶と、その粒間の石基(GM)から構成される。この安山岩では、マグマの揮発成分がガスとして逃げ去ったため生じた気孔(V)の周囲に、特に多量のトリディマイト(Trd)が存在している。

付図-4.6.4 偏光顕微鏡写真 (82228 3A, 安山岩)

(7) 87T04 3A

付表-4.7.1 粗骨材岩種の構成割合 (87T04 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
安山岩	100	無斑晶質。角閃石, 斜長石などの斑晶をわずかに含む。色調は紅灰～灰色。多数の粒子が反応リムを持つ。

付表-4.7.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (87T04 3A)

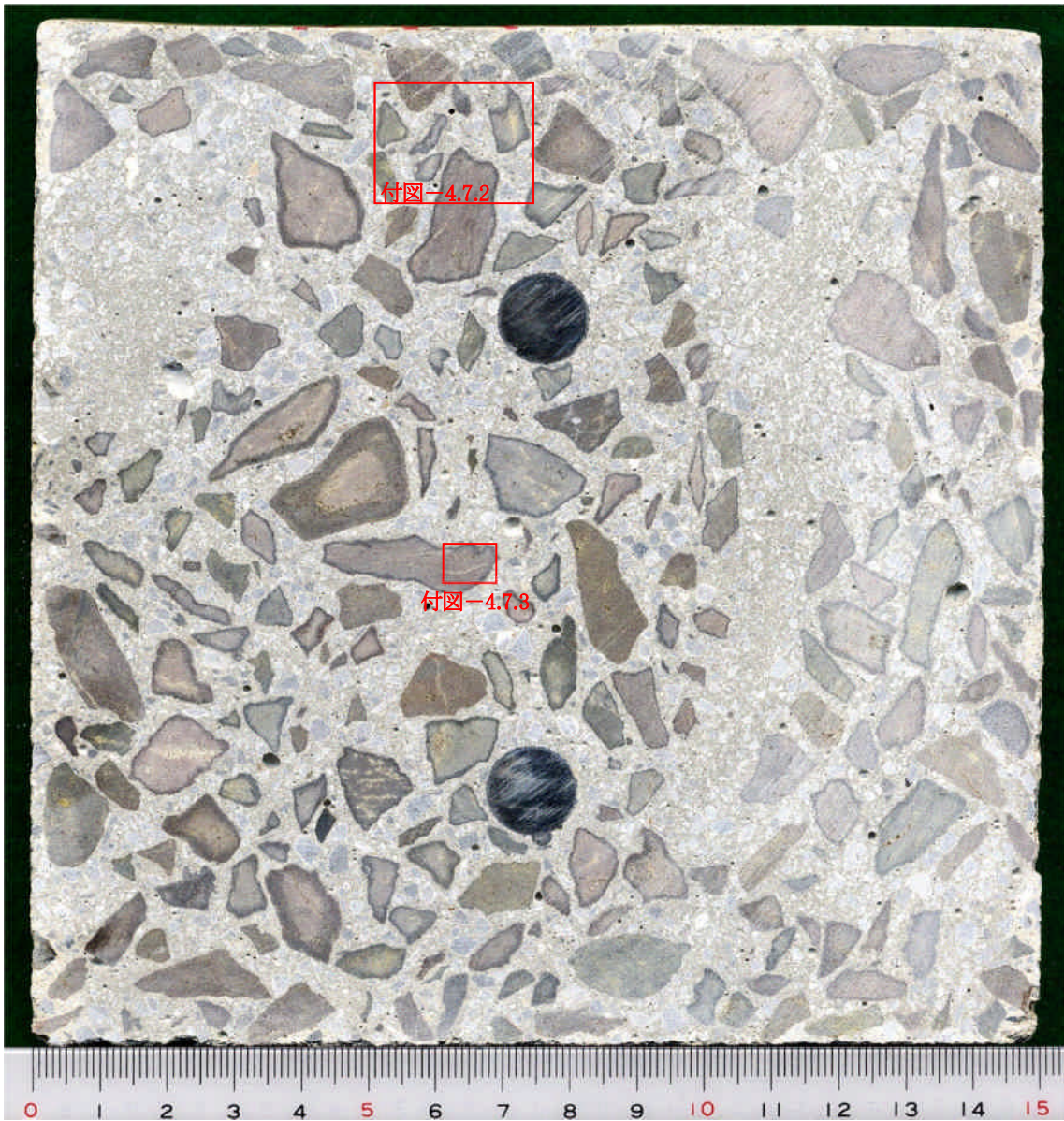
項目 岩石名	構成鉱物							
	ASR 反応性鉱物		斜長石	斜方輝石	単斜輝石	黒雲母	スメクタイト	不透明鉱物
	クリストバライト	ガラス						
安山岩	○	t r	◎	○	△	t r	t r	△

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr微量 —確認されない

付表-4.7.3 ASR の程度 (87T04 3A)

反応の程度 岩石名	潜在的	軽微	中程度	顕著	顕微鏡による コアの ASR 判定
	反応リム ゲル/ゾル滲出	骨材粒子内の ゲルに充填さ れたひび割れ 形成	セメントペーストへ のゲルに充填 されたひび 割れ進展	ゲルのセメント ペースト中の気 泡充填	
安山岩 (粗骨材)	◎	△			軽微～潜在的

骨材粒子中で対象とする反応の見られる頻度を, ◎:大, ○:中, △:小, 空欄:なし, で評価した。



付図-4.7.1 供試体切断面 (87T04 3A)

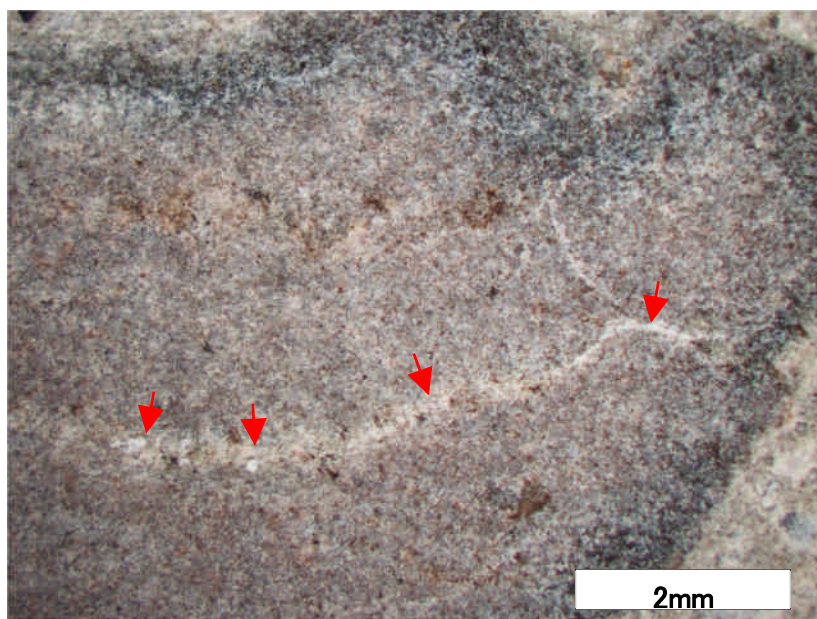
※ スケールの数字は cm

粗骨材：安山岩



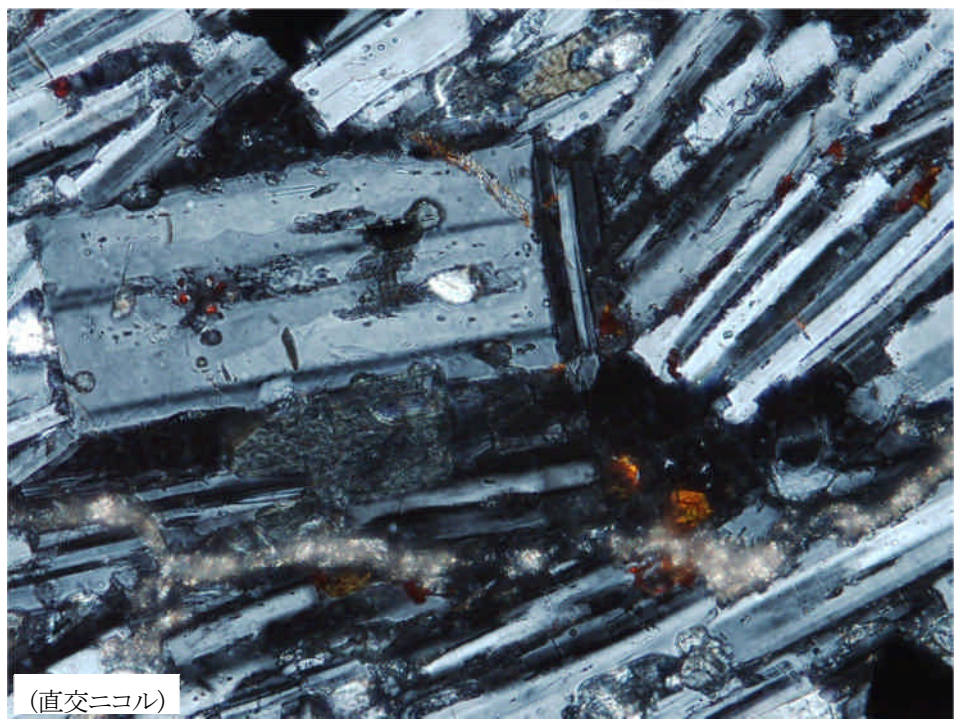
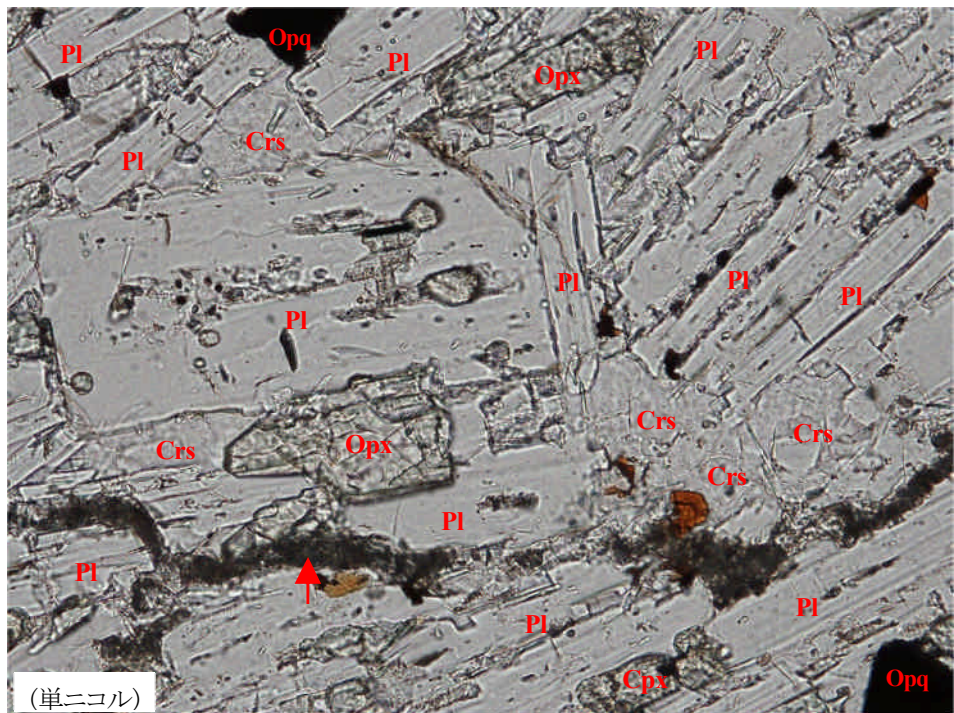
粗骨材には、多数の粒子に明瞭な反応リムが見られるが、ASR ゲルの滲出や割れは認められない。

付図-4.7.2 供試体切断面拡大 (87T04 3A)



ASR ゲルと思われる微量の滲出物や、微細な割れのようにも見える現象は、供試体切断面中央付近の粗骨材に稀に認められる程度である。

付図-4.7.3 供試体切断面拡大 (87T04 3A)



0.1mm

安山岩の拡大写真。斜長石(Pl), クリストバライト(Crs), 斜方輝石(Opx), 単斜輝石(Cpx)および不透明鉱物(Opq : 磁鉄鉱など)から主に構成される。相当量のクリストバライトを含み, ASR 反応性の岩石である。結晶化した ASR ゲル(矢印)が複屈折を持つため, 膨張ひび割れが直交ニコルで輝いている。

付図-4.7.4 偏光顕微鏡写真 (87T04 3A, 安山岩)

(8) 89096 3A

付表-4.8.1 粗骨材岩種の構成割合 (89096 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
安山岩	100	斑状組織を示す。色調は灰色、一部に桃灰色。淡い反応リム、ASR ゲルの微量の滲出を伴う、非常に軽微な ASR を生じている粒子が存在する。

付表-4.8.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (89096 3A)

項目 岩石名	構成鉱物							
	ASR 反応性鉱物		石英	斜長石	黒雲母	斜方輝石	粘土鉱物	鉄チタン鉱物
	クリストバライト	ガラス						
安山岩	◎	△	△	◎	tr	○	△	△

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr微量 —確認されない

付表-4.8.3 ASR の程度 (89096 3A)

	反応の程度→			
	潜在的	軽微	中程度	顕著
	反応リム ゲル/ゲル滲出	骨材粒子内のゲル に充填されたひび 割れ形成	セメントペーストへのゲル に充填されたひび 割れ進展	ゲルのセメントペースト中 の気泡充填
安山岩	*****	****		



付図-4.8.1 供試体切断面 (89096 3A)

※ スケールの単位は cm。

粗骨材：安山岩

※反応リムとほぼ同位置に ASR ゲルの非常に微量な滲出があるが，実体顕微鏡写真での認識は難しい程度であった。

(9) 82181 3A

付表-4.9.1 粗骨材岩種の構成割合 (82181 3A)

岩石名	構成割合 (vol.%)	備考
トータル斑岩	98	珩長質ないし中間質組成の完晶質火成岩。斑状組織を示す。色調は淡桃～桃灰色。幅広く淡い反応リムを有する粒子がある。
トータル岩	2	珩長質ないし中間質組成の完晶質火成岩。中粒。色調は灰色。ASRを生じている粒子は認められない。

付表-4.9.2 粗骨材の主要な構成鉱物 (82181 3A)

項目 岩石名	構成鉱物								
	ASR 反応性鉱物	斜長石	石英	角閃石	黒雲母	不透明鉱物	スメクタイト	アパタイト	ジルコン
	微晶質石英 隠微晶質石英								
トータル斑岩	○	◎	△	△	△	△	△	t r	t r

構成鉱物の概測量比 ◎多量 ○中量 △少量 tr微量 —確認されない

付表-4.9.3 ASR の程度 (82181 3A)

	反応の程度→			
	潜在的	軽微	中程度	顕著
	反応リム ゲル/ゲル滲出	骨材粒子内のゲル に充填されたひび 割れ形成	セメントペーストへのゲル に充填されたひび 割れ進展	ゲルのセメントペースト中 の気泡充填
トータル斑岩	*** (反応リムのみ)			



付図-4.9.1 供試体切断面 (82181 3A)

※ スケールの数字は cm。

粗骨材：トータル斑岩

※反応リムは認められたが、ASR ゲルは
確認されなかった。

5. 暴露供試体のアルカリ量測定結果

暴露後の供試体から試料を採取し、アルカリ量の測定を行った。測定は、 3kg/m^3 でも ASR によりひび割れが生じたと見られる骨材を中心に行った。これは、アルカリ量 3kg/m^3 の供試体で ASR が生じていると判定した骨材について、そのアルカリ量を確認するためである。試料は、各供試体からスライス状に採取した全断面を粉砕し、必要量を分取したものをを用いた。

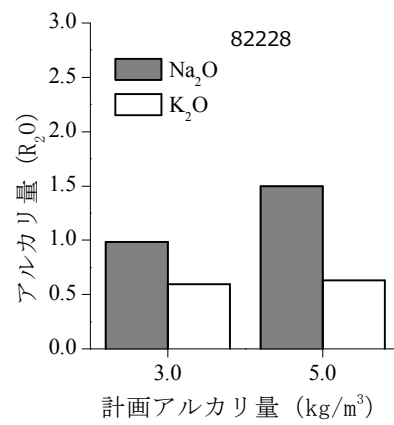
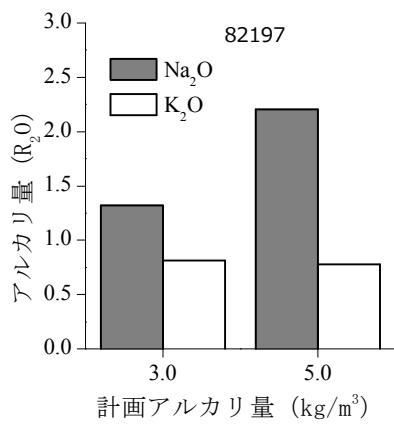
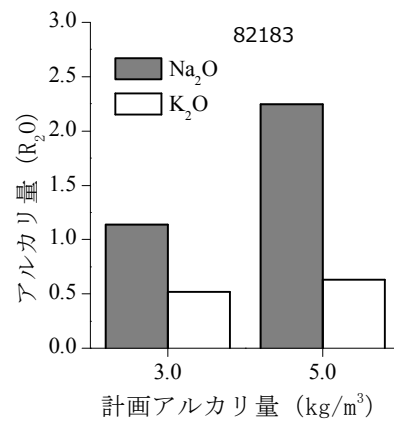
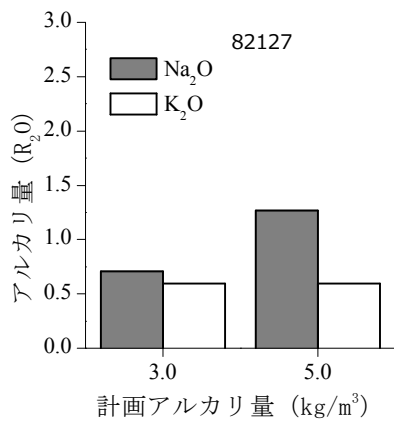
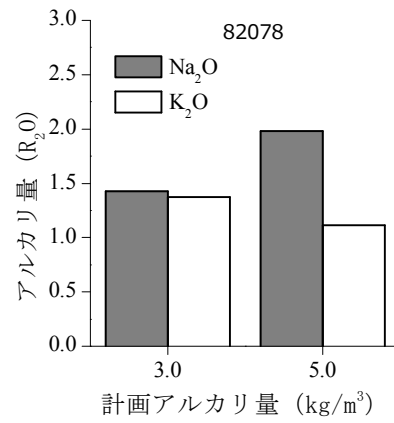
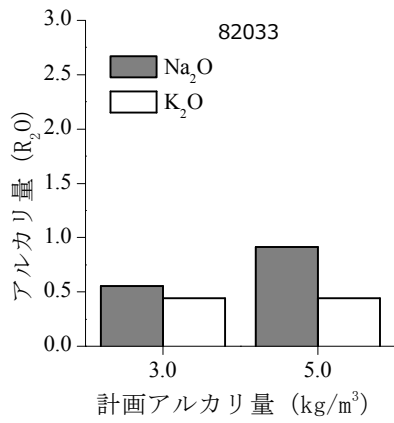
測定方法は、建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発報告書に示された「コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法（案）」に準じて行った。ただし、このアルカリ抽出する試料の粉砕において、前出、分析方法（案）では 50mm メッシュ程度とあるところを、今回の測定では、 0.15mm 以下に微粉砕した試料とした。これは、省力化のため粉砕作業に自動で 0.15mm 以下まで粉砕できる装置を用いたためである。

付図-5.1～付図-5.3 に測定結果を示す。なお、測定結果のとりまとめについて、以下に留意点を示す。

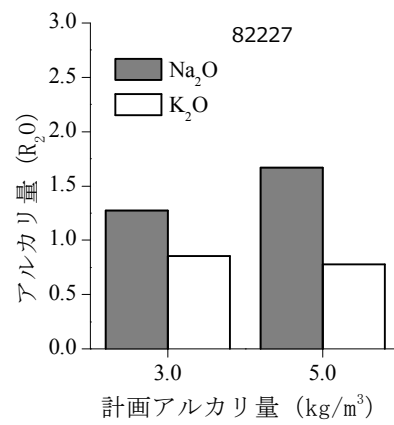
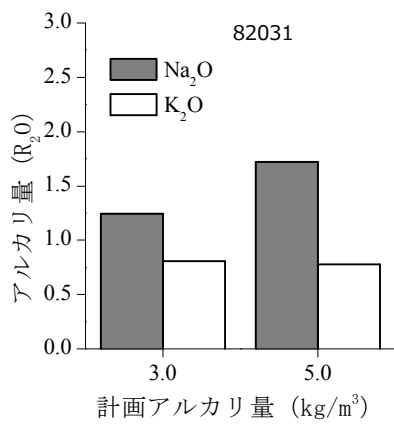
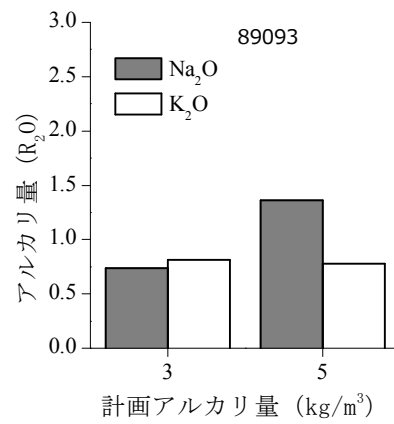
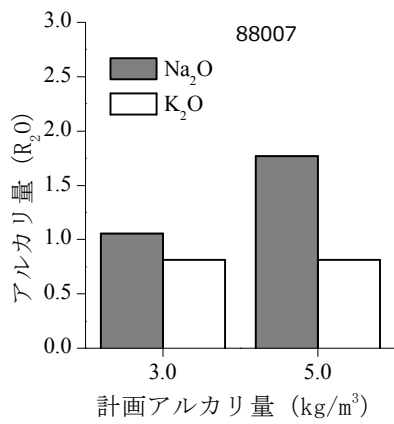
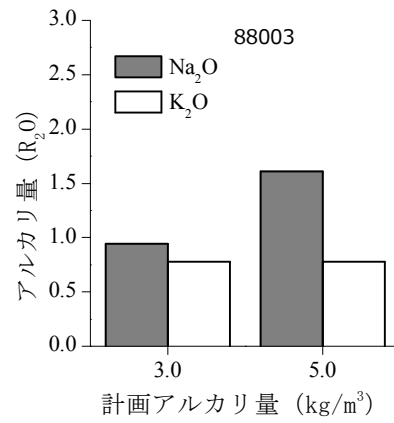
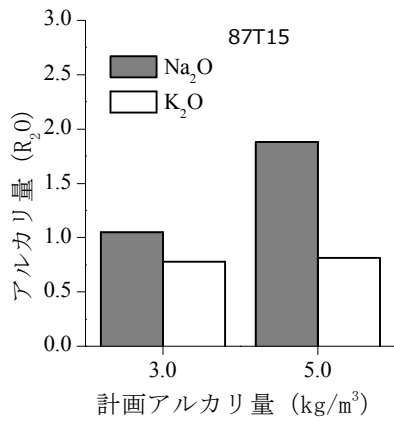
- アルカリ量 3kg/m^3 の供試体 3A, 3B またはアルカリ量 5kg/m^3 の供試体 5A, 5B について、それぞれ 2 体の供試体から採取した試料で測定した結果の平均値を示した。
- アルカリの回収率として、ナトリウムイオンは 0.6、カリウムイオンは 0.8 を仮定した^{*1}。すなわち、例えば、ナトリウムイオンの場合は、抽出した溶液を定量して得られたナトリウムイオン量 (Na_2O 当量) を 0.6 で除した値を示した。
- ナトリウムイオン、カリウムイオンそれぞれの値を示しているので、総アルカリ量 (Na_2O 当量) を算出する場合は、カリウムイオンの値に 0.658 を乗じた値を用いなければならない。

測定結果から、当初の供試体に混入した NaOH に起因するナトリウムイオン量の違いがあり、供試体の試験条件を確認することができた。

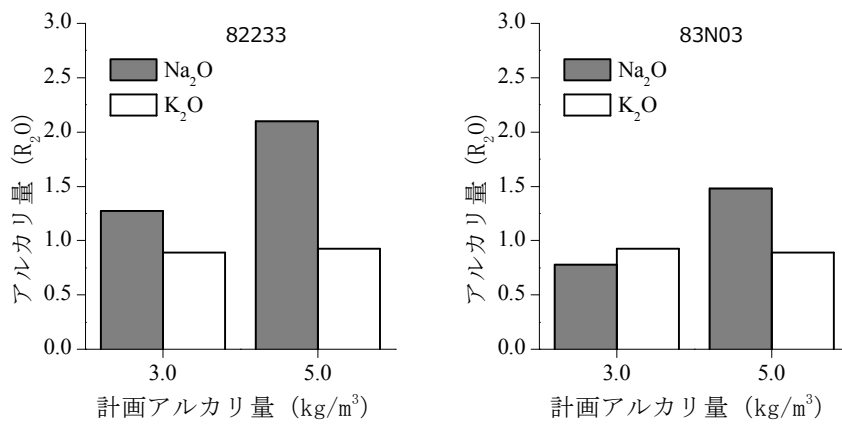
*1 土木研究センター：建設省総合技術開発プロジェクトコンクリートの耐久性向上技術の開発報告書（土木構造物に関する研究成果），p.130，1989.



付図-5.1 暴露後のコンクリート中のアルカリ量測定結果 (1/3)



付図-5.2 暴露後のコンクリート中のアルカリ量測定結果 (2/3)



付図-5.3 暴露後のコンクリート中のアルカリ量測定結果 (3/3)

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4281 March 2014

編集・発行 © 独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話 029－879－6754