

原子力規制庁 御中

平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年化技術
評価高度化（アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の
長期健全性評価に関する研究））事業

成果報告書

平成 2 9 年 3 月

MRI株式会社三菱総合研究所

本報告書は、原子力規制庁の委託業務により、三菱総合研究所が、東北大学、広島大学との連携により作成し、原子力規制庁へ納品したものです。

したがって、本資料の公開、複製、転載、引用等には、原子力規制庁の承認が必要です。

目 次

I 序論	1-1
1 事業目的	1-1
2 事業項目	1-1
3 事業遂行体制	1-1
4 実施スケジュール	1-1
5 事業概要	1-1
II コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する研究	2-1
1. はじめに	2-1
1. 1 研究の背景	2-1
1. 2 研究の目的	2-2
1. 3 研究の全体概要	2-3
2. 試験用骨材の検討	2-6
2. 1 実施概要	2-6
2. 2 試験用骨材の選定・入手	2-8
2. 2. 1 目的	2-8
2. 2. 2 骨材の選定	2-8
2. 2. 3 骨材の入手	2-9
2. 3 試験用骨材の岩石学的試験	2-10
2. 3. 1 目的	2-10
2. 3. 2 方法	2-10
2. 3. 3 結果	2-10
2. 3. 4 考察	2-13
2. 4 まとめ	2-13
2. 4. 1 試験用骨材の選定・入手	2-13
2. 4. 2 試験用骨材の岩石学的試験	2-14
3. ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法	2-15
3. 1 実施概要	2-15
3. 2 国内外の骨材試験方法の比較	2-15
3. 2. 1 目的	2-15
3. 2. 2 方法	2-15
3. 2. 3 考察	2-21
3. 3 骨材試験方法の検討	2-25
3. 3. 1 温度及びアルカリ濃度依存性	2-25

3. 3. 2	アルカリラッピングの効果	2-30
3. 3. 3	JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 の比較	2-33
3. 3. 4	フライアッシュの置換効果	2-38
3. 3. 5	CPT の膨張挙動の分析	2-42
3. 3. 6	高温・高アルカリ濃度での ASG 生成と膨張に関する検討	2-47
3. 4	骨材試験方法の提案	2-51
3. 4. 1	骨材の ASR 試験フローの検証	2-51
3. 4. 2	骨材の ASR 試験フローの提案	2-54
3. 5	まとめ	2-57
4.	コンクリート構造物の ASR 診断方法	2-59
4. 1	実施概要	2-59
4. 2	劣化進行段階の評価	2-63
4. 2. 1	実施概要	2-63
4. 2. 2	試験方法	2-63
4. 2. 3	試験結果	2-70
4. 3	促進膨張試験の評価	2-96
4. 3. 1	実施概要	2-96
4. 3. 2	試験方法	2-97
4. 3. 3	試験結果	2-104
4. 3. 4	まとめ	2-114
4. 4	ASR 劣化した実構造物による評価	2-117
4. 4. 1	実施概要	2-117
4. 4. 2	対象構造物及びコア採取	2-117
4. 4. 3	岩石学的評価	2-127
4. 4. 4	コアの促進膨張試験	2-150
4. 4. 5	まとめ	2-154
4. 5	ASR 診断フローの提案	2-156
4. 6	まとめ	2-162
5.	数値解析のための調査	2-164
5. 1	実施概要	2-164
5. 2	モデル化ための構成則の調査	2-167
5. 2. 1	海外の調査結果	2-167
5. 2. 2	国内の調査結果	2-172
5. 2. 3	まとめ	2-174
5. 3	ASR 膨張挙動モデル化に必要な項目の調査	2-175
5. 3. 1	ASR の温湿度依存性に関する既往の研究	2-175

5. 3. 2	湿度依存性のモデル化	2-178
5. 3. 3	水分移動のモデル化	2-180
5. 3. 4	熱移動のモデル化	2-187
5. 3. 5	鉄筋拘束、外部拘束に関する既往研究	2-190
5. 3. 6	拘束影響のモデル化	2-193
5. 3. 7	機械的特性変化のモデル化	2-196
5. 3. 8	まとめ	2-199
5. 4	まとめ	2-200
6.	ASR に関する国際動向	2-202
7.	まとめ	2-207
付録		

III	事業進捗の管理と成果報告の実施	3-1
1	実施履歴	3-1
2	報告会	3-1
3	第三者有識者委員会	3-2
4	研究会	3-3
5	定例報告	3-3
6	品質管理活動	3-3
IV	結論	4-1
謝辞		

I 序論

1 事業目的

運転開始後 30 年を超えて運転する経年プラントの高経年化技術評価に、常に最新知見を取り入れるため、アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の長期健全性評価手法の高度化を図る。

2 事業項目

以下の項目について実施する。

- (1) コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する研究
- (2) 事業進捗の管理と成果報告の実施

3 事業遂行体制

本事業は、三菱総合研究所が受託機関代表となり、国立大学法人東北大学（以下、東北大学）、国立大学法人広島大学（以下、広島大学）と連携し、業務を遂行した。図 3.1 に事業遂行体制図を記す。

なお、本事業で実施した研究の遂行体制については、5 事業概要に記載した。

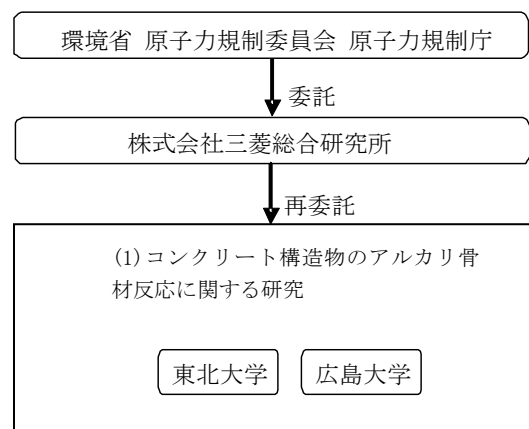


図 3.1 事業遂行体制

4 実施スケジュール

実施スケジュールは以下の通りである。

平成 28 年 4 月 15 日から、平成 29 年 3 月 31 日まで

5 事業概要

本事業で実施した研究の実施概要を以下に示す。

(1) コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する研究

1) 実施内容

アルカリ骨材反応（以下、「ASR」という。）に関する国内外の学术论文や技術情報による最新知見を基に検討した骨材試験方法と ASR 診断方法による総合的な ASR 評価方法の検証を行い、骨材試験方法の適用性と ASR 診断方法の有効性を確認する。

また、ASR の影響によるコンクリート部材の性能変化を予測可能な数値解析的手法の構築のための調査を行う。

2) 実施方法

原子力発電施設の高経年化技術評価に係るコンクリート構造物の健全性については、既往の規格基準類により ASR 評価を実施している。

近年、ASR の原因である急速膨張性骨材以外に、劣化事例が報告されている遅延膨張性骨材（10 数年以上経過してからコンクリートにひび割れを生じる。）を含むすべての反応性骨材を対象にした総合的な ASR 評価方法を策定する。

そこで、国内外の骨材試験方法による比較試験を実施し、遅延膨張性骨材に適用可能な試験方法を検討する。また、コンクリート構造物を模擬した劣化進行段階の異なる試験体及び拘束条件の異なる試験体を作製し、コアの外観観察、岩石学的評価、促進膨張試験等による ASR 診断方法の有効性を確認する。

また、ASR の影響によるコンクリート部材の性能変化を予測可能な国内外の数値解析的手法について、構築に必要な構成則の調査を行う。

平成 28 年度は、総合的な ASR 評価方法のうち、コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法については、国内の急速膨張性骨材及び遅延膨張性骨材を用いた試験（例：RILEM AAR-3、RILEM AAR-4）並びに、改善案を含む試験による結果の比較・分析を行い、長期膨張特性を総合的に評価する。また、過年度に実施した試験結果と併せて、適用可能な骨材試験方法を整備し、最善の骨材試験方法を提案する。

総合的な ASR 評価方法のうち、供用期間中のコンクリート構造物の ASR 診断方法については、コアを用いた外観観察、岩石学的評価等によるコンクリート構造物の反応性評価と促進膨張試験による残存膨張のポテンシャル評価に関する試験を実施することにより、ASR 診断方法を整備し、その有効性を確認する。また、ASR によるコンクリート構造物の膨張やひび割れ等の影響を評価する数値解析的手法を構築するために必要な水分移動、熱移動、膨張等に対する構成則の調査を行う。

また、ASR に関する国際会議（例：15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction 及び Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, MSSCE 2016）に参加し、関連情報を収集する。

3) 研究体制

図 5.1 に研究実施体制を示す。

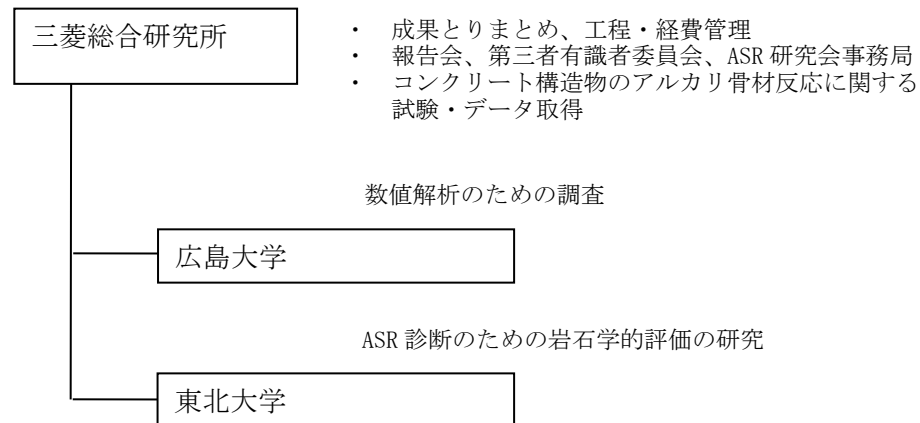


図 5.1 研究実施体制

(2) 事業進捗の管理と成果報告の実施

1) 実施内容

本事業で実施する（１）の研究について、研究計画に対する進捗度の確認、研究目標に対する実施内容の妥当性の確認及び研究成果の取りまとめ等に係る管理を行い、事業開始時説明、中間成果報告及び最終成果報告を行う。

2) 実施方法

本事業で実施する（１）コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する研究に対して、研究計画の確認や進捗度の把握、研究目標に対する実施内容の妥当性の確認及び研究成果の取りまとめ等に係る管理を行う。

上記の管理を満足するため、下記の a. ～c. について記述する品質保証計画書を提出するとともに、品質保証計画書の記載内容について発注者の了解を得る。

a. 品質保証体制

- ・ 品質保証部署が、業務実施部署と独立していること
- ・ 品質保証責任者は、実施責任者と兼務していないこと
- ・ 品質保証に関わる責任及び役割が明確になっていること

b. 品質保証活動

- ・ 品質を保証するため、業務手順及び成果品（インプット、アウトプット）の審査・検証を確実に実施する活動フローが明確になっていること
- ・ 品質を保証するため、審査項目、審査内容、審査基準、審査者等を明記したチェ

ックリストが作成されていること

- ・過年度までに実施した各調査研究の成果が、確実に取り入れられて業務を実施しているか確認すること
- ・その他、品質保証活動に必要な事項を記載すること

c. 文書管理

- ・業務で発生する文書の維持・保管方法について明確にされていること

また、発注者と1～2ヶ月に1回程度の打合せを行い、発注者との打合せ議事録、並びに月ごとの研究の進捗状況、課題状況及び課題への対応案をまとめた月報を提出する。

さらに、各調査研究について、事業開始時に実施計画書の提出及び説明、中間での進捗状況及び成果取りまとめ状況の報告（3回程度）、並びに最終成果取りまとめ報告を実施する。なお、実施者は第3者有識者（3名程度）による委員会を設置し、進捗状況、成果の妥当性等に関する意見聴取を行い、その結果を成果とりまとめの参考とすることとする。

II コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する研究

1. はじめに

1. 1 研究の背景

日本のアルカリ骨材反応（以下、「ASR」という。）の抑制対策は、1986年の7月と10月に「コンクリート中の塩化物総量規制及びアルカリ骨材反応暫定対策について」2種類の通達が出され、1989年7月に「アルカリ骨材反応抑制対策について」が建設省技術調査室より通達が建設省より出された。一方、JIS A5308（レディミクストコンクリート）では、1986年10月と1989年12月にアルカリ骨材反応の抑制方法が規定化された。現在、原子力施設におけるコンクリートのASR評価は、これらの規格基準類により行われている。しかし、これらの規格基準類ではASR抑制対策として不十分であることが指摘されている¹。特に、実構造物でASRが確認されているある種の膨張性骨材が、JISの方法でアルカリ骨材反応性を検出できないことが課題である。

近年、日本でASRの主要な原因と考えられてきた急速膨張性骨材以外に、遅延膨張性骨材²（10 数年以上経過してからコンクリートにひび割れを生じる。）による劣化事例が報告されている¹。骨材試験方法の課題としては、遅延膨張性骨材を含む反応性骨材を評価できる規格基準類が確立されていないことである。また、現状のアルカリシリカ反応性に関する骨材試験方法では、複数種類の骨材が組み合わさるコンクリートのASRポテンシャル評価には不十分である。つまりJISの方法で無害とされる骨材であっても必ずしもASRを生じないとは限らない。そこで、より有効な骨材のアルカリ骨材反応性を評価する方法が必要である。

一方、既存コンクリート構造物のASR診断では、ASR発生の有無、進行度の判定、さらに将来の進行予測が必要である。

ASR診断については、国際的学会活動RILEM (International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures) において、AAR-6として手順が示されており³、日本でもコンクリート工学会の研究委員会が岩石学的試

¹ JCI-TC062A 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会、日本コンクリート工学会、2008

² It. Katayama, A review of alkali-aggregate reactions in Asia -Recent topics and future research, S. Nishibayashi, M. Kawamura (ed.), East Asia alkali-aggregate reaction seminar, Tottori, Supplementary Papers, pp. A33-A44, 1997.

急速膨張性及び遅延膨張性という用語は、Katayamaにより定義されたものであり、それぞれ組成ベシム現象を示すかどうかで区別されている。急速膨張性骨材の典型例は、新第三紀以降の安山岩やフリントなど、高い反応性を示すクリストバライト、トリディマイト、オパール、カルセドニーを含有する岩石である。遅延膨張性骨材の典型例は片麻岩、泥岩、グレイワック（泥質砂岩）、フォルンフェルス、マイロナイト、カタクレサイトなど、より反応性が低い微晶質／隠微晶質石英を含有する岩石である。急速膨張性、遅延膨張性という分類は世界的には広く受け入れられているものではなく、rapid reactive/expanding, slow/late reactive/expanding と称されることが多い。なお、日本では一般的な急速性の安山岩は世界的には珍しい。日本のASR対策が安山岩による被害を防止することに主体としたのに対し、海外では遅延膨張性骨材を主眼にしたものである。

³ AAR-6.1, Guide to diagnosis and appraisal of AAR damage to concrete in structures, (eds.) B. Godart, M. de Rooij, J.G.M. Wood, RILEM State-of-the-Art Report, Springer, Vol. 12, 2013

験を取り入れた方法を提案している⁴。しかし、評価手法として、根拠となるデータは少なく、コアサンプルによる ASR 診断の評価方法が確立されていない。さらに、現在の ASR 進行度は把握できても、将来の膨張性は予測できない。

このような背景のもと、旧独立行政法人原子力安全基盤機構が、RE レポート（以下、「JNES レポート」という。）として、最新の国際情報に基づき、骨材の ASR 試験方法及びコンクリート構造物の ASR 診断方法（以下、「JNES フロー」という。）を提案している⁵。しかし、JNES フローで提案されている、各評価方法の有効性を確認する必要がある。

1. 2 研究の目的

国内外の学術論文や技術情報による最新知見を基に提案された JNES フローの骨材試験方法と ASR 診断方法の妥当性を確認する。

本事業では大きく、骨材試験方法と ASR 診断方法の検討、部材性能の ASR による経年変化に関する数値解析のための調査を行う。

ASR 要因から、環境条件と部材の詳細条件の影響を受け、部材性能の ASR による経年変化へつながる関係を図 1.1 に示す。

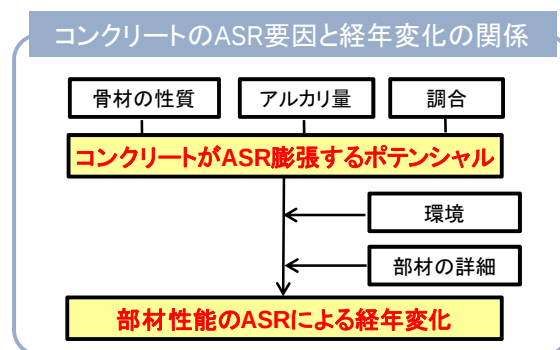


図 1.1 ASR による部材性能の経年変化に影響する各種要因

骨材試験の結果だけでは ASR 膨張するポテンシャルは決まらないので、調合条件を考慮したコンクリート試験が重要となる。JASS5N T603 はこの代表的な試験方法である。さらに、部材性能の経年変化は、温湿度などの環境条件、部材厚さや拘束条件の影響を受けるため、これらの検討も必要となる。JIS の ASR 抑制対策は一般の使用条件を前提としているが、原子力施設には 60℃に長期間晒される部材があり、この条件での ASR の長期的進行への対応が十分であるかどうかは検証する必要がある。

本事業では骨材試験方法として、JNES フローで提案されているコンクリートプリズム試験（以下、「CPT」という。）RILEM AAR-3 及び AAR-4 と、国内の JASS5N T603 を比較

⁴ JCI-TC115FS ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書、コンクリート工学会、2014

⁵独立行政法人原子力安全基盤機構（JNES）中野眞木郎：“原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案”，JNES-RE-2013-2050（2014）

し、試験方法としての有効性を確認することとした。また、ASR 診断方法として、JNES フローで提案されている方法の有効性を確認すると共に、有効と思われる新たな方法を提案することとした。

1. 3 研究の概要

今年度は、最終的な成果のとりまとめとして、総合的な ASR 評価方法の妥当性の確認を、国内の急速膨張性骨材や遅延膨張性骨材により、以下に示す各項目について行った。なお、過年度に実施した項目や結果についても、今年度の最終的な総合評価の位置づけの中でデータの整理や分析、考察の対象としている。

(1) 骨材試験方法

過年度において、骨材試験方法の有効性を確認するため、国内の複数の急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材を調査し、反応性の有無を確認するため、予備試験（ASTM C1260 促進モルタルバー法）を行い、急速 2 種類と遅延 3 種類を選定した。

今年度は、これらの骨材に対して、以下に示す国内外の代表的な試験方法を適用し、比較検討した。

a 岩石学的試験

偏光顕微鏡観察（RILEM AAR-1 に準じた反応性岩種・鉱物の判定）※

b 促進膨張試験

促進モルタルバー試験（RILEM AAR-2 に準じたスクリーニング試験）※

c 長期膨張試験

促進コンクリートプリズム試験（RILEM AAR-4）

コンクリートプリズム試験（RILEM AAR-3）

現行試験（化学法（JIS A1145）、モルタルバー法（JIS A1146）、コンクリートの反応性試験方法（JASS 5N T-603））※

（注）※は過年度に試験を実施した項目

(2) ASR 診断方法

ASR 診断方法の有効性を確認するため、次の 3 種類のコンクリートを使用した。

- ・ 劣化進行段階が異なるコンクリート（小型試験体 75×75×250mm）
- ・ 促進養生したコンクリート（小型試験体 650×650×650mm）
- ・ ASR 劣化したコンクリート（実構造物）

これらを用いて、以下の検討を行った。

- a コアの外観観察による ASR 劣化状況の検出（可視光源下での展開写真、実体顕微鏡、蛍光法）
- b コア XRD による反応性鉱物の検出（ただし、対象鉱物は限定される）
- c 岩種構成定量による反応性骨材量・ペシマム評価
- d 薄片を用いた偏光顕微鏡による岩種判定と ASR 劣化度診断
- e 薄片スキャナによる ASR を生じた骨材の岩種同定、ASR 劣化度診断
- f 走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型分光法（SEM/EDS）による反応状況分析、セメントアルカリ量推定と、調合条件等からのアルカリ収支計算によるアルカリ量推定
- g 空隙水の pH 測定による残存膨張性評価
- h コアの促進膨張試験による残存膨張性評価
- i ASR 診断の各種方法の総合的評価

（３） 数値解析のための調査

ASR によるコンクリート部材の性能変化を予測する数値解析手法に関する、以下の情報を国内外について調査した。

- a ASR モデルの構成則
- b ASR の温度依存性、湿度依存性、拘束依存性
- c ASR に及ぼす水分移動、熱移動
- d ASR による機械的特性の変化

（４） 国際動向

ASR に関する国際会議及び国際的学会活動の情報を収集した。

以上の各項目に関する実施工程を表 1.1 に示す。

表 1.1 実施工程

	平成28年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
① 骨材試験方法												
国内外の骨材試験方法の比較検討												
RILEM AAR-3												
RILEM AAR-4												
骨材試験方法の検討												
温度およびアルカリ濃度依存性												
フライアッシュ置換効果												
骨材試験方法の提案とまとめ												
② ASR診断方法												
劣化進行段階が異なるコンクリート												
中期診断												
後期診断												
促進養生したコンクリート												
促進膨張試験												
ASR劣化したコンクリート												
コア外観観察												
岩石学的評価												
各種試験・分析												
ASR診断方法の提案とまとめ												
③ 数値解析のための調査												
国内外文献調査												
ASRモデルの構成則												
ASRの温度／湿度／拘束依存性												
ASRに及ぼす水分移動、熱移動												
ASRによる機械的特性の変化												
調査結果のまとめ												
④ 国際動向												
RILEM TC AAA												
国際会議												

2. 試験用骨材の検討

本章は、今年度実施結果をまとめるにあたり基本的事項として参照することが必要なため、過年度に実施した内容⁶の要点を改めて整理したものである。

2. 1 実施概要

「3. ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法」及び「4. コンクリート構造物の ASR 診断方法の検討」を行うため、国内で産出する反応性骨材を調査し、急速膨張性骨材 2 種類、遅延膨張性骨材 3 種類と非反応性骨材 1 種を選定・入手し、岩石学的特徴を明らかにして、検証試験に用いる骨材とした。

試験に用いる骨材は、事前に調査した情報から、全国 20 箇所の採石場を対象として、現地調査、サンプル採取、及び関連した文献調査を行い、岩種／反応性鉱物、ASTM C1260 促進モルタルバー法による膨張率、入手性、及び骨材としての物理的特性（泥分を含まない、粒度が適切等を外観観察により把握）を指標とし、産出する地域及び ASR 劣化事例を考慮して選定した。選定した骨材について、試験に用いる量の骨材を入手し、岩石学的試験を実施した。その結果、選定した急速膨張性骨材は ASR 反応性の高い鉱物（トリディマイト、クリストバライト、火山ガラス）を、また、遅延膨張性骨材は隠微晶質石英を含有していることを確認し、これらの骨材は、検証試験に用いる骨材として適すると判断した。

候補とした骨材から最終的に選定した骨材まで、選定理由と判断を含めて表 2.1 に骨材の選定結果を示す。

⁶ 三菱総合研究所、平成 26 年度高経年化技術評価高度化事業（コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究）成果報告書

表 2.1 骨材の選定結果

骨材種類	調査対象地域 *1	砕石場 記号	現地 調査 *2	サン プル 採取 *3	関連 文献 *3	岩種及び反応性鉱物(採取試料の観察および文献等調査)*4		ASTM C1260 選定試験*5 (14日膨張率)	入手性 *6	物理的 特性 *7	ASR事例 *8	選定理由／(不選定理由)
						岩種	主な反応性鉱物など					
急速	北海道	TO	○		[1][2]	安山岩	トリプティマイト	有害(0.43%)	○	○	あり	反応性が高い安山岩。現在もコンクリートに用いられている
	北海道	UB	○		[1]	ガラス質安山岩	火山ガラス		×	—	不明確	(入手不可。反応性が低いと推測)
	北海道	SK	○	○	[3]	堆積物(凝灰岩、安山岩、花崗岩、砂岩、チャートを含む)	オーナル、クリストハライト、隠微晶質石英		○	×	あり	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	東北	TN	○		[2]	変質安山岩	オーナル、クリストハライト、カルセドニー	有害(0.43%)	△	×	あり	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	北陸	GT	○	○	[4][5]	安山岩	火山ガラス、クリストハライト、トリプティマイト	有害(0.55%)	×	○	あり	(入手不可)
	北陸	SI	○	○	[4][5]	安山岩	クリストハライト、トリプティマイト、(スモグザイト)	有害(0.54%)	×	○	あり	(粒度調整、泥分除去が必要)
	北陸	WS	○	○	[4][5]	安山岩	クリストハライト、火山ガラス	有害(0.26%)	△	○	あり	北陸地方の反応性の代表的な安山岩。現在もコンクリートに用いられている
	北陸	SN	○	○		安山岩	火山ガラス		○	×	不明確	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	北陸	YK	○	○		安山岩(変質している)	火山ガラス、カルセドニー		○	×	不明確	(物理特性がコンクリート用骨材に適さない)
	北陸	JM	○	○		様々な岩種が混在	不明		○	×	不明確	(軟石を含む様々な岩種が混在し試験用骨材として不適)
遅延	四国	ST	○	○		安山岩	クリストハライト		×	—	不明確	(入手不可)
	中部	TT			[6]	チャート	隠微晶質石英、カルセドニー	無害(0.0%)	○	○	不明確	(カルセドニーを含有し、遅延膨張性としての試験に適さない)
	関東	WI	○	○		砂質ホルンフェルス	隠微晶質石英	有害(0.29%)	○	○	不明確	C1260で反応性確認。関東地方で使用されている。
	関東	MO	○	○		砂岩	不明	有害(0.30%)	△	○	不明確	(同上である。地域がWIと同じであり、入手性からWIを選定)
	中部	DO	○	○	[2]	砂質ホルンフェルス	隠微晶質石英	不明確(0.12%)	△	○	不明確	C1260の膨張率が高くない)
	四国	HE	○	○		砂質片岩	隠微晶質石英	有害(0.31%)	△	○	不明確	C1260で反応性確認。四国地方で使用されている。
	四国	YT	○			変成作用をほとんど受けていない砂岩、片岩、チャート類	不明		○	○	不明確	(変成作用を受けてなく、反応性は低いと推定)
	四国	DS	○	○		砂質片岩	不明	不明確(0.12%)	△	○	不明確	(C1260で反応性が低い)
	九州	GK	○	○		緑色片岩	隠微晶質石英	有害(0.22%)	△	○	あり	C1260で反応性確認。九州地方で使用されている。
	非反応性	九州	IO	○	○	[2]	石灰石	方解石	無害(0.08%)	○	○	なし*9

：選定した急速膨張性骨材2種類、遅延膨張性骨材3種類の合計5種類。岩石学的評価(偏光顕微鏡および粉末X線回折)、JIS化学法、JISモルタルパー法、AAR-2(ASTM C1260)、AAR-3、AAR-4の比較に用いる。

□□: 選定した5種類のうち、温度およびアルカリ量を変えたCPT試験に用いる急速膨張性骨材1種類、遅延膨張性骨材2種類

*1 調査対象とした、反応性を有すると考えられる骨材が産出する地域。→骨材選定においては、異なった地域であることに留意した。

*2 現地調査を行った採石場。IMおよびYTについては目視確認でASR試験に適さないと判断したためサンプル採取は行っていない。

*3 関連する既往の文献。ただし、文献では採石場の所在は特定されていない場合もある。

*4 選定した骨材の岩種および反応性鉱物は、今後実施する詳細岩石学的評価によって変わる可能性あり。斜体は文献情報を示す。

→骨材選定においては、急速膨張性骨材において反応性の高い鉱物を含むことを必須条件とした。また、なるべく異なった岩種／鉱物を有する骨材を選定した。

偏光顕微鏡観察で、隠微晶質石英を検知するには時間を要するため、比較的確認しやすい急速膨張性の反応性鉱物の検知を目的とした。

偏光顕微鏡で急速膨張性の反応性鋳物が認められず、かつASTM C1260で有害判定となった骨材には、遅延膨張性の反応性鋳物(隠微晶質石英等)が含まれる可能性がある判断した。

*5 斜体は文献情報を示す。選定した骨材については別途試験を行う予定。→骨材選定においては、主に遅延膨張性骨材の判断基準とした。

*6 ○:日本で多く生産され、現在でもコンクリート用骨材あるいは路盤用骨材として生産されている。→骨材選定においては、○を優先し、△でも可とした。

△：特定の事業者のみが取扱っている、採掘場所によって反応性鉱物が偏在する可能性がある、輸送が困難、あるいは、産出する骨材の粒度特性から

×：閉掘等により入手できない

*7 ○:コンクリート用骨材に求められる物理的特性を有すると考えられるもの(物理的特性の判断:外観観察により、泥分を含まない、粒度が適切等)→骨材選定においては、○を必須条件とした。

×:コンクリート用骨材に求められる物理的特性を有しないと考えられるもの

一:不明

*8 あり:近隣に多数のASR劣化構造物が見られる、あるいは明らかに産出地の骨材を用いたコンクリートにASRが生じている。

不明確：骨材の産出場所特定はできないが近隣にASR劣化構造物が認められる。

なし: ASR劣化構造物は稀、あるいは認められない。

→調査対象とした骨材が反応性を有するかどうかの妥当性を示すものであり、骨材選定の判断基準には用いず、留意事項とした。

*9 石灰石および他の岩種を組み合わせるコンクリートに用いる場合、他の岩種がASRを生じ、構造物に劣化が生じる可能性あり

＜選定での判断基準＞

- ・急速膨張性骨材は、反応性の高い鉱物を含むこと
- ・遅延膨張性は、ASTM C1260試験で反応性を有すること。
- ・ASR劣化事例報告・情報があること、あるいは、近隣構造物にASRが発生していること
- ・特定の地域、岩種に偏らないこと
- ・現在でも入手することが可能であり、コンクリート用骨材としての物理的特性を有していること

<文献>

- [1] 川端謙一他, 岩石学的分析に基づいた安山岩のASR反応性評価および膨張挙動解析, 土木学会論文集E, Vol.64, No.4, pp.689-703, 2007
- [2] 佐川康貴他, コングリテータリズムを用いた60℃加熱養生によるアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, コングリート学年次論文集, No.35, No.1, pp.1120-1125, 2014
- [3] 井上祐一郎他, ベシム現象を生じ得る材料を用いたモルタルのフライアッシュによるASR抑制効果, コングリート学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.953-958, 2010
- [4] 山戸博他, 他, 石川県産骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, コングリート学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1257-1262, 2007
- [5] 広野真一他, ASTM C1260によるフライアッシュ含有モルタルの安山岩に対するASR抑制効果の評価, 材料、Vol.62, No.498-503, pp.498-503, 2014
- [6] 山田一夫, 他, 原力施設におけるアルカリ骨材反応の考察, セメントコンクリート論文集, 2014(印刷中)

選定候補となる得る

- : 選定候補となる得るが優先度が低い

: 選定候補として除外する

2. 2 試験用骨材の選定・入手

2. 2. 1 目的

反応性骨材は日本各地に分布し、骨材に含まれる反応性鉱物によって反応速度が異なる。反応性骨材を対象にした骨材の ASR 評価方法を整備する必要性があり、反応性の高い鉱物を含み急速膨張を示すと考えられる骨材（急速膨張性骨材）と、微晶質石英や隠微晶質石英を含有しゆっくり反応すると考えられる骨材（遅延膨張性骨材）を検証試験に用いる骨材として、選定・入手することとした。

なお、国内における骨材の ASR 反応性を評価するため、その代表性を考慮して選定・入手したが、全国には様々な反応性鉱物を含む岩種があるため、必ずしもすべての骨材が適合するものではないことに留意する必要がある。

2. 2. 2 骨材の選定

ASR 反応性に関する各種試験は、コンクリートによる試験を含むため、骨材の量として数百 kg～1t 程度必要となり、候補地からこの量の骨材を一度に入手することは効率的ではない。そこで、試験用骨材の選定は、以下の手順により行った。

- ① 候補地の検討
- ② 現地調査及びサンプル採取
- ③ ASR 反応性の確認
- ④ 試験用骨材の選定

①候補地の検討では、ASR 反応性を示すと考えられる岩石の全国分布、産地に関する情報が記載されている文献、ASR 研究に関わる大学等へのヒアリング情報から 20 箇所を候補地として挙げた。

②現地調査及びサンプル採取では、①で挙げた候補地について現地調査を行い、骨材サンプルとして 14 種類の骨材を採取した。また、現地調査では、地質図及び航空写真から ASR 反応性と入手の可能性を検討した上で採石場を訪問、骨材の生産状況及び生産されている骨材の目視による確認、採石場近隣の構造物の ASR 発生状況を調査した。特に、岩石の地質的産状から考え、採石が産出場所の平均的な性質を代表されることを確認することとした。また、骨材の入手性や物理的特性（泥分を含まない、粒度が適切等）を含め、試験に適するか否かについても確認した。

③ASR 反応性の確認では、候補としてサンプル採取した急速膨張性骨材は、偏光顕微鏡観察によりトリディマイト、クリストバライト、火山ガラスなど反応性鉱物が含まれていることを確認した。また、遅延膨張性骨材は、ASTM C1260⁷による促進モルタルバー法で ASR 反応性を有することを確認した。

⁷ ASTM C 1260 : “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)”, ASTM(American Society for Testing Materials)で規定される、骨材の潜在的アルカリ反応性を検出するための試験方法であり、モルタルバーを用いた促進試験。

④試験用骨材の選定では、①～③の結果から、以下の判断に基づいて行った。

- ・急速膨張性骨材は、反応性鉱物として、トリディマイト、クリストバライト、火山ガラスなど、採取したサンプルの偏光顕微鏡観察による含有鉱物の確認によって ASR 反応性の高い鉱物を含むこと
- ・遅延膨張性骨材は、偏光顕微鏡観察による含有鉱物の確認によって急速膨張性を示す鉱物を含まないこと、かつ ASTM C1260 試験で反応性を有すること。
これは、偏光顕微鏡観察で、隠微晶質石英を検知するには時間を要するため、比較的確認しやすい急速膨張性の反応性鉱物が検知されず、かつ ASTM C1260 で有害判定となった骨材には、遅延膨張性の反応性鉱物（隠微晶質石英）が含まれる可能性が高いと判断した。
- ・非反応性骨材は、偏光顕微鏡観察による含有鉱物の確認によって反応性鉱物を含まないこと
- ・入手することが可能であり、コンクリート用骨材としての物理的特性を有していること
- ・特定の地域、岩種に偏らないこと

なお、現地調査における近隣構造物の ASR 劣化事例については、明らかに現地から産出する骨材を用いていると判断される場合もあるが、不明確な場合もあることから、参考情報とした。

急速膨張性骨材の選定は、反応性鉱物を含有することに加え、骨材の入手性、物理的特性を考慮し、骨材 T0 と骨材 SI の 2 種類とした。また、遅延膨張性骨材は、サンプル採取段階の骨材を用いた偏光顕微鏡観察で隠微晶質石英が確認されたものもあったが、最終的には「2. 3 試験用骨材の岩石学的試験」の偏光顕微鏡観察で隠微晶質石英の含有を確認した。ASTM C1260 の試験結果から、骨材 WI、骨材 MO、骨材 HE 及び骨材 GK の 4 つは何れも有害判定となり候補になり得たが、骨材 WI と骨材 MO は、採石場は異なるが何れも同地域であるため、入手性のよい骨材 WI を選定することとし、結果として、骨材 WI、骨材 HE 及び骨材 GK の 3 種類とした。

2. 2. 3 骨材の入手

選定した以下の 5 種類の反応性骨材及び 1 種類の非反応性骨材は、コンクリート試験に用いるために各々数百 kg～1t を調達した。

急速膨張性骨材：骨材 T0（北海道）、骨材 SI（北陸）

遅延膨張性骨材：骨材 WI（関東）、骨材 HE（四国）、骨材 GK（九州）

非反応性骨材：骨材 IO（九州）

2. 3 試験用骨材の岩石学的試験

2. 3. 1 目的

ASR 反応性を考察する上で岩種及び含有鉱物を明らかとしておく必要がある。また、試験に使用する骨材の岩石学的な特徴を確認する必要がある。試験用骨材として調達した反応性骨材 5 種類（急速膨張性 2 種類、遅延膨張性 3 種類）及び非反応性骨材について、偏光顕微鏡観察による岩種及び構成鉱物の判定、粉末 X 線回折による鉱物組成分析、及び蛍光 X 線分析による化学組成の分析を行い、岩石学的特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 3. 2 方法

(1) 偏光顕微鏡観察

選定・入手した骨材の岩種及び反応性鉱物の同定を目的として、偏光顕微鏡観察を実施した。各骨材から、厚さ 15-20 μm 程度の薄片を作製し、偏光顕微鏡で観察した。

(2) 粉末 X 線回折

反応性鉱物の検出を目的として、粉末 X 線回折を実施した。測定試料は、各試料を粗粉碎、縮分し、めのう乳鉢を用いて指頭に粒を感じなくなるまで微粉化したものを用いた。測定装置はスペクトリス社製粉末 X 線回折装置 (X' Pert PRO MPD) を使用した。測定条件は、管球 Cu、入射側発散スリット 1° 、入射側散乱防止スリット 2° 、受光側散乱防止スリット 5.5 mm、管電流 40 mA、管電圧 45 kV、スキャン角度 $2\theta = 5 \sim 60^\circ$ 、スキンスピード $5^\circ/\text{min}$ 、サンプリング間隔 0.03° とした。

(3) 蛍光 X 線分析

化学組成分析を目的として、蛍光 X 線分析を実施した。測定試料は、 105°C にて乾燥後、ディスク型ミルにて微粉碎したものをを用いた。測定装置は、(株)リガク社製の蛍光 X 線分析装置 (ZSX primus II) を使用した。

2. 3. 3 結果

(1) 偏光顕微鏡観察

偏光顕微鏡観察の結果、入手した各骨材の岩種及び認められた鉱物を表 2.2 に示す。選定した骨材は、反応性鉱物として、急速膨張性骨材には、トリディマイト、クリストバライト、火山ガラスなど、ASR 反応性の高い鉱物を含有していた。また、遅延膨張性骨材は、何れもゆっくり反応する隠微晶質石英を含有していた。なお、非反応性骨材として選定した骨材 IO は、ASR に対して非反応性であることを確認した。

表 2.2 偏光顕微鏡観察結果

試料名	岩種	主要な構成鉱物※ ¹	反応性鉱物
骨材 T0（北海道）	安山岩	斜長石、単斜輝石、斜方輝石、かんらん石、ホルンブレンド、トリディマイト、不透明鉱物、石英	トリディマイト※ ²
骨材 SI（北陸）	安山岩	斜長石、単斜輝石、斜方輝石、クリストバライト、石英、不透明鉱物、スメクタイト、火山ガラス、その他の粘土鉱物	クリストバライト※ ³ 火山ガラス※ ⁴
骨材 WI（関東）	砂質ホルンフェルス	石英、隠微晶質石英、黒雲母、白雲母、石墨	隠微晶質石英※ ⁵
骨材 HE（四国）	砂質片岩	石英、隠微晶質石英、黒雲母、白雲母、石墨、ざくろ石	隠微晶質石英※ ⁵
骨材 GK（九州）	緑色片岩	緑泥石、曹長石、隠微晶質石英、緑レン石、方解石、石墨、スフェーン、石英	隠微晶質石英※ ⁵
骨材 I0（九州）	石灰岩	方解石	

注）※¹ 主要な構成鉱物は、概ね構成量比の多いものから順に記載してある。

※² トリディマイトは、高温で安定なシリカ鉱物であるが、安定領域よりはるかに低温でも石英に転移せず存在しているもので、熱力学的に不安定でASR反応性（急速膨張性）を示す。

※³ クリストバライトは、高温で安定なシリカ鉱物であるが、安定領域よりはるかに低温でも石英に転移せず存在しているもので、熱力学的に不安定でASR反応性（急速膨張性）を示す。

※⁴ 火山ガラスは、マグマが急冷されたため結晶化することなく固化したもので、SiO₄四面体の結合が不規則で弱いため不安定であり、シリカ分が高い場合はASR反応性を示す。ガラスは鉱物ではないが構成成分として示してある。

※⁵ 隠微晶質石英は偏光顕微鏡下で個々の粒子が識別不可能なほど細粒な組織を指す。隠微晶質な結晶粒子は非常に微細で表面積が大きく、また結晶度が低いため、それが石英であればASR反応性（遅延膨張性）を示す。

（２） 粉末 X 線回折

粉末 X 線回折による検出鉱物の一覧を表 2.3 に示す。

反応性鉱物として、骨材 T0（急速）にはトリディマイト、骨材 SI（急速）にはクリストバライトが検出された。これらの結果は、偏光顕微鏡観察の結果と一致した。なお、(1)項の偏光顕微鏡観察では、骨材 WI（遅延）、骨材 HE（遅延）及び骨材 GK（遅延）に ASR 反応性の隠微晶質石英が認められたことから、これら骨材の粉末 X 線回折で検出された石英には、ASR 反応性の隠微晶質石英も含まれると考えられる。

なお、非反応性骨材として選定した骨材 I0 は、含有量は低いけどロマイト及び石墨が検出されたが、何れも ASR に対して非反応性である。

表 2.3 粉末 X 線回折による検出鉱物の一覧

試料名 \ 検出 鉱物	ASR 反応性鉱物		斜長石	石英	カリ長石	輝石	角閃石	雲母	緑泥石	緑 レン石	方解石	ドロ マイト	石墨
	トリ デイ マイト	クリ スト バ ライ ト ※1											
骨材T0（急速）	○	—	◎	△	△	△	—	—	—	—	—	—	—
骨材SI（急速）	—	△	◎	△	—	△	—	—	—	—	—	—	—
骨材WI（遅延）	—	—	○	◎	△	—	—	○	—	—	—	—	—
骨材HE（遅延）	—	—	○	◎	—	—	—	○	△	—	—	—	—
骨材GK（遅延）	—	—	○	◎	—	—	△	△	○	△	△	—	—
骨材I0（非反応性）	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	◎	△	△

注) 表中の記号は、最強ピークの回折強度に応じた表記 (◎:40,000Counts 以上、○:40,000~20,000Counts、△:20,000Counts 未満、—:検出せず)

※1 : クリストバライトの最強ピーク ($2\theta=22^\circ$ 付近) は、斜長石のピークと重複した位置にあるため、斜長石のピークのうち 22° とほぼ同等の強度を有する 24° 付近のピークと 22° のピークの強度差を、クリストバライトの最強ピーク強度とした。

(3) 蛍光 X 線分析

蛍光 X 線分析による化学組成の分析結果を表 2.4 に示す。

一般的に、火成岩については、 SiO_2 含有量から 45%~52%が玄武岩、52~62%が安山岩、62%~70%がデイサイト、70%超が流紋岩とされる。安山岩と鑑定された骨材 T0 (60.38%) 及び骨材 SI (61.21%) は、 SiO_2 含有量からも安山岩の領域となった。また、骨材 I0（非反応性骨材）において、ig. loss（強熱減量）が他の骨材に比べ大きい値となった。これは、骨材 I0 の中に含まれる方解石（組成は炭酸カルシウム、 CaCO_3 ）が、 825°C 以上に加熱されると酸化カルシウム (CaO) と二酸化炭素 (CO_2) に分解される性質を有することから、二酸化炭素の放出に伴う質量減少である。

骨材 WI 及び骨材 HE は、偏光顕微鏡観察による主要な構成鉱物から、それぞれ砂質ホルンフェルス及び砂質片岩である。骨材 WI は石英の粒子を多く含み、その結果として、化学組成は SiO_2 含有率が 75%と高く、原岩が石英粒子に富む堆積岩であったと推定される。周辺の地質構造から花崗岩の貫入による熱変成を受けたホルンフェルスと考えられる。

骨材 GK は、偏光顕微鏡観察の結果から緑泥石を含む緑色片岩である。シリカ含有率が 58.4%であることから、広域変成作用を受けた片岩と考えられる。

表 2.4 蛍光 X 線分析による化学組成の分析結果

骨材名	ig.loss※	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
T0(急速)	0.30	60.38	15.99	8.00	7.22	3.26	0.00	2.61	1.55	0.65	0.10	0.16	100.22
SI(急速)	1.61	61.21	18.22	5.32	5.76	1.13	0.00	4.21	1.63	0.87	0.19	0.07	100.22
WI(遅延)	1.44	75.02	11.71	2.25	2.16	1.23	0.13	2.34	3.22	0.37	0.08	0.03	99.98
HE(遅延)	2.01	76.69	11.11	3.70	0.83	1.05	0.10	1.91	2.02	0.37	0.07	0.27	100.13
GK(遅延)	6.59	58.43	12.81	6.50	7.88	2.54	0.00	3.18	1.26	0.72	0.13	0.16	100.20
I0(非反応性)	43.64	0.46	0.18	0.12	54.88	0.60	0.01	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	99.95

注) 1050℃、1 時間強熱における減量値

(単位: mass%)

2. 3. 4 考察

偏光顕微鏡観察の結果から、急速膨張性として選定した 2 種類の骨材は、何れも安山岩であり、高い ASR 反応性を有する鉱物として、骨材 SI はクリストバライト及び火山ガラスで、骨材 T0 はトリディマイトであることを確認した。また、粉末 X 線回折では火山ガラスは検出できないが、これら骨材が、それぞれクリストバライト及びトリディマイトを含有することを確認した。選定した急速膨張性骨材は、反応性鉱物以外の鉱物も含有することから、試験における多様性という観点からも、これらの骨材は、検証試験に用いる骨材として適すると考えられる。

遅延膨張性として選定した 3 種類の骨材は、骨材 WI が砂質ホルンフェルス、骨材 HE が砂質片岩、骨材 GK が緑色片岩であり、原岩の種類や変成作用が異なるものであった。また、何れも反応性鉱物として遅延膨張性を示す隠微晶質石英を含有していることを確認した。したがって、選定した 3 種類の骨材は、検証試験に用いる骨材として適すると考えた。

一方、非反応性骨材として選定した骨材 I0 は、方解石からなる石灰岩であり、反応性鉱物を含有しないことから、ASR 反応性はないと考えた。

2. 4 まとめ

2. 4. 1 試験用骨材の選定・入手

試験に用いる骨材として適すると考えられる骨材を選定し、入手した。選定は、以下の手順で行った。

- ① 日本における反応性骨材の状況、既往の文献等から 20 箇所の候補地を選択
- ② 15 箇所の現地調査と 14 種類のサンプル採取
- ③ サンプル採取した骨材の ASR 反応性を評価するため、偏光顕微鏡を用いた反応性鉱物の確認、及び ASTM C1260 試験による膨張率の確認

結果として、急速膨張性骨材 2 種類、遅延膨張性骨材 3 種類、及び非反応性骨材 1 種類を選定し、ASR 反応性の試験に用いることができる量の各骨材を入手した。

2. 4. 2 試験用骨材の岩石学的試験

入手した骨材の岩石学的特徴を表 2.5 に示す。入手した骨材に対して、岩石学的試験を行った結果、以下の特徴を有するものであった

- ・急速膨張性骨材は、何れも安山岩で ASR 反応性の高いクリストバライト、トリディマイト、火山ガラスを含む
- ・遅延膨張性骨材は、砂質ホルンフェルス、砂質片岩、緑色片岩であり、何れもゆっくり反応する隠微晶質石英を含む
- ・非反応性骨材は石灰岩であり反応性鉱物を含有しない

表 2.5 入手した骨材の岩石学的特徴

分類		試料名（地域）	岩石名	反応性鉱物	
反応性 骨材	急速	骨材 T0（北海道）	安山岩	トリディマイト	
	膨張性	骨材 SI（北陸）	安山岩	クリストバライト、火山ガラス	
		遅延 膨張性	骨材 WI（関東）	砂質ホルンフェルス	隠微晶質石英
			骨材 HE（四国）	砂質片岩	隠微晶質石英
			骨材 GK（九州）	緑色片岩	隠微晶質石英
非反応性骨材		骨材 IO（九州）	石灰岩	（含有しない）	

3. ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法

3. 1 実施概要

選定した急速膨張性骨材及び遅延膨張性骨材を用いて、国内の試験方法及び海外の試験方法を比較、評価した。

また、RILEM AAR-3、AAR-4 及び JASS 5N T-603 などの CPT を実施し、各種要因（骨材種類、温度、アルカリ量）が CPT の膨張挙動に与える影響を評価するため、以下の項目を実施した。

- ・ 温度及びアルカリ濃度依存性
- ・ アルカリラッピングの効果
- ・ JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 の比較
- ・ フライアッシュの置換効果

これらの結果から、JNES フローを国内の骨材を対象に実施することを前提に検証し、骨材の ASR 試験フローを提案した。

3. 2 国内外の骨材試験方法の比較

3. 2. 1 目的

骨材試験方法の検証試験として、入手した骨材を用いて、従来から行われている国内の試験方法と、最新知見に基づき JNES フローで提案されている海外の試験方法を比較し、急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材に対する有効性を確認することを目的とする。

3. 2. 2 方法

骨材試験方法の検証試験を行った各骨材試験の実施要領を以下に記す。また、骨材試験方法の特徴と課題を表 3.1 に示す。

表 3.1 骨材試験方法の特徴と課題

	試験概要	特徴	課題
JIS 化学法 ⁸	骨材を 150～300 μm に粒度調整し 80℃1N-NaOH 溶液に 24 時間浸漬	モルタルバー法よりも早期に結果が得られる。	・急速膨張性骨材に適するが、遅延膨張性骨材には適さない。
JIS モルタルバー法 ⁹	モルタルバー (40×40×160mm) 40℃、湿空養生 促進養生 6 ヶ月で判定	日本ではより信頼性の高い方法とされ、化学法と判定結果が異なる場合は、モルタルバー法の結果を優先する。	・急速膨張性骨材に適するが、遅延膨張性骨材には適さない。 ・ペシマム現象を検出できない。
RILEM AAR-2 ¹⁰ (ASTM C1260 相当)	モルタルバー (25×25×285mm) 80℃1N-NaOH 溶液に浸漬 促進養生 14 日で判定 (AAR-2 は ASTM C1260 とほぼ同等の試験方法である)	早期 (14 日) に結果が得られる。	・促進条件が厳しく、多くの骨材が反応性となる。 ・ペシマム現象を検出できない。 ・チャート、フリントは検出できない。 ・用いる試料の粒度、試験体サイズに選択枝があるが、その評価が明確となっていない。 ・試験の詳細が規定されていない
RILEM AAR-3 ¹⁰	コンクリートプリズム (75×75×250mm) 38℃湿空養生 アルカリ量: 5.5kg/m ³ 促進養生 52 週で判定	室内試験としては最も信頼されている。	・判定に 1 年要する (混合材を含む、材齢 1 年でも膨張が継続している条件では 2 年を推奨) ・試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。 ・骨材試験であり、試験におけるコンクリート調合が国内で用いられている調合と比べて、単位水量が多い。
RILEM AAR-4 ¹⁰	コンクリートプリズム (75×75×250mm) 60℃湿空養生で工夫された養生層／容器を使用 アルカリ量: 5.5kg/m ³ 促進養生 15 週で判定	温度を 60℃に高めて膨張を促進する。 試験期間は 15 週。 (2015 年発刊の RILEM 正式版で 20 週を 15 週に短縮)	・試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題がある。 ・骨材試験であり、試験におけるコンクリート調合が国内で用いられている調合と比べて、単位水量が多い。
JASS 5N T-603 ¹¹	コンクリートプリズム (100×100×400mm) 40℃水ラッピング養生 3 段階のアルカリ量 (実調合に 1.2、1.8、2.4kg/m ³ のアルカリを添加) としアルカリ限界量を推定 促進養生 6 ヶ月で判定	骨材試験ではなく実調合を用いた試験方法。 試験体サイズが 10x10x40cm と RILEM AAR-3、4 よりも大きい。 推定アルカリ限界量から ASR 反応性を判断。	・同様の温度の RILEM AAR-3 が 1～2 年であるのに対し試験期間が 6 ヶ月と短く、また、現在の市販セメントを用いた場合にアルカリ量が最大でも 4～5kg/m ³ であり、促進条件が緩く遅延膨張性骨材が検出できない可能性がある。

アルカリ量：コンクリート 1m³ あたりのアルカリ量⁸ JIS 化学法：JIS A 1145 “骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）”⁹ JIS モルタルバー法：JIS A 1146 “骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）”¹⁰ P.J.Nixon, I.Sims, Editors：RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer 1st ed. (2015)¹¹ 日本建築学会：“JASS 5N T-603 コンクリートの反応性試験方法”，建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，pp. 446-457 (2013)

(1) JIS 化学法

JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）」は、150～300 μm に粒度を調整した骨材を $80\pm 1^\circ\text{C}$ 、1N の NaOH 水溶液中に 24 時間浸漬し、骨材から NaOH 溶液中に溶出した SiO_2 の量（溶解シリカ量：Sc）と、試験中の NaOH 水溶液中のアルカリ濃度の低下量（アルカリ濃度減少量：Rc）を測定し、これらの値から骨材の有害性を判定する。JIS 化学法は、短時間で結果が得られるため、広く用いられているが、同一産地の骨材であっても試験結果に大きなバラツキが生じること¹²、遅延膨張性骨材の検出ができないこと¹³等の課題が指摘されている。

(2) JIS モルタルバー法

JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」は、セメントの等価アルカリ量 $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ が 1.2%になるように、NaOH を添加したモルタル試験体（ $4\times 4\times 16\text{cm}$ ）を、貯蔵容器（温度 $40\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 95%以上）中に保存する方法である。

JIS 規格では、26 週後の平均膨張率が 0.100%未満の場合は「無害」、0.100%以上の場合（もしくは 13 週で 0.050%以上の場合）には「無害でない」と判定する。

なお、この試験方法は、隠微晶質石英が含まれる遅延膨張性骨材を検出できないこと、反応性の高い骨材のペシマム現象¹⁴を考慮できないこと等の問題点が挙げられている¹³。

(3) RILEM AAR-2 (ASTM C1260 相当)

ASTM C1260 は、RILEM AAR-2「Detection of potential alkali-reactivity - Accelerated mortar-bar test method for aggregates」¹⁰と同様の試験方法であり、温度 80°C の 1N の NaOH 水溶液中にモルタル試験体（ $25\times 25\times 285\text{mm}$ ）を浸漬させる。モルタルの配合は、質量比でセメント 1、水 0.47、細骨材 2.25 とする。判定基準は促進養生材齢 14 日間の膨張率で定められ、0.1%以下を「無害」、0.1～0.2%を「不明瞭」、0.2%以上を「有害」と判定する。

ASTM C1260 では試験条件や手順等が詳細に規定されているのに対し、RILEM AAR-2 では詳細な記述がない。試験方法の細部が試験結果に与える影響が懸念されたため、ASTM C1260 に準じて実施した。

(4) RILEM AAR-3 及び AAR-4

¹² 社団法人日本コンクリート工学協会：“作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書”，pp. 87-96（2008）

¹³ 社団法人日本コンクリート工学会：“ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書”，pp. 272-284（2014）

¹⁴ ペシマム現象：ASR では、反応性骨材単体で用いた場合よりも、反応性骨材と非反応性骨材をある割合で混合して用いた場合に膨張量が大きくなる場合がある。このように最悪（ペシマム）値をとる割合が存在する現象を、ペシマム現象という。

RILEM AAR-3「Detection of potential alkali-reactivity - 38°C test method for aggregate combinations using concrete prisms」¹⁰は、CPTであり、75×75×250mmの試験体を用い、底部に水を張った養生容器に試験体を入れ、38±2°Cの恒温槽内で養生を行う方法である。コンクリート中のアルカリ量は5.5kg/m³、促進材齢12ヶ月(52週)における膨張率0.05%以上で潜在的膨張性ありと判定される。

RILEM AAR-4.1「Detection of potential alkali-reactivity - 60°C test method for aggregate combinations using concrete prisms」¹⁰は、AAR-3と同様に、75×75×250mmの試験体を用い、コンクリート中のアルカリ量を5.5kg/m³とする試験方法であるが、促進養生温度は60±2°Cである点、養生期間中の試験体の乾燥に配慮して、底部に水を張ったステンレス製容器を用い、さらにステンレス製容器を加湿した飽和湿度恒温槽を用いて促進養生を行う点が異なる。判定は促進養生15週における膨張率0.03%を超える場合は潜在的膨張性ありと判定される。

なお、これらRILEM AAR-3及びAAR-4は、表3.1で示した課題があるため、以下に示すように試験方法を一部変更した。

① 調合

RILEM AAR-3及びAAR-4は骨材試験であり、調合試験ではない。RILEMの調合条件は、現在、日本における標準的な調合とかけ離れ、さらに、骨材の粒度分布（ふるい呼び寸法）も異なり、日本での実施は現実的ではない。そこで、調合は、日本における標準的な調合とし、また、骨材粒度規定（JIS A 5308 付属書A「レディーミクストコンクリート用骨材」）を考慮し、以下の通りとした。

単位水量：160 kg/m³（RILEM記載値：220kg/m³）

単位セメント量：320 kg/m³（RILEM記載値：440kg/m³）

細骨材率(s/a)：45%（RILEM記載値：粗骨材(4-22.4mm)：細骨材(0-4mm)=60%：40%）

粗骨材粒度分布：20-10mm：10-5mm = 6：4

細骨材粒度分布：JIS規定値

試験に用いた骨材の物性値を表3.2に示す。これらの結果は、JIA A 5308のレディーミクストコンクリート用骨材に示される物性値を満足するものである。

表3.2 使用骨材の物性値

分類	骨材	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/L)	実積率 (%)	粗粒率	微粒 分量 (%)
反応性*	T0 (急速)	2.69	2.65	1.52	1.60	60.4	6.61	—
	SI (急速)	2.62	2.58	1.59	1.53	59.3	6.61	—
	WI (遅延)	2.64	2.62	0.82	1.58	60.1	6.59	—
	HE (遅延)	2.70	2.68	0.52	1.60	59.7	6.68	—
	GK (遅延)	2.73	2.71	0.81	1.63	60.0	7.05	—
非 反応性	IO(粗骨材)	2.71	2.70	0.22	1.56	57.8	6.67	—
	IO(細骨材)	2.63	2.59	1.74	1.85	71.4	2.91	8.4

*：反応性骨材はすべて粗骨材

調合における骨材の使用率は、急速膨張性骨材の場合のペシマム現象を考慮して¹⁵急速膨張性粗骨材 30vol%+非反応性粗骨材（石灰石）70vol%とした。また、遅延膨張性骨材の場合は非反応性粗骨材を用いず 100vol%とした。なお、細骨材は何れの水準の調合でも非反応性細骨材（石灰石）を使用した。試験に用いたコンクリートの調合を表 3.3 に示す。なお、骨材を除くコンクリート中のアルカリ量が Na₂O 換算 (Na₂O_{eq}) で 5.5kg/m³ となるように水酸化ナトリウム水溶液を用いて、練混ぜ水に添加して調整した。コンクリートの調合を表 3.3 に、コンクリートのフレッシュ性状を表 3.4 に示す。

表 3.3 コンクリートの調合

骨材 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤量 減水剤 ^{※2} (C×%)	
			水 (W)	セメント ^{※1} (C)	細骨材 (S)	粗骨材(G)		
						反応性		非反応性
T0(急速)	50.0	45.0	160	320	821	309	724	1.45
SI(急速)						306	724	
WI(遅延)						1007	—	
HE(遅延)						1030	—	
GK(遅延)						1042	—	

注) ※1：セメントは、普通ポルトランドセメント (R₂O=0.55%) を使用。

※2：減水剤は、マスターボゾリス No. 70 を使用。4 倍希釈液としての添加率を表示。

その他：目標空気量 4.5±1.5%となるように空気量調整剤としてマスターエア 404 を使用

表 3.4 コンクリートのフレッシュ性状

骨材 種類	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	C. T. * (℃)
T0(急速)	16.5	4.2	20
SI(急速)	14.5	4.2	21
WI(遅延)	15.5	4.0	20
HE(遅延)	15.0	4.6	20
GK(遅延)	17.5	3.5	21

*：C. T. はコンクリートの練り上がり温度

② 使用セメント

セメントは JIS R 5201「ポルトランドセメント」に規定される普通ポルトランドセメントを使用した。使用したセメントの蛍光 X 線分析による化学組成を表 3.5 示す。セメントのアルカリ量（以下、「R₂O」という。Na₂O 及び K₂O の値から Na₂O_{eq}(Na₂O 換算)値で示す。）は、0.55mass% (Na₂O 0.34%+0.658×K₂O 0.33%) であった。

(0.658 は、Na₂O (62) / K₂O (94.2)である。()は分子量)

¹⁵井上祐一郎，濱田秀則，川端雄一郎，山田一夫：“ペシマム現象を生じる骨材を用いたモルタルのフライアッシュによる ASR 抑制効果”，コンクリート工学年次論文集，32 巻，No. 1, pp. 953-958 (2010)

表 3.5 セメントの化学組成

ig. loss※	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
2.32	20.53	5.13	3.02	64.24	0.91	2.12	0.34	0.33	0.28	0.43	0.09	99.74

注) ※：975℃、1 時間強熱における減量値

(単位：mass%)

③ アルカリラッピング

RILEM AAR-3 及び AAR-4 は、試験体の湿分保持とアルカリ溶脱に課題があり、試験期間中における水分の逸散とアルカリ溶脱の影響で、膨張を過小評価している可能性が指摘されている^{16, 17, 18}。そこで、アルカリ溶脱を抑制するため、アルカリラッピング（以下、「AW」という。）を採用した。AW は、アルカリ溶液を含ませた不織布を試験体に巻き、フィルムラッピングして養生する方法である¹⁹。AW の濃度（NaOH 濃度）は、公益社団法人日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」（2014 年 7 月）で示されている方法に準じて、1.5mol/l とした。

AW は、アルカリ溶脱を抑制し、アルカリ量を練混ぜ時と同等に保つ効果と、促進養生期間中における試験体の乾燥を抑制する効果が期待できる。なお、水分逸散を防ぎ安定した膨張を確保するために、JASS 5N T-603 では吸水紙に水を吸水させてラッピングする水ラッピング（以下、「WW」という。）が採用されている。

なお、以後の記載では AW を施していない試験には“AW なし”と表記した。

(5) 試験結果

JIS 化学法、JIS モルタルバー法、RILEM AAR-2 (ASTM C 1260 相当)、RILEM AAR-3 及び AAR-4 の結果と併せて、ASR 反応性に関する判定結果を表 3.6 に示す。表 3.6 において、RILEM AAR-3/AAR-4 は、最新の 2015 年に発刊された RILEM AAR 試験方法 (2015) の判定基準¹⁰を記した。なお、RILEM AAR-3/AAR-4 の各試験は AW を施した結果であるため、AW を行わない RILEM AAR-4 の結果も合わせて示す。

¹⁶ 井上祐一郎，佐川康貴，川端雄一郎：“コンクリートの ASR 促進膨張試験結果にアルカリ溶脱が及ぼす影響”，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部，65 巻，pp. 545-546 (2010)

¹⁷ Yamada, K et al: CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion, Construction and Building Materials, Vol.64, pp.184-191 (2014)

¹⁸ Jason H. Ideker et al: The current state of the accelerated concrete prism test, Cement and Concrete Research 40, pp. 550-555 (2010)

¹⁹ (社)日本コンクリート工学会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書，pp. 272-284 (2014)

表 3.6 ASR 反応性に関する判定結果の比較

試験方法	無害でない または有害判定 となる膨張率	急速膨張性骨材		遅延膨張性骨材		
		TO	SI	WI	HE	GK
JIS 化学法	—	無害でない	無害でない	無害でない	無害	無害
JIS モルタル バー法	材齢 26 週で 0.100%以上	無害でない (0.415%) ^{※1}	無害でない (0.216%) ^{※1}	無害 (0.038%) ^{※1}	無害 (0.059%) ^{※1}	無害 (0.022%) ^{※1}
RILEM AAR-2 (ASTM C1260 相当)	材齢 14 日で 0.2%以上	有害 (0.54%) ^{※2}	有害 (0.40%) ^{※2}	有害 (0.23%) ^{※2}	有害 (0.30%) ^{※2}	有害 (0.23%) ^{※2}
RILEM AAR-3 (AW)	材齢 52 週で 0.05%以上 ^{※5}	有害 (0.242%) ^{※3}	有害 (0.205%) ^{※3}	有害 (0.095%) ^{※3}	有害 (0.097%) ^{※3}	無害 (0.046%) ^{※3}
RILEM AAR-4 (AW)	材齢 15 週で 0.03%以上 ^{※5}	有害 (0.186%) ^{※4}	有害 (0.182%) ^{※4}	有害 (0.080%) ^{※4}	有害 (0.095%) ^{※4}	有害 (0.066%) ^{※4}
RILEM AAR-4 (AW なし)	材齢 15 週で 0.03%以上 ^{※5}	有害 (0.215%) ^{※4}	—	有害 (0.037%) ^{※4}	—	—

(注) 括弧書きの判定結果は、判定材齢前に基準値を超えた水準。

※1：JIS モルタルバー法の欄にある数値は、材齢 26 週における膨張率。

※2：ASTM C1260 の欄にある数値は、材齢 14 日（2 週）における膨張率。

※3：RILEM AAR-3 の欄にある数値は、材齢 1 年（52 週）における膨張率。

※4：RILEM AAR-4 の欄にある数値は、材齢 15 週における膨張率。

※5：RILEM AAR-3/AAR-4 は、最新の 2015 年発刊の RILEM AAR 試験法¹⁰の判定基準に従った。

3. 2. 3 考察

(1) JIS による判定

日本における ASR 抑制対策は、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートで定められ、以下の何れかの対策が講じられている。

a アルカリ総量規制

コンクリート中のアルカリ総量を 3.0kg/m³以下にする。

b 混合セメントの使用

高炉セメントまたはフライアッシュセメントを使用する。

c 安全と認められる骨材を使用

JIS 化学法または JIS モルタルバー法の結果で「無害」と確認された骨材を使用する。

表 3.6 の判定結果から、急速膨張性骨材は、JIS 化学法、JIS モルタルバー法を実施すれば、有害判定となり、現行の JIS においてこのような骨材を排除することが可能と考えられる。しかし、ASR 反応性の高い急速膨張性を有する骨材が少量含まれるような場合は、これら JIS の試験で無害判定となる可能性は否定できない。ASR 反応性の高い骨材はペシマムを有することがあり、石灰石骨材に対して 5%混入された場合にも膨張を生じることが知られている²⁰。例えば、骨材 TO の JIS モルタルバーの膨張率は約 0.4%

²⁰ 独立行政法人原子力安全基盤機構：“原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案”，pp. 25，付表Ⅱ-1（2014）

であり、この骨材を石灰石骨材に 5%混合させ、反応性骨材含有率が膨張率と比例関係にあると仮定すれば、推定される膨張率は 0.02%となり、判定基準である 0.1%を下回り、無害と判定される可能性がある。

一方、遅延膨張性として用いた 3 種類の骨材は、JIS 化学法では「無害でない」と判定された骨材もあったが（骨材 WI）、何れの遅延膨張性骨材も判定閾値に近い値を示したことから、これらの骨材は、同じ産地であったとしても、採取場所や採取時期、あるいはサンプリング方法の違いなどの条件によっては判定が分かれる可能性がある。しかし、これらの骨材は何れも JIS モルタルバー法で「無害」判定となったことから、JIS では安全と認められる骨材として使用可能となる。これら遅延膨張性骨材のうち、骨材 GK は、表 2.1「骨材の選定結果」の中の「ASR 事例^{*8}」に示した通り、採取地周辺の構造物に劣化事例が認められ、また骨材 HE は、劣化事例は確認されなかったが JIS による試験方法では、このような遅延膨張性骨材を排除できない可能性があると考えられる。

（２） RILEM AAR-2（ASTM C1260 相当）による判定

この方法は、モルタルバーを 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬し、浸漬から 14 日の膨張率で ASR 反応性を判定する方法である。また、温度及びアルカリ濃度が高いことで、遅延膨張性骨材に含まれる反応性鉱物である隠微晶質石英に対しても反応し、ASR 反応性を検出できると考えられており、遅延膨張性を含む、すべての骨材で有害判定となった。

一方、チャート、フリントなどの骨材は 1mol/l の NaOH 溶液への浸漬では骨材中の反応性鉱物が溶解し、この試験方法では膨張を生じないことが知られている^{21,22}。また、この試験方法は NaOH 溶液に浸漬する厳しい試験方法であり、RILEM では、骨材の ASR 反応性評価として、REILEM AAR-2 試験で反応性ありと判定された骨材に対して、さらに REILEM AAR-3 あるいは AAR-4 で反応性を確認する手順としている。これは、実際に ASR によるリスクが低い骨材までも反応性ありと判定してしまう可能性を示していると考えられる。また、2015 年に制定された BS 規格(British Standard, BS 8500-2:2015, Minimizing the risk of damaging alkali-silica reaction in concrete)では、AAR-2 に該当するような試験は要求されず、BS 812-123 に REILEM AAR-3 及び AAR-4 と同様の CPT が制定されている。

堆積岩系骨材の ASR 反応性に関する評価を行った既往の研究結果²²において、JIS 化学法(JIS A1145)、JIS モルタルバー法(JIS A1146)及び ASTM C1260 を比較した結果を抜粋し、表 3.7 に示す。堆積岩系骨材は、主に遅延膨張性を示す隠微晶質石英を含むものである。この表から、JIS 化学法(JIS A1145)及び JIS モルタルバー法(JIS A1146)の

²¹ 小石孝浩，小田聡，田中暁大，佐川康貴，山田一夫，小川彰一：“隠微晶質石英を含む骨材を用いたモルタル及びコンクリートのアルカリシリカ反応膨張挙動に関する研究”，平成 27 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，V-18（2016）

²² 蟹谷真生，山戸博晃，広野真一，鳥居和之：“遅延膨張型堆積岩系骨材のアルカリシリカ反応性の評価”，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 1, pp. 959-964（2011）

両者の結果から無害（JIS における ASR 反応性が認められない）と判定される骨材においても、ASTM C1260 の試験では有害となっている。また、チャート（骨材 D）は ASTM C1260 の判定結果で「不明確」となっており、ASTM C1260 の試験では検知できない可能性を示している。

表 3.7 堆積岩系骨材の ASR 反応性の判定結果²²

骨材	反応性鉱物の種類	化学法	モルタルバー法	
		JIS A1145	JIS A1146	ASTM C1260
砂岩	隠微晶質石英	無害	無害	有害
砂岩	不明（同定されず）	無害でない	無害	有害
頁岩	隠微晶質石液	無害でない	無害でない	有害
チャート	玉髄、隠微晶質石英、オパール	無害でない	無害でない	不明確
珪石	玉髄、隠微晶質石英	無害でない	無害	無害
川砂利	不明（同定されず）	無害	無害	有害

これらのことから、ASTM C1260（RILEM AAR-2 相当）の試験は、チャートなどの一部の骨材を除いて ASR 反応性を検知可能である。しかし、ASTM C1260 は厳しい試験方法であり、実際に ASR 反応性が無くとも有害判定となることは否定できない。

（３） RILEM AAR-3 及び AAR-4 による判定

① 判定

遅延膨張性の骨材 GK を用いた RILEM AAR-3 の判定結果のみ無害となったが、その他の骨材は何れも有害判定となった。また、骨材 GK は、RILEM AAR-3 では無害判定となったが、膨張率は 0.046%であった。これは、判定基準の閾値である材齢 52 週における膨張率 0.05%に近い値である。

RILEM AAR-3 では、疑わしい判定結果の場合には、さらに 1 年間測定を継続し膨張を確認することを推奨している。骨材 GK の膨張挙動は、図 3.1 に示すように、材齢 52 週以降さらに膨張が継続し、膨張率 0.05%を上回ることを確認した。このことから、試験で使用した 5 種類の骨材はすべて有害判定とみなしてもよいと考えられる。すなわち、JIS では検知できない遅延膨張性を有する骨材も含め RILEM AAR-3 または、AAR-4 で ASR 反応性を検知できると考えられる。

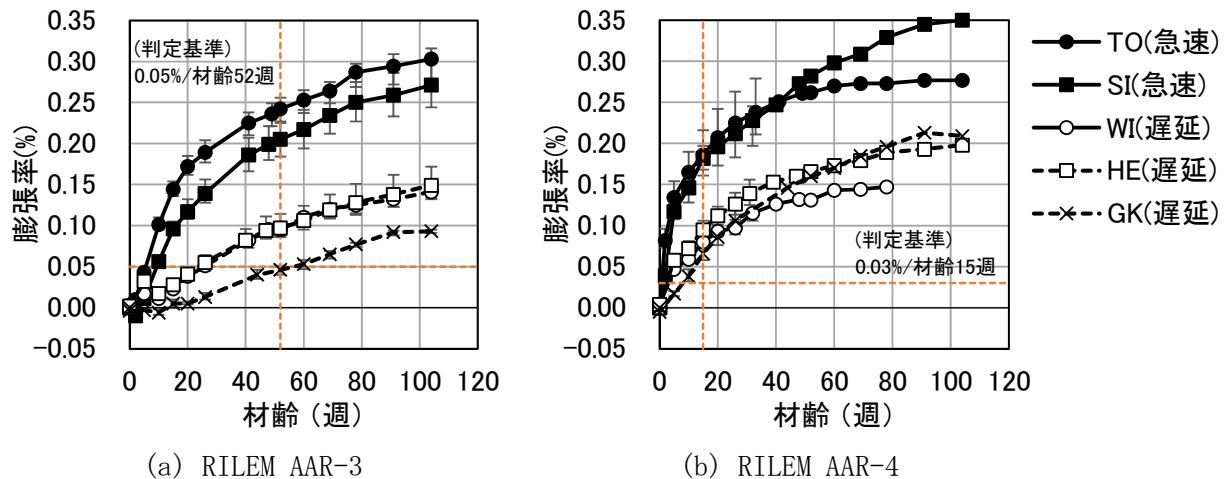


図 3.1 RILEM AAR-3 及び AAR-4 における膨張率の経時変化

② REILEM AAR-3 と AAR-4 との比較

REILEM AAR-3 の膨張の判定材齢は 1 年（膨張が継続している場合や不明瞭な場合は 2 年）であるのに対し、REILEM AAR-4 の判定材齢は 15 週と試験期間が短縮できる。試験結果については、REILEM AAR-3 において骨材 GK が材齢 1 年（52 週）で判定基準に近い膨張率を示したのに対し、REILEM AAR-4 では何れも判定基準を上回るものであった。これらのことから、REILEM AAR-4 は AAR-3 と比較して試験期間の短縮とともに、確実に判定できる可能性があると考えられる。

しかし、REILEM AAR-4 は 60℃で試験を行う方法であり、直射日光が当たるコンクリート表面ではこのような高温環境となることも考えられるが、通常環境におかれるコンクリートは 60℃となることは稀である。従って、このように高温促進環境で、しかも短い期間でのコンクリートの膨張率から、実構造物のコンクリートの ASR 反応性を判断することの妥当性については、実構造物あるいは暴露試験体等により、検証データを取得していく必要があると考える。

③ アルカリラッピングの効果

AAR-4 で AW の有無による影響を検討した。骨材 TO については、養生初期から大きく膨張し、AW の有無とも判定基準とした材齢 15 週での膨張率 0.03%を大きく越え、判定結果への影響はほとんどないと考えられる。これは、急速膨張性を有する骨材は 60℃環境において養生初期から膨張を生じるため、試験期間中におけるコンクリート試験体からのアルカリ溶脱の影響を受け難いことが要因として挙げられる。

また、遅延膨張性骨材 WI についても、AW の有無とも判定結果は有害となったが、AW ありは AW なしより膨張率が大きくなった。これは、急速膨張性を示す骨材とは異なりゆっくり膨張するため、AW により促進養生期間中のアルカリ溶脱、水分逸散が抑制されたためと考えられる。RILEM AAR-4 の方法は AW なしを前提としているが、AW なしで

は、遅延膨張性骨材はアルカリ溶脱、水分逸散の影響を受けやすいことを示しており、AWを施すことが望ましいと考えられる。

④ ペシマムの影響

遅延膨張性骨材はペシマム現象を示さないとされているため²⁰、粗骨材として100%の比率で用いたが、急速膨張性骨材は非反応性の石灰石に対してペシマムとなるよう30%の混合率とした。しかし RILEM AAR-3 及び AAR-4 は骨材試験を前提¹⁰としており、このようなペシマム調合ではない。

ペシマムには、反応性骨材と非反応性骨材の比率で生じるが、粒度分布によって ASR 反応性が異なる（粒径ペシマム）という課題もある。RILEM の骨材試験方法では、骨材は所定の粒度分布となるように粒度調整を行い、実際に用いるコンクリートでの粒度分布とは異なる課題もある。

⑤ その他

RILEM の骨材試験方法、あるいは、その考え方を導入することで、遅延膨張性を含め骨材の ASR 反応性（ポテンシャル）は評価可能と考えられる。しかし、前述の試験期間中の試験体の乾燥、アルカリ溶脱、ペシマムの課題から、骨材選定における骨材試験方法は、岩石学的試験や、とるべき対策（混合材の使用やアルカリ総量規制）と合わせて総合的に考慮し、試験方法における課題を改善して設定していく必要があると考える。

3. 3 骨材試験方法の検討

RILEM AAR-3 及び AAR-4 の CPT において、その有効性を確認するための基礎データの取得を目的に、各種要因（骨材種類、温度、アルカリ量）が CPT の膨張挙動に与える影響を評価した。

実施した試験は、コンクリートの ASR 膨張評価の CPT として、温度及びアルカリ濃度依存性、改善法としての AW の効果、既存の試験方法としての JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 の比較、及びフライアッシュの置換効果である。

3. 3. 1 温度及びアルカリ濃度依存性

（1） 目的

ASR の膨張ポテンシャルは、用いる骨材の性質と、温度、アルカリ濃度といった環境要因の影響を大きく受ける。有効な試験方法を選定する上で、ASR の膨張挙動が温度及びアルカリ量によってどのような影響を受けるか、その基礎データを取得することで ASR の膨張ポテンシャルを評価し、骨材試験方法としての CPT の適用性を確認する必要がある。アルカリ濃度依存性に関する試験は、現行の JASS 5N T-603 においても実施されているが、2015 年に発刊された RILEM の試験方法では、新たにアルカリ閾値の試験

方法が記載された (RILEM AAR-3.2¹⁰⁾)。アルカリ濃度依存性は、骨材の性質と環境要因の影響を受けるため、その関係を把握することが必要である。

また、ASR の膨張ポテンシャル評価は、膨張の将来予測の観点でも必要であり、その基礎データを集積することで、将来に起こりえる ASR 膨張を推定できると考えられる。

本項では、骨材種類、温度、アルカリ量が異なる試験体を用い、これらの要因が ASR の膨張挙動に与える影響を評価した。

(2) 方法

① 試験水準及びコンクリート調合

作製した CPT 用試験体の水準を表 3.8 に示す。試験水準は 3.2 項で実施した CPT (RILEM AAR-3 及び AAR-4) と一部重なる水準については、改めて試験は実施しなかった。

試験に用いた骨材は、3.2 項で用いた 5 種類の骨材のうち、急速膨張性骨材 1 種類 (骨材 T0)、遅延膨張性骨材 2 種類 (骨材 WI、骨材 HE) を選定した。選定理由は、骨材の産出地域が重ならないこと、岩種及び含有する反応性鉱物が異なること、ASR 反応性が高いこと及び骨材の入手性である。

アルカリ量の異なる CPT 用試験体 (75×75×250mm) を作製し、60℃の水準は REILEM AAR-4 の方法に準拠し、38℃の水準は REILEM AAR-3 の方法に準拠し、また、20℃の水準は、REILEM AAR-3 の方法において促進養生における温度のみ 20℃とした。

コンクリート調合は、表 3.3 に示す調合と同じであり、アルカリ量のみ異なる。フレッシュ性状の測定結果を表 3.9 に示す。

表 3.8 CPT 用試験体の水準

骨材 種類	アルカリ量 (kg/m ³)	温度(℃)		
		20	38	60
骨材 T0 (急速)	3.00	—	○	—
	4.25	—	○	—
	5.50	○	●	●
骨材 WI (遅延)	3.00	—	—	○
	4.25	—	○	○
	5.50	○	●	●
骨材 HE (遅延)	2.00		○	○
	3.00	—	○	○
	4.25	—	○	○
	5.50	○	●	●

●：RILEM AAR-3 及び AAR-4 として、3.2 項で実施

○：温度及びアルカリ量の影響確認試験の水準 (本項で実施)
試験体寸法は 75×75×250mm

表 3.9 フレッシュ性状の測定結果

骨材種類	アルカリ量 (kg/m ³)	フレッシュ性状		
		スランプ (cm)	空気量 (%)	C. T. ※ (°C)
骨材 T0 (急速)	3.00	17.0	4.0	20
	4.25	17.0	4.0	20
	5.50	16.5	4.2	20
骨材 WI (遅延)	3.00	17.5	4.5	20
	4.25	17.5	4.9	20
	5.50	15.5	4.0	20
骨材 HE (遅延)	2.00	17.5	4.6	20
	3.00	17.5	4.7	20
	4.25	17.5	4.9	20
	5.50	15.0	4.6	20

注) ※ : C. T. はコンクリートの練り上がり温度

② アルカリラッピングの濃度設定

試験はアルカリ量をパラメータとしたため、コンクリート中のアルカリ量に応じて、AW の濃度を設定することとした。これは、骨材と反応する液相のアルカリ濃度は、アルカリ量と比例するとの既往の知見²³があり、また、コンクリート細孔中のアルカリ濃度と AW のアルカリ濃度を近い値に設定することで、試験体のアルカリ濃度を一定に保つことができると考えられるためである。AW における NaOH 濃度は、日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会」に記載される、アルカリ量 5.5kg/m³の時の NaOH 濃度 1.5 mol/l に対し、アルカリ量に応じて比例計算で AW での NaOH 濃度を設定した (4.25kg/m³の場合は 1.16 mol/l、3.00kg/m³の場合は 0.818 mol/l)。AW は、使用した不織布 1 枚に対し、各濃度の NaOH 溶液 50g を含浸させ試験体を包み、さらにプラスチックフィルムでラップした。また、養生期間中の測定材齢に含浸量を確認し、50g に対して不足する質量分の水を補給した。

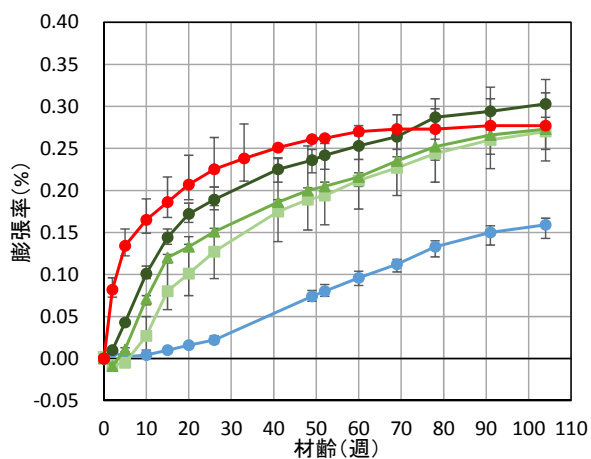
(3) 結果及び考察

骨材種類、温度、アルカリ量が異なる CPT の膨張率及び質量変化率を図 3.2 に示す。なお、図中の凡例は、骨材種類、温度、アルカリ量の順で示している。図 3.2 から、骨材種類、温度、アルカリ量によって膨張挙動及び質量変化挙動が異なることがわかる。つまり、急速膨張性骨材 (骨材 T0) は材齢の早い段階で急速に膨張し、また、膨張率も高いが、遅延膨張性骨材 (骨材 WI 及び骨材 HE) は急速膨張性骨材と比較して膨張はゆっくり生じ、また、試験期間における膨張率も低い傾向にあった。また、ほとんどの水準で、材齢とともに膨張速度は遅くなり、膨張率は飽和に達する傾向にあるが、温度及

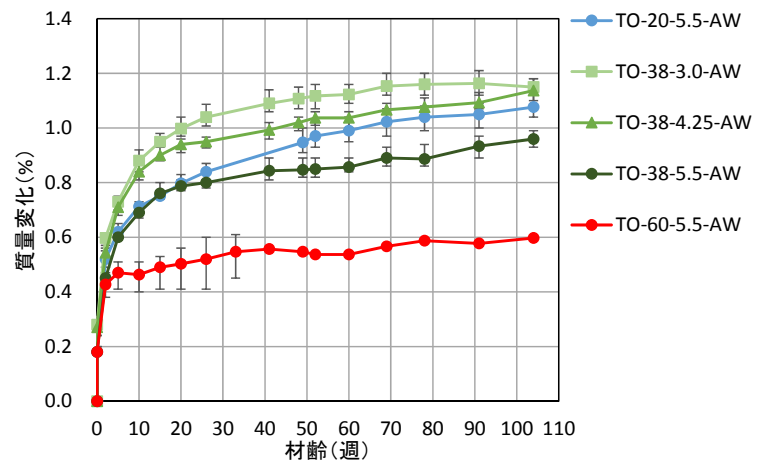
²³ 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: “セメント系材料により生成される水和物の相組成と ASR 膨張抑制効果の関係”, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 4 (2013)

びアルカリ量の条件によっては、骨材 T0-20-5.5-AW や、骨材 WI-38-4.25-AW のように、材齢 52 週を超えてもなお直線的に膨張が継続する水準もあった。

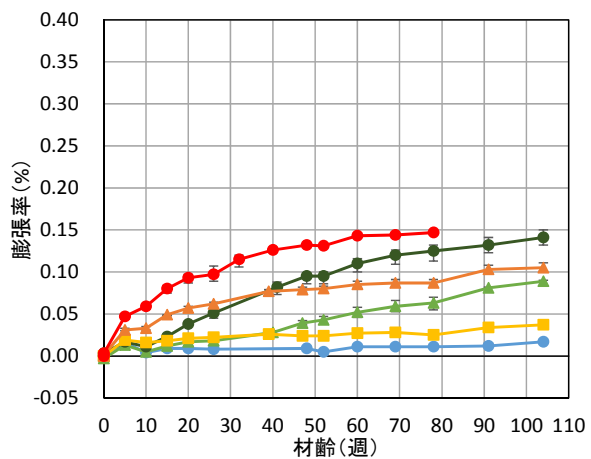
これらの膨張挙動及び質量変化挙動は、「3. 3. 5 CPT の膨張挙動の分析」で整理し、考察する。



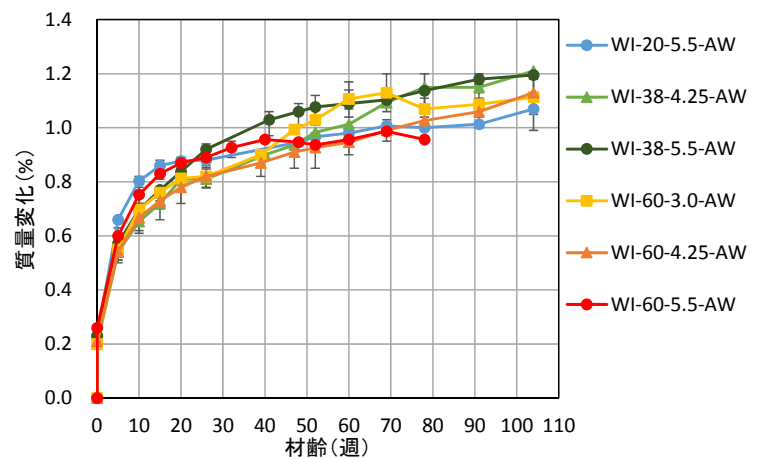
(a) 骨材 T0 膨張率



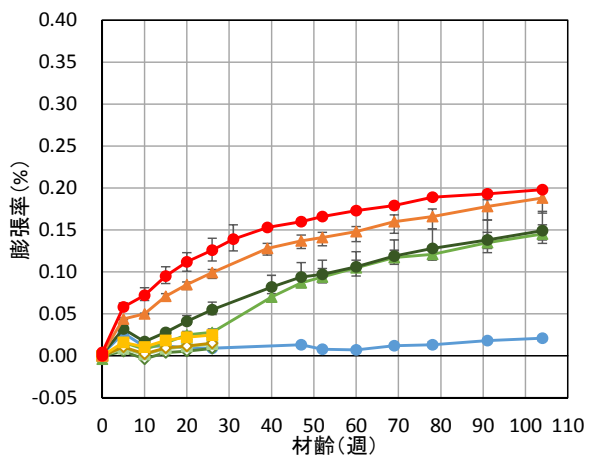
(b) 骨材 T0 質量変化率



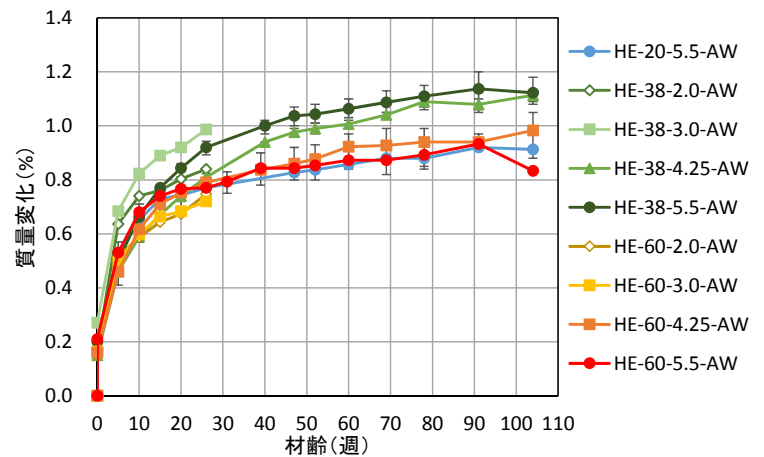
(c) 骨材 WI 膨張率



(d) 骨材 WI 質量変化率



(e) 骨材 HE 膨張率



(f) 骨材 HE 質量変化率

図 3.2 CPT の膨張率及び質量変化率

3. 3. 2 アルカリラッピングの効果

(1) 目的

AW を施した RILEM AAR-4 の試験において、AW が膨張率及び質量変化率に及ぼす影響の確認、養生期間中におけるアルカリ溶脱量の把握、及び AW によってアルカリ溶脱が抑制されるかの確認を目的とする。

(2) 方法

① 試験水準及びコンクリート調合

試験には、急速膨張性骨材 T0、及び遅延膨張性骨材 WI の二つの骨材を用いた。RILEM AAR-4 に準拠して、アルカリ量は 5.5kg/m^3 とし、AW の有無を比較した。AW の方法は「3. 3. 1 温度及びアルカリ濃度依存性」における(2)方法の「②アルカリラッピングの濃度設定」で示した方法と同じである。また、コンクリートの調合は、表 3.3 に示す調合と同じである。

② アルカリ溶脱量の評価方法

RILEM AAR-4 におけるアルカリ溶脱の概要を図 3.3 に示す。RILEM AAR-4 では、試験体の乾燥を防ぐ目的で底部に水を張ったステンレス容器を用いて促進養生した。そこで、促進養生に用いたステンレス容器底部の水を採取し、Na 及び K を誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (ICP) を用いて定量した。この定量値と、容器底部の水量、及びコンクリート試験体のアルカリ量と容器中のコンクリート試験体本数から、コンクリートからのアルカリ溶脱率を算出した。

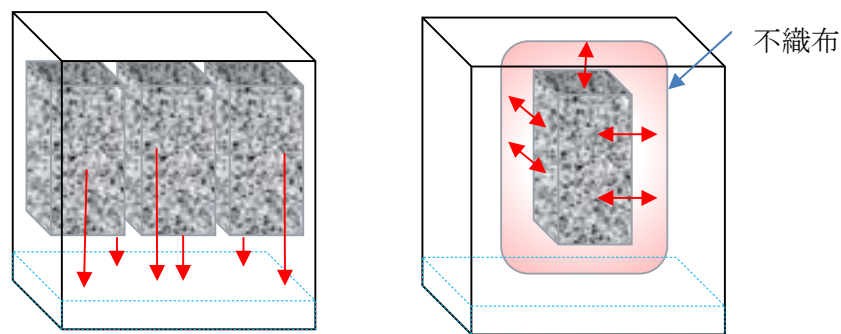


図 3.3 RILEM AAR-4 におけるアルカリ溶脱の概要

(左図：AW なしの場合の試験体からのアルカリ溶脱)

(右図：AW の場合の試験体から不織布へのアルカリ溶脱)

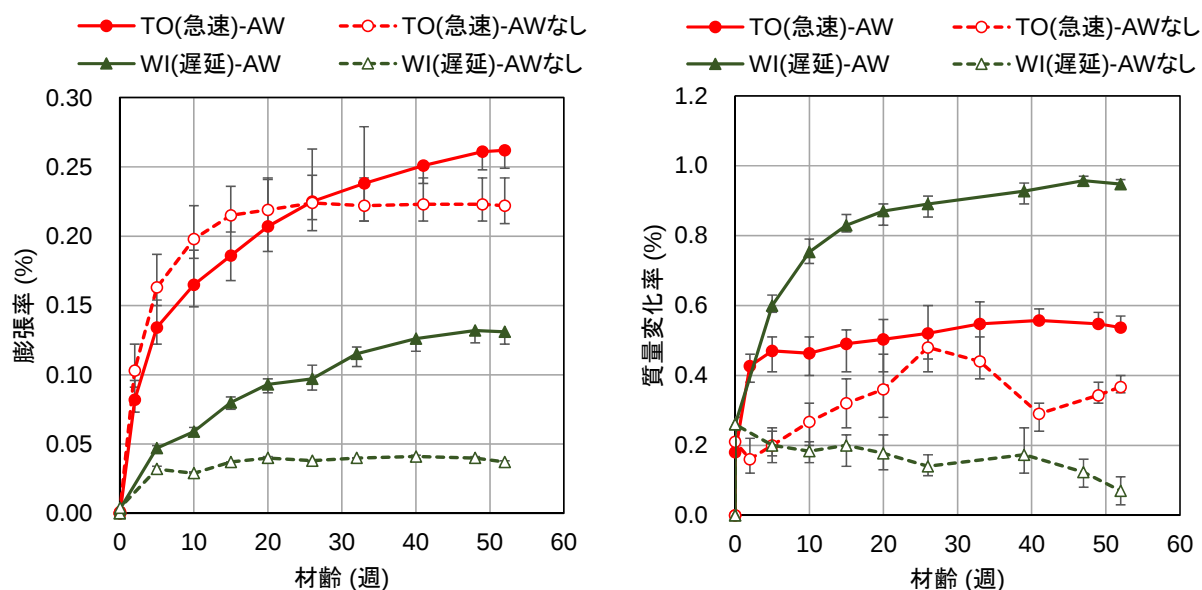
(3) 結果及び考察

① 膨張率及び質量変化率

RILEM AAR-4 における AW 有無による比較を図 3.4 に示す。急速膨張性の骨材 T0 では、膨張率は、材齢 26 週までは AW なしの方が AW を上回ったが、26 週以降では AW の方が上回り、材齢 52 週における膨張率は、AW なしで 0.222% に対し、AW で 0.262% となった。この現象は、骨材 T0 は ASR 反応性が高く、AW を施すことにより生成した ASG が不織布に移行し、早期では膨張が生じにくく、AW を施さない条件では、材齢が進むに従ってアルカリが溶脱するため、ASR 反応はそれ以上生じず、材齢 26 週以後の膨張が飽和に達したものと考えられる。

また、骨材 T0 の質量変化率は、AW に対して AW なしの質量増加は小さく、また養生期間中の変動も大きい。これは、AW を施さないと試験体が乾燥するためと考えられるが、AW なしにおいて試験体が乾燥を生じたにも係わらず膨張を生じた理由は、骨材 T0 は ASR 反応性が高い急速膨張性を示す骨材であり、内部の水分で十分に膨張を生じたためと考えられる。

一方、遅延膨張性の骨材 WI では、AW の膨張率は AW なしよりも大きく、材齢 52 週における膨張率は、AW なしで 0.037% に対し、AW ありで 0.131% となった。また、質量変化率も、AW では材齢が進むにつれて質量が増加したのに対し、AW なしでは質量減少を生じた。これは、骨材 T0 と同様に、AW なしでは養生期間中に試験体からのアルカリ溶脱と乾燥を生じたためであり、特に骨材 WI は ASR 反応がゆっくり生じる遅延膨張性を示す骨材であるため、アルカリ溶脱及び乾燥の影響を強く受け、AW なしでは膨張が生じにくくなり、また、質量の増加が抑制されたと考えられる。また、骨材 WI では、AW なしの条件では、AAR-4 による判定基準である材齢 15 週での膨張率 0.03% を下回り、骨材の ASR 反応性を検知できない可能性があると考えられる。



(a) 膨張率

(b) 質量変化率

図 3.4 RILEM AAR-4 における AW 有無による比較

② アルカリ溶脱率

CPT 用試験体 (75×75×250mm) からのアルカリ溶脱率の時間変化を図 3.5 に示す。AW のステンレス容器底部へのアルカリ溶脱率は数%程度であったのに対し、AW なしの水準では、材齢の経過に伴いアルカリ溶脱率が増大し、RILEM AAR-4 の判定基準である材齢 15 週時点で T0 の溶脱率は約 23%、WI では約 15%であった。AW なしの場合には試験体からかなりの量のアルカリが溶脱することが明らかとなった。

また、急速膨張性の骨材 T0 が遅延膨張性の骨材 WI を用いた水準よりアルカリ溶脱率が高くなったのは、骨材 T0 は材齢 2 週から膨張を開始し材齢 10 週での膨張率が約 0.2% と初期に大きく膨張したのに対し、骨材 WI は遅延膨張性であるため材齢 10 週での膨張率は約 0.06%に留まり (図 3.2(a)(c))、膨張率の高い骨材 T0 では、膨張によって生じたひび割れにより溶脱しやすくなったと考えられる。なお、RILEM AAR-4 は温度(60℃)が一定で、かつ底部に水を張った密閉ステンレス容器を用い、さらに、ステンレス容器の外が飽和水蒸気で囲まれた養生条件である。試験体からアルカリ溶脱が生じた理由として、RILEM AAR-4 では (AAR-3 も同様)、膨張率測定時に 20℃環境に容器を移してから測定することとなっており、また、養生槽は温度一定の設定であっても、温度管理範囲である±2℃程度で変化している。容器の温度上昇時には、冷えた試験体表面に結露が生じてアルカリが溶脱し、冷却時には容器内壁等への結露が生じて試験体が乾燥を受けたと考えられる。AW なしの試験体が乾燥を受けることは、図 3.4 で示した試験体の質量変化率が AW では増加するのに対し、AW なしでは増加が少ないことから明らかである。

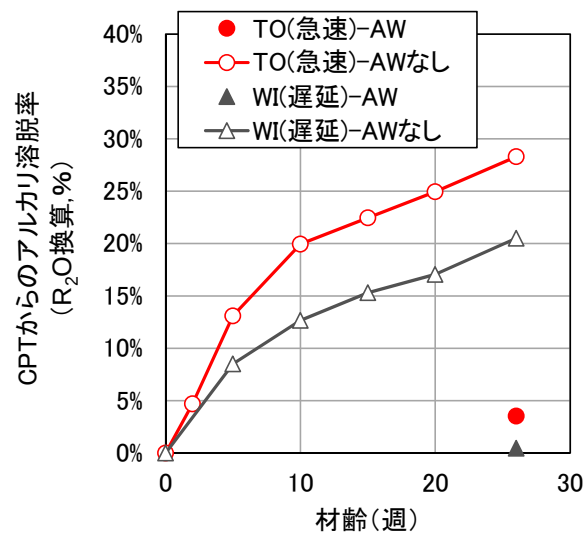


図 3.5 CPT 用試験体からのアルカリ溶脱率の時間変化

一方、促進養生期間に、AW では不織布に含有させたアルカリが試験体中に移動する、あるいは試験体から不織布にアルカリが移動することが考えられ（図 3.3 の右図）、試験体中のアルカリ量が保たれているかどうかを確認する必要がある。この点については、不織布中のアルカリ濃度を分析することで確認することが可能であり、この結果については、「4. 2 劣化進行段階の評価」における 4. 2. 2 (2) ②「不織布中のアルカリ量の測定」で述べる。

3. 3. 3 JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 の比較

(1) 目的

国内の骨材試験方法として、JIS 化学法、JIS モルタルバー法その他、原子力施設では JASS 5N T-603 が用いられることがある。JASS 5N T-603 は CPT であり、RILEM AAR-3 の 38℃ とほぼ同じ 40℃ とした試験である。JASS 5N T-603 は、主に、コンクリート調合を用いる点、試験期間が 6 ヶ月と短い点、試験体寸法が 100x100x400mm と大きいサイズを用いる点、AW ではないが乾燥とアルカリ溶出を防止するために WW を用いている点、アルカリ量がコンクリート調合に対して最大+2.4kg/m³ 添加する点で、RILEM AAR-3 と異なる。しかし、RILEM AAR-3 と類似する試験方法であり、多くの実績があることから、RILEM AAR-3 との比較試験を実施し、その特徴を把握して課題を抽出することとした。

JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 の試験方法の比較を表 3.10 に示す。

表 3.10 JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 の試験方法の比較

	JASS 5N T-603	RILEM AAR-3
調合	実際に使用するコンクリート調合	骨材試験として定められた調合
アルカリ量	アルカリ添加量 +1.2、+1.8、+2.4kg/m ³ の3水準 (国内で市販されているセメントを用いた場合、通常は最大でもアルカリ量は5.5kg/m ³ にならない)	5.5kg/m ³
アルカリ添加方法	粒状の NaOH を練上がったコンクリートに練込み	高 R ₂ O のセメントの使用、及び NaOH 水溶液を用いたコンクリートの練混ぜ
試験体寸法	100 x 100 x 400mm	75 x 75 x 250mm
ラッピング	水ラッピング	ラッピングなし
養生温度	40±2℃	38℃ (100 ° F)
養生期間	6 ヶ月まで	1 年まで(材齢 1 年でも膨張が継続している場合は 2 年まで)
判定基準 (反応性なし)	0.1%未満(材齢 6 ヶ月)、及び材齢 6 ヶ月において膨張率が 0.1%となる臨界アルカリ量から判定	0.05%未満(材齢 1 年)

(2) 方法

① JASS 5N T-603 の調合

JASS 5N T-603 では、急速膨張性を示す骨材 T0 と、遅延膨張性を示す骨材 WI を用いた。コンクリートの調合は、表 3.3 に示した RILEM AAR-3 で実施した試験と同じ調合とし、アルカリの添加量は JASS 5N T603 における最も多い+2.4kg/m³とした。なお、アルカリは JASS 5N T-603 記載通り、粒状の NaOH を練り上がったコンクリートに添加した。

② JASS 5N T-603 におけるアルカリ溶脱率

JASS 5N によれば¹¹⁾、試験期間中の乾燥及びアルカリ溶脱抑制のために WW を施すと記載されている。この効果を確認するため、試験終了後の材齢 6 ヶ月における不織布中のアルカリ濃度を、「3. 3. 2 アルカリラッピングの効果」における「(2) 方法」の「②アルカリ溶脱量の評価方法」と同じ方法で測定し、アルカリ溶脱率を算出した。

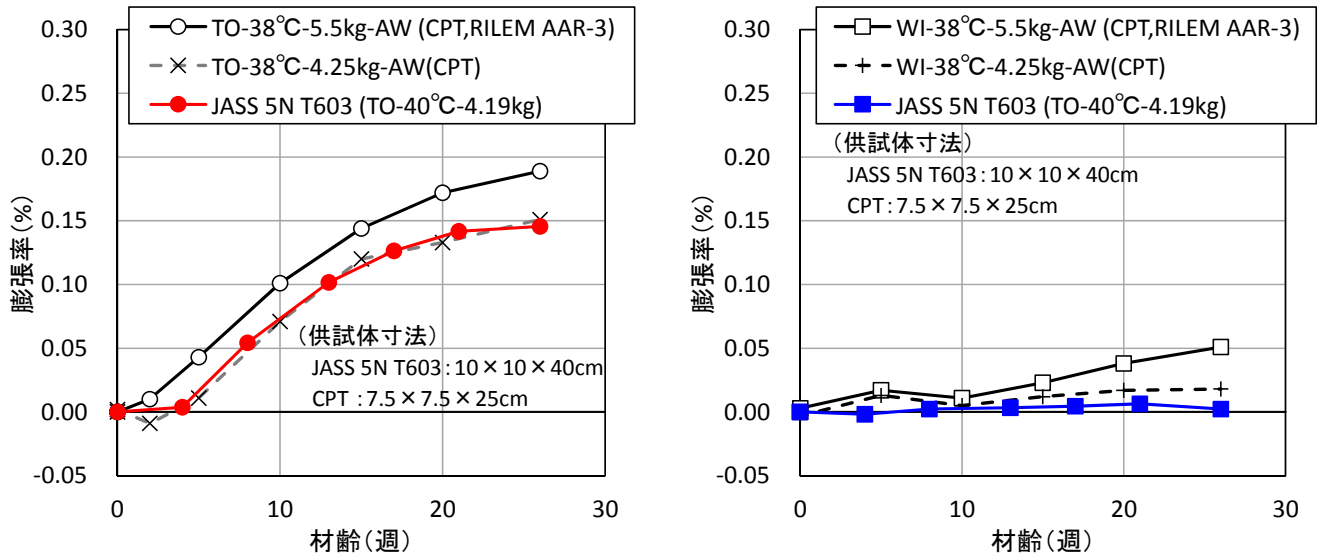
(3) 結果

① 膨張率

結果を図 3.6 に示す。なお、実施した JASS 5N T-603 におけるアルカリ添加量+2.4kg/m³は、アルカリ量に換算すると 4.19kg/m³となる(注記参照)ため、同程度のアルカリ量 4.25kg/m³とした RILEM AAR-3(AW)、及び、アルカリ量 5.5kg/m³の RILEM AAR-3(AW)の結果を合わせて図 3.6 に示す。

(注記) アルカリ量換算値 4.19kg/m³ は、次のように求められる。表 3.5 の化学分析値 Na₂O=0.34%, K₂O=0.33%、及び表 3.3 の調合における単位セメント量 320kg/m³より、アルカリ添加前のアルカリ量を JIS に従って算出すると、 $(0.34 + 0.33 \times 0.658) \times 320 / 100 = 1.79\text{kg/m}^3$ となる。これに 2.4kg/m³のアルカリを添加すると、 $1.79 + 2.4 = 4.19\text{kg/m}^3$ となる。

骨材 T0、骨材 WI とともに、JASS 5N T-603 におけるアルカリ量 4.19kg/m^3 のコンクリートの膨張率は、RILEM AAR-3 においてアルカリ量 4.25kg/m^3 としたコンクリートと、材齢 26 週まではほぼ同じ膨張率を示した。



(a) 骨材 T0 (急速膨張性)

(b) 骨材 WI (遅延膨張性)

図 3.6 JASS 5N T-603 の測定結果 (RILEM AAR-3 (AW) による膨張率との比較)

② アルカリ溶脱率

JASS 5N T-603 の試験終了後の材齢 6 ヶ月における不織布中のアルカリ量の分析結果及び溶脱率の算定結果を表 3.11 に示す。試験体 1 本あたりのアルカリ量は、寸法を $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ としてコンクリート中のアルカリ量 (4.19kg/m^3) から計算した。

分析の結果、膨張を生じた急速膨張性の骨材 T0 では 10.8%、ほとんど膨張を生じなかった遅延膨張性の骨材 WI では 4.6%のアルカリが溶脱した。

表 3.11 不織布中のアルカリ量分析結果及びアルカリ溶脱率

骨材 種類	不織布分析結果の合計値						試験体 1 本に使用した 不織布中のアルカリ量 (g/本)			試験体 1 本あたりの アルカリ量(g/本) ※2 R ₂ O [B]	溶脱率 [A]/[B]
	①温水抽出 (mg)		②塩酸抽出 (mg)		①+② (mg)						
	Na	K	Na	K	Na	K	Na	K	R ₂ O [A]		
骨材 T0	1210	213	4.10	1.56	1214.1	214.6	1.214	0.215	1.807	16.76	10.8%
骨材 WI	540	52.5	1.63	<0.1※1	541.6	52.5	0.542	0.053	0.772	16.76	4.6%

注) ※1 : 定量下限値以下 (定量下限値 0.1 を下回った箇所は 0 として合算)

※2 : 試験体寸法は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ としてコンクリート中のアルカリ量 (4.19kg/m^3) から計算

(4) JASS 5N T-603 の特徴と課題

① アルカリ溶脱率

WW を施しても、膨張を生じた急速膨張性の骨材 T0 でアルカリ溶脱率は材齢 6 ヶ月において 10.8%、ほとんど膨張を生じなかった遅延膨張性の骨材 WI で 4.6%であった。JASS 5N T-603 は臨界アルカリ量を求めて判定することになっているが、試験期間中にアルカリが溶脱し、また、骨材の特性によって溶脱率が異なることから、判定で求める臨界アルカリ量²⁴は過大評価（危険側の評価）となる可能性がある。また、JASS 5N T-603 では、材齢 6 ヶ月の試験判定結果から反応性を判断する根拠として、材齢 24 ヶ月における膨張が飽和に達している試験結果が示されている²⁵が、材齢 24 ヶ月における試験でのアルカリ溶脱については言及されてなく、試験期間中にアルカリが溶脱して膨張が飽和に達した可能性は否定できない。

② RILEM AAR-3 (AW) との比較

試験の結果、同程度のアルカリ量とした場合に、JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 (AW) は、同程度の膨張率を示した。アルカリ量以外の JASS 5N T-603 と RILEM AAR-3 (AW) の主な試験条件の違いは、養生温度がそれぞれ 40℃に対して 38℃、試験体サイズがそれぞれ 100×100×400mm に対して 75×75×250mm、及びラッピングがそれぞれ WW に対して AW、である（表 3.10 参照）。

養生温度 38℃と 40℃の差異は僅かであり、JASS 5N T-603 では WW によって試験体の乾燥が抑制され、一方で、WW としたことでアルカリが試験体から溶脱するが、試験体サイズが RILEM AAR-3 より大きいことで、この影響が顕著に出なかったと考えられる。

今回の試験では、JASS 5N T-603 はアルカリ添加量が最も多い+2.4kg/m³の水準のみ実施したが、「3.3.1 温度及びアルカリ濃度依存性」で行った RILEM AAR-3 (AW) の結果は JASS 5N T-603 での膨張挙動とほぼ同じであった。そこで、アルカリ量の異なる RILEM AAR-3 (AW) の試験結果（膨張率）も JASS 5N T-603 の膨張率と同じと仮定し、JASS 5N T-603 に記載される判定基準を準用して反応性を判断し、他の ASR 試験法の結果と比較した。具体的には、RILEM AAR-3 (AW) での結果は JASS 5N T-603 での膨張挙動と同じ、RILEM AAR-3 (AW) の材齢 26 週におけるアルカリ濃度依存性はアルカリ量に対して直線関係があると仮定し、RILEM AAR-3 (AW) におけるアルカリ量が 3.0kg/m³及び 4.25kg/m³の 2 点のデータを用いて、JASS 5N T-603 での判定基準を準用した。

結果を表 3.12 に示す。JASS 5N T-603 は、JIS 試験法の判定（モルタルバー法を優先）と何れの骨材でも同じ判定となった。しかし、遅延膨張性の骨材については、RILEM AAR-3 及び AAR-4 では有害判定となったが、JASS 5N T-603 では反応性なしとなり、JASS

²⁴ 日本建築学会：「JASS 5N T-603 コンクリートの反応性試験方法」，建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，pp. 454，付図 3.2（2013）

²⁵ 日本建築学会：「JASS 5N T-603 コンクリートの反応性試験方法」，建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事，pp. 456-457，d. 判定能力（2013）

5N T-603 では、遅延膨張性骨材の ASR 反応性を検知できない可能性があり、以下の課題が挙げられる。

これは、

- ・ JASS 5N T-603 は、試験におけるアルカリ添加量が最大でも 2.4kg/m^3 であり、セメントのアルカリ量 R_2O が 0.6% (JIS R 5210「ポルトランドセメント」における低アルカリ形の全アルカリ規定最大値)、単位セメント量が 350kg/m^3 と仮定すると、最大でもアルカリ量として 4.5kg/m^3 ($350(\text{kg/m}^3) \times 0.6\% + 2.4(\text{kg/m}^3) = 4.5(\text{kg/m}^3)$) であり、REILEM AAR-3 及び AAR-4 におけるアルカリ量 5.5kg/m^3 に対して、促進条件としてのアルカリ量が不足すること
- ・ 促進養生期間が RILEM AAR-3 の試験方法では 1～2 年としているのに対して、JASS 5N T-603 では 6 ヶ月と短いこと

が挙げられる。

表 3.12 JASS 5N T-603 の判定(推定)と他の試験結果との比較

試験方法	急速膨張性 骨材	遅延膨張性 骨材	
	骨材 TO	骨材 WI	骨材 HE
JASS 5N T-603	反応性あり	反応性なし	反応性なし*
JIS 化学法	無害でない	無害でない	無害
JIS モルタルバー法	無害でない	無害	無害
RILEM AAR-3 (AW)	有害	有害	有害
RILEM AAR-4 (AW)	有害	有害	有害

*骨材 HE は、図 3.10(d)に示した REILEM AAR-3(AW)の膨張率が 5.5kg/m^3 でも 26 週の膨張率が 0.1% に達しないことから推定

以上の結果から、JASS 5N T-603 の特徴を以下に挙げる。

- ・ WW はアルカリ溶脱を生じ、試験体中のアルカリ量が試験期間中に低下し、アルカリ濃度依存性（臨界アルカリ量）が評価できない可能性がある。
- ・ 試験期間が 6 ヶ月と短く、遅延膨張性骨材を検知できない可能性がある。
- ・ JASS 5N T-603 では、WW により試験体の乾燥は抑制される。

3. 3. 4 フライアッシュの置換効果

(1) 目的

RILEM AAR-3 及び AAR-4 では、骨材試験を前提としているため、現状ではフライアッシュを添加した実際のコンクリートの調合試験として用いられていない。

そこで、フライアッシュのセメントへの置換によって、温度、アルカリ量が膨張挙動に及ぼす影響を把握し、RILEM AAR-3 (38℃) 及び AAR-4 (60℃) を調合試験とした場合にフライアッシュ置換効果を評価できるか確認するため、フライアッシュを置換した場合の RILEM AAR-3 及び AAR-4 でアルカリ量を 3.0kg/m³ 及び 5.5kg/m³ とした試験を実施した。

(2) 方法

① 使用材料

フライアッシュの置換によって、膨張が抑制され、膨張に時間を要すると想定されるため、急速膨張性の骨材 T0 を用いた。使用したフライアッシュは、一般的にコンクリート混和剤として流通している JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に規定されるⅡ種であり、品質を表 3.13 に、蛍光 X 線分析による化学組成を表 3.14 に示す。使用したセメントは表 3.5 に示す普通ポルトランドセメントである。

表 3.13 フライアッシュの品質

項目		試験値
二酸化けい素		61.68 %
湿分		0.1 %
強熱減量		1.55 %
密度		2.28 g/cm ³
粉末度	45 μm ふるい残分	6 %
	比表面積(ブレーン法)	4060 cm ² /g
フロー値比		111
活性度指数	材齢 28 日	89
	材齢 91 日	103
メチレンブルー吸着量		0.38 mg/g

表 3.14 フライアッシュの化学組成

ig. loss※	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	合計
1.55	61.68	24.43	3.96	2.7	1.26	0.34	0.87	1.19	1.27	0.28	0.03	99.56

注) ※ : 1000℃、1 時間強熱における減量値

(単位 : mass%)

② 調合

フライアッシュ置換のコンクリートの調合を表 3.15 に、フレッシュ性状の測定結果を表 3.16 に示す。単位結合材量は 320kg/m³、水結合材比 (W/B) は 50%、細骨材率 (s/a) は 45%とし、空気量は目標空気量 4.5±1.5%となるように調整した。これはフライアッ

シュを含まない、「3. 2 国内外の骨材試験方法の比較」の「3. 2. 2 (4) ①調合」で示す CPT と同じである。

フライアッシュ置換率は、セメントの内割で 15 質量%とした。この置換率はフライアッシュセメント B 種（フライアッシュ置換率 10 質量%を超え 20 質量%以下）に該当し、JIS による混和剤による ASR 抑制対策はフライアッシュセメント B 種相当としていることから、フライアッシュ置換率 15 質量%は混和剤による ASR 抑制対策を行ったことになる。骨材を除くコンクリート中のアルカリ量が、 Na_2Oeq 換算でそれぞれ 3.0 kg/m^3 及び 5.5 kg/m^3 となるように、水酸化ナトリウム水溶液を用いて調整した。

具体的には、表 3.5 に示すセメントのアルカリ量($0.34+0.33 \times 0.658=0.56\%(\text{Na}_2\text{Oeq})$)と表 3.14 に示すフライアッシュのアルカリ量($0.87+1.19 \times 0.658=1.65\%(\text{Na}_2\text{Oeq})$)とを用い、それぞれ、表 3.15 に示す単位セメント量及び単位フライアッシュ量とからコンクリート 1m^3 あたりのアルカリ量を算出し($0.56 \times 272/100+1.65 \times 48/100=2.31 \text{ kg/m}^3$)、表 3.15 に示す所定のアルカリ量から不足するアルカリ量を 5N の水酸化ナトリウム水溶液を練混ぜ水に添加することで補った。

表 3.15 フライアッシュ置換のコンクリートの調合

アルカリ量 (kg/m^3)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						混和剤	
			水 (W)	結合材(B)		細骨材 (石灰石)	粗骨材		減水剤 (B×%) ^{※1}	空気量 調整剤 (B×%) ^{※2}
				セメント	フライ アッシュ		反応性 (T0)	非反応性 (石灰石)		
3.0	50	45	160	272	48	814	308	718	1.45	0.0
5.5										0.0

注) ※1：減水剤は、マスターボゾリス No. 70 を使用。4 倍希釈液としての添加率を表示。

※2：空気量調整剤は、マスターエア 404。100 倍希釈液としての添加率を表示。

表 3.16 フレッシュ性状の測定結果

アルカリ量 (kg/m^3)	フレッシュ性状		
	スランプ (cm)	空気量 ^{※1} (%)	C. T. ^{※2} ($^{\circ}\text{C}$)
3.0	17.0	4.0	21
5.5	17.5	4.7	21

注) ※1：目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ ※2：C. T. はコンクリート温度

③ CPT 用試験体の水準

フライアッシュ置換(15%)した CPT 試験体の水準を表 3.17 に示す。アルカリ量 2 水準、温度 2 水準を設定し、計 4 水準の CPT 試験体を作製した。

表 3.17 CPT 試験体の水準

骨材種類	フライアッシュ置換率(%)	アルカリ量(kg/m ³)	温度(℃)	
			38	60
骨材 T0 (急速)	15	3.00	○ (T0-FA15%-3.0kg-38℃)	○ (T0-FA15%-3.0kg-60℃)
		5.50	○ (T0-FA15%-5.5kg-38℃)	○ (T0-FA15%-5.5kg-60℃)

注) 試験体寸法: 75×75×250mm

④ アルカリラッピング

「3.3.1 温度及びアルカリ濃度依存性」と同様、アルカリ量をパラメータとしたため、コンクリート中のアルカリ量（液相のアルカリ濃度）に応じて、AW の NaOH 濃度を以下の通り設定した。

【AW の濃度設定】

5.50kg/m³→1.50 mol/l

4.25kg/m³→1.16 mol/l

3.00kg/m³→0.818 mol/l

(3) 結果及び考察

フライアッシュ置換(15%)を用いた CPT 試験体の膨張率及び質量変化率をそれぞれ図 3.7 及び図 3.8 に示す。また、図には、「3.2 国内外の骨材試験方法の比較」及び「3.3.1 温度及びアルカリ濃度依存性」で取得したフライアッシュなしの調合（骨材 T0）を破線で示す。

膨張率は、フライアッシュなし(破線)と比較して大きく抑制された。しかしながら、フライアッシュを置換した T0-FA15%-5.5kg-60℃の条件では膨張が継続し、材齢 26 週で膨張率 0.1%に近い膨張を示した。また、温度を 38℃とした T0-FA15%-5.5kg-38℃では材齢 20 週から膨張する傾向を示した。

また、アルカリ量を 3.0kg/m³とした T0-FA15%-3.0kg-38℃では殆ど膨張は生じていないが、T0-FA15%-3.0kg-60℃は、RILEM AAR-4 の判定基準である材齢 15 週の膨張率 0.03%を下回るが、継続的に膨張する傾向を示した。

一方、質量変化率は、膨張率が大きい水準ほど質量変化率が大きくなるという傾向は見られず、膨張率が大きいほど質量変化率は低い傾向を示した。膨張率が大きい水準は、高温（60℃）あるいは高アルカリ（5.5kg/m³）の水準であった。すなわち、高温・高アルカリ条件では、フライアッシュが十分セメントと反応する前に骨材とアルカリが反応して膨張を生じたと考えられる。

これらのことから、FA15%置換で膨張を低減する効果を CPT で確認できたが、この置換率では ASR 膨張を十分に抑制することはできない可能性がある。これは、JIS における混和剤による ASR 抑制対策を行っても、用いる骨材やフライアッシュの品質によっては膨張を抑制することができないことを示すものである。また、高温・高アルカリ条件

ではフライアッシュの置換による ASR 抑制効果が適切に評価できない可能性がある。

以上のように、フライアッシュを 15%置換した CPT では、高温・高アルカリほど膨張抑制効果が小さく見積もられるという課題があるが、安全側の判定となるため、38℃の REILEM AAR-3、60℃の AAR-4 は調合試験として混合材を含めて評価可能と考えられた。

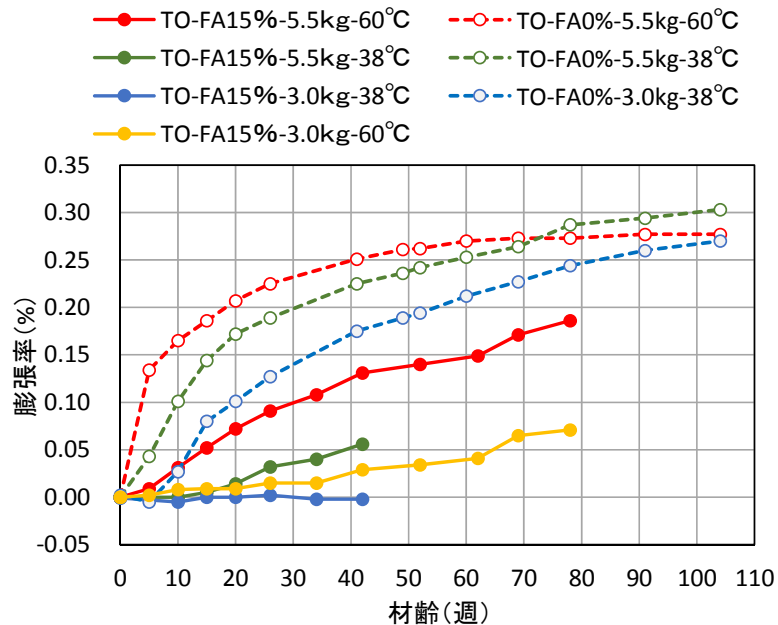


図 3.7 フライアッシュ置換(15%)の CPT 試験体の膨張率

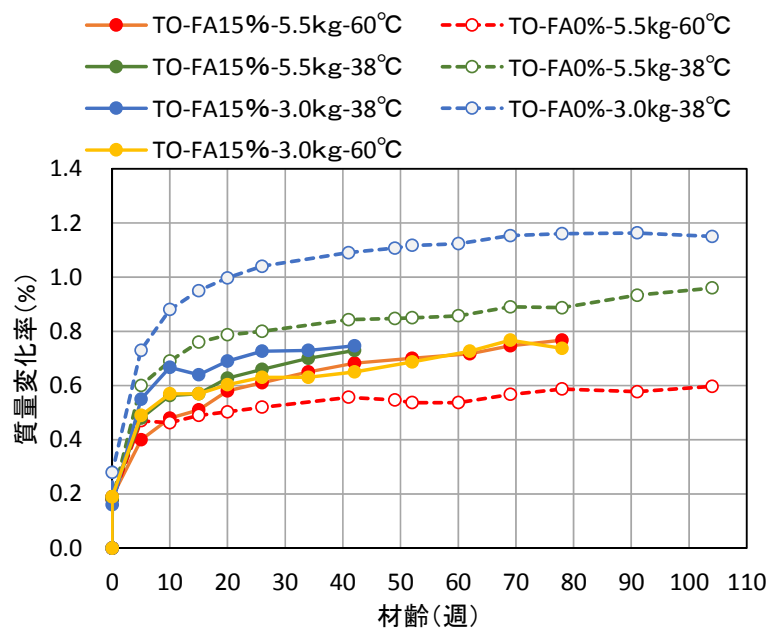


図 3.8 フライアッシュ置換(15%)の CPT 試験体の質量変化率

3. 3. 5 CPT の膨張挙動の分析

「3. 2 国内外の骨材試験方法の比較検討」で得た AW を施した RILEM AAR-3 及び AAR-4 で取得したデータ、及び「3. 3. 1 温度及びアルカリ濃度依存性」で取得したデータを用い、AW によってアルカリが溶脱しないことを前提に、膨張率と質量変化率の関係、促進養生材齢ごとのアルカリ濃度と膨張率の関係から、それらの膨張挙動のデータを分析し、温度及びアルカリ濃度が膨張に及ぼす影響を確認することを目的とする。

(1) 膨張率と質量変化率の関係

CPT における膨張率と質量変化率の関係を図 3.9 に示す。図 3.9 では、60℃養生の水準 (RILEM AAR-4) は赤色、38℃養生の水準 (RILEM AAR-3) は緑色、20℃養生の水準は水色で示している。

図 3.9 から、各水準別には、CPT の質量変化率と膨張率の間には概ね相関があり、膨張に伴って質量が増加した (青い破線が通常の傾向)。しかしながら、温度が高いほど (赤色>緑色>水色) また、アルカリ量が多いほど、質量増加率は小さくても膨張が生じている。そして、この傾向は遅延膨張性を示す骨材 (図 3.9(b)) よりも、急速膨張性を示す骨材 (図 3.9(a)) で顕著である。

この理由は明らかではないが、温度が高い、あるいは、アルカリ量が多い場合において、特に反応性の高い鉱物を含有する急速膨張性を示す骨材は、ASR が急激に進行し、骨材中の生成した ASG が骨材からペースト内に浸潤し、有効に膨張に寄与しない可能性があると考えられる。すなわち、高温・高アルカリで ASG が生じて、そのすべてが有効に膨張に寄与せず、結果的に十分に吸水しない (=質量増加しない) 状態で膨張が生じていると考えられる。これは逆に、高温・高アルカリで、特に急速膨張性骨材を用いた場合には、ASR が生じて膨張を生じにくいことを示している。

ASR による膨張劣化は数年から数十年といった年月によって生じることから、ASR 評価では促進条件として高温・高アルカリで行う必要があり、促進試験である RILEM AAR-3 及び AAR-4 は、このような促進条件下の試験での評価である。促進条件が厳しすぎると、実環境で生じる膨張よりも膨張しにくくなり、特に 60℃の試験である RILEM AAR-4 は急速膨張性骨材を含有する場合に適さないと考えられる。

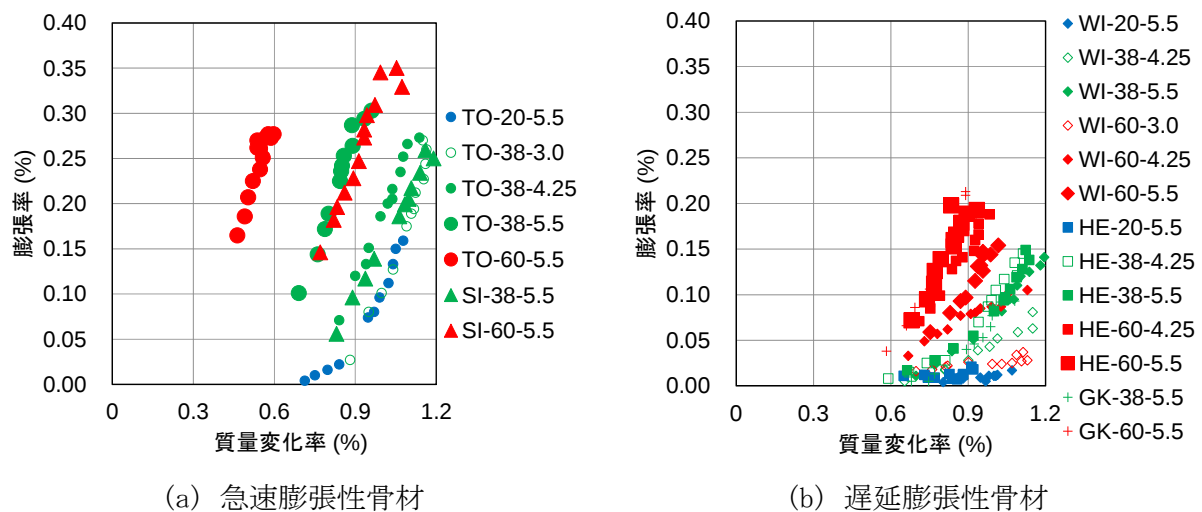


図 3.9 CPT における膨張率と質量変化率の関係

(2) アルカリ濃度依存性

温度及びアルカリ濃度依存性で取得した CPT のデータを用い、アルカリ量と膨張率との関係でデータを整理した。CPT における膨張率とアルカリ量を図 3.10 に示す。

①骨材 T0 38℃ (図 3.10(a))

急速膨張性骨材であり、比較的材齢初期から高い膨張率を示す。今回の試験は反応性骨材率 30%としたペシマム配合であるが、JIS による ASR 抑制対策のアルカリ量規制値である 3kg/m^3 でも膨張を生じる可能性があると考えられる。このような急速膨張性骨材は JIS 化学法、JIS モルタルバー法によって有害判定として排除できる可能性が高いが、ペシマムは検知できず、ペシマムを考慮した実調合での CPT によって ASR 反応性を評価することが望ましいと考えられる。また、今回の試験では急速膨張性骨材を少量(例えば、5%程度)含むペシマム調合でのアルカリ濃度依存性に関する検討は実施していない。(1)項で示したように、急速膨張性骨材では高温／高アルカリ条件では ASR が生じても膨張しない可能性があるため、反応性の高い鉱物を含有する骨材が少量混合されたペシマム調合において、RILEM AAR-4 の 60℃促進環境で ASR 反応性が膨張として現れ、検知できるかどうかは確認する必要があると考えられる。

②骨材 WI 38℃及び 60℃ (図 3.10(b)及び(c))

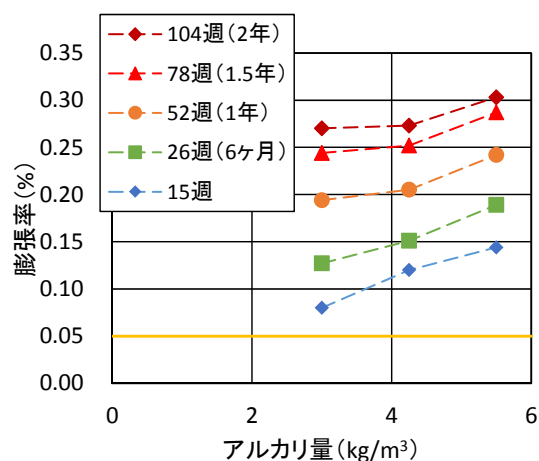
38℃及び 60℃ともにアルカリ濃度依存性がほぼ直線的で明確であり、何れの材齢でも膨張を生じない限界アルカリ量が明確に求まる骨材と考えられる。すなわち、アルカリ量を $2\sim 3\text{kg/m}^3$ 程度以下とすれば膨張を生じないと考えられる。また、38℃の RILEM AAR-3 では 1～2 年の期間が必要であるが、RILEM AAR-4 の 60℃促進環境とすることで試験期間の短縮が図れると考えられる。

③骨材 HE 38℃及び60℃（図 3.10(d)及び(e)）

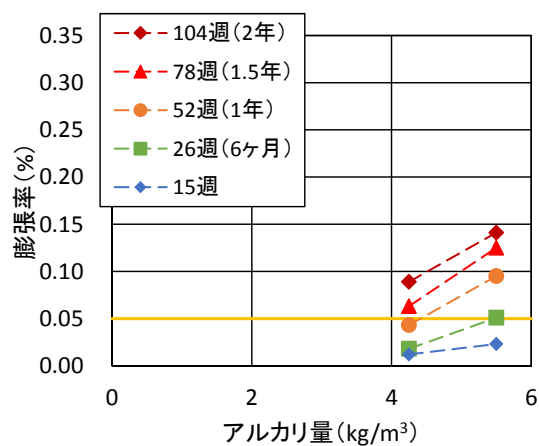
骨材 HE は、試験温度が 38℃と 60℃とで同様の傾向を示し、促進材齢が長くなると、長期的にはアルカリ量 4.25kg/m^3 では材齢の経過とともに膨張率が大きくなり、骨材 WI とは傾向が異なる。アルカリが無ければ ASR は生じず、膨張を生じない限界アルカリ量は存在するはずで、今後、長期的な膨張挙動を確認する必要があるが、このような骨材はアルカリ総量規制で抑制することは困難で、混合材（フライアッシュ等）の置換等の対策を行う必要があると考えられる。しかし、38℃と 60℃とで同様の傾向を示したことから、AAR-4 の 60℃とすることで試験期間の短縮が図れる。限界アルカリ量は求まらないが、AAR-3 または AAR-4 による試験によって ASR による膨張リスクを排除できる。

しかし、骨材 HE のようにアルカリ量が低くても長期的に膨張を生じる可能性がある。また、アルカリ量に対して直線的に膨張率が定まらない場合、低いアルカリ量でも膨張を生じる可能性があるが、アルカリ量を数点設定した REILEM AAR-3 または AAR-4 の試験で確認できると考えられる。

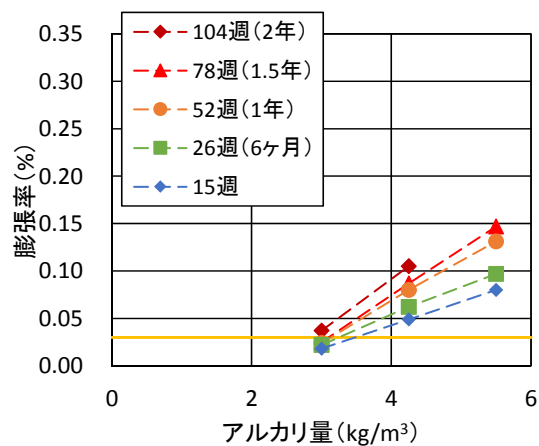
以上のように、骨材種類、温度条件によって、アルカリ量に対する膨張挙動は異なるが、コンクリートを用いて実際に用いる調合をベースとし、アルカリ量を数点変えた試験によって、ASR による膨張を生じない限界アルカリ量が求まる可能性がある。なお、この限界アルカリ量から使用する骨材などの材料を含めた調合においてアルカリ量を適切に設定することで、ASR を生じない抑制対策とできる可能性があると考えられる。



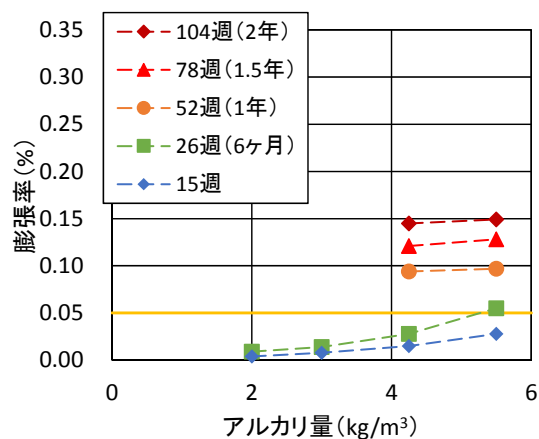
(a) TO-38°C



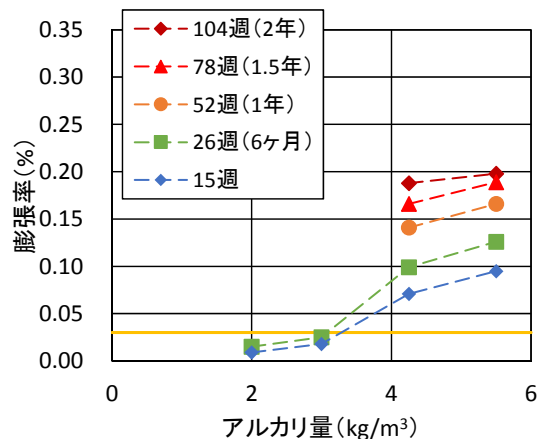
(b) WI-38°C



(c) WI-60°C



(d) HE-38°C



(e) HE-60°C

図 3.10 CPT における膨張率とアルカリ量の関係

(図中の黄色線は判定基準で、RILEM AAR-3 : 0.05%、RILEM AAR-4 : 0.03%、アルカリ量は調合におけるアルカリ総量(kg/m³)を表す)

（３） 温度依存性

「３．３．１ 温度及びアルカリ濃度依存性」で取得した CPT のデータを用い、温度と膨張率との関係を図 3.11 に示す。

CPT では 40℃で膨張が最大となる温度ペシマム現象が報告されている²⁶。最も膨張が生じやすいと考えられる温度ペシマムは、本事業の範囲では明確にならなかった。しかし、骨材によって温度依存性が異なり、急速膨張性の骨材 T0 は低い温度でも材齢が進むにつれ膨張し（図 3.11 の(a)）、かつ長期的にはさらに膨張率が高くなる可能性が示唆された。骨材 WI 及び骨材 HE については、60℃で最も膨張を生じていたが（図 3.11 の(b)及び図 3.11 の(c)）、骨材 T0 と同様に、より低い温度である 20℃あるいは 40℃で長期的には膨張を生じる可能性を否定できない。本節での検討結果は試験材齢 2 年までの結果であるが、ASR は長期にわたって膨張する可能性があり、暴露試験などの長期試験によって確認する必要がある。

²⁶ 財団法人土木研究センター：“アルカリ骨材反応被害構造物（土木）の補修・補強指針（案）”、コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果），建設省総合技術開発プロジェクト報告書(1989)

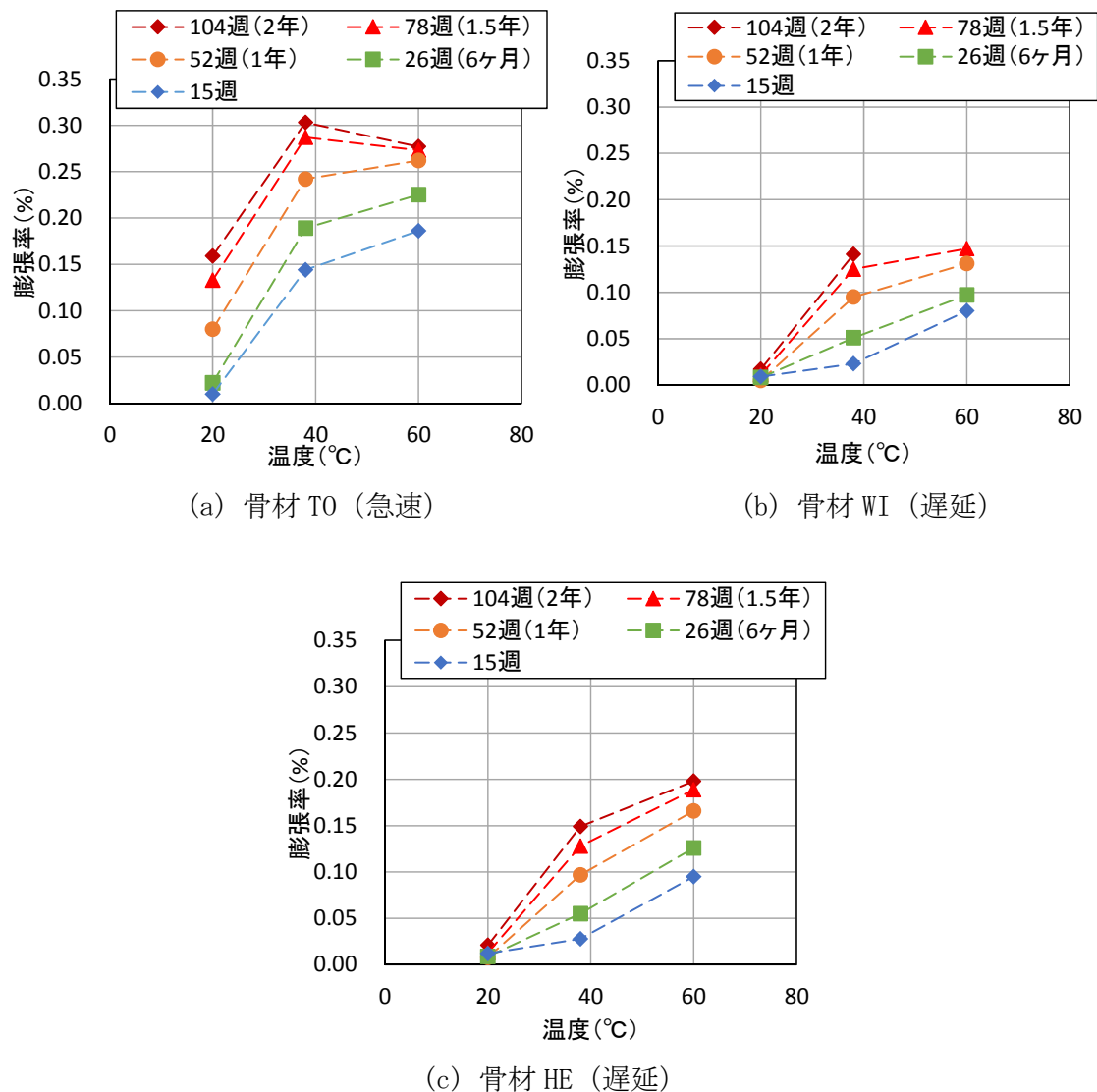


図 3.11 CPT における膨張率との温度の関係 (アルカリ量 5.5kg/m^3)

3. 3. 6 高温・高アルカリ濃度での ASG 生成と膨張に関する検討

「3. 3. 5 CPT の膨張挙動の分析」(1) で示した図 3.9 から、高温・高アルカリの場合には、ASR が生じて膨張を生じにくい可能性を指摘したが、これは、「4. 3 促進膨張試験の評価」で実施した、急速膨張性の骨材 T0 を用いたコア供試体の外観観察において、同じ膨張率の供試体でも、より高温・高アルカリの試験体で多くのアルカリシリカゲル (以下、「ASG」という。) が外観上観察されている結果と整合している。

この考察が正しければ、促進条件が厳しすぎた場合に、実環境で生じる膨張よりも促進環境のほうが、終局膨張量が小さくなる可能性が考えられ、結果として高温による促進試験の適用範囲が限定される可能性がある。

そこで本項では、高温・高アルカリ環境で ASG の流出が膨張率に及ぼす影響を確認するため、以下の実験を行った。

(1) 実施概要

ASRは、コンクリート中のアルカリ反応性を有する反応性骨材が、主にセメントからもたらされるアルカリと反応し、膨張性のASGを生じるものである。ASGによるコンクリートの膨張メカニズムは、Fournierによって提案されたモデル²⁷が一般的によく知られており、これは、反応性骨材周囲に生じたASGが膨張することで、コンクリートにひび割れをもたらすモデルである。

一方、Ichikawaによって提案されたモデル²⁸は、反応性骨材内部で生成したASGが骨材内部からコンクリートの微細構造中に滲出する前に、コンクリートの空隙水に含まれているカルシウムイオンと反応することで、ASGよりも硬いカルシウムシリケート水和物へと変化し、それが骨材表層で殻の役割となり、内側のASGの滲出を阻止することで骨材内部の膨張圧が増加するために、最終的に骨材自体がひび割れる、というモデル(以下、「Ichikawaモデル」という。)を提案している。それぞれのモデル図を図3.12に示す。

本項では、ASRに伴う反応性骨材及びコンクリート全体としての膨張メカニズムを明らかにするために、Ichikawaモデルの検証実験として、セメントペーストへ埋没させた後に、断面内のASGの分布状況の観察を行った。

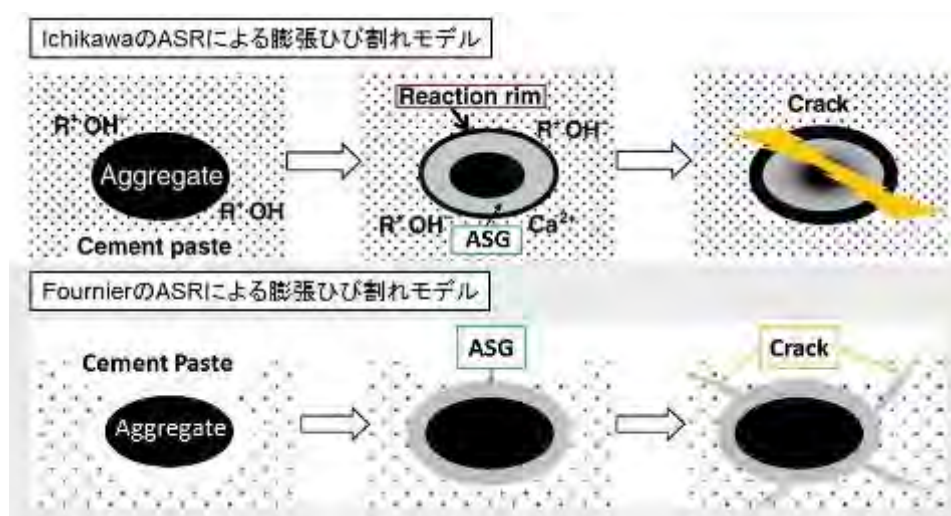


図 3.12 Ichikawa 及び Fournier の ASR による膨張ひび割れモデルの比較 ^{25, 26}

(2) 実験方法

骨材 T0 を、NaOH を添加した水結合材比 W/B=0.5 または、1.0 の普通セメントペースト、低熱セメントペースト、及び、セメントやポリマーを含まずセメントよりも単純な

²⁷ B. Fournier, M-A. Bérubé: Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications, Can. J. Civ. Eng. , Vol.27, No.2, pp. 167-191, 2000

²⁸ T. Ichikawa, M. Miura: Modified Model of Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, Vol.37, No.9, pp. 1291-1297, 2007

系の水硬性物質である焼き石膏ペースト中に埋没させ、100 ml のポリプロピレン製容器内に密閉して 60℃環境で養生を行った。養生 1 週後に小割切断機で湿式切断し、1 週間湿潤環境で静置した後に断面観察を行った。試験体の調合を表 3.18 に示す。

表 3.18 試験体の調合

シリーズ名	W/B	1 サンプルごとの質量 (g)				
		水 (W)	結合材(B)	骨材 T0 (G)	NaOH	増粘剤*
N-0.5	0.5	51.5	103.0	30.9	0.55	1.0
N-1.0	1.0	63.9	63.85	30.9	0.55	2.0
L-0.5	0.5	51.7	103.5	30.9	0.55	1.0
L-1.0	1.0	64.0	64.0	30.9	0.55	2.0
Gy-0.5	0.5	49.3	98.6	30.9	0.55	1.0
Gy-1.0	1.0	62.6	62.6	30.9	0.55	2.0

*増粘剤：アルキルアリルスルホン酸塩アルキルアンモニウム塩混合剤

(3) 実験結果及び考察

NaOH を添加したセメントペースト中に骨材 T0 を埋没させ、60℃環境下で 1 週間経過後に切断した断面を図 3.13、図 3.14 に示す。両図に示されるように、普通セメント及び低熱セメントのどちらにおいても、W/C=0.5 のほうが、W/C=1.0 に比べて、セメントペースト境界部の変色が顕著にみられることから、骨材 T0 中に ASG がより多く蓄積されていることが確認できる。ASG は骨材単体で蓄積されたり、骨材表層に生成すると考えられる殻によって拘束されるのではなく、周囲に W/C=1.0 未満の緻密なセメントペーストマトリクス（結合材）があつてはじめて骨材内に拘束及び蓄積されと考えられる。

同様にして、骨材 T0 を石こうペースト中に埋没させ、60℃環境下で 1 週間経過後に切断した断面を図 3.15 に示す。ただし、W/C=1.0 の石こうは硬化していなかったため、骨材のみの断面である。図 3.14 より、W/C=0.5 ではわずかに ASG の滲出が見られたが、W/C=1.0 では見られなかった。これは、W/C=0.5 の石こうペースト硬化体は同じ水セメント比のセメントペーストに比べてポーラスなマトリクスであったためと考えられる。W/C=1.0 の石こうペーストは硬化体を形成できなかったため、水溶液中に ASG がすべて溶脱してしまったと考えられる。

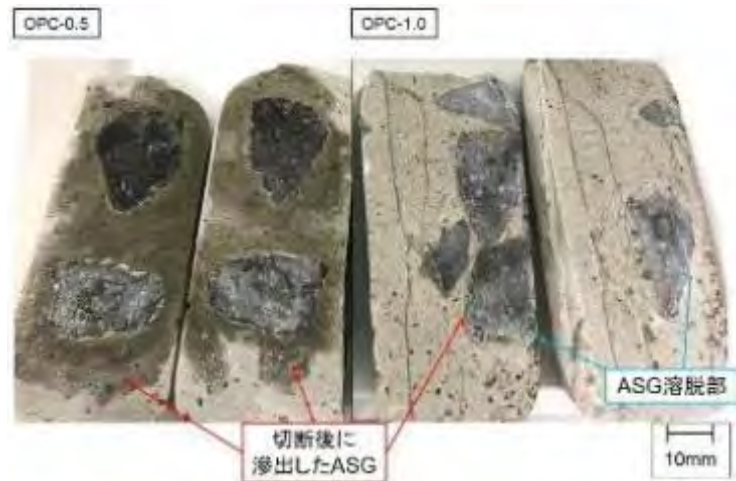


図 3.13 普通セメントペースト中の骨材 T0 断面

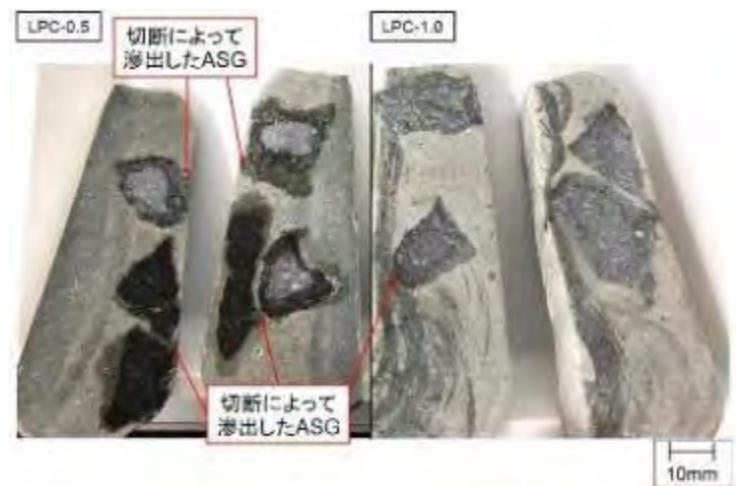


図 3.14 低熱セメントペースト中の骨材 T0 断面



図 3.15 石膏ペースト中の骨材 T0 断面

（４） まとめ

本検討では、ASR 膨張メカニズムを解明するために、反応性骨材をセメントペーストへ埋没させた後、断面観察を行った。その結果、ASR によって生じた ASG は、反応性骨材の周囲のセメントペーストマトリクスによって拘束されていることが実験的に確認された。このことから、CPT にみられる膨張挙動の温度依存性は、反応性骨材内に生じた ASG の生成量及び膨張量と周囲のセメントペーストの密度（物質移動抵抗性）のバランスによって決定されることが推察される。このことから、高い温度環境で実施した CPT のコンクリートプリズムの長期膨張量が、低い温度環境で実施した CPT のコンクリートプリズムの長期膨張量を下回る原因は、高い温度環境のコンクリートプリズムのほうが、反応性骨材内の ASG を拘束できていないためと考えられる。これは、セメントペーストのひび割れによるものか、高い温度環境による ASG の拡散係数の増加によるものかは不明である。ペースト埋没試験を異なる温度環境下で実施し、経時的な断面観察、膨張量、質量変化を取得することで、反応性骨材内に拘束された ASG 量と膨張挙動の関係を明らかにすることができる。

3. 4 骨材試験方法の提案

3. 4. 1 骨材の ASR 試験フローの検証

海外の知見を取り入れた骨材の ASR 試験フロー案について、これまでに国内の急速膨張性骨材及び遅延膨張性骨材を用いた試験を行い、国内で産出される骨材への適用性を検証した。

JNES レポートにおける骨材の ASR 試験フロー案を図 3. 16 に示す。

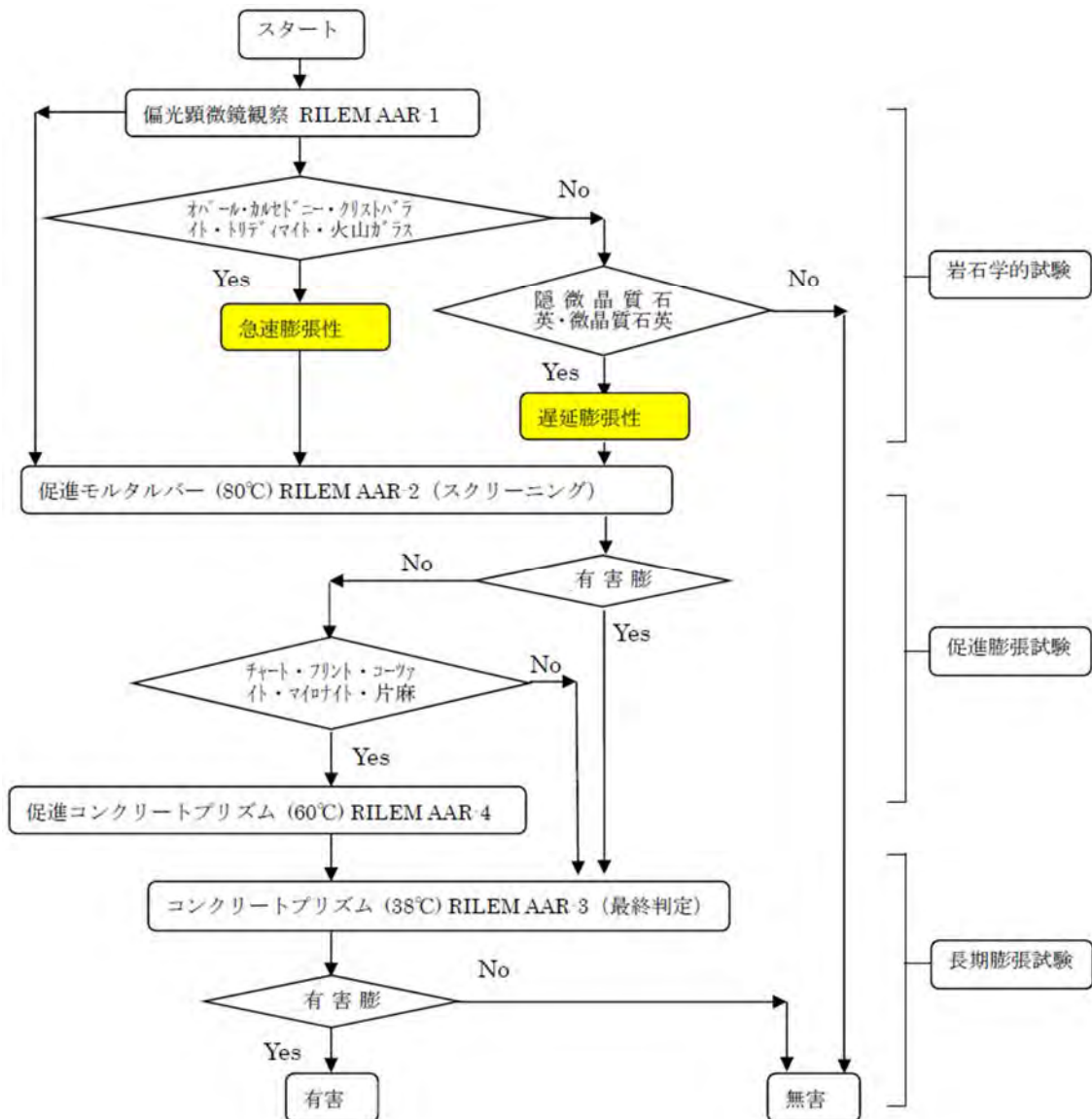


図 3.16 骨材の ASR 試験フロー案

(1) 偏光顕微鏡観察 (AAR-1 に準じた岩種・鉱物の同定)

(検証結果)

1. 選定した 5 種類の骨材について偏光顕微鏡観察を行った結果、急速膨張性骨材ではトリディマイト、クリストバライト及び火山ガラスを、遅延膨張性骨材では隠微晶質石英を検出。

(課題)

2. 反応性鉱物を特定せずに、偏光顕微鏡観察から促進モルタルバー試験 (REILEM AAR-2) に進むフローに判断分岐がない。
3. 川砂利、川砂等、岩種・鉱物が混在している場合の判定基準が不明。
4. 岩種・鉱物の同定には、実施者の経験・技量に大きく依存する¹⁹。

(2) 促進モルタルバー試験 (RILEM AAR-2 に準じたスクリーニング試験)

(検証結果)

5. REILEM RILEM AAR-2 相当の ASTM C1260 を実施し、JIS 法では無害判定となった遅延膨張性骨材も含め、本事業で用いた全ての骨材で「有害」と判定でき、有害膨張性を有する骨材を検知できることを確認した。

(課題)

6. 促進モルタルバー法は厳しい試験で、潜在膨張性のない骨材も有害判定となる可能性がある²⁹。
7. 高アルカリ溶液への浸漬で溶解し、検出できない骨材がある (チャート、フリント)^{10、21、29}。
8. REILEM AAR-2 は ASTM C1260 と比較して、試験方法が詳細に記述されておらず、また、試験体サイズに選択枝があるにも関わらず判定条件に差異がなく、安定した結果が得られない可能性がある。

(3) 促進コンクリートプリズム試験 (RILEM AAR-4)

(検証結果)

9. JIS 法では無害判定となった遅延膨張性骨材も含め、RILEM の判定基準 (材齢 15 週/0.03%以上) で有害判定となることを確認した。
10. 国内の骨材でも RILEM AAR-4 で検知できることを確認した。

(課題)

11. 促進養生期間中に試験体が乾燥し、アルカリが溶脱し、有害反応性を検出できない可能性がある。
12. 反応性の高い急速膨張性骨材において、生成した ASG が骨材からペースト内に浸潤するなどして、有効に膨張に寄与しない可能性がある。
13. 「骨材試験」の位置付けで調合を指定されるため、ペシマム/アルカリ濃度依存性を評価できない¹⁰。
14. RILEM AAR-4 の指定調合は国内で一般的に用いられているコンクリートにはない調合 (JASS 5N における単位水量の上限 185kg/m³ に対し RILEM の条件は単位水量 220kg/m³) であり、この調合条件での試験結果では実コンクリートに適用できない。

(4) コンクリートプリズム試験 (RILEM AAR-3)

(検証結果)

15. AW を施すことで、試験体のアルカリ濃度は初期値より増加したが、乾燥による

²⁹ 本田貴子, 谷本祥, 山戸博晃, 鳥居和之: 北陸地方の川砂の岩石学的特長とアルカリシリカ反応性の評価, 土木学会第 59 回年次学術講演会, V-003, pp. 5-6 (2004)

試験体質量の低下は無く、アルカリ溶脱が抑制された。

16. 促進温度が 40℃の WW を施した CPT 試験(JASS 5N T-603) では、材齢 6 ヶ月で最大約 10%アルカリが溶脱した。
17. AW を施した条件ではあるが、選定した 5 種類の国内の骨材は RILEM の判定基準で (材齢 52 週/0.05%以上)で有害判定となった。
18. 骨材ごとにアルカリ濃度依存性が異なり、アルカリ量の低減で膨張しない骨材がある一方、低いアルカリ量でも膨張する可能性のある骨材があり、RILEM AAR-3 試験でこの骨材特性を把握できることを確認した。
19. フライアッシュを 15%置換した CPT では、高温・高アルカリほど膨張抑制効果が小さくなるという課題があるが、安全側の判定となるため、RILEM AAR-3、AAR-4 は調合試験として、混合材を含めて評価可能と考えられた。

(課題)

20. RILEM AAR-4 と同様、「骨材試験」の位置付けで調合が指定されている (ペシマム/アルカリ濃度依存性を評価できない、JASS 5N における単位水量の上限 185kg/m³に対し RILEM の条件は単位水量 220kg/m³の調合条件である)。
21. RILEM AAR-3 の条件で乾燥とアルカリ溶脱によって無害判定となっても暴露環境で ASR 膨張を生じる可能性がある³⁰。

(5) まとめ

図 3.16 の ASR 骨材試験フロー案は、遅延膨張性骨材も含め、有害膨張性を有する骨材を概ね検知可能であることを確認した。しかし、前述のような課題があり、試験方法の改善とフローの修正が必要である。

3. 4. 2 骨材の ASR 試験フローの提案

選定した国内の急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材を用いて国内の試験方法と海外の試験方法を比較した結果を反映し、骨材の ASR 試験フローを策定した。3.4.1 の検証結果を考慮した骨材の ASR 試験フローの提案を図 3.17 に示す。

³⁰ 川端雄一郎，山田一夫，小川彰一，佐川康貴：アルカリラッピングしたコンクリートの促進膨張試験に基づく野外暴露コンクリートの ASR 膨張挙動の予測，セメントコンクリート論文集 Vol. 69, pp. 496-503 (2015)

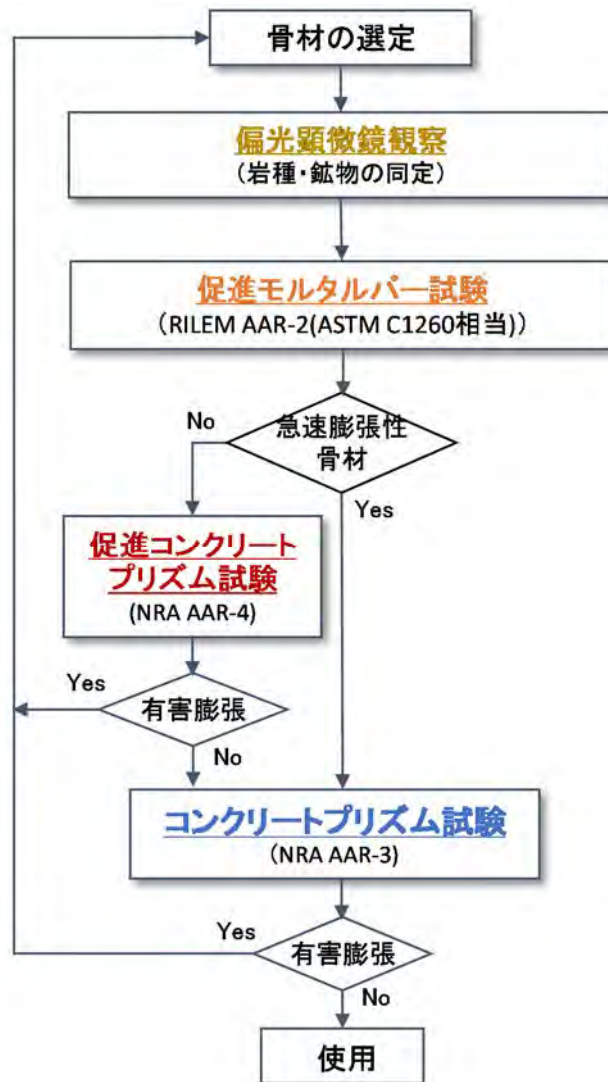


図 3.17 骨材の ASR 試験フローの提案

以下に、前述した課題に対する改善案を示す。

(1) 偏光顕微鏡観察

- ・使用骨材の岩石学的特長を把握する（課題 2 に対応）。
- ・急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材の判定に資する（課題 3 に対応）。

(2) 促進モルタルバー試験 (RILEM AAR-2)

- ・RILEM AAR-2 と同様の試験である ASTM C1260 を準用する（検証 5、課題 8 に対応）。

(3) 促進コンクリートプリズム試験 NRA AAR-4 (RILEM AAR-4 の改善)

- ・NRA AAR-3 を優先したフローとし、急速膨張性骨材を含まない場合に適用する（課

題 12 に対応)。

- ・実調合による試験を実施する (課題 13、14 に対応)。
- ・AW を採用する (課題 11 に対応)。

(4) コンクリートプリズム試験 NRA AAR-3 (RILEM AAR-3 の改善)

- ・実調合による試験を実施する (課題 20 に対応)。
- ・AW を採用する (課題 21 に対応)。
- ・試験体寸法を $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とする (RILEM AAR-3 の $75 \times 75 \times 250\text{mm}$ よりも乾燥／アルカリ溶脱が生じにくい条件と考えられる。一般的に用いられる寸法であり実用性が高い)。

(5) 補足

＜促進コンクリートプリズム試験＞

- ・促進コンクリートプリズム試験の判定基準は、実構造物や暴露試験結果等との対応を含め課題が残るが、RILEM AAR-4.1 に記載される材齢 15 週で 0.03%以下で ASR 反応性なし、とすることが、現在の知見では妥当と考えられる。ただし、AW によって、試験期間中に試験体のアルカリ量が調合でのアルカリ量よりも増加する。安全側の評価となるが、過剰な抑制対策となる可能性がある。
- ・高温・高アルカリ条件では、フライアッシュの場合に十分セメントと反応する前に骨材とアルカリが反応して、その効果が評価できない可能性がある。

＜コンクリートプリズム試験＞

- ・CPT の判定基準も、RILEM AAR-3.1 に記載される、材齢 52 週で 0.05%未満で ASR 反応性なし、ただし、膨張が継続する傾向にある場合や混合材を置換した場合は 2 年間で判定することが、現在の知見では妥当と考えられる。また、アルカリ量を JASS 5N T-603、あるいは RILEM AAR-3.2 に示されるように 3 水準あるいは 4 水準以上のアルカリ量を変えた試験とするのが望ましい。これにより、ASR が生じない限界アルカリ量が求まり、安全余裕度を考慮すれば、調合におけるアルカリ量を実験的に求め、制限することで現実的な ASR 抑制対策とすることができると考えられる。
- ・試験期間が長いため、実工事の前段階で、骨材産地が変わった場合に実工事で想定される幾つかの調合を用いて、予め ASR 反応性の確認しておき、日常の管理は ASTM C1260 との対比で行うなどの運用が考えられる。
- ・AW の濃度の最適値はさらに検討が必要であり、この現象を考慮した試験でのアルカリ量や判定基準の設定が必要である。また、JASS 5N T-603 のよう試験体サイズを $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ と大きく、かつ、WW とすることで、乾燥の影響がなく、溶脱率も小さい試験方法とすることも選択枝としてある。

以下に、骨材の ASR 試験フローの概要を示す。

- ①選定した骨材に対して、偏光顕微鏡観察で骨材の岩種及び鉱物を同定し、REILEM AAR-2(試験方法がより詳細に規定されている REILEM AAR-2 と同様の ASTM C1260 を準用)の促進モルタルバー試験を行い、反応性の有無を判定する。
- ②偏光顕微鏡観察の結果と促進モルタルバー試験の結果から、急速膨張性骨材の場合は、NRA AAR-3 (REILEM AAR-3 を改善：AW、実調合による試験、アルカリ添加量 3 水準)による CPT を行う。急速膨張性骨材でない場合は、NRA AAR-4(REILEM AAR-4 を改善：AW、実調合による試験)による促進コンクリートプリズム試験を行う。
- ③有害と判定された場合は、骨材選定に戻る。無害と判定された場合は、使用可能と判定する。

本試験フローは、新設のコンクリート構造物を建設する際、事前に骨材の反応性を確認する場合に適用できる。また、建設時と同じ骨材が入手又は構造物から採取できれば、既設のコンクリート構造物の ASR 発現可能性について評価する目的で本試験フローを適用可能である。

3. 5 まとめ

< 3. 2 国内外の骨材試験方法の比較 >

- ① JIS による試験方法では、遅延膨張性骨材を排除できない可能性がある骨材でも、RILEM による試験方法で骨材の ASR 反応性を検知できると考えられた。RILEM の考え方を導入することで、遅延膨張性を含め骨材の ASR 反応性は評価可能になると考えられる。
- ② CPT である RILEM AAR-3、RILEM AAR-4 では、海外の文献等で確認、指摘されているように、RILEM AAR-4 の判定基準である材齢 15 週で約 15～23%アルカリが溶脱したり、試験体が乾燥して骨材の ASR 反応性を検知できない場合があることを確認した。また、JASS 5N T-603 では、試験体サイズが RILEM AAR-3 より大きいこと、及び WW を施すことで、乾燥は抑制されるが、材齢 6 ヶ月でのアルカリ溶脱率はおおよそ 5～10%であった。

< 3. 3 骨材試験方法の検討 >

- ① 改善策として、AW を検討した結果、乾燥及びアルカリ溶脱は抑制されることを確認した。また、次章の 4. 2 節での結果であるが、試験期間中にアルカリ量が増加し、安全側の評価となることを確認した。
- ② 骨材の特性を把握し、RILEM 試験方法への適用性を評価するため、膨張に対する温

度依存性、アルカリ濃度依存性の検討を行った。その結果、促進条件の厳しい、高温・高アルカリ条件では、膨張を生じてでも試験体質量の増加が小さい試験水準があり、ASR が生じて ASG が生成しても、ASG が骨材からペースト内に浸潤するなどして膨張に寄与しない可能性が考えられた。したがって、急速膨張性骨材を RILEM AAR-4(60℃)で試験を行う場合に、ASR が生じてでも膨張しない場合がある可能性がある。また、フライアッシュでは十分セメントと反応する前に骨材とアルカリが反応して膨張を生じた可能性があるが、安全側の判定となるため、混合材を含めて評価可能と考えられた。

- ③ ASR の膨張メカニズムとして、ASR によって生じた ASG が、反応性骨材の周囲のセメントペーストマトリクスによって拘束されることが確認された。このことから、ASR の膨張の温度依存性は、反応性骨材内に生じた ASG の生成量、ASG 自体の膨張量及び周囲のセメントペーストの密度（物質移動抵抗性）のバランスによって決定される。したがって、高温・高アルカリ条件では ASG の生成速度が早く、周囲のセメントペーストが十分に緻密な微細構造を形成する前に ASG が生成されることで、反応性骨材内に ASG が拘束できておらず、膨張量が伸びないと考えられた。
- ④ 骨材によって、アルカリ量に対する膨張挙動が異なることから、実際に用いる調合をベースとした CPT で、アルカリ量を数点変えた試験を行うことで、ASR による膨張を生じない限界アルカリ量が求まる。安全裕度を考慮すれば、調合におけるアルカリ量を実験的に求めることができ、現実的な ASR 抑制対策とすることができると考えられる。

< 3. 4 骨材試験方法の提案 >

- ① 試験によって、JNES レポートにおける骨材の ASR 試験フロー案を検証し、得られた知見及び文献に基づき、現状における最適と考えられる改善案を提案した。これにより、遅延膨張性骨材やペシマム現象を生じる骨材に対しても ASR によるコンクリートの膨張リスクを確認できると考えられる。
- ② REILEM AAR-3 は 1 年を要し、混合材（フライアッシュ等）を調合した場合や膨張傾向が認められる骨材では 2 年間の試験を実施することが望ましいと考えられる。実際の運用面では、調合条件に関しては、ペシマムは骨材の調合比が大きく変わらなければ CPT 試験結果に対する影響は小さく、また、単位セメント量、水セメント比の影響も大きくないと考えられる。そこで、実工事に使用されることが想定される範囲で、いくつかの調合を用いて ASR 膨張によるリスクを確認し、骨材産地が変わった場合等に ASR 反応性を確認するなどの適用方法が考えられる。

4. コンクリート構造物の ASR 診断方法

4. 1 実施概要

JNES レポートに、原子力用コンクリートの反応性骨材の評価方法の提案⁵で、コンクリート構造物の ASR 診断フロー（案）（以下、「ASR 診断フロー」という。）が示されている。コンクリート構造物の ASR 診断フローを図 4.1 及び図 4.2 に示す。

図 4.1 に示すように、日常点検によるひび割れ等の外観の変状を検出、既存記録の調査、現地調査を行い、ASR が疑われるようであれば、環境及び変形のモニタリングを行い、その結果に応じてコアを採取し、図 4.2 に示す各種岩石学的評価及びコアの促進膨張試験を行い、ASR の反応性を評価することが提案されている。

本章では、まず図 4.2 で示したコンクリート構造物の ASR 診断フローの有効性を検証した。

試験項目は、コンクリートコアの外観観察（可視光下での展開写真、実体顕微鏡観察、及び ASG 蛍光反応試薬塗布後の短波長（254nm）UV 光観察による蛍光法）及び岩石学的評価（骨材の粉末 X 線回折、岩種構成定量、コンクリート薄片観察（偏光顕微鏡観察、フィルムスキャナによる写真撮影、SEM/EDS（走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型元素スペクトル分析））であり、また、アルカリ収支の計算、コンクリートコアの圧搾抽出から得られた空隙水分析、及び促進膨張試験を実施した。検討においてコンクリート構造物の ASR 診断への有効性について検討した項目を表 4.1 に示す。なお、表中で括弧書きとした項目は、ASR 診断フローに明記された項目ではなく、本事業において追加で有効性を検討した項目である。また、表 4.1 において外観観察と岩種構成定量は ASR 診断フローでは異なるステップとして記載されているが、同じ撮影画像を用いることがある。同様に、SEM 観察と EDS 定量分析についても ASR 診断フローでは異なるステップとして記載されているが、EDS 分析装置は SEM に取り付けられていることから、同時に行うことがある。

各試験項目の対象としたコンクリートは、劣化進行段階の異なる試験体より採取したコア、及び実構造物から採取したコアである。前者は、ASR 反応性の評価において各種試験結果を評価するために、使用材料、アルカリ含有量、劣化進行段階に伴う膨張率が既知である必要があるため、選定した骨材を用い促進養生を行ったコンクリート試験体を作製して実施した。また、後者は、促進養生を行った試験体は実環境下で長期間経過したコンクリートと異なる可能性があるため、ASR を生じた実構造物から採取したコアを用いて実施した。なお、原子力施設では高温状態に長期間晒される環境も考えられることから、高温履歴を受けたと推測される実構造物を選定した。

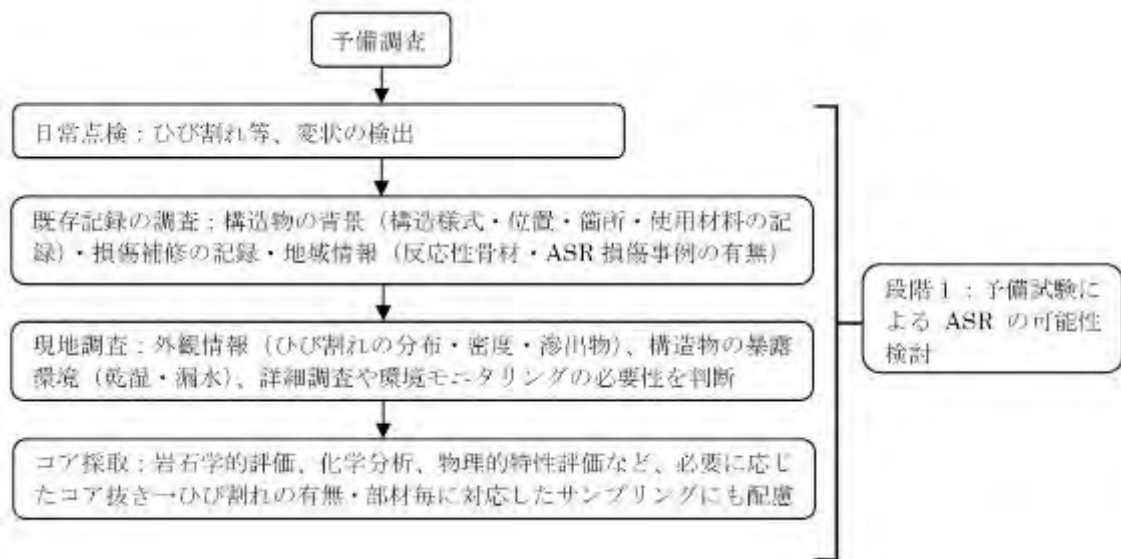


図 4.1 コンクリート構造物の ASR 診断フロー⁵

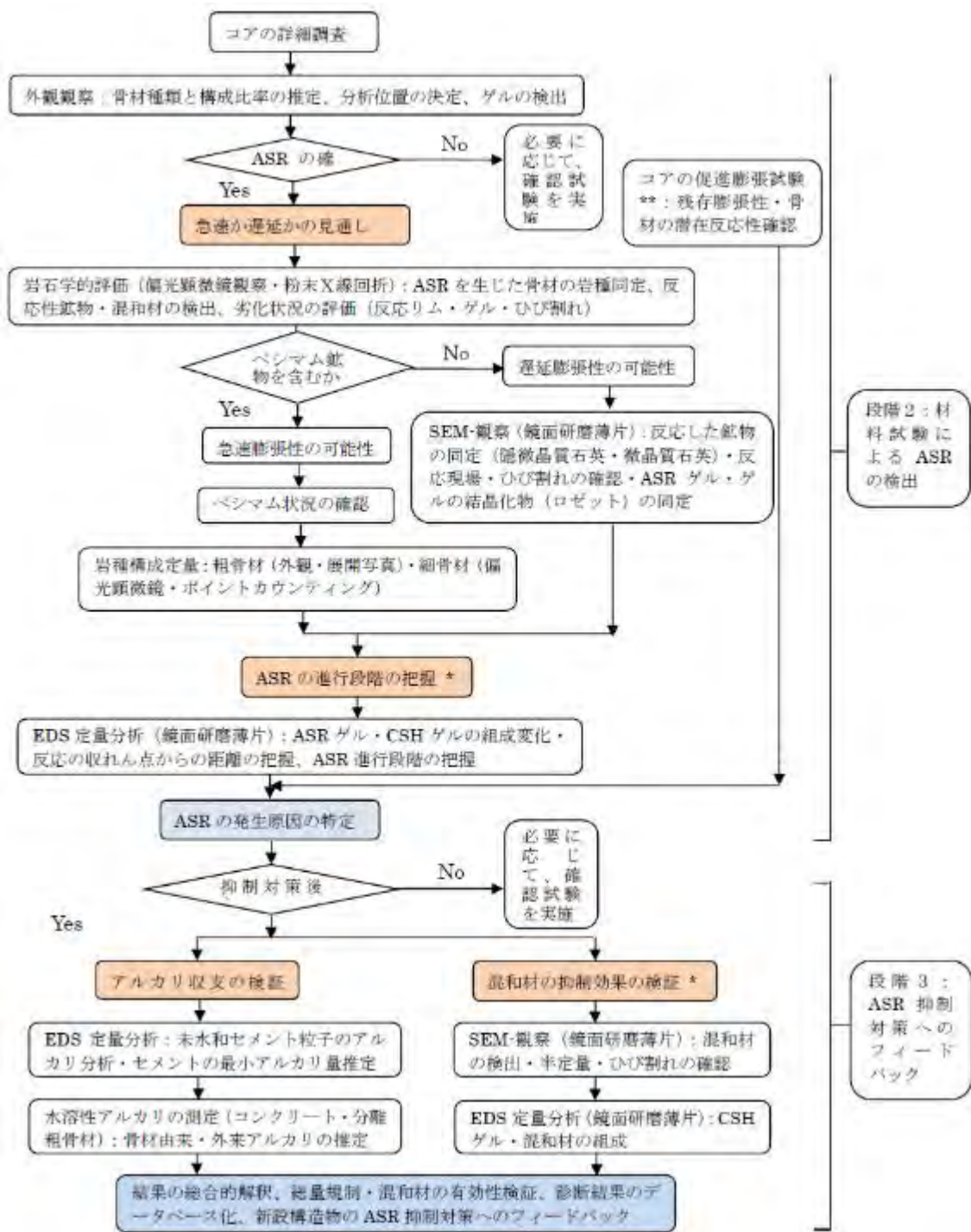


図 4.2 コンクリート構造物の ASR 診断フロー（続き）⁵

表 4.1 コンクリート構造物の ASR 診断への有効性を検討した項目

分類	方法	必要な装置	必要な技術、ノウハウ
外観観察	可視光源下での展開写真	コンクリートカッター、切断面撮影装置	ASR の特性を把握し、ASG を観察できる試料の調整と観察力
	UV 光源下での展開写真（蛍光法*）	ASG 蛍光反応試薬、切断面撮影装置、254nmUV 光源、暗箱（暗室）	標準的な方法は無く技術ノウハウの蓄積が必要
	実体顕微鏡観察	実体顕微鏡	
岩石学的試験	コア XRD	粉末 X 線回折装置、結晶構造データベース	コンクリートからの骨材分離
	岩種構成定量（粗骨材、細骨材）	切断面撮影装置、画像処理装置	岩石学的知識、経験
	薄片偏光顕微鏡観察	コンクリートカッター、研磨装置、偏光顕微鏡	岩石学的知識、コンクリート材料の知識、経験
	薄片スキャナ*	撮影装置	岩石学的知識、コンクリート材料の知識、経験
	薄片 SEM 観察 /EDS 分析	偏光顕微鏡、SEM/EDS	鏡面研磨技術、岩石学的知識、電子顕微鏡観察・組成分析技術、コンクリート材料の知識、経験
アルカリ収支計算		偏光顕微鏡、SEM/EDS、元素定量分析機器	岩石学的知識、コンクリート材料の知識、セメント化学知識、化学分析技術、経験
コア空隙水分分析*		載荷装置、圧搾抽出治具、元素定量分析機器	圧搾技術、圧搾水の取扱い法、抽出液化学分析技術
コアの促進膨張試験 ・ JCI-DD2 法 ・ アルカリ溶液浸漬法		恒温恒湿器、容器類、長さ変化測定装置、薬品	コンクリート試験技術、薬品類取扱い技術

*：診断方法として追加した試験項目

4. 2 劣化進行段階の評価

4. 2. 1 実施概要

劣化進行段階の異なる試験体を作製し各種試験に用いるコアを採取し、ASR 反応性評価において必要な試験体の基礎データを取得する。現実的には年数が経過したコンクリートよりコアを採取して評価を行うのが望ましいが、建設時の使用材料、アルカリ量、あるいは建設当初からの膨張率が既知の ASR を生じたコンクリートは皆無であり、これらの値が不明であると、劣化進行段階やアルカリ収支の評価ができない。そこで、アルカリ量、促進程度（促進養生温度、あるいは促進材齢）が異なるコンクリート試験体（RILEM AAR-3 または AAR-4 に準じた方法で作製した試験体）を作製し、この試験体からコアを採取して外観観察及び岩石学的評価に用いることとした。また、基礎データとして、コアを採取するコンクリート試験体の膨張率変化を測定した。

4. 2. 2 試験方法

(1) 試験体作製

① 使用材料

反応性粗骨材には骨材 T0（急速膨張性骨材）及び骨材 WI（遅延膨張性骨材）を、非反応性粗骨材及び細骨材には骨材 I0（石灰石骨材）を用いた。粗骨材は骨材粒度規定（JIS A 5308 付属書 A「レディーミクストコンクリート用骨材」）に従い、何れも粒径 20-10mm:10-5mm が質量比で 6:4 となるように調整した。その他、普通ポルトランドセメント（ $R_2O=0.55\%$ ）、減水剤はマスターボゾリス No. 70 を使用した。

② コンクリートの調合

コンクリートの調合を表 4.2 に示す。3 章「ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法」の CPT 用試験体と同じ、単位結合材量は 320kg/m^3 、水結合材比（W/B）は 50%、細骨材率（s/a）は 45%とし、空気量は目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$ となるように、AE 調整剤により調整した。

反応性骨材と非反応性骨材の混合比率は、ペシマムを考慮し、急速膨張性骨材 T0 については骨材 T0 を 30%、非反応性骨材を 70%の混合率とし、遅延膨張性骨材 WI については骨材 WI100%とした。なお、反応性骨材なし（非反応性骨材 100%）の調合も 1 水準設定した。

アルカリ量は 3.0kg/m^3 及び 5.5kg/m^3 の 2 水準とし、水酸化ナトリウム水溶液を練混ぜ水に添加し、 R_2O 換算でそれぞれ 3.0 kg/m^3 及び 5.5kg/m^3 となるように練混ぜた。なお、アルカリ量は、セメント、フライアッシュ、混和剤、及び水酸化ナトリウムの総計である。コンクリートの調合を表 4.2 に示す。なお、コンクリートのフレッシュ性状は、スランプが 14.0～17.5cm の範囲、空気量が 4.2～4.7%の範囲であった。

各調合のコンクリートは、75x75x250mm に成形し、AW を施して、促進養生温度 38°C の

試験体は RILEM AAR-3、促進養生温度 60℃の試験体は RILEM AAR-4 の方法に準拠して促進養生を行った。所定の劣化進行段階に達した試験体は、コア採取及びアルカリ量分析に供した。

表 4.2 コンクリートの調合

骨材種類	アルカリ 総量 (kg/m³)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						混和剤		
				水 (W)	結合材(B)		細骨材 (非反応性)	粗骨材		AE 減水剤 (B×%)※1	AE 調整剤 (B×%)※2	NaOH 水溶液※3 (kg/m³)
					セメ ント	フライ アッシュ		反応性	非反応性			
骨材 T0 (急速)	3.0	50	45	160	320	—	821	309	724	1.45	0.1	1.24
	5.5				320	—	821	309	724		0.1	3.74
	3.0				272	48	814	308	718		—	0.71
	5.5				272	48	814	308	718		—	3.21
骨材 WI (遅延)	3.0				320	—	821	1007	—		—	2.49
	5.5				320	—	821	1007	—		—	3.74
骨材 I0(非 反応性)	5.5							320	—		821	—

注) ※1:AE 減水剤は、4 倍希釈液としての添加率を表示

※2:AE 調整剤は、100 倍希釈液としての添加率を表示

※3:5N の水酸化ナトリウム水溶液を使用

③ 劣化進行段階の設定

ASR による劣化進行段階は、試験体の膨張率と膨張が飽和に達する期間（養生を継続しても膨張が大きく継続しない材齢）等を考慮して設定した。設定した劣化進行段階を表 4.3 に示す。

本試験では、試験体の膨張率が一定量に到達した段階で試験体よりコアを採取し、作製した試験体の膨張率と試験体から採取したコアの ASR の劣化進行段階を比較した。

表 4.3 劣化進行段階の設定

劣化進行段階	設定条件
初期	<u>ASR 反応が進んでいない状態</u> ・ある程度の強度発現がないとコアを採取できないため、成形直後ではなく、20℃で 2 週間養生後とした。
中期	<u>ASR 反応がある程度進行した状態</u> ・膨張率が 0.1%強程度に達した状態（後期の約 1/2 の膨張率）。
後期	<u>ASR 反応が収束した状態</u> ・膨張が 0.2～0.3%（中期の約 2 倍）に達した状態（膨張が飽和に達する期間）。

④ 試験体の膨張率及びコア採取

作製した試験体の膨張率の測定結果を図 4.3 に示す。なお、図中の水準名は、骨材種類—アルカリ量—温度の順で示し、フライアッシュを添加した調合は末尾に「FA15」と付記した。

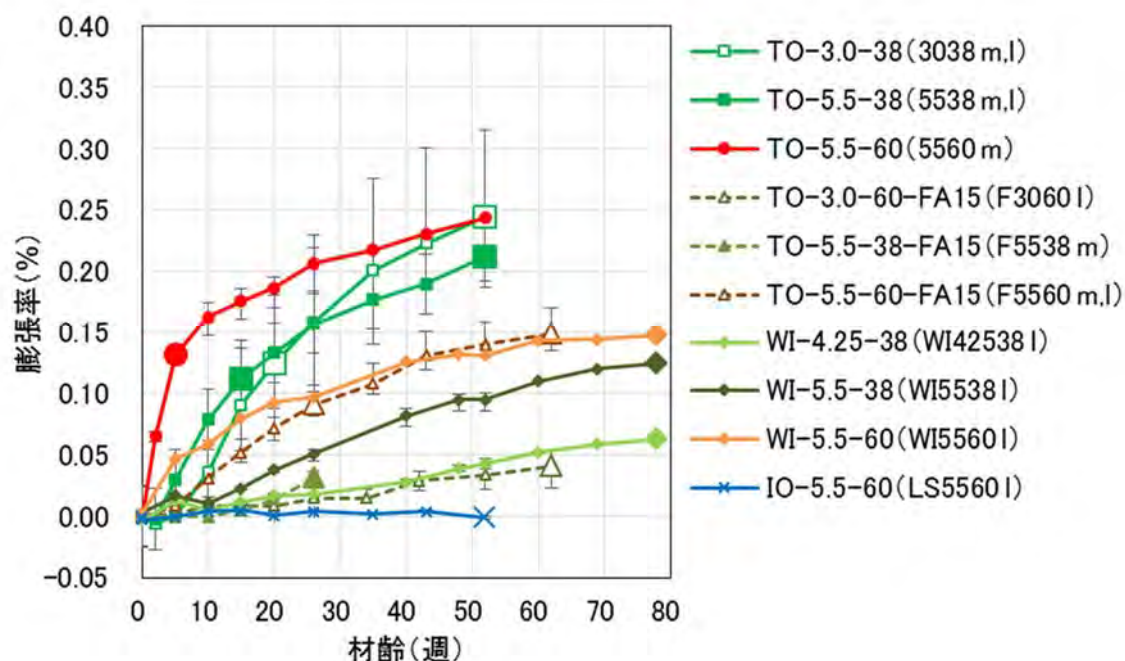


図 4.3 膨張率の測定結果

(コアを採取した時の膨張率のプロットは、大きいサイズで表示している。
凡例の () 内は、(使用骨材(骨材 T0 の場合は省略)又はフライアッシュの有無)-アルカリ
量(30, 55)-養生温度-進行段階(i, m, l)を表す。)

コア採取は、図 4.3 に示した膨張率の測定結果より、表 4.3 で設定した状態に達した時に実施した。試験体からコンクリートコアを採取している様子を図 4.4 に示し、採取された直後のコアの様子を図 4.5 に示す。コンクリートコアは、外径 $\Phi 52\text{mm}$ のコアビットを用いて湿式穿孔で採取し、採取したらコア寸法は約 $\Phi 45\text{mm} \times 75\text{mm}$ である。採取したコアは、表面が乾かないように水膜ができるように十分な水で濡らした状態で市販のポリ塩化ビニリデン (PVDC) 製ラップで包み、その上から湿布で包んだ状態で 1 週間以上経過した後に、各試験に供した。促進養生条件とコア水準名を表 4.4 に示す。なお、コア採取本数は各水準とも 3 本とし、内 1 本は岩石学的評価に、1 本は空隙水分析に用い、残り 1 本は予備とした。

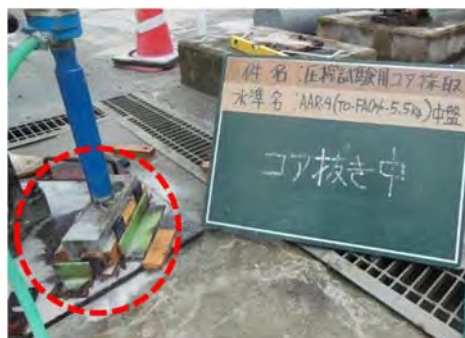


図 4.4 コンクリートコア採取中

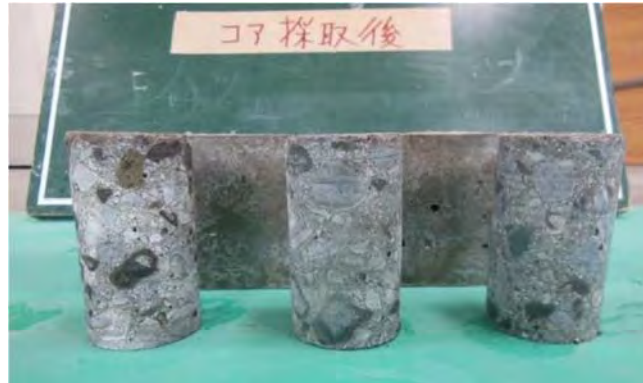


図 4.5 コンクリートコア採取後

表 4.4 促進養生条件とコア水準名

骨材種類	促進養生条件			コア水準名 (コア採取時材齢/膨張率)		
	フライアッシュ置換率 (%)	アルカリ量 (kg/m ³)	温度 (℃)	初期	中期	後期
骨材 T0 (急速)	0	3.00	38	—	3038m (20 週/0.12%)	3038l (52 週/0.25%)
		5.50	38	5538i (0 週/0.00%)	5538m (15 週/0.11%)	5538l (52 週/0.21%)
			60	—	5560m (5 週/0.13%)	—
	15	3.00	60	—	—	F3060l (62 週/0.04%)
		5.50	38	—	F5538m (26 週/0.03%)	—
			60	—	F5560m (26 週/0.09%)	F5560l (62 週/0.15%)
骨材 WI (遅延)	0	4.25	38	—	—	WI42538l (78 週/0.06%)
		5.50	38	—	—	WI5538l (78 週/0.13%)
		5.50	60	—	—	WI5560l (78 週/0.15%)
骨材 IO (非反応性)	0	5.50	60	—	—	IO5560l (52 週/0.00%)

注 1) 水準名は、(使用骨材(骨材 T0 の場合は省略) or フライアッシュの有無)-アルカリ量(30, 55)-養生温度-進行段階(i, m, l)で表示

注 2) 促進養生はすべての試験体に AW を施した。

注 3) コア採取本数は各水準とも 3 本

また、各コア水準で実施した試験項目一覧を表 4.5 に示す。

表 4.5 コア水準名対応の試験実施項目

分類	試験項目	初期	中期					後期							
		5538i	5538m	3038m	5560m	F5538m	F5560m	5538i	3038i	F3060i	F5560i	WI42538i	WI5538i	WI5560i	IO5560i
外観観察	可視光	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	蛍光法	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	実体顕微鏡	—	—	—	—	○	—	○	○	○	○	○	—	○	○
岩石学的評価	コア XRD	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	岩種構成定量	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	薄片偏光顕微鏡観察	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
	薄片スキャナ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	薄片 SEM 観察／EDS 分析	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
アルカリ量推定		—	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	—	○	○
コア空隙水分析		○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	—	—	○	○
コアの促進膨張試験		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注 1) コア XRD は、「2. 3 試験用骨材の岩石学的試験」で実施済である。

(2) 試験体のアルカリ量分析

① 実施概要

外観観察、岩石学的評価に用いる試験体を作製しコアを採取したが、試験体の促進養生中に用いた AW によって試験体中のアルカリ量が変わることが考えられる。評価用試験体のアルカリ量は、アルカリ収支の計算で得られるアルカリ量を評価するために必要である。AW を施さない試験体は促進養生中にアルカリの溶脱が生じる可能性があるため試験体には AW を施しているが、促進養生期間中にコンクリートのアルカリが AW で用いている不織布に溶出、あるいは、AW 中のアルカリが試験体中に吸収され、コア採取時にアルカリ量が変わることが考えられる。

そこで、促進養生終了時の AW で用いた不織布中のアルカリ (Na 及び K) 量を測定し、練混ぜ時のアルカリ量と差引きすることで、各劣化段階までの促進養生後の試験体中のアルカリ量を確定することとした。また、アルカリ収支の計算では、試験体そのものの水溶性アルカリ量及び粗骨材の水溶性アルカリ量の値が必要となるため、試験体の全粉碎試料、及び粗骨材のみを取り出し粉碎した試料を用い、総プロ法⁴⁶⁾によって水溶性アルカリ量を分析し、アルカリ収支の計算データとした。

不織布中のアルカリ量の測定で対象とした試験体は、表 4.4 で示した水準のうち、初期の 5538i と圧搾抽出のみを実施した F5538m、及び予備の WI55381 を除く計 11 水準である。また、水溶性アルカリ量の測定で対象とした試験体は、表 4.4 で示した水準のうち、圧搾抽出のみを実施した F5538m 及び予備の WI55381 を除く計 12 水準である。促進養生前に不織布（AW）を施した試験体を図 4.6 に示す。



図 4.6 促進養生前に不織布（AW）を施した試験体

② 不織布中のアルカリ量の測定

a 測定方法

所定の促進養生をした試験体の不織布を用い、温水抽出及び塩酸抽出し、これら抽出液の Na、K を JIS K 0102 で規定されるフレーム原子吸光法に準じて定量し、促進養生開始時の AW の NaOH 濃度（アルカリ量が 3.0kg/m^3 の試験体は 0.818N 、 5.5kg/m^3 の試験体は 1.5N ）との差異から、試験体の促進養生後のアルカリ量を求めた。

b 測定結果

不織布の分析結果及び促進養生後のアルカリ量を表 4.6 に示す。促進養生後のアルカリ量は、調合時の 5.5kg/m^3 から最大で 6.72kg/m^3 に増加（WI55381 が約 22%増加）した水準もあったが、平均的には約 11%増加であった。試験体のアルカリ量は増加するが、AW を施すことで促進養生後も溶脱せずに保たれた。

表 4.6 不織布の分析結果及び促進養生後のアルカリ量

水準名	促進養生後の不織布 1 枚あたりの 抽出アルカリ量							促進養生開始時の 不織布 1 枚 あたりのアルカリ量			不織布 1 枚あたりの コンクリートに移行したアルカリ量	促進養生後の コンクリートの アルカリ量
	温水抽出 (mg)		塩酸抽出 (mg)		合計 (mg)		R ₂ O ^(A) (mg)	NaOH 濃度 (N)	AW 量 (g)	R ₂ O ^(B) (mg)	(B) - (A) R ₂ O (mg)	R ₂ O (kg/m ³)
	Na	K	Na	K	Na	K						
3038m	403	67.3	4.57	2.20	408	69.5	513	0.818	50	0.818	755	3.47
30381	560	105	16.6	28.7	577	134	779	0.818	50	0.818	489	3.28
5538m	1360	125	7.30	2.82	1367	128	1561	1.5	50	1.5	764	5.75
55381	974	97.7	41.6	41.0	1016	139	1226	1.5	50	1.5	1099	6.08
5560m	1540	132	5.55	3.48	1546	135	1751	1.5	50	1.5	574	5.58
F30601	318	69.2	3.95	18.1	322	87.3	454	0.818	50	0.818	814	3.52
F5560m	829	84.0	6.33	14.9	835	98.9	985	1.5	50	1.5	1340	6.27
F55601	786	80.7	8.67	43.9	795	125	984	1.5	50	1.5	1341	6.30
WI425381	304	23.7	3.24	1.06	307	24.8	345	1.16	50	1.16	1453	5.20
WI55601	408	24.4	11.50	8.53	420	32.9	469	1.5	50	1.5	1856	6.72
I055601	602	120	2.83	1.15	605	121	789	1.5	50	1.5	1536	6.49

③ 水溶性アルカリ量の測定

a 測定方法

アルカリ収支の計算に必要な水溶性アルカリ量は、コンクリートの全粉砕試料、及び、骨材を取り出して粉砕した試料を対象とした。測定は、まず、所定の期間促進養生した試験体(75x75x250mm)を中央から半分に切断し、一つは全量を微粉砕、もう一つは粗骨材を取り出して粗骨材のみを微粉砕した。微粉砕した試料は、総プロ法⁴⁶に記載されるアルカリ量試験に準じて、40℃温水抽出により水溶性アルカリを抽出し、原子吸光法で Na 及び K を定量した。

b 測定結果

水溶性アルカリ量の測定結果を表 4.7 に示す。

「表 4.17 アルカリ収支 (Katayama 法) の計算結果」の(4)列で示すが、コンクリートの水溶性アルカリ量測定値(mg/g)にコンクリートの単位容積質量(g/m³)を乗じると、コンクリート 1m³あたりの水溶性アルカリ量(kg)が算出される。この値は、促進養生後のアルカリ量 (AW による試験体へのアルカリの出入りを補正した値) を下回っており、コンクリート中のアルカリがすべて水溶性アルカリとして抽出されないことを示している。総プロ法では、この水溶性アルカリ量から構造物中のアルカリ量を推定する式が示されており、この計算結果と促進養生後のアルカリ量との関係を図 4.7 に示す。この図より、総プロ法を用いたアルカリ量の推定は、試験体のアルカリ量を大まかには示すがばらつきが大きいことが分かる。

表 4.7 水溶性アルカリ量の測定結果

水準名	コンクリート			骨材		
	ws-Na ₂ O (mg/g)	ws-K ₂ O (mg/g)	ws-Na ₂ Oeq (mg/g)	ws-Na ₂ O (mg/g)	ws-K ₂ O (mg/g)	ws-Na ₂ Oeq (mg/g)
5538i	1.43	0.35	1.66	0.26	0.11	0.33
3038m	0.76	0.29	0.95	0.56	0.23	0.71
3038l	0.71	0.25	0.87	0.45	0.12	0.53
5538m	1.31	0.30	1.51	0.89	0.19	1.02
5538l	1.14	0.25	1.30	0.97	0.36	1.21
5560m	1.38	0.27	1.56	0.61	0.12	0.69
F3060l	0.68	0.25	0.84	0.58	0.20	0.71
F5560m	1.48	0.36	1.72	0.79	0.15	0.89
F5560l	1.12	0.25	1.28	0.77	0.09	0.83
WI42538l	1.14	0.36	1.38	0.84	0.23	0.99
WI5560l	1.65	0.35	1.88	1.22	0.21	1.36
IO5560l	1.44	0.14	1.53	0.05	0.02	0.06

注) ws は水溶性を表す。

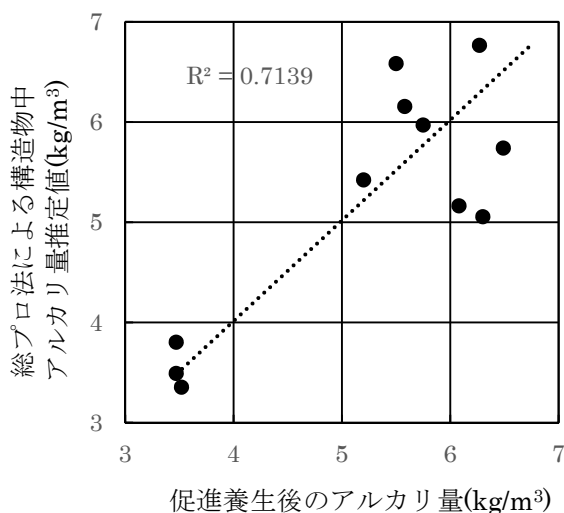


図 4.7 促進養生後の試験体のアルカリ量と、総プロ法による構造物中アルカリ推定値との関係

4. 2. 3 試験結果

(1) 外観観察

コアの外観を肉眼や実体顕微鏡で観察し、ASG や骨材の反応リムの状況から ASR の発生や進行を確認する。観察は以下の 3 項目について実施した。

なお、今年度撮影した各水準の写真は、「付録」に集約した。

- ① 可視光源下での展開写真
- ② 可視光源下での実体顕微鏡写真

③ UV 光源下での展開写真（蛍光法）

① 可視光源下での展開写真

採取直後のコア表面が乾かないうちに水膜ができるように十分な水で濡らした状態で市販のポリ塩化ビニリデン（PVDC）製ラップで包み、その上から湿布で包んだ状態で1週間以上経過した後、コンクリートコアを開封し外観観察を行った。コンクリートコア側面の展開写真は、図 4.9 に示すように、コンクリートコアを横に寝かせた状態で白色 LED 照明を当て、上方からデジタルカメラで撮影した写真を用いた。照明には、白色 LED 照明、カメラには、デジタル一眼カメラ（SONY、 α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー、E30mm F3.5 マクロレンズ）を用いた。コアの側面を約 30° ずつ回転させて撮影を行い、得られた約 12 枚の画像を画像加工ソフト（Adobe Photoshop CS6）で連結し、展開写真を作成した。

可視光源下で撮影した画像から作成した展開写真例を図 4.9 に、観察結果のまとめを表 4.8 に示す。図 4.9 に示されるように、中期から後期にかけて反応性骨材に反応リムが生じ、コア側面全体を白色の ASG が覆っている様子が確認されたことから、ASR 診断への有効性があると判断できる。



図 4.8 コンクリートコア外観観察マクロ写真撮影状況（可視光源）

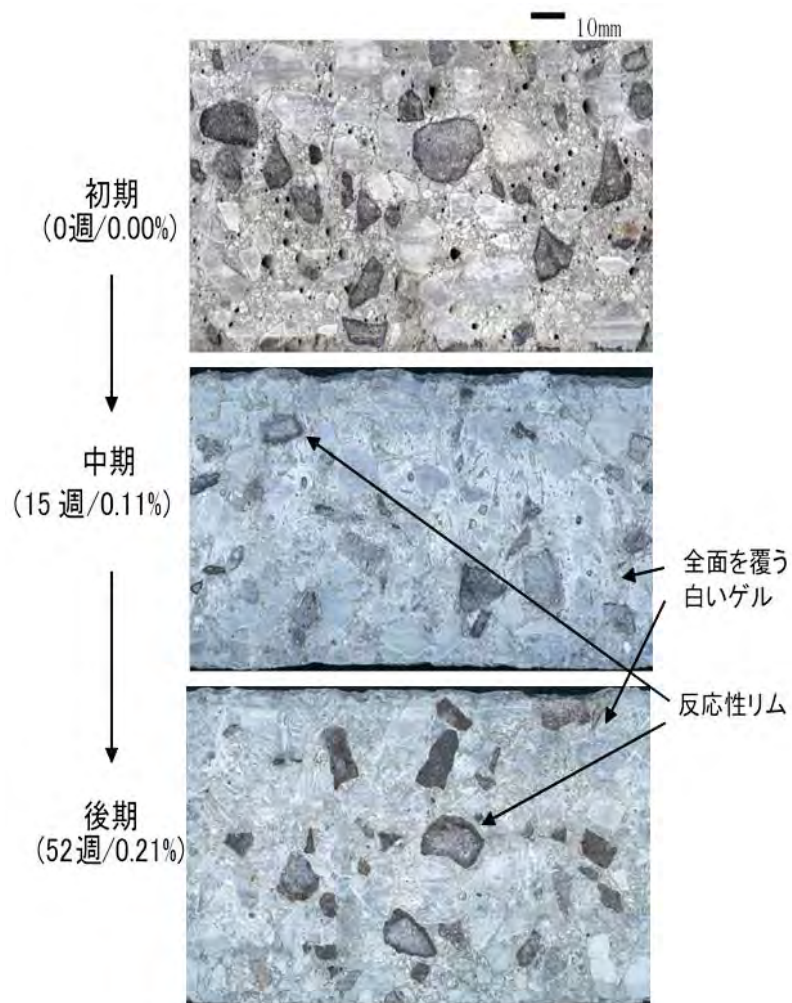


図 4.9 コンクリートコア展開写真例
(5538、可視光源、75mm×141mm)

表 4.8 可視光源下での外観観察結果

コア水準名		観察結果
初期	5538i	反応リム
中期	5538m	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	3038m	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	5560m	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	F5538m	反応リム
	F5560m	反応リム
後期	5538l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	3038l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	F3060l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	F5560l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	WI42538l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	WI5538l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	WI5560l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル
	IO5560l	反応リム、全面を覆う透明または白いゲル

② 実体顕微鏡観察

コンクリートコア側面の観察を行った後、小割切断機で半分に油式切断する。アセトンで切削油を洗い流し、1日程度放置した後、実体顕微鏡観察を行った。実体顕微鏡写真は、三眼の実体顕微鏡にアダプター（マイクロネット、NY-1S 35 スーパーアダプター）を用いて取り付け付けたデジタルカメラ（SONY、 α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー）で撮影した。図 4.10 の左側に実体顕微鏡による撮影画像例を示す。なお、右側には左側の撮影画像に用いた同一切断面のマクロ写真を示す。観察結果を表 4.9 に示す。図に示すように、反応性骨材の ASG の滲み出し、反応リム、ひび割れといった様子が確認されたことから、ASR 診断への有効性があると判断できる。なお、左側の撮影画像のような実体顕微鏡観察のみの画像では、コンクリート断面内における ASR 劣化による損傷レベル（ひび割れや ASG の量など）といったコンクリート全体の俯瞰的な情報が損なわれてしまうため、右側に示すようなマクロ写真と併せて記録することが望ましい。

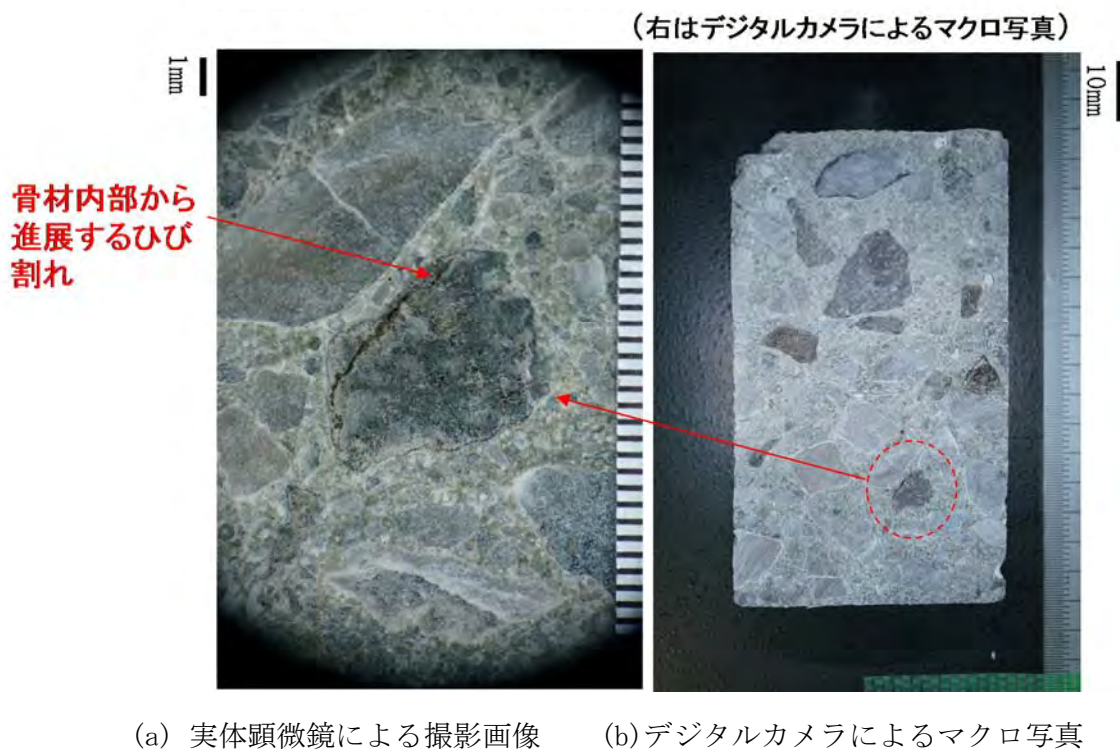


図 4.10 コンクリートコア切断面観察例 (30381)

表 4.9 実体顕微鏡観察結果

コア水準名		観察結果
初期	5538i	—
中期	5538m	—
	3038m	—
	5560m	—
	F5538m	反応リム、ひび割れ、ゲルの滲み出し、気泡を埋めるゲル
	F5560m	—
後期	55381	反応リム、ひび割れ、ゲルの滲み出し、気泡を埋めるゲル
	30381	反応リム、ひび割れ、ゲルの滲み出し、気泡を埋めるゲル
	F30601	反応リム、ひび割れ、気泡を埋めるゲル
	F55601	反応リム、ひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI425381	ひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI55381	ひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI55601	ひび割れ、気泡を埋めるゲル
	I055601	ASR の症状確認できず。

③ UV 光源下での展開写真（蛍光法）

蛍光発色試薬により、ASG は短波長 UV 光（遠紫外線：ブラックライト）下で緑色に蛍光反応を示す。そのため、ASG を容易に観察でき、コアの外観観察の段階における ASG の検出に有効と考え、診断方法として追加した。

コンクリートコア側面の可視光での観察を行った後、前処理として、蛍光発色試薬（ファースト社製）を塗布し、ポリエチレンフィルムで包んだ状態で 30 分以上経過した後、フィルムを取り外し表面の余剰な試薬を乾燥させた。照明には、短波長（254nm）UV ランプ（アズワン、SUV-16×2 台）、カメラには、デジタル一眼カメラ（SONY、α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー、E30mm F3.5 マクロレンズ）を用いた。ASG 蛍光反応試薬により ASG は、短波長（254nm）UV 光源下で緑色に蛍光反応を示す³¹。コンクリートコア側面の展開写真は、図 4.11 のように、コンクリートコアを横に寝かせた状態で短波長（254nm）UV ランプを当て、上方からデジタルカメラで撮影した写真を用いた。コアの側面を約 30°ずつ回転させて撮影を行い、得られた約 12 枚の画像を画像加工ソフト（Adobe Photoshop CS6）で連結し、展開写真とした。

³¹ 参納千夏男，丸山達也，山戸博晃，鳥居和之：“ゲルフルオレッセンス法による ASR 簡易診断手法の開発”，コンクリート工学年次論文集，35，1，pp. 973-978（2013）



図 4.11 コンクリートコア外観観察マクロ写真撮影状況（蛍光法）

短波長（254nm）UV 光源下で撮影した画像から作成した展開写真例を図 4.12 に、観察結果を表 4.10 に示す。図 4.12 に示すように、可視光による外観観察と比較してコア側面全体を ASG が覆っている様子が明確に確認されたことから、可視光源下での展開写真に加えて蛍光法を実施することで ASR 診断への有効性があると判断できる。

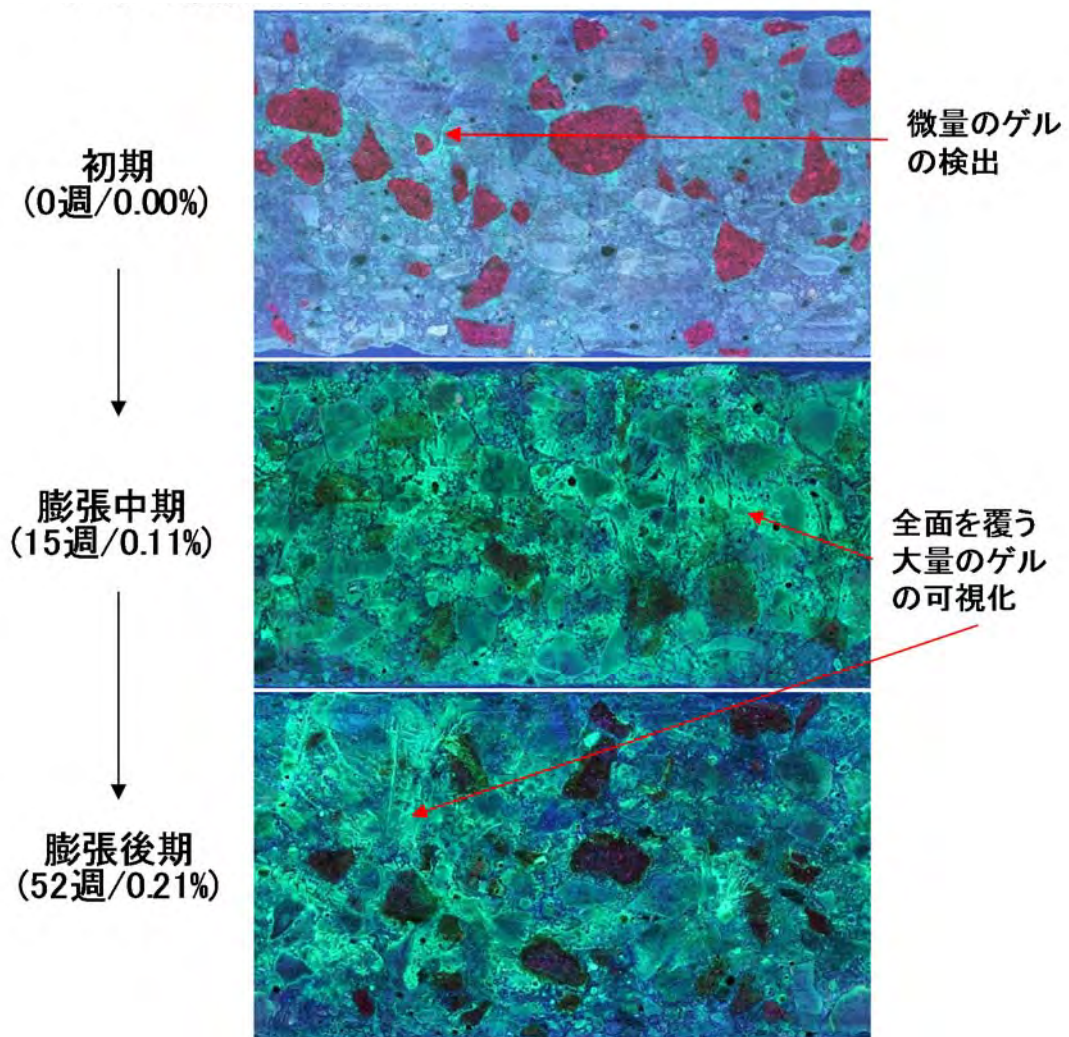


図 4.12 コンクリートコア展開写真例
(5538、蛍光法、75mm×141mm)

表 4.10 短波長 (254nm) UV 光源下での観察結果

コア水準名		観察結果
初期	5538i	微量の緑色蛍光のゲル
中期	5538m	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	3038m	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	5560m	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	F5538m	少量の緑色蛍光のゲル
	F5560m	少量の緑色蛍光のゲル
後期	5538l	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	3038l	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	F3060l	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	F5560l	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	WI42538l	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	WI5538l	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	WI5560l	全面を覆う緑色蛍光のゲル
	I05560l	—

(2) 岩石学的評価

岩石学的評価として、岩種構成定量、薄片偏光顕微鏡観察、薄片スキャナ、薄片 SEM 観察/EDS 分析を実施した。

岩種構成定量については、外観観察で得られた可視光源下での展開写真を用いた。薄片偏光顕微鏡観察、薄片スキャナ、薄片 SEM 観察/EDS 分析については、外観観察を終えたコンクリートコアからコンクリート薄片を作製し、観察を行った。コンクリート薄片の作製は、日本コンクリート工学会研究委員会報告¹³に記載されている手法に準じて行った。以下に、手順をまとめる。コンクリートコアの切断は、小割切断機を用いて切削油による油式切断を行い、観察したい箇所を含んだコンクリート片（チップ（およそ幅 3cm×奥行 2cm×厚さ 1cm））を切り出した。得られたコンクリートチップをアセトンに漬け、切削油の洗浄を行い、ロータリーポンプを接続した真空デシケータ内で真空乾燥を行った。十分に真空乾燥を行った後、チップに低粘性のエポキシ樹脂を真空含浸させ硬化させてから、観察したい面を 800 メッシュまで切削油による油式研磨を行った。研磨後、コンクリートチップをエタノールに漬け、切削油の洗浄を行い、再度真空乾燥させた。真空乾燥後は、研磨した面を常温硬化型接着剤（アラルダイト）で鉤物用スライドガラスに脱気をしながら低温（38℃）で接着した。接着剤の硬化後、二次切断でスライドガラスに接着されたチップを約 1mm に切断を行い、400 メッシュから順に 2000 メッシュまで油式研磨を行ってから、#10000 のダイヤモンドペーストで鏡面研磨を行い、反射顕微鏡で表面の平滑度を確認して、ルブリカントを染み込ませたキムワイプで切削油をふき取り完成品とした。ASR 観察用の薄片は、薄くする研磨過程でゲルが落ちてしまうのを抑えるために最終的には 30um 程度にしている。

① 粗骨材の岩種構成定量

図 4.9 に示した可視光源下で撮影した画像から作製した展開写真（約 75mm×141mm）を用いて、T0 骨材、WI 骨材、石灰石碎石の面積比を画像解析ソフトウェア（Image J）を用いて求めた。展開写真上に T0 骨材を赤色、WI 骨材を黄色、石灰石碎石を緑色に塗り分けた例を図 4.13、図 4.14 に示す。これらの図を用いて画像解析を行い、撮影画像における粗骨材の総面積比（粗骨材総量）と T0 シリーズについてはペシマム比を計算した。調合から算出した値と比較した結果を粗骨材総量について図 4.15、表 4.11、ペシマム比について図 4.16、表 4.12 に示す。図に示されるように、粗骨材総量は調合から算出した値よりも総じて一定の割合で高くなる傾向が得られた。一方で、図 4.16 に示されるようにペシマム比は F5538m については大きく外れているものの調合から算出した値とほぼ同等の結果が得られた。これは、今回用いた試験体が 75×75×250mm のコンクリートプリズムから採取したコンクリートコアであったが、コンクリートプリズムの型枠効果により理想値よりも粗骨材が型枠内に多く入ったためと考えられる。このことから、粗骨材の岩種構成定量プロセス自体には問題はなく、粗骨材の岩種それぞれの骨材を精度よく定量でき、ASR 診断への有効性があると判断できる。なお、画像分析において、石灰石は白色であるため、コア側面に ASG が多く滲み出していると ASG に覆われている石灰石碎石を見落とさないように注意を要する。これを改善するには、粗骨材の岩種構成定量を行う際には、表面に ASG が滲み出る前、もしくは外観観察後に表面の ASG を洗い落として再度画像撮影を行うことや、図 4.12 に示されるように UV 光源下で撮影した画像を補完的な情報として粗骨材の位置を確認したほうが、ASG に覆われている粗骨材を見落とすリスクを低減できる可能性があると考えられた。

なお、細骨材については、劣化進行段階の評価で作製したコンクリートに石灰石砕砂（骨材 I0）を調合で 100%用いているため、岩種構成定量は行っていない。



図 4.13 粗骨材 T0 の岩種構成定量例
(55381、75mm×141mm)

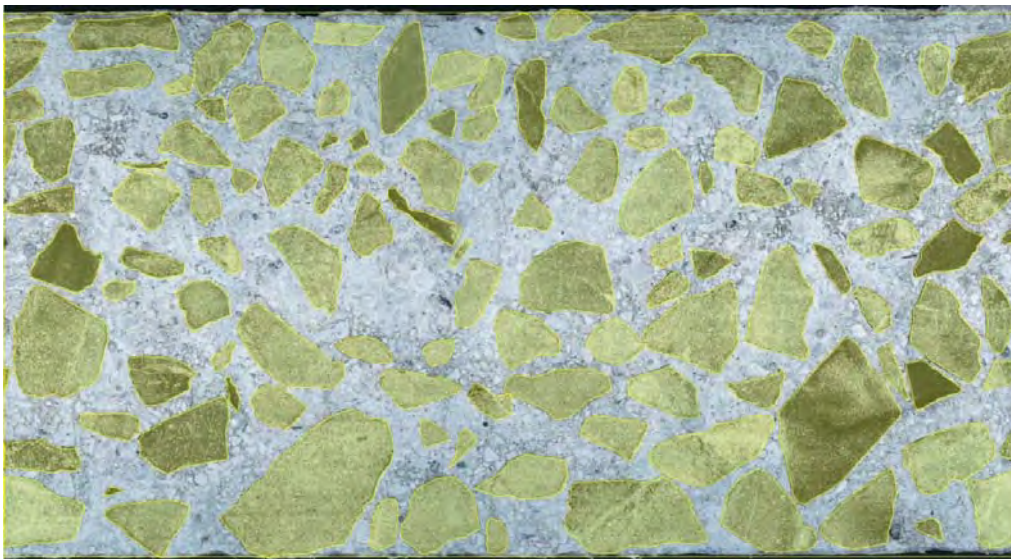


図 4.14 粗骨材 WI の岩種構成定量例
(WI55381、75mm×141mm)

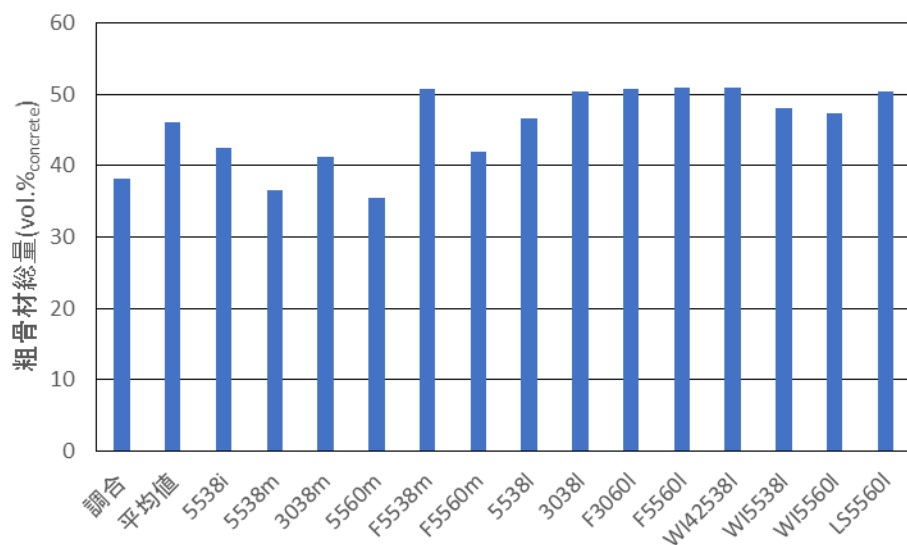


図 4.15 岩種構成定量結果（粗骨材総量）

表 4.11 岩種構成定量結果（粗骨材総量）

コア水準名		粗骨材総量 (vol.%)
調合		38.2
初期	5538i	42.5
中期	5538m	36.6
	3038m	41.2
	5560m	35.5
	F5538m	50.7
	F5560m	41.9
後期	5538l	46.7
	3038l	50.4
	F3060l	50.8
	F5560l	50.9
	WI42538l	51.0
	WI5538l	48.1
	WI5560l	47.4
	IO5560l	50.4
平均値		46.0
標準偏差		5.5

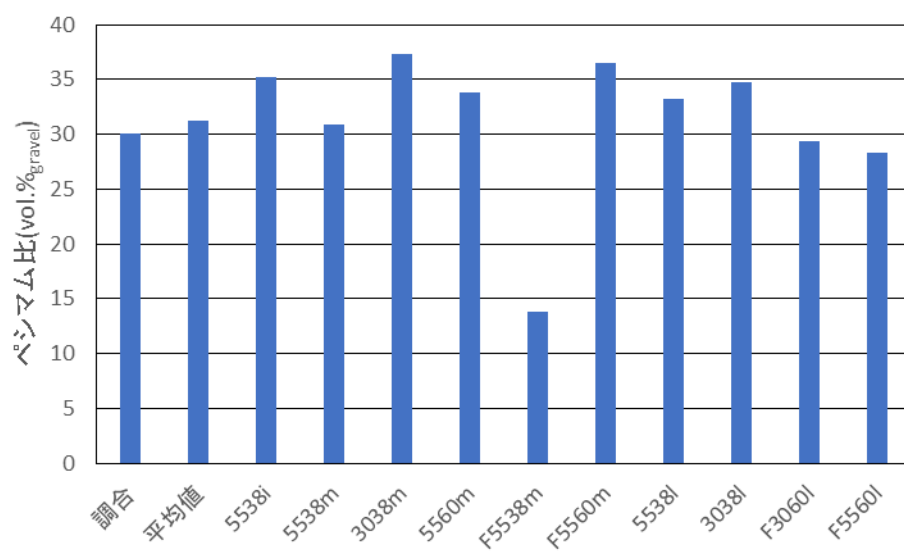


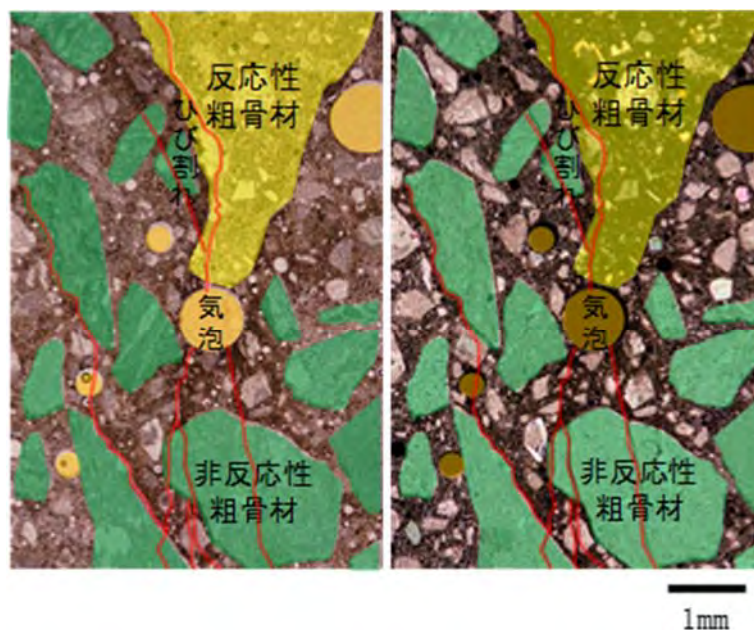
図 4.16 岩種構成定量結果 (ペシマム比)

表 4.12 岩種構成定量結果 (ペシマム比)

コア水準名		ペシマム比 (vol.%gravel)
調合		30.1
初期	5538i	35.2
中期	5538m	30.9
	3038m	37.3
	5560m	33.8
	F5538m	13.8
	F5560m	36.5
後期	5538l	33.2
	3038l	34.8
	F3060l	29.4
	F5560l	28.3
平均値		31.3
標準偏差		6.8

② コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察

コンクリート薄片の偏光顕微鏡写真例を図 4.17 に示し、各劣化進行段階における偏光顕微鏡写真例を図 4.18 に示す。また、一連の観察結果から得られた ASR の進行度の判定結果を表 4.13 に示す。撮影は、偏光顕微鏡（Nikon、ECLIPSE E200 POL、接眼レンズ：x10、対物レンズ：x2、x4、x10、x40）にアダプター（マイクロネット、NY-1S 35 スーパーアダプター）を用いて取り付けしたデジタル一眼カメラ（SONY、 α 7R II、4240 万画素、35mm フルサイズ CMOS センサー）で行った。薄片全体の分布情報（モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係）は限定されるが、粗骨材、細骨材の岩種及び鉱物組成、反応性骨材内や反応性骨材からペーストマトリクスへと延びるひび割れや、ひび割れや気泡を充填する ASG を微細なレベルまで観察可能であることが確認されたことから、ASR 診断への有効性があると判断できる。開放ニコルで観察した場合にはひび割れやゲルが見易く、直行ニコルで観察した場合には鉱物種の判定がし易くなる。なお、薄片全体の分布情報が限定されるので、後述の薄片スキャナを併用することで全体の情報を補完することが望ましいと考えられる。



(a) 開放ニコル

(b) 右：直交ニコル

図 4.17 偏光顕微鏡写真例
(55381、 $\times 20$ 、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ 、 $t \approx 30\mu\text{m}$)

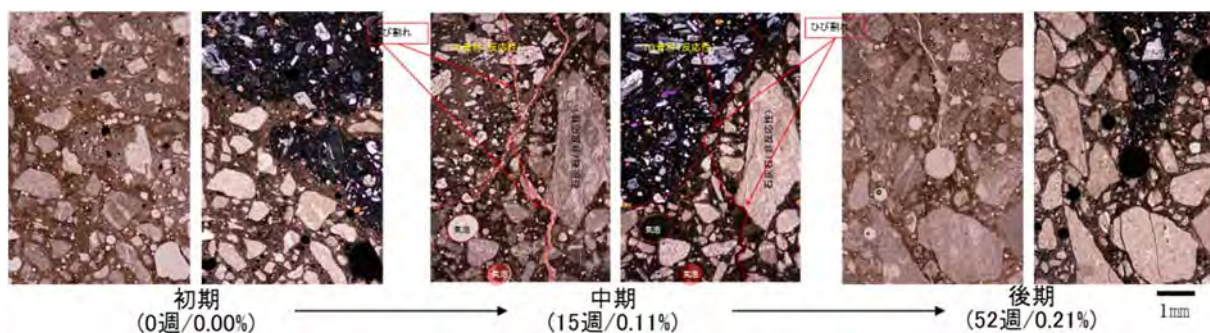


図 4.18 劣化進行段階における偏光顕微鏡写真例(5538)

表 4.13 偏光顕微鏡による ASR の進行度判定結果

水準名	試験条件				劣化度評価		
	骨材種類	FA 置換率 (%)	アルカリ量 (kg/m ³)	温度 (℃)	初期	中期	後期
3038	T0	0	3.00	38	-	◎◎◎◎◎→ 3	◎◎◎◎◎→ 3
5538			5.50	38	◎◎無無無→ 1	◎◎◎◎◎→ 3	◎◎◎◎◎→ 3
5560				60	-	◎◎◎◎◎→ 3	-
F3060		15	3.00	60	-	-	◎◎◎◎○→ 3
F5538			5.50	38	-	◎○○○無→ 2	-
F5560				60	-	◎◎◎◎◎→ 3	◎◎◎◎◎→ 3
WI42538	WI	0	4.25	38	-	-	◎◎◎◎○→ 3
WI5538			5.50	38	-	-	◎◎◎◎◎→ 3
WI5560				60	-	-	◎◎◎◎◎→ 3
IO5560	IO	0	5.50	60	-	-	無無無無無→ 1

ASR の進行→

i	ii	iii	iv	v
骨材	ペースト	骨材	ペースト	ペースト
反応リム	ゲルの取巻き	ひび割れゲル充填	ひび割れゲル充填	気泡ゲル充填

※ i、ii は、コアの外観観察の結果から判定した。

◎顕著、○あり、+痕跡程度 劣化度の評価：1 軽微、2 中程度、3 顕著

③ 薄片スキャナ

コンクリート薄片を大山らの報告³²を参考にして、市販のフィルムスキャナ（EPSON、GT-X980、最大光学解像度 6,400dpi）を用いて図 4.19 に示すように全景写真を撮影した。観察結果を表 4.14 に示す。偏光顕微鏡視野と比較して薄片全体の分布情報（モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係）を取得可能であり、コアの外観観察と薄片の偏光顕微鏡観察の中間のスケールの情報を補完できる。加えて、

³² 大山次男，伊藤嘉紀，北風嵐：“フィルムスキャナーによる岩石・鉱物の大型薄片の偏光像観察”，東北アジア研究，4，pp. 207-211（2000）

SEM/EDS 観察中に全景写真を手元に置いておくと全体の中の観察位置を把握することが可能である。図に示されるように、粗骨材、細骨材の岩種や、顕著な ASR が生じている場合、フィルムスキャナによって反応性骨材の反応リムに沿った骨材内部のひび割れ、反応性骨材から周囲のセメントペーストマトリクスへと延びるひび割れ、ひび割れや気泡を充填する ASG が観察可能であることが確認されたことから、外観観察及び偏光顕微鏡観察と組み合わせて実施することで ASR 診断への有効性があると判断できる。

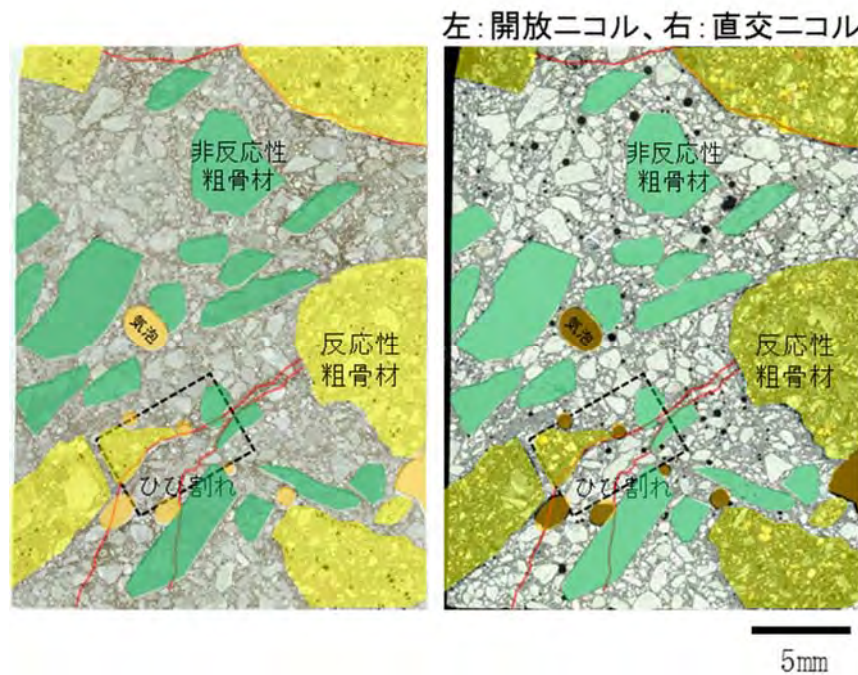


図 4.19 コンクリート薄片全景画像例
(55381、24mm×32mm、t=約 30um)

表 4.14 薄片スキャナ観察結果

コア水準名		観察結果
初期	5538i	ASR の症状確認できず
中期	5538m	太いひび割れ
	3038m	細いひび割れ
	5560m	太いひび割れ
	F5538m	細いひび割れ
	F5560m	細いひび割れ
後期	55381	太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	30381	太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	F30601	細いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	F55601	細いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI425381	太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI55381	太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	WI55601	太いひび割れ、気泡を埋めるゲル
	I055601	ASR の症状確認できず。

④ コンクリート薄片の SEM 観察/EDS 分析

SEM 観察には、ショットキー電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM) (JEOL、JSM-7001F、加速電圧：0.5～30kV、倍率：x10～1,000,000、分解能：1.2nm (30kV)、3.0nm (1kV)) を使用し、加速電圧：15.0kV、ワーキングディスタンス 10mm、電流量 1.40nA で観察を行い、元素定量分析 (EDS 分析) には、FE-SEM に併設されたエネルギー分散型スペクトル検出装置 (EDS) (Oxford、INCA) を使用し、測定時間 60s で、 Na_2O 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 P_2O_5 、 SO_3 、 K_2O 、 CaO 、 TiO_2 、 MnO 、 Fe_2O_3 を定量対象とした。なお、撮影画像は、偏光顕微鏡画像と比較を行いやすくするために、x40 の画像を掲載したが、観察自体は、x2000 程度までの倍率を使用している。また、EDS 分析については、x800～x2000 程度の倍率で実施している。なお、今年度撮影した各水準の写真は、「付録」に集約した。

a コンクリート薄片の SEM 観察

コンクリート薄片の SEM 観察から得られた反射電子像 (BEI 像) 写真例を図 4.20 に、SEM 観察結果を表 4.15 に示す。図に示されるように、偏光顕微鏡と比較して薄片全体の分布情報 (モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係) は限定されるが、劣化進行段階の違いに応じて、反応性骨材内や反応性骨材からペーストマトリクスへと延びるひび割れや、ひび割れや気泡を充填する ASG をより微細なレベルまで観察可能であることが確認されたことから、ASR 診断への有効性があると判断できる。

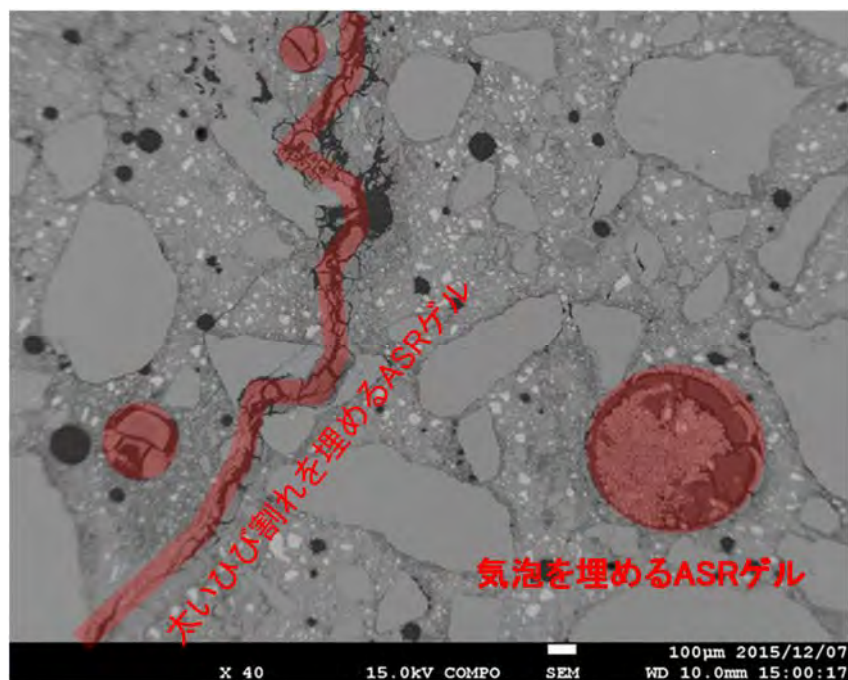


図 4.20 反射電子像 (BEI) 写真例

(5538m、3.2mm×2.4mm)

表 4.15 SEM 観察結果

コア水準名		観察結果
初期	5538i	ASR の症状確認できず
中期	5538m	太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	3038m	太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	5560m	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	F5538m	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル
	F5560m	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
後期	5538l	太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	3038l	太いひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	F3060l	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	F5560l	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	WI42538l	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	WI5538l	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	WI5560l	ひび割れ、ひび割れを埋めるゲル、気泡を埋めるゲル
	IO5560l	ASR の症状確認できず。

b コンクリート薄片の EDS 分析

Katayama らの方法^{33, 34}では、Ca/Si モル比－Ca/(Na+K)モル比の関係図において、ASG の組成線の延長と CSH ゲルの組成線が交錯する ASR の「収斂点」からの ASG の組成の距離を確認し、ASR がどの程度収束に近づいているかを把握するとともに、ASG の膨張性を評価することが提案されていることから、Ca/Si モル比－Ca/(Na+K)モル比の関係図を作成した。

図 4.21 に示すように、ASG の組成の分布は、ASG の化学組成の分析結果から得られた組成線上で、ASG 組成が変化していることが確認された。この図の意味するところを以下に示す。

ASR ゲルは、骨材中のひび割れからセメントペースト中のひび割れに浸出するとゲルの Ca/Si が上昇し、セメント中の水和物の組成に近づいていく。一方、コンクリート中のセメント鉱物（エーライト、ビーライト）は水和に伴って Ca を放出し、Ca/Si が低下する。そのため ASR が進行すると ASR ゲルと CSH ゲル（カルシウムシリケート水和物）の組成は一致するようになり、上図の収斂点付近に収斂する。反応初期の膨張性の高いアルカリの多い ASR ゲルは図の左下に位置し、反応終期の膨張性のなくなった Ca の多い ASR ゲルは、図の右上に位置する。

表 4.16 に EDS 分析結果を示す。また、後述する「4. 4 ASR 劣化した実構造物によ

³³ Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., Yamato, T. “Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan”, Proceedings of 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAAR), pp. 862-874 (2008)

³⁴ Katayama, T. “Late-expansive ASR in a 30-year old PC structure in eastern Japan”, Proceedings of 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAAR) (2012)

る評価」の「4. 4. 3 岩石学的評価」に示した図 4. 74 及び図 4. 75 で認められるように、劣化進行程度の違いによって ASG 組成が収斂点付近に変化していることから、ASR 診断への有効性があると判断できる。なお、図 4. 21 からわかるように同一のコンクリート薄片内においても ASG の組成には分布がみられる。これは、反応性骨材内の ASG は Ca が少なく、ペースト部へのひび割れ内の ASG は Ca が多いためである。このことから、コンクリート構造物の ASR 反応性を評価するには、反応性骨材内の Ca が少ない ASG は液体に近いゾル状であるため、薄片作製の際に脱落しないように慎重に加工することが重要である。

なお、今年度作成した各水準の図は、「付録」に集約した。

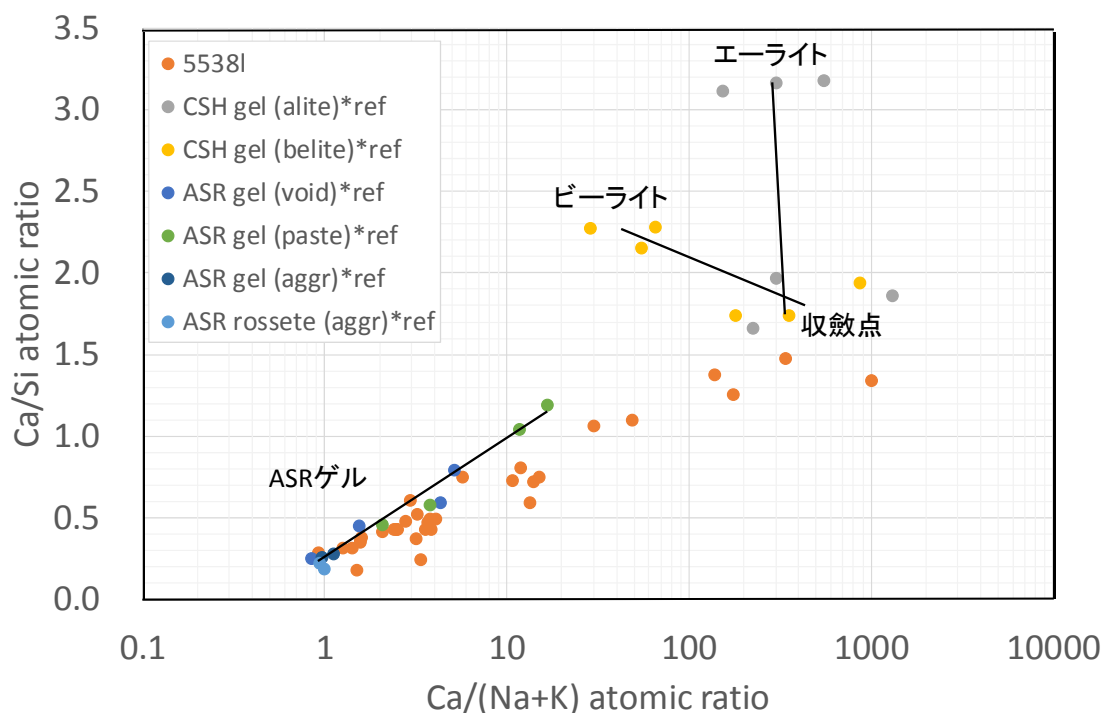


図 4. 21 ASG の化学組成分布 $[Ca/Si] - [Ca/(Na+K)]$ 図例 (5538I) ^{33, 34}

表 4.16 EDS 分析結果

コア水準名		分析結果
初期	5538i	ASG を確認できず。
中期	5538m	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 100$
	3038m	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 100$
	5560m	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 100$
	F5538m	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 10$
	F5560m	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 100$
後期	5538l	$1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 1000$
	3038l	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 1000$
	F3060l	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 10$
	F5560l	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 100$
	WI42538l	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 100$
	WI5538l	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 100$
	WI5560l	$0.1 < \text{Ca}/(\text{Na}+\text{K}) < 10$
	I05560l	ASG を確認できず。

(3) アルカリ収支計算

JNES レポートにおいては、既存コンクリート構造物のコンクリート中のアルカリ量がアルカリ総量規制値の範囲内であったかどうか検証を行うことを推奨している。最小アルカリ量の推定及びコンクリート中の使用材料の水溶性アルカリ量の組み合わせによるアルカリ収支³⁵を計算しコンクリート中の全アルカリ量の推定を行った。これは、薄片を用いた SEM/EDS 分析値、水溶性アルカリ量測定値（全粉砕と取り出した粗骨材）から計算する方法である。

ここで、最小アルカリ量とは、クリンカー（石こう添加前のセメント）中のエーライト・ビーライト・アルミネート・フェライトの4種類の鉱物に含まれるアルカリ量の合計として片山氏が定義したものである。また、クリンカーには Na、K として Na_2SO_4 や K_2SO_4 が含まれ、これらは水に容易に溶けるので水溶性アルカリと呼ばれている。この最小アルカリ量と水溶性アルカリ量の合計を、セメント中の全アルカリ量としている。

アルカリ量推定の全体の流れは以下ようになる³⁶。

粗骨材に起因するアルカリ及びモルタルに起因するアルカリを区別するために、採取

³⁵ 片山哲哉：アルカリシリカ反応入門 アルカリシリカ反応の診断方法，コンクリート工学 Vol. 52, No. 12, pp. 1083-1090. 2014

³⁶ 河村直哉、川端雄一郎、片山哲哉、「岩石学的評価に基づいた空港コンクリート舗装の ASR 劣化事例解析」コンクリート工学年次論文集，Vol. 35, No. 1, 2013

コアを粗骨材及びモルタルに分離し、総プロ法に準拠して、それぞれの水溶性アルカリ量を測定する。次に、エネルギー分散型スペクトル分析装置（EDS）により、鏡面研磨薄片内の未水和セメント粒子（エーライト・ビーライト・アルミネート・フェライト）の化学組成を定量分析し、最小アルカリ量を求める。この値には、コンクリートの混練時に溶解する硫酸アルカリのアルカリ量が含まれていない。そのため、そのアルカリ量を補正するために、一般的なセメントの最小アルカリ量と水溶性アルカリ量の比率を用いて、セメントの最小アルカリ量に対して、水溶性アルカリ量の推定値を上乗せして、セメントに含まれているはずのすべてのアルカリ量（全アルカリ量）を算出する。

このように推定したセメント由来の全アルカリ量と、粗骨材やその他の部分（細骨材や混和剤）の水溶性アルカリ量（コアの水溶性アルカリ量から、セメント起源と粗骨材の水溶性アルカリ量を差し引く）を合計し、コンクリート中の全アルカリ量を求める。

① 最小アルカリ量の推定

硬化コンクリート中に残存する未水和セメント粒子（エーライト・ビーライト・アルミネート・フェライト）の最小アルカリ量を EDS 定量分析値から求め、セメントクリンカー（セメント製造時に石こうを添加する前の状態）の最小アルカリ量を推定した。

採取したコアから作成した研磨薄片により、偏光顕微鏡にて未水和セメント粒子を識別し、その粒子を構成する C3S, β C2S, C3A, C4F ごとのアルカリ量を EPMA (EDS) で測定した。

このとき、未水和セメント粒子の平均としての最小アルカリ量は、SEM/EDS で未水和セメント粒子（エーライト・ビーライト・アルミネート・フェライト）を識別し、分析した結果に対して、未水和セメントの粉末 X 線回折 (XRD) による鉱物組成の解析 (XRD/リートベルト定量解析) 結果（エーライト：56.0、ビーライト：17.92、アルミネート：8.46、フェライト：9.95）（単位：mass %）を乗ずることで算出した。得られた結果を、真値とみなせる未水和セメントの電子線マイクロアナライザ（EPMA）による結果と比較したものを図 4.22 に示す。図 4.22 に示すように、 ± 0.14 mass % 程度のばらつきはみられるが、最小アルカリ量の平均値としては、EPMA の結果とほぼ同じ値となった。未水和セメントに含まれる最小アルカリ量は、全体に対して 0.39 mass % と微量であるため、EDS 分析を行う際のデータ取得時間を十分に取ることが重要である。得られた最小アルカリ量を用いて、全アルカリ量の推定を行った。

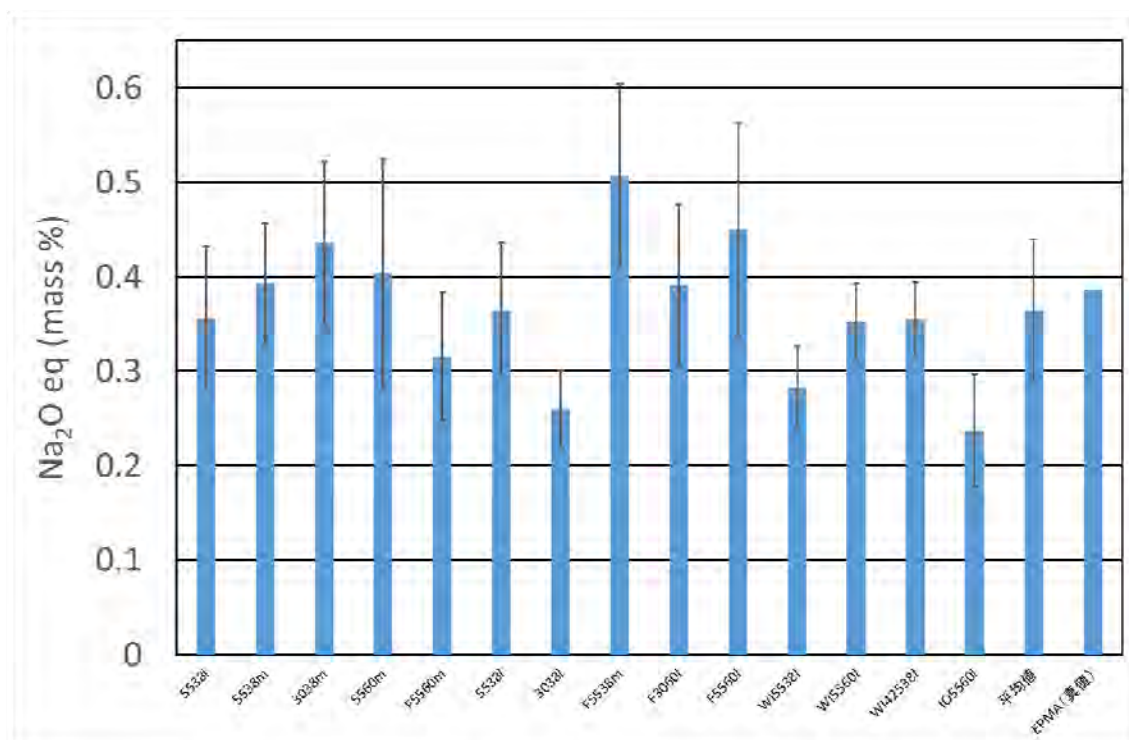


図 4.22 最小アルカリ量の推定

② 全アルカリ量の推定

コンクリートの全アルカリ量を推定するためには、上記の最小アルカリ量に対して、セメント中の水溶性アルカリ量を上乘せして、セメント中の全アルカリ量を推定する必要がある。本検討においては、評価に用いたコンクリートの練混ぜに使用したセメントを用いて水溶性アルカリ量の測定値 ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ として 37.9%、JCS I-04 : 2004「セメントの水溶性成分の分析方法」に準拠) を用いて、セメント中の全アルカリ量を求めた。なお、全アルカリ量を推定するために必要な、コンクリート全体及びコンクリートから抽出した粗骨材の水溶性アルカリ量は、4. 2. 2 (2) で測定した値を用いた。

測定したセメントの水溶性アルカリ量及び前述のセメントの最小アルカリ量から未水和セメント中の全アルカリ量を算出し、未水和セメントの全アルカリ量の真値とみなせる未水和セメントの蛍光 X 線分析 (XRF) の結果と比較したものを図 4.23 に示す。図 4.23 に示されるように、 $\pm 0.5 \text{ kg/m}^3$ 程度のばらつきはみられるが、全アルカリ量の平均値としては XRF の値とほぼ同じとなった。なお、セメント中の水溶性アルカリ量は、全アルカリ量に対して約 4 割を占める (表 4.17 の (10) 水溶性アルカリの比率が 0.37 である) ことから、使用セメントの水溶性アルカリ量が実測できない場合は、全アルカリ量を推定する際の最小アルカリ量に対する比率は仮定値を用いざるを得ないが、この値が変わると全アルカリ量の推定値に影響を及ぼすので注意を要する。

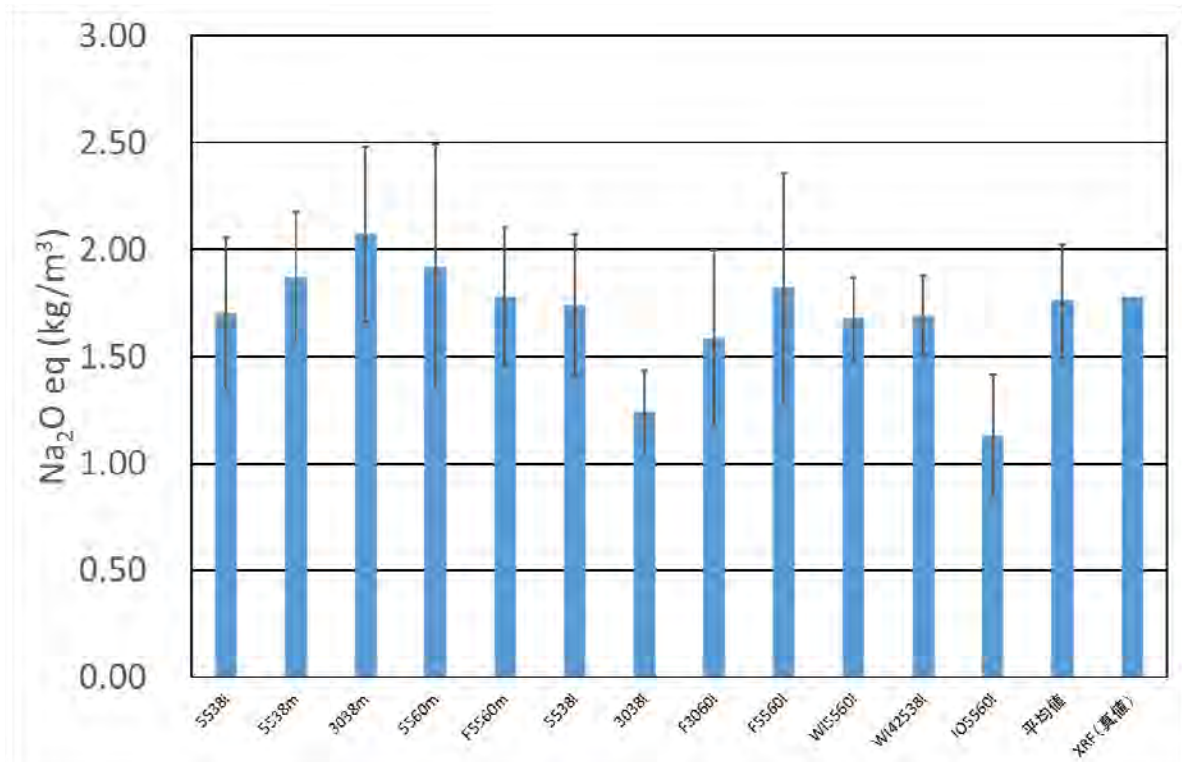


図 4.23 セメント中の全アルカリ量の推定

③ アルカリ収支の計算

推定したコンクリート中の全アルカリ量と、採取したコアの全アルカリ量と比較したものを図 4.24 に示す。AW に用いた不織布には、測定開始時にのみ NaOH 水溶液 50g を含ませただけで、CPT 中には減少した水しか補給していない。つまり、CPT 後の不織布に含まれるアルカリ量を分析すれば、コンクリートプリズム内に入り出したアルカリ量がわかるので、CPT 後のコンクリートプリズムのアルカリ量が求められる。図に示されるように、全アルカリ量は、平均すると 0.9 kg/m³ 程度過小に推定されることが確認されるものの、全アルカリ量の大小の比較は可能であることが確認できる。以上から、ASR 診断への有効性があると判断できる。

なお、I055601 に着目すると、ほかの水準と比較してもっとも実験値に近い。このことから、Katayama の方法によるアルカリ量の推定は、ASR の進行によって過小評価になっていると考えられる。このとき、Katayama のアルカリ量の推定過程において、前述のように水溶性アルカリ量の測定があるが、ASR の進行によって生成された ASG は、この水溶性アルカリ量の測定を阻害している可能性、つまり、温水抽出ではコンクリート中のすべての ASG を溶解できずに不溶残分となっている可能性が示唆された。

アルカリ収支 (Katayama 法) の計算結果を表 4.17 に示す。

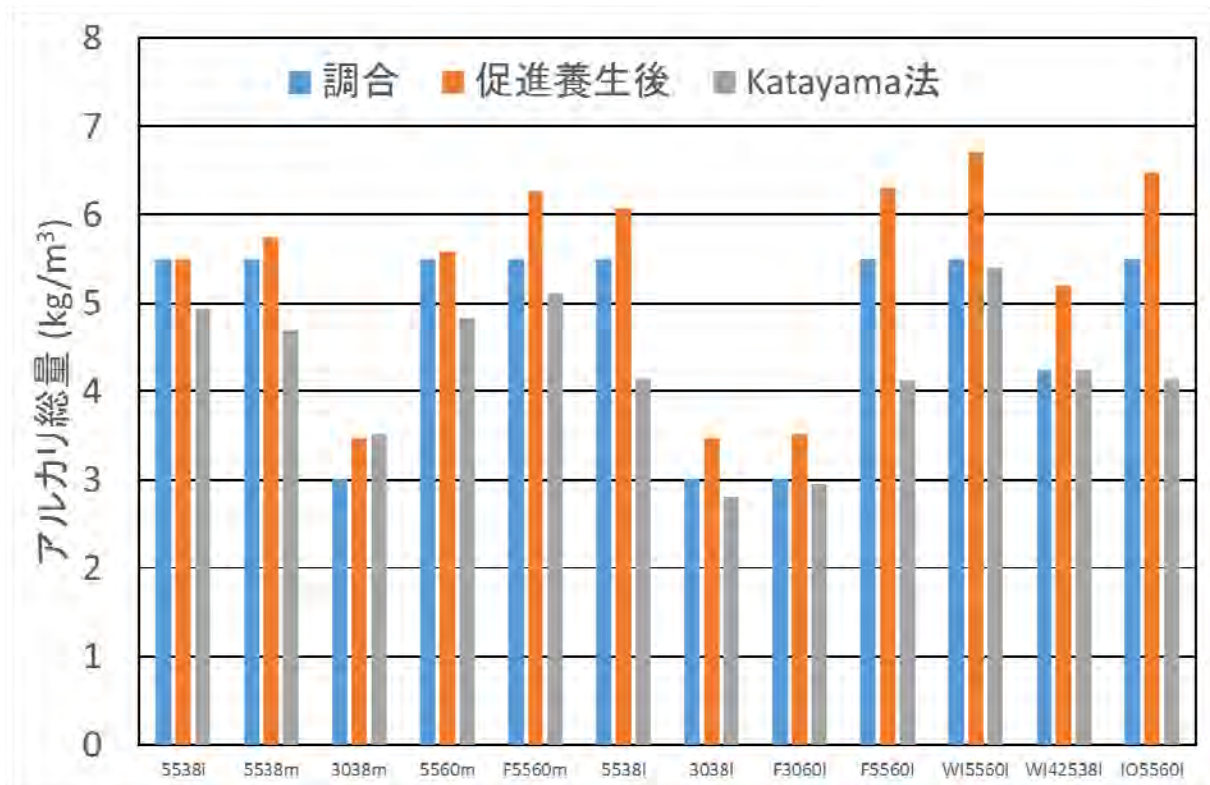


図 4.24 全アルカリ量の比較

表 4.17 アルカリ収支 (Katayama 法) の計算結果

項目	クリンカー			セメント		コンクリート				粗骨材		その他	
	最小アルカリ			全 アルカリ	水溶性 アルカリ	水溶性アルカリ		全 アルカリ	水溶性アルカリ				
	EDS分析												
	測定			推定		測定		推定		測定		推定	
コア水準	%			Na2Oeq kg/m³		%		Na2Oeq kg/m³		%		Na2Oeq kg/m³	
	Na₂O	K₂O	(1)	(2)	(3)	Na₂O	K₂O	(4)	(5)	Na₂O	K₂O	(6)	(7)
5538i	0.31	0.07	0.36	1.70	0.63	0.14	0.04	3.88	4.94	0.03	0.01	0.34	2.90
5538m	0.30	0.13	0.39	1.87	0.70	0.13	0.03	3.52	4.69	0.09	0.02	1.05	1.77
3038m	0.34	0.14	0.44	2.07	0.77	0.08	0.03	2.22	3.52	0.06	0.02	0.73	0.71
5560m	0.35	0.09	0.40	1.92	0.72	0.14	0.03	3.64	4.84	0.06	0.01	0.71	2.21
F5560m	0.29	0.23	0.44	2.10	0.78	0.15	0.04	3.98	5.30	0.08	0.02	0.91	2.29
5538l	0.28	0.12	0.37	1.74	0.65	0.11	0.03	3.04	4.13	0.10	0.04	1.25	1.15
3038l	0.21	0.08	0.26	1.24	0.46	0.07	0.03	2.04	2.82	0.05	0.01	0.55	1.03
F3060l	0.27	0.18	0.39	1.86	0.70	0.07	0.03	1.96	3.13	0.06	0.02	0.73	0.53
F5560l	0.30	0.23	0.45	2.14	0.80	0.11	0.03	2.98	4.32	0.08	0.01	0.88	1.30
WI5560l	0.28	0.11	0.35	1.68	0.63	0.17	0.04	4.34	5.39	0.12	0.02	1.37	2.35
WI42538l	0.28	0.11	0.36	1.69	0.63	0.11	0.04	3.18	4.24	0.08	0.02	1.00	1.55
IO5560l	0.20	0.06	0.24	1.13	0.42	0.14	0.01	3.42	4.13	0.01	0.00	0.07	2.94
平均値	0.28	0.13	0.37	1.76	0.66	0.12	0.03	3.18	4.29	0.07	0.02	0.80	1.73
セメント 種類	セメント												
	全アルカリ			水溶性アルカリ									
	測定			推定		測定							
	%			Na2Oeq kg/m3		%			比率				
	Na₂O	K₂O	(8)	(11)	(12)	Na₂O	K₂O	(9)	(10)				
普通ポルトランドセメント	0.34	0.33	0.56	1.78	0.67	0.07	0.21	0.21	0.37				

(Katayama 法では、全アルカリ量はアルカリ総量としている。)

表 4.17 の各項目の計算方法を以下に示す。

- (1) 最小アルカリ：クリンカー（石こう添加前のセメント）中のアルカリ量。等価アルカリ
 $\text{Na}_2\text{Oeq}=\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$
- (2) セメントの全アルカリ： $1.3 \times ((1)/100) \times 320 \text{ kg/m}^3$ 。換算係数 $1.3 = 1.4$ （クリンカーの全アルカリ量/クリンカーの最小アルカリ量） $\times 0.97$ （石膏による希釈） $\times 0.96$ （混和剤による希釈）= 普通ポルトランドセメント (OPC) の全アルカリ量 (8)/クリンカーの最小アルカリ量
 平均値 = $0.56/0.43$
- (3) セメントの水溶性アルカリ： $0.37 \times (2)$ 。ここで 0.37 は、(10) 水溶性アルカリの比率で、セメントの全アルカリと水溶性アルカリの本試験データから算出
- (4) コンクリートの水溶性アルカリ： (3) + (6) + (7)
 コンクリートの単位容積質量は表 4.18 参照
- (5) コンクリートの全アルカリ量：セメントの全アルカリ量 (2) + 粗骨材の水溶性アルカリ量 (6) + その他の水溶性アルカリ量 (7)（細骨材・混和剤・添加アルカリを含む）
 $= (2) + (4) - (3)$
- (6)：粗骨材の水溶性アルカリ $\text{Na}_2\text{Oeq}=\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$
 粗骨材の単位容積質量は表 4.18 参照
- (7)：細骨材・混和剤・添加アルカリの水溶性アルカリ = (4) - (3) - (6)
 粗骨材・細骨材・混和剤・添加アルカリの水溶性アルカリ = (6) + (7) = (4) - (3)
- (8)： $\text{Na}_2\text{Oeq}=\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$
- (9)： $\text{Na}_2\text{Oeq}=\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$
- (10)：水溶性アルカリの比率 ((9)/(8))
- (11)： $((8)/100) \times 320 \text{ kg/m}^3$ （セメントの単位容積質量）
- (12)：水溶性アルカリ ((9)/100) $\times 320 \text{ kg/m}^3$

表 4.18 単位容積質量

骨材種類	コンクリート (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)
TO	2,334	1,033
WI	2,320	1,026
IO	2,335	1,034

④ コア空隙水分析

ASR リスクの可能性を予測する手法として、鍵本³⁷らの手法をもとに、コンクリートコアの圧搾抽出により得られた空隙水の分析を試みた。圧搾抽出治具の概念図を図 4.25 に示し、圧搾抽出による空隙水の採取状況を図 4.25、図 4.26 に示す。両図に示すように、中央に孔のあるシリンダー状の治具にコンクリートコアを入れ、上から押し棒を差し込み、万能試験機により徐々に荷重をかける。載荷中に治具の底部に開けられた小さな穴から徐々に染み出す空隙水をポリプロピレン製使い捨て注射筒（ディスポシリンジ）で採取を行った。載荷は、100kN ずつ荷重を段階的に増やし、それぞれの荷重で約 5 分間、一定荷重を維持した。最大荷重は 1200～1500kN までとし、載荷中に染み出す空隙水をすべて回収できるように慎重に採取した。得られた空隙水は、速やかに注射筒に直接接続できる濾過フィルター（マイクロシリンジフィルタ、孔径 0.45 μm ）でろ過を行

³⁷ 鍵本広之、佐藤道生、川村満紀：2，3 の異なるアルカリ反応性骨材を用いたモルタルの細孔溶液の限界 OH⁻イオン濃度、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23、No. 2、pp. 589-594、2001

い、pH メータ（ホリバ、D-71、電極：9818S-10D）で pH を測定後、ICP-MS（Agilent 8800）で元素分析を行った。対象とした元素は、Na、Al、Si、S、K、Ca である。

空隙水の pH を比較したものを図 4.27 に、アルカリ濃度（ $[\text{Na}] + [\text{K}]$ ）を比較したものを図 4.28 に示す。両図に示されるように、5538i、5538m、55601 や 3038m、30381 に着目して ASR の進行度による空隙水組成の変化をみると、ASR の進行に伴い pH とアルカリ濃度の両方で低下する傾向が確認された。これは、ASG の生成反応がアルカリの消費を伴っていることと整合する。

また、5538m と F5538m、5560m と F5560m に着目してフライアッシュの有無による空隙水組成の変化をみると、フライアッシュの添加により ASR が抑制されているとみなせる水準が pH とアルカリ濃度が低下する傾向が確認された。これは低い Ca/Si モル比の CSH ゲル（微細なケイ酸カルシウム水和物が液体中に分散したもの）が生成し、アルカリを吸着したためと考えられる。

このことから、空隙水分析で pH とアルカリ濃度の低下を検出することで今後の ASR リスクの可能性を予測することや、フライアッシュによる ASR の抑制効果を確認できる。以上から、ASR 診断への有効性があると判断できる。

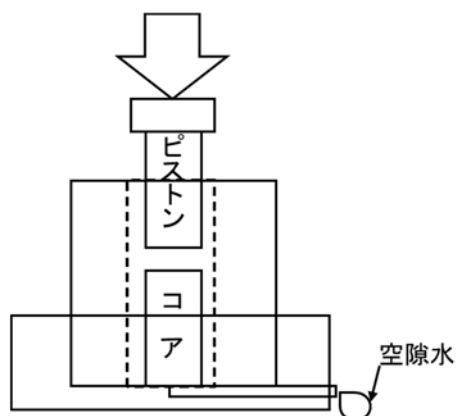


図 4.25 圧搾抽出治具の概念図



図 4.26 空隙水の採取状況

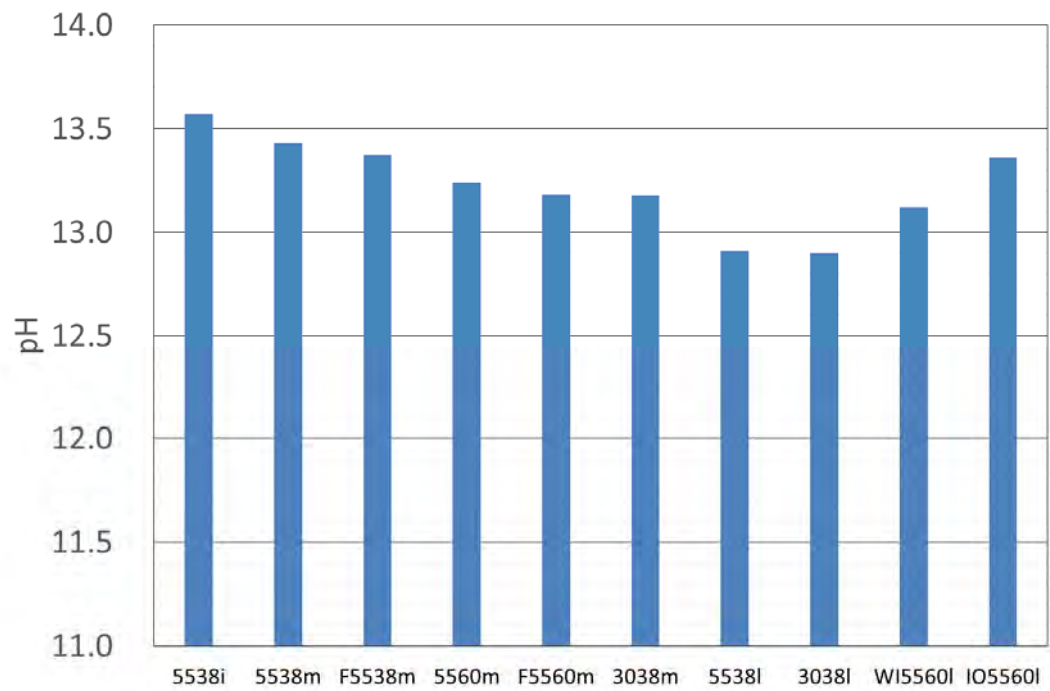


図 4.27 空隙水の pH

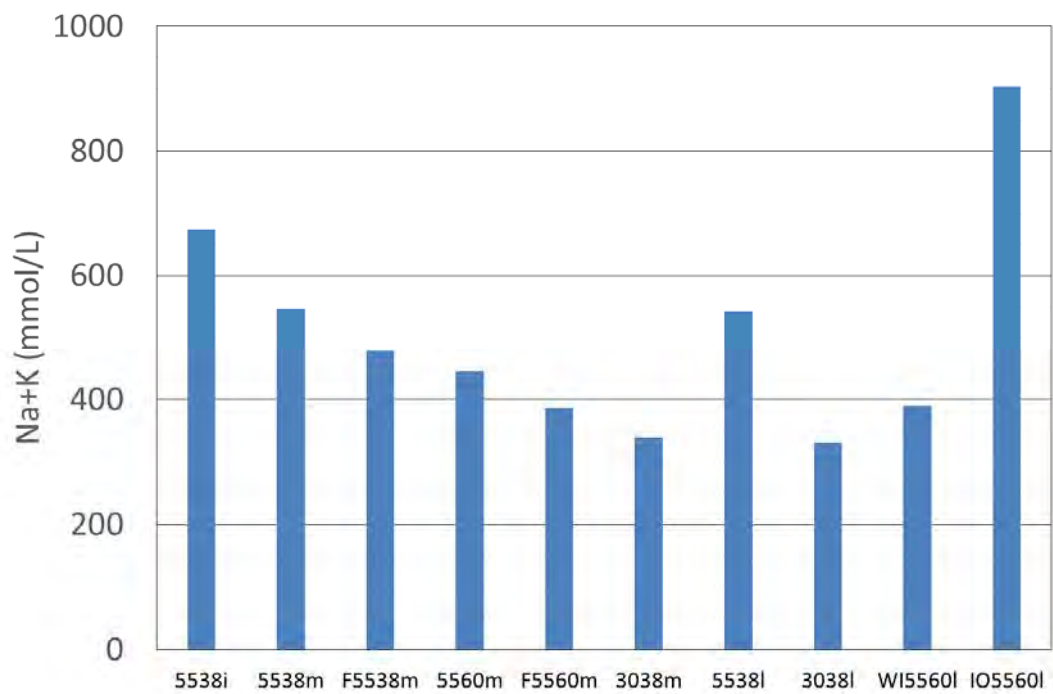


図 4.28 空隙水のアルカリ濃度

(4) まとめ

本項では、コンクリートコアの採取による ASR 診断方法の検証を目的として、ASR 促進試験後の試験体から採取したコンクリートコアを対象に、岩石学的評価の各試験項目を実施した。その結果、各種試験は課題はあるものの、すべて ASR 診断への有効性が確認された。各試験項目のまとめを以下に示す。

- ① コンクリートコアの外観観察（可視光、蛍光法、実体顕微鏡観察）から劣化進行段階に応じた ASG を検出できることを確認した。コンクリートコアの可視光による外観観察に加えて、ASG 蛍光反応試薬を塗布し、短波長（254nm）UV 光の観察を実施することで、コンクリートコアの表面ににじみ出た ASG を容易に観察できる。
- ② コンクリートコア岩種構成定量から骨材種類と構成比率が評価できることを確認した。
- ③ コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察及び SEM 観察/EDS 分析（走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型元素スペクトル分析）から劣化進行段階に応じた ASR によるひび割れ、ASG が観察できることを確認した。なお、コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察に加えて、フィルムスキャナによる写真撮影を実施することで、コンクリートコアの外観観察よりもミクロ、コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察よりもマクロな中間のスケールの観察が可能になる。
- ④ アルカリ収支計算からコンクリート中の全アルカリ量を推定できることを確認した。一方で、EDS 定量分析によるセメントの最小アルカリ量や水溶性アルカリの測定の測定精度には限界があり、推定結果のばらつきを認識しておくことが重要である。
- ⑤ コンクリートコアを圧搾抽出することで得られた空隙水の pH 及び ICP-MS による元素分析を実施することで、ASR リスクの可能性及びフライアッシュによる抑制効果が評価できることを確認した。

4. 3 促進膨張試験の評価

4. 3. 1 実施概要

骨材種類、コンクリート中のアルカリ量、鉄筋拘束条件及び養生条件が異なる試験体（以下、「小型試験体」という）を作製した。38℃環境下で促進養生を行い膨張させた後にコアを採取し、促進膨張試験を実施して、その有効性を検証した。実施した促進膨張試験は、国内で残存膨張試験として将来の膨張予測の判断に用いられることが多い JCI-DD2 法と、通称「カナダ法」と呼ばれ北米のモルタルによる ASR 試験方法を元に開発されたアルカリ溶液浸漬法とした。なお、アルカリ (Na) 溶液に浸漬するコアの促進膨張試験として飽和 NaCl 浸漬法¹³もあるが、アルカリ溶液浸漬法と飽和 NaCl 浸漬法とは

良好な対応関係があること³⁸、また火山ガラスは飽和 NaCl で膨張を促進しない可能性
があること³⁹から、アルカリ溶液浸漬法を選択した。なお、JCI-DD2 法は試験期間中に
アルカリが溶脱する可能性が指摘されていることから、試験期間中のアルカリ溶脱を確
認し、また、溶脱抑制方法として、AW 等を施した試験についても検討を行った。

4. 3. 2 試験方法

(1) 小型試験体の作製

① 試験水準

作製した小型試験体の概要を表 4.19 に示す。小型試験体には、急速膨張性骨材とし
て骨材 T0 を、遅延膨張性骨材として骨材 WI を用いた。

表 4.19 小型試験体の概要

試験体名	反応性骨材	アルカリ量	鉄筋拘束	養生条件
T0_3.0	骨材 T0(急速)	3.0kg/m ³	無	38℃湿潤
T0_5.5	骨材 T0(急速)	5.5kg/m ³	無	38℃湿潤
T0_5.5_有筋	骨材 T0(急速)	5.5kg/m ³	有	38℃湿潤
WI_5.5	骨材 WI(遅延)	5.5kg/m ³	無	38℃湿潤

作製した試験体の寸法は、何れも 650×650×650mm の立方体であり、5 体のうち 4 体
(T0_3.0、T0_5.5、WI_5.5、T0_5.5_湿度分布)は無筋コンクリート、1 体(T0_5.5_有
筋)は鉄筋コンクリートとした。

養生温度は、RILEM AAR-3 の温度条件に従い、何れも 38℃とした。ただし、5 体のう
ち 4 体 (T0_3.0、T0_5.5、WI_5.5、T0_5.5_有筋)は湿潤養生とした。

② コンクリートの調合

コンクリートの調合を表 4.20 に示す。使用骨材は、急速膨張性骨材である骨材 T0 と
遅延膨張性骨材である骨材 WI であり、アルカリ量は、骨材 T0 の調合で 3.0kg/m³(T0_3.0)
及び 5.5kg/m³ (以下、T0_5.5) の 2 水準、骨材 WI で 5.5kg/m³ (WI_5.5) の 1 水準を設
定した。目標空気量は 4.5±1.5%とし、目標範囲となるように混和剤量を調整した。ア
ルカリ量の調整方法は、3. 2 項と同様である。

³⁸ 野村昌弘ら：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法、コンクリート工学
論文集、Vol.13、No.3、pp.105-114 (2002)

³⁹ 川端雄一郎ら：岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価及び膨張挙動解析、土木学会論文集
E、Vol.63、No.4、pp.689-703 (2007)

表 4.20 コンクリートの調合

反応性 骨材 種類	アルカリ 量 (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤	
				水	セメント	細骨材	粗骨材 (G)		AE 減水剤 (C×%) ^{※1}	AE 調整剤 (C×%) ^{※2}
				(W)	(C)	(S)	反応性	非反応性		
T0(急速)	3.0	50	45	160	320	821	309	724	1.45	0.1
	5.5						309	724	1.45	0.1
WI(遅延)	5.5						1007	—	1.45	0.1

※1:AE 減水剤は、4 倍希釈液としての添加率を表示

※2:AE 調整剤は、100 倍希釈液としての添加率を表示

③ 型枠成形

a 無筋試験体 (T0_3.0、T0_5.5、WI_5.5)

作製した小型試験体には、養生期間中の表面膨張率が測定できるよう、型枠に予めコンタクトゲージ用の標点を取り付けた。T0_3.0、T0_5.5、WI_5.5 のコンタクトゲージ用標点位置を図 4.29 に示す。コンタクトゲージ用の標点の間隔は 25cm とし、図 4.29 に示すように、側面 (4 面) で水平及び垂直方向で測定できるよう配置した。

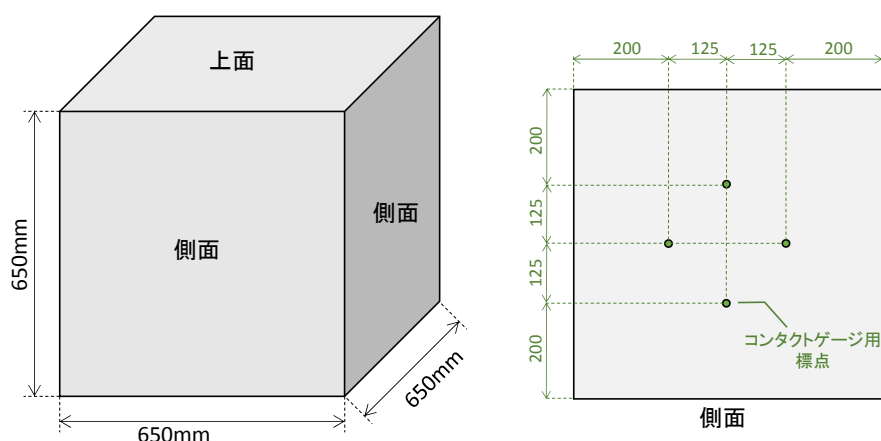


図 4.29 コンタクトゲージ用標点位置 (T0_3.0、T0_5.5、WI_5.5)

b 有筋試験体 (T0_5.5_有筋)

有筋の試験体 (T0_5.5_有筋) の配筋及びコンタクトゲージ用標点位置を図 4.30 に示す。有筋の試験体は、原子炉建屋の復元力特性に関する既往の文献⁴⁰を参考に、鉄筋比 0.8% の面 (08 面上、08 面横と表記) と、2.4% の面 (24 面と表記) を設けた。また、設計上のかぶりは 30mm とした。

有筋の試験体は、鉄筋径が細いと設定した鉄筋比とするための鉄筋間隔が狭くなり、

⁴⁰ 秋野金次, 杉田和直他: “原子炉建屋の復元力特性試験 (その 1) ~ (その 7) ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 957-970, (1982)

所定の径のコアが採取できない。JCI-DD2 法ではコア径 100mm が必要であるため、このコアが採取できる鉄筋間隔、かつ設定した鉄筋比となるよう、鉄筋比 0.8% の鉄筋には D35 を、2.4% の鉄筋には D51（何れも JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」規格品の異形鉄筋 SD345）を使用した。また、鉄筋の定着を確保するため、鉄筋の端部には 100×100×16mm の鉄板を予め鉄筋に溶接して配置した。

有筋試験体の型枠内部の状況を図 4.31 に示す。T0_5.5_有筋では、T0_5.5 と同様、試験体内部の膨張挙動を確認するため、埋込型ひずみ計を 3 軸方向に設置した。

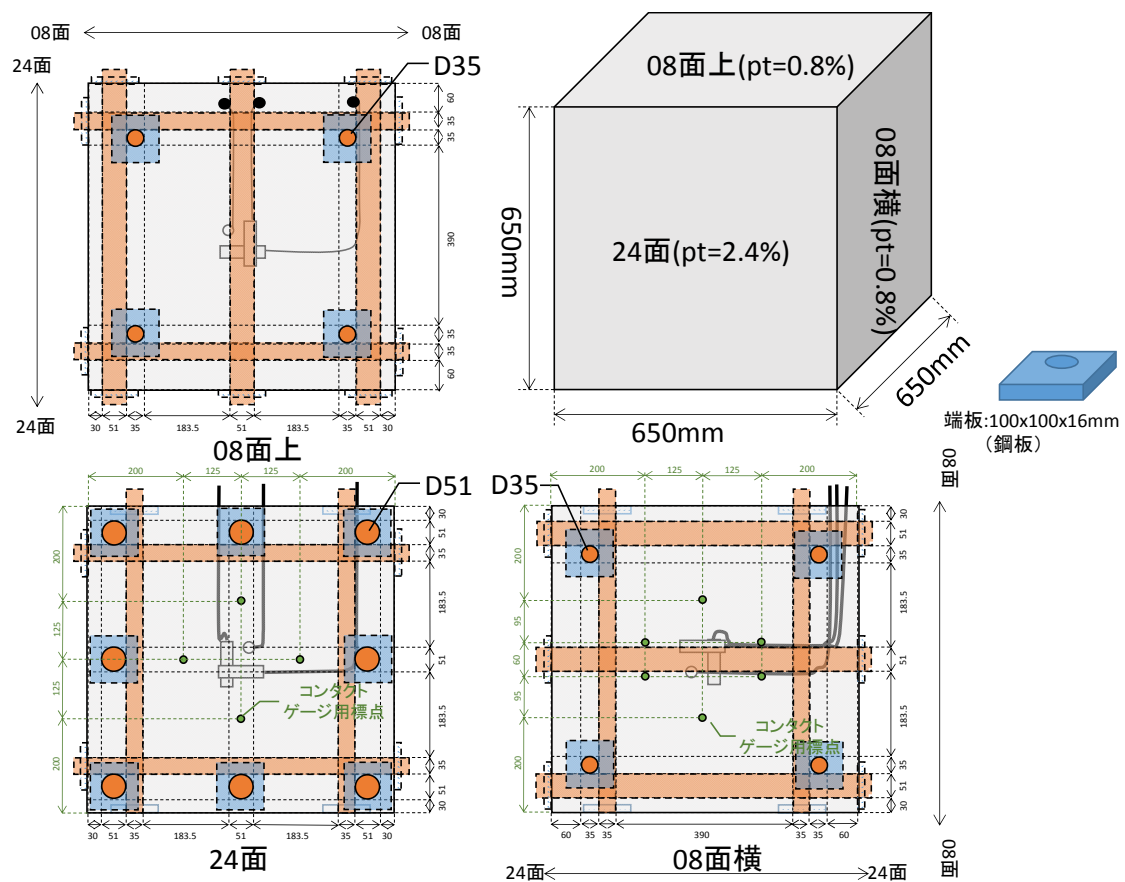


図 4.30 配筋及びコンタクトゲージ用標点位置 (T0_5.5_有筋)



図 4.31 有筋試験体 (T0_5.5_有筋) の型枠内部の状況

④ 打設及び養生方法

a 打設

型枠への打設状況を図 4.32 に示す。



図 4.32 型枠への打設状況

b 養生方法

小型試験体は、打設後から 2 週間までは室内で保管し、乾燥を防ぐため打設面をビニールシート及び湿潤マットで保護した。打設から 2 週間後に脱枠し、T0_3.0、T0_5.5、WI_5.5、T0_5.5_有筋では全面に湿潤マット（ただし、アルカリは含まず）及びフィルムラッピングを巻いた。

それぞれ湿潤マット及びラッピングを施した後、底部に水を張り加温することで温度 38℃に制御した養生槽に移した。小型試験体の養生槽への設置状況を図 4.33 に示す。



(a) 養生槽外観



(b) 内部(下部に温水を循環させ、槽内温度を制御)



(c) 養生槽への収納状況



(d) 収納後状況 (この後屋根を設置)

図 4.33 養生槽への設置状況

(2) 小型試験体の膨張率の測定方法

試験体表面の膨張率の測定は、JIS A 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第2部:コンタクトゲージ方法」で定める方法に準拠し、試験体表面に設置したコンタクトゲージ用標点の標点間距離を測定した。測定材齢は、脱枠直後(38℃養生開始時)、促進養生3日、2週、5週、8週、10週、15週、20週及び26週とし、以降2ヶ月を目処に材齢52週まで測定した。ただし、T0_3.0、T0_5.5、T0_5.5_有筋については、促進材齢10週コアを採取したため、10週までの測定とした。

表面膨張率の測定状況を図4.34に示す。測定は、水平及び垂直の2方向で実施した。なお、湿潤マット及びラッピングは、表面膨張率の測定時に一旦取り外し、測定終了後に再度巻き直した。



(a) 垂直方向



(b) 水平方向

図 4.34 表面膨張率の測定状況

(3) コアを用いた促進膨張試験

① 試験概要

促進膨張試験の有効性の検証を目的に、(1)項で作製した小型試験体よりコアを採取し、JCI-DD2 法及びアルカリ溶液浸漬法による促進膨張試験を実施した。JCI-DD2 法では、促進膨張試験の養生期間中に試験体が乾燥する可能性が指摘され、また、コアからアルカリが溶脱する可能性が指摘されている。そこで、試験期間におけるアルカリ溶脱を確認し、さらに、乾燥やアルカリ溶脱の抑制方法として、AW、WW の検討を行った。

コアの採取状況を図 4.35 に、採取したコアの一例を図 4.36 に示す。湿式のコアドリルを用いて、 $\phi 100\text{mm}$ 及び $\phi 50\text{mm}$ のコアを、小型試験体の上面及び側面から貫通するように採取した。なお、一部の $\phi 50\text{mm}$ のコアでは、図 4.36 (b)に示したように、穿孔中に破断したもののもあったが、破断した箇所は促進膨張試験に用いなかった。採取したコアは、所定の長さに切断して、各試験に供した。



図 4.35 コアの採取状況



(a) ϕ 100mm



(b) ϕ 50mm

図 4.36 採取コアの一例 (T0_5.5_有筋)

② コアの試験項目

試験に供したコア本数を表 4.21 に、各試験項目の実施方法を表 4.22 に示す。

ここで、JCI-DD2 法は、試験期間中の乾燥及びアルカリ溶脱が指摘されているため、AW、及び WW を施していない JCI-DD2 法の水準（表 4.22 における DD2、湿度 95%以上、温度 40℃）の他、AW 及び WW を施した水準も実施した。AW 及び WW には、不織布を用い、不織布 1 枚につきアルカリ溶液または水を 50g 含ませた後、コア 1 本に対して 1 枚の不織布を包み、さらにラップフィルムで周囲を包んだ。AW の NaOH 濃度は 1.33mol/L とした。

また、促進養生におけるコアからのアルカリ溶脱を確認するため、T0_3.0 及び T0_5.5

の小型試験体から採取したコアの試験では、コアを収納した促進養生のための保管容器の底の水を採取し、誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP）を用いて Na 及び K を定量し、アルカリ溶脱を確認した。

表 4.21 試験に供したコア本数

小型 試験体名	コアの 採取方向	コア径：φ10cm				コア径：φ5cm アルカリ溶液 浸漬法
		基礎デー タ用	JCI-DD2 法※ ¹			
			DD2	DD2- AW	DD2- WW	
T0_3.0	水平	—	1 本※ ²	1 本	1 本	3 本
	垂直	3 本	1 本※ ²	1 本	1 本	—
T0_5.5	水平	—	1 本※ ²	1 本	1 本	3 本
	垂直	3 本	1 本※ ²	1 本	1 本	—
T0_5.5 有筋	水平 (pt=2.4%)	3 本	2 本	2 本	—	3 本
	垂直 (pt=0.8%)	3 本	2 本	2 本	—	3 本
WI_5.5	水平	—	1 本	1 本	1 本	3 本
	垂直	3 本	1 本	1 本	1 本	—

※1：JCI-DD2 法の養生条件は以下の通り。

DD2：JCI-DD2 法（湿度 95%以上、温度条件：40℃）

DD2-AW：アルカリラッピング。5.5kg/m³は 1.33N、3.0kg/m³は 0.726N。温度条件：40℃。

DD2-WW：水ラッピング。JIS モルタルバー記載の方法で水ラッピングし恒温槽に。温度条件：40℃。

※2：アルカリ溶脱を確認した水準。

表 4.22 試験項目の実施方法

試験項目		方法
促進 膨張 試験	JCI-DD2 法	JCI-DD2「アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法（案）」に準拠。 ただし、規定の養生方法（温度 40℃、湿度 95%以上）以外に、アルカリラッピング（AW）及び水ラッピング（WW）を施した養生方法、試験期間中のアルカリ溶脱確認。
	アルカリ溶液 浸漬法	日本コンクリート工学会 ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書に記載の「アルカリ溶液浸漬法」に準拠。

4. 3. 3 試験結果

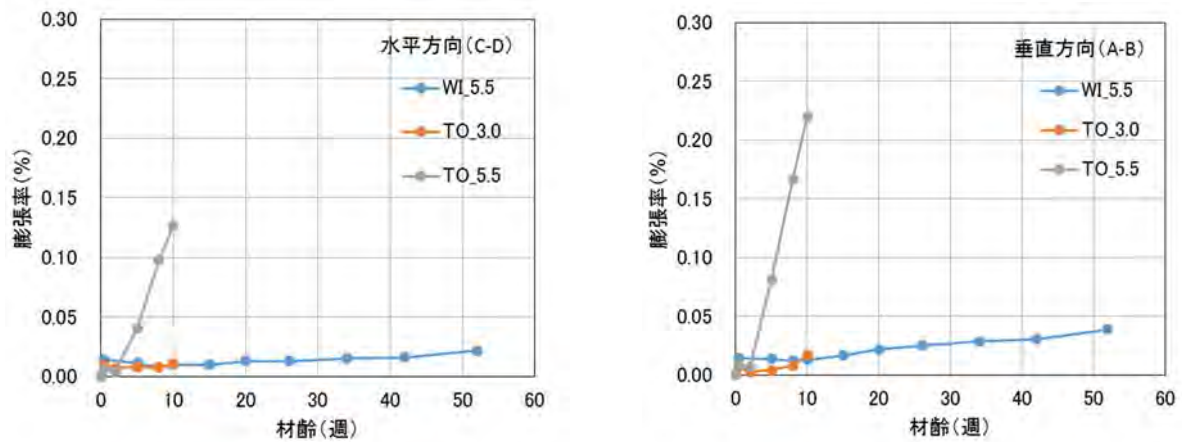
（1） 小型試験体の膨張率測定結果

① 表面膨張率

a 無筋試験体

無筋試験体（T0_3.0、T0_5.5 及び WI_5.5）における膨張率の経時変化を図 4.37 に示す。急速膨張性骨材 T0 を用いた試験体は、コンクリート中のアルカリ量が 3.0kg/m³とした T0_3.0 では顕著な膨張は認められなかったが、アルカリ量が 5.5kg/m³と多い T0_5.5 では、材齢 2 週以降に急激に膨張した。なお、材齢 10 週時点における膨張率は、水平方向で 0.13%、垂直方向で 0.22%と、打設方向によって膨張率が異なり、無筋試験体でも水平及び垂直方向に膨張の異方性が認められた。これは、ASR によるコンクリートの膨張挙動に関する特徴として、打設方向等で異方性を有する場合があります、既往の文

献^{41, 42}でも環境条件の相違により異方性が存在することが報告されている。



(a) 水平方向

(b) 垂直方向

図 4.37 表面膨張率の経時変化 (TO_3.0、TO_5.5 及び WI_5.5)

b 有筋試験体 (TO_5.5_有筋)

有筋試験体 (TO_5.5_有筋) における表面膨張率の経時変化を図 4.38 に示す。鉄筋により拘束すると、拘束が強い (鉄筋比が大きい $\rho_t=2.4\%$) 方向の膨張は、無筋の膨張よりも抑制されたが、拘束が弱い方向 ($\rho_t=0.8\%$) では、無筋の膨張よりも大きくなった。表面膨張率の測定結果から、膨張による小型試験体の体積膨張率を計算すると、TO_5.5 では 0.47%、TO_5.5_有筋では 0.58%であった。膨張に伴う体積変化は、鉄筋の有無で大差はないとすれば、拘束が強い方向で膨張が抑制された分、鉄筋で拘束されていても、拘束条件が弱い方向に変形していると考えられた。

実構造物において鉄筋等によって実際にはコンクリートは拘束下におかれ、コア採取によって拘束が解放されることで、膨張が生じる可能性がある。JCI-DD2 法では、コア採取後、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 95%以上の標準養生を行い、解放による膨張を測定することとしており、有筋の小型試験体による標準養生での開放膨張評価に資すると考えられる。

⁴¹ Leslie A. Clark : Modeling the Structural Effects of Alkali-Aggregate Reactions on Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 3, pp. 271-277, 1991

⁴² S. Multon, J.F. Seignol and F. Toutlemonde : Structural Behavior of Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, Vol. 102, No. 2, pp. 67-76, 2005

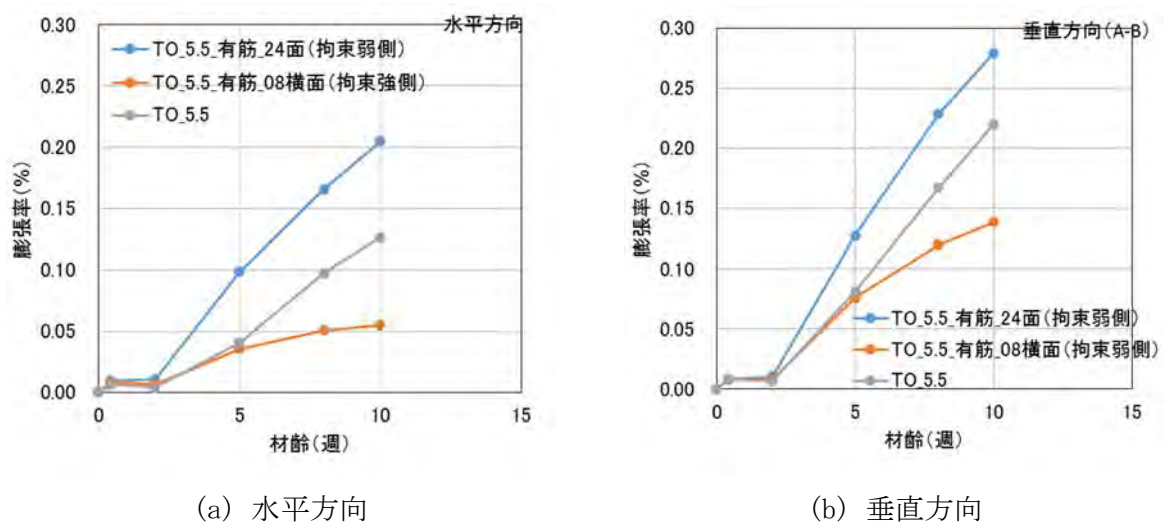


図 4.38 表面膨張率の経時変化 (TO_5.5_有筋)

② コア採取材齢

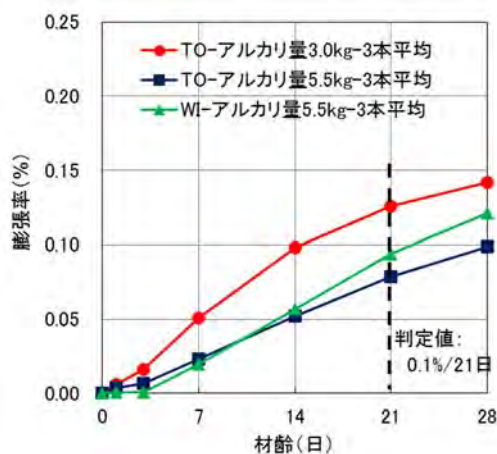
小型試験体からのコア採取は、以下の考えに基づき、促進材齢 10 週で採取したコアを促進膨張試験に供した。これは、「4. 2 劣化進行段階の評価」において、最も膨張を生じ飽和に達した膨張率は、およそ 0.2~0.3%と推定され、その後の促進膨張試験において膨張が飽和に達する前にコア採取する必要があるためである。なお、WI_5.5 は、遅延膨張性骨材を用いた水準であり、膨張に時間を要するため促進材齢 52 週(1 年)でコアを採取した。

(2) コアの促進膨張試験

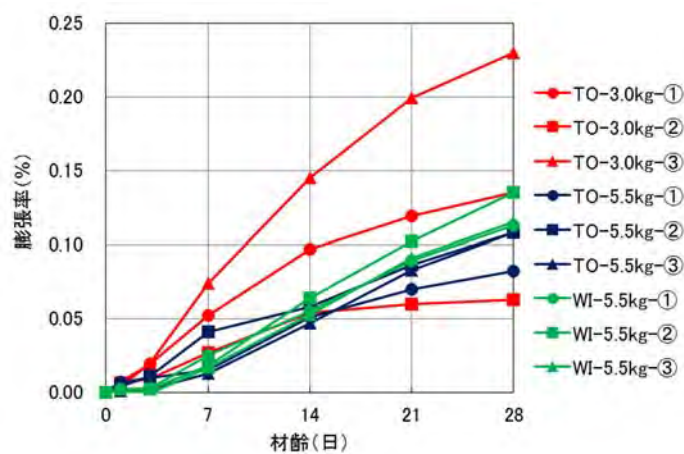
① アルカリ溶液浸漬法による膨張率

アルカリ溶液浸漬法による膨張率の結果を、無筋試験体から採取したコアについて図 4.39 に、鉄筋を配した有筋試験体から採取したコアについて図 4.40 に示す。なお、アルカリ溶液浸漬法による膨張率は本試験では $n=3$ 本であり、図には、既往の文献⁴³による残存膨張性の判定値(材齢 21 日の膨張率が 0.10%以上の時、残存膨張性あり)を記す。

⁴³ Katayama T, Tagami M, Sarai Y, Izumi S and Hira T: "Alkali-aggregate reaction under influence of deicing salts in the Hokuriku district", Materials Characterization, Vol.53, pp. 105-122 (2004)

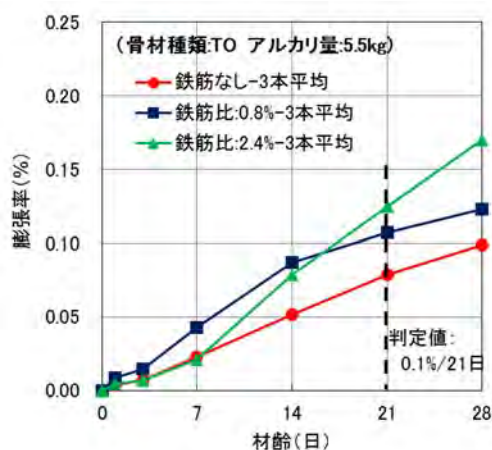


(a) コア 3 本の平均膨張率

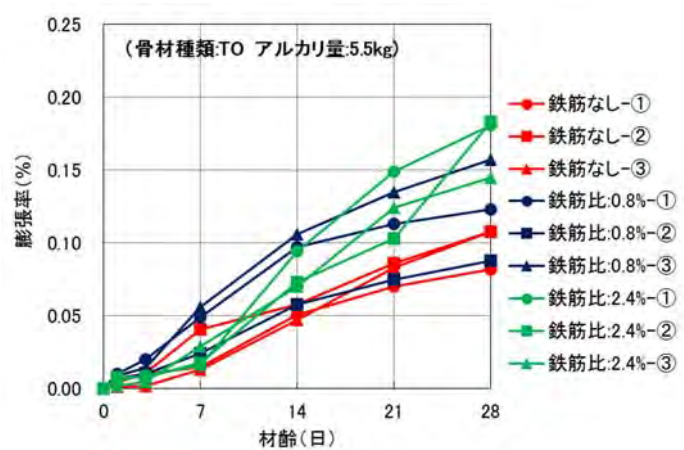


(b) 各コアの膨張率

図 4.39 アルカリ溶液浸漬法による膨張率（無筋試験体）



(a) コア 3 本の平均膨張率



(b) 各コアの膨張率

図 4.40 アルカリ溶液浸漬法による膨張率（有筋試験体）

ここで、コア採取前の小型試験体の表面膨張率（水平方向）の経時変化を図 4.41 に示す。コアを採取した材齢 10 週時点における膨張率は、T0_5.5（アルカリ量 5.5kg/m^3 ）が 0.13% と最も大きく、T0_5.5_有筋（鉄筋比 2.4% ）が 0.05% 、T0_3.0（アルカリ量 3.0kg/m^3 ）が 0.01% であった。しかし、3.3 項で記した CPT の結果によれば、骨材 T0 の温度 38°C の材齢 52 週における膨張率は、T0-3.0 で 0.19% 、T0-5.5 で 0.24% まで達していた。すなわち、小型試験体 T0_3.0 及び T0_5.5_有筋は、コアを採取した材齢 10 週時点で、まだ膨張するポテンシャルを有していたと考えられる。

これに対し、図 4.39(a) 及び図 4.40(a) で示した促進膨張試験の平均膨張率（材齢 21 日）は、T0_5.5 よりも、T0_3.0 あるいは T0_5.5_有筋の鉄筋比 2.4% の水準の方が大きかった。さらに、無筋である T0_5.5 は 10 週以後もさらに膨張すると考えられるが、判定値である材齢 21 日で 0.01% ⁵⁰ を下回り、無害（膨張性なし）と判断される。これらの結

果から、アルカリ溶液浸漬法は ASR の潜在反応性を評価することができ、促進試験開始前までに既に膨張したコンクリートは、促進膨張しない傾向にあった。また、試験のばらつきが大きく、コアの採取本数によっては、将来膨張する可能性があるコンクリートについても潜在膨張性を検知できない可能性もあると考えられる。

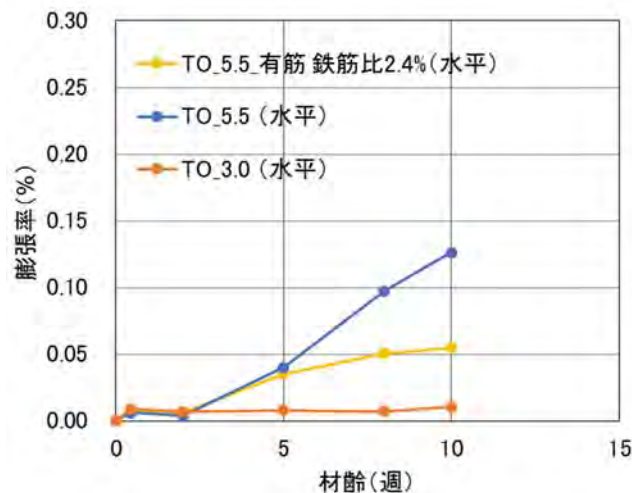


図 4.41 表面膨張率（水平方向）の経時変化（コア採取前）

また、図 4.39 (b) 及び図 4.40 (b) で示すように、コンクリート中のアルカリ量、促進膨張試験開始前の拘束条件によっては、膨張率のバラツキが大きくなった。この要因としては、

- ・ コアの採取径約 $\phi 50\text{mm}$ に対して、粗骨材の最大寸法が 20mm であること
- ・ 骨材 T0 の水準では、反応性骨材の混合比率を 30% としたペシマム調合で実施したこと

が考えられ、コア試験体中の骨材の分布の影響を受けたものと推察される。すなわち、 $\phi 50\text{mm}$ のコアを用いるアルカリ溶液浸漬法では、結果のバラツキが大きい。このことから、少なくとも 3 本以上のコアで試験を実施する必要があると考えられる。

② JCI-DD2 法による膨張率

JCI-DD2 法による膨張率の測定結果を図 4.42 に、試験期間中における質量変化率の結果を図 4.43 に示した。なお、図 4.42 には、建設省総プロ法⁴⁶ 及び阪神高速の判定基準⁴⁷ も併せて示す。なお、各水準とも試験に供したコアは 2 本 ($n=2$) である。

a 骨材 T0 を用いた試験

WW を施さない JCI-DD2 法の促進養生条件（図中の水準名 DD2）で比較すると、TO_5.5、TO_3.0、TO_5.5_有筋は、何れも同様の膨張挙動を示し、5～10 週程度まで

膨張速度が遅く、また、材齢 40 週以後にほぼ膨張は飽和に達し、最終的な膨張率は 0.20～0.24%となった。このうち、T0_3.0 は、コア採取時に小型試験体は殆ど膨張していないが、T0_5.5 は既に表面膨張率が 0.13～0.22% (図 4.37)、T0_5.5_有筋は水平垂直方向、及び拘束比によって異なるが 0.05～0.28% (図 4.38) に達している。仮に、DD2 がコアの残存膨張性を示すとすれば、T0_3.0 が最も膨張することになる。

b 骨材 WI を用いた試験

骨材 WI は遅延膨張性骨材であり、コア採取時の小型試験体の材齢 52 週における表面膨張率は最大でも 0.04%程度と、膨張を生じていない(図 4.37)。また、CPT の結果 (図 3.2 (C)) では、この骨材はアルカリ量 5.5kg/m^3 、促進温度 38°C とした場合に、材齢 2 年で膨張率が約 0.13%に達しており、ASR による膨張を生じる可能性がある。しかし、図 4.42 (d)に示すように、DD2 では材齢 3 ヶ月を超えても殆ど膨張せず、建設省総プロ法の判定基準にあてはめると、有害/潜在的有害の判定にはならなかった。JCI-DD2 法では試験期間が短く、また、図 4.44 に示すように試験期間中のアルカリ溶脱が生じる可能性があることから、JCI-DD2 法で膨張は生じなかったと考えられる。

c AW 及び WW の効果

JCI-DD2 法で膨張を生じていない骨材 WI を除き、JCI-DD2、WW を施した JCI-DD2-WW、及びアルカリラッピングを施した JCI-DD2-AW を比較すると、促進養生開始以降の膨張挙動は促進養生条件によって異なる。材齢 15 週における膨張率は、アルカリ量の違い、鉄筋拘束の有無によらず、 $\text{JCI-DD2-AW} < \text{JCI-DD2-WW} < \text{JCI-DD2}$ の順となった。一方、これら試験体の質量変化 (図 4.43) は、膨張する水準で質量が増加しているが、JCI-DD2 では材齢が経過してから質量減少を示す傾向は認められず、AW 及び WW でも養生管理を適切に行えば、試験期間中に試験体が乾燥することはない。また、AW によってアルカリは溶脱せず、アルカリ量は試験期間中に減少することはないと考えられる。JCI-DD2 と比較して AW 及び WW で膨張率が低くなったのは、今回用いた小型試験体は十分に水が供給される状態でありコア採取時からコアは湿潤状態で、また試験期間中にも乾燥の影響を受けなかったこと、AW によってコアから ASG が不織布に溶脱し ASG が生成しても膨張を生じなかったことが考えられる。

d 解放膨張率

鉄筋拘束下の小型試験体から採取したコアを含め、何れの水準においても解放膨張 (材齢 2 週まで) は殆ど認められなかった。解放膨張期間中では WI_5.5 を除

き、僅かであるが質量増加しており（図 4.43）、この期間中に試験体を吸水させる効果はあると考えられるが、拘束下にあるコンクリートはコア採取時に既に膨張が解放されている可能性がある。

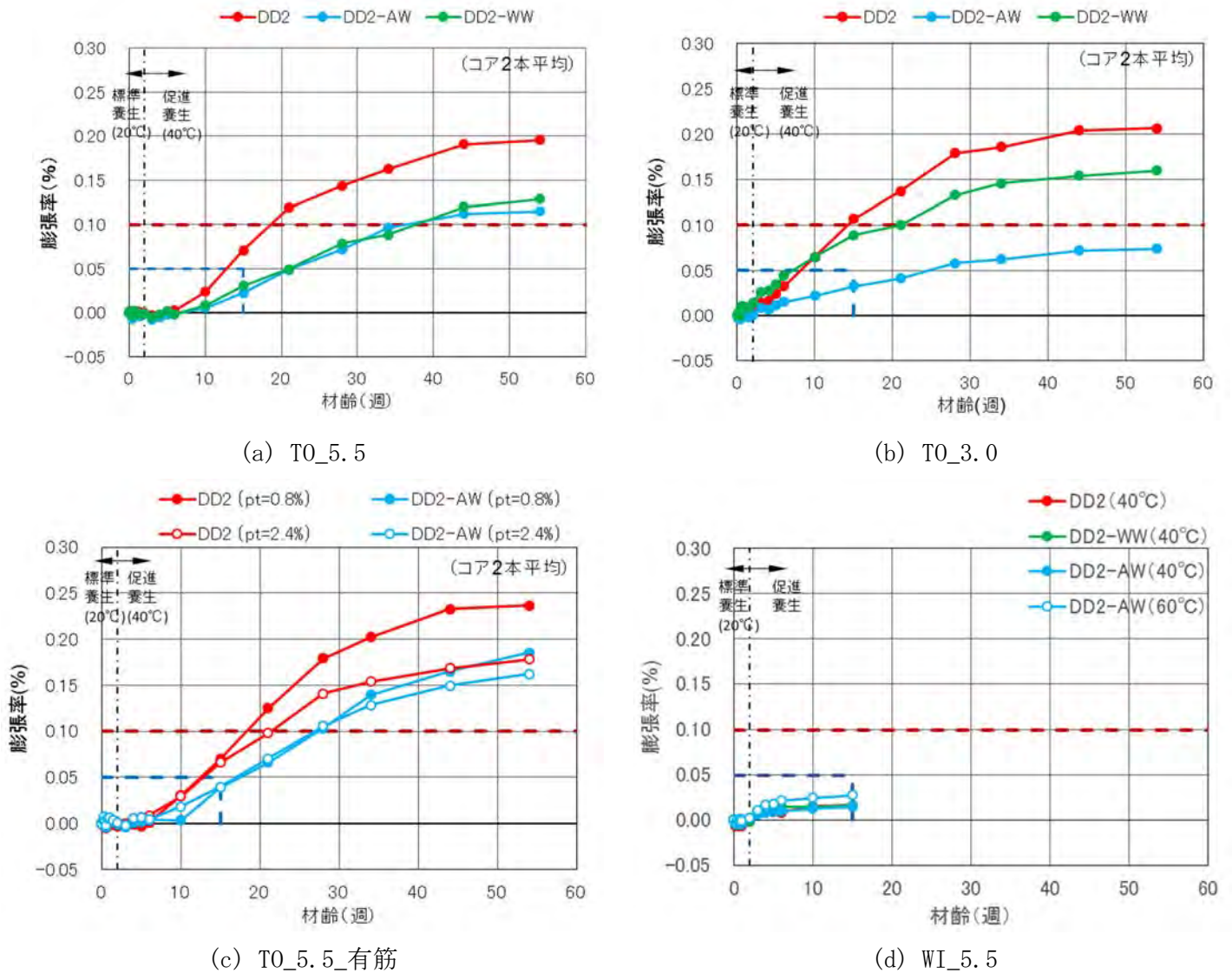
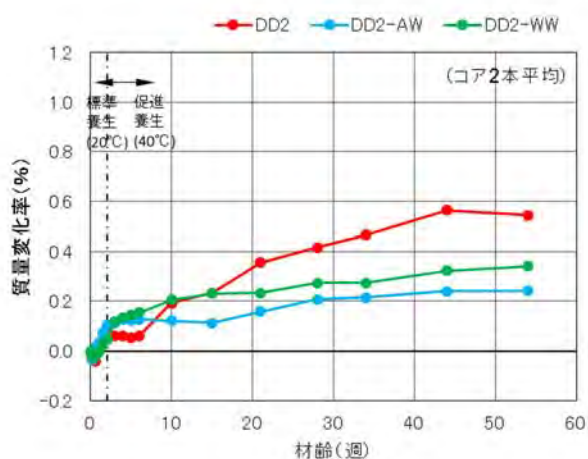
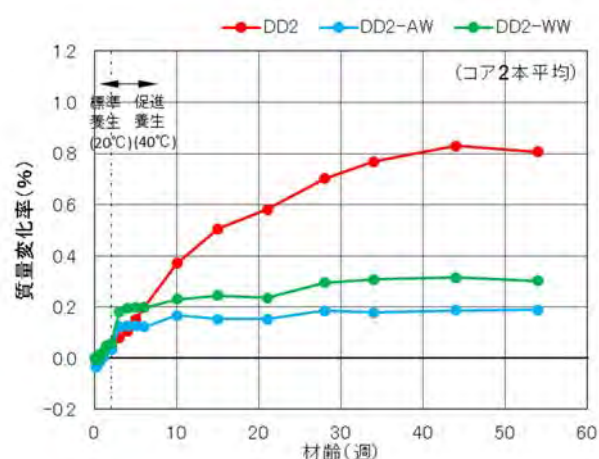


図 4.42 JCI-DD2 法による膨張率

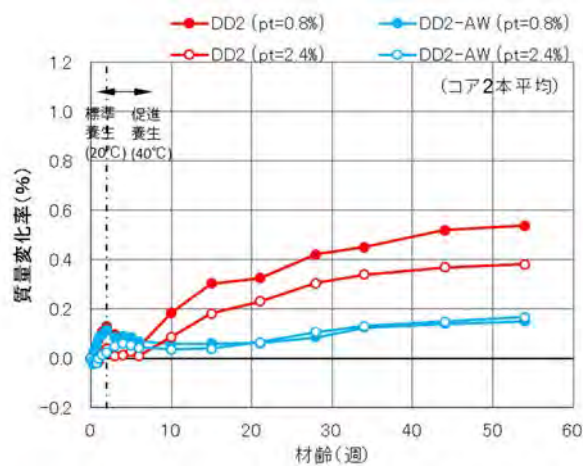
（図中の破線は、赤色は阪神高速道路（全膨張率が 0.1%を超える場合）、青色は建設省総プロ法（13 週／0.05%以上で有害／潜在的有害）の判定基準を示す）



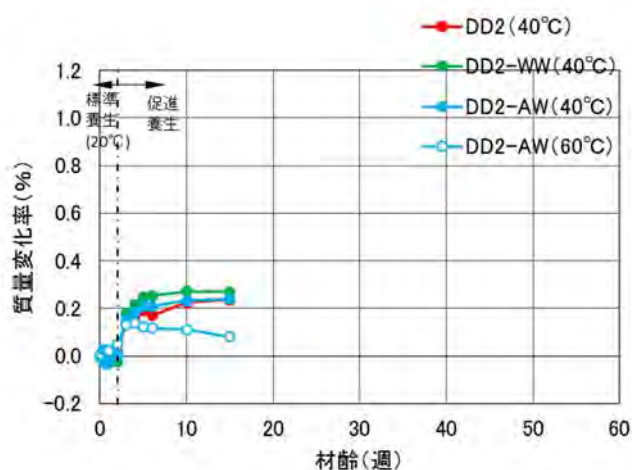
(a) T0_5.5



(b) T0_3.0



(c) T0.5.5_有筋



(d) WI_5.5

図 4.43 JCI-DD2 法による質量変化率

③ JCI-DD2 法におけるアルカリ溶脱

JCI-DD2 法のコアを収納した容器底の水を採取してアルカリ濃度を測定し、コアからのアルカリ溶脱率を確認した (図 4.44)。コアのアルカリ量は小型試験体作製時と同じ (3.0kg/m^3 または 5.5kg/m^3) であると仮定して溶脱率を算出した結果、AW なしの水準では、約 20%のアルカリの溶脱が生じていたが、AW ありの水準でアルカリ溶脱を抑制できていることが確認された。

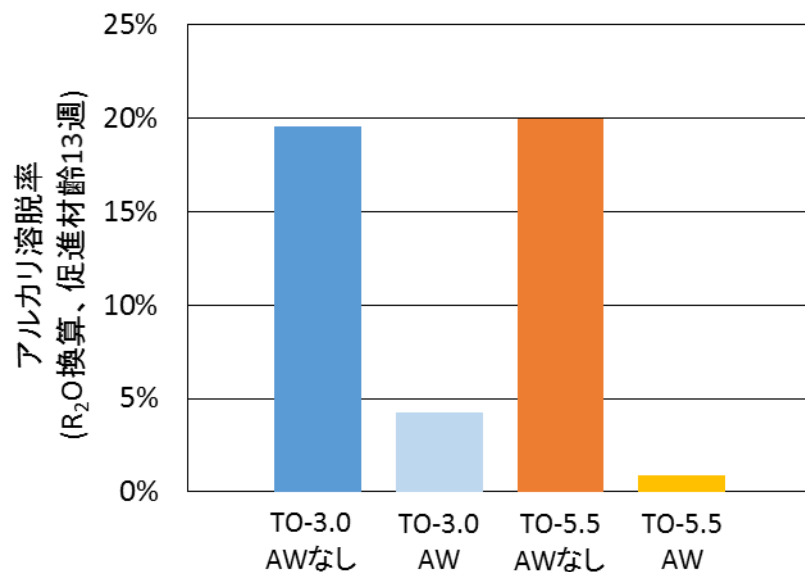


図 4.44 JCI-DD2 法によるコアからのアルカリ溶脱率
(促進材齢 13 週、温度 40℃)

④ 将来の膨張挙動と JCI-DD2 法による膨張

小型試験体の表面膨張率の実測値のコア採取後の膨張を、「3. 3 骨材試験方法の検討」で取得した CPT の結果から得られた膨張曲線から小型試験体の将来の膨張を予測し、JCI-DD2 法によるコアの膨張挙動と比較した結果を図 4.45 に示す。この結果より、JCI-DD2 法では、ほぼ予測曲線と近い挙動を示した。しかし、JCI-DD2 法の実測値は、膨張予測値と比べると、AW の有無によらず、促進養生開始直後に直ぐに膨張を開始せず、一時的に膨張が休止したような挙動を示した。これは、コア採取の際、採取と同時に拘束応力が解放され⁴⁴、解放膨張の基長測定前までに既に膨張が生じた可能性が考えられる。そして、この解放によってひび割れが生じ、生成した ASG がひび割れの空隙に解放あるいは促進膨張によって生成した ASG がひび割れの空隙を埋めるのに時間を要した可能性が考えられる。また、JCI-DD2-AW では、CPT の結果に基づく予測曲線を下回ったが、JCI-DD2-AW のアルカリ溶脱は抑制されているため、別の要因によるものと考えられる。

以上のことから、JCI-DD2 法では将来の膨張と近い挙動を示す可能性はあるが、前項で示したようにアルカリが溶脱を生じていたことは明らかであり、予想に反した膨張挙動を示した。したがって、JCI-DD2 法で膨張を生じた場合は将来の ASR による膨張リスクは高いと考えられるが、JCI-DD2 法で膨張が判定基準を下回ったからといって、将来

⁴⁴ Y Kawabata, H Goda, T Kato, M Iwanami: “Evaluation of induced strain in concrete due to ASR expansion by digital image correlation”, New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Chiangmai, Thailand, pp.1-10 (2011)

ASR による膨張が生じないとは言えないと考えられる。

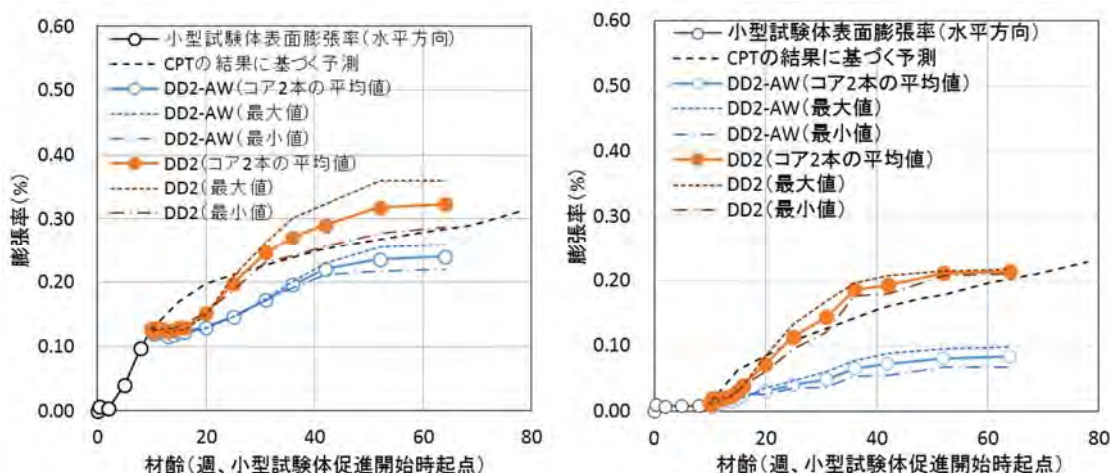


図 4.45 JCI-DD2 法によるコアの膨張挙動と小型試験体の膨張予測との比較

⑤ 考察

アルカリ溶液浸漬法は、JCI-DD2 法と比較して試験期間が短く、コア径が $\phi 50\text{mm}$ と小さいために鉄筋間隔が狭いコンクリート構造物にも適用できる特長がある。しかし、コア間のバラツキが大きく、コアの採取本数が少ない場合には、適切に膨張性を判断できない可能性がある。バラツキは、コア径が $\phi 50\text{mm}$ と最大粗骨材寸法の 2.5 倍しかなく、特にペシマム配合において反応性粗骨材の量が少ない場合にコアに含まれる粗骨材の量がバラツクため、その影響を受けることによると考えられる。また、アルカリ溶液に浸漬することから、コンクリートのアルカリ量が少なく、実際には膨張しないコンクリートにおいても有害判定となる可能性がある。しかしながら、反応性骨材が含まれる場合には膨張を生じ、コンクリートの潜在膨張性を評価できると考えられる。

JCI-DD2 法は、試験規格では、 20°C 相対湿度 95% 以上の環境下で解放膨張率を測定することとしている。しかし、今回の試験の範囲内では拘束した有筋試験体でも解放膨張は殆ど認められず、コア採取時に既に膨張は解放されている可能性がある。また、試験規格には、試験期間や判定基準は記載されないが、建設省総プロ法では材齢 13 週（最大で約 6 ヶ月）での判定であり、骨材 WI のように遅延膨張性骨材によって ASR が生じするような場合では試験期間が不足すると考えられる。

JCI-DD2 法の膨張挙動は、CPT から予測された小型試験体での膨張挙動と近い挙動を示したが、JCI-DD2 法では一時的に膨張が休止したような挙動を示すこと、本試験の条件では促進養生 13 週で約 20% のアルカリが溶脱したことが確認されたことから、JCI-DD2 法での膨張は、実構造物など、ある程度の大きさをもったコンクリートの将来の膨張挙動とは異なる可能性がある。

4. 3. 4 まとめ

(1) 小型試験体の作製及び膨張率の測定

骨材種類、アルカリ量、及び鉄筋の有無が異なる小型試験体を作製し、表面膨張率を測定して膨張挙動を把握し、コアを採取して促進膨張試験に供した。表面膨張率を測定した結果、何れの試験体でも、水平方向より垂直方向の膨張が大きい傾向にあり、無筋試験体でもコンクリート打設方向によって膨張に異方性があることが認められた。一方、有筋試験体の膨張挙動は、拘束が強い方向で膨張は抑制されたが、拘束が弱い方向で膨張が大きくなった。鉄筋による拘束が膨張に大きく影響していると考えられ、鉄筋比が比較的高い原子力施設においては鉄筋の拘束が ASR に対する影響を考慮する必要があると考えられた。

(2) コアの促進膨張試験

① アルカリ溶液浸漬法

・アルカリ溶液浸漬法を実施した結果、コンクリートのアルカリ量、養生温度によって促進試験による膨張率は若干異なったが何れも膨張を生じ、コア採取時の表面膨張率が大きい水準ほど促進膨張率は小さい傾向を示した。アルカリ溶液浸漬法では、外部からのアルカリの浸透によって骨材に膨張性があれば膨張する、すなわち潜在的な膨張性を評価する試験であることから、コンクリートのアルカリ量が少なく実際には膨張しないコンクリートにおいても有害判定となる可能性がある。

・アルカリ溶液浸漬法を実施した結果、コア試験体ごとのバラツキが大きかった。これは、アルカリ溶液浸漬法ではφ50mmのコアを用いるためであり、コアの採取本数が少ないと、適切に膨張性を判断できない可能性がある。

・拘束条件の違いについては、鉄筋比が高く拘束が強い方向から採取したコアの膨張率は高い傾向にあったが、明確な違い認められなかった。

② JCI-DD2 法

・拘束した有筋試験体で解放膨張は殆ど認められず、コア採取時に既に膨張は解放されている可能性があり、解放膨張そのものを評価できない可能性がある。また、材齢3～6ヶ月の膨張率で判定では、遅延膨張性骨材によって ASR が生じるような場合では試験期間が不足する。

・JCI-DD2 法の膨張挙動は、CPT から予測された小型試験体での膨張挙動と近い挙動を示したが、13週で約20%のアルカリが溶脱したこと、及び促進養生開始でも一時的に膨張が休止したような挙動が確認されたことから、JCI-DD2 法での膨張は、実構造物など、ある程度の大きさをもったコンクリートの将来の膨張挙動とは異なる可能性がある。

③ 促進膨張試験の適用性

日本で主に用いられているコアの促進膨張試験の概要、特徴及び本検討で得られた課題を表 4.23 に示す。

コアの促進膨張試験は、採取コアを促進養生して、その期間中の膨張率を測定し、その膨張率からコンクリート構造物の潜在的な膨張性や将来の膨張を予測しようとするものである。しかしながら、将来の膨張予測について、促進膨張試験は ASR の診断において参考となる知見は得られるが、この試験方法のみでコンクリートの将来の膨張挙動を予測することはできないと考えられる。

表 4.23 コアの促進膨張試験の概要、特徴及び課題

	試験概要	特徴	課題
JCI-DD2 法 ⁴⁵	原則としてφ100×250mm のコアを使用(基長 200mm) 〈養生条件〉 解放膨張:20℃RH95%養生 促進膨張:40℃RH95%養生 〈判定基準〉 ・総プロ法:促進養生 13 週後 0.05%以上の膨張で有害/潜在的有害⁴⁶ ・阪神高速:全膨張率が 0.1%を超える場合有害判定⁴⁷	・鉄筋拘束をコア採取で解放した時の膨張(解放膨張率)と、その後の促進養生の膨張(促進膨張率)を合わせて評価する。 ・日本では、この試験方法を「残存膨張試験」として、将来の膨張予測の判断に用いている。	・過密配筋ではφ100mm のコアが採取できない ・拘束下における開放膨張は、この試験法で評価できない可能性がある。また、現場ではコア採取直後に所定の長さにコアを切断し、バンドを取り付け、基長を測定することは困難である。 ・RH95%養生であるため、試験期間中の乾燥が懸念される。 ・促進養生期間中にアルカリ溶脱が生じる。 ・特に遅延膨張性骨材では将来膨張する可能性のあるコンクリートでも促進養生 13 週では判定できない可能性がある。
アルカリ溶液浸漬法 ⁴⁸	φ50mm 程度のコアを使用(基長:100mm) 〈養生条件〉 80℃1N-NaOH 溶液に浸漬 〈判定基準〉 材齢 21 日の膨張率が 0.10% 以上で、有害⁴⁹	・通称'カナダ法'と呼ばれ、北米のモルタルによる ASR 試験法を元に研究/開発された方法。 ・短期間で結果が得られる。 ・コア径が小さいので過密鉄筋に対応できる。	・NaOH 溶液に浸漬するため、骨材に ASR 反応性があれば膨張を生じる可能性がある。 ・NaOH 濃度が高いため、チャートには適用できない。 ・コアごとのバラツキが大きく、ASR 反応性があっても判定基準を下回る可能性がある。
飽和 NaCl 溶液浸漬法 ⁴⁸	φ50mm 程度のコアを使用(基長:100mm) 〈養生条件〉 50℃飽和 NaCl 溶液に浸漬 〈判定基準〉 材齢 91 日の膨張率が 0.10% 以上で、有害⁵⁰	・通称'デンマーク法'と呼ばれている。 ・コア径が小さいので過密鉄筋に対応できる。	本検討では実施していない (・NaCl 溶液に浸漬するため、骨材に ASR 反応性があれば膨張を生じる可能性がある。 ・試験期間がアルカリ溶液浸漬法より長い。 ・火山ガラスに対しては膨張が促進されない可能性がある³⁹⁾

⁴⁵ 社団法人日本コンクリート工学会：“JCI-DD2 アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法(案)”，JCI 規準集，pp. 152-156 (2004)

⁴⁶ 建設省、財団法人国土開発技術研究センター：“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<第二編>” (1989)

⁴⁷ 阪神高速道路株式会社、阪神高速道路管理技術センター：“ASR 構造物の維持管理マニュアル”，pp. 17-19 (2007)

⁴⁸ 社団法人日本コンクリート工学会：“ASR 診断の現状とあるべき姿研究員会報告書”，(2014)

⁴⁹ Katayama T, Tagami M, Sarai Y, Izumi S and Hira T: “Alkali-aggregate reaction under influence of deicing salts in the Hokuriku district”，Materials Characterization, Vol.53, pp. 105-122 (2004)

⁵⁰ 野村昌弘ら：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法、コンクリート工学論文集、Vol. 13、No. 3、pp. 105-114 (2002)

4. 4 ASR 劣化した実構造物による評価

4. 4. 1 実施概要

ASR 診断方法の検証として、ASR による劣化を生じ、高温状態にあったと考えられるキルン架台からコアを採取し、表 4.1 に示す各種試験を行って、実構造物に対する適用性を評価することを目的とした。これは、原子力施設では高温状態となるコンクリートがあり、また、促進養生による試験体を用いた検討では実構造物に対する適用性が評価できないためである。

対象とした構造物であるキルン架台は、1974 年に竣工し、約 28 年間、高温状態にあったと考えられるが、現在は停止している。そこで、まず、類似の他の工場のキルン架台の温度測定値から解析によって対象構造物のコンクリート温度を推定した。次いで、対象構造物からコアを採取し、調合推定などの基礎データを取得し、岩石学的試験及び促進膨張試験に供した。

4. 4. 2 対象構造物及びコア採取

(1) 対象構造物

① 構造物諸元

対象構造物は、福岡県にあるキルンの架台である。外観状況を図 4.46 に示す。

キルンは 1974 年竣工、1976 年稼働開始で、キルン架台のコンクリート材齢は約 40 年である。2004 年にセメント生産の停止に伴い、キルンの運転は休止となったが、キルンは年間数回の点検整備のための休止期間を除いて約 28 年間にわたり稼働し、キルン架台は高温履歴を受けていた。



図 4.46 対象構造物の外観状況

② 劣化状況（ひび割れ）

対象構造物のひび割れ図を図 4.47 に示す。また、ひび割れ箇所の拡大写真を図 4.48 に示す。外観観察では、架台全体にひび割れが生じており、主に配筋に沿った水平方向のひび割れが多く認められた。最大ひび割れ幅は、架台上部で 1.2mm、架台下部で 0.5mm であった（図 4.48 の(a)及び(b)）。また、架台の上縁付近には、図 4.48 の（c）に示すような大きなひび割れが認められた。ひび割れ以外には、特に架台上部において、図 4.48 の(d)に示すような白色の析出物がひび割れに認められ、また、架台上部にあるキルンを支えるローラーの機械油が内部のひび割れを伝って表面に出たと思われる、表面が黒色化した部分が、特に架台の上半分に多く見られた。

日本コンクリート工学会が刊行する「コンクリート診断技術」⁵¹による構造物の外観変状の特徴から、対象構造物の劣化（ひび割れ発生）要因は ASR に起因し、架台上部でより劣化しており、長期間高温に晒されていたと推定した。

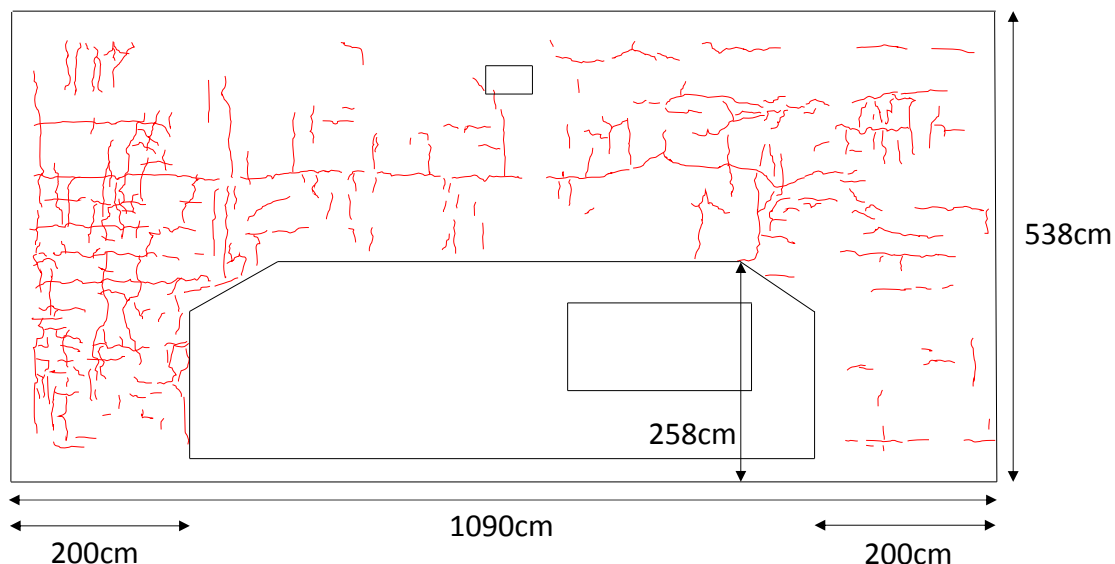


図 4.47 対象構造物のひび割れ図

⁵¹ 日本コンクリート工学協会：“コンクリート診断技術’09 [基礎編]”，pp.195-199（2009）



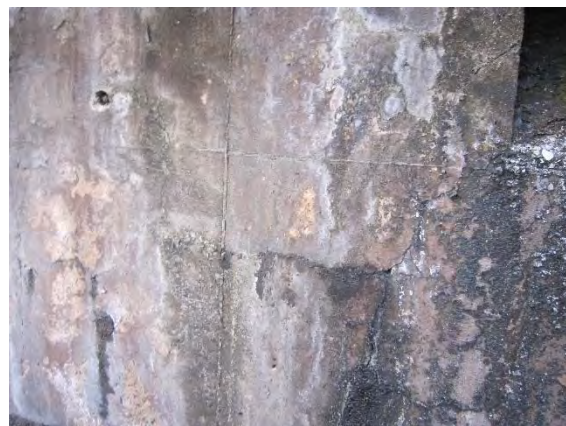
(a) 架台上部のひび割れ(1.2mm)



(b) 架台下部のひび割れ(0.5mm)



(c) 架台上縁付近のひび割れ



(d) 析出物及び油の滲出

図 4.48 ひび割れ箇所の拡大写真

(2) コンクリート温度の推定

(1)項で述べた通り、対象構造物であるキルン架台は、キルンからの輻射熱による高温環境下に置かれていた。しかしながら、キルンは既に運転を停止しているため、現在では、直接、コンクリート温度を測定することができない。そこで、キルン架台からのコア採取位置の選定のため対象構造物の受熱温度及び温度分布を推定した。

① 推定方法

他の稼働中のセメント工場のキルン架台で測定した温度データを用い、有限要素法により温度解析を行い、そのパラメータを用いて対象構造物の受熱温度を推定した。

a 使用プログラム

解析プログラムは、ASTEAMACS ver. 9 (株式会社計算力学センター) を用いた。また、有限要素法による熱伝導は、フーリエの法則に基づく熱伝導方程式を用いた。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q \cdots \cdots \cdots (4.3)$$

ここに、

ρ : 密度、 c : 比熱、 T : 温度、 λ : 熱伝導率、 Q : 単位時間あたりの発熱量

∇ : 空間における微分

コンクリートに外部から温度を伝える手法としては、①発熱体をモデル化する方法、②境界条件（熱伝達境界）による方法が考えられる。輻射熱を直接考慮した解析は困難であり、また、熱の供給源がコンクリート表面より離れていることから、輻射熱がコンクリート表面に作用してコンクリート温度を上昇させることとして、②境界条件（熱伝達境界）による方法とした。ここで、輻射熱を与えられた場合の熱伝達率は不明であるため、他の稼働中のセメント工場のキルン架台で測定した温度データを用いて熱伝達率を求めた。稼働中のキルンの表面温度は、対象としたキルンとほぼ同じ温度と推定されることから、この熱伝達率を用いて対象構造物コンクリートの運転当時の温度を推定することとした。

b コンクリートの物性値

コンクリートの物性値は、土木学会「コンクリート標準示方書」[設計編]2012 年度版に示される、一般的な熱特性値の平均的な値を用いた。

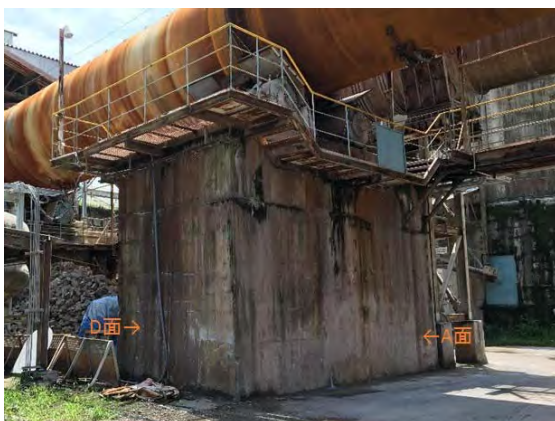
熱伝導率 : $2.8 \sim 2.6 \text{ W/m}^\circ\text{C} \rightarrow 2.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

密度 : 2300 kg/m^3

比熱 : $1.05 \sim 1.26 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \rightarrow 1.125 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

c 温度データの取得

温度データを取得したキルン架台の外観を図 4.49 に示す。



(a) 外観（全景）



(b) キルン直下面外観（A面側）

図 4.49 温度データを取得したキルン架台の外観

d 熱伝達境界の設定

温度データを取得したキルン架台のモデル化は、左右対称性を利用した 1/4 モデルとし、メッシュの寸法は 100mm として作成した。熱伝達率は、キルン直下から 1m、2m、3m 離れた点及び架台端部の位置における温度が合うように、距離に応じて設定した。

e 温度同定結果

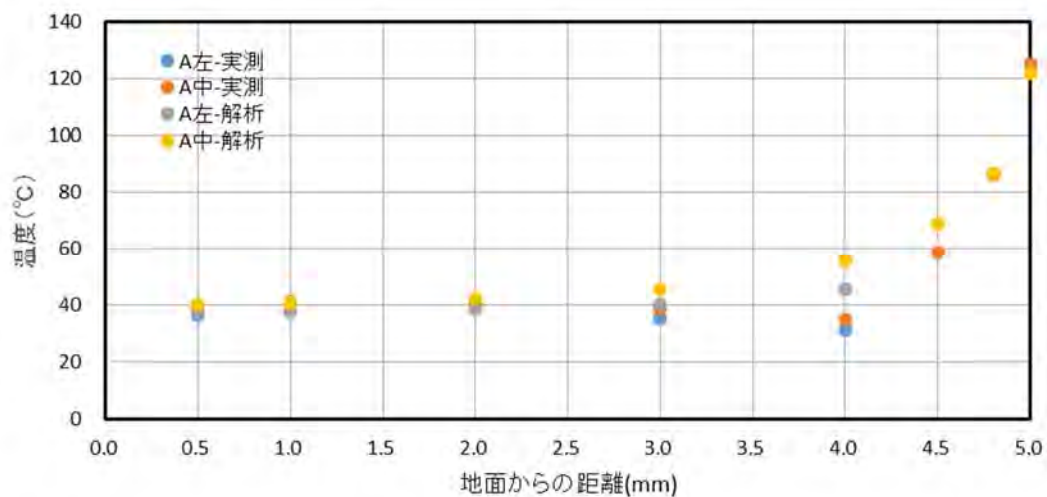
稼働中キルンの架台で取得した温度データに基づき、有限要素法により温度解析を行い、パラメトリックスタディからキルン架台上面の熱伝達率は $400\text{W/m}^2\text{C}$ と決定した。キルン直下と輻射熱の影響度合いが相違する側面に関しては、側面の温度計測結果をもとに熱伝達率を設定し、キルン軸方向面は $14\text{W/m}^2\text{C}$ 、キルン軸直角方向は $5\text{W/m}^2\text{C}$ とした。

f 実測値と解析値の比較

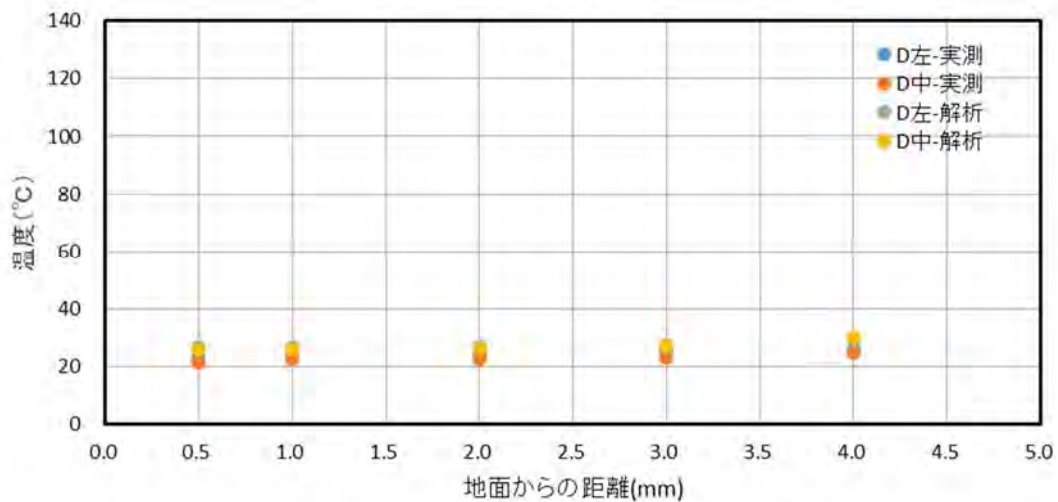
c 項で得た温度の実測値と、e 項で得た解析値を比較した結果を図 4.50 に示す。

キルン直下のキルン架台側面（以下、「A 面」という）の地面から 4.0m の位置で、実測値と解析値がやや乖離していた。これは、A 面の地面から 4m の位置には、保守点検用の歩廊が設置されており（図 4.49 (b) 参照）、歩廊により輻射熱が遮られたものと推察される。なお、図 4.50 の D 面はキルン軸方向と平行位置にあるキルン架台の側面である。

全般的には実測値と解析値は概ね一致しており、本項で設定したパラメータで、対象構造物のコンクリート温度を推定することができると考えられる。



(a) キルン直下面 (A 面)



(b) 架台側面 (D 面)

図 4.50 実測値と解析値の比較

② 温度推定結果

対象構造物をモデル化し、①項で設定した解析条件（コンクリートの物性値、熱伝達境界、熱伝達率）で、対象構造物の温度を推定した。対象構造物のモデル化は、左右対称性を利用した 1/4 モデルとし、メッシュの寸法は 100mm として作成した。

対象構造物におけるコンクリート温度の推定結果を図 4.51 に示す。キルン近傍の 125℃から架台下部に向かって 15℃までの温度分布状況となっている。

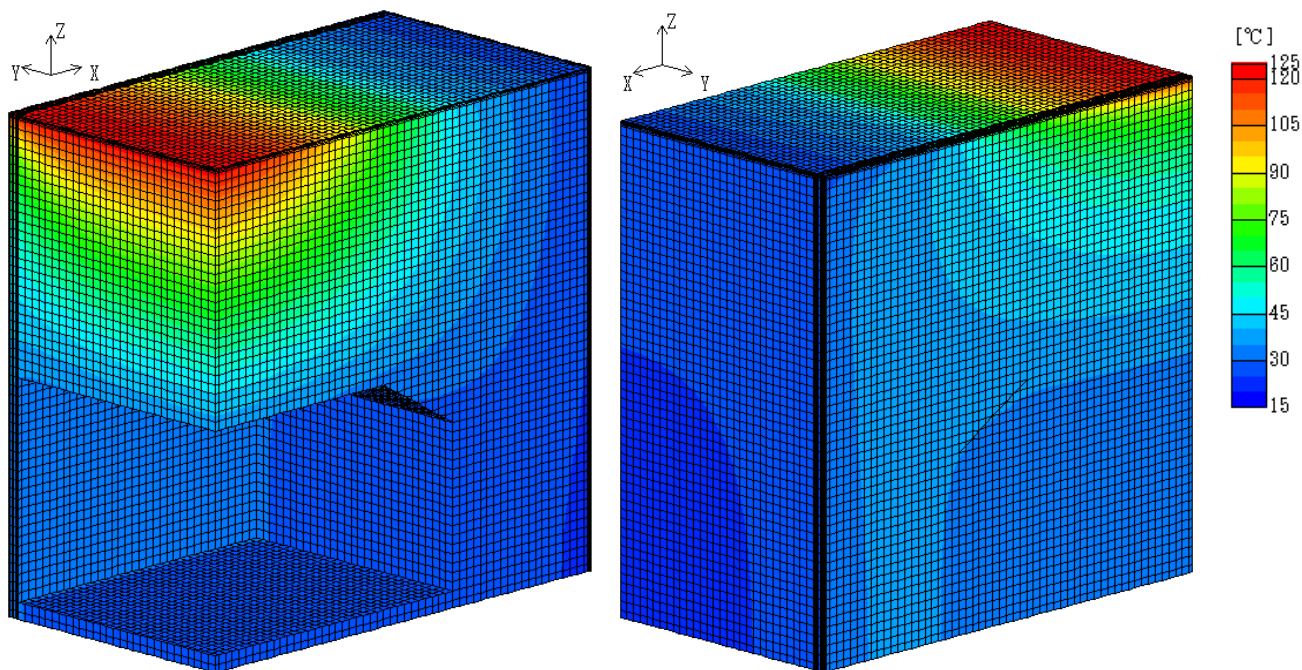


図 4.51 コンクリート温度の推定結果

(3) コア採取

① コア採取位置

原子力施設のコンクリートにおいては、運転時の雰囲気温度、放射線の吸収などにより、高温となる部位がある。コンクリートが高温を受けた際には、化学的及び物理的変質が生じ、結果として力学的性質が変化する場合がある。このため、JASS5N「原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事」では、構造安全性の観点から温度制限値が設定されており、配管貫通部などの局所については 90℃を、その他の部分については 65℃を超えないこととしている⁵²。

そこで、上記の内容と(2)項の推定結果から、コンクリート温度が 65～90℃の範囲の温度を受けたと推定される位置を選定してコアを採取することとした。また比較として、同一構造物においてコンクリート温度が低いと推定される位置でもコアを採取し、受熱温度による差異を検討することとした。

選定したコア採取位置を図 4.52 に、コア採取位置におけるコンクリートの推定温度を表 4.24 に、コンクリート表面からの距離と温度の関係を図 4.53 に示す。なお、同図には、コア採取位置へのアクセス等の条件から最終的にコアを採取した箇所を①～⑥で示した。

図 4.53 に示すように、①～④（架台上部）は高温であった箇所、キルンが稼動していた 28 年間、コアを採取するコンクリート表面から 1m の範囲で 60～90℃温度とな

⁵² 日本建築学会：“建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事”，pp.81-83（2013）

っていたと推定された。一方、比較対照とした⑤⑥（架台下部）は、おおよそ 30～35℃ の温度となっていたと推定された。

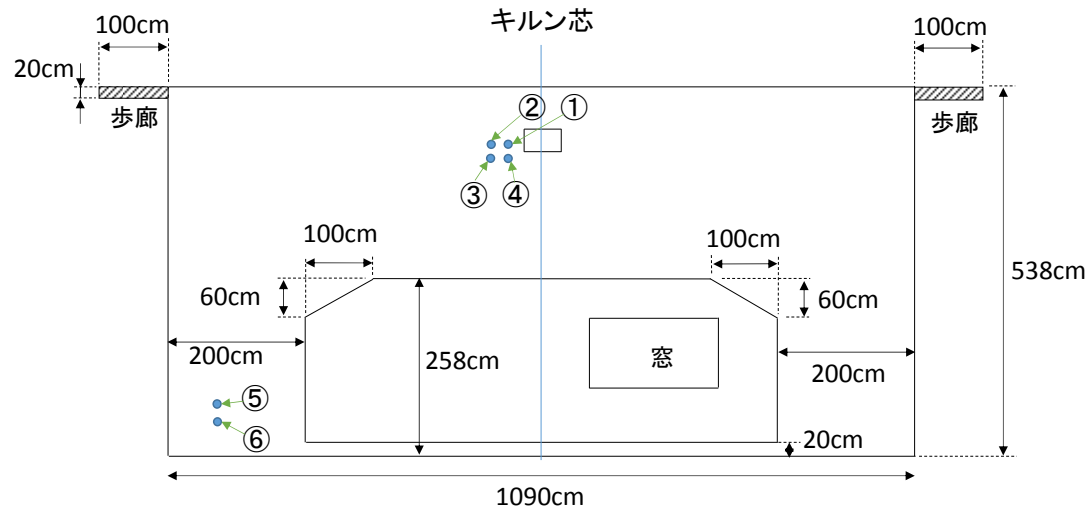


図 4.52 コア採取位置

表 4.24 コア採取位置における推定温度

コンクリート表面からの距離 (mm)	推定温度 (℃)					
	架台上部				架台下部	
	①	②	③	④	⑤	⑥
0	65.9	64.8	59.2	60.0	35.3	35.3
50	68.7	67.5	61.2	62.1	34.8	34.8
100	71.3	69.9	63.2	64.2	34.4	34.3
200	77.9	76.3	68.4	69.7	33.0	33.0
300	81.4	79.7	71.4	72.8	32.2	32.1
400	84.4	82.5	74.0	75.5	31.4	31.4
500	86.8	84.8	76.3	77.9	30.7	30.7
1000	93.7	91.5	83.4	85.3	28.2	28.1
2000	98.0	95.6	88.3	90.4	26.1	26.0
3000	98.8	96.3	89.3	91.4	25.6	25.5

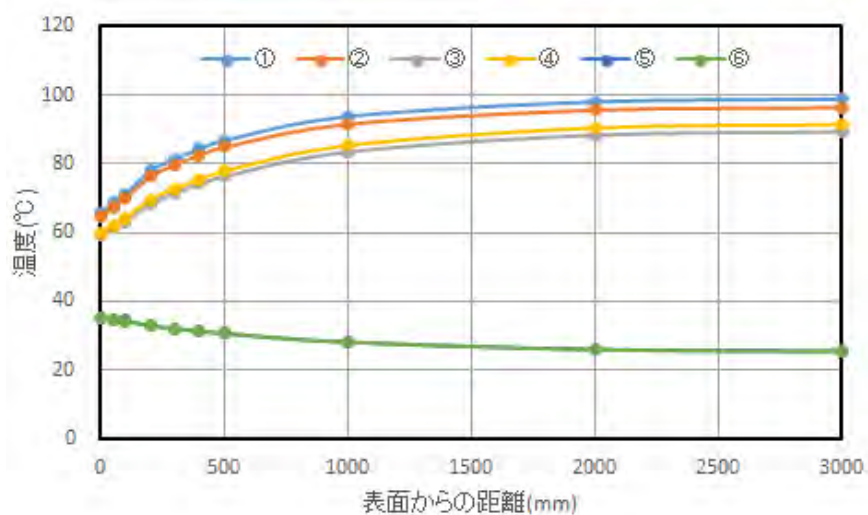
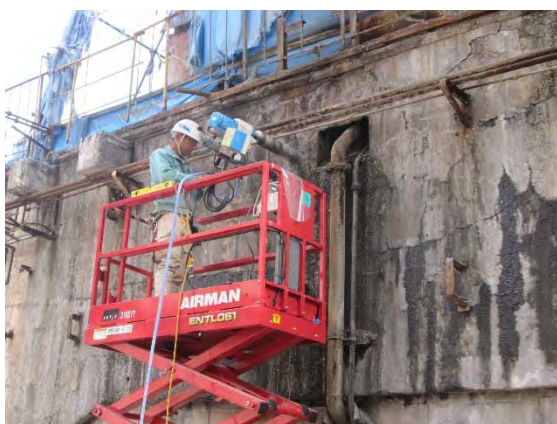


図 4.53 コンクリート表面からの距離と温度の関係

② コア採取方法

コアの採取状況を図 4.54 に示す。コアは架台側面より水平方向に、湿式により採取した。



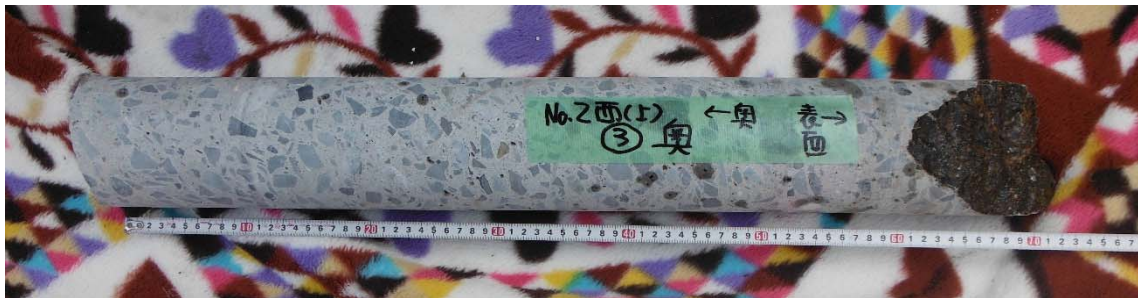
(a) 架台上部



(b) 架台下部

図 4.54 コアの採取状況

採取したコアの外観を図 4.55 に示す。架台上部で採取したコアのうち、①②は、採取途中で内部鉄筋にあたり、確保できた長さが 10 数 cm 程度であったため、試験には用いなかった。また、架台上部のコア③④は、ひび割れで破断した箇所や油が多く染み込んだ箇所があった。このため、促進膨張試験に適用できるコアは複数本確保できず、架台上部では n 数=1 本、架台下部では n 数=2 本とした。



(a) 架台上部（コア採取位置③）



(b) 架台上部（コア採取位置④）



(c) 架台下部（コア採取位置⑤）



(d) 架台下部（コア採取位置⑥）

図 4.55 採取コアの外観

③ コンクリートの特性

採取したコアの中性化深さは、③及び④（何れも架台上部）はそれぞれ 0.5cm 及び 0.6cm、⑤及び⑥は（何れも架台下部）はそれぞれ 1.7cm 及び 1.0cm であった。配合推定の結果は、架台上部及び架台下部で、それぞれ単位セメント量 410kg/m^3 及び 403kg/m^3 、それぞれ水セメント比 47% 及び 49% であり、架台上部及び架台下部で大きな差異は無かった。塩化物イオン濃度は、架台上部及び架台下部でそれぞれ 1.21kg/m^3 及び架台下部で 0.62kg/m^3 であり、塩化物イオンが海砂等による NaCl 由来とすると、セメント由来

のアルカリだけでなく、NaCl によってアルカリ量が若干ではあるが増加した可能性がある。

4. 4. 3 岩石学的評価

(1) 試験方法

試験項目は、コア外觀観察（可視光源下での展開写真、UV 光源下での展開写真、実体顕微鏡観察）、岩石学的評価（薄片偏光顕微鏡観察、薄片スキャナ、粉末 X 線回折（コア XRD））、岩種構成定量、SEM 観察/EDS 分析）、アルカリ収支計算、コア空隙水分析である。試験方法は「4. 2. 2 試験方法」と同様である。実施した試験項目一覧を表 4. 25 に示す。

表 4. 25 ASR劣化した実構造物の試験実施項目

分類	試験項目	キルン架台 上部	キルン架台 上部
外 観 観 察	可視光	○	○
	蛍光法	○	○
	実体顕微鏡	○	○
岩 石 学 的 評 価	薄片偏光顕微鏡 観察	○	○
	薄片スキャナ	○	○
	コア XRD	○	○
	岩種構成定量	○	○
	薄片 SEM 観察/ EDS 分析	○	○
	アルカリ量推定	○	○
	コア空隙水分析	○	○
	コアの促進膨張試験	○	○

なお、粉末 X 線回折の試験方法について、以下に示す。

コンクリートコアより取り出した骨材について、反応性鋁物の検出を目的として、粉末 X 線回折を実施した。

測定試料は、採取コアの水溶性アルカリ量の測定で取り出した骨材であり、粗粉碎、縮分後、めのう乳鉢を用いて、指頭に粒を感じなくなるまで微粉化し、測定に供した。測定装置は図 4. 56 に示すスペクトリス社製粉末 X 線回折装置（X' Pert PRO MPD）を使用した。測定条件は、管球 Cu、入射側発散スリット 1°、入射側散乱防止スリット 2°、受光側散乱防止スリット 5.5 mm、管電流 40 mA、管電圧 45 kV、スキャン角度 $2\theta = 5 \sim 60^\circ$ 、スキャンスピード $5^\circ / \text{min}$ 、サンプリング間隔 0.03° とした。



図 4.56 粉末 X 線回折装置

(2) 試験結果

① コア外観観察

a 可視光源下での展開写真

可視光源下で撮影した画像から作製した展開写真を図 4.57 及び図 4.58 に示す。図に示されるように、架台上部と下部では同種の粗骨材が用いられていると判断した。粗骨材の最大粒径は、架台上部、下部ともに、20mm 程度であった。



図 4.57 コンクリートコア展開写真（キルン架台上部、可視光源）



図 4.58 コンクリートコア展開写真（キルン架台下部、可視光源）

b UV 光源下での展開写真

短波長(254nm)UV 光源下で撮影した画像から作製した展開写真を図 4. 59 及び図 4. 60 に示す。

架台上部では、図 4. 59 に示されるように、ASG の存在を示す緑色蛍光は確認されなかったが、青白く光る蛍光が確認された。これは機械油によるものであると考えられ、別途、機械油を塗布したコンクリートで同様に青白く蛍光を発することを確認している。このように、ASG とは異なる成分による蛍光に注意が必要である。

架台下部では、図 4. 60 に示されるように、ASG の存在を示す緑色蛍光が複数の粗骨材の周囲に広がっていることが確認された。以上のことから、実構造物においても、蛍光試薬により ASG を視認できることが確認された。

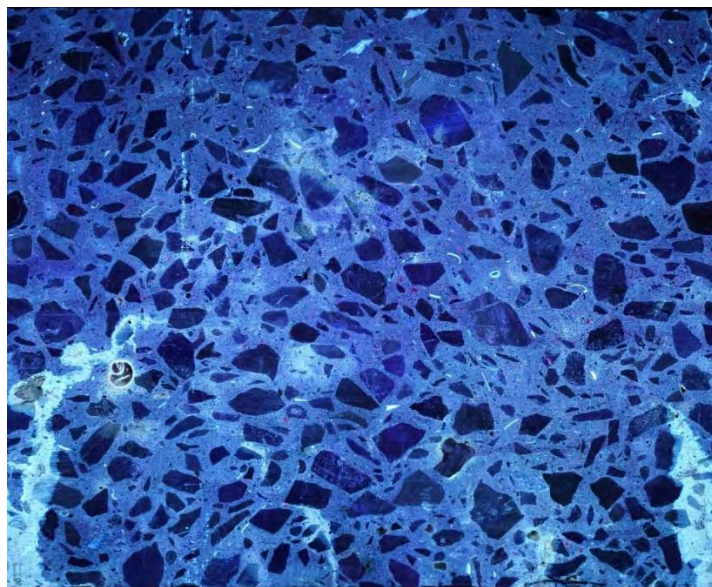


図 4. 59 コンクリートコア展開写真（キルン架台上部、UV 光源）

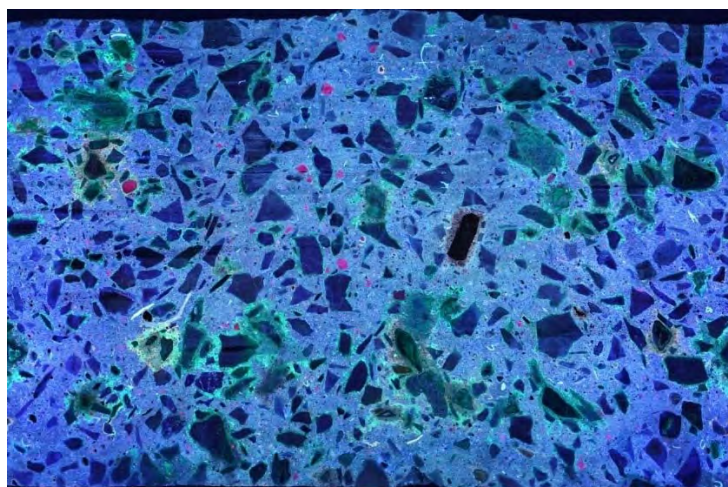


図 4. 60 コンクリートコア展開写真（キルン架台下部、UV 光源）

c 実体顕微鏡観察

図 4. 61 及び図 4. 62 の左側に撮影画像を示す。なお、右側には左側の撮影画像に用いた同一切断面のマクロ写真を示す。

架台上部では、図 4. 61 に示されるように、ひび割れ内の ASG は認められなかったが、コンクリート断面内に機械油で満たされたひび割れが観察された。実体顕微鏡観察のみでは、このひび割れが ASR に由来するものかは判断できないが、後述する偏光顕微鏡観察において反応リムや ASG の滲出が認められたことから、このひび割れは ASR によって生じたものと推察された。

一方、架台下部では、図 4. 62 に示されるように、一部の粗骨材に ASR の反応リム及び骨材周囲への ASG の染み出しが確認された。

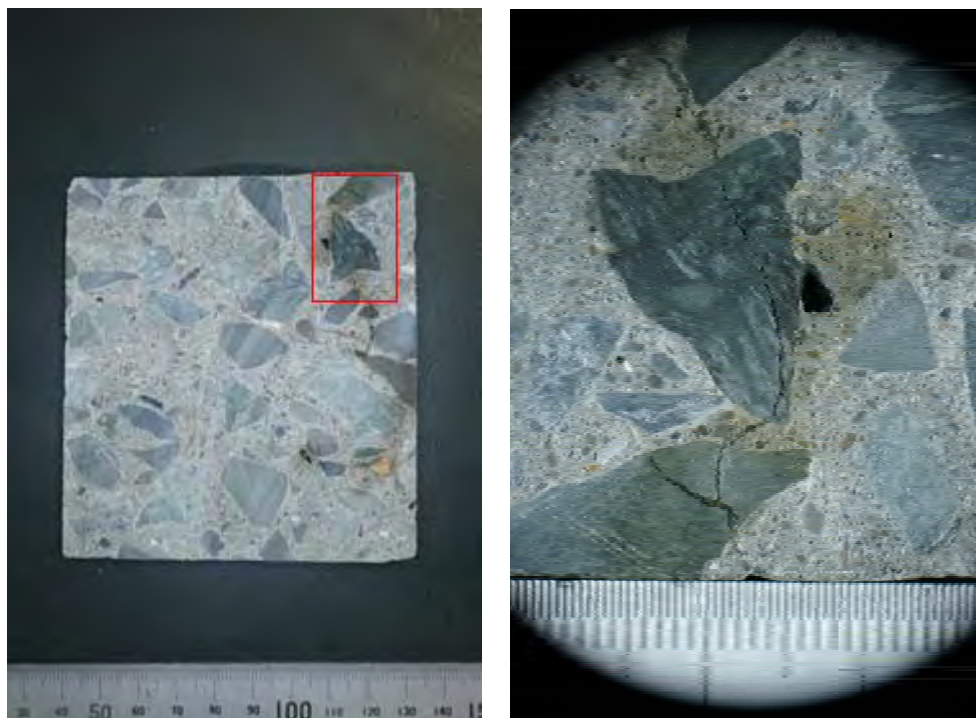


図 4. 61 コンクリートコア切断面観察

(キルン架台上部、左：切断面 101mm×91mm、右：視野左図赤枠 30×45mm)

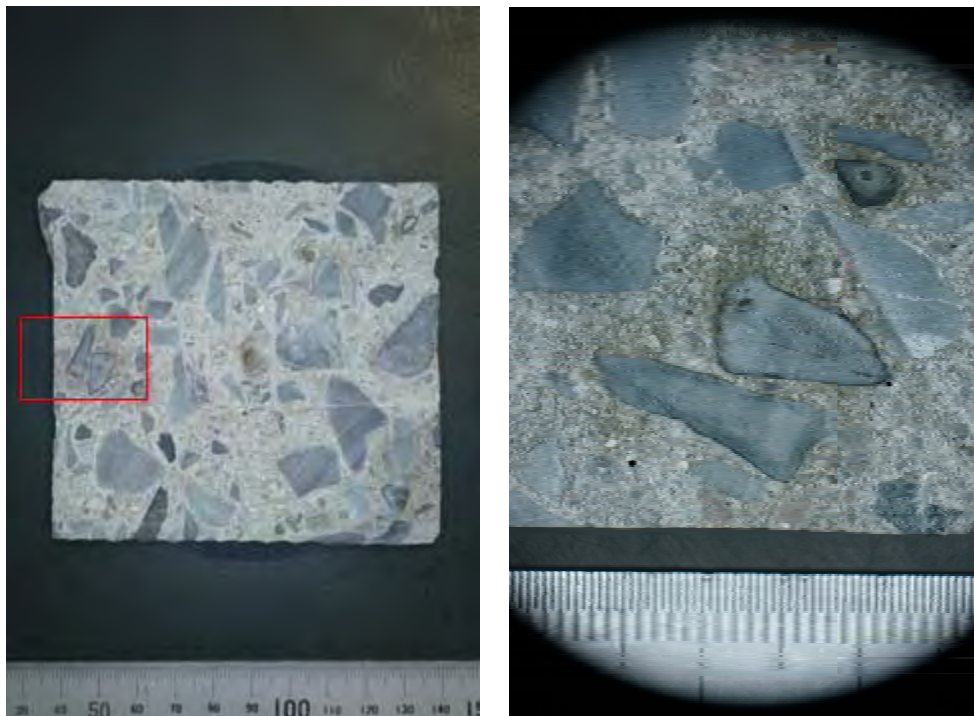


図 4.62 コンクリートコア切断面観察
(キルン架台下部、左：切断面 101mm×91mm、右：視野左図赤枠 30×45mm)

② 岩石学的評価

a 偏光顕微鏡観察

薄片の偏光顕微鏡写真を図 4.63 及び図 4.64 に示す。

反応リムや ASG に充填された微細な膨張ひび割れの発生が認められた。

その微細なひび割れの一部がセメントペーストへ伸展している状況も確認された。

この他、粗骨材の頁岩・砂岩などの多くの粒子に、反応リムや ASG の滲出などが認められた。なお、ASG の滲出について架台上部と下部を比較すると、架台下部の方が ASG の滲出が多く観察された。

セメントペーストには、高炉スラグ、フライアッシュ、石灰石微粉末などの混入は認められず、ポルトランドセメントが使用されていると考えられる。

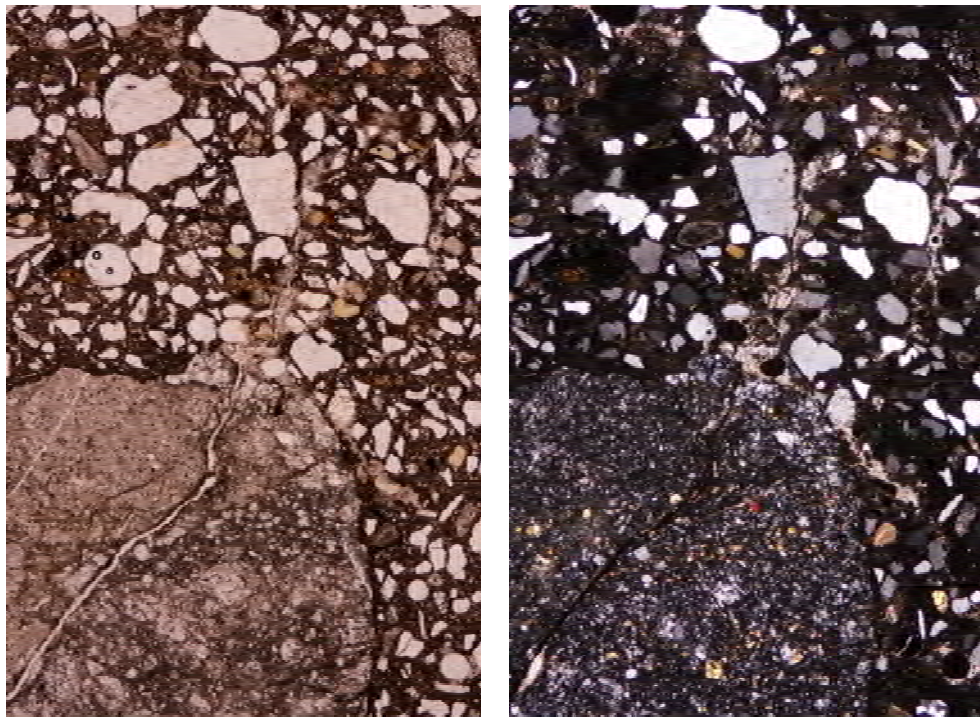


図 4.63 偏光顕微鏡写真例
(キルン架台上部、×20、左：開放ニコル、右：直交ニコル)

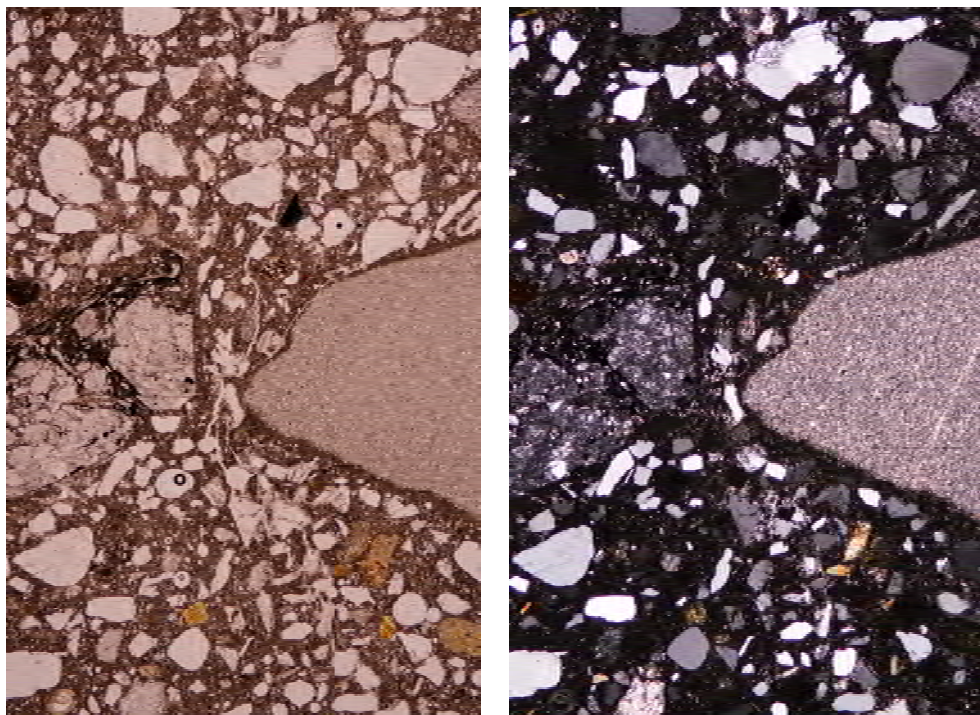


図 4.64 偏光顕微鏡写真例
(キルン架台下部、×20、左：開放ニコル、右：直交ニコル)

b 薄片スキャナ

架台上部、架台下部のコンクリート薄片をスキャナで取り込んだ全景画像をそれぞれ図 4. 65、図 4. 66 に示す。図中には、掲載した薄片の偏光顕微鏡の撮影視野を赤枠で示した。

図 4. 65 に示されるように、図の中央部にある粗骨材や左上にある粗骨材からペースト部へひび割れが貫通している様子が確認できる。また、左上にある粗骨材や図の下部中央にみられる粗骨材に反応リムのようなものが確認できる。このことから、粗骨材を貫通しているひび割れは、ASR によるものと考えられた。

図 4. 66 に示されるように、粗骨材やペーストに明確なひび割れの発生は確認できなかった。一方で、中央部にある粗骨材や図の右上にみられる粗骨材に反応リムのようなものが確認できる。このことから、ASR の進行段階の途中であると考えられた。

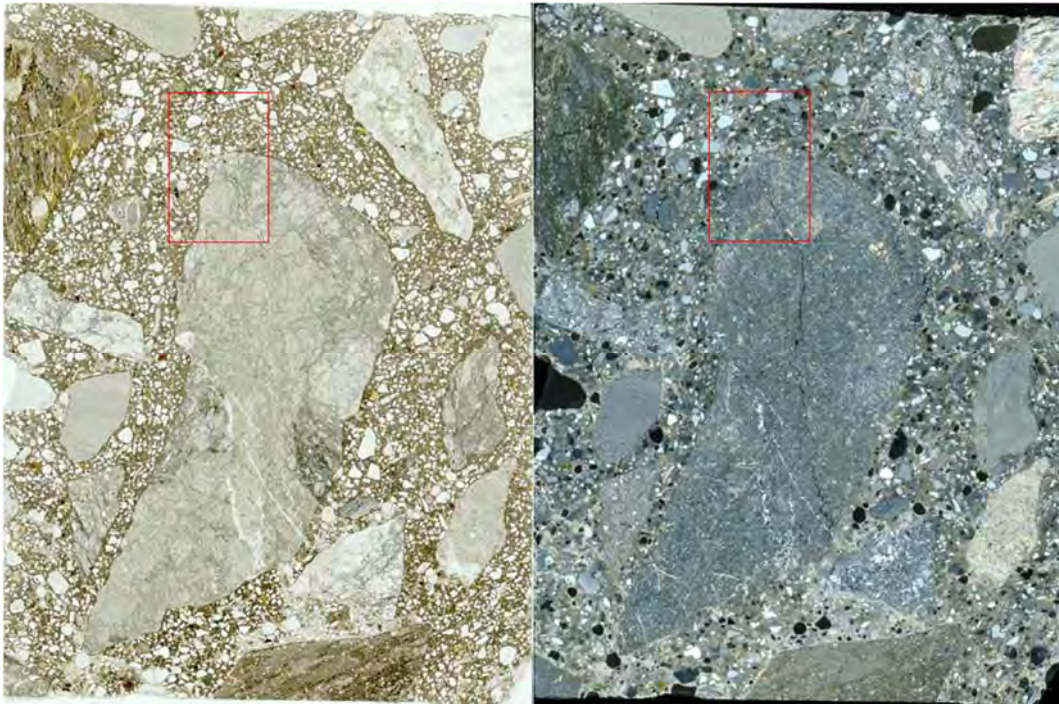


図 4.65 コンクリート薄片全景画像例（キルン架台上部）

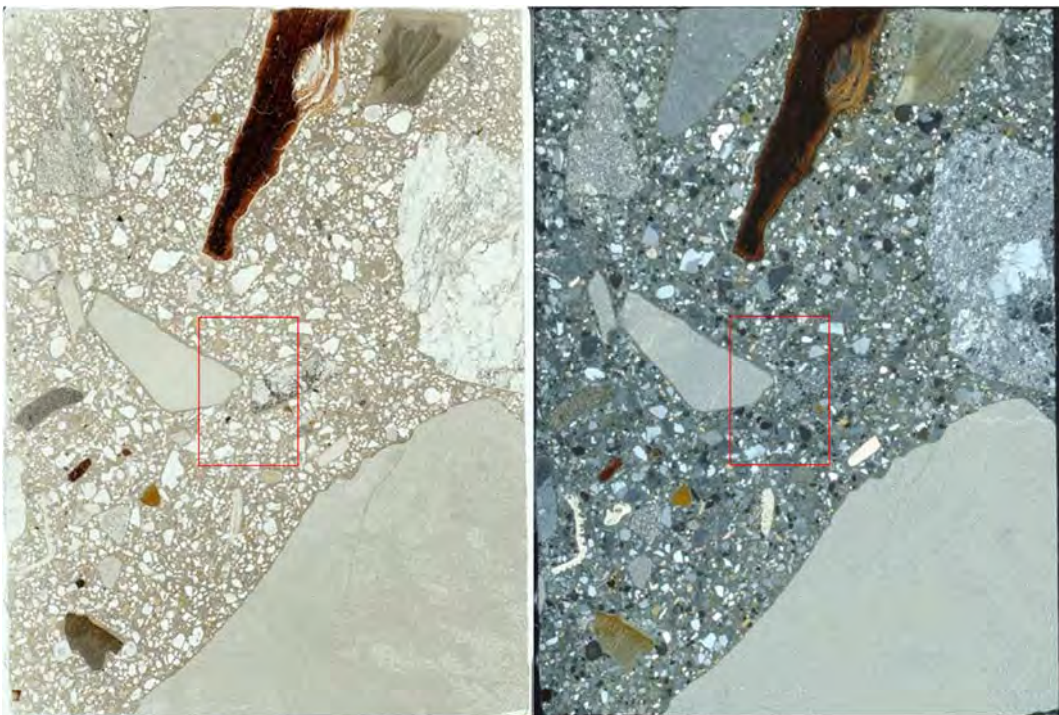


図 4.66 コンクリート薄片全景画像例（キルン架台下部）

c 粉末 X 線回折

コンクリートコアより取り出した骨材の粉末 X 線回折図を図 4.67 に示す。粉末 X 線回折の結果からは、架台上部と下部ともに、反応性鉱物は検出されなかった。なお、粉末 X 線回折では、隠微晶質石英は粗粒石英（図中ではどちらも Q: 石英）を区別できず、同定できる反応性鉱物はクリストバライト及びトリディマイトのみに限られる。また、ASR 反応が生じているかどうかの判断はできないことに注意が必要である¹³。

キルン架台上部と下部のそれぞれで検出された鉱物は、ほぼ同一であることから、架台上部と下部で用いられている骨材は、同じ産地のものと考えられた。

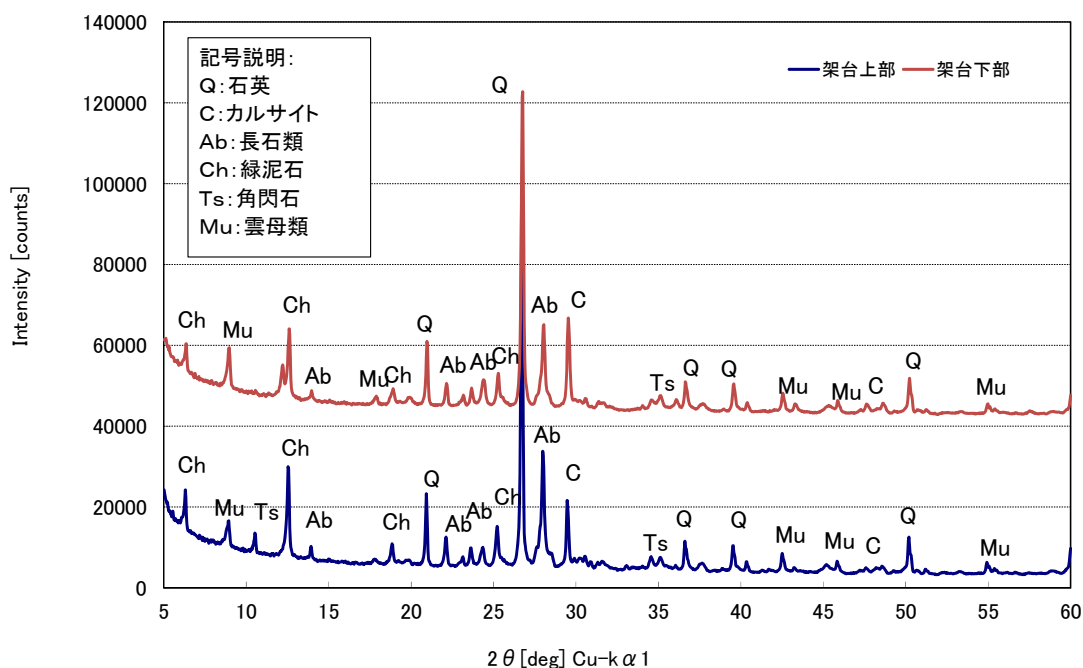


図 4.67 粉末 X 線回折図

d 岩種構成定量

(a) 粗骨材

確認された粗骨材の岩種構成割合と主要な構成鉱物を表 4.26 に、コア側面の展開写真と構成岩種を図 4.68 に、粗骨材の偏光顕微鏡写真を図 4.69 及び図 4.70 に示す。

粗骨材は、架台上部、下部ともに、最大寸法が 20 mm 程度で、多くの岩種からなる碎石であった。確認された岩石は、架台上部では、割合の多い順に、凝灰質砂岩・砂岩・頁岩・斑レイ岩など、架台下部は頁岩・凝灰質砂岩・蛇紋岩・砂岩などであり、構成割合は異なるものの、架台上部と下部で、ほぼ同一の種類 of 岩石が認められた。この結果は、図 4.67 に示す粉末 X 線回折の結果と一致する。なお、蛇紋岩の有無は、採石場での採取位置の違いによるものと考えられる。

確認された粗骨材は、架台上部、下部ともに、堆積岩（頁岩・砂岩）の他、火成岩（玄武岩＋斑レイ岩＋蛇紋岩（長石や石英などをほとんど含まない超苦鉄質岩の一種））の組み合わせであるが、頁岩及び砂岩には、ASR 反応性の隠微晶質石英が認められた。従って、粉末 X 線回折で検出された石英には、ASR 反応性の隠微晶質石英も含まれると考えられる。また、多くの種類の岩石で変形変成作用を受けた痕跡が認められたことから、日本列島に付加したオフィオライトのような海洋プレートの断片からなる岩体の一部であった可能性が考えられる。

なお、前記の「付加」とは、海洋プレートが日本列島を含む陸側のプレートの下に沈み込むときに、その一部が剥ぎ取られて、日本列島に押し付けられることである。「オフィオライト」とは、超苦鉄質岩・斑レイ岩・ドレライト（粗粒の玄武岩）・玄武岩・チャートなどからなる複合岩体で、海洋プレートの沈み込みに伴う海洋プレートの断片である。

これらの結果から、粗骨材は、架台上部と架台下部ともに同一産地であると考えられ、反応性鉱物としては急速膨張性を生じる鉱物は含まず、遅延膨張性を示すと考えられる隠微晶質石英を含有するものであった。

表 4.26 粗骨材の岩種構成割合と主要な構成鉱物

岩種	架台上部 (%)	架台下部 (%)	主要な構成鉱物※1
頁岩	24	45	石英、炭酸塩鉱物、隠微晶質石英、炭質物、緑泥石、雲母粘土鉱物、白雲母、斜長石
凝灰質砂岩	32	28	斜長石、緑泥石、炭酸塩鉱物、スフェーン
蛇紋岩	-	10	蛇紋石、ブルーサイト、スピネル
砂岩	30	10	石英、斜長石、隠微晶質石英、緑泥石、雲母粘土鉱物、炭酸塩鉱物、白雲母、不透明鉱物、炭質物、緑レン石
玄武岩	3	4	斜長石、緑泥石、炭酸塩鉱物、スフェーン、不透明鉱物
斑レイ岩	10	3	斜長石、緑泥石、スフェーン、石英、緑レン石
花崗岩	1	微量	石英、斜長石、カリ長石、黒雲母

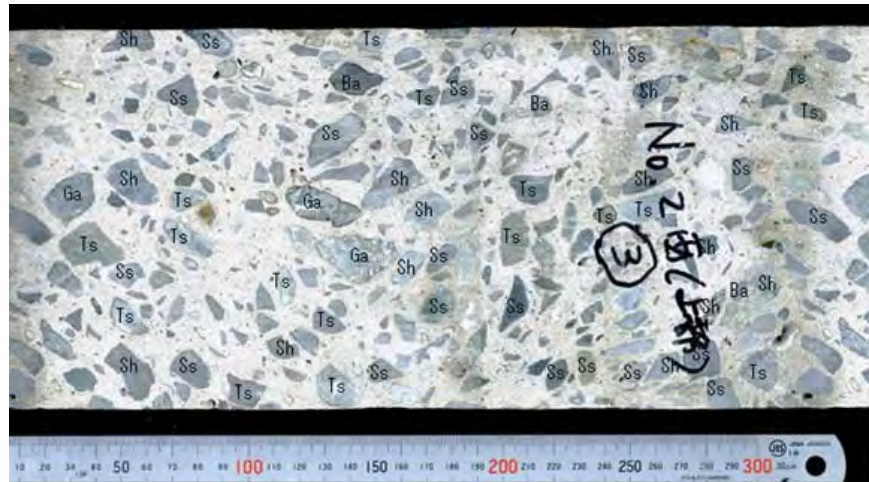
数字の単位はvol%

※1 主要な構成鉱物は概ね構成量比の多いものから順に記載してあるが、個々の骨材粒子は岩石の一部分であり、全ての骨材粒子に上記の鉱物が上記の順位で含まれているわけではない。

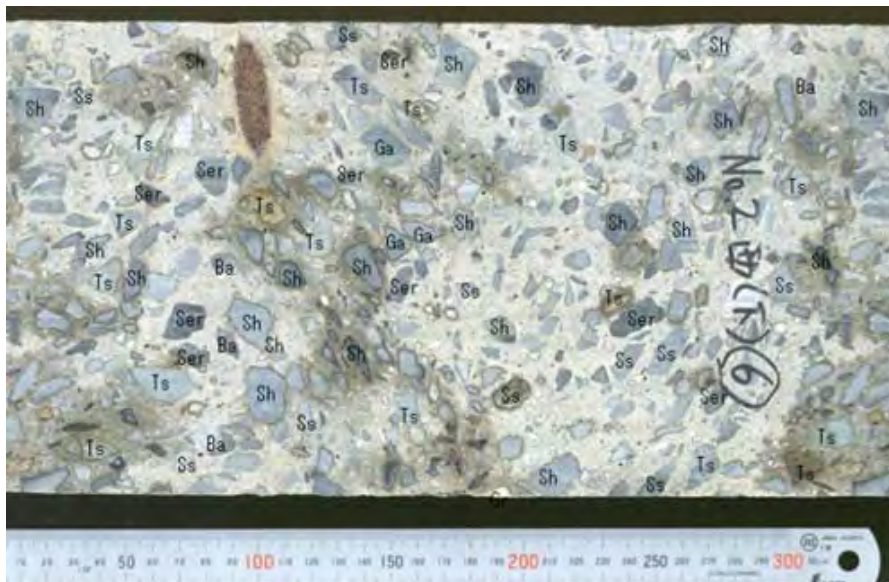
図 4.69 及び図 4.70 に示す偏光顕微鏡写真で確認できた内容は、以下の通りである。

- ・上部 (a) : 砂岩粒子に ASG に充填された膨張ひび割れ、砂岩粒子内のひび割れには ASG が充填され、セメントペーストへと進展が認められた。
- ・上部 (b) : 頁岩。石英、長石、炭質物、粘土鉱物などの細粒な粒子からなる堆積岩である。構成粒子は微細であり、隠微晶質石英を含む。うっすらとした反応リムが確認された。

- 下部 (a) : 頁岩。隠微晶質石英、炭酸塩鉱物（直交ニコルで明るい粒子）、炭質物（単ニコルで暗黒の部分）を多量に含む。（頁岩粒子内のひび割れには ASG が充填し、セメントペーストへと伸展している。
- 下部 (b) : 頁岩。石英、長石、炭質物、粘土鉱物などの細粒な粒子からなる堆積岩。構成粒子は微細であり、隠微晶質石英を含む。また、反応リムが明瞭である。



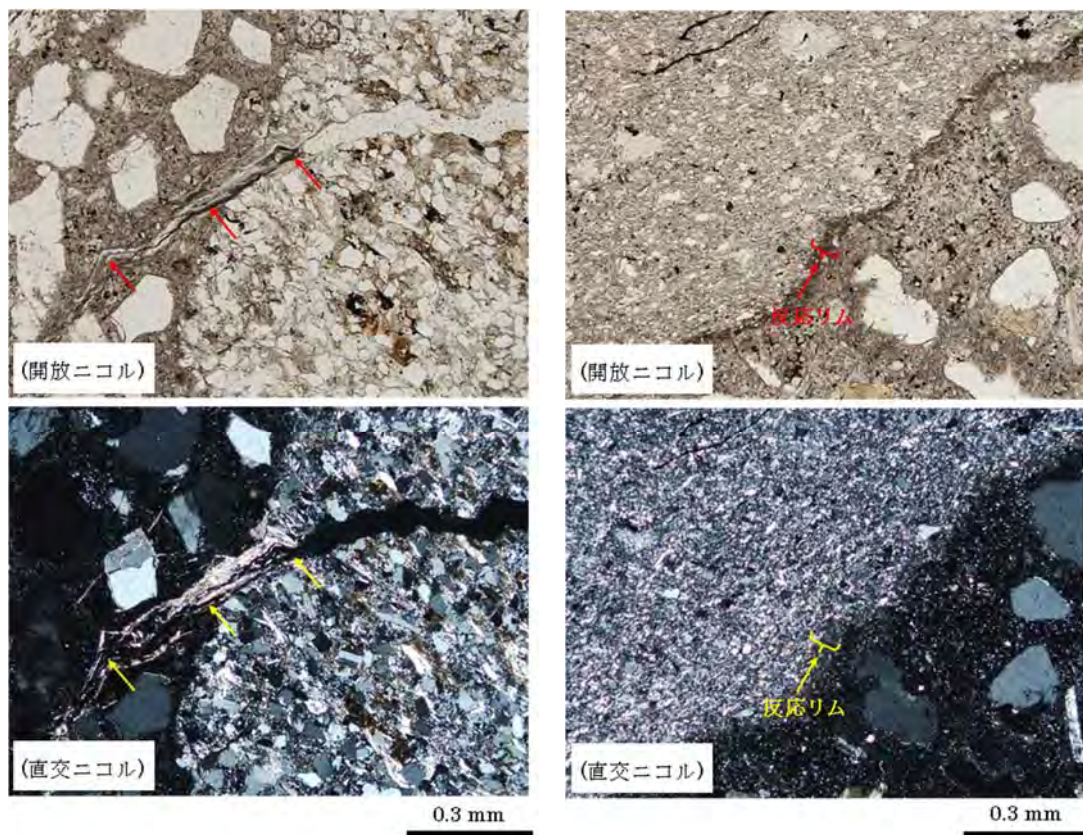
(a) 架台上部



(b) 架台下部

図 4.68 コア側面の展開写真と構成岩石

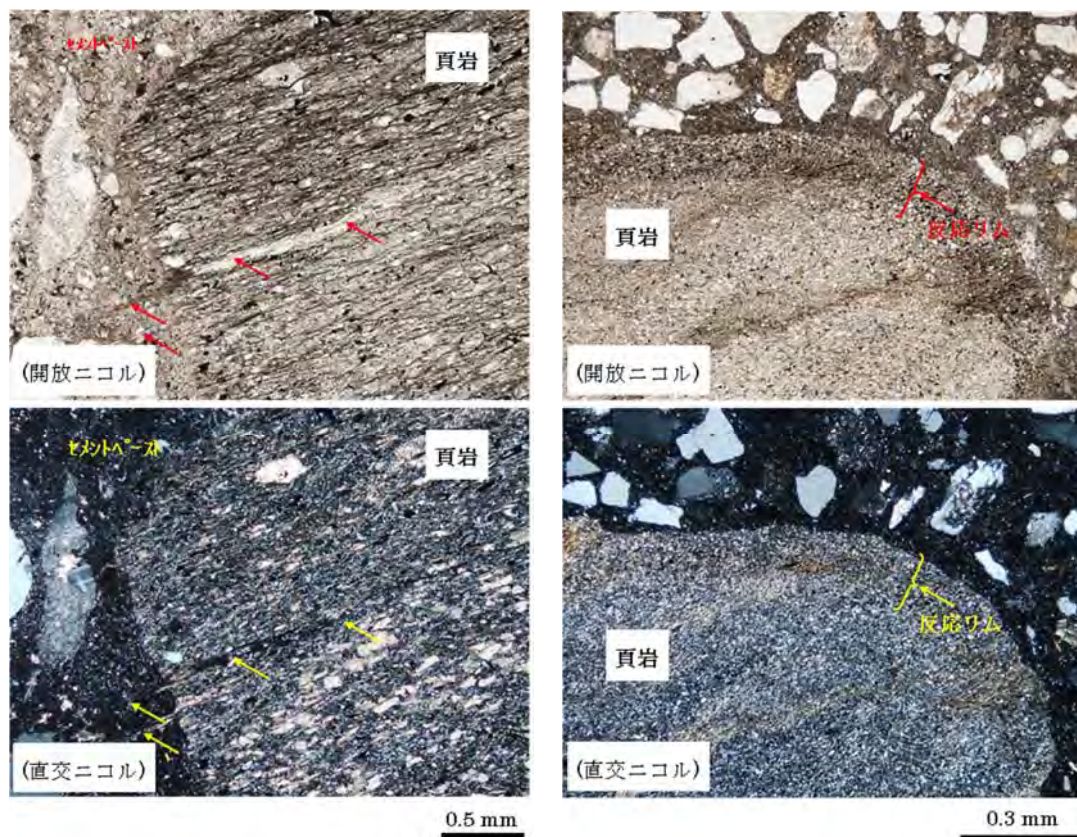
(凡例) 砂岩 : Ss, 頁岩 : Sh, 凝灰質砂岩 : Ts, 蛇紋岩 : Ser, 斑レイ岩 : Ga, 玄武岩 : Ba, 花崗岩 : Gr



(a) 上部(a)

(b) 上部(b)

図 4.69 粗骨材の偏光顕微鏡写真 (キルン架台上部)



(a) 下部(a) (b) 下部(b)
図 4.70 粗骨材の偏光顕微鏡写真 (キルン架台下部)

(b) 細骨材

確認された細骨材の岩種及び鉱物結晶の構成割合と主要な構成鉱物を表 4.27 に、岩種同定における偏光顕微鏡写真を図 4.71 に示す。また、同写真には、構成割合の多い岩石や ASR を生じている岩石を示した。

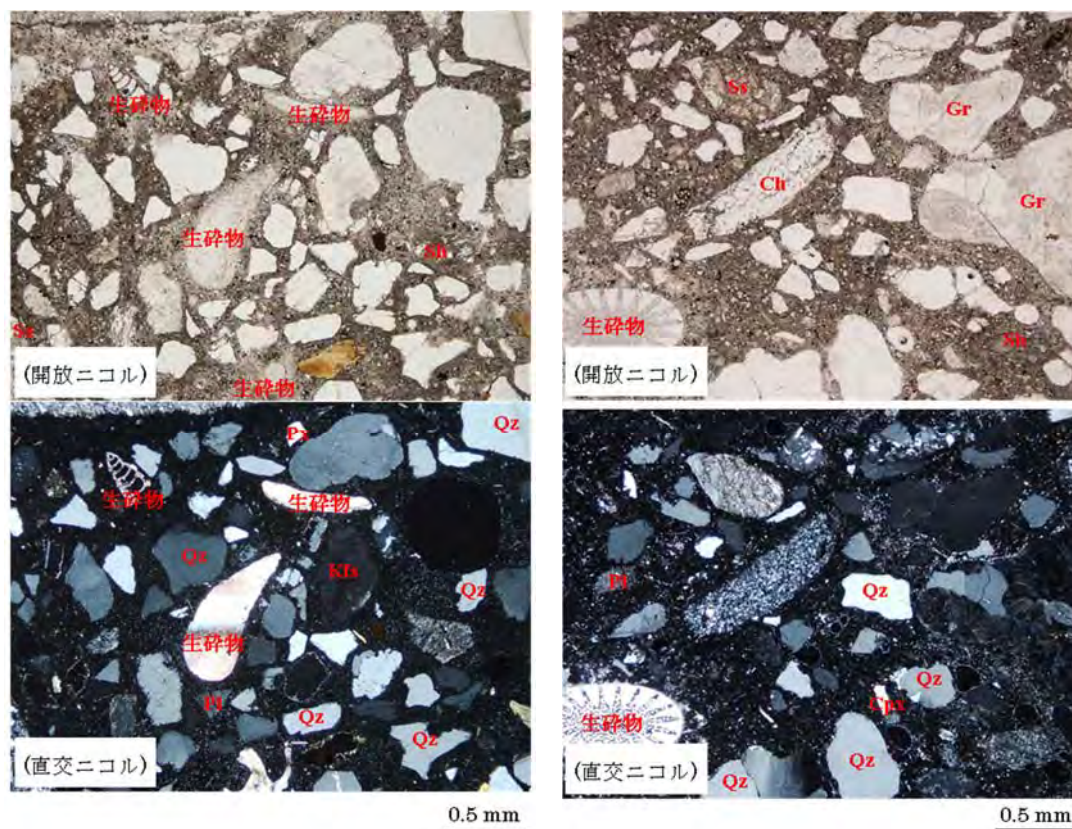
細骨材は、架台上部、下部ともに、主に花崗岩を構成する鉱物（花崗岩質岩起源）の結晶片、その他に頁岩・チャート・砂岩などの岩石片と、生砕物（二枚貝・巻貝の殻、ウニの棘、有孔虫の殻など）が含まれていた。海生生物の殻などを多く含むことから、海成堆積物であると考えられる。なお、架台上部と下部ともに、構成種類が同一であることから、同一の産地のものである可能性が高いと考えられる。

表 4. 27 細骨材の岩石構成と主要な構成鉱物

種別	岩種 鉱物結晶	架台上部 (%)	架台下部 (%)	主要な構成鉱物※2
岩石片	花崗岩質岩	5	15	石英，斜長石，黒雲母，カリ長石
	頁岩	3	4	石英，斜長石，緑泥石，雲母粘土鉱物，白雲母，炭質物，隠微晶質石英，不透明鉱物
	砂岩	4	2	石英，斜長石，隠微晶質石英，緑泥石，雲母粘土鉱物，白雲母，不透明鉱物，炭質物，
	チャート	4	4	隠微晶質石英，石英，不透明鉱物
	結晶片岩	3	1	石英，隠微晶質石英，緑泥石，白雲母，不透明鉱物
結晶片	石英	54	47	石英
	斜長石	7	9	斜長石
	輝石	4	微量	単斜輝石，斜方輝石
	カリ長石	微量	7	カリ長石
	不透明鉱物	1	微量	不透明鉱物（磁鉄鉱，チタン鉄鉱など）
	雲母	1	2	黒雲母
	角閃石	1	1	ホルンブレンド
粘土鉱物集合体		3	2	スメクタイト，緑泥石，雲母粘土鉱物など
生砕物		10	6	アラゴナイト，方解石

数字の単位はvol%

※2 主要な構成鉱物は，概ね構成量比の多いものから順に記載してあるが，細骨材粒子は岩石のごく一部分であり，個々の細骨材粒子に主要な構成鉱物の全てが含まれるわけではない。



(a) 架台上部

(b) 架台下部

図 4.71 細骨材の偏光顕微鏡写真 (キルン架台)

(凡例) 石英 (Qz), 斜長石 (Pl), 単斜輝石 (Cpx), 花崗岩 (Gr), 砂岩 (Ss), チャート (Ch), 頁岩 (Sh), 生砕物 (ウニの棘)

(c) まとめ

これらの結果から、粗骨材、細骨材ともに、架台上部と架台下部ともに岩種構成種類は同一であり同一産地であると考えられ、反応性鉱物としては急速膨張性を生じる鉱物は含まれず、遅延膨張性を生じる隠微晶質石英を含有するものであった。また、細骨材には海生生物を多く含むものであった。

e コンクリート薄片の SEM 観察/EDS 分析

コンクリート薄片の SEM 観察から得られた反射電子像 (BEI) 写真例を図 4.72 及び図 4.73 に示す。ASG の化学組成分布を図 4.74 及び図 4.75 に示す。

図 4.72 及び図 4.73 の写真例に示すように、架台上部では ASR の進行によって生じたと考えられるひび割れ及び ASG ではなく、エトリンガイトが充填する様子が多く確認された。一方、架台下部では、ひび割れはあまり存在せず、反応性骨材とみられる骨材内に ASG が充填されている様子が多く確認された。このことから ASR の進行段階を推定す

ると、架台上部では ASR が十分進行していて、架台下部ではこれから進行する可能性があることが推察される。

架台上部では、前節で推定したようにキルンからの熱を受けた履歴がある。このことから考察すると、架台上部では反応性鉱物の ASR が促進され、ASR によるひび割れが生じていたと考えられる。キルン稼働終了後、キルンからの受熱がなくなり大気温度に低下したことで、ペーストマトリクス内のモノサルフェート（水和物の一種）がエトリンガイトに転化して、ASR によって生じたひび割れや気泡を埋めるように結晶成長したと考えられる。

一方で、架台下部では、キルンからの熱をあまり受けていないため、反応性鉱物の ASR は促進されていなかったことから、ASR を生じるのに十分なアルカリは存在しているものの、ASR ひび割れを生じるまでの進行はしておらず、未だ反応性骨材内に ASG がとどまっていると考えられる。

図 4.74 及び図 4.75 の化学組成分布にあらわれるように、架台上部では、ASG の多くは Ca 置換が進み、C-S-H の組成に近づいていること、架台下部では、ASG の多くはまだ Ca 置換が進んでいないことが確認できる。これは、架台上部では ASG が反応性骨材からペーストに進展することで Ca 置換が進んでおり、一方で、架台下部では ASG が反応性骨材内にとどまっていることを示す。このことから架台下部は、これからも ASR が進行することが推察された。

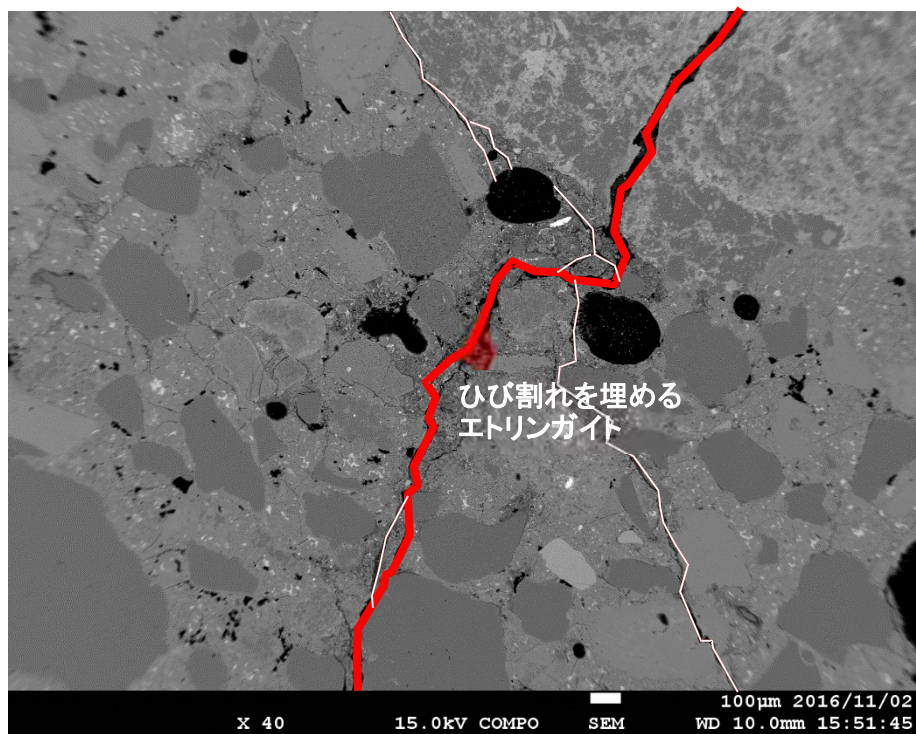


図 4.72 反射電子像 (BEI) 写真例 (キルン架台上部)
(写真下の白色バー□は縮尺(100 μ m)を表す)

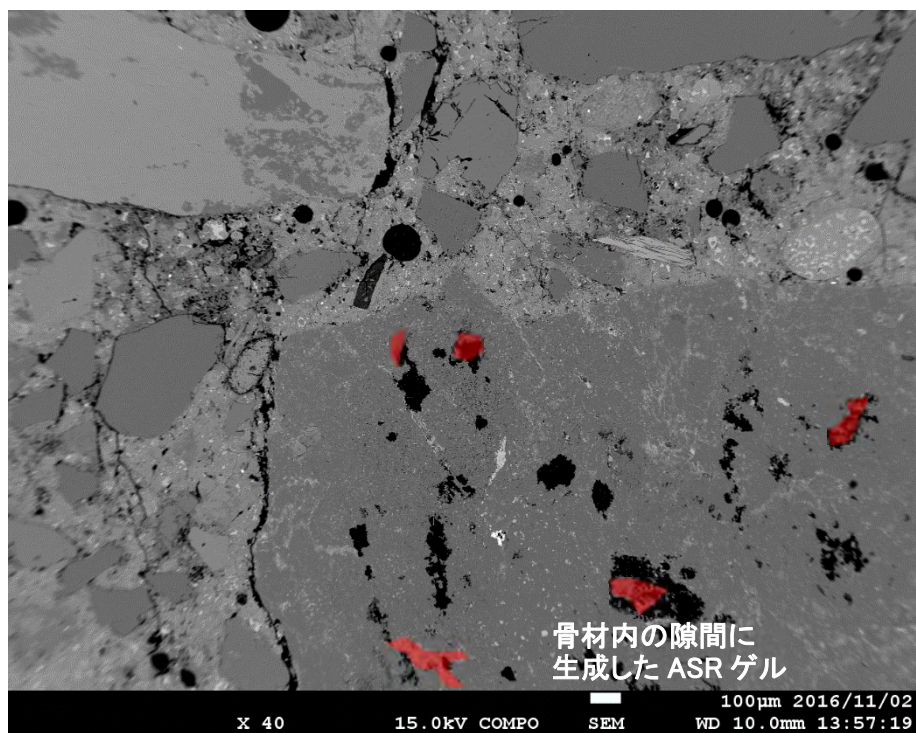


図 4.73 反射電子像 (BEI) 写真例 (キルン架台下部)
(写真下の白色バー□は縮尺(100 μ m)を表す)

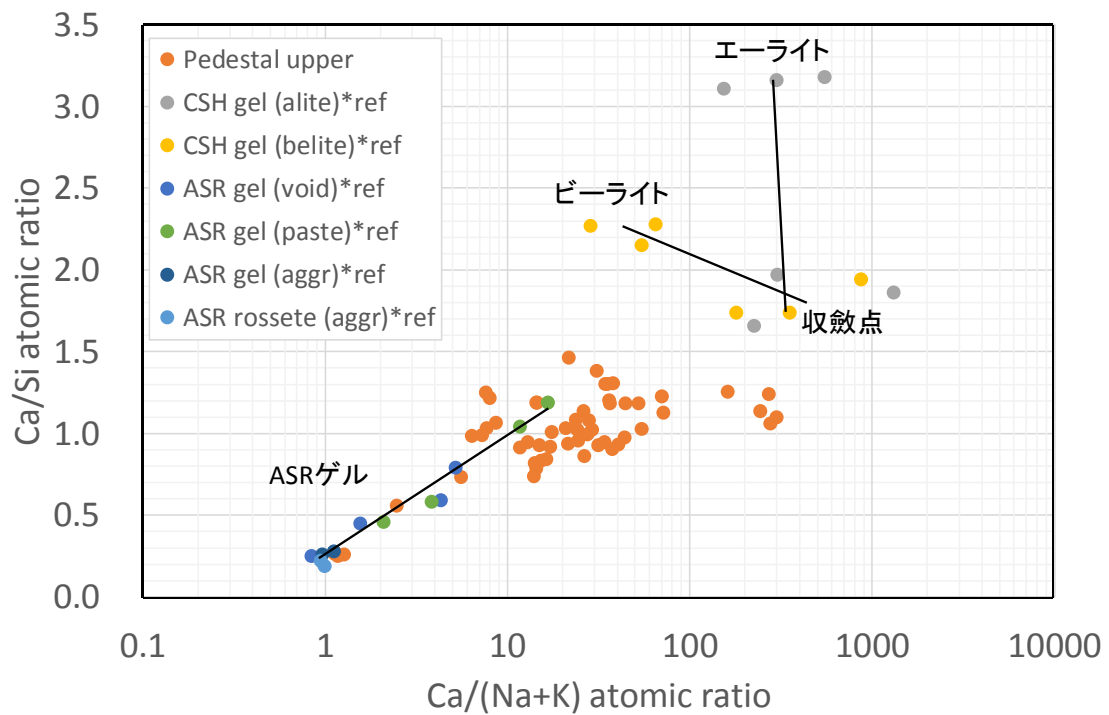


図 4.74 ASG の化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図（キルン架台上部）

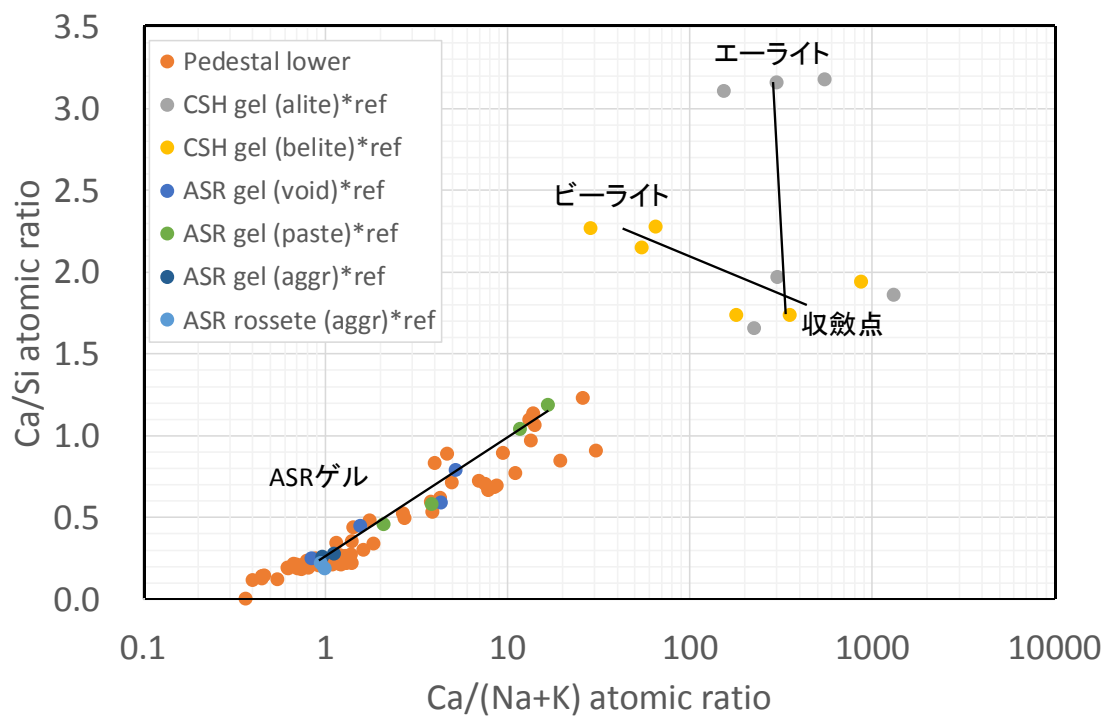


図 4.75 ASG の化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図（キルン架台下部）

③ アルカリ収支計算

a 最小アルカリ量の推定

硬化コンクリート中に残存する未水和セメント粒子の最小アルカリ量（エーライト・ビーライト・アルミネート・フェライト）を Katayama の方法^{51, 52, 53}により EDS 定量分析値から求め、セメントクリンカー（セメント製造時に石こうを添加する前の状態）の最小アルカリ量を推定した。以下に推定方法の概要を記す。

- ・薄片の SEM 観察から、未水和セメント粒子を探し、未水和セメント粒子中の鉱物（エーライト、ビーライト、アルミネート、フェライト）の EDS 分析を行った。EDS 分析については、「4. 2. 3 (3) アルカリ収支計算」で示した手法と同様である。
- ・得られたセメント鉱物に含まれるアルカリ量（Na 及び K）と、未使用のセメントの鉱物組成から、セメントに含まれるアルカリ量を算出した。なお、対象構造物で使用されたセメントの鉱物組成のデータはないため、ここでは便宜上、「4. 2. 3 (3) アルカリ収支計算」の最小アルカリ量の推定で示した未使用のセメントの鉱物組成（エーライト：56.0、ビーライト：17.92、アルミネート：8.46、フェライト：9.95）（単位：mass %）を用いた。
- ・セメントは、セメントクリンカーと石こうから成るため、石こう分を差し引いて、セメントクリンカーに含まれるアルカリ量（最小アルカリ量）を算出した。

SEM 観察／EDS 分析から得られたセメント鉱物に含まれるアルカリ量の結果を図 4.76 に示す。

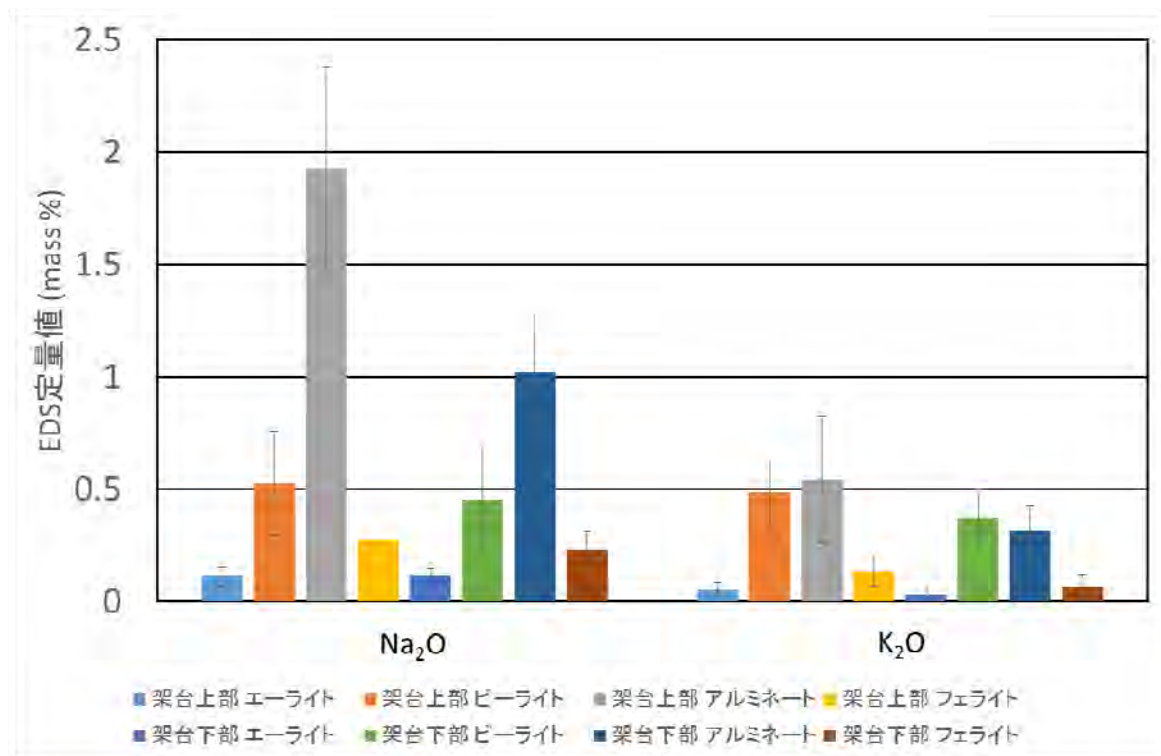


図 4.76 セメント鉱物の EDS 分析結果

EDS 分析の結果をもとに算出した最小アルカリ量の結果を図 4.77 に示す。同図には、比較として、「4. 2. 3 (3) アルカリ収支計算」で得た、劣化進行段階が異なる試験体より採取したコアの推定結果の平均値も示す。劣化進行段階が異なる試験体より採取したコアの結果と比較すると、普通ポルトランドセメントの最小アルカリ量と誤差の範囲内の数値に収まっていることが確認できる。このことから、供用年数が経ったコンクリート構造物においても、SEM 観察からセメント鉱物を見つけることができれば、最小アルカリ量の推定は可能であることが確認された。

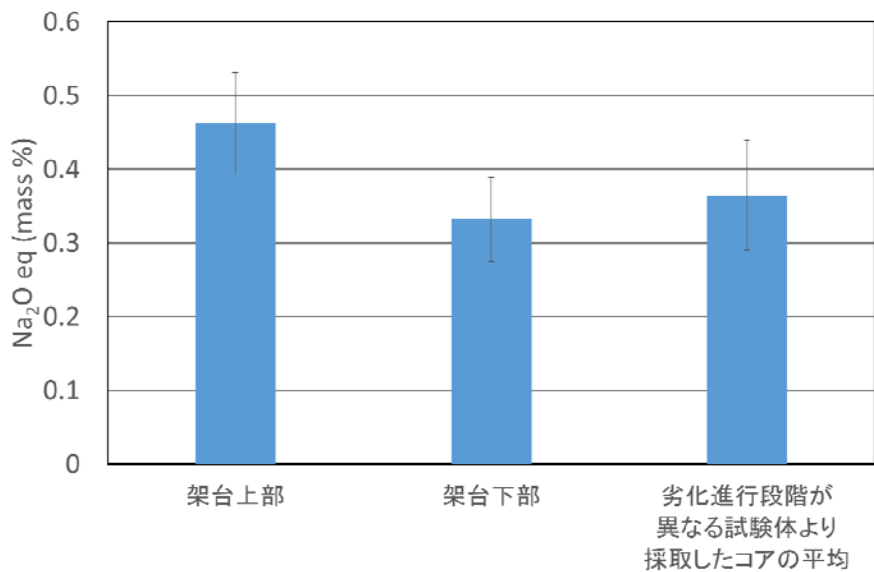


図 4.77 最小アルカリ量

b 水溶性アルカリ量の測定

コンクリート中の使用材料（供試体・抽出した粗骨材・未水和セメント）の水溶性アルカリ量を、Katayama et al. の方法^{48, 55}を参考に求めた。水溶性アルカリ量の測定方法は、「4. 2. 3 (3) アルカリ収支計算」で示した方法と同様である。得られた結果を表 4.28 に示す。アルカリ量の推定には表に示す値を用いた。

表 4.28 水溶性アルカリ量

試料名	コンクリート			骨材		
	ws-Na ₂ O (mg/g)	ws-K ₂ O (mg/g)	ws-Na ₂ Oeq (mg/g)	ws-Na ₂ O (mg/g)	ws-K ₂ O (mg/g)	ws-Na ₂ Oeq (mg/g)
架台上部	1.72	0.84	2.27	1.00	0.83	1.55
架台下部	1.62	0.80	2.15	0.51	0.59	0.90

注) 表中の ws は水溶性を表す。水溶性アルカリとは、ASR に関与する細孔溶液中に存在するアルカリである。

c 全アルカリ量の推定

最小アルカリ量、水溶性アルカリ量から全アルカリ量を推定した。なお、未水和セメ

ントの水溶性アルカリ量の値が必要となるが、対象構造物で使用されたセメントの水溶性アルカリ量のデータはないため、「4. 2. 3 (3) アルカリ収支計算」で用いた普通ポルトランドセメントの水溶性アルカリ量の実験値を引用した。また、単位セメント量は、グルコン酸ナトリウム法（社団法人日本非破壊検査協会 NDIS 3422:2002）により推定し、単位粗骨材量は、岩種構成定量の際の粗骨材総量から 1681kg/m³ と推定した。得られた結果を図 4.78 に示す。図に示されるように、架台に用いられたコンクリートの全アルカリ量は、上部で約 7kg/m³、下部で約 6kg/m³ であった。これらの値は、RILEM AAR-3 または AAR-4 で設定されるアルカリ量（5.5kg/m³）を上回っており、ASR の発生に十分な値であることが確認された。なお、アルカリ収支（Katayama 法）の計算結果を表 4.29 に示す。

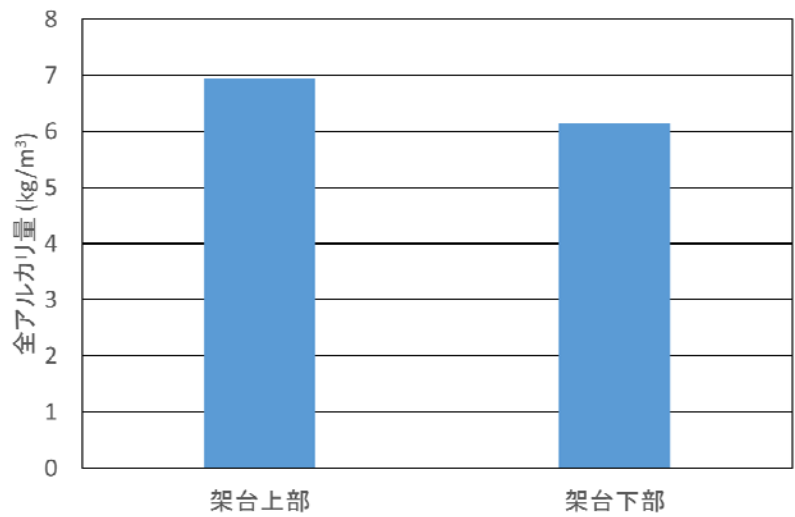


図 4.78 全アルカリ量

表 4.29 アルカリ収支（Katayama 法）の計算結果

項目	クリンカー			セメント		コンクリート				粗骨材		その他		
	最小アルカリ			全 アルカリ	水溶性 アルカリ	水溶性アルカリ			全 アルカリ	水溶性アルカリ				
	EDS分析													
	測定			推定		測定		推定		測定		推定		
コア水準名	%			Na2Oeq kg/m ³		%		Na2Oeq kg/m ³		%		Na2Oeq kg/m ³		
	Na ₂ O	K ₂ O	(1)	(2)	(3)	Na ₂ O	K ₂ O	(4)	(5)	Na ₂ O	K ₂ O	(6)	(7)	
架台上部	0.35	0.18	0.46	2.82	1.05	0.17	0.08	5.18	6.95	0.10	0.08	1.59	2.54	
架台下部	0.26	0.12	0.33	1.99	0.74	0.16	0.08	4.89	6.14	0.05	0.06	0.93	3.23	
平均値	0.30	0.15	0.40	2.40	0.90	0.17	0.08	5.04	6.55	0.08	0.07	1.26	2.89	
セメント 種類	セメント													
	全アルカリ				水溶性アルカリ									
	測定			推定		測定								
	%			Na2Oeq kg/m3		%			比率					
	Na ₂ O	K ₂ O	(8)	(11)	(12)	Na ₂ O	K ₂ O	(9)	(10)					
	普通ポルトランドセメント	0.34	0.33	0.56	1.78	0.67	0.07	0.21	0.21	0.37				

(Katayama 法では、全アルカリ量はアルカリ総量としている。)

④ コア空隙水分析

空隙水の pH とアルカリ濃度 ($[\text{Na}]+[\text{K}]$) の測定結果を、図 4.79、図 4.80 にそれぞれ示す。なお、それぞれの図には、比較として、「4. 2. 3 (3) アルカリ収支計算」で得た劣化進行段階が異なる試験体より採取したコアの分析結果の平均値も示す。図 4.79 に示されるように、架台下部は劣化進行段階が異なる試験体より採取したコアの値と同程度であるため、今後も ASR の進行が予測されるが、架台上部については、飽和水酸化カルシウム溶液の pH (12.6) よりも低下しているため、今後の ASR の進行はあまりないことが予測される。また、図 4.80 に示されるように、Andersson らが報告した⁵³、普通ポルトランドセメントのセメントペースト硬化体から採取された空隙水のアルカリ濃度 (230mmol/L) と同程度であるため、前述のアルカリ量で得られたアルカリの多くは、ASR によって消費されていると考えられる。

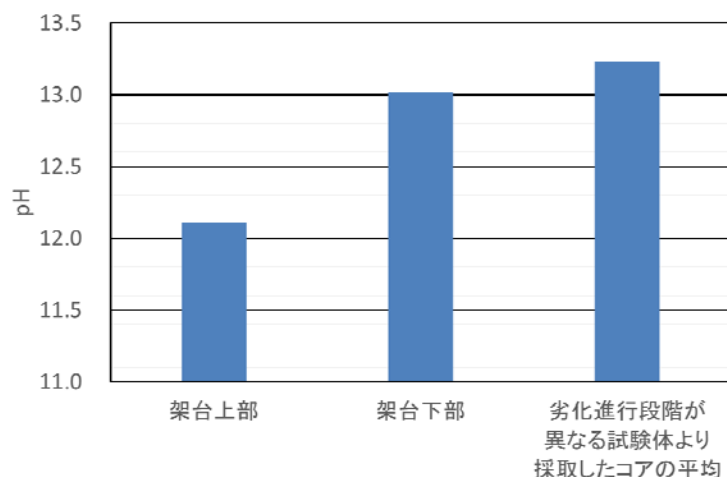


図 4.79 空隙水の pH

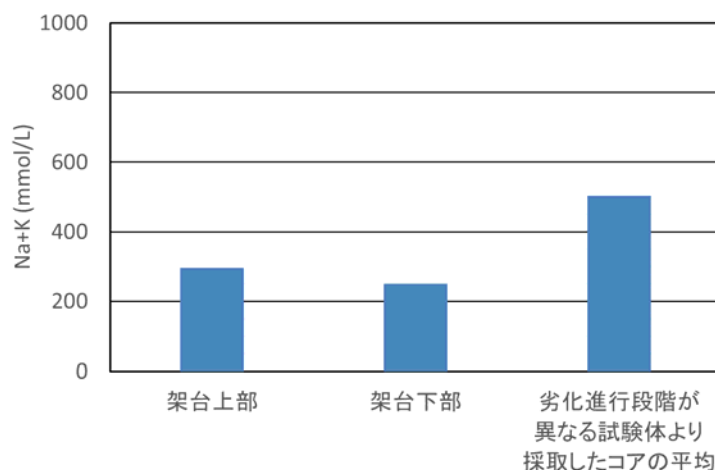


図 4.80 空隙水のアルカリ濃度 ($[\text{Na}]+[\text{K}]$)

⁵³ Andersson, K., et al.: "Chemical-Composition of Cement Pore Solutions." Cement and Concrete Research 19(3), pp.327-332 (1989)

(3) 考察

上記の分析結果を総合的に判断すると、架台に用いられていたコンクリートは ASR の反応リスクが十分に高かったことが分かり、架台上部では ASR は十分に進行した状態、架台下部では ASR が今後も進行する可能性がある状態であることが推察された。

以下、各試験項目での考察を記す。

① コア外観観察

- ・架台採取コアの展開写真（可視光）は、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアとは異なる径のコアを用いたが、同様に実施が可能であった。
- ・コンクリートコア採取後に、湿潤環境で一定期間置いた後の展開写真から切断面に現れている反応性骨材中に存在していた ASG のコンクリート断面への染み出しは簡易に確認できるが、長い年数が経過した実構造物では、ASG の Ca 置換が進み、吸水性が低下していることで、ASG が存在していても ASG の染み出しが少なく明確に観察できない可能性がある。この補完方法として、ASG 蛍光反応試薬による ASG の緑色蛍光を観察することで、ASG が明確に観察できるようになる。
- ・コンクリートの展開写真（蛍光法）は、ASG の緑色蛍光だけでなく、コンクリート中に機械油が存在すると、青色蛍光が観察されたり、一部の鉱物は、赤色蛍光が観察されることがある。このような ASG ではない蛍光成分を明確に分離するためには、ASG 蛍光反応試薬を塗布する前とした後に、UV 光源下での蛍光観察を実施することで容易に解決できる。

② 岩石学的評価

- ・粉末 X 線回折では、同定できる鉱物が限られ、また、ASR 反応が生じているかどうかの判断はできないが、本項のように架台上部及び下部の違いが評価できるなど、その特性を理解して適用すれば有効な方法であると考えられる。
- ・岩種構成定量は、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアと同様に実施が可能であった。なお、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアのように均質の粗骨材ではなく多様な岩種を含む可能性があるため、岩種の特定、分類により専門的技術を要する。
- ・断面観察及び偏光顕微鏡観察は、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアと同様に実施が可能であった。岩種構成定量に表れるように、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアのように均質の粗骨材ではなく多様な岩種を含む可能性があるため、切断面から薄片を作製する位置及び数量を決定する際に注意が必要である。これは、展開写真観察、断面写真観察、岩種構成定量を丁寧に行うことで改善される。
- ・反応性骨材内にとどまり Ca 置換が進む前の ASG は、極めて粘性が低く、コンクリート薄片の作製過程において ASG が落ちないように細心の注意を払う必要がある。Ca

置換が進む前の ASG の存在の有無によって ASR の進行度が決定するので、作製過程において Ca 置換が進む前の ASG が落ち、Ca 置換が進んだ後の ASG が残っている場合、そのコンクリートは反応後期と誤って判断される可能性がある。同様に、作製過程において Ca 置換が進む前の ASG が落ちてしまい何も ASG が残っていない場合、そのコンクリートは、反応初期ないしは ASR 反応性なしと誤って判断される可能性があるので注意を要する。

- ・岩石学的評価は極めて微小な領域の観察であるので、コンクリート薄片を作製する位置、観察位置がコンクリートの全体のどこに位置するかを図等で記録しておくことが重要である。同様に、実構造物のように、多様な岩種である場合、すべての岩種の分析を行うには、多くのコンクリート薄片の作製が必要になる可能性がある。
- ・SEM/EDS 観察は、偏光顕微鏡観察と同様に、多様な岩種を含むため観察位置に注意が必要である。また、EDS 分析を行う際は、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアと同様に、対象とした ASG またはセメント水和物の位置を記録しておくことが重要である。
- ・岩石学的評価は、観察者の熟練度、観察に費やした時間によって、どれだけ微小な ASR を検出できるかが変わる可能性がある。観察者が見つけた極めて微小な ASR が、コンクリート構造物の診断において、コンクリート全体への影響の大きさについては十分に考慮する必要があると考えられる。これは、骨材は天然材料であることから、特に実構造物においては多様な岩種が用いられている可能性が高く、極めて細かく観察すれば、極めて微小な領域の鉱物は ASR 反応性を有している可能性があるため、コンクリート全体に及ぼす影響の大小を考慮する必要がある。
- ・微小な ASR については、観察者の熟練度や観察に費やした時間等により結果は変わる可能性がある。観察結果や SEM/EDS 分析結果を工学的に有効な診断方法として確立するには、実際の原子力施設のコンクリートや 40 年以上経過したコンクリートなど、なるべく多くの観察結果とコンクリート構造物の劣化程度の関係の事例を整理する必要があると考えられる。

③ アルカリ収支計算

- ・アルカリ収支計算は、まず最小アルカリ量を測定するうえで、未水和セメント鉱物の EDS 分析が必要となるが、年数が経過した実構造物ではセメントが十分水和しており、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアと比べて未水和セメント鉱物の観察が困難であった。特に、アルミネートは、4つのセメント鉱物（エーライト、ビーライト、アルミネート、フェライト）の中で、最もアルカリが固溶するが、水和活性が高く材齢初期にほとんどが水和してしまうため、SEM 観察で十分に探索する必要がある。
- ・セメントの水溶性アルカリ量の測定にあたり、コンクリートに使用したセメントが保

管されていない場合、他のセメントから推定する必要があるため、推定値が妥当かどうか十分に考慮する必要がある。

- ・アルカリ量の推定において、コンクリートの調合が不明である場合には、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアでの推定プロセスに加えて、単位容積質量、単位セメント量、単位粗骨材量の推定が必要である。
- ・アルカリ収支計算では、岩石学的評価の結果と対応するように、ASRが生じたと考えられる架台コンクリートで、極めて高いアルカリ量が推定された。このことから、ひび割れが確認されたコンクリートのひび割れの原因がASRかどうか検証を行うためのASR診断への有効性が確認された。また、明確なASR劣化が生じていないコンクリート構造物において、アルカリ収支計算で高アルカリ量が推定された場合は、予防対策を実施するうえで有効であると考えられる。

④ コア空隙水分析

- ・空隙水分析によって、岩石学的評価の結果と対応するように、ASGが検出された架台下部では高いpHが、明確にはASGが検出されなかった架台上部ではpHの低下が測定された。このことから、空隙水分析によってpHを測定することには、ASR診断への有効性が確認された。
- ・空隙水分析において、実構造物は乾燥環境に置かれて十分な空隙水が抽出できない可能性がある。その場合は、コンクリートコアを湿布などで巻いて、空隙水が平衡になるまで十分な期間をおいてから圧搾抽出を実施する必要がある。
- ・海水成分を含んでいる可能性がある場合は、抽出した空隙水の化学組成の分析をする際に、イオンクロマトグラフィなどにより対象に塩化物イオンの分析を加えることが推奨される。
- ・空隙水は、抽出された圧力に応じて平衡点がシフトし、化学組成が変化するため、分析対象とした空隙水の抽出圧力を記録しておくことが推奨される。
- ・空隙水分析の結果と将来の膨張に関する事例は多くないため、今後さらに多くのデータの蓄積が必要と考えられる。

4. 4. 4 コアの促進膨張試験

(1) 試験方法

① JCI-DD2 法

JCI-DD2 法は、公益社団法人日本コンクリート工学会“JCI-DD2 アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物のコア試料による膨張率の測定方法（案）”に準拠した。

4. 4 項で実施した、小型試験体より採取したコアを用いた JCI-DD2 法では、採取、切断直後にゲージプラグを取り付け、解放膨張量を測定したが、本試験では、対象構造物と試験を実施する場所が異なるため、コア採取後、コアを運搬し、所定の長さに切断

してからステンレス製バンドを取り付けて基長を測定した。なお、JCI-DD2 法では、試験期間中の試験体の質量変化測定の規定はないが、長さ変化を測定時に合わせて質量を測定し、質量変化率を算出した。

② アルカリ溶液浸漬法

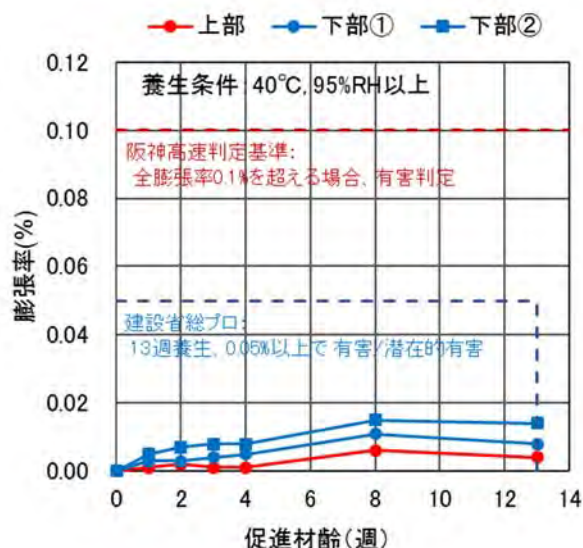
アルカリ溶液浸漬法は、日本コンクリート工学会「ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書（2014 年 7 月）」で提案されている方法に準拠した。なお、採取したコアは全て $\phi 100\text{mm}$ であるため、さらに $\phi 100\text{mm}$ のコアから $\phi 50\text{mm}$ のコアを採取し、長さ約 13cm に切断して試験を実施した。

（2） 試験結果

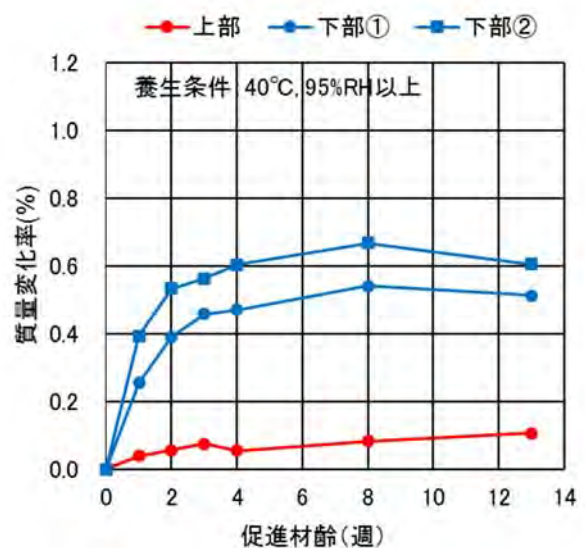
① JCI-DD2 法

JCI-DD2 法によるコアの促進膨張試験結果を図 4.81 に示す。なお、 20°C 相対湿度 95% 以上の環境における解放膨張期間では、材齢 7 日まで殆ど長さ変化は示さず、材齢 7 日での膨張率は、何れの試験体でも -0.003% であったことから、同図には示していない。

図 4.81 の (a) に示した建設省総プロ及び阪神高速判定基準と照合すると、何れのコア供試体でも無害判定となった。なお、僅かではあるが、膨張率は架台上部より架台下部で大きな値を示した。また、質量変化率は乾燥傾向を示さず、架台下部で質量変化率が高い傾向を示した。



(a) 膨張率



(b) 質量変化率

図 4.81 JCI-DD2 法によるコアの促進膨張試験結果

② アルカリ溶液浸漬法

アルカリ溶液浸漬法によるコアの促進膨張試験結果を図 4.82 に示す。膨張率は、架台上部で殆ど膨張しなかったのに対し、架台下部では膨張し、架台上部のコア 2 本のうち 1 本は、既往の判定基準⁵⁴では有害となった。

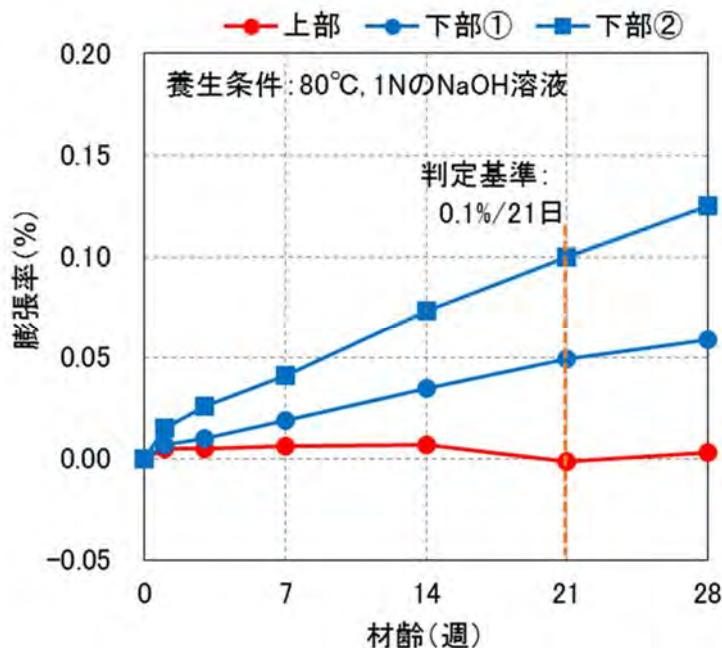


図 4.82 アルカリ溶液浸漬法によるコアの促進膨張試験結果

(3) 考察

コアの外観観察における UV 光源下での展開写真では、60～90°Cの高温状態をおおよそ 28 年間受けたと推測された架台上部において ASG は確認されなかったが、30～35°C 程度であったと推測された架台下部では ASG が認められた。また、図 4.75 の化学組成の結果から架台下部では ASR が今後も進行することは否定できず、図 4.79 の空隙水 pH は架台上部より高い値であり、さらに、図 4.78 で示したアルカリ量は高い状態であった。これらのことから、架台下部では、今後も ASR 反応が継続すると考えられる。しかし、JCI-DD2 法における架台下部は殆ど膨張を示さず、また、無害判定となった。

現在、ASR の将来予測手法として JCI-DD2 法が用いられ、この試験方法によって無害となれば将来膨張しないと判断される場合が多い。本試験結果からは、将来膨張する可能性が否定できない架台下部においても JCI-DD2 法では無害となった。

⁵⁴ 野村昌弘ら：北陸地方における道路構二造物の ASR による損傷事例とその評価手法、コンクリート工学論文集、Vol. 13、No. 3、pp. 105-114 (2002)

キルン架台に用いられた骨材には急速膨張性を示す鉱物は含まれず、反応性鉱物として確認されたのは隠微晶質石英（表 4. 26、表 4. 27）であり、これは遅延膨張性を示す鉱物である。遅延膨張性骨材の膨張特性として、JCI-DD2 法による促進温度 40℃と近い RILEM AAR-3 の 38℃養生では、アルカリ量を 5.5kg/m^3 としているにもかかわらず判定には 1～2 年を要する。したがって、本検討において遅延膨張性骨材の場合には試験期間が 3 ヶ月と短いことが、JCI-DD2 法で検知できなかった一因であると考えられる。

また、JCI-DD2 法では、実際の試験では、現場においてコア採取直後、現場で所定の長さのコアを切断し、バンドを取り付け、基長を測定することが困難であった。困難な理由としては、例えば屋外の現場では天候に左右されたり、切断作業に必要な水が使用できなかったり、防塵対策が必要であったり、あるいは重機が稼働している時間は立ち入れない等の様々な制約である。架台上部及び架台下部ともに鉄筋拘束下にあるが、小型試験体を用いた JCI-DD2 法の検討では、鉄筋を配した拘束試験体においても、コア採取直後に基長測定を行ったにも関わらず、解放膨張は認められなかった。これは、コア採取時に既に解放膨張が生じてしまっている可能性があった。

一方、アルカリ溶液浸漬法では、ASR は十分に進行した状態と推察された架台上部においては膨張せず、一方、架台下部では ASR が今後も進行する可能性がある状態であることが推察された架台下部では、コア 2 本のうち 1 本が有害判定となった。このことから、アルカリ溶液浸漬法はばらつきが大きいものの、実構造物において潜在的に膨張を生じるか否かの判定はできる可能性があると考えられる。

本試験では、コアの促進膨張試験として、JCI-DD2 法及びアルカリ溶液浸漬法を実施したが、これらの試験結果だけでは実構造物における将来の ASR 膨張の可能性を判断することはできないと考える。

4. 4. 5 まとめ

本節では、対象構造物として、ASR による劣化を生じ、高温状態にあったと考えられるキルン架台からコアを採取し、JNES レポートに記載されている各種試験を行ってその適用性を評価した。

(1) 対象構造物

対象とした構造物は外観の状況から ASR を生じていると考えられ、コアを採取した架台上部は約 28 年間おおよそ 60～90℃の温度を受け、また、架台下部は 30～35℃の温度であったと推測された。両者のコンクリートは、配合推定、中性化、塩化物量、岩種構成定量及び粉末 X 線回折の結果から、両者はコンクリートロットの差異はあるが、同一産地の骨材が用いられたと考えられ、各種 ASR 診断試験法の適用性の評価に資すると考えられた。

(2) コア外観観察

- ・展開写真から ASG の染み出しは簡易に確認できるが、実構造物では ASG の染み出しが少ない可能性があるため、蛍光観察を実施することで、より明確になる。
- ・蛍光法では、機械油のように、ASG とは異なる成分によって蛍光を発することがある。

(3) 岩石学的評価

- ・粉末 X 線回折で同定できる反応性鉱物は限られ、また、ASR 反応が生じているかどうかの判断はできないが、これらの点に留意すれば、キルン架台上部と下部の骨材の差異が評価できるなど、有効なデータが得られると考えられる。
- ・コンクリートコア岩種構成定量から実構造物においても骨材種類と構成比率が評価できると考えられる。
- ・均質の粗骨材ではなく多様な岩種を含む可能性があるため、切断面から偏光顕微鏡観察に用いる薄片を作製する位置及び数量の決定に留意する必要がある。
- ・偏光顕微鏡観察に用いた鏡面研磨薄片で EDS 分析を行う際に、分析対象とした ASG またはセメント水和物の位置の記録することが望ましいと考えられる。
- ・岩石学的試験の結果から、架台上部では ASR は十分に進行した状態、架台下部は ASR が今後も進行する可能性がある状態であると推察され、岩石学的試験は、温度履歴の違いによる ASR の劣化進行の違いを把握することが可能であり、このような高温状態にあったコンクリートにも適用可能であると考えられる。
- ・岩石学的評価では極めて小さな ASR を検出できる一方で、それがコンクリート構造物全体の ASR 健全性を評価できるかについては慎重な判断が必要である。

(4) アルカリ収支計算

- ・アルカリ収支計算では、年数が経過した実構造物ではセメントが十分水和しており、未水和セメント鉱物の観察が困難である可能性がある。
- ・セメントの水溶性アルカリ量は、実構造物では用いられたセメントが保管されていることはほぼ無いことから、他のセメントからの推定や仮定値を用いる必要があり、その推定値の妥当性に課題がある。

(5) コア空隙水分析

コア空隙水分析では、実構造物は乾燥環境に置かれて十分な空隙水が抽出できない可能性がある。また、海水成分を含んでいる可能性がある場合は、分析対象に塩化物イオンを加えたほうがよいと考えられる。

(6) 促進膨張試験

- ・JCI-DD2 法では、架台下部の ASR 進行は架台上部ほど進んでなく、今後も ASR は進行する可能性もあると考えられるが、促進養生材齢 13 週では架台下部では殆ど膨張を生じなかった。
- ・アルカリ溶液浸漬法は、将来的に実構造物で膨張が生じるかは不明であるが、ASR が進行している架台上部より、進行していない架台下部で大きな膨張率を示した。アルカリ溶液浸漬法で試験におけるばらつきを考慮した試験を実施すれば、潜在的に膨張を生じるか否かは判定できる可能性がある。
- ・コアの促進膨張試験として、JCI-DD2 法及びアルカリ溶液浸漬法を実施したが、何れの試験においても、これらの試験結果だけでは実構造物における将来の ASR 膨張の可能性を判断することはできないと考える。

以上より、本項で実施した何れの診断方法も、劣化進行段階の異なる試験体から採取したコアだけでなく、高温履歴を受けた実構造物でも適用可能であると考えられる。

4. 5 ASR 診断フローの提案

各種 ASR 診断方法は何れも有効であることを確認した。また、JNES レポートで提案しているコンクリート構造物の ASR 診断フローは、必ずしも ASR 診断として客観的なデータや判断基準、分岐点が明確にされていないと考えられる。

JNES レポートのコンクリート構造物の ASR 診断フローの検証結果と課題を整理したものを図 4.83、表 4.30 に示す。

コンクリート構造物の ASR 診断フローでは、まず検出した ASR が全体のどのくらいの割合を示すかを客観的なデータとして示すために、コンクリート薄片→コンクリート切断面→コンクリートコアといったスケール情報を補完するために、コンクリート薄片のフィルムスキャナ撮影が有効である。また、蛍光観察を実施することで、より明確に、また展開写真からの染み出しの定量が容易になる。詳細な評価を行う上で、薄片を作製し、偏光顕微鏡観察、SEM 観察/EDS 分析をすることで、たとえば、展開写真、断面観察時に ASG が確認されなかった場合に、反応性骨材が反応前か反応が進み、ASG がすでに十分 Ca 置換によって膨張性を失っているかを確認できる。さらに、空隙水分析を実施することで、反応性鉱物が存在したときには、今後も反応して ASR を生じるリスクがあるかを推定することができる。

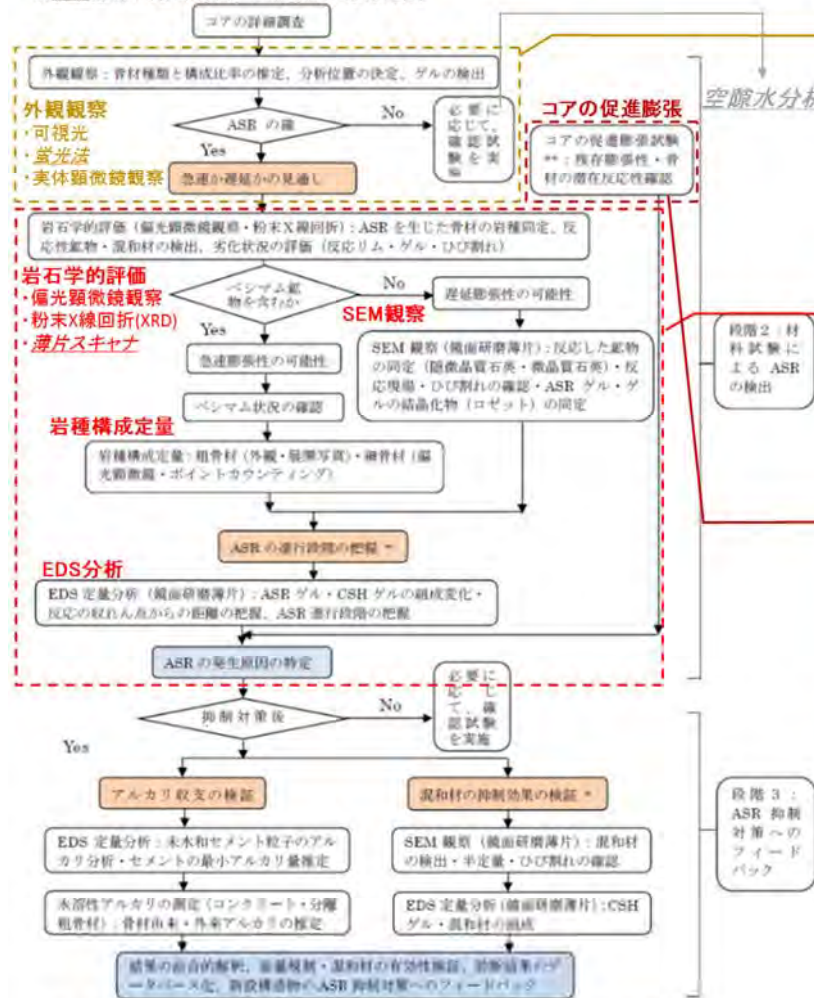
提案したフローにより、すべての試験項目を実施すれば十分な ASR 診断といえるが、極めて小さな ASR を検出した際に、直ちに ASR 対策を行うかどうかは工学的な合理性が求められる。そこで、以下に示す 3 ルートを提案し、ASR 劣化の状況に応じて選択できるようにした。

- A. 簡易評価ルート：①日常点検→②既存記録の調査→③現地調査
- B. 通常評価ルート：A→④コアの外観観察（展開写真、実体顕微鏡、蛍光法）
- C. 詳細評価ルート：B→⑤岩石学的評価（肉眼・実体顕微鏡）→⑥岩石学的評価（薄片スキャナ、偏光顕微鏡観察、粉末 X 線回折）→⑦岩種構成定量→⑧ASG の観察・組成分析（SEM 観察/EDS 分析）→⑨ASR の発生原因と損傷程度の評価

以上より、コンクリート構造物の ASR 診断フローの全体構成について再検討した提案を図 4.84 に、各項目の実施内容を表 4.31 に示す。また、将来の ASR リスクを評価するための ASR ポテンシャル評価フロー（図 4.85）として、コンクリートコアの促進膨張試験、コンクリートコアのアルカリ量測定、コンクリートコアの空隙水分析の 3 種類の測定方法を ASR 診断の補完となる評価方法として提案した。

＜コンクリート構造物のASR診断フロー案(2014.2 JNESレポート)＞

※斜字箇所は、診断方法として追加した試験項目



JNESレポートでは、「特徴はコア採取後の岩石学的試験を重視し、コンクリート材齢が若くてもASRの存在や進行状態を確認できる」としている。

最新の海外の知見を取り入れ、現状におけるASR評価の最先端技術。ASRの有無だけでなく、ASR劣化進行段階、反応性鉱物および含有アルカリ量推定からASR発生原因を特定可能

＜目的＞

JNESレポートで提案している方法について、ASRの存在や進行状態を確認できるか等を検証し、ASR診断方法の有効性を確認する。

ASRの確認(外観観察)

(検証結果)

・コアの外観観察から、骨材種類と構成比率は評価できることを確認。

(課題)

・反応リムとASGは、一定の手順に従えば、容易に判断できる場合もあるが、試料の性質や判定者の技量にも依存し、必ず判断できるかどうかの保証はない。
・次のステップに進む判断基準は明瞭ではない。

ASRの発生原因の特定/進行段階の把握

(検証結果)

・岩石学的評価(薄片の偏光顕微鏡観察およびSEM観察/EDS分析等)の結果から、ASRによるひび割れ、ASGを観察できることを確認。

(課題)

・急速/遅延膨張性骨材の混在の調査を考慮すると、SEM観察および岩種構成定量は、骨材の膨張性によらず実施した方がよい。
・SEM観察とEDS分析は、併せて実施するのが現実的なため、フローの記載上、SEM観察とEDS分析、ASRの進行段階の把握と発生原因の特定をまとめることとする。
・ASRの存在は確認でき、劣化の程度は分かるが、ASRの終局状態が分からないため、進行段階(反応状態)を断定することはできない。
⇒ 将来予測に結びつけるのは困難。

コアの促進膨張試験

(検証結果)

・コアの促進膨張試験により、現状の潜在膨張性は概略評価できることを確認。
・アルカリ溶液浸漬法コア中の骨材の潜在的な反応性(ASRポテンシャル)は評価できる
・JCI-DD2法コンクリートコアの残存膨張性は評価できる

(課題)

・コアの促進膨張試験で膨張しても、実構造物で膨張するとは限らない。
⇒ 将来の膨張予測の判断に用いるという従来の考え方には、結びつけられない。

コアのアルカリ量測定

(検証結果)

・JNESレポートの手順で、コンクリート中のアルカリ量を概略推定できることを確認。

(課題)

・セメントの最小アルカリ量や水溶性アルカリの測定の精度には限界があり、推定結果はばらつきがあることを認識する必要がある。

＜新たに追加した方法の検証結果＞

・可視光による外観観察に加え、ASR蛍光試薬+UV光による観察を実施。

→ ASRゲルを容易に観察できることを確認。ASG以外の蛍光発色に注意が必要。
⇒ コアの外観観察の段階におけるASGの検出に有用。

・岩石学的評価における新たな方法として、薄片のフィルムスキャナによる撮影を実施。

→ 薄片全体の分布情報(モルタル、反応性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割れ、気泡の位置関係)を取得できることを確認
⇒ コアの外観観察と薄片の偏光顕微鏡観察の中間スケールの情報を補充可能

・コアより圧搾抽出し採取した空疎水の分析を実施。

→ pHおよびIGP-MSによる元素分析の結果より、ASR反応性およびフライアッシュによる抑制効果が確認できる可能性がある。⇒ 将来のASRリスクの可能性調査として有用

図 4.83 コンクリート構造物のASR診断フローの検証結果及び課題(1/2)

表 4.30 コンクリート構造物の ASR 診断法の検証結果及び課題 (2/2)

分類	方法	確認項目 (目的)	必要な装置	必要な技術 ノウハウ	有効性 ^{※1}			精度 ^{※1}	技術的 難易度 ^{※2}	優位点 (メリット)	現状課題 (デメリット)
					発生 原因	進行 段階	将来 予測				
外観 観察	可視光源下での 展開写真	ASGの検出、骨材からのひび割れ、骨材の反応リムの確認	コンクリートカッター、 切断面撮影装置	ASRの特性を把握し、 ASGを観察できる試料の 調整と観察力	△	○	—	○	+	簡便	・ 反応リムとASGは一定の手順に従えば、容易に判断できる 場合もあるが、ASRの知見・経験が必要であり、実施者によ っては見落とす可能性がある。
	UV光源下での 展開写真	ASGの検出	ASG蛍光反応試薬、 切断面撮影装置、 254nmUV光源、 暗箱(暗室)	標準的な方法は無く 技術ノウハウの蓄積が必 要	△	◎	—	○	+	簡便 ・ ASRゲルを容易に観察でき、コアの 外観観察の段階におけるASGの検出 に有用	・ 利用するASG蛍光反応試薬の種類によっては、国際規制に より厳格な管理と廃液の保管廃棄(永久保存)が必要となる。 ・ ASG以外の蛍光発色に注意が必要。
	実体顕微鏡観察	反応性骨材のASGの滲み出し、骨材からのひび割 れ、骨材の反応リムの確認	コンクリートカッター、 切断面撮影装置	ASRの特性を把握し、 ASGを観察できる試料の 調整と観察力	△	△	—	×	+	簡便	・ 実体顕微鏡写真だけでは、コンクリート断面内におけるASR 劣化による損傷レベル(ひび割れやASGの量など)といった コンクリート全体の俯瞰的な情報が損なわれてしまう。
岩石学 的評価	コアXRD	反応性鉱物(クリストバライト・トリディマイトに限る) の検出	粉末X線回折装置、 結晶構造データ ベース	コンクリートからの骨材分 離	△	—	×	○	++	クリストバライト・トリディマイトの検出 に有用	・ 検出できる反応性鉱物が限定的。 ・ 管理区域内、点検困難箇所では実施できない(コアが持ち出せ ない)
	岩種構成定量	反応性骨材量・ベシム配合の評価	切断面撮影装置、 画像処理装置	岩石学的知識、経験	△	—	×	○	+++	ベシム配合が評価可能	・ 実施者の技術力に依存
	薄片 偏光顕微鏡観察	ASRを生じた骨材の岩種同定、反応性鉱物・混和材 の検出、劣化状況の評価(反応リム、ASG、ひび割 れ)	コンクリートカッター、 研磨装置、 偏光顕微鏡	岩石学的知識、 コンクリート材料の知識、 経験	◎	◎	×	×	+++	ASRによるひび割れ、ASGを観察でき る	・ 実施者の技術力に依存 ・ 管理区域内、点検困難箇所では実施できない(コアが持ち出せ ない)
	薄片スキャナ	ASRを生じた骨材の岩種同定、劣化状況の評価(反 応リム、ASG、ひび割れ)	撮影装置	岩石学的知識、 コンクリート材料の知識、 経験	○	○	×	△	++	簡便 ・ 薄片全体の分布情報(モルタル、反応 性粗骨材、非反応性粗骨材、ひび割 れ、気泡の位置関係)を取得でき、肉 眼と顕微鏡の中間スケールの情報を 補充可能	・ 反応性鉱物・混和材や、微小なASRは検出できない。
	薄片SEM観察 /EDS分析	反応した鉱物の同定(急速膨張性:クリストバライト、 トリディマイト、オパール、カルセドニー、ガラス、遅延 膨張性:微晶質・隠微晶質石英、粒界)、反応リム、 骨材からペーストに伸びるひび割れ状況観察、ひび 割れ起点での反応現場、ASGの存在場所の特定、 ゲルの結晶化物(ロゼット)の同定、ASGの組成分析	偏光顕微鏡 SEM/EDS、 元素定量分析機器	鏡面研磨技術、岩石学的 知識、電子顕微鏡観察・ 組成分析技術 コンクリート材料の知識、 経験	◎	◎	×	×	+++	ASRによるひび割れ、ASGを観察でき る	・ 実施者の技術力に依存 ・ 微小領域での測定のため、観察箇所の選定が適切である必 要がある。 ・ 管理区域内、点検困難箇所では実施できない(コアが持ち出せ ない)
コア インシ ン	コアのアルカリ 収支計算	SEM/EDSによるセメントアルカリ量推定値、取り出し た粗骨材および全粉砕試料の水溶性アルカリの測 定(総プロ法を適用)、および調査条件等からアルカリ 収支を計算し、用いたコンクリートのアルカリ総量を 推定	偏光顕微鏡 SEM/EDS、 元素定量分析機器	岩石学的知識、 コンクリート材料の知識、 セメント化学知識、 化学分析技術、経験	—	—	△	△	++	コンクリート中のアルカリ総量を概略 推定できる	・ 細骨材由来のアルカリは測定できない(粗骨材は取り出せて も、細骨材はできない) ・ EDS 定量分析によるセメントの最小アルカリ量や水溶性アル カリの測定はばらつきが大きい。 ・ 管理区域内、点検困難箇所では実施できない(コアが持ち出せ ない)
	コア空隙水 分析	空隙水のpH、アルカリ濃度の測定(圧搾抽出)によ る将来のASRリスクの可能性を調査	圧搾装置、 圧搾抽出器具、 元素定量分析機器	圧搾技術、圧搾水の取扱 い法、 抽出液化学分析技術	—	—	△	△	+	ASR 反応性およびフライアッシュ(FA) による抑制効果が確認できる	・ 知見が少ないため研究的要素が強い ・ 管理区域内、点検困難箇所での岩石学的な評価ができない (コアが持ち出せない)
	コアの 促進膨張試験	促進膨張量の測定による将来のASRリスクの可能性 を調査	恒温恒湿器、 容器類、 長さ変化測定装置、薬品	コンクリート試験技術、 薬品類取扱い技術	—	—	△	△	++	簡便 ・ 現状の潜在膨張性は概略評価できる	・ 試験結果と、実構造物の膨張挙動は、必ずしも整合しない。 ・ アルカリ溶液浸漬法は、バラツキが大きい。 ・ JCI-DD2法は、アルカリ溶脱が生じる。遅延膨張性骨材に対 して試験期間が短い。

青字は診断方法として
追加した試験項目

※1: ◎:非常に有効/良好, ○:有効/良好, △:やや劣る, ×:劣る、一対象外 ※2: 難易度 +: 比較的容易, ++: 難しい, +++: かなり難しい
将来予測については、単独の項目では十分ではないので、複数の項目の実施から総合的な判断が必要。
精度の観点からは余裕をもった試験体数・試料数を準備するのが望ましい。

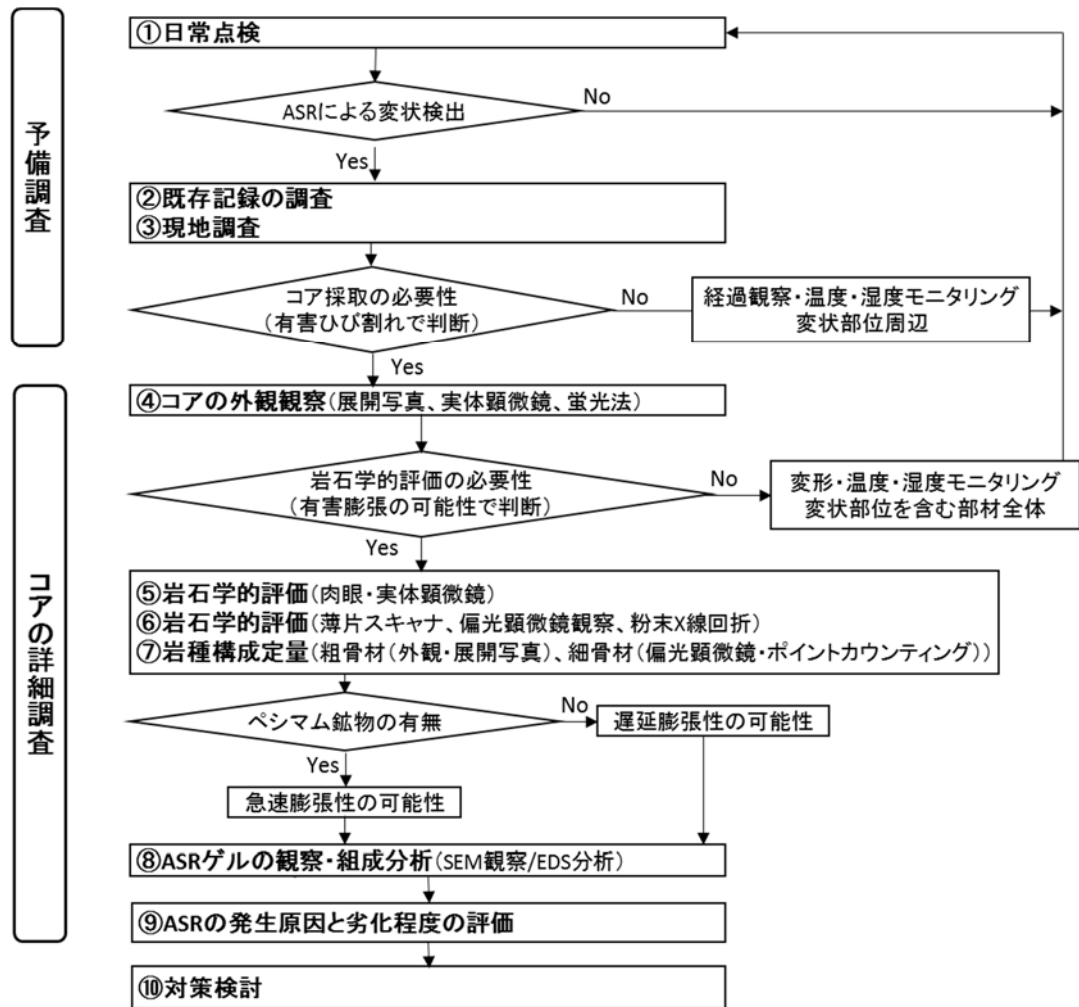


図 4.84 コンクリート構造物の ASR 診断フロー

表 4.31 コンクリート構造物の ASR 診断フローの実施内容

項目	実施内容
予備調査	ASRの可能性の検討と詳細調査の必要性判断
①日常点検	ひび割れ等、変状の検出
②既存記録の調査	構造物の基本情報(図面、構造様式・使用材料・調合等)、点検記録(ひび割れ、変状等)、補修・補強の記録、地域情報(反応性骨材・ASR劣化事例の有無)
③現地調査	劣化状況(ひび割れの状況・析出物の有無)、構造物の環境条件(温度、湿度、乾燥状態、漏水の有無)
コア採取の必要性(有害ひび割れで判断)	(参考)総ひび割れ幅/m>1mm/m もしくは0.5mm以上のひび割れに対して、総ひび割れ幅/mの増加量または変位の増加率>0.5mm/m/年もしくは0.5mm以上のひび割れが0.2mm/年以上の進展がみられること(フランス中央土木研究所LCPC(現IFSTTAR))。 総ひび割れ幅/m>0.5 mm/m、もしくはひび割れ幅>0.15mm(米国連邦道路庁FHWA)。
コアの詳細調査	ASRの発生原因と劣化程度の評価
④コアの外観観察 (展開写真、実体顕微鏡、蛍光法)	ASRゲルの検出、骨材からのひび割れ・骨材の反応リムの確認
岩石学的評価の必要性 (有害膨張の可能性で判断)	④コアの外観観察結果から、反応性リムの形成に留まる場合、あるいは、ポテンシャル評価結果から将来のASRによる膨張リスクが低い場合は、構造物の経過年数を考慮した上で、有害膨張の可能性は低いとして良いと考えられる。
⑤岩石学的評価(肉眼・実体顕微鏡)	骨材種類と構成比率の推定、分析位置(薄片採取位置)の決定
⑥岩石学的評価(薄片スキャナ、 偏光顕微鏡観察、粉末X線回折)	ASRを生じた骨材の岩種同定、鉱物の同定、劣化状況の評価(反応リム、ASRゲル、ひび割れ)
⑦岩種構成定量(粗骨材(外観・展開写真)、細骨材(偏光顕微鏡・ポイントカウンティング))	反応性骨材量・ベシマム配合の評価
⑧ASRゲルの観察・組成分析(SEM観察/EDS分析)	反応した鉱物の同定(急速膨張性:クリストバライト、トリディマイト、オパール、カルセドニー、ガラス、遅延膨張性:微晶質・隠微晶質石英)、反応リム、骨材からペーストに伸びるひび割れ状況観察、ひび割れ起点での反応現場、ASGの存在場所の特定、ゲルの結晶化物の同定、ASGの組成分析
⑨ASRの発生原因と劣化程度の評価	①～⑧の実施項目を通して、「反応性骨材(鉱物)量」、「ASRゲル量」、「ASRによるひび割れ量」、「アルカリ総量」、「アルカリ濃度(pH)」などから総合的に評価を行う。
ASRポテンシャル評価	以下のオプションは、「ASR診断方法の特徴と課題の整理」で示した通り、これら試験には課題があり、これら試験のみで判定できない場合がある。しかしながら、「有害膨張の可能性の判断」あるいは「ASRの発生原因と損傷程度の評価」において、将来のASRリスクに関して有用な情報が得られる可能性があるため、補助的な位置づけとした。
コアの促進膨張試験 (アルカリ溶液浸漬試験)	骨材の潜在膨張性を評価(促進養生期間3週間が望ましい。厳しい試験であり、この方法で膨張しない場合は、将来のASRリスクは低い。試験体寸法が小さくばつきは大きいことに留意)
(JCI-DD2法)	コンクリートの残存膨張性を評価(促進養生期間13週または飽和するまで。ただしこの方法で膨張しないことが実構造物で将来のASRリスクがないことを必ずしも意味しない)
コアのアルカリ量推定	アルカリ収支からアルカリ量を推定し、用いられている骨材の反応性や調合条件等を含めて、将来のASRリスクの可能性を調査。(アルカリ総量規制3kg/m ³ 以下でも膨張を生じる骨材があることに留意)。
コアの空隙水抽出試験 (圧搾抽出)	コアの圧搾抽出液を用いて空隙水のpH、アルカリ濃度の測定による将来のASRリスクの可能性を調査(pHが13を下回るような場合は、将来のASRリスクは低い)。

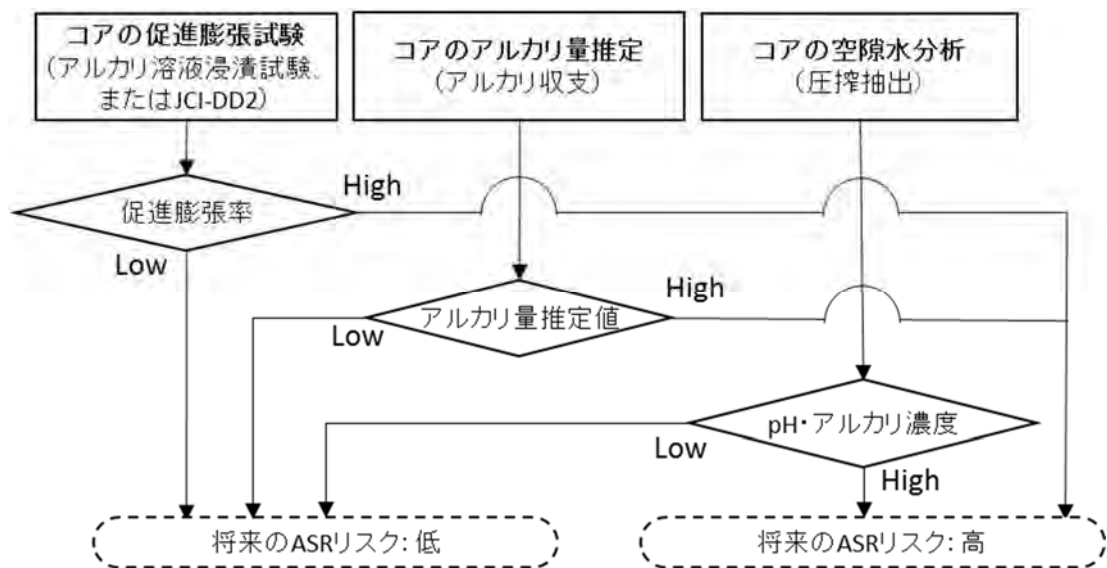


図 4.85 ASR ポテンシャル評価フロー (案)

4. 6 まとめ

本章では、各種試験の ASR 診断方法への有効性の検証を行い、ASR 診断方法の改善を提案した。ASR 診断方法について、劣化進行段階の異なる試験体、拘束条件の異なる小型試験体、及び ASR 劣化した実構造物から採取したコアを用いて検証を行った。その結果、各種試験に、課題はあるもののすべて ASR 診断への有効性が確認された。

なお、将来予測については、単独で十分な有効性が得られる項目はないので、複数の項目の実施から総合的に判断することが必要である。各試験項目のまとめを以下に示す。

1. コンクリートコアの外観観察（可視光観察、蛍光法、実体顕微鏡観察）から ASG を検出できることが確認された。コンクリートコアの可視光による外観観察に加えて、ASG 蛍光反応試薬を塗布し、短波長（254nm）UV 光の観察を実施することで、コンクリートコアの表面ににじみ出た ASG を容易に観察できる。
2. コンクリートコア岩種構成定量から粗骨材／細骨材とも骨材種類と構成比率が評価できることを確認した。
3. コア XRD（粉末 X 線回折）で同定できる反応性鉱物は限られ、また、ASR 反応が生じているかどうかの判断はできないが、これらの点に留意すれば、有効なデータが得られる場合がある。
4. コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察及び SEM 観察/EDS 分析（走査型電子顕微鏡/エネルギー分散型元素スペクトル分析）から ASR によるひび割れ、ASG が観察できることを確認した。なお、コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察に加えて、フィルムスキャナによる写真撮影を実施することで、コンクリートコアの外観観察よりもミクロ、コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察よりもマクロな中間のスケールの観察が可能になることを確認した。
5. 1～4 の各岩石学的評価では、観察者の熟練度等にも大きく依存し、骨材は天然材料であることから、極めて細かく観察すれば微小な領域の鉱物は ASR 反応性を有している可能性がある。コンクリート全体に及ぼす影響の大きさについては十分に考慮する必要がある。また、ASR の発生を確認でき、劣化の程度は分かるが、ASR の終局状態が分からないため、将来の膨張予測に結びつけるのは困難である。なお、年数が経過したコンクリートの観察結果とコンクリート構造物の劣化程度の関係の事例を整理し、有効性を確認する必要があると考えられる。
6. コアの促進膨張試験
アルカリ溶液浸漬法では潜在的な膨張性を評価できる可能性があるが試験体間のバラツキが大きいことが確認され、JCI-DD2 法では、遅延膨張性骨材の場合には 3 ヶ月 (13 週) では試験期間が短く、また、試験期間中のアルカリ溶脱が確認された。促進膨張試験だけの結果から、実構造物における将来の膨張の可能性を判断することはできない。

7. アルカリ収支計算からコンクリート中のアルカリ量がだまかに推定できることを確認した。一方で、EDS 定量分析によるセメントの最小アルカリ量や水溶性アルカリの測定の測定精度には限界があり、推定結果のばらつきを認識しておくことが必要であることが確認された。
8. コンクリートコアを圧搾抽出することで得られた空隙水の pH 及び ICP-MS による元素分析を実施することで、ASR 反応性及びフライアッシュによる抑制効果が確認できる可能性があることを確認した。

コンクリート構造物の ASR 診断フローの提案に当たり、様々な ASR 診断方法を実施し、すべての測定結果を鑑みて ASR の診断を行うことは、詳細な ASR の診断という観点ではもっとも精度よく診断が可能であると考えられる。しかし、コンクリート構造物の維持保全に係るコストとのバランスを考えると、詳細な診断にコストをかけるよりも簡易な診断を行い、適宜 ASR の抑制対策を実施したほうが工学的には有効となると考えられる。このことから、簡易評価ルート、通常評価ルート、詳細評価ルートの 3 種類のグレードの評価ルートを提示した。また、ASR ポテンシャル評価として、コンクリートコアに対する促進膨張試験、アルカリ量推定及び空隙水分析の 3 種類の ASR 診断の補完となる評価方法を提示した。