

## 5. 数値解析のための調査

### 5. 1 実施概要

原子力施設のコンクリート構造物においてコンクリートに ASR が生じた際、ASR 発生時における当該部材の健全性評価はコア採取による機械的特性の取得などである程度は可能である。しかし現状の診断技術では、将来にわたる ASR の劣化の進展を見越した健全性評価や、コア採取が不可能な部材の健全性評価を行うことは容易でなく、数値解析が必要不可欠となる。本項では、部材に生じる ASR 劣化を予測し劣化後の構造性能を推定するための数値解析ツールを構築する上で必要な情報をとりまとめる。

まず、原子力施設のコンクリート構造物においてどのような ASR 膨張挙動が生じるかを想定するため、原子力施設におけるコンクリート構造物の特徴及び ASR の特徴について整理する。

原子力施設におけるコンクリート構造物の特徴としては以下の項目が挙げられる。

- 1) 大断面部材を有する
- 2) 鉄筋比が比較的大きく、多数の耐震壁を有する
- 3) 様々な温湿度環境に晒される
- 4) 外観検査が不可能な箇所が存在する

これらの特徴は、ASR 劣化に対する診断・健全性評価方法を考える上で、考慮されなければならない事項である。

次に、ASR によるコンクリートの膨張挙動に関する特徴を以下に列挙する。

- A) 温度が高いほど、膨張速度が大きい
- B) 湿度が高いほど、膨張量・膨張速度が大きい
- C) 拘束が大きいほど、膨張量が小さい
- D) 拘束度が異方性を有する場合、膨張圧も異方性を有する
- E) 打設方向等で異方性を有する場合がある
- F) 機械的特性を低下させる

原子力施設の特徴、ASR 膨張の特徴を鑑みたとき、原子力施設での ASR 解析ツールに求められる事項は以下のとおりである。

- ① 部材内の温度分布、湿度分布の経時変化を追跡できる
- ② コンクリートの温度、湿度、拘束条件に応じた適切な ASR 膨張を付与できる
- ③ ASR 膨張による RC 構造物の劣化を再現できる
- ④ ASR 膨張による構造物の劣化を想定した状態において、構造性能、使用性能、遮蔽

性能を判断できる

上記の数値解析の流れを図に示すと図 5.1 のようになる。

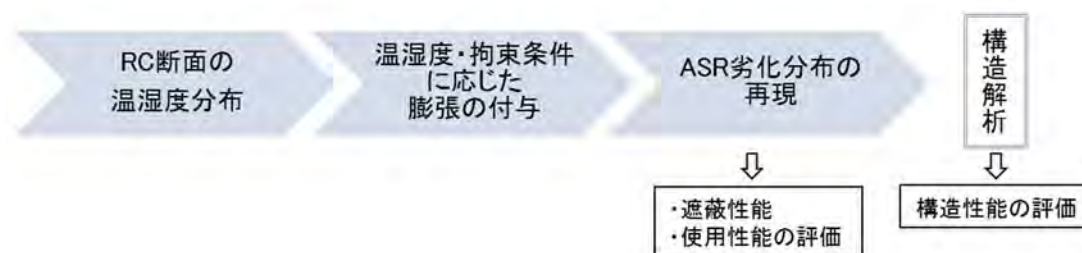


図 5.1 数値解析の流れ

本節では図 5.1 の数値解析の流れを基に ASR 解析ツールの構築に必要な情報の調査を実施した。以下に、調査内容と記載場所について記す。

前ページで述べたように、ASR によるコンクリートの膨張は A)～F) の特徴を持つとされている。そこで、5. 2 ではまず、国内外の先端的な ASR 解析ツールにおいて ASR 膨張の構成則がどのように表現されているかを国内外の文献について調査した。

次に、5. 3 では、ASR 膨張の構成則において重要な意味を持つ、環境因子の影響について既往の実験的研究及びそれらの実験を踏まえたモデル化の現状について調査を実施した。対象とする環境因子は、コンクリート中の温度、湿度及び拘束度、また ASR 膨張の結果生じる機械的特性の低下である。

ASR の特徴 A)、B) にあるように、ASR によるコンクリートの膨張速度及び最大膨張量はコンクリートの温度、湿度の影響を受けることがわかっている。また、原子力施設にみられるコンクリート構造物の特徴のうち、1) 大断面部材を有するコンクリート部材及び、3) 様々な温湿度環境に晒されることを考慮すると、図 5.2 のように、RC 部材断面内に温度分布や湿度分布が生じているものが存在する可能性が高い。この両者の特徴を踏まえると、結果として RC 部材内部に ASR 膨張分布が発生している可能性が想定される。

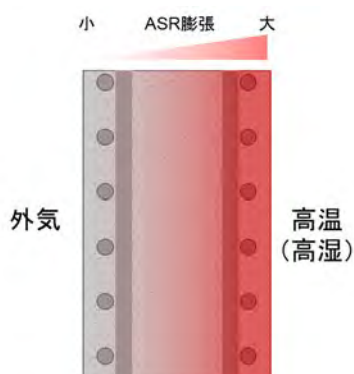


図 5.2 大断面 RC 部材の温湿度分布と ASR 膨張の概念図



現状、ASR 膨張に及ぼす温度の影響に関しては、ASR の進行速度にのみ影響を及ぼし、ASR の膨張量には影響しないとするモデルがほとんどである。また ASR 進行速度への影響に関しても見かけの活性化エネルギーを仮定したアレニウス則によるモデルが多くを占め、研究機関による差異はほとんどみられない。一方、湿度の影響に関しては、“これ以下の湿度では ASR 膨張は生じない” という湿度限界の値など、未だ共通認識を得られていない部分があるため、湿度依存性に関する既往の実験的研究（５．３．１）並びにモデル化手法（５．３．２）について調査を実施した。

次に、ASR 膨張の温湿度依存性を考慮する上で必要な情報として、部材内部の温湿度分布を把握するために必要なコンクリート中の水分移動（５．３．３）及び熱移動（５．３．４）に関する既往の解析的研究の調査を実施した。この際、ASR が生じているコンクリートにはひび割れなどのポーラスな部分が存在している可能性が高いことから、健全部の水分移動及び劣化部の水分移動の両者について調査を実施した。

また、原子力施設のコンクリート構造物で多く見られる図 5.3 のような耐震壁を想定したとき、耐震壁の多くは面内方向には鉄筋が多数配置されているものの、面外方向の拘束度は小さいことが多く、部材内の拘束度に異方性が生じている。このような環境条件において、コンクリートに ASR 膨張が生じた場合、コンクリートの膨張は鉄筋に拘束され面内方向に大きな、そして面外方向には比較的小さな圧縮応力が発生することが想定される。このとき ASR 膨張の特徴である C) 拘束の影響や D) ASR 膨張の異方性を考慮すると、拘束度の小さい方向に ASR 膨張が大きく進行することが想定される（５．３．５）。

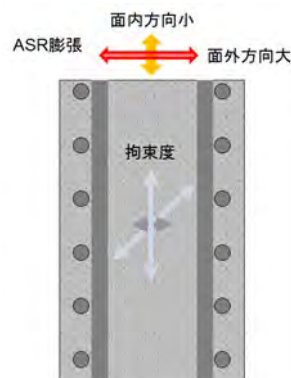


図 5.3 RC 部材の ASR 膨張異方性に関する概念図

そこで、鉄筋比が比較的大きく、多数の耐震壁を有するという原子力施設の RC 部材において、ASR 膨張の拘束依存性を理解するために、ASR に関する拘束影響に関する調査（５．３．６）を実施した。これらの情報は ASR 膨張が発生しやすい危険部位を予測する上では貴重な情報となる。

最後に、構造解析を行うにあたり必要な情報として ASR の進展に伴って生じるコンクリ

ートの圧縮強度やヤング係数などの機械的特性変化に関する既往の実験的研究並びにそのモデル化に関して調査を実施した（５．３．７）。

以上の調査によって得られた知見のまとめと今後必要となる情報、またそれらを得るために実施したほうがよい実験について、まとめに記す。

## ５．２ モデル化ための構成則の調査

将来の部材の健全性評価を実施するにあたり、ASR 劣化がどのように進展し、部材にどのような性能の変化を及ぼすかを数値解析ツールにより適切に予測するためには、実現象に即した ASR のモデル化を行う必要がある。本節では、海外及び国内の ASR 解析ツールで使用されている ASR 膨張の構成則について調査した結果を報告する。

### ５．２．１ 海外の調査結果

ASR が頻発しているフランスや北米などの海外の先端的な研究機関においては、ASR の膨張予測モデルは過去に複数提案されており、カナダでは実際に原子力施設のコンクリート構造物の健全性評価に使用された例も存在している（後述する Hydro-Quebec の Gentilly-2 原子力発電所の解析技術を用いた健全性評価）。

ASR は骨材中に含まれるある種のシリカ鉱物とコンクリート中のアルカリとの間で生じる化学反応であり、生じている反応そのものはマイクロモデルで考慮する必要性がある一方で、最終的に求められるものはコンクリート構造物の健全性評価であることから、コンクリートのマクロな膨張挙動を説明できるモデルも工学的に有用性が高い。

そのため、既存の ASR のモデルは着目しているスケールから大まかにマイクロモデルとマクロモデル、あるいはその中間のメソモデルに分類されている。

マイクロモデルは骨材とセメントペーストを別々にモデル化し、輸送方程式によってアルカリシリカゲルの生成過程を説明するもので、Suwito<sup>55</sup>、Bazant<sup>56</sup>、Bangert<sup>57</sup>、Wu<sup>58</sup>、Saouma<sup>59</sup>らのモデルが提案されている。また、メソモデルとしては、骨材内部に膨張要素を組み込み、ASR による骨材内部からセメントペーストへの亀裂進展を再現できるDunant<sup>60</sup>らのモデルが存在する。

---

<sup>55</sup> Suwito, A., Jin, W., Xi, Y., Meyer, C.: A Mathematical Model for the Pessimum Effect of ASR in Concrete, Concrete Science and Engineering, RILEM, Vol.4, pp. 23-34, (2002)

<sup>56</sup> Bazant, Z., Steffens, A.: Mathematical Model for Kinetics of Alkali-Silica Reaction in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.419-428, (2000)

<sup>57</sup> Bangert, F., Kuhl, D. and Meschke, G.: Chemo-Hygro-Mechanical Modelling and Numerical Simulation of Concrete Deterioration Caused by Alkali-Silica Reaction, Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, pp.689-714, (2004)

<sup>58</sup> Wu, T., Temizer, I., Wriggers, P.: MultiscaleHydro-Thermo-Chemo-Mechanical Coupling: Application to Alkali-Silica Reaction, Computational Materials Science, Vol.84, pp.381-395, (2014)

<sup>59</sup> Saouma, V. E., Martin, R. A., Hariri-Ardebili, M. A., Katayama, T.: A Mathmatical Model for the Kinetics of the Alkali-Silica Chemical Reaction, Cement and Concrete Research, Vol.68, pp.184-195, (2015)

<sup>60</sup> Dunant, C. F., Scrivener, K.: Micro-Mechanical Modelling of Alkali-Silica Reaction-Induced

これらのマイクロモデル、メソモデルは ASR 現象を把握する上で重要ではあるが、構造解析に使用するためには ASR ゲルの生成とコンクリートの膨張を結びつける別のモデルが必要となるが、構造物の健全性評価にはこれまでのところ使用されていないため本項では省略する。

一方マクロモデルは、ASR 膨張がコンクリート材料全体で平均的に生じると仮定したモデルである。McMaster University の Pietruszczak<sup>61</sup>や、IFSTTAR で採用されている Ulm<sup>62</sup>、Multon<sup>63</sup>、Seignol<sup>64</sup>ら、University of Colorado の Saouma<sup>65</sup>のモデルはマクロモデルの代表的な事例である。マクロモデルには、膨張量のみを予測して構造解析に使用しているものや、反応解析と構造解析という二つの段階を設けたものまで様々あるが、基本的には、ASR 膨張の実験データや実構造物のモニタリング結果をフィッティングして、外挿によって将来予測を行うというものである。フィッティングに使用される速度関数は前述のように指数曲線と S 字曲線があり、近念提案されている速度関数はそのほとんどが S 字曲線である。この S 字曲線は Larive<sup>66</sup>による 600 以上の試験体を用いた試験によって得られた曲線で、温度、相対湿度といった環境条件を ASR 進行速度に反映できる。

S 字曲線には ASR の潜伏期間を表現できる長所がある。ただし、潜伏期間を事前に予測する手法は確立されておらず、潜伏期間についてもフィッティング対象となる。

以下に、海外の研究機関で提案されているマクロモデルの構成則を記す。

#### (1) University of Colorado

Saouma<sup>11</sup> は、ASR 膨張について以下に示す 7 つの実験的事実に基づいて、ASR 膨張ひずみを式(5.1)のように表した。

- 1) ASR は体積膨張であり、原因なしに主たる方向性をもたない。
- 2) ASR 反応は温度の影響を受ける。
- 3) ASR 膨張は圧縮力によって抑制され、圧縮力が小さい別方向へ膨張が進展する。
- 4) ASR によって比較的強い応力が発生し、マイクロクラックが生成されたとき、ASR ゲルの一部はそのひび割れに吸収される。

---

Degradation Using the AMIE Framework, Cement and Concrete Research, Vol.40, pp.517-525, (2010)

<sup>61</sup> Pietruszczak: On the Mechanical Behaviour of Concrete Subjected to Alkali-Aggregate Reaction, Computers and Structures, Vol.58, pp.1093-1097, (1996)

<sup>62</sup> Ulm, F.-J., Coussy, O., Kefei, L., Larive, C.: "Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures" Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, pp.233-242, (2000)

<sup>63</sup> Multon, S. Toutlemonde, F.: "Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions" Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp.912-920, (2006)

<sup>64</sup> Seignol, J. F., Omikrine-Metalssi, O., Baghdadi, N., Toutlemonde, F.: "From AAR to Def: Numerical Modeling of Structures Affected by Expansive Reactions in Concrete" 14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions. 10p., (2012)

<sup>65</sup> Saouma, V. E.: Numerical Modeling of AAR, CRC Press, (2014)

<sup>66</sup> Larive, C., Coussy, O.: Behavior of AAR-affected Concrete, Modeling, Proceeding 10th AAR International Conference, Quebec, Canada, (1996)

- 5) 静水圧圧縮力が強く働いているとき、ASR 反応の速度は小さくなる。
- 6) 3 軸圧縮力が働いた場合、膨張量は小さくなるがゼロにはならない。
- 7) ASR 膨張によって、引張強度と弾性係数は低下する。

$$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t) = \Gamma_t(f_t', \sigma_1 | COD) \cdot \Gamma_c(\bar{\sigma}, f_c') \cdot f(h) \cdot \xi(t, \theta) \cdot \varepsilon^\infty \Big|_{\theta=\theta_0} \quad (5.1)$$

ここで、

$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t)$  : 時間  $t$  における ASR 膨張ひずみの増分、

$\Gamma_t(f_t', \sigma_1 | COD)$  : ひび割れ発生時の ASR 膨張の低減係数で  $COD$  はひび割れ開閉変位、

$\Gamma_c(\bar{\sigma}, f_c')$  : 拘束応力  $\bar{\sigma}$  条件下での ASR 膨張の低減係数、

$f(h)$  : 相対湿度条件による ASR 膨張の低減係数、

$$\xi(t, \theta) = \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c(\theta)}}}{1 + e^{-\frac{t - \tau_L(\theta, I_{\theta}, f_c')}{\tau_c(\theta)}}} : \text{体積膨張を表すシグモイド曲線、}$$

$\varepsilon^\infty \Big|_{\theta=\theta_0}$  : 実験的に得られた温度  $\theta_0$  のときの無拘束時の最大膨張ひずみ

である。式中の  $\xi(t, \theta)$  が、Larive が提唱した S 字曲線を表している。このとき、ASR 膨張を表現するためには、終局膨張ひずみ  $\varepsilon_\infty$  や、速度の指標となる材料係数  $\tau_c$ 、潜伏期の長さの指標となる材料係数  $\tau_L$  が必要でありフィッティングにより求めることになる。Saouma の ASR 膨張の構成則は最大膨張量に各種要因による低減係数を付与する形式であり、各種低減係数は既往の実験的研究を参考に設定している。

## (2) McMaster University

Pietruzzak<sup>61</sup> は、ある材齢における ASR 膨張ひずみを、進行率  $\zeta(t)$  としては以下のよう

うに単純に表現している。

$$\varepsilon(t) = \zeta(t) \cdot \varepsilon_\infty \quad (5.2)$$

ここで、 $\frac{d\zeta}{dt} = \gamma \cdot (1 - \zeta)$  と定義すると、膨張ひずみの進行率は以下のように表される。

$$\zeta(t) = 1 - e^{-\gamma(t-t_0)} \quad (5.3)$$

また、ASR 膨張の進行は温度と相対湿度の影響を受けることが分かっているため Pietruzcak は  $\gamma$  が温度と相対湿度によって決定すると仮定して  $\gamma$  を以下の式で表現した。

$$\gamma(T, RH) = \gamma_0 \cdot g_1(T) \cdot g_2(RH) \quad (5.4)$$

ここで、

$$g_1(T) = \exp \left[ U \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5.5)$$

$$g_2(RH) = \left( \frac{RH}{100} \right)^m \quad (5.6)$$

であり、 $\gamma_0$ 、 $m$ は材料定数である。Pietruzcak のモデルは、湿度の影響を速度項に導入しており、湿度は最大膨張量に影響しないという立場をとっている。

Hydro-Quebec の Gentilly-2 原子力発電所の解析では、まず実験室レベルで実施した小型試験体の結果から材料定数などの解析パラメータを入力し解析結果を取得する。次に、現地で計測された実構造物の鉄筋ひずみや変形量、ひび割れ密度などのモニタリング結果と整合するように解析パラメータを修正しフィッティングすることで、実構造物の変形挙動を再現可能な解析パラメータを導出している。最後に、これらの値を用いて将来の ASR 挙動を予測することで、現在の健全性評価から、将来の健全性評価を可能としている。Hydro-Quebec で実施されている解析技術を用いた健全性評価の流れ及び、解析に必要なパラメータを以下に示す。

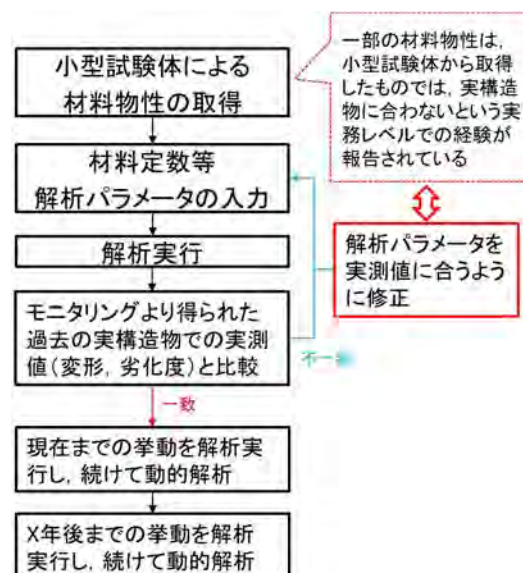


図 5.4 Hydro-Quebec で実施されている解析技術を用いた健全性評価の流れ

表 5.1 Hydro-Quebec で実施されている解析に必要なパラメーター一覧

| 解析に必要なパラメータ                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| コンクリートの静弾性係数, ポアソン比, 密度, 劣化前の圧縮強度, 強度パラメータ, 拘束による ASR 膨張の低減係数, ASR 膨張がゼロとなる拘束応力, 拘束異方性に関する材料定数, ひずみ軟化パラメータ, ひずみ軟化を表す材料定数, 破壊限度を表す応力閾値, ASR が開始するステップ, ASR が終了するステップ, 時間刻み, 最大膨張ひずみ, 膨張ひずみ進行速度関数, 劣化定数 (機械的特性の低下を表す材料定数), 要素数 |

### (3) IFSTTAR

フランス運輸・整備・ネットワーク科学技術研究所 IFSTTAR<sup>9, 10</sup> では, Larive らの膨大な実験により, ASR の進行度  $\xi_a(t)$  がシグモイド曲線によって表現できることを示しこの形式を採用している。このシグモイド曲線は先述の Saouma など他の研究者にも幅広く引用されている。次式に拘束の影響、打設影響による異方性を考慮した ASR 膨張ひずみ式を示す。

$$\varepsilon_z(\sigma) = A_i \cdot A_s \cdot \xi_a(t) \cdot \varepsilon_\infty \quad (5.7)$$

ここで、ASR 進行度は、

$$\xi_a(t) = \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c(\theta)}}}{1 + e^{-\frac{t - \tau_L(\theta, I_a, f_c)}{\tau_c(\theta)}}} \quad (5.8)$$

であり、最大膨張ひずみ  $\varepsilon_\infty$  は、コンクリート内部の水分状態の影響を受け、水分量にを変数とした関数により低減されるとして、空隙に満たされている水の割合 ( $S_r$ ) を変数とした次式で表現している。

$$\varepsilon_\infty(S_r) = f_\infty(S_r) \cdot \varepsilon_\infty(1) \quad (5.9)$$

つまり、IFSTTAR のモデルは、湿度、打設方向の異方性、及び拘束度が最大膨張量に影響を与えるとしている。

### (4) University of Toulouse

Capra・Sellier<sup>67</sup>のモデルは、上記 1)～3) のものと異なり、見掛けの膨張ひずみではなく

<sup>67</sup> Capra, B. and Sellier, A.: Orthotropic Modelling of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Structures: Numerical Simulations, Mechanics of Materials, Vol.35, pp.817-830, (2003)

アルカリシリカゲルによる膨張圧  $P_g$  を与えるモデルになっている。

$$P_g = M_g \sum n^s \left\langle A^s fV_a^s - \left\langle V_p^s + \frac{b_g}{n^s} tr(\varepsilon) \right\rangle \right\rangle \quad (5.10)$$

ここで、

$P_g$  : ゲルの膨張圧、

$M_g$  : ゲルの弾性係数、

$n^s$  : 骨材粒径  $s$  の骨材量、

$A^s$  : 温度、湿度、時間によって決まる ASR の進行度、

$fV_a^s$  : ゲルの最大膨張量、

$V_p^s$  : 骨材と連続している空隙量、

$b_g tr(\varepsilon)$  : コンクリートのひずみにより骨材と連続した空隙量

である。また、ASR の進行度を示す  $A^s$  は、温度と水分飽和度及び時間を変数として構成されている。

$$\frac{\partial A^s}{\partial t} = \alpha_{20}^s \cdot \exp \left( -\frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{273+\theta} - \frac{1}{293} \right) \right) \left\langle \frac{Sr - Sr^0}{1 - Sr^0} \right\rangle \langle Sr - A^s \rangle \quad (5.11)$$

このモデルは、ASG の空隙への移動を適切に再現できる場合には、拘束影響を自動的に表現できるようになることから拘束応力そのものによる ASR 膨張の低減を考慮する必要がないという点でメリットがある。

しかし現状では ASG の弾性係数や、最大膨張量、空隙への移動性状などは未だ十分に明らかにされておらず、既往の実験結果を再現する場合には、結果としてフィッティングパラメータの一つとせざるを得ない。

## 5. 2. 2 国内の調査結果

国内の ASR 膨張に関する研究では、メソモデルとして、骨材のサイズベシマムを説明する

ために導入された魚本ら<sup>68</sup>のモデルや、ASR ゲルのメソ空隙への移動等を考慮した村中ら<sup>69</sup>のモデルが知られている。また、ASR 劣化進展から構造解析までを網羅した数値解析ツールとしては Takahashi・Maekawa のモデル<sup>70</sup>がある。しかしながら、国内の ASR に関する数値解析の多くは、構造解析に特化しており、ASR 膨張として分布や速度を考慮するわけではなく、コンクリート要素に一律の膨張ひずみを付与している場合<sup>例えば71</sup>がほとんどである。よってここでは、Takahashi・Maekawa のモデルのみ紹介することとする。

Takahashi・Maekawa のモデルでは、University of Toulouse と同様に、ASG の生成が膨張圧を発生させるという形態をとっている。このモデルで特徴的なのは ASG が固体及び液体の性質を有しているとモデル化している点である。ASG の固体部分と液体部分の膨張圧をそれぞれ  $p_{ai}$ 、 $p_i$  とした場合、全体の膨張圧  $p$  は以下の式で計算される。

$$p = \frac{1}{3} \sum_i^{x,y,z} p_{ai} + p_i \quad (5.12)$$

ただし、

$$p_{ai} = \text{stiffness} \cdot \beta \cdot \left( \frac{V_{asr}}{3} - V_{crack i} \right) \quad (5.13)$$

$$p_i = \text{stiffness} \cdot (1 - \beta) \cdot \left( V_{asr} - \sum_{x,y,z} V_{crack i} \right) \quad (5.14)$$

である。

ASR の温湿度依存性の関数は ASG の体積  $V_{asr}$  を求める式に含まれており、ASG の逐次生成量

□  $\Delta_{x^+}$  は次式で求められる。

$$\square \Delta_{Gel_{x^+}} = \frac{R_{ASR \times} \square \Delta \cdot t \cdot M_{gel}}{\rho_{gel}} \quad (5.15)$$

ここで、

<sup>68</sup> 魚本健人，古澤靖彦：アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築，コンクリート工学論文集，Vol.3，No.1，pp.109-119，(1992)

<sup>69</sup> 村中誠，田中泰司：反応機構に立脚した ASR 膨張挙動に関する物理—化学モデルの構築，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.1-15，(2013)

<sup>70</sup> Takahashi, Y., Shibata, K., Maekawa, K.: " Chemo-Hygral Modeling and Structural Behaviours of Reinforced Concrete Damaged by Alkali-Silica Reaction" The 6th International Conference of Asian Concrete Federation, pp.1274-1281, (2014)

<sup>71</sup> 新名勉，松本茂，佐藤彰紀，久利良夫，真鍋英規：ASR による劣化を受けた PC はり部材の力学的挙動に関する解析的検討，コンクリートの構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.397-404 (2009)



$M_{gel}$  : ASG の分子量、

$\rho_{gel}$  : ASG の密度

であり、ASG の生成速度  $R_{ASR\_X^+}$  は以下のように書ける。

$$R_{ASR\_X^+} = k_{RH} \cdot k_T \cdot R'_{ASR\_X^-} \quad (5.16)$$

$$R'_{ASR\_X^-} = k \cdot C_{X^-} \cdot F_{water} \cdot V_{RG} \cdot 1.0E-9 \quad (5.17)$$

$$k_{RH} = \exp\left(-1500.0(1.0 - RH)^{5.0}\right) \quad (5.18)$$

$$k_T = \exp\left(6000.0\left(\frac{1}{313} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (5.19)$$

\* Takahashi・Maekawa のモデルでは、Capra・Sellier<sup>67</sup> と同様に、見掛けの膨張ひずみではなく ASG による膨張圧を与えるモデルになっている。

### 5. 2. 3 まとめ

本節では、国内外における ASR 解析ツールで使用されている ASR 膨張の構成則に関する調査を行った。国内の解析事例では ASR の進展から構造物の劣化分布を再現し、劣化時点での構造性能を取得することができる時間依存性の解析ツールが限られており、海外の先端モデルでは、ASR の劣化の進行から将来予測に重きをおき、ASR 膨張の構成則が各要素を考慮できるよう整備されていることが分かった。

また、それぞれの構成則をみると、以下の性質は何れの構成則においても共通であった

- ・温度の影響は、膨張速度もしくは ASG の生成速度に組み込まれている。
- ・湿度の影響は、膨張量を低減するものと膨張速度を低下させるものに分かれる。

ただし、何れも水分量が大きいほど、膨張速度もしくは量が大きくなる。

一方、拘束の影響に関しては、拘束度を直接的に明示しているものと、拘束によって発生するひび割れ空間による ASG の膨張圧の低減で表現する方法に大別された。

### 5. 3 ASR 膨張挙動モデル化に必要な項目の調査

#### 5. 3. 1 ASR の温湿度依存性に関する既往の研究

ASR 膨張は、コンクリートに含まれるアルカリ金属イオンが、反応性骨材に含まれるシリケート鉱物と化学反応を起こし ASG を生成し、生成された ASG が外部の水を吸収し膨張することで、コンクリートにマクロな膨張を生じる劣化現象である。ASG の生成反応は一般的な化学反応と同様に、高温になるほど反応速度が大きくなるため、ASR の進行速度は温度の影響を受ける。

温度の影響のモデル化に関しては、5.2 節で紹介したすべてのマクロモデルにおいてアレニウス則による見かけの活性化エネルギーを用いる手法を取り入れている。特に、University of Colorado と IFSTTAR のモデルは、式 (5.8) に示す Larive が提案した S 字曲線を使用しているが、式 (5.8) に含まれる材料定数  $\tau_c(\theta)$ 、 $\tau_L(\theta)$  によって温度の影響を

表現している。なお、 $\tau_c(\theta)$  は進行速度を表す係数であり、 $\tau_L(\theta)$  は潜伏期間を表す係数である。Ulm ら<sup>62</sup> の論文において、それぞれの係数における見かけの活性化エネルギー  $U$  は  $U_c = 9400 \pm 500$ ， $U_L = 5400 \pm 500$  という値が提案されている。

一方、湿度依存性に関しては、現在のところ、複数の研究機関で異なるモデルが採用されている。そこで、本節では、ASR の湿度依存性に関して既往の研究を取りまとめる。

コンクリート中の水分は、化学反応そのものに使用されるとともに、ASG の膨潤にも寄与しているため、ASR によるコンクリートの膨張挙動は、コンクリート内部の水分環境に大きく影響を受ける。ASR の湿度依存性については従来からその重要性が理解されており、いくつかの実験的検討が行われている。80 年代初頭の検討において、相対湿度が概ね 80% 以下の領域で ASR 膨張が極めて小さくなる結果が得られていることから、ASR 膨張は相対湿度 85% 以下の領域では発生しないと一般的に広く認識されてきた<sup>72</sup>。この、「ある相対湿度以下では ASR 膨張は生じない」という相対湿度は「湿度限界」と呼ばれ、実環境における ASR 抑制方法の一つの目安とされている。

しかしながら、近年の研究において、反応性骨材の種類やコンクリートの調合によっては必ずしも 80%RH 程度の湿度領域には湿度限界が存在しない実験結果も報告されており、ASR の湿度依存性に関する認識は変化し始めている。

本報告では、国内外の湿度依存性に関する実験について入手可能な文献をとりまとめた。調査対象とした湿度依存性に関する既往の実験的研究を表 5.2 に示す。表には大まかな実験条件として、湿度計測位置（コンクリート内部もしくは外部）、湿度設定パラメータ、養生温度、実験期間、アルカリ量について記載した。

---

<sup>72</sup> A. M. Neville 著，三浦尚訳，ネビルのコンクリートバイブル，技報道出版，（2004）

表 5.2 湿度依存性に関する既往の実験的研究

|   | 発表<br>年 | 第一著者                         | 収録先                   | 湿度<br>計測 | 湿度設定                       | 温度        | 実験<br>期間 | アルカリ量                        |
|---|---------|------------------------------|-----------------------|----------|----------------------------|-----------|----------|------------------------------|
| 1 | 1981    | L. Nilsson <sup>73</sup>     | 5 <sup>th</sup> ICAAR | －        | 65、80、93                   | 20        | 16 週     | 1.04%                        |
| 2 | 1983    | L. Nilsson <sup>74</sup>     | 6 <sup>th</sup> ICAAR | －        | 65、80、93                   | 20        | 16 週     | 1.04%                        |
| 3 | 1983    | G. Guomundsson <sup>75</sup> | 6 <sup>th</sup> ICAAR | －        | 83、90、<br>95、100           | 23、<br>38 | 26 週     | 1.30%以上                      |
| 4 | 1986    | H. Olafsson <sup>76</sup>    | 7 <sup>th</sup> ICAAR | －        | 73、83、<br>90、95、<br>100    | 23、<br>38 | 22 ヶ月    | 1.50%                        |
| 5 | 1989    | F. Tomosawa <sup>77</sup>    | 8 <sup>th</sup> ICAAR | －        | 75、80、<br>85、90、<br>100    | 40        | 52 週     | 6.0、<br>8.0kg/m <sup>3</sup> |
| 6 | 1989    | T. Kurihara <sup>78</sup>    | 8 <sup>th</sup> ICAAR | －        | 80、90、<br>100              | 40        | 16 週     | 1.20%                        |
| 7 | 1997    | C. Larive <sup>79</sup>      | PhD Thesis            | 外部       | 73、87.5、<br>92.5、100       | 38        | 50 週     | 1.25%                        |
| 8 | 2006    | S. Poyet <sup>80</sup>       | ASCE MCE              | 外部       | 59、76、<br>80、82、<br>96、100 | 60        | 13 週     | 9.9kg/m <sup>3</sup>         |
| 9 | 2014    | 鍵本広之 <sup>81</sup>           | コンクリート<br>工学論文集       | 内部       | 60、70                      | 35、<br>40 | 42 週     | 1.80%                        |

各研究機関で行われた湿度依存性試験の結果について、100%RH に対する終局膨張ひずみ量を基準とした各環境相対湿度の終局膨張ひずみ量の比率を縦軸にとり、環境相対湿度との関係を整理したものを図 5.5 に示す。

<sup>73</sup> Nilsson, L. O.: “Pop-out due to Alkali-Silica Reaction - A Moisture Problem?” 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 1-6 (1981)

<sup>74</sup> Nilsson, L. O.: “Moisture Effects on the Alkali-Silica Reaction” 6th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 201-208 (1983)

<sup>75</sup> Guomundsson, G., Asgeirsson, H.: “Parameters Affecting Alkali Expansion in Icelandic Concretes” The International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 217-221 (1983)

<sup>76</sup> Olafsson, H.: “The Effect of Relative Humidity and Temperature on Alkali Expansion of Mortar Bars” 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 461-465 (1986)

<sup>77</sup> Tomosawa, F., Tamura, K., Abe, H.: “Influence of Water Content of Concrete on Alkali-Aggregate Reaction” 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 881-885 (1989)

<sup>78</sup> Kurihara, T., Katawaki, K.: “Effects of Moisture Control and Inhibition on Alkali Silica Reaction” 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 629-634 (1989)

<sup>79</sup> C. Larive. “Apport combines de l'alkali-reaction et des ses effets mecaniques” PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1997)

<sup>80</sup> S. Poyet. “Influence of Water on Alkali-Silica Reaction: Experimental Study and Numerical Simulations” Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, Issue 4, pp. 588-596 (2006)

<sup>81</sup> 鍵本広之: “大型コンクリート円柱における ASR 表面ひび割れの発生メカニズム”, コンクリート工学論文集, Vol. 25, pp. 201-211 (2014)

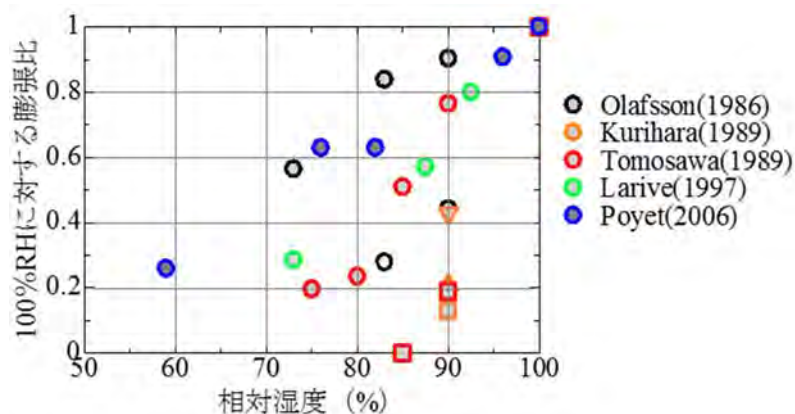


図 5.5 相対湿度と 100%RH 膨張比の関係

図からわかるように、従来は、概ね相対湿度 80%以下では ASR 膨張は少ないと考えられていたが、大きな膨張をするデータも存在する。

何れの実験についても環境相対湿度の低下に伴って膨張量が低下する傾向は見られるが、その関係性は一様ではなく実験環境や使用するコンクリートによって異なっている。特に Poyet らの実験では、相対湿度が 60%の場合においても無視できない程度の ASR 膨張が生じており、十分に水が供給されないような部位においても、気中に含まれる水分のみで ASR 膨張が発生する可能性を示唆している。しかしながら、これらのデータの取り扱いにおいて図に示される既往の研究はすべて、外部空間の相対湿度とコンクリート内部の相対湿度が等しいという仮定の上で描かれたものであるという点に留意する必要がある。

既往の実験の多くは、ASR 膨張の湿度依存性を確認するため、比較的早期に設定湿度の室内に移動させることになるが、このときコンクリート内部の相対湿度は調合水の影響により、設定湿度より高い状態にある場合も考えられる。このような条件において加速試験のために高温養生を行ったときには、外部の相対湿度と十分平衡に達するまでに ASR 膨張が進行している可能性が考えられる。また、コンクリートの調合や、混和したアルカリ量が異なる場合には、コンクリート内部で平衡する相対湿度と、その相対湿度におけるコンクリートの含水率は変化している可能性が考えられ、実験上の相対湿度設定値が、コンクリート内部の含水状態と一致していない状況が考えられる。

鍵本らは、コンクリート内部に湿度センサーを埋設し、乾燥面からの距離をパラメータとして、相対湿度と ASR 膨張ひずみの関係を示している（図 5.6）が、この実験では、相対湿度 80%以下では、ASR 膨張がほとんど進展しないという結果になっている。

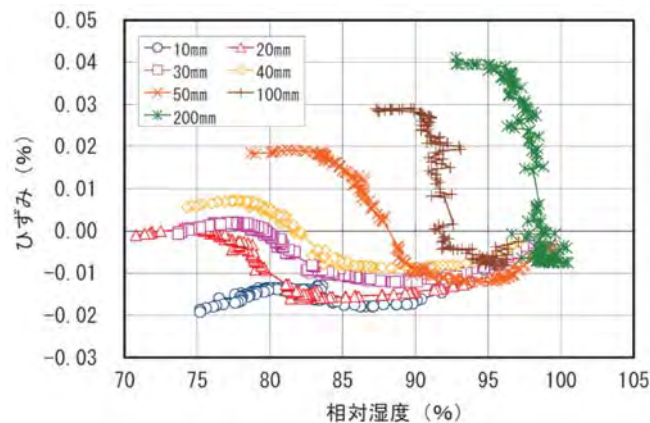


図 5.6 相対湿度とひずみの関係<sup>81</sup>

以上のように、ASR 膨張の湿度依存性に関しては、環境相対湿度及びコンクリート内部水分量の低下によって ASR 膨張量が低下するという傾向に関しては一定のコンセンサスが得られているものの、低下程度は明らかになっていないのが現状である。湿度依存性に関する有益な実験としては、コンクリート内部に過剰な乾燥収縮ひび割れを生じない程度の条件において十分に乾燥させた験体を用い、その後各環境相対湿度へ移動すること、コンクリート内部の相対湿度を計測することといった方法が考えられるが、上記の実験方法は ASR 膨張の終局までには莫大な時間を要する。

### 5. 3. 2 湿度依存性のモデル化

各研究機関で開発されている ASR 劣化に関する解析ツールの多くには、ASR 膨張に及ぼす湿度依存性をモデル化した数式が組み込まれている。湿度依存のモデル化の方法には大きく二つの種類が存在する。

一つは、変数としてコンクリート内部の相対湿度を取り扱っているものであり、もう一つは空隙中の水分量を採用しているものである。着目する変数は異なるが、何れのモデルについてもコンクリート中の水分量が少ない状態では、ASR 膨張速度（膨張量）が低下するという現象を再現するという点では変わりがない。

例えば、Capra<sup>82</sup>らは、ASG の膨張圧は相対湿度の低下に伴って指数関数的に低下するとし、式のような低減関数  $f(RH)$  を導入している。

$$f(RH)=RH^m \quad (5.20)$$

<sup>82</sup> Capra, B. and Bournazel, J.-P.: “Modeling of Induced Mechanical Effects of Alkali-Aggregate Reaction” Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 2, pp. 251-260 (1998)

$m$  は材料定数であるが、上記の論文では  $m=8$  を採用している。Saouma<sup>65</sup> も湿度依存性の項目としてこの Capra のモデルをそのまま引用している。また、Bazant<sup>56</sup> らは相対湿度 85% 以下では ASR 膨張が生じないとして、85%RH と 100%RH を直線で結んだ関数を使用している。Takahashi<sup>70</sup> らも相対湿度を変数としていることは同様であるが、85%RH 以上程度の高湿度域では ASR 膨張はほとんど抑制されないというモデルを用いている。

このように、ASR 膨張の湿度依存性を相対湿度で表現するモデルは、比較的簡便であり直感的に理解しやすい。

図 5.7 に、既往の実験的研究と併せて、相対湿度を変数とした湿度依存性モデルの代表的なものを示した。図のように、相対湿度を変数としたモデルの中でも相対湿度と ASR 膨張の関係は一様でなく、相対湿度と ASR 膨張との関係については明確な関係性が判明していない現状を反映している。

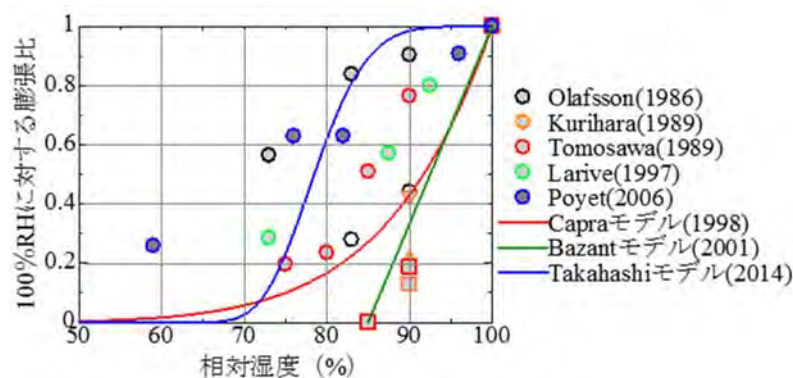


図 5.7 湿度依存性モデル例

一方、Poyet ら<sup>80</sup> は、相対湿度と膨張比の関係が、使用する材料や温度条件によって異なることから、相対湿度を変数には用いず、空隙に満たされている水の割合 ( $Sr$ ) を変数として取り扱い、ASR 進行速度を以下の式で表現している。

$$\dot{A}(Sr,t) = \alpha_0 \alpha(Sr) [\beta(Sr) - A(Sr,t)] \quad (5.21)$$

ここで、

$\dot{A}(Sr,t)$  : ASR の進行速度、

$\alpha_0$  : ASR の速度を表す材料定数、

$\alpha(Sr)$  :  $Sr$  を変数とした ASR の速度を表す関数、

$\beta(Sr)$  : ASR が可能な領域を表す関数

である。 $\alpha(Sr)$ 、 $\beta(Sr)$  は以下の式で示される。

$$\alpha(Sr) = \left( \frac{\langle Sr - Sr_0^\alpha \rangle^+}{1 - Sr_0^\alpha} \right)^{m_\alpha} \quad (5.22)$$

$$\beta(Sr) = \left( \frac{\langle Sr - Sr_0^\beta \rangle^+}{1 - Sr_0^\beta} \right)^{m_\beta} \quad (5.23)$$

ここで、 $Sr_0^\alpha$  及び  $Sr_0^\beta$  は、湿度限界を表す材料定数である。

Poyet らは、この指標を用いて、既往の実験的研究のうち Tomosawa<sup>77</sup> ら、Larive<sup>79</sup> らの結果を再現することを試みている。解析では FEM により各位置における  $Sr$  を導出し、この  $Sr$  を用いた場合に、実験結果にフィットする各種材料定数を求めている。

Seignol<sup>64</sup> らも既往の研究においてこの  $Sr$  の概念を採用している。このモデルは、要素実験により  $Sr$  を求めることが難しく解析によってしか検証ができていないのが現状であり、今後の更なる検証が望まれている。

### 5. 3. 3 水分移動のモデル化

コンクリートの水分移動モデルに関しては、これまで多くの研究がなされており、それらを網羅することは限りなく困難である。そこで本項では Weerheijm 著「Understanding the Tensile Properties of Concrete<sup>83</sup>」に記載されている P. Moone らが作成したコンクリートの水分移動に関するレビューや多田<sup>84</sup>のレビュー、連続体内の拡散を解説したいくつかの参考書<sup>85</sup>を基に、まず水分移動のモデル化における考え方を整理し、既往の研究における水分移動解析の要点をとりまとめる。

また、健全なコンクリートでの水分移動解析手法を説明したのち、ASR 劣化が生じているコンクリート部材で想定される、ひび割れ等の損傷を受けたコンクリートにおける水分移動のモデル化について取りまとめを行う。

#### (1) 健全なコンクリートにおける水分移動のモデル化

水分移動の機構としては大きく、拡散、毛管流あるいは表面流といった分類が考えられる。不飽和であるコンクリートの水分移動モデルにおいて、基本的な支配方程式として当初広く使用されていたものとしては Darcy 則（多孔質媒体における水の流速を透水係数と水頭

<sup>83</sup> Weerheijm, J.: "Understanding the Tensile Properties of Concrete", Woodhead publishing, (2013)

<sup>84</sup> 多田眞作: "水分移動と乾燥収縮機構", コンクリート工学, Vol. 43, No. 5, (2005)

<sup>85</sup> H. メーラー著, 藤川辰一郎訳, "固体中の拡散", 丸善出版

勾配の積で表した経験則) を不飽和状態へと拡張した L. A. Richards<sup>86</sup>による下式が知られている。

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot (K(g + \nabla \psi)) = 0 \quad (5.24)$$

ここで、

$\theta$  : 体積含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )、

$\psi$  : 毛管ポテンシャル ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )、

$K$  : 透水係数 (s)、

$g$  : 重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) である。

上式では、コンクリート中の体積含水率の経時変化は、重力と毛管張力による圧力の勾配によって計算されるとしており、透水係数が毛管張力⇐含水率の関数で表されるということを示した点において広く受け入れられた。以降、様々な研究者が式(5.24)を改良した形で水分移動を表現している。例えば、Klute<sup>87</sup>は質量含水率  $X$  を使用して水分移動の駆動力を下式で表現している。

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \nabla \cdot (Kg + D \nabla X) = 0 \quad (5.25)$$

ここで、 $D$  : 拡散係数 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) であり、次式で表される。

$$D = K \frac{\partial \psi}{\partial X} \quad (5.26)$$

上記の研究は何れもコンクリート中の液状水の移動を想定したモデルであるが、Philip<sup>88</sup>の研究により、コンクリートの水分移動においては液状水の移動と水蒸気の移動は明確に区別する必要があることが示され、さらに Philip、De Vries<sup>89</sup>の研究により、拡散係数が温度や含水率に依存するモデルへと拡張された。

---

<sup>86</sup> L. A. Richards: "Capillary conduction of liquids through porous mediums", Physics, Vol. 1, pp. 318-333 (1931)

<sup>87</sup> A. Klute: "A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials", Soil Science, Vol. 73, No.2, pp. 105-116 (1952)

<sup>88</sup> J. R. Philip: "Some recent advances in hydrologic physics", Journal of the Institute of Engineers Australia, Vol. 26, pp. 255-259 (1954)

<sup>89</sup> J. R. Philip and D. A. de Vries: "Moisture movement in porous materials under temperature gradients", Transactions, American Geophysical Union, Vol. 38, No.2, pp. 222-232 (1957)



1983年には、Kiessl<sup>90</sup>によって、含水率ではなく相対湿度を駆動力とした支配方程式が提案され、Hens<sup>91</sup>によって、含水率、相対湿度、何れを駆動力とした場合にも物理学的には正しいことが証明された。以降、水分移動の駆動力としては相対湿度を使用したものや、質量含水率によるもの、あるいは後述するように飽和率（飽和質量含水率に対する割合）で示したものが使用されている。1980年代以降の研究では、駆動力として含水率あるいは飽和含水率を用いることが多くなっているが、これは相対湿度と比較して実験的に求めることがより簡便であるためである。

近年の水分移動のモデル化は、水の形態として、液状水と水蒸気双方の移動を考慮できるよう、連続体理論の局所平衡仮定に基づいた下式<sup>92</sup>のような表現がなされることが多くなっている。

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (g_l + g_v) = G_m \quad (5.27)$$

ここで、

$w$  : 質量含水率 (kg/m<sup>3</sup>)、

$g_l, g_v$  : それぞれ液状水と水蒸気のフラックス (kg/(m<sup>2</sup>s))、

$G_m$  : 湧出項 (kg/(m<sup>3</sup>s))

である。式(5.27)において液圧の勾配と毛管圧の勾配が等しいと仮定すると、以下式が導出される。

$$\frac{\partial w}{\partial p_c} \frac{\partial p_c}{\partial t} + \nabla \cdot (K \nabla p_c) = G_m \quad (5.28)$$

水和などによる水の消費や、水和物の分解による水の増大を考慮しない場合、 $G_m = 0$ であるため、結果として式(5.28)は、Richards<sup>86</sup>らの提案した式(5.24)と非常によく似た形をとる。上記のような支配方程式を数値解析に使用するためには、飽和度 $S(p_c)$ の関数形や $K_l$ 、 $K_v$ といった定数を求めることが重要となる。

飽和度 $S(p_c)$ は、最大質量含水率が既知であれば水分特性曲線 $w(p_c)$ と相互変換が可能である。一般に吸着等温線と呼ばれる曲線は、同一温度時の相対湿度の変化に対する水分吸着

<sup>90</sup> K. Kiessle: “Kapillarer und dampfförmiger feuchtetransport in mehrschichtigen bauteilen”, Universtat-Gesamthochshule Essen (1996)

<sup>91</sup> H. Hens: IEA Annex 24 “Heat, Air and Moisture Transport” (1996)

<sup>92</sup> Saouma, V. E.: Numerical Modeling of AAR, CRC Press, (2014)

及び毛管凝縮による質量増分を表しているが、ケルビン式に基づいて、相対湿度軸を毛管張力に置き換えたものが水分特性曲線である。すなわち、吸着等温線を求めることが飽和度

$S(p_c)$  の関数形を求めることに直結している。

吸着等温線をモデル化する試みとしては、大きく二つのアプローチがある。

一つは、小孔の空隙から水分が充填するとの前提にたち、空隙構造を仮定することで空隙構造から吸着等温線を導出するものであり、Hillerborg<sup>93</sup>や下村ら<sup>94</sup>、半井ら<sup>95</sup>の研究がある。このモデルでは、吸着等温線に生じる、脱着時と吸着時のヒステリシスを考慮することができないが、石田ら<sup>96</sup>は、インクボトル効果を考慮してヒステリシスを示す実験値に合うように半井らのモデルを修正している。

他方、空隙構造を考慮せず、経験的に吸着等温線をモデル化するアプローチとしては、岡島ら<sup>97</sup>、Thierry ら<sup>98</sup>、内海ら<sup>99</sup>の研究があり、材齢によるセメント硬化体の変化に応じた吸着等温線の変化を考慮できるモデルとしては、Xi ら<sup>100</sup>、Jonasson ら<sup>101</sup>、丸山ら<sup>102</sup>の研究がある。

しかしながらセメント水和物の主成分であるカルシウムシリケート化合物 (C-S-H) は、材齢だけでなく乾燥状態によってもその水分吸着性状が異なることが明らかになっているため、精緻なモデル化を実施するためには更なる検討が必要とされている。

上記の議論を踏まえて、実際のコンクリート中の水分移動を数値解析で求める手法としては、みかけの拡散係数を仮定して水分移動を表現することが簡便である。つまり、本来は物質の状態と温度のみで一義的に決まるはずの拡散係数を、水の存在状態の配分を表現できるよう含水率や相対湿度の関数として表し、拡散係数が見かけ上コンクリート中の含水

---

<sup>93</sup> A. Hillerborg: "A modified absorption theory", Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 809-816 (1985)

<sup>94</sup> 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp. 35-45 (1995)

<sup>95</sup> 半井健一郎, 石田哲也, 岸利治, 前川宏一: セメント硬化体組織構造の温度依存性に基づく熱力学連成解析の高度化, 土木学会論文集, No. 802, V-69, pp. 61-78 (2005)

<sup>96</sup> 石田哲也, R. P. Chaube, 岸利治, 前川宏一: 任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル, 土木学会論文集, No. 564/V-35, pp. 199-209 (1997)

<sup>97</sup> 岡島達夫, 水谷章夫, 河辺伸二, 志村欣一: モルタルの等温吸着特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. A, pp. 349-350, (1989)

<sup>98</sup> J. Ph. Thierry, G. Chanvillard: "Autogenous and drying shrinkage modeling: from paste to concrete" Proc. of. Int. RILEM Symp. on Concrete Modelling - CONMOD'08, 26-28 May, Delft, The Netherland, pp. 337-344, (2008)

<sup>99</sup> 内海秀幸: セメント硬化体の水蒸気吸着等温関係式, 土木学会論文集E, Vol. 64, No. 4, pp. 560-571, (2008)

<sup>100</sup> Y. Xi, Z. P. Bazant, H. M. Jennings: "Moisture diffusion in cementitious materials Adsorption Isotherms" Advn. Cem. Bas. Mat., pp. 258-266 (1994)

<sup>101</sup> J.-E. Jonasson: "Modelling of Moisture Isotherms Including Alkali Effects" Proceedings of Workshop Water in Cement Paste and Concrete, Hydration and Pore Structure, Skangen, Denmark 7-8 October 1999, The Nordic Concrete Federation pp. 28-48, (2000)

<sup>102</sup> 丸山一平, 五十嵐豪: セメント硬化体の水蒸気吸着等温線モデル, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 664, pp. 1033-1041, (2011)

率に依存するとして記述することが行われている。

拡散係数の含水率依存性を表現する式として Gardner and Mayhugh<sup>103</sup>は次式を提案している。

$$D_w(w) = D_{w0} \exp\left(\beta \frac{\theta - \theta_0}{\theta_{cap} - \theta_0}\right) \quad (5.29)$$

ここで、

$D_{w0}$  : 質量含水率  $\theta_0$  のときの拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、

$\theta_{cap}$  : 毛管空隙が満たされる質量含水率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )、

$\beta$  : フィッティングパラメータ

である。 $D_{w0}$  に関して、Brutsaert<sup>104</sup>は以下のように表現している。

$$D_{w0} = \gamma \left( \frac{A}{\theta_{cap} - \theta_0} \right)^2 \quad (5.30)$$

ここで、 $A$  : 材料の吸着性能を表す定数 ( $\text{m}/\text{s}^{1/2}$ )、 $\gamma$  : フィッティングパラメータである。  
また、Bazant<sup>105</sup>による著名な研究では、相対湿度の関数として以下を提案している。

$$D(RH) = D_1 \left( \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left( \frac{1 - RH}{1 - RH_c} \right)^n} \right) \quad (5.31)$$

ここで、 $D_1$  : 相対湿度 1 のときの拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $\alpha_0$  : 最大拡散係数と最小拡散係数の比である。同様に、Mensi<sup>106</sup>は、相対湿度の指数関数として、以下の式を提案している。

$$D(RH) = A \cdot \exp(B \cdot RH) \quad (5.32)$$

---

<sup>103</sup> W. R. Gardner and M. S. Mayhugh: "Solutions and Tests of the Diffusion Equation for the Movement of Water in Soil", Soil Science Society of America Journal, Vol. 22, No.3, pp. 197-201 (1958)

<sup>104</sup> W. Brutsaert: "University constants for scaling the exponential soil water diffusivity?", Water Resources Research, Vol. 15, No.2, pp. 481-483 (1979)

<sup>105</sup> Z.P. Bazant, L.J. Najjar: "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete", Materials and Structures, Vol. 5, No.25, pp. 3-20 (1972)

<sup>106</sup> R. Mensi, P. Acker, A. Attolou: "Séchage du béton : analyse et modélisation", Materials and Structures, Vol. 21, pp. 3-12 (1988)

ここで、 $A, B$  : フィッティングパラメータである。

上式に記載の各係数はボルツマン-マタノ法などを利用して実験により求めることができる。このように、拡散係数を含水率や相対湿度の関数として表現することで、水分移動の非線形性を説明することが一般的である。国内でも、阪田ら、秋田ら、橋田らが同様の手法を用いて解析を行っている。参考までに阪田ら<sup>107</sup>と秋田ら<sup>108</sup>の拡散係数導出式を以下に記す。

$$D_w(w) = D_{w0} + \frac{D_s - D_0}{1 + \left( \frac{100 - w}{100 - w_c} \right)^n} + \frac{D_s - D_0}{1 + \left( \frac{100}{100 - w_c} \right)^n} \frac{w - 100}{100} \quad (5.33)$$

$$D(R) = D_{Ri} \left( 0.01 + \frac{0.99}{1 + (k(h - R))^m} \right) \quad (5.34)$$

$$D(R) = D_{Ri} \left( 0.01 + \frac{0.99}{1 + (k(h - 2n + R))^m} \right) \quad (5.35)$$

拡散係数の関数形は、研究者により微妙な違いがあるものの何れも実験的に求められるもので物理的な意味合いはないようである。

## (2) ひびわれ等の劣化を有するコンクリートにおける水分移動モデル

劣化がすでに進行しているコンクリートの水分移動を表現するための考え方としては、大きく以下の三つに分類される。

- 1) dual-porosity
- 2) dual-permeability
- 3) discrete fracture models

それぞれの考え方及び長所、短所は以下の通りある。

dual-porosity モデルは、劣化したコンクリートが“健全なコンクリート”と“劣化部”から構成され则认为るもので、水分移動においては劣化部の性状が支配的と考えられ、健全部での移動及び劣化部から健全部への移動はほとんど考慮しない。健全部と劣化部にお

<sup>107</sup> 阪田憲次ほか：乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究，土木学会論文集，No. 318， pp. 145-152，1981

<sup>108</sup> 秋田宏ほか：毛管作用に基づいたモルタル中の水分移動解析，セメントコンクリート論文集，No. 51，pp. 624-629，1997

ける支配方程式は例えば以下のように記される<sup>109</sup>。

$$\text{劣化部：} \quad \frac{\partial w_f}{\partial t} + \nabla \cdot (D_f \nabla w_f) + \Gamma = 0 \quad (5.36)$$

$$\text{健全部：} \quad \frac{\partial w_m}{\partial t} - \Gamma = 0 \quad (5.37)$$

ここで、 $\Gamma$ が劣化部から健全部への水部にどう速度を表している。このモデルの長所は、手法そのものの単純さにあり、主な短所としては、健全部そのものの水分移動性状を表現することが難しいことである。

dual-permeability モデルは、1960 年に Barenblatt<sup>110</sup>らが最初に提案したとされているもので、劣化部と健全部双方の水分移動を考慮する。そのため、一つの材料のなかに異なる水分移動性状を有した空隙構造を持つことを仮定する。劣化部と健全部は異なる水分保持特性（飽和含水率）を有し、水分移動としては、劣化部内の移動、健全部の移動、劣化部と健全部間の移動を考慮する必要がある。健全部と劣化部における支配方程式は例えば次式のように表現される。

$$\text{劣化部：} \quad \frac{\partial w_f}{\partial t} + \nabla \cdot (D_f \nabla w_f) + \frac{\Gamma}{V_f} = 0 \quad (5.38)$$

$$\text{健全部：} \quad \frac{\partial w_m}{\partial t} + \nabla \cdot (D_m \nabla w_m) - \frac{\Gamma}{1-V_f} = 0 \quad (5.39)$$

式中の  $D_f$ 、 $D_m$  のように、劣化部と健全部で見かけの拡散係数を設定することが必要になる。

discrete fracture モデルは、上記の二つと異なり、よりミクロな視点で劣化部を表現することを可能としている。すなわち、劣化部それぞれについて位置や形状、水分移動性状を表現する。Castillo ら<sup>111</sup>は 1972 年に初めて、discrete fracture モデルを採用している。discrete fracture モデルを採用することで、局所的な透水や、異方性をより高度に表現することが可能となるが、解析としてはより多くのインプットデータが必要となるため複雑

<sup>109</sup> Weerheijm, J.:” Understanding the Tensile Properties of Concrete”, Woodhead publishing, (2013)

<sup>110</sup> G. I. Barenblatt et. al.:” Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks” Prikladnaya Matematika I Mekhanika, Vol.25, No.5, pp. 852-864, (1960)

<sup>111</sup> E. Castillo et. al.:” Unconfined flow through jointed rock” Journal of the American Water Resources Association, Vol.8, No.2, pp. 266-281, (1972)

化する。

劣化部の水分移動特性を求める実験的研究としては、長瀧ら<sup>112</sup>、佐藤・下村ら<sup>113</sup>の研究があるが、一般化できるほどの知見は蓄積されておらず、例えば石田ら<sup>114</sup>のように、ひび割れ部の水分移動係数を感度解析によって確認し、採用することが現実的な手段となっている。

#### 5. 3. 4 熱移動のモデル化

熱の移動も水分移動と同様に複数のメカニズムを有しているが、熱移動解析時に考えるべきものとしては、熱伝導、熱対流、熱放射がある。

熱伝導を表現する最も基本的な式は以下に示す Fourier の法則（熱流束は温度勾配に比例するという経験則）である。

$$q_i^{cond} = -k_i \frac{\partial T(x,y)}{\partial x_i} \quad (5.40)$$

ここで、

$T(x,y)$  :  $(x,y)$  座標における温度 (K)、

$q_i^{cond}$  : i 方向の熱フラックス (W/m<sup>2</sup>)、

$k_i$  : i 方向の熱伝導率

である。式中のマイナスは、熱が低いほうへ流れることを意味している。

熱対流は、コンクリートが、異なる温度の水や空気といった流体に晒されているときに生じる熱移動の形態で、次式で表される Newton の冷却則（熱移動量は温度差に比例するという経験則）にしたがう。

$$q_i^{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (5.41)$$

ここで、

$q_i^{conv}$  : 熱対流フラックス (W/m<sup>2</sup>)、

---

<sup>112</sup> 長瀧重義，氏家勲，西岡耕一郎：微細ひび割れを有する コンクリートの透気性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9，pp. 187-192，（1987）

<sup>113</sup> 佐藤博之，下村匠，青山敏幸：ひび割れを有するコンクリートの気体透過抵抗性，土木学会第 52 回 年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp. 744-745，（1997）

<sup>114</sup> 石田哲也，前川宏一：物質・エネルギーの生成・移動と変形・応力場に関する連成解析システム，土木学会論文集，No. 627，pp. 13-25，（1999）

$h$  : 対流熱移動係数 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )、  
 $T_s, T_\infty$  : 表面及び流体の温度 (K) である。

最後に、熱放射は、二つの異なる物質間でのエネルギーの移動であり、基礎式は以下の Stefan-Boltzman の法則（熱輻射により黒体から放出されるエネルギーは熱力学温度の 4 乗に比例するという経験則）で表現される。

$$q^{rad} = eC_s(T_{surf}^4 - T_{fluid,\infty}^4) \quad (5.42)$$

ここで、

$e$  : 放射率、  
 $C_s$  : Stefan-Boltzman 定数である。

解析時に上記の三つの熱移動のモードを選択する場合は、境界条件によって決定されることが多い。

実際にコンクリート中の熱移動に常温域の RC 部材断面内の熱移動において支配的なのは熱伝導といわれている。Philip, de Vries<sup>35</sup> は土壌の分野において、熱伝導を駆動力とした式 (5.40) を拡張して、水の移動による熱の移動を考慮した支配方程式を提案している。コンクリートの分野では、水熱の連成を考慮した Bazant による以下の支配方程式がよく知られている。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} q_i^{cond} + C_w JVT + C_a \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \quad (5.43)$$

ここで、

$\rho C$  : コンクリートの熱容量  
 $C_w$  : 単体積あたりの水の熱容量  
 $C_a$  : 移動する水の吸熱量である。

コンクリートの水熱連成移動に関しては、Bazant 以外にも石田ら、丸山ら、Saouma らのように水和熱の発生を考慮したものもあるが、式中の支配方程式そのものに大きな差異はなく、試験体や現場の計測値から熱容量や熱伝導率を導出し、解析値の妥当性を比較検証するという形式が多い。

また、解析にあたって熱容量や熱伝導率のデータがない場合には、米国土木学会 (ASCE : American Society of Civil Engineers) や Eurocode (EU 域内で統一的にその使用が定め

られた設計基準)などの各種学会で推奨されている温度に応じて変化する「熱容量」,「熱伝導率」を使用することが可能である。

ASCE や Eurocode で提案されている値は以下の通りである。

コンクリートの熱容量を求めるための諸量

ASCE

-珪質骨材使用の場合-

$$\rho C = \begin{cases} 0.005T + 1.7 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C} \\ 2.7 & 200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C} \\ 0.013T - 2.5 & 400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 500^{\circ}\text{C} \\ 10.5 - 0.013T & 500^{\circ}\text{C} \leq T \leq 600^{\circ}\text{C} \\ 2.7 & 600^{\circ}\text{C} \leq T \end{cases} \quad (5.44)$$

-石灰系骨材使用の場合-

$$\rho C = \begin{cases} 2.566 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C} \\ 0.1756T - 68.034 & 400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 410^{\circ}\text{C} \\ 25.00671 - 0.05043T & 410^{\circ}\text{C} \leq T \leq 445^{\circ}\text{C} \\ 2.556 & 445^{\circ}\text{C} \leq T \leq 500^{\circ}\text{C} \\ 0.01603T - 5.44881 & 500^{\circ}\text{C} \leq T \leq 635^{\circ}\text{C} \\ 0.16635T - 100.90225 & 635^{\circ}\text{C} \leq T \leq 715^{\circ}\text{C} \\ 176.07343 - 0.22103T & 715^{\circ}\text{C} \leq T \leq 785^{\circ}\text{C} \\ 2.566 & 785^{\circ}\text{C} \leq T \end{cases} \quad (5.45)$$

Eurocode

$$\rho = \begin{cases} \rho_{20} & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 115^{\circ}\text{C} \\ \rho_{20}(1 - 0.02(T - 115)/85) & 115^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C} \\ \rho_{20}(0.98 - 0.03(T - 200)/200) & 200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C} \\ \rho_{20}(0.95 - 0.07(T - 400)/800) & 400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (5.46)$$

$$C = \begin{cases} 900 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C} \\ 900 + (T - 100) & 100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C} \\ 1000 + ((T - 200)/2) & 200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C} \\ 1100 & 400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (5.47)$$

コンクリートの熱伝導率

ASCE



-珪質骨材使用の場合-

$$k = \begin{cases} -0.000625T + 1.5 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C} \\ 1.0 & 800^{\circ}\text{C} \leq T \end{cases} \quad (5.48)$$

-石灰系骨材使用の場合-

$$k = \begin{cases} 1.355 & 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 293^{\circ}\text{C} \\ 1.0 & 293^{\circ}\text{C} \leq T \end{cases} \quad (5.49)$$

Eurocode

熱伝導率の上限値

$$k = 2 - 0.2451 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.0107 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (5.50)$$

熱伝導率の下限值

$$k = 1.36 - 0.136 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.0057 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \quad (5.51)$$

### 5. 3. 5 鉄筋拘束、外部拘束に関する既往研究

ASR 膨張は圧縮応力下では膨張量が低減することが知られており、Struble and Diamond<sup>115</sup> 及び Larive<sup>12</sup> によると、圧縮応力がおおよそ 10MPa に達すると ASR 膨張が生じなくなるといわれている。

RC 部材においては、コンクリートに ASR 膨張が発生した場合に、コンクリートの膨張が鉄筋に拘束され圧縮応力が導入されるため、拘束鉄筋比が大きい RC 部材では、ASR 膨張の進行に伴って拘束されている軸方向の ASR 膨張速度は小さくなる。拘束が RC 部材内の ASR 膨張に及ぼす影響は極めて大きく、適切な解析ツールの構築において重要なウェイトを占めている。本節では、既往の研究における一軸鉄筋拘束状態における ASR 膨張挙動、及び外部から強制的に応力を付与した条件における ASR 膨張挙動に関する実験的研究を調査した。鉄筋拘束試験に関する既往研究を表 5.3 及び図 5.8 に、外部拘束試験に関する既往研究を

---

<sup>115</sup> Struble, L., and Diamond, S.: "Swelling Properties of Synthetic Alkali Silica Gels" Journal of the American Ceramic Society, Vol. 64, No. 11, pp. 652-655. (1981)

表 5.4 及び図 5.9 にそれぞれとりまとめた。

表 5.3 鉄筋拘束条件における ASR 膨張に関する既往研究

|      |   | 発表年  | 第一著者                    | 文献名                                                                                                            | 収録先                    | 拘束 |
|------|---|------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----|
| 鉄筋拘束 | 1 | 1986 | 本田 <sup>116</sup>       | アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響                                                                                            | JCI                    | 一軸 |
|      | 2 | 1991 | L.Clark <sup>117</sup>  | Modeling the Structural Effects of Alkali-Aggregate Reactions on Reinforced Concrete                           | ACI                    | 一軸 |
|      | 3 | 1992 | Koyanagi <sup>118</sup> | Mechanical Properties of Concrete Deteriorated by Alkali Aggregate Reaction under Various Reinforcement Ratios | 9 <sup>th</sup> ICAAR  | 一軸 |
|      | 4 | 1994 | 矢村 <sup>119</sup>       | ASR による損傷に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究                                                                                     | 材料                     | 一軸 |
|      | 5 | 2004 | Mohammed <sup>120</sup> | ASR Expansion of Concrete Beams with Various Restrained Conditions -612Days of Accelerated Marine Exposure     | 12 <sup>th</sup> ICAAR | 一軸 |

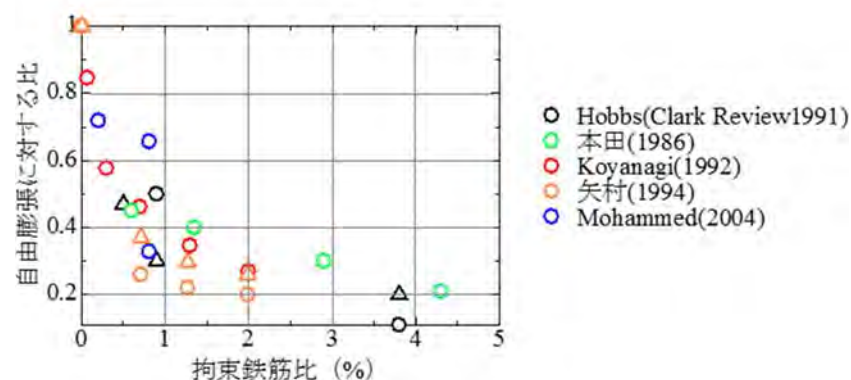


図 5.8 ASR 膨張の鉄筋拘束影響に関する実験

<sup>116</sup> 本田裕夫, 白石文雄, 上田浩吉, 林芳尚: “アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の影響”, コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 169-174, (1986)

<sup>117</sup> Clark, L.:” Modeling the Structural Effects of Alkali-Aggregate Reactions on Reinforced Concrete” ACI Material Journal, No. 33-M8, pp.271-277, (1991)

<sup>118</sup> Koyanagi, W., Rokugo, K., Uchida, Y.: “Mechanical Properties of Concrete Deteriorated by Alkali Aggregate Reaction under Various Reinforcement Ratios,” 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 556-563, (1992)

<sup>119</sup> 矢村潔, 長井吾郎, 道廣一利: “ASR による損傷に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究”, 材料, Vol. 43, No. 491, pp. 970-975, (1994)

<sup>120</sup> Mohammed, T. U., Hamada, H., Yamaji, T., Yokota, H.:” ASR Expansion of Concrete Beams with Various Restrained Conditions -612Days of Accelerated Marine Exposure” 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 1169-1180, (2004)

表 5.4 外部拘束条件における ASR 膨張に関する既往研究

|      |   | 発表年  | 第一著者                      | 文献名                                                                                                     | 収録先        | 拘束 |
|------|---|------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----|
| 外部拘束 | 1 | 1990 | N. Clayton <sup>121</sup> | The effects of alkali-silica reaction on the strength - of prestressed concrete beams                   | ACI        | 一軸 |
|      | 2 | 1992 | B. Durand <sup>122</sup>  | Free Expansion and Stresses in Concrete Related to Alkali-Aggregate Reaction                            | ICAAR      | 一軸 |
|      | 3 | 1997 | Larive <sup>25</sup>      | Apport combines de l'alcali-réaction et des ses effets mécaniques                                       | PhD thesis | 一軸 |
|      | 4 | 2000 | Gravel <sup>123</sup>     | Expansion of AAR Concrete under Triaxial Stresses:Simulation with Instrumented Concrete Block           | ICAAR      | 二軸 |
|      | 5 | 2006 | S. Multon <sup>9</sup>    | Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions                                 | CCR        | 円筒 |
|      | 6 | 2010 | M. Berra <sup>124</sup>   | Influence of stress restraint on the expansive behaviour of concrete affected by alkali-silica reaction | CCR        | 一軸 |

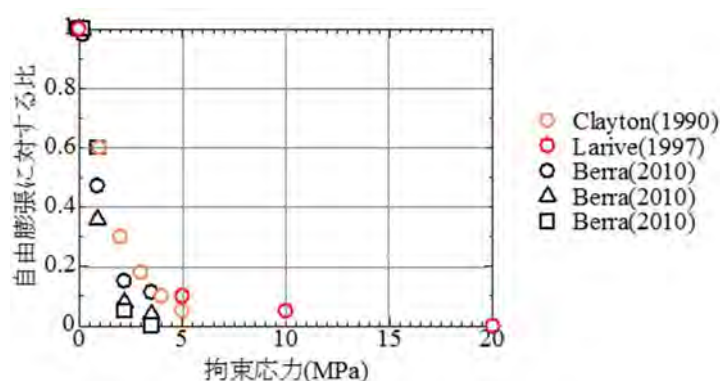


図 5.9 ASR 膨張の外部拘束影響に関する実験まとめ

図 5.8 より、ASR 膨張量は拘束鉄筋比の増加に伴って低下することがみてとれる。これは無拘束コンクリートの ASR 膨張量、膨張速度が同じ場合、拘束鉄筋比が大きいものほど、コンクリートに大きな圧縮応力が導入されるためと理解されている。そのため、拘束鉄筋比が同じであっても、各研究機関で使用したコンクリートの ASR 膨張量、膨張速度、コンクリートの弾性係数、クリープ性状などが異なる場合、発生する応力には差異が生じる。

そのため、図から分かるように、ASR 膨張の低下程度は各研究機関によって異なっている。

<sup>121</sup> Clayton, N., Cumie, R., Moss, R. N. :” The effects of alkali-silica reaction on the strength - of prestressed concrete beams” The Structural Engineer, Vol. 68, No.15, pp. 287-292 (1990)

<sup>122</sup> Durand, B., Roux, R., Houde, J., Blanchette, A. :” Free Expansion and Stresses in Concrete Related to Alkali-Aggregate Reaction” 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 298-310. (1992)

<sup>123</sup> Gravel, C., Ballivy, G., Khayat, K., Ouirion, M., Lachemi, M. :” Expansion of AAR Concrete under Triaxial Stresses: Simulation with Instrumented Concrete Block” 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp. 959-968. (2000)

<sup>124</sup> Berra, M. Faggiani, G., Mangialardi, T., Paolini, A. E. :” Influence of stress restraint on the expansive behaviour of concrete affected by alkali-silica reaction” Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp.1403-1409 (2010)

また、矢村らの実験のように同じコンクリートを用いた場合にも、養生温度を変え ASR 膨張速度を変化させた場合には異なる傾向が見られている。

既往の研究の傾向として、膨張速度が大きいコンクリートほど同じ拘束鉄筋比に対して膨張量は大きくなる傾向があるが、ASR 膨張下で逐次変化する圧縮応力に対して、拘束応力と ASR 膨張速度の関係を詳細に検討した事例はなく、拘束応力と ASR 膨張の関係に言及するまでに到っていない。また、既往の鉄筋拘束試験は一軸拘束がほとんどであり、多軸方向に異なる鉄筋比を有した実験の報告はみられない。

実構造物では、耐震壁のように拘束度に異方性を有する部材が多数存在するため、図 5.8 のデータが拘束異方性のモデルに資することができるかどうかは検討が必要である。

次に図 5.9 の外部拘束応力試験の結果を見ると、拘束応力の増加に伴って ASR 膨張量は低下する傾向が見て取れる。加えて、先述の既往の研究のとおり 10MPa 以上の領域ではほとんど膨張がみられないことが確認される。一方で、Berra<sup>28</sup> らの試験結果によると、同じ調合の異なるアルカリ量を有する試験体を用いて拘束試験を実施した場合に、拘束応力と低下度の関係性は一樣ではない結果が得られている。このことから、外部拘束応力と ASR 膨張量の関係についても ASR 膨張速度の影響を受けることが示唆される。

この原因の一つとして、クリープ影響が挙げられる。多大な拘束応力条件下では、クリープの影響が顕著になるが、ASR 劣化によってクリープ特性が変化している可能性は否定できない。現状、ASR 劣化とクリープ特性との関係は十分に明らかにされておらず、クリープ係数の仮定方法によっては、図の膨張量の値そのものを誤って算出している可能性がある。しかしながら、コンクリートのクリープは、コンクリートの含水状態の影響を受けることが知られており、クリープ試験を実施した際に、ASR の湿度依存性と、クリープの湿度依存性を分離して評価することは極めて困難である。

### 5. 3. 6 拘束影響のモデル化

代表的な研究機関における ASR 膨張に及ぼす拘束影響のモデル化の方法を調査した。現在、モデル化の方法に統一見解はなく、ASR 解析の開発において最も関心がもたれている分野である。そもそも ASR 膨張が、拘束応力により低減されるメカニズムは、以下のように考えられている。

ASR により骨材に膨張圧が生じたとき、周辺のセメントペーストマトリクスには引張応力が導入される。この引張応力が引張強度を超えたときひび割れが発生し、体積が膨張する。しかしながら、ある軸方向に圧縮応力が付与されている場合には、ひび割れは圧縮応力軸方向には導入されず、直行方向に優先的に発生する。このとき、ASG が十分に流動性を有しているとすると、ASG は直行方向のひび割れに移動し、さらに直行方向の膨張圧を増大させる。反対に、この ASG の移動により圧縮応力が働いている軸方向の膨張圧は緩和され、結果として ASR 膨張量が低減される。Dunant<sup>125</sup>らは、このような、拘束応力によるひび割れの発生方

<sup>125</sup> Dunant, C., Scrivener, K.:” Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction

向の変化を解析的に再現している。

以上の想定される現象を踏まえ、ASR 膨張に及ぼす拘束影響のモデル化については、方針により大きく 3 つのグループに分けられる。

### (1) マクロな膨張速度（量）に応力に応じた低減係数をかけることで表現したモデル

このモデルは図 5.9 のように拘束応力に応じて ASR 膨張量が低減するという現象を各軸に個別に評価するものである。例えば Pietruzzak<sup>61</sup> らは、ASR 進行度の抑制を次式のように表現している。

$$\bar{\zeta} = \exp \left( -A_1 \sqrt{\frac{\langle -tr(\sigma) \rangle}{3f_c}} \right) \quad (5.52)$$

ここで、 $\bar{\zeta}$  : 圧縮応力による進行速度の低減係数、 $A_1$  : 材料定数である。

用いている関数の違いはあるが、Leger<sup>126</sup>ら、Bazant<sup>14</sup>らも同様に、応力状態によって決定する低減関数を定義している。このモデルは、直感的で分かりやすく利用しやすいが、例えば、拘束に極端な異方性を有する RC 部材の場合、拘束方向と直行する方向の膨張ひずみは増大することがありえるが、このモデルではこの現象を表現することは難しい。

### (2) ひび割れ部にゲルが流入することで拘束応力の影響を考慮したモデル

ASG のひび割れへの移動による膨張圧の低減という、現在想定されている実現象により近い形で拘束応力の影響を考慮したモデルといえる。Capra・Sellier らは、ASG の膨張によって発生する膨張圧を以下の式で表現している。

$$P_g = M_g \sum n^s \left\langle A^s f V_a^s - \left\langle V_p^s + \frac{b_g}{n^s} tr(\varepsilon) \right\rangle \right\rangle \quad (5.53)$$

式中の  $\left\langle V_p^s + \frac{b_g}{n^s} tr(\varepsilon) \right\rangle$  が ASG が移動可能な空隙の量を表しており、この空隙量によっ

て膨張圧が低減されるということが表現されている。Takahashi<sup>15</sup> らのモデルでも上記の研究とほぼ同様に、ASG の総体積からひび割れの体積を差し引くことで、ASG の膨張圧の低減を考慮している。

### (3) 各方向の拘束応力比に応じてひずみに異方性を与えるモデル

---

induced expansion of concrete” Cement and Concrete Research, Vol. 42, pp.567-576 (2012)

<sup>126</sup> Leger, P., Cote, P, Tinawi, R. :” Finit Element Analysis of Concrete Swelling due to Alkali-Aggregate Reaction in Dams” Computers and Structures, Vol.60, No.4, pp.601-611, (1996)

Multon ら<sup>63</sup>は、図 5.10 の長軸（z）方向に外部拘束応力を与え、円周方向に鋼製リングによる受動的な拘束応力を与えた条件において、各方向への ASR 膨張性状を計測する実験を実施した。

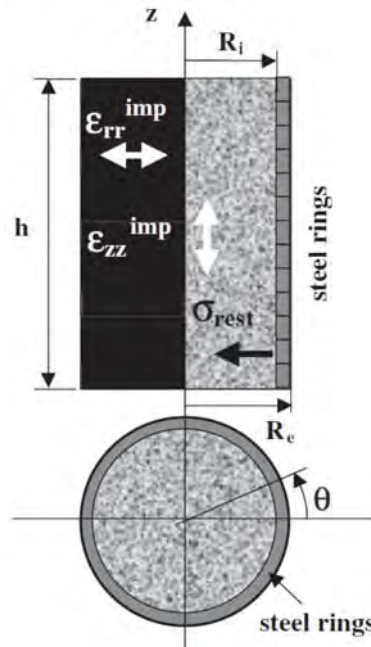


図 5.10 拘束試験状況（Multon ら）

ASR の多軸拘束試験を体系的に実施した研究が多くはない現状において、この論文は多数の論文で引用されるとともに、ASR 膨張の拘束影響を再現するモデル試験体として活用されている。

この実験により、強い拘束を受けている軸と直行する方向に ASR 膨張が卓越することが明らかにされ、多軸拘束下における ASR 膨張の駆動力は、各方向への応力状態によって異なることを示した。この現象を Multon らにより “ASR-expansion transfer” と呼ばれている。Multon らは、各軸方向の圧縮応力の比と ASR 膨張の異方性の関係から、次式のような実験式を提案している。

$$\text{For } D_{zz} \leq 4\text{MPa} \quad \alpha_{ASR} = \frac{\varepsilon_{zz}^{imp}}{\varepsilon_{rr}^{imp}} = \frac{44}{(\sigma_{zz} - \sigma_{mean} - 7.1)^2} + 0.18 \quad (5.54)$$

ここで、

$\alpha_{ASR}$  : ASR 膨張の異方性、

$\varepsilon_i^{imp}$  : i 方向への入力 ASR 膨張量、

$\sigma_{zz}$  : 長軸方向への拘束応力、

$\sigma_{mean}$  : コンクリートにかかる平均拘束応力

である。この式により、各軸方向に入力する ASR 膨張量を、各軸方向の応力状態に応じて振り分けることで、拘束影響を表現している。

### 5. 3. 7 機械的特性変化のモデル化

ASR の進展は、コンクリートにマクロな膨張やひびわれを生じさせるだけでなく、圧縮強度や静弾性係数といった機械的特性の低下も伴う。そのため、将来にわたって部材の健全性を評価する際には、機械的特性の変化を予測する必要がある。

構造物の健全性評価への使用を想定した ASR 膨張の進展と機械的特性の変化の関係を把握することを目的として既往の研究を調査した。表 5.5 に調査対象を示す。

表 5.5 ASR 膨張と機械的特性の関係の調査対象

|   | 筆頭著者                 | 圧縮強度 | 静弾性 | 動弾性 | 超音波 | 拘束有無 | 発表年  |
|---|----------------------|------|-----|-----|-----|------|------|
| 1 | 中野 <sup>127</sup>    | ○    | ○   | ○   | ○   | 有・無  | 1987 |
| 2 | Swamy <sup>128</sup> | ○    | ○   | －   | －   | 無    | 1988 |
| 3 | 富田 <sup>129</sup>    | ○    | ○   | ○   | ○   | 有・無  | 1988 |
| 4 | 小林 <sup>130</sup>    | ○    | ○   | －   | ○   | 無    | 1990 |
| 5 | 尼崎 <sup>131</sup>    | －    | －   | －   | ○   | 有・無  | 1990 |
| 6 | Fan <sup>132</sup>   | ○    | －   | ○   | －   | 有    | 1995 |
| 7 | Swamy <sup>133</sup> | －    | －   | －   | ○   | 無    | 1997 |
| 8 | Ahmed <sup>134</sup> | －    | －   | －   | ○   | 有    | 1998 |

<sup>127</sup> 中野錦一，小林茂広，中上明久：アルカリシリカ反応による損傷度とコンクリートの諸物理特性との関連性の検討，セメント技術年報，Vol. 41，pp. 419-422，（1987）

<sup>128</sup> Swamy, R. N., Al-Asali, M. M.: Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, No. 85-M41, pp. 367-374, （1988）

<sup>129</sup> 富田穰，幸左賢二，中野錦一，中上明久：コア採取による ASR 変状構造物診断の基礎的研究，セメント技術年報，Vol. 42，pp. 335-338，（1988）

<sup>130</sup> 小林一輔，森弥広：ASR を生じたコンクリートの動弾性係数および超音波伝播速度に関する一考察，土木学会論文集，Vol. 420, V-13, pp. 245-250, （1990）

<sup>131</sup> 尼崎省二：超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12, No. 1, pp. 751-756, （1990）

<sup>132</sup> Fan, S., Hanson, J. M.: Effecte of Alkali Silica Reaction Expansion and Cracking on Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams, ACI Structural Journal, No. 95-S44, pp. 488-495, （1995）

<sup>133</sup> Swamy, R. N.: Assessment and Rehabilitation of AAR-agected Structures, Cement and Concrete Composites, Vol. 19, pp. 427-440, （1997）

<sup>134</sup> Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S.: The Static and Fatigue Strength of Reinforced Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, No. 95-M35, pp. 356-368, （1998）

|    |                         |   |   |   |   |   |      |
|----|-------------------------|---|---|---|---|---|------|
| 9  | Ahmed <sup>135</sup>    | - | - | - | ○ | 有 | 1999 |
| 10 | 岩波 <sup>136</sup>       | - | - | - | ○ | 有 | 2002 |
| 11 | Mohammed <sup>137</sup> | ○ | ○ | - | ○ | 無 | 2003 |
| 12 | 久保 <sup>138</sup>       | ○ | ○ | - | - | 無 | 2006 |
| 13 | Giaccio <sup>139</sup>  | ○ | ○ | - | - | 無 | 2008 |
| 14 | 谷口 <sup>140</sup>       | - | - | ○ | - | 無 | 2008 |
| 15 | 中川 <sup>141</sup>       | - | - | - | ○ | 無 | 2008 |
| 16 | 幸左 <sup>142</sup>       | ○ | ○ | - | - | 無 | 2009 |
| 17 | 中川 <sup>143</sup>       | - | - | - | ○ | 無 | 2010 |
| 18 | 上田 <sup>144</sup>       | ○ | ○ | - | - | 無 | 2011 |
| 19 | Moradi-                 | - | - | - | ○ | 有 | 2014 |

調査によって得られた各機械的特性（圧縮強度、静弾性係数、動粘性係数、超音波伝播速度）と膨張率の関係をそれぞれ図 5. 11 から図 5. 14 に示す。各図において、左図は膨張促進を行う以前の各物性値を 1 とした比率を表し、右図は膨張促進を行う以前の状態から損失された各物性値の比率を意味している。また、図中の凡例は引用文献毎に異なるものを使用し、灰色の点は拘束条件下で養生された試験体を示している。

<sup>135</sup> Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S.: Effect of Alkali-Silica Reaction on Bearing Capacity of Plain and Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, No.96-S62, pp.557-570, (1999)

<sup>136</sup> 岩波光保, 横田弘, 奥山和俊, 鳥居和之: ASR 損傷を受けたコンクリート柱の力学挙動と補強方法に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.704, V-55, pp.129-142, (2002)

<sup>137</sup> Mohammed, T. U., Hamada, H., Yamaji, T.: Alkali-Silica Reaction-Induced Strains over Concrete Surface and Steel Bars in Concrete, ACI Materials Journal, No.100-M16, pp.133-142, (2003)

<sup>138</sup> 久保善司, 上田隆雄, 黒田保, 野村倫一: アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1691-1696, (2006)

<sup>139</sup> Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J. M., Batic, O. R.: Mechanical Behavior of Concretes Damaged by Alkali-Silica Reaction, Cement and Concrete Research, Vol.38, pp.993-1004, (2008)

<sup>140</sup> 谷口秀明, 三上浩, 浅井洋, 樋口正典, 藤田学: 高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性に関する研究, 三井住友建設技術研究所報告, No.6, pp.91-96, (2008)

<sup>141</sup> 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: ASR 劣化状態に関する超音波法による評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.793-798, (2008)

<sup>142</sup> 幸左賢二, 久利良夫, 川島恭志, 三浦正嗣: ASR 構造物より採取したコアの力学的特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1036-1047, (2009)

<sup>143</sup> 中川裕之, 横田優, 長尾和明, 松島学: 超音波法による ASR 既存膨張率の算定, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1709-1714, (2010)

<sup>144</sup> 上田尚史, 中村光, 国枝稔, 前野裕文, 森下宣明, 浅井洋: コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.1, pp.28-47, (2011)

<sup>145</sup> Moradi-Marani, F., Kodjo, A. A., Rivard, P., Lamarche, C.-P.: Nonlinear Acoustic Technique of Time Shift for Evaluation of Alkali-Silica Reaction Damage in Concrete Structures, ACI Materials Journal, No.M-2013-004.R1, pp.1-12, (2014)



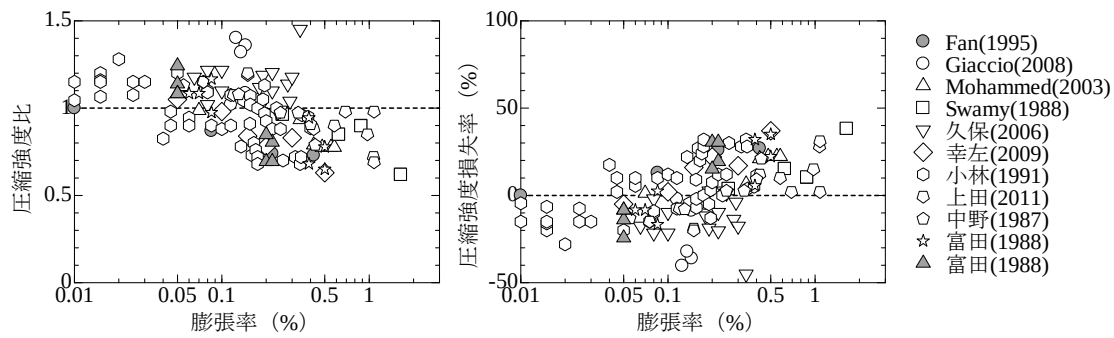


図 5.11 圧縮強度と膨張率の関係

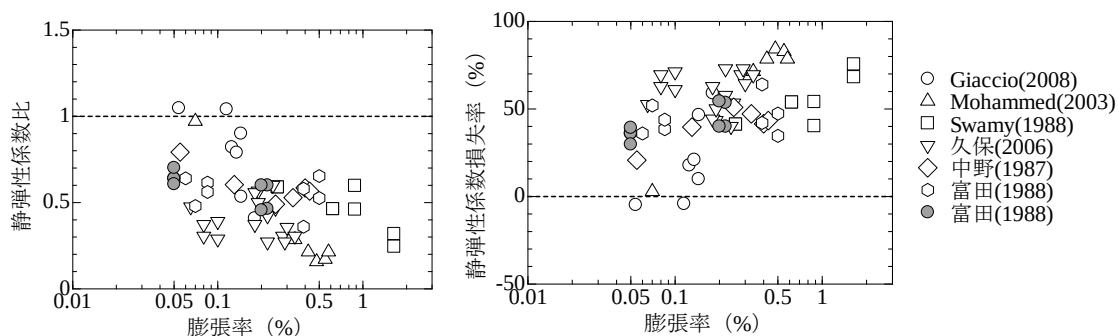


図 5.12 静弾性係数と膨張率の関係

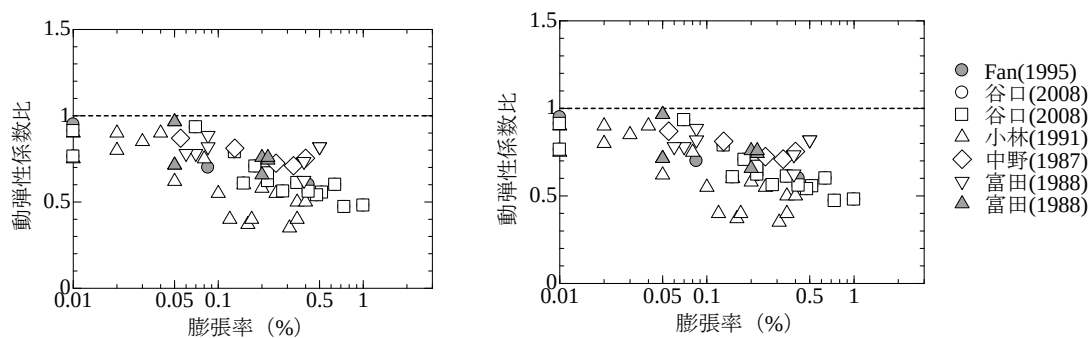


図 5.13 動弾性係数と膨張率の関係

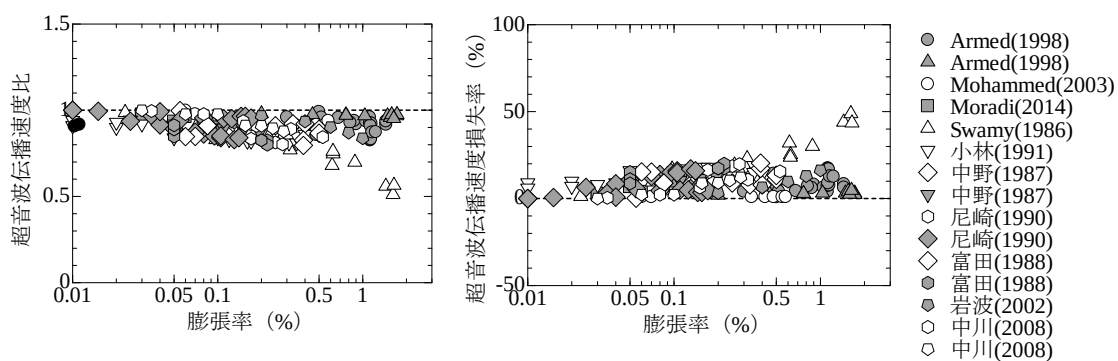


図 5.14 超音波伝播速度と膨張率の関係

何れの機械的特性についても、膨張率が増大するにつれて物性値は低下する傾向が見られる。これは、ASR 膨張によってコンクリート内部に空隙（ひび割れ）が発生していることに起因する。この傾向は特に静弾性係数で顕著であり、場合によっては 8 割以上の低下が生じることもある。

ASR の数値解析ツールにおいては、これらの実験結果を参考に圧縮強度、静弾性係数といった機械的特性の変化が膨張の進展度合と関連付けられているものがあり、膨張量に応じて物性が低下していくという論文は既往の研究でも多くみられる。例えば Pietruzzak<sup>61</sup> は、膨張ひずみの進行率  $\zeta$  (t) をとったとき、静弾性係数の低下率は、下式で表されるとしている。

$$E = E_0 [1 - (1 - B_1) \zeta] \quad (5.55)$$

ここで、

$E$  : ASR 進行度が  $\zeta$  のときの静弾性係数、

$E_0$  : 健全時の静弾性係数、

$B_1$  : 材料定数

である。

Saouma<sup>65</sup> らもまた同様のモデルを、圧縮強度に適用して構造物の応力解析を行っており、そこでは静弾性係数や引張強度も圧縮強度の関数として間接的に導出している。

ただし、上記モデルを使用しようとする場合、あらかじめ実験によって材料定数及び終局膨張ひずみを把握しておく必要があり、実際の RC 部材の健全性評価に適用するには相当数のコア採取が必要になる。

### 5. 3. 8 まとめ

本節では、ASR 膨張挙動モデル化に必要な項目の調査として、ASR の湿度依存性、拘束依存性、並びに部材内の湿度分布を推定する手法として水分移動、熱移動に関する既往の研究を実施した。

ASR 膨張の湿度依存性に関しては、湿度の低下により ASR の進行が停滞することは共通認識としてもたれているが、ASR が完全に停滞する湿度限界が存在するかどうかは現状不明であり、湿度の低下に伴う ASR 膨張の停滞を表現する手法は材料定数によるフィッティング対象の一つとなっていることがわかった。湿度依存性のモデル化については、水分量の変数として相対湿度を使用するものと含水飽和度を使用するものに大別されている。

ASR 膨張の湿度依存性モデルの良し悪しを評価するためには、部材内の温湿度分布が適切に与えられる必要があるため、コンクリート中の水分移動、熱移動も重要な役割を果たす。これまでのところ、ASR 劣化を想定した水分移動のモデルはなく、従来の水分移動解析手法

(健全部と劣化部を含む) が採用されている。

また、ASR 膨張の拘束影響に関しては、拘束の影響、異方性の考え方について、統一見解は現状なく、モデルの根拠となる実験数も少ないことが分かった。原子力施設においては特に、鉄筋による拘束の異方性の影響を解析により再現する必要性が高いが、このような部材における拘束影響を確かめた事例はない。拘束度のモデル化に関しては、それぞれの軸方向の応力に応じて低減する方法、ASG の空隙への移動を考慮することで発生するひび割れの方向に応じて膨張圧を低減する方法、それぞれの軸方向の応力度の割合に応じて膨張圧を振り分ける方法に大別されたが、それぞれのモデル化手法の長所、短所を議論できる土壌はまだ整っておらず、平成 28 年度よりようやく、RILEM の委員会において共通の実験を対象とした共通解析を実施することになっている。

#### 5. 4 まとめ

ASR 膨張の特徴から、原子力施設での ASR 解析ツールに求められる要件は以下のとおりである。

- ① 部材内の温度分布、湿度分布の経時変化を追跡できる。
- ② コンクリートの温度、湿度、拘束条件に応じた適切な ASR 膨張を付与できる。
- ③ ASR 膨張による RC 構造物の劣化を再現できる。
- ④ ASR 膨張による構造物の劣化を想定した状態において、構造安全性能、使用性能、遮蔽性能を判断できる。

国内の解析事例では ASR の進展から構造物の劣化分布を再現し、劣化時点での構造性能を取得することができる時間依存性の解析ツールが限られている。海外のモデルでは、ASR の劣化の進行から将来予測に重きをおき、ASR 膨張の構成則が各要を考慮できるよう整備されている。それぞれの構成則の共通点を以下に示す。

- ・温度の影響は、膨張速度もしくは ASG の生成速度に組み込まれている。
- ・湿度の影響は、膨張量を低減するものと膨張速度を低下させるものに分かれる。

ただし、何れも水分量が大きいほど、膨張速度もしくは量が大きくなる。

拘束の影響に関しては、拘束度を直接的に明示しているものと、拘束によって発生するひび割れ空間による ASG の膨張圧の低減で表現する方法に大別される。

ASR 膨張の湿度依存性に関しては、湿度の低下に伴う ASR 膨張の停滞を表現する手法は、材料定数によるフィッティング対象の一つとなっている。湿度依存性のモデル化については、水分量の変数として相対湿度を使用するものと含水飽和度を使用するものに大別される。

ASR 膨張の湿度依存性モデルを評価するためには、部材内の温湿度分布が適切に与えられる必要があるが、ASR 劣化を想定した水分移動のモデルはなく、従来の水分移動解析手法(健全部と劣化部を含む) が採用されている。

また、ASR 膨張の拘束度のモデル化に関しては、それぞれの軸方向の応力に応じて低減す

る方法、ASG の空隙への移動を考慮することで発生するひび割れの方  
向に応じて膨張圧を低減する方法、それぞれの軸方向の応力度の割合  
に応じて膨張圧を振り分ける方法に大別される。

## 6. ASRに関する国際動向

### (1) 調査概要

表 6.1 に示すように、ASR に関する国際会議として 7 月に開催された ICAAR、8 月に開催された MSSCE 他に参加し、以下のような関連情報を収集した。

表 6.1 ASR に関する国際動向調査

| 名称                                    | 時期             | 場所                |
|---------------------------------------|----------------|-------------------|
| 15 <sup>th</sup> ICAAR <sup>146</sup> | 2016. 7. 3-7   | サンパウロ             |
| RILEM TC 258-AAA <sup>147</sup>       | 2016. 7. 7     | サンパウロ             |
| MSSCE <sup>148</sup> 2016             | 2016. 8. 24-25 | デンマーク工科大学、コペンハーゲン |

### (2) 15<sup>th</sup>ICAAR

第 15 回アルカリ骨材反応国際会議は、基調講演、一般講演、ポスター発表、会議全体に関するラウンドテーブル会議、RILEM TC-258 AAA から構成された。会議プログラムから、テーマごとの発表件数を表 6.2 に示す。ICAAR は、岩石学的観点からの発表が多いことが特徴であるが、その他材料面と構造面の発表も多くなされている。

表 6.2 ICAAR の発表論文のテーマと件数

| テーマ             | 発表件数 | 分類    |
|-----------------|------|-------|
| ASR のメカニズム      | 20   | 材料    |
| ASR への影響要因      | 11   | 材料    |
| ASR の試験法        | 29   | 材料    |
| 抑制対策            | 15   | 材料    |
| 診断および評価         | 22   | 材料・構造 |
| 劣化事例            | 10   | 材料・構造 |
| ASR の構造性能への影響   | 12   | 構造    |
| モニタリング・モデリング    | 13   | 材料・構造 |
| 補修および延命方策       | 8    | 構造    |
| ASR と DEF の複合劣化 | 6    | 材料    |

基調講演は 6 件である。2 件は RILEM の活動状況と最新動向、ホスト国ブラジルの現状について 2 件、北米から ASR を生じたコンクリート構造物の診断・予測について 1 件、フランスから骨材から構造までの広い範囲のモデリング 1 件である。議論となった主な課題は、骨材のアルカリ反応性の試験法、AAR 診断法等である。

会議中の主要な議論を以下に示す。

<sup>146</sup> ICAAR : The International conference on alkali-aggregate reaction

<sup>147</sup> AAA: Avoiding alkali aggregate reactions in concrete - Performance based concept

<sup>148</sup> MSSCE : Materials, Systems and Structures in Civil Engineering

### 1) 試験法

現在 RILEM TC 258-AAA では、骨材のアルカリ反応性試験ではなく、コンクリートとしての膨張性を評価するための試験法(performance test)を目的としている。骨材試験としては、コンクリートプリズム試験 (CPT) が最も信頼性が高いと考えられている。CPT では、ある配合条件で判定基準値を定めているが、試験結果と主にコンクリートの暴露試験等との対応させたものである。CPT では、アルカリ溶脱 (試験中にコンクリートからアルカリが系外に抜け落ちる現象) により試験結果が小さくなることが指摘されている。多くの発表で、CPT におけるアルカリ溶脱量を測定したデータの提示があった。これらの問題を改善するための試験法として、北米からは Concrete Cylinder Test (CCC) (Thoumas ほか)、Alkali-Wrapped Concrete Prism Test (AW-CPT) (Yamada&Kawabata ほか) が提案された。特に AW-CPT と暴露試験体の膨張挙動を、降雨量影響を考慮したシミュレーションにより整合化が図れるとする発表は極めて重要である。これらの試験にはまだ課題はあるものの、今後改良されていくことが期待される。

### 2) 診断

ASR の診断には岩石学的診断が必要であるが、同時に基調講演などでは岩石学的診断の限界も示された。これは、岩石学的観察のレベルの問題であり、Katayama らのように反応性シリカ鉱物の成因の理論的背景やその理解に基づく観察と分析が適切になされる場合にのみ劣化原因の本質に迫れるが、一般的な記載岩石学の範囲では有用な情報を見逃し、役に立っていない場合も多い。観察者の能力に依存する診断方法の普遍化にはまだ時間を要する。

日本ではひび割れの観察・定量評価方法は普及していないが、北米では、確立した方法がある。DRI (Damage Rating Index) や SDT (Stiffness Damage Test) である。DRI はコンクリートの断面のひび割れ観察から、損傷状態をカウントすることで数値化し、劣化原因とその程度を特定する。SDT は繰返し圧縮載荷試験の応力-ひずみ関係で得られるヒステリシスから、消散されたエネルギーを計算し、診断を試みる。室内試験では消散エネルギーと膨張率には高い相関があり、消散エネルギーから既往の膨張率を把握する。

### 3) ASR と DEF の区別

ASR と遅延エトリンガイト生成 (DEF) の複合劣化の指摘が多くなされている。事例として、タイ、ブラジル、中国など 8 件の関連報告があった。これらの判定には根拠が乏しいものが多い。ひび割れをエトリンガイトが埋めているという観察結果を基に DEF の可能性を疑ったものであり、DEF であるという決定的証拠は多くの場合、提示されていない。タイの事例では、Vigor らは強く DEF を疑ったが、Hirono らは組織観察から、多くの研究者が根拠としているエトリンガイト生成は、ASR が発生した後の二次的なもの

である可能性を示した。DEF の診断は国際的にも十分に確立されておらず、AAR と定量的に区別することは困難である。DEF は近年プレキャストコンクリート製品を中心に国内でも報告されているため、国内でも今後の課題として検討が必要である。

#### 4) モデリング・数値解析

ASR の構造性能への影響を材料レベルから考察するスイスやフランスの研究例もあるが、より実構造物に近い規模での挙動を考えるものも多い。ASR は機械的特性として、変形が重要な場合と、耐火性能が重要な場合がある。大規模ダム の劣化事例などが多く、わずかな膨張変形でも機械設備の運用等に支障が出るため、変形解析が重視されている。耐荷性の実験的、解析的検討が日本から多く発表された (Mikata ら、Ueda ら、Takahashi ら)。今後、AAR の数値解析は応力下での異方性やクリープとの連成などが主な論点となる。

#### 5) 抑制

Fournier は、フライアッシュ (FA) の抑制効果評価には、実環境での長期的評価が必要とする。アメリカ合衆国運輸省 (DOT) では、非常に反応性の高いグレイワックに対して FA20%置換が標準である。しかし、供用 20 年後によるひび割れが検出された。CPT では 2 年で 0.04%と判定基準以下で、FA の効果が十分であるとみなされる。一方、同一配合で作製したコンクリートブロックの野外暴露試験では 16 年で 0.14%を超えた。CPT では問題ないとされるが、現場を再現できない。この原因は、アルカリ溶脱と不十分な水分供給と考えられ、適切な試験条件の設定と環境影響の再現が必要である。FA の効果については、ポルトガルの花崗岩、北米のアルカリ炭酸塩反応、JR 東日本の新潟駅周辺の鉄道高架橋について報告された。これらの報告では、反応性鉱物の同定が不十分であり、FA の効果を議論する研究としてはさらなる検討が必要である。

ジオポリマーは、珪酸 Ca 水和物を主体とするセメント系水和物とは異なり、アルミノ珪酸塩系の反応生成物により硬化する。典型的には、焼成粘土と水ガラスを混合する。Ca を含まないので石灰石の脱炭酸による CO<sub>2</sub> ガス発生が低減でき、環境負荷が少ないとされている。アルカリを使用することから、ASR を促進する可能性が検討されている。CPT で、スラグ系のジオポリマーでは ASR 膨張を十分に抑制できていないという結果があった (Spratt limestone、材齢 52 週で 0.14%)。一方、FA 系のジオポリマーでは材齢 40 週までの時点では効果的に膨張が抑制されている。なお、モルタルによる試験ではあるが、メタカオリン系のジオポリマーでも高い抑制効果が得られていた。

#### 6) おわりに

ICAAR は、ASR が問題となり研究が活発な国で開催される。今回は中南米での事例が多く、研究の進展とともに新しく問題視されてきたという背景がある。今回の会議で、

環境条件の影響の指摘もあり、高温多雨で ASR のリスクが高い東南アジアなどからの報告が今後は増えることが予想される。次回開催は 2020 年にポルトガルのリスボンとなった。

### (3) RILEM TC 258-AAA

材料系の研究者からなる Technical Committee が開催され、以下の三つの Work Package の紹介があった。

#### WP1 性能試験方法

供用条件での挙動予測を現実にかき起こるメカニズムで検討する。

耐久性は一般に、暴露条件>セメント種類>W/C (水セメント比)、であるが、ASR について考える必要がある。性能規定型を目指す、限界状態の設定を CEN/TR16349 TC191 の基本を参考とする。混和材 (SCM) の効果、アルカリ総量、現場配合の観点から考える。試験の市場需要を考えると、オプションのない試験法、骨材試験なのか、現場配合なのかという観点が必要である。試験方法を定めるために、アルカリ添加量、試験体からのアルカリ溶脱、骨材からの溶出、ラウンドロビン試験を 38℃と 60℃で検討している。W/C は、60℃では鈍感だが、40℃でペシマムがあり、W/C が溶脱に関係しているという想定である。試験体寸法 10×10×45cm を推奨する。限界値は地域ごとに決める。

#### WP2 暴露との対比

CPT と暴露試験の相関を検討する。

CPT で膨張しない 20%FA 配合でも 20 年したら膨張してきた。暴露の経験では、オースティンとオタワでは反応速度が大きく異なる。欧州中心の Partner プロジェクトで EU7 か所で暴露しており、10 年の暴露コアを回収し分析する。微細構造、機械的特性、アルカリ濃度プロファイル他を検討する。新しい暴露試験は、ポルトガルで 2015.4 に作製し 9 機関で行っている。骨材種類、混和材効果などを検証する。

#### WP3 骨材からのアルカリ溶出の評価を統一するため、試験手順の提案を行う。

### (4) MSSCE 2016

MSSCE2016 で発表された主なテーマを以下に示す。

- 供用期間 Service Life
- 混和材利用コンクリート Concrete with Supplementary Cementitious Materials
- 材料と構造物中の湿分 Moisture in Materials and Structures
- フレッシュコンクリート Fresh Concrete



- 建築材料と室内環境 Building Materials and Indoor Environment
- 歴史的建造物 Historical Masonry
- コンクリートの凍結作用 Frost Action in Concrete
- 土木工学での建設情報モデル化 Building Information Modelling in Civil Engineering
- 材料と構造の教育の革新 Innovation of Teaching in Materials and Structures
- 情報の信頼性、安全、価値 Reliability, Safety and Value of Information
- 寒冷地工学 Cold Region Engineering
- 土木工学の電気化学 Electrochemistry in Civilengineering

以上のうち、ASRに関連するものは混和材（SCM）に関するものである。種々の混和材を適用したコンクリートの特性、ジオポリマー技術など 45 報が報告された。SCM は ASR 抑制に極めて重要であるが、SCM の利用は ASR を抑制するものの、組成が多様にわたり、ASR 以外の強度や収縮などにも影響する。これらの最新情報が、新しい利用法であるジオポリマーとしての特性と合わせて報告された。ASR の抑制効果を直接論じたものはないが、ASR を目的に SCM を利用する際の他の特性に関して、フライアッシュに加え、炉底灰、バイオマス灰、石灰石やスラグ、粘土、ゼオライト、廃棄物などの利用時の、フレッシュ特性から、反応状況、温度影響を含めた強度、塩素浸透、炭酸化、収縮などの研究が報告された。

## 7. まとめ

国内 20 箇所の採石場から入手・選定した、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 種類に対して、「ASR ポテンシャル評価のための骨材試験」を実施し、以下の知見が得られた。

- ①JIS 試験法では「無害」判定となる骨材でも、CPT である RILEM AAR-2、AAR-3、AAR-4 の試験法で、国内の骨材でも ASR 反応性を検知できる。  
ただし、RILEM AAR-3、RILEM AAR-4 では、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。その改善策としてアルカリラッピングが有効であることを確認した。
- ②RILEM AAR-4 (60℃) では、急速膨張性骨材の場合に ASR が生じて膨張しない場合があった。これは、アルカリシリカゲル (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ためと考えられた。
- ③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。
- ④JNES レポートにおける骨材の ASR 試験フロー案を試験により検証し、得られた知見及び文献に基づき、現状で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。

また、「コンクリート構造物の ASR 診断方法」では、試験体製作による劣化進行段階の評価及び ASR 劣化した実構造物による評価を行い、以下の知見が得られた。

- 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）により、劣化進行段階による ASG 生成状況の違いを検出できる。
- ②実構造物のコンクリートコア岩種構成定量から粗骨材／細骨材ともに骨材種類と構成比率が評価できる。
- ③コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察、SEM 観察/EDS 分析及びフィルムスキャナによる写真撮影により、ASR の進行度を評価できる。
- ④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。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。
- ⑤アルカリ収支計算からコンクリート中のアルカリ量を概略推定できる。また、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 及び元素分析により、ASR 反応性及びフライアッシュ (FA) による抑制効果が確認できる。

⑥JNES レポートにおける ASR 診断方法の有効性を検証し、新たに追加した方法も含めて ASR 診断フローの改善案を提案した。

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「数値解析のための調査」では、ASR 膨張の構成則について調査し、構成則の特徴を整理した。

- ・温度の影響は、膨張速度もしくは ASG の生成速度に組み込まれている。
- ・湿度の影響は、膨張量を低減するものと膨張速度を低下させるものに分かれる。  
ただし、何れも水分量が多いほど、膨張速度もしくは膨張量が大きくなる。
- ・拘束の影響に関しては、拘束度を直接的に明示しているものと、拘束によって発生するひび割れ空間による ASG の膨張圧の低減で表現する方法に大別される。
- ・ASR 膨張の湿度依存性のモデル化については、水分量の変数として相対湿度を使用するものと含水飽和度を使用するものに大別される。
- ・ASR 劣化を想定した水分移動のモデルについては、従来の水分移動解析手法（健全部と劣化部を含む）が採用されている。
- ・ASR 膨張の拘束度のモデル化に関しては、それぞれの軸方向の応力に応じて低減する方法、ASG の空隙への移動を考慮することで発生するひび割れの方角に応じて膨張圧を低減する方法、それぞれの軸方向の応力度の割合に応じて膨張圧を振り分ける方法に大別される。

最後に、ASR 関連する国際会議や国際的学術団体 RILEM の技術委員会などに参加し、最新の海外技術情報を収集した。

## < 付 録 >

「4. コンクリート構造物の ASR 診断方法」－「4. 2 劣化進行段階の評価」－  
「4. 2. 3 試験結果」の外観観察及び岩石学的評価の補足  
(各水準のうち、今年度の撮影写真と作成図)

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 1. 可視光源下での展開写真 .....       | 1 -  |
| 2. 実体顕微鏡観察 .....           | 6 -  |
| 3. UV 光源下での展開写真（蛍光法） ..... | 10 - |
| 4. 粗骨材の岩種構成定量 .....        | 15 - |
| 5. コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察 .....  | 19 - |
| 6. 薄片スキャナ .....            | 24 - |
| 7. コンクリート薄片の SEM 観察 .....  | 29 - |
| 8. コンクリート薄片の EDS 分析 .....  | 34 - |

1. 可視光源下での展開写真



付図 1.1 コンクリートコア展開写真 (30381、可視光源、75mm×141mm)

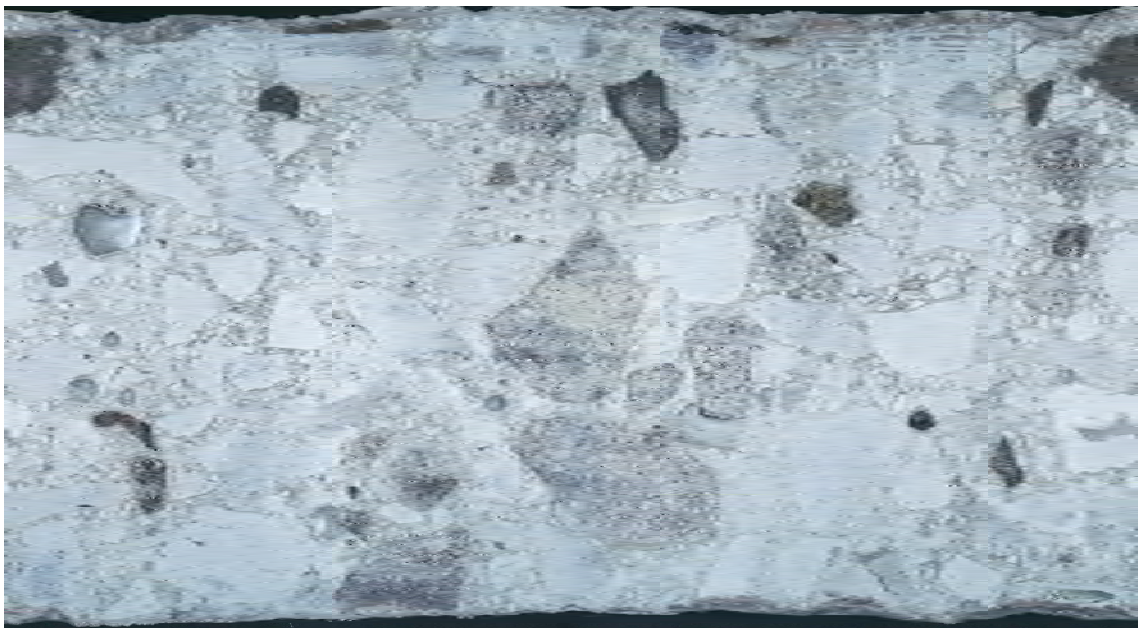


付図 1.2 コンクリートコア展開写真 (55381、可視光源、75mm×141mm)





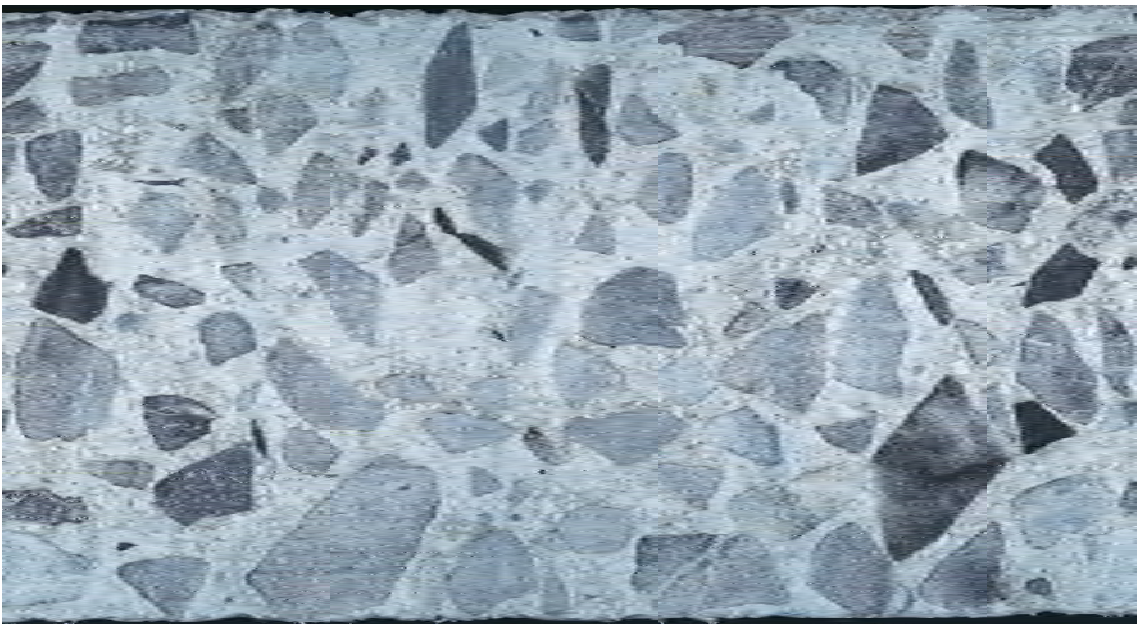
付図 1.3 コンクリートコア展開写真 (F5538m、可視光源、75mm×141mm)



付図 1.4 コンクリートコア展開写真 (F30601、可視光源、75mm×141mm)



付図 1.5 コンクリートコア展開写真 (F55601、可視光源、75mm×141mm)



付図 1.6 コンクリートコア展開写真 (WI55381、可視光源、75mm×141mm)





付図 1.7 コンクリートコア展開写真 (WI425381、可視光源、75mm×141mm)



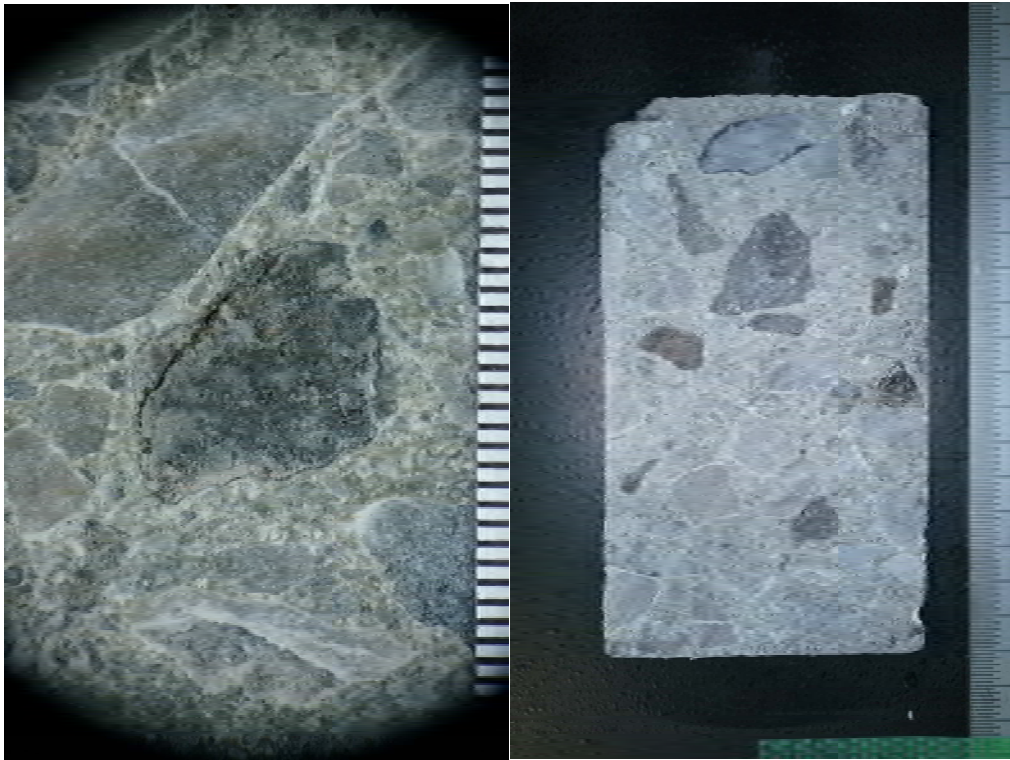
付図 1.8 コンクリートコア展開写真 (WI55601、可視光源、75mm×141mm)



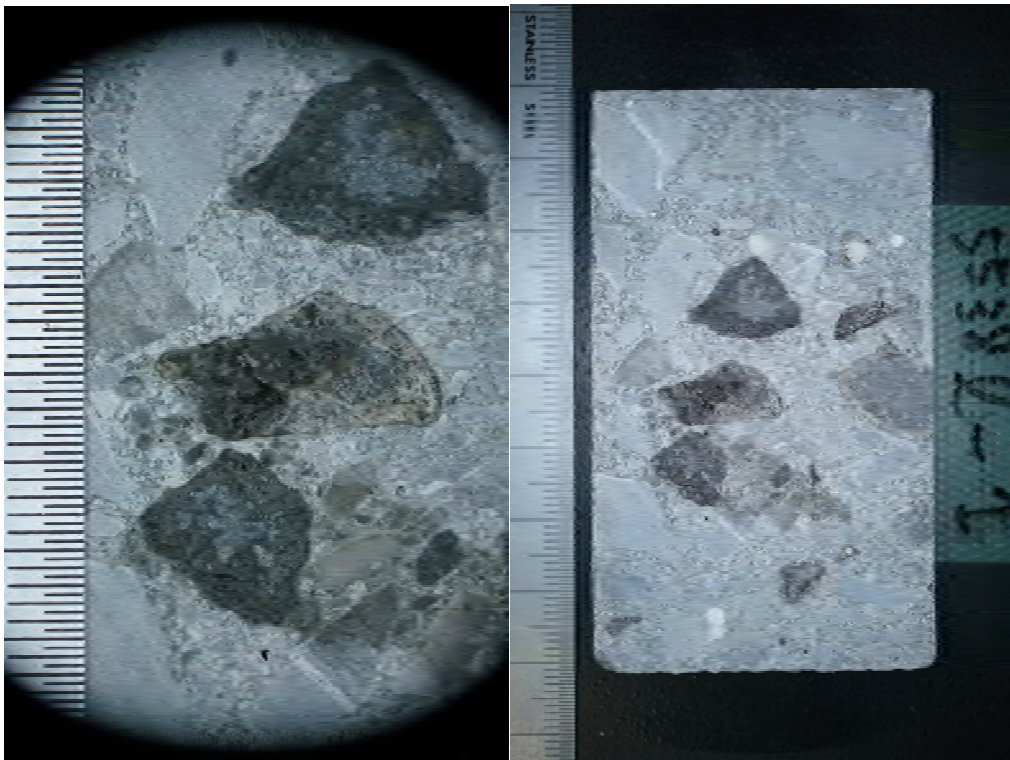


付図 1.9 コンクリートコア展開写真 (I055601、可視光源、75mm×141mm)

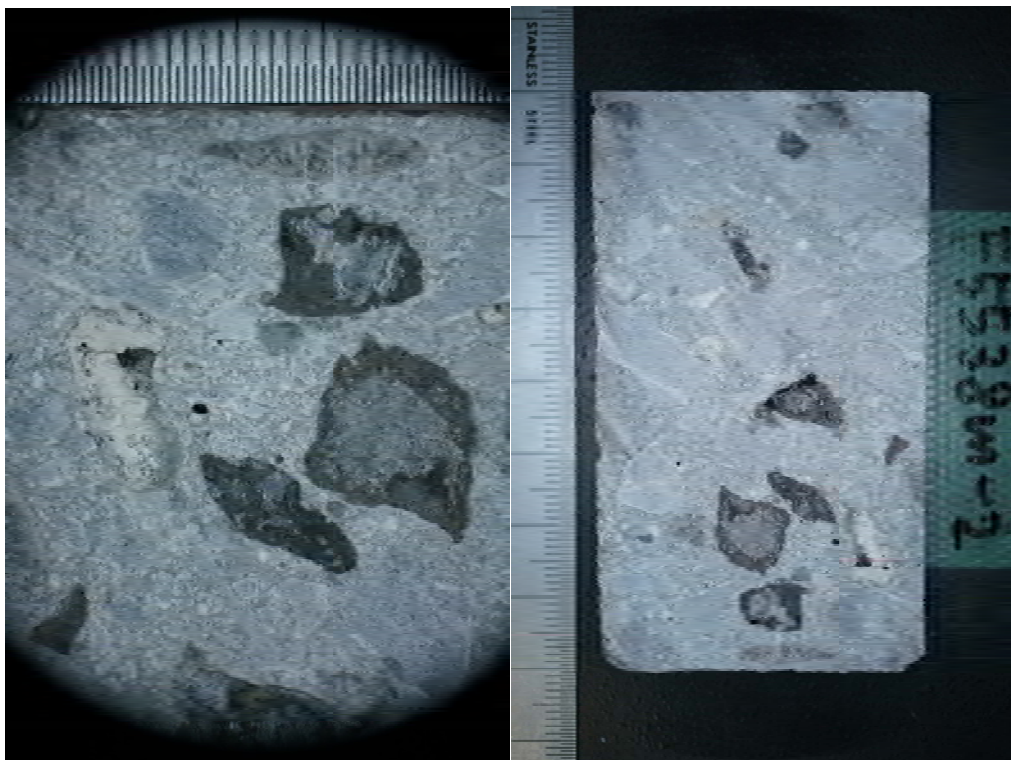
## 2. 実体顕微鏡観察



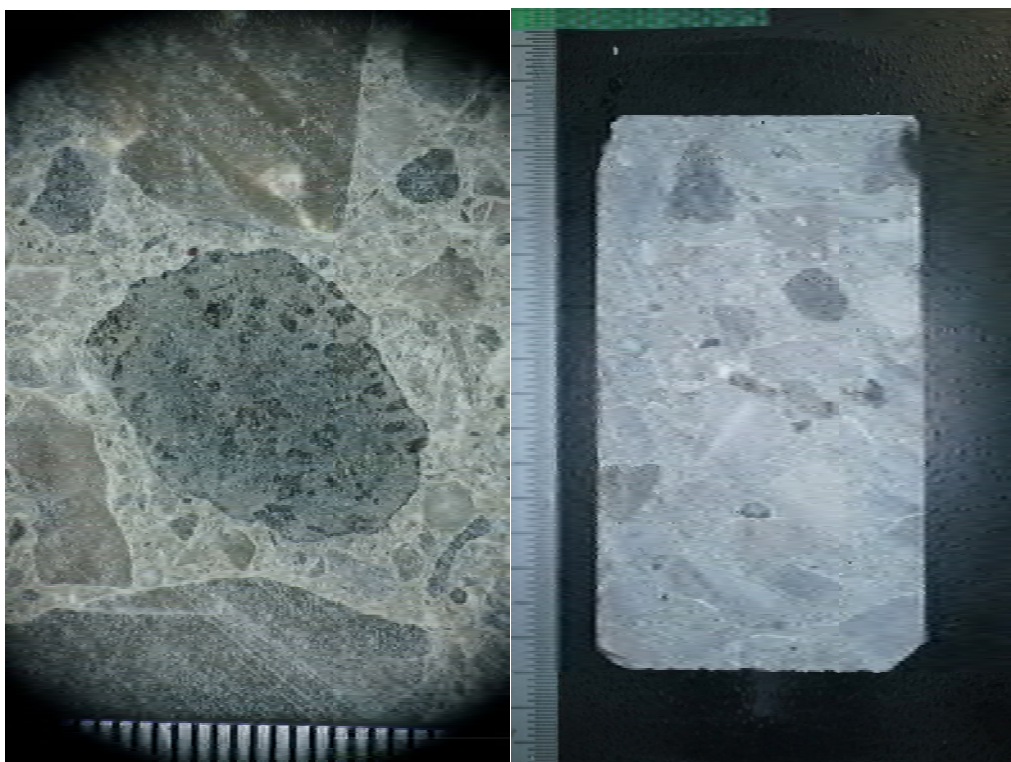
付図 2.1 コンクリートコア切断面観察 (30381、左 : 13×19mm、右 : 45×75mm)



付図 2.2 コンクリートコア切断面観察 (55381、左 : 29×43mm、右 : 45×75mm)

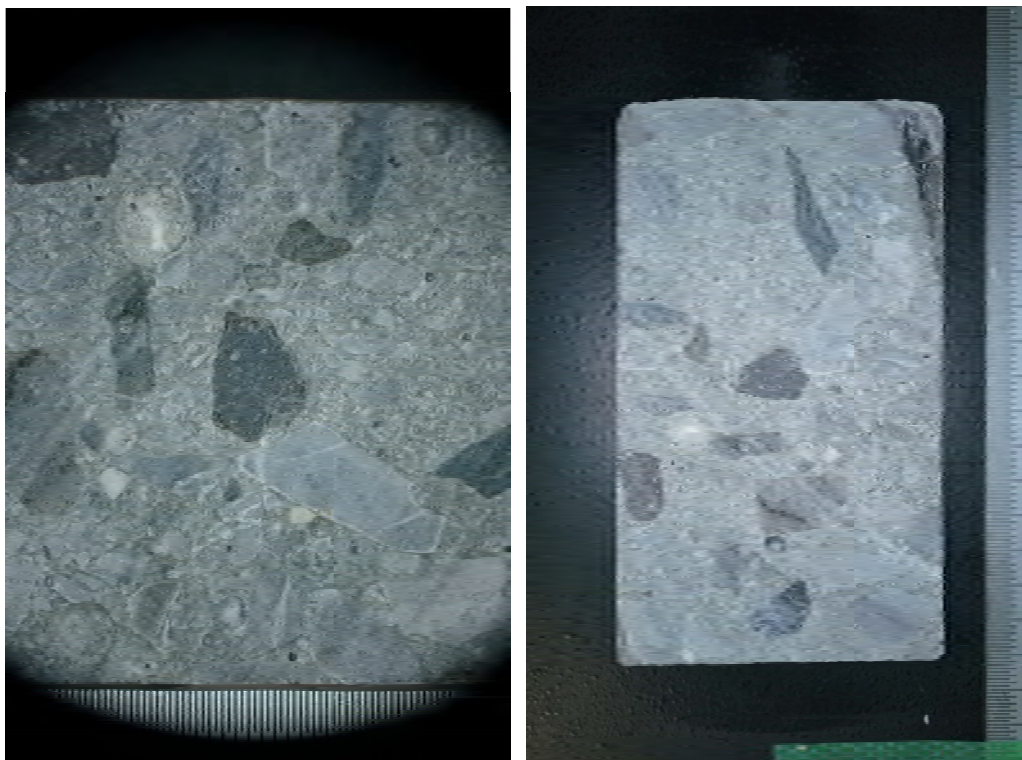


付図 2.3 コンクリートコア切断面観察 (F55381、左 : 29×44mm、右 : 45×75mm)

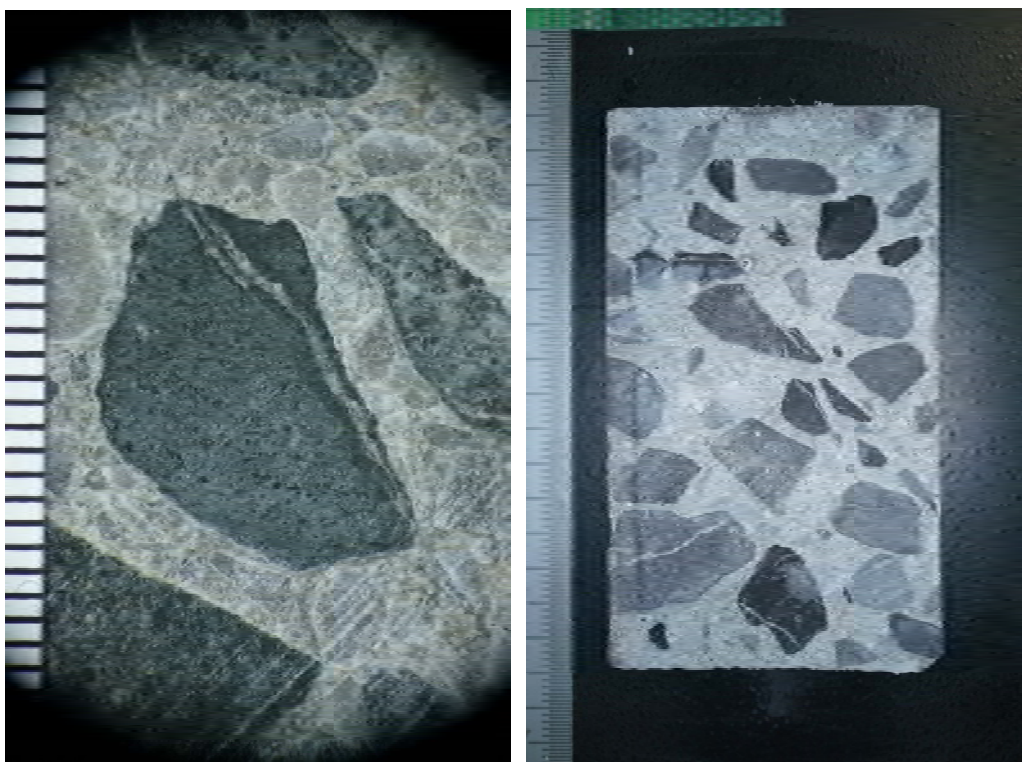


付図 2.4 コンクリートコア切断面観察 (F30601、左 : 13×19mm、右 : 45×75mm)

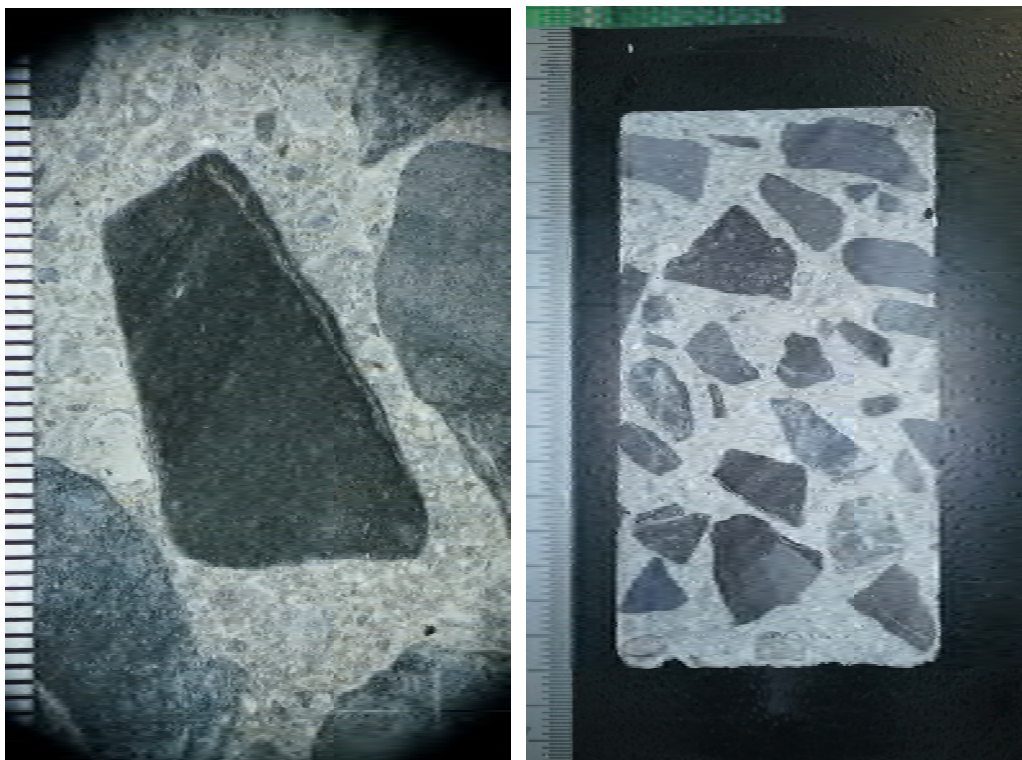




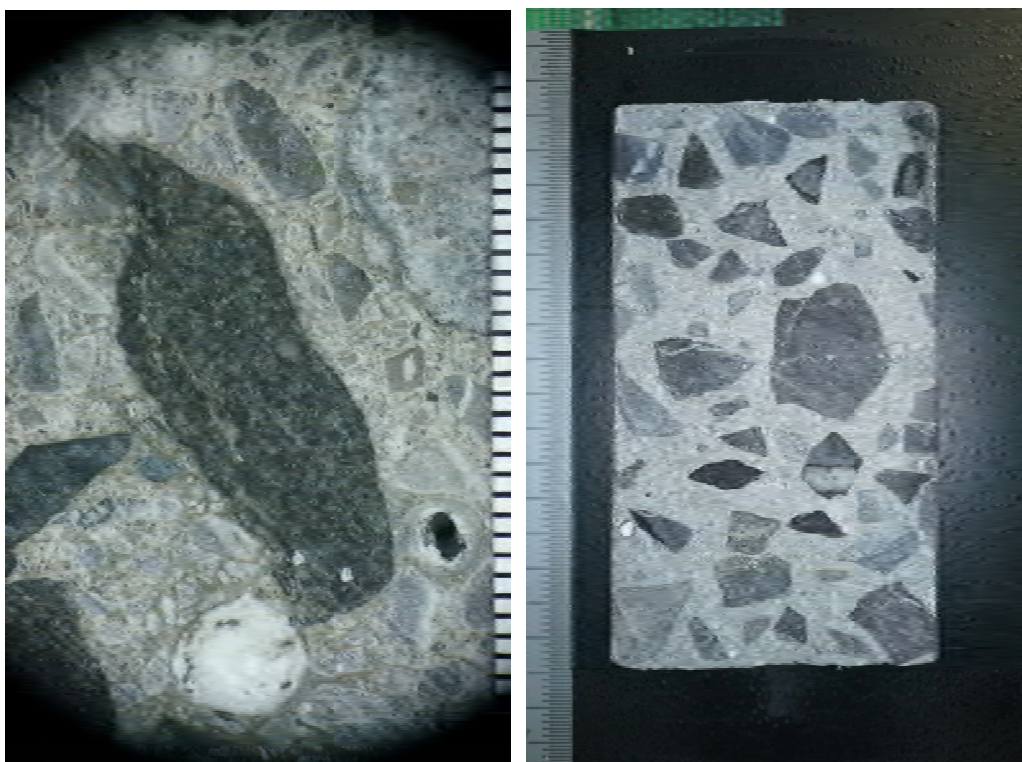
付図 2.5 コンクリートコア切断面観察 (F55601、左 : 19×29mm、右 : 45×75mm)



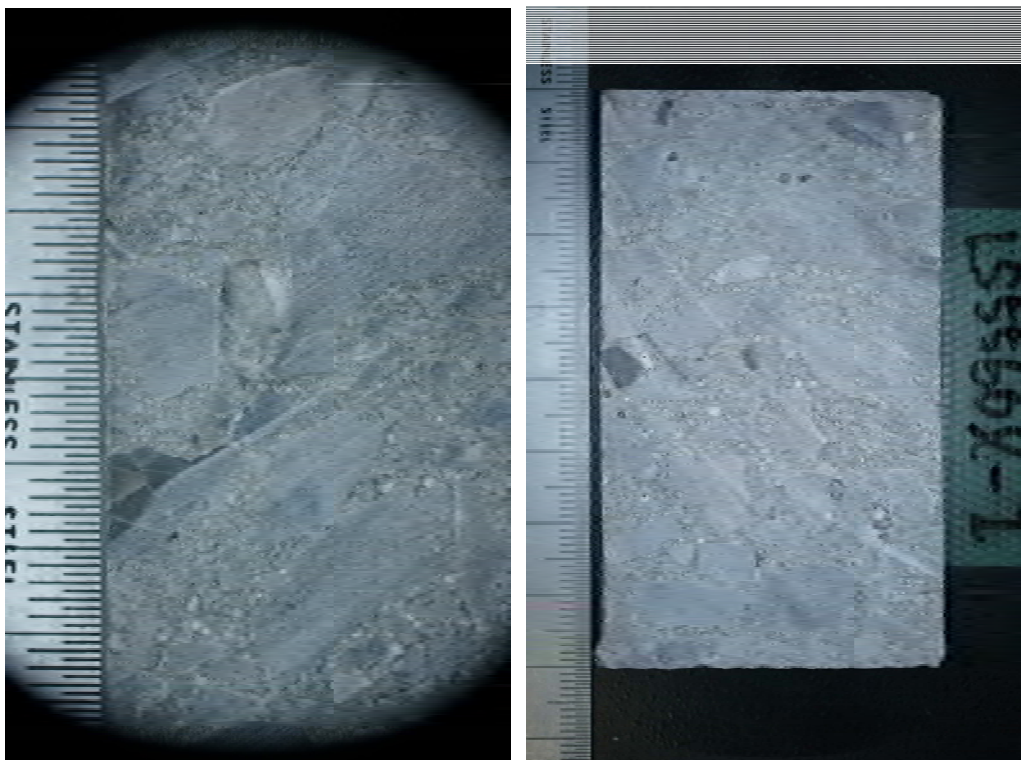
付図 2.6 コンクリートコア切断面観察 (WI55381、左 : 10×16mm、右 : 45×75mm)



付図 2.7 コンクリートコア切断面観察 (WI425381、左 : 17×25mm、右 : 45×75mm)

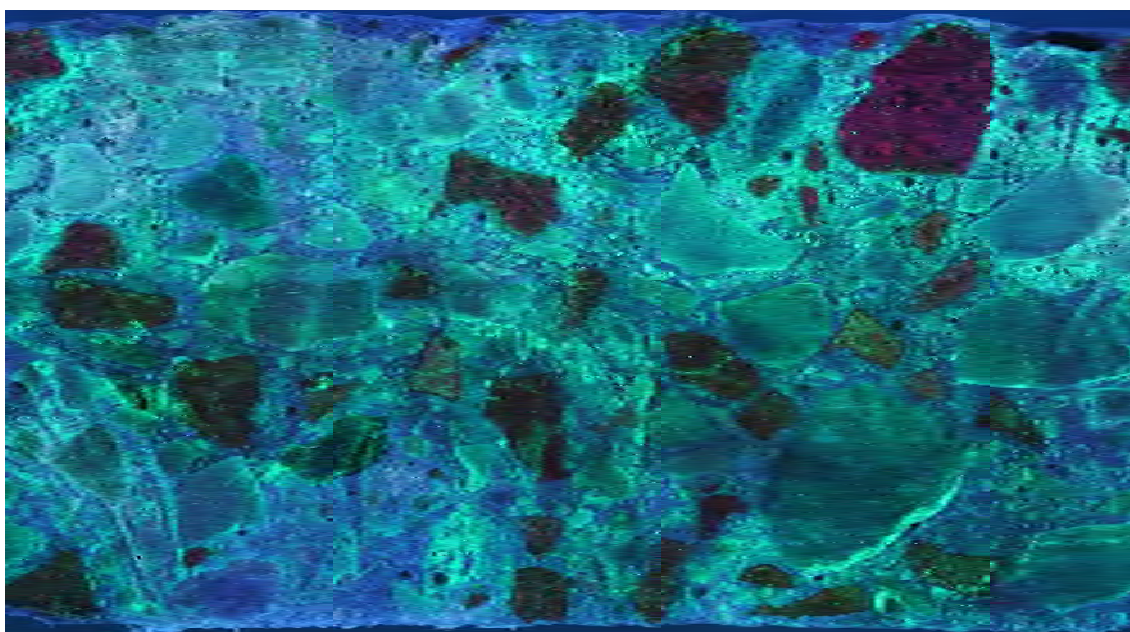


付図 2.8 コンクリートコア切断面観察 (WI55601、左 : 12×18mm、右 : 45×75mm)



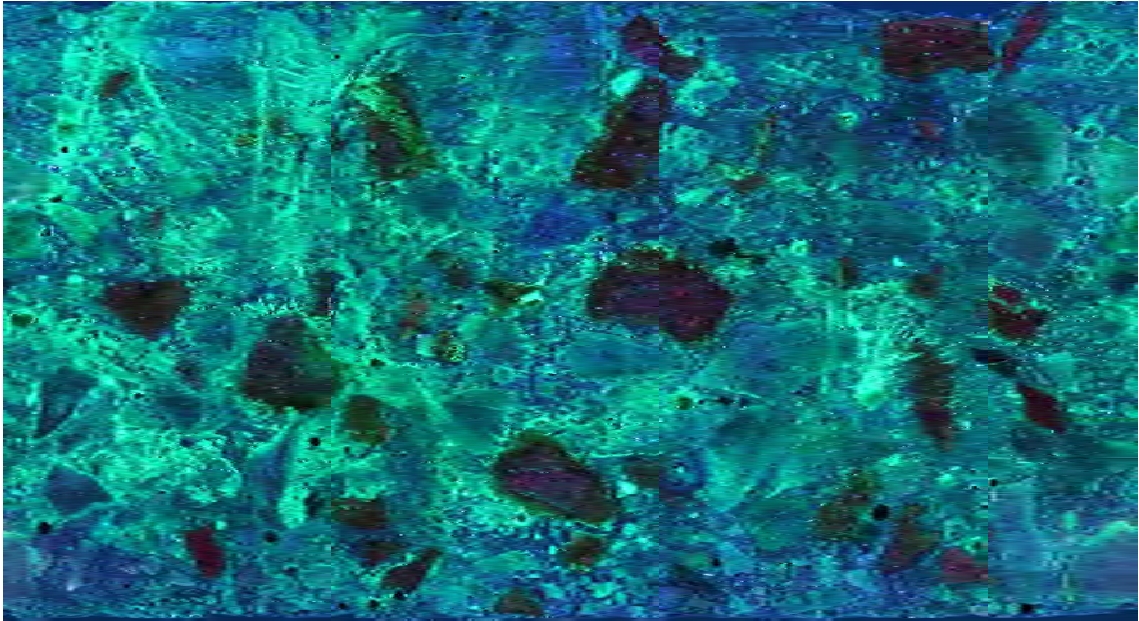
付図 2.9 コンクリートコア切断面観察 (I055601、左 : 30×45mm、右 : 45×75mm)

### 3. UV 光源下での展開写真 (蛍光法)

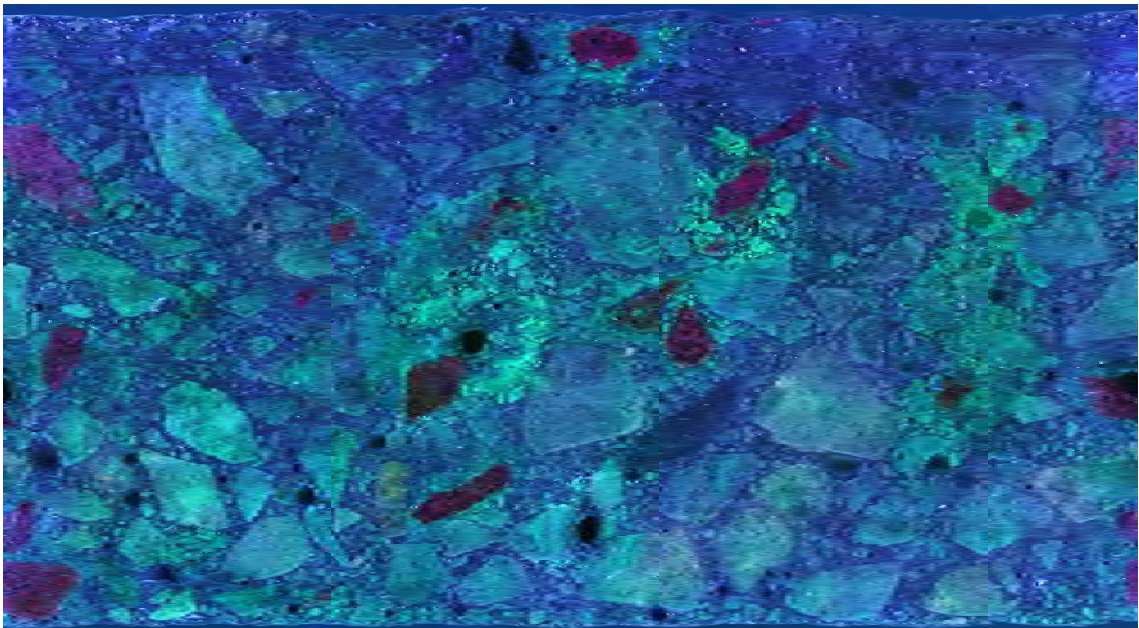


付図 3.1 コンクリートコア展開写真 (30381、UV 光源、75mm×141mm)



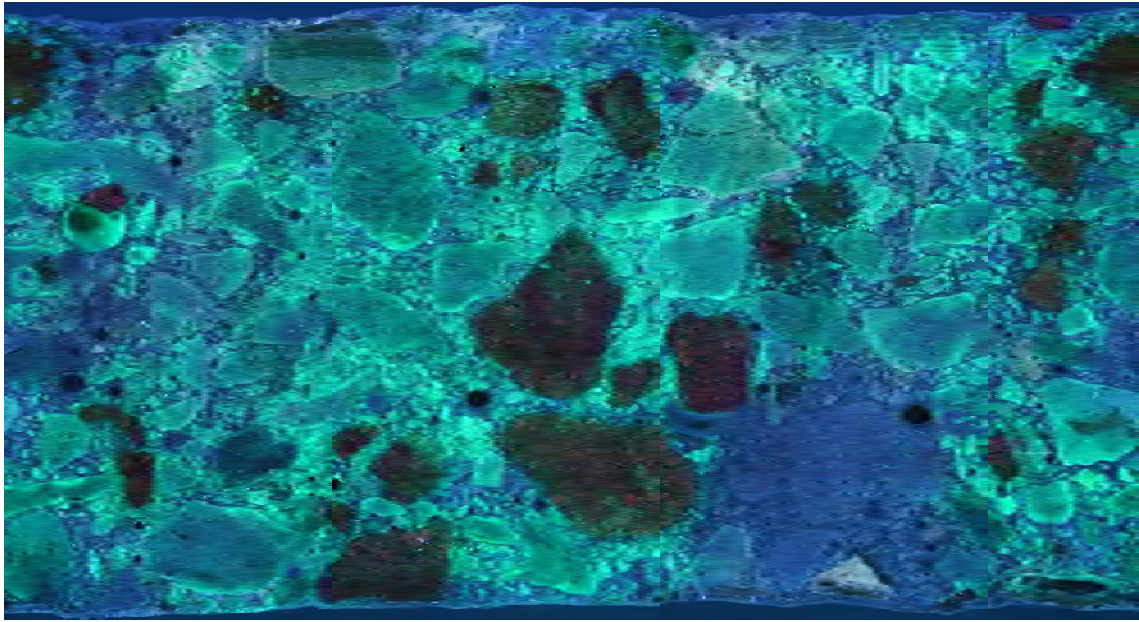


付図 3.2 コンクリートコア展開写真 (55381、UV 光源、75mm×141mm)

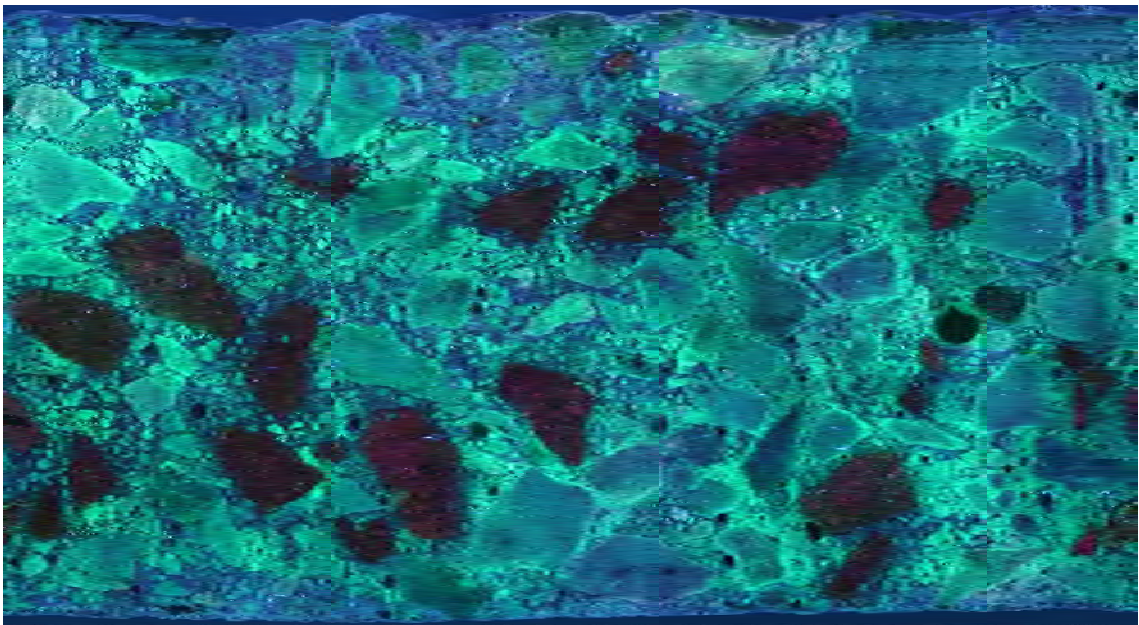


付図 3.3 コンクリートコア展開写真 (F5538m、UV 光源、75mm×141mm)



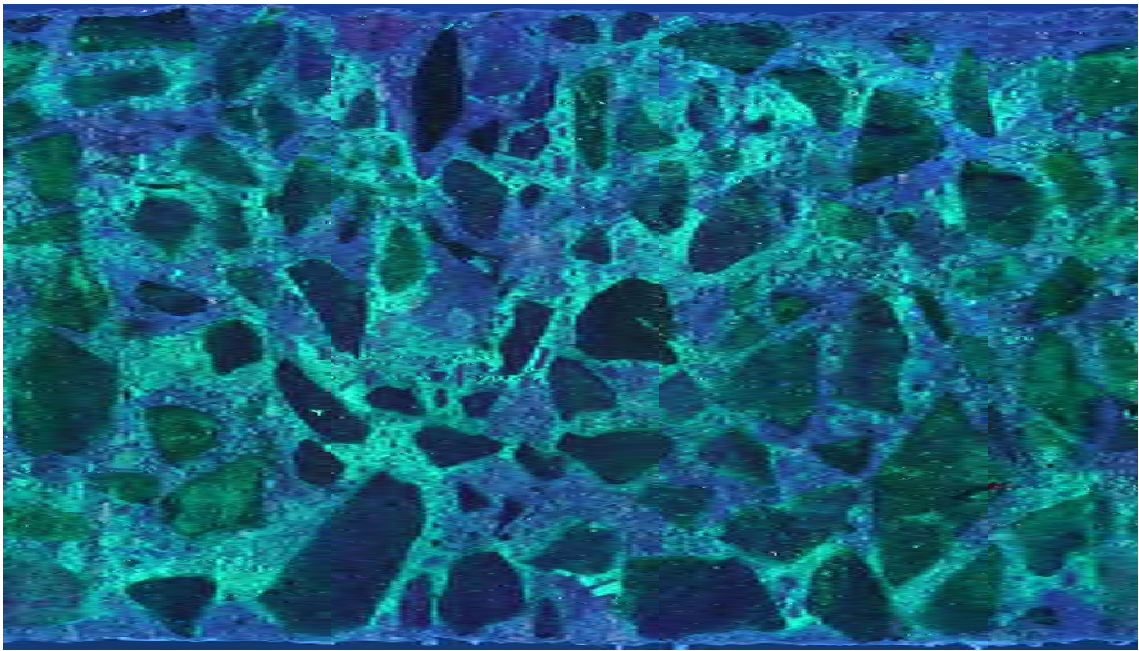


付図 3.4 コンクリートコア展開写真 (F30601、UV 光源、75mm×141mm)

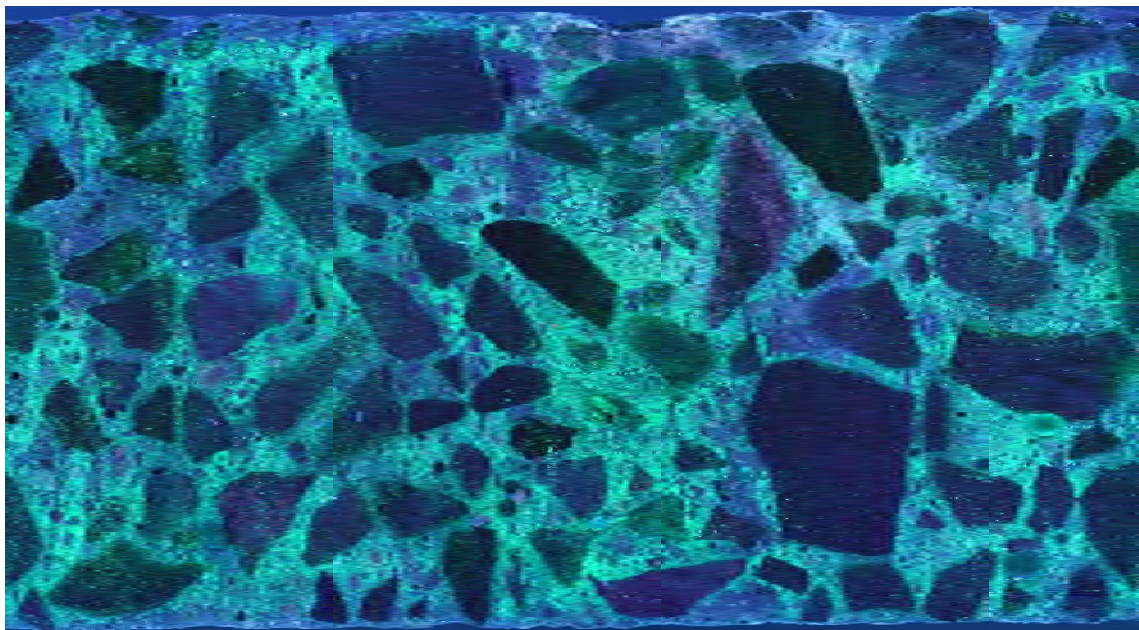


付図 3.5 コンクリートコア展開写真 (F55601、UV 光源、75mm×141mm)

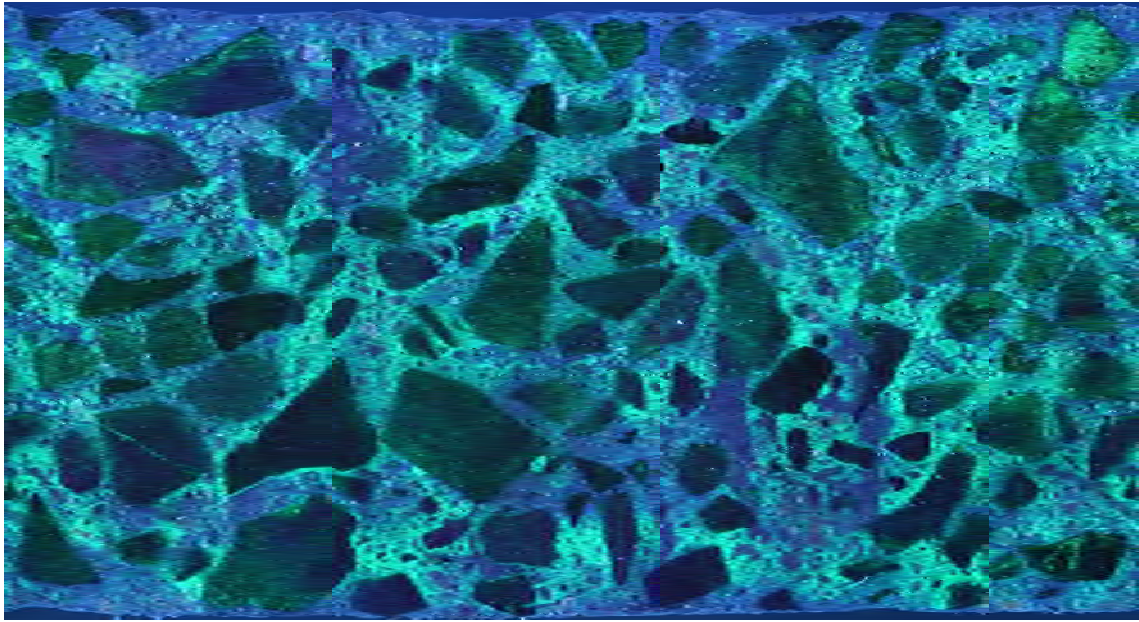




付図 3.6 コンクリートコア展開写真 (WI55381、UV 光源、75mm×141mm)



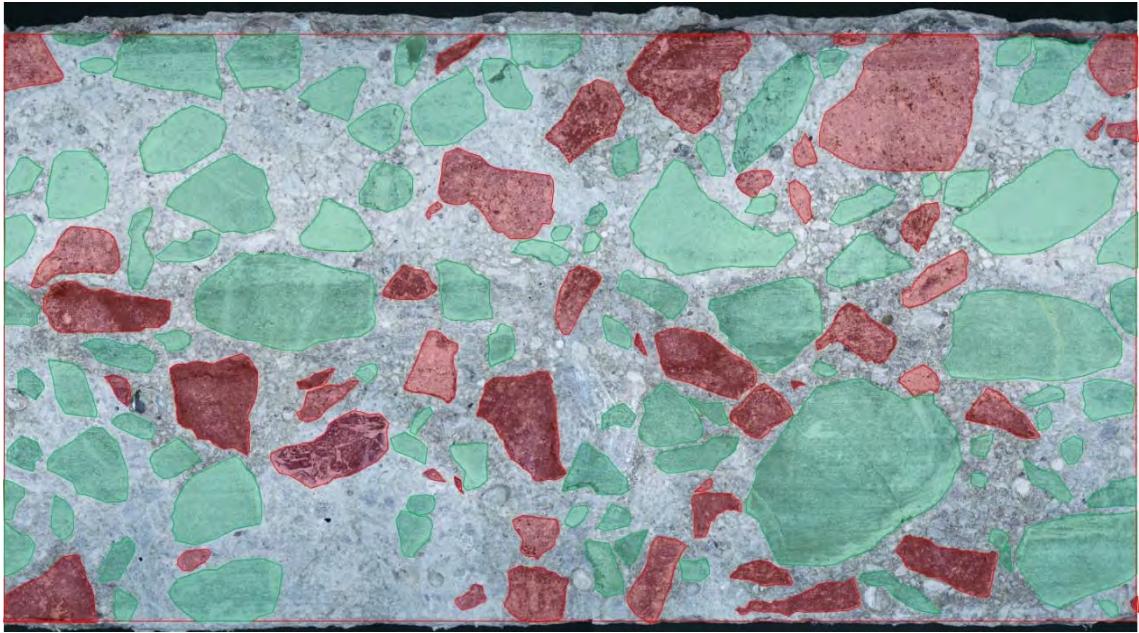
付図 3.7 コンクリートコア展開写真 (WI425381、UV 光源、75mm×141mm)



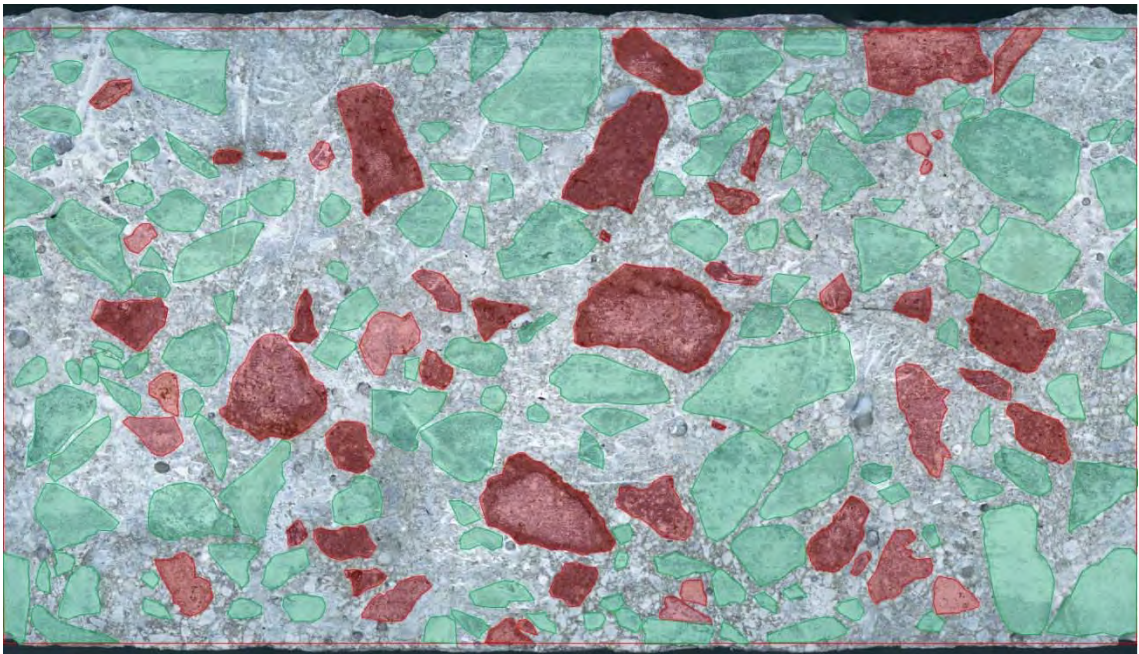
付図 3.8 コンクリートコア展開写真 (WI55601、UV 光源、75mm×141mm)



#### 4. 粗骨材の岩種構成定量

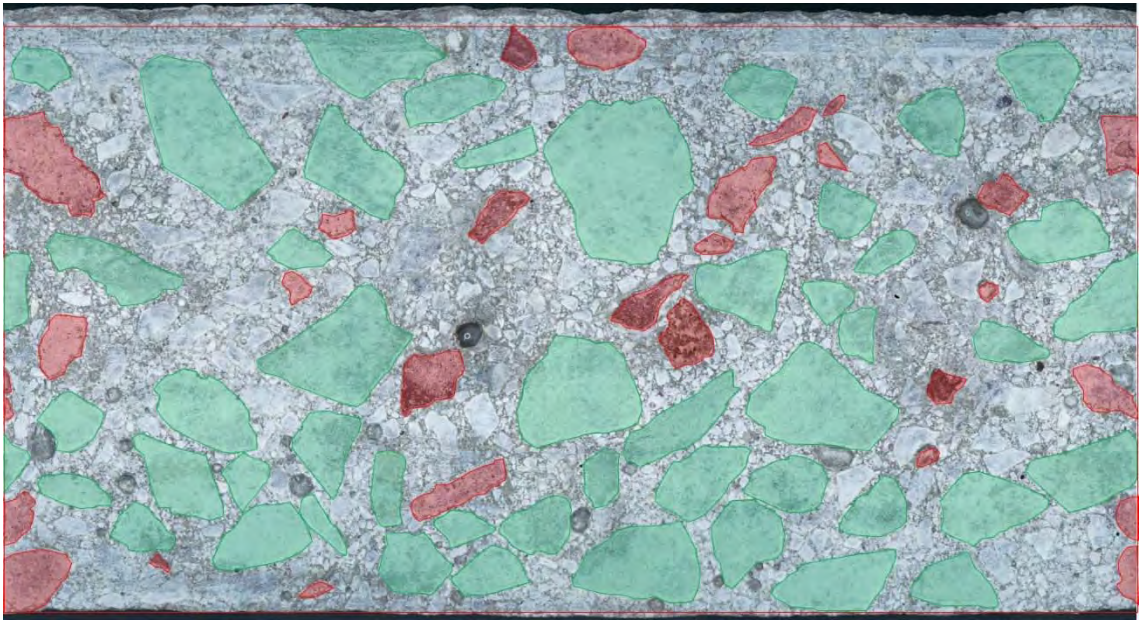


付図 4.1 粗骨材の岩種構成定量 (30381、75mm×141mm)

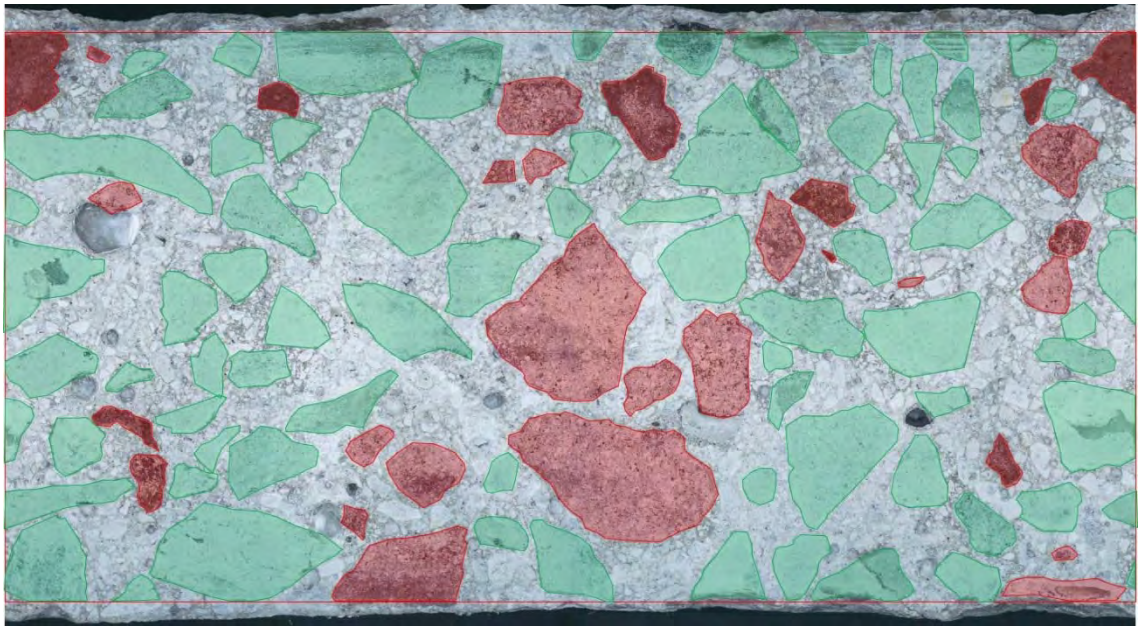


付図 4.2 粗骨材の岩種構成定量 (55381、75mm×141mm)



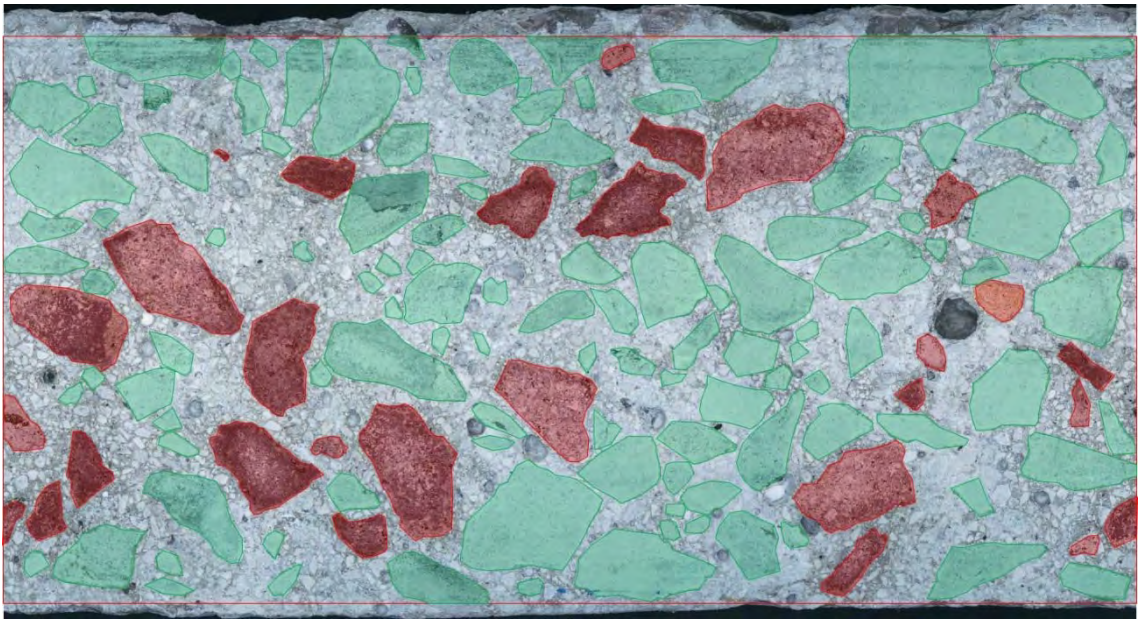


付図 4.3 粗骨材の岩種構成定量 (F5538m、75mm×141mm)

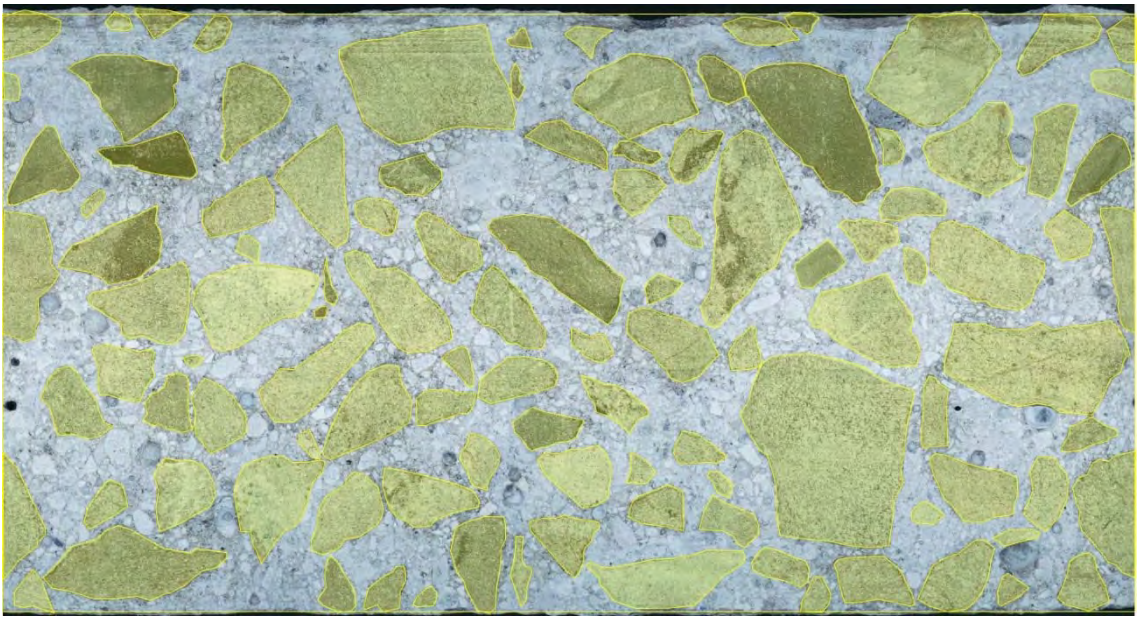


付図 4.4 粗骨材の岩種構成定量 (F30601、75mm×141mm)



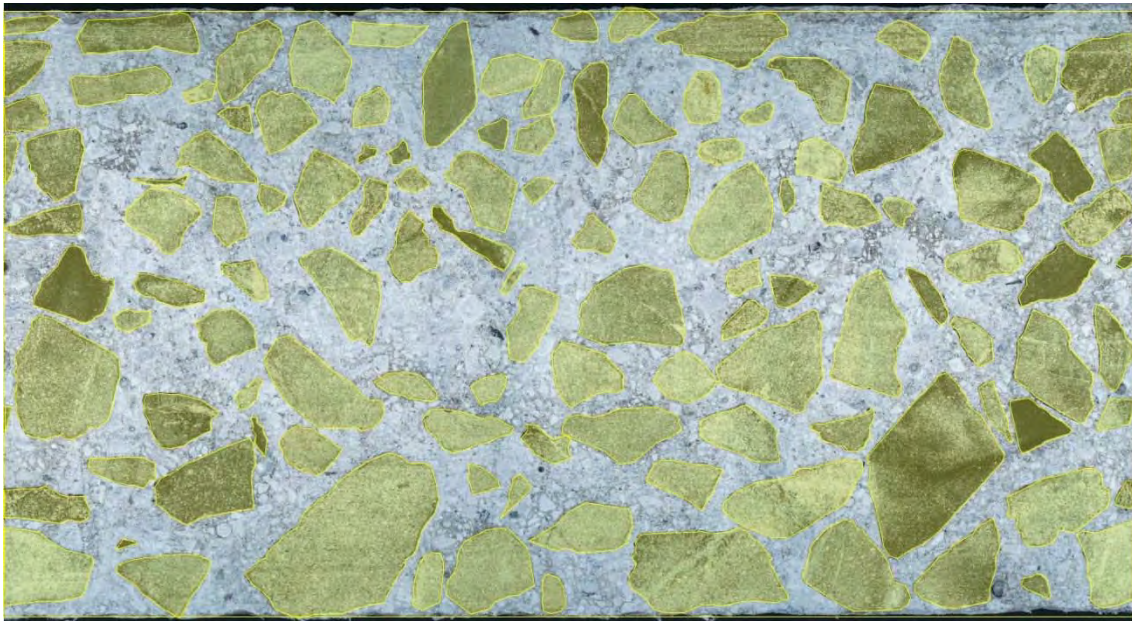


付図 4.5 粗骨材の岩種構成定量 (F55601、75mm×141mm)

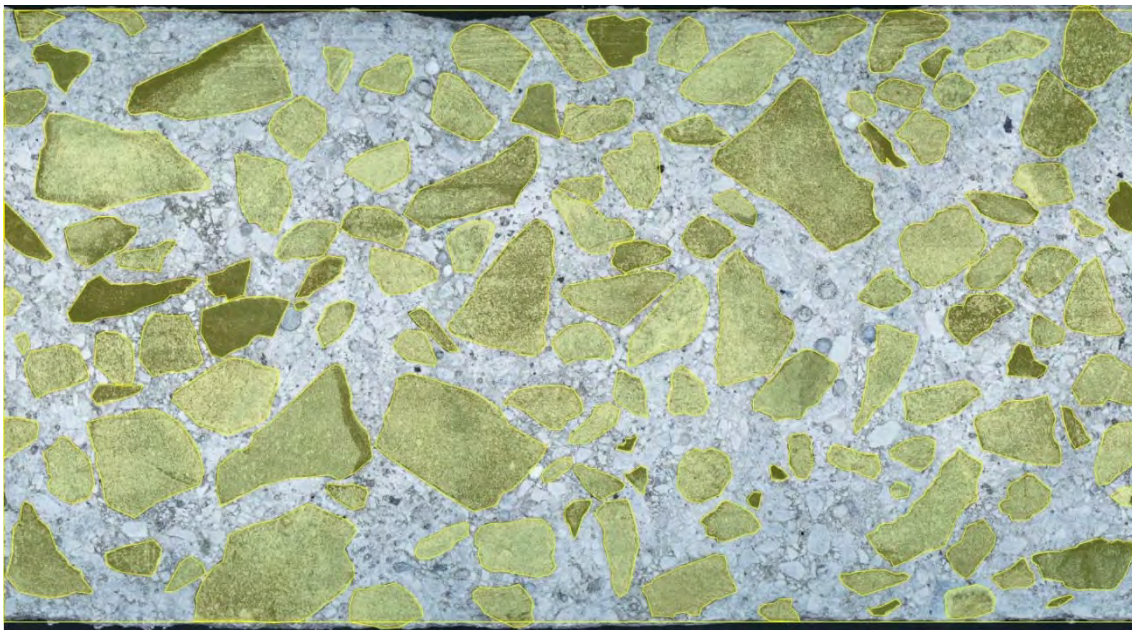


付図 4.6 粗骨材の岩種構成定量 (WI425381、75mm×141mm)



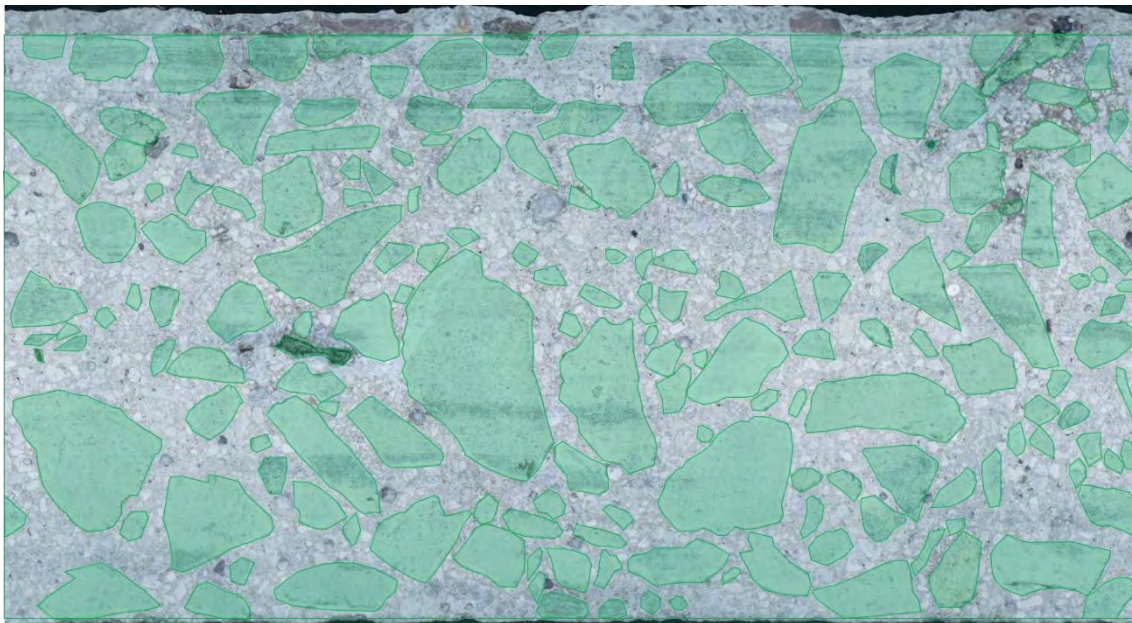


付図 4.7 粗骨材の岩種構成定量 (WI55381、75mm×141mm)



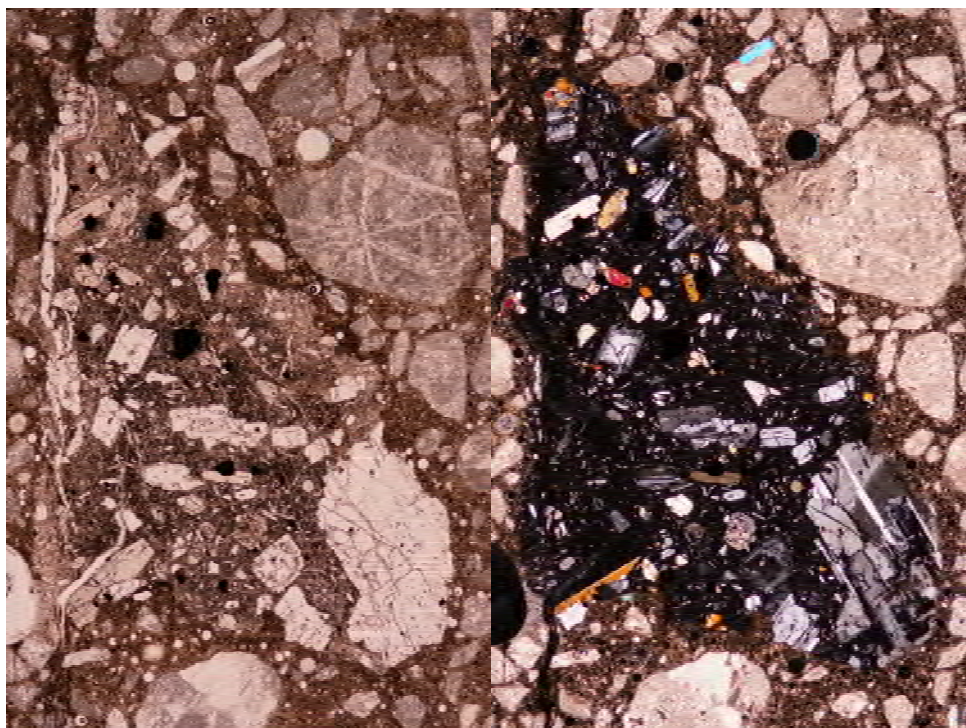
付図 4.8 粗骨材の岩種構成定量 (WI55601、75mm×141mm)



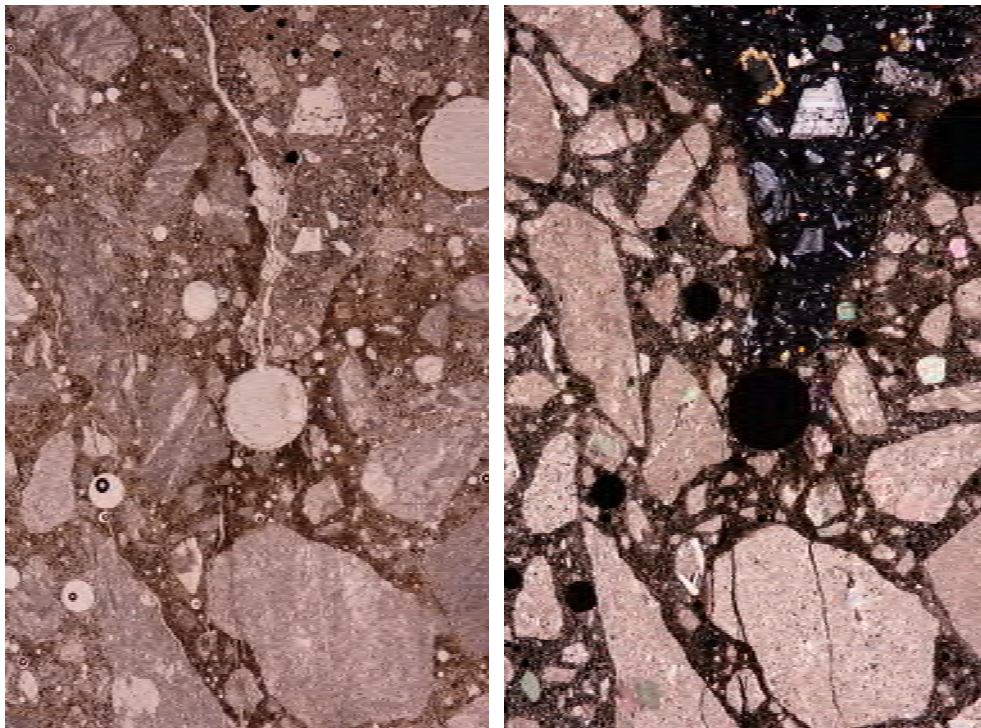


付図 4.9 粗骨材の岩種構成定量 (I055601、75mm×141mm)

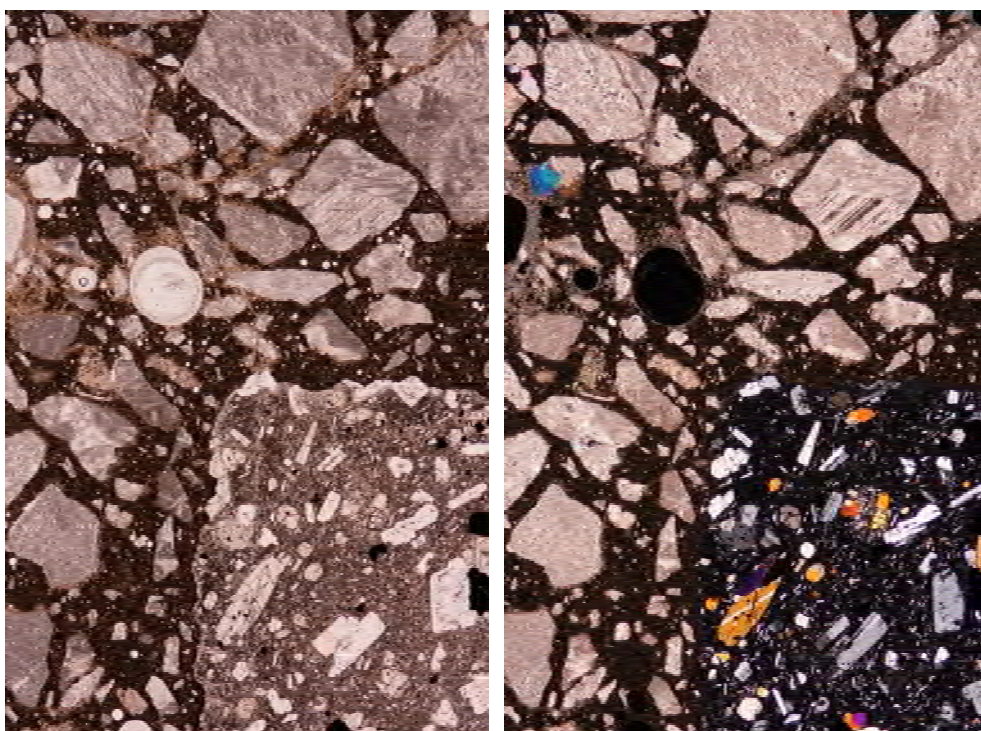
## 5. コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察



付図 5.1 偏光顕微鏡写真例 (30381、×20、左：開放ニコル、右：直交ニコル、4.9mm×7.3mm)

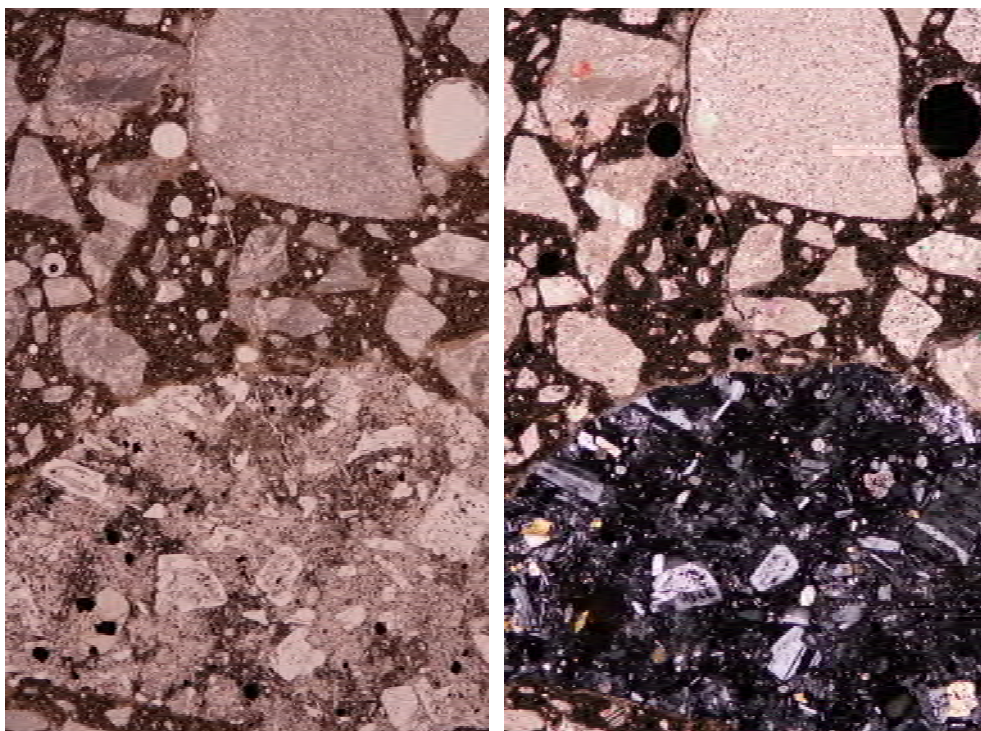


付図 5.2 偏光顕微鏡写真例 (55381、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )

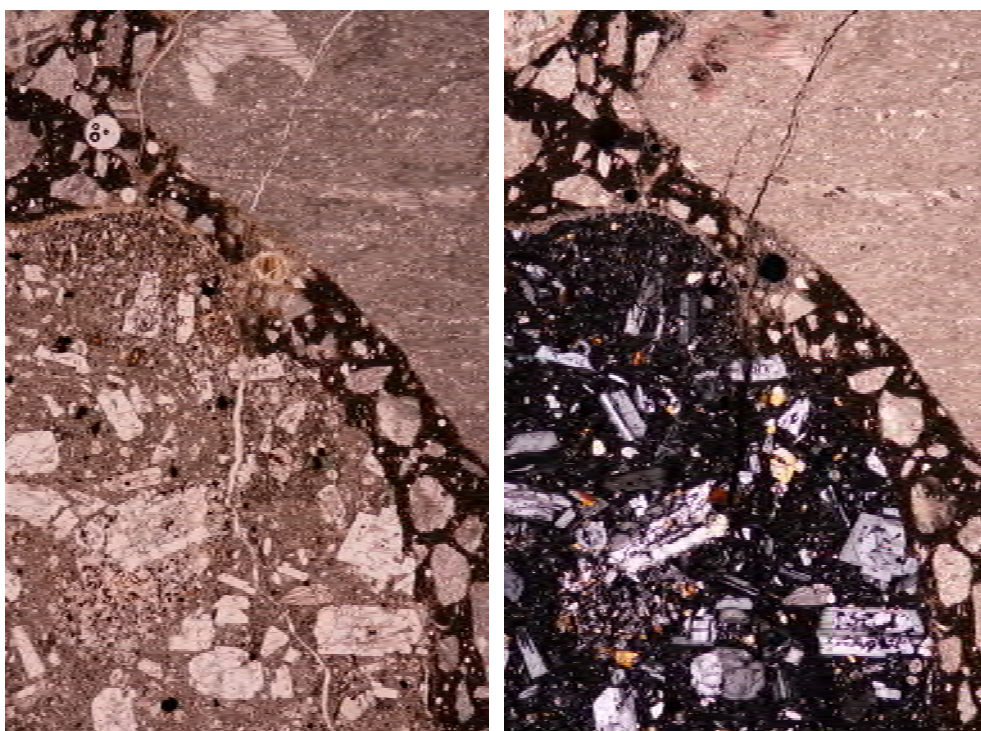


付図 5.3 偏光顕微鏡写真例 (F5538m、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )

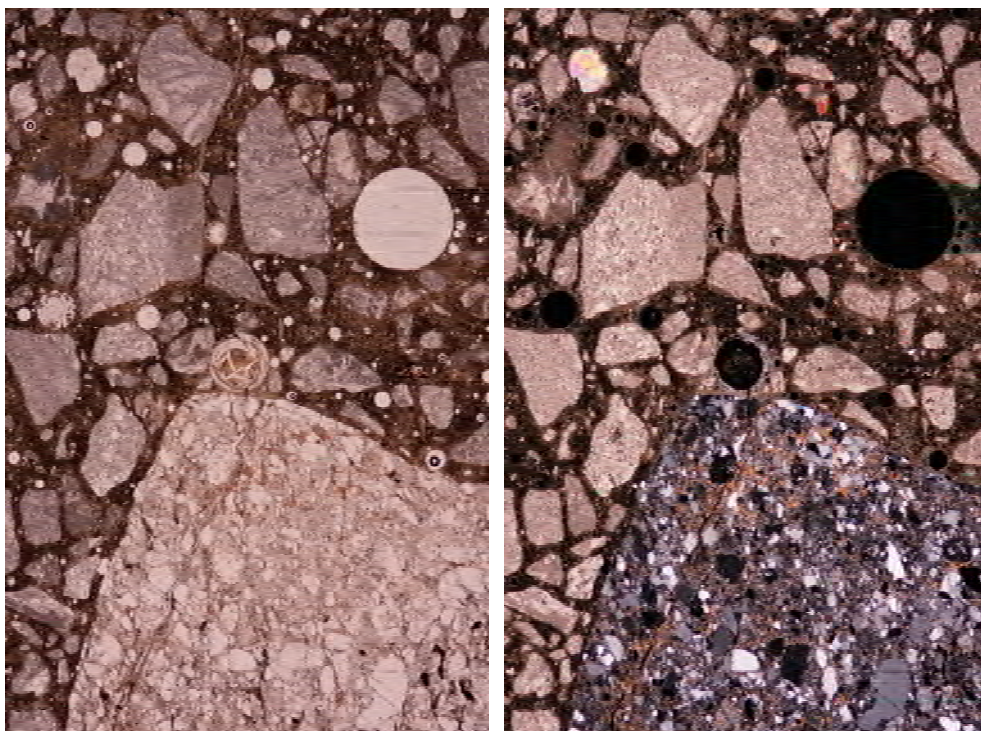




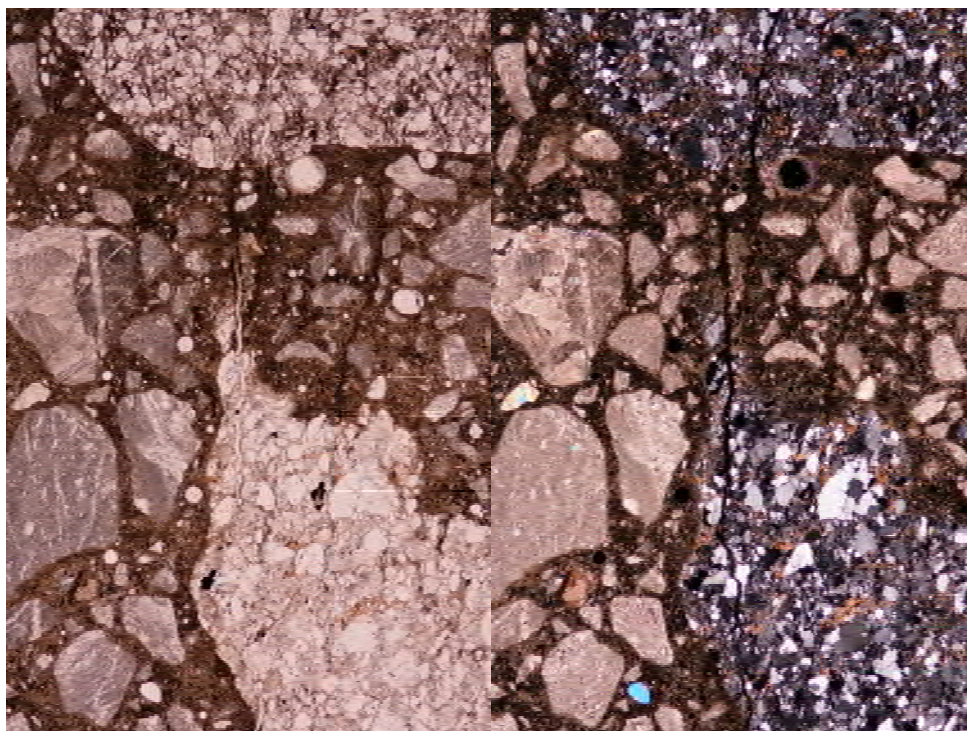
付図 5.4 偏光顕微鏡写真例 (F30601、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )



付図 5.5 偏光顕微鏡写真例 (F55601、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )

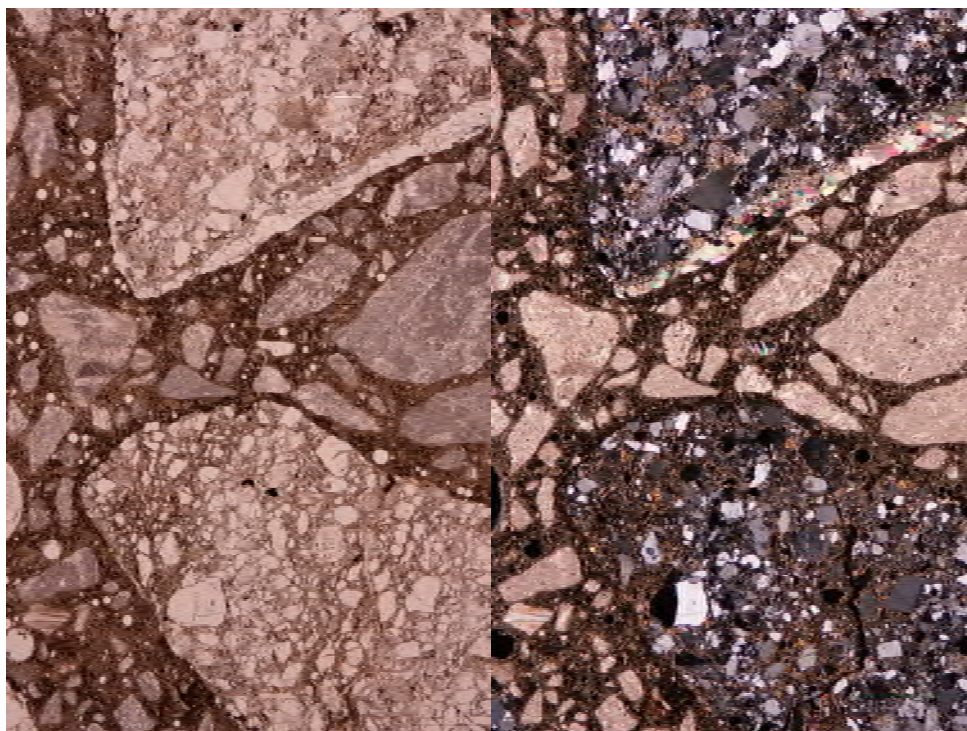


付図 5.6 偏光顕微鏡写真例 (WI425381、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )

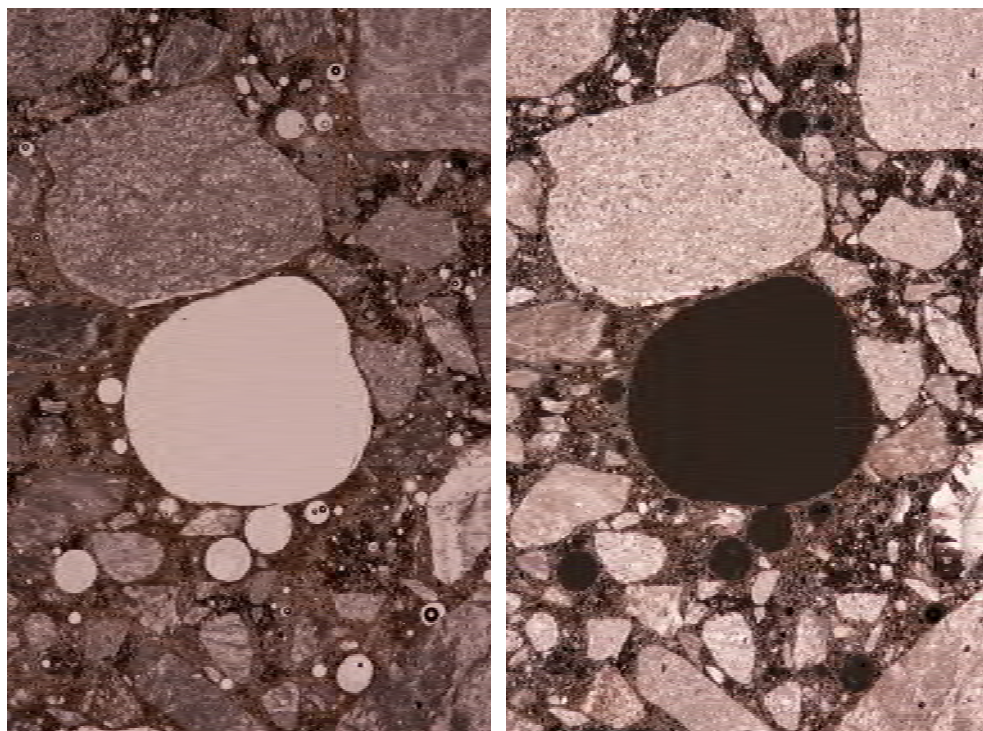


付図 5.7 偏光顕微鏡写真例 (WI55381、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )





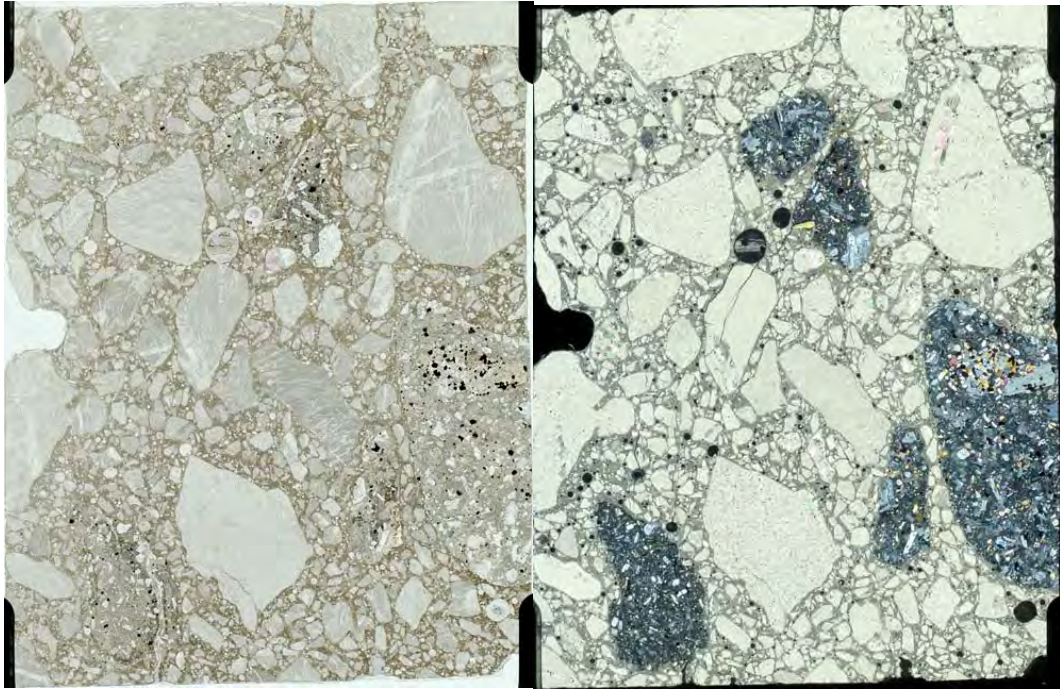
付図 5.8 偏光顕微鏡写真例 (WI55601、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )



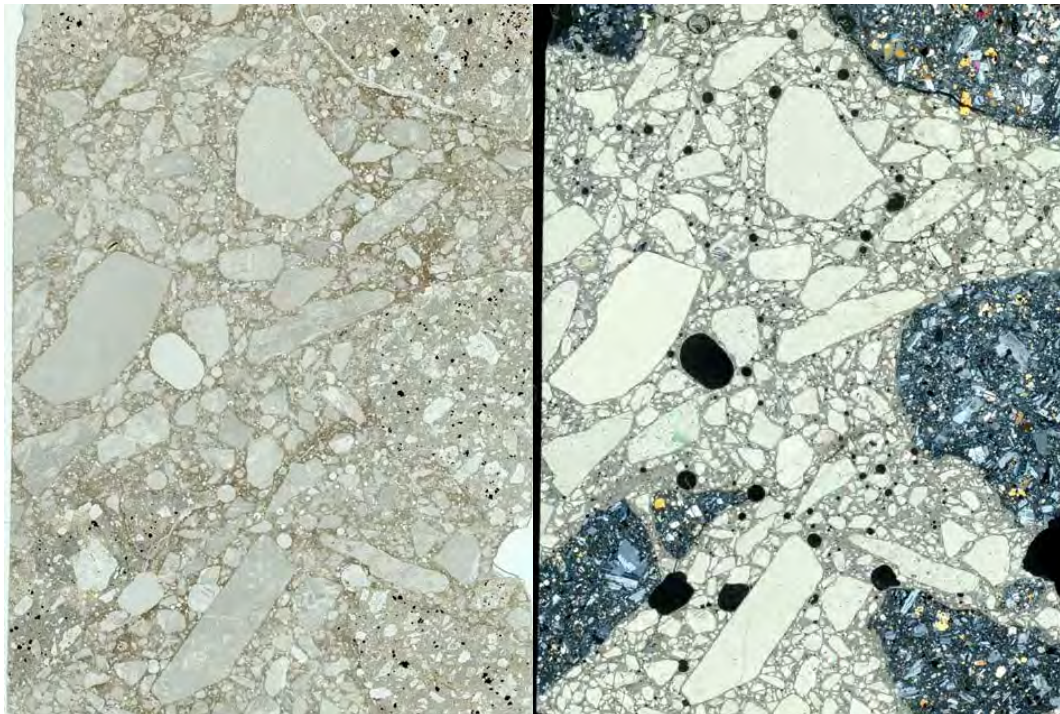
付図 5.9 偏光顕微鏡写真例 (IO55601、 $\times 20$ 、左：開放ニコル、右：直交ニコル、 $4.9\text{mm} \times 7.3\text{mm}$ )



## 6. 薄片スキャナ

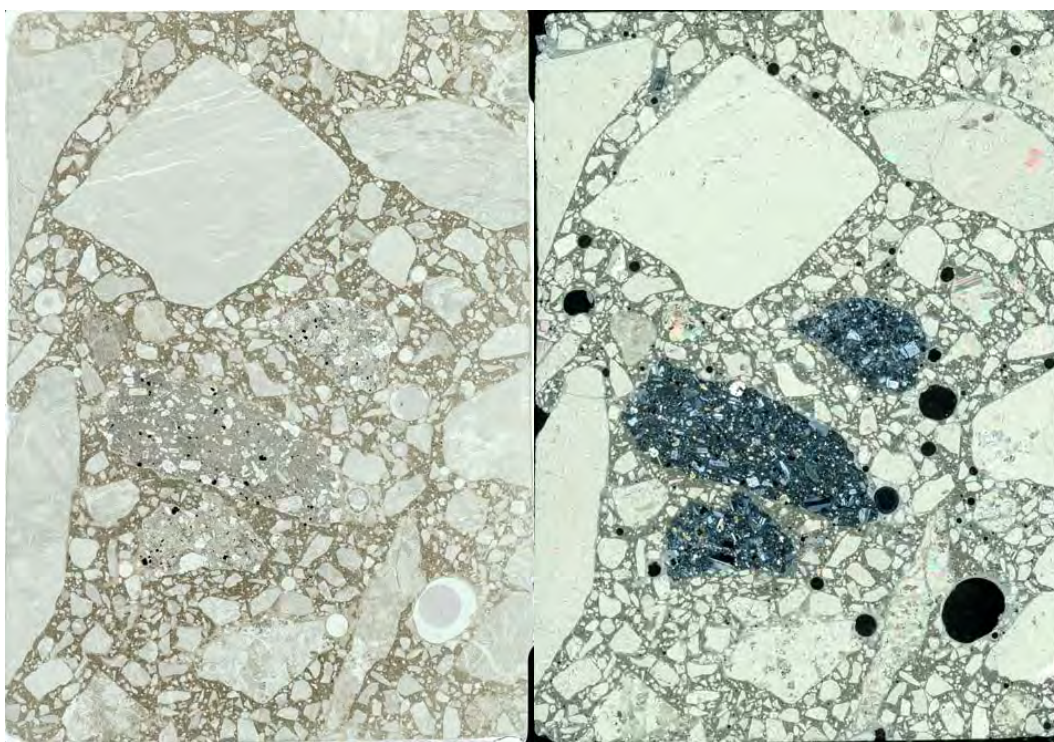


付図 6.1 薄片全景画像 (30381、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)

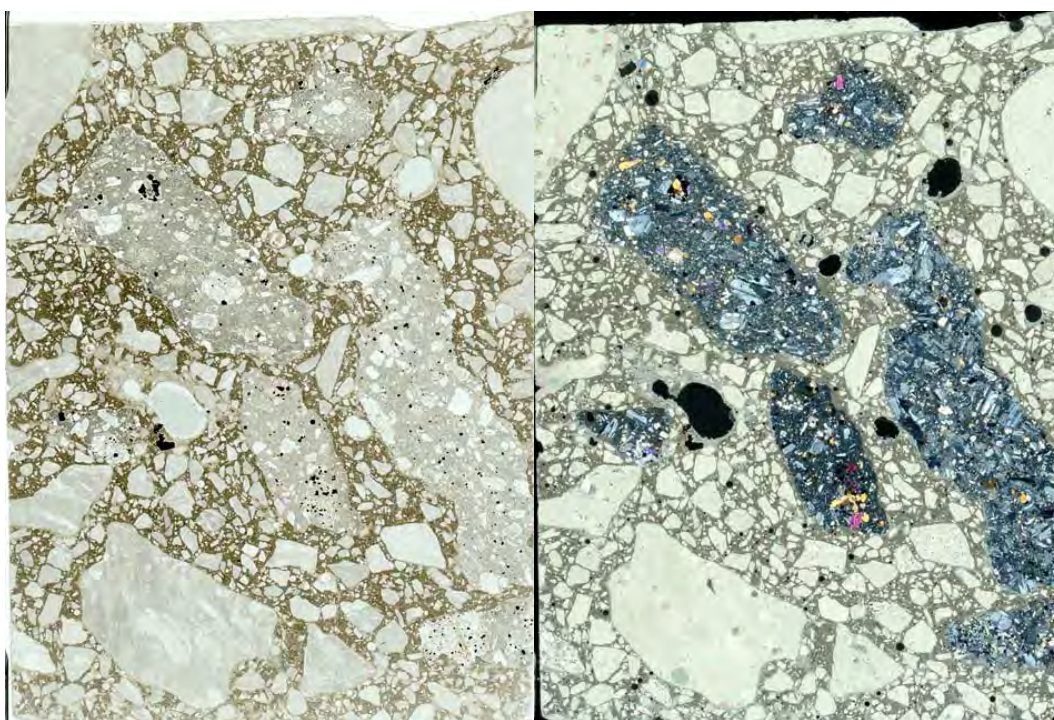


付図 6.2 薄片全景画像 (55381、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)



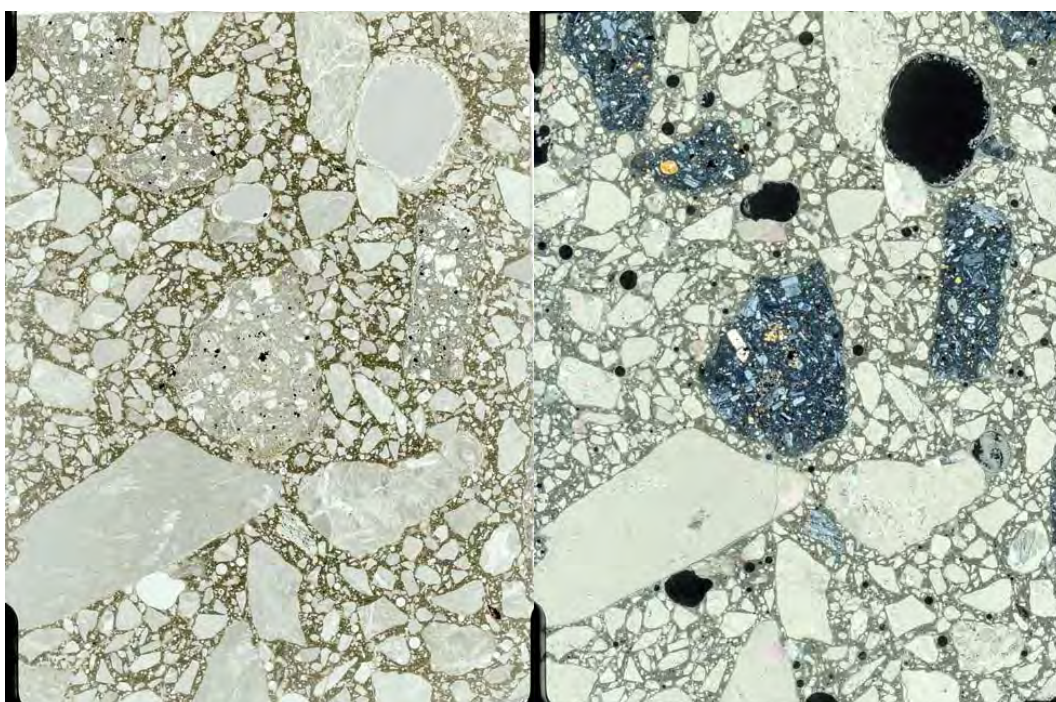


付図 6.3 薄片全景画像 (F30601、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)

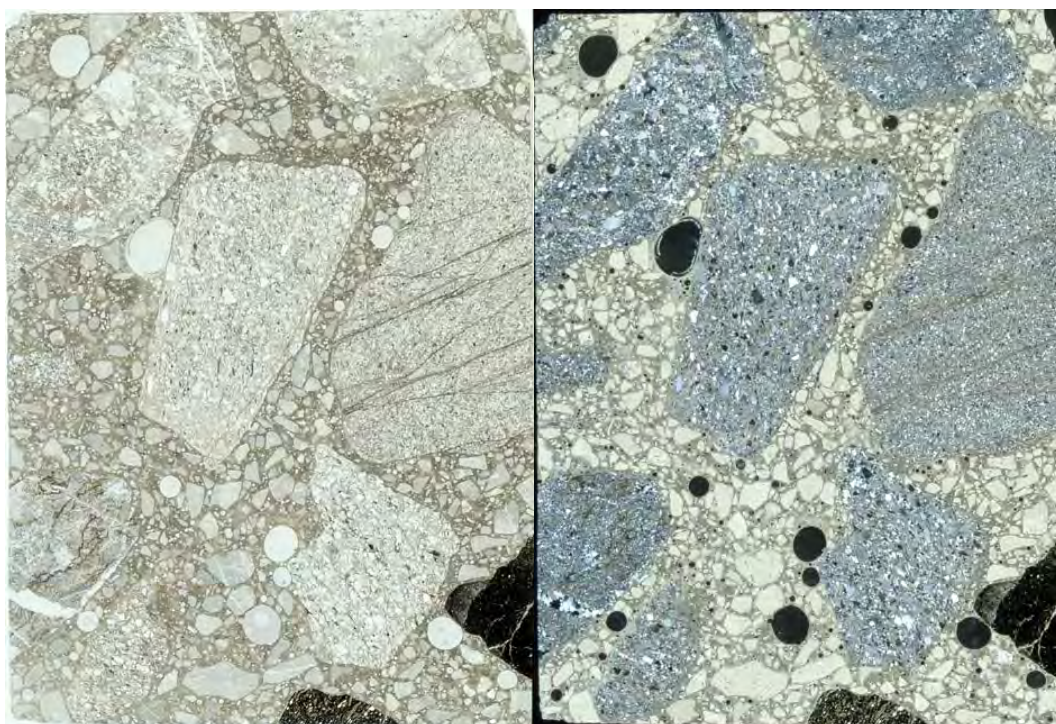


付図 6.4 薄片全景画像 (F5538m、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)



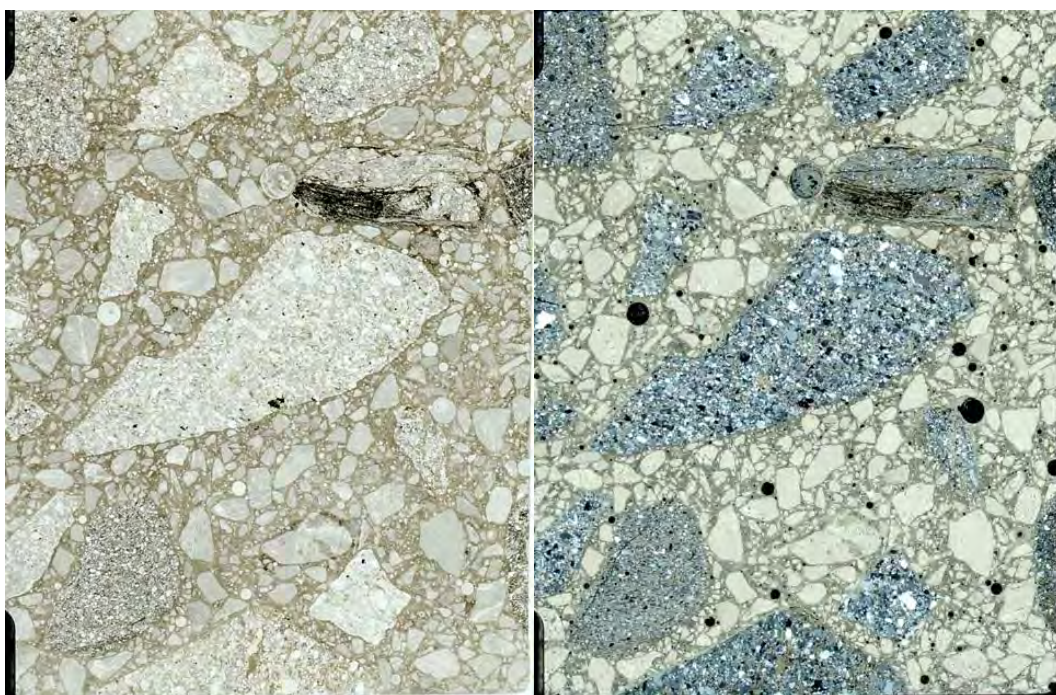


付図 6.5 薄片全景画像 (F55601、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)

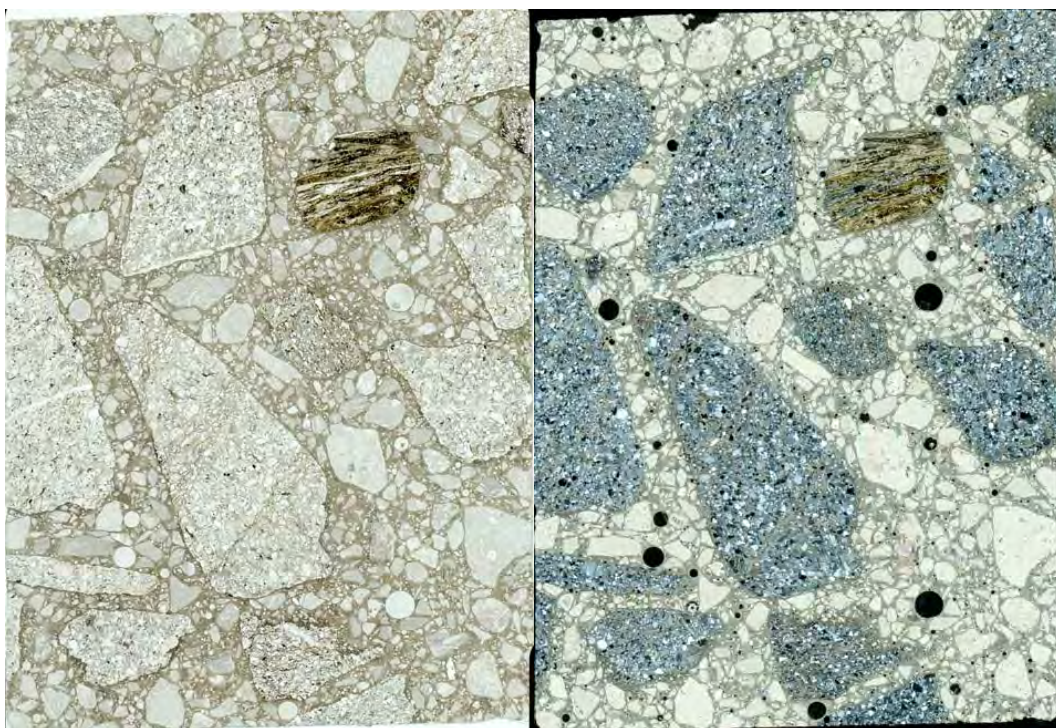


付図 6.6 薄片全景画像 (WI425381、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)



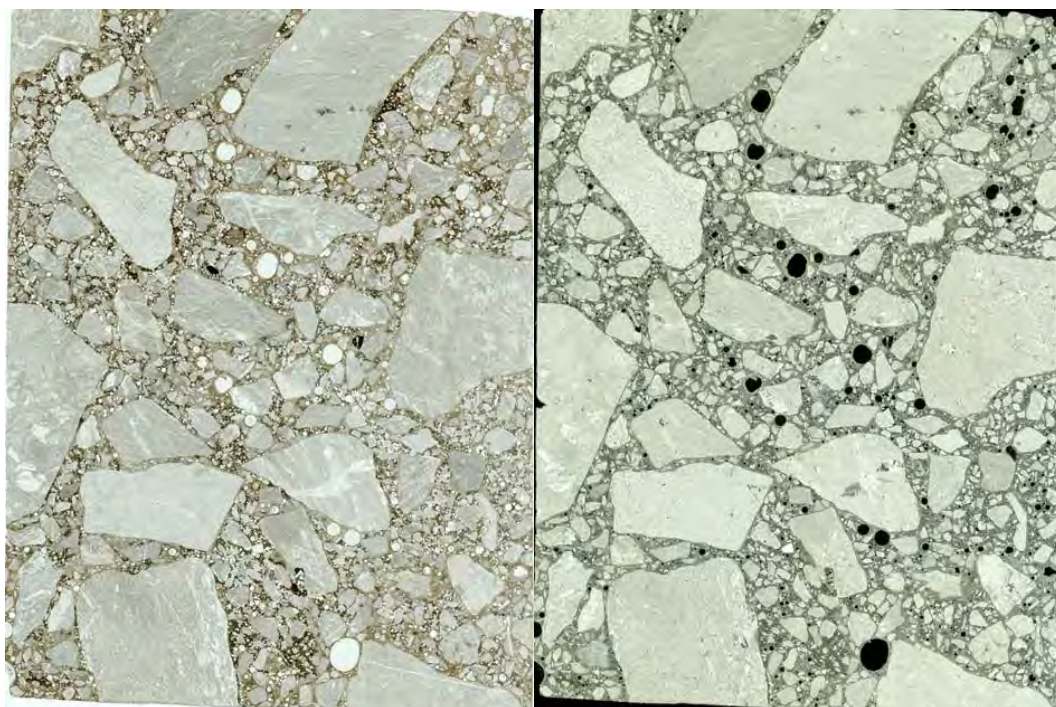


付図 6.7 薄片全景画像 (WI55381、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)



付図 6.8 薄片全景画像 (WI55601、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)

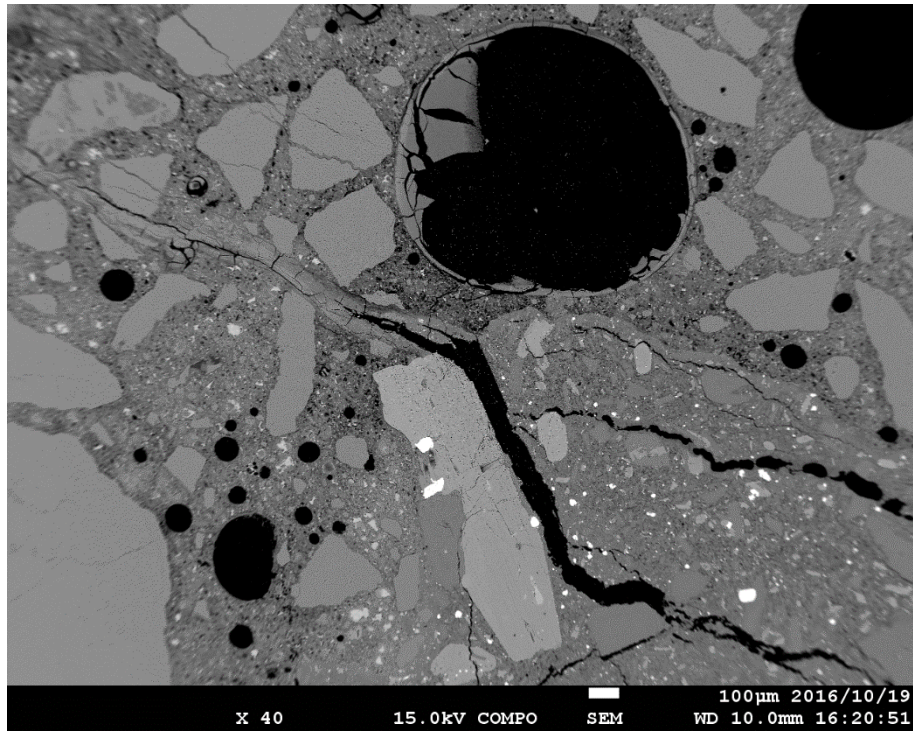




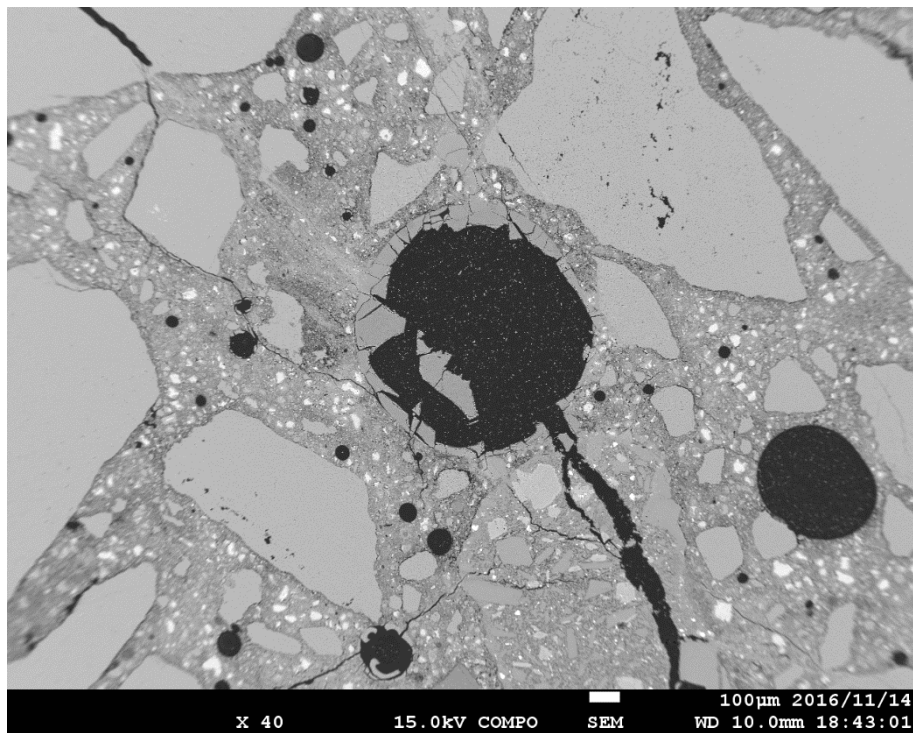
付図 6.9 薄片全景画像 (I055601、左：開放ニコル、右：直交ニコル、24mm×32mm)



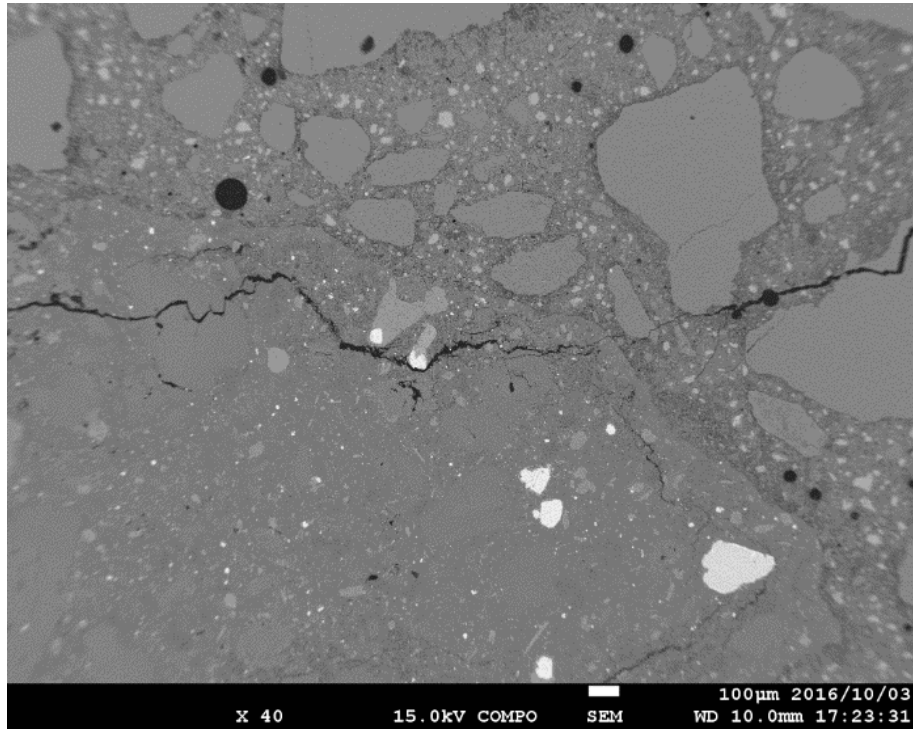
## 7. コンクリート薄片の SEM 観察



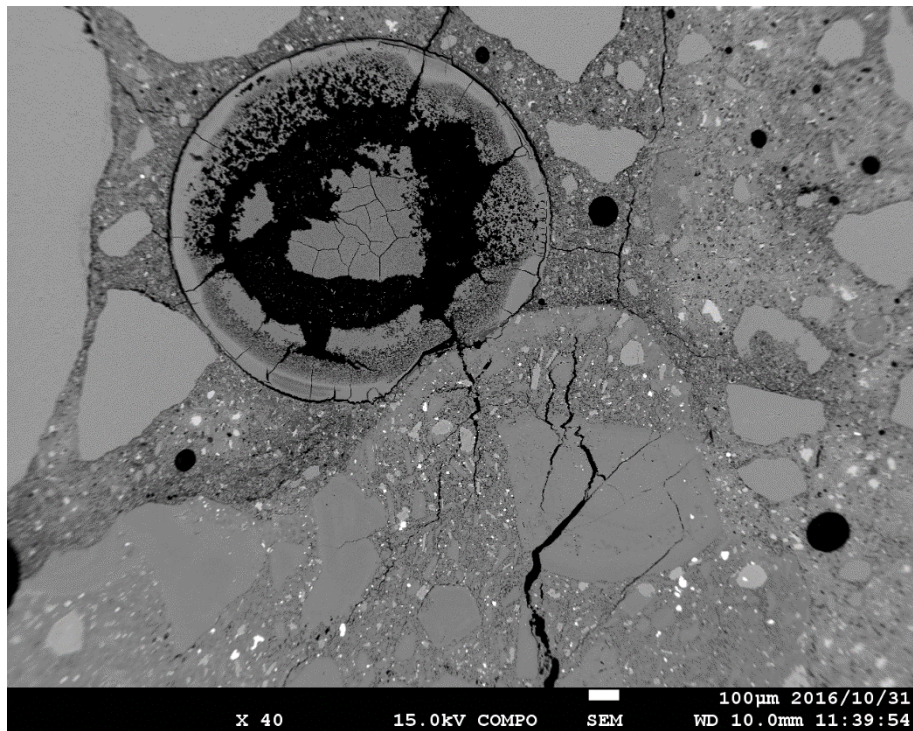
付図 7.1 反射電子像 (BEI) (30381、 $2.4 \times 3.2\text{mm}$ )



付図 7.2 反射電子像 (BEI) (55381、 $2.4 \times 3.2\text{mm}$ )

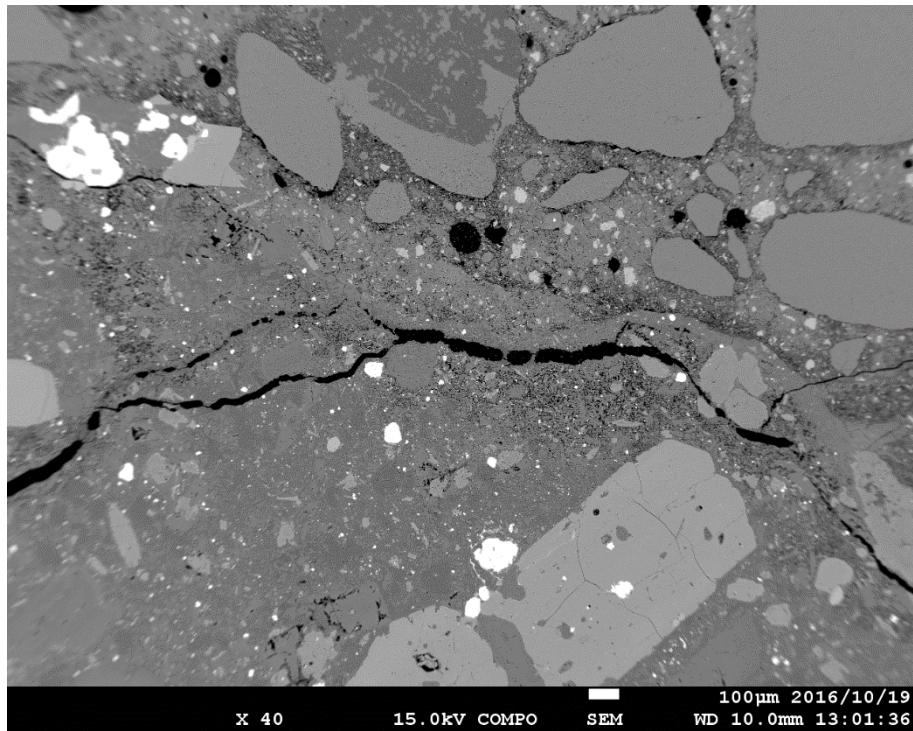


付図 7.3 反射電子像 (BEI) (F5538m、 $2.4 \times 3.2\text{mm}$ )

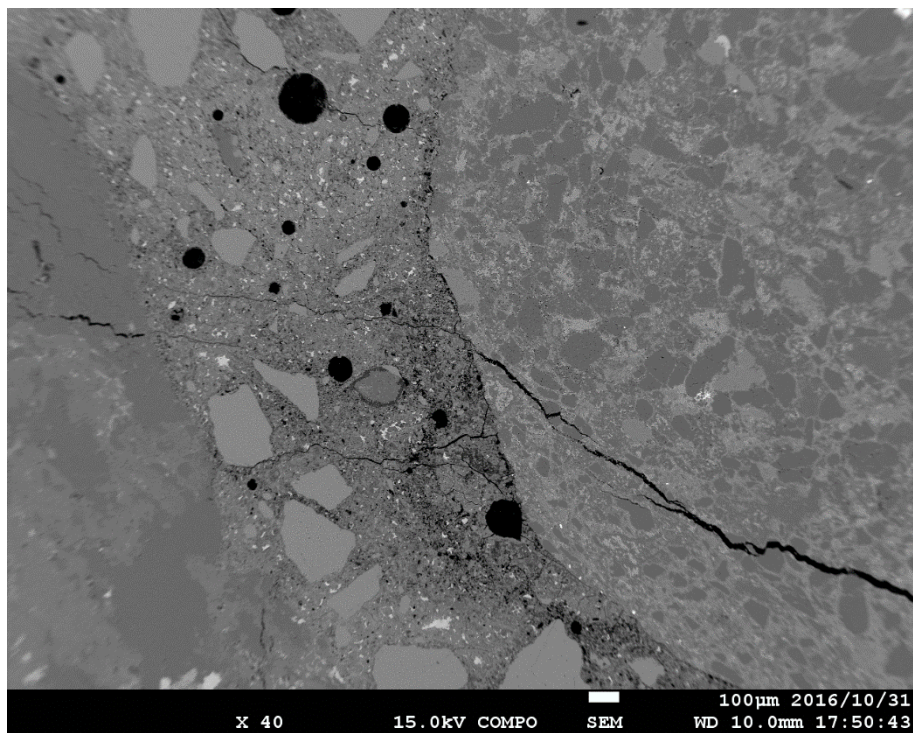


付図 7.4 反射電子像 (BEI) (F30601、 $2.4 \times 3.2\text{mm}$ )

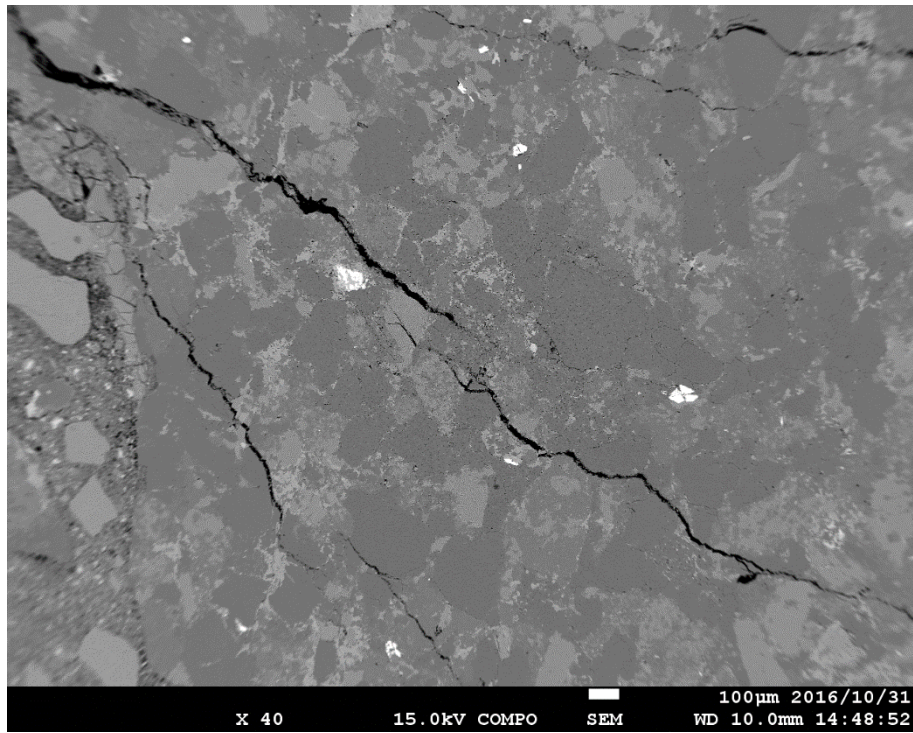




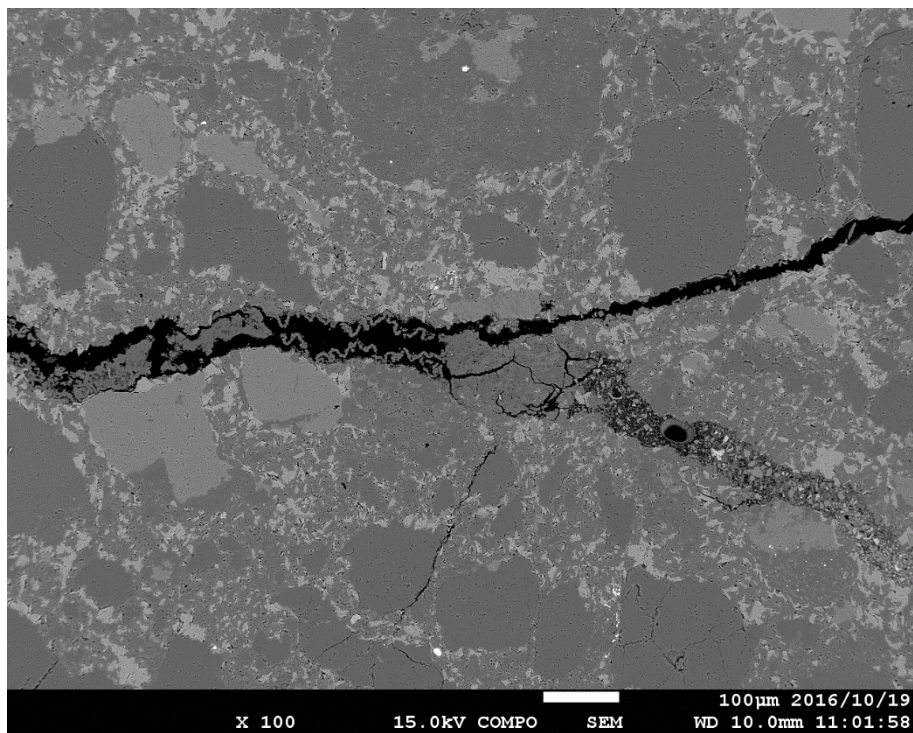
付図 7.5 反射電子像 (BEI) (F55601、 $2.4 \times 3.2\text{mm}$ )



付図 7.6 反射電子像 (BEI) (WI425381、 $2.4 \times 3.2\text{mm}$ )

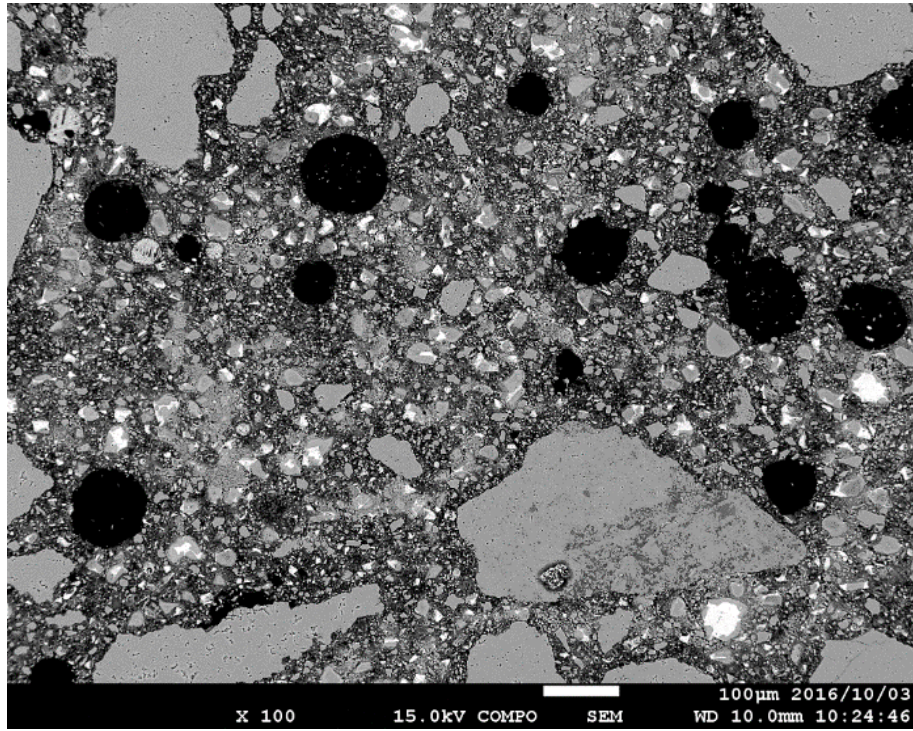


付図 7.7 反射電子像 (BEI) (WI55381、 $2.4 \times 3.2$ mm)



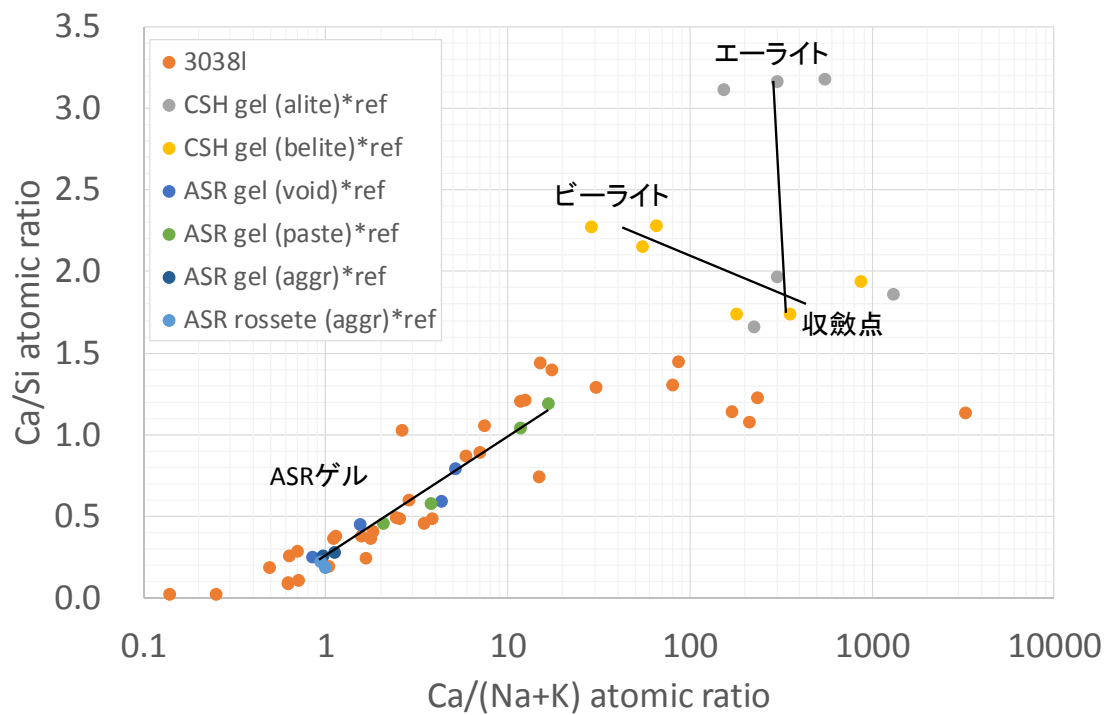
付図 7.8 反射電子像 (BEI) (WI55601、 $0.9 \times 1.2$ mm)



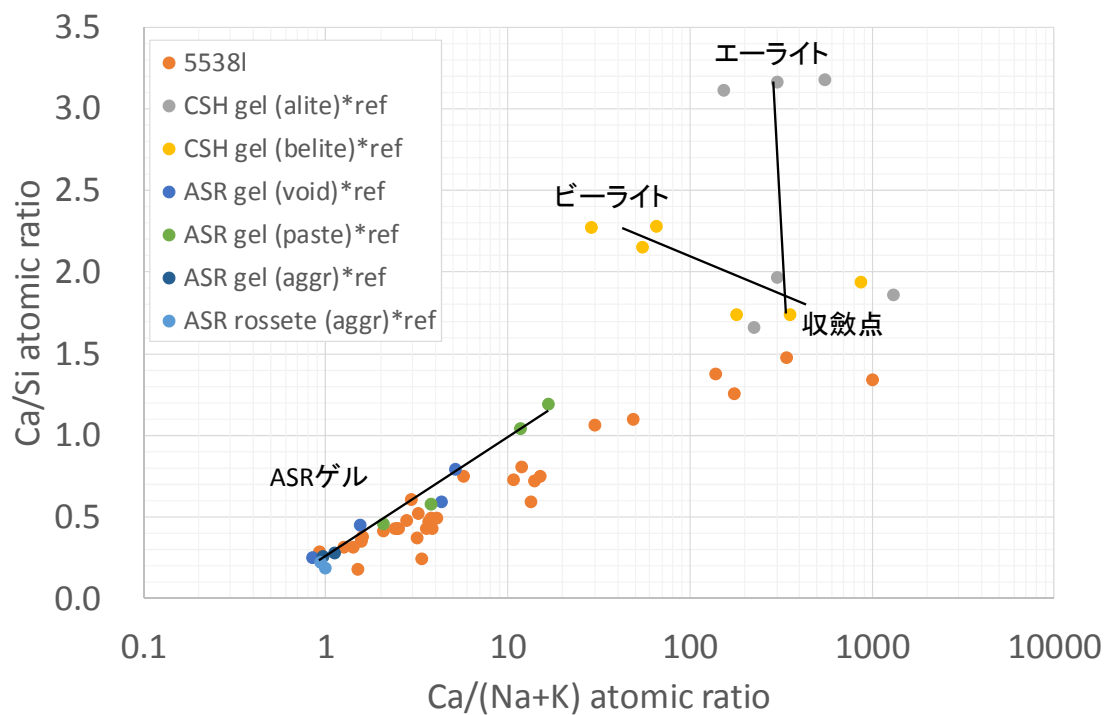


付図 7.9 反射電子像 (BEI) (I055601、 $0.9 \times 1.2\text{mm}$ )

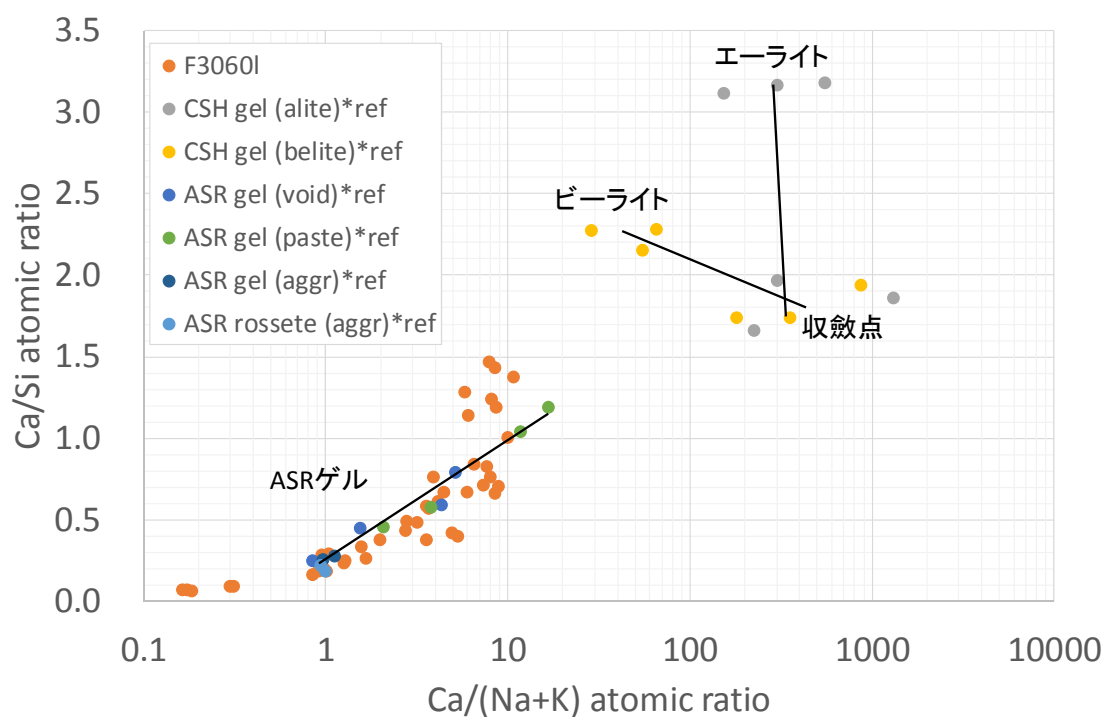
## 8. コンクリート薄片の EDS 分析



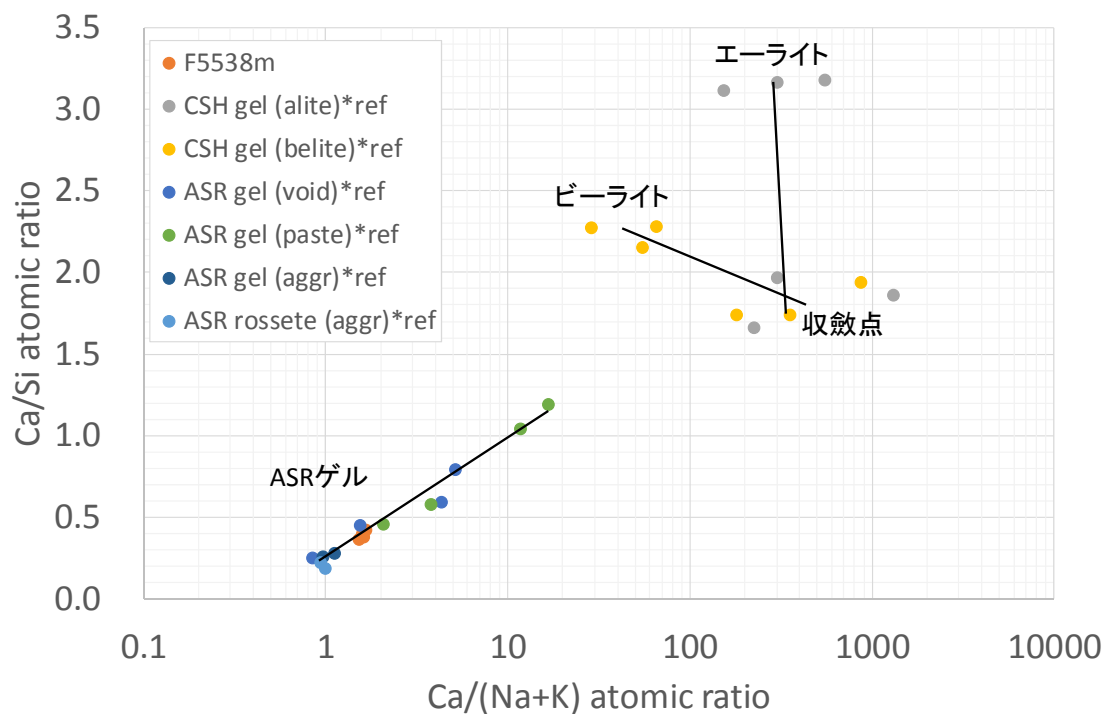
付図 8.1 ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 (30381)



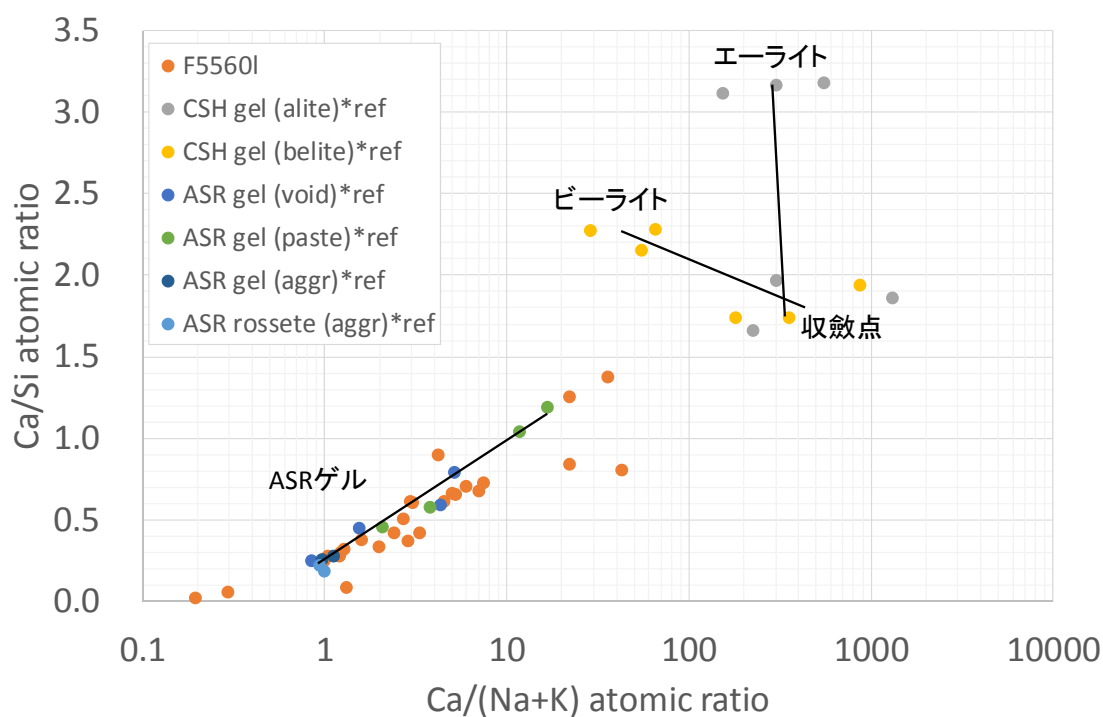
付図 8.2 ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 (55381)



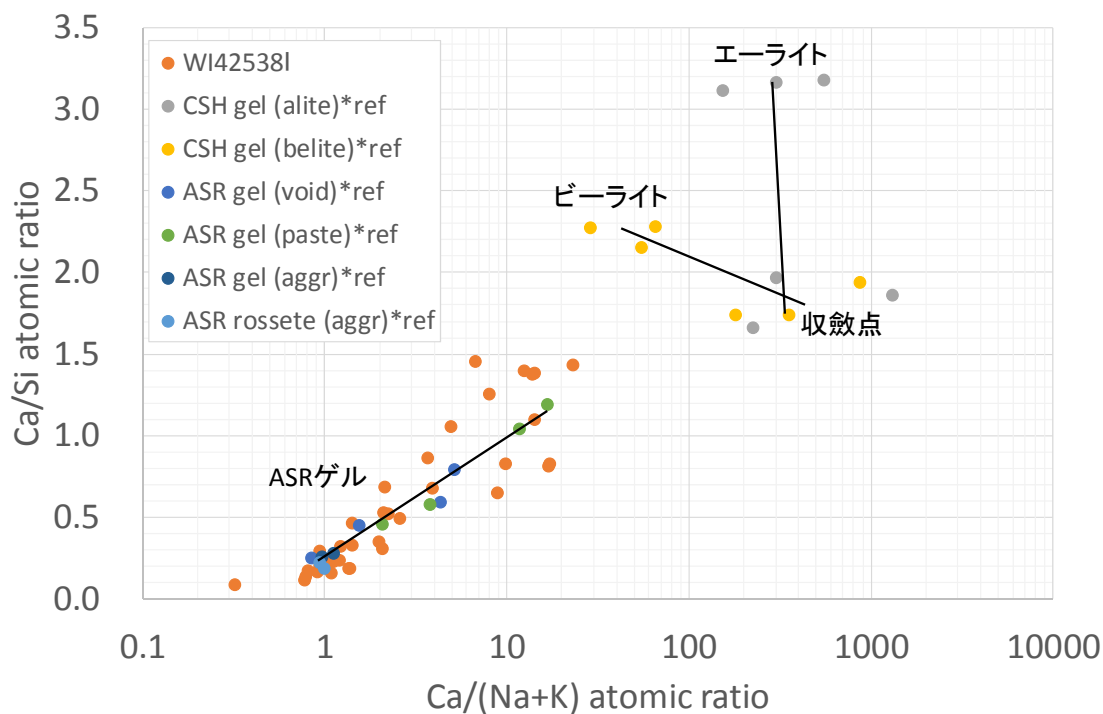
付図 8.3 ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 (F3060I)



付図 8.4 ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 (F5538m)

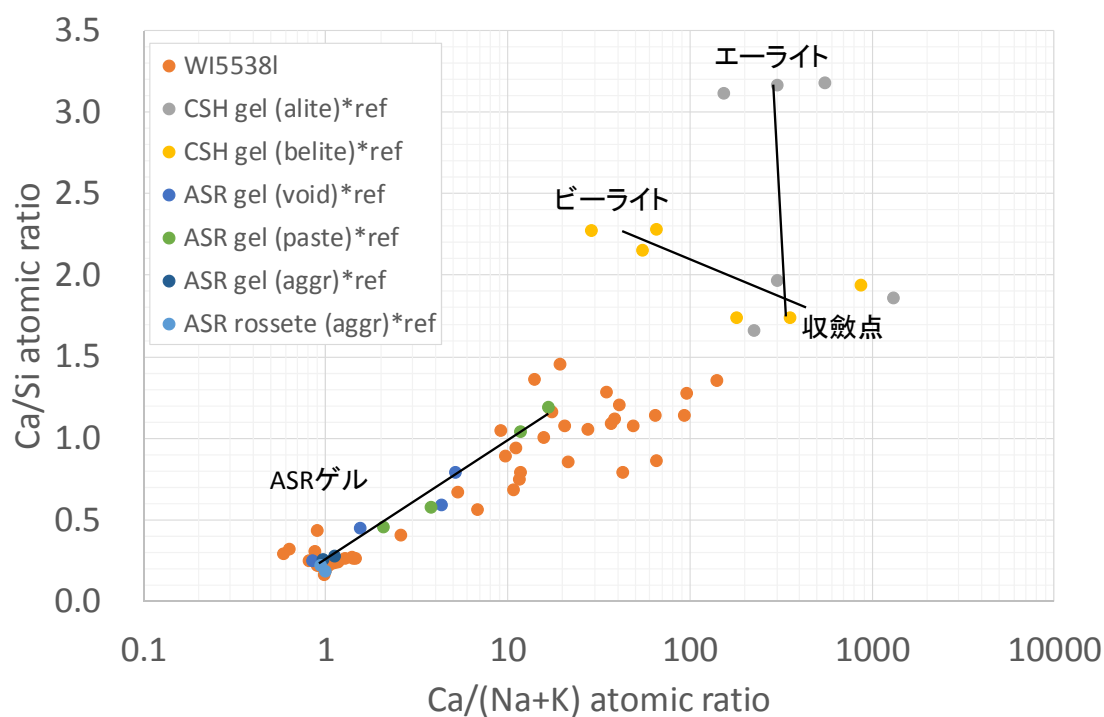


付図 8.5 ASR ゲルの化学組成分布 $[Ca/Si] - [Ca/(Na+K)]$ 図 (F5560I)

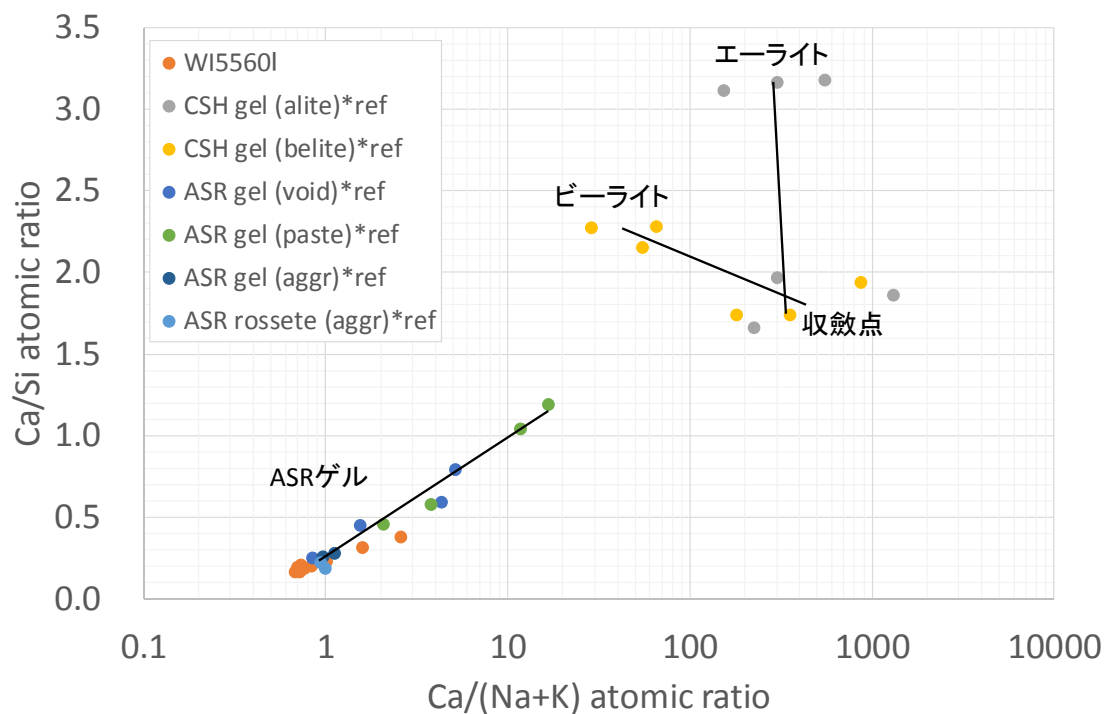


付図 8.6 ASR ゲルの化学組成分布 $[Ca/Si] - [Ca/(Na+K)]$ 図 (WI42538I)

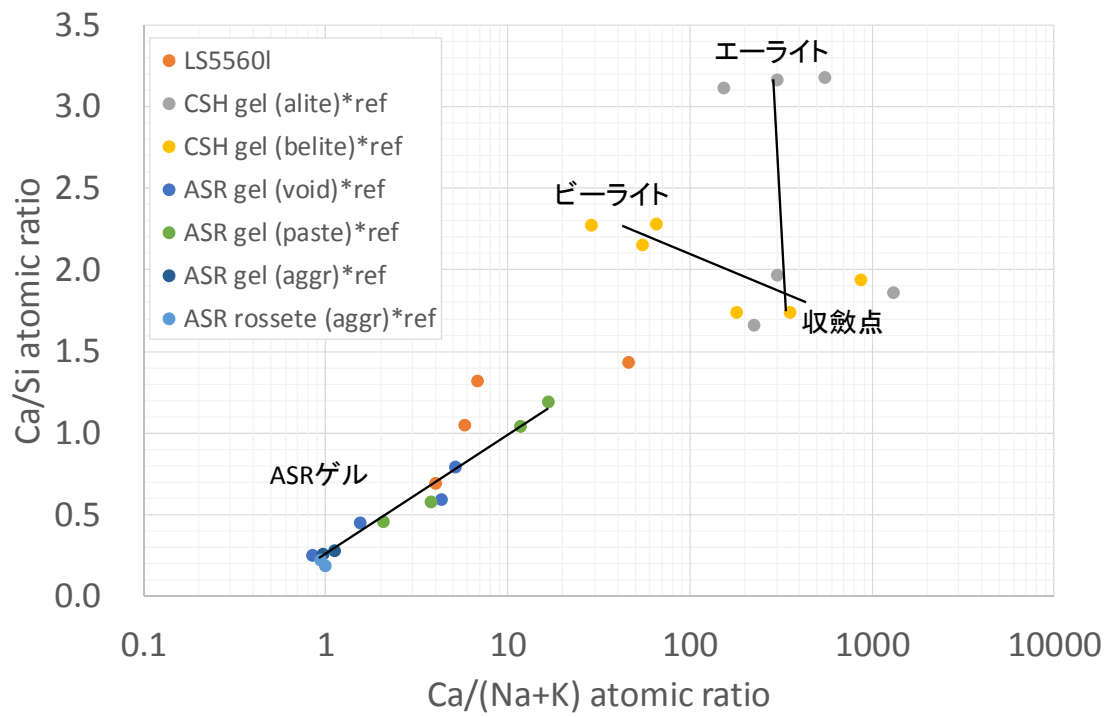




付図 8.7 ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 (WI5538I)



付図 8.8 ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 (WI5560I)



付図 8.9 ASR ゲルの化学組成分布[Ca/Si]－[Ca/(Na+K)]図 (I055601)

### Ⅲ 事業進捗の管理と成果報告の実施

#### 1 実施履歴

表 1.1 に、事業進捗の管理と成果報告の履歴を示す。

表 1.1 事業進捗の管理と成果総括に係る活動履歴

| 作業項目              | 平成28年度 |              |    |      |             |    |              |        |              |    |     |              |
|-------------------|--------|--------------|----|------|-------------|----|--------------|--------|--------------|----|-----|--------------|
|                   | 4月     | 5月           | 6月 | 7月   | 8月          | 9月 | 10月          | 11月    | 12月          | 1月 | 2月  | 3月           |
| 1. 研究会<br>ASR研究会  | [22]   |              |    | [19] |             |    | [6]          | 9 [22] | [12]         |    | [3] |              |
| 2. 第三者有識者委員会      |        |              |    | [19] |             |    |              | [22]   |              |    | [3] |              |
| 3. 報告会            |        | [16]<br>実施計画 |    |      | [1]<br>中間報告 |    | [17]<br>中間報告 |        | [19]<br>中間報告 |    |     | [20]<br>成果報告 |
| 4. 報告書作成          |        |              |    |      |             |    |              |        |              |    |     |              |
| 5. 品質管理活動         |        |              |    |      |             |    |              |        |              |    |     |              |
| 規制庁殿との打合せ<br>月報提出 |        | △            | △  | △    | △           | △  | △            | △      | △            | △  | △   | △            |

#### 2 報告会

##### (1) 第1回

今年度実施計画を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：過年度までの結果では、骨材の種類によって膨張率に違いが見られたことから、この点を考慮した観点から評価を行う。

2016年5月16日（月）13：30～16：30 原子力規制庁 18F 会議室 出席者 9名

##### (2) 第2回

第一回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点：岩石学的評価の各試験項目は、JNES フローで提案している方法の有用性を確認し、精度、使用性、必要とする設備等から適用性を検討する。

2016年8月1日（月）13：30～16：30 原子力規制庁 18F 会議室 出席者 7名

##### (3) 第3回

第二回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点:試験方法や診断方法の提案において、採用する根拠や採用しない根拠を示すこと。

2016年10月17日(月) 13:30~16:30 原子力規制庁 18F 会議室 出席者 11 名

(3)第4回

第三回中間進捗状況を説明し、内容についての質疑を行った。

要点:提案した ASR 診断フローは、定期検査及び特別点検の両方に使えるものである。

2016年12月19日(月) 13:30~15:15 原子力規制庁 18F 会議室 出席者 12 名

(4)第5回

最終成果を説明し、内容についての質疑を行った。

要点:骨材試験方法の温度及びアルカリ濃度依存性で、膨張率と質量変化率との関係が、急速膨張性骨材と遅延膨張性骨材では異なる傾向となる。

2017年2月20日(月) 10:00~12:00 原子力規制庁 18F 会議室 出席者 10 名

3 第三者有識者委員会

委員は、本テーマに関係する分野に造詣が深く、本事業には直接関与していない第三者の立場の有識者の観点から京都大学・教授、宇都宮大学・名誉教授を選任した。

(1)第1回

第二回報告会に向けて、進捗内容に関する意見を聴取した。

要点:仮に ASR の痕跡が発見されたとしても、構造物としての寿命まで ASR 劣化が進行しなければ問題はなく、構造物の健全性評価も今後必要であろう。

2016年7月19日(火) 14:00~16:00 弊社 CR-E 会議室 出席者 10 名

(2)第2回

第四回報告会に向けて、進捗内容に関する意見を聴取した。

要点:今回の提案内容は、前回コメント内容を反映したものであり、評価できる。

2016年11月22日(火) 17:00~19:00 弊社 CR-C 会議室 出席者 10 名

(2)第3回

最終報告会に向けて、成果案の内容に関する意見を聴取した。

要点:今後の課題としては、これらのフローを実運用した場合に、データが蓄積されて改善につながるような仕組みの構築が必要であろう。

2017年2月3日(金) 17:15~19:15 弊社 CR-F 会議室 出席者 9 名



#### 4 研究会

##### (1)ASR 研究会

研究会委員は、主査を始め、大学、国研、民間の7名で構成される。

4/22、7/19、10/6、11/9、11/22、12/12、2/3 に開催し、報告会に向けた意見交換を行った。

#### 5 定例報告

規制庁殿との打合せや月報提出も、予定通り定期的に行った。打合せは、5回の報告会以外に6/20、9/12、11/28、1/30、3/13に行い、月報は翌月の初旬に毎月提出した。

#### 6 品質管理活動

5月に提出・承認された品質管理計画書に従って、弊社品質管理体制のもとで、品質管理活動や文書管理等を行った。

#### IV 結論

JNES フローの骨材試験方法（国際的手法である RILEM AAR-3 および AAR-4）及び ASR 診断方法の有効性を確認し、適用可能な骨材試験方法及び ASR 診断方法を整備した。

国内 20 箇所の採石場から入手・選定した、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 種類に対して、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とともに、改善案を含む試験による結果の比較・分析を行った。

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や、ASR 劣化した実構造物から採取したコアの外観観察、岩石学的評価によるコンクリート構造物の反応性評価や劣化度評価、及び促進膨張試験による残存膨張のポテンシャル評価等を行った。

以上を踏まえて、国内の急速膨張性骨材及び遅延膨張性骨材に対する骨材の ASR 試験フロー及びコンクリート構造物の ASR 診断フローを提案した。

あわせて、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国内外の数値解析的手法を調査し、その適用性や構成則の検討を行った。さらに、ASR に関する国際会議等に参加し、関連情報を収集した。

## 謝辞

本研究は、株式会社三菱総合研究所が原子力規制庁より委託を受け、再委託契約の下で、東北大学、広島大学と連携して実施したものです。

したがって、本報告書は株式会社三菱総合研究所のクレジットで作成しておりますが、再委託先が有するノウハウや知見も含めた研究活動の成果を取りまとめたものです。加えて、専門性の高い知見が必要な研究のとりまとめに際しては、学术界、産業界の方々から構成される委員会や研究会から多大なご協力を賜りました。

あらためて、再委託先の機関ならびにご協力頂いた関係各所に対し、御礼申し上げます。

平成 29 年 3 月

株式会社三菱総合研究所

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

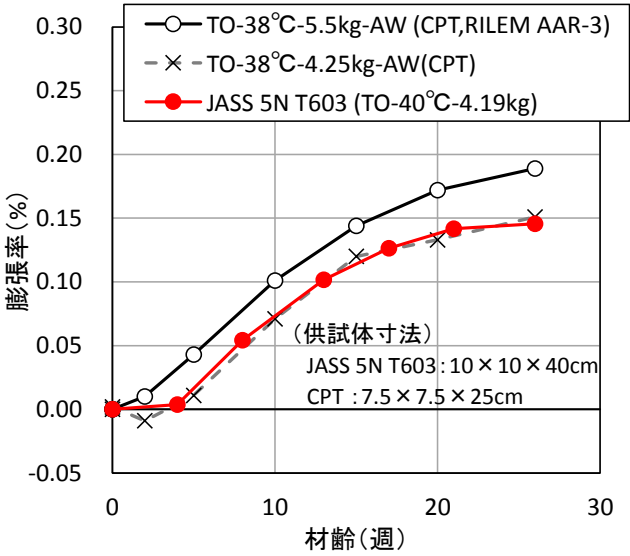
正誤表

**MRI**株式会社三菱総合研究所

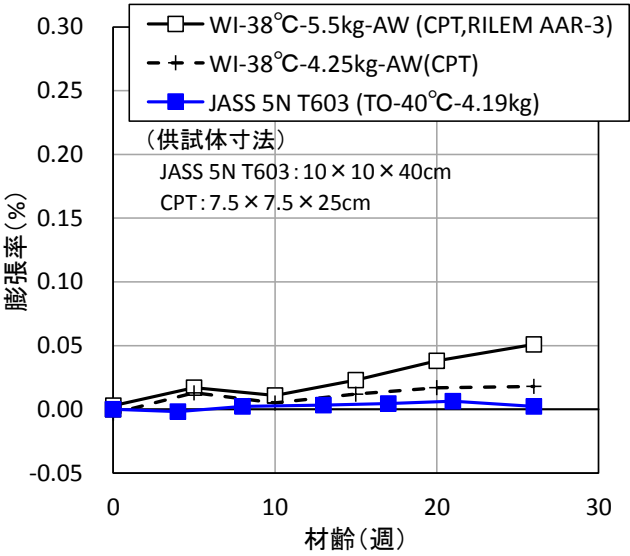


P2-35

(誤)



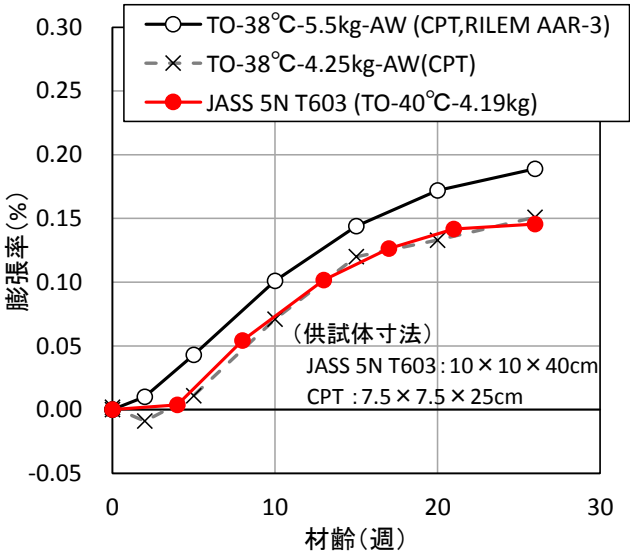
(a) 骨材 T0 (急速膨張性)



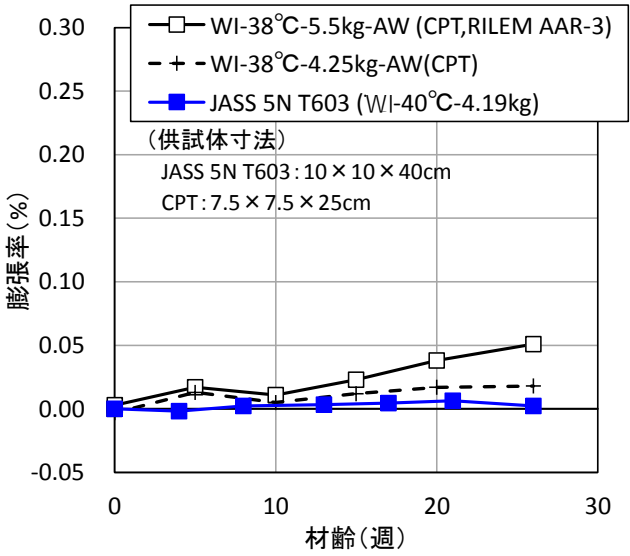
(b) 骨材 WI (遅延膨張性)

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)

(正)



(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)

P2-64

(誤)

表 4.2 コンクリートの調合

| 骨材種類               | アルカリ<br>総量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | W/B<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |          |             |                   |      |      | 混和剤                                |                                   |                                                   |
|--------------------|------------------------------------|------------|------------|--------------------------|----------|-------------|-------------------|------|------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
|                    |                                    |            |            | 水<br>(W)                 | 結合材(B)   |             | 細骨材<br>(非反<br>応性) | 粗骨材  |      | AE 減水<br>剤<br>(B×%) ※ <sup>1</sup> | AE<br>調整剤<br>(B×%) ※ <sup>2</sup> | NaOH<br>水溶液※ <sup>3</sup><br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|                    |                                    |            |            |                          | セメ<br>ント | フライ<br>アッシュ |                   | 反応性  | 非反応性 |                                    |                                   |                                                   |
| 骨材 T0<br>(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<br>(遅延)      | 3.0                                |            |            |                          | 320      | —           | 821               | 1007 | —    |                                    | —                                 | 2.49                                              |
|                    | 5.5                                |            |            |                          | 320      | —           | 821               | 1007 | —    |                                    |                                   | 3.74                                              |
| 骨材<br>IO(非反応<br>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

(正)

表 4.2 コンクリートの調合

| 骨材種類            | アルカリ<br>総量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | W/B<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |          |             |                   |           | 混和剤        |                                    |                                   |                                                   |
|-----------------|------------------------------------|------------|------------|--------------------------|----------|-------------|-------------------|-----------|------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
|                 |                                    |            |            | 水<br>(W)                 | 結合材(B)   |             | 細骨材<br>(非反<br>応性) | 粗骨材       |            | AE 減水<br>剤<br>(B×%) ※ <sup>1</sup> | AE<br>調整剤<br>(B×%) ※ <sup>2</sup> | NaOH<br>水溶液※ <sup>3</sup><br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|                 |                                    |            |            |                          | セメ<br>ント | フライ<br>アッシュ |                   | 反応性<br>骨材 | 非反応性<br>骨材 |                                    |                                   |                                                   |
| 骨材 T0<br>(急速)   | 3.0                                | 50         | 45         | 160                      | 320      | —           | 821               | 309       | 724        | 1.45                               | 0.1                               | 8.00                                              |
|                 | 5.5                                |            |            |                          | 320      | —           | 821               | 309       | 724        |                                    | 0.1                               | 24.1                                              |
|                 | 3.0                                |            |            |                          | 272      | 48          | 814               | 308       | 718        |                                    | —                                 | 4.59                                              |
|                 | 5.5                                |            |            |                          | 272      | 48          | 814               | 308       | 718        |                                    | —                                 | 20.7                                              |
| 骨材 WI<br>(遅延)   | 4.25                               |            |            |                          | 320      | —           | 821               | 1007      | —          |                                    | —                                 | 16.1                                              |
|                 | 5.5                                |            |            |                          | 320      | —           | 821               | 1007      | —          |                                    | —                                 | 24.1                                              |
| 骨材 I0<br>(非反応性) | 5.5                                |            |            |                          |          |             |                   | 320       | —          |                                    | 821                               | —                                                 |

注記) ※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

P2-65  
(誤)

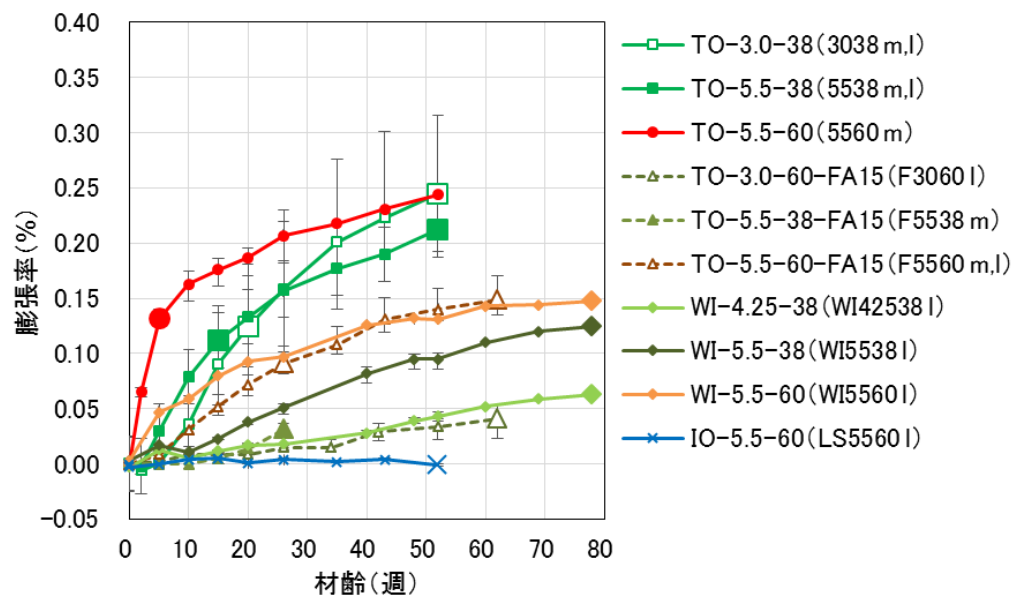


図 4.3 膨張率の測定結果

(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。)

(正)

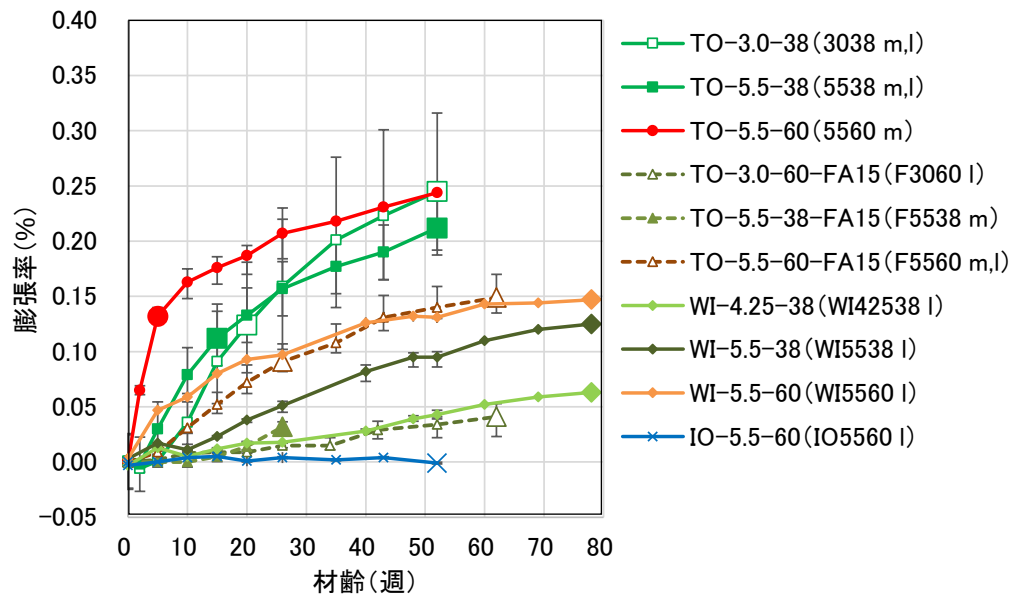


図 4.3 膨張率の測定結果

(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-劣化進行段階(m, l)を表す。)

P2-66

(誤)

表 4.4 促進養生条件とコア水準名

| 骨材<br>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<br>置換率 (%) | アルカリ量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 温度<br>(°C) | 初期                   | 中期                     | 後期                       |
| 骨材 T0<br>(急速)   | 0                  | 3.00                          | 38         | —                    | 3038m<br>(20 週/0.12%)  | 30381<br>(52 週/0.25%)    |
|                 |                    | 5.50                          | 38         | 5538i<br>(0 週/0.00%) | 5538m<br>(15 週/0.11%)  | 55381<br>(52 週/0.21%)    |
|                 |                    |                               | 60         | —                    | 5560m<br>(5 週/0.13%)   | —                        |
|                 | 15                 | 3.00                          | 60         | —                    | —                      | F30601<br>(62 週/0.04%)   |
|                 |                    | 5.50                          | 38         | —                    | F5538m<br>(26 週/0.03%) | —                        |
|                 |                    |                               | 60         | —                    | F5560m<br>(26 週/0.09%) | F55601<br>(62 週/0.15%)   |
| 骨材 WI<br>(遅延)   | 0                  | 4.25                          | 38         | —                    | —                      | WI425381<br>(78 週/0.06%) |
|                 |                    | 5.50                          | 38         | —                    | —                      | WI55381<br>(78 週/0.13%)  |
|                 |                    | 5.50                          | 60         | —                    | —                      | WI55601<br>(78 週/0.15%)  |
| 骨材 I0<br>(非反応性) | 0                  | 5.50                          | 60         | —                    | —                      | I055601<br>(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



(正)

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 (%) | アルカリ総量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 温度 (°C) | 初期                                  | 中期                     | 後期                       |
| 骨材 T0 (急速)   | 0              | 3.00                        | 38      | —                                   | 3038m<br>(20 週/0.12%)  | 3038l<br>(52 週/0.25%)    |
|              |                | 5.50                        | 38      | 5538i<br>(0 週/0.00%) <sup>注 4</sup> | 5538m<br>(15 週/0.11%)  | 5538l<br>(52 週/0.21%)    |
|              |                |                             | 60      | —                                   | 5560m<br>(5 週/0.13%)   | —                        |
|              | 15             | 3.00                        | 60      | —                                   | —                      | F3060l<br>(62 週/0.04%)   |
|              |                | 5.50                        | 38      | —                                   | F5538m<br>(26 週/0.03%) | —                        |
|              |                |                             | 60      | —                                   | F5560m<br>(26 週/0.09%) | F5560l<br>(62 週/0.15%)   |
| 骨材 WI (遅延)   | 0              | 4.25                        | 38      | —                                   | —                      | WI42538l<br>(78 週/0.06%) |
|              |                | 5.50                        | 38      | —                                   | —                      | WI5538l<br>(78 週/0.13%)  |
|              |                | 5.50                        | 60      | —                                   | —                      | WI5560l<br>(78 週/0.15%)  |
| 骨材 IO (非反応性) | 0              | 5.50                        | 60      | —                                   | —                      | I05560l<br>(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

注 4) 5538i は 20°C で 2 週間養生としたが、促進養生は行っていないため、促進養生後のコア採取時材齢としては 0 週

P2-69

(誤)

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 <sub>2</sub> O <sup>(A)</sup><br>(mg) | NaOH 濃度 (N)              | AW 量 (g) | R <sub>2</sub> O <sup>(B)</sup><br>(mg) | (B) - (A)<br>R <sub>2</sub> O (mg) | R <sub>2</sub> O<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|          | 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                                     |

(正)

表 4.6 不織布の分析結果および促進養生後のコンクリートアルカリ総量

| 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 <sub>2</sub> O <sup>(A)</sup> (mg) | NaOH 濃度 (N)              | AW 量 (g) | R <sub>2</sub> O <sup>(B)</sup> (mg) | (B) - (A) R <sub>2</sub> O (mg) | R <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> ) |
|          | Na                       | K    | Na        | K    | Na      | K    |                                      |                          |          |                                      |                                 |                                       |
| 3038m    | 403                      | 67.3 | 4.57      | 2.20 | 408     | 69.5 | 604                                  | 0.818                    | 50       | 1268                                 | 664                             | 3.47                                  |
| 30381    | 560                      | 105  | 16.6      | 28.7 | 577     | 134  | 883                                  | 0.818                    | 50       | 1268                                 | 385                             | 3.28                                  |
| 5538m    | 1360                     | 125  | 7.30      | 2.82 | 1367    | 128  | 1944                                 | 1.5                      | 50       | 2325                                 | 381                             | 5.75                                  |
| 55381    | 974                      | 97.7 | 41.6      | 41.0 | 1016    | 139  | 1479                                 | 1.5                      | 50       | 2325                                 | 846                             | 6.08                                  |
| 5560m    | 1540                     | 132  | 5.55      | 3.48 | 1546    | 135  | 2191                                 | 1.5                      | 50       | 2325                                 | 134                             | 5.58                                  |
| F30601   | 318                      | 69.2 | 3.95      | 18.1 | 322     | 87.3 | 503                                  | 0.818                    | 50       | 1268                                 | 765                             | 3.52                                  |
| F5560m   | 829                      | 84.0 | 6.33      | 14.9 | 835     | 98.9 | 1204                                 | 1.5                      | 50       | 2325                                 | 1121                            | 6.27                                  |
| F55601   | 786                      | 80.7 | 8.67      | 43.9 | 795     | 125  | 1170                                 | 1.5                      | 50       | 2325                                 | 1155                            | 6.30                                  |
| WI425381 | 304                      | 23.7 | 3.24      | 1.06 | 307     | 24.8 | 434                                  | 1.16                     | 50       | 1798                                 | 1364                            | 5.20                                  |
| WI55381  | 408                      | 24.4 | 11.50     | 8.53 | 420     | 32.9 | 592                                  | 1.5                      | 50       | 2325                                 | 1733                            | 6.72                                  |
| IO55601  | 602                      | 120  | 2.83      | 1.15 | 605     | 121  | 911                                  | 1.5                      | 50       | 2325                                 | 1414                            | 6.49                                  |

R<sub>2</sub>O<sup>[A]</sup> (g) :

$$[\text{Na}_2\text{O 分子量}(46+16) / (\text{Na 原子量}(23) \times 2) \times \text{Na の合計}(\text{mg})] \\ + [\text{K の合計}(\text{mg}) \times \text{Na}_2\text{O 分子量}(46+16) / (\text{K 原子量}(39.1) \times 2)]$$

R<sub>2</sub>O<sup>[B]</sup> (mg) :

$$[\text{NaOH 濃度}(\text{N}) \times \text{Na 原子量}(23) \times \text{AW 量}(\text{g}) / 1000] \\ \times [\text{Na}_2\text{O 分子量}(46+16) / \text{Na}_2(46)] \times 1000 (\text{mg 換算})$$

P2-76

(誤)

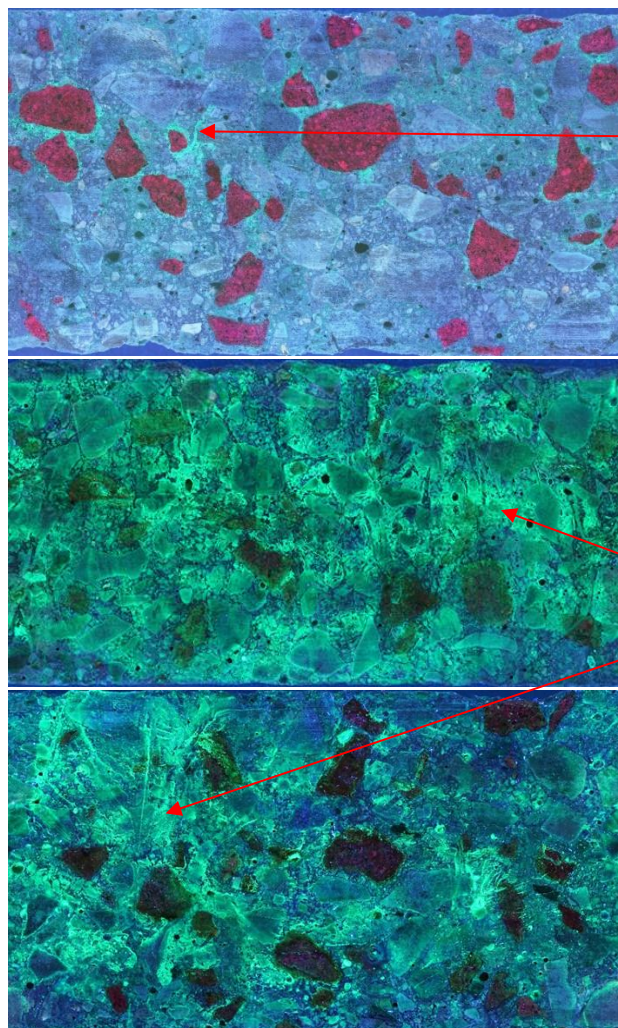
初期  
(0週/0.00%)



膨張中期  
(15週/0.11%)



膨張後期  
(52週/0.21%)



微量のゲル  
の検出

全面を覆う  
大量のゲル  
の可視化

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



(正)

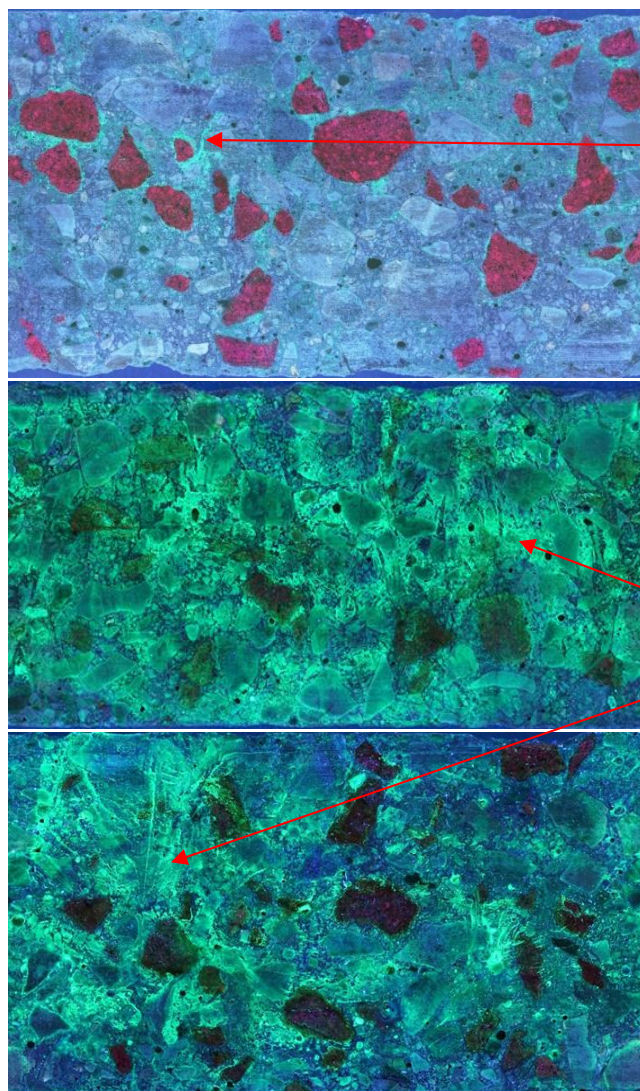
初期  
(0週/0.00%)



中期  
(15週/0.11%)



後期  
(52週/0.21%)



微量のゲル  
の検出

全面を覆う  
大量のゲル  
の可視化

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

P2-92, 93

(誤)

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<br>アルカリ                | 水溶性<br>アルカリ | 水溶性アルカリ           |                  | 全<br>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/m <sup>3</sup> |             | %                 |                  | Na2Oeq kg/m <sup>3</sup> |         | %                 |                  | Na2Oeq kg/m <sup>3</sup> |      |
|              | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (1)  | (2)                      | (3)         | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (4)                      | (5)     | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (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 |
| I05560l      | 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<br>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 <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (8)  | (11)                     | (12)        | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> 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。)

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)  $\times 320 \text{ kg/m}^3$

(正)

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<br>アルカリ                             | 水溶性<br>アルカリ | 水溶性アルカリ           |                  | 全<br>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         | %                 |                  |      | Na <sub>2</sub> Oeq kg/m <sup>3</sup> |             | %                 |                  | Na <sub>2</sub> Oeq kg/m <sup>3</sup> |         | %                 |                  | Na <sub>2</sub> Oeq kg/m <sup>3</sup> |      |
|              | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (1)  | (2)                                   | (3)         | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (4)                                   | (5)     | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (6)                                   | (7)  |
| 5538i        | 0.31              | 0.07             | 0.36 | 1.72                                  | 0.64        | 0.14              | 0.04             | 3.88                                  | 4.95    | 0.03              | 0.01             | 0.34                                  | 2.89 |
| 5538m        | 0.30              | 0.13             | 0.39 | 1.89                                  | 0.71        | 0.13              | 0.03             | 3.52                                  | 4.70    | 0.09              | 0.02             | 1.05                                  | 1.76 |
| 3038m        | 0.34              | 0.14             | 0.44 | 2.10                                  | 0.78        | 0.08              | 0.03             | 2.22                                  | 3.53    | 0.06              | 0.02             | 0.73                                  | 0.70 |
| 5560m        | 0.35              | 0.09             | 0.40 | 1.94                                  | 0.73        | 0.14              | 0.03             | 3.64                                  | 4.85    | 0.06              | 0.01             | 0.71                                  | 2.20 |
| F5560m       | 0.29              | 0.23             | 0.44 | 2.75                                  | 0.67        | 0.15              | 0.04             | 3.98                                  | 6.06    | 0.08              | 0.02             | 0.91                                  | 2.40 |
| 5538l        | 0.28              | 0.12             | 0.37 | 1.76                                  | 0.66        | 0.11              | 0.03             | 3.04                                  | 4.15    | 0.10              | 0.04             | 1.25                                  | 1.14 |
| 3038l        | 0.21              | 0.08             | 0.26 | 1.25                                  | 0.47        | 0.07              | 0.03             | 2.04                                  | 2.83    | 0.05              | 0.01             | 0.55                                  | 1.03 |
| F3060l       | 0.27              | 0.18             | 0.39 | 2.44                                  | 0.60        | 0.07              | 0.03             | 1.96                                  | 3.80    | 0.06              | 0.02             | 0.73                                  | 0.63 |
| F5560l       | 0.30              | 0.23             | 0.45 | 2.81                                  | 0.69        | 0.11              | 0.03             | 2.98                                  | 5.10    | 0.08              | 0.01             | 0.88                                  | 1.41 |
| W15560l      | 0.28              | 0.11             | 0.35 | 1.70                                  | 0.63        | 0.17              | 0.04             | 4.34                                  | 5.40    | 0.12              | 0.02             | 1.37                                  | 2.34 |
| WI42538l     | 0.28              | 0.11             | 0.36 | 1.71                                  | 0.64        | 0.11              | 0.04             | 3.18                                  | 4.25    | 0.08              | 0.02             | 1.00                                  | 1.54 |
| IO5560l      | 0.20              | 0.06             | 0.24 | 1.14                                  | 0.43        | 0.14              | 0.01             | 3.42                                  | 4.14    | 0.01              | 0.00             | 0.07                                  | 2.93 |
| 架台上部         | 0.35              | 0.18             | 0.46 | 2.85                                  | 1.07        | 0.17              | 0.08             | 5.18                                  | 6.97    | 0.10              | 0.08             | 1.59                                  | 2.52 |
| 架台下部         | 0.26              | 0.12             | 0.33 | 2.01                                  | 0.75        | 0.16              | 0.08             | 4.89                                  | 6.16    | 0.05              | 0.06             | 0.93                                  | 3.22 |
| 平均値          | 0.28              | 0.13             | 0.37 | 1.69                                  | 0.63        | -                 | -                | -                                     | -       | 0.07              | 0.02             | 0.80                                  | -    |
| 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                |                  |                                       |         |                   |                  |                                       |      |
|              | %                 |                  |      | Na <sub>2</sub> Oeq kg/m <sup>3</sup> |             | %                 |                  |                                       | 比率      |                   |                  |                                       |      |
|              | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | (8)  | (11)                                  | (12)        | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> 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    |                   |                  |                                       |      |
| フライアッシュ      | 0.87              | 1.19             | 1.65 |                                       |             |                   |                  |                                       |         |                   |                  |                                       |      |
| FAセメント       |                   |                  | 0.72 | 2.31                                  | 0.57        |                   |                  | 0.18                                  | 0.25    |                   |                  |                                       |      |

(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：  $1.5 \times ((1)/100) \times (\text{単位セメント量: } 320 \text{ kg/m}^3)$ 。換算係数  $1.5 = \text{普通ポルトランドセメント (OPC) の全アルカリ量 (8) / クリンカーの最小アルカリ量平均値 (CPT 試験体使用材料の値を使用)} = 0.56/0.37$  (FA セメントの場合:  $0.72/0.37$ )
- (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  $((9)/100) \times 320 \text{ kg/m}^3$

P2-104

(誤)

表 4.21 試験に供したコア本数

| 小型<br>試験体名 | コアの<br>採取方向  | コア径：φ 10cm     |                         |        |        | コア径：φ 5cm<br>アルカリ溶液<br>浸漬法 |
|------------|--------------|----------------|-------------------------|--------|--------|----------------------------|
|            |              | 基礎<br>デー<br>タ用 | JCI-DD2 法 <sup>※1</sup> |        |        |                            |
|            |              |                | DD2                     | DD2-AW | DD2-WW |                            |
| T0_3.0     | 水平           | —              | 1 本 <sup>※2</sup>       | 1 本    | 1 本    | 3 本                        |
|            | 垂直           | 3 本            | 1 本 <sup>※2</sup>       | 1 本    | 1 本    | —                          |
| T0_5.5     | 水平           | —              | 1 本 <sup>※2</sup>       | 1 本    | 1 本    | 3 本                        |
|            | 垂直           | 3 本            | 1 本 <sup>※2</sup>       | 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/m<sup>3</sup>は1.33N、3.0kg/m<sup>3</sup>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。

(正)

表 4.21 試験に供したコア本数

| 小型<br>試験体名 | コアの<br>採取方向  | コア径：φ10cm               |        |        |                              | コア径：φ5cm<br>アルカリ溶液<br>浸漬法 |
|------------|--------------|-------------------------|--------|--------|------------------------------|---------------------------|
|            |              | JCI-DD2 法 <sup>※1</sup> |        |        |                              |                           |
|            |              | DD2                     | DD2-AW | DD2-WW | DD2-AW-<br>60℃ <sup>※2</sup> |                           |
| T0_3.0     | 水平           | 1 本 <sup>※3</sup>       | 1 本    | 1 本    | —                            | 3 本                       |
|            | 垂直           | 1 本 <sup>※3</sup>       | 1 本    | 1 本    | —                            | —                         |
| T0_5.5     | 水平           | 1 本 <sup>※3</sup>       | 1 本    | 1 本    | —                            | 3 本                       |
|            | 垂直           | 1 本 <sup>※3</sup>       | 1 本    | 1 本    | —                            | —                         |
| T0_5.5 有筋  | 水平 (pt=2.4%) | 2 本                     | 2 本    | —      | —                            | 3 本                       |
|            | 垂直 (pt=0.8%) | 2 本                     | 2 本    | —      | —                            | 3 本                       |
| WI_5.5     | 水平           | 1 本                     | 1 本    | 1 本    | 1 本                          | 3 本                       |
|            | 垂直           | 1 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の方法（湿度95%以上、温度条件：40℃）

DD2-AW：5.5kg/m<sup>3</sup>は1.33N、3.0kg/m<sup>3</sup>は0.726Nでアルカリラッピング。温度条件：40℃。

DD2-WW：JISモルタルバー法記載の方法で水ラッピング。温度条件：40℃。

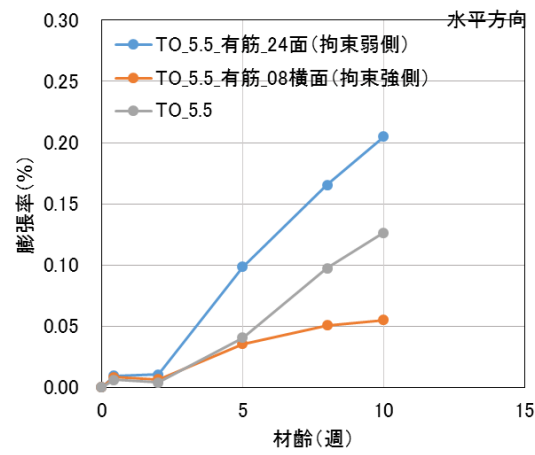
※2：WI5.5は遅延膨張性を示す骨材WIを用いており、40℃では膨張が緩慢になると予想されたことから、温度を60℃とし促進を強めた水準も設定。

※3：アルカリ溶脱を確認した水準。

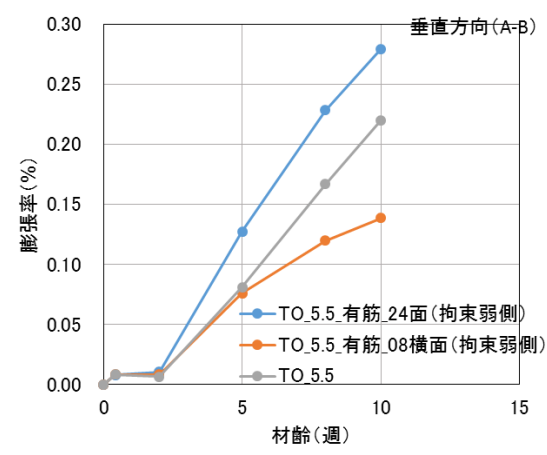


P2-106

(誤)



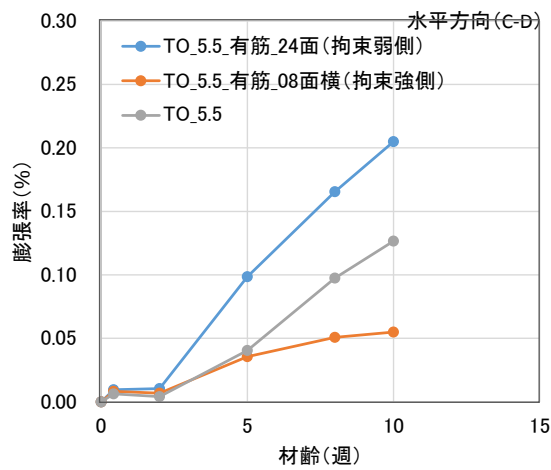
(a) 水平方向



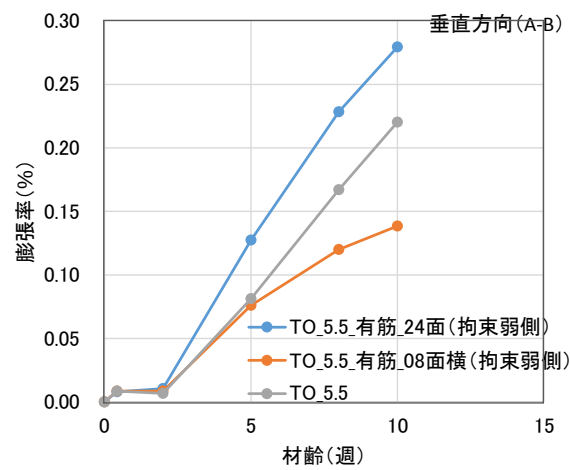
(b) 垂直方向

図 4.38 表面膨張率の経時変化 (TO\_5.5\_有筋)

(正)



(a) 水平方向



(b) 垂直方向

図 4.38 表面膨張率の経時変化 (TO\_5.5\_有筋)

P2-127

(誤)

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<br>上部 | キルン架台<br>上部 |
|----------------------------|----------------------|-------------|-------------|
| 外<br>観<br>観<br>察           | 可視光                  | ○           | ○           |
|                            | 蛍光法                  | ○           | ○           |
|                            | 実体顕微鏡                | ○           | ○           |
| 岩<br>石<br>学<br>的<br>評<br>価 | 薄片偏光顕微鏡<br>観察        | ○           | ○           |
|                            | 薄片スキャナ               | ○           | ○           |
|                            | コア XRD               | ○           | ○           |
|                            | 岩種構成定量               | ○           | ○           |
|                            | 薄片 SEM 観察／<br>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                  |                      | ○           | ○           |

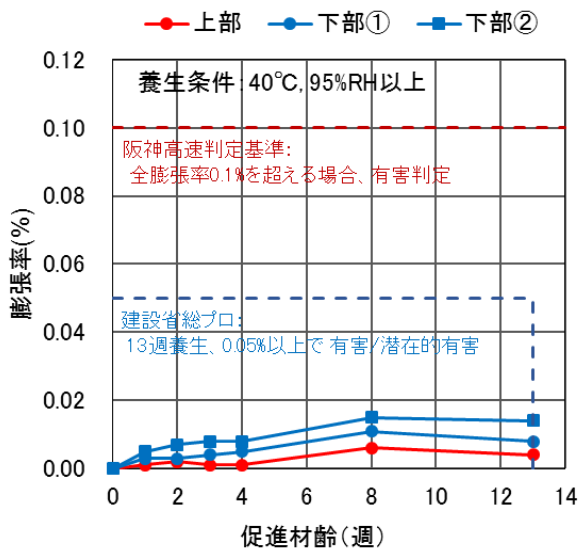
(正)

表 4.25 ASR 劣化した実構造物の試験実施項目

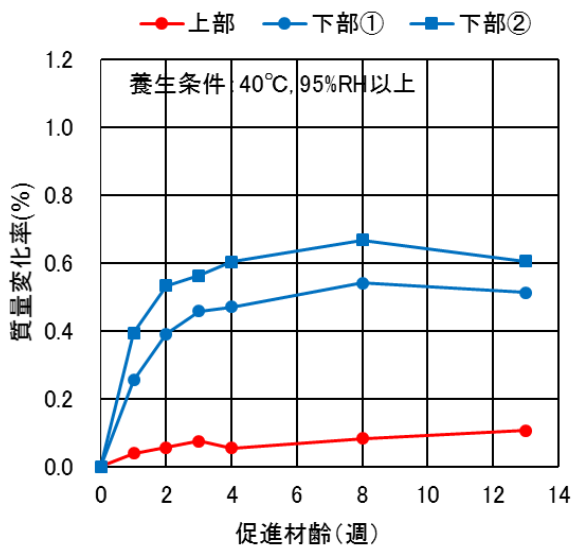
| 分類                         | 試験項目                 | キルン架台<br>上部 | キルン架台<br>下部 |
|----------------------------|----------------------|-------------|-------------|
| 外<br>観<br>観<br>察           | 可視光                  | ○           | ○           |
|                            | 蛍光法                  | ○           | ○           |
|                            | 実体顕微鏡                | ○           | ○           |
| 岩<br>石<br>学<br>的<br>評<br>価 | 薄片偏光顕微鏡<br>観察        | ○           | ○           |
|                            | 薄片スキャナ               | ○           | ○           |
|                            | コア XRD               | ○           | ○           |
|                            | 岩種構成定量               | ○           | ○           |
|                            | 薄片 SEM 観察／<br>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                  |                      | ○           | ○           |

P2-153

(誤)



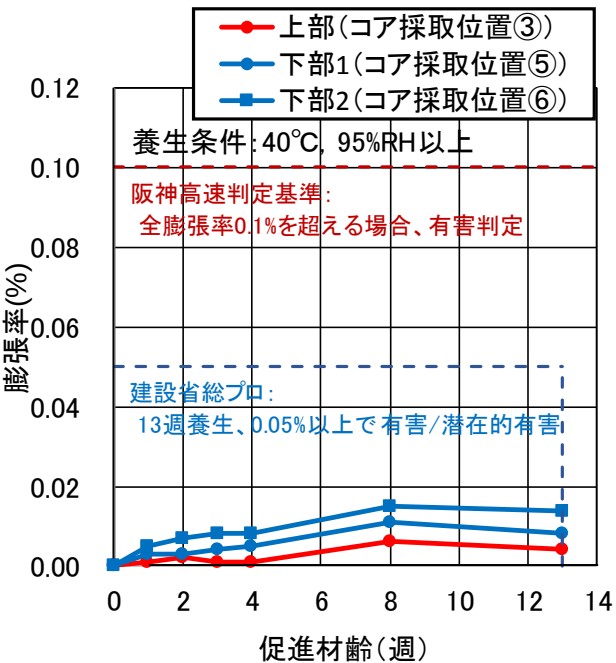
(a) 膨張率



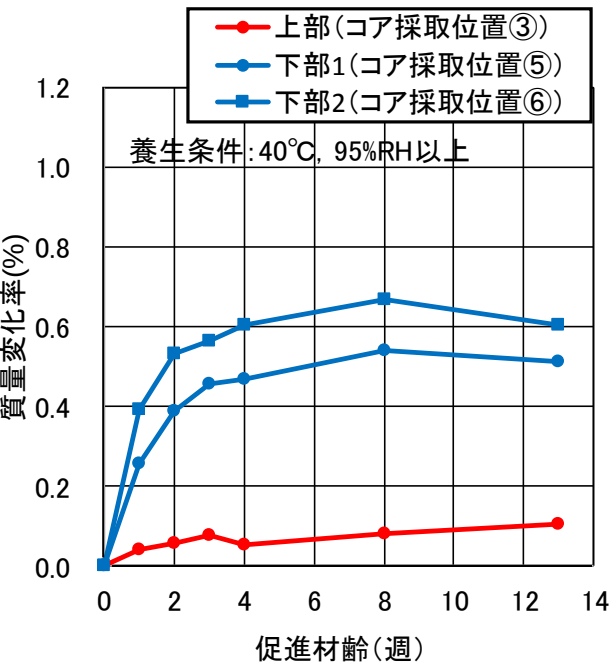
(b) 質量変化率

図 4. 81 JCI-DD2 法によるコアの促進膨張試験結果

(正)



a) 膨張率



(b) 質量変化率

図 4. 81 JCI-DD2 によるコアの促進膨張試験結果

(凡例中のコア採取位置は、図 4. 52 で示した位置)

P2-154  
(誤)

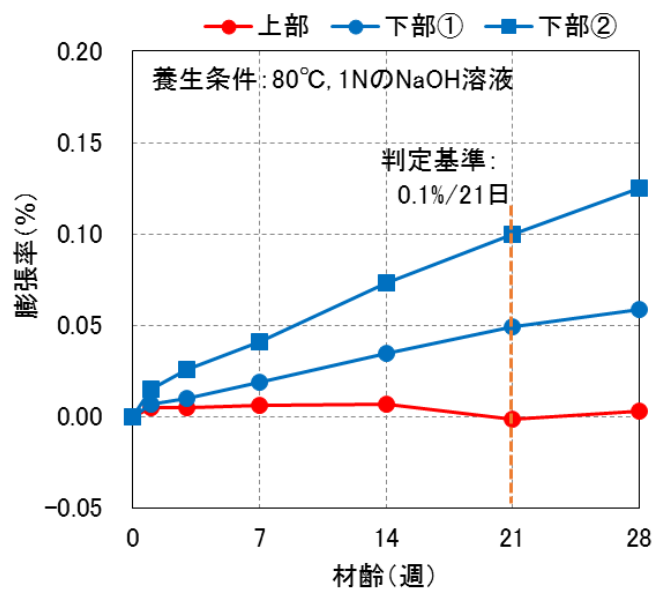


図 4.82 アルカリ溶液浸漬法によるコアの促進膨張試験結果

(正)

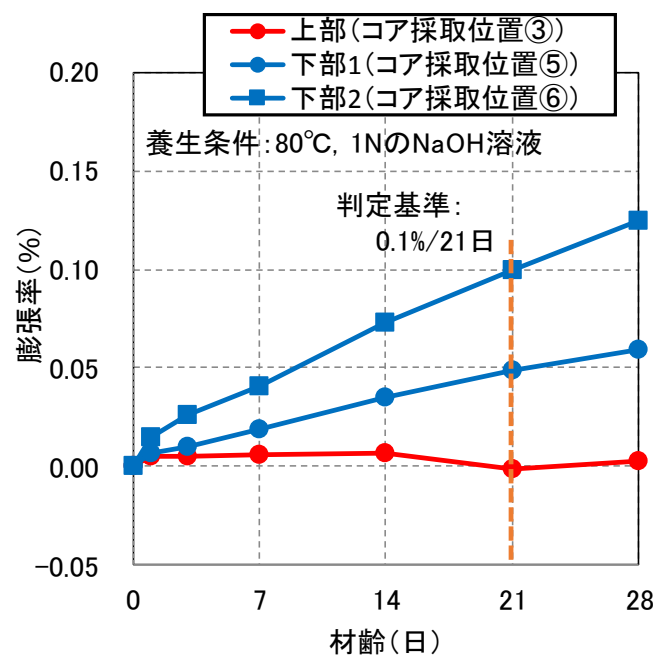


図 4.82 アルカリ溶液浸漬法によるコアの促進膨張試験結果  
(凡例中のコア採取位置は、図 4.52 で示した位置)