

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

熱移動に伴うアルカリ骨材反応による
膨張解析の材料構成則の調査

名古屋大学
平成 29 年 12 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

I	序論	1
1.	事業目的	
2.	事業概要	
II	材料構成則候補決定に必要な文献調査	2
1.	はじめに	
2.	ASRの温度依存性	
2. 1	既往の実験結果	
2. 2	メカニズムに立脚した考察	
2. 3	数値モデルに関する温度依存性	
3.	水分移動の温度依存性	
4.	まとめ	
III	原子力施設へのアルカリ骨材反応による膨張及びひび割れ解析の実例調査並びに材料構成則候補の解析コード組込へのノウハウの調査	17
1.	はじめに	
2.	温度環境の影響を考慮した材料構成則候補の解析コード組込に必要となる新たな情報	
3.	材料構成則候補決定に必要な文献調査の補足情報	
4.	解析コード組込へのノウハウ	
IV	材料構成則候補	19
1.	ASRの膨張ひずみ予測式における構成則	
2.	水分移動における温度依存性	
3.	結論	
V	調査結果の報告	22
1.	実施履歴	
2.	報告内容	

I 序論

1. 事業目的

平成 29 年度末までに整備予定の FINAS/STAR(Basic)における 3 次元ソリッドモデルによるコンクリート中の水分の移動、湿度に依存するアルカリ骨材反応による膨張及びひびずみに依存する物性変化に対応する解析コードについて、原子力施設で顕著となる温度環境の影響（熱移動と水分移動の相互影響を含む）を解析コードに組み込むために必要となる材料構成則候補を決定することを目的とする。

2. 事業概要

(1) 材料構成則候補決定に必要な文献調査

コンクリート構造物の温度環境の影響に伴うアルカリ骨材反応に対応する 3 次元ソリッドモデルによる膨張予測プログラムの作成及び膨張・ひび割れの材料構成則候補の決定のために必要となる国内外の既存文献等を調査する。

(2) 原子力施設へのアルカリ骨材反応による膨張及びひび割れ解析の実例調査並びに材料構成則候補の解析コード組込へのノウハウの調査

原子力施設へのアルカリ骨材反応による膨張及びひび割れベンチマーク解析に関する国際会議（具体的には 2017 年 5 月 8 日及び 9 日にカナダ・オタワで開催される ASCET Phase II Workshop）に出席し、温度環境の影響を考慮した材料構成則候補の解析コード組込に必要な新たな情報、前記(1)の補足情報、解析コード組込へのノウハウ等を調査する。

(3) 調査報告書の作成

前記(1)及び(2)の調査で得られた結果について、平成 29 年度末までに整備予定の FINAS/STAR(Basic)における 3 次元ソリッドモデルによるコンクリート中の水分の移動、湿度に依存するアルカリ骨材反応による膨張及びひびずみに依存する物性変化に対応する解析コードと原子力施設で顕著となる温度環境の影響を受ける解析コードへ改良するために必要となる材料構成則候補（複数可）との関係を整理したものを調査報告書として作成する。

(4) 調査結果の報告

前記(1)、(2)及び 3. (3)について取りまとめた調査結果の報告を定期的（2～3 ヶ月毎程度）に行う。

II 材料構成則候補決定に必要な文献調査

1. はじめに

原子力発電所施設におけるコンクリートのアルカリ骨材反応（現在では、アルカリシリカ反応という単一の現象であることがわかっているため、以下、アルカリシリカ反応、略称として「ASR」を用いる）による膨張挙動を評価し、その結果として生じるコンクリート構造物の性能変化を評価・予測することは高経年化技術評価上重要である。特に、日本において伊方原発1号におけるタービンペデスタルの事例¹、諸外国においてもカナダケベック州の原子力発電所 Gently-2 における原子炉格納建屋の気密性低下や使用済み燃料プールの漏水といった事例が報告されている²。伊方原発1号におけるタービンペデスタルの事例では、温度が一般的な試験環境である 20℃よりも高い温度で ASR が生じていること、また、大断面部材が乾燥を受ける環境で ASR が生じることが特徴的で、広く土木分野を中心として知見が獲得されている事例と大きく発生環境が異なっている。そのため、ASR の温度依存性を評価することは原子力発電所施設に用いられるコンクリート部材の健全性評価上重要であるが、知見としてまとまっていないため、本報告書において調査を行う。

2. ASR の温度依存性

2. 1 既往の実験結果

コンクリートプリズム試験における試験体の、ASR によるコンクリートの膨張ひずみの温度依存性は、Oberholster and Davies³、小林と野村⁴、大岸ら⁵、Folliard et al.⁶、米倉ら

¹ R. Manabe, H. Kawae, K. Ogawa, M. Matsuura, Maintenance management of turbine generator foundation affected by alkali-silica reaction, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14 (2016) 590-606.

² J. Chénier, D. Komljenovic, V. Gocevski, S. Picard, G. Chrétien, An approach regarding aging management program for concrete containment structure at the gently-2 nuclear power plant, *Proceedings of 33rd Annual Conference of the Canadian Nuclear Society*, TCU Place, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, 2012, pp. 126-151.

³ R. E. Oberholster and G. Davies, "An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates," *Cement and Concrete Research*, Vol.16, No.2, pp.181-89 (1986)

⁴ 小林一輔, 野村謙二, "アルカリシリカ反応がコンクリートの諸性状に及ぼす影響 (1) : アルカリ量・温度・反応性骨材の粒度がコンクリートの膨張性状に及ぼす影響," *生産研究*, Vol.40, No.3, pp.156-58 (1988)

⁵ 大岸佐吉, 小野博宣, 山下隆司, "アルカリ骨材反応の促進試験および含浸無機ポリマーによる AAR 抑制効果," *コンクリート工学年次論文集*, Vol.11, No.1, pp.129-34 (1989)

⁶ K. J. Folliard, J. Ideker, M. D. A. Thomas, and B. Fournier, "Assessing Aggregate Reactivity Using the Accelerated Concrete Prism Test," *Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*, pp.269-83 (2004)

7、黒田ら^{8、9}、Lindgård et al.¹⁰が検討を行っているが、本報告書では、Folliard et al.⁶と Lindgård et al.¹⁰の測定結果についてそれぞれ図1、図2に示す。図1、図2に示されるように、凡例は促進試験時の環境温度であるが、60°Cの促進環境は、38°Cの促進環境と比較して、膨張挙動の初期の立ち上がりが早く、その後の膨張挙動の収束も早い。一方、38°Cの促進環境は、膨張挙動が持続し、60°Cの促進環境において収束した膨張ひずみを上回っていることが確認できる。

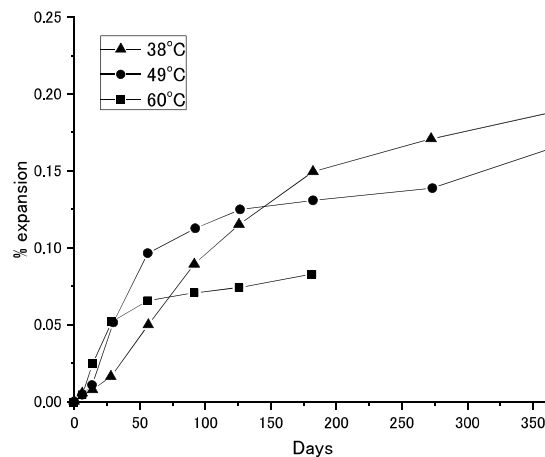


図1 Folliard et al.によるCPT試験体のASR促進試験結果⁶

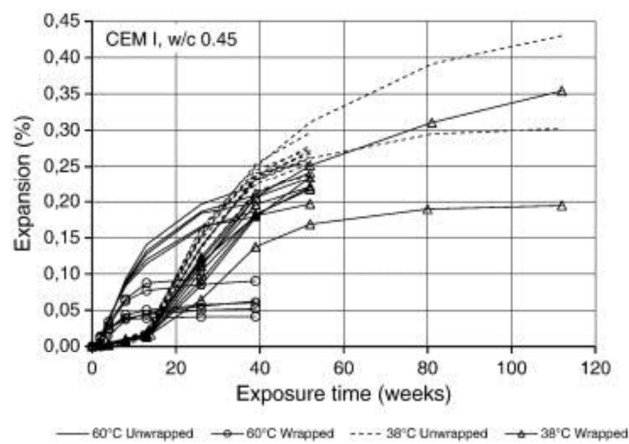


図2 Lindgård et al.によるCPT試験体のASR促進試験結果¹⁰

⁷ 米倉亜州夫, 伊藤秀敏, 政所暢利, "アルカリ骨材反応に起因するコンクリートの膨張に及ぼす温度の影響," セメント・コンクリート論文集, Vol.61, pp.302-09 (2007)

⁸ 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵, "コンクリートのASR膨張に与えるNaOH溶液濃度と保存温度の影響," コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1013-18 (2011)

⁹ 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵, "コンクリートのASR膨張に与える保存温度とアルカリ総量の影響," コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.946-51 (2012)

¹⁰ J. Lindgård, M. D. A. Thomas, E. J. Sellevold, B. Pedersen, Ö. Andiç-Çakır, H. Justnes, and T. F. Rønning, "Alkali-silica reaction (ASR)—performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion," Cement and Concrete Research, Vol.53, pp.68-90 (2013)

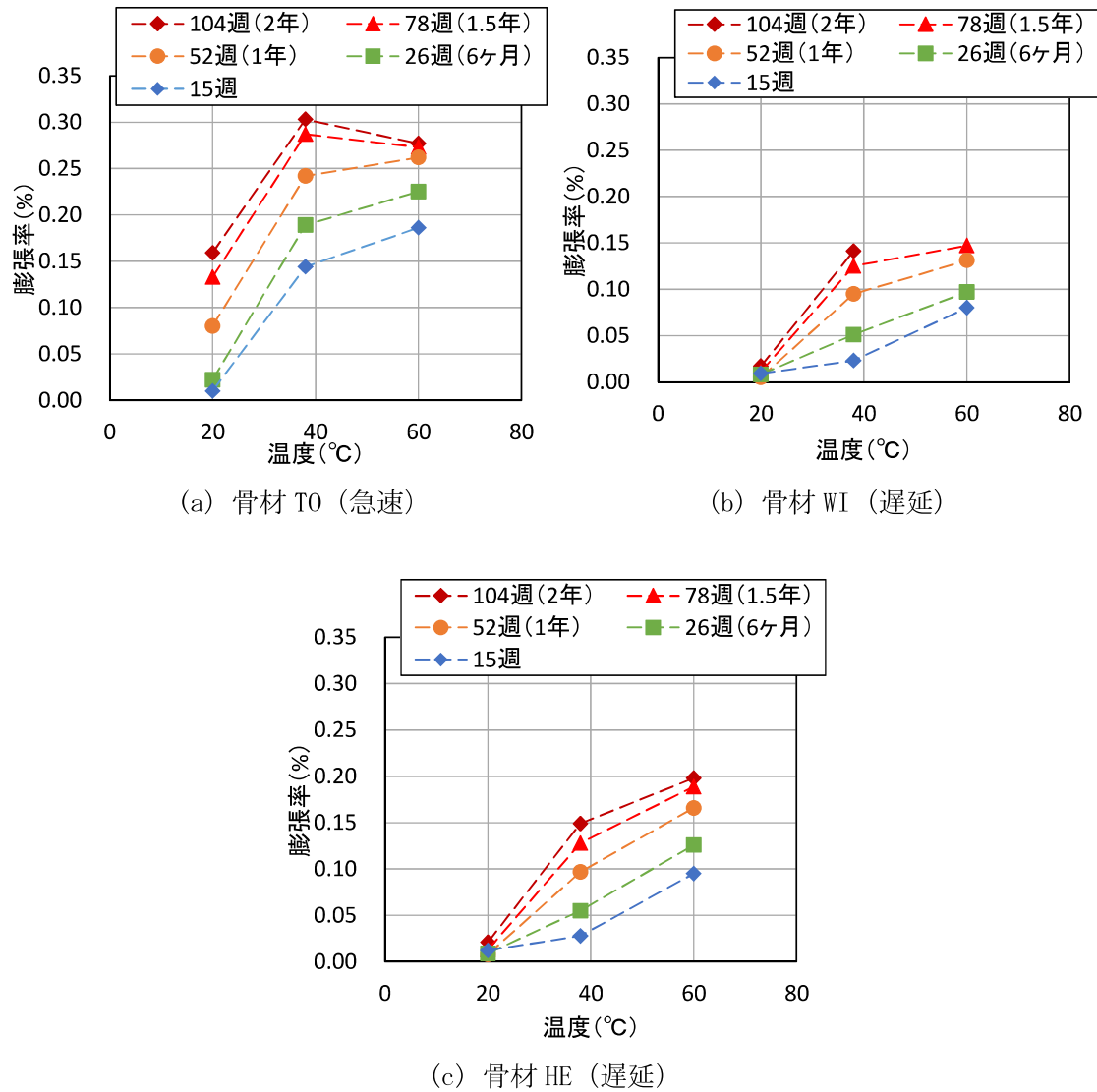


図3 コンクリートプリズム試験における膨張率との温度の関係（アルカリ量 5.5kg/m³）¹¹

すなわち、60℃の促進環境における膨張ひずみの収束値があらゆる温度における膨張ひずみの収束値と等しいことの裏付けが得られないことから、60℃における促進環境におけるコンクリートプリズム試験における試験体の収束膨張ひずみをそのまま用いて、60℃以下の温度環境におかれたコンクリート部材の膨張ひずみの将来予測をすると、過小評価になる可能性がある。

図3に過年度まで実施された、原子力規制庁事業における実験結果を示す¹¹。ここではコンクリートプリズム試験において40℃で膨張が最大となる温度ペシマム現象が報告されている¹¹。しかしながら、最も膨張が生じやすいと考えられる温度ペシマムは、規制庁事業の研究範囲では明確になっていない。また、骨材種類によって温度依存性が異なり、急速膨

¹¹ 三菱総合研究所：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、2017

張性の骨材 T0 は低い温度でも材齢が進むにつれ膨張し (図 3 の (a))、かつ長期的にはさらに膨張ひずみ (図中では、膨張率) が高くなる可能性が示唆された。骨材 WI 及び骨材 HE は、60°C で最も膨張ひずみを生じていたが (図 3 の (b) 及び図 3 の (c))、骨材 T0 と同様に、より低い温度である 20°C あるいは 40°C で長期的にさらに膨張ひずみを生じる可能性が否定できない。そのため、試験材齢 2 年までの結果では実験として十分でなく、膨張速度や最終膨張ひずみの温度依存性について確認するためには、さらに長期にわたって膨張ひずみの測定を継続する必要があることが指摘されている。

2. 2 メカニズムに立脚した考察

ASR による膨張ひずみに差異を生じさせる要因としては、反応性骨材から生じたアルカリシリカゲルの生成量、骨材からペーストに流出したアルカリシリカゲルの流出量、セメントペーストマトリクス of 剛性、生成したアルカリシリカゲルの剛性の変化、アルカリシリカゲルおよび C-S-H のアルカリの取り込み、骨材中の粘土鉱物からのアルカリの溶出、液相中のアルカリ濃度の変化が ASR の反応速度やアルカリシリカゲルの生成量を変化させたり、膨張に寄与するアルカリシリカゲル量を変化させうる。

ASR を生じたコンクリートの薄片観察については、近年の電子ジャーナルの普及や薄片作製技術の向上により、アルカリシリカゲルの鮮明な画像が報告されているが^{例えば、12、13、14、}異なる温度で促進試験を行った同一調合のコンクリートプリズム試験体薄片の観察をしている文献は確認できなかった。

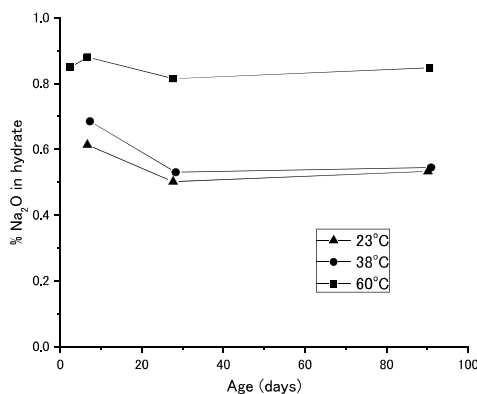


図 4 Berube et al. による細孔溶液の試験結果²⁸

¹² T. Katayama, "The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) — Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR," *Cement and Concrete Research*, Vol.40, No.4, pp.643-75 (2010)

¹³ T. Katayama, "SO-CALLED ALKALI-CARBONATE REACTION - PETROGRAPHIC DETAILS OF FIELD CONCRETES IN ONTARIO," 13th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Vol.13, pp.1-15 (2010)

¹⁴ 富山潤, 山田一夫, 金田一男, 伊良波繁雄, 大城武, "ASR 劣化したプレテンション PC 桁の岩石学的検討に基づく ASR 診断および耐荷性能の評価," *土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)*, Vol.67, No.4, pp.578-95 (2011)

一方、反応性骨材を用いた試験体中の細孔溶液の測定については、川村ら^{15、16、17、18}、小林ら^{19、20、21}、二村ら^{22、23、24、25}、Durand et al.²⁶、小早川ら²⁷、Berube et al.^{28、29}が検討を行っている。温度依存性について検討を行っている Berube et al. の測定結果を図 4 に示す²⁸。図 4 に示されるように、60°C の促進環境は、23°C、38°C の温度環境と比較して、セメントペースト中に取り込まれた Na₂O 量が多くなっており、ASR に消費される Na₂O 量が減少していることが推察された。このことは、高い温度では、セメントペースト内に高いアルカリ濃度が保たれていることから、継続的に ASR が生じうることを示唆している。

過年度までの規制庁事業における研究では¹¹、異なる水セメント比のペーストの中に反応性骨材を置き、ASR を生じさせた様子を観察している。図 5 に示されるように水セメント比が大きく（水セメント比 1.0）、ポーラスなペーストに囲まれた場合、アルカリシリカゲルはペースト中に滲出してしまふ（図 5 の右側）。一方、水セメント比が小さいと（水セメント比 0.5）、アルカリシリカゲルが骨材内部に蓄えられ、切断とともにゲルがより見えるようになる。これらの結果から、ASR によって生じたアルカリシリカゲルは、反応性骨材の周囲のセメントペーストマトリクスによって拘束されていることが実験的に確認された（図

¹⁵ 川村満紀, 竹本邦夫, "混和材による細孔溶液のアルカリ量の低減とアルカリ・シリカ膨張の抑制," セメント技術年報, Vol.40, pp.328-31 (1986)

¹⁶ 川村満紀, 竹本邦夫, "種々のフライアッシュおよび高炉スラグの細孔溶液の組成に及ぼす影響とアルカリ・シリカ反応," セメント技術年報, Vol.41, pp.431-34 (1987)

¹⁷ M. Kawamura and K. Takeuchi, "Alkali-silica reaction and pore solution composition in mortars in sea water," Cement and Concrete Research, Vol.26, No.12, pp.1809-19 (1996)

¹⁸ 鍵本広之, 佐藤道生, 川村満紀, "アルカリシリカ反応により劣化した構造物の劣化度評価と細孔溶液分析による劣化進行の予測," 土木学会論文集, No.641, pp.241-51 (2000)

¹⁹ 小林一輔, 瀬野康弘, 河合研至, 宇野祐一, "反応性骨材を用いたモルタル細孔溶液の組成 (1) ~ (3)," 生産研究, Vol.40, No.6, pp.297-300, 346-349, 441-443 (1988)

²⁰ 小林一輔, 瀬野康弘, 河合研至, 宇野祐一, "反応性骨材を用いたモルタル細孔溶液の組成," コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.733-38 (1988)

²¹ 瀬野康弘, 小林一輔, "反応性骨材を用いたモルタル供試体における細孔溶液の組成と膨張特性," コンクリート工学論文集, Vol.1, No.2, pp.29-38 (1990)

²² 二村誠二, 福島正人, "アルカリシリカ反応によるモルタル膨張に及ぼす細孔溶液中のアルカリ量の影響," コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.727-32 (1988)

²³ 二村誠二, 福島正人, "反応性骨材混入率がモルタル細孔溶液中の化学組成に及ぼす影響," コンクリート工学年次論文集, Vol.11, No.1, pp.99-104 (1989)

²⁴ 村上あい, 二村誠二, 乾義尚, "アルカリシリカ反応における反応性鉱物の違いが細孔溶液の化学組成に及ぼす影響について," コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.937-42 (1998)

²⁵ 村上あい, 二村誠二, 乾義尚, "潜晶質石英の混入率が ASR による細孔溶液の化学組成に及ぼす影響," コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.271-76 (2000)

²⁶ B. Durand, J. Berard, R. Roux, and J. A. Soles, "Alkali-Silica Reaction - the Relation between Pore Solution Characteristics and Expansion Test-Results," Cement and Concrete Research, Vol.20, No.3, pp.419-28 (1990)

²⁷ 小早川真, 小津博, 羽原俊祐, "硬化フライアッシュセメントモルタルの空隙水中の溶存イオン濃度の経時変化," セメント・コンクリート論文集, Vol.53, pp.102-09 (1999)

²⁸ M. A. Berube, C. Tremblay, B. Fournier, M. D. Thomas, and D. B. Stokes, "Influence of lithium-based products proposed for counteracting ASR on the chemistry of pore solution and cement hydrates," Cement and Concrete Research, Vol.34, No.9, pp.1645-60 (2004)

²⁹ P. Rivard, M. A. Berube, J. P. Ollivier, and G. Ballivy, "Decrease of pore solution alkalinity in concrete tested for alkali-silica reaction," Materials and Structures, Vol.40, No.9, pp.909-21 (2007)

5の左側)。このことから、コンクリートプリズム試験にみられる最終膨張ひずみの温度依存性は、反応性骨材内に生じたアルカリシリカゲルの生成量及び膨張量と周囲のセメントペーストの多孔性のバランスによって決定されると判断された。



図5 普通セメントペースト中の骨材 T0 断面

高い温度環境で実施したコンクリートプリズム試験の試験体に生ずる最終膨張ひずみが、低い温度環境で実施したコンクリートプリズム試験における試験体の長期膨張ひずみを下回る原因は、高い温度環境の方が、反応性骨材内のアルカリシリカゲルをセメントペーストが拘束できていないためと考えられる。その理由は、高温によってアルカリシリカゲルの粘性が低下すること、高温によってセメントペーストに粗大空隙が増えること、骨材とセメントペーストの線膨張係数差に起因して生じるひび割れの発生が骨材周囲に起き、そこへアルカリシリカゲルが滲出する、といった理由が考えられる。

2. 3 数値モデルに関する温度依存性

ここでは、既往の数値モデルにおける ASR によるコンクリートの膨張ひずみ（以下、ASR 膨張ひずみ）予測式の温度依存性についてとりまとめる。既往の研究では、Saouma の研究^{30,31}、Pietruszczak の研究³²、フランス運輸・整備・ネットワーク科学技術研究所（以下、IFSTTAR）の研究^{33,34,35,36}、Sellier らの研究^{37,38}、高橋・前川らの研究³⁹、について記す。

1) Saouma らの研究

Saouma 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 (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 は温度の影響を受ける。
- 3) ASR 膨張ひずみは圧縮力によって抑制され、圧縮力が小さい別の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、アルカ

³⁰ V. Saouma, L. Perotti, Constitutive model for alkali-aggregate reactions, *Materials Journal*, 103 (2006) 194-202.

³¹ Saouma, V. E.: *Numerical Modeling of AAR*, CRC Press, (2014)

³² Pietruszczak: On the Mechanical Behaviour of Concrete Subjected to Alkali-Aggregate Reaction, *Computers and Structures*, Vol. 58, pp.1093-1097, (1996)

³³ 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)

³⁴ Multon, S. Toutlemonde, F.: "Effect of applied stresses on alkali-silica reaction-induced expansions" *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp.912-920, (2006)

³⁵ 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)

³⁶ Catherine Larive. Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques. *Mechanics. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1997. French.

³⁷ A. Sellier, E. Bourdarot, S. Multon, M. Cyr, E. Grimal, Combination of structural monitoring and laboratory tests for assessment of alkali-aggregate reaction swelling: Application to gate structure dam, *ACI materials journal*, 106 (2009) 281-290.

³⁸ 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)

³⁹ 高橋佑弥, 田中泰司, 前川宏一: 固液二相モデルを用いた ASR 膨張モデルと床版疲労解析への応用, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 38, No. 1, pp.1029-1034, 2016

リシリカゲルの一部はそのひび割れに吸収される。

- 5) 静水圧圧縮力が強く働いているとき、ASR の反応速度は小さくなる。
- 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 膨張ひずみによって、引張強度と弾性係数は低下する。

$$\varepsilon_{vol}^{ASR}(t) = \Gamma_t(f'_t, \sigma_1 | COD) \cdot \Gamma_c(\bar{\sigma}, f'_c) \cdot f(h) \cdot \dot{\xi}(t, \theta) \cdot \varepsilon^\infty |_{\theta=\theta_0} \quad (1)$$

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 膨張ひずみの低減係数で 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 膨張ひずみの低減係数、

$f(h)$: 相対湿度条件による ASR 膨張ひずみの低減係数、

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

$\varepsilon^\infty |_{\theta=\theta_0}$: 実験的に得られた温度 θ_0 のときの無拘束時の最大膨張ひずみである。

式中の $\dot{\xi}(t, \theta)$ が、Larive が提唱した S 字曲線を表している⁴⁰。このとき、ASR 膨張ひずみを表現するためには、終局膨張ひずみ ε_∞ や、速度の指標となる材料係数 Γ_L 、潜伏期の長さの指標となる材料係数 Γ_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 膨張ひずみ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) Pietruzcak の研究

Pietruzcak³² 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に単純に表現している。

$$\varepsilon(t) = \zeta(t) \cdot \varepsilon_\infty \quad (2)$$

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

$$\zeta(t) = 1 - e^{-\gamma(t-t_0)} \quad (3)$$

⁴⁰ Catherine Larive. Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques. Mechanics. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. French.

また、ASR 膨張ひずみ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 γ が温度と相対湿度によって決定すると仮定して γ を以下の式で表現した。

$$\gamma(T, RH) = \gamma_0 \cdot g_1(T) \cdot g_2(RH) \quad (4)$$

ここで、

$$g_1(T) = \exp \left[U \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

$$g_2(RH) = \left(\frac{RH}{100} \right)^m \quad (6)$$

であり、 γ_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。

3) IFSTAR の研究

IFSTAR では、Larive らの膨大な実験⁴⁰により、ASR 膨張ひずみの進行度 $\xi_a(t)$ 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。

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

ここで、ASR 進行度は、

$$\xi(t, \theta) = \frac{1 - e^{-\frac{t}{\tau_c(\theta)}}}{1 + e^{\frac{t - t_L(\theta, I_{g, f, c})}{\tau_c(\theta)}}} \quad (5.8)$$

であり、最大膨張ひずみ ε_∞ 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、IFSTAR 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) Sellier らの研究

Capra・Sellier⁴¹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。

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

ここで、

P_g : アルカリシリカゲルの膨張圧、

M_g : アルカリシリカゲルの弾性係数、

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 : アルカリシリカゲルの最大膨張量、

V_p^s : 骨材と連続している空隙量、

$b_g tr(\epsilon)$: 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。

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

このモデルは、アルカリシリカゲル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 膨張ひずみ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。

しかし現状ではアルカリシリカゲルの弾性係数や、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) 高橋・前川らの研究

Takahashi・Maekawa のモデルでは、University of Toulouse と同様に、アルカリシリカゲル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アルカリシリカゲル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。アルカリシリカゲル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。

⁴¹ 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)

$$P = \frac{1}{3} \sum_i^{x,y,z} P_{ai} + P_i \quad (12)$$

ただし、

$$P_{ai} = stiffness \cdot \beta \cdot \left(\frac{V_{asr}}{3} - V_{cracki} \right) \quad (13)$$

$$P_i = stiffness \cdot (1 - \beta) \cdot (V_{asr} - \sum_{x,y,z} V_{cracki}) \quad (14)$$

である。

ASR の温湿度依存性の関数はアルカリシリカゲルの体積 V_{asr} を求める式に含まれており、アルカリシリカゲルの逐次生成量 $\Delta]Gel_{X+}$ は次式で求められる。

$$\Delta]Gel_{X+} = \frac{R_{ASR-X} \Delta]t \cdot M_{gel}}{\rho_{gel}} \quad (15)$$

ここで、

M_{gel} : アルカリシリカゲルの分子量、

ρ_{gel} : アルカリシリカゲルの密度

であり、アルカリシリカゲルの生成速度 R_{ASR-X+} は以下のように書ける。

$$R_{ASR-X+} = k_{RH} \cdot k_T \cdot R'_{ASR-X-} \quad (16)$$

$$R'_{ASR-X-} = k \cdot C_{X-} \cdot F_{water} \cdot V_{RG} \cdot 1.0E - 9 \quad (17)$$

$$k_{RH} = \exp(-1500.0(1.0 - RH)^{5.0}) \quad (18)$$

$$k_T = \exp\left(6000.0 \left(\frac{1}{313} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (19)$$

Takahashi・Maekawa のモデルでは、Sellier らと同様に、見掛けの膨張ひずみではなくアルカリシリカゲルによる膨張圧を与えるモデルになっている。

以上の研究では、拘束応力の無いコンクリートの状態における最終膨張ひずみは、アルカリシリカゲルの圧力から計算するもの、ならびに固有のものとして与えるもの、フィッティングで決めていくものなど様々である。しかしながら、温度の依存性をすべてのモデルでアレニウスの活性化エネルギーで評価することとしている。それらの値をここにまとめる。

Saouma	5400 ± 500K	(Larive の実験による)
Pietruzcak	記載なし	
IFSTTAR	5400 ± 500K	(Larive の実験による)
Seiller	5656K	
高橋・前川	6000K	

以上のようにいずれもモデルでも概ね同一の値を用いていることがわかる。

3. 水分移動の温度依存性

水分の移動は温度依存性を有する。図6に示されるように水分に関わる移動係数、ならびに吸着等温線が温度依存性を有することがわかっている。

水分移動係数については、Jooss&Reinhardt の研究⁴²、Hughes らの研究⁴³、Hancox の研究⁴⁴、Lin らの研究⁴⁵、藤原らの研究等⁴⁶がある。

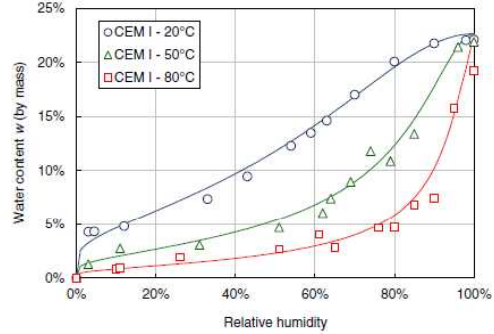
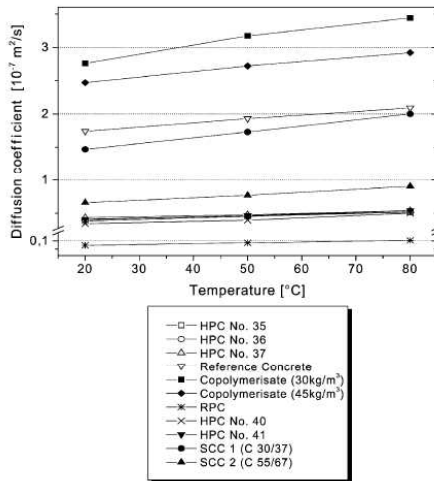
⁴² M. Jooss, H. W. Reinhardt, Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature, *Cement and Concrete Research*, 32 (2002) 1497-1504.

⁴³ B. P. Hughes, I. R. G. Lowe, J. Walker, The diffusion of water in concrete at temperatures between 50 and 95° c, *British Journal of Applied Physics*, 17 (1966) 1545.

⁴⁴ N. L. Hancox, The role of moisture diffusion in the drying of cement paste under the influence of temperature gradients, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1 (1968) 1769.

⁴⁵ M. Lin, H. Sasano, I. Maruyama, Fundamental study on water diffusion coefficient of cement based material, *Proceedings of Japan Concrete Institute*, 35 (2013) 595-600.

⁴⁶ 藤原忠司, 萱場正和, 秋田宏: 温度条件の異なる乾燥過程でのコンクリート内部における水分移動, *セメント・コンクリート論文集*, No. 48, pp. 428-433, 1992



(a) 水分移動係数⁴²

(b) 吸着等温線⁴⁷

図6 水分移動係数と吸着等温線の温度依存性の事例

これらの結果について、20°Cの拡散係数との比較に関してとりまとめたものが、図7である。ここに示されるように、水分移動に関する係数は温度上昇とともに大きくなり、それらは、以下の式で近似できる。

$$y = (x/20)^2 \quad (20)$$

$$y = 0.00002237x^{3.099} + 0.759255 \quad (21)$$

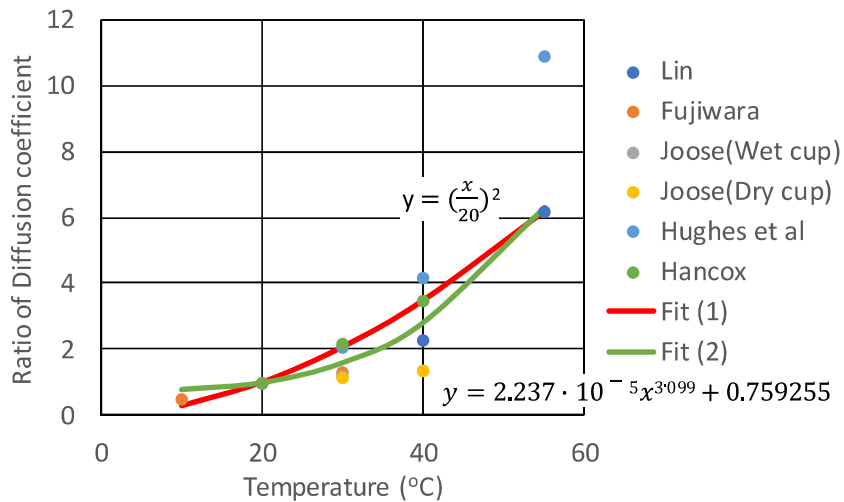


図7 拡散係数の20°Cのものとの比率と温度の関係

⁴⁷ E. Drouet, S. Poyet, J.-M. Torrenti, Temperature influence on water transport in hardened cement pastes, Cement and Concrete Research, 76 (2015) 37-50.

また、吸着等温線の温度依存性については、Poyet らの研究^{48, 49}、de Burgh らの研究^{50, 51}、Hansen らの研究⁵²、Abdelhamid らの研究⁵³、五十嵐らの研究⁵⁴、などがある。いずれも、高温になるほど吸着量が下がる傾向にあるが、測定したデータが比較的短期間における C-S-H の変質影響が少ないデータか、あるいは長期間による平衡を確認した上での C-S-H の変質を考慮したデータかでその傾向は異なっており、実際のモデルにあたっては、長期変質の前提とした等温線のモデルを構築することが望ましい。この観点では、Clausius-Clapeyron の吸着に関する半理論式を用いた立式のものよりは、実験データに基づく経験式の方が現状では精度が高いと考えられる。

4. まとめ

以上見てきたように、ASR の温度依存性については、コンクリートプリズム試験での最終ひずみの温度依存性と、進行速度の温度依存性について実験的事実が確認されているが、いずれもメカニズムは明らかにされていない。ASR と膨張メカニズムの関係も明らかにされていないため、現状では数値解析モデルを用いる場合には、現象論的モデルを用いざるをえない状況にある。最終膨張ひずみについては、実構造レベルでの実験事実も確認されていないので、多くの数値解析社が実施しているように、現状では温度依存性を持つことを明示的にモデルに取り入れる必要性は無いと考えられる。ASR の進行速度の温度依存性については、アレニウス式における活性化エネルギー E/R の値を概ね 5500~6000K とするのが良い。

また、比較的大きな断面における ASR の温度依存性の要因を考慮する場合には、水分の

⁴⁸ S. Poyet, Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete, *Cement and Concrete Research*, 39 (2009) 1052-1059.

⁴⁹ S. Poyet, S. Charles, Temperature dependence of the sorption isotherms of cement-based materials: Heat of sorption and clausius-clapeyron formula, *Cement and Concrete Research*, 39 (2009) 1060-1067.

⁵⁰ J.M. de Burgh, S.J. Foster, H.R. Valipour, Prediction of water vapour sorption isotherms and microstructure of hardened portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 81 (2016) 134-150.

⁵¹ J.M. de Burgh, S.J. Foster, Influence of temperature on water vapour sorption isotherms and kinetics of hardened cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, 92 (2017) 37-55.

⁵² F. Radjy, E. J. Sellevold, K.K. Hansen, Isoteric vapor pressure: Temperature data for water sorption in hardened cement paste: Enthalpy, entropy and sorption isotherms at different temperatures, 2003.

⁵³ M. Ben Abdelhamid, D. Mihoubi, J. Sghaier, A. Bellagi, Water sorption isotherms and thermodynamic characteristics of hardened cement paste and mortar, *Transp Porous Med*, 113 (2016) 283-301.

⁵⁴ G. Igarashi, I. Maruyama, Temperature dependency of virgin isothermal desorption and bet surface area of hardened cement paste, *Proceedings of Annual AIJ Tokai Meeting*, (2012) 81-84. (in japanese)

温度依存性を考慮することも必要と考えられ、本調査で示したように水分移動の温度依存性について、吸着等温線および水分移動係数について考慮することが必要である。

Ⅲ 原子力施設へのアルカリ骨材反応による膨張及びひび割れ解析の実例調査並びに材料構成則候補の解析コード組込へのノウハウの調査

1. はじめに

2017年5月8日、9日にカナダ、オタワにある Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) 本社において、OECD/NEA/CSNI ASCET Phase II workshop が開催され、ASRを生じた鉄筋コンクリート造 (RC) 壁部材のベンチマーク解析に関する会合が持たれた。本件は、その時の Workshop に参加した際に得られた構成則候補の組込へのノウハウ等を調査したものを報告するものである。なお、ベンチマーク解析の対応となる RC 壁の載荷試験は、トロント大学によって実施され、その内容も報告された。

2. 温度環境の影響を考慮した材料構成則候補の解析コード組込に必要な新たな情報

Workshop で対象とした RC 壁の破壊モードは、ASR の生じていない Regular concrete 試験体はせん断すべり破壊を生じており、その位置は下から 1/4 くらいのところにある。一方、ASR コンクリートは、せん断破壊を生じており、圧壊部位は右上の柱部分。通常は曲げ影響を受けている下部隅角部が影響を受けるが、上部である点が若干珍しい。

山梨大学の齋藤先生がせん断滑りの発生条件について剛体バネモデルを用いて研究しており、鉄筋比と圧縮強度のバランスで二次せん断破壊が生ずる条件について議論している。対象実験はトロント大学の Collins 教授の実験であるので、構成則構築にあたっては、それらの実験を参照するとともに、構築した構成則でコンクリートの圧壊後の横滑り（二次せん断破壊）が生じるかを確認することが望ましい。

Workshop 解析対象である RC 壁の載荷時におけるスタブの取り付けは PC 鋼棒のみであるので、回転あるいは浮きが生じている可能性が高い。そのため、解析ではスタブの浮きを考えるのが望ましい。また軸力を与える載荷梁とジャッキは直接接合しておりヒンジが無い。そのため、載荷後に変形した後は、鉛直荷重は均等にかかっていない可能性がある。解析ではその点についても留意する必要がある。これらの知見は、解析対象となる部材の境界条件が解析に大きな影響を与えることを意味している。

Regular concrete 試験体は 50°C、95%に 260 日静置されており、その間に温度上昇による C-S-H の変質と骨材とペーストの線膨張係数の差による微細損傷の蓄積によりコンクリートの圧縮強度が低下する可能性がある。また、試験体は C-S-H の温度上昇による凝集の結果、毛管空隙が大きくなって粗大空隙の数・体積ともに増加すると考えられるので水の蒸発が生じやすくなり、95%であっても水分の逸散が生じて収縮が生じたと考えられる。さらに試験体の準備が迅速とは考えにくく、その間にも乾燥が生じたと考えられる。以上から、Regular concrete 試験体の非対称な載荷による荷重変形履歴ならびに大きな剛性低下は、コンクリートの収縮によるひび割れとヤング率の低下という材料・部材的要因と、スタブの設置などの境界条件の特異性によるものと推察される。

今後、温度を変化させた部材の解析の際には、吸着等温線の変化、コンクリートの巨視的な線膨張係数、骨材とペーストの線膨張係数の差によって生ずる微細損傷による剛性や強度の変化を考慮することが望ましいが、これらの数値モデル構築に資するデータは不十分であるので、取り入れることが可能な範囲ですすめるべきである。

なお、実験でもひび割れの開口が負側載荷で閉じなかったという実験責任者のコメントがあった。これは、少なくとも収縮があったことの傍証と考えられることを付記する。

ベンチマーク解析の結果報告では、すべての解析において解析より実験の方が剛性が小さい結果となった。V. Saouma 教授（コロラド大学）の解析では、変形を単純に 2.3 倍していた。部材の剛性は、上部スタブの固定度によっても変化させられるとの報告があり、同時に下部スタブの支持条件（前述の浮き上がりの考慮等）を変化させることでも変化する。

境界条件は、構成則の影響よりも大きかった、部材の破壊時荷重については、概ね 1100～1300kN の範囲で壊れる事になっており大きな差は無い。ただし、ひび割れの入り方、解析から見られる破壊モードは発表者により大きく異なっていた。

3. 材料構成則候補決定に必要な文献調査の補足情報

ここでは、必要な事例を文献調査として、II 章 2 節に記載した。

4. 解析コード組込へのノウハウ

構造性能、特に最大耐力や剛性の低下、部材の降伏点剛性を予測することが、ASR を生じた RC 部材性能の耐震性能評価においては重要である。この観点から重要なのは、コンクリートの膨張量を予測する手法、とくに水分ならびに温度の依存性を有する膨張挙動を評価すること、部材内部の分布を評価すること、膨張と拘束応力のフィードバックシステムを数値解析の中でなんらか考慮すること、鉄筋とコンクリートの付着強度および付着剛性低下を考慮すること、である。しかしながら、ここにあげた項目について、材料物性から構造性能や構成則に資するデータを包括的に整理した実験データは存在しない。そのため、現状では構造性能評価を主軸として構成則を構築した上で、重要と思われるパラメータ、特に水分移動と ASR の膨張挙動の温度依存性について、実験結果に合わせ込むよう、モデルパラメータを決定していくことが ASR の影響を受けた RC 部材を対象とした性能予測コードの開発で必要な手段と考えられる。また、規制庁としては、特に原子力建屋特有の温度環境における長期暴露実験や載荷実験を行い、コードの検証のためのデータ整備を行うことが望ましい。

IV 材料構成則候補

1. ASR の膨張ひずみ予測式における構成則

膨張ひずみの進行率は以下のように表す構成則を前提とする。

$$\zeta(t) = 1 - e^{-\gamma(t-t_0)} \quad (22)$$

また、ASR 膨張の進行は温度と相対湿度の影響を受ける実験事実があることから、Pietruzzak の考えを踏襲し、 γ が温度と相対湿度によって決定する次式を用いる。

$$\gamma(T, RH) = \gamma_0 \cdot g_1(T) \cdot g_2(RH) \quad (23)$$

ここで、温度依存性については、他の研究者と同様にアレニウス式を用いることとし、次式を採用するのが望ましい。

$$g_1(T) = \exp \left[5500 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (24)$$

2. 水分移動における温度依存性

II 章で示した用に、水分移動には吸着等温線ならびに水分移動係数の温度依存性を考慮することが必要である。しかしながら、セメント系材料は単純な多孔材料ではないため、他の多孔材料とは異なる水分移動係数などを考慮する必要がある。これらは、現状のところ、コロイド的性質を有する C-S-H の性状が明らかにされていないので、経験式を用いる方が比較的適合性が高い。

2. 1 水分移動係数の温度依存性

水分移動係数の温度依存性のメカニズムはあきらかになっていない。これは、高温により水分子の運動性が増加することによる蒸気の変化、気体-吸着層平衡の変化、固体-吸着層間力の変化、気液界面に生ずる表面張力の変化、ならびに温度による C-S-H の変質による比表面積と空隙構造の変化によって生ずるが、これらを明示的に分離・定量化した実験データは無い。そのため、経験式を用いるのであれば、次式を用いるのが簡便であろう。

$$K_w(T) = K_{w,20}(T/20)^2 \quad (25)$$

ここで、 T : 温度 (°C)、 $K_{w,20}$: 20°Cの時の水分移動係数、である。

2. 2 吸着等温線の温度依存性

本検討では、処女脱着プロセスのみを考慮した吸着等温線の温度依存性に言及する。任意温度条件における脱着線は以下の式により評価する。

($0 < RH \leq 0.4$)

$$w(RH, T) = S'_{BET, T} \left(K_3 - K_4 \cdot \ln(\ln(RH)) \right) \rho_w \cdot 10^{-9} \quad (26)$$

($0.4 < RH \leq 0.975$)

$$w(RH, T) = (w_{0.975, T} - w_{0.4, T}) / 0.575 \cdot (RH - 0.4) + w_{0.4, T} \quad (27)$$

($0.975 < RH$)

$$w(RH, T) = (w_{0.293} - w_{0.975, T}) / 0.025 \cdot (RH - 0.975) + w_{0.975, T} \quad (28)$$

$$w_{0.4, T} = S'_{BET, T} \cdot \left(K_3 - K_4 \ln(-\ln(0.4)) \right) \cdot \rho_w \cdot 10^{-9} \quad (29)$$

$$w_{0.975, T} = (1.06 - 0.0035(T - 273.15)) \cdot w_{0.293} \quad (30)$$

$$S'_{BET-293} = 229 \cdot \alpha \quad (31)$$

$$S'_{BET, T} = 1.44 \cdot \text{Exp}(-0.017(T - 273.15)) \cdot S'_{BET, 293} \quad (32)$$

ここに、 $K_3, K_4 : 0.39, 0.12$ の係数、 $w(RH)$: 湿度 RH の時の 105°C 乾燥状態のセメント硬化体質量に対する吸着量 (g/g)、 ρ_w : 水の密度 (g/m^3)、 $S'_{BET, T}$: 温度 T (K) の時の脱着時の BET 比表面積 (m^2/g)、 $w_{0.293}$: 293K における飽和含水率 (g/g-hcp)、 $w_{0.975, T}$: 相対湿度 97.5% 時の含水率 (g/g-hcp)、 $w_{0.4, T}$: 相対湿度 40% 時の含水率 (g/g-hcp)、 α : セメントの各鉱物の平均水和率 (－) である。

また、既往文献⁵⁵⁾で任意の温度に拡張するために実験を行い、式(30)、(32)を定めた。測定した実験結果について、図 8 に示す。

⁵⁵⁾ G. Igarashi, I. Maruyama, Temperature dependency of virgin isothermal desorption and bet surface area of hardened cement paste, Proceedings of Annual AIJ Tokai Meeting, (2012) 81-84 (in japanese).

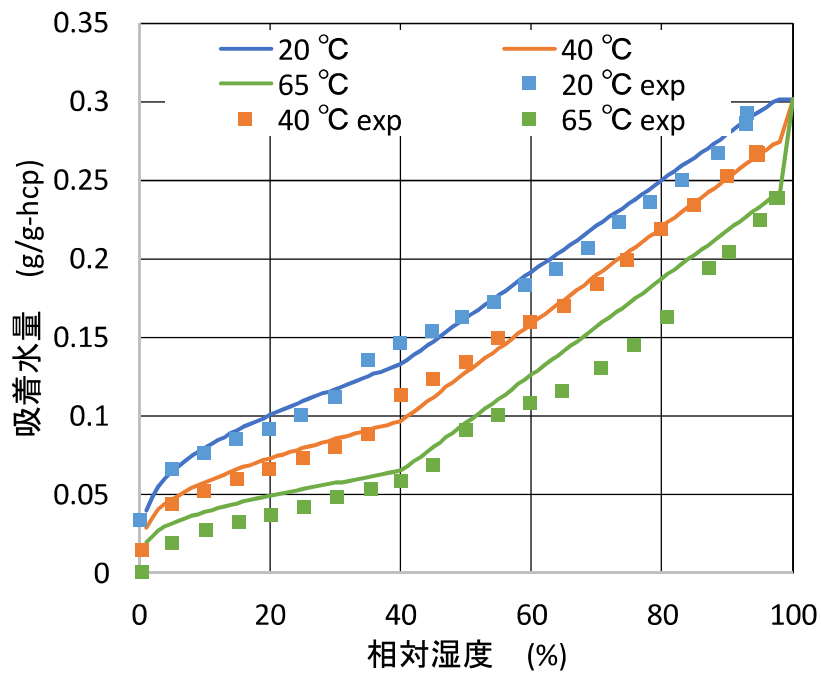


図8 異なる温度の脱着線データとモデルとの比較

3. 結論

文献調査を実施し、組み込むべき材料構成則の案を提案した。

V 調査結果の報告

1. 実施履歴

表1に、事業進捗の履歴（実施スケジュール表）を示す。

表1 事業進捗の履歴

2017年4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
			文献調査					
▲ 打合せ	▲ ASCET WS				▲ 報告書作成			
	▲ 打合せ			▲ 打合せ				▲ 提出

2. 報告内容

平成29年4月18日：事業開始キックオフミーティングを行った。

平成29年5月24日：水分移動、熱移動、ASRの熱依存についてのとりまとめすべき項目について確認した

平成29年8月31日：成果報告書案について説明を行った。