

論文 岩石学的観察に基づく ASR による各種反応性骨材の損傷形態と損傷過程の評価

川端 雄一郎^{*1}・広野 真一^{*2}・岩波 光保^{*3}・加藤 絵万^{*4}

要旨：本研究は、アルカリシリカ反応（ASR）による各種反応性骨材における損傷形態を評価し、また ASR によるコンクリートの膨張およびひび割れ発生過程と骨材内部および界面等における損傷過程の関連について検討したものである。ASR の生成物であるアルカリシリケート水和物の膨張には反力を得る部位が必要であり、その部位は反応性鉱物の存在形態等によって変化することを示した。さらに、ASR によるコンクリートの膨張およびひび割れ発生・進展過程は反応性骨材内部のひび割れ発生・進展およびその後のセメント硬化体へのひび割れ進展と密接な関係があることが確認された。

キーワード：アルカリシリカ反応（ASR）、岩石学的観察、損傷形態、ASR 膨張

1. はじめに

アルカリシリカ反応（ASR）によるコンクリートの膨張機構に関しては諸説あるものの、統一的な見解が無く、その解明が不可欠である¹⁾。ASR によるコンクリートの膨張は生成物であるアルカリシリケート水和物（A-S-H）の膨張圧によるものと思われるが、A-S-H の膨張過程やそれに伴う骨材内部および骨材-セメント硬化体界面などのひび割れ等の損傷形態や損傷過程については十分に明らかにされていない。ASR によるコンクリートのマクロな膨張機構を明らかにするためには、A-S-H のメゾ～ミクロな膨張圧発現機構を明確にする必要がある。ここで、本研究では骨材内部および骨材-セメント硬化体界面などの損傷を微細領域の損傷と定義することとする。

ASR により生成される A-S-H は低粘度の液体状のゾルの挙動を示すため、A-S-H が膨張圧を発現するためには反力を得るための部位（反力障壁）が必要となる。Ichikawa & Miura²⁾は A-S-H が多孔質なセメント硬化体からは反力を得ることができないと考え、骨材に生成される反応リムが反力障壁となるため、A-S-H の膨張圧が反応リムの内部に貯蓄され、最終的に骨材の割れを伴ったコンクリートの膨張を生じると述べている。一方 Katayama³⁾は、A-S-H による膨張圧は、反応性鉱物の周囲に存在する粗粒な石英粒子や微細なカルサイトののような鉱物やセメント硬化体からも反力を得ることができると述べている。このように、A-S-H が膨張圧を発現する起点については統一した見解が得られていない⁴⁾。また、反応性骨材の種類によっても微細領域の損傷形態が異なることが知られている。これは反応性骨材の種類によって、A-S-H の膨張圧発現時において反力障壁とな

る部位が異なるためと思われる。損傷形態の違いについては小林ら⁵⁾が安山岩とチャートに関して考察を行っているが、その本質的機構については言及されていない。A-S-H の反力障壁と微細領域の損傷形態は密接に関連していると考えられることから、A-S-H の反力障壁の必要性等を議論するためには、多種の反応性骨材における微細領域の損傷形態を評価する必要がある。

一方、微細領域の損傷過程に関して、薄片観察により劣化度を区分する手法が Katayama により提案されており、本手法は外観観察による劣化度と良好な相関があることを報告している⁶⁾。また、Grattan-Bellew & Mitchell は ASR に特徴的な微細領域の損傷を定量的に評価するための岩石学的分析手法を提案している⁷⁾。しかしながら、これらの手法ではコンクリートの膨張やそれによってコンクリート表面に生じるひび割れなどのマクロな劣化・損傷との対応について十分に言及されていない。また、これまでの研究では、コンクリートそのもののマクロな膨張およびひび割れ挙動の関連について検討が多数行われているものの、微細領域の損傷との関連性については十分に議論されていない。このため、微細領域の損傷過程とコンクリートの膨張過程などの関連性について評価する必要がある。

本研究は、まず ASR による劣化を生じた実構造物から採取した試料の薄片観察から、各種反応性骨材における微細領域の損傷形態を評価し、ASR によるコンクリートの膨張機構に関して考察を行った。また、室内におけるコンクリートの促進膨張試験から、ASR による膨張過程およびひび割れ発生過程を評価し、岩石学的観察に基づく微細領域の損傷過程との関連性について評価した。

*1 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)

*2 株式会社太平洋コンサルタント 解析技術部 解析グループ (非会員)

*3 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)

*4 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)

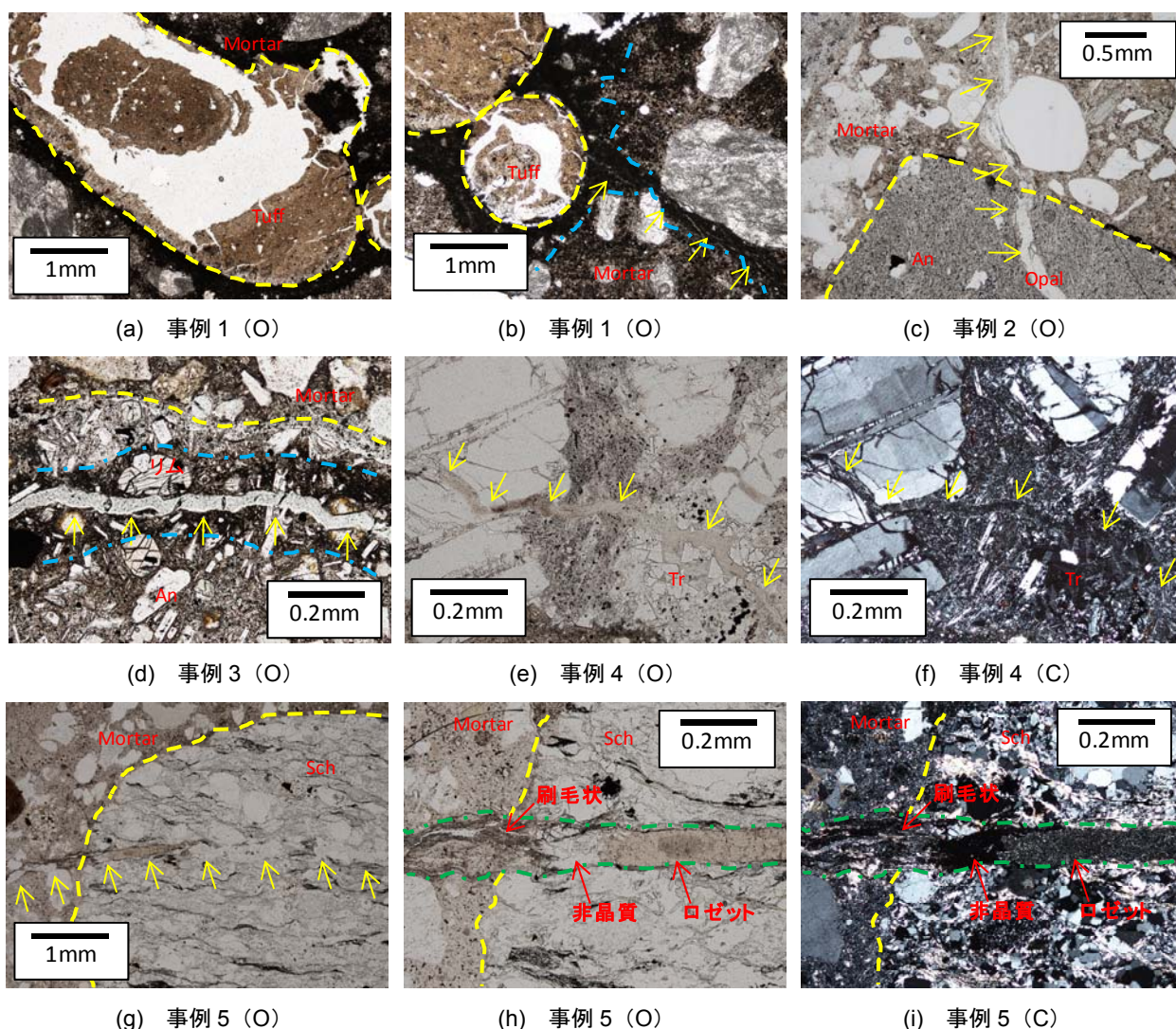


写真-1 各種反応性骨材の損傷形態 (O : オープンニコル, C : クロスニコル,
青色点線, 黄色矢印, 黄色点線, 緑色点線については本文を参照)

2. ASRによるコンクリートの膨張機構の再考

2.1 反力障壁の必要性

写真-1(a)にオパールを多く含む凝灰岩粒子 (Tuff) の薄片観察像を示す。骨材界面を黄色点線で示す。凝灰岩粒子は反応性が非常に高く、粒子のほとんどが反応し、原形を留めていない。しかしながら、ASRによる反応を多く生じているにも関わらず周囲のセメント硬化体にはひび割れが認められない。また、写真-1(b)では、凝灰岩粒子から1本の微細なひび割れ (黄色矢印) がセメント硬化体に進展している。セメント硬化体に着目すると、凝灰岩粒子から離れた領域 (水色点線より右側) のセメント硬化体では茶色を呈しているのに対し、粒子およびひび割れの近傍 (水色点線より左側) は黒色に変色している。これらの観察結果は、A-S-Hがセメント硬化体に拡散し、膨張圧をほとんど発現しなかったことを示している。すなわち、A-S-Hは多孔質なセメント硬化体もしくは柔らかい凝灰岩粒子内部では反力を十分に得

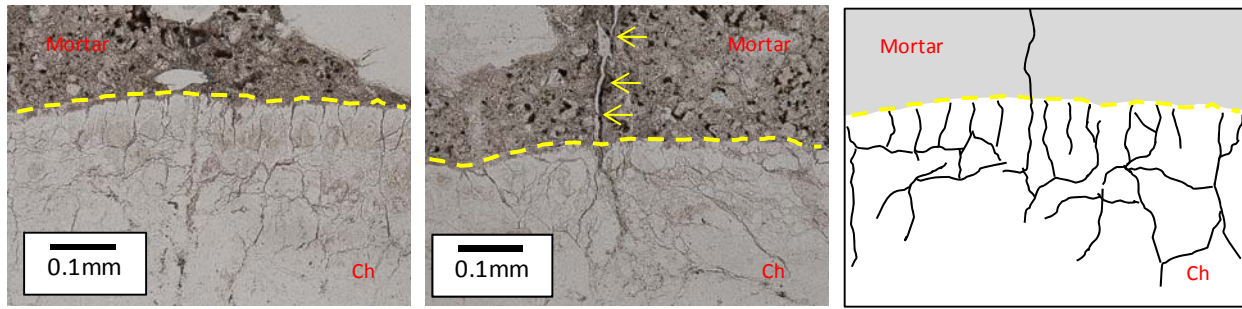
ることができていないことが分かる。

一方、写真-1(c)に示すように、オパール (Opal) が安山岩骨材 (An) に脈状に存在した場合、オパール脈に沿ってA-S-Hが形成され、セメント硬化体へとひび割れが進展している。この事例は、オパール脈の反応により生成したA-S-Hがオパール脈周囲の安山岩で反力を得て膨張圧を発現したものと推察される。

これらの観察結果は、A-S-Hが十分な膨張圧を発現するためには、反応性鉱物の種類や量だけでなく、A-S-Hの反力障壁が必要であることを示している。すなわち、反応性鉱物の存在状態によってA-S-Hが十分な膨張圧を発現するために必要な反力障壁となり得る箇所が変化することが推察される。

2.2 反応リムの存在

上述したように、A-S-Hの膨張圧発現において反力障壁は必要であると考えられる。Ichikawa & Miura²⁾は反応リムが反力障壁の役割を果たすとしているが、必ずしも



(a) 骨材内部のひび割れ (b) セメント硬化体へのひび割れ (c) チャート骨材の損傷状況の模式図

写真-2 チャート骨材界面の微細ひび割れ損傷状況（オープンニコル）

ASR 膨張を生じたコンクリート中の骨材において反応リムが生じているわけではない。

写真-1(d)にASR膨張を生じたコンクリート中のガラス質安山岩 (An) の骨材界面を示す。骨材内部において反応リム（水色点線）が認められ、反応リムに沿ったひび割れの発生が認められる。事例3における観察結果はIchikawa & Miura が提案したモデル²⁾と類似している。

一方、写真-1(e), (f)に示す安山岩骨材中のトリディマイト (Tr) の反応事例4では、安山岩骨材内部においてトリディマイトが反応し、その周囲にひび割れが発生していることが分かる。また、写真-1(g)に示す砂質片岩 (Sch) の事例5では、骨材からセメント硬化体へと進展したひび割れが認められるものの、骨材界面に反応リムは認められない。これらの事例4, 5は、反応性鉱物の周囲に存在する鉱物が反力障壁となったと考えられ、Ichikawa & Miura のモデル²⁾と相反している。

2.3 ASR による膨張機構の整理および考察

ASR によるコンクリートの膨張において、A-S-H が膨張圧を発現するためには反力障壁が必要であること、またA-S-Hが膨張圧を発現するめに反応リムは必ずしも必要でないことを示した。ここで、上述した事例を整理してA-S-Hの膨張圧発現機構について再考する。例えば、ガラス骨材の場合、骨材表面から反応が進行するが、反力障壁が無い限り生成されたA-S-Hはセメント硬化体へと拡散し、セメント硬化体中のCaとC-S-Hを生成するのみで、膨張圧を発現することはない。すなわち、この場合には骨材表面または界面に反力障壁が必要となる。この場合、Ichikawa & Miura と類似したモデル²⁾が必要となる。Ichikawa & Miura も硬質ガラス玉を用いたモデル実験により実証している²⁾。しかしながら、多くの天然骨材では骨材中に均一に反応性鉱物が存在しない。したがって、Katayama³⁾が述べるように、反応性鉱物周囲の鉱物が反力障壁の役割を果たすと思われる。

また、一度ひび割れが生じると、A-S-H はひび割れを通じて流動することとなる。一度ひび割れを生じた場合、ひび割れによりA-S-Hはセメント硬化体へと流動できる

ようになり膨張圧が緩和されるため、これまでのIchikawa & Miura²⁾やKatayama³⁾のモデルは適用が困難と思われる、ここでA-S-Hの膨張圧を蓄積するための新たな反力障壁が必要となる。この二次的な反力障壁はひび割れを流動してセメント硬化体と接触したA-S-HがCaと反応して非膨張性の緻密なC-S-Hとなって³⁾ひび割れを閉塞することで生じると思われる。骨材からセメント硬化体へと進展するひび割れ部ではこの反応が継続的に生じてひび割れは閉塞されるため、A-S-Hが新たに反力を得るための障壁となると思われる。写真-1(h), (i)に写真-1(g)の骨材界面の拡大図を示す。骨材-セメント硬化体界面に到達したASRゲル脈（緑色点線）が刷毛状の形態を示している。これは、徐々にひび割れが開口し、その度にA-S-Hのひび割れを介した流動、Caとの反応に伴い生成されるC-S-Hの沈殿³⁾によるひび割れ閉塞が生じたためと思われる。よって、少量のA-S-H生成量であってもくさび作用により骨材内部のひび割れは容易に開口する。このようなA-S-Hの膨張圧発現機構によりコンクリートにマクロな膨張をもたらすと考えられる。

このような二次的な反力障壁が必要となる事例について、チャートを例に考察する。写真-2(a)にASRによる劣化を生じたコンクリートのチャート骨材 (Ch) 界面の観察像を示す。対象としたチャートは主に隠微晶質石英から成る。骨材表面に無数の微細ひび割れが放射状に発生しているが、セメント硬化体へのひび割れは確認されない。一方、同一のコンクリートでより骨材中心部まで反応が進行したチャートの写真-2(b)ではセメント硬化体へひび割れが進展している。写真-2(c)にチャート骨材界面における微細ひび割れ状況の模式図を示す。

ここで、チャート骨材の観察結果について上述した機構に基づいて考察する。チャートは表面の隠微晶質石英から反応が進行するものの、表面付近で生成されたA-S-HはC-S-Hとなり、膨張しない。その後、粒界等を通じて浸透したアルカリ溶液によって内部の隠微晶質石英の反応が進行するに伴い、内部で生成されたA-S-Hが周囲の鉱物を反力障壁として膨張し、微細なひび割れ

が骨材内に放射状に無数に生じる。この段階が写真－2(a)に相当する。このひび割れを流動する A-S-H は骨材-セメント硬化体界面において非膨張性の C-S-H となり、二次的な反力障壁を形成する。その後も反応がより中心部にて進行すると、ひび割れを通じてセメント硬化体に流動しようとする A-S-H は二次的な反力障壁により膨張圧を発現し、骨材内部のひび割れを開口する。隠微品質石英から成るチャートではこれらのプロセスがいたる所で生じるため、骨材表面に無数の微細ひび割れと数本のセメント硬化体へと進展するひび割れが観察される。

以上より、A-S-H が膨張圧を発現するためには反力を得るための反力障壁が必要であるが、その反力を得る部位は反応性鉱物の存在形態によって変化することが分かった。また、A-S-H の膨張圧はセメント硬化体ではほとんど反力を得ることができないため、骨材内部において反力を得るものと推察された。骨材内部のひび割れ発生後では骨材内部のひび割れとセメント硬化体の接触部において A-S-H が Ca と反応して C-S-H となり、その C-S-H がひび割れを閉塞するため、二次的な反力障壁となる可能性が考えられた。いずれにしても、A-S-H が反力を得て膨張を生じた結果、骨材内部あるいはセメント硬化体中のひび割れなどの微細領域の損傷として観察されることが示された。

3. ASR による微細領域の損傷過程の評価

本章では、ASR による微細領域の損傷過程を経時的に観察し、コンクリートのマクロな膨張過程およびひび割れ発生・進展過程との関連性について評価した。

3.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材に、反応性骨材として北海道産の安山岩碎石（表乾密度 2.69g/cm^3 ）を使用した。本研究で使用した安山岩碎石はクリストバライトおよび火山ガラスを主要な反応性鉱物とする骨材である。細骨材には非反応性である山砂（表乾密度 2.56g/cm^3 ）を使用した。

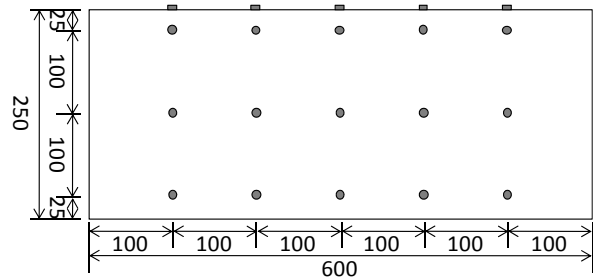
表－1 にコンクリートの示方配合を示す。配合は水セメント比 $W/C=47\%$ とし、目標スランプ $11.0\pm 2.0\text{cm}$ 、目標空気量 $4.0\pm 1.0\%$ を満足するよう試験練りにより決定した。また、コンクリートのアルカリ総量は、NaOH 水溶液を練混ぜ水に混ぜ、 6.0kg/m^3 とした。

(2) 試験体の作製および促進膨張試験

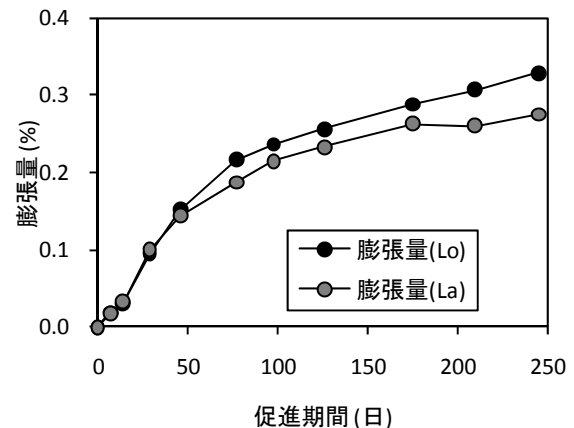
試験体は $250\times 250\times 600\text{mm}$ の角柱供試体および $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体とした。試験体は、コンクリート打設後 24 時間で脱型した後、前養生として温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 80% にて、材齢 28 日まで養生を行った。この期間において膨張は認められなかった。

表－1 示方配合

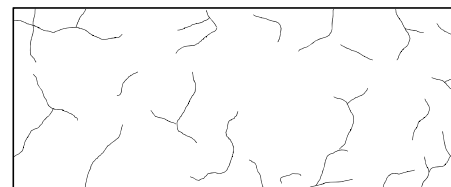
W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G		
47	42.4	165	351	752	1064	11.0	4.1



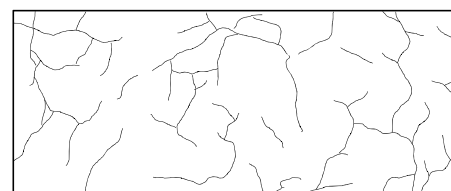
図－1 膨張量の計測箇所（角柱供試体，単位：mm）



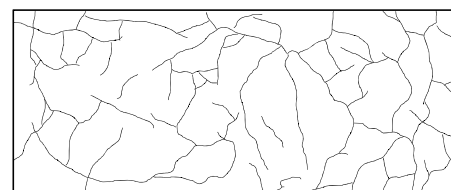
図－2 膨張量の経時変化



(a) 46 日

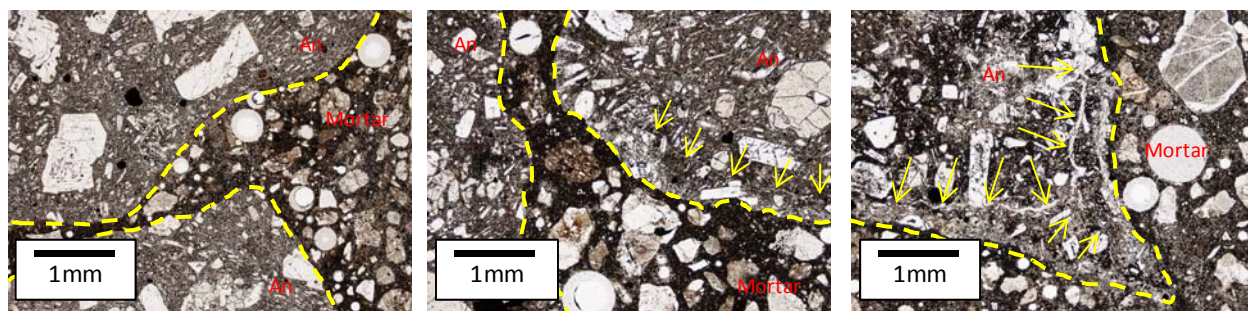


(b) 175 日

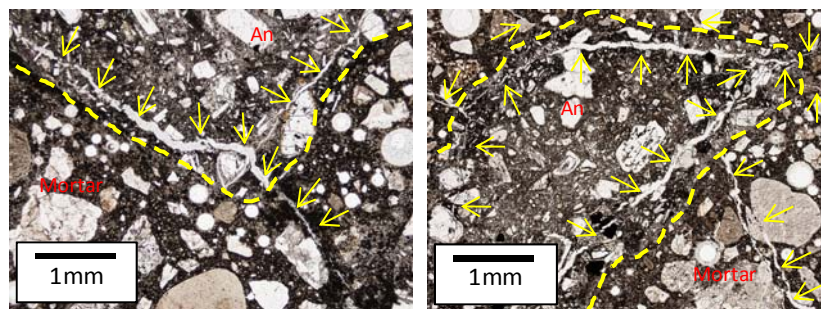


(a) 245 日

図－3 各促進期間におけるひび割れ発生状況



(a) 損傷無し (b) 骨材内部のひび割れ (c) 骨材内部のひび割れ幅拡大



(d) 骨材からセメント硬化体へのひび割れ (e) セメント硬化体へのひび割れ量の増加

写真-3 微細領域の損傷過程 (オープンニコル)

その後、材齢 28 日から 60℃の海水浸漬と室温乾燥の乾湿繰返しによる促進膨張試験を行った。乾湿繰返しは 60℃の海水浸漬 3.5 日、室温乾燥 3.5 日を 1 サイクルとした。試験は促進期間 245 日まで行った。海水には久里浜湾から採取した自然海水を用いた。

(3) 計測項目

コンクリートの膨張量の計測をコンタクトゲージ法により行った。基長は 100mm とした。250×600mm の 2 面において図-1 に示す箇所にゲージプラグを貼付し、軸 (Lo) 方向 24 箇所および軸直角 (La) 方向 20 箇所の長さ変化を測定し、測定値の平均を膨張量とした。また、コンクリート表面に発生したひび割れをスケッチした。所定の材齢にて円柱供試体の中心部から試料を採取し、25×50mm 程度の薄片を 4 枚以上作製した。作製した薄片について、偏光顕微鏡により薄片の観察を行った。

3.2 実験結果

(1) コンクリートの膨張およびひび割れ挙動

図-2 にコンクリートの膨張量の経時変化を示す。図より、角柱供試体の Lo 方向および La 方向の膨張量は同程度であった。本試験体は無筋コンクリートであり、この結果については妥当と思われる。図-3 にコンクリート表面に発生したひび割れ観察結果を示す。促進期間 46 日において供試体表面に微細なひび割れが発生し、その後亀甲状のひび割れへと発達した。

(2) 微細領域の損傷過程

写真-3(a)に促進期間 0 日における骨材-セメント硬

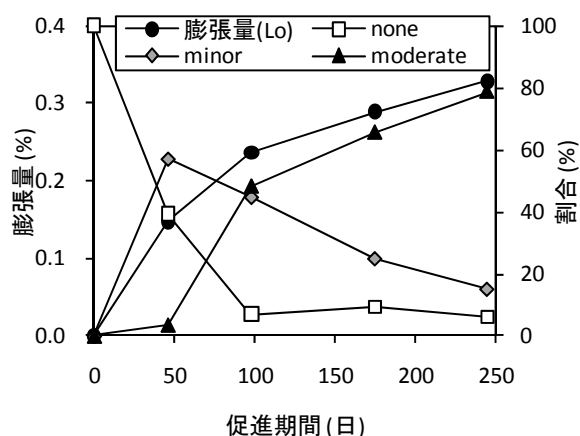


図-4 膨張量および ASR 劣化度の経時変化

化体界面の偏光顕微鏡像を示す。骨材内部およびセメント硬化体との界面に損傷や変状は認められない。写真-3(b)に促進期間 46 日における骨材-セメント硬化体界面の偏光顕微鏡像を示す。写真右側の骨材内部に微細なひび割れが生じているが、セメント硬化体には進展していなかった。促進期間 46 日では、変状の認められない骨材、または骨材内部にひび割れを生じている骨材が多く確認された。写真-3(c)に示す促進期間 98 日では骨材内部のひび割れ幅が大きくなり、また約半数の骨材では骨材からセメント硬化体へとひび割れが進展している状況 (写真-3(d)) が確認された。その後、写真-3(e)に示すように、一つの骨材から数本のひび割れがセメント硬化体へと放射状に進展し、ASR ゲルがひび割れを充填している状況が確認された。促進期間 175 日および 245

日では、写真-3(e)の状態となった骨材が多く観察された。ここで、Katayama 手法⁹⁾を参考に、薄片レベルにおける劣化度を以下の3つに区分した。

- ・ none：ひび割れが認められない状況
 - ・ minor：骨材内部のひび割れ発生
 - ・ moderate：骨材からセメント硬化体へのひび割れ進展
- 本研究では、任意の薄片中の粗骨材を約 30 粒子を観察し、各材齢におけるそれぞれの劣化度の割合を求めた。

図-4 に各促進期間における膨張量および薄片観察による劣化度の割合の経時変化を示す。ASR による反応および膨張が認められた促進期間 46 日では骨材内部のひび割れ(minor)が卓越した。その後、骨材内部のひび割れはセメント硬化体へ進展(moderate)した。

コンクリートの膨張・ひび割れ挙動と比較すると、骨材内部のひび割れが卓越している促進期間 46 日では、コンクリートの膨張量が 0.1%を超えており、コンクリート表面にひび割れが発生している。セメント硬化体にはほとんど損傷が認められないことから、弾性的に挙動しているものと考えられる。ただし、マクロ的にはコンクリート表層付近に非膨張層が形成されるため⁸⁾、コンクリート表面ではひび割れが発生したと考えられる。その後、コンクリートの膨張量はセメント硬化体へひび割れが進展した骨材量の増加に伴って大きくなった。この結果は、前章で述べた機構により A-S-H が反力を得てコンクリートの膨張に寄与していることを裏付けている。

以上より、ASR によるコンクリートの膨張およびひび割れ発生・進展過程は反応性骨材内部のひび割れ発生・進展およびその後のセメント硬化体へのひび割れ進展と密接な関係があることが確認された。これらの結果は上述した ASR の膨張機構と整合すると思われる。ただし、上述した通り、反応性骨材の種類等によってその損傷形態が異なるため、各種反応性骨材における微細領域の損傷過程について更なる検討が必要である。ASR の膨張機構を明らかにすることで、より信頼性の高い試験法や劣化構造物の診断技術に寄与すると思われる。

4. 結論

本研究は、各種反応性骨材における微細領域の損傷形態を評価し、A-S-H の膨張圧発現機構に関して考察を行った。また、ASR によるコンクリートのマクロな膨張およびひび割れ発生過程と微細領域における損傷過程の関連付けを行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) ASR の生成物である A-S-H の膨張圧発現には反力を得る部位が必要であり、その部位は反応性鉱物の存在形態等によって変化することを示した。また、反応リムは必ずしも必要ではないことを示した。さらに、セメントペーストではほとんど反力を得ること

ができないものと推察された。

- (2) 骨材界面において ASR ゲルは刷毛状の形態を呈していた。これは、骨材からセメント硬化体へのひび割れ発生後、A-S-H がひび割れを介して流動し、界面において C-S-H となってひび割れを閉塞しているためと考えられた。
- (3) ASR によるコンクリートのマクロな膨張およびひび割れ発生・進展過程は反応性骨材内部のひび割れ発生・進展およびその後のセメント硬化体へのひび割れ進展などの微細領域の損傷過程と密接な関係があることが確認された。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究(B)，課題番号 22760335)の助成を受けて行ったものである。また、本研究の実施にあたっては、多くの方々と議論した内容を参考にした。ここに付記し、関係各位に深く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書，2008
- 2) T. Ichikawa and M. Miura: Modified model of alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.1291-1297, 2007
- 3) 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, pp.643-675, 2010
- 4) 山田一夫：ASR による膨張機構の再検討，セメント・コンクリート，No.753, pp.2-8, 2009
- 5) 小林一輔，白木亮司，森弥広：ASR を生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する 2, 3 の考察，土木学会論文集，No.426/V-14, pp. 91-100, 1991
- 6) T. Katayama: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.862-873, 2008
- 7) P. E. Grattan-Bellew & L. D. Mitchell: Quantitative petrographic analysis of concrete – The Damage Rating Index (DRI) method, a review, Proceedings of Marc-Berube symposium on alkali-aggregate reactivity in concrete, pp.321-334, 2006
- 8) M. Kawamura: Estimation of critical free expansions related to surface cracking in ASR-affected concretes, Cement and Concrete Composites, Vol.29, No.4, pp.324-329, 2007