

論文 ASR 膨張によりひび割れが生じたコンクリートの圧縮応力下におけるひずみ分布に関する研究

阪井 峻*¹・山本 大介*²・濱田 秀則*³・佐川 康貴*⁴

要旨：本研究では、アルカリシリカ反応（ASR）により生じたひび割れがコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を明らかにするため、膨張量ごとの力学的性質、内部のひび割れ性状を詳細に調査した。また、圧縮載荷試験を行うと同時にデジタル画像相関法を適用し、ASR による内部ひび割れとひずみ分布の特徴について考察した。その結果、ASR による内部ひび割れは膨張開始初期に発生し、膨張に伴い力学的性質は低下した。また、ASR により生じた水平方向と斜め方向ひび割れに大きな縦ひずみが確認できた。これにより、載荷によってひび割れが閉じ、それに伴い変形量が大きくなり、静弾性係数が低下したと推察した。

キーワード：アルカリシリカ反応、力学的性質、内部ひび割れ、デジタル画像相関法

1. はじめに

アルカリシリカ反応（ASR）は、コンクリートの劣化現象の一つである。1986 年の ASR 抑制対策が実施されるようになり、ASR 劣化現象はほとんどが制御されたが、ASR の抑制対策が実施される以前に建設されたコンクリート構造物の場合には劣化現象が見られる。よって、現在においても ASR 劣化の補修・補強対策が実施される事例もある。補修や補強を行う場合には、ひび割れが生じたコンクリートの力学的性質の評価が必要である。

一般的にコンクリートのひずみ計測は、ひずみゲージを使用して行われることが多いが、ゲージ貼り付け部の局所的な測定となり、広範囲の表面変形を計測することは難しい。また近年、構造物の複雑化や維持管理意識の高まりなどにより、コンクリート構造物の変形を全視野的に計測できる方法の確立が求められている²⁾。このような背景から、コンクリート構造物の変形を全視野的に計測することができるデジタル画像相関法が注目されつつある。

既往の研究においても ASR 膨張によってコンクリートの力学的性質が低下することは報告^{3)・4)}されている。例えば、東原ら³⁾は膨張量 3000 μ 程度までは圧縮強度の低下は顕著でないが、膨張が進展した 5000 μ 程度では 30%の圧縮強度の低下が認められたと報告している。また、久保ら⁴⁾は静弾性係数については膨張初期における低下が大きく、膨張量 1000 μ 以降は緩やかに低下し、水セメント比が異なる場合でも、同程度の膨張量では低下の程度に顕著な違いは認められないと報告している。このように多くの ASR と力学的性質の関係性についての研究は行われてきたが、ASR により生じたコンクリート

の内部ひび割れが膨張量ごとにどのように進展し、その内部ひび割れが圧縮強度および静弾性係数に与える影響についての検討は、ほとんどないのが現状である。本研究では、ASR により生じたひび割れがコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、圧縮強度、静弾性係数等の各力学的性質と内部ひび割れとの関係性を実験的に考察した。また、デジタル画像相関法を用いて、一軸圧縮応力下におけるひずみ分布の特徴について考察を行った。

2. コンクリートの膨張特性

2.1 材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、アルカリ量 0.51%）を、細骨材は海砂（表乾密度 2.58g/cm³、吸水率 1.72%）を使用した。粗骨材は ASR 反応性を有する安山岩碎石（表乾密度 2.67 g/cm³、吸水率 1.47%）を使用した。なお、この粗骨材は JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）」の結果、アルカリ濃度減少量 Rc は 215mmol/l、溶解シリカ量 Sc は 526mmol/l であり、「無害でない」と判定されたものである。

コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比（W/C）は 40%とした。コンクリート中のアルカリ総量を高めるため、練混ぜ水に NaCl 試薬を添加し、Na₂O_{eq} が 8kg/m³ となるようにした。

2.2 供試体

本研究では、円柱供試体（ ϕ 100×200mm）および角柱供試体（100×200×200mm）を作製した。打設後 24 時間で脱型し、供試体を湿布で覆い、20℃、100%R.H.の環境で材齢 28 日まで養生した。その後、40℃、100%R.H.の

*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻（学生会員）

*2 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 技術職員 修士（理学）（正会員）

*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 博士（工学）（正会員）

*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授 博士（工学）（正会員）

表—1 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤		NaCl (kg/m ³)	備考
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤(g/m ³)	AE剤(ml/m ³)		
40	165	413	759	975	1547	15	11.1	本研究
55	165	300	851	1094	938	12	12.7	文献5)

環境で促進養生を実施した。材齢 28 日を膨張量の初期値 (0 μ) とし、供試体側面にゲージプラグを貼り付け、コンタクトゲージ法により膨張量を測定した。設定した膨張量 (100 μ , 500 μ , 1000 μ , 1500 μ , 2000 μ , 3000 μ , 4000 μ) に達した時点で円柱供試体は圧縮強度、超音波伝播速度、動弾性係数の測定を行った。なお、 μ は「 $\times 10^{-6}$ 」を表す。角柱供試体は 100 $\times$ 100 $\times$ 200mm となるようにコンクリートカッターで切断して二分割し、一方は切断面に蛍光樹脂を含浸させた後、内部ひび割れの観察を行った。もう一方は圧縮載荷試験を行うと同時に、切断面に対しデジタル画像相関法を適用した。また、供試体の側面には載荷軸方向および載荷軸直角方向にひずみゲージ (検長 60mm) を 2 箇所貼付してひずみの計測を行った。

2.3 促進膨張試験結果

図-1 に円柱供試体および角柱供試体の促進膨張試験の測定結果を示す。促進膨張試験の結果、円柱供試体は約 20 日、角柱供試体は約 40 日で膨張を開始した。その後は両者とも約 200 日で膨張量 4000 μ に達した。円柱供試体および角柱供試体で、膨張開始時は異なったが、その後の膨張挙動は同様な傾向を示した。

3. 力学的性質

本研究では、各段階の膨張量 (0 μ , 100 μ , 500 μ , 1000 μ , 1500 μ , 2000 μ , 3000 μ , 4000 μ) に達した時点で、円柱供試体では強度試験と非破壊試験を、角柱供試体では内部観察を行い、内部ひび割れと力学的性質との関係性について検討した。また、本実験で作製した円柱供試体 (W/C=40%) と以前作製した円柱供試体⁵⁾ (W/C=55%) との膨張量に伴う力学的性質の比較を行った。なお、本実験と既往の実験とは同一反応性骨材を用い、アルカリ総量および促進温度、湿度環境も同一としている。

3.1 実験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従い行った。供試体の側面に検長 60mm のひずみゲージを貼付し、ひずみ (載荷軸方向および載荷軸直角方向) を測定した。計測値から圧縮強度、静弾性係数およびポアソン比を求めた。

(2) 動弾性係数および超音波伝播速度

動弾性係数は JIS A 1127 に準じて縦振動の一次共鳴振動数から求めた。計測の際は供試体を測定台の上に設置し、発振器により振動を加えた。振動数を変え、これに

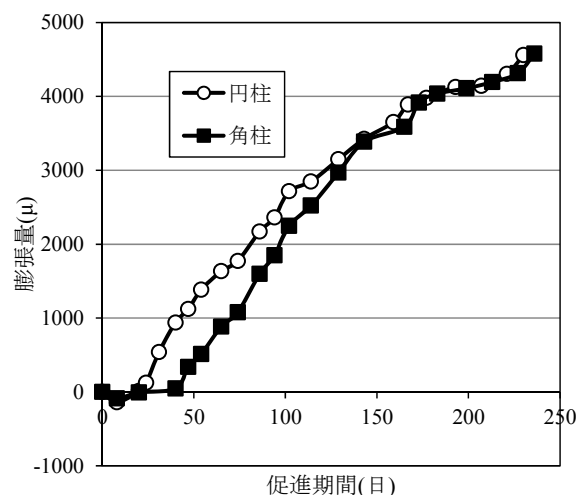


図-1 促進膨張試験の測定結果

応じて供試体が振動するように駆動力を加えながら、増幅された出力電圧を観測し、指示器に明確な最大の振れを生じた振動数を一次共鳴振動数とした。

超音波伝播速度は高さ方向の計測を行い、高さ方向の距離を伝播速度で除して、超音波伝播速度を算出した。

(3) 蛍光樹脂含浸による内部ひび割れの観察

ASR を生じたコンクリートの膨張による内部ひび割れの変化を観察するため、作製した角柱供試体 (100 $\times$ 200 $\times$ 200mm) を使用した。角柱供試体を 100 $\times$ 100 $\times$ 200mm に切断し、蛍光樹脂の含浸を行った。ブラックライトを照射した際に目視できる、ひび割れ総延長をコンクリート断面積で除し、内部ひび割れ密度を算出した。W/C=40%の方は内部のひび割れ幅も算出した。

3.2 実験結果および考察

(1) 内部ひび割れ観察結果

写真-1 に内部断面のブラックライト照射像を、図-2 に膨張量と内部ひび割れ密度および幅の関係を示す。W/C=40%の内部ひび割れ密度は 100 μ において 20m/m² 程度確認できた。また、1000 μ に達するまでのひび割れの進展が著しく、2000 μ 以上では収束した。4000 μ においてはひび割れ幅 0.3mm のひび割れが確認でき、網目状のひび割れパターンを形成していた。また 2000 μ から 4000 μ の間ではひび割れ密度に大きな変化はなかった。本研究では、膨張量 2000 μ までは主に内部のひび割れ密度の増加が、膨張量 2000 μ から 4000 μ までは主に内部のひび割れ幅の増加が進展したと考えられる。また W/C=55%の場合でも 100 μ において内部ひび割れが発生

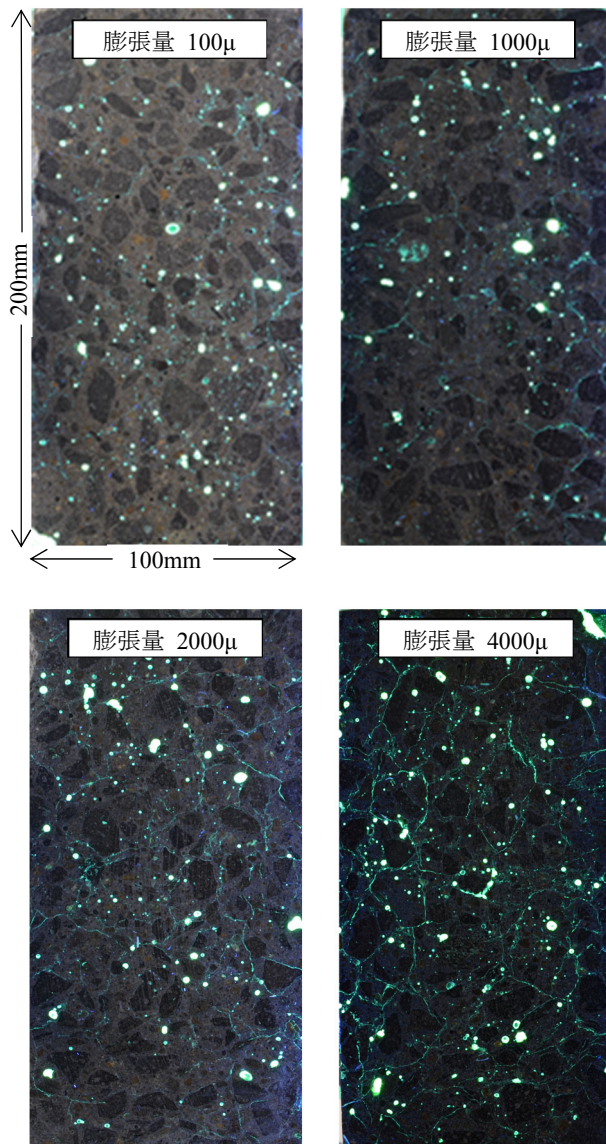


写真-1 コンクリート断面のブラックライト照射像

し、2000 μ 以上では収束する傾向を示した。W/C=40%および W/C=55%の双方で、膨張に伴う内部のひび割れの進展はほぼ同様の傾向が確認された。

(2) W/C=40%と W/C=55%との膨張量に伴う力学的性質の比較

図-3 に W/C=40%の各膨張量における応力-ひずみ曲線を示す。なお、載荷軸方向のひずみを縦ひずみ、載荷軸直角方向のひずみを横ひずみと定義した。また、プラス側を圧縮、マイナス側を引張とした。膨張量が大きくなるほど最大応力時のひずみは大きくなる傾向であった。ASR によりコンクリートにひび割れが生じたことで変形が生じやすくなったことによるものと考えられる。また、応力レベルが高い場合では、膨張量が大きくなるほど、ひずみの増加量は縦ひずみより横ひずみの方が大きくなる傾向を示した。

図-4 に膨張量と圧縮強度の関係を示す。W/C=40%の圧縮強度は膨張量が 100 μ において最大を示し、100 μ 以

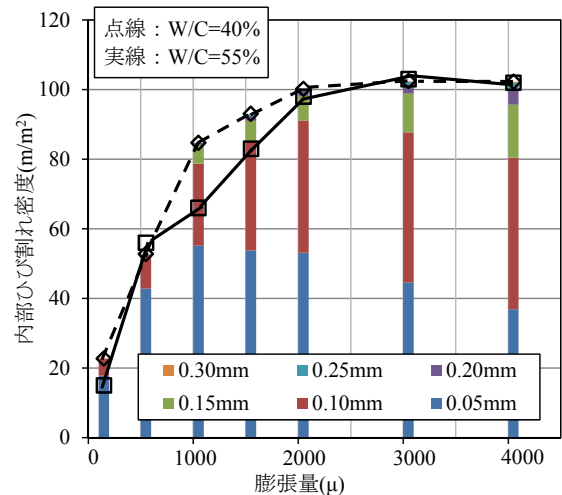


図-2 膨張量と内部ひび割れ密度および幅の関係

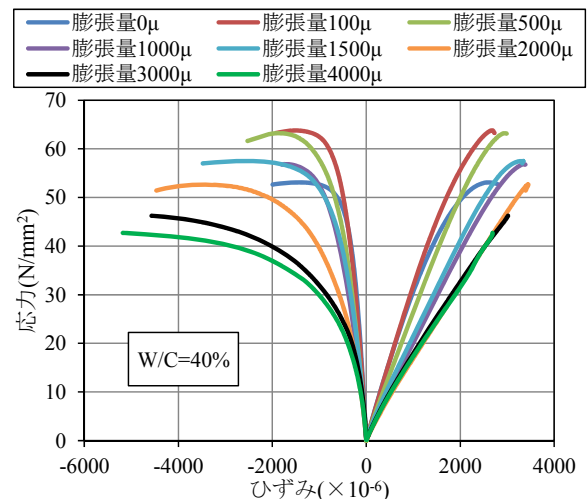


図-3 応力-ひずみ曲線(正：圧縮、負：引張)

降は圧縮強度が徐々に低下する結果となった。W/C=55%の圧縮強度は膨張量が 500 μ において最大を示し、その後の膨張の進展とともに圧縮強度が徐々に低下する傾向を示した。膨張初期に最大を示したのは、材齢 28 日から試験を開始したため、促進養生により水和反応が促進され強度が増進したからだと考えられる。また、W/C=40%の方が W/C=55%よりも密実な組織のため圧縮強度は大きな値を示した。W/C=40%の方が W/C=55%よりも膨張に伴う圧縮強度の低下量は大きい結果となった。

図-5 に膨張量と静弾性係数および動弾性係数の関係を示す。静弾性係数は W/C=40%と W/C=55%の両者とも 1000 μ までに大きく低下していた。これは 1000 μ までの間に内部のひび割れ密度が大きく増加したことが影響したと考えられる。また、既往の研究においても膨張初期に静弾性係数が顕著に低下し、それ以降は緩やかに低下する傾向が報告されており⁴⁾、本研究との結果は既往の研究との整合性が認められる。動弾性係数は膨張量 4000 μ では少し異なったが、W/C=40%および W/C=55%

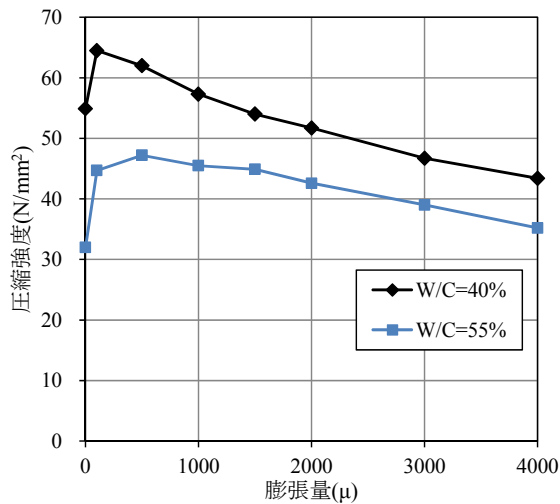


図-4 膨張量と圧縮強度の関係

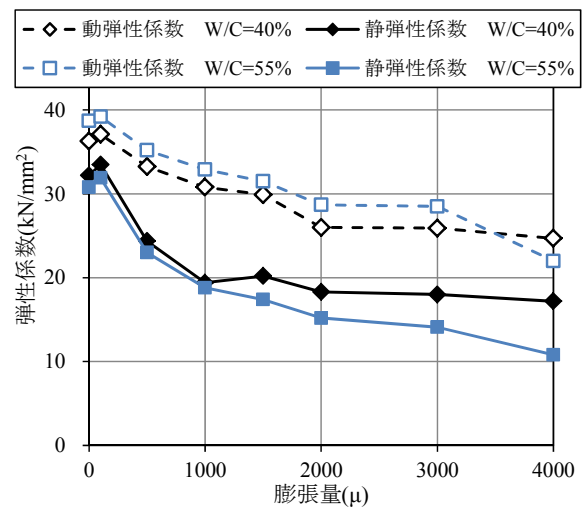


図-5 膨張量と弾性係数の関係

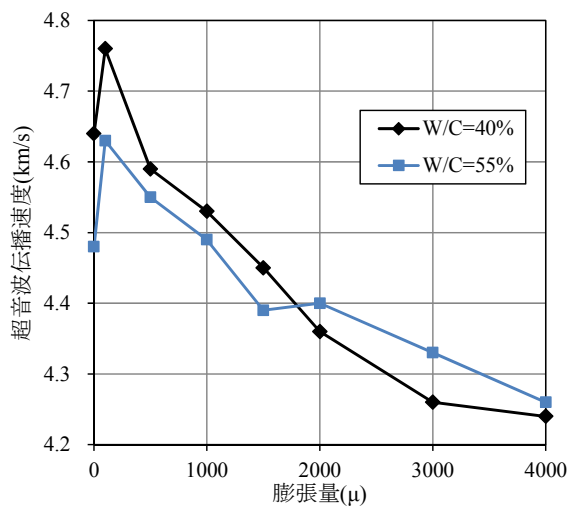


図-6 膨張量と超音波伝播速度の関係

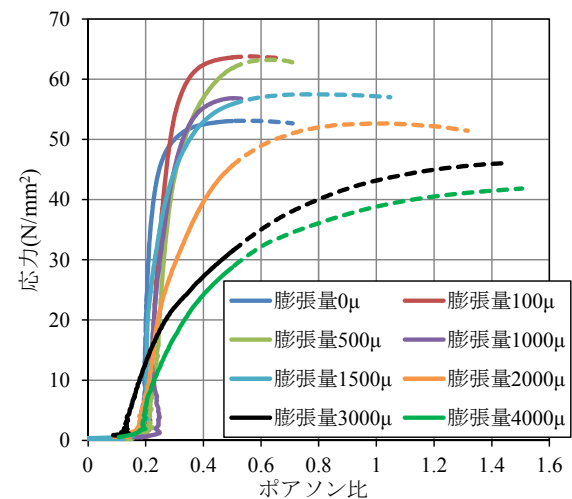


図-7 応力-ポアソン比曲線

の場合でも、膨張量の増加に伴う動弾性係数の低下量がほぼ等しい結果となった。本実験では、膨張量 4000 μ を除くすべての膨張量で W/C=55%の方が W/C=40%よりも大きい値を示した。骨材体積比が大きいほど弾性係数は大きくなる傾向があると報告⁶⁾されている。本研究でも骨材体積比は W/C=55%の方が W/C=40%よりも 8%大きいことなどが影響し、動弾性係数は W/C=55%の方が大きい値を示したと考えられる。

図-6 に膨張量と超音波伝播速度の関係を示す。超音波伝播速度は W/C=40%、W/C=55%ともに 100 μ 時に最も大きな値を示し、その後は膨張とともに小さくなるのが分かる。W/C=55%の方は 2000 μ において低下が一旦収束した。これはひび割れにゲルや水分が充填されたことが影響したことによるものと考えられる。

図-7 に W/C=40%の各膨張量における圧縮載荷時の応力-ポアソン比曲線を示す。なお、体積の変化が無い場合、ポアソン比は理論上 0.5 以下となるため、図中の破線領域（ポアソン比 0.5 以上）は、内部ひび割れにより見かけ上、体積が膨張していることを示す。ここで、

膨張量 2000 μ に着目すると、最大応力時の 60%程度よりポアソン比が大きく進展することが分かる。3000 μ では最大応力時の 50%程度、4000 μ では最大応力時の 40%程度よりポアソン比が大きく進展することが分かる。図-3より 2000 μ 以降の最大応力時における横ひずみが大きくなる傾向も確認でき、膨張量 2000 μ を境に圧縮破壊性状が大きく変化する結果となった。

内部のひび割れ密度および幅と力学的性質の実験結果を比較すると、W/C=55%の圧縮強度を除く力学的性質は膨張量 100 μ において最大となり、500 μ において低下する結果となった。これは 500 μ に達するまでに内部のひび割れ密度が増加したことが影響したと考えられる。本研究では静弾性係数は 1000 μ までに大きく低下し、1000 μ 以降は大きな低下は見られなかった。圧縮強度は膨張初期に最大を示し、その後は膨張量の増加に伴い低下する結果となった。このことから、静弾性係数は内部のひび割れ密度の影響を大きく受け、圧縮強度は内部のひび割れ密度と内部のひび割れ幅の両者の影響を大きく受ける傾向があると考えられた。



写真-2 圧縮载荷試験の状況

4. デジタル画像相関法によるひずみ分布の観察

本研究では、非接触的な方法でコンクリート構造物の変形を全視野的に計測ができるデジタル画像相関法を用い、ASR 膨張を生じたコンクリートの圧縮破壊挙動について考察を行った。

4.1 実験方法

切断した角柱供試体 (100×100×200mm) を用い、ASR によるひび割れと圧縮応力下のひずみ分布の関係性を考察した。解析範囲は切断面 (200×100mm) とし、デジタル画像相関法におけるパターン認識を容易にするため、切断面に黒色塗料を吹き付け、ランダム模様とした。デジタルカメラ (2048 画素×2048 画素) および供試体表面を観察しやすくするために LED のスタンドライトを設置した。そして、载荷板と供試体が触れた直後を 0kN と見なし、50kN 増加させるごとに、コンクリート表面の画像をデジタルカメラで撮影した。撮影した画像はパソコンに保存し、実験終了後に 50kN ごとの画像を 0kN の画像と比較し、画像を解析することでひずみ分布を求めた。実験の状況を写真-2 に示す。

4.2 実験結果

図-8 に膨張量 0 μ および促進養生で膨張量 3000 μ を生じさせた角柱供試体の载荷試験を行った際の応力とひずみの関係を示す。デジタル画像相関法により求めた供試体表面の平均ひずみと、ひずみゲージにより測定した供試体側面中央部の平均ひずみとの比較をみると、両者はほとんど一致していることが確認できた。

図-9 に、角柱供試体 (膨張量 0 μ および 3000 μ) の载荷試験を行った際の最大応力時 (膨張量 0 μ は 48.3N/mm²、膨張量 3000 μ は 40.3N/mm²) における縦ひずみと横ひずみの分布を示す。また同図に粗骨材 (黒色) と ASR による内部ひび割れ (白色) のスケッチを併記した。この図より、ASR ひび割れ部にひずみの集中が確認された。

図-9 のように縦ひずみが集中している A の部分と、横ひずみが集中している B の部分に着目し、ASR によるひび割れと、荷重増加に伴うひずみの変化について考

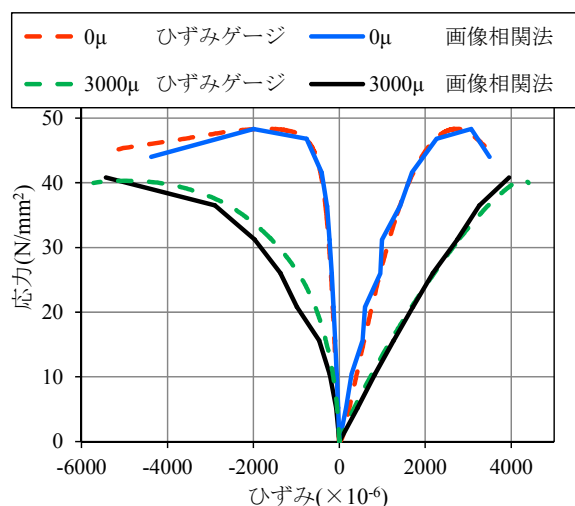


図-8 応力-ひずみ関係 (正：圧縮，負：引張)

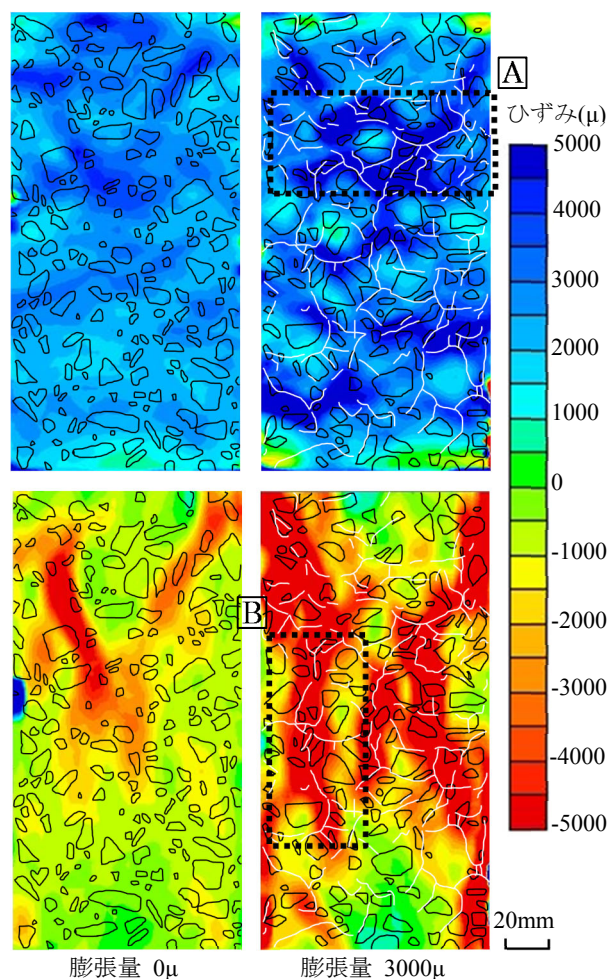


図-9 最大応力時の縦ひずみ (上段) と横ひずみ (下段)

察した。図-10 に着目した A、図-11 に着目した B の部分における 31.2N/mm² と最大応力時のひずみ分布の変化を示す。ここで、三木ら⁷⁾の画像相関によるひび割れ評価方法を参考にし、ASR によるひび割れを方向別に区分した。内部ひび割れをスケッチした図に 10mm 間隔の格子を設け、格子を通過するひび割れの、载荷軸直角方

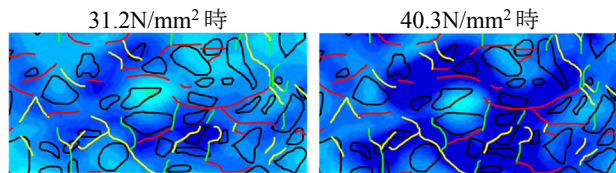


図-10 図-9 中の A の部分におけるひずみ分布の変化

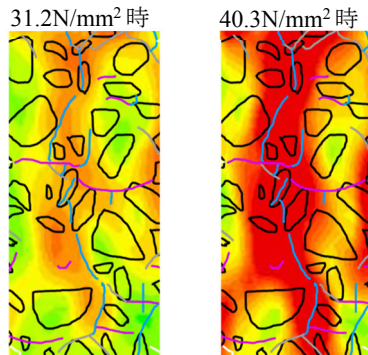


図-11 図-9 中の B の部分におけるひずみ分布の変化

向からの角度をひび割れ角度と定義した。その角度を載荷軸直角方向から 30 度ごとに分類し、水平方向、斜め方向、鉛直方向の 3 種に区分した。図-10 に水平方向ひび割れ（赤色）、斜め方向ひび割れ（黄色）、鉛直方向ひび割れ（緑色）のスケッチを加えた。また、図-11 に水平方向ひび割れ（紫色）、斜め方向ひび割れ（灰色）、鉛直方向ひび割れ（青色）のスケッチを示した。

図-10 より、水平方向と斜め方向のひび割れ部にひずみが増大したことが分かる。これより載荷によって水平方向と斜め方向のひび割れが閉じ、それに伴い変形量が大きくなり、静弾性係数が低下したと考えられる。また、三木らの研究においても同様な傾向が報告されており、本研究との結果は三木らの研究との整合性が認められる。図-11 より、鉛直方向のひび割れ部にひずみが増大したことから、鉛直方向のひび割れが水平方向に広がったと考えられる。さらに、図-8 では膨張量 0μ および 3000μ とで圧縮破壊挙動が違う結果になったこととしては、載荷によって水平方向と斜め方向のひび割れが閉じること、また鉛直方向のひび割れが広がることにより変形量が大きくなりひずみが増大したからだと考えられる。

5. まとめ

本研究では、ASR によりコンクリートに生じた内部ひび割れの発生状況とコンクリートの力学的性質との関係を明らかにすることを目的とし、円柱供試体では膨張量ごとの力学的性質、角柱供試体ではひび割れ性状の変化を詳細に調査した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 供試体内部のひび割れは、膨張量 2000μ までは主にひび割れ総延長が増大し、膨張量 2000μ から 4000μ までは主にひび割れ幅が増大する結果となった。

- (2) W/C=40%の方が W/C=55%よりも膨張に伴う圧縮強度の低下量は大きい結果となり、W/C=40%および W/C=55%の場合でも、膨張初期の段階で静弾性係数は大きく低下する傾向を示した。
- (3) 膨張量 500μ に達するまでに内部のひび割れ密度が増加したことにより、W/C=55%の圧縮強度を除く力学的性質は 500μ において低下する結果となった。
- (4) 本研究では、静弾性係数は内部のひび割れ密度の影響を大きく受け、圧縮強度は内部のひび割れ密度と内部のひび割れ幅の両者の影響を大きく受ける傾向があると考えられた。
- (5) 圧縮載荷試験を行った結果、ASR によって静弾性係数が低下するのは、水平方向と斜め方向のひび割れが閉じたためであると考えられた。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 15K18101 の助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、コンクリートライブラリー124, 2005.8
- 2) 出水亨, 松田浩, 伊藤幸広, 木村嘉富：デジタル画像相関法を用いた撤去 PCT 桁橋の載荷試験時における変位, ひずみ, ひび割れ計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1411-1416, 2012.7
- 3) 東原直, 久保善司, 上田隆雄, 野村倫一：過大な ASR 劣化膨張にともなうコンクリートの力学的性能の変化, 土木学会第 61 回年次術講演会講演概要集, pp.127-128, 2006.9
- 4) 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.1633-1638, 2006.7
- 5) 溝淵真之, 山本大介, 濱田秀則, 佐川康貴：ASR を生じたコンクリートの損傷状態と力学的性質の関係に関する実験的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 14 巻, pp.53-60, 2014.10
- 6) 寺本篤史, 五十嵐豪, 丸山一平：硬化過程におけるモルタルの動弾性係数に及ぼす骨材量の影響に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.132-139, 2011.3
- 7) 三木朋広, 宮川侑大：ASR が生じたコンクリートの弾性係数および圧縮破壊挙動の評価に関する実験的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 14 巻, pp.45-52, 2014.10