論文　アルカリシリカ反応によりひび割れが生じたコンクリートを対象とした圧縮応力下での表面ひずみ計測に関する基礎的研究

星野　翔太郎[*1]・三木　朋広[*2]

要旨：アルカリシリカ反応（ASR）によってひび割れが生じたコンクリート角柱供試体を対象として，表面を研磨した断面を観察し，研磨面の画像を積層化して，コンクリート内部ひび割れの 3 次元的に可視化することを試みた。また，ASR によってひび割れが生じたコンクリートの圧縮応力下においてコンクリートのひずみを画像解析により計測し，ポアソン比，ただし，ここでは最大荷重の約 10%から最大荷重までの非線形領域を含めた載荷軸方向と横方向のひずみの比として縦横ひずみ比を算出した。画像解析の結果とひずみゲージによる結果を比較するとともに，圧縮応力下での縦横ひずみ比の変化，ひずみの推移を把握できた。

キーワード：ASR，内部ひび割れ，3 次元可視化，ポアソン比，画像解析

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下，ASR）によってコンクリートが材料として劣化するだけでなく，異常な膨張により鉄筋が破断するといった事例が報告されている [1)]。ASR による損傷ならびにその損傷が生じたコンクリート構造物の性能評価に関する知見は蓄積されつつあり，さらなる知見蓄積やその知見に基づく補修補強技術が期待される。このような背景の中，ASR による膨張によって，コンクリートの圧縮強度と比較して，弾性係数が著しく低下することがこれまでの実験や構造物から採取したコンクリートコアの圧縮試験より示されているものの，弾性係数と言ったコンクリートの基本的な力学特性についても，その低下要因の推定に必要な基本情報が不足しているのも現状である。

著者らのこれまでの関連研究では，ASR 劣化したコンクリートの力学的特性を把握するために，コンクリートの内部ひび割れの観察 [2)]，ならびに圧縮強度，弾性係数等，圧縮応力下での変形挙動を把握するための圧縮載荷試験 [3,4)]を行ってきた。本研究では，圧縮載荷試験では，ひずみゲージならびに画像解析によって載荷軸ならびに直交方向のひずみ計測を行い，ASR ひび割れがコンクリートの圧縮応力下で載荷軸直交方向のひずみの挙動に与える影響を実験的に検討した。

圧縮載荷試験で対象とした ASR が生じたコンクリート供試体（以下，ASR コンクリート供試体）では，供試体全体においてほぼ一様にひび割れが生じており，ひずみゲージの貼付位置や方向により計測されるひずみが大きく異なることが推測される。そこで本研究では，圧縮載荷試験において，ひずみゲージによる載荷軸方向と横方向のひずみを計測するとともに，画像解析によるひずみ計測を並行し，それぞれの計測で得たひずみ値，ならびにポアソン比を比較した。ただし，ここでは最大荷重の約 10%から最大荷重に至るコンクリートの非線形領域におけるひずみ計測を行っており，その測定結果に基づき軸方向と横方向のひずみの比を求めているため，以降ではポアソン比の代わりに縦横ひずみ比と称する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

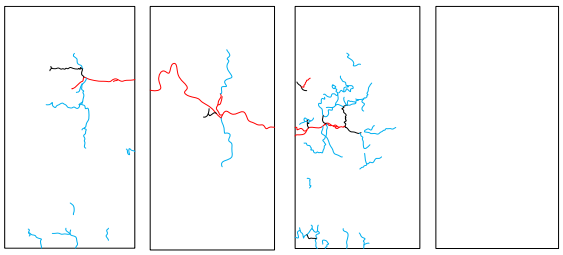
実験では，断面 100 mm×100 mm，高さ約 200 mm の角柱供試体を対象とする。用いた供試体は，内部ひび割れ観察用の ASR を促進させたコンクリート供試体（以下では ASR コンクリート供試体と称する）が 1 体，圧縮載荷試験用の基準となる健全なコンクリート供試体が 1 体，ASR コンクリート供試体が 2 体（ASR-1，ASR-2）ある。健全コンクリート供試体ならびに ASR コンクリート供試体に使用した示方配合を**表－1** に示す。なお，健全コンクリート供試体の示方配合は，反応性の細骨材ならびに粗骨材を，それぞれ非反応性の細骨材ならびに粗骨材にじゃ得たものを使用した。コンクリートに使用した骨

表－1　コンクリートの示方配合表

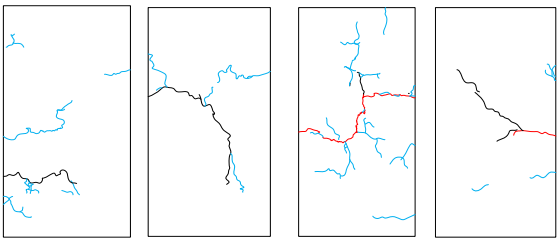
G_{max}	ｽﾗﾝﾌﾟ	W/C	空気量	s/a	kg/m^3							g/m^3
mm	cm	%	%	%	W	C	Sn	Sr	Gn	Gr	NaCl	AE 減水剤
20	18	63.0	5.0	48	181	287	422	432	466	475	12.4	575

Sn：非反応性細骨材，Sr：反応性細骨材，Gn：非反応性粗骨材，Gr：反応性粗骨材

*1 神戸大学　大学院工学研究科市民工学専攻　(学生会員)
*2 神戸大学　大学院工学研究科市民工学専攻　准教授　博士(工学)　(正会員)

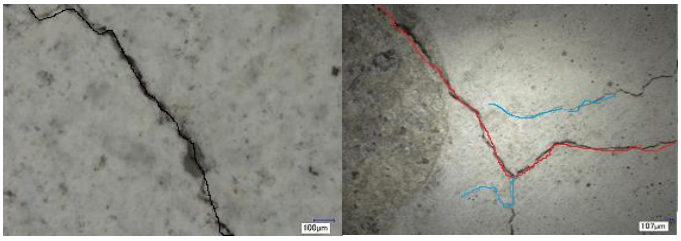


(1) ASR-1



(2) ASR-2

図－1　圧縮試験用供試体のひび割れ図



図－2　マイクロスコープによるひび割れの拡大写真

図－3　圧縮試験概要

図－4　画像撮影面とひずみゲージ貼付け位置

材の最大寸法は 20 mm とした。全ての供試体において，セメントは普通ポルトランドセメントを使用し，AE 減水剤を使用した。反応性骨材を使用した ASR コンクリート供試体は ASR を促進することを目的として，載荷試験まで実験棟南側の日当たりのよい屋外（内陸部）に暴露した。

圧縮載荷試験の前にまず供試体端部を成形した。供試体端部の成形には，研磨機と研磨剤（粒度 F100）を用いた。供試体端面の凹凸を取り除くともに，載荷時に載荷板と載荷面が水平になるように表面を研磨し，調整した。また，供試体側面のひび割れと骨材位置の関係を把握しやすくするため，供試体側面も同様に研磨した。

内部ひび割れ観察用の ASR コンクリート供試体と圧縮載荷試験用 ASR コンクリート供試体は同一の材料ならびに配合ではあるが，内部ひび割れ観察用の ASR コンクリート供試体は宮川 [2) 3)]が打設し，長期間曝露されたものを使用したため膨張量が異なる。内部ひび割れ観察用の ASR コンクリート供試体 1 体の膨張量は 1200 μ 以上あり，圧縮載荷試験用の ASR コンクリート供試体 2 体の膨張量は 500μ 程度である。

圧縮載荷試験に用いた ASR コンクリートの供試体の側面である 4 面のひび割れ図を**図－1** に示す。ひび割れ幅 0.1mm より大きいひび割れを赤色，ひび割れ幅 0.1mm のひび割れを黒色，ひび割れ幅 0.1mm 未満のひび割れを青色で表している。この時，ひび割れ幅の計測にはクラックスケールを用いて計測を行った。また，ひび割れをマイクロスコープで撮影した画像を**図－2** に示す。このように，膨張量は 500μ 程度であったが供試体の表面においては非常に微細なひび割れを観察することができた。後の圧縮試験では，この様な ASR によりひび割れが生じた状態のコンクリートを対象として載荷実験を実施していく。

2.2 内部ひび割れの観測 [4)]

本研究では，供試体表面を研磨し，研磨面を撮影することで，ASR ひび割れの内部の状態を観察した。供試体面は，100 mm×200 mm の長方形面とし，1 面だけを研磨剤（粒度 F100）と研磨機を用いて研磨して，その断面の観測を行った。

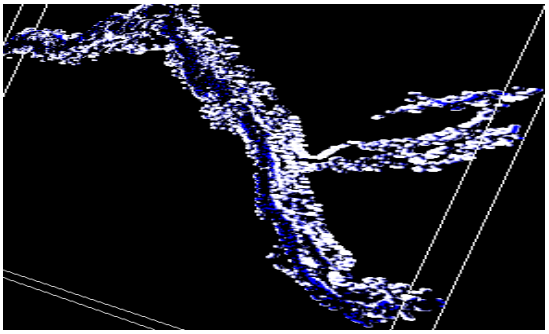
正確なひび割れ形状を観察するため，ひび割れ内部に低粘度のエポキシ樹脂を注入して，ASR ひび割れを固定したうえで研磨を行った。内部ひび割れの観測においては，研磨面を厚さ 0.3 mm 程度の間隔で研磨し，研磨面をスキャナでデジタル画像（解像度：1600 dpi）として取り込んだ。取り込んだ複数の画像を積層化するソフトを用いて，2 次元画像から 3 次元画像を作成した。

2.3 圧縮載荷試験の概要

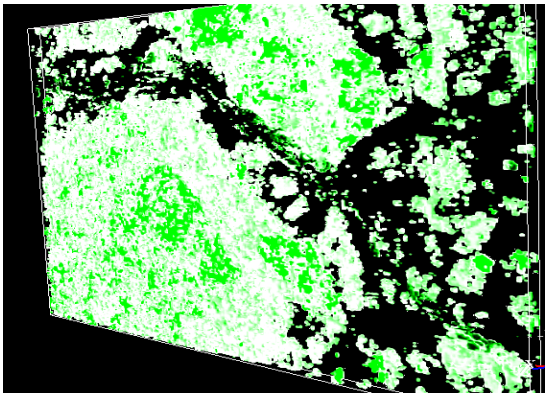
図－3 に示す圧縮載荷試験では，ASR コンクリート供試体 2 体，健全コンクリート供試体 1 体の計 3 体を使用した。またすべての供試体に**図－4** に示すように，コンクリート表面のデジタル画像撮影面と直交する 2 面に，ひずみゲージを貼り付けて，載荷軸方向ならびに直交方向のコンクリートひずみの測定を行った。

圧縮載荷試験には，2000 kN 万能試験機を用いた。載荷では，最大荷重を示すまで単調増加し，最大荷重を示すとすぐに除荷し，一度最小荷重（およそ 0.5kN）まで除荷した後，再度加力して荷重増分が小さくなると除荷するといった繰返し載荷を行った。これによりポストピークの挙動を安定して測定することができる。圧縮載荷試験では，載荷版と供試体間の減摩処理を施さず，供試体端部に水平方向の拘束が存在する条件で載荷した。

供試体の表面ひずみの計測では，ひずみゲージ（ゲージ



(1) ひび割れ拡大図



(2) 骨材

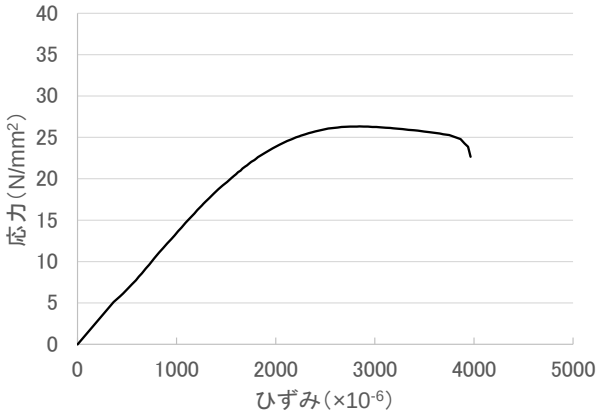
図－5　ひび割れと骨材の 3 次元積層画

長：60 mm）による測定の他，画像相関法による画像解析による表面ひずみ計測を実施した。載荷中，各荷重レベルにおける供試体を対象としてデジタルカメラを用いて写真を撮影しておき，載荷試験後に画像相関法を用いてコンクリート供試体の表面のひずみを求めた。本研究では，ひび割れの進展状況を把握するため，画像解析によって試験載荷中のコンクリート供試体における表面ひずみの測定を行った。画像解析の手法として画像相関法を採用した。画像相関法による画像解析の手順を述べる。まず，各荷重レベルにおいてデジタルカメラで撮影する。次に撮影したデジタル画像における基準画像（変形前）と比較画像（変形後）の輝度値を比較し，類似点の移動量を計測する。この処理をすべての小領域で繰り返すことによって，計測範囲における変位の大きさや方向を求めることができる。画像相関法を用いて画像解析を行うと，各節点の座標が算出される。本実験で解析した範囲は図 2－7 に示す，画像解析範囲は 11×11 の 121 節点で計測した。画像解析で求めた範囲の中央部分である 7×7 の 49 節点の座標を用いて各節点間の距離を求めた。軸方向に 7 本，直交方向に 7 本の長さを求め，その値を平均し各荷重の軸方向，および直交方向の節点間距離を求める．各荷重の節点間距離から計算した軸方向ひずみ，直交方向ひずみを用いていく。これにより，後に結果を示すが，ひずみゲージならびに画像解析から得られるひずみの値を用いて縦横ひずみ比の値を比較していく．また ひずみゲージを張ることが難しく，また表面の細かなひずみ分布を計測することを目的として，ASR コンクリート供試体を対象としてコンクリートの表面ひずみ，ならびに縦横ひずみ比を画像解析から求めた。

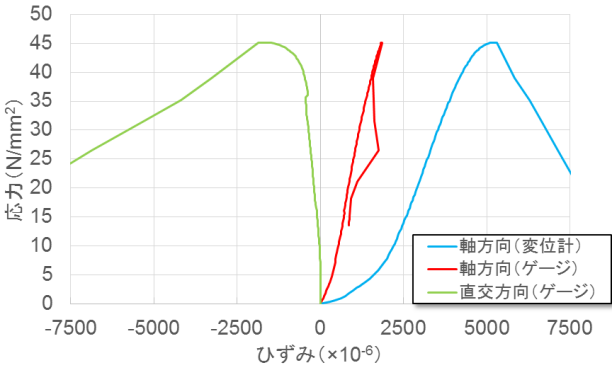
3. 内部ひび割れの観察 [4)]

ひび割れを含むコンクリート研磨面画像の 3 次元積層化によって，ASR によって生じたひび割れが，コンクリート内部でどのように生じているのかを確認していく。さらに，ASR ひび割れの性状に対する骨材位置の影響についても調べる。

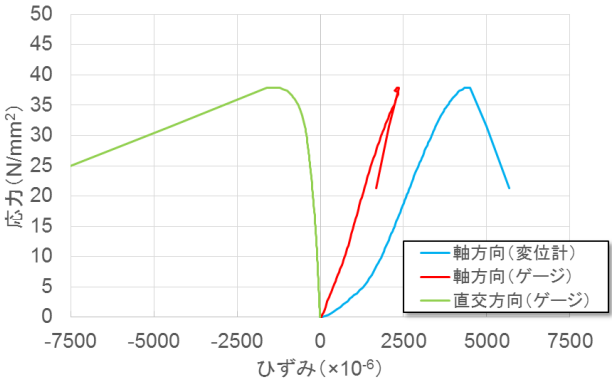
積層化した画像の一例を**図－5** に示す。この 3 次元積層化画像では，ひび割れは青色，骨材は緑色，セメント



図－6　応力－ひずみ関係（健全，変位計）



図－7　応力－ひずみ関係（ASR-1）



図－8　応力－ひずみ関係（ASR-2）

表-2　圧縮載荷試験結果

供試体名	健全	ASR-1	ASR-2
最大応力度 (N/mm^2)	26.3	45.1	38.0
静弾性係数 (N/mm^2)	13 000	13 100	12 600

ペーストは黒色，また色の濃い所は表面に表れているひび割れ，および骨材を表している。この結果から，ひび割れは，深くなるにつれて，つまり供試体表面から**図－5**(1)の上方に向かって生じていることがわかる。これは骨材が 3 次元的な形状であり，コンクリート表面からの深さによって骨材の位置が異なることを意味している。本実験では，角柱供試体を薄く研磨し，それぞれコンクリート表面から順にひび割れの状態を観察していくと，同じひび割れを観察していても表面からの研磨深さが異なると，骨材が 3 次元的な構造をしていることから，異なる位置の骨材に沿ってひび割れが進展していくことがわかる。

4. 圧縮載荷試験の結果と考察

4.1 応力－ひずみ関係

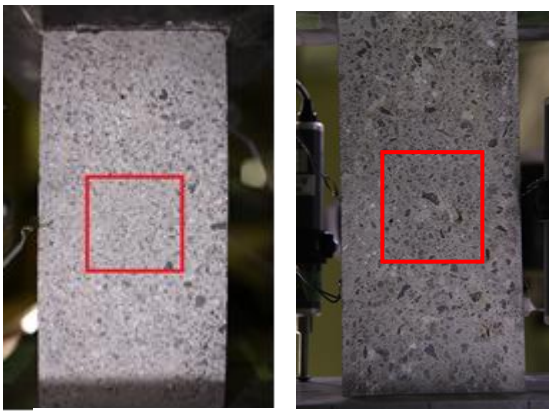
本研究では健全コンクリート供試体 1 体，ASR コンクリート供試体 2 体の供試体を用いた。各供試体の応力－ひずみ関係をそれぞれ**図－6**～**図－8** に示す。また，圧縮載荷試験の結果から得られた各供試体の最大応力度，および静弾性係数を**表－2** にまとめる。

ここで，静弾性係数は，測定した応力－ひずみ最大応力度の 1/3 の点を含むような直線近似部分の接線剛性として算出した。また，ここで示す応力－ひずみ関係は，圧縮載荷試験では繰返し載荷を行ったが，その結果の各繰返しサイクルにおける最大応力値をつないだ包絡線である。

応力－ひずみ関係において，健全コンクリートについては，変位計から得られた軸方向ひずみを用いる。一方，ASR コンクリートでは，圧縮載荷時に変位計とひずみゲージから得たひずみ値を用いている。なお，ひずみの正負については，軸方向の圧縮ひずみを正の値とし，ひずみゲージで測定した直交方向の引張ひずみを負の値として示している。

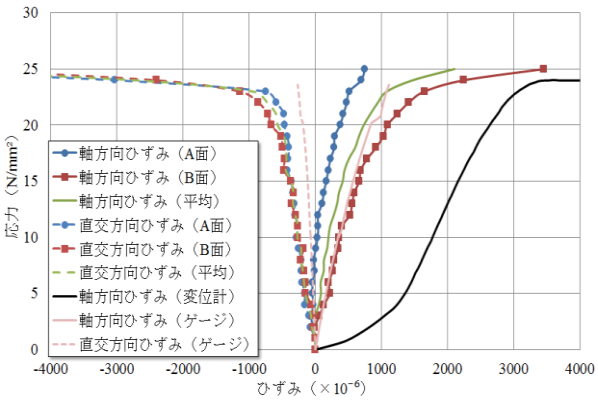
4.2 画像解析による縦横ひずみ比の測定精度検証

画像解析によるひずみの計測精度を検証するため，まず，健全コンクリート供試体を対象として，圧縮載荷実験中に撮影した写真を用いて画像解析を行い，軸方向ひずみと直交方向ひずみの比，縦横ひずみ比を計測していく。前述のように，ここで用いる縦横ひずみ比とは，ポアソン比と同様に，一軸圧縮応力下における軸方向ひずみと直交方向ひずみの比の絶対値として算出しているが，本研究では最大荷重の約 10%から最大荷重に至るコンクリートの非線形領域におけるひずみ計測を行っており，弾性定数と同様の用語を用いると適切ではないことから，ここではポアソン比の代わりに縦横ひずみ比と称することとした。

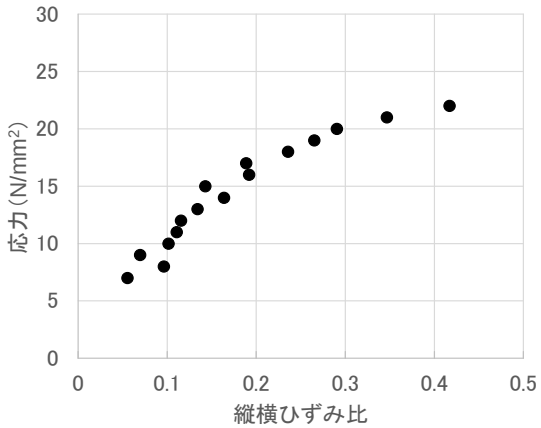


図－9　解析範囲（赤枠内が対象）

画像解析の対象範囲を**図－9** に示す。画像解析の対象は，前出の**図－2** に示したように，供試体側面 4 面のうちひずみゲージを貼った 2 面と直交する 2 面（A 面・B 面）で行った。画像解像度は 8600dpi×5800dpi と 4800dpi×3200dpi であり，そのほぼ中央部分のそれぞれ 2000dpi



図－10　画像解析による応力－ひずみ関係（健全）



図－11　画像解析による縦横ひずみ比の推移（健全）

×2000dpi，1400 dpi×1400 dpi を解析範囲に設定した。

変位計を用いた軸方向のひずみについては，供試体の側面 4 頂点のうち 2 頂点に変位計を設定し，軸圧縮ひずみを測定し，ひずみ値の平均値を結果として示す。

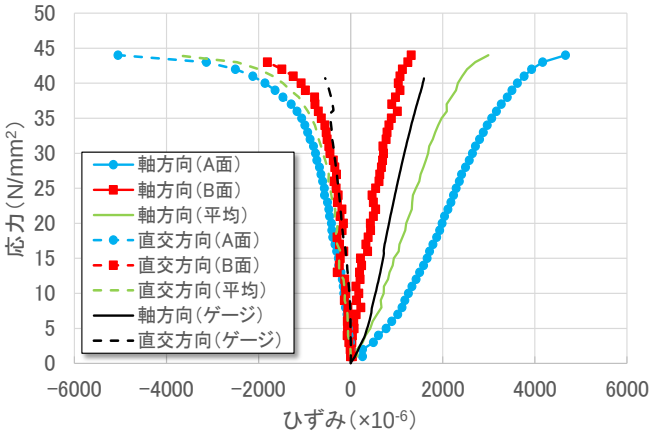
健全コンクリート供試体を対象として変位計から求めた軸方向ひずみ，ならびに画像解析から求めた軸方向ひずみと直交方向ひずみを計測した。その応力－ひずみ関係を**図－10** に，画像解析から求めたひずみを用いた縦横ひずみ比を**図－11** にそれぞれ示す。一般的に，硬化コンクリートのポアソン比は 0.15～0.20 の範囲であるといわれている。今回の計測では，弾性域では縦横ひずみ比（ポアソン比）は 0.1～0.2 の値を示していることがわかる。一方，最大応力の 76%程度の約 20 N/mm^2 以降，ひずみゲージによって測定した軸方向の応力－ひずみ関係は非線形挙動を示し，縦横ひずみ比の値が著しく大きくなっていることがわかる。これは，圧縮載荷時に載荷方向にひび割れが生じ，供試体の水平方向の変形が大きくなり，直交方向のひずみが大きくなったものと推察する。

以上の結果より，画像解析における縦横ひずみ比の計測は，弾性域ならびに軸方向にひび割れが生じる最大応力度の 76%程度までの弾性挙動を妥当な精度で測定できており，さらに非線形領域に至るまでのコンクリートの圧縮挙動を平面的に測定できていることがわかる。

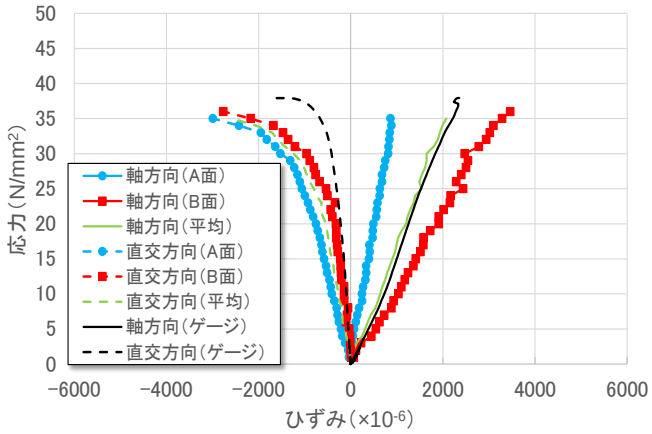
4.3 ASR コンクリート供試体を対象とした画像解析によるひずみ計測

ASR コンクリート供試体 2 体を対象として，ひずみゲージならびに画像解析によって載荷軸ならびに直交方向のひずみ計測を行った。画像解析の対象は，ひずみゲージを貼りつけた面に直交する 2 面とした。撮影画像のサイズは 8100dpi×4000dp（以下，A 面と称す）と 4500dpi×2100dpi（以下，B 面と称す）であり，そのほぼ中央部分のそれぞれ 2000dpi×2000dpi，1400 dpi×1400 dpi を解析範囲に設定した。

画像解析によって求めたひずみによる応力－ひずみ関係を**図－12**，**図－13** に示す。A 面，B 面の画像解析結果をそれぞれ示すとともに，両面の軸方向ひずみの平均値もあわせて示す。

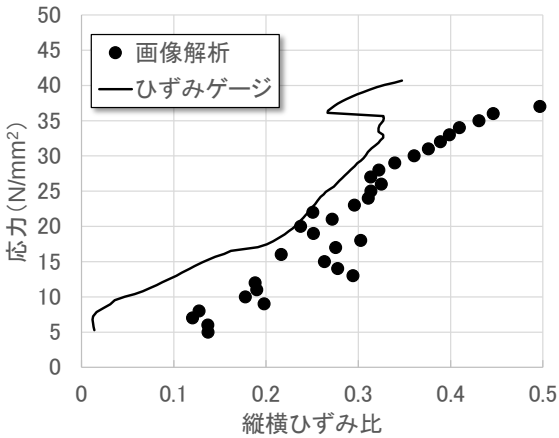


図－12　画像解析による応力－ひずみ関係（ASR-1）

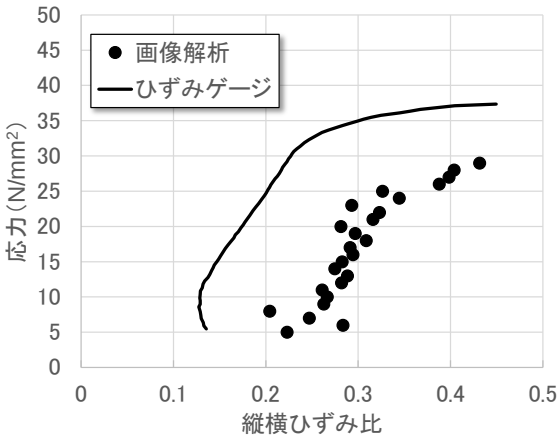


図－13　画像解析による応力－ひずみ関係（ASR－2）

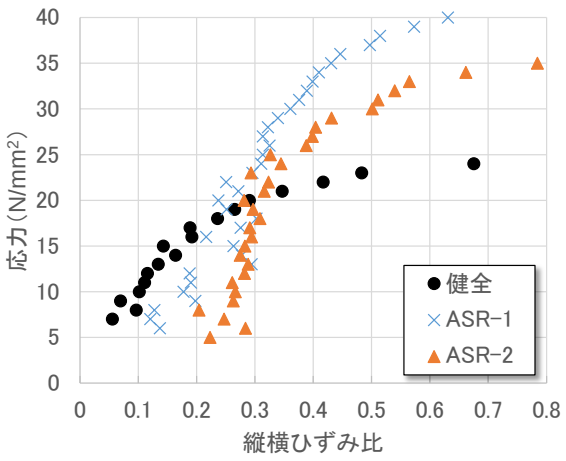
画像解析による結果を見ると，直交方向のひずみ計測の結果は A 面と B 面の差は大きくないが，軸方向ひずみは大きな差が生じていることがわかる。ここで，A 面と B 面の測定結果を見ると，ASR-1 供試体では A 面が，一方 ASR-2 供試体では B 面のほうが大きな値を示しており，画像サイズ，解像度の影響は見られない。また，ひずみゲージの値と比較してみても測定している面の違いはあるものの，平均値は同等程度の値を示している。



図－14　画像解析による縦横ひずみ比の推移（ASR－1）



図－15　画像解析による縦横ひずみ比の推移（ASR－2）



図－16　縦横ひずみ比に関する各ケースの比較

本実験では一軸圧縮応力をコンクリート角柱供試体に作用させているものの，平均的に力を作用させることができず，両側面で異なる変形をすることでひずみの差が測定されたものと考える。ただし，それぞれの測定面の平均値を採用することによって，画像解析によって一軸圧縮ひずみを計測できることがわかる。以降の議論では，画像解析によって求めた各方向のひずみの平均値も用いることにする。また，ゲージで求めた値は ASR ひび割れの影響を大きく受けるため，画像解析の値よりも大きくなっていることがわかる。

4.4 ASR コンクリート供試体を対象とした縦横ひずみ比の計測

前に示した**図－7**，**図－8** をみると，ひずみゲージを用いたひずみ計測では，ひび割れの発生によって載荷軸直交方向の変形が大きくなり，載荷に伴って直交方向ひずみの値が大きくなっていたことがわかる。ここでは，ひずみゲージで計測した縦横ひずみ比と，画像解析で求めた値の比較を行う。応力－縦横ひずみ比の関係を**図－14**，**図－15** にそれぞれ示す。

ひずみゲージで計測した縦横ひずみ比をみると，弾性域である最大応力度の約 1/3 時に 0.2 程度の値を示しており，最大応力度に近い最大応力の 90%時は弾性域ではないため 0.2 以上の値を示していることがわかる。一方 ASR-2 供試体の応力度が小さい時点での縦横ひずみ比が小さくなっていることがわかる。

最後に，画像解析によって求めた縦横ひずみ比の値を用いて，健全コンクリート供試体と ASR コンクリート供試体の比較するために，それぞれの結果を**図－16** にまとめる。各供試体で弾性挙動を示す，約 15N/mm^2 までの応力範囲における縦横ひずみ比を比較していくと，健全コンクリート供試体の値が最も小さい値を示している。これは，ASR コンクリート供試体では，今回対象とした供試体では膨張量が 500μ程度であったが，既に表面から観察できるひび割れが生じており，さらにはコンクリート内部においてもひび割れが生じていることが考えられるため，そのような 3 次元的なひび割れの影響によって直交方向のひずみの値が増大しやすいことが要因であると推察する。ただし，本研究で示したデジタル画像を積層化によるコンクリートの内部におけるひび割れの 3 次元的に可視化の結果とあわせて，応力－ひずみ関係において弾性挙動を示す領域の挙動解明を行う必要があり，今後の課題として指摘する。

5. 結論

本研究では，ASR によってひび割れが生じたコンクリートの圧縮応力下における力学特性を評価することを目的とした。圧縮載荷試験では，ひずみゲージならびに画像解析によって載荷軸ならびに直交方向のひずみ計測を行い，ASR ひび割れがコンクリートの圧縮応力下でのポアソン比（本研究では縦横ひずみ比）に与える影響を実験的に検討した。本研究で得た結果を以下に述べる。

1) 供試体各面を撮影し，画像解析を用いてひずみの計測を行いひずみゲージが示す値と同程度のひずみの値を最大応力度の 76%程度まで妥当な精度で計測できることがわかった。
2) 圧縮載荷試験において，アルカリシリカ反応が生じたコンクリートのポアソン比に相当する縦横ひずみ比を計測し，その値の圧縮応力下での変化，特に載荷直交方向のひずみの推移を把握することができた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25709040 の助成を受けました。ご援助頂きましたことに感謝致します。

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，2005.8.
2) 三木朋広，宮川侑大：アルカリシリカ反応によりひび割れが生じたコンクリートの圧縮破壊挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.73-78，2013.10
3) 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，Vol.14，pp.45-52，2014.1
4) 星野翔太郎，三木朋広：ASR が生じたコンクリートの内部ひび割れが圧縮破壊挙動に与える影響に関する基礎的研究，コンクリート構造物の修繕，補強，アップグレード論文報告集，Vol.15，pp517