

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の引張軟化挙動に関する研究

松谷 幸一郎*1・宮川 侑大*1・三木 朋広*2

要旨: 本論文では、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の引張軟化曲線と破壊エネルギーを求め、ASR に起因したひび割れの状態と引張破壊挙動の関係を明らかにすることを目的とした。供試体表面に生じた ASR ひび割れの幅、長さ、面積を測定し、ひび割れが生じた状態のコンクリートの破壊エネルギーを実験的に評価した。また、破断面における骨材の分布と引張破壊挙動との関係を調べた。さらに、载荷中の供試体の表面ひずみ分布を画像解析によって求め、その結果に基づき ASR ひび割れが外荷重下で発生、進展するひび割れと ASR ひび割れの関連について考察した。

キーワード: ASR, 引張軟化曲線, 破壊エネルギー, 主ひずみ分布

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (Alkali Silica Reaction, 以下 ASR) は、骨材中の反応性シリカとセメント中の水酸化ナトリウムなどのアルカリ成分が反応し、骨材周辺にゲルが生じる現象である。このゲルによってコンクリートが体積膨張し、コンクリートにひび割れが生じる場合がある。ASR の膨張が生じたコンクリート (ASR コンクリート) は健全なコンクリートと比較して、力学特性が変化することが知られている。その中でも静弾性係数の低下が顕著であり、ASR の膨張初期の段階で急激に低下する。一方、圧縮強度は ASR の膨張がいくらか進行しても大きく低下しないが、膨張量の増加とともに緩やかな低下傾向を示し、膨張量 5000 μ 程度で約 60%程度まで圧縮強度が低下するといった報告もある¹⁾。しかし、ASR 膨張がコンクリートの破壊現象に与える影響については不明な点が多いことが現状である。また、ASR 膨張によってコンクリートに発生するひび割れ (ASR ひび割れ) の位置やひび割れ幅に規則性がないこと、内部の ASR ひび割れが観測できないことが、ASR コンクリートの破壊現象を研究する際の問題点である。ASR ひび割れが荷重により生じるひび割れに影響するため、その基礎的データが必要である。先の著者らの研究²⁾では、画像解析により、コ

ンクリート表面のひび割れと破壊挙動との関連を示した。本研究では、ASR ひび割れが生じたコンクリートの引張軟化挙動を実験的に評価することを試みる。実験では、画像解析によってひずみ分布を算出し、ASR ひび割れと破壊挙動との関係について明らかにするとともに、ASR コンクリートの引張軟化特性を検討した。なお、引張軟化曲線を求める手法は、橋高ら³⁾の多直線近似法、ならびに二羽ら⁴⁾が提案した拡張 J 積分法を用いて求めた。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究で使用したコンクリート供試体は、断面が 100mm×100mm、長さが 840 mm、切欠き深さ 50 mm のはりである。供試体は 8 体準備した。この供試体を対象に、スパン長を 800 mm として 3 点曲げ载荷試験を行った。測定項目は荷重、中央たわみ、ひび割れ開口変位、および画像解析用デジタル画像とした。

各供試体は同じコンクリート配合で作製した。ただし、供試体の形状は同一であるが、図-1 に示すように ASR に起因するひび割れの状況が異なる結果となった。このコンクリートの示方配合を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、混和剤には AE 減水剤を

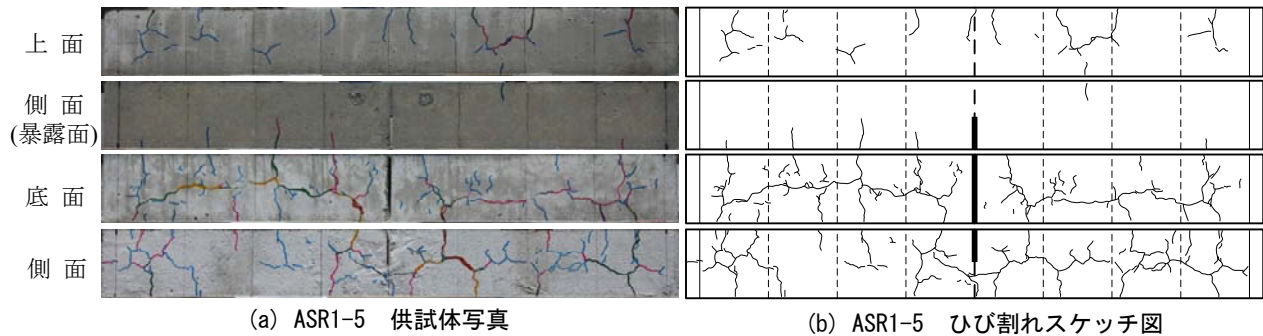


図-1 ひび割れ図

*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)

使用した。配合では、反応性骨材と非反応性骨材を、細骨材、粗骨材ともに体積比で1対1の割合で混合している。粗骨材最大寸法は20 mmとした。円柱供試体を用いて測定したコンクリートの圧縮強度は31.6 N/mm²であり、引張強度は2.90 N/mm²であった。ASR1-1～ASR1-6は3年間、ASR2-7とASR2-8は1年間、それぞれ屋外で暴露した。暴露中、図-1に示す暴露面を上面とした。

2.2 曲げ載荷試験の概要

本実験で用いた切欠きは供試体の載荷状況を図-2に示す。試験には精密万能試験機を用いた。切欠きは供試体の支点位置には、水平方向の拘束を出来る限り除去するため、テフロンシート間にグリースを塗布して鋼板間に挟んだ減摩パットを配置した。引張軟化曲線を求める際、弾性エネルギーの解放分を明らかにするために、荷重-変位関係における軟化領域において、荷重が一定の水準まで低下した後に除荷する、繰返し載荷を行った。繰返し載荷は、ピーク後、最大荷重の1/3以下になるまで続けた。変位の測定では、左右の支点上の変位を平均して得た支点変位と、変位計で測定したスパン中央変位との差分により中央変位を求めた。リガメントでの水平方向開口変位はπ型変位計を用いて測定し、また切欠き先端における開口変位も同時に測定した。

2.3 画像解析

本研究では、デジタル画像相関法を用いて、コンクリート表面のひずみ分布を計測した。この手法では、載荷試験前と載荷試験中における供試体表面の解析対象面をデジタルカメラで撮影し、画像相関法によって各要素の座標を求める。このように求めた載荷試験前の座標と、ひずみ分布を求める載荷荷重時の座標をそれぞれ節点と仮定し、それらの点の載荷前後の変位量を求める。さらに、これらの点を節点とした有限要素とみなして、要素内のひずみ分布を算出する。ここで、デジタルカメラで

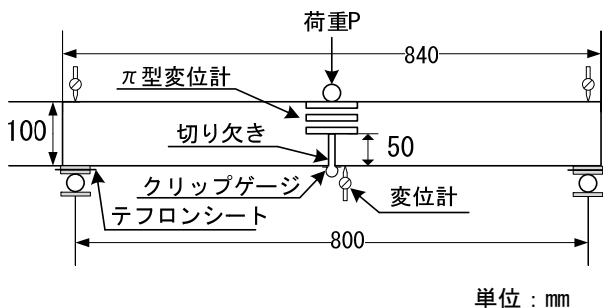


図-2 供試体載荷状況

撮影した画像には、カメラのレンズで3次元的な情報を2次元の画像に投影しており、また、カメラのレンズは湾曲しているため、撮影画像にはある程度の歪みが生じている。そのため、画像解析を行う際はこれらに起因する歪みを除去する必要がある、画像解析に用いるための処理にはレンズ歪みについてのキャリブレーションを要する⁵⁾。なお、本研究では、ひび割れ進展挙動を評価するために、各荷重レベルの最大主ひずみの変化について見ていく。

3. 引張軟化曲線の算出方法

3.1 多直線近似法³⁾

多直線近似法は、試験で得られた荷重変位曲線を用いて、逆解析により引張軟化曲線を推定する手法である。仮想ひび割れモデルを用いたひび割れ進展解析を行う際に、構成則として用いる引張軟化曲線の先端部分の勾配を変化させ、荷重変位関係の結果と解析結果が合致するような、最適な引張軟化曲線の勾配を決定する。これを繰り返し行い、引張軟化曲線の全体形状を決定していく。引張軟化曲線を推定するには、静弾性係数と軟化開始応力を求める必要がある。静弾性係数は、線形弾性体を仮定して数値解析を行い、その結果を試験で得られた荷重変位曲線の最大荷重の1/3の荷重点における割線剛性と一致するように推定する。一方、逆解析による引張軟化曲線の推定法では、軟化開始応力は唯一に求めることができない。そのため、軟化応力を変化させた完全塑性型の引張軟化曲線を用いてひび割れ進展解析を行い、ひび割れ初期からの荷重変位関係の解析値と実験値が、ある許容誤差範囲内で合致した場合、その軟化応力を軟化開始応力とする。この手法は非常に汎用性の高い手法である一方で、コンクリートのひび割れ進展に関して、実際に起きる現象を無視して適用できてしまう。そのため、実現象の影響は別の方法で検討する必要がある。

3.2 拡張J積分法⁴⁾

二羽らが提案した拡張J積分法はエネルギーバランスに基づく引張軟化曲線の決定手法の一つであり、内田らの修正J積分法⁶⁾の問題点を改善した手法である。修正J積分法の問題点として以下の2点が指摘されている。

- (a) 外部仕事として与えられたエネルギーが全て仮想ひび割れ部で消費されること

表-1 コンクリートの示方配合

G _{max} (mm)	sl (cm)	W/C	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	C	S _n	S _r	G _n	G _r	NaCl	AE 減水剤
20	18	0.63	5	48	181	287	422	432	466	475	12.4	575

S_n: 非反応性細骨材, S_r: 反応性細骨材, G_n: 非反応性粗骨材, G_r: 反応性粗骨材

(b) 仮想ひび割れ幅が載荷後すぐにリガメント部全域に進展すること

ここで、(a)に関する問題点において、外部仕事として与えられるエネルギーのうち、仮想ひび割れ部意外に蓄えられるエネルギーを無視している。そこで、仮想ひび割れ部で消費されるエネルギーを適切に評価するために、除荷時に解放される弾性エネルギーを考慮する必要がある。弾性エネルギーの解放分を考慮した場合、仮想ひび割れ部で消費されるエネルギー $E(w)$ は式(1)のように評価できる。第二項が弾性エネルギー解放分である。

$$E(w) = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta - \frac{1}{2} P(\delta) (\delta - \delta_p) \quad (1)$$

ここで、 w ：開口変位、 $E(w)$ ：開口変位 w での消費エネルギー、 δ ：変位、 $P(\delta)$ ：変位 δ での荷重、 δ_p ：完全除荷時の塑性変位

次に、(b)の問題点において、仮想ひび割れが実際には変形の増加と共に徐々に進展していくはずであることを無視している。仮想ひび割れが徐々に進展していくことを考慮した場合、引張軟化応力 $\sigma(w)$ は式(2)のように評価できる。

$$\sigma(w) = \frac{1}{ab} \left\{ 2 \cdot \frac{dE(w)}{dw} + w \cdot \frac{d^2E(w)}{dw^2} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma(w)$ ：開口変位 w における引張軟化応力、 a ：仮想ひび割れ長さ、 b ：供試体幅

4. 載荷試験の結果と考察

4.1 荷重－変位曲線

3点曲げ載荷試験の結果を図-3に示す。ここで、載荷試験において、荷重が小さい領域において安定して測定できなかったため、変位が最大となるときの荷重が0となっていない。ここでは、図-3に示す最終計測点を最大変位とした。この図より、荷重がピークとなるときの変位が、健全供試体よりもASR供試体の方が大きくなっていることがわかる。ASR2-2は暴露期間が短く、表面のASRひび割れを目視で確認できなかったが、健全供試体よりも静弾性係数が低下しているため、ASR膨張を受けているものと考えられる。

一方、ピーク直後の挙動は、健全供試体に比べてASR供試体の方が緩やかに下降していることがわかる。

4.2 破壊エネルギー

それぞれの供試体において測定された破壊エネルギーを表-2に示す。ここで、破壊エネルギー G_F は式(3)のように求めた。

$$G_F = (W_0 + mg\delta_0) / A_{lig} \quad (3)$$

ここで、 W_0 ：荷重変位曲線下の面積(N・mm)、 mg ：供試体重量(N)、 δ_{max} ：最大変位(mm)、 A_{lig} ：リガメントの断

面積(mm²)

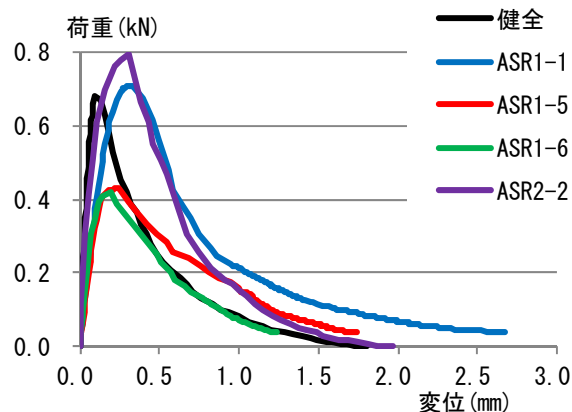
表-2を見ると、ASR1-6以外のASR供試体で測定した破壊エネルギーは、健全供試体のその値よりも大きいことがわかる。これは、ASR供試体の方がピーク荷重時の変位が大きく、ポストピーク挙動もゆるやかであり、その結果、荷重－変位曲線下の面積が大きくなったためである。

4.3 多直線近似法による引張軟化曲線

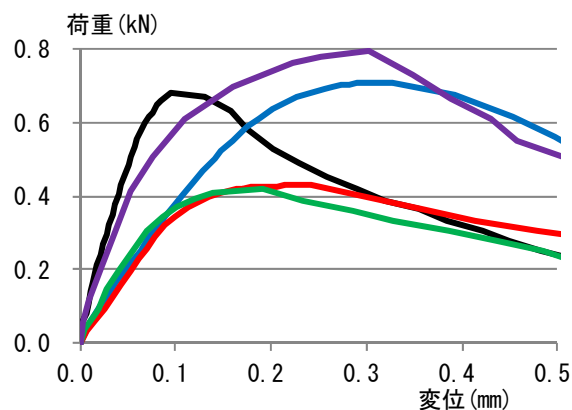
多直線近似法によって求めた引張軟化曲線を図-4に示す。健全供試体とASR供試体を比較すると、最大ひび割れ幅が健全供試体は0.3mm程度であるのに対して、ASR供試体はどれも0.3mm以上であり、なかでも

表-2 破壊エネルギー G_F

供試体名	G_F (N/mm)
健全	0.131
ASR1-1	0.209
ASR1-2	0.152
ASR1-3	0.156
ASR1-4	0.172
ASR1-5	0.139
ASR1-6	0.093
ASR2-1	0.217
ASR2-2	0.174



(a) 全体図



(b) 拡大図 (変位 0.5mm まで)

図-3 荷重－変位曲線

ASR1-5は0.8 mmを越えている。これは、荷重によって生じるひび割れの進展が、ASR ひび割れによって妨げられるために、ASR 供試体の最大ひび割れの値が大きくなったと考える。

ASR2-1とASR2-2はASR1-1～ASR1-6に比べて暴露期間が短く、劣化具合も低かったため、ASR1-1～ASR1-6よりも小さな最大ひび割れ幅となった。軟化開始応力は、健全供試体が3.4 N/mm²で最も大きく、ASR 供試体は2.2～3.3 N/mm²の間の値をとり、ばらつきが大きい結果となった。

4.4 拡張J積分法による引張軟化曲線

一例として、ASR1-1、ASR1-5、ASR1-6の拡張J積分法による引張軟化曲線の結果を図-5に示す。ASR1-5とASR1-6は荷重-変位曲線(図-3)において最大荷重が近く、多直線近似法による引張軟化曲線(図-4)においても他のASR 供試体と比較して、似た挙動を示している。しかし、拡張J積分法により求めた引張軟化曲線では軟化応力の最大値が明らかに異なっている。また、荷重変位曲線のピーク以降と同様に、開口変位はASR1-1が最大で、ASR1-5が最小となっている。

4.5 ひび割れの長さとの面積の比較

供試体に生じていたASR ひび割れと、試験結果に与える影響について考察する。まず、クラックスケールを用いて供試体表面に発生したASR ひび割れを計測し、それぞれを0.05mm、0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、および0.4 mmの幅ごとに分類した。各供試体におけるASR ひび割れの全長、面積を図-6に示す。なお、ASR2-1、ASR2-2については、供試体表面にASR ひび割れを目視で確認できなかった。

ASR1-6に関してみると、ASR ひび割れの全長は短いものの、ひび割れ面積は最大となっていることがわかる。これは、幅が0.02 mm以上のASR ひび割れの割合が他の供試体よりも大きいためである。

ここで、ひび割れ面積をひび割れ全長で除した値を平

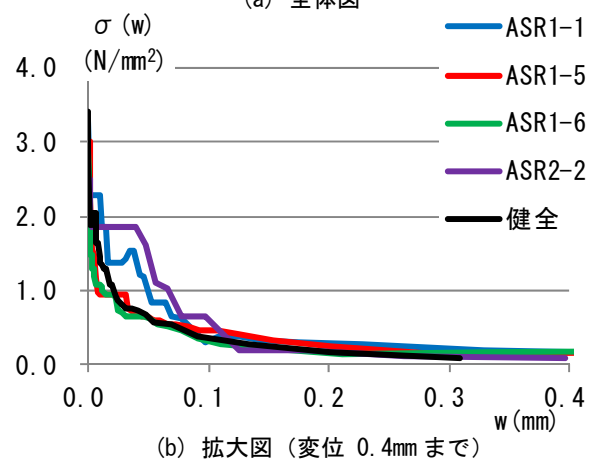
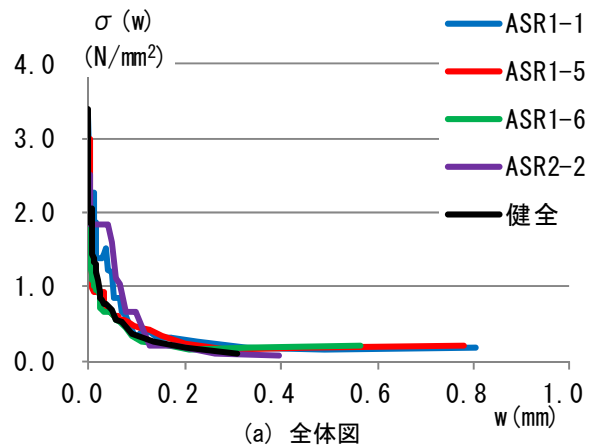


図-4 多直線近似法による引張軟化曲線

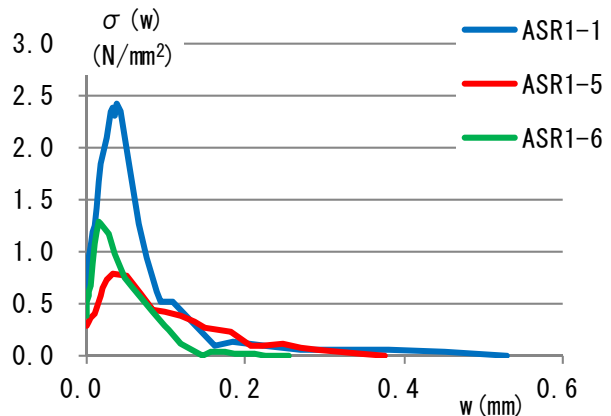


図-5 拡張J積分法による引張軟化曲線

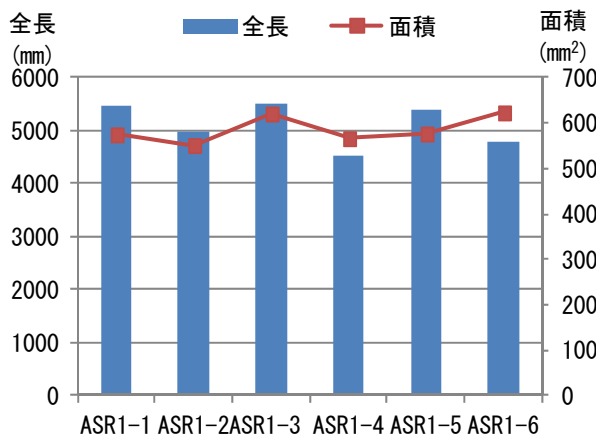


図-6 ひび割れ状況

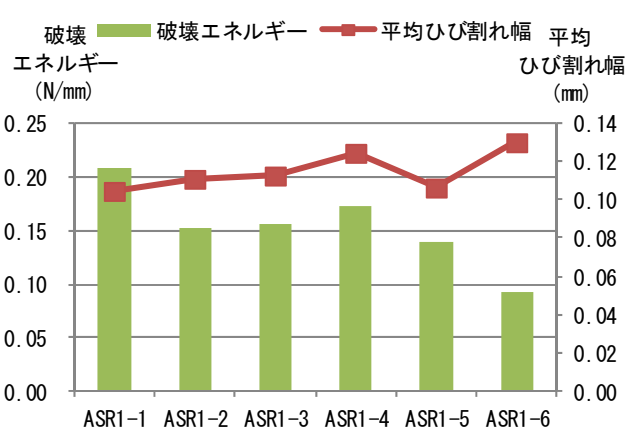


図-7 破壊エネルギーと平均ひび割れ幅

均ひび割れ幅 (mm) として算出した。各供試体の平均ひび割れ幅と破壊エネルギーの関係を図-7 に示す。破壊エネルギーが最大の ASR1-1 では平均ひび割れ幅が最小になり、破壊エネルギーが最小である ASR1-6 は平均ひび割れ幅が最大となった。つまり、平均ひび割れ幅が大きくなると、破壊エネルギーが小さくなる傾向がある。ただし、ASR1-2~ASR1-5 においてばらつきがあり、この点に関しては更なる検討が必要と考える。

5. ASR によるひび割れが曲げひび割れの進展に与える影響

5.1 リガメント部における粗骨材破断の影響

3 点曲げ試験を実施後、各供試体の破断面における粗骨材の状態を観察した。断面 50 mm×100 mm のリガメント部の面積に対する、破断した粗骨材 (破断骨材) の割合について、測定結果を整理した。結果の一例として、供試体 3 体の破断面の様子を図-8 に示す。また、それぞれの測定結果を表-3 にまとめる。なお、図-8 の写真中の赤線で囲まれた部分が、破断した骨材と判断したものである。前出の図-3 にみられるように、ASR1-1 は供試体 3 体の中でピーク荷重値が最も大きい、破断骨材は ASR1-6 とほぼ同程度の割合であることがわかる。いじょうより、軟化応力の最大値は、最大曲げ荷重の大きさに従って ASR1-1 が顕著に大きいものの、リガメント部における粗骨材の破断割合が最大荷重に与える影響は小さいことがわかる。

一方、図-5 の引張軟化曲線を見ると、軟化応力が最大値に至ったのち、ASR1-5 は ASR1-1 ならびに ASR1-6 供試体と比較して比較的ゆるやかに応力が低下していることがわかる。ここで、リガメント部における骨材の有無、および骨材寸法は、荷重によって生じるひび割れの進展に影響を与える⁷⁾。また拡張 J 積分法は、3 点曲げ荷重試験から実際に得られた荷重、変位、開口変位、ならびに除荷時の塑性変位を用いて引張軟化曲線を算出している。そのため、多直近似法により求めた場合より、破

壊時の実現象、特にひび割れ幅や進展高さなど、荷重に伴う曲げひび割れの進展挙動を反映させることができる。そのため、特にリガメント部における破断骨材の割合が大きい ASR1-5 では、ひび割れ面の形状が相対的に平滑となり、拡張 J 積分法によって求めた引張軟化曲線の形状においてその影響が表現されていると考える。

5.2 最大主ひずみ分布

図-9 に ASR1-5 の最大主ひずみ分布に関する画像解析の結果を示す。図中のリガメント部分の写真は荷重前のものであり、幅 100 mm、高さ 50 mm の領域全てを解析対象とした。各画像解析の結果は、その画像を撮影した際のひび割れ幅とともに示している。このひび割れ幅は、前出の引張軟化曲線の開口変位 w と対応している。著者らの研究²⁾では、リガメント部の切欠き先端近傍に存在する ASR ひび割れに沿って、荷重によって発生するひび割れが進展していくことを確認した。また、荷重の増大に伴って、水平方向に存在する ASR ひび割れが開口していく挙動が見られた²⁾。しかし、今回対象とした供試体では、切欠き近傍に水平方向の ASR ひび割れが存在しているものの、この ASR ひび割れに沿って荷重によるひび割れが進展していく様子は見られなかった。解析対象面の裏側には ASR ひび割れが存在しておらず、解析対象面に確認できる ASR ひび割れが、リガメント部の断面内を貫通しているわけではない。そのため、より詳細な検討として、供試体表面の情報だけでなく、供試体内部の ASR ひび割れ状況など、3 次元的なひび割れ分布に関する情報を考慮していくことが今後の課題として残る。

表-3 破断骨材の面積と割合

供試体名	破断骨材面積 (mm ²)	面積割合* (%)
ASR1-1	91.9	1.8
ASR1-5	441.3	8.8
ASR1-6	54.1	1.1

*面積割合は、破断骨材面積をリガメント断面積 (5000mm²) で除した値として算出した

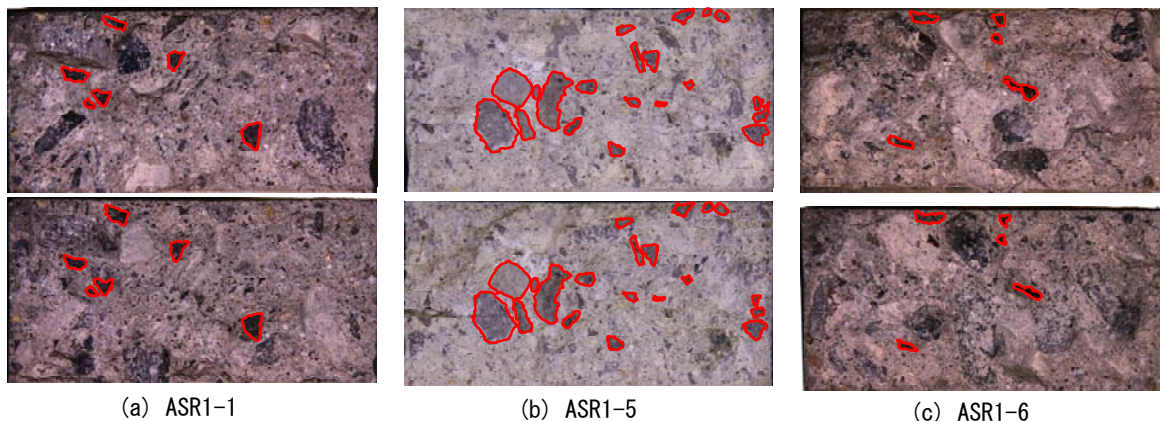


図-8 破断面の様子 (各供試体下の写真は左右反転させて示している)

6. まとめ

本研究では、ASRに起因するひび割れがコンクリートの引張軟化挙動に与える影響を破壊現象面から評価するために、ASRひび割れが生じたコンクリートを対象として破壊エネルギーと引張軟化曲線を求めた。本研究より得られた結果を以下に示す。

- (1) 荷重-変位曲線において、ASRコンクリートは健全コンクリートと比較して最大荷重時の変位が大きく、また、ピーク直後はゆるやかに下降する。そのため、荷重変位曲線下の面積が大きくなり、破壊エネルギーの値が大きくなる傾向がある。
- (2) 拡張J積分法によって求めた引張軟化曲線は、ひび割れ進展時の破壊現象による影響を考慮しているため、破断面の骨材の存在によって、得られる引張軟化曲線が異なることがわかった。
- (3) 供試体表面で確認できたASRひび割れについて、ひび割れ面積をひび割れの長さで除した、平均ひび割れ幅が破壊エネルギーに与える影響が大きい。平均ひび割れ幅が大きくなると、破壊エネルギーが小さくなる傾向がある。しかし、これは破壊エネルギーを供試体の表面のみの情報で評価したものであり、ばらつきも多いため、さらなる検討が必要である。

なお、本研究では限られた実験結果を用いて考察している。ASRひび割れが生じたコンクリートでは、ひび割れの分布やひび割れ幅など、同一の配合や暴露環境でも一般にばらつきを示すため、より統一的な結論を導くために、今後もさらなるデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 三木朋広, 松谷幸一郎: ASRに起因したひび割れが生じたコンクリートの引張軟化挙動に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, Vol.11, pp.479-484, 2011
- 3) 橋高義典, 上村克郎, 中村成春: コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, pp.15-25, 1993.11

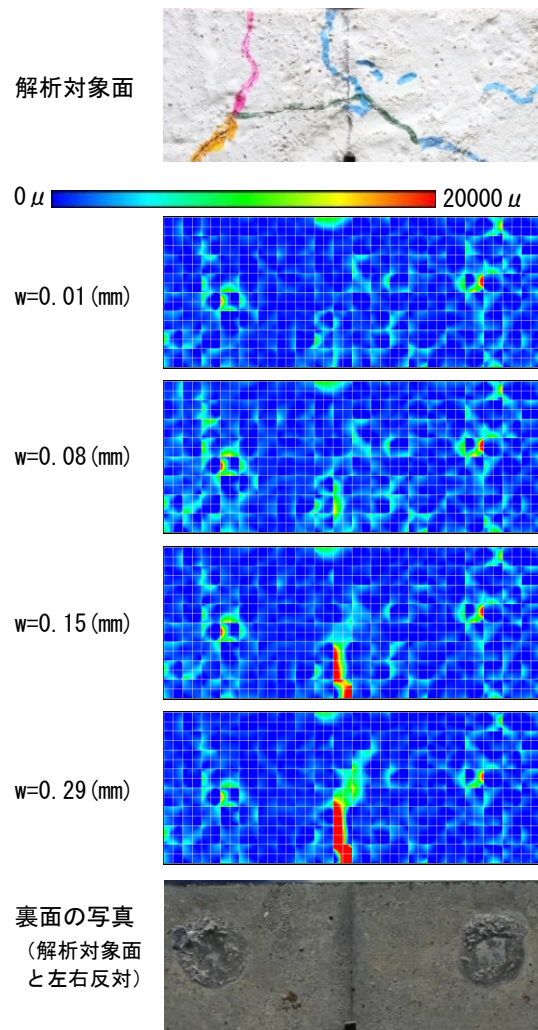


図-9 最大主ひずみ分布 (ASR1-5)

- 4) 二羽淳一郎, Sumranwanich, T., 松尾豊史: コンクリートの引張軟化曲線決定に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.666/V-41, pp.75-88, 1998.11
- 5) 三木朋広, 林 大輔: 画像相関法による局所的圧縮力を受けるコンクリートの非接触ひずみ計測, 建設工学研究所論文報告集, 52号, pp.53-60, 2010.11
- 6) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.203-212, 1991.2
- 7) 大塚浩司, 勝部宏明: コンクリートの破壊進行領域の性状に及ぼす骨材寸法の影響, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.109-116, 1993.11