

# 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圧縮破壊挙動に関する研究

三木 朋広\*1・宮川 侑大\*2

**要旨**：本研究では、ASRに起因するひび割れを測定し、その結果に基づいてASRが生じたコンクリートの力学的性能を評価することを目的とした。そこで、屋外暴露した角柱供試体を対象として、ひび割れの総延長と面積密度を測定し、ASRひび割れの状態を定量的に整理した。その後同一の供試体を対象として行った圧縮試験では、画像解析を用いて載荷に伴うひび割れの進展を計測した。軸方向のASRひび割れの幅、長さや分布性状によって、載荷に伴うひび割れの開口の様子が異なり、圧縮破壊挙動に影響することを確認した。

**キーワード**：アルカリシリカ反応、ひび割れ、定量評価、圧縮破壊、静弾性係数、画像解析

## 1. はじめに

コンクリートにおいてアルカリシリカ反応(ASR)が生じた場合、セメントに起因したアルカリ、もしくは外部から進入したアルカリと、骨材中の準安定なシリカの化学反応によって、骨材周辺や骨材中にゲルが生成される。このゲルが吸水膨張することにより、コンクリートにとって有害な膨張やひび割れが発生することがある。このようにASRによって劣化したコンクリートを対象として、その材料的な特性の評価に向けた研究<sup>1)</sup>が精力的になされており、知見が蓄積されてきている一方、ASRにより劣化した構造部材の力学挙動については未解明な部分も多いため、ASR劣化した構造物の耐荷性能の評価、それを踏まえた補修・補強手法の確立は急務である。

ここで、ASRが生じて性能が低下したと考えられる構造物の補修・補強を適切に行うためには、まず構造部材の力学的性能を定量的に評価することが必要となる。ただし、コンクリート内の骨材位置の不均一性や反応の不均一性などによって、ASRに起因するひび割れ(以下、ASRひび割れと称する)が発生した位置や生じているひび割れ幅に規則性が無いため、それらの定量化には課題が残る。また、例えば圧縮強度や静弾性係数などの指標において、劣化状態が適切に反映されておらず、RC部材の耐荷力、変形性能を妥当な精度で評価する手法が未だ確立されていないのが現状である。この問題に対して著者らは、ASRによってひび割れが生じたコンクリートの引張軟化挙動<sup>2), 3)</sup>、ならびに圧縮破壊挙動<sup>4)</sup>に関して

検討するとともに、コンクリート内部に生じたひび割れを実験的に評価<sup>4)</sup>することを試みてきた。

本研究では、既往研究で対象とした供試体について、ASRによって生じたひび割れをより詳細に調べるとともに、その状態と圧縮強度や静弾性係数との関係を実験的に明らかにすることを試みる。そこで、まずひび割れ状態を定量化していく。つまり、供試体に生じているASRひび割れの幅、方向、ならびに分布や密度などを測定する。さらに、これらの指標を基にしたASRひび割れの定量評価を試み、ASRひび割れがコンクリートの圧縮強度や静弾性係数に与える影響について検討する。これらの検討に加えて、圧縮載荷試験を行い、ASRコンクリートの力学的性能を破壊面から評価していく。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

実験では、断面100mm×100mm、高さ約200mmの角柱供試体を用いた。用いた供試体は14体である。これらの供試体はそれぞれ異なった膨張量を有している。実験時の膨張量が約100 $\mu$ 、800 $\mu$ 、1000 $\mu$ 、1200 $\mu$ の供試体を、それぞれASR100、ASR800、ASR1000、ASR1200と称する。なお、ASR1200については、別途行った切り欠きを有するコンクリートはりの曲げ試験<sup>2)</sup>の後、破断した供試体を端部成型したものをを用いているため、供試体高さが若干異なっている。

コンクリート作製に用いた配合を表-1に示す。粗骨材

表-1 コンクリートの配合

G <sub>max</sub> (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
					W	C	S <sub>n</sub>	S <sub>r</sub>	G <sub>n</sub>	G <sub>r</sub>	NaCl	AE減水剤
20	18	63	5.0	48	181	287	422	432	466	475	12.4	0.575

S<sub>n</sub>：非反応性細骨材、S<sub>r</sub>：反応性細骨材、G<sub>n</sub>：非反応性粗骨材、G<sub>r</sub>：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准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻

表-2 各供試体のひび割れの状態, 最大応力度, 静弾性係数

供試体名	端部拘束	ひび割れの長さ(mm)				ひび割れの面積(mm <sup>2</sup> )				最大応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
		軸	水平	斜め	計	軸	水平	斜め	計		
ASR100-1	有	0	0	0	0	0	0	0	0	44.2	21000
ASR100-2	有	0	0	0	0	0	0	0	0	42.7	20100
ASR800-1	有	390	228	205	823	39.2	19.6	13.8	72.7	38.5	12800
ASR800-2	有	327	499	245	1071	29.0	38.0	13.7	80.7	34.4	11700
ASR800-3	有	318	334	201	853	70.9	55.3	23.3	149.5	36.5	11800
ASR1000-1	有	475	169	389	1033	59.3	23.6	68.3	151.3	40.7	10200
ASR1000-2	有	307	289	342	939	78.6	42.6	62.5	183.6	38.8	10400
ASR1200-1	有	305	468	488	1261	51.1	70.2	78.7	200.0	29.4	6240
ASR1200-2	有	410	365	347	1122	21.9	24.7	22.0	68.6	33.0	9980
ASR1200-3	有	553	492	508	1554	54.6	53.2	39.2	147.0	30.2	6800
ASR1200-4	有	553	756	477	1786	109.3	108.0	68.8	286.1	28.0	7170
ASR1200-5	無	695	752	628	2076	27.6	77.8	58.4	163.8	23.0	5880
ASR1200-6	無	546	443	364	1353	63.3	38.1	36.0	137.5	20.7	5070
ASR1200-7	無	641	524	466	1630	84.1	69.9	67.8	221.7	16.0	4930

の最大寸法は 20 mm とした。細骨材, 粗骨材ともに, 反応性を有する骨材を, 反応性を示さない骨材と体積比 1 : 1 で混合して使用した。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し, 混和剤には AE 減水剤を使用した。また, ASR を促進するため, 所定の量の NaCl を練混ぜ時に添加した。表-2 に各供試体のひび割れの状態, 最大応力度および静弾性係数を示す。ただし, ここで行ったひび割れの状態の評価方法については後述する。

## 2.2 圧縮試験

荷重状況を図-1 に示す。圧縮試験では, 2000kN 荷重試験機を用いて, 所定の荷重まで荷重して, 一度 5 kN まで除荷するといった繰り返し荷重を行った。ここでは, 供試体端部の拘束の有無を実験パラメータとした。端部拘束有りの場合, 供試体に鋼製荷重板を介して直接加力した。一方, 端部拘束無しの場合では, 供試体と荷重板の間に, 2 枚のテフロンシート間にグリスを塗布した減摩シートを配置して加力した。

測定項目は, 荷重荷重, 軸方向変位, ならびに供試体

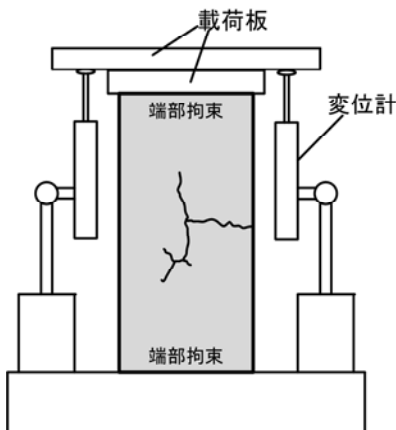


図-1 圧縮試験

表面ひずみとした。供試体表面ひずみについては, 荷重前と荷重中の所定の荷重毎において, コンクリート表面の画像をデジタルカメラで撮影し, 画像解析によって主ひずみ分布を求めた。

なお, 以後の考察で用いる値として, 各供試体において, 最大荷重を供試体断面積で除した値を最大応力度として算出した。また, 応力-ひずみ曲線における最大応力度の 1/3 点を含む直線近似部分の傾き (接線剛性) を静弾性係数として算出した。

## 3. ASR ひび割れの状態の評価方法

### 3.1 各供試体のひび割れの状態

図-2 に ASR によって生じたひび割れの状態の一例を示す。各供試体は同一のコンクリートの配合で作製し, かつ供試体の形状はほぼ同様であるが, ASR ひび割れの状態が若干異なることがわかる。本研究では, まずはこれらのひび割れの状態を定量的に評価し, さらにその状態が圧縮破壊挙動に与える影響について考察していく。

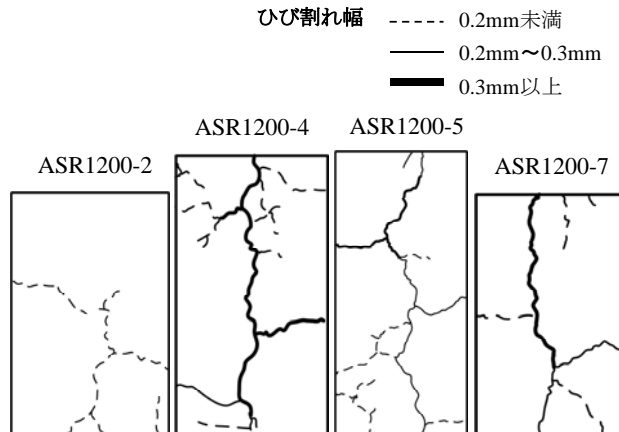
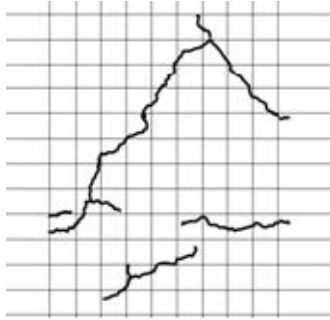
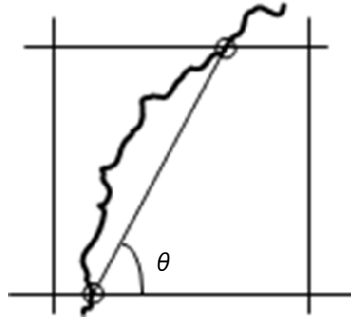


図-2 ひび割れ図 (ASR1200-2, 4, 5, 7)

①ひび割れのスケッチ図を元にひび割れを10mm格子で分割



②ひび割れと格子の交差点間を直線近似し、ひび割れの角度  $\theta$  を算出



③ひび割れを軸方向, 斜め方向, 水平方向に区分

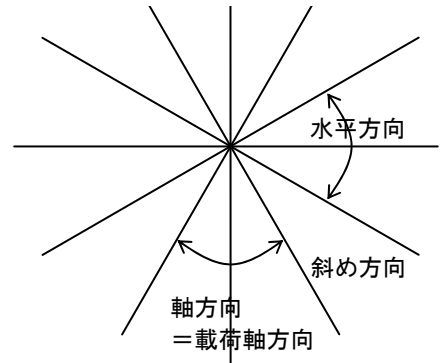


図-3 ひび割れの評価方法

### 3.2 ひび割れの評価方法

図-3にひび割れの分類方法, ならびにひび割れ幅の計測方法の概要について示す。供試体に生じたひび割れについて, まず目視観察図とデジタルスキャン画像を用いてスケッチ図を作成した。このひび割れのスケッチ図に10mm間隔の格子状メッシュを重ねて, それぞれのひび割れを格子との交点毎に分割した。分割したひび割れにおける任意の代表点でのひび割れ幅を平均ひび割れ幅として測定するとともに, 格子との交点間を直線近似して, 載荷方向となす角度を求め, これをひび割れの角度と定義した。その角度を図-3に示すように載荷方向から30度毎に分類して, 軸方向, 斜め方向, 水平方向にそれぞれ区分した。その区分における, ひび割れ長さ, ひび割れ幅の合計, ならびに平均ひび割れ幅に分割したひび割れの長さに乗じたひび割れ面積を算出して, 供試体表面で観察されたひび割れの状態を評価していく。

## 4. 圧縮試験結果と考察

### 4.1 端部拘束がある場合

#### (1) 応力-ひずみ関係

図-4に圧縮試験から得られたASR1200-1~4の応力-ひずみ関係を示す。この図における応力-ひずみ関係には, 繰返し載荷を行った結果の各繰返しサイクルにおける最大値をつないだ包絡線を示している。この図より, 供試体によって最大応力度が異なることがわかる。

#### (2) 最大主ひずみ分布

図-5にASR1200-2とASR1200-4を対象とした画像解析によって得た最大主ひずみ分布図, および載荷前のASRひび割れの状況を示す。最大主ひずみ分布図を見ると, いずれの供試体も鉛直方向に生じたASRひび割れ周辺部に大きな引張ひずみが生じていることがわかる。特に, 荷重が大きくなると, 20000 $\mu$ 以上の大きな引張ひずみが発生している。

一方, ASR1200-2では, ピーク荷重に至るまでその領

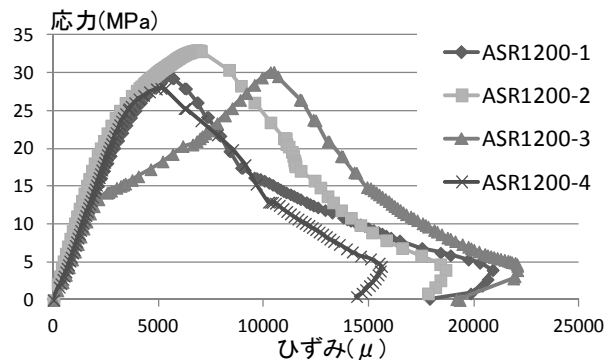


図-4 応力-ひずみ関係(端部拘束有)

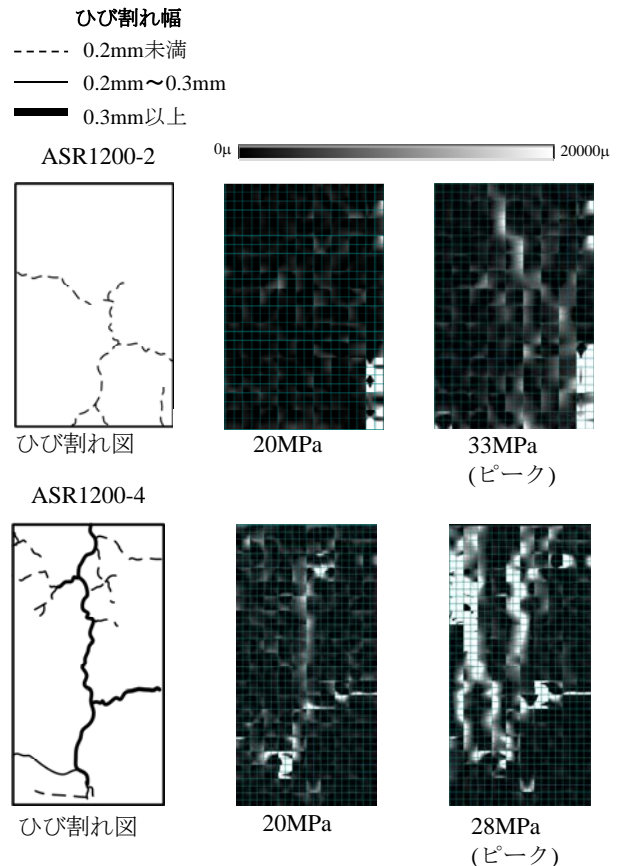


図-5 最大主ひずみ分布(端部拘束有)

域以外には目立った引張ひずみは生じておらず、供試体中心付近に存在する鉛直方向の ASR ひび割れ周辺にも引張ひずみの増大は確認できない。このような挙動を示す要因として、ASR ひび割れの幅が小さいことや、鉛直方向のひび割れが荷重軸方向に連続していないといった、既に生じている ASR ひび割れの長さや形状等の特性が関係していると考えられる。

また、いずれの供試体でもピーク時に鉛直方向の ASR ひび割れが大きく開口していることから、今回対象とした ASR 劣化したコンクリートの圧縮破壊には、荷重軸方向の ASR ひび割れが影響していることがわかる。以上の結果から、2 体の供試体の最大応力度が異なるのは、鉛直方向の ASR ひび割れの幅、長さ、形状の違いによるものと考えられる。

#### 4.2 端部拘束がない場合の圧縮試験の結果

##### (1) 応力-ひずみ関係

ASR1200-5~7 の応力-ひずみ関係を図-6 に示す。この結果、ならびに前出の表-2 より、供試体端部に拘束がある場合と比べて最大応力度、静弾性係数ともに3割程度低下していることがわかる。以下では最大応力度が最も大きかった ASR1200-5 と最も小さかった ASR1200-7 の2 体を比較して考察する。

##### (2) 最大主ひずみ分布

画像解析により得られた ASR1200-5 と ASR1200-7 の最大主ひずみ分布図と、試験前の ASR ひび割れの性状を図-7 に示す。最大主ひずみ分布をみると、両供試体とも 13 MPa 付近で鉛直方向の ASR ひび割れに沿うように大きな引張ひずみが発生している。ただし、2 体の供試体は、13 MPa を超える応力状態で異なった挙動を示した。ASR1200-5 では鉛直方向の ASR ひび割れに沿うように発生した引張ひずみが全体的に大きくなり、ピークに達している。一方 ASR1200-7 では、20000  $\mu$  以上の引張ひ

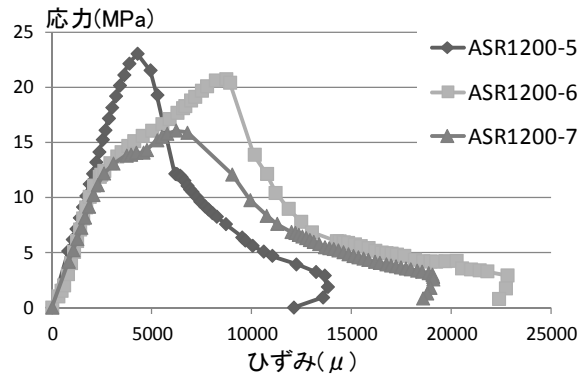


図-6 応力-ひずみ関係(端部拘束無)

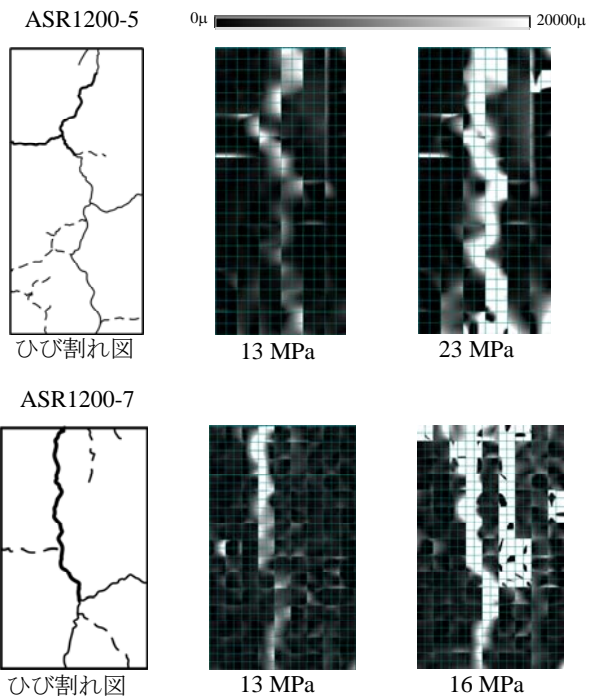
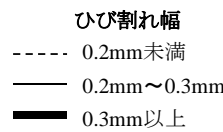


図-7 最大主ひずみ分布(端部拘束無)

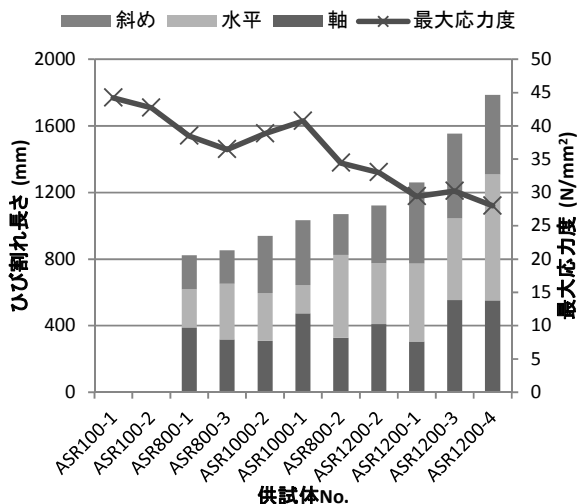


図-8 ひび割れの長さと最大応力度の関係

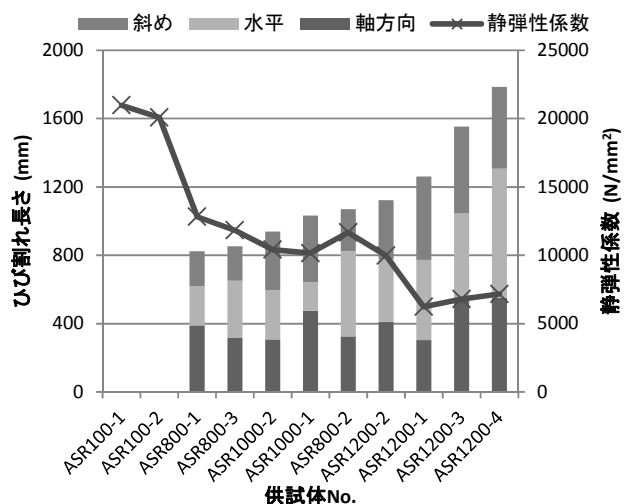


図-9 ひび割れの長さと静弾性係数の関係

表-3 各方向で整理したひび割れの長さ，最大応力度，静弾性係数の相関係数

	軸方向	水平	斜め	水平+斜め	総延長	最大応力度	静弾性係数
軸方向	1.00	0.754	0.865	0.850	0.930	-0.711	-0.882
水平		1.00	0.783	0.956	0.921	-0.939	-0.830
斜め			1.00	0.930	0.941	-0.824	-0.972
水平+斜め				1.00	0.983	-0.940	-0.945
総延長					1.00	-0.895	-0.957
最大応力						1.00	0.857
静弾性係数							1.00

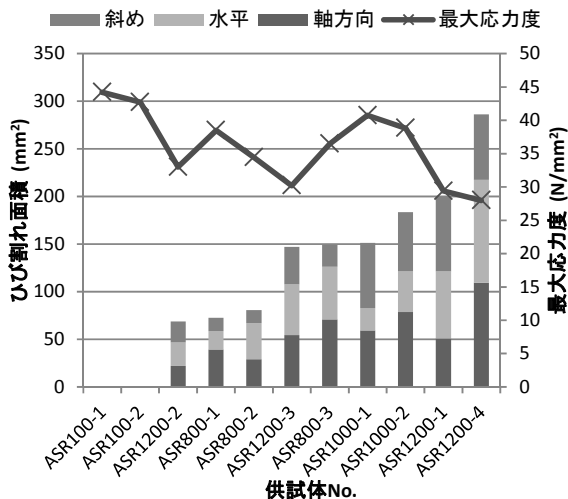


図-10 ひび割れの面積と最大応力度の関係

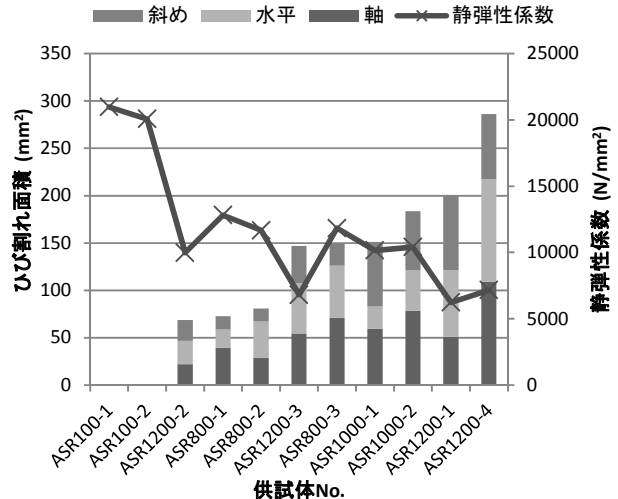


図-11 ひび割れの面積と静弾性係数の関係

表-4 各方向で整理したひび割れの面積，最大応力度，静弾性係数の相関係数

	軸方向	水平	斜め	水平+斜め	総面積	最大応力度	静弾性係数
軸方向	1.00	0.855	0.766	0.881	0.952	-0.561	-0.732
水平		1.00	0.698	0.928	0.927	-0.850	-0.785
斜め			1.00	0.915	0.884	-0.531	-0.781
水平+斜め				1.00	0.983	-0.756	-0.850
総面積					1.00	-0.703	-0.829
最大応力						1.00	0.857
静弾性係数							1.00

ずみが生じた供試体上部から進展し、ピークに達していることがわかる。つまり、ASR1200-5 は全体的に鉛直方向のASR ひび割れが開口する挙動であり、ASR1200-7 は上部からひび割れが生じた供試体を裂くように開口していく挙動を示している。

以上のように異なった挙動を示すのは、ASR1200-7 が鉛直方向に直線的なひび割れが生じているのに対して、ASR1200-5 に生じたひび割れは斜め方向のひび割れが連続するように分布していることが要因であると推察する。つまり、斜め方向のひび割れより鉛直方向に生じたひび割れが、圧縮荷重を受けた際に開口しやすく、強度低下に及ぼす影響が大きかったと考える。

## 5. ASR ひび割れの状態と力学特性

### 5.1 ひび割れの総延長と力学特性の関係

図-8 ならびに図-9 には、ひび割れの総延長と最大応力度の関係、ならびにひび割れの総延長と静弾性係数の関係をそれぞれ示す。また、それぞれの値の相関係数を表-3 に示す。これらの結果から、ASR ひび割れが見られなかった供試体と比較して、ASR ひび割れの延長が長くなると最大応力度、静弾性係数いずれも低下していることがわかる。ただし、最大応力度はひび割れの長さとおおよそ負の比例の関係にあるのに対し、静弾性係数はASR ひび割れが発生するに伴って低下し、その後はひび割れの長さの増大に伴って緩やかに低下している。また、表-3 を見ると、ひび割れの総延長と各方向のひび割れの

相関が高いことがわかる。つまり、いずれの方向のひび割れも総延長の増大に伴い増加しており、ひび割れの増加に伴ったひび割れの方向性の割合については変化していないものと考え。

ここで、最大応力度と相関が高いのは水平ひび割れならびに総延長であることがわかる。ひび割れの増大に伴って、いずれの方向のひび割れの長さは増加しているが、最大応力度の低下には特に水平方向のひび割れが影響している。一方、静弾性係数に関しては、斜め方向のひび割れと総延長との負の相関が高くなっていることもわかる。これらひび割れの方向性と最大応力度、静弾性係数などの力学特性との関係については、より詳細に調べる必要があるものの、ここでは今後の課題とする。

## 5.2 ひび割れの総面積と力学特性の関係

図-10 ならびに図-11 には、ひび割れの総面積と最大応力度の関係、ならびにひび割れの総延長と静弾性係数の関係をそれぞれ示す。また、それぞれの値の相関係数を表-4 に示す。これらの結果より、ひび割れ面積と最大応力度との明確な相関はみられないが、水平方向のひび割れ面積との負の相関が高いことがわかる。静弾性係数に関しては、総面積、および水平方向と斜め方向のひび割れの合計値との間に負の相関がみられる。水平方向、もしくは斜め方向のひび割れと静弾性係数との相関は高くないが、それと比較すると、これらの合計面積を算出すると相関が高くなっている。これは、荷重によって水平方向と斜め方向のひび割れが閉じ、その圧縮方向の変形が増大することで、静弾性係数が著しく低下したものと考える。

## 6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 角柱供試体において生じた ASR に起因するひび割れの幅、長さについて、それぞれのひび割れの方向

に着目して分類し、ひび割れの状態を定量的に評価した。

- (2) 圧縮荷試験によって、ひび割れの方向ならびに形状に加えて、供試体の端部の水平方向の拘束の有無によって、圧縮力によって生じる鉛直方向のひび割れの開口挙動が異なり、その結果、最大応力度が異なることを確認した。
- (3) ASR コンクリート角柱供試体を圧縮荷した際、荷重軸方向の ASR ひび割れが開口し、破壊に至ることが、画像解析によって得た主ひずみ分布によって確認できた。
- (4) 各方向別に整理した ASR ひび割れの長さや面積と最大応力度ならびに静弾性係数との相関係数を示した。特に、斜め方向のひび割れの長さ、ならびに水平方向と斜め方向のひび割れの面積が静弾性係数と高い相関を有することを確認した。

## 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) 松谷幸一郎，宮川侑大，三木朋広：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.2, pp.91-96, 2013
- 3) Miki, T., Matsutani, K. and Miyagawa, Y.: Evaluation of Crack Propagation in ASR Damaged Concrete Based on Image Analysis, Proceedings of 8th Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, pp.1787-1794, 2013.3
- 4) 宮川侑大，三木朋広：ASR が生じたコンクリートの内部ひび割れ評価および圧縮破壊挙動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.12, pp.503-508, 2012.10