

# 論文 ASR 供試体を用いた実構造物の劣化現象関係性評価

増田 隆宏\*<sup>1</sup>・幸左 賢二\*<sup>2</sup>・草野 昌夫\*<sup>3</sup>・合田 寛基\*<sup>4</sup>

**要旨:** アルカリ骨材反応 (以下 ASR) で劣化を生じた構造物中ではコア強度の低下や鉄筋損傷が生じており、ひび割れ等の外観劣化との相関性を評価することで構造物内部の劣化状況を外観で評価を行えることが求められる。本研究では、反応性骨材を使用した供試体を屋外暴露環境下でひび割れ、膨張量を長期計測し、ASR 劣化程度が初期、採取コア物性値の低下が顕著となる中期の状態でのコア採取試験・鉄筋亀裂進展量の確認を行った。その結果、初期劣化の供試体と比較して中程度の劣化した供試体は圧縮強度・静弾性係数が大きく低下し、鉄筋亀裂深さが大きいことを確認し、ひび割れや膨張量等の劣化進展との関係を明らかにした。

**キーワード:** ASR, ひび割れ密度, コア物性低下, 鉄筋破断

## 1. はじめに

現在、ASR 劣化を生じた実構造物で鉄筋破断を生じた事例が報告<sup>1)</sup>されており、実験的検討が数多く行われているが、ASR 劣化現象と鉄筋損傷を総合的に実験で評価を行った例は少ない。

図-1 に、本研究フローを示す。過年度の研究<sup>2)</sup>では反応性骨材を用いて実構造物を模擬した供試体実験を行い、1) 実構造物同様に外観劣化の進展に伴い内部コア物性値が低下する、2) 供試体の帯鉄筋曲げ加工部で亀裂の進展が生じる、以上2点が明らかになり、小型供試体で実構造物の劣化現象を評価可能であることが確認された。

しかし供試体1体の試験結果であるため、ひび割れや膨張量の劣化進展とともにどの程度の物性値になるか、鉄筋損傷が進展するのか評価を行っておらず、内部劣化進展が外観劣化に与える影響の有無についても明確になっていない。

また、内部コア物性値は供試体の劣化が初期段階であったために採取方向の違いで物性値に明瞭な差が生じておらず、十分な検討が行っていないことから劣化が中程度の状態での検討を行う必要がある。

そこで本研究では、内部物性値の低下や鉄筋損傷の進展と、ひび割れや膨張量等の劣化進展との関係を明らかにすることを目的として、過年度の研究と同形状の供試体を屋外暴露環境下で長期計測し、劣化が進展した状態で各種試験を行った。試験項目は、実構造物で破断が報告されているスターラップ鉄筋曲げ加工部に着目した鉄筋亀裂進展量の確認と、主鉄筋軸方向、直角方向からそれぞれ採取したコア供試体の圧縮強度、静弾性係数試験としており、劣化程度の異なる2供試体の採取コア物性値、亀裂進展量とひび割れや膨張量の経年劣化の進展傾向を比較検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体諸元

#### (1) 供試体形状とパラメータ

本研究における供試体形状は竣工から20年以上経過した実構造物の橋脚を模擬しており、使用鉄筋についても昭和60年以前に建設された実構造物よりはつり出した旧節形状鉄筋を使用して試験を行っている。

図-2に供試体形状を示す。供試体断面寸法は、実際にASRによる損傷および曲げ加工部において鉄筋破断が確認されている橋脚梁部の寸法を1/8の長さにして使用した。帯鉄筋形状は、曲げ加工半径1.0dで加工しており、現行D10鉄筋は断面に合わせ矩形に加工したものを使用した。また、供試体端部に配置した旧節D16鉄筋については、長さの制約から図に示すように両端にフックを設けたL形状の鉄筋を2つ組み合わせて使用した。

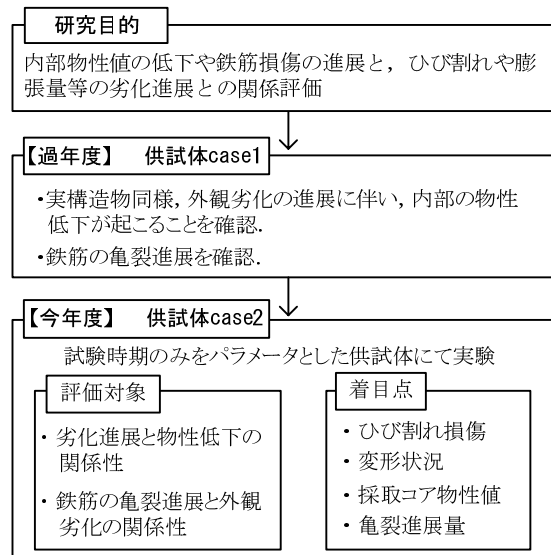


図-1 本研究フロー

\*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (正会員)

\*2 九州工業大学 工学部建設社会工学科教授 Ph.D. (正会員)

\*3 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

\*4 九州工業大学大学院 工学研究科機能システム工学専攻 工修 (正会員)

本実験は、供試体2体について試験時期を劣化初期、中期で設定しており、ASR劣化初期状態で試験を行った供試体を case1, 中程度の劣化状態で試験を行った供試体を case2 としている。

## (2) 供試体作成および使用材料

本実験で使用したコンクリートの示方配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。反応性骨材は粗骨材に北海道産、細骨材に長崎産砕砂を使用した。ASRを促進させるため、コンクリートの等価アルカリ量を  $8\text{kg/m}^3$  に設定し、NaClを添加した。打設後1日で脱型し、28日間湿布養生を行った後に屋外暴露を実施した。また、鉄筋には経年変化を考慮するため電気炉で  $120^\circ\text{C}$ 、10時間の加熱処理を行い、実構造物における竣工後6年経過分に相当するひずみ時効を与えた<sup>3)</sup>。

## 2.2 測定項目

本実験では、ASR劣化の進行における外観損傷とコンクリートの内部損傷および鉄筋損傷との関係を検討するため、供試体のひび割れおよび膨張量を経時的に確認している。

図-3に供試体における外観損傷測定箇所を示す。コンタクトゲージ用チップ（基長：100mm）を供試体端面と供試体上面に貼り付け、コンタクトゲージを使用して供試体の膨張量を測定した。また、ひび割れの測定は下面を除く供試体表面について、目視による観察から0.05mm幅以上のひび割れを対象に行い、幅の測定に関しては100mm間隔で供試体に升目を引き、各測定点（長手方向a~d、断面方向1~7）を横切るひび割れについて幅の測定を行っている。

供試体の変形状況計測は詳細を図-8に示すように、コンタクトゲージ用チップを貼りつけている端面を撮影した画像から標点の移動量を確認し、変形図を作成した。

## 2.3 試験項目

### (1) 方向別コア採取試験

コア採取位置・本数を図-4に示す。本研究では、方向別に採取したコアでの物性値の比較を行うことを目的としており、供試体上面から  $\phi 75\text{mm}$  の軸直角方向コアを6本、供試体端面から  $\phi 75\text{mm}$  の軸方向コアを5本採取している。また試験項目と使用本数については、圧縮強度・静弾性係数試験に軸直角方向コア3本と軸方向コア3本を使用し、促進膨張量試験に軸直角方向コア3本と軸方向コア2本を使用して行っている。なお、試験はコア採取1週間後に実施した。

### (2) 亀裂進展量

鉄筋曲げ加工部の亀裂進展量の測定は、既往の研究<sup>2)</sup>同様、鉄筋曲げ加工部を縦断面に1/2カットし、顕微鏡で50~200倍に拡大した鉄筋の断面を観察し、亀裂深さ、亀裂幅を測定した。

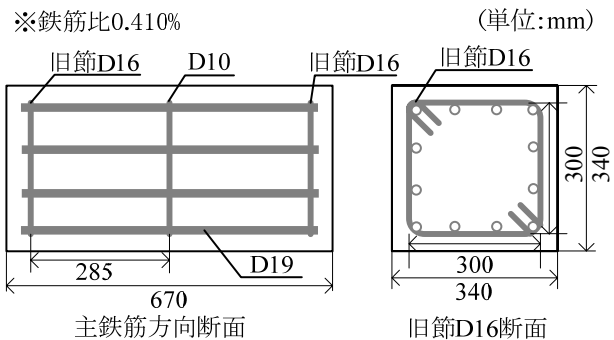


図-2 供試体形状

表-1 コンクリート配合表

(設計基準強度:  $35\text{N/mm}^2$ )

W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )							
		W	C	S		G		塩分 NaCl	AE 減水剤
				非反応	反応	非反応	反応		
46	43	175	381	287	431	509	509	11.57	1.142

※AE減水剤: ポンプリスNo.70(リグニンスルホン酸)

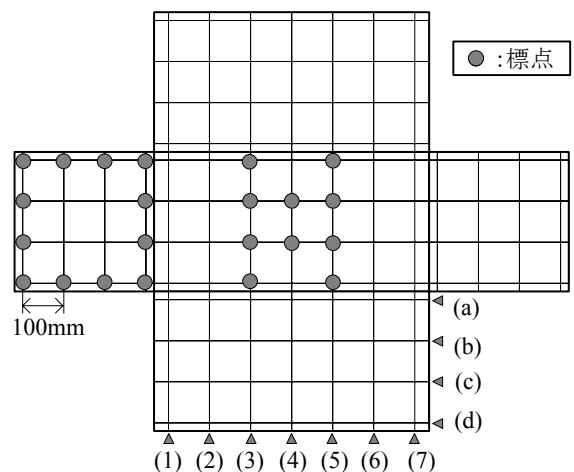


図-3 ひび割れ測定方法およびゲージ貼り付け位置

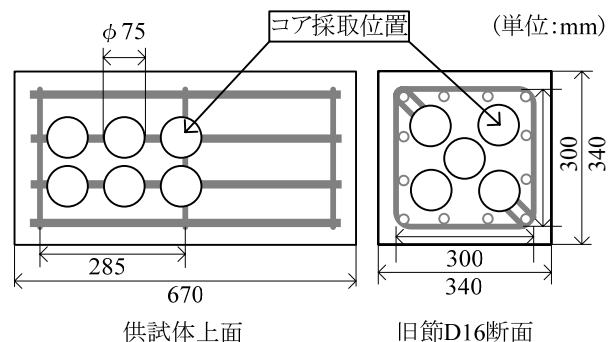


図-4 供試体コア採取位置

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 供試体損傷の経年変化

図-5に供試体ひび割れ密度の経時変化を示す。ひび割れ密度の算出は、日照条件が供試体の上面や側面で異なり劣化状況がばらついているため、下面を除く3側面のひび割れ密度の平均値を採用した。なお、密度の算出

は主鉄筋方向のひび割れ（幅 0.2mm 以上）を使用した。  
 2 供試体ともに日数の経過とともにひび割れ密度の進展が確認でき、case1 では試験を行った経過日数 452 日時点でひび割れ密度  $1.78\text{m}^2/\text{m}^2$ 、case2 では試験を行った経過日数 790 日時点でひび割れ密度  $3.98\text{m}^2/\text{m}^2$  であった。

図-6 に、ひび割れ密度の算出に使用した 3 面のひび割れ損傷図を示す。case1、case2 とともに試験実施時のひび割れを示し、比較を行う。ひび割れ性状は、case1 では各面でひび割れが点在する状態にあり、側面 B で密度  $0.94\text{m}^2/\text{m}^2$ 、上面で密度  $3.23\text{m}^2/\text{m}^2$  と、劣化初期状態であるために日照時間が長く、水分供給の多い供試体上面で劣化が顕著である傾向にあった。case2 では連続性を持つひび割れが多く発生しており、特に拘束差の影響から主鉄筋方向のひび割れが卓越する状態であった。上面で密度  $3.49\text{m}^2/\text{m}^2$ 、側面 B で密度  $4.70\text{m}^2/\text{m}^2$  と、case1 と比較して各計測面でのひび割れ発生量に差が小さく、劣化の進展に伴い全体的にひび割れが増加したと考えられる。後述する図-11 で case1 と case2 の採取コアの圧縮強度が軸直角方向で case1 が  $42.1\text{N}/\text{mm}^2$ 、case2 が  $28.7\text{N}/\text{mm}^2$  と大きな差が生じており、外観のひび割れ発生量の増加に伴い採取コア強度が低下する結果となった。

図-7 に帯鉄筋と平行な箇所計測を行った端面鉛直方向、上面軸直角方向の 2 箇所、また上面軸方向の 1 箇所の測線におけるひずみの経年変化を示している。帯鉄筋と平行なひずみ（測定位置 1、2 及び 5、6 の平均値）は、case1 で  $2762\mu$  と  $2431\mu$ 、case2 で  $4102\mu$  と  $2939\mu$  となっており、2 供試体ともに供試体上面で計測した値が大きい。また、主鉄筋軸方向のひずみ（測定位置 3、4 の平均値）は、鉄筋比の大きい方向への変形となるために進展は小さく、case1 で  $1386\mu$ 、case2 で  $1402\mu$  となった。2 供試体で進展が最大となった供試体上面の軸直角方向ひずみに着目すると、膨張量の最大値は試験時期が異なるために差があるが、進展傾向は case1 と case2 でほぼ同等の傾きで進展していた。

### 3.2 変形状態計測結果

ASR 膨張を模擬した供試体を使用した既往の室内試験では、鉄筋かご内部の膨張により、帯鉄筋曲げ加工部が曲げ戻される変形が生じ、外観上も全体が丸く変形することが確認されている。本実験では、より実構造物の状態に近い供試体で変形状況を確認し、外観の変形から帯鉄筋の変形状況の評価を行う。

供試体端面の変形状況の測定方法を図-8 に示す。測定は、供試体端面にコンタクトゲージ用チップを貼り付けて行い、配置はスターラップ位置と対応している。変形量は暴露開始時の供試体端面と、試験実施前の供試体端面の標点位置を比較し、膨張前からの標点移動量とした。なお、計測では供試体端面画像から面に対する水平

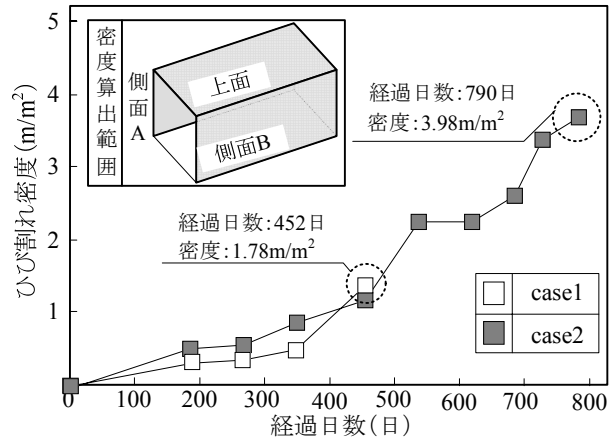


図-5 ひび割れ密度の経年変化

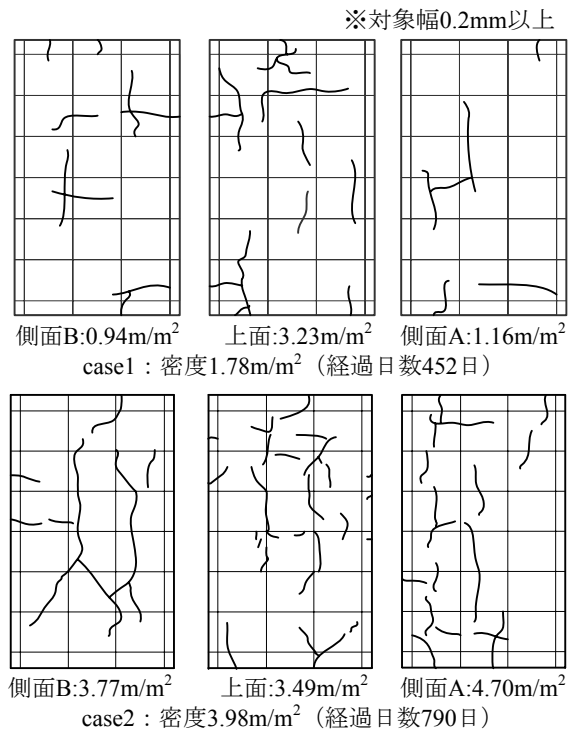


図-6 供試体ひび割れ損傷図

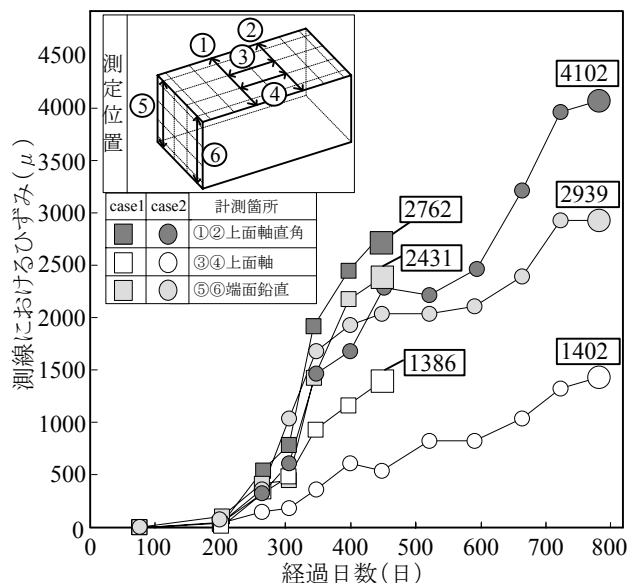


図-7 測線におけるひずみ

変位、鉛直変位をそれぞれ確認しており、変形図を作成する上では丸く膨らむ変形の評価を行うために各標点の面に対する直角方向変位を示す。図-9に case2 の標点変位量を示す。上面で 1.72mm、側面 A で 0.97mm と、1mm 程度の変位が生じており、供試体中央部付近で各面最大の変位を生じていることから、既往の研究同様丸く膨らむ変形を生じたと考えられる。後述する図-16 に示す亀裂進展量の確認を行った位置が右上部、左下部にあたり、それぞれ 90.26°、90.52° と角度の進展が生じており、帯鉄筋曲げ加工部で最大 6.22% の鉄筋亀裂進展が生じた。また、角度進展が最大となった位置は左上部で 91.33° であり、帯鉄筋の 135° 曲げの箇所に対応し、他の箇所より拘束が小さく膨張が集中したと考えられ、外観の変形は内部の鉄筋拘束状況に影響を受けることが考えられる。

### 3.3 方向別コア採取試験

#### (1) 方向別コアの物性値比較

図-10 は、コア供試体の採取方向でコア供試体が鉄筋により採取前に拘束を受ける方向を示している。既往の研究<sup>4)</sup>では、PC 供試体で軸方向、軸直角方向の 2 方向から採取したコアで、大きな拘束を受ける方向の違いで静弾性係数の低下する割合が変化することを指摘している。本実験供試体では、拘束を受ける方向の違いによる物性値の変化の有無を確認し、採取方向の違いにより物性値に差が生じる要因を明確にすることを目的として、軸方向と軸直角方向の 2 方向からコア採取試験を実施した。

図-11 に採取コアの試験結果を示す。静弾性係数は、case1 で軸方向コア平均 18.9kN/mm<sup>2</sup>、軸直角方向コア平均 17.9kN/mm<sup>2</sup>、case2 で軸方向コア平均 17.4kN/mm<sup>2</sup>、軸直角方向コア平均 12.1kN/mm<sup>2</sup> となり、ひび割れ密度が大きい case2 でやや低下が大きいことを確認した。圧縮強度は、case1 で軸方向コア平均 37.3N/mm<sup>2</sup>、軸直角方向コア平均 42.1N/mm<sup>2</sup>、case2 は軸方向コア平均 33.8N/mm<sup>2</sup>、軸直角方向コア平均 28.7N/mm<sup>2</sup>、と静弾性係数同様 case1 と比較して case2 で強度が大きく低下することを確認した。また、方向差については case2 では既往の研究<sup>4)</sup>と同様に軸直角方向コアの方が軸方向コアと比較して静弾性係数、圧縮強度共に低下の割合が大きく、どちらも 2 割程度の差が確認された。

#### (2) コア内部微細ひび割れと物性値の関係

経年劣化に伴い圧縮強度が低下した原因及び、case2 で方向差によって物性値に大きな差が生じた原因について検討を行うため、採取コア内部に生じているひび割れに着目した分析を行った。内部に生じたひび割れは、目視観察が行えないマイクロクラックの発生が考えられるため、既往の検討<sup>5)</sup>を参考にコア供試体を軸方向に 1/2 カットし、蛍光樹脂の塗布後、表面を研磨することでひび割れ内部に浸透した蛍光樹脂にブラックライトを当て

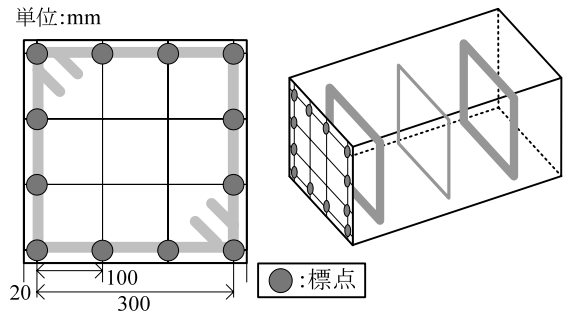


図-8 端面における変形計測

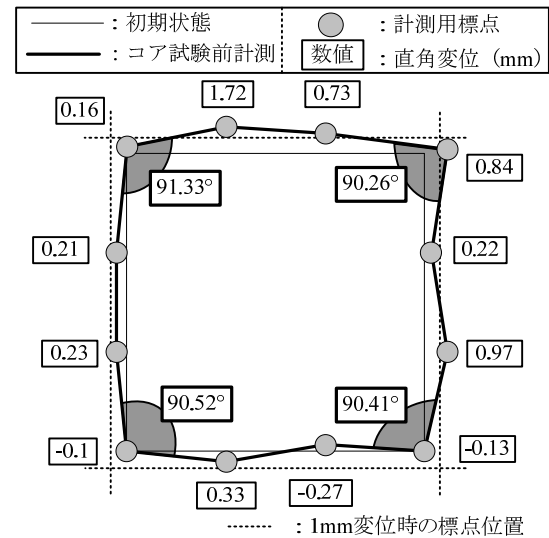


図-9 端面における変形量 (case2)

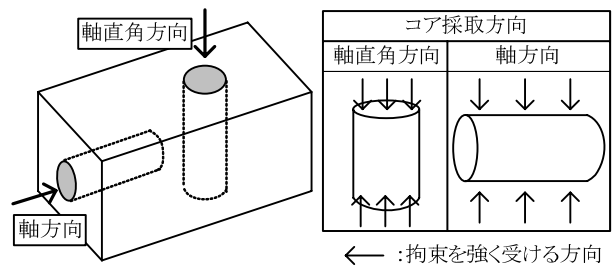


図-10 コア供試体への拘束の影響

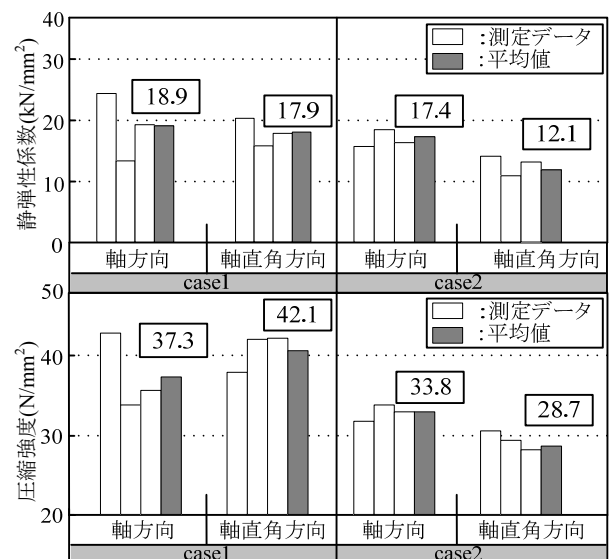


図-11 圧縮強度、静弾性係数試験結果

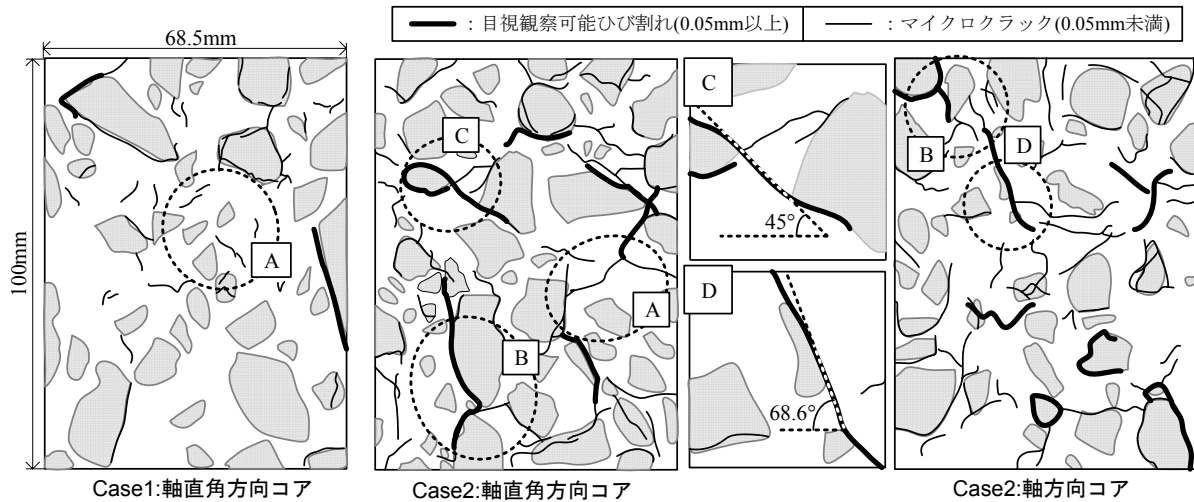


図-12 内部ひび割れ状況

てマイクロクラックの観察も十分行えるようにした。

内部に発生したひび割れの観察結果を図-12, 図-13に示す。内部ひび割れの状況図は密度の分析範囲を示しており、幅 68.5mm, 採取位置によりコア長さに差があるため、高さは 100mm で統一している。対象ひび割れは、蛍光樹脂塗布により観察可能なひび割れ (0.05mm未満) と目視で観察可能なひび割れ (0.05mm以上) の2種に分けた。case1 と case2 の軸直角方向コアに発生したひび割れを比較すると、図中 A の囲みに示すように case1 ではモルタル部に短いマイクロクラックが複数点在しており、ひび割れ密度は 30.1m/m<sup>2</sup> となった。また、目視観察可能なひび割れは骨材周りにのみ生じ、発生量も密度 1.2m/m<sup>2</sup> と少ない。経年劣化が進んだ case2 では、モルタル部に連続したマイクロクラックが多数生じており、密度 101.3m/m<sup>2</sup> と、ひび割れの増加が顕著であった。case2 の採取方向の違いについて軸方向コア, 軸直角方向コアの内部ひび割れを比較すると、ひび割れの発生量は軸方向で 109.7m/m<sup>2</sup>, 軸直角方向で 101.3m/m<sup>2</sup> と差は小さく、目視観察可能なひび割れの発生量も軸方向 22.9m/m<sup>2</sup>, 軸直角方向 27.5m/m<sup>2</sup> と明瞭な差は無く、ひび割れの発生状況 (図中 B の囲み) にも差は生じなかった。

(3) 物性値に差が生じた case2 における分析

case2 の軸方向コア, 軸直角方向コアを使用して、採取コア内部に生じたひび割れを詳細に分析し、強度低下の割合に差が生じた要因の検討を行った。物性値の低下が微小であった case1 で、ほとんど発生が確認できなかった目視観察可能なひび割れを物性値低下の一要因と考え、図-14 に示すようにモルタル間を通じて骨材同士を連続する範囲でひび割れが進展する角度を算出した。なお、角度について圧縮強度試験を行う際の载荷方向を 90° と定義した。分析結果を図-15 に示す。case2 軸方向コアでは3本が対象となり角度の平均は 67.0° case2 軸直角方向コアでは5本が対象となり角度の平均は 63.4° と、平均値に大きな差は生じなかった。角度のばらつきを見

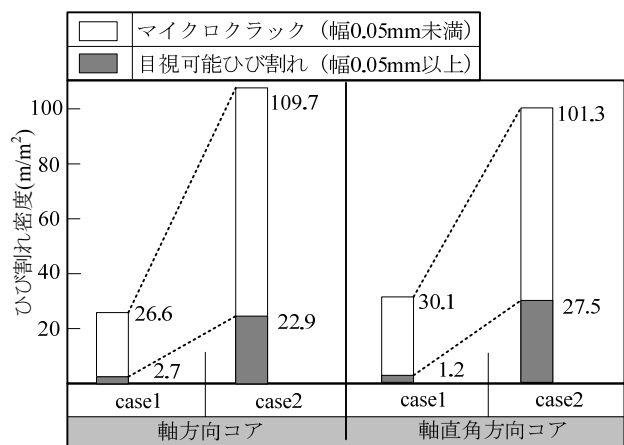


図-13 コア内部のひび割れ密度比較

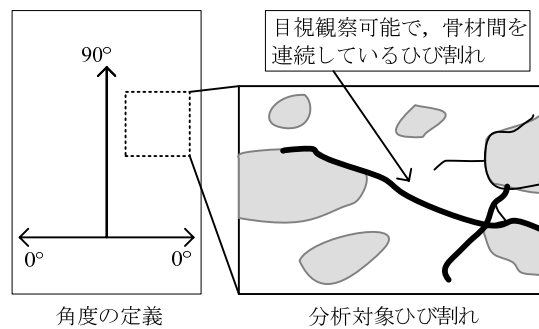


図-14 ひび割れの進展方向分析手法

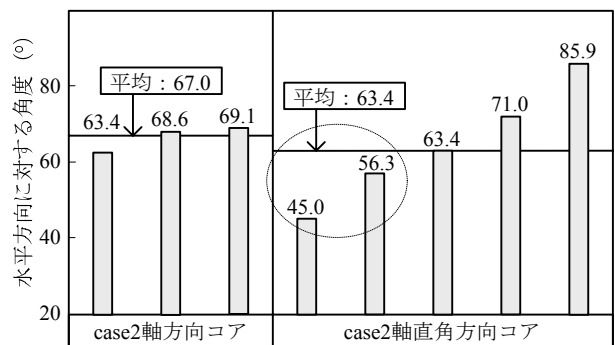


図-15 ひび割れの進展方向分析結果

ると、case2 軸方向では 60~70° で同様の角度を有しており、図-12 の D に示すようにひび割れの方向が垂直に近い形で進展している。それに対して、case2 軸直角方向では最小で 45°、最大で 85.9° と値のばらつきが大きく、図-12 中の C に示す、特に 45° 方向に進展するひび割れは、せん断型の破壊形状となる圧縮強度試験において、強度低下に与える影響が比較的大きいと考えられる。

ひび割れの進展角度が case2 軸直角方向でばらつきが大きかった点について、本実験供試体は鉄筋の拘束差の影響から主鉄筋軸方向のひび割れ発生が顕著であり、内部においても同様のひび割れ進展傾向であったと考えられる。主鉄筋軸方向コアではひび割れの進展方向が垂直に近くなり、軸直角方向コアでは、拘束が小さいためひび割れの進展方向にばらつきが生じたことが考えられる。

### 3.4 鉄筋亀裂進展の確認

鉄筋曲げ加工部の鉄筋亀裂進展量について、図-16 に結果を示す。亀裂進展を判断する手法は、既往の研究と同様に、曲げ加工した段階での初期亀裂を材料試験により確認し、供試体からはつり出した鉄筋曲げ加工部で初期亀裂を上回る亀裂が確認された場合、ASR 劣化によって進展した亀裂とした。なお、鉄筋亀裂進展量は発生した亀裂深さを鉄筋径で除すことで算出を行った。旧節 D16 鉄筋では初期亀裂の平均が 1.13% であるのに対して case1 で 4.72% (試料 1)、case2 で 6.22% (試料 2) の最大亀裂が生じた。旧節形状鉄筋の case1 と case2 の進展後亀裂を比較すると、どちらも 1 本大きく進展する亀裂があり、同様の傾向であった。また、case2 で亀裂の最大値が大きく ASR 劣化が進展することで鉄筋破断の危険性が増すことが考えられる。本実験は波節形状の鉄筋を使用しており、竹節形状の鉄筋と初期亀裂の発生を比較すると、亀裂の発生本数は同等であるが、初期亀裂深さの平均値は竹節鉄筋で 2.0% を超えており、最大の初期亀裂深さも竹節の半分程度であることが確認されている<sup>6)</sup>。初期亀裂深さは鉄筋損傷が進展する起点となり、鉄筋破断の一要因であることから、平均初期亀裂深さが比較的小さい本実験供試体では十分な劣化状況にあったが、破断に至るような進展後亀裂は生じなかったと考えられる。

### 4. まとめ

反応性骨材を使用した供試体の屋外暴露試験を行い、外観の経年劣化と内部の物性低下及び亀裂進展量との関係性を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 劣化程度の異なる case1 (ひび割れ密度 1.78m/m<sup>2</sup>) と case2 (ひび割れ密度 3.98m/m<sup>2</sup>) でコア強度と内部ひび割れの関係を検討した結果、case2 で 28.7N/mm<sup>2</sup> と基準値を下回る強度を確認し、コア内部、外観のひ

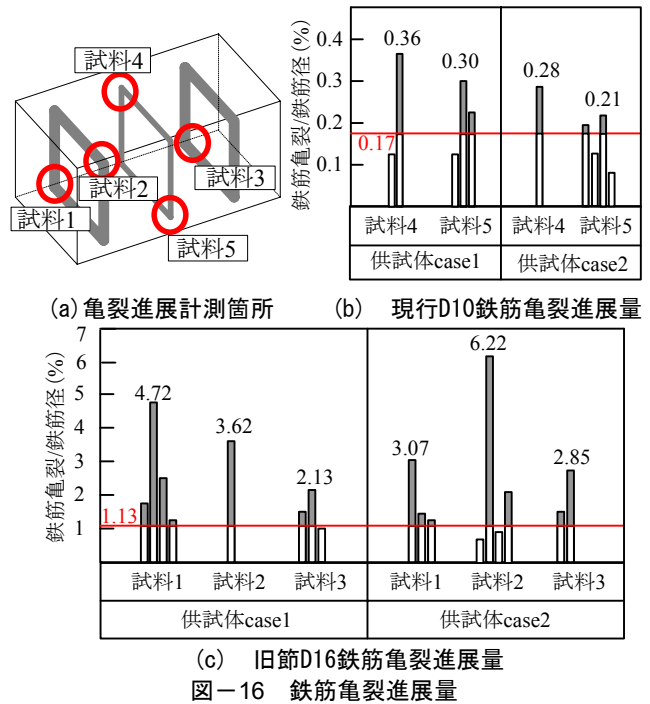


図-16 鉄筋亀裂進展量

- び割れの増加に伴い、強度が低下する結果となった。
- (2) コア採取方向の違いで case2 では軸方向コア強度 33.8N/mm<sup>2</sup>、軸直角方向 28.7N/mm<sup>2</sup> と差が生じる結果が得られ、内部ひび割れの進展角度に着目した分析の結果、45° 方向のひび割れが生じていたことがコア強度に差を生じた一要因であると考えられる。
- (3) case1 と case2 の進展後亀裂を比較した結果、最大亀裂が 4.72%、6.22% と ASR 劣化が進行した case2 で亀裂深さの増加を確認し、ASR 劣化が進行することで鉄筋破断の危険性が増すことが考えられる。

### 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—鉄筋破断と新たな対応—、コンクリートライブラリーNo.124, pp. I -2- I -77, 2005
- 2) 増田隆宏ほか：ASR 供試体を用いた実構造物内の鉄筋損傷評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1207-1212, 2009.7
- 3) Hundy, B. B. : Accelerated Strain Ageing of Mild Steel, Journal Of The Iron Steel Institute, pp.34-38, Sep.1954
- 4) 北沢宏和ほか：アルカリシリカ反応を生じた PC 桁の疲労寿命の検討、セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.649-654, 2002
- 5) 三浦正剛ほか：ASR を生じた実構造物の長期的な損傷度評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1023-1028, 2008.7
- 6) 川島恭志ほか：ASR 実構造物の鉄筋損傷に対する初期損傷の影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1029-1034, 2008.7