

# 論文 ASR 供試体を用いた実構造物の劣化状況に対する内部損傷評価

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:** ASR の発生した構造物の劣化の中で、特に重要である鉄筋破断と構造物におけるひび割れ進展などの劣化現象との相関性を評価するため、本研究では反応性骨材を用いて実構造物を模擬した供試体の作成を行い、外観のひび割れ進展と鉄筋ひずみの長期計測を行った。実構造物における中程度の損傷に至った段階の供試体を用いてコア採取試験・鉄筋亀裂進展量の確認を行った結果、圧縮強度・静弾性係数の低下、鉄筋亀裂の発生が確認されるとともに、実構造物の外観損傷に対する内部損傷状況の評価を行った。

**キーワード:** ASR, ひび割れ密度, 鉄筋破断

## 1. はじめに

近年アルカリシリカ反応（以下ASRと表記）等によるコンクリート構造物の早期劣化が問題となっている。ASRが著しく進行した構造物に関しては、鉄筋の曲げ加工部や圧接部での亀裂・破断が確認されている<sup>1)</sup>。このことから、構造物の耐力低下が懸念されており、鉄筋損傷メカニズムの解明を目的とした研究が行われている。

本研究では、ASR損傷において特に重要な損傷状況である鉄筋破断現象に着目し、厳しい条件下におけるASR構造物の劣化現象を供試体レベルで再現を行うことで、ひび割れ・膨張量等の外観から得られる損傷と、コアの圧縮強度、鉄筋亀裂進展量等の内部損傷の経年変化を追うことで、実構造物の内部における劣化状況に関する検討を行った。

図-1に、本研究のフローを示す。一般にASRによる鉄筋破断は曲げ加工時に発生する初期亀裂、ASRによる膨張、遅れ破壊等の材料の劣化、旧節鉄筋の使用といった複合的な要因により発生すると考えられており、またひび割れ性状などの劣化現象との相関性も明確にされていない。それらを踏まえて、過年度では膨張コンクリートでASRの膨張を模擬した実験を行い、終局状態に着目して種々の破断要因が鉄筋損傷に与える影響について検討を行っている<sup>2)</sup>。その結果、鉄筋破断には(1)旧節鉄筋の使用、(2)曲げ加工により発生する初期亀裂、(3)ひずみ時効による脆化、(4)ASR膨張量が大きく影響することが明らかとなった。しかし、膨張コンクリートでの試験では短時間での膨張により経時変化を追うことが困難であり、ひび割れ性状や鉄筋損傷と外観損傷の相関を確認することが十分ではなかった。そこで本研究において、より実構造物での劣化現象を再現するために反応性骨材を使用した供試体の長期計測を実施し、供試体の最終膨張量予測から途中段階での内部損傷に対する試験

を行うこととした。本研究ではASRにおける劣化現象と内部損傷の関係を確認し、実構造物での劣化現象との比較を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体諸元

#### (1) 供試体形状

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用いて試験を行っている。図-2に供試体形状を示す。供試体断面寸法に関しては実際にASRによる

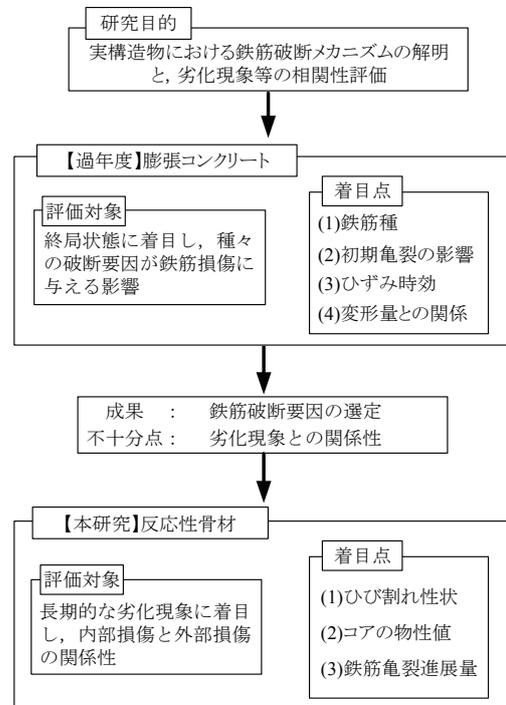


図-1 本研究フロー

\*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)

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断面を1/8にスケールダウンして用いている。帯鉄筋形状に関して、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用いている。また、供試体端部に配置した旧節D16鉄筋については、過年度の実験と同条件による比較を行うため、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つ組み合わせて用いている。

### (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。また、鉄筋には経年変化を考慮するため電気炉を用いて $120^\circ\text{C}$ 、10時間の加熱処理を行いひずみ時効の促進を行った。

### 2.2 測定項目

本実験では、ASRの進行における外観損傷とコンクリートの内部損傷の関係を検討するため、供試体の劣化を経時的に確認している。図-3に供試体における鉄筋ひずみ計測箇所を示す。供試体の中央に配置している現行D10鉄筋の曲げ加工部に対して、曲げ加工部内側(A)、曲げ加工部外側(B)、曲げ加工部近傍(C)にひずみゲージを貼り付けた。A点、B点に関しては曲げの中心の位置に対して内側と外側に、C点に関しては中央点から曲げ加工の始点となる曲げ加工部の寸法Rの1/2の直線となる位置とした。旧節D16鉄筋曲げ加工部については、亀裂進展量を観察するためにゲージを貼り付けなかった。また、全ての帯鉄筋に対して直線部中央2箇所(D)にゲージを貼り付けている。

図-4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)を供試体北側端面と供試体上面に貼り付け、供試体の膨張挙動の把握を行う。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。

### 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-5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 $\phi 75$ の軸直角方向コアを6本、供試体端面から $\phi 75$ 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・静弾性係数試験について軸直角方向コア3本と軸方向コア3本を使用し、促進膨張量試験について軸直角方向コア

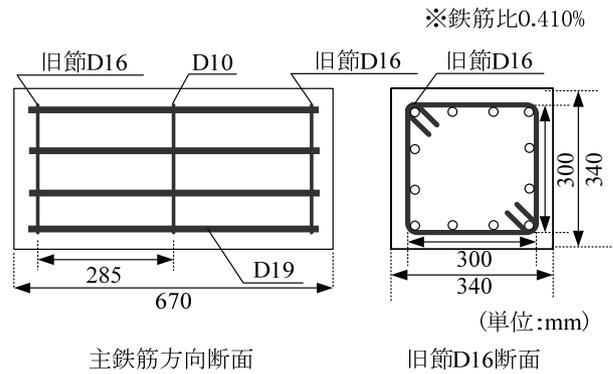


図-2 供試体形状

表-1 コンクリート配合表

(設計基準強度:35N/mm<sup>2</sup>)

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
		水 W	セメント C	S		G		塩分 NaCl	AE減水剤
				非反応性	反応性	非反応性	反応性		
46	43	175	381	287	431	509	509	11.57	1.142

※AE減水剤:ポリリスNo.70(U)グニスルホン酸

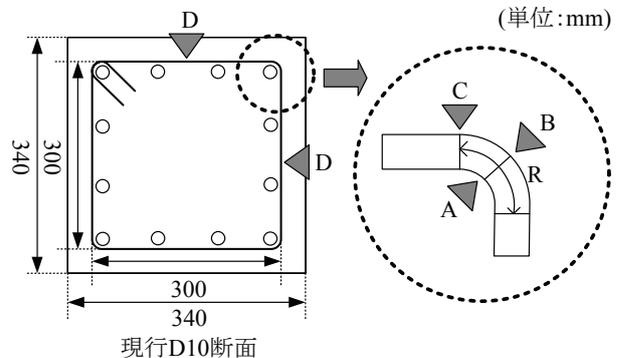


図-3 鉄筋ひずみ計測箇所

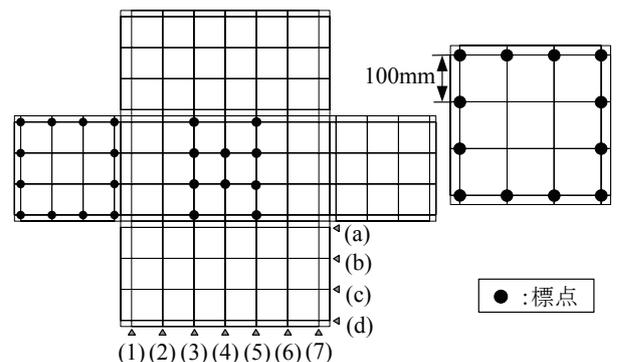


図-4 ひび割れ測定方法およびゲージ貼り付け位置

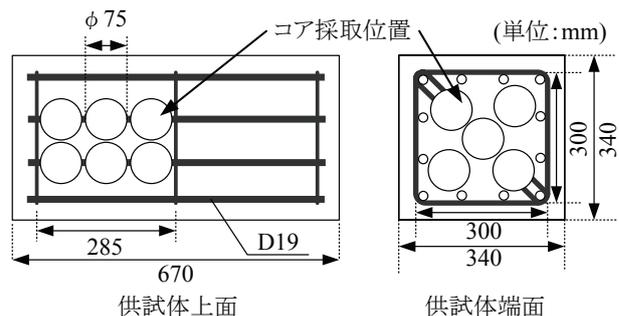


図-5 供試体コア採取位置

3本と軸方向コア2本を使用している。

### (2) 亀裂進展量

縦断面観察方法を図-6に示す。既往の検討<sup>2)</sup>と同様に鉄筋曲げ加工部を軸方向1/2カットし、顕微鏡を用いて50~200倍の断面観察を行い、亀裂深さ、亀裂幅を測定した。

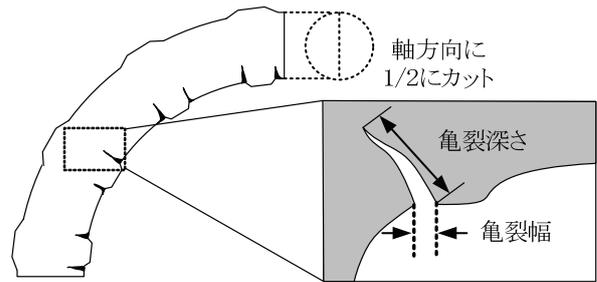


図-6 亀裂進展の確認

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 供試体損傷の経年変化

図-7に供試体のひび割れ密度の経時変化を示す。ひび割れ密度は、劣化の激しかった供試体上面に着目し、ひび割れ幅0.2mm以上で主鉄筋方向のひび割れから算出を行った。ひび割れ密度は、経過日数に合わせて増加しており、経過日数452日の段階で3.23m<sup>2</sup>であった。この劣化状況は後述する実構造物から定義をした劣化領域2に相当し、中程度の損傷に至っていると判断できる。また、供試体のひび割れ進展傾向を、実構造物から分類した劣化領域と照らし合わせて考察を行うため、劣化領域3の初期段階に相当する経過日数187日のひび割れ密度をStep1、劣化領域3と劣化領域2の境界に相当する経過日数323日のひび割れ密度をStep2、劣化領域2の中程度の損傷に相当する経過日数452日のひび割れ密度をStep3として、StepごとにASR進展状況の評価を行った。

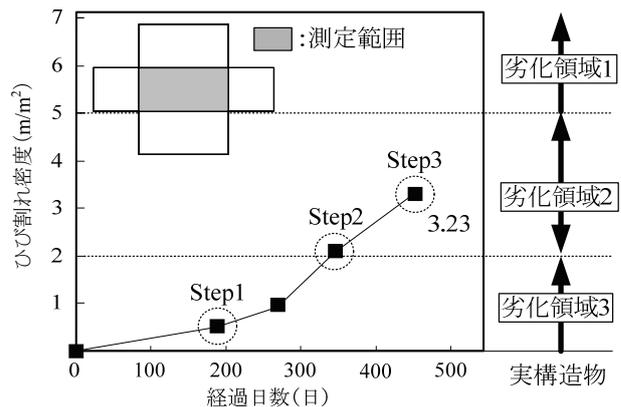


図-7 ひび割れ密度の経年変化

図-8に、供試体上面でのひび割れ損傷の経時変化をStepごとに分けて示す。損傷の軽微な劣化領域3に相当する経過日数187日では、明確な方向性が確認できるひび割れが入っていない。劣化領域3と2の境界に相当する経過日数323日では、主鉄筋方向に卓越したひび割れの発生が始まっているものの、短いひび割れが点在する状態にある。中程度の損傷を示す劣化領域2に相当する経過日数452日では、先ほどよりも既存のひび割れの延長、幅の拡大が起きる傾向にあることが明瞭となる段階に至っており、短いひび割れが繋がり連続性を持つ状態と考えられる。

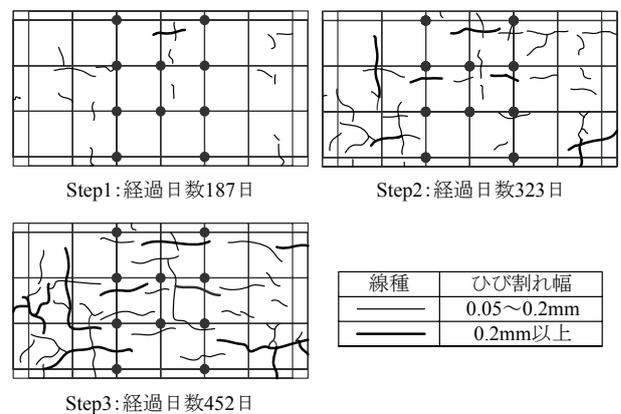


図-8 供試体ひび割れ損傷図

Step3でのひび割れ損傷図において、ひび割れが主鉄筋方向、帯筋方向共に同程度入っており、ASR劣化の特徴といえる明瞭な主鉄筋方向に卓越したひび割れの発生になっていない。ただ、幅の大きいひび割れの発生本数、総延長を確認すると、主鉄筋方向に偏っている傾向が見られたことから、図-9に0.2mm幅以上のひび割れに着目し主鉄筋方向・帯鉄筋方向で比較したものを示す。経過日数が増加するに伴い、幅の大きいひび割れ本数、総延長が主鉄筋方向で増加する傾向が帯鉄筋方向のひび割れより顕著であり、主鉄筋方向に卓越したひび割れの進展を見せていることが確認できる。本実験供試体は主鉄筋比に対して帯鉄筋比が小さく、拘束の弱い方向に膨張が集中するASRの特徴を十分に捉えられていると判

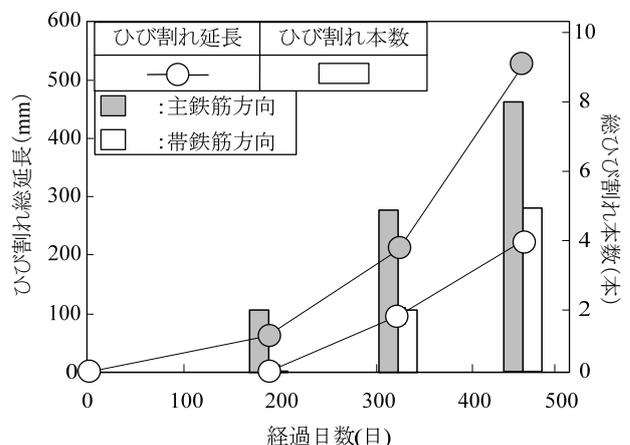


図-9 幅0.2mmを超えるひび割れの発生本数

断できる。図-10は、帯鉄筋と平行となる箇所にて計測を行っている端面鉛直方向、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。帯鉄筋と平行となるひずみ(測定位置1, 2及び5, 6)については、現段階で2762 $\mu$ 、2431 $\mu$ の測定結果になっており、測定値には差が認められるが、同様の進展傾向を示している。また、主鉄筋軸方向のひずみ(測定位置3, 4)は、鉄筋比の大きい方向への変形となるため、ひずみの進展は小さく1386 $\mu$ となっている。Step2の段階で、上面におけるひずみが方向別で大きく進展量に違いが生じているが、図-9に示すようにStep2の段階から主鉄筋方向のひび割れ幅が大きく進展する傾向と一致しており、鉄筋比の小さい方向である帯鉄筋方向に膨張が偏り始めていると判断できる。なお、測線におけるひずみはコンタクトゲージで測定した長さ変化量の平均を、測線長さで除した値を用いている。

図-11に、供試体における鉄筋ひずみ経年変化を示す。経過日数400日で曲げ加工部内側(A)、外側(B)ともに2000 $\mu$ を超えるひずみが発生しており、降伏に至っている。また、曲げ加工部近傍(C)のひずみの変化を見ると、ほとんど測定値が横ばいとなっておりひずみの増加が見られない。このことから、曲げ加工の中心部にのみひずみが集中して発生する傾向が確認される。

### 3.2 方向別コア採取試験

#### (1) 方向別コアの物性値比較

図-12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>3)</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結果となっている。本実験供試体でも拘束を受ける方向の違いによる物性値の変化の有無を検討するために、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-13にコア供試体の圧縮強度・静弾性係数試験結果を示す。圧縮強度は、軸方向コアが平均37.3N/mm<sup>2</sup>、軸直角方向コアが平均42.1N/mm<sup>2</sup>となり、材齢28日での圧縮強度・静弾性係数試験結果を初期値として圧縮強度比を計算した結果、軸方向コアで0.94、軸直角方向コアで0.83となった。また、静弾性係数は軸方向コアで18.9 $\times 10^4$ N/mm<sup>2</sup>、軸直角方向コアで17.9 $\times 10^4$ N/mm<sup>2</sup>という結果となり、初期値に対して軸方向で0.54、軸直角方向で0.52という結果となった。方向別でコア供試体の結果を比較すると、採取したコアの静弾性係数はほとんど採取方向別による差が認められなかった。また圧縮強度は軸方向コアの方が測定値のばらつき、低下の割合が大きくなっていた。これは、既往の研究にあるようなPC供試体ではなく、本実験供試体ではRCでの鉄筋拘束で、また中

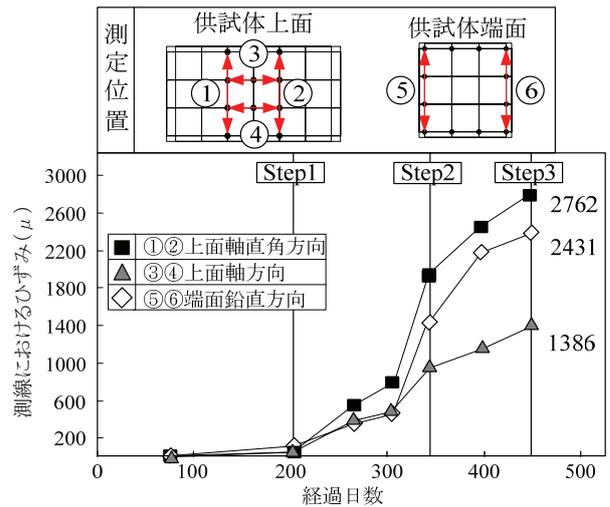


図-10 測線におけるひずみ

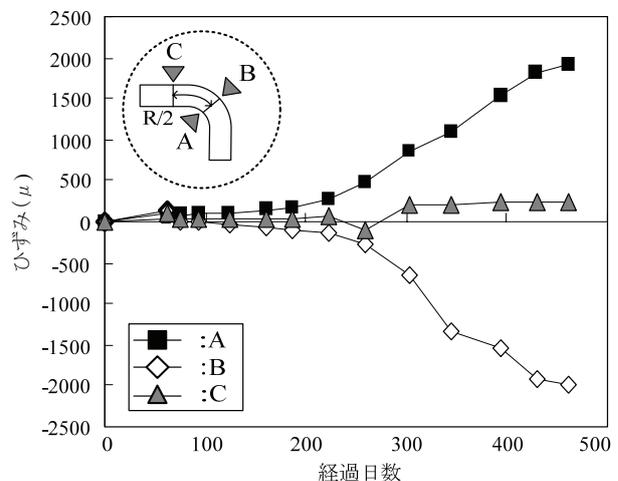


図-11 鉄筋曲げ加工部ひずみ

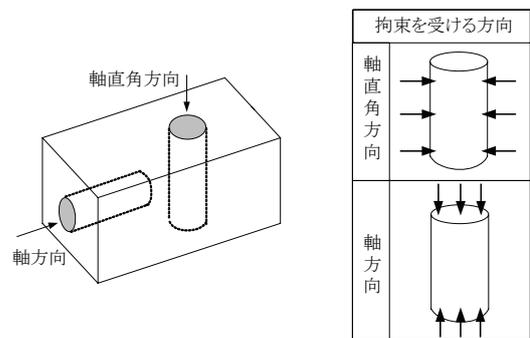


図-12 コア供試体への拘束の影響

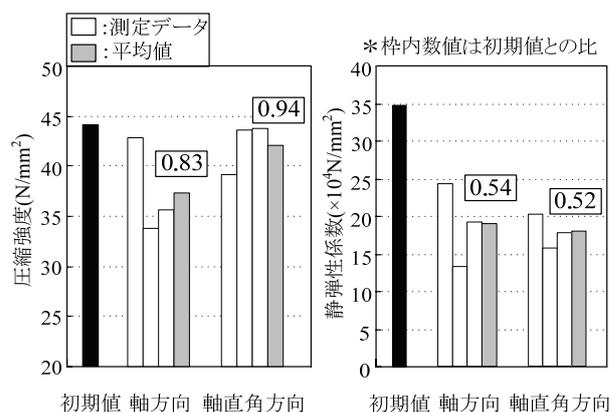


図-13 コアの圧縮強度・静弾性係数試験結果

程度の劣化状況であったため、方向別に採取したコアで物性値にそれほど変化が見られなかったとも考えられる。

### (2) 構造物から採取されたコアとの比較

既往の報告<sup>4)</sup>では、形状が同じで寸法を変えた供試体実験でひび割れ密度にほとんど差が見られていないことから、分析に用いた実構造物の形状を模擬している本実験供試体ではある程度比較が可能であると判断した。そこから、本試験における採取コア物性値の妥当性について実構造物から採取されたコアと比較することで検討を行った。実構造物のひび割れ密度と採取されたコアの圧縮強度平均値/設計強度（以下圧縮強度比と表記）との相関性は既往の研究<sup>5)</sup>で確認されており、その結果を図-14に示す。ここで示している劣化領域の分類は、昭和60年代（供用年数約10年）に実施されたASR橋脚のデータ分析結果<sup>6)</sup>をもとに、物性値が明らかに低下する傾向にあるひび割れ密度  $2.0\text{m}^2$ 、また実構造物において特に劣化の厳しい状態と考えられる  $5.0\text{m}^2$  を基準として劣化領域を3段階に設定を行っている。

図-14において、橋脚21基のデータから各劣化領域での圧縮強度比とひび割れ密度の平均値を図-15に示す。そこに本試験の値を入れると、実構造物の圧縮強度比の低下傾向のグラフにある程度一致することが確認できた。このことよりひび割れ密度  $2\text{m}^2$  を超える実構造物では、圧縮強度比が1.23から0.91と大きく低下する状況にあり、本試験でも0.94、0.83の試験値となっている。また、図-8で試験を行った際のひび割れ損傷（Step3）を確認すると、幅の広いひび割れが数多く確認されひび割れが連続性を持つ状態にあることから、外観から内部損傷を判断する上で連続性を持つひび割れの発生が一つの目安になると考えられる。

### 3.3 鉄筋亀裂進展の確認

#### (1) 実験結果

鉄筋亀裂進展量について、既往の検討<sup>2)</sup>より旧節D16鉄筋での初期亀裂発生は現行D10鉄筋を大きく上回ることが確認されており、ASR膨張を受けた際の亀裂進展も同様に旧節D16鉄筋の方が大きくなると予測される。供試体よりはつり出した鉄筋の亀裂進展を判断する手法は、図-16に示すように曲げ加工した段階での初期亀裂を材

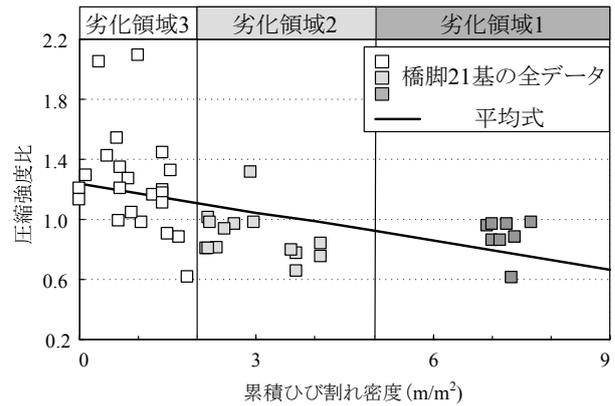


図-14 累積ひび割れ密度とコアの圧縮強度の関係<sup>5)</sup>

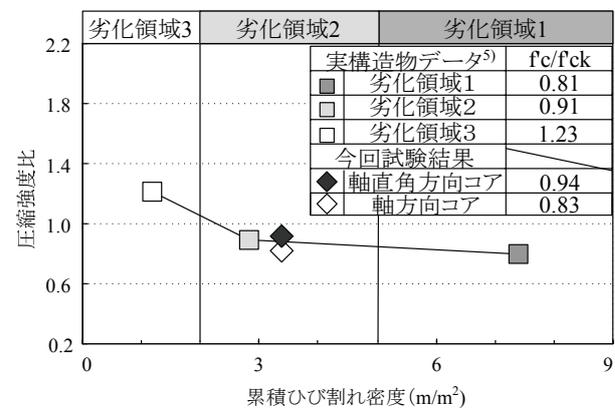
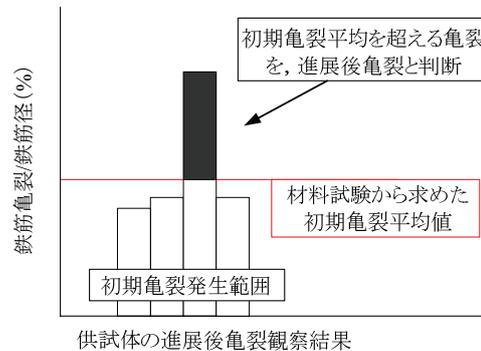
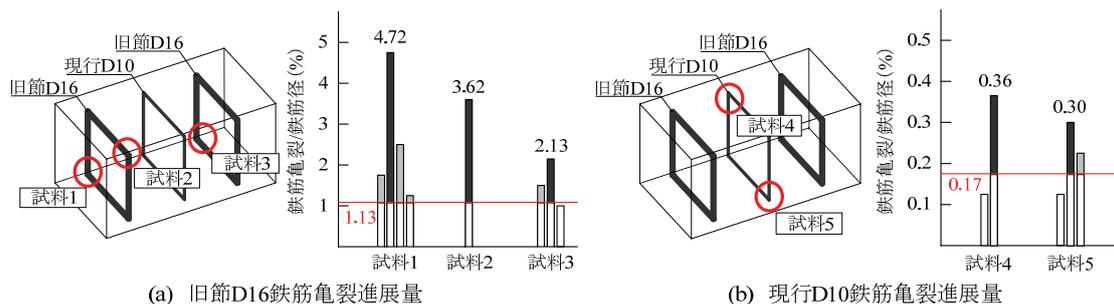


図-15 構造物と比較したコアの圧縮強度低下



供試体の進展後亀裂観察結果

図-16 亀裂進展の判断手法



(a) 旧節D16鉄筋亀裂進展量

(b) 現行D10鉄筋亀裂進展量

図-17 各鉄筋における亀裂進展量

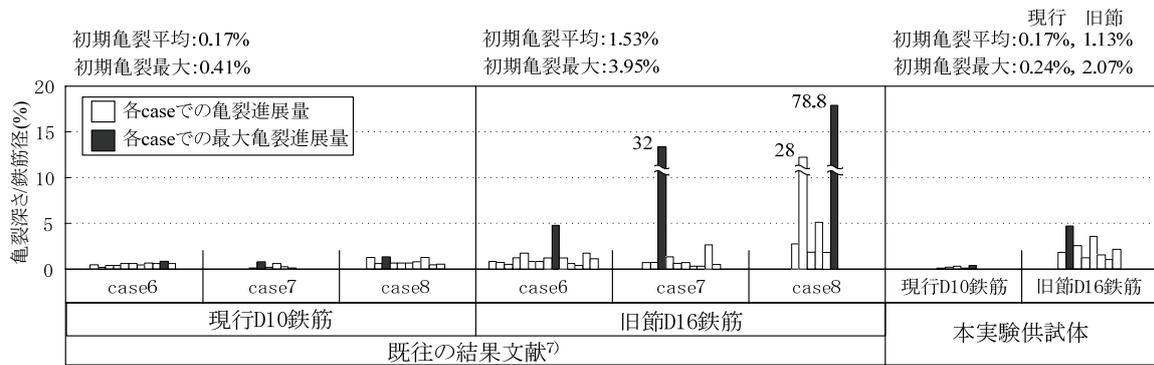


図-18 膨張コンクリート実験での亀裂進展量との比較

料試験により確認しておき、進展後の亀裂と初期亀裂の平均値を比較し、初期亀裂の平均値を上回る亀裂をASR膨張により進展をした亀裂とした。図-17に供試体からはつり出した鉄筋の亀裂進展量の結果を示す。旧節D16鉄筋では初期亀裂の平均が1.13%であるのに対して最大で4.72%（試料1）の進展後亀裂が確認された。また現行D10鉄筋については初期亀裂の平均が0.17%であるのに対して最大で0.36%（試料4）であり、初期亀裂の最大値が0.24%であったことからやや進展していると考えられるが、旧節D16鉄筋に比べはっきりとした進展状況は確認できなかった。また、亀裂観察を行った全試料の亀裂データを比較すると、試料ごとに一つの亀裂のみが大きく進展する傾向にあることが確認された。

#### (2) 既往の実験結果との比較

亀裂進展傾向に関して、膨張コンクリートを用いてASR膨張を再現した既往の検討<sup>7)</sup>では、鉄筋曲げ加工部ひずみの発生傾向及び鉄筋破断面から、ASR膨張が鉄筋曲げ加工部に与える影響を模擬することが可能であると報告されている。亀裂進展量を観察したcase6~8の結果を見ると本試験で確認された1試料に対して1本の亀裂のみが進展するという傾向が確認されており、ASRによる鉄筋亀裂進展の特徴的な現象であると考えられる。そこで、case6~8からはつり出した鉄筋の亀裂進展量を現行D10鉄筋、旧節D16鉄筋で確認した結果と、本実験供試体での結果を比較したものを図-18に示す。case6~8では、現行D10鉄筋についても初期亀裂の平均を上回る亀裂が複数確認されているものの、やはり旧節D16鉄筋の方が現行D10鉄筋よりも明瞭な亀裂の進展が発生している。旧節D16鉄筋について各caseでの最大亀裂進展量を比較した際、case6では本試験結果と同程度の5%に満たない亀裂の進展であるのに対して、case7, 8ではそれぞれ32%、78.8%と大きく進展を見せている。今回の供試体は膨張途中段階で試験を行っているため、今後ASRの進展が進めば、それに伴い亀裂の進展も大きくなると推測される。

#### 4. まとめ

反応性骨材を使用した供試体の長期計測と、膨張途中

段階における採取コアでの圧縮強度・静弾性係数試験によって、以下の知見が得られた。

- (1) 主鉄筋方向に卓越したひび割れの発生が顕著になるひび割れ密度 $3.23\text{m}^2$ の段階で、圧縮強度が軸直角方向0.94、軸方向0.81、静弾性係数が軸直角方向0.52、軸方向0.54と低下することが確認され、低下傾向は実構造物で得られた結果とある程度同様であった。
- (2) 供試体のひび割れ密度 $3.23\text{m}^2$ の段階で、鉄筋亀裂進展の確認を行った結果、旧節D16鉄筋の曲げ加工部において曲げ加工段階で発生する初期亀裂平均1.13%に対して、4.72%の鉄筋亀裂進展が確認された。
- (3) ASRの損傷が見られる橋脚21基の分析から、ひび割れ密度が $2\text{m}^2$ を超える損傷領域2の段階で、すでに圧縮強度の低下、鉄筋の損傷が進展する可能性があることが、本供試体実験より確認された。

#### 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—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) 興梠展朗ほか：鉄筋の節形状とコンクリートの膨張が破断に与える影響、コンクリート年次論文集, Vol.28, No.1, pp.719-724, 2006.7
- 3) 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
- 4) 三浦正嗣ほか：ASRを生じた実構造物の長期的な損傷度評価、コンクリート年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1023-1028, 2008.7
- 5) 阪神高速道路株式会社：H18年度ASR構造物の維持管理に関する検討会報告書、(財)阪神高速道路管理技術センター, 2007.3
- 6) 阪神高速道路公団：コンクリート構造物の健全度に関する調査研究業務（その3）報告書、(財)阪神高速道路管理技術センター, 1985.3
- 7) 幸左賢二ほか：アルカリ骨材反応による鉄筋破断を模擬した供試体実験、構造工学論文集, Vol.53A, pp.968-979, 2007.3