

論文 ASR 供試体を用いた内部劣化進展度評価

増田 隆宏*¹・幸左 賢二*²・草野 昌夫*³・合田 寛基*⁴

要旨：本研究では、反応性骨材で実構造物を模擬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、中期、終局の状態でもコア採取試験・鉄筋亀裂進展量の確認を行った。その結果、初期段階の劣化を生じた供試体と比較して中程度の劣化を生じた供試体は圧縮強度・静弾性係数が大きく低下し、その後劣化終局では強度低下が 2 割程度で漸減する傾向を得た。供試体内部の微細ひび割れに着目した分析の結果、圧縮強度の低下に影響を与える内部ひび割れ発生が、鉄筋拘束の影響から表面側よりも早い段階で収束を迎える傾向を確認した。

キーワード：ASR、ひび割れ密度、圧縮強度

1. はじめに

ASR 構造物の長期的な劣化メカニズムを明らかにすることは、構造物を管理するためにも極めて重要と考えられる。しかしながら、ASR 劣化進展に伴う外観ひび割れ状況の進展傾向および外観劣化と内部劣化の関係性について、ASR 劣化が終局に至るまでの範囲で検討を行った例はごく僅かである。

本研究フローを図-1 に示すが、過年度の研究¹⁾では反応性骨材を使用した供試体実験を行い、ASR 劣化初期、中期の段階で採取コア試験を実施し、実構造物同様経年劣化進展に伴い圧縮強度が低下し、設計基準強度に対して最大 2 割の低下を確認している。

そこで本研究では、まず ASR 劣化が初期から終局に至るまでの長期的な劣化進展傾向に着目し、ひび割れや膨張量等の外観劣化進展を計測し、劣化初期、中期、終局時で段階的にコアを採取して圧縮強度や静弾性係数等の内部劣化進展を把握した。

次いで、ASR 劣化の進展に伴い経年的に圧縮強度が低下する現象について、膨張に伴い供試体内部に発生するひび割れに着目し、圧縮強度の低下要因および外観劣化の進展と内部劣化の進展の関係を比較検討した。

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 つ組み合わせ使用した。

本実験は、供試体 3 体について試験時期を劣化初期、中期、終局で設定しており、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、終局の劣化状態で試験を行った供試体を case3 とした。

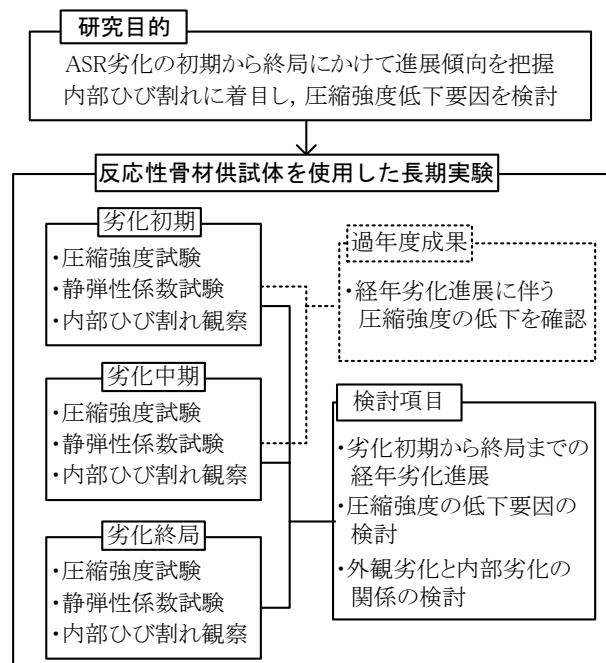


図-1 検討フロー

*1 九州工業大学大学院 工学府 建設社会工学専攻 (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)

(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は、セメントに普通ポルトランドセメントを使用し、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 8kg/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で 120°C 、10 時間の加熱処理を行い、実構造物竣工後 6 年経過分に相当するひずみ時効を与えた。

2.2 測定項目

図-3 に供試体における外観損傷測定箇所を示す。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-4 に示す。本研究では、供試体上面から $\phi 75\text{mm}$ の軸直角方向コアを 6 本採取し、圧縮強度・静弾性係数試験に 3 本、促進膨張量試験に 3 本を使用した。

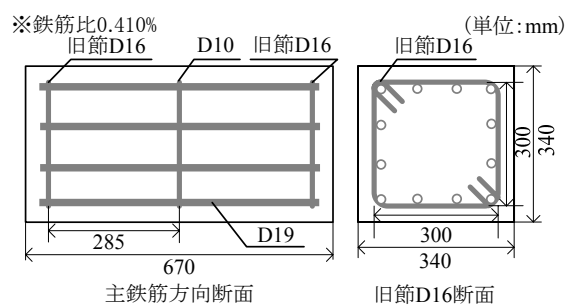
(2) 採取コア内部ひび割れ観察

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²⁾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てマイクロクラックの観察も十分行えるようにした。分析範囲は、供試体表面側から深さ約 115mm の範囲を使用した。

3. 実験結果と考察

3.1 供試体損傷の経年変化

図-6 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。3 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 $3.98\text{m}^2/\text{m}^2$ ，case3 では経過日数 1113 日でひび割れ密度 $5.39\text{m}^2/\text{m}^2$ であった。case3 では、日照時間や水分量の供給が十分にある夏季においても新規ひび割れの発生が極僅かであったことから、終局状態にあったと判断される。図-7 に、密度の算出に使用した 3 面のひび割れ損傷図を示す。case1～case3 で試験実施時のひび割れを示し、比較を行う。ひび割れ性



(a) 供試体形状

case	case1	case2	case3
想定劣化度	劣化初期	劣化中期	劣化終局
試験実施時期	452 日	790 日	1113 日

(b) 供試体計画

図-2 供試体形状およびパラメータ

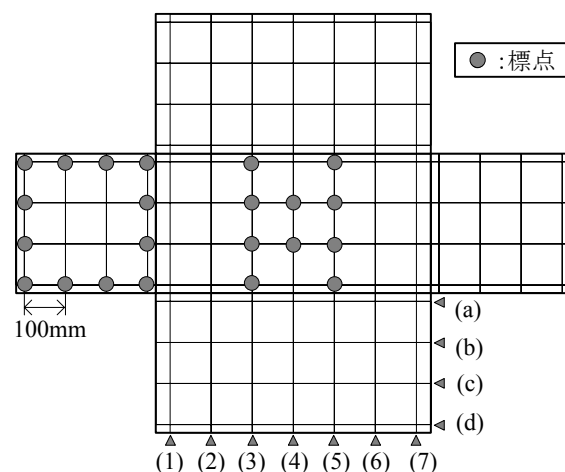


図-3 ひび割れ測定方法およびゲージ貼り付け位置

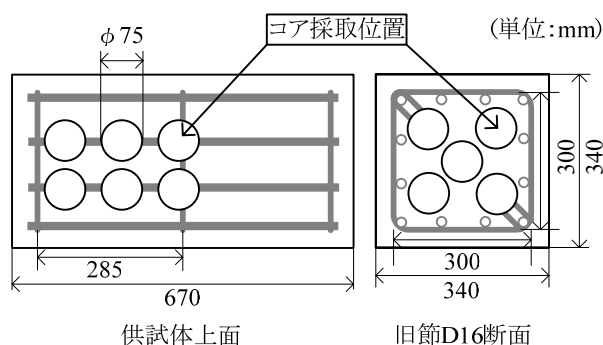


図-4 供試体コア採取位置

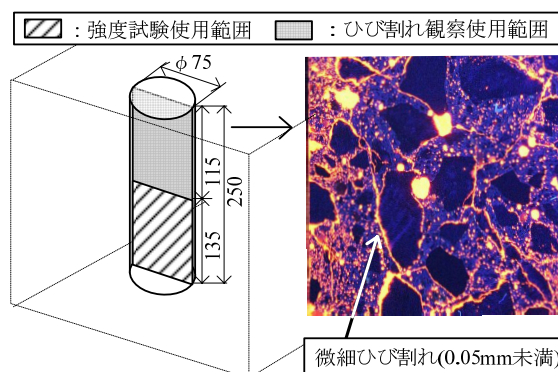


図-5 採取コア内部ひび割れ観察手法

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。次いで case2 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。case3 では、case2 で確認された傾向がより顕著となっており、供試体を貫く連続ひび割れが各面で確認された。

また、case3 では case2 と比較して軸直角方向のひび割れが顕著に確認された。一般的な RC 構造物と比較して主鉄筋比が大きいにもかかわらず、軸直角方向のひび割れが多い理由として、図中破線で示す帯鉄筋位置でひび割れが発生していることから、かぶりが 20mm と小さい状況で ASR の内部膨張を受けたことなどが考えられる。

3.2 採取コア試験結果

図-8 に採取コアの試験結果を示す。case1～case3 に劣化が進行する過程で、静弾性係数の平均値が 17.9, 12.1, $17.5\text{kN}/\text{mm}^2$ と推移した。静弾性係数の健全な値は $30\sim 35\text{kN}/\text{mm}^2$ であり、劣化初期から大きく低下している。また、劣化が進行した case2, case3 においても case1 と比較して大きく低下を生じなかった。以上の 2 点は、既往の検討で指摘されている点と同様の傾向であった。

圧縮強度は、平均値が 42.1, 28.7, $30.2\text{N}/\text{mm}^2$ と推移した。基準強度は $35\text{N}/\text{mm}^2$ であり、劣化初期では基準値を上回る値を示したのち、劣化中期では基準値を 2 割程度下回る値へと大きな低下を示した。ただし、劣化が終局に至った case3 においても低下が 2 割程度にとどまっており、劣化中期から進展が漸減していた。

図-9 に、経年劣化進展に伴う圧縮強度の低下状況を示す。前述したように、ひび割れ密度 $1.78\text{m}^2/\text{m}^2$ の case1 からひび割れ密度 $3.98\text{m}^2/\text{m}^2$ の case2 へと劣化が進行する過程で大きく強度が低下した。既往の研究²⁾では、実構造物から採取したコアで同様の分析を行った結果、ひび割れ密度 $2.0\text{m}^2/\text{m}^2$ を境界として基準値を下回る傾向にあることが指摘されており、同様の傾向であった。また、case2 から case3 へひび割れ密度が 1.5 倍程度増加しているにもかかわらず、圧縮強度の低下進展は極僅かであった。

3.3 コア強度と外観ひび割れの関係

劣化が進行していく過程で圧縮強度の低下が漸減する傾向は過去の研究³⁾においても指摘されているが、詳

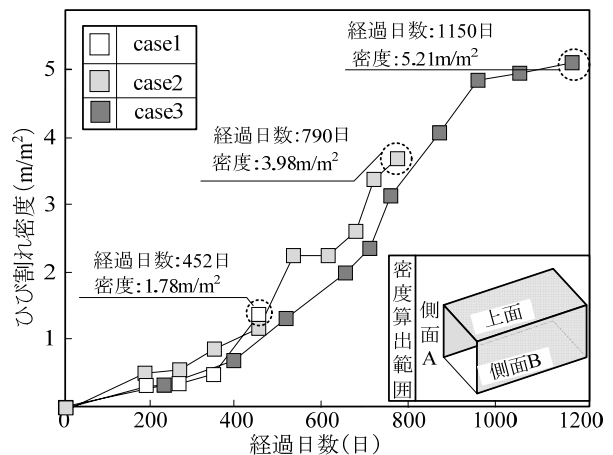
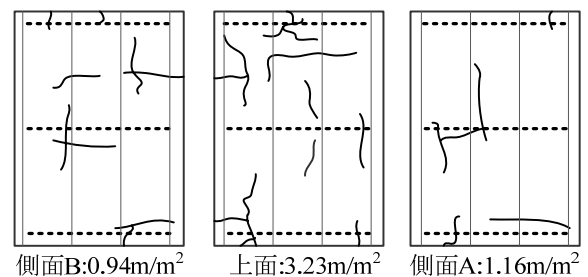
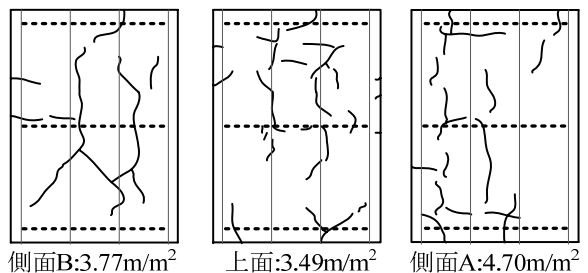


図-6 供試体ひび割れ経年劣化

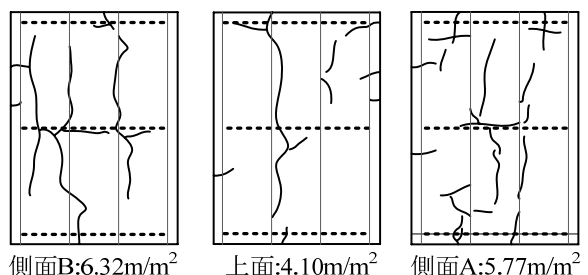
—: 主鉄筋 - - - - : 帯鉄筋 ※対象幅0.2mm以上



case1 : 密度 $1.78\text{m}^2/\text{m}^2$ (経過日数452日)



case2 : 密度 $3.98\text{m}^2/\text{m}^2$ (経過日数790日)



case3 : 密度 $5.39\text{m}^2/\text{m}^2$ (経過日数1113日)

図-7 供試体ひび割れ状況

細に分析可能な小型供試体を使用して分析を実施された例は少ない。

そこで、外観ひび割れの発生状況と内部物性値の低下の関係性を分析するため、図-10に示すように、コア採取位置ごとに一定のひび割れ分析範囲を設定した。図中には、代表として case1 の分析例を示す。分析範囲は、図

中の囲みで示すように、軸直角方向は供試体を貫通するように設定し、軸方向はコア採取位置を中心に 200mm の範囲を設定した。なお、ひび割れの分析は供試体上面、側面 2 面の計 3 面を使用した。

図-10 (1) は、帯鉄筋の間に位置しており、分析範囲内のひび割れ総延長は 1.17m であった。対して、図-10 (2), (3) は帯鉄筋が中央に通る位置にあり、ひび割れの総延長はいずれも 1.06m であった。圧縮強度は (1), (2), (3) のそれぞれ 39.2N/mm², 43.5N/mm², 43.8N/mm² と、外観ひび割れの発生量が多い (1) で圧縮強度の低下が大きくなった。

図-11 に、case1～case3 においてコア採取位置に生じたひび割れと内部物性値の関係を示す。

外観ひび割れの総延長が 1.06～1.39m、圧縮強度 43.8～28.3N/mm² と、外観ひび割れの発生量と圧縮強度が密接に関連することが確認された。しかしながら、総ひび割れ延長が 1.39～1.8m の範囲に関しては、圧縮強度が 31.7～28.3N/mm² と変化が小さく、同程度の強度であった。ただし、供試体全体のひび割れと比較すると、コア採取位置付近のひび割れに着目して分析を実施した結果の方が、内部物性値を正確に評価出来る結果となった。

4. コア採取内部ひび割れ分析

4.1 分析対象

採取コアの圧縮強度が、劣化の進展に伴い低下する現象について詳細に分析を行うため、採取コアを縦断面にカットし、供試体内部の微細ひび割れの経年的な進展を確認した。その際、外観のひび割れと内部物性値の低下の進展に差が生じた点についても検討するために、表-1 に示すように表面から主鉄筋までを (a) かぶり部、主鉄筋から内部を (b) 拘束内部として分類した。

分析は圧縮強度等の試験に使用しない範囲を抽出して、各供試体 3 試料の計 9 試料で分析をおこなった。なお、供試体表面側から深さ 96mm～210mm と大きく差があり、経年劣化に伴う進展を各試料の比較で評価するため、125～145mm と分析範囲が同程度になる case1 の試料 1, case2 の試料 1, case3 の試料 3 を代表として分析に使用した。

4.2 内部ひび割れ発生状況

case3 を使用した内部ひび割れ分析例を図-12 に示す。灰色に示す位置は粗骨材位置であり、粗骨材周囲およびモルタル間に生じた全ひび割れを分析の対象とした。また、ひび割れ幅について、幅の大きなクラックは内部物性値に与える影響が大きいと考えられるため、本検討では破線部の蛍光樹脂塗布により観察可能となる微細ひび割れ（以降、マイクロクラック）と、実線の（図-12 (b) に示す）ひび割れ幅が 0.2mm を超えるひび割れ（目視可能ひび割れ）2 種類に分類した。ひび割れは反応性粗骨

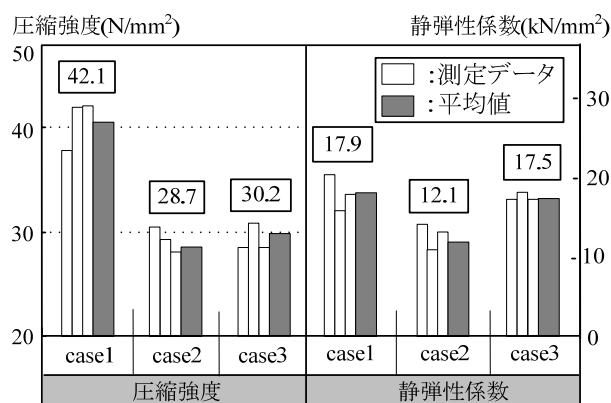


図-8 圧縮強度、静弾性係数試験結果

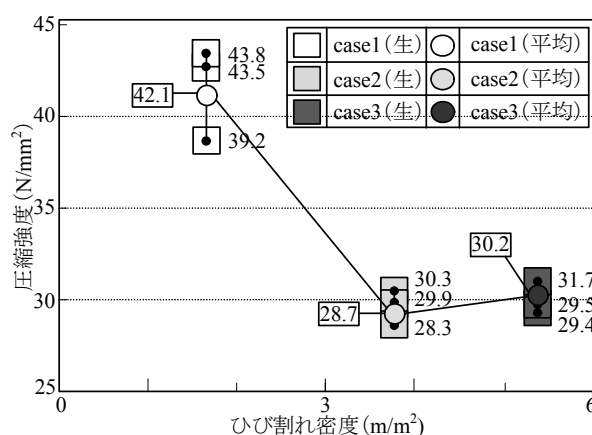


図-9 経年劣化進展に伴う物性値低下

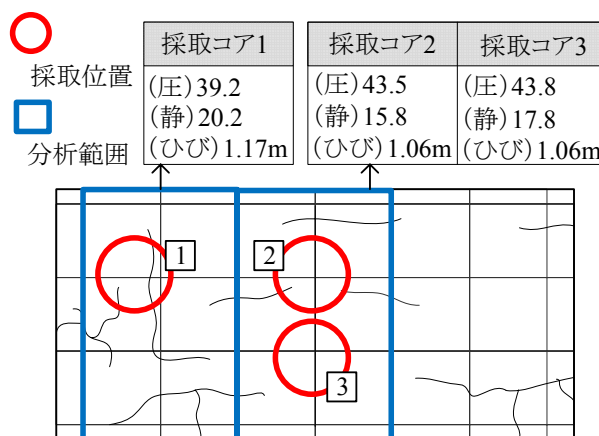


図-10 採取位置による物性値の分析

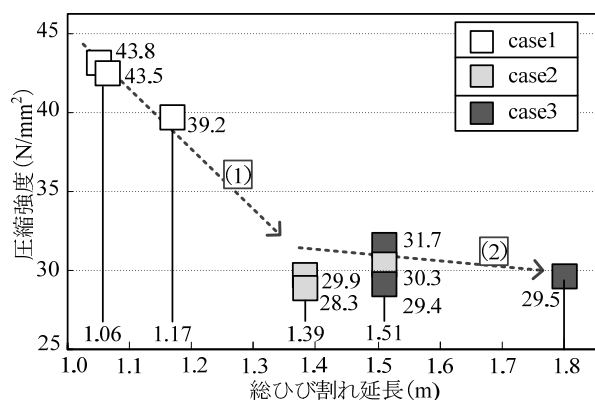


図-11 外観ひび割れと内部物性の関係

材周囲や、モルタル部では骨材間を連続するように発生していた。ひび割れ密度はかぶり部で、発生した全てのひび割れで密度が $89.0\text{m}^2/\text{m}^2$ 、そのうち、目視観察可能なひび割れで密度が $23.2\text{m}^2/\text{m}^2$ 、内部では $110.2, 8.5\text{m}^2/\text{m}^2$ と、ひび割れ発生量はかぶり部、拘束内部で同程度であった。ただし、かぶり部では、目視ひび割れの発生割合が高く、かぶり部で劣化が大きいと考えられる。

図-13 に、内部ひび割れの経年変化として、case1～case3 の内部ひび割れ密度を示す。

まず、case1～case2 間では、全体のマイクロクラックが $40.1\text{--}101.7\text{m}^2/\text{m}^2$ と大きく増加し、かぶり部、拘束内部についても同様の結果であった。目視可能ひび割れは、全体で $5.18\text{--}13.2\text{m}^2/\text{m}^2$ と増加しており、マイクロクラック同様、かぶり部、拘束内部でも傾向は変化しなかった。

次いで、case2～case3 間では、全体のマイクロクラックが $101.7\text{--}105.9\text{m}^2/\text{m}^2$ と顕著な進展は生じておらず、ひび割れ発生が収束傾向にあった。かぶり部、拘束内部も同様であり、外観のひび割れは $3.98\text{--}5.39\text{m}^2/\text{m}^2$ と進展した傾向とは異なっていた。目視可能ひび割れについては全体ではどちらも $13.2\text{m}^2/\text{m}^2$ と進展は生じていなかったものの、かぶり部に着目すると $11.5\text{--}23.2\text{m}^2/\text{m}^2$ と、case2～case3 間で唯一ひび割れ密度の増加が認められた。

4.3 内部ひび割れ進展過程

かぶり部で、大きく目視可能ひび割れが増加した原因について、図-14 に示すように case1～case3 のかぶり部 ($45\text{--}65\text{mm}$) 近傍のひび割れに着目して分析を実施した。

case1 では、マイクロクラックは主に骨材周囲に発生し、かぶり部、拘束内部で発生傾向に差は認められない。また、供試体表面に発生した目視可能ひび割れ (図-14 の A) は、表面から内部へ 10mm 程度までしか進行しておらず、マイクロクラックのみが主鉄筋まで連続していた。

case2 では、反応性の粗骨材周囲のほとんどにマイクロクラックが発生し、モルタル間を連続するように進展が生じた。かぶり部、拘束内部でも case1 と同様で発生傾向に差は認められない。また、表面から内部へ進展するひび割れ (図-14 の B) は、表面から 20mm 程度までと進展が小さく、最大ひび割れ幅は 0.3mm であった。

case3 では、case2 からマイクロクラックの発生が収束していた。しかしながら、表面から内部へ進展するひび割れ (図-14 の C) は、主鉄筋へと到達する約 50mm まで幅が顕著に増加しており、最大幅は 0.6mm に増加した。劣化終局までかぶり部の目視可能ひび割れ密度が増加したのは、表面に発生したひび割れが幅を拡大しながら内部へ進行したためであり、供試体内部のひび割れ発生が収束した後も、外観ひび割れが進行していることが確認された。

表-1 ひび割れ分析試料

単位: mm

		試料1		試料2		試料3	
a: かぶり部		case1		case2		case3	
a	b	40	85	45	77	48	162
b: 拘束内部		case1		case2		case3	
a	b	60	95	62	34	62	53
		case1		case2		case3	
a	b	60	85	60	55	60	85

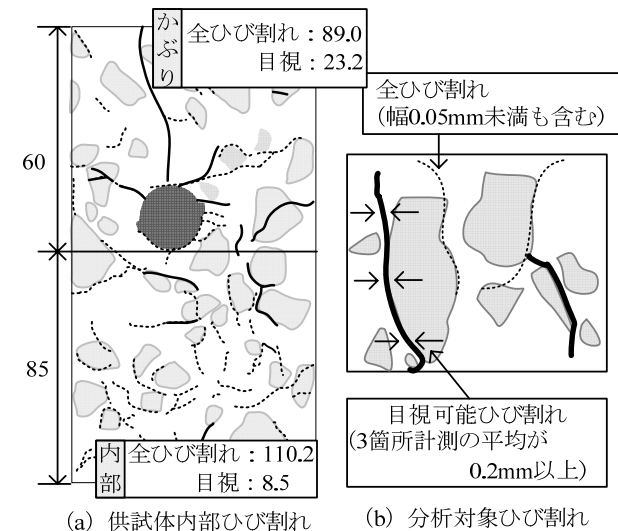


図-12 対象ひび割れと計測例

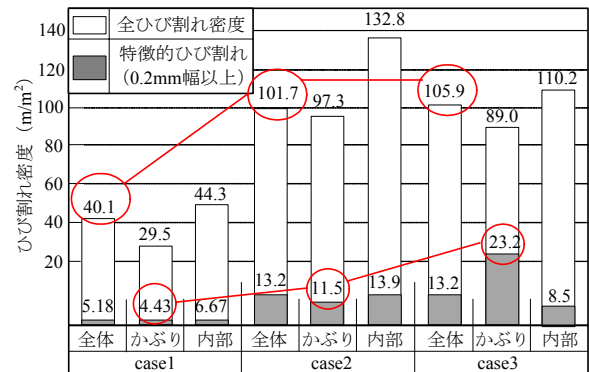


図-13 内部ひび割れの発生状況

図-15 に、本実験供試体における外観、内部の劣化進展傾向を模式図で示す。

図-15 (a) では劣化初期～中期を示しており、供試体かぶり部、拘束内部ともにマイクロクラックの発生量が増加し、圧縮強度の低下が進展する。また、外観では供試体表面でひび割れ量が増加し、内部へと進行する。ここでは、外観、内部ともひび割れが進行し、劣化の進展が認められる。

図-15 (b) では、劣化中期～終局を示しており、内部でマイクロクラック発生が、かぶり部、拘束内部ともに収束し、それに伴い圧縮強度も強度低下が漸減する。そ

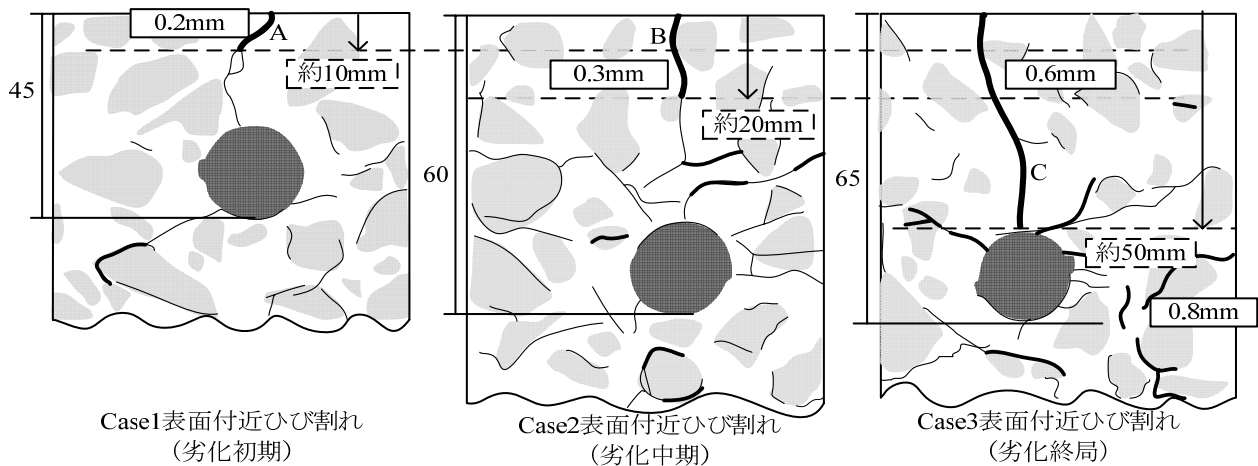


図-14 かぶり付近におけるひび割れ状況

れに対して、外観ひび割れは新規のひび割れ発生は減少するものの、既存のひび割れで幅、延長が進展する。

このように、劣化中期以降で外観、内部の劣化進展に差が生じたり、圧縮強度の低下が漸減する要因の1つとしては、内部は鉄筋の拘束を受けて膨張に伴うひび割れ発生が外観より先に収束することが考えられる。

5. 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 $1.78\text{m}^2/\text{m}^3$) と case2 ($3.98\text{m}^2/\text{m}^3$)、case3 ($5.39\text{m}^2/\text{m}^3$) で採取コア強度の経年変化に着目した結果、劣化中期で $28.7\text{N}/\text{mm}^2$ と基準値に対して2割程低下したが、その後劣化終局時においても $30.2\text{N}/\text{mm}^2$ と顕著な低下は生じなかった。
- (2) 外観のひび割れと、圧縮強度低下の関係に着目すると、コア採取位置近傍の軸方向 $200\text{mm} \times$ 軸直角方向 340mm (計3面) に生じた外観ひび割れ総延長が $1.06 - 1.39\text{m}$ と増加するのに伴い、コアの強度は、 $42.1 - 30.3\text{N}/\text{mm}^2$ と低下することから、両者は密接に関係することが確認された。ただし、劣化が終局付近まで進展した状況は、ひび割れの増加に対して強度低下は顕著でなかった。
- (3) 外観ひび割れと内部の劣化を比較するため、採取コア内部の微細ひび割れを分析した結果、劣化中期以降顕著な進展が生じず、外観劣化の進行程度と傾向が異なった。一方、かぶり部では目視可能なひび割れが終

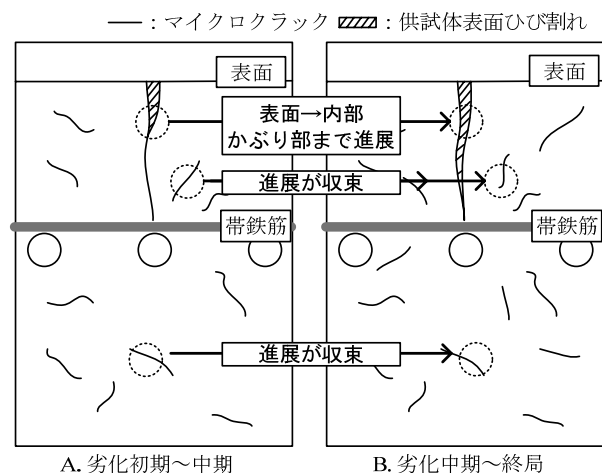


図-15 外観、内部の劣化進展傾向の模式図

局まで進展していた。ここから外観劣化の進展に対して採取コア圧縮強度の低下が劣化中期以降は漸減する要因の1つとしては、圧縮強度の低下に影響を与える内部ひび割れ発生が、鉄筋拘束の影響から表面側よりも早い段階で収束を迎えることが挙げられる。

参考文献

- 1) 増田隆宏, 幸左賢二, 草野昌夫, 合田寛基: ASR 供試体を用いた実構造物内の鉄筋損傷評価, コンクリート年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1207-1212, 2009.7
- 2) 川島恭志, 幸左賢二, 三浦正嗣: 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
- 3) 小林一輔, 白木亮司, 森弥広: ASR を生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する2, 3の考察, 土木学会論文集, No.426/V-14, pp.91-100, 1991.2