

論文 ASR 供試体における内部劣化度評価

柴田 綾野*¹・幸左 賢二*²・草野 昌夫*³・市川 慧*⁴

要旨: ASR による劣化が進展した実構造物での内部劣化状況を把握するため、本検討では、経年変化により外観劣化、内部圧縮強度の低下がともに進展した供試体を用いて、内部ひび割れ性状の観察を実施した。その結果、外観ひび割れの進展が漸減し、内部コアによる圧縮強度も 2 割低下した供試体では内部ひび割れの発生が確認された。また、内部ひび割れは外観と比較してひび割れが短く、骨材に沿うように発生するひび割れが全体の 6 割となり、内部ひび割れの発生が骨材とモルタル部の界面に集中することを確認した。

キーワード: ASR, 外観ひび割れ, 内部ひび割れ

1. はじめに

現在、ASR により劣化を生じたコンクリート構造物において鉄筋破断、圧縮強度の低下の内部損傷が数多く報告¹⁾されており、既往の研究²⁾では内部ひび割れの発生が圧縮強度の低下に起因することが確認されている。しかし、ASR による内部ひび割れについて微細領域における検討は多くされているが、構造物自体の耐力等に影響すると考えられる内部全体のひび割れ発生状況と、外観ひび割れとの関係については明らかになっていないのが現状である。

そこで筆者らは ASR による構造物内部のひび割れ発生状況と外観ひび割れとの関係について検討を行うため、反応性骨材を用い、実構造物を模擬した小型供試体をシリーズ I, II で 3 体ずつ作製し長期曝露試験を実施している(図-1 参照)。

本研究ではシリーズ II における外観劣化度大の case5 供試体を使用して、外観ひび割れと内部ひび割れの観察、比較を詳細に行った。なお、内部ひび割れの評価は、後述するφ190mm 大型コア(以下、大型コアと表記)のコア側面に発生したひび割れで行った。

また、実構造物でのコア削孔による内部劣化調査は躯体を傷つけるため、小径コアによる調査が望まれている。そこで小径コアによる実構造物内部ひび割れ調査の適用性について検討するため、大型コアのひび割れ観察結果とφ24.5mm 小径コア(以下、小径コアと表記)による棒状スキャナーを用いたひび割れ観察結果を比較した。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

(1) 供試体形状

case1~6 の供試体形状は、ASR を生じ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

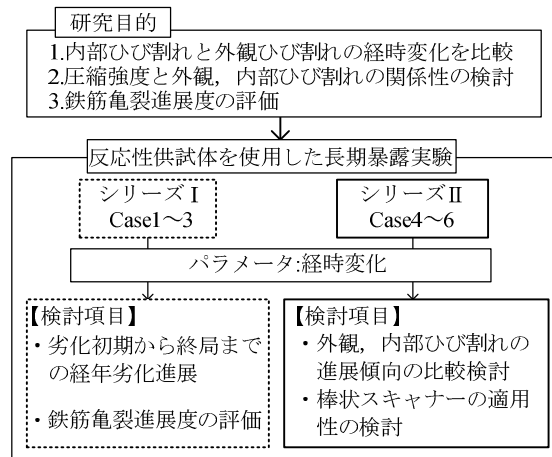


図-1 検討フロー

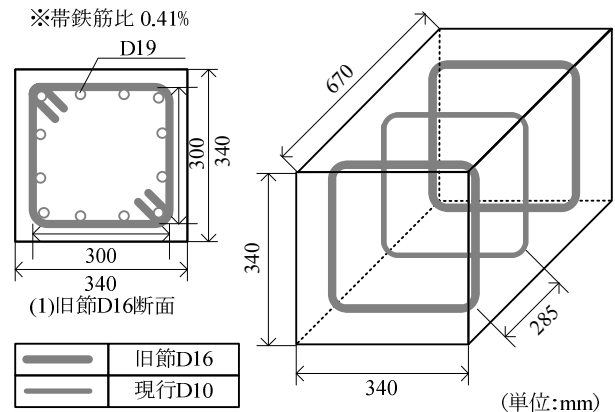


図-2 供試体形状

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供試体を作成した。

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基に 1/8 スケールとした。供試体両端面の帯鉄筋には、実構造物からはつり出した旧節 D16 鉄筋を曲げ加工半径 1.0d で加工して配置

*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 工学部 建設社会工学科

した。また、経年変化を考慮し、実構造物における竣工後6年経過相当分のひびずみ時効を与えている。なお、模擬した実橋脚と帯鉄筋比を合わせるため、供試体中央部分には現行D10鉄筋を使用した。

(2) 使用材料および供試体作成

本実験で使用したコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリート配合はW/C=46%, s/a=43%とし、case1~6の設計基準強度は、単柱式橋脚PC梁の35N/mm²とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、反応性骨材は細骨材に長崎県産砕砂、粗骨材に北海道産砕石を使用し、岩種はどちらも安山岩である。また、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/m³に設定し、NaClを添加した。供試体は打設後1日で脱型し、28日間湿布養生を行った後に屋外曝露を開始した。なお、供試体は、端面が北側、南側、側面が西側、東側に向くように設置した。

(3) コア採取方法

図-3に内部ひび割れ観察に使用した大型コア、小径コアの採取位置を示す。大型コア採取位置は供試体端面の中心とし、コア長さは670mmとした。小径コア採取位置は、帯鉄筋内で大型コアに重ならない箇所とし、両端面から各7本ずつコアの採取を行った。採取深さは、後述する棒状スキャナーのコア側面観察範囲が210mmであったことから、供試体端面より210mmの深さとした。

2.2 測定項目

本実験では、ASR劣化が生じた供試体における外観ひび割れと内部ひび割れの発生状況を比較するため、両者のひび割れ幅、長さ、本数、角度の計測を行った。

(1) ひび割れ計測方法

図-3にひび割れ計測方法を示す。外観ひび割れ観察箇所は端面と下面を除いた東面、西面、および上面とした。内部ひび割れ観察箇所は大型コアの表面と小径コア穴側面とし、大型コアは目視、小径コア穴側面は棒状スキャナーによる画像計測によりひび割れ観察を行った。外観および内部ひび割れ計測は、図中(a)に示すように、ひび割れの端点同士を直線で結び、その直線の長さをひび割れの長さ、その直線の主鉄筋方向からの傾きをひび割れ角度 α とした。ひび割れ幅は、1つのひび割れの最大ひび割れ幅、最小ひび割れ幅、最大と最小の中間程度の幅の3点を計測し、その3点の平均値をひび割れ幅とした。なお、外観ひび割れは経時変化におけるひび割れ密度の算出には幅0.2mm以上、コア削孔時の最終状況のみ幅0.1mm以上のひび割れを対象にひび割れ観察を行った。また大型コア、小径コアの内部ひび割れも外観の最終状況と同様に幅0.1mm以上のひび割れを対象としている。

表-1 コンクリート配合

単位量 (kg/m ³)							
水 W	セメント C	S		G		塩分 NaCl	AE 減水剤
		非反応	反応	非反応	反応		
175	381	287	431	509	509	11.75	1.142

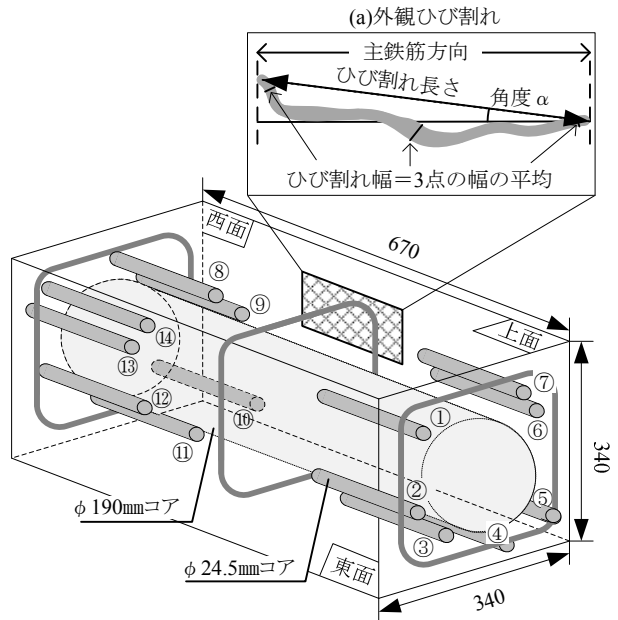


図-3 ひび割れ観察箇所とひび割れ計測方法

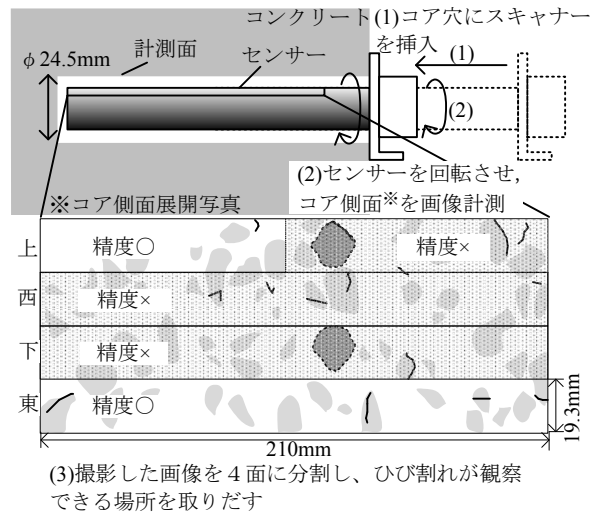


図-4 小径コア (φ24.5mm) ひび割れ撮影

(2) 小径コアひび割れ撮影方法

図-4に小径コアの内部ひび割れ撮影方法を示す。本実験での小径コアのひび割れ観察は、コア穴の側面をセンサーで画像計測する方法を用いた。具体的な方法としては、コア穴削孔後、内部を洗浄・乾燥させ、図中(1)に示すように棒状スキャナーをコア穴に挿入し、図中(2)に示すように内部で回転させることで削孔したコア穴の側面の状態を展開図として画像計測した。なお、このス

キャナーで計測できる最少ひび割れは幅 0.1mm であり、目視による観察と同等の分解能を有する。

3. 外観と内部のひび割れ性状比較

本章では ASR による外観、内部ひび割れの幅、長さ、発生本数に着目し、両者のひび割れ発生状況について比較分析を行った。なお、内部ひび割れについては大型コアを用いて分析した。

3.1 供試体劣化状況

本研究で対象とする case5 供試体の ASR 劣化進展状況について外観のひび割れ密度で評価した結果を case1~6 供試体の結果と併せて図-5 に示す。なお、供試体では劣化が顕在化し、ひび割れ幅の進展が定常状態となる幅が 0.2mm との研究²⁾もあることから、経時変化におけるひび割れ密度の算出には幅 0.2mm 以上を対象とした。ひび割れ密度は、供試体外観の上面、西面、および東面の平均で評価している。

図より、本研究で対象とする case5 供試体では、屋外曝露開始後 1169 日経過した時点で 5.01 m/m² のひび割れ密度が算出された。図-5 に示す case1~6 供試体の傾向と併せて評価すると case5 供試体は、実構造物において外観ひび割れ密度を指標に定義される劣化度大 (5.00 m/m² 以上) の状態³⁾であり、また外観ひび割れがほぼ定常状態に達した供試体であると考えられる。

ここで、劣化度大の状態では内部コンクリートにおいても顕著な劣化が生じているものと考えられる。したがって、劣化度中の case4 供試体 (ひび割れ密度 3.86m/m²) から得られた圧縮強度と case5 の圧縮強度を比較することによって ASR 供試体の経年変化に伴う圧縮強度低下状況として評価する。両者の比較を図-6 に示す。なお、圧縮強度計測には前述した大型コアを使用した。圧縮強度は case4, case5 でそれぞれ 37.2N/mm², 29.4N/mm² となった。設計基準強度は 35N/mm² であり、劣化度中の case4 では基準値と同程度の値を示したのに対し、劣化度大の case5 では基準値を 2 割程度下回る値を示した。このことから、case5 供試体においては外観ひび割れの進展と同様に内部においても劣化が進展した供試体であることが確認された。

3.2 外観ひび割れ性状

図-7 に代表例として case5 供試体東面の外観ひび割れ損傷図を示す。ここでは内部とのひび割れの比較をより詳細に行うため、前述したように幅 0.1mm 以上のひび割れを対象としている。東面外観のひび割れ密度は 11.6m/m² であり、ひび割れは連続性を持ち、枝分かれしているものが多く確認された。また、ひび割れの発生方向については、主筋方向に沿ったものが多く認められ、主鉄筋による拘束を受けていることがわかる。

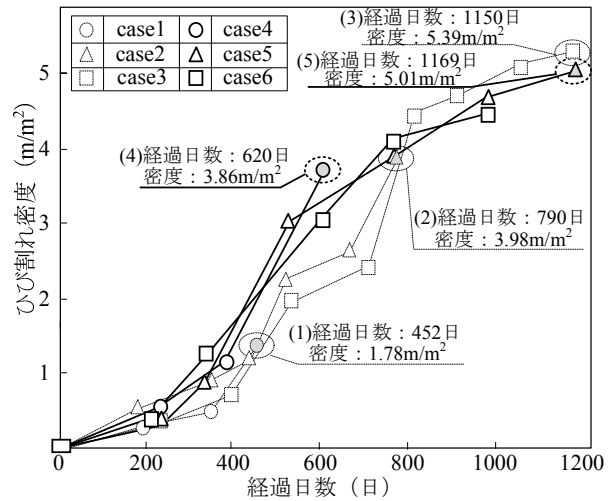


図-5 外観ひび割れ密度の経時変化

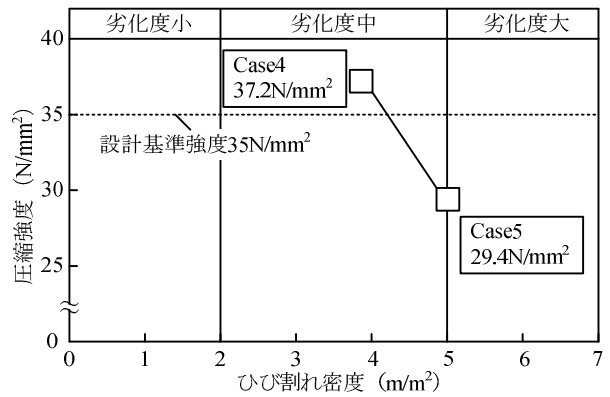


図-6 経年劣化に伴う圧縮強度低下状況

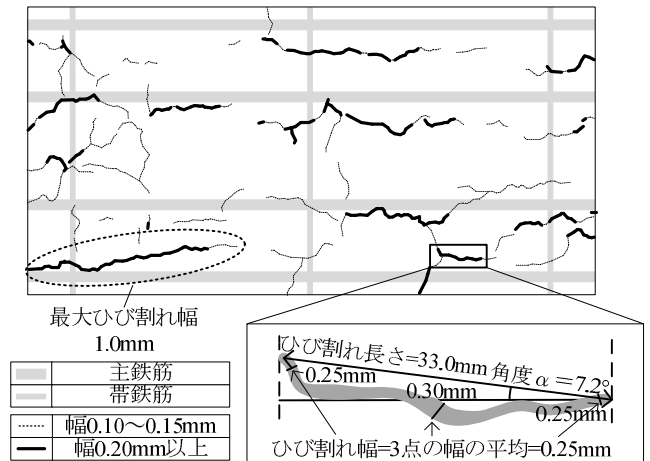


図-7 東面外観ひび割れ最終状況

図-8 に東面外観ひび割れの幅-長さ関係とひび割れ幅ごとの本数を示す。なお、ひび割れ幅、長さの測定方法は第 2 章で述べたとおりである。外観の東面では図中 (a) に示すように 79 本のひび割れが確認された。ひび割れ幅の最大値と平均値はそれぞれ 1.0mm, 0.21mm であり、ひび割れ長さの最大値と平均値はそれぞれ 109mm, 30.1mm であった。その内、幅 0.2mm 未満のひび割れが全体の 59% (47 本) を占めていた。

3.3 大型コアを用いた内部ひび割れ分析

(1) 大型コアひび割れ分析方法

図-9 に大型コアのひび割れ損傷図と測定方法を示す。なお、ひび割れ計測方法は外観ひび割れと同様である。内部ひび割れは骨材周りに発生しているもの（骨材を貫通したものを含む）と、モルタル部に発生しているものの2つに区分した。ひび割れ観察面については、外観と同様にコアを上、下、西、東の4面に分けてそれぞれの面でひび割れ計測を行った。ここで、ひび割れ発生本数については、外観ひび割れ観察面と内部ひび割れ観察面で対象面積が異なるため、直接外観ひび割れ本数との比較が行えない。そこで、以下の式(1)を用いて外観測定側の1側面に相当する面積に換算し、換算前本数Nから換算後本数N'を算出した。

$$N' = \frac{N \times \text{外観面積}(340\text{mm} \times 670\text{mm})}{\text{内部対象面積}(150\text{mm} \times 670\text{mm})} \quad (1)$$

ここに

N：換算前本数

N'：換算後本数

(2) 内部ひび割れ性状

図-10 に大型コアの東面におけるひび割れの幅-長さ関係とひび割れ幅ごとの本数を示す。大型コア東面では図中(a)に示すように46本のひび割れが確認された。内部ひび割れ幅の最大値と平均値はそれぞれ0.8mm, 0.15mmであり、内部ひび割れ長さの最大値と平均値はそれぞれ31.0mm, 13.2mmであった。ひび割れ幅においては、幅0.2mm未満のひび割れ本数は図中(b)に示すように15本で全体の33%であったが、幅0.6~0.8mmの大きなひび割れも多く発生しており、ひび割れ幅は、ばらつきがみられた。また、全46本のひび割れの内、骨材まわりとモルタル部のひび割れがそれぞれ34本、12本と骨材まわりのひび割れが74%を占めており、供試体内部は骨材まわりのひび割れが主要なひび割れであった。

3.4 外観ひび割れと内部ひび割れの比較

図-11 に内部と外部ひび割れのデータ比較を示す。図中(a)より外観ひび割れと内部ひび割れの外観面積換算後の発生本数はそれぞれ79本、110本、(b)より平均幅は0.21mm, 0.35mm, (c)より平均長さは30.4mm, 13.2mm, (d)より幅0.1mm以上を対象としたひび割れ密度は11.6m², 6.1m²であった。

ここで、平均長さ、平均幅、発生本数に差が生じた理由について考察を行う。外観ひび割れは、供試体表面では拘束がなく内部主鉄筋による拘束の影響のみを受けているため、ひび割れが連結して長さが進展していくと考えられる。しかし、内部においては主鉄筋に加えて帯鉄筋の拘束を受けており、内部ひび割れの長さが外観と比

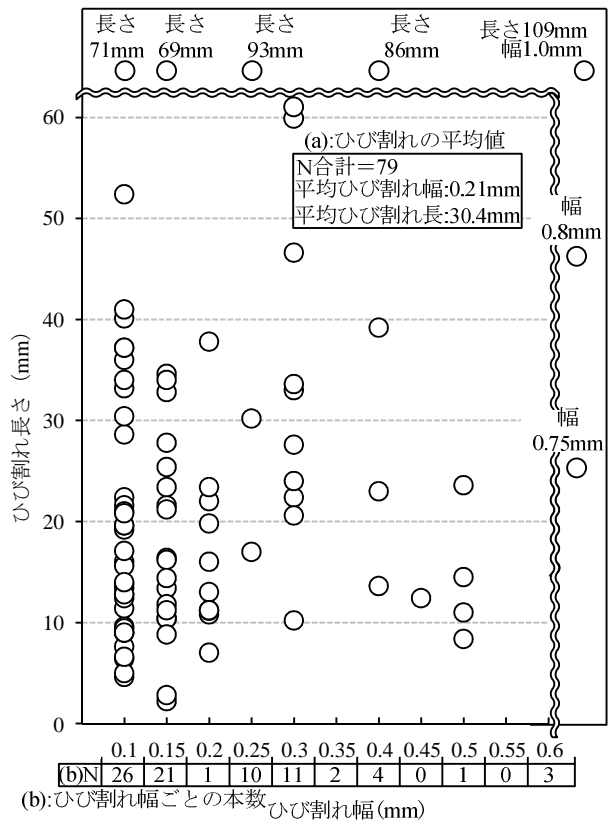


図-8 東面外観ひび割れの幅-長さ関係

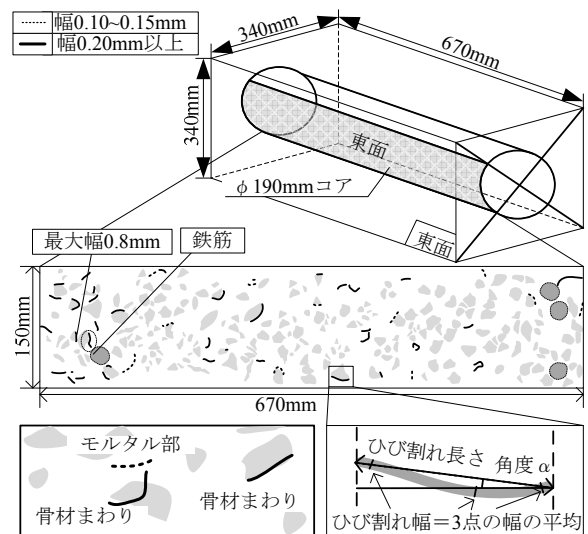


図-9 大型コアひび割れ損傷図

較して進展しにくいと考えられる。ここで、前述したように内部ひび割れにおいて骨材まわりが74%と主であったことから、骨材まわりのひび割れについて詳細に分析を行った結果を図-12に示す。既往の研究²⁾より本供試体に使用している安山岩は、骨材の周辺からASR反応が進行することから、骨材まわりにひび割れが発生しやすいとされている。本検討においても、図に示すように内部ひび割れの内、(a)骨材表面に沿うひび割れが65%、(b)骨材中央部を貫通するひび割れが9%と骨材表面において多くのひび割れが確認された。以上より、内部ひび

割れ長さは骨材寸法に依存し、かつ、主鉄筋と帯鉄筋の拘束により長さが進展しにくいいため、外観ひび割れ長さとの差が生じたと考えられる。

4.内部ひび割れ比較(大型コア・小径コア)

実構造物でのコア削孔による内部劣化調査においては、躯体への影響が少ない小径コアによる調査が望ましい。そこで、本章では棒状スキャナーを用いた小径コアによる内部ひび割れ観察を実施し、大型コアとのひび割れ性状を比較することで棒状スキャナーの内部ひび割れ観察への適用性について検討を行った。

4.1 小径コアひび割れ算出方法

図-13に小径コアのひび割れ測定結果を示す。小径コアのひび割れ測定方法は第2章で述べたとおりである。また本供試体では、大型コア、小径コア共に帯鉄筋内部から採取していることから、採取位置による拘束の差は小さいと考えられる。前述した図-4に示すように、棒状スキャナーから得られる画像は77.0mm×210mmの大きさであるが、大型コアと同様に、上面、下面、西面、東面の4面に分割し、一面の寸法を19.3mm×210mmとした。また、小径コアによるひび割れ観察箇所は図-3に示すとおりである。ここで、搾孔したコア穴のサイズが棒状スキャナーに最適なサイズよりも多少大きかったためセンサーの焦点距離が合わず、精度の低い面が存在した。そこで北側と南側それぞれ7本の計14本のコアから画像の精度が高い場所を抜粋した結果、図-13に示すコア番号の16面となった。図中の網掛け部分は画像の精度が悪かったため除いた部分であり、抜粋した16面のひび割れ損傷図から、ひび割れの長さ、幅、角度、本数の算出を行った。また、ひび割れ本数は、面積換算できるものとし、前述した式(1)に示す本数換算法を用いて供試体外観面積340mm×670mmでの発生本数に換算した。なお、小径コアにおける内部対象面積は図-13に示す精度の高い16面の合計面積(19.3mm×1427mm)とした。

4.2 小径コア内部ひび割れ性状と大型コアとの比較

図-14に小径コアのひび割れ長さ-角度関係を示す。ひび割れ長さの最大値、平均値はそれぞれ15.0mm、6.3mmであった。ひび割れ発生本数は16本となり、(b)に示すように、その内、長さ4~6mmのひび割れが7本と最も多く発生していた。また、ひび割れ角度に着目すると、ひび割れ角度の平均値は46.1°となり、0~10°のひび割れが4本と最も多かったが、(a)に示すように45~90°のコア採取方向のひび割れが10本あり、角度についてはばらつきが生じていた。また、ひび割れ長さが最大のもはコア採取方向(主鉄筋方向)に発生しており、最小のものはコア採取方向と直角方向(主鉄筋直角方向)に発生していた。

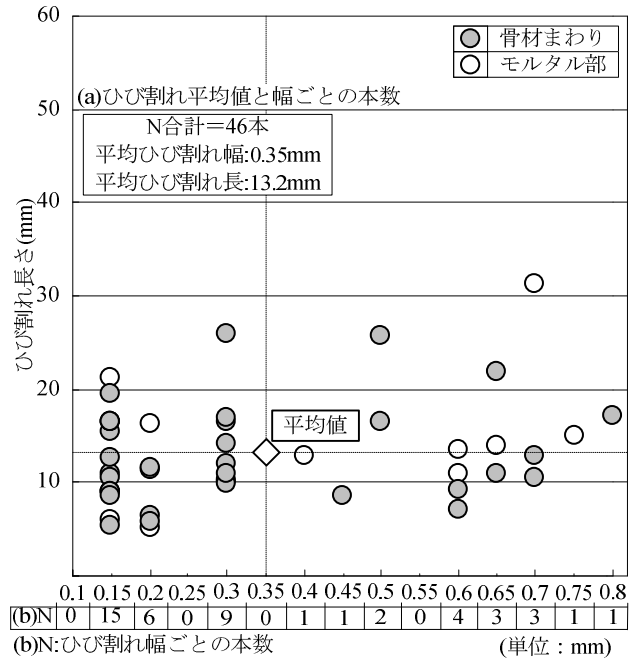


図-10 大型コア東面幅-長さ関係

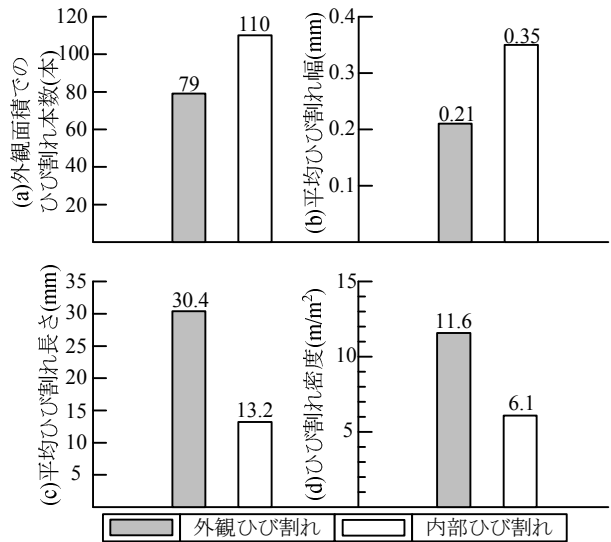


図-11 内部と外部ひび割れのデータ比較

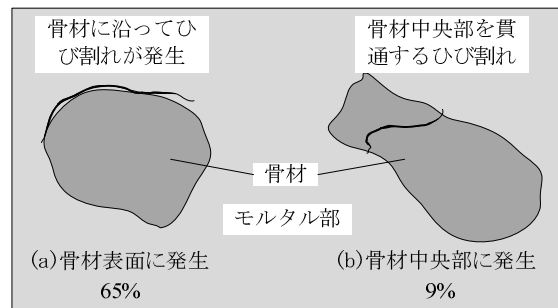


図-12 内部ひび割れ分析結果

以上の結果を踏まえ、大型コアと小径コアに発生したひび割れの比較を行う。大型コアと小径コアの平均ひび割れ幅はそれぞれ0.35mm、0.21mm、平均ひび割れ角度は30.4°、46.1°、外観面積換算後の本数は110本、141本となり、ひび割れ幅、角度、本数については大型コアと

同様の値となっており、スキャナーによる内部ひび割れ観察の有効性が確認された。しかし、大型コアと小径コアの平均ひび割れ長さはそれぞれ 13.2mm, 6.3mm となり、ひび割れ長さについては約 2 倍の差がみられた。

ここで図-15 に大型コアと小径コアのひび割れ長さが異なる場合について示す。図中(a), (b)はそれぞれ小径コア、大型コアに骨材まわりのコア採取方向と直角方向のひび割れが生じた場合を示している。ここでコア採取方向のひび割れは、コア径の違いによるひび割れ長さの差は生じにくいと考えられるため、コア採取方向と直角方向のひび割れのみを示す。図に示すコア採取方向と直角方向のひび割れは、(a)に示すように、コア径の曲率が大きい場合（小径コア）にはひび割れの一部しかコアに重ならないため、ひび割れ長さが短く計測されることがわかる。また、小径コアのひび割れにおいて 45° 以下（コア採取方向）と 45° 以上（コア採取直角方向）のひび割れ長さはそれぞれ 8.0mm, 5.6mm となり、コア採取直角方向のひび割れ長さが短くなることを確認した。

この結果から、棒状スキャナーを用いた小径コアによるひび割れ観察は、コアを採取した方向に影響を受け、コア採取方向と直角方向のひび割れは短く計測される場合があると考えられる。

5. まとめ

反応性骨材を使用した小型供試体の長期曝露による劣化度大の case5 供試体を用い、外観に生じるひび割れと内部に生じるひび割れの比較、棒状スキャナーの内部ひび割れ観察への適用性を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 反応性骨材供試体において外観、内部のひび割れ観察を行った。その結果、ひび割れ性状、特に長さにおいて外観、内部でそれぞれ 30.4mm, 13.2mm と約 2 倍の差が生じることを確認した。その理由として、内部は外観と比較して拘束力が大きいこと、内部ひび割れ長さが進展しにくいこと、内部ひび割れは骨材寸法に依存することが考えられる。
- (2) 小径コアによる内部劣化観察の適用について検討を行うため、棒状スキャナーを用いた内部ひび割れ観察を実施し、棒状スキャナーで内部ひび割れ発生の有無を確認できることを明らかにした。ただし、コアの曲率の差により、ひび割れ長さに差が生じる場合があると考えられる。

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

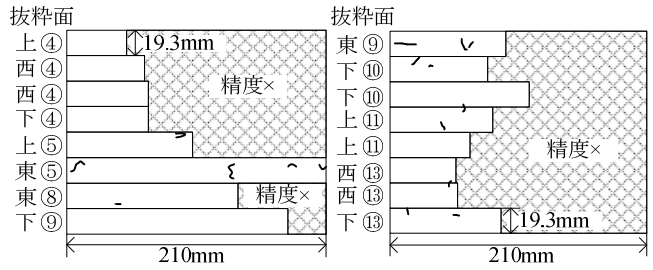


図-13 小径コアひび割れ測定結果

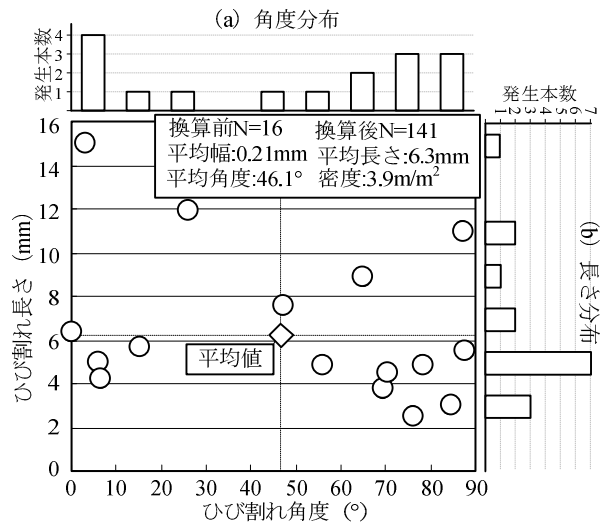


図-14 小径コアひび割れ幅-長さ関係

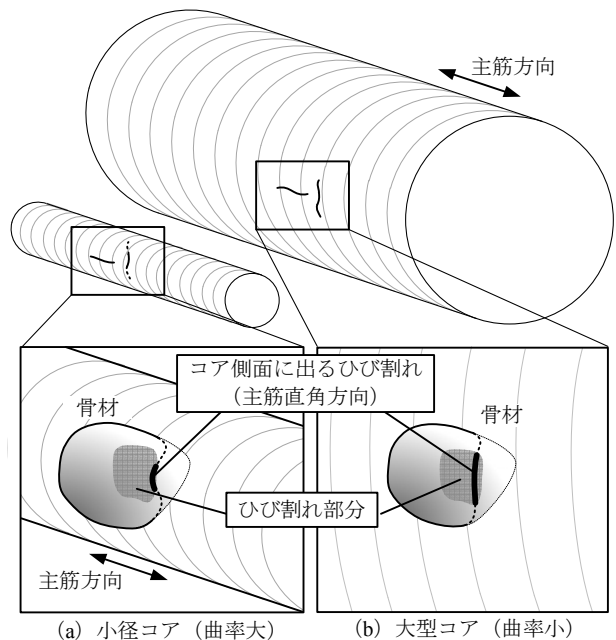


図-15 コア径の違いによるひび割れの違い

- 2) 幸左賢二, 久利良夫, 川島恭志, 三浦正嗣：ASR 構造物より採取したコアの力学的特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.54A, No. 0, pp.750-758, 2008.
- 3) 川島恭志, 幸左賢二, 佐々木則一, 眞野裕子：実構造物における ASR 損傷度の定量的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28A, No. 1, pp.737-742, 2006