

論文 ASR 供試体を使用した鉄筋損傷進展度の評価

草野 昌夫^{*1}・幸左 賢二^{*2}・秋吉 秀一^{*3}・合田 寛基^{*4}

要旨：本検討は、アルカリ骨材反応（以下 ASR）劣化を生じた実構造物における変形性状を把握し、鉄筋損傷との関係性を評価することを目的とし、反応性骨材を使用した供試体を用いて外観のひび割れ状況、変形状況と鉄筋損傷の関係性を検討した。その結果、実験供試体では劣化の進展に伴い外観が円弧変形することおよび、鉄筋曲げ加工部での亀裂の進展を確認した。一方、鉄筋はリブ曲率が急な旧鉄筋であるにも関わらず、波節形状であるため、終局状態でも鉄筋の亀裂進展は、鉄筋径の 6% 程度に留まることを明らかにした。

キーワード：ASR、鉄筋破断、節形状

1. はじめに

ASR による帯鉄筋の破断は、最近の研究により帯鉄筋の曲げ加工に伴い発生する微細な初期亀裂が ASR により生じる膨張圧によって、亀裂が進展し破断に至ると推定されている¹⁾。筆者らは急速膨張させた以下に示す模擬試験により上記の鉄筋破断に至るメカニズムが妥当であることを明らかにしている。

まず中空矩形断面に鉄筋リブの立ち上がりが鋭角で、曲げ加工により最大鉄筋径の 2% 程度の初期亀裂が発生する帯鉄筋を配置した。ついで矩形断面内空に膨張コンクリートを打設し、内部膨張圧により矩形断面が円弧状に膨張し、それに伴い隅角部の帯鉄筋が拵がり、ある特定の鉄筋で亀裂の進展、破断を確認している。このように、鉄筋破断現象は再現されたものの、実構造物の ASR による劣化進展は長期的であり、経時的な構造物の劣化の進行と鉄筋亀裂の進展の関係性については現在まで十分には検討できていない。

そこで本研究では図-1 に示すように、実構造物に対して断面を 1/8 スケールとし、コンクリート強度と引張主鉄筋比が実構造物と等しくなるように作製し、長期暴露状況での劣化度の評価を行った。具体的には、同一条件で 3 体の小型供試体を作製し、ASR による劣化状態を劣化度小（ひび割れが進展している状態、ひび割れ密度は 2m/m^2 以下）、劣化度中（ひび割れが継続的な進展をしている状態、ひび割れ密度は $2\sim 5\text{m/m}^2$ 程度）、劣化度大（新しいひび割れの発生が見られない状態、ひび割れ密度は 5m/m^2 以上）と仮定し、各劣化度での経年劣化に伴うコア物性値、鉄筋亀裂の進展傾向を評価するとともに、供試体の変形性状を確認し、これらの関係性について検討を加えた。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

本研究に使用した供試体形状を図-2 に示す。本実験供試体は、既往の検討¹⁾と同様の供試体の寸法である $340\times 340\times 670\text{mm}$ の直方体形状、かぶり厚は 20mm として作製した。反応性骨材としては、粗骨材に北海道産、細骨材に長崎県産砕砂を使用し、岩種はどちらもとも安山岩である。また、ASR 促進のため、コンクリートの等価アルカリ量を 8kg/m^3 に設定し、NaCl を添加している。なお、供試体の設計基準強度は実橋脚梁部と同程度の 35N/mm^2 、コンクリート配合は $W/C=46\%$ 、 $s/a=43\%$ とした²⁾。帯鉄筋比は 0.41% で、断面に合わせ矩形に加工した現行 D10 鉄筋と、昭和 60 年以前に建設された実構造物よりはつりだされた旧節 D16 鉄筋を使用した。

本実験は 3 供試体を用いて、実構造物の小程度の劣化、中程度の劣化、大程度の劣化に対応する状態で試験を行っており、小程度の劣化状態で試験を行った供試体を case1、中程度の劣化状態の供試体を case2、大程度の劣化状態での供試体を case3 としている。

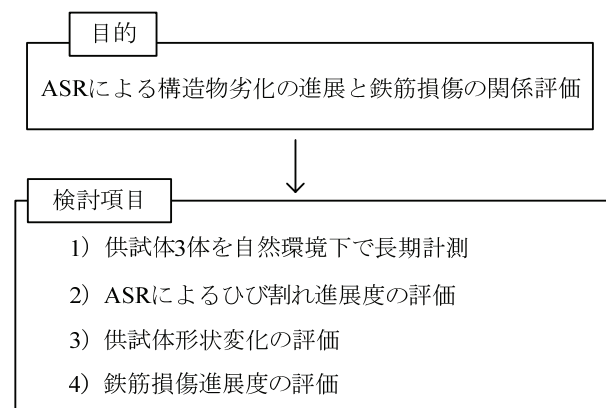


図-1 検討フロー

*1 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）

*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 九州工業大学大学院 工学部建設社会工学科

*4 九州工業大学大学院 工学研究室機能システム工学専攻 工修（正会員）

2.2 劣化進展状況

図-3 に供試体のひび割れ密度の経時変化を示す。ひび割れ密度は下面を除く 3 側面を算出に使用している。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³⁾もあることから、幅 0.2mm 以上のひび割れを算出対象としている。なお、図中のグラフではひび割れ密度は 3 側面の平均値を示す。case1, 2, 3 は同時期に暴露試験を開始しており、ひび割れ進展傾向や発生傾向は同様であった。case1 では経過日数 452 日の時点でひび割れ密度 1.78m/m²、case2 は経過日数 790 日でひび割れ密度 3.98m/m²、case3 では経過日数 1113 日で 5.39m/m²と増加傾向は認められるが、1000 日以降は夏期であるにも関わらずひび割れ進展が増加せず定常状態に至っている。

図-4 に供試体 case1, 2, 3 の代表側面 B のひび割れ発生状況を示す。case1 ではひび割れ密度は 0.94m/m²であるが、ひび割れの発生方向には主鉄筋軸方向、軸直角方向で差異は見られない。case2, 3 ではひび割れ密度はそれぞれ 3.77, 6.32 m/m²と劣化が進行しており、ひび割れの発生方向は、主鉄筋方向に卓越しており、またひび割れは連続性を持っている。

3 供試体について詳細に経年劣化に伴うひび割れの発生傾向を確認するため、供試体側面を主鉄筋軸方向に 68mm 間隔で 5 等分し、各範囲におけるひび割れ発生量の比較を行なった。図-5 には供試体 case1, 2, 3 のひび割れ発生位置とひび割れ密度の関係を示す。ここでは、軸方向に対して 45° 以内のひび割れを検討対象としている。

劣化小程度である case1 では、側面 B の隅角部（範囲 1, 5）、側面 A の範囲 4 で幅 0.2mm 以上のひび割れが生じていない。また、上面の範囲 1 で 4.99m/m²、範囲 4 で 6.11m/m²、側面 B の範囲 4 で 5.83m/m²とひび割れが比較的多く発生している箇所もあり、ASR 膨張が初期の段階では、幅の広いひび割れ箇所の発生が各側面で異なる傾向にあった。劣化中程度である case2、劣化大程度である case3 では、各範囲ともひび割れ密度の増加が確認できる。しかしながら、ひび割れ発生範囲に着目すると case2, 3 では隅角部の範囲（1, 5）に比べて中央部範囲（2, 3, 4）ではひび割れ密度は相対的に大きい傾向となっている。具体例で示すと case3 の側面 B では範囲 1, 5 がそれぞれ、0, 10.17m/m²であるのに対して、範囲 2, 3, 4 ではそれぞれ 13.29, 4.53, 12.37m/m²と平均的には 3 倍ものひび割れ密度が中央部付近で集中して発生する傾向となった。

3. 断面変形に関する考察

3.1 変形計測概要および計測手法

供試体の経年的な外観変形の進展を評価するため、前

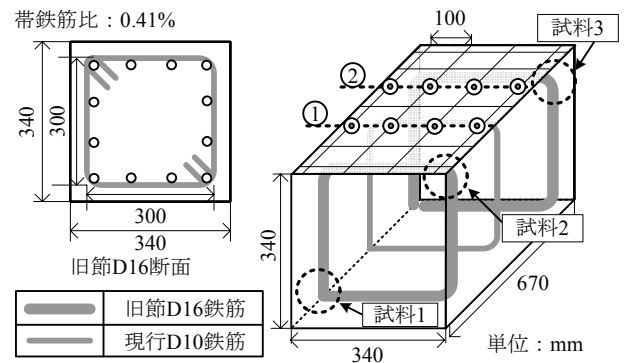


図-2 供試体形状

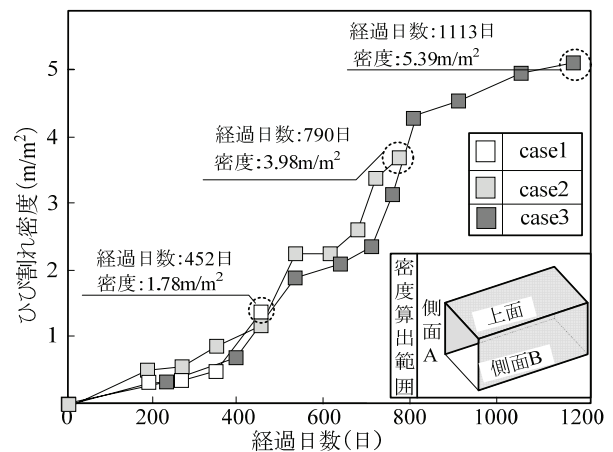
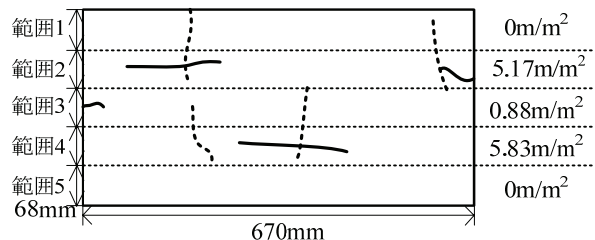
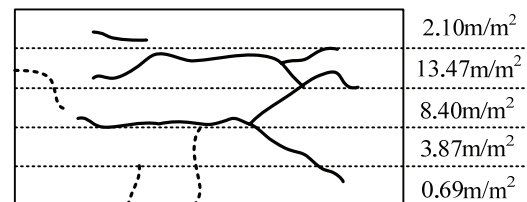


図-3 供試体ひび割れ密度経過時間変化

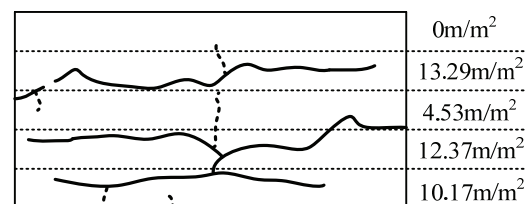
Case1: 側面B (ひび割れ密度0.94m/m²)



Case2: 側面B (ひび割れ密度3.77m/m²)



Case3: 側面B (ひび割れ密度6.32m/m²)



----- 主鉄筋軸直角方向 ——— 主鉄筋軸方向

図-4 代表側面でのひび割れ発生状況

述の図-3 でひび割れ密度 5.39m/m^2 まで長期計測を行った case3 を使用して変形計測を実施した。

計測時期は、劣化中程度～劣化大程度にあたるひび割れ密度 4.18m/m^2 で 1 回目計測（経過 790 日）、密度 4.80m/m^2 で 2 回目計測（経過 995 日）、密度 5.39m/m^2 で 3 回目計測（経過 1113 日）とした。また、計測精度を確認するため 3 回目計測時に同一箇所でも 3 度（A, B, C）計測を行い、計測精度の評価に使用した。

計測方法を図-6 に示す。ASR 膨張により生じる変形には、隅角部の角度進展を伴う円弧変形と水平方向・鉛直方向に拡がる一様変形の 2 種類が考えられ、本研究では帯鉄筋曲げ加工部の鉄筋亀裂進展と密接に関係する円弧変形に着目して計測を行った。供試体は設置状況の差によって傾いていることから、本検討における変形量は以下の手順で算出をおこなった。

まず、供試体から 100mm 程度離れた位置に計測の基準とした下げ振りを設置し、供試体までの距離を 50mm 間隔で計測を行った。次いで、供試体の傾きをキャンセルするため、供試体の上下端点を直線で結んで変形量 0mm の線を作成した。最後に、変形量 0mm の線に対する基準線からの距離で差分をとり、各計測点における変形量とした。

本検討における変形計測対象は、図に示すように供試体全長 670mm に対して半分の 335mm の位置とし、下面を除く 3 面で計測を行った。

3.2 変形計測代表例

図-7 に変形計測の代表として、3 回目計測（C）の結果を示す。各計測面で、最大変位はそれぞれ 0.65, 0.93, 0.45mm と最大で約 1.0mm の変形を生じた。いずれの面も最大変形の発生箇所は側面中央部であり、断面が円弧状に丸く膨らむ変形を生じた。

円弧変形に伴う変形面積は、全体で 375.5mm^2 であり面積増加率（変形面積 / 供試体断面積）は 0.3% となった。各面における面積増加量を比較すると、側面 A の 162mm^2 に対して側面 B では 57.5mm^2 と変形がやや小さくなっている。

3.3 断面変形の劣化進展評価

図-8 (1) に、経時的な変形の進展を 3 回にわたって計測した結果を示す。

1 回目計測～3 回目計測にかけて、各側面における最大変位は上面で 0.69, 0.65, 0.70mm、側面 A で 0.56, 0.95, 0.45mm、側面 B で 0.65, 0.89, 0.93mm となり、進展は確認されるものの比較的变化は小さく、特に 2 回目と 3 回目ではほとんど進展が生じなかった。経年的な変形の進展は、いずれも中央部が丸くなるとともに、中央付近で最大値となった。また、各計測点で計測結果に差が生じた点について、図-8 (2) に示すように 3 回目

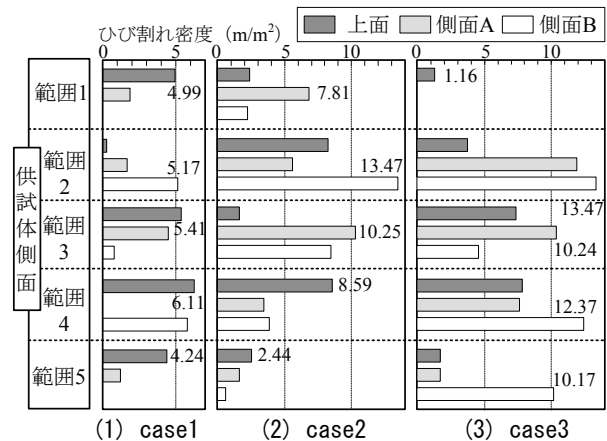


図-5 各劣化度におけるひび割れ発生状況

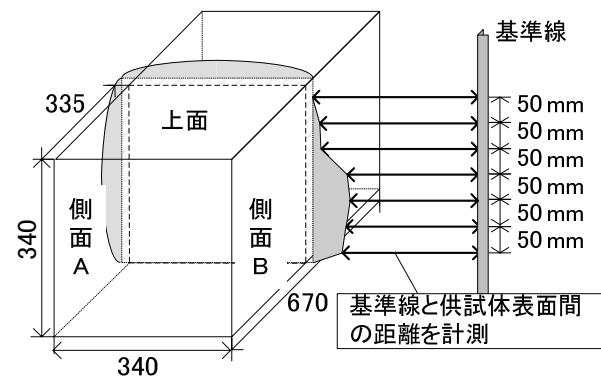


図-6 変形計測方法

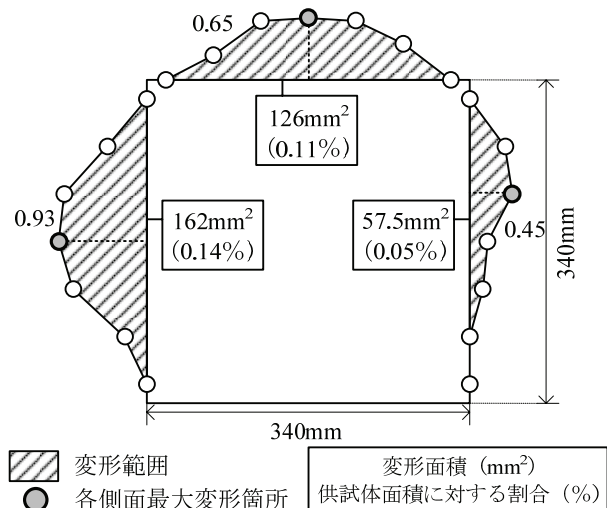


図-7 代表（3 回目 C）における変形状況

計測時に同一箇所を 3 度計測した結果を使用して計測精度の確認を行った。精度の確認作業は、計測に使用する下げ振りの設置から繰返し行っており、計測における誤差としては計測に伴う人為的誤差をすべて含む様に実施している。

計測結果は、最大変位が上面で 0.65～0.83mm、側面 A で 0.37～0.45mm、側面 B で 0.79～0.93mm となり、最大 0.2mm 程度の誤差は生じるものの、最大変位箇所や変形

形状はほぼ同じであった。

次に、前述の図-7 で行った面積増加率を使用して、図-9 に示すように経年劣化進展に伴う変形量の進展を評価した。なお、図中の面積増加率は供試体上面、側面A、側面Bの計3面の合計を示しており、3回目計測については3回目Cの計測結果を使用している。

1回目から3回目計測にかけて、変形面積率は0.26%、0.28%、0.30%であった。図に示すように、劣化中程度～劣化大程度にかけて変形面積の増加は小さく、変化はほぼ横ばいになっている。劣化初期から中期の変形進展傾向については、本検討では行えていないものの、ひび割れ発生状況から一様に増加すると考えられ、劣化中程度～劣化大程度にかけては、外観ひび割れ進展の収束と同様に、変形も進展が収束する傾向が確認された。以上から、本実験供試体においてはひび割れ密度 5.39m/m^2 になった case3 では、ひび割れ、変形ともに収束し、終局に至っていたと判断される。

4. 鉄筋亀裂進展の評価

4.1 亀裂観察結果

帯鉄筋曲げ加工部における鉄筋亀裂の進展を確認するため、鉄筋を採取し、亀裂進展深さを計測した。亀裂の観察は図-10 に示すよう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、亀裂深さを測定した。亀裂の評価は、鉄筋を縦断面カットして観察するために同一試料では観察は行えない。そこで、個別の曲げ加工を行った鉄筋で初期亀裂を観察し、膨張試験後の進展後亀裂の観察は供試体からは取り出した鉄筋を用いて観察を行った。

図-11 に現行鉄筋 D10 の亀裂進展量の結果を、図-12 に旧波節 D16 鉄筋における亀裂進展量の結果を示す。亀裂観察は曲げ加工の中心付近の節3つを観察しており、図-10 に示すように亀裂発生箇所を節1、節2、節3と分類し、節毎に亀裂の進展量をまとめた。現行 D10 鉄筋と旧 D16 鉄筋の亀裂進展量の平均値に着目すると、現行 D10 鉄筋と旧波節 D16 鉄筋の初期亀裂はそれぞれ0.17%、1.01%となり旧波節鉄筋が現行鉄筋より6倍大きかった。

初期亀裂の発生は、図-11 に示す節高さ、節の立ち上がり評価した節変化率と密接に関係しており、使用した現行鉄筋は節高さ0.80mm、節変化率7.1mmである。対して、旧基準波節鉄筋は節高さ0.91mm、節変化率3.1mmであり、初期亀裂を発生しやすい形状であった。終局では現行鉄筋は0.54%、旧波節鉄筋は2.54%となり旧節鉄筋が大きくなる結果となった。

現行D10鉄筋における亀裂進展量の最大値に着目すると、それぞれ節2の位置において、初期亀裂で0.41%、

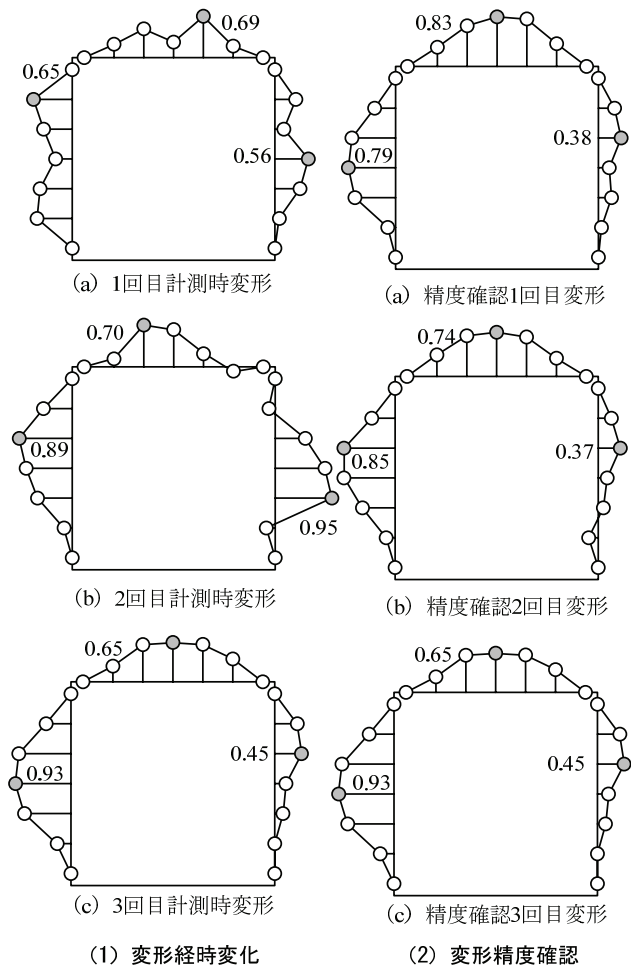


図-8 変形計測結果

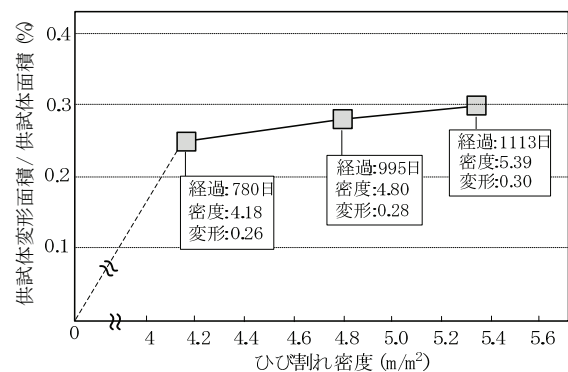


図-9 劣化進展に伴う変形面積変化

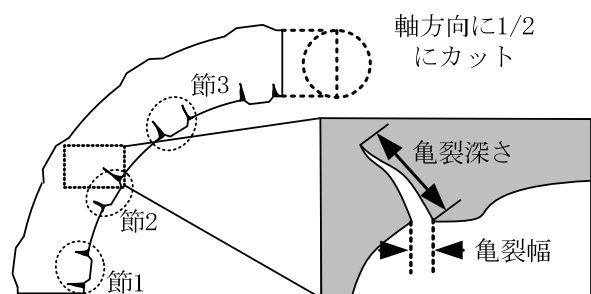


図-10 亀裂進展の確認

劣化度小で0.36%，劣化度中で0.28%，終局で0.57%となり，亀裂の進展量は極めて小さい。旧波節 D16 鉄筋の初期亀裂は2.07%，劣化度小で4.72%，劣化度中で6.22%，終局で6.00%となり，鉄筋亀裂の最大値は劣化度中まで進展し，それ以降は定常状態になる傾向となった。旧波節が現行鉄筋より亀裂進展量が大きくなった原因は，旧節鉄筋が現行鉄筋より初期亀裂が大きかったため，亀裂の最大値も進展したことが考えられる。

図-13 に波節D16 鉄筋亀裂観察結果の代表例を示す。例えば図-13 (c) では亀裂0.72%で，方向が変化しており，この部分以降は膨張に伴う亀裂進展と考えられる。図-13 に示すように，(a) では旧 D16 鉄筋の初期亀裂のみで2.07%，(b) で結果日数452日では2.18%の比較幅の広い初期亀裂が発生した後，劣化によって2.54%進展している。また(c) では，790日後には初期亀裂として0.72%が発生した後，劣化の進展によって亀裂方向を変え，5.50%進展した。

4.2 亀裂進展の特徴

本実験で使用した波節鉄筋の亀裂観察では終局時の鉄筋亀裂が6%に留まっていることが確認された。この要因を既往の研究の竹節鉄筋の結果をもとに検討を行

った⁴⁾。図-14 に既往の研究成果の竹節鉄筋の初期亀裂と終局時の亀裂進展量の結果を示す。使用した竹節鉄筋は節高さ1.22 mm，節変化率0.9 mmであり，波節と比較して節変化率はより小さい鉄筋である。実験は供試体寸法680×680×1340 mm，膨張コンクリートの打設範囲380×380×1340 mm，帯鉄筋比0.22%の大型供試体を用い，長期間のASRを短期間で再現するため，膨張コンクリート

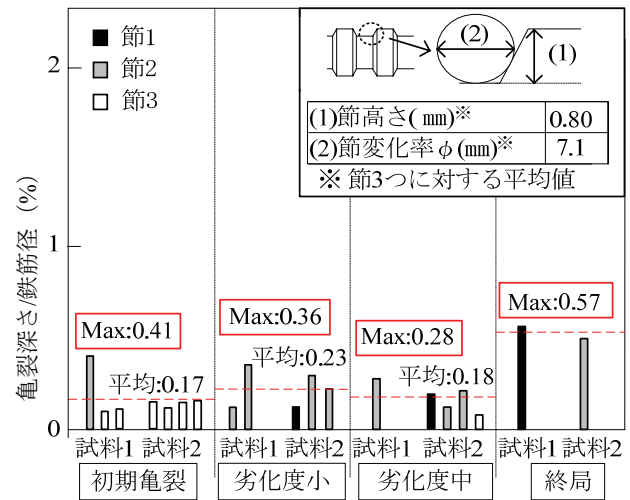


図-11 鉄筋亀裂（現行鉄筋）

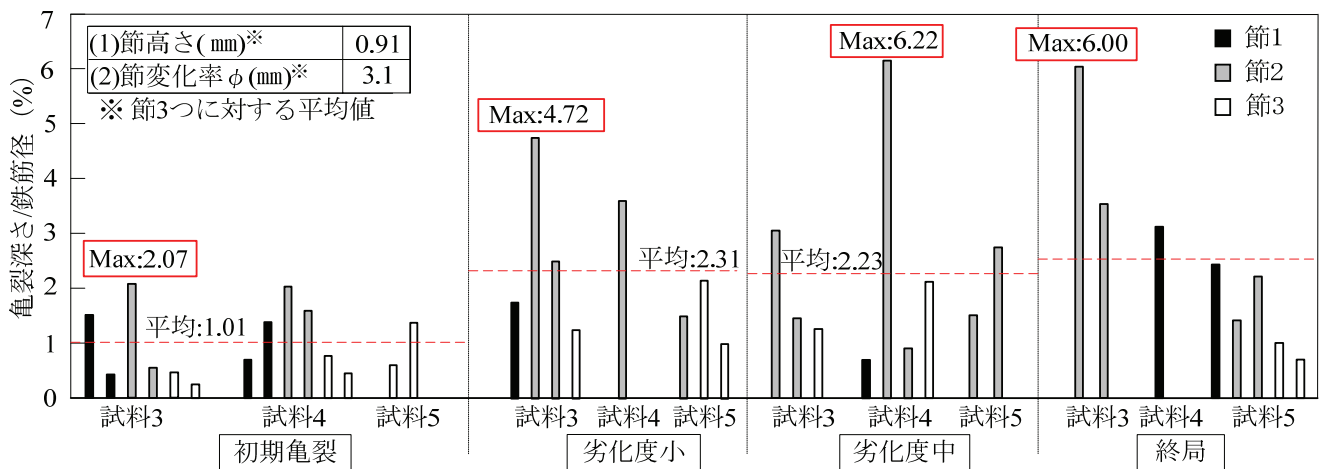


図-12 鉄筋亀裂（旧鉄筋）

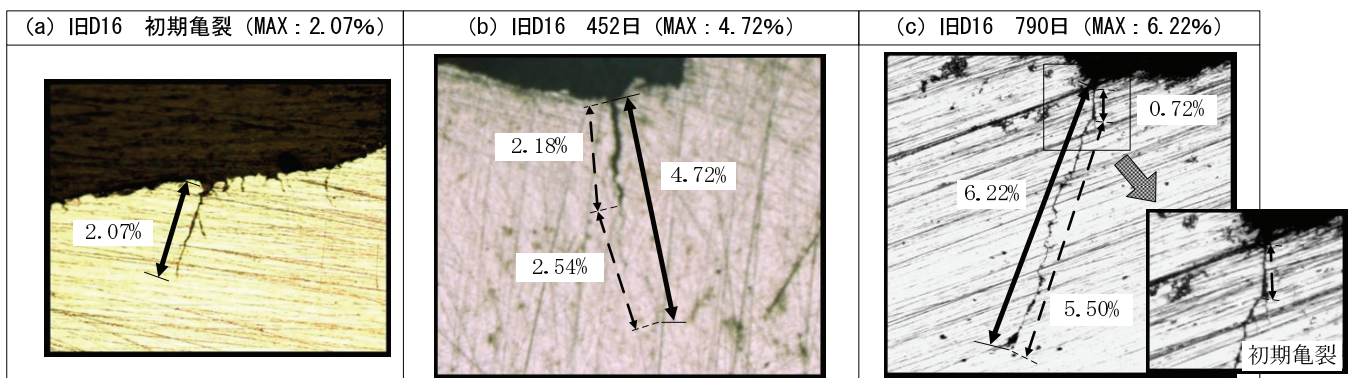


図-13 鉄筋亀裂観察結果（倍率100%）

を普通コンクリートの中央部に打設している。大型供試体実験の終局時の膨張量は 7011μ ，ひび割れ密度は 6.04m/m^2 であった。初期亀裂に着目すると、竹節鉄筋の鉄筋亀裂は平均値 2.17%，最大値 4.00%であり、波節鉄筋（平均値 1.01%，最大値 2.07%）と比べるとやや大きめとなっている。終局の亀裂に着目すると、竹節鉄筋の亀裂は平均値 14.1%，最大は鉄筋破断となり波節鉄筋（平均値 2.54%，最大値 6.00%）と比べ、竹節鉄筋の亀裂進展が著しく生じる結果となっている。図-15の曲げ加工の亀裂状況を基にこの原因について検討する。同図は波節、竹節それぞれの鉄筋について曲げ加工した時の亀裂状況を示す。鉄筋曲げ加工の際、波節鉄筋、竹節鉄筋ともに節に沿って亀裂が発生し、波節鉄筋の場合は 45° の方向に、竹節鉄筋の場合は 90° の方向に初期亀裂が発生する。その後、ASR膨張に伴い、鉄筋が曲げ戻される力が作用すると波節鉄筋の初期亀裂に対して、角度を持ち、膨張に伴う作用力と亀裂は 45° の角度を有している。一方、竹節鉄筋は初期亀裂に対して直角方向に引張力が作用し、初期亀裂が進展するため鉄筋破断が生じることが考えられる。以上のような原因から鉄筋に同じ作用力が加わっても、波節鉄筋の方は角度を持った初期亀裂のために亀裂進展量が小さくなったと考えられる。

5. まとめ

反応性骨材使用供試体の経年劣化進展状況と外観の變形性状を比較した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 小型供試体で経年変化に伴う變形状況を比較した結果、1回目計測（経過日数 452 日、ひび割れ密度 1.78m/m^2 ）で最大 0.69mm ，2回目計測（経過日数 790 日、ひび割れ密度 3.98m/m^2 ）で最大 0.95mm ，3回目計測（経過日数 1113 日、ひび割れ密度 5.39m/m^2 ）で最大 0.93mm といずれも測線中央部で外側にはらみだす變形を生じる結果となった。
- (2) 鉄筋亀裂進展量に着目した結果、経年劣化の進展に伴い亀裂深さの進展（初期亀裂 2.07%，劣化度小 4.72%，劣化度中 6.22，終局 6.00%）を確認した。ただし、ASR 膨張が終局を迎えた状況でも、旧波節 D16 鉄筋は鉄筋径に対して 6.0%の進展にとどまった。
- (3) 波節鉄筋と竹節鉄筋では終局を迎えたとき、亀裂進展は波節が 6.00%，竹節が鉄筋破断に至る結果となった。亀裂の進展度合いに差が生じた原因の一つとしては曲げ加工部の亀裂状況に着目すると、初期亀裂に対して波節鉄筋の場合は 45° の方向に、竹節

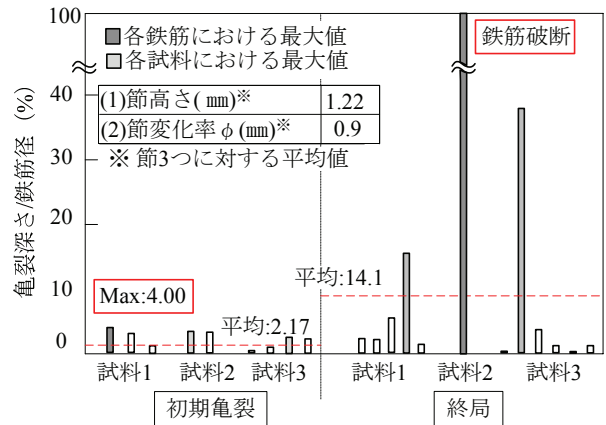


図-14 鉄筋亀裂（竹節鉄筋）

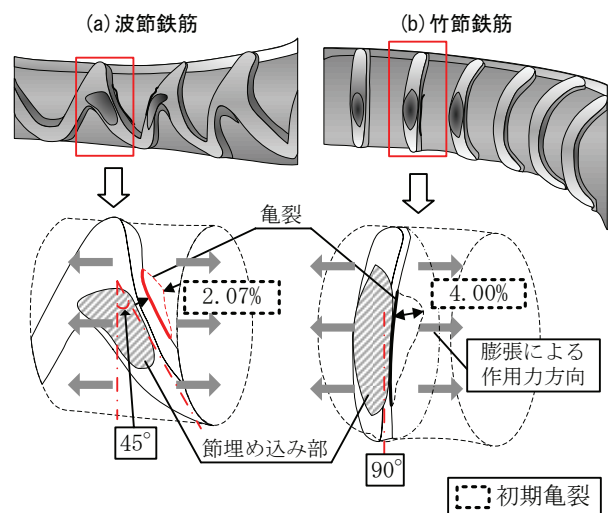


図-15 曲げ加工時の亀裂状況（a：波節鉄筋，b：竹節鉄筋）

鉄筋の場合は 90° の方向に膨張力が作用するため、亀裂進展量に差異が生じると考えられる。

参考文献

- 1) 幸左賢二，川島恭志，合田寛基，五十嵐弘行：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
- 2) 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の劣化現象関係性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，pp.959-964，2010
- 3) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレスト・コンクリート建設業協会 ASR 対策検討委員会報告書，pp. 38-51，2009.3
- 4) 稲垣裕之，幸左賢二，草野昌夫，合田寛基：大型 ASR 模擬供試体を用いた各種鉄筋の亀裂進展度評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，pp.977-982，2010