# 論文 大型 ASR 模擬供試体による鉄筋損傷進展評価

稲垣 裕之\*1・幸左 賢二\*2・草野 昌夫\*3・合田 寛基\*4

要旨:本研究は ASR による鉄筋の曲げ加工部における損傷に焦点を当て,損傷の進展原因および進展メカ ニズムの解明を目的としている。本実験においては,膨張コンクリートを用いて ASR 膨張の物理現象を模 擬し,実構造物の現象を精度良く再現するため供試体寸法を実構造物の 1/4 スケールとし,実構造物内部で 膨張圧を受けた場合の鉄筋損傷の進展を実験的に検討した。その結果,最大亀裂進展量として 1.47%の進展 が確認された。また,供試体の最終ひび割れ密度は,実構造物で著しい劣化とされる 5.5 m/m<sup>2</sup>程度となり, 供試体隅角部で帯鉄筋曲げ加工部が曲げ戻される方向に 2°~3°の変形を起こすことが確認された。 キーワード: ASR,鉄筋破断,膨張圧

#### 1. はじめに

現在 ASR が著しく進行した構造物において,鉄筋の曲 げ加工部での亀裂・破断が生じた事例が数多く確認され ていることから,鉄筋曲げ加工部の破断に着目し,破断 メカニズムの解明を目的に検討が行われている<sup>1)</sup>。しか し,現在実構造物の帯鉄筋配置等を考慮した大型供試体 による鉄筋破断の検討は行われていない。

図-1 に本実験フローを示す。既往の研究では,鉄筋 種別,曲げ加工半径,鉄筋比をパラメータとした小型供 試体実験を行い,旧節形状鉄筋の 1.00d 曲げ加工した箇 所で最大 78%の亀裂が進展することを確認した<sup>2)</sup>。しか し,供試体寸法が実構造物 1/8 スケールと小型であった こと,帯鉄筋は 3 本であること,かぶりも 20mm と少な かったことから,ひび割れ進展,変形状態の再現性が低 い可能性があり,さらに亀裂進展に着目して行っていた ため変形過程の把握も完全ではなかった。そこで今回の 実験では,過年度の実構造物 1/8 スケール供試体に対し て 1/4 スケールに大型化した供試体を用いて,帯鉄筋数 も増やし,鉄筋ひずみ,ひび割れの進展,供試体の変形 挙動の関係をより詳細に計測することで改善とし,鉄筋 曲げ加工部の変形に与える影響について検討した。

今回の実験条件は、1/8 スケール試験同様膨張コンク リートを用いて ASR 膨張の模擬を行い,鉄筋に膨張圧を 与えることとした。対象とする帯鉄筋は旧節形状鉄筋 D16 を用いて,加工半径は小型供試体実験で亀裂進展が 顕著であった 1.00d (d は公称直径)とした。また,帯鉄 筋間隔を小型供試体と同じにすることで、1/8 スケール 供試体ではやむをえず端面近くに配置していた帯鉄筋 を,実構造物のように並べて配置できるようにした。測 定方法としては,ひび割れ性状を細かいピッチでスケッ



図-1 実験フロー

チし、ひび割れ幅については断面方向に測線を引き、重 なる部分の幅を計測するとともに断面方向のひずみを 評価した。また、鉄筋ひずみや変形過程の計測となる画 像計測、標点間距離計測についても計測ピッチをより細 かく設定し複合的に照らし合わせることで膨張による 鉄筋損傷の影響を検討した。

#### 2. 供試体概要

## 2.1 実験諸元

- (1) 供試体形状
- 図-2 に供試体形状,表-1 に普通コンクリートの配
- \*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻(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創成工学専攻(正会員)

合を,表-2に使用鉄筋の材料特性を示す。本実験では, 鉄筋がコンクリートにより拘束されている状態で, ASR によって内部に発生した膨張圧を受けた場合の損傷度 を検討するため、膨張コンクリートを普通コンクリート の中央部に打設できるように中空形状を適用した。膨張 コンクリートの配合は、既往の研究<sup>1)</sup>と同条件の W/C= 40%,単位膨張材量 200kg/m<sup>3</sup>とした。供試体断面寸法に 関しては、基本的に過年度での1/8スケールの供試体の 寸法を2倍とした。ただし、寸法効果より中央と隅角部 の剛性差を考慮して、小型供試体において大きな変形で あった供試体の中央部変形量が倍になるように普通コ ンクリート厚さを薄くした。帯鉄筋は入手した旧節形状 D16鉄筋の長さが2m前後であったため図-2のように両 端にフックを設けたL型形状の鉄筋とし、1つの断面に つき旧節形状鉄筋 D16,現行節鉄筋 D16 を組み合わせて いる。

曲げ加工半径は、既往の検討と同条件の大きな初期亀 裂が確認された曲げ加工半径1.00dとした。また、鉄筋の 曲げ加工部には経年変化の影響からひずみ時効が発生 するため、鉄筋の靭性が低下し、鉄筋損傷進展に影響を 与えると考えられ、実験では加工鉄筋を120℃の10時間 加熱処理し、ひずみ時効を再現している。

#### (2) 供試体作製および養生

供試体の普通コンクリート部分は中空形状で打設し, 3週間養生を行った。また,実験開始時の圧縮強度が 32N/mm<sup>2</sup>(呼び強度27 N/mm<sup>2</sup>)であることを圧縮強度試 験により確認し,膨張コンクリートを打設した。

## 2.2 各測定方法, 測定ピッチ

## (1) ひび割れ測定方法

ひび割れ測定は図-3 に示すように,鉄筋破断の可能 性の高いとされている旧節形状鉄筋側の2面を対象とし てひび割れ損傷図をスケッチした。ひび割れ幅は供試体 側面に 100mm 間隔で主鉄筋軸方向に測線を引き,測線 と交差する位置でひび割れの幅を測定した。なお,ひび 割れは実構造物での調査で用いられている 0.2mm 以上 を対象とした。また供試体の膨張量の指標として,ひび 割れ幅合計を供試体の測線長で除した側線ひずみを算 出している。側線ひずみについては式(1)で算出しており, データ詳細は3章に記す。測定ピッチはひび割れ発生確 認後より計測を開始し,初回より8時間までは1時間ピ ッチ,以降は2~4時間ピッチとした。

(測線ひずみ) = 
$$\frac{(ひび割れ幅合計)}{(測線長)}$$
 (1)

#### (2) 変形量測定方法

図-4 に供試体上端面の変形量測定に用いる標点位置, 画像測定面を示す。100mm 間隔で設けている標点間の直 線距離はノギス(0.05mm 目量)で計測した。膨張変形



による標点移動後の斜め距離,角度進展量の算出は供試 体上端面を 1000 万画素のデジタルカメラを用いて撮影 した。撮影は供試体横に足場を組んだ上に供試体中心位 置を撮影できるようにカメラを備えつけ,実験終了まで 固定状態で行った。画像計測は膨張コンクリート打設後 より1時間ピッチで行い,標点間距離の計測はひび割れ 発生時より1時間ピッチとした。

#### (3) 鉄筋ひずみ測定方法

図-5 にひずみゲージの貼り付け位置を示す。帯鉄筋 のひずみ計測は鉄筋の変形を考慮するため、曲げ加工の 中心に位置する箇所で内側(A),外側(B),また変形が 曲げ加工の中心に集中していることを確認するために 近傍(曲げ加工寸法Rの1/2)(C)にひずみゲージを張 付けた。また、直線部での変形状態、ひずみ発生時期を 確認するために直線部(D)にもひずみゲージを貼付け た。ただし、亀裂の進展評価を行う旧節鉄筋側の曲げ加 工部にはひずみゲージは貼付けていない。主鉄筋ひずみ については曲げ加工部は着目していない為、全体系のひ ずみを代表して隅角部に位置する2本の主鉄筋(E)に2 箇所、主鉄筋高さ中央位置にひずみゲージを張付けた。 打設直前にイニシャル値を計測し、計測間隔は打設直後 より5分間隔で行った。

#### (4) 鉄筋損傷度評価方法

鉄筋の亀裂損傷程度を観察するため実験終了後に,対 象鉄筋の曲げ加工部をはつりだし鉄筋の亀裂損傷程度 を観察した。観察方法は,既往の研究と同様に樹脂加工 し縦断面にカットした 1/2 断面をマイクロスコープによ って 50~200 倍に拡大し,亀裂発生位置と亀裂の進展量 を観察した。

#### 3. 実験結果と考察

本実験供試体では,膨張コンクリート打設後5.5時間 で供試体表面にひび割れの発生が確認され,以降ひび割 れに急激な進展が認められた。打設後15時間でひび割 れの進展に収束する傾向が確認され,打設後30時間で ほぼ停止を確認し実験終了とした。以下に,実験結果お よび考察を示す。

#### 3.1 膨張と鉄筋損傷の関係

#### (1) 測線ひずみ、ひび割れ密度結果

図-6 に測定を行った旧節形状鉄筋側 2 測面での測線 ひずみ,ひび割れ密度の経時変化を示す。測線ひずみは 主鉄筋軸直角方向に引いた測線(計13 測線)を用いて, 各測線と交差するひび割れ幅の合計を測線長で除した 値であり,図中にはその平均値を示している。ひび割れ 密度については,ひび割れの総延長を算出し対象とする 側面積で除した値である。時間経過で測線ひずみ,ひび 割れ密度は増加傾向を示しており,膨張が収束した最終 段階での値は測線ひずみで 6496 µ,ひび割れ密度で 5.58m/m<sup>2</sup>であった。実橋脚 21 基についてひび割れ密度 の経年変化より分析を行っている既往の研究<sup>3)</sup>では,ひ び割れ密度 2.0m/m<sup>2</sup>を超えると圧縮強度など物性値が低 下し始め,ひび割れ密度 5.0m/m<sup>2</sup>以上は特に劣化が厳し い状態とされていることから,劣化領域 3 をひび割れ密 度 2.0m/m<sup>2</sup>以下,劣化領域 2 をひび割れ密度 2.0~5.0m/m<sup>2</sup>,











図-7 ひび割れ損傷図

劣化領域1をひび割れ密度5.0m/m<sup>2</sup>以上と3段階に分類 する。これより本実験ではひび割れ密度の値が劣化領域 1 に達しており,実構造物で特に劣化が厳しい状態と同 程度の膨張量が発生したと考えられる。

### (2) ひび割れ性状

図-7 にひび割れが多く見られた1 側面のひび割れ損 傷図を示す。図中の劣化3 は劣化領域3 内の一例であり, 同様に劣化2,劣化1 は劣化領域2内,劣化領域1内の データー例である。劣化3 では,側面中央部で主鉄筋方 向に連続した幅1mm以下のひび割れが確認された。側 面隅角部では供試体上部にひび割れの発生が見られた が,100mm 程度の短いひび割れであった。劣化2では, 中央部での新たなひび割れ発生は少なくなり,隅角部で 幅 1mm を超える主鉄筋方向に連続したひび割れが発生 した。劣化1では,中央部でのひび割れも進展している ものの,隅角部でのひび割れ幅の拡大が著しく進展した。

供試体の膨張状態をみるために、図-8 に各測線でひ び割れ幅より算定した測線ひずみの進展を劣化領域ご とに示す。劣化3ではどの位置でも測線ひずみに差が少 なく発生しているが、劣化2以降は供試体上部付近の2 測線のひずみが他の測線ひずみと比べて著しく大きく、 上部が自由端となっていたことで拘束が小さかったと 考えられる。

ひび割れ損傷の進展から得られた傾向を確認するた め、供試体側面を隅角部・中央部に分類し、それぞれの ひび割れ密度の進展を劣化ごとに示したものを図-9 に 示す。劣化3の段階では、中央部のひび割れ密度が隅角 部より大きく進展しており、曲げによるひび割れが発生 していると考えられる.劣化2の段階では中央部での進 展は少なく、隅角部でのひび割れ密度の進展が顕著にな っており、鉄筋曲げ加工部が降伏ひずみに達したことで、 拘束力が低下し、隅角部にひび割れが集中して発生した と考えられる.劣化1では、中央部.隅角部ともに同等 の進展を見せていることから、全体的に拡大している傾 向が見られる。

#### (3) 鉄筋ひずみ

図-10 に供試体における鉄筋ひずみの経時変化を示 す。直線部(D,E)のひずみを見ると、本実験供試体が 帯鉄筋に対して主鉄筋が多く配置されていることから、 帯鉄筋の直線部(D)のひずみは1800 µ と大きくひずみ が進展しているのに対して、主鉄筋方向のひずみ(E) は膨張が終了するまでほとんど進展していない。また、 曲げ加工部(A, B, C)でのひずみは短時間で著しい進 展を見せているため、曲げ加工部内側(A)および外側

(B)が降伏に至る前後に着目したものを図-11に示す。 (A)および(B)はほぼ同時に降伏に至っており,最初 に曲げ加工部(A),(B)が降伏ひずみに達していた。 300×300×900mmの長方形断面の供試体に反応性骨材を 使用しASR膨張を再現し,長期間屋外暴露条件で経年変 化を計測している実験<sup>4)</sup>においても,曲げ加工部内側, 外側が最初に降伏し,その時の直線部ひずみが1000µ程 度となっていた。これより今回の膨張コンクリート実験 でASRの膨張が帯鉄筋に与える影響は十分模擬できて いたと考えられ,曲げ加工部に変形が集中する傾向が確 認された。発生状況では(D)が最も早く発生し,その 後(A),(B)が急激に進展し,降伏に至っている。ここ から,帯鉄筋全体を丸くするような膨張がかったと判断



できる。ひび割れ性状と比較を行うと、発生かり、変形 が大きい曲げ加工部が最初に降伏ひずみに至モーメン トが大きい中央部にひび割れが発生し、その後隅角部で の鉄筋降伏により拘束力が低下したことでひび割れの 発生が隅角部に集中したと考えられる。さらに、曲げ加 工部近傍(C)のひずみは(A),(B)よりもひずみの発 生が遅く進展も少ないことから、曲げ加工の中心に変形 が集中していると考えられる。

#### (4) 変形過程

供試体全体のひび割れ性状や鉄筋ひずみより,劣化 3 段階では中央部と隅角部に分かれたひび割れが発生し, 曲げ加工部内側,外側は降伏ひずみに達し,その後劣化 2,劣化1と膨張していくに従って,隅角部にひび割れ, 鉄筋ひずみが集中していく傾向が得られた。

そこで隅角部に着目し、主鉄筋軸直角方向断面の膨張 による進展変形の検討を行う。図-12に現行鉄筋側、旧 節鉄筋側各3標点での標点進展角度、斜め進展距離の算 出方法を示す。0.05mmの精度が確認されている小型ノ ギスを用いた標点間直線距離の計測結果より、小型ノギ スでは計測出来なかった標点の斜め距離 C を, 図中の式 に示すようにそれぞれ実際の距離となるように、2 辺標 点距離 A, B で画像上の距離と実際の計測距離との比率 を算出し、掛け合わせることで補正を行った。そして2 方向より補正された補正差が 10mm の変形に対して 0.2mm 以下であったことから、その平均値を実際の斜め 距離として算定した。また、角度については上記で算出 した実際の斜め距離Cと、ノギスを用いて計測した標点 間距離A, Bの三角形より3辺が既知であることから, 余弦定理を用いて算出した。図-13に各進展量の劣化段 階毎の経過図を示す。なお、各値は初期値からの進展を 示している。斜め距離は現行鉄筋側では劣化3は2.4mm, 劣化2は8.0mm,劣化1は10.5mmであり,鉄筋が開く 方向にほぼ直線的に進展していた。また旧節鉄筋側では 劣化 3~1 において 1.9~6.4mm の進展距離であり、現行 鉄筋と同じ傾向を示した。角度に関しては現行鉄筋側で は,劣化 3~1 で 0.9°, 2.7°, 2.6°となっており,旧節 鉄筋側では、劣化 3~1 で 0.9°, 0.7°, 1.9°に標点間距 離同様,開く方向に進展しており,鉄筋ひずみで推定さ れたように、鉄筋は曲げ戻される変形を起こしたと考え られる。以上より、内側より膨張力を受けた場合、隅角 部では劣化3における側線ひずみ1000 µ 程度の膨張初期 から、1°程度は既に曲げ戻し方向の変形を起こしてお り、その後劣化1における側線ひずみ6500 μ程度の膨張 に進展した場合、2~3°の曲げ戻し方向の変形が起こる ことが確認された。

#### 3.2 膨張と亀裂進展関係

図-14に、旧節鉄筋曲げ加工部で亀裂を確認した位置





図-14 亀裂計測鉄筋位置

供試体上方向

示す。マイクロスコープによる縦断面観察で確認された 亀裂は、図-15で示すように亀裂形状から2種類に分類 でき、曲げ加工時の節のめり込みにより発生したと思わ れる比較的幅の大きい亀裂を1 次亀裂(初期亀裂), そ の後膨張コンクリートの膨張により進展したと考えら れる細く,先端のとがった亀裂を2次亀裂(膨張進展亀 裂)と定義づけた。 亀裂観察を行った鉄筋の亀裂深さを 鉄筋径で除すことによって求めた鉄筋亀裂進展量を図 -16に示す。5つのうち4つの試料で曲げ加工の中心に 2 次亀裂の発生が確認され、亀裂進展量の最大進展量は 試料2で1.47%であった。2次亀裂の発生は、1つの試 料に複数本発生している1次亀裂に対して1本のみとい う傾向が確認され、小型の供試体で膨張コンクリート実 験を行っている既往の研究で確認された傾向と同様で あった。また、2 次亀裂が発生している箇所はいずれも 曲げ加工の中心付近であり、これより鉄筋の亀裂進展は 曲げ加工の中心付近に発生した1次亀裂を起点にして発 生する傾向にあることが確認された<sup>2)</sup>。しかし,各測線 ひずみ結果において供試体上部では他と比べ大きなひ ずみを生じていたにも関わらず,最大亀裂発生位置は測 線 No.4 にあたる鉄筋 No.2 であり, 最上部の鉄筋 No.1 とは最大1次亀裂にも差が少ないことから、必ずしも全 ての鉄筋が膨張量. 初期亀裂量と比例するように進展す る傾向とはなっていないと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では, ASR による鉄筋曲げ加工部の損傷進展原因,進展過程に着目し,膨張コンクリートを用いた大型 供試体実験を行うことにより以下の知見が得られた。

- (1)供試体形状を過年度の実構造物の1/8 スケールから1/4 スケールに大型化し膨張コンクリートを用いた実験を行った結果,帯鉄筋曲げ加工部が最初に降伏ひずみに達すること,その時の帯鉄筋直線部のひずみが1000 µ 程度であることが既往の研究における屋外暴露で反応性骨材を使用している長方形断面供試体の鉄筋ひずみ経年変化とよく一致する結果が得られ,大型供試体でもASR 膨張によるコンクリート内部の帯鉄筋の挙動を十分模擬出来たと考えられる。
- (2) 実験終了時のひび割れ密度は 5.5m/m<sup>2</sup> であり、実構造物で特に著しい劣化状態のひび割れ密度と同程度であった。ひび割れ性状は、膨張初期で側面中央部に 1.0mm 未満のひび割れが発生し、以降膨張に従い隅角部に 1.0mm 以上の大きなひび割れが集中的に進展する傾向が確認された。
- (3) 側線ひずみ 6500 µ 程度の膨張で,供試体軸方向断 面隅角部が 2°~3°の帯鉄筋曲げ加工部が曲げ戻



される方向へ変形を起こすことが確認された。

(4) 鉄筋の亀裂進展量は 1.00d で曲げ加工した旧節形 状帯鉄筋の曲げ加工部内側で膨張による亀裂進展 が確認され,さらに曲げ加工部中心に近い位置で 特定の亀裂が進展する傾向が得られた。最大亀裂 進展量として 1.47%の進展が確認されたが,対象箇 所の膨張量,初期亀裂状況などから,必ずしも全 ての亀裂が進展する傾向とはなっていなかった。

#### 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, コンクリートライブラリー124, pp.I-32-I-65, 2005.8
- 幸左賢二,川島恭志,合田寛基,興梠展朗,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
- 三浦正嗣,幸左賢二,久利良夫,川島恭志: 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.
- 4) 鳥居和之,池富修,久保善司,川村満紀:ASR膨張 によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証,コン クリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.595-600, 2001.7