

# 論文 大型 ASR 模擬供試体を用いた各種鉄筋の亀裂進展度評価

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 の進行が鉄筋の曲げ加工部の損傷に及ぼす影響を把握することにより、亀裂進展原因の解明を目的としている。膨張コンクリートを用いて ASR 膨張を模擬し、実構造物の 1/4 寸法の供試体で、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、必ずしも外観上の膨張ひずみ、角度変形に比例して鉄筋亀裂が増大するのではなく、曲げ加工による初期亀裂率が 1.0%を超える旧基準の節形状鉄筋のうち、特定の鉄筋種類において急激に亀裂進展、破断に至ることを明らかにした。

**キーワード:** ASR, 鉄筋破断, 鉄筋種類

## 1. はじめに

ASR の著しく進行した構造物において、鉄筋の曲げ加工部や圧接部で亀裂・鉄筋破断が数多く確認されている<sup>1)</sup>が、ASR 劣化現象と鉄筋の損傷・破断の感受性を実験的に評価した例は少ない。

図-1 に本研究フローを示す。過年度の研究<sup>2)</sup>では鉄筋種別、曲げ加工半径、環境条件(腐食)をパラメータに、ASR 膨張を模擬した実橋脚に対して 1/8 寸法の小型供試体実験を行い、旧基準の節形状鉄筋は現行の節形状鉄筋より初期亀裂が大きく進展すること、鉄筋亀裂進展に環境条件が及ぼす影響は小さいことを確認した。しかしながら、実験に使用した供試体寸法が実構造物の 1/8 寸法と小型であるため、検討対象としている帯鉄筋が供試体端部に近い位置に配置されており、かぶり厚さも 20mm と小さいことから実構造物の変形状況の再現としては、改善が必要であった。また旧基準の鉄筋も 1 種類であった。

そこで本研究では、過年度の小型供試体に対して、実構造物に近い配筋状態を再現するため 1/4 寸法に大型化した供試体とし、採取場所、節形状が異なる旧基準の鉄筋 3 種類を用いて、その損傷進展状況の比較を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体諸元

#### (1) パラメータ

表-1 に供試体概要を示す。帯鉄筋比、種類をパラメータとして設定した。帯鉄筋比は、実構造物の帯鉄筋間隔 300mm に対して、285mm で帯鉄筋比 0.22% (Case11, 13) のものと、帯鉄筋比の増加が鉄筋損傷に与える影響を検討するために、帯鉄筋間隔を 1/2 にした 142.5mm で帯鉄筋比 0.39% (Case12) とした 2 水準を設定した。

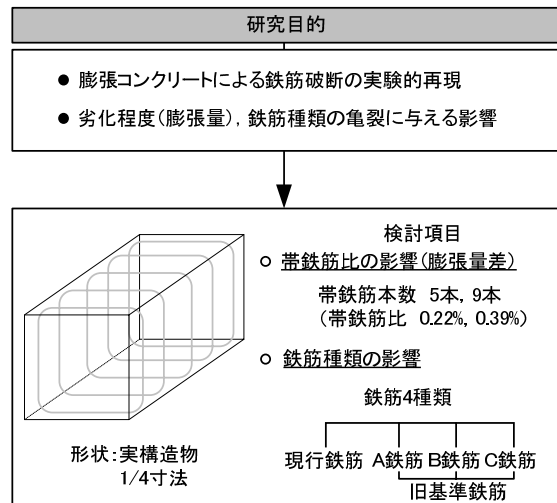


図-1 研究フロー

帯鉄筋の種類については、現行の節形状鉄筋 1 種、旧基準の節形状鉄筋 3 種 (A, B, C) の計 4 種類を用いた。なお、旧基準の鉄筋 (D16) は、ASR による鉄筋破断が確認されている地域において補修、調査のため実構造物よりはつりだされた鉄筋である。

曲げ加工半径は、既往の検討<sup>2)</sup>で大きな初期亀裂が確認されたものと同条件である曲げ加工半径 1.0d とした。また、鉄筋曲げ加工部に生じる経年劣化によるひずみ時効硬化は鉄筋加工後に 120°C の 10 時間<sup>3)</sup> 加熱処理することで再現している。

#### (2) 供試体形状および配合

図-2 に供試体形状 (Case11~13) を、表-2, 3 に普通・膨張コンクリートの配合を示す。ASR 劣化を模擬するため、膨張コンクリートを中央部に打設できるように普通コンクリート部は中空形状となっている。供試体の普通コンクリート部分は中空形状で打設したのち、3 週間養生をおこなった。その後実験開始時の圧縮強度が

\*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・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)

32N/mm<sup>2</sup> (呼び強度 27N/mm<sup>2</sup>) であることを圧縮強度試験で確認し、膨張コンクリートを打設した。使用する旧基準の鉄筋の長さが、はつり通りの条件により 1~2m であったため、Case11, 12 では図-2 のように両端にフックを設けた L 型形状の鉄筋とし、Case13 ではフレア溶接を行い複数の鉄筋を同一断面に配置した。なお、同鉄筋比の供試体でフレア溶接箇所のない Case11, フレア溶接箇所がある Case13 でひび割れ性状、変形状状などに有意差は認められなかった。

## 2.2 各測定方法、測定ピッチ

### (1) ひび割れ測定 (測線ひずみ)

ひび割れ幅、測線ひずみの測定方法を図-3 に示す。Case11, 12 では鉄筋破断の可能性の高いとされている旧基準の鉄筋側 2 側面、Case13 では 4 側面を測定対象としてひび割れ状況をスケッチした。ひび割れ幅は図-3 に示すように Case11, 12 では 100mm 間隔で測線を引き、測線に交わるひび割れ幅を測定した。Case13 では、帯鉄筋位置について詳細に測定するため 100mm 間隔を基準として、帯鉄筋位置 5 測線を追加した。なお、計測は目視可能な 0.05mm 以上のひび割れを対象としている。

測定はひび割れ発生確認後より計測を開始し、初回より膨張速度が速い 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。また、供試体の膨張量の指標として、ひび割れ幅の合計を供試体の測線長 680mm で除すことで測線ひずみを算出した。

### (2) 変形量測定

図-4 に供試体の変形量測定箇所、測定方法を示す。Case11, 12 は上部端面に標点を配置し、コンタクトゲージを用いて、ひずみを測定した。これに対し、Case13 では各帯鉄筋断面を詳細に測定するため、供試体側面の各帯鉄筋位置における断面変形を測定した。測定方法は供試体から離して設置したアングルより、供試体の端点より 40mm, 100mm 間隔の位置からディプスゲージ (0.05mm 目量) を用いて、水平に長さを測定した。膨張に伴う変形量は、図中に示すように初期の測定長さから、膨張後の測定長さを差し引くことで算出した。計測時間ピッチはひび割れ測定と同間隔で行った。

### (3) 鉄筋亀裂測定

鉄筋の亀裂損傷程度を曲げ加工部に発生する亀裂より測定した。測定方法は対象鉄筋試料を樹脂加工し、鉄筋軸方向に縦断面にカット、表面研磨したものを顕微鏡で観察することで亀裂深さを計測した<sup>2)</sup>。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 材料試験結果

著者らは、鉄筋の曲げ加工時に曲げ加工部内側で節がベンダーの加工芯で押し潰され、初期損傷が発生するこ

表-1 供試体概要

| No.    | 帯鉄筋比  | 鉄筋組み合わせ        |
|--------|-------|----------------|
| Case11 | 0.22% | 現行鉄筋, A鉄筋      |
| Case12 | 0.39% | 現行鉄筋, A鉄筋      |
| Case13 | 0.22% | 現行鉄筋, B鉄筋, C鉄筋 |

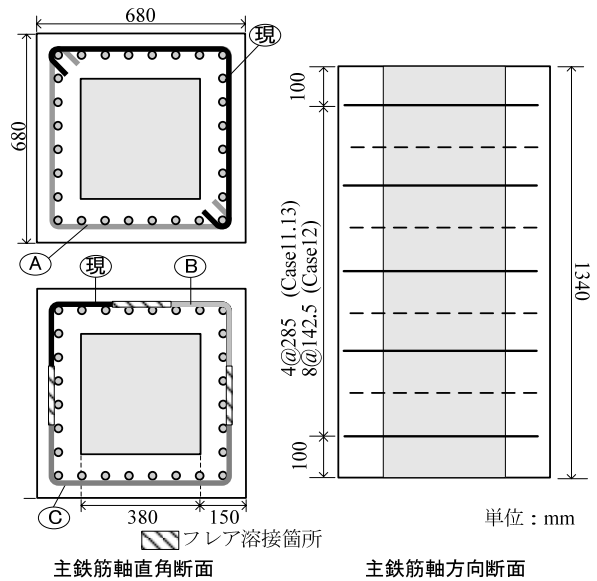


図-2 供試体概要

表-2 普通コンクリート配合表  
呼び強度 (27N/mm<sup>2</sup>)

| Gmax<br>mm | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      | 混和剤<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|------------|------------|-------------------------|-----|-----|------|-----------------------------|
|            |            |            | W                       | C   | S   | G    |                             |
| 20         | 46         | 43         | 175                     | 381 | 718 | 1018 | 1.142                       |

表-3 膨張コンクリート配合表

| W/C<br>% | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |   |     | 膨張剤<br>E |
|----------|-------------------------|-----|------|---|-----|----------|
|          | W                       | C   | S    | G |     |          |
| 40       | 230                     | 575 | 1150 | 0 | 200 |          |

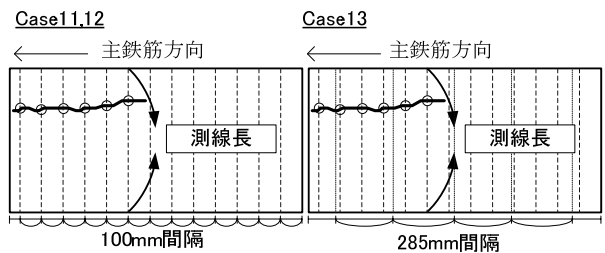


図-3 ひび割れ測定、測線ひずみ (側面)

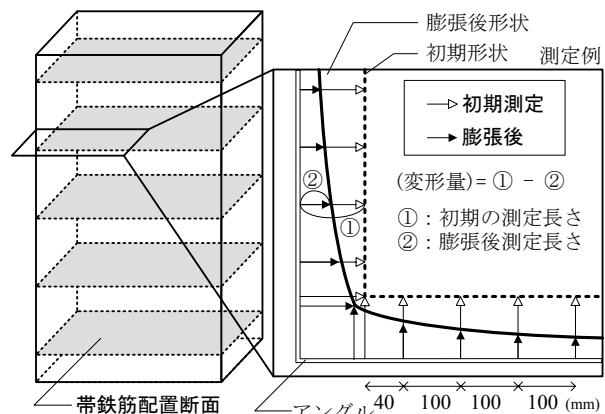


図-4 膨張変形計測方法

とを明らかにしている<sup>2)</sup>。また、実構造物でも破断、目視による亀裂発生が曲げ加工内側節付け根部である<sup>4)</sup>ことから、加工部の初期亀裂が破断・亀裂進展に影響していると推測される。よって異なる4種の鉄筋について、既往の研究<sup>2)</sup>と同様に節形状測定、初期亀裂測定を行った。試験数は節形状では1本(節は3個)、初期亀裂測定では曲げ加工1.0dで6本とした。

### (1) 節形状

初期亀裂の発生要因として節形状の影響が考えられるため、節変化部の直線部の延長と、鉄筋の直線部の延長に接する円の直径を変化量 $\phi$ として計測・評価を行った。図-5に変化量 $\phi$ の結果を示す。変化量 $\phi$ は現行の鉄筋7.1mmに対し、旧基準のA鉄筋では3.1mm、B鉄筋では1.1mm、C鉄筋では0.9mmとなった。現行と旧基準では最大6mm程度の差があり、変化量 $\phi$ の小さい旧基準鉄筋では節変化が厳しく、旧基準鉄筋間でも差があることを確認した。

### (2) 初期亀裂率

曲げ加工直後に発生する初期亀裂率は、対象鉄筋試料を顕微鏡で観察・測定した亀裂深さを鉄筋径で除した値である。図-6に初期亀裂率の結果を示す。6本の平均値では、現行の鉄筋が0.81%に対し、旧基準のA鉄筋では0.92%、B鉄筋では1.53%、C鉄筋では1.74%となり、初期亀裂は、いずれの旧基準鉄筋でも、現行鉄筋より大きくなった。また、節形状の変化量 $\phi$ が小さくなるほど、初期亀裂は大きくなる傾向がみられた。

## 3.2 供試体膨張結果

### (1) 測線ひずみ、ひび割れ密度

膨張進展状況は、測線ひずみ(ひび割れ幅を測線長で除した値)とひび割れ密度(ひび割れ総延長を対象面積で除した値)を用いて評価した。図-7に膨張に伴う測線ひずみとひび割れ密度の経時変化を示す。Case11, 13(帯鉄筋比0.22%)の最終段階での測線ひずみは6488 $\mu$ と7010 $\mu$ 、ひび割れ密度は5.08 $m/m^2$ と5.46 $m/m^2$ であり同程度であるが、Case12(帯鉄筋比0.39%)では、1798 $\mu$ 、3.86 $m/m^2$ といずれも小さい値を示しており、帯鉄筋比増加に伴い、ひび割れ密度、測線ひずみの抑制効果が認められた。

### (2) ひび割れ発生状況

図-8にCase11~13代表側面のひび割れ状況を示す。Case11, 13では全面的に1.0mmを超えるひび割れが発生したのに対し、Case12では0.3mm程度の軽微なひび割れが多く、帯鉄筋比の増加によりひび割れ本数、長さ、幅の抑制が確認されている。

Case13を代表例としてひび割れ進展状況を示す。図-7, 8中のa(ひび割れ密度1.60 $m/m^2$ )では、中央部に0.2mm程度のひび割れが主鉄筋方向に発生し、その後b

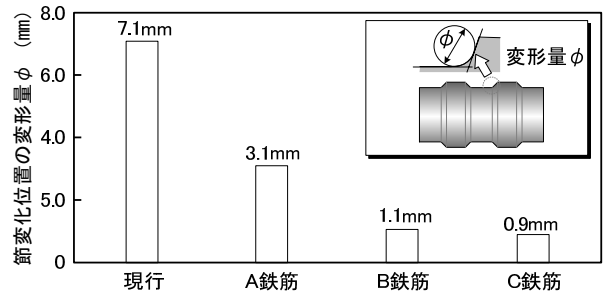


図-5 隅角変化量 $\phi$

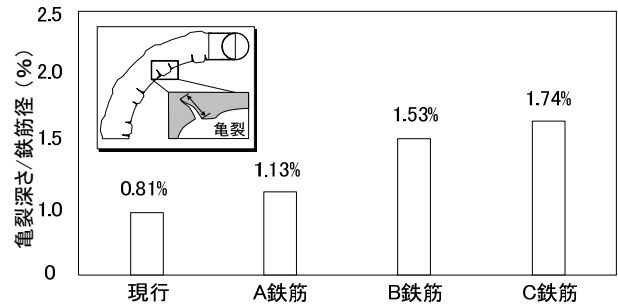


図-6 初期亀裂率

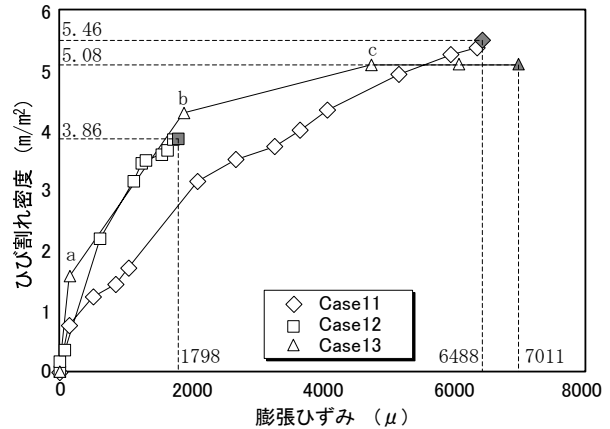


図-7 測線ひずみ、ひび割れ密度結果 (Case11~13)

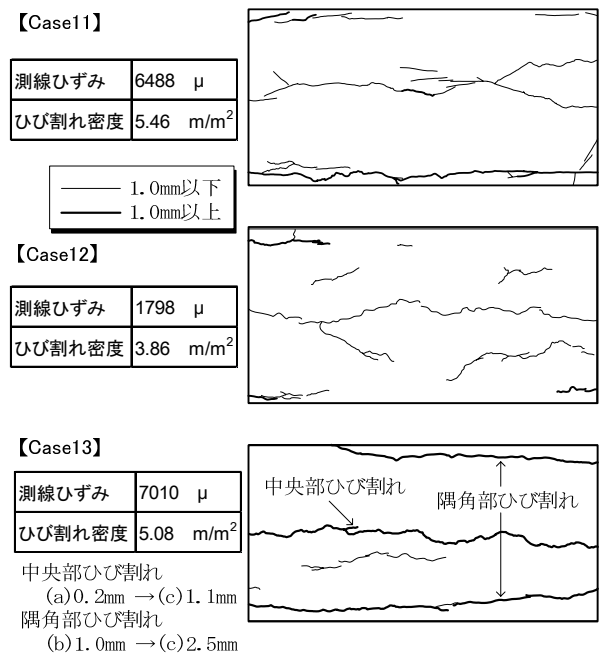


図-8 ひび割れ損傷図 (Case11~13, 最終時)

(ひび割れ密度  $4.29 \text{ m/m}^2$ ) では隅角部付近に  $1.0\text{mm}$  程度のひび割れが発生した。そして,  $c$  (ひび割れ密度  $5.08 \text{ m/m}^2$ ) では, 中央部では  $0.2\text{mm}$  から  $1.1\text{mm}$  程度に, 隅角部では  $1.0\text{mm}$  から  $2.5\text{mm}$  に進展し,  $c$  以降は既存のひび割れ幅が進展する結果となった。なお, Case11, および帯鉄筋比の増加に伴いひび割れの抑制効果が認められた Case12 でも, 同様の進展過程であった。

### (3) 変形状態

帯鉄筋位置でディプスゲージにより測定された変化量を, 固定されたアングルの各測定位置からプロットし, 直線で結ぶことで膨張後の変形図を作成した。図-9 に各帯鉄筋位置の変形状態を示す。各断面において, 初期値からの変形量が最大となる箇所を最大変形量として図中に示す。値は各  $5.04\sim 7.47\text{mm}$  となり大きな差は見られなかった。また発生箇所は, すべて側面の中央部であり, 形状をみても各断面で4辺とも側面中央部ではらみだし, 丸みを帯びた形状となっていた。

また, 図-9 中に示すように, 変形後のプロットを結んだ範囲の面積を算出し, 膨張後面積を初期断面面積 ( $680\text{mm}\times 680\text{mm}$ ) で除して面積変化率を算出した。増加率は  $101.9\%\sim 102.9\%$  の範囲となっており, 全体の変形量は各断面で大きな違いは見られなかった。

### (4) 鉄筋破断が変形状態に及ぼす影響

後述する鉄筋損傷では, 図-9 に示す 2 段目の帯鉄筋で鉄筋破断が生じた。図-10 は鉄筋破断が生じた断面 (2 段目) と破断が生じていない断面 (4 段目) に着目して,  $1000\mu$  時と  $7000\mu$  時 (最終時) の断面変形および隅角部の進展角度を示す。表示している角度は, 図-10 中に示す隅角部端点 (y) から両側に  $340\text{mm}$  のプロット(x), (z) の3点を結んで出来る三角形の y 点の角度を算出し, 初期の角度  $90^\circ$  より進展した量を示す。例えば図-10 中  $1000\mu$  時の (y) 点では  $90.55^\circ$  となり, 進展量は  $0.55^\circ$  となる。

測線ひずみ  $1000\mu$  段階では, 破断断面は側面中央部で  $0.8\sim 2.2\text{mm}$  の変形を示し, 角度は  $0.3\sim 0.8^\circ$  の進展であった。未破断断面は, 側面中央部で  $0.7\sim 2.2\text{mm}$  の変形を示し, 角度は  $0.38\sim 0.8^\circ$  の進展であった。これより  $1000\mu$  と少量の膨張時から, 隅角部で角度進展が発生していることがわかる。また, 破断位置で特に大きな変形や角度進展は発生していない。

次に測線ひずみ  $7000\mu$  段階 (膨張終了時) では, 破断断面は側面中央部で  $2.6\sim 5.0\text{mm}$  の変形を示し, 角度は  $0.86\sim 1.37^\circ$  の進展であった。未破断断面は, 側面中央部で  $3.7\sim 6.0\text{mm}$  の変形を示し, 角度は  $0.86\sim 1.24^\circ$  の進展であった。経時変化では, とともに  $1000\mu$  時と比べ, 膨張にともなった変形に偏りが生じ, 平均 2 倍~2.5 倍に増大していた。破断断面と未破断断面を比較すると, 変形量は

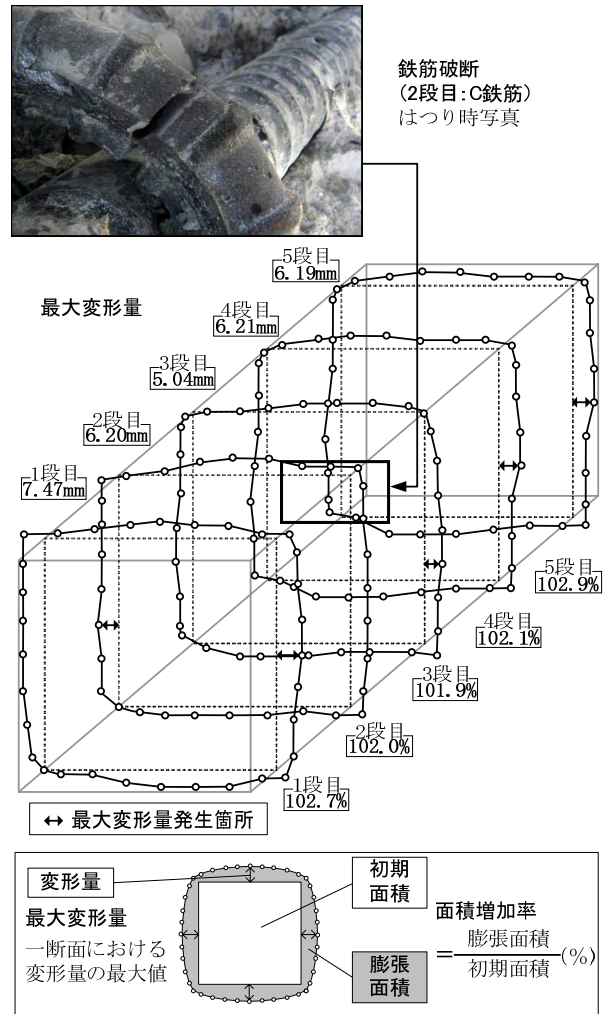


図-9 全体変形図, 面積増加率 (Case13 最終時)

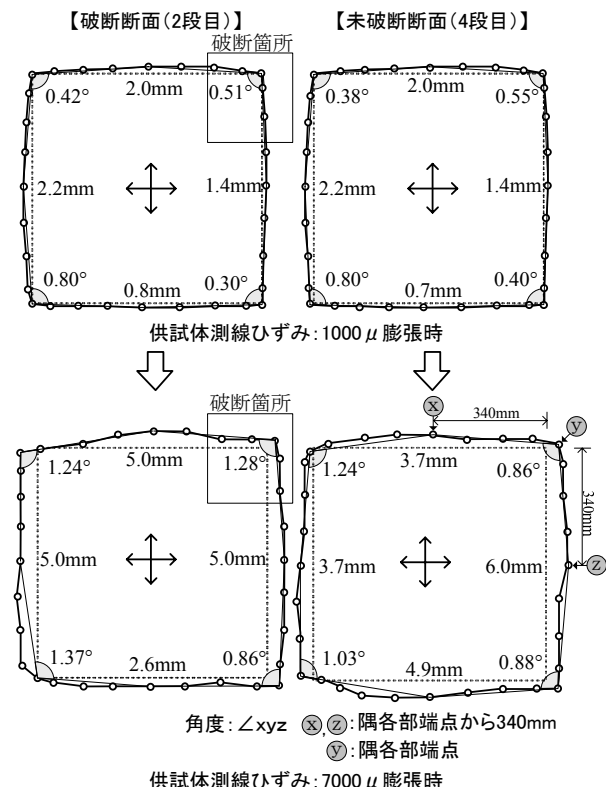


図-10 破断断面, 未破断断面変形図

破断箇所においては、他の箇所と比べてもやや角度進展が大きい傾向が見られた。

#### 4. 鉄筋損傷の亀裂進展度評価

##### (1) 亀裂進展結果

本実験では、膨張収束後の供試体からはつりだした鉄筋曲げ加工部を縦断面方向で1/2にカットし、顕微鏡を用いて断面観察された亀裂深さを鉄筋径で除し、亀裂率としている。図-11にCase11~13の亀裂率を示す。例えば、Case11では、A鉄筋の曲げ加工部が5箇所あり、各曲げ加工部に3~4個発生している亀裂の最大値をプロットしている。

次に、帯鉄筋比の影響について、同じA鉄筋を使用しているCase11, 12で比較を行う。Case11では5箇所の亀裂に対して平均1.68%、Case12では9箇所の亀裂に対して平均2.50%の亀裂が発生していた。亀裂の発生個数や進展量に差は小さいことから、帯鉄筋比の差異による影響は小さいと考えられる。

##### (2) 鉄筋種別の影響

図-12に鉄筋種別の初期亀裂、及び亀裂率の平均値を示す。亀裂率の平均値は、現行鉄筋0.6%に対し、A鉄筋は1.68~2.50%、B鉄筋は3.87%、C鉄筋は20.4%となり、旧基準の鉄筋で進展後亀裂が大きい傾向が見られた。現行鉄筋では初期亀裂0.81%から0.60%程度となり、ばらつきがあるものの進展はほとんどみられなかった。このように減少した要因には、亀裂進展量測定は、鉄筋試料を縦断面にカットして観察しなくてはならないことから、同一試料ではなく、別途実施している材料試験で得られた初期亀裂を用いて評価した影響が考えられる。これに対し、旧基準鉄筋ではA鉄筋で1.43%から2.21%、B鉄筋で2.27%から3.87%、C鉄筋で2.56%から20.4%となり、旧基準の鉄筋においては、いずれも亀裂が進展し、特にC鉄筋のみで急激な進展が発生している。

##### (3) 外観の膨張ひずみと進展後亀裂の関係

進展後亀裂と外観上のひび割れ幅の関係性を検討するために、以下に示す膨張ひずみを定義して検討を行った。膨張ひずみは、帯鉄筋曲げ加工部の近傍の測線ひずみと定義する。具体的には図-13に示すように、供試体端部から両側に340mm(側面幅680mmの1/2)の範囲のひび割れ幅(a, b, c, d)を、対象長さ680mmで除し、算出した値とする。

図-14に横軸に膨張ひずみ( $\mu$ )、縦軸に進展後亀裂(%)の関係性を示す。膨張ひずみは8000 $\mu$ まで幅広く分布し、2000 $\mu$ 以下では5.0%以下と軽微な亀裂であったが、2000 $\mu$ 以上では30%を超える進展後亀裂、鉄筋破断と過大な損傷が確認された。

##### (4) 外観変形(隅角部角度)と進展後亀裂の関係

隅角部の変形角度と進展後亀裂の関係性について検

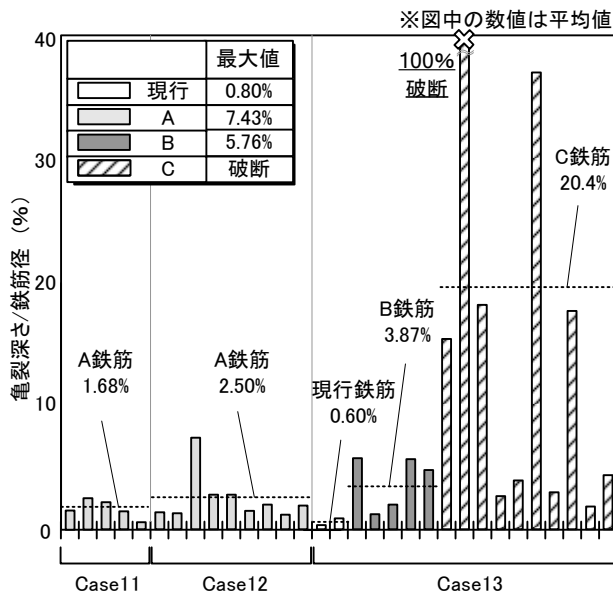


図-11 亀裂率 (Case11~13)

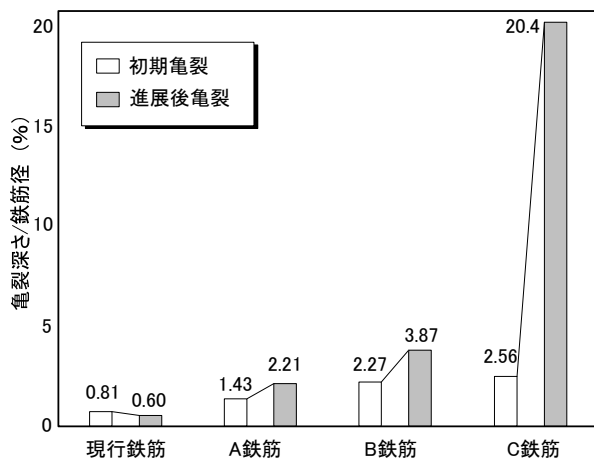


図-12 初期亀裂からの進展率 (平均亀裂)

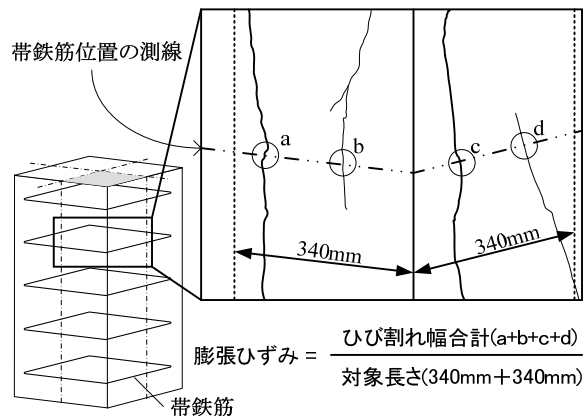


図-13 膨張ひずみの算出方法

討した。隅角部角度は、前述した変形変位が最大となる340mmではなく、図-15に示すように供試体隅角部 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 点でなす角度と定義される。ここで測定長は、変形図のプロットより角度を算出した結果、140mm範囲では進展に収束する傾向が見られたことより、140mmとしている。

図-15に横軸に角度進展度(度)と、縦軸に進展後亀裂(%)の関係性を示す。角度進展はすべて増加しており、 $0.5^\circ$ 以下では、5.0%以下の軽微な亀裂である。 $0.5^\circ$ を超えると10%を超える比較的大きな亀裂が発生しており、さらに $1.0^\circ$ 以上では、30%を超える亀裂、鉄筋破断が発生していた。

### 5. まとめ

本研究はASRの進行が鉄筋の曲げ加工部の損傷に及ぼす影響を把握することにより、亀裂進展原因の解明を目的として実験を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 帯鉄筋比をパラメータに用いた結果、外観上の損傷ではひび割れ発生本数、長さ、ひび割れ幅が帯鉄筋比の増加により抑制されたが、鉄筋亀裂進展程度への影響は見られなかった。
- (2) 鉄筋種類をパラメータに用いた結果、現行鉄筋を用いた場合は亀裂の進展がほとんど確認できなかった。これに対し、 $1.0\%$ 以上の初期亀裂を有する旧基準鉄筋では進展後の亀裂が大きくなることが確認されるとともに、特定の鉄筋で急激に進展する傾向が得られた。
- (3) 鉄筋破断が1箇所確認された箇所で、変形状態を検討した結果、破断面内では変形量、角度進展量ともに大きな差は見られないが、未破断面と比較すると、角度進展量について、やや大きくなる傾向が得られた。

### 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，コンクリートライブラリー124，pp.I-32-I-65，2005.8
- 2) 幸左賢二，川島恭志，合田寛基，興梶展朗：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

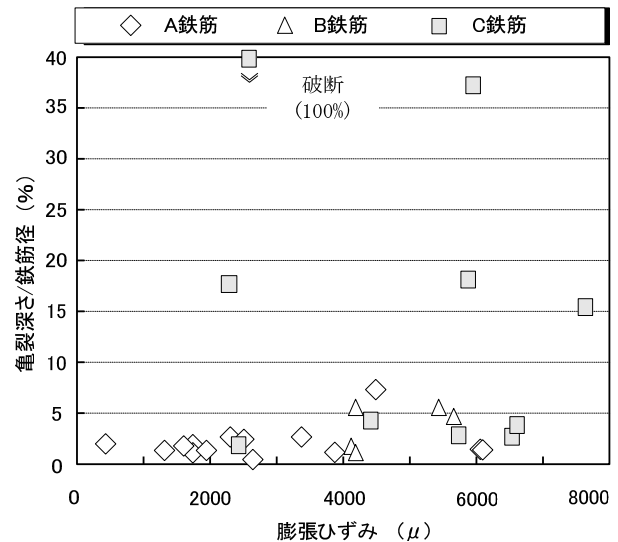


図-14 膨張ひずみと最大亀裂関係

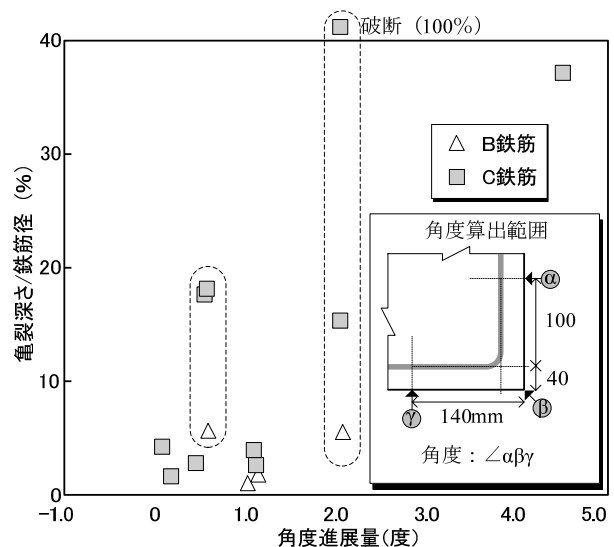


図-15 変形角度と最大亀裂関係

工学論文集，Vol.53A，pp.968-979，2007.3

- 3) Hundy, B. B. : Accelerated Strain Ageing of Mild Steel, Journal Of The Iron Steel Institute, pp.34-38, Sep.1954
- 4) 熊澤美早，西岡敬治，岩永巧，佐々木一則：アルカリ骨材反応による鉄筋損傷の原因究明に関する調査報告，土木学会第59回年次学術講演会，pp.35-36，2004.9