

# 論文 ASR 構造物中における鉄筋の初期欠陥が破断に及ぼす影響

眞野 裕子<sup>\*1</sup>・幸左 賢二<sup>\*2</sup>・合田 寛基<sup>\*3</sup>・荒木 茂<sup>\*4</sup>

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、その原因及びメカニズムの解明を目的としている。曲げ加工した際に曲げ加工部内側に初期亀裂が発生した鉄筋を、膨張コンクリートにより ASR 膨張を模擬した供試体内に配置し、初期亀裂と膨張の関係性について実験的検討を行った。その結果、矩形構造物全体が円形となろうとするため、鉄筋曲げ加工部において大きな応力が作用すること、膨張圧により鉄筋の初期亀裂が進展することが明らかとなった。

キーワード：ASR, 曲げ加工, 鉄筋の初期亀裂, 膨張圧

## 1. はじめに

近年アルカリ骨材反応(以下ASRと表記)等によるコンクリート構造物の早期劣化が問題となっている。ASRに起因する膨張圧の発生により、コンクリートにはひび割れが発生し、鉄筋においては曲げ加工部や圧接部での亀裂・破断が確認されるなど、構造機能の低下が懸念されている。特に鉄筋損傷が生じることにより、耐荷性・耐震性が低下し、構造物が十分に機能しない可能性があるため、維持管理の面からも鉄筋損傷のメカニズムを解明することが重要な課題となっている。

鉄筋損傷に関しては、コンクリートの膨張だけでなく、鉄筋にも原因があると考えられる。そこで、曲げ加工した鉄筋に対して引張試験や縦断面観察等の材料試験を行った結果、写真-1に示すように、曲げ加工半径が小さい場合、曲げ加工時に曲げ加工部内側に初期亀裂が発生していること、その場合破断強度が低下することを明らかにした<sup>1)</sup>。本稿では、ASRによる鉄筋の曲げ加工部での破断に関して、曲げ加工時に初期亀裂が発生した鉄筋を、膨張コンクリートによりASR膨張を模擬した供試体内に配置し、初期亀裂と膨張に関して実験的検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体形状

検討対象として、建設後 20 年程度経過しており、ASR による損傷及び曲げ加工部での鉄筋破断が確認された橋脚を選定した。供試体断面は鉄筋が損傷した場合、構造物の耐力低下が最も懸念される A-A 断面の 1/8 スケールとし、引張主鉄筋比が実橋と等しくなるように D19 を 4 本配置し、帯鉄筋曲げ加工部に作用する膨張を同じにするため、断面は正方形とし、各辺同様の配筋とした。図-2に供試体形状を示す。供試体数が多く、長期的な測定のため、測定を簡易にさせる目的から、小型の供試体を作成し、長さは 670mm とした。膨張コンクリートのみで実験を行った場合、自己崩壊を起こす可能性があることから、中央部を空洞にした普通コンクリートを打設し、その後普通コンクリートの中央部分に膨張コンクリートを打設した。

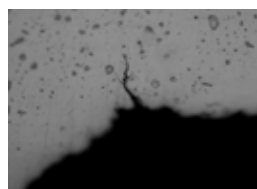


写真-1 鉄筋初期亀裂

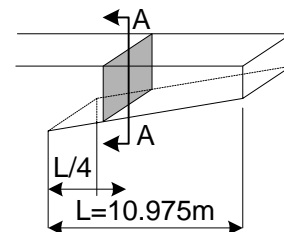


図-1 着目断面

\*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 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)

\*4 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)

## 2.2 検討ケース

パラメーターとしてはかぶりの有無，帯鉄筋比，帯鉄筋の曲げ加工半径，膨張量に着目した。

鉄筋の損傷状況を目視により確認するため，図 - 2 (b)に示すように，帯鉄筋を外側に配置したかぶり無し供試体(case2)を作成した。帯鉄筋比は実橋と同等の 0.147% を標準として，その 2 倍の 0.290% の検討も行った。曲げ加工半径は初期亀裂が多く確認された 1.00d と，初期欠陥の程度が軽微なものとして 1.25d を選定した。膨張量については膨張コンクリートの配合を変化させ，膨張量が小さいものと大きいものの 2 パターンを行った。

## 2.3 使用材料

### (1) 膨張コンクリート

ASR による反応過程は「化学反応によりゲルが生成する化学的過程」と「ゲルが吸水することにより膨張する物理的過程」の 2 つに分類される。実際に反応性骨材を用いた場合，ASR によるひび割れが顕在化するには早くても数年かかるため，本実験では，物理的過程のみに着目し，石灰系膨張材を用いて ASR の膨張を模擬した。

### (2) 鉄筋

帯鉄筋に使用した D10 鉄筋には 90° の曲げ加工を施し，曲げ加工半径は曲げ加工した際に初期亀裂が確認された 1.00d と 1.25d とした。さらに経年劣化を考慮するため，全ての鉄筋に対し，電気炉を用いて 150 ， 60 分の加熱処理を行うことにより，ひずみ時効の促進を行っている。

## 2.4 実験方法

曲げ加工した際に曲げ加工部内側に発生する初期亀裂に関して，対象物を 100 倍まで拡大して観察できるマイクロスコープを用いて画像計測を行った。外側の普通コンクリートは 3 週間養生した後，膨張コンクリートを打設した。

## 2.5 測定項目

本実験では帯鉄筋の応力状態を調べるためにひずみを測定し，膨張による変形を調べるためにデジタルカメラで撮影を行った。図 - 3 にひ

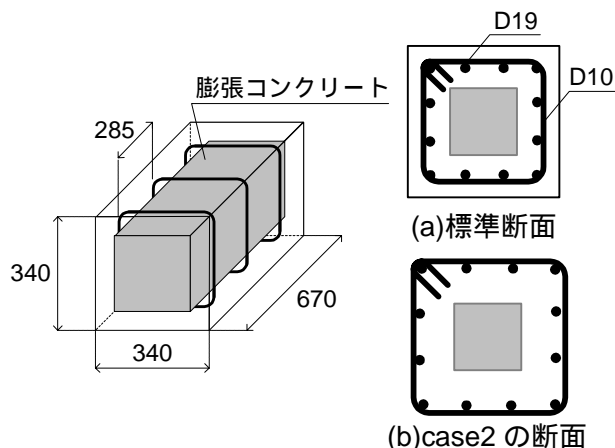


図 - 2 供試体形状

表 - 1 供試体諸元

	かぶり	帯鉄筋比	曲げ加工半径	膨張量
case1	有り	0.147%	1.00d	小
case2	無し	0.147%	1.00d	小
case3	有り	0.290%	1.00d	大
case4	有り	0.147%	1.25d	大

ひずみゲージ測定位置

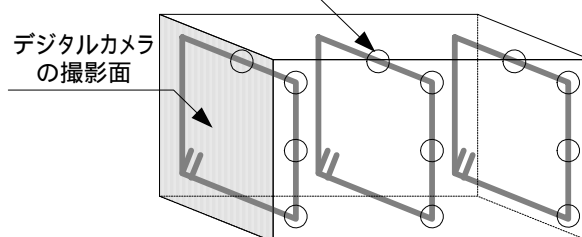


図 - 3 測定項目

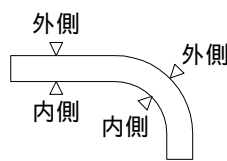


図 - 4 ひずみゲージの貼り付け位置

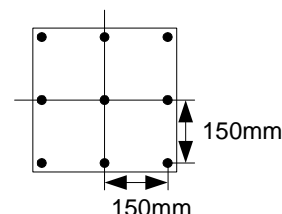


図 - 5 標点位置

ずみ測定位置とデジタルカメラの撮影面を示す。ひずみの測定は，鉄筋の変形を考慮するため，図 - 4 に示すように内側と外側にゲージを貼り付けた。なお，曲げ加工部のうち 1 箇所に関しては，実験終了後，はつり出して亀裂の進展を測定するためにゲージを貼付していない。400 万画素のデジタルカメラを供試体から 30cm 離れた設置台に固定し，図 - 5 に示すように供試体断面に標点を貼り付けて，標点間距離を測定することにより変位量を評価した。

また，曲げ加工部の亀裂程度を評価するため，マイクロスコープを用いて亀裂を観察した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 コンクリートの挙動

##### (1) ひび割れ発生状況

図 - 6 ~ 9 にひび割れ損傷図を示す。ここで、実験終了後にはつり出しによる初期亀裂の進展を確認した case3 を代表例として、膨張コンクリート打設後 2, 3, 5, 11 日目のひび割れ損傷図を載せている。その他のケースについては 11 日目の損傷図を載せている。特に図 - 6(a)には側面 1, 2, 上面を示し、側面 1 に端部、中央部の定義を示している。

図 - 6 からひび割れの発生傾向は、2 日目程度から供試体の側面の中央部に主鉄筋方向にひび割れが発生し、3 日目前後に供試体の端部にひび割れが発生した。その後 5 日目前後までは新しいひび割れが発生していく傾向にあったが、それ以降は既存のひび割れが進展あるいはひび割れ幅が拡大する傾向が見られた。case3 と同様に膨張量の大きい case4 においても同傾向のひび割れ損傷が生じた。一方、膨張量が小さい case1, 2 については、中央部にひび割れが入る程度に損傷が留まっている。膨張がさらに進めば case3, 4 と同様の損傷状況となると考えられる。

図 - 11 に最もひび割れ損傷の激しかった case3 の側面 1 のひび割れ幅の増加傾向を示す。ひび割れ幅は図 - 10 に示す 1mm を超えたものを対象としている。ここで、中央部と端部でひび割れの発生傾向が異なったことから、端部に発生したひび割れを黒で表記し、中央部に発生したひび割れを白抜きでプロットしてひび割れ幅の増加傾向を比較した。日数が経つにつれ、中央部で発生したひび割れ幅に比べ、端部に発生したひび割れ幅の伸びが大きいことが分かる。後述するが、膨張が進むと、鉄筋においては曲げ加工部のひずみが進展し、コンクリートに関しては端部のひび割れが進展すると考えられる。

以上よりひび割れ損傷は、初めに中央部に発生し、その後端部に発生する。その後新たなひび割れ発生が落ち着き、端部を中心としてひび割れ幅やひび割れ長さが進展すると考えられる。

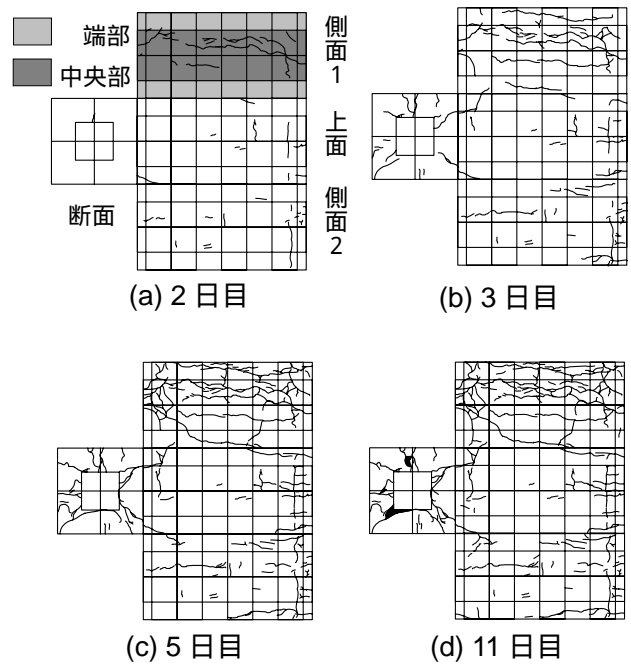


図 - 6 ひび割れ損傷図(case3)

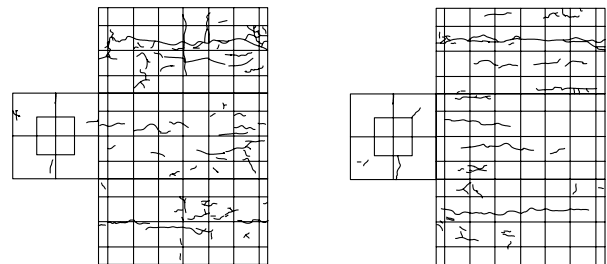


図 - 7 ひび割れ損傷図 (case1, 11 日目) 図 - 8 ひび割れ損傷図 (case2, 11 日目)

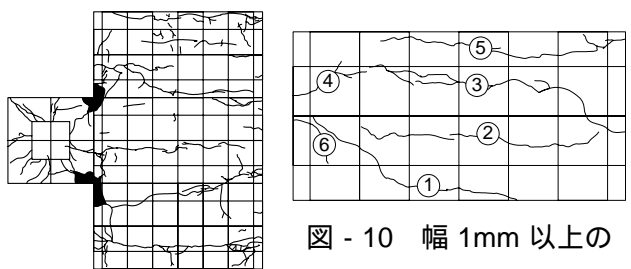


図 - 9 ひび割れ損傷図 (case4, 11 日目) 図 - 10 幅 1mm 以上のひび割れ (case3, 側面 1)

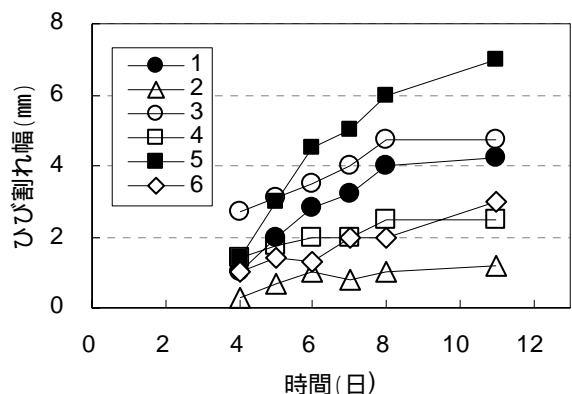


図 - 11 ひび割れ幅の増加傾向

## (2) 変形

膨張量の大きかった case3, 4 に関して, デジタルカメラの画像によって, コンクリートの膨張に伴う変形量に関して検討を行った。

図 - 12, 13 に各ケースの変形の模式図と各標点の移動状況を示す。標点の移動状況は中心の標点を基準点として, その他の標点について移動後の座標で示している。case3 については断面の 1/4 を詳しく示している。

両ケースとも隅角部に貼り付けた標点の X 方向, Y 方向の変位が軸上に貼り付けた標点の変位に比べ小さく, 直線部がはらみだす方向の変形量が大きいたことが分かる。つまり, 供試体が全体的に大きくなるというより, 丸みを帯びるように変形していることが分かる。帯鉄筋比に着目すると, case4 の方が case3 より変形量が大きいたことから, 帯鉄筋比の高い方が鉄筋の拘束により変形が抑えられると考えられる。

### 3.2 鉄筋の挙動

図 - 14, 15 に鉄筋の直線部及び曲げ加工部でのひずみの経過図を示す。データは各ケースの鉄筋ひずみを平均化したものを用いた。

図 - 14, 15 によると, case3 A に対して case1, 2 では膨張量が小さいため, ひずみの伸びは小さいが, 全ケースで直線部に比べ, 曲げ加工部において大きなひずみが発生しており, 曲げ加工部に変形が集中していることが分かる。

鉄筋の内側と外側を比較すると, 直線部では外側の方が引張ひずみが大きく, 曲げ加工部では内側の方で引張, 外側で圧縮のひずみが発生している。図 - 12, 13 に示す変形状態とあわせて考えると, コンクリートの膨張により, 帯鉄筋の直線部は外側に押し出されるため, 外側の引張ひずみが内側より大きくなり, 曲げ加工部では広げられるような挙動であるため, 内側に引張ひずみが集中したと考えられる(図 - 16)。特に直線部のひずみからは, 膨張量が大きいものの方が内側と外側のひずみの差が顕著であることから, 膨張量が大きいほど, 丸みを帯びた変形となる傾向が高いと考えられる。帯鉄筋比に

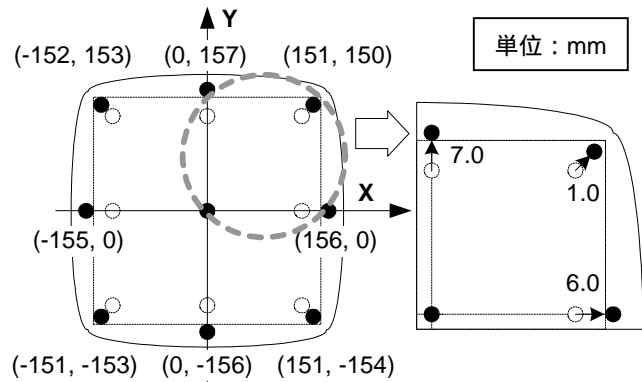


図 - 12 変形図(case3, 11日目)

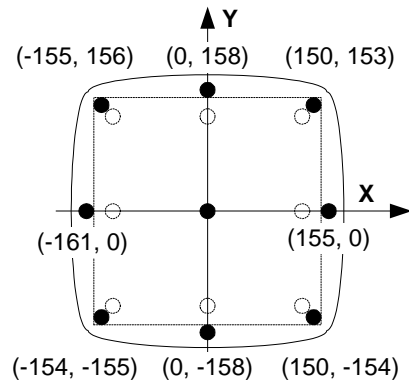


図 - 13 変形図(case4, 11日目)

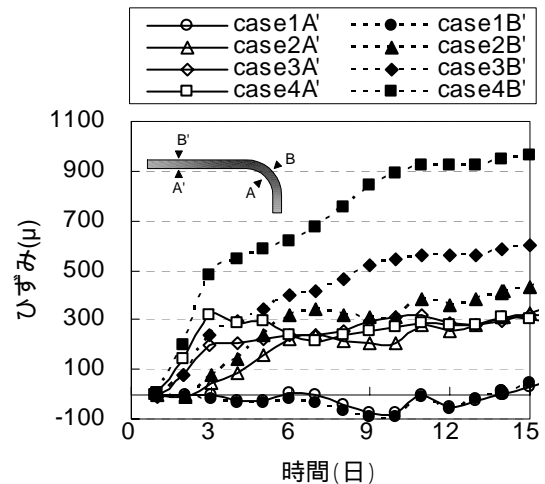


図 - 14 鉄筋ひずみ経過図(直線部)

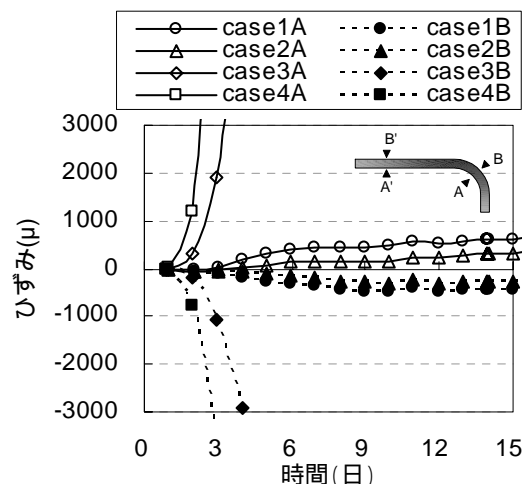


図 - 15 鉄筋ひずみ経過図(曲げ加工部)

着目すると，case4 は case3 より大きなひずみが発生していることから，鉄筋にかかる応力が大きいと考えられる。よって，帯鉄筋比が小さい方が 1 本あたりの鉄筋が負担する膨張圧が大きいため，大きな応力が発生すると考えられる。

#### 4. 実橋との比較

図 - 17 に対象橋梁のひび割れ損傷図を示す。0.2mm 以上のひび割れに着目し，1mm を超えるひび割れに関しては 1 以上として表記した。ひび割れは梁側面の中央部及び上面の端部に主鉄筋に沿う方向に発生し，その後既存のひび割れが進展するとともに，梁側面及び上面に全体的に新たなひび割れが発生している。特に破断が確認された箇所では，幅 1mm 以上の長いひび割れが発生している。鉄筋損傷としては破断，曲げ加工部内側において亀裂が確認されている。

ここで，対象断面である A-A 断面の梁側面 2 面及び上面を横切るひび割れの総ひび割れ幅と供試体の総ひび割れ幅，ひび割れ本数を表 - 2 に示す。供試体の総ひび割れ幅及びひび割れ本数は，帯鉄筋比が同等の case4 の側面 2 面及び上面における全測定線の総ひび割れ幅，測定線をまたぐひび割れ本数の平均値を用いた。また，総ひび割れ幅及びひび割れ本数を対象長さで除することにより，断面での損傷度を検討した。

表 - 2 より，供試体の 4 日目と実橋の A-A 断面での見かけの膨張量及び単位長さあたりのひび割れ本数が，若干の値の差はあるが，比較的近い値を示している。供試体においては，その後，膨張量の増加に伴って，端部のひび割れ幅が拡大していき，鉄筋に発生する引張応力が卓越することから，実橋の A-A 断面も膨張が進むにつれて端部(スターラップ曲げ加工部付近)にひび割れが多く発生し，鉄筋曲げ加工部において引張応力が集中すると考えられる。

#### 5. 初期亀裂の進展

曲げ加工半径 1.00d で初期損傷が大きく，膨張量も大きい case3 に関してはつり取り調査を行

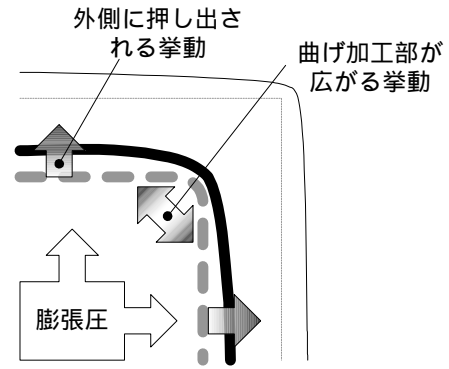
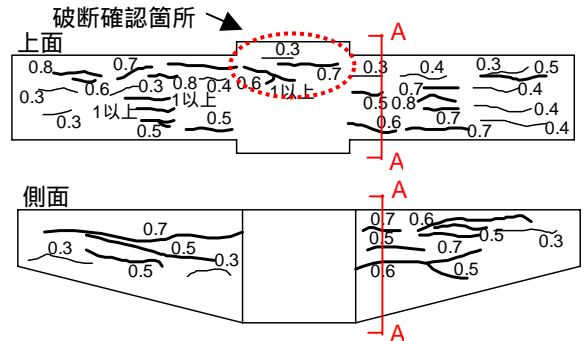


図 - 16 鉄筋の挙動



— ひび割れ幅0.5mm以上  
— ひび割れ幅0.2mm以上

図 - 17 対象橋梁ひび割れ損傷図

表 - 2 実橋と供試体の膨張量の比較

	実橋	供試体	
	A-A断面	4日目	11日目
総ひび割れ幅(mm)	9.8	1.0	3.4
ひび割れ本数(本)	22	3.9	7.1
対象長さ(mm)	8370	1020	
見かけの膨張量( $\times 10^6$ )	1171	964	3364
単位長さあたりのひび割れ本数(本/m)	2.63	3.78	7.00

見かけの膨張量 = 総ひび割れ幅/対象長さ  
単位長さあたりのひび割れ本数 = ひび割れ本数/対象長さ

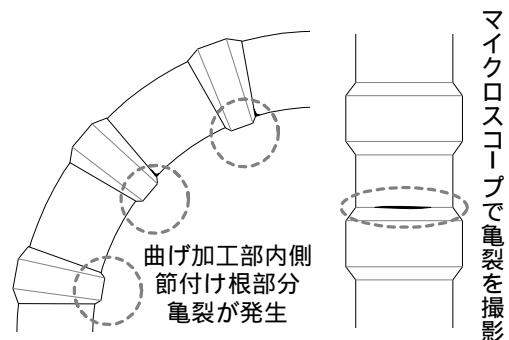


図 - 18 亀裂測定位置

表 - 3 鉄筋初期亀裂の変化量

		鉄筋1	鉄筋2	鉄筋3	鉄筋4	鉄筋5
亀裂幅	試験前	0.089	0.071	0.076	0.093	0.082
	試験後	0.091	0.113	0.109	0.148	0.122
	伸び量	0.002	0.042	0.033	0.055	0.040
亀裂長さ	試験前	3.660	7.492	4.012	7.500	6.520
	試験後	5.950	8.095	4.737	7.523	6.588
	伸び量	2.290	0.603	0.725	0.023	0.068

(単位 : mm)

い、亀裂の進展状況を確認した。case3 における曲げ加工部内側の引張りずみは、平均で 15000  $\mu$  を越えていたことから、case3 の帯鉄筋には、膨張圧により曲げ加工部に高い引張応力が作用したと考えられる。

亀裂の測定箇所は、図 - 18 に示すように曲げ加工によって亀裂が発生すると考えられる<sup>1)</sup>曲げ加工部内側での節付け根を対象としている。

測定はマイクロSCOPEを用いて行い、打設前とはつりだした後の亀裂状況を比較している。マイクロSCOPEの画像は3.0×4.5mmの範囲を45万画素で撮影し、画像診断ソフトを用いて処理し、測定している。

図 - 19, 20 に亀裂の撮影状況、表 - 3, 図 - 21, 22 に測定結果を示す。表 - 3, 図 - 21, 22 で表記している値は、各帯鉄筋で確認された亀裂の中で最も大きい亀裂である。図 - 21 によると、亀裂幅はすべて亀裂について進展が確認でき、最大では 1.58 倍となる亀裂もあった。亀裂長さについては、ほとんど変わらない亀裂もあるが、約 2mm 程度大きくなる亀裂も見られた。以上より亀裂長さ、亀裂幅共に進展にばらつきが見られるものの、膨張圧によって初期亀裂が進展していくことを確認した。

しかし膨張量が過大であったにも関わらず、破断に至らなかった。これは検討に用いた鉄筋が現行規格の鉄筋であり、節形状など亀裂の発生に大きく影響を与える条件が損傷を受けた約 20 年前の鉄筋より安全側であること、膨張圧がかかる時間が短期であったため、経年劣化の影響が少なかったことが原因であると考えられる。

## 6. まとめ

以上より得られた結果を以下にまとめる。

- (1) コンクリートが膨張すると、鉄筋曲げ加工部において大きな応力が発生し、付近のひび割れも進展する傾向にあるため、構造物全体が円形になる挙動を示す。
- (2) 膨張圧により、曲げ加工によって発生する鉄筋初期亀裂が進展することがわかった。

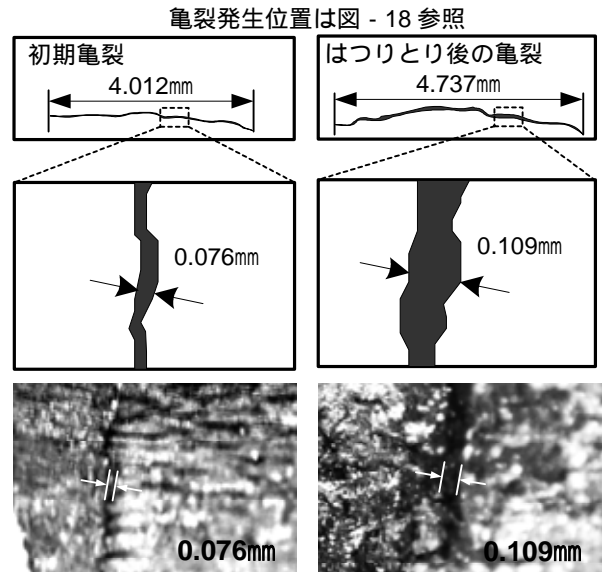


図 - 19 実験前の亀裂 図 - 20 実験後の亀裂  
(鉄筋 3 最大亀裂幅) (鉄筋 3 最大亀裂幅)

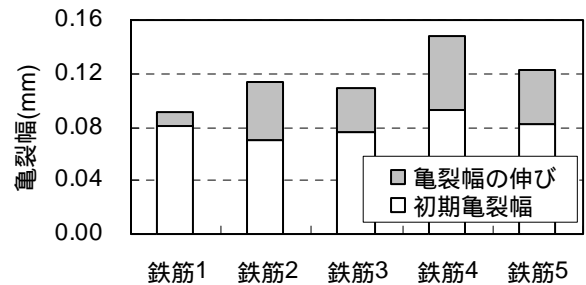


図 - 21 亀裂幅の進展

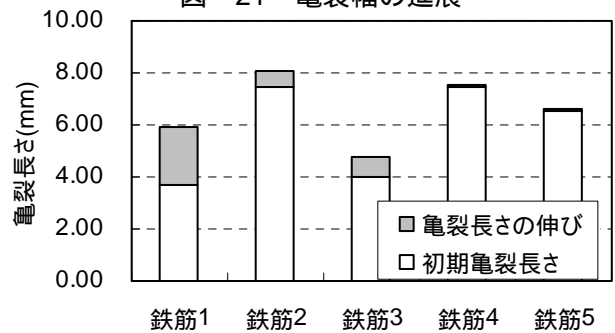


図 - 22 亀裂長さの進展

- (3) 今回の実験では膨張量が過大であったにも関わらず、鉄筋破断は起こらなかった。しかし、亀裂の進展は見られたことから、鉄筋の初期損傷の程度によっては破断に至る可能性があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 眞野裕子, 幸左賢二, 松本茂, 橋場盛: 曲げ加工部での鉄筋損傷メカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.963-968, 2004.7