

論文 鉄筋の節形状とコンクリートの膨張が破断に与える影響

興梠 展朗^{*1}・幸左 賢二^{*2}・合田 寛基^{*3}・五十嵐 弘行^{*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、その原因およびメカニズムの解明を目的としている。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、鉄筋曲げ加工部に変形が集中すること、および旧節形状鉄筋では鉄筋径の 1/3 の亀裂深さの進展が見られ、節形状が鉄筋破断に与える影響が大きい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が著しく進行した構造物に関しては、鉄筋の曲げ加工部や圧接部での亀裂・破断が確認されていることから、構造機能の低下が懸念されており、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。

そこで本研究では、曲げ加工時に曲げ加工部内側に亀裂が発生した鉄筋を供試体内部に配置し、コンクリート膨張に伴う鉄筋の亀裂の進展に関する検討を行った。

2. 本研究の流れ

図-1に研究フローを示す。図-1の左側には推定鉄筋損傷メカニズムを示すが、ASRによる鉄筋破断は曲げ加工時に発生する初期亀裂、ASRによるコンクリートの膨張、遅れ破壊等の材料の劣化といった複合的な要因により発生すると考えられる。そこで、過年度、材料に着目した研究を行い、鉄筋は経年劣化の影響を受けることで、破断感受性が増大することを明らか

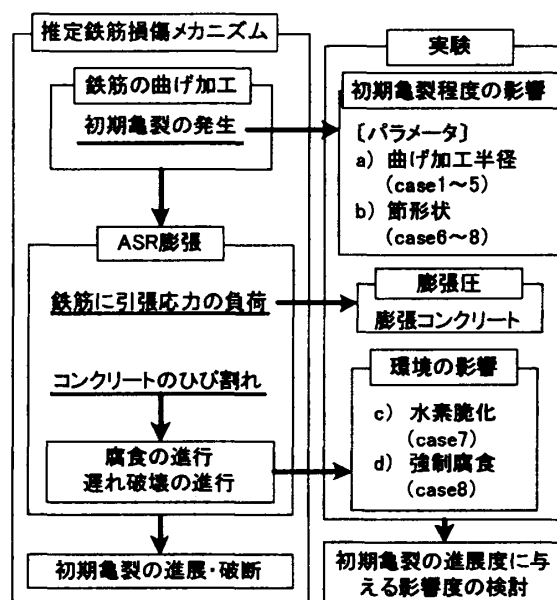


図-1 研究フロー

にしている¹⁾。しかしながら、材料試験では鉄筋曲げ戻し状態での評価となっているため、本研究ではコンクリート中での鉄筋挙動を正確に評価するために、膨張コンクリートを用いた供試体実験を行った。図-1の右側に示すように初期亀裂と環境の影響に着目し、曲げ加工半径の影響、現行と旧鉄筋の節形状（以下旧節形状鉄筋と称す）の影響、環境による遅れ破壊の影響に関する実験を行った。特に、節形状に関して

*1 九州工業大学 工学部 建設社会工学科（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 神鋼鋼線工業株式会社 開発本部 開発部

は、実橋で破断が確認された鉄筋の節形状が現行の節形状と異なっており、鉄筋破断に影響を与えると考えられる。そこで、曲げ加工半径、節形状の違いをパラメータとした検討を行った。

3. 実験概要

3.1 実験の流れ

本実験の流れを図-2に示す。曲げ加工時に発生する初期亀裂と、供試体実験により膨張圧を受けた進展後亀裂の深さを縦断面観察により測定し、初期亀裂と進展後亀裂の比較を行った。

3.2 供試体諸元

(1) パラメータ

表-1に供試体諸元を示す。パラメータとしてはかぶりの有無、帯鉄筋比、帯鉄筋の曲げ加工半径、節形状、環境条件を設定した。

かぶりの有無に関しては、外部から鉄筋の損傷を見るためにかぶりを無くした case2 を作製した。

帯鉄筋比に関しては、プロトモデルとした実橋の帯鉄筋比 0.147% を基準として、case3 に約 2 倍となった場合の 0.290%，case6～7 に現行 D16 と旧節形状 D16 を配置した 0.410% を設定した。

曲げ加工半径に関しては、実橋で破断していた D16 鉄筋の曲げ加工半径が $1.8d$ であったことから²⁾、それよりも損傷度の高い曲げ加工半径を基準として設定するため、既往の検討¹⁾で初期亀裂が最も多く確認された曲げ加工半径 $1.00d$ (d は公称直径) を基準とし、case4 に初期損傷が軽微な $1.25d$ ，case5 に $1.00d$ よりさらに厳しい初期損傷の $0.75d$ を選定した。また、節形状の異なる鉄筋を配置した case6～7 は全て $1.00d$ とした。

節形状に関しては、昭和 60 年代に異形鉄筋の節形状が緩やかな形状に変更され、応力集中しにくい形状となったため³⁾、竣工後 30 年以上経過している構造物からは取り出した旧節形状 D16 を検討対象に加え、現行 D16 と共に供試体に配置した。

環境条件に関しては、case7 では膨張収束後、過防食の方法で応力が集中する曲げ加工部に水素を充填させ、その後、拡散性水素量を測定

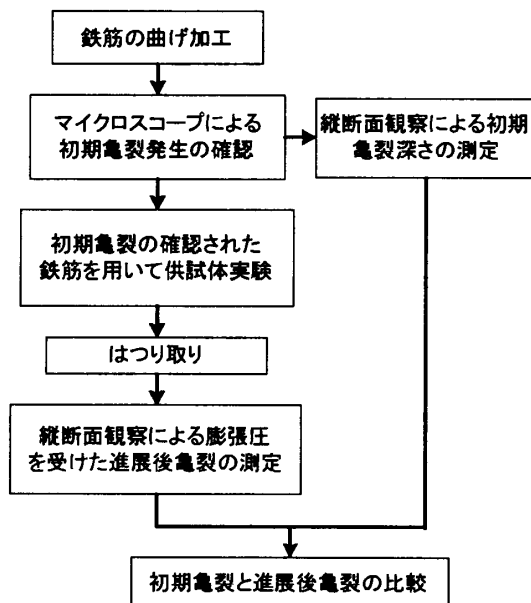


図-2 実験フロー

表-1 供試体諸元

	曲げ加工半径	帯鉄筋比	鉄筋種別	かぶり	環境条件
case1	1.00d	0.147%	D10	有り	通常
case2	1.00d	0.147%	D10	無し	通常
case3	1.00d	0.290%	D10	有り	通常
case4	1.25d	0.147%	D10	有り	通常
case5	0.75d	0.147%	D10	有り	通常
case6	1.00d	0.410%	3種類※	有り	通常
case7	1.00d	0.410%	3種類※	有り	水素脆化(中止)
case8	1.00d	0.410%	3種類※	有り	腐食

※現行D16, D10, 旧節形状D16

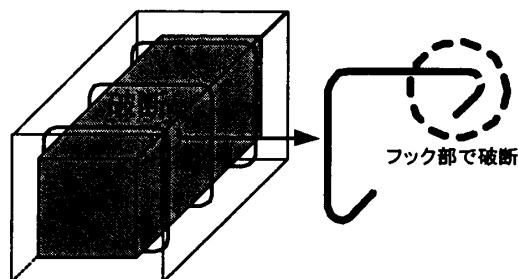


図-3 case7 鉄筋破断状況

することにより水素脆化の影響を評価する予定であったが、供試体膨張時に帯鉄筋フック部分での破断が確認されたため(図-3)、膨張収束後 case6 と同様に鉄筋をはつり出し、縦断面観察を行った。また、破断箇所は 135° の鉄筋曲げ加工部であることから、鉄筋破断現象の一種であると考えられる。case8 に関しては電食の方法で強制的に腐食を生じさせた。

(2) 供試体形状

図-4に供試体形状を示す。本研究では、ASR

によって内部に発生する膨張圧の再現を行うため、膨張コンクリートを普通コンクリートの中央部に打設して実験を行った。供試体寸法に関しては、実際に ASR による損傷および曲げ加工部での鉄筋破断が確認された橋脚梁部の断面を 1/8 にスケールダウンして用いた。

なお、帯鉄筋形状は D10 では鉄筋 1 本を断面に合わせ四角に加工したものを用いた。また、case6~7 の供試体端部に配置した現行および旧節形状 D16 では入手した鉄筋の長さの制約により図-3 のように両端にフックを設けた L 型形状の鉄筋を 2 つ合わせて用いた。

(3) 供試体作成および使用材料

本実験では外側の普通コンクリートを 3 週間養生した後、膨張コンクリートを打設した。膨張コンクリートには石灰系膨張材を用いた。鉄筋に関しては、検討に用いた旧節形状鉄筋および現行鉄筋は機械的性質、成分共に、JIS 規格値を満足していた。鉄筋には、経年劣化を考慮するため、電気炉を用いて 120℃、10 時間の加熱処理を行い、ひずみ時効の促進を行っている。

3.3 実験方法

(1) 縦断面観察方法

曲げ加工による鉄筋の初期亀裂及び亀裂の進展状況を調べるため、縦断面観察を実施した。縦断面観察方法を図-5 に示す。曲げ加工した鉄筋を軸方向に 1/2 にカットし、顕微鏡を用いて 50~200 倍の断面を観察し、亀裂深さ、亀裂幅を測定した。なお、本検討では曲げ加工だけの状態で測定した亀裂を初期亀裂、膨張実験より膨張圧を受けた帯鉄筋の曲げ加工部で測定した亀裂を進展後亀裂と定義する。初期亀裂に関しては各条件において鉄筋 3 本について測定した。

(2) 供試体測定項目

本実験では膨張によって発生するひび割れと、帯鉄筋の応力状態を調べるためにひずみを測定した。ひずみの測定は、鉄筋の変形を考慮するため曲げ加工部内側、外側、近傍、直線部にゲージを貼り付けた。ただし、亀裂の進展を確認する曲げ加工部ではゲージを貼り付けていない。

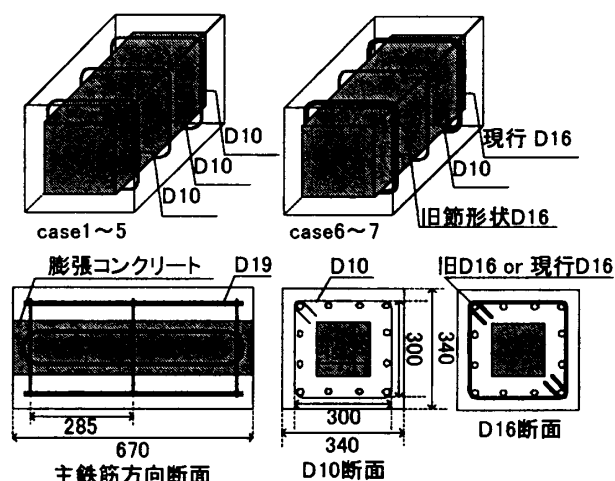


図-4 供試体形状

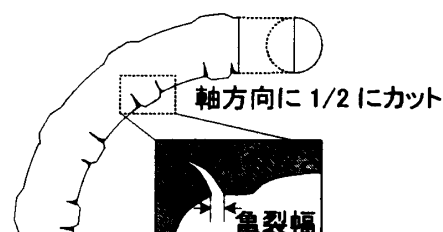


図-5 亀裂の測定方法

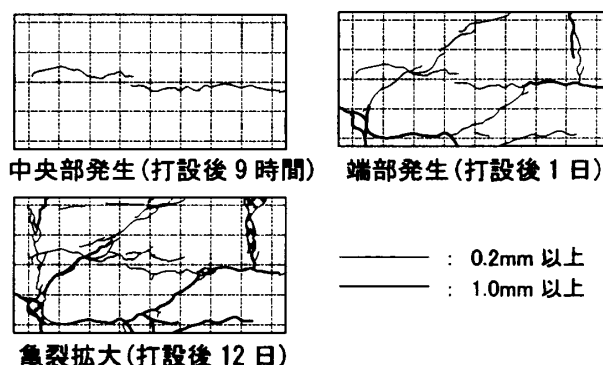


図-6 ひび割れ進展図 (case6)

4. 実験結果

4.1 コンクリート供試体の計測結果

(1) ひび割れ性状

図-6 に供試体実験の代表例として case6 のひび割れ進展図を示す。まず、ひび割れは供試体中央部軸方向に発生し、次に軸方向端部で発生した。その後軸方向端部のひび割れが拡大した。また、帯鉄筋に沿ったひび割れも発生していたが、これは D16 鉄筋のかぶりが薄いことが影響したと考えられる。ひび割れの発生メカニズムを図-7 に示す。供試体全体が丸くなる挙動となるため、ひび割れが供試体中央部に発生し、次に端部で発生する。鉄筋にはコンクリートの膨張圧による曲げ戻しの影響により、曲げ

加工による残留ひずみ以外の大きな引張ひずみが曲げ加工部内側で発生し、膨張が進むと鉄筋が降伏して拘束力が低下するため、端部のひび割れが拡大すると考えられる。

(2) 鉄筋ひずみの進展

図-8に D10 に着目した case6 の鉄筋の直線部および曲げ加工部でのひずみの経過図を示す。図-8より、膨張初期の段階で曲げ加工部の内側(A)では引張ひずみ、外側(B)では圧縮ひずみが大きく発生している。一方、曲げ加工部近傍(C)および直線部(D)は降伏には至るものの、ひずみの進展が遅いことから、曲げ加工部に变形が集中すると考えられる。

ひずみの結果より D10, D16 共に曲げ加工部で変形が起こり亀裂が進展していると考えられるため、縦断面観察を行った。

4.2 縦断面観察結果

(1) 初期亀裂深さの測定結果

表-2に初期亀裂の大きさと亀裂発生個数を示す。なお、亀裂深さは鉄筋径で除すことにより無次元化を行い評価した。

(a) 曲げ加工半径

表-2より、現行 D10 に着目して比較すると、1.00d と 1.25d では差異が小さいが、0.75d では 1.00d, 1.25d と比べ平均値、最大値共に大きく上回る結果が得られた。図-9には現行 D10 の曲げ加工半径と亀裂深さ割合の全データの関係を示す。図-9より曲げ加工半径が小さくなることで亀裂深さが急激に大きくなる傾向が見て取れる。また、亀裂の発生個数についても曲げ加工が厳しい方が多く発生していることから、厳しい曲げ加工半径は初期損傷に与える影響が大きいと考えられる。

(b) 鉄筋径の影響

表-2より、現行 D10 と現行 D16 の曲げ加工半径 1.00d を比較すると、現行 D16 の方が大きく上回る亀裂深さとなっており、亀裂個数も多く発生している。亀裂は節付け根部に発生するため、節の個数について着目すると、JIS 規格による節の平均間隔の許容限度より節間隔は、D10

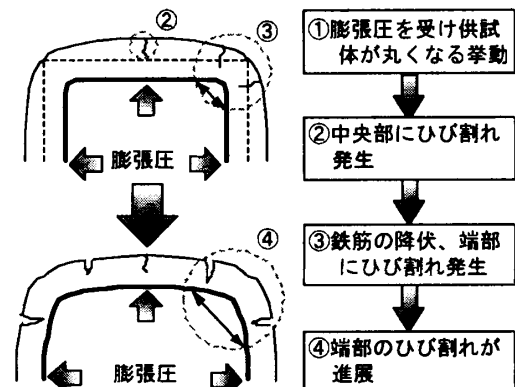


図-7 ひび割れ発生メカニズム

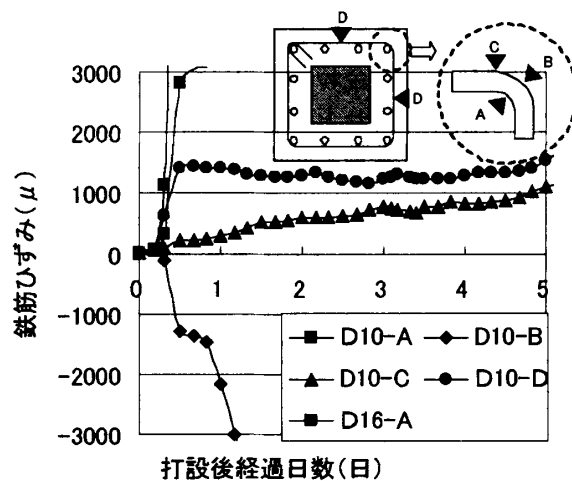


図-8 鉄筋ひずみ経過図 (case6 D10)

表-2 初期亀裂の大きさと発生個数

節形状	曲げ加工半径	鉄筋径に対する亀裂割合(%)		平均亀裂発生個数
		平均	最大	
現行D10	1.25d	0.14	0.26	2.0
	1.00d	0.17	0.41	2.7
	0.75d	0.70	1.48	4.3
現行D16	1.00d	0.61	1.79	6.0
旧節形状D16	1.00d	1.43	3.96	5.0

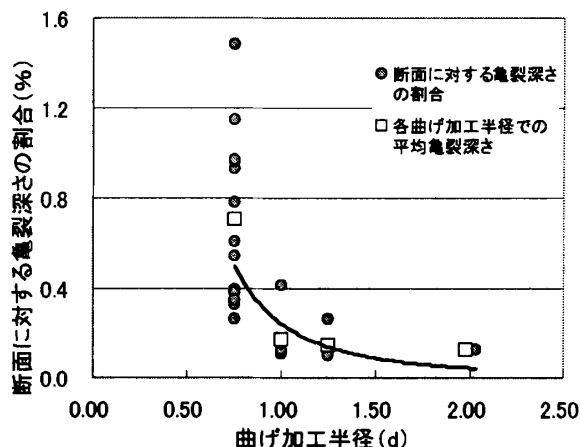


図-9 曲げ加工半径の影響 (現行 D10)

では6.7mm, D16では11.1mm以下でなければならないため, 1.00dの曲げ加工を行う場合, 図-10に示すように, D10もD16も最低3.4個の節が曲げ加工の影響を受ける。また, 鉄筋の圧縮側面積が変化する絶対量の違いにより節付け根部が受ける応力が変化すると仮定して鉄筋の面積変化量を求めた。曲げ加工時に圧縮の影響を受ける部分を灰色で示すと, D10では 118mm^2 から 98.2mm^2 と, 19.8mm^2 の減少が考えられる。同様にD16では 50.3mm^2 減少しており, D16の方が約2.5倍変形の絶対量が多い。これより曲げ加工の影響を受ける節の個数が同じ場合, 鉄筋径が大きい方が節付け根に集中する変形の絶対量が大きくなり, より初期損傷度が酷くなると考えられる。

(c) 節形状の差

表-2より, 現行D16と旧節形状D16を比較すると亀裂の発生個数は同程度であるが, 亀裂深さでは, 旧節形状の方が大きく上回っている。そこで, 節形状に関する検討を行った。

図-11に節形状の測定方法と実際の旧節形状の曲率を示す。節立ち上がり部分の直線部の延長と, 鉄筋の直線部の延長により切り取られた節変化部の曲線に合わせて円を描き, その円の直径を曲率 ϕ とした。3つの節に対して節の形状変化部の曲率 ϕ を測定し, その平均値を鉄筋径で除すことで無次元化を行っている。

図-12に節形状の測定結果を示す。図-12より, 節の変化位置の曲率は現行の節が42%, 44%であるのに対し, 旧節形状D16では7.0%と小さく, 6倍以上の差が認められた。急激な形状変化部では応力集中と塑性変形が起き, その結果節付け根部に亀裂が発生すると考えられるため³⁾, 旧節形状鉄筋は現行鉄筋よりも大きな亀裂が発生しやすい節形状であったと考えられる。

(2) 進展後亀裂の検討

はつり出した鉄筋の縦断面観察から, 亀裂深さの最大値比較を図-13に, 曲げ加工半径1.00dでの最大亀裂の亀裂幅を表-3に, 観察結果の代表例を写真-1に示し, 進展後亀裂と初期亀

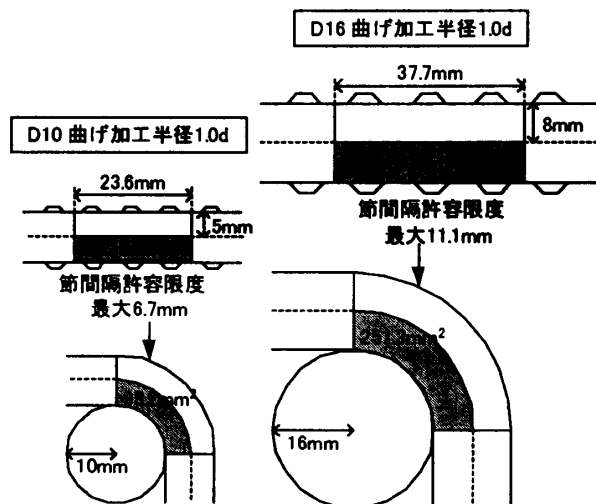


図-10 鉄筋の面積変化

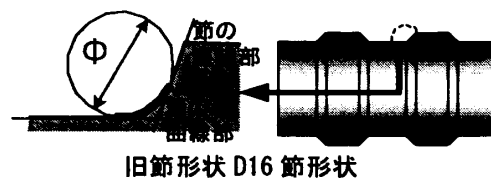


図-11 節形状測定方法

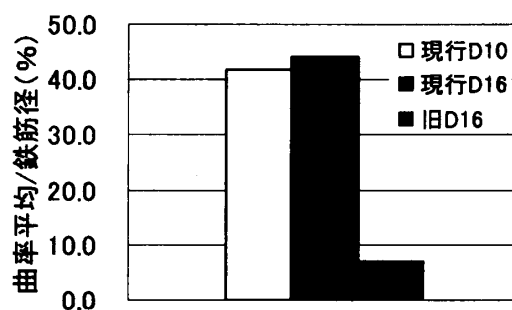
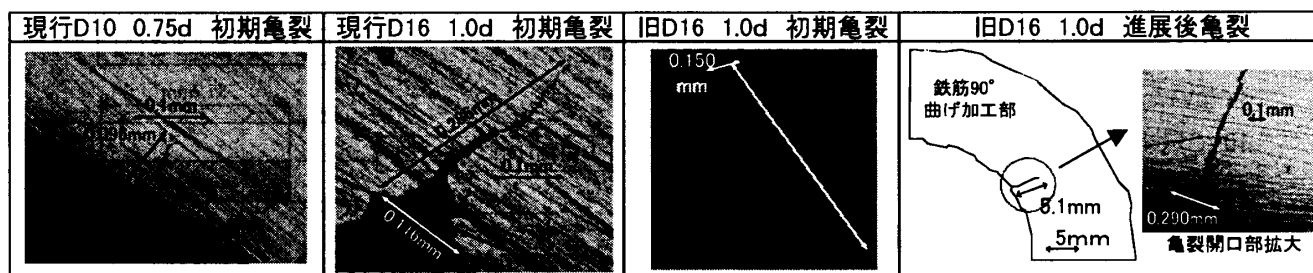


図-12 節変化位置の比較

裂の比較検討を行った。

図-13より, 現行D10の曲げ加工半径の影響に着目すると, 進展後亀裂の割合は曲げ加工半径が小さくなるほど大きくなった。特に, 旧節形状D16では進展後亀裂が断面の1/3に及ぶ非常に顕著な値を示している。旧節形状D16と現行鉄筋の曲げ加工半径1.00dを比較すると最大で23.9倍の亀裂深さが発生しており, 大きな初期亀裂部で応力集中が顕著に発生し亀裂が急激に進展したと考えられる。よって, 初期亀裂が大きいほど亀裂の進展速度も早いと考えられる。



写真－1 亀裂観察結果 代表例

また、現行 D16 に関して、進展後の亀裂深さの方が小さくなっているが、縦断面観察の方法上、初期亀裂と進展後亀裂を同一の試料で検討できないために生じる差異が原因であると考えられる。

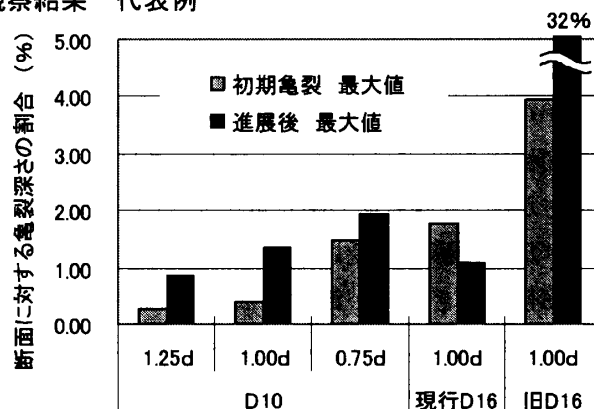
写真－1 に亀裂観察結果の代表例を示すが、亀裂が大きい場合、亀裂開口部が扇状に広がっている傾向が見られた。扇状の形状は初期亀裂の段階でも確認できるため、扇状の形状部分は、鉄筋の表面が内側に変形して発生したと考えられる。

表－3 より、初期亀裂の亀裂幅と進展後の亀裂幅を比較すると、現行 D10 と旧節形状 D16 において進展が確認された。特に、亀裂深さが鉄筋径の 1/3 に達していた旧節形状 D16 の亀裂幅が最も大きく、大きな扇状の形状部分が発生していた。

したがって、旧節形状 D16 では、曲げ加工時に鉄筋の表面が内側に変形することで、大きな扇状の形状部分が形成され、扇状先端部で応力集中が顕著に発生したため、急激な亀裂の進展が見られたと考えられる。

5. まとめ

- (1) ASR による膨張を模擬したコンクリート供試体の帯鉄筋曲げ加工部近傍と曲げ加工部のひずみの比較から、曲げ加工部に変形が集中することにより、曲げ加工部の亀裂の進展を助長すると考えられる。
- (2) 旧節形状鉄筋は現行鉄筋に比べ、節付け根変化位置の曲率が 1/6 と小さく、初期亀裂深さは 2.0 倍以上であった。また、曲げ加工半径 1.00d の進展後亀裂では現行鉄筋に比べ、最大



図－13 亀裂最大値比較

表－3 亀裂幅結果

亀裂幅(mm)	曲げ加工半径1.00d 最大亀裂		
	現行D10	現行D16	旧D16
初期亀裂	0.008	0.116	0.150
進展後亀裂	0.128	0.004	0.290

23.9 倍の亀裂（鉄筋径の約 1/3）が発生しており、旧節形状が鉄筋破断に与える影響は極めて大きいと言える。

- (3) 本研究の供試体実験において旧鉄筋を用いることにより、鉄筋径の 1/3 までの亀裂進展は再現できたことから、定性的には鉄筋破断現象を再現できたと考えられる。

参考文献

- 1) 眞野, 幸左, 松本, 橋場: 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
- 2) 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
- 3) 佐々木, 熊澤, 五十嵐: アルカリ骨材反応による鉄筋損傷の原因究明に関する検討報告, 土木学会第 60 回年次学術講演会 pp.31-32, 平成 17 年 9 月