

論文 ASR 実構造物の鉄筋損傷に対する初期損傷の影響

川島 恭志^{*1}・幸左 賢二^{*2}・合田 寛基^{*3}・興相 展朗^{*4}

要旨：ASR による鉄筋破断は鉄筋を曲げ加工した際に生じる初期亀裂が起点となっており、鉄筋破断を予防するためにも初期亀裂の発生メカニズムを明らかにする必要がある。そのため、鉄筋曲げ加工試験により初期亀裂の発生傾向と発生メカニズムの推定を行った。試験結果によると、初期亀裂の発生には曲げ加工半径、節形状が影響しており、特に節形状の影響が大きいことが判明した。また、現行鉄筋を道路橋示方書の規格内で曲げ加工を行って使用している場合、ASR による鉄筋破断の可能性は極めて低いことが明らかとなった。
 キーワード：ASR, 鉄筋破断, 旧節形状鉄筋, 曲げ加工半径, 節形状

1. はじめに

近年アルカリ骨材反応（日本において多く確認されているのはアルカリシリカ反応，以下ASRと表記）等によるコンクリート構造物の劣化が問題となっている。

従来，ASRによる損傷は，コンクリートの体積膨張により発生するひび割れや，圧縮強度および静弾性係数の低下，ひび割れからの雨水浸入による鉄筋腐食などが問題視されており，極端な耐力低下はないと考えられてきた。しかし，近年の調査により，ASR劣化構造物中において，鉄筋の曲げ加工部や圧接部が破断している事例が報告された¹⁾。特に被害事例が多く報告されている帯鉄筋曲げ加工部での破断が多く発生した場合，帯鉄筋の有効附着長に変化が生じ，せん断耐力が低下する可能性があることから，極めて重大な損傷であると考えられる。そのため，本研究においては，特に鉄筋に着目することで，鉄筋の曲げ加工方法や節形状が鉄筋損傷に与える影響について検討する。

図-1に研究フローを示す。ASR構造物での鉄筋破断メカニズムは，既往の研究結果等²⁾より，鉄筋曲げ加工部内側に発生した初期亀裂を起点として，ASRによる膨張力やひずみ時効といった経年劣化の影響を受け，鉄筋破断に至ると考えられている。このため，ASRによる鉄筋破断現象の起点となる初期亀裂の発生を未然に防ぐことができれば，初期亀裂が進展することも無く，ASRによる鉄筋破断現象を予防・減少させることができると考えられる。そこで，本研究では初期亀裂の発生に着目し，初期亀裂発生傾向と初期亀裂発生メカニズムについて調査を行った。

初期亀裂発生傾向の比較では，種々の要因が初期亀裂へ与える影響を検討するために，鉄筋種別，曲げ加工半径，節曲線部変化量をパラメータとして，90°曲げ加工に伴う初期亀裂の発生傾向を縦断面観察により調査した。

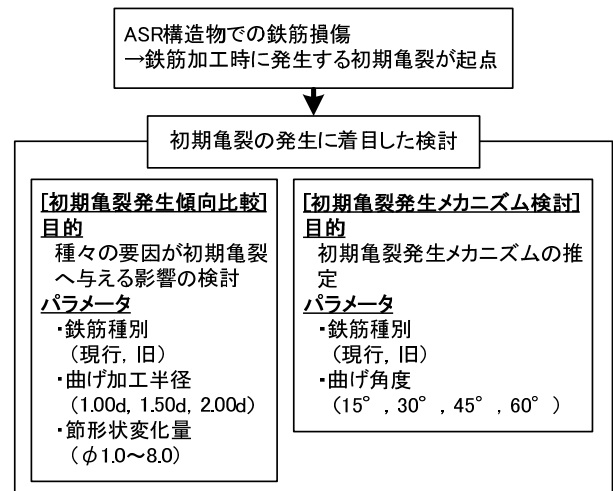


図-1 研究フロー

その後，ASR 膨張を受けた場合でも進展しにくい初期亀裂深さを明らかにするため，既往の研究との比較を行い，初期亀裂の安全域について検討した。

また，初期亀裂発生傾向比較より，鉄筋の節形状が初期亀裂発生に大きく関与していることが考えられるため，初期亀裂発生メカニズムを明らかにすることを目的に，現行と旧鉄筋を用いて曲げ角度を細かく区切り，各曲げ角度における節形状の変化と初期亀裂の発生状況を調査することで，曲げ加工による初期亀裂の発生メカニズムを詳細に検討した。

なお，各検討ではD16鉄筋を用いて検討しており，竣工後20年以上経過した実構造物からはつり出された鉄筋と現在市販されている鉄筋（現行鉄筋）を用いて比較している。昭和60年頃に疲労破壊を回避する目的で鉄筋の節形状が変更されている背景があるため，今回使用した実構造物からはつり出した鉄筋は旧規格の節形状を有する鉄筋であると考えられる（以下旧鉄筋と呼ぶ）。

*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生コンクリート技術センター 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 工学研究科機能システム工学専攻 工修（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）

表 - 1 検討試料

試験用途	鉄筋種別	曲げ加工半径	節形状変化量 ϕ (mm)	曲げ角度	試料数
初期亀裂発生傾向	旧D16	1.0d	1.0~2.0	90°	3
			2.0~3.0		3
			3.0~4.0		3
		1.5d	1.0~2.0		3
			2.0~3.0		3
			3.0~4.0		3
	2.0d	1.0~2.0	3		
		2.0~3.0	3		
		3.0~4.0	3		
現行D16	1.0d	8.0	3		
	2.0d	8.0	3		
初期亀裂発生メカニズム	旧D16	1.0d	1.0~2.0	15°	1
				30°	1
				45°	1
	現行D16	1.0d	8.0	60°	1
				15°	1
				30°	1
				45°	1
				60°	1
				60°	1

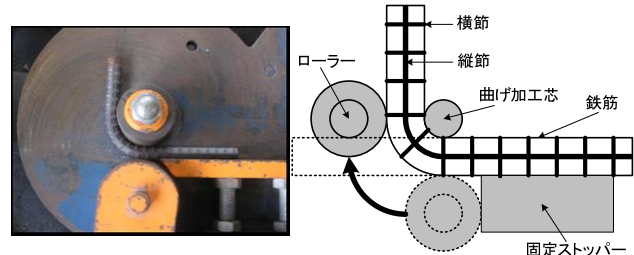


図 - 2 曲げ加工方法

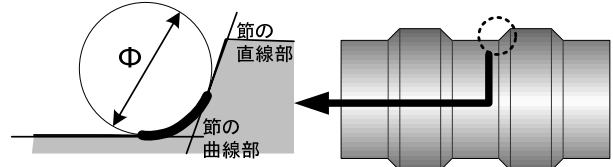


図 - 4 節形状の測定

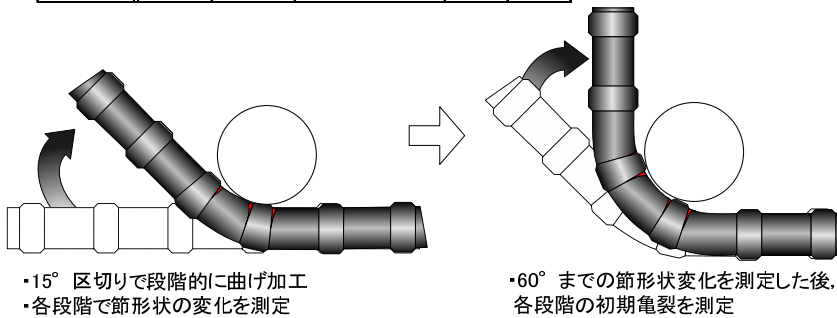


図 - 3 段階曲げ加工

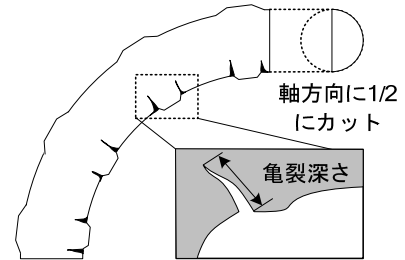


図 - 5 鉄筋縦断面観察方法

2. 鉄筋曲げ加工試験

2.1 試験ケース

表 - 1 に鉄筋曲げ加工試験の試験ケースを示す。本試験では、初期亀裂の発生傾向の比較と初期亀裂発生メカニズムの検討を行っている。初期亀裂の発生傾向に関しては鉄筋種別、曲げ加工半径、節曲線部変化量をパラメータとしており、初期亀裂発生メカニズムに関しては鉄筋種別、曲げ角度をパラメータとして検討を行った。

なお、本実験で使用した鉄筋 SD295A の機械的性質および化学成分分析結果は、JIS 規格値を満足していた。

(1) 初期亀裂発生傾向の比較試料について

初期亀裂発生傾向の比較では、一般的にスターラップに多く使用されている鉄筋径である旧D16と現行D16を用いて検討した。パラメータとしては曲げ加工半径、節曲線部変化量を設定しており、曲げ加工半径に関しては、道路橋示方書で規定されている 2.0d、極端に厳しく加工された場合を想定した 1.0d、その間の 1.5d の三水準によって比較検討した。節曲線部変化量 については詳細は後述するが、旧鉄筋では 1.0~2.0, 2.0~3.0, 3.0~4.0mm に区切り、現行鉄筋は 8.0mm のものを使用して比較検討した。

(2) 初期亀裂発生メカニズム検討試料について

初期亀裂発生メカニズム検討用の試料についても、旧D16と現行D16を用いて比較している。初期亀裂深さの

検討結果より曲げ加工半径1.0dで初期亀裂が比較的発生しやすい傾向であったため、曲げ加工半径は1.0dに固定し、曲げ角度を15~60°まで15°刻みで変化させ初期亀裂の発生状況について検討した。

2.2 試験および測定方法

(1) 曲げ加工方法

図 - 2に曲げ加工方法を示す。鉄筋の曲げ加工には、ローラー式の鉄筋曲げ加工装置を用いており、試料長は曲げ加工が行える長さを確保するため300mmとした。初期亀裂深さ比較用の試料は90°に曲げ加工し、初期亀裂発生メカニズム検討用の試料については、図 - 3に示すように、曲げ角度を15~60°の間を15°刻みで曲げ加工した。曲げ角度に関しては、ローラーの移動距離を変化させ調節した。

(2) 節曲線部変化量 測定方法

本検討では鉄筋の種別として現行鉄筋と旧鉄筋を用いているが、大きな違いとして節の形状が挙げられる。特に図 - 4 に示すように節曲線部の変化量は現行鉄筋と旧鉄筋で明確な差異が生じていたため、これをパラメータとし、測定することとした。なお、節曲線部変化量は節の直線部および、鉄筋の直線部によって切り取られる円弧部分に沿って円を描き、その直径を測定することで節曲線部変化量 としている。

(3) 鉄筋縦断面観察方法

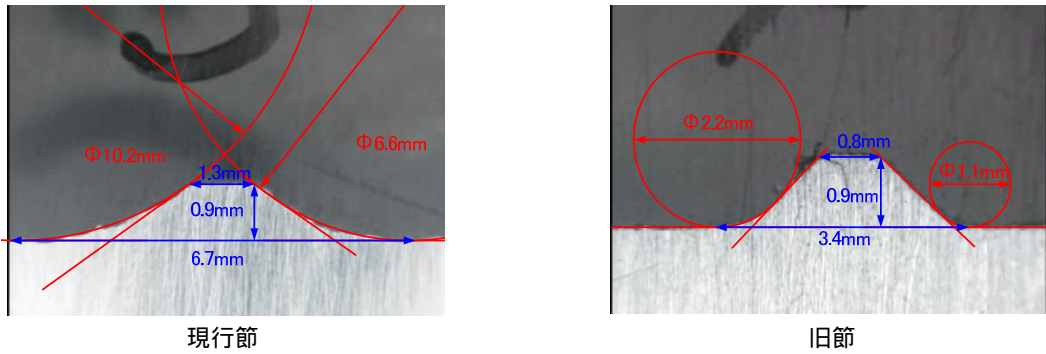


図 - 6 節形状測定例

曲げ加工によって鉄筋の曲げ加工部内側に発生する初期亀裂の発生状況を調べるため、図 - 5に示すように、鉄筋の曲げ加工部を切り出し、切り出した部分を軸方向に1/2にカットした後、顕微鏡を用いて50~200倍に拡大した縦断面を観察することで、亀裂の深さを測定した。なお、亀裂深さは亀裂の開口部の中心から亀裂の先端部分までの直線距離として評価した。

3. 曲げ加工試験結果

3.1 鉄筋節形状について

実構造物からはつり出した鉄筋は、同一の構造物からはつり出したものではなく、複数の構造物からはつり出されたものであったため、鉄筋の状態によっては損傷傾向が異なると考えられる。そのため、鉄筋によっては形状が異なる節曲線部変化量 による分類を行い、鉄筋の形状の差異による損傷傾向を検討した。

図 - 6に節形状の現行節と旧節の測定例を示す。図 - 6に示すように、同一の鉄筋内でも左右の節の節曲線部変化量 の値が異なっていたため、本稿においては、1 試料について3~4 個の測定結果の平均値を用いて 1~2, 2~3, 3~4 の範囲に区分した。表 - 2 に1 試験条件につき3 試料(1~ 3)として実施した節形状の測定結果を示す。

なお、現行節については同一の鉄筋での評価を行っているため、節3 個に対して測定した の平均値 8.0mm

表 - 2 節曲線部変化量結果(平均値)

試験条件		試料No.1	試料No.2	試料No.3	
旧D16	1.0d	φ1~2	1.57	1.84	1.77
		φ2~3	2.37	2.09	2.96
		φ3~4	3.80	3.24	3.08
	1.5d	φ1~2	1.57	1.50	1.47
		φ2~3	2.16	2.40	2.89
		φ3~4	3.32	3.90	4.28
2.0d	φ1~2	1.86	1.56	1.75	
	φ2~3	2.30	2.82	2.86	
	φ3~4	3.82	4.07	4.16	

を採用している。

3.2 初期亀裂発生傾向

(1) 曲げ加工半径による初期亀裂の発生傾向

曲げ加工半径による初期亀裂の発生傾向を検討した。節形状変化部が急なほど応力集中すると考えられるため、ここでは節曲線部変化量 1~2における旧D16の曲げ加工半径に着目した比較を図 - 7 に示す。横軸は亀裂深さを0.1%区切りで示し、縦軸は亀裂深さに対する度数となっている。また、亀裂深さは連続的に変動し、亀裂深さの発生傾向が正規分布に従うと仮定して、確率密度関数を用いて発生確率を曲線分布で示した。そのため、第2縦軸には発生確率を示している。また、図中にはデータ諸元として標準偏差、変動係数、平均亀裂発生本数、亀裂平均値、最大値、5%超過確率値をあわせて示す。

図 - 7 より亀裂深さの平均値を比較すると曲げ加工半径1.0d が2.3%、1.5d が1.8%、2.0d が1.6%であった。

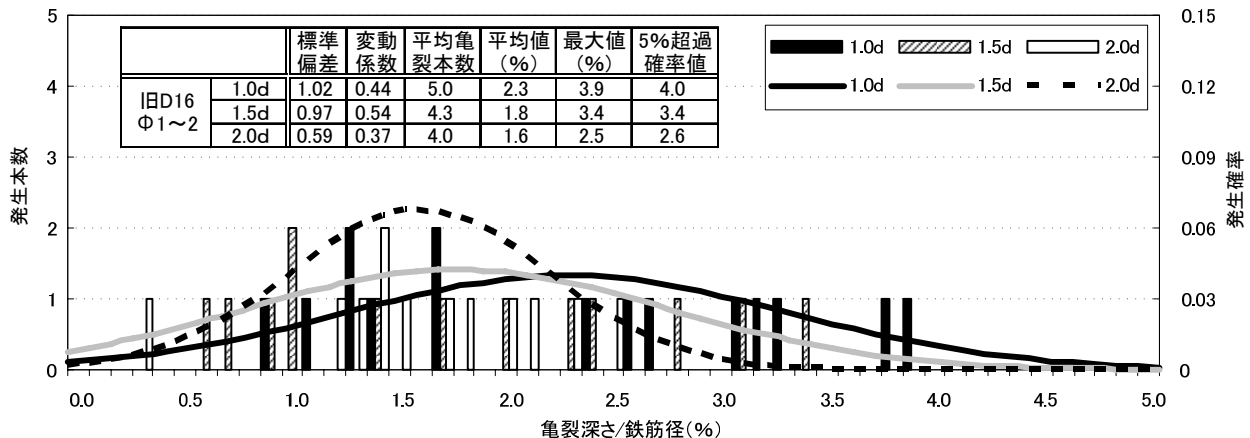


図 - 7 旧鉄筋初期亀裂発生傾向(曲げ加工半径の影響)

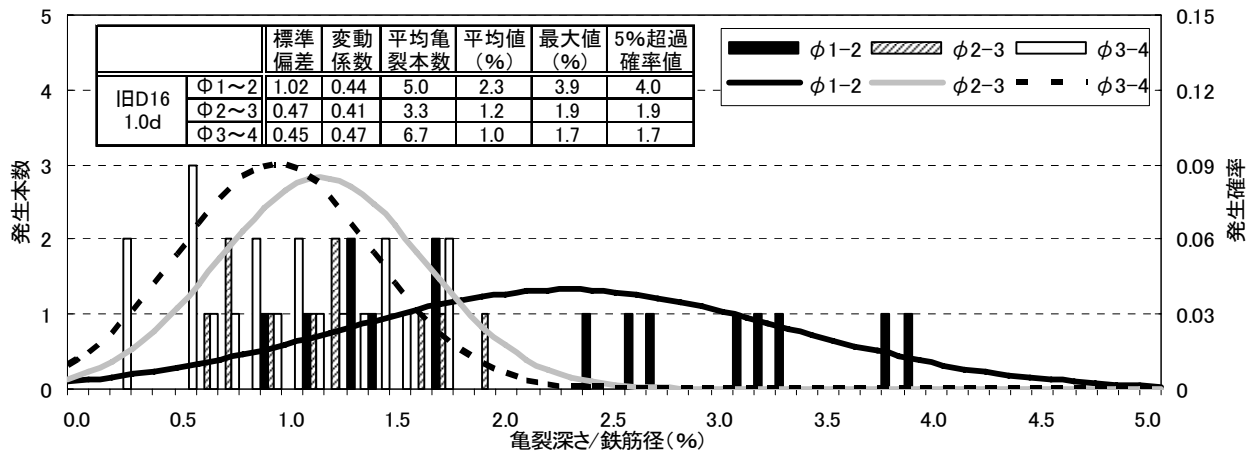


図 - 8 旧鉄筋初期亀裂発生傾向（節形状の影響）

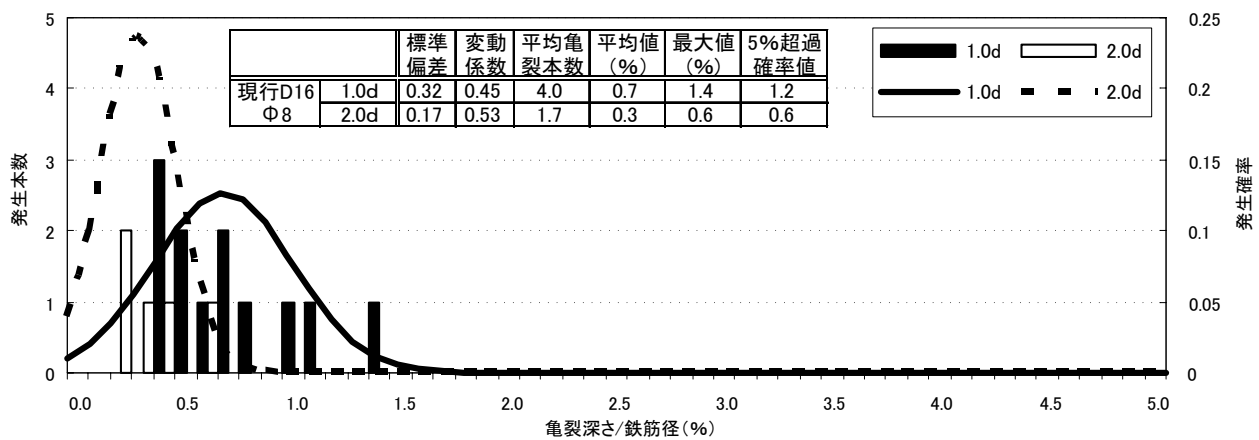


図 - 9 現行鉄筋初期亀裂発生傾向

5%超過確率値では1.0dが4.0%、1.5dが3.4%、2.0dが2.6%であり、曲げ加工半径1.0dと2.0dにおいて初期亀裂深さの比較を行っても平均値で0.7%程度、最大値で1.4%程度の差であった。また、一本の鉄筋の曲げ加工部当たり発生した平均亀裂発生本数については1.0dが5.0本、1.5dが4.3本、2.0dが4.0本であり、各曲げ加工半径において多くの初期亀裂の発生が認められた。

以上の点より、曲げ加工半径が小さくなるほど、大きな初期亀裂が発生しやすいことがわかる。しかしながら、節曲線部変化量1~2の場合では、道路橋示方書の曲げ加工の規格値である曲げ加工半径2.0dにおいても比較的大きな損傷を受けており、節曲線部変化量が小さい場合、曲げ加工時に初期損傷が発生しやすいと考えられる。

(2) 節形状の違いによる初期亀裂の発生傾向

D16 - 1.0d 曲げにおける節形状の影響に着目した初期亀裂の比較を図 - 8 に示す。図 - 7 と同様に亀裂の発生本数、発生確率、亀裂深さの比較を行っている。

図 - 8 より、節曲線部変化量1~2の平均亀裂深さは2.3%で、2~4の値と比較すると2倍以上の値となっている。また、5%超過確率の値においても1~2では、4.0%であるのに対して、2~3が1.9%、3~4が1.7%

であり、φ1~2の場合、2~3倍程度の大きな亀裂が発生する傾向が得られている。

一方、平均亀裂発生本数に着目すると、1~2においては5.0本、2~3では3.3本、3~4では6.7本と多くの初期亀裂が発生しているため、曲げ加工半径1.0dという厳しい曲げ加工が亀裂発生本数に影響するためと考えられる。

以上より、節曲線部変化量が小さいことが大きな初期亀裂の発生に密接に関係していると考えられる。

(3) 現行鉄筋での初期亀裂の発生傾向

現行鉄筋(8.0mm)での初期亀裂の発生傾向を図 - 9 に示す。現行鉄筋の平均亀裂深さは、曲げ加工半径1.0dで0.7%、2.0dで0.3%となっており、5%超過確率値では1.0dで1.2%、2.0dで0.6%と非常に小さな亀裂深さであった。平均発生本数をみると、曲げ加工半径1.0dでは4.0本の初期亀裂が発生しているものの、2.0dでは1.7本程度の初期亀裂しか発生していなかった。旧鉄筋のデータとの比較からもJIS G3112の規格通りに曲げ加工半径2.0dで現行鉄筋を加工する場合、ASRによる鉄筋破断に対して現行鉄筋は鉄筋破断に至る可能性が相対的に小さいと考えられる。

3.3 初期亀裂発生メカニズム

初期亀裂の発生傾向より、初期亀裂の発生には節の影響が大きく作用していることが考えられる。そこで、節の形状が極端に異なる旧鉄筋（1～2）と現行鉄筋を用いて曲げ加工し、節の変形を詳細に調査することで、節形状の変形の推移と初期亀裂発生との関係性を検討した。

(1) 節変形概要

図 - 10 に鉄筋を曲げた際の節の変形の概要図を示す。なお、鉄筋は曲げる際に、鉄筋の中央付近の節を必ず曲げ加工の芯に当てることとし、縦節の影響は無いように縦節を上面および下面に来るように鉄筋を設置し、曲げ加工を行った。鉄筋は全て竹節を使用した。ここでは、最初に曲げ加工の芯に接しているものから順に節1, 節2, 節3とする。また、鉄筋の方向が分かるように、曲げ加工時にローラーで曲げられていく部分を曲げ加工側とし、固定されている部分を固定側と表記する。

図 - 10 より、まず、曲げ角度 15～30° の間に最初に接していた節1の変形が終了した。その後、45～60° の間に最も大きな亀裂が発生する傾向にある節2が完全に潰れた。最後に、75～90° の間に節3が潰れるという結果となった。曲げ加工により鉄筋の節は最低でも3つ程度曲げ加工による影響があることが分かった。

以上の点から、最も変形の大きい節2に特に着目し、詳細に節の変形を検討していく。

(2) 節変形結果

写真 - 1 に現行鉄筋と旧鉄筋の節2の変形の様子を示す。図 - 10 にも示したように節の方向については固定側と曲げ加工側で判別している。

まず、節の変形の仕方に着目すると、旧鉄筋、現行鉄筋ともに、固定側が潰れた後、曲げ加工側が潰れていく傾向が見られた。これは、ローラーが移動することで段階的に鉄筋を押し曲げていくためであると考えられる。

次に初期亀裂の発生傾向に着目すると、曲げ加工側で大きな亀裂が発生しやすい傾向が見られた。特に、旧鉄筋の初期亀裂の発生状況では、曲げ角度 0～15° の間に固定側の節付け根部に微小な初期亀裂が発生し、15～30° の間で固定側よりも大きな初期亀裂が曲げ加工側の節付け根部に発生した。この際、初期亀裂が発生している箇所では節の形状が急激に変化している箇所が見られた。その後、30～45° の間に急激な形状変化部がほぼ変形を完了し、曲げ加工側の節付け根部の初期亀裂が非常に大きくなった。最終的に 45～60° の間に節2が完全に潰れ、初期亀裂が最大となる傾向が見られた。

これに対して、現行鉄筋の節の変形および、初期亀裂の発生傾向を見ると、曲げ加工により旧鉄筋のような急激な形状変化部が形成された痕跡は見られず、節が非常に滑らかに変形していた。また、現行鉄筋では初期亀裂

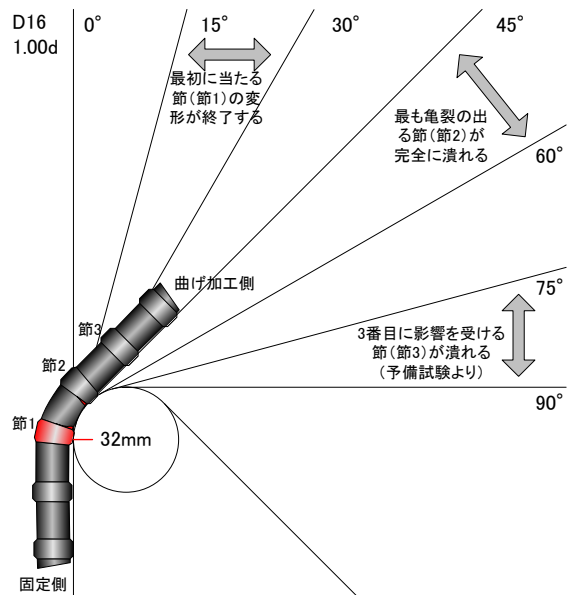


図 - 10 節変形結果概要

	旧鉄筋 (φ 1.5) 1.0d	現行鉄筋 (φ 8.0) 1.0d
0°	 固定側 ← 曲げ加工側	 固定側 ← 曲げ加工側
15°	 亀裂深さ 0.3%	
30°	 0.5% 0.7%	
45°	 0.5% 3.2%	 亀裂深さ 1.0%
60°	 0.4% 3.4%	 0.6%

写真 - 1 節変形写真

の発生がほとんど見られなかった。このことから、節が変形していく過程で、応力集中が生じやすい急激な形状変化部が形成されることが、初期亀裂の発生要因に大きく関係していると考えられる。

(3) 初期亀裂発生メカニズム

節変形結果より、初期亀裂の発生には、節形状の変化が大きく作用していると考えられる。また、初期亀裂は節が鉄筋内部にめり込むことにより発生していることも考えられるため、初期亀裂が顕著に発生した旧節形状に関して図 - 11 に示すように断面の面積変化と形状の推移を比較した。なお、ここでは、初期亀裂が発生している範囲を節が鉄筋内部にめり込んだ部分と仮定して評価している。

図 - 11 より、15°程度の曲げ加工がされただけで、節の断面の面積は曲げ加工前と比べて50%程度に低下している。これは、節形状変形状態の模式図に示しているように、節は鉄筋の軸方向のみだけでなく、鉄筋の周方向にも変形していることから、曲げ始めは節が変形しやすい鉄筋の周方向に変形したためであると考えられる。

しかしながら、曲げ角度 15～60°を見てみると節の面積は53～44%程度となっており、節の断面上の面積はほぼ変化していない傾向が得られている。

このことから、曲げ始めの段階で節が鉄筋の周方向に変形した後、変形する場所が無くなった50%程度の節が鉄筋内部にめり込み始める。この際、節が変形した際に形成された急激な形状変化部で応力集中が生じ、初期亀裂が発生すると推定される。

3.4 初期亀裂の鉄筋破断への影響の検討

最後に、初期亀裂がASRによる鉄筋破断に与える影響の検討を行う。ここでは、ASRによる鉄筋破断を膨張コンクリートを用いて模擬的に実験した既往の検討結果²⁾を参考としている。なお、供試体実験では旧鉄筋を1.0dで曲げ加工し、配筋した供試体において最大で鉄筋径の78.8%もの亀裂進展結果が得られている。

図 - 12 に本試験で得られた初期亀裂深さの5%超過確率値の比較を示す。図 - 12 に示すように、鉄筋破断程度の鉄筋損傷を示した供試体実験における旧鉄筋の1.0dの初期亀裂平均値1.5%を本試験における5%超過確率値と比較すると、旧鉄筋である1～4の鉄筋では曲げ加工半径に関わらず1.5%を超える初期亀裂深さが発生する傾向が得られた。これに対して、現行鉄筋に着目すると、曲げ加工半径が1.0dにも関わらず1.5%を超えておらず、鉄筋破断の可能性が極めて低いと考えられる。

以上の検討結果より、現行鉄筋を用いて適切な鉄筋加工を行っている場合、ASRにより鉄筋破断が発生する可能性は極めて低いと考えられる。

4. まとめ

以上の曲げ加工試験より得られた知見を以下に示す。

- (1) 初期亀裂の発生傾向より、初期亀裂の発生には、曲げ加工半径と節形状の影響が大きく、特に節曲線部変化

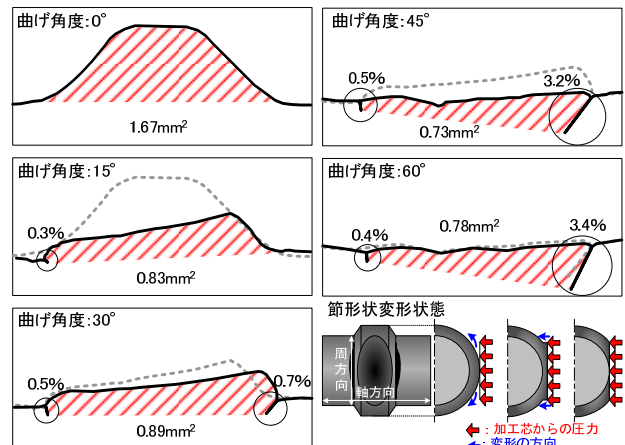


図 - 11 旧節変形状態

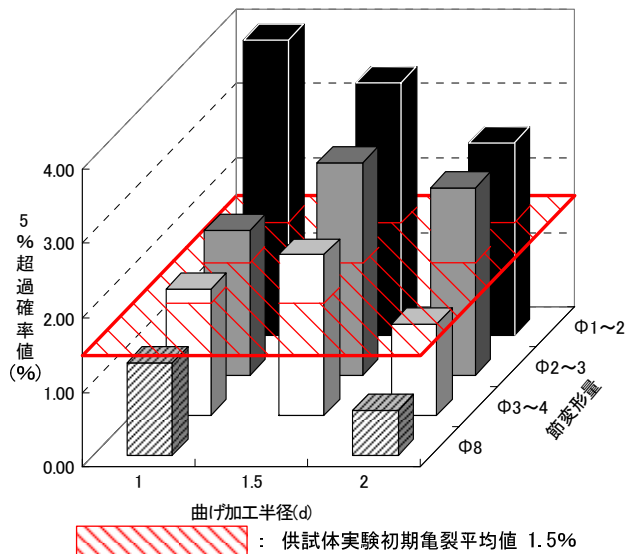


図 - 12 5%超過確率値比較

量 の小さい鉄筋において大きな初期亀裂が発生しやすい傾向が得られた。

- (2) 初期亀裂発生メカニズムより、曲げ加工時に鉄筋の周方向に変形しきれなかった50%程度の節が鉄筋内部にめり込むことにより発生すると推定される。
- (3) 各試料の初期亀裂深さの5%超過確率値の比較結果より、旧鉄筋では曲げ加工を行うことにより、1.5%を超える可能性が示唆されたが、現行鉄筋の初期亀裂は小さく、鉄筋破断に至る可能性は相対的に小さいと考えられる。

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. -32- -65，2005.8
- 2) 幸左賢二，川島恭志，合田寛基，興相展朗，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