論文　ASR 膨張による鉄筋曲げ加工部での破断に関する実験的研究

原田　哲夫[*1]・坂田　祥文[*2]・永藤　政敏[*3]・合田　寛基[*4]

要旨：アルカリ骨材反応の膨張による曲げ加工部での鉄筋破断の要因として，ここでは，鉄筋の曲げ加工にともなう加工硬化とひずみ時効の影響を取り上げ，主としてビッカース硬さ試験による実験的な検討を行った。ビッカース硬さの分布と初期亀裂発生の有無に基づき，鉄筋破断のメカニズムの推定を行った。

キーワード：ASR，鉄筋破断，加工硬化，ひずみ時効，ビッカース硬さ

1. はじめに

ASR による鉄筋破断の要因として，鉄筋の曲げ加工部での加工硬化およびひずみ時効の影響が挙げられている。しかしながら，それらが鉄筋の材料特性に及ぼす影響について詳細に検討した研究は少ないようである。

そこで，鉄筋の曲げ加工とひずみ時効の有無が曲げ加工部の材料特性にどのような影響を及ぼすかについて，主としてビッカース硬さ試験，鉄筋の曲げ戻し試験によって実験的に検討した。本研究で用いた鉄筋は現行の市販鉄筋であり，その材料試験結果を**表－1** に示す。

表－1　鉄筋の材料試験結果

種類	呼び名	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)	伸び
SD295A	D10	336	472	1.9×10^5	21%
SD295A	D13	343	462	1.9×10^5	19%
SD295A	D16	365	539	1.9×10^5	23%
SD295A	D19	350	506	2.0×10^5	22%
SD345	D19	403	567	2.0×10^5	22%
SD345	D22	371	553	2.0×10^5	22%

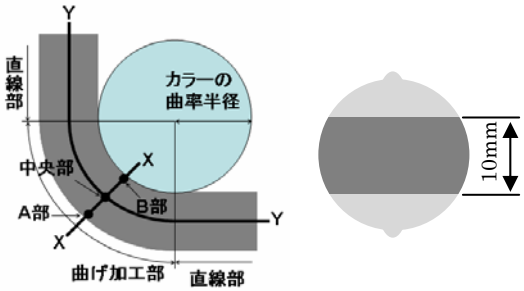
(a) 直線試験片　　(b) 曲げ試験片

写真－1　ビッカース硬さ試験片

2. 鉄筋のビッカース硬さ試験

一般に金属材料では硬くなると脆くなる傾向がある。そこで，曲げ加工部が曲げ半径とひずみ時効の影響によって，どの程度硬さが変化するかをビッカース硬さ試験によって調べた。

本実験ではいずれも D19 で，SD295A と SD345 の２種類の鉄筋を用いた。試験片上面を平滑な平面にするために，両リブから等しく削って 10mm の厚さにし，表面仕上げを行い，**写真－1** のように直線試験片と曲げ試験片を作製した。直線試験片は，引張残留ひずみを与えたものと比較のために無負荷の状態のものとを作製した。



(a) 曲げ加工　　(b) ビッカース硬さ試験用加工断面

図－1　加工状況および計測位置

*1 長崎大学　工学部構造工学科教授　工博　(正会員)
*2 長崎大学　生産科学研究科　工修　(正会員)
*3 長崎大学　工学部構造工学科技術職員　(正会員)
*4 九州工業大学　大学院工学研究科助手　工博　(正会員)

曲げ試験片の加工状況を**図－1** に示す。試験片の曲げ半径は 1dと 2d, 曲げ角度はいずれも 90°とし，ひずみ時効を促進させたものと促進させていないものを作成した。本実験では電気炉を使用し，220℃で 3 時間加熱することでひずみ時効を促進させた[1)]。

2.1 鉄筋曲げ加工部の軸方向と軸直角方向の硬さ変化

基本となる直線試験片の硬さは, SD295A で平均 170HV10，SD345 で平均 185HV10 であった。

図－2 にX－X方向のビッカース硬さの分布を示す。同図によれば，引張縁側と圧縮縁側は中央部と比較して 30~40HV10 ほど高くなっており，分布は V 字形の様相を呈している。ひずみ時効ありの場合には，V 字の形状を保ったまま，さらに高くなっている。中央部の値は，引張試験により 5%の残留ひずみを与えた直線試験片のビッカース硬さとほぼ同等であり，曲げ加工部では引張られながら曲げられることによって，5%程度の残留ひずみが生じたと考えられる。

図－3 に Y－Y 方向の硬さの分布を示す。直線部から曲げ加工部に向かうにつれて硬くなっていることがわかる。直線材では長さ方向の硬さ分布はほぼ一様であり，**図－2** に示した値と同じであった。

2.2 ビッカース硬さの平面分布

つぎに，ビッカース硬さの平面分布を調べるために，**図－4(e)** で示すように 2mm 間隔の格子点でのビッカース硬さを計測した。格子点間の値は直線補間し，**図－4～図－6** に示す平面分布図を作成した。以下に，要因ごとの特徴を示す。

(1) 曲げ半径とひずみ時効の影響

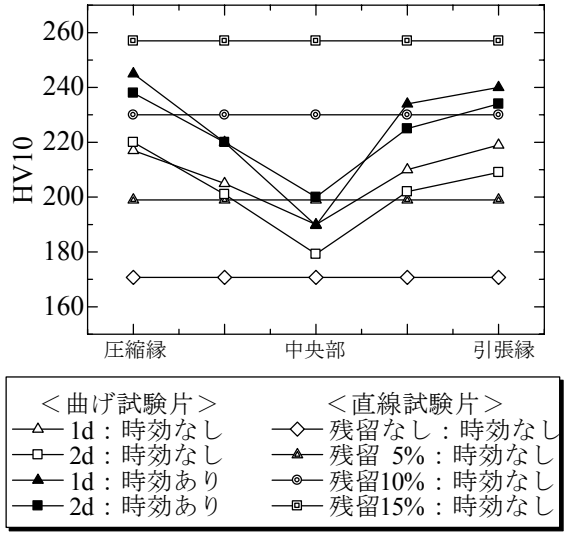
曲げ半径が小さいほど，またひずみ時効を促進させた場合には，例えば**図－4(c)** の点線で囲むような硬い領域が加工部内側に局所的に存在することがわかった。

(2) 節の影響

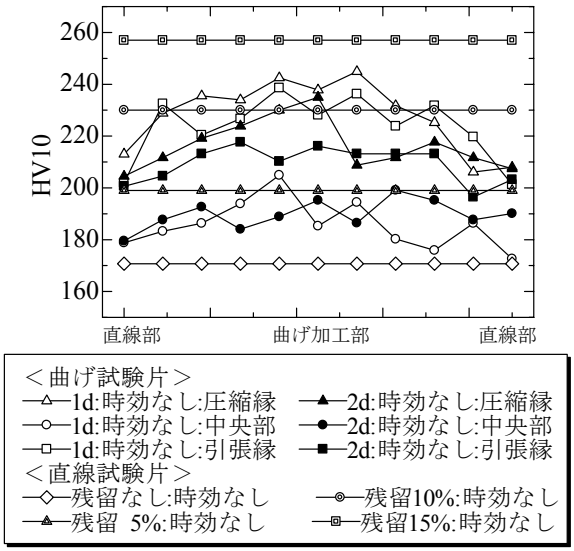
図－5 と**図－6** の比較によって，節なしの場合には，節ありの場合のように局所的な硬い領域は，存在していないことがわかる。

(3) 鉄筋の種類の影響

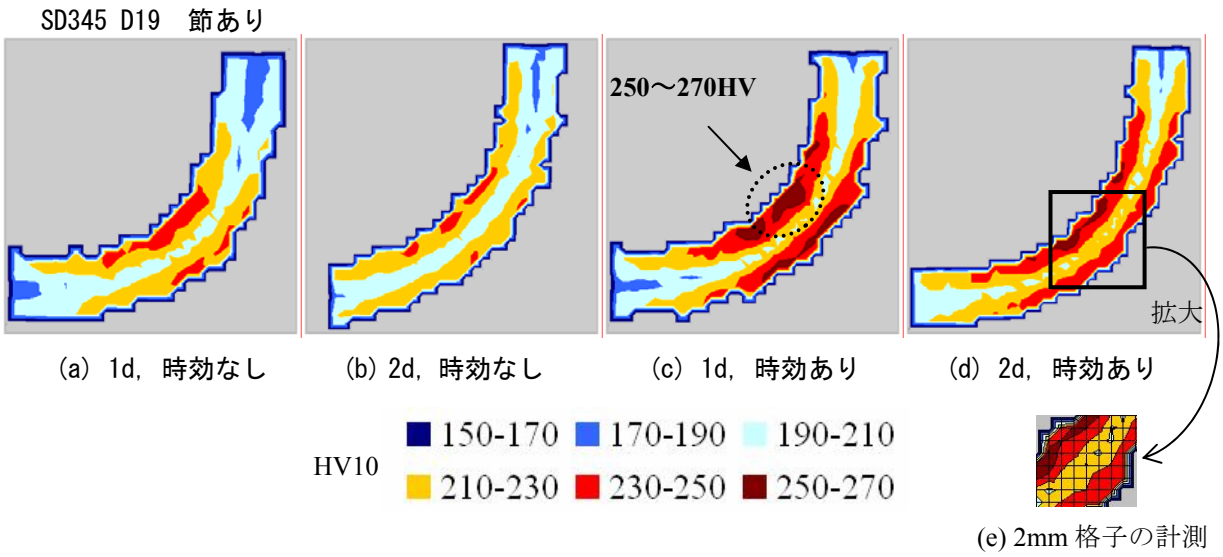
図－4 と図－5 から，SD295A より SD345 の方が，全体的に値が大きく硬くなっていることから，降伏強度が高くなるとビッカース硬さも大きな値を示すことが確認できた。



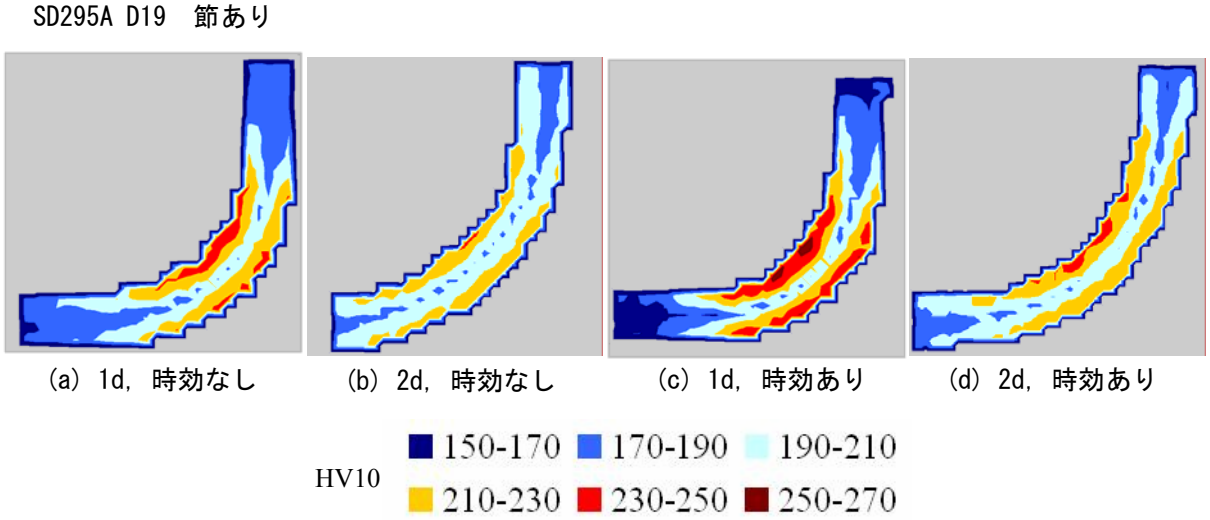
図－2　X－X 方向の硬さ分布
（SD295A－節あり）



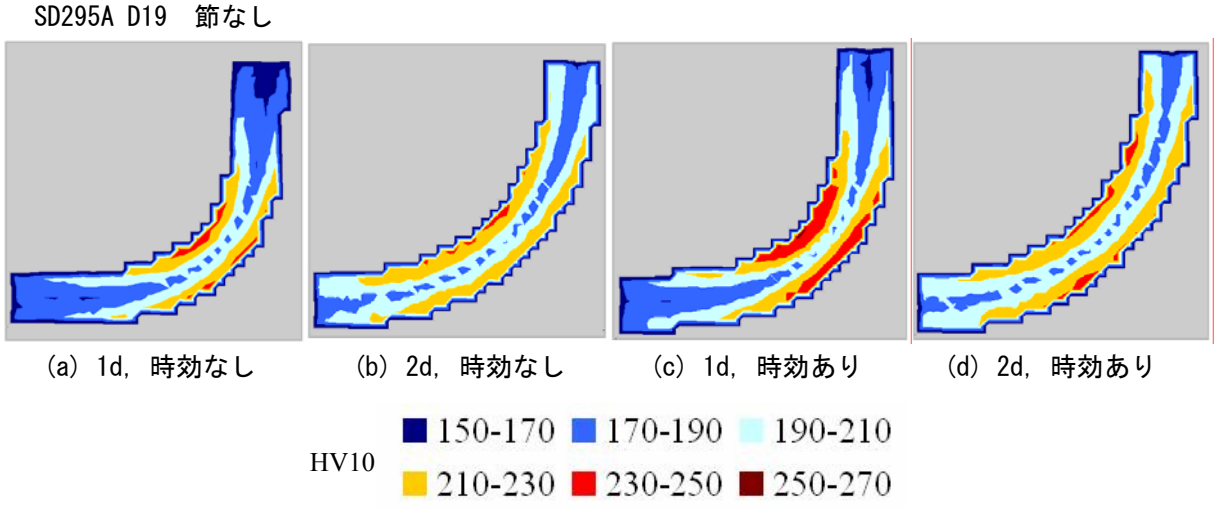
図－3　Y－Y 方向の硬さ変化
（SD295A－節あり）



図－4　ビッカース硬さ分布（SD345 D19－節あり）



図－5　ビッカース硬さ分布（SD295A D19－節あり）



図－6　ビッカース硬さ分布（SD295A D19－節なし）

3. 鉄筋の曲げ戻し試験

3.1 曲げ加工部を有する鉄筋の引張試験

ASR による曲げ戻しの力を与えるため，鉄筋を**図－7** のように加工し引張試験を行った。鉄筋は D16，D19，D22 を使用し，曲げ角度は全て 90° とし，曲げ半径は 1d と 2d に最も近いものとした。また，ひずみ時効は 2 章で述べた方法と同様に促進させている。

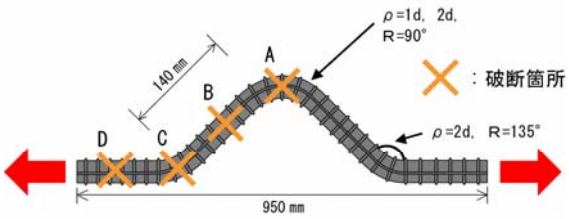
表－2 より，曲げ半径 1d でひずみ時効を促進させた場合には，折り曲げ部において 10kN 程度の低い荷重で，**写真－2** のように脆性破断する割合が増加した。脆性破断しなかった試験体では，折り曲げ部は引き伸ばされ，折り曲げ部の中央以外の箇所で通常の鉄筋破断を呈した。また，異形鉄筋の節を削り丸鋼の形状にしたもので同様の引張試験を行った結果，曲げ半径 1d でひずみ時効を促進させても脆性破断は生じなかった。

3.2 曲げ加工部を有する鉄筋の押し曲げ試験

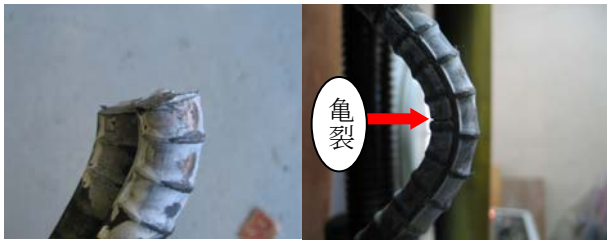
曲げ加工部内側での亀裂がいつの時点でどのように進展するかを調べるために，D19（SD295A）を曲げ半径 1d で加工した試験片を**図－8** のように押し曲げた。実験方法は，5kN 載荷した後に試験機から取り出して顕微鏡によって曲げ加工部内側を観察した。その際，亀裂が観察できなければ，再度 5kN 増加させ，観察する。この作業を最大 30kN まで繰り返し行った。**表－3** より，「1d-時効あり-節あり」の試験片において，15kN の時点で節の根元に亀裂が発生した。亀裂発生箇所と硬さの平面分布とを重ねたものを**写真－3** に示す。亀裂の箇所と 250~270HV10 の領域とが一致していることがわかる。

4. 鉄筋破断メカニズムの考察

これまでの実験により，節があり，曲げ半径が 1d と小さいとき，ひずみ時効が促進されると，曲げ戻しの力により破断に至りやすくなることがわかった。また，その亀裂の発生箇所は節の根元であり，ビッカース硬さ試験により局所的に硬くなっている箇所と一致することがわかっ



図－7　曲げ加工部を有する引張試験試験体

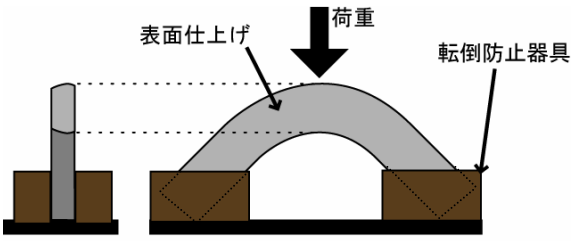


写真－2　引張試験による鉄筋の脆性破断例

表－2　曲げ加工部を有する引張試験

鉄筋	種類	曲げ半径	時効	試験本数	脆性破断	破断割合	平均破断荷重
D16	SD295A	1.2d	なし	5	0	0/5	—
			あり	5	1	1/5	5.5kN
		2.0d	なし	5	0	0/5	—
			あり	5	0	0/5	—
D19	SD295A	1.0d	なし	10	0	0/10	—
			あり	10	7	7/10	7.1kN
		1.0d[*1)]	あり	2	0	0/2	—
		2.0d	なし	5	0	0/5	—
			あり	5	0	0/5	—
	SD345	1.0d	なし	10	0	0/10	—
			あり	10	4	4/10	5.3kN
D22	SD345	0.9d	なし	3	0	0/3	—
			あり	3	3	3/3	12.0kN

- 表中の“1.0d[*1)]”は，曲げ加工前に，節を削り取ったことを示している。
- 表中の“1/5”の表示は，試験体 5 本中に 1 本破断したことを示す。



図－8　押し曲げ試験

た。これらの結果を基に，以下に破断のメカニズムについて考察する。

4.1 鉄筋破断に至るプロセスの推定

鉄筋の曲げ加工部で亀裂が発生し破断に至る過程として，２つの場合が推察できる。

(1) 曲げ半径が小さい場合に曲げ加工によって節の根元部に初期亀裂が生じ，ひずみ時効の影響で亀裂が進展しやすい状態となり，曲げ戻しにより一気に破断に至る。

(2) 曲げ加工によって亀裂は生じていないが，節と曲げ半径とひずみ時効の影響で曲げ加工部内側の節根元部に局所的に硬い領域が集中しており，亀裂が生じやすい状態となっている。そこへ曲げ戻しの力が作用した場合に亀裂が生じ，そのまま破断に至る。

4.2 組織観察による考察

曲げ戻し試験によって亀裂が発生した鉄筋破面の組織観察をすることで，4.1 で挙げた２つの推定について検討した。

組織観察するための鉄筋の切断箇所を**図－9** に示す。**図－9 (a)** は軸方向の断面で，**図－9 (b)** は軸直角方向の断面を示す。また，**図－9 (b)** の観察面①，②における亀裂拡大図を**写真－4** に示す。当初，押曲げ試験前に観察面①では初期亀裂は観察されなかったので，押曲げ試験後には観察面①と観察面②の両方で組織観察を行った。

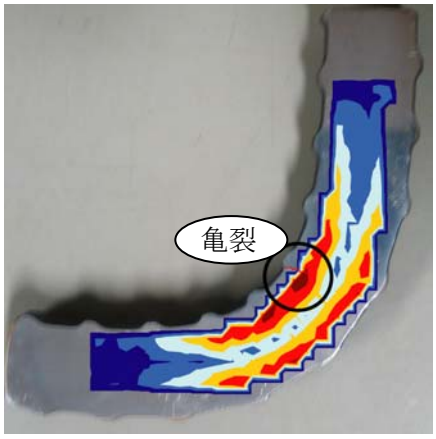
写真－4 (d)，**(e)** を比較すると **(e)** の鉄筋中央部の組織は結晶粒の形状が整っており、曲げ加工の影響が少ないのに対して、**(d)** の亀裂部付近の組織は、結晶粒が曲げ加工時の応力集中の影響で潰れており、整っていないことがわかる。

写真－4 (b)，**(d)** より，観察面②のほうが観察面①よりも結晶の形状が大きく変形しており、この位置では初期亀裂が発生していた可能性が高いと考えられる。このことは，他の研究機関の報告にもみられる[2)]。

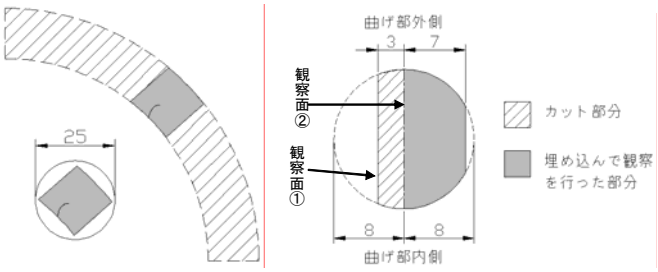
そこで，曲げ加工直後の観察面②における破面の観察を行った。しかし，**表－4** に示すように，

表－3　押し曲げ試験結果

鉄筋の種類		SD295A			
呼び名		D19			
曲げ半径		1d			
ひずみ時効		なし		あり	
節		なし	あり	なし	あり
き裂の有無	無載荷時	×	×	×	×
	5kN	×	×	×	×
	10kN	×	×	×	×
	15kN	×	×	×	crack
	20kN	×	×	×	
	25kN	×	×	×	
	30kN	×	×	×	



写真－3　き裂の発生位置とビッカース硬さの平面分布
（SD295A-D19-1d-時効あり）



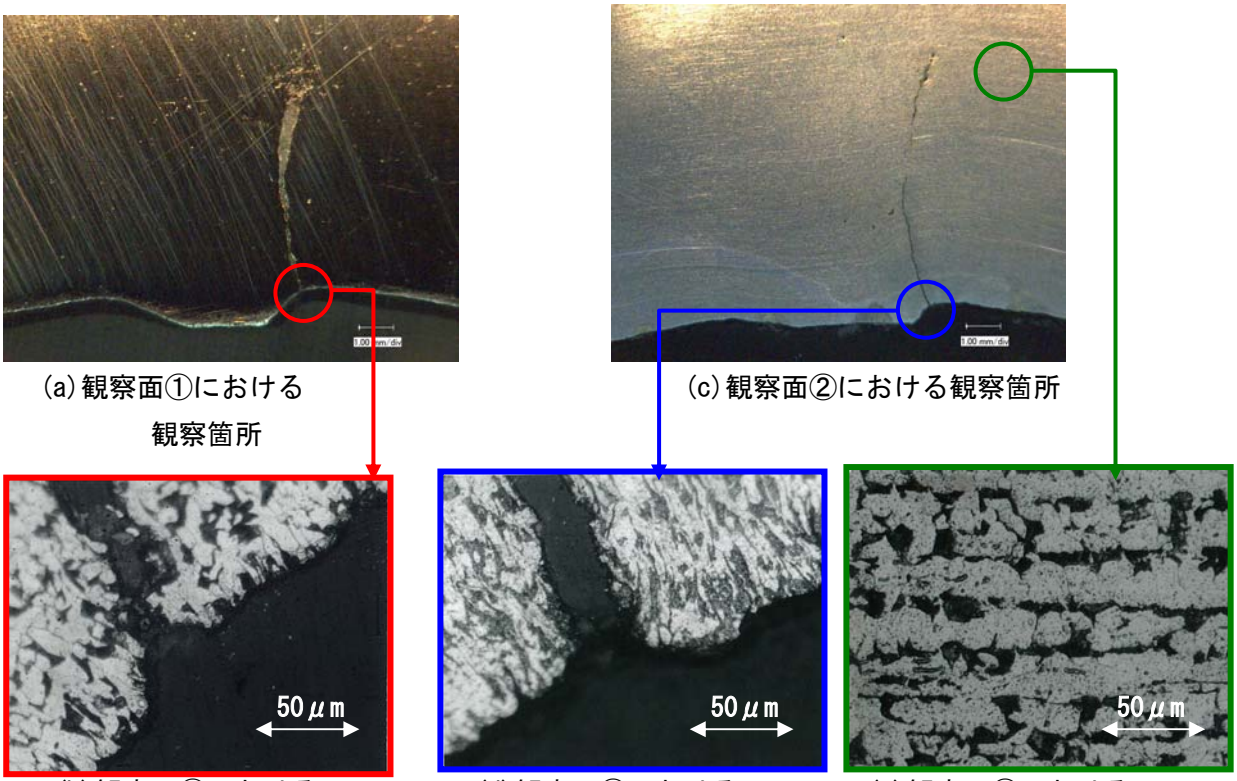
(a) 軸方向断面　　**(b) 軸直角方向断面**

図－9　鉄筋の切断箇所

表－4　初期亀裂の確認試験結果

種類	呼び名	曲げ半径	試験本数	初期亀裂が確認された本数
SD295A	D19	1d	5	0
SD345	D19	1d	3	0

本実験では SD295A を 5 本，SD345 を 3 本，計 8 本すべての試験片において初期亀裂を確認することはできなかった。したがって，現時点では



(a) 観察面①における観察箇所　(c) 観察面②における観察箇所

(b) 観察面①における亀裂周辺の組織写真　(d) 観察面②における亀裂周辺の組織写真　(e) 観察面②における鉄筋中央部の組織写真

写真－4　押し曲げ試験により生じた亀裂周辺の組織写真

推定（2）の可能性も考えられる。

5 結論

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

（1） ビッカース硬さ試験より，曲げ加工時に鉄筋は全体的に引張られながら曲げられており，残留ひずみが 5%程度であることを確認した。

（2） 曲げ半径 1d で曲げ加工後，ひずみ時効を促進させた場合には，250~270HV10 の硬い領域が曲げ加工部内側に集中することがわかった。この領域が，曲げ加工部内側の亀裂発生要因になり得るものと推察される。

（3） 節があることによって，局所的な硬い領域が増加することがわかった。

（4） 曲げ半径 1d で曲げ加工し，ひずみ時効を促進させると小さな荷重で脆性破断する割合が高くなる。

（5） 「1d－時効あり－節あり」の鉄筋の押し曲げ戻し試験において，低い荷重で亀裂の発生が確認できた。この亀裂の箇所は，局所的にビッカース硬さの値が大きな箇所と合致する。

（6） 曲げ戻し時に生じた亀裂周辺の組織観察によると，初期亀裂は曲げ加工段階で生じた可能性が高いと考えられる。

（7） 2d 以上の曲げ半径で加工した場合には，脆性破断の試験体が全く無かったことから，土木学会コンクリート標準示方書に従って曲げ加工が行われた場合には問題ないものと考えられる。

参考文献

1） 日本コンクリート工学協会九州支部：膨張性骨材による構造物被害分析委員会報告書，2006.8

2） 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たなる対応－，コンクリートライブラリー124，2005.8