

ASR 膨張による異形鉄筋曲げ加工部の破断とそのメカニズムに関する考察

長崎大学 正会員 原田哲夫

長崎大学 正会員 佐々木謙二

九州工業大学 正会員 合田寛基

1. はじめに

近年、道路橋脚のスターラップなどの曲げ加工部に ASR 膨張による破断の事例が確認されており、破断した鉄筋は旧規格の鉄筋であるとの報告がなされている¹⁾。

鉄筋の破断メカニズムについては、様々な研究が行われているものの十分に解明されているとは言い難く、筆者らは現行規格の鉄筋を対象として、破断の可能性および破断メカニズムに着目した基礎的な研究を行ってきている。ここでは、筆者らのこれまでの実験結果を集約しつつ、ASR 膨張による鉄筋破断のメカニズムに関する考察を述べる。

2. 鉄筋破断に及ぼす機械的特性の変化とその要因

ASR 膨張による鉄筋破断の要因のうち、まず、鉄筋の機械的特性の変化が考えられる。主として、曲げ加工部の加工硬化とひずみ時効（熱による時効硬化）の影響を取りあげ、検討を行ってきた。ASR 膨張を模擬した加力方法として、鉄筋を曲げ加工し「くの字」を有する状態での引張試験（「曲げ戻し試験」と呼ぶ）を実施した。実験結果を表-1 に示す。加工硬化にひずみ時効を施した場合には、鉄筋破断に大きな影響を与えることがわかった。また、加工硬化だけでは破断に至らないこともわかった。曲げ加工半径が 1.0d 以下の場合、破断確率が高くなる。

3. ビッカース硬さ試験結果

鉄筋の機械的特性の 1 つをビッカース硬さで評価した。曲げ加工部では引張られながら曲げられ、大きな残留ひずみが生じる。まず、鉄筋を一樣に引張った場合の残留ひずみの大きさとビッカース硬さとの関係を調べた。引張残留ひずみの大きさは 5%、10%、15% とした。

試験体の概要を図-1 に示す。X-X 軸上の曲げ加工外側を A 点、曲げ加工内側を B 点として、残留ひずみを与えた直線試験体と比較した。実験結果を図-2 に示す。B 点では、HV280 程度を示しており、直線試験体の残留ひずみ 15%以上のビッカース硬さに相当していることがわかる。図-3 からビッカース硬さは、残留ひずみが大きくなるとほぼ残留ひずみの大きさに比例して増加し、さらにひずみ時効を受けることで増加することがわかる。ただ

し、残留ひずみなしの状態では、ひずみ時効はビッカース硬さに影響しないことがわかった。

表-1 曲げ戻し試験結果

種類	呼び名	曲げ半径	ひずみ時効	試験本数	破断本数	破断割合
SD345	D19	1.0d	なし	5	0	0%
			220℃-3時間	5	5	100%
		2.0d	220℃-3時間	5	0	0%
	D22	0.9d	なし	10	0	0%
			220℃-30分	10	1	10%
			220℃-1時間	10	5	50%
			220℃-2時間	10	8	80%
			220℃-3時間	10	10	100%
			220℃-6時間	10	10	100%

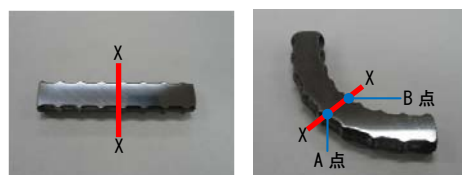


図-1 ビッカース硬さ試験体

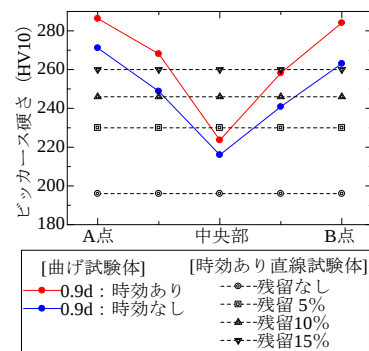


図-2 ビッカース硬さ試験比較図

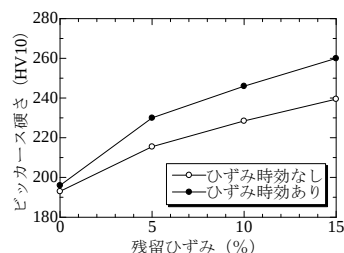
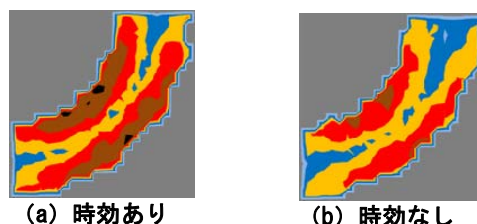


図-3 ビッカース硬さ試験結果（残留ひずみ）



(a) 時効あり (b) 時効なし
180-200 200-220 220-240 240-260 260-280 280-300
図-4 ビッカース硬さ分布図

曲げ加工した試験体のビッカース硬さの平面分布図を図-4に示す。曲げ加工半径を $0.9d$ で曲げ、ひずみ時効を促進させると、曲げ加工内側に局所的に硬い部分が発生した。

4. 圧縮残留ひずみを与えた鉄筋の引張試験

圧縮引張残留ひずみを与えた後、ひずみ時効を施し、引張試験を行った。圧縮残留ひずみは 5%、10%、15% とした。それぞれについての応力-ひずみ関係を図-5に示す。図-6は引張試験開始時から破断に至るまでのひずみ量と残留ひずみの大きさの関係であり、残留ひずみが大きくなるに従って伸び能力が低下していることがわかる。すなわち、ビッカース硬さの値が大きくなるにしたがって、脆くなることを示している。

5. 鉄筋破断に及ぼす初期亀裂の影響

曲げ加工後の鉄筋の縦断面の組織観察結果を図-7に示す。 $0.9d$ で曲げた試験体で、 $50\mu\text{m}$ 程度の初期亀裂が確認できた。ここで、初期亀裂がなければ鉄筋破断に至らないのかどうかを確認するために、初期亀裂をやすりで磨いて、初期亀裂の影響を取り除いた状態で曲げ戻し試験を行った。結果として、初期亀裂の有無にかかわらず破断が確認された。これより、初期亀裂が存在すれば破断が誘発されやすくなるが、初期亀裂がなくても鉄筋破断に至るケースがあることから、初期亀裂は必ずしも破断の必要条件とはならないと考えられる。

6. 破断メカニズムに関する考察

以上の結果から、破断メカニズムを次のように推定している。すなわち、鉄筋を曲げ加工半径 $1.0d$ 以下で曲げると、図-8(b)の②の節（2番目の節）では、図-9に示すようないびつな変形が生じ、ひずみ時効によってビッカース硬さが局所的に高いところ、すなわち材料的に脆い箇所が発生する。この部分が ASR 膨張による曲げ戻しの力を受けると、いびつに変形している 2 番目の節の付け根で応力が集中し、材料的に脆い箇所から亀裂が発生して破断に至る。図-10は、いびつに変形した節の付け根からの亀裂の様子を示している。

7. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 曲げ加工半径が $1.0d$ 以下の場合、ひずみ時効を促進させると、加工硬化と時効硬化により局所的に硬い部分、すなわち、亀裂を発生しやすい脆い部分ができる。
- 2) 曲げ加工半径が $1.0d$ 以下の場合、鉄筋の節の付け根は、いびつに変形し、ASR 膨張による曲げ戻しの力

を加えると、変形した節の付け根に応力集中がおきやすい。

- 3) 局所的に脆い箇所に応力集中が起きるために、破断に至ると推定される。
- 4) 初期亀裂は必ずしも破断の必要条件とはならないと考えられる。

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 124）

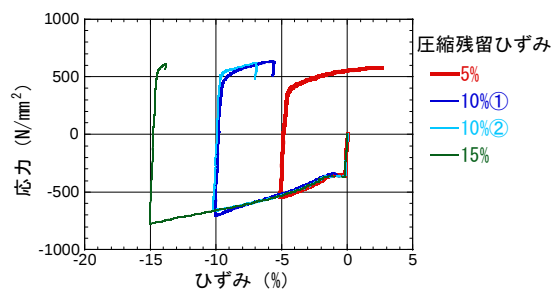


図-5 圧縮残留ひずみを与えた鉄筋の引張試験結果

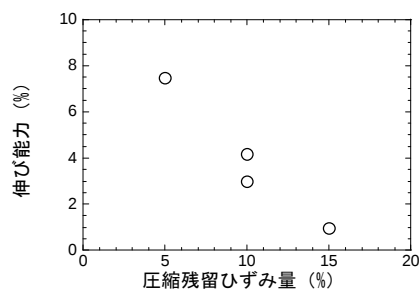


図-6 残留ひずみと伸び能力の関係

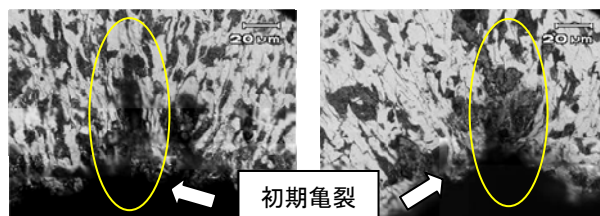
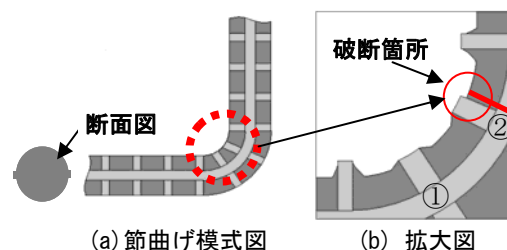


図-7 鉄筋組織観察



(a) 節曲げ模式図 (b) 拡大図
図-8 鉄筋拡大図



図-9 節拡大図

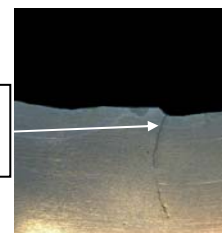


図-10 亀裂拡大図