

# 論文 曲げ戻しを受ける鉄筋の脆性破断に対する感受性の検討

合田 寛基\*1・原田 哲夫\*2・日比野 誠\*3・永藤 政敏\*4

**要旨：**本研究では、異形鉄筋を対象に曲げ戻しを受けた際の脆性破断に対する感受性について検討した。脆性破断に対する感受性は延性の低下と相関があることから、延性に影響すると考えられる硬度の増加に着目した。パラメータは、加工硬化とひずみ時効である。得られた知見として、加工硬化のみによる硬度の増加よりも時効硬化を併用させたときに脆性が大きくなった。また、多軸応力を受ける節基部で硬度の増加が最も大きく、その部分から破断に至ったことから硬度の増加と脆性破断に対する感受性の相関が確認された。節基部では破断時の最大主ひずみが約 3000 $\mu$ を示した。

**キーワード：**アルカリ骨材反応, 鉄筋破断, 表面硬度, 加工硬化, ひずみ時効

## 1. はじめに

1996年にアルカリ骨材反応による鉄筋破断が確認<sup>1)</sup>されて以来、北陸地方や関西地方の橋脚やフーチングなどを中心に数例の被害事例が報告されている<sup>2)</sup>。この鉄筋破断現象により、構造物の耐荷特性に対する影響が懸念され、その原因解明と既設・新設構造物に対する対策が重要とされている。既往の研究<sup>2)</sup>から、鉄筋破断現象は、ASRによるコンクリートの膨張作用と相関性が確認されており、曲げ加工方法やひずみ時効、初期亀裂などとの相関性が指摘されている。さらに被害構造物の多くでは、1980年以前に製造された電炉鉄筋が使用されていることが多く、この電炉鉄筋の材料特性と脆性破断との関係についても検討がなされている。

これまで、旧鉄筋の破断現象の再現や破断メカニズムに関する研究成果<sup>2),3),4),5)</sup>が報告されている一方で、現行鉄筋の脆性破断に対する感受性ならびに安全性については未だ検討が必要とされている。この一因として、検証内容が節形状や曲げ加工半径といった変形を付与するものに着目したものが多く、破断現象の要因として考えられる脆性を十分に評価できていないことがあげられる。破断に対する対策を講じる上で、鉄筋破断が生じる条件を明らかにすることは重要であり、脆性の定量評価を行うことが望まれる。そこで本研究では、現行鉄筋の脆性破断に対する感受性を評価することを目的とした実験研究を行った。鉄筋の脆性破断には延性の低下が影響すると考えられることから、変形量と硬度の増加との因果関係について評価を試みるとともに、硬度を増加させる方法と脆性との関係について検討した。さらに、破断部周辺におけるひずみ分布から、変形の局所化する領域を明らかにするとともに破断時におけるひずみから破断メカニズムについて検討した。

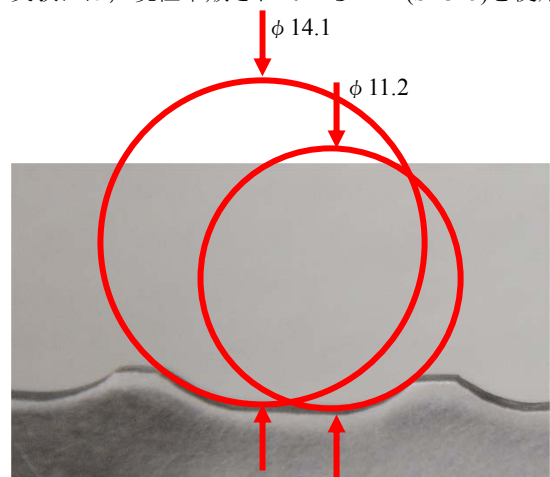
実験では、まず一軸引張試験ならびにビッカース試験から、材料強度、表面硬度ならびに残留ひずみを測定し、それぞれの相関について検討した。次に、曲げ加工による加工硬化とひずみ時効による時効硬化を付与した鉄筋の表面硬度分布を測定し、それを基に脆性の大きくなる領域を特定した。最後に、曲げ戻し作用を受ける鉄筋の表面ひずみをデジタル画像相関法によって測定し、破断時におけるひずみ量とひずみの局所化する領域を特定した。

## 2. 一軸引張が作用する場合における表面硬度の変化と応力-ひずみ関係

本章では、一軸引張によって変形を与えた場合における残留ひずみと表面硬度の関係から、ひずみ時効が表面硬度に及ぼす影響について検討した。

### 2.1 実験方法

本実験には、現在市販されている D22(SD345)を使用



(単位: mm)

写真一 異形鉄筋の形状

\*1 九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学研究系助教 工修 (正会員)

\*2 長崎大学 工学部構造工学科教授 工博 (正会員)

\*3 九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学研究系准教授 工博 (正会員)

\*4 長崎大学 工学部構造工学科技術職員 (正会員)

した。鉄筋の節形状は、竹節形状である。鉄筋形状を写真-1に、強度特性を表-1にそれぞれ示す。なお、写真-1に示す円は、節基部の直径を示す。比較として、既往の研究<sup>3)</sup>で脆性破断した旧節形状のD16を示す。本試験で使用する異形鉄筋は、鉄筋コンクリート用棒鋼(JIS G 3112-2004)を満足している。

供試体ケースを表-2に示す。パラメータは、加工硬化の程度を示す残留ひずみならびにひずみ時効による時効硬化である。供試体数は、各ケース2体である。

供試体の長さは、500mmとした。ひずみを測定するため、供試体中央部の両リブに大塑性ひずみゲージを貼付した。残留ひずみは一軸引張除荷後のひずみで評価し、それぞれ5%、10%、15%とした。ひずみ時効は、残留ひずみを与えた後に220℃の恒温槽内へ3時間静置させて付与した。表面硬度は、残留ひずみを測定した領域を対象とし、図-1に示すように両リブから断面の厚さが10mmとなるように切削した平滑な断面で計測した。

## 2.2 結果と考察

図-2に、残留ひずみと表面硬度の関係を示す。残留ひずみが大きくなると表面硬度が増加しており、残留ひずみ0~15%では、両者の間に正の相関がみられた。残留ひずみを有する箇所にひずみ時効を付与すると硬度の増加が顕著であることがわかった。

これより、大きな塑性変形を受けた領域では、加工硬化が進行するとともにひずみ時効による時効硬化も進み、両者の相乗効果によって表面硬度が著しく増加することが確認された。

加工硬化と時効硬化について、それぞれの硬化のメカニズムには以下の要因が関係する。加工硬化では、変形にともなう転位が影響する。一方、ひずみ時効ではCやNといった溶質原子の拡散が関係する<sup>6)</sup>。このように2つの硬化メカニズムは異なっている。これまでの研究成果<sup>35)</sup>では、鉄筋破断現象が加工硬化に加えて時効硬化を付与した場合に脆性破断が発生している。

以上より、同程度の硬度の増加がみられる場合、ひずみ時効による硬度の増加は加工硬化よりも延性の低下に影響し、脆性破断を引き起こす可能性を高める要因になる可能性が考えられる。現段階では、単に量的な硬度増加の評価に留まっているが、硬度を増加させる過程や要因を考慮した硬度増加と脆性との相関について検討が求められる。今後、硬度の量と質に関する検討を行い、加工硬化や時効硬化といった要因と脆性に対する感受性との因果関係について明らかにする必要がある。

## 3. 曲げ加工した鉄筋における硬度の増加と脆性破断との相関性

表-1 一軸引張試験結果<sup>3)</sup>

	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	伸び %
本研究 D22	407	581	22
旧節形状 D16	345	508	30
JIS G 3112	345~440	490 以上	16

表-2 表面硬度の供試体ケースならびに結果

供試体 ケース	ひずみ時効	残留ひずみ (%)	ビッカース 硬さ (HV)
Type1	なし	0	193
Type2		5	216
Type3		10	229
Type4		15	240
Type5	あり	0	196
Type6		5	230
Type7		10	246
Type8		15	260

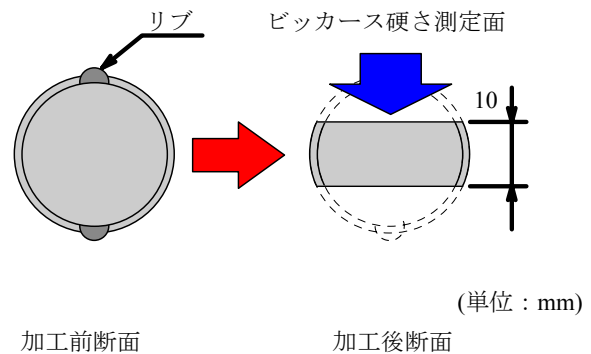


図-1 鉄筋断面の切削方法

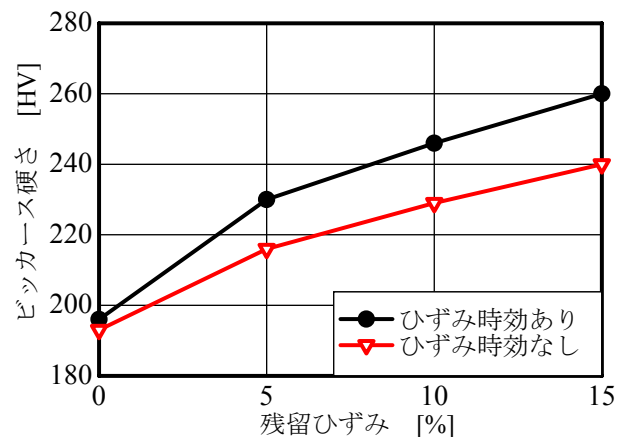


図-2 残留ひずみと表面硬度の関係

本章では、破断が報告されている曲げ加工鉄筋のように、局所的に大変形を受けた場合における硬度の増加領域と脆性破断との相関について検討した。

### 3.1 実験方法

供試体形状を写真-2に示す。既往の研究<sup>3),6)</sup>に基づき、曲げ加工半径ならびに節形状の相違を変化させて局所的な変形を付与した。表-3に供試体ケースを示す。表中の脆性破断割合は、試験本数に対する脆性破断した供試体数の割合を示す。Type4は、曲げ加工部に相当する異形鉄筋の節をやすりで研磨し、表面に凹凸のない丸鋼を模擬したものである。ひずみ時効の付与方法は、前章と同様である。曲げ角度は全て90度とした。

実験では、曲げ加工後、前章と同様に断面を切削し、写真-3に示す曲げ加工部を対象にビッカース試験によって表面硬度を測定した。測定間隔は、軸方向・軸直角方向いずれも2mmピッチとした。供試体数は、各ケース2体である。

### 3.2 結果と考察

図-3は、各供試体ケースにおける表面硬度の大きさを示す。未加工の直線部における表面硬度は、約170HVであった。同図(a)のType1では、曲げ角50°付近の節基部で約300を示し、直線部よりも約140HV大きいことがわかる。一方、同図(b)のType2では、節の基部で表面硬度が約270HVを示し、直線部と比較して100HVの硬度増加がみられた。同図(c)Type3ならびに(d)Type4についても、同様の結果が得られた。既往の研究<sup>7)</sup>より、曲げ加工時に40~60°の曲げ加工角度でコアリングに接触する節の基部で最も大きなひずみが生じることが明らかになっていることから、硬度が最も増加した領域とひずみの局所化した領域は一致することがわかった。

次に、ひずみ時効の有無が硬度の分布に及ぼす影響について検討した。図-4は、Type1とType2のひずみの差を示す。同図より、最も変形の大きかった節基部での表面硬度の増加量が大きいことが明らかとなった。本章に示す局所的に多軸応力が作用する場合においても、前章の一軸引張と同様の結果が得られた。佐々木らの研究<sup>8)</sup>の解析では、節基部に作用する相当塑性ひずみは0.9以上となり、本研究の一軸引張試験で得られた残留ひずみ0.15の6倍以上であった。これより、曲げ加工によって節基部では、脆性破断に対する感受性が極めて高くなっていると推察される。

表-3は、各供試体に曲げ戻しを作用させた結果である。ひずみ時効を付与したType1は、約7kNの低荷重で脆性破断した。破断箇所はいずれも、最も変形の大きかった節の基部である。一方、ひずみ時効を付与しなかったType2では脆性破断せず、一軸引張試験と同様に延性破壊した。Type3についても、Type2と同様の結果を示し

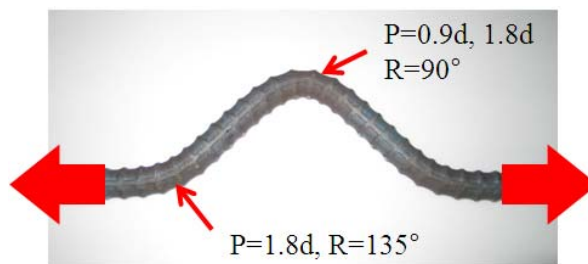


写真-2 局所的な変形を受けた鉄筋の曲げ戻し試験供試体

表-3 曲げ戻し試験供試体ケースならびに結果

供試体ケース	曲げ半径	ひずみ時効	節	試験本数(本)	脆性破断割合(%)	平均荷重(kN)
Type1	0.9d	あり	あり	2	100	7
Type2	0.9d	なし	あり	2	0	140
Type3	1.8d	あり	あり	2	0	93
Type4	0.9d	あり	なし	2	0	210

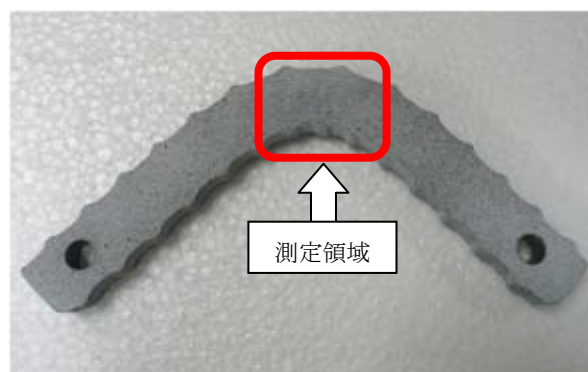


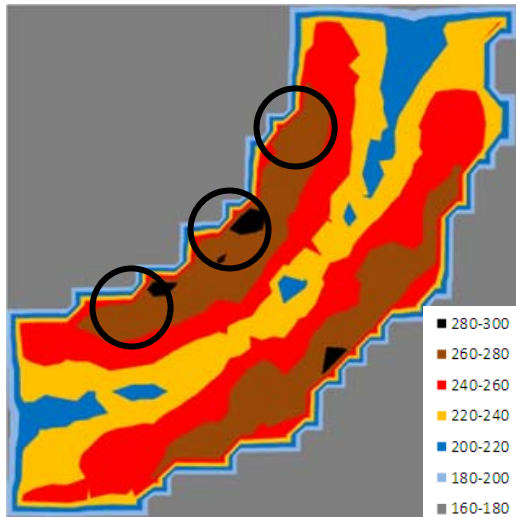
写真-3 曲げ戻し供試体のビッカース硬さ試験領域

た。

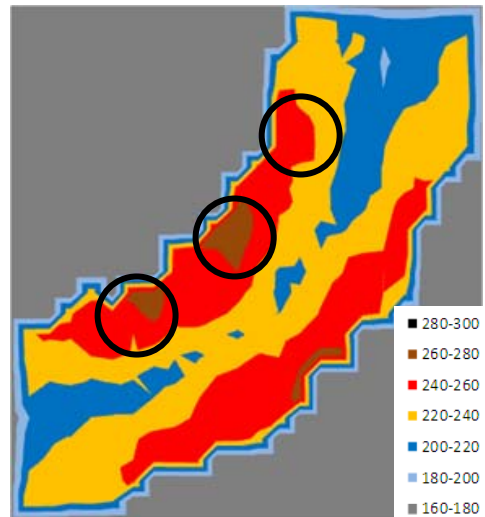
以上より、曲げ加工時の節基部のように多軸応力が作用する領域では、加工硬化によって著しい硬度の増加が生じ、ひずみ時効との相乗効果によってさらに硬度が増加する。これは大きな材料特性の変化をもたらすことにつながり、節基部での脆性破壊に対する感受性が極めて大きくなる要因であることがわかった。

## 4. デジタル画像相関法による節基部のひずみ評価

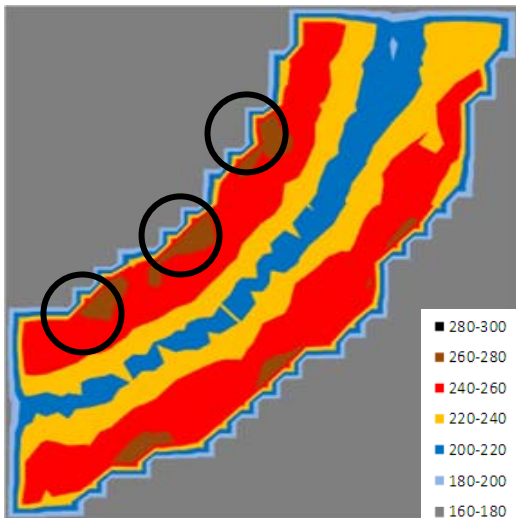
本節では、デジタル画像相関法を用いて曲げ戻しを受ける場合における節基部のひずみ量を測定し、ひずみの局所化する領域ならびに破断時におけるひずみ量について検討した。



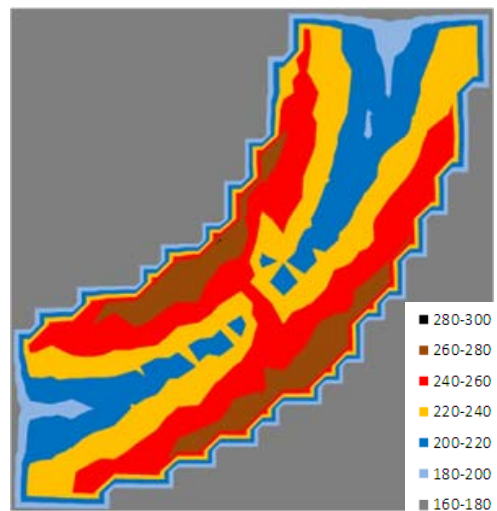
(a) Type1 (黒○印は節)



(b) Type2 (黒○印は節)



(c) Type3 (黒○印は節)



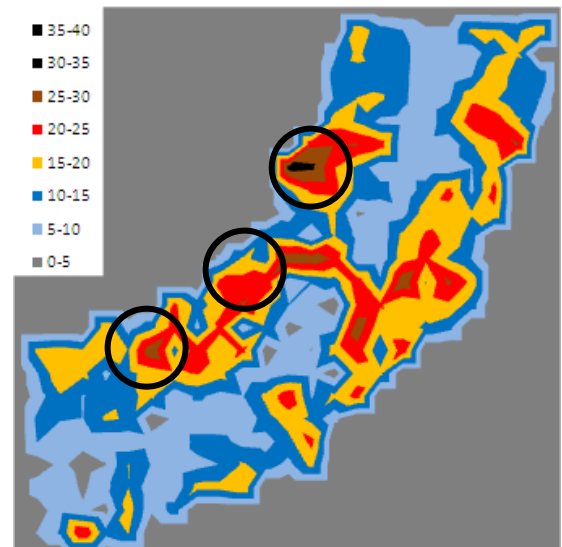
(d) Type4 (単位：HV)

図-3 ビッカース硬さに基づく硬度分布

#### 4.1 実験方法

供試体ケースは、前章と同様である。供試体は、ビッカース試験後の供試体両端部にアンカー用のφ10の穴を開け、シャックルを通したものである。面外変形を考慮するため、2台のデジタルカメラを用いて3次元計測を行った。デジタルカメラの有効画素数は、1280×1024pic(約130万画素)である。撮影画角は250×200mm(0.2mm/pic)とし、約30N毎に撮影した。デジタル画像相関法に用いたアプリケーションソフトは、VIC3Dである。サブセットは9×9pic(1.8×1.8mm)、サブセット間隔は4pic(0.8mm)とした。

曲げ加工時におけるひずみ量の評価に関して、佐々木らの研究<sup>8)</sup>に示す通り、曲げ加工部は大変形を呈することから、相当塑性ひずみによって評価を行うことが多い。一方、曲げ戻し時の破断現象を検証する場合、対象領域の曲げ加工内側では、鉄筋が脆性的な破壊形式を示すこ



(黒○印は節) (単位：HV)

図-4 ひずみ時効による硬度の変化

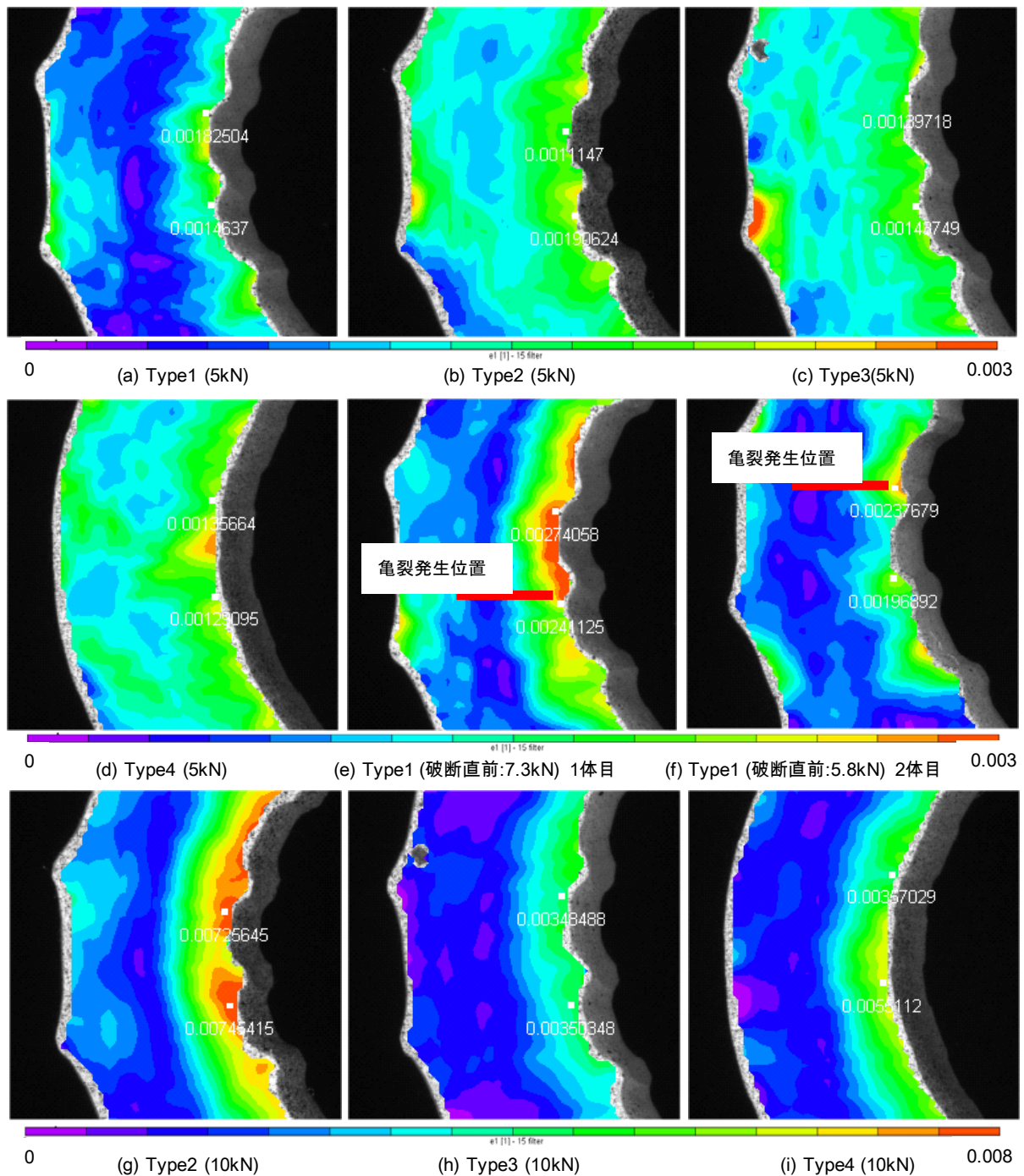


図-5 最大主ひずみ分布

とが予測されることから、脆性的な材料の微小な変形について評価する必要がある。そこで、本研究では最大主ひずみによって評価した。

#### 4.2 結果と考察

写真-4 に、脆性的な亀裂が生じた Type1 の表面を示す。同部では、試験前の曲げ加工時に深さ 0.04mm の微小亀裂が確認された。曲げ戻しにより新たに発生した亀裂幅は約 0.2mm、亀裂の進展深さは約 4mm であった。図-5(a)~(d)に、各供試体ケースの 5kN 時における最大主ひずみ分布を示す。5kN では、いずれのケースも曲げ加工内側の節基部、特に節と節の間で大きなひずみを示



写真-4 Type1 の亀裂発生状況

している。この部分では、Type1 と Type2 でひずみが大  
きい。Type 1 について、亀裂発生直前のひずみ分布を  
図-5(e), (f)に示す。両図より、節基部でのひずみの局  
所化が顕著にみられ、亀裂発生時には同部で約 3000  $\mu$  の  
ひずみが生じていた。

次に脆性的な亀裂が確認されなかった Type2, Type3,  
Type4 について、10kN 時における最大主ひずみ分布を  
図-5(g)~(i)に示す。Type2, Type3 では、Type1 と同様に  
節基部で 0.02~0.04mm の微小亀裂を確認したが、6000  
 $\mu$  以上のひずみを示しても亀裂が発生していない。  
Type4 でも同様に脆性的な亀裂が発生した Type1 以上の  
ひずみが確認されたが新たな亀裂の発生や進展は見ら  
れなかった。この要因として、Type2~Type4 における条  
件では、破断に必要と考えられる 2 つの硬化現象の組み  
合わせがなかったことや硬度の増加が不十分であった  
ことから、脆性的な破壊に対する感受性の高い領域が存  
在しないことが考えられる。

以上のことから、今回の実験では顕著な加工硬化と時  
効硬化の両方を受けた領域では、硬度の増加にともなう  
延性の低下が生じ、脆性的な亀裂に対する感受性が大き  
くなることがわかった。

なお、既往の研究<sup>3)</sup>にも示す通り、初期亀裂が存在す  
ると破断確率が高いと考えられるが、本研究では初期亀  
裂の確認された Type2, Type3 で破断が起きなかったこと  
から、微小亀裂・加工硬化・時効硬化といった要因と破  
断現象との因果関係を明確にすることが必要である。

## 5. まとめ

本研究では、硬度に基づき脆性破断に対する感受性に  
ついて検討した。得られた知見を示す。

- (1) 加工硬化と時効硬化には相関がみられた。
- (2) 加工硬化のみによる硬度の増加よりも、時効硬化を  
併せることで付与される硬度の増加の方が、脆性を  
大きくすると考えられる。
- (3) 加工硬化と時効硬化によって著しい硬度の増加が  
みられた領域では、脆性破断に対する感受性が極め  
て大きくなった。

- (4) 脆性亀裂の発生直前に、破断部周辺では約 3000 $\mu$  の  
最大主ひずみを示した。

## 謝辞

本研究にあたり、長崎大学工学部松田浩教授、元山浩  
二氏他同大学学生の皆様ならびに福岡県工業技術セン  
ター機械電子研究所内野正和研究員に多大なるご協力  
を頂戴しました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) K Takeo, H Matsushita, Y Matsufuji and T Sato: Surveys  
and repairs of AAR-damaged concrete Structures,  
proceedings of the 10th International Conference on  
Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1049-1055,  
1996
- 2) 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), pp. I 26- I 65, 2005.8
- 3) 幸左 賢二, 川島 恭志, 合田 寛基, 興梠 展朗:  
アルカリ骨材反応による鉄筋破断現象に関する実  
験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.371-388,  
2008.6
- 4) (社)日本材料学会:コンクリート中鉄筋の割れに関  
するシンポジウム講演資料, 2008.4
- 5) 原田 哲夫, 坂田 祥文, 永藤 正敏, 合田 寛基:  
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, コンクリート工学年次論文集, Vol.29,  
No.1, pp.1281-1286, 2007.7
- 6) 日本材料学会:塑性加工学, 養賢堂, pp.207-224,  
1976.8
- 7) 合田 寛基, 日比野 誠, 西川 祐輔, 内野 正和:  
デジタル画像相関法を用いた曲げ加工鋼材のひず  
み計測, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.62, 第  
V 部門, pp.869-870, 2007.9
- 8) 佐々木 一則, 久利 良夫, 五十嵐 弘行, 宮川 豊  
章:鉄筋曲げ加工部のひずみおよび応力分布に関す  
る研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1,  
pp.987-992, 2008.7