

論文 ASR 膨張による断面の変形挙動に関する実験的研究

佐藤 雅義^{*1}・田中 泰司^{*2}・岸 利治^{*3}

要旨 : ASR 膨張により生じた鉄筋曲げ加工部の破断現象の機構解明に資するべく, 各種鉄筋破断要因のうち, 鉄筋の材料欠陥と構造的な局所変形の相互作用に着目し, 実験的な検討を行った。ASR 膨張を模擬するため, 膨張材を添加したコンクリートを用いて帯鉄筋に生じるひずみと変形挙動の測定を行った。その結果, 帯鉄筋の隅角部ひずみは, 直線部と比較して顕著に局所化すること, 断面変形はほぼ四角形を保持した状態で変形するモードであることを確認した。また, 鉄筋の材料欠陥と ASR 膨張による力学的変形現象の組み合わせによって, 破断現象が生じることを確認した。

キーワード : ASR, 鉄筋破断, 曲げ加工, 亀裂, ひずみ時効, 旧節形状鉄筋

1. 序論

ASR膨張による骨材の膨張作用によって, 道路橋の橋脚における帯鉄筋の曲げ加工部等で破断が生じるという問題が報告されている¹⁾。この鉄筋破断現象の原因として, 曲げ加工時における鉄筋隅角部のひび割れ, 水素脆化, 腐食, ひずみ時効や遅れ破壊等による材料的な欠陥, また, ASRによる膨張作用が鉄筋自体に変形を発生させる力学的要因が挙げられている。しかし, 隅角部の鉄筋の品質や状態に関する材料的な視点に立脚した検討は精力的に行われているものの, 力学的・構造的な視点に立脚した検討は未だ十分とはいえず, 鉄筋破断機構に関しても不明な点が残っている。そこで本研究では, 鉄筋破断現象が材料欠陥と力学的な応力集中現象の組み合わせによって生じると仮定し, 材料欠陥と応力集中現象の度合いを評価することを目的として, 実験的な検討を行った。

ただし ASR 再現実験は多大な労力と長い期間を必要とし, 確実に膨張作用が発生するという確証が得られないため, 部材レベルで試験を実施することが困難である。ASR による骨材の膨張作用を, 簡易的かつ短期間に模擬することが

可能であれば, 数多くの実験を実施することで, ASR による鉄筋破断現象の解明に資する情報を得る事ができると考えられる。そこで, 本研究では膨張材を用いることによって, ASR 膨張を模擬して鉄筋破断現象の再現実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の形状

図-1 に供試体立体図, 図-2 に供試体平面図を示す。供試体は柱部材の断面を模擬し, 寸法が900mm×900mm×300mmの直方体とした。ASR によるコンクリート膨張が帯鉄筋に作用する変形性状を模擬するためには, 膨張作用が忠実に帯鉄筋に伝達することが重要であると考えられる。そこで, 本研究では帯鉄筋周辺部の剛性を確保する目的で帯鉄筋周辺のフレーム部に普通コンクリートを打設し, 所定の養生期間後に内部コア部に膨張材を添加したコンクリートを打設する方法を採用した²⁾。

膨張コアコンクリートの寸法は 650mm×650mm×300mm の直方体とした。

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系助手 博(工) (正会員)

*3 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門助教授 博(工) (正会員)

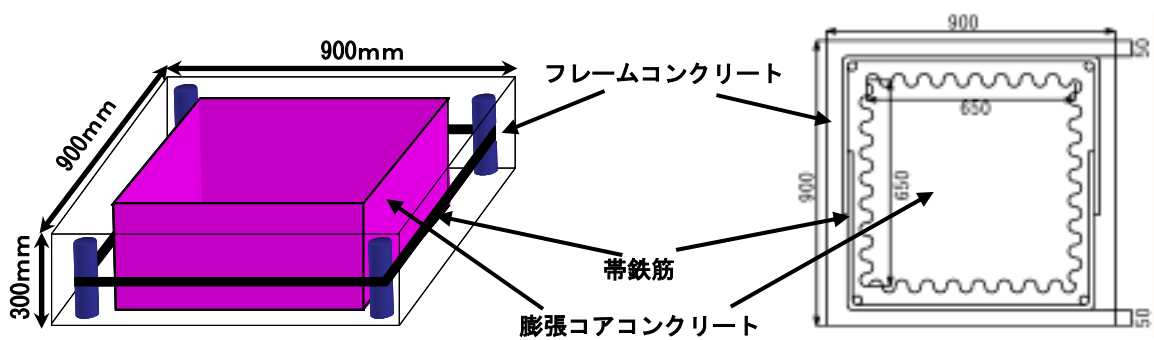


図-1 供試体立体図

図-2 供試体平面図

表-1 フレームコンクリート配合

W/C (%)	空気量 (%)	質量(kg/m ³)						圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S	G	SP	AE	
40	3	175	438	793	955	C×0.6%	C×0.003%	45

表-2 膨張コアコンクリート配合

W/B (%)	空気量 (%)	質量(kg/m ³)					
		W	C	E	S	G	増粘剤
45	5	360	600	200	399	483	B×0.35%

表-3 供試体一覧

供試体名	鉄筋種類	鉄筋径	曲げ内半径	鉄筋劣化処理	鉄筋の節形状
No.1	異形鉄筋 (SD295A)	D16	1d	無	現行節
No.2				人工ひずみ時効硬化	現行節
No.3				人工ひずみ時効硬化	模擬旧型節
No.4	丸鋼 (SR235)	φ16		無	現行節
No.5				無	無(丸鋼)



写真-1 人工ひずみ時効硬化処理

2.2 各種コンクリートの配合条件

フレームコンクリートの配合を表-1に、膨張コアコンクリートの配合を表-2に示す。鉄筋破断現象が生じるほどコンクリートが十分に膨張するように膨張コアコンクリートの単位膨張材量は 200kg/m³とした。全ケースでフレームコンクリートと膨張コアコンクリートの配合は一定とした。本試験による膨張量と ASR による膨張の対応関係については別途検討を要する。

2.3 供試体諸元

表-3に供試体一覧を示す。No.1~No.4供試体の帯鉄筋には異形鉄筋 (SD295A) D16を、No.5供試体には丸鋼 (SR235) φ16を用いた。帯鉄筋の曲げ半径は1d(dは鉄筋の直径を表す)とし、また、供試体せん断補強筋比は、コンクリート標準示方書に記載の最小せん断補強筋比を参考に0.15%とした³⁾。

フレームコンクリートと膨張コアコンクリー

トの境界面の応力伝達を確保するため、No.1~No.3, No.5 供試体の境界面は波形形状とした。一方、No.4 供試体のコンクリート境界面は平板形状とした。

2.4 鉄筋劣化処理

表-3に鉄筋劣化処理に関する種別を示した。鉄筋の経年劣化による脆化⁴⁾を模擬するためNo.2, No.3供試体に人工ひずみ時効硬化処理を施した。時効処理方法を写真-1に示す。帯状の巻き付け型ヒータを鉄筋曲げ加工後に一様に巻きつけ既往の研究を参考にし、150℃、15時間の加熱処理をおこなった。

さらに、実際に破断が生じた構造物の建設年代に製造されていた旧型の節形状の鉄筋は現行鉄筋と比較して節と節の根元の形状が直角に近く、曲げ加工を施す際に鉄筋の節に沿って亀裂を誘発すると考えられる¹⁾。そこで旧型の節形状

の鉄筋を模擬するために、No.3供試体において、鉄筋曲げ加工前に刃幅2mmのグラインダで異形鉄筋の節の根元を削り、鋭角な形状にすることで、旧節形状を模擬することとした。写真-2に現行鉄筋、写真-3に模擬旧節形状鉄筋を示す。両者を比較すると、模擬旧節形状鉄筋において節と節の根元の勾配が明確に異なった。

2.4 計測項目

図-3に帯鉄筋に貼付したひずみゲージの位置を示す。膨張作用が生じたときに、鉄筋ひずみが局所化する位置と範囲を把握するために、帯鉄筋隅角部に2箇所、隅角部近傍に4箇所、直線部に3箇所の計9箇所それぞれの内側と外側に貼付した。

図-4に供試体に設置した変位計の位置を示す。既往の研究では、膨張作用が生じたとき供試体断面は円弧状に変形を生じるとされている³⁾。そこで供試体2側面、合計6箇所に変位計を設置した。

また、膨張コアコンクリートの膨張ひずみを計測する目的で、膨張コアコンクリートの中心部にモールドゲージを埋設した。

3. 実験の結果および考察

3.1 帯鉄筋のひずみ分布

No.3供試体とNo.5供試体のコンクリートの膨張ひずみと隅角部、隅角部近傍、および直線部の鉄筋ひずみの関係を図-5、図-6に示す。No.3, No.5供試体の帯鉄筋隅角部のひずみE, Fはそれぞれ膨張ひずみ0.2%, 0.4%以降で圧縮・引張ひずみがそれぞれ顕著に増加する傾向となった。帯鉄筋内側が引張、外側が圧縮であるため、この部位では曲げ戻し変形が生じていることがわかる。この傾向はその他の供試体においても同様に確認された。また、No.3供試体では膨張ひずみが約0.7%の時に鉄筋隅角部で破断現象を確認したものの、他の供試体では鉄筋の破断現象は確認できなかった。本実験では帯鉄筋隅角部のみで曲げ戻し変形が卓越し、直線部と隅角部近傍ではひずみの増加が緩慢であった

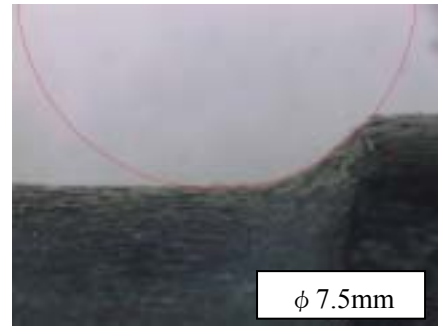


写真-2 現行鉄筋



写真-3 模擬旧節形状鉄筋

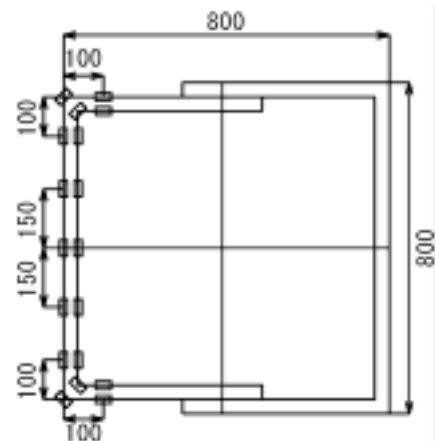


図-3 鉄筋に貼付したひずみゲージ位置

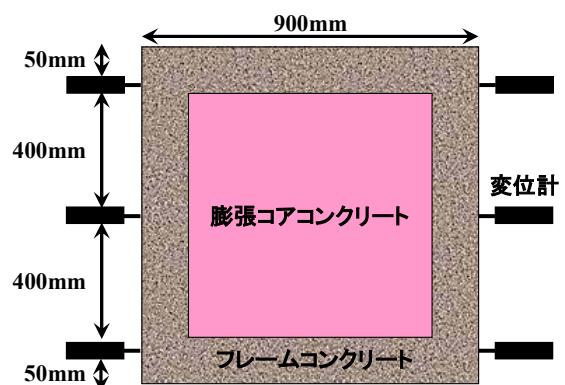


図-4 供試体に設置した変位計位置

(図-5, 6のA~Dを参照)。

図-7に膨張コアコンクリートの膨張ひずみが5000 μ の際に計測された、No.2, No.4, No.5

供試体 A~I 断面における曲率分布を示す。隅角部 (B, H) の曲率は全供試体ともに局所化する傾向であったが、直線部 (D, E, F) は 0 に近い値であった。また、隅角部の局所化程度は No.2 供試体が大きく、No.4, No.5 供試体よりも顕著に増加する現象を確認した。No.1, No.3 供試体も No.2 供試体とほぼ同様な曲率分布であった。

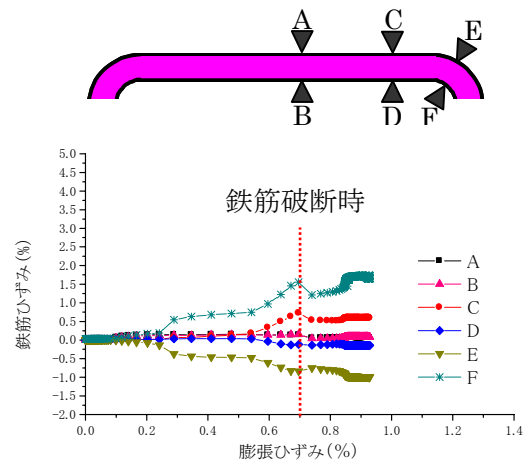
鉄筋のひずみ分布と曲率分布の両面から考察すると、直線部は円弧になるような変形は小さく、鉄筋隅角部に局所的な曲げ戻し変形が生じていることから、部材全体としてはほぼ 4 角形の形状を保持したまま膨張変形が生じていたと推察される。このようなひずみ分布の傾向は劣化処理や鋼種等の区別なく、全試験体で同様に確認された。

3.2 供試体断面の変形

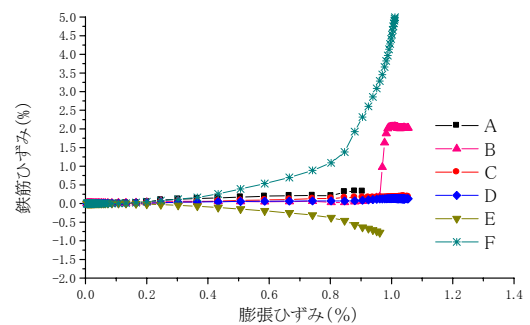
図一 8 に No.2 供試体の膨張ひずみと変位量の関係を示す。供試体の断面変形は中心部「変位 2」より隅角部「変位 1」の変位量が大きく、隅角部「変位 3」が最も小さい値となった。また、No.1 供試体と No.3 供試体においても同様な傾向を確認することができた。このことより、鉄筋劣化処理の有無に関わらず 3 供試体ともに台形に近い変形が生じたことがわかる。これは「変位 1」側の隅角部が先行して損傷したために、他方である「変位 3」側の隅角部損傷が回避されたためと考えられる。

図一 9 に No.4 の膨張ひずみと変位量の関係を示す。供試体の断面変形は、隅角部変位 1 よりも中心部変位 2 が一番大きい結果となった。No.5 供試体においても同様な傾向を確認することができた。このことより、2 供試体ともに断面中心部に大きな変位が生じ、円弧を形成するように変形が生じたことが分かる。ただし、今回の実験では、このような変形性状を帯鉄筋のひずみ分布から明確に推察することができなかった。

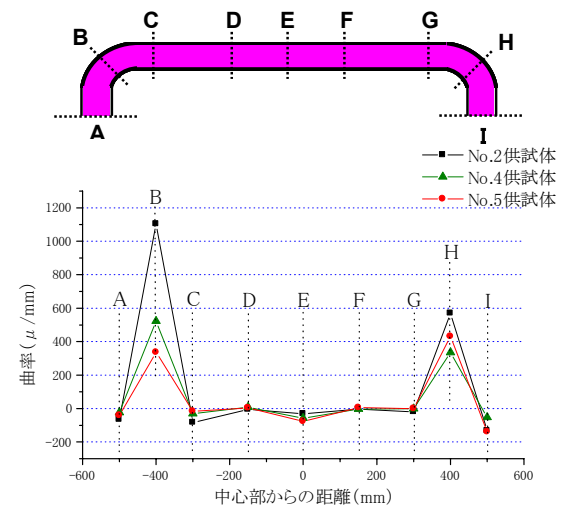
コアコンクリートとフレームコンクリートの境界面に平板形状を用いた No.4 供試体と帯鉄筋に丸鋼を使用した No.5 供試体では、供試体全体が円弧となるような変形を呈したのに対して、



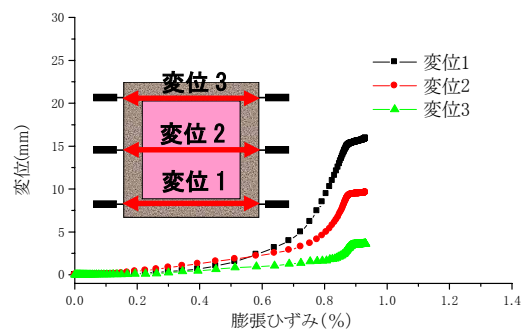
図一 5 膨張ひずみと鉄筋ひずみ関係 (No. 3)



図一 6 膨張ひずみと鉄筋ひずみ関係 (No. 5)



図一 7 曲率分布 (膨張ひずみ 5000 μ)



図一 8 膨張ひずみと変位関係 (No. 2)

帯鉄筋に異形鉄筋を使用し、かつ境界面が波板形状である No.1～No.3 供試体は、円弧を形成せずに台形に近い変形を呈した。両者の相違は、コアコンクリートの膨張の帯鉄筋への伝達機構の相違によるものと推察される。コンクリートから鉄筋への鉄筋軸方向の応力伝達が十分でない場合には、コアの膨張は膨張方向と平行な鉄筋を直接引っ張ることが難しく、直交方向の鉄筋を押し広げることによって隅角部を介して間接的に引っ張る機構が卓越すると考えられる。

3.3 供試体断面のひびわれ図

写真-4 に試験終了後の No.2 供試体の断面ひび割れ状況を示す。供試体の隅角部だけに幅 10mm を越える大きなひび割れが生じた。隅角部に生じたひび割れは、供試体中心部から膨張コアコンクリートとフレームコンクリートの角部を貫通するように進展しており、ひび割れ形状からフレームの各辺を弦とするタイドアーチの形成が推察された。また、直線部のひび割れ損傷は隅角部のひび割れと比較して小さかった。No.1, No.3, No.4 供試体においても同様なひび割れパターンを確認することができた。ただし、No.4 供試体は隅角部に生じたひび割れの局所化程度は、他の供試体と比較して小さかった。

写真-5 に丸鋼を使用した No.5 供試体の試験終了後の断面ひび割れ状況を示す。他の試験体と同様に、隅角部では膨張コアコンクリートとフレームコンクリートの隅角部を貫通するようなひび割れが生じたが、他の試験体と比較して直線部のひび割れ損傷が大きく、隅角部のひび割れは小さくなる傾向となった。

3.4 鉄筋の劣化処理の影響

鉄筋材料の変形特性に影響を与える因子として、曲げ加工や時効硬化、節形状を取り上げ、それぞれ実験結果とあわせて検討を行う。

旧節を模擬した試験体(No.3)では鉄筋破断が生じ、現行の節形状(No.2)の場合には破断が生じなかったことから、節形状の相違による応力集中の度合いが鉄筋破断現象に大きな影響を与えていると考えて差し支えないであろう。現行鉄

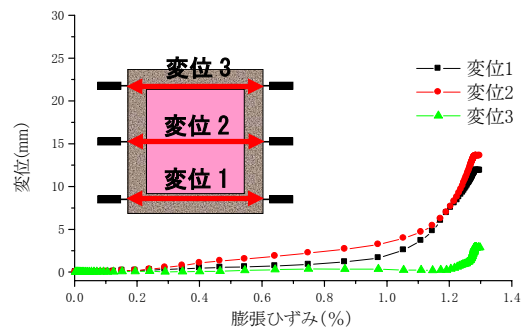


図-9 膨張ひずみと変位関係 (No. 4)

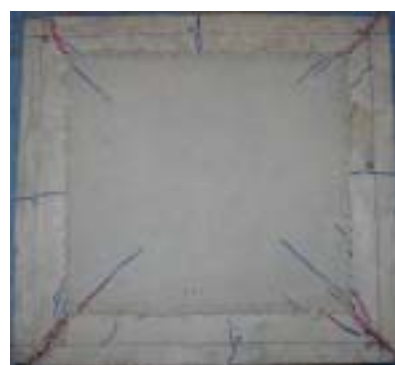


写真-4 断面のひび割れ状況 (No. 2)



写真-5 断面のひび割れ状況 (No. 5)

筋は節と節の根元が緩やかな形状であるため、曲げ加工を施した際にも亀裂が節の根元に沿って生じにくく、小さな曲げ内半径であっても初期損傷が小さいと考えられる。そのため、ASRによる大きな膨張が鉄筋に作用した際にも亀裂進展が顕著に生じないものと考えられる。

一方、模擬旧節形状の鉄筋は現行節の場合に比べて、曲げ加工の際に節の根元で比較的大きな初期損傷を受けていたと考えられる^{1),2)}。この際、ひずみ時効処理によって、損傷を受けた曲げ加工部が硬化し、さらに脆性破断を生じやすくなったと推測される。時効処理の影響度につ

いては、今後、別個に試験を行い、検討を行う予定である。

写真－6に No.3 供試体の鉄筋破断面を示す。破断現象は鉄筋隅角部で発生し、節の根元に沿って破断面が形成された。破断部近傍では鉄筋の絞りは確認できなかった。また破断面はほぼ全面が脆性破面であった。マイクروسコープで詳細に破断面観察をしたところ、曲げ加工部内側縁から 0.18mm の範囲で延性破面を確認した。この延性破面は旧節形状処理後に曲げ加工を施した際に形成された初期亀裂であると考えられる。

以上の検討から、鉄筋破断現象に及ぼす主要因は、鉄筋の節形状に起因する曲げ加工時の亀裂の発生、時効硬化による鉄筋の脆化、ASR 膨張作用による変形の隅角部への局所化の 3 要因であると考えられる。これらの材料的・構造的な要因が揃うことによって鉄筋の破断現象が極めて生じやすくなると推察される。なお、本研究では鉄筋の劣化処理を模擬旧節形状処理と人工ひずみ時効硬化処理の 2 種類で検討を行ったが、他の劣化要因である腐食、遅れ破壊や水素脆化などがさらに複合して生じることで、鉄筋の初期損傷・脆化の度合いが助長されることも考えられる。

4. まとめ

1. コンクリート境界面を波板形状とした供試体は、境界面の応力伝達を確保し、供試体隅角部に局所的な変形が作用し、四角形に近い変形が生じた。
2. コンクリート境界面を平板形状とした供試体は、境界面に対して垂直方向に応力が作用することで円弧を呈する変形が生じた。
3. 帯鉄筋に丸鋼を用いた供試体は、鉄筋ひずみ分布において、異形鉄筋を用いたものと明確な相違を確認できなかったが、変形性状は異なり、円弧を呈する変形となった。
4. 旧節形状を有する鉄筋に曲げ加工や時効硬化などによる材料欠陥・脆化が生じていること



写真－6 鉄筋破断面

が、鉄筋破断現象にとっての必要条件と考えられる。

したがって、現行鉄筋であれば曲げ加工による初期損傷は発生しにくく、大きな膨張作用を受けた場合でも定性的な推論ではあるが、鉄筋破断現象は生じにくいと考えられる。

5. 鉄筋破断現象は、節形状が急峻な異形鉄筋において曲げ加工や時効硬化などにより材料欠陥・脆化が発生した後、ASR 膨張が作用した場合に発生確率が高くなると考えられる。
6. 供試体断面は四角形の形状を保持したまま変形し、隅角部に変形が局所化することが実験的に示された。鉄筋が破断するためには、鉄筋隅角部における材料品質的な必要条件に加え、隅角部への変形の局所化という構造的な要因も大きく関与している可能性が示唆される。

参考文献

- 1) アルカリ骨材反対策小委員会報告書、土木学会、I - 2-3, 2005
- 2) 興梠ら：鉄筋の節形状とコンクリート膨張が破断に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.28, No.1, pp.719-724, 2006
- 3) コンクリート標準示方書構造性能照査編、土木学会、pp.80, 2002
- 4) 為石ら：ひずみ時効の鉄筋破断への影響に関する一考察、土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集、V-025, pp.49-50, 2004 年 9 月