

論文 曲げ加工部での鉄筋損傷メカニズムの検討

眞野 裕子^{*1}・幸左 賢二^{*2}・松本 茂^{*3}・橋場 盛^{*4}

要旨：本研究は ASR によるスターラップの曲げ加工部における損傷に焦点を当て、その原因およびメカニズムの解明を目的としている。鉄筋の曲げ加工や経年劣化に着目した材料試験を行い、引張試験での破断や曲げ加工部内側の亀裂を確認し、残留応力を測定した。また、ASR による膨張を再現した解析を行い、曲げ加工部に大きな応力が発生していることがわかった。

キーワード：ASR, 曲げ加工部, ひずみ時効, 鉄筋の破断, FEM 解析

1. はじめに

現在、アルカリ骨材反応（以下 ASR と表記）で劣化した構造物にて耐久性の早期劣化が問題となっている。ASR に起因する膨張圧の発生により構造物中のスターラップが破断する事例が報告されており、維持管理の面からもそのメカニズムの解明が重要な課題となっている。

本研究では ASR によるスターラップの曲げ加工部における損傷に焦点を当て、その損傷メカニズムの検討を行った。図 - 1 に検討フローを示す。まず、鉄筋の引張試験、亀裂の確認、残留応力の測定を行い、強度、破断状況に着目した検討を行った。次に ASR によるコンクリートの膨張を再現した FEM 解析を行い、曲げ加工部における応力状態の検討を行った。

鉄筋を標準として検討を行った。供試体には 90° の曲げ加工を施し検討した。実橋の曲げ加工を考慮して、曲げ加工半径は D16 鉄筋の JIS 規格値 2d を基準とした。使用した D10 鉄筋成分および性質と JIS 規格値を表 - 1, 2 に示す。解析においては、図 - 2 に示す張出し梁の 1/4 部分をモデル化し、着目断面は張出し長さの 1/4 の位置とした。

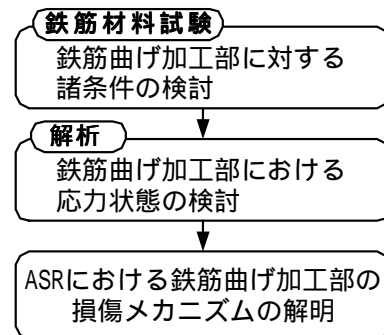


図 - 1 検討フロー

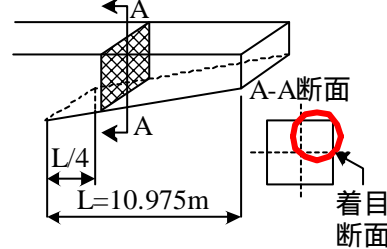


図 - 2 着目断面

2. 検討対象橋梁

検討対象として、建設後 20 年程度経過しており、実際に ASR による損傷および曲げ加工部における鉄筋破断が確認された PC 梁の単柱式橋脚を抽出した。破断したスターラップは D16、設計曲げ半径 2d であったが、材料試験では一連の 1/3 スケールの再現実験との関連から、D10

表 - 1 ミルシートと JIS の比較 (化学成分)

	C	Si	Mn	P	S
供試材 (%)	0.18-0.27	0.11-0.15	0.51-0.56	0.032-0.034	0.037-0.045
JIS規格 (%)	-	-	-	0.05以下	0.05以下

表 - 2 ミルシートと JIS の比較 (機械的性質)

	降伏荷重(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	伸び(%)
供試材	352 ~ 380	515 ~ 550	23 ~ 29
JIS規格	295以上	440 ~ 600	16以上

*1 九州工業大学 工学部 建設社会工学科 (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 阪神高速道路公団 神戸管理部

*4 オリエンタルコンサルタンツ (株) 関西支社 工博 (正会員)

3. 鉄筋材料試験概要

検討ケースを表 - 3 に示す。パラメーターに曲げ加工半径，ひずみ時効の影響を考慮した。曲げ加工半径は，実橋で用いられていた D16 鉄筋の JIS 規格値 2d を基準とし，より厳しい場合として 1d と 1.25d，規格を満たした場合として 2.5d を検討した。また，実損傷は，竣工後数十年過ぎて起きる事例もある。そこで，経年劣化を再現するために，電気炉を用いて 150 ，60 分の加熱処理を行い，ひずみ時効を促進させた。

試験概要として，曲げ加工やひずみ時効の影響による破断状況と破断強度を調べるため引張試験を行った。また，曲げ加工による鉄筋の損傷状況を調べるため亀裂の確認試験も実施した。さらに，遅れ破壊の懸念から，残留応力の有無について調べた。引張試験は試験機の関係上，図 - 3 のように 90° に曲げ加工した両端を 45° に加工した。亀裂の確認試験は図 - 4 に示すように，鉄筋を軸方向に 1/2 にカットし，断面を顕微鏡を用いて 50 倍に拡大して行った。引張試験は 1 ケースにつき 6 本，亀裂の確認試験は 1 ケースにつき 3 本行った。残留応力は 2d の曲げ加工を施した鉄筋について，曲げ加工部内側と外側において X 線回折法を用いて測定した。

4. 試験結果

4.1 引張試験結果

引張試験の結果を図 - 5 ， 6 ，表 - 4 ， 5 に示す。破断状況は降伏前などに脆性破断を起こすものと，最大荷重後に延性破断を起こすものがあった。図 - 5 ， 6 では延性破断を起こしたものは，降伏，最大，破断荷重にばらつきが見られないため，平均値を用いて白抜きで表記した。脆性破断を起こしたものは各データを黒塗りで表記した。表 - 5 では各ケースの破断位置を示している。脆性破断を起こしたものはすべて曲げ加工部で破断し，延性破断を起こしたものは直線部とチャック部で破断した。図 - 5 より曲げ加工半径が極端に小さい 1d では 6 本中 4 本，1.25d では 6 本中 1 本が最大荷重に至る前

表 - 3 検討ケース

試料No.	条件		試験	
	曲げ加工半径	ひずみ時効	ノッチの確認	引張試験
case1	1.00d	有り	3本	6本
case2	1.00d	無し	-	6本
case3	1.25d	有り	3本	6本
case4	2.00d	有り	3本	6本
case5	2.00d	無し	-	6本
case6	2.50d	有り	3本	6本

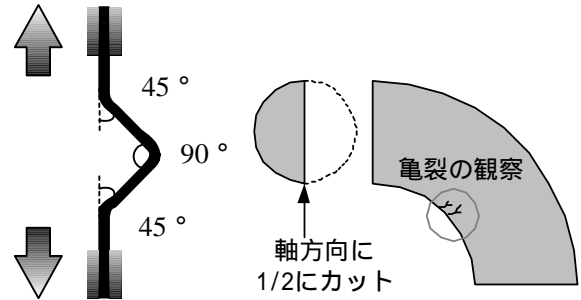


図 - 3 引張試験 図 - 4 亀裂の確認

概要図

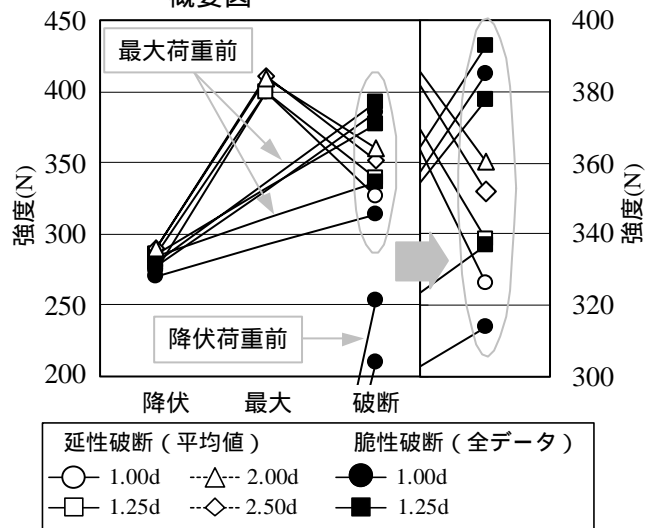


図 - 5 引張試験結果 (曲げ半径の影響)

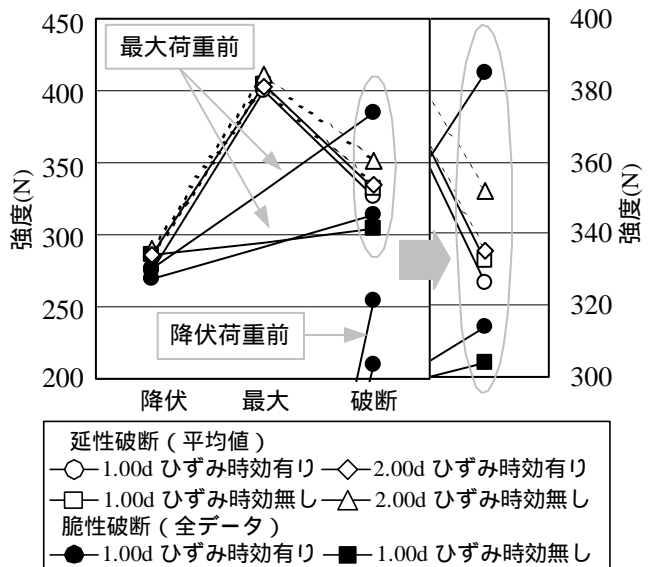


図 - 6 引張試験結果 (ひずみ時効の影響)

に曲げ加工部で破断に至った。その破断面を写真 - 1 に示す。絞りを生じず、脆性的な破断を起こしていた。一方、曲げ加工半径が大きい 2d や 2.5d の鉄筋は、写真 - 2 に示すような絞りを伴う延性破断を起こし、降伏、最大、破断荷重もばらつきの少ない結果となった。次に図 - 6 よりひずみ時効の影響に着目すると、曲げ半径 1d ではひずみ時効を与えた場合 6 本中 4 本、ひずみ時効無しの場合 6 本中 3 本が最大荷重に至る前に破断した。また、ひずみ時効有りで破断した供試体 4 本の内 2 本は降伏荷重前に破断した。これはひずみ時効により延性が低下し、同程度の変形を与えても鉄筋が伸びにくく、より脆性的な破断に至ったと考えられる。曲げ半径 2d の鉄筋は延性破断を起こし、各荷重とも違いは確認できなかった。

4.2 亀裂の確認試験

写真 - 3 に曲げ内側の亀裂の状況と、表 - 6 に亀裂深さを示す。曲げ外側には比較的微細な亀裂しか確認できなかったため、省略した。曲げ半径による違いに着目すると、亀裂深さは 1d の鉄筋では 0.04mm の亀裂が確認された。一方 2d の鉄筋は 0.01mm 程度の亀裂しか確認できなかった。よって曲げ半径が小さいほど深い亀裂が発生しやすいと考えられる。また、曲げ半径が小さいほど亀裂は多く確認された。

4.3 残留応力の測定

図 - 7 に残留応力の測定箇所と、表 - 7 に残留応力の測定結果を示す。測定は X 線回折法(日本材料学会 X 線応力測定法標準に基づく)で行い、測定結果の±以下は 1 (標準偏差の信頼限界値)を用いている。比較対象に D19 鉄筋の残留応力を測定した。測定結果より鉄筋径によら

ず残留応力が確認できた。特に、曲げ加工部内側は降伏応力に相当するような引張応力が確認された。引張力は、応力腐食割れや水素脆化などの遅れ破壊の要因となることから、曲げ加工部内側には遅れ破壊が起こることも懸念される。

表 - 4 破断状況

	1.00d	1.00d	1.25d	2.00d	2.00d	2.50d
ひずみ時効	有り	無し	有り	無し	無し	有り
脆性破断	4本	3本	1本	0本	0本	0本
延性破断	2本	3本	5本	6本	6本	6本

表 - 5 破断位置

試料No.	曲げ加工部	直線部	チャック部
case1	4本	-	2本
case2	3本	-	3本
case3	1本	-	5本
case4	-	2本	4本
case5	-	-	6本
case6	-	-	6本



写真 - 1 脆性破断面 写真 - 2 延性破断面

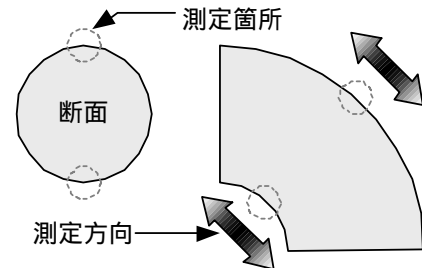


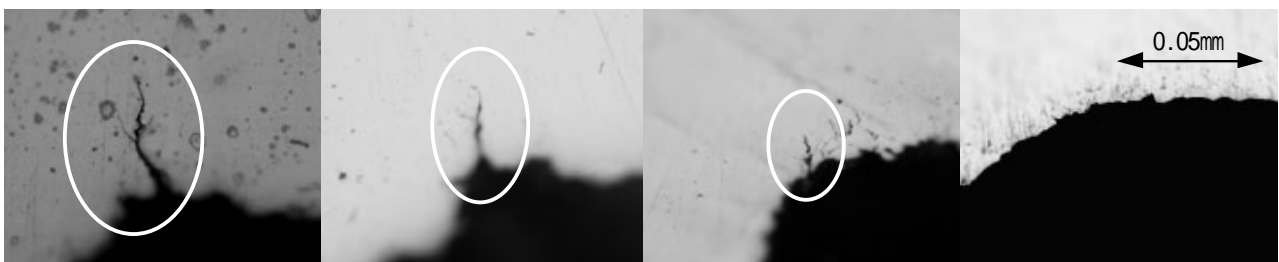
図 - 7 残留応力測定箇所

表 - 6 各曲げ半径での亀裂深さ

	1.00d	1.25d	2.00d	2.50d
ノッチ深さ(mm)	0.04	0.03	0.01	無し

表 - 7 残留応力測定結果

D10	外側	-233.2 ±28.4(N/mm)
	内側	438.8 ±40.8(N/mm)
D19	外側	-309.1 ±48.5(N/mm)
	内側	393.9 ±10.3(N/mm)



(a) 曲げ半径 1.00d (b) 曲げ半径 1.25d (c) 曲げ半径 2.00d (d) 曲げ半径 2.50d

写真 - 3 亀裂の発生

5. 解析概要

5.1 解析モデル

本解析には2次元弾塑性有限要素解析法を用いた。図-2で示した通り、張出し梁の1/4部分をモデル化し、着目断面は張出し長さの1/4の区間とした。図-8に解析モデル図を示す。鉄筋径は実橋においてD16を使用しているため、解析においても同様の径を選定した。また、荷重条件としては、全コンクリート要素に温度変化を与えて、一様に1500 μ まで膨張させた。支持条件としては、側面は水平方向を固定とし、下面は鉛直方向を固定とした。解析パラメータとしては曲げ加工半径に着目し、Case1 (JIS規格による最小曲げ加工半径で、実橋においても使用されている2)、Case2 (1.50)の2種類を選定した。

5.2 材料モデル

本解析は張出し梁断面をモデル化しているため、奥行き方向の変形が拘束されると考えられることから、コンクリートおよび鉄筋の要素特性には平面ひずみ要素を使用した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性としては表-8に示す値を用いた。実構造物では、部分的にのみクラックが発生していたことから、コンクリートと鉄筋は完全付着モデルとした。

コンクリートの降伏および破壊基準としては、圧縮側ではDrucker-Pragerを用い、引張側では最大主応力基準を用いた。コンクリートの応力-ひずみモデルを図-9に示す。圧縮域では圧縮破壊強度までを2次放物線とし、その後は応力一定のもとひずみのみが増加するモデルを採用し、引張域では引張強度に達した後、直線的に応力が減少する線形引張軟化モデルを用いた。

鉄筋の降伏判定にはVon-Misesを用い、応力-ひずみモデルは鉄筋降伏強度に達した後のひずみ硬化を考慮したトリリニアモデルを用いた。

6. 解析結果

6.1 Case1 (標準ケース, 曲げ加工半径2)

図-11に500 μ と1500 μ の膨張量を与えた

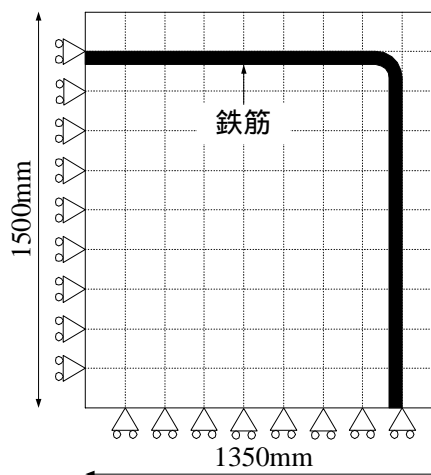


図-8 解析モデル

表-8 材料特性

	引張強度	圧縮強度	弾性係数
コンクリート	2.7	27	2.80E+04
鉄筋	440	440	2.10E+05

単位：N/mm²

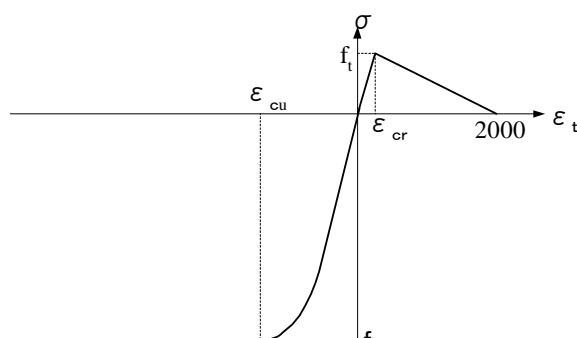


図-9 コンクリート応力-ひずみ

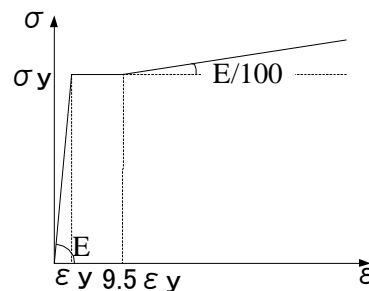


図-10 鉄筋応力-ひずみ

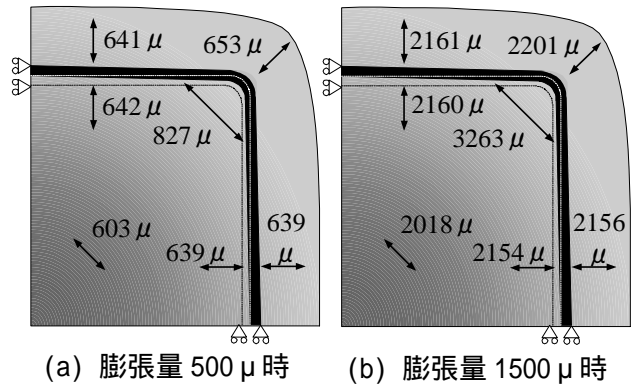
際の変形図およびコンクリートのひずみ量を示す。矩形の鉄筋は、加工部近傍のみ拘束されることから、鉄筋直線部が外側に押し出されるような挙動を示すため、曲げ加工部内側では斜め方向にひずみが生じたと考えられる¹⁾。曲げ加工部内側のひずみ量は、膨張量500 μ 時には直線部の1.3倍程度であるが、1500 μ 時には1.5倍程度に増加している。これは、鉄筋の拘束によ

り、初期のひずみ発生は小さいが、鉄筋の曲げ変形が進むにつれて、徐々に曲げ加工部内側コンクリートのひずみが進展したと考えられる。構造物内部のひずみは斜め方向に発生しているが、直線部に比べ小さい値（603 μ 、2018 μ ）となっている。これはモデルの左側と下側が固定であること、および鉄筋の拘束の影響であると考えられる。曲げ加工部外側においてもひずみ量が小さい（653 μ 、2201 μ ）が、これは曲げ加工部を中心とした曲げ変形が生じることにより、曲げ加工部付近の変形量が周辺に比べ小さいことが原因と考えられる。

図 - 12 に鉄筋のひずみ経過図を示す。曲げ加工部を中心とした曲げ変形が起こっているため、曲げ加工部内側である A において著しいひずみの進展が見られる。また、膨張量 1100 μ を境に傾きが急激に上昇しているが、これは膨張量 1200 μ 時に鉄筋要素に接しているコンクリートの最大主ひずみが 2000 μ に達し、コンクリートが応力を負担しなくなったため、鉄筋に応力が移行したことから、鉄筋のひずみ量が増加したと考えられる。

図 - 13 にクラックの発生箇所を示す。曲げ加工部外側のコンクリートにおいて、最大主ひずみは鉄筋形状に対して垂直方向に発生している。膨張量 300 μ 時に 6000 μ のひずみが発生していることから、鉄筋形状に沿ったクラックが発生すると考えられる。曲げ加工部外側に局所的に 6000 μ の最大主ひずみが発生した原因としては、図 - 14 に示しているように、曲げ加工部外側のコンクリートにおいて、ひずみが鉄筋形状に対して垂直方向に発生していること、および曲げ加工部において鉄筋が若干内側に入り込むような変形を起こすためと考えられる。

また、鉄筋の曲げ加工部と直線部の境目付近は鉄筋の曲げ変形の影響を受け、周辺に比べ大きなひずみ量が算出されており、膨張量が増加するに従って、ひずみ量も徐々に増加する傾向にある。ひずみは、鉄筋直線部では鉄筋に対して垂直に発生しているが、曲げ加工部近傍は鉄



(a) 膨張量 500 μ 時 (b) 膨張量 1500 μ 時
図 - 11 変形図 (Case1)

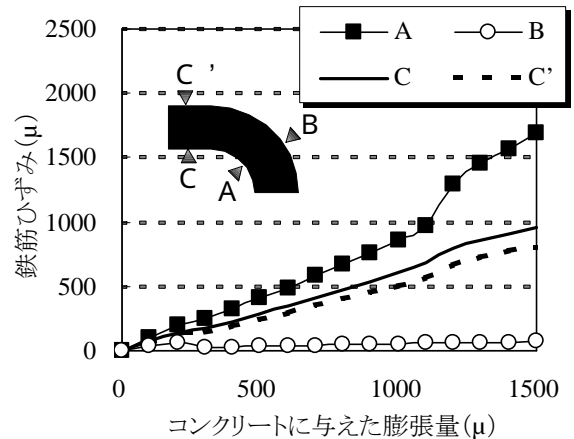


図 - 12 鉄筋のひずみ経過 (Case1)

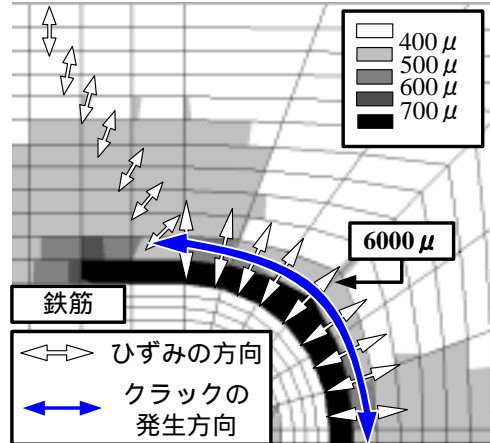


図 - 13 クラック発生箇所(膨張量 300 μ 時)

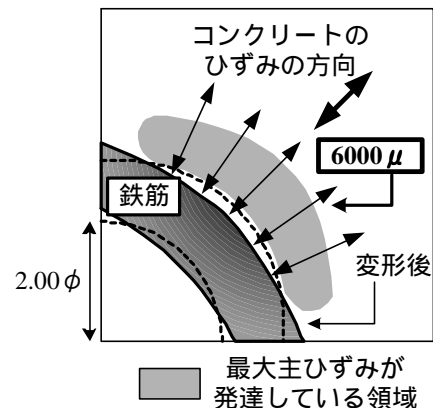


図 - 14 曲げ加工部における変形図

筋の曲げ変形の影響を受け、斜め方向に発生している。

図 - 15 に 500 μ の膨張を与えた際の曲げ加工部の最大主応力分布図を示す。曲げ加工部内側において 100N/mm² を超える応力が算出されており、曲げ加工部中心において応力が集中していることがわかる。鉄筋ひずみの分布は曲げ加工の内側から外側に向けて減少していることから、応力は図 - 15 に示すように曲げ加工部中心から 45°方向に進展すると考えられ、亀裂の進展は内側から外側に向けて起こると考えられる。

6.2 Case2 (曲げ加工半径の違い, 1.50)

図 - 16 に 500 μ の膨張量を与えた際の変形図とコンクリートのひずみ量, 図 - 17 に鉄筋のひずみ経過図を示す。曲げ加工部内側以外は Case1 とほぼ同じ挙動を示しており、ASR による膨張は曲げ加工部内側に集中すると考えられる。また、鉄筋ひずみの進展は Case1 に比べ若干早い傾向にあり、特に膨張量 1000 μ 以降のひずみの進展が著しいことから、曲げ加工半径が小さいほど、鉄筋は降伏しやすいと考えられる。

7. まとめ

- (1) 材料試験結果より、JIS の規格値である 2.00d より曲げ半径が小さいほど、曲げ加工部内側に大きな亀裂が数多く発生している可能性が高く、また亀裂がある場合はその部分に応力集中を起こし、遅れ破壊などの経年劣化の影響を受けやすいため、脆性的な破断を起こす危険性がある。
- (2) 曲げ加工することにより、曲げ加工部に大きな残留応力が発生することが X 線回折法を用いることにより確認された。
- (3) ASR による膨張が曲げ加工部に集中し、曲げ加工部を支点とした曲げ変形が起きるため、鉄筋曲げ加工部内側で大きな引張応力が発生すると考えられる。これは曲げ加工半径が小さいほど、顕著である。
- (4) (2)の結論より、曲げ加工部における材料特性が変わっている可能性があるが、本解析

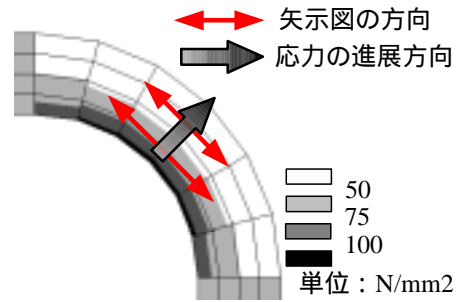


図 - 15 最大主応力分布図
(Case1, 膨張量 500 μ 時)

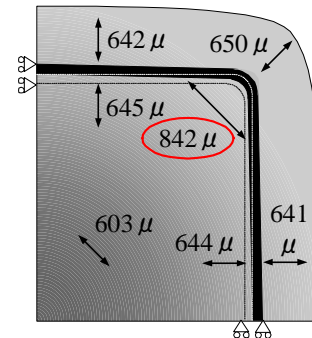


図 - 16 変形図 (Case2)

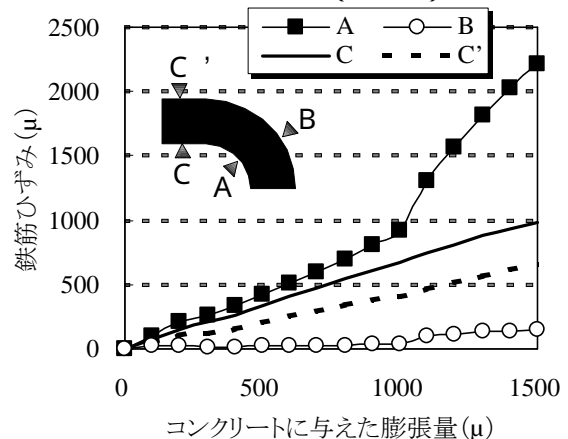


図 - 17 鉄筋ひずみ経過 (Case2)

は ASR 膨張による鉄筋の挙動を確認することを目的としたため、これらの考慮はしていない。しかし、残留応力と ASR 膨張による曲げ加工部における引張応力の集中、経年劣化等の影響により、曲げ加工部における鉄筋破断は起こると考えられる。

参考文献

- 1) M.J.N.Priestley 他: 橋梁の耐震設計と耐震補強, 技報堂出版株式会社, pp.139-140, 1998.4
- 2) 葛目和宏, 南敏和, 松本茂: ASR 構造物中の鉄筋損傷について, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 3 巻, pp.7-12, 2003.10