

論文 曲げ加工方法の相違による鉄筋の初期損傷評価

原口 政仁*1・幸左 賢二*2・上原 伸郎*3

要旨：鉄筋破断が生じた ASR 劣化構造物の竣工年を考慮し、当時実施された可能性がある曲げ加工方法を再現することで、加工に伴う節形状の変化と初期亀裂の発生状況について調査した。その結果、現在のローラー型曲げ加工方法以前に主流であったハンドル型加工方法では、節のめり込み量、初期亀裂ともに小さいことが確認された。一方、曲げ加工内側に設けた加工芯に鉄筋を当てることによって加工するローラー型曲げ加工方法では、鉄筋と加工芯との隙間が小さいほど同一の曲げ加工半径であっても節のめり込みが大きく生じ、めり込み量が大きいほど初期亀裂も大きく発生することが明らかとなった。

キーワード：ASR, 曲げ加工方法, 節形状, 鉄筋亀裂

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下、ASR)に起因する鉄筋曲げ加工部の破断現象については、ASRによる内部膨張圧に加えて、鉄筋の曲げ加工に伴う初期損傷が鉄筋破断に至る大きな要因の一つであることが明らかとなっている¹⁾。初期損傷を生じやすい鉄筋は、1985年に行われた JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」の改正以前に製造された鉄筋(以下、旧基準鉄筋)であり、具体的には、節形状が現在に比べて急峻であることから、曲げ加工時に節がめり込みやすく、初期亀裂が比較的大きく生じることが要因として考えられる。次に、曲げ加工方法に着目すると、曲げ加工半径が小さいほど節のめり込み量が大きくなり、初期亀裂は大きく発生することが明らかとなっている²⁾。ここで、鉄筋破断の確認された構造物は昭和40年代から50年代に竣工されたものが多く、当時の曲げ加工方法を考えると、主に現場内において、ハンドルを用いた曲げ加工(以下、ハンドル型)が行われるなど、現在とは異なる手法で加工された場合も考えられる。

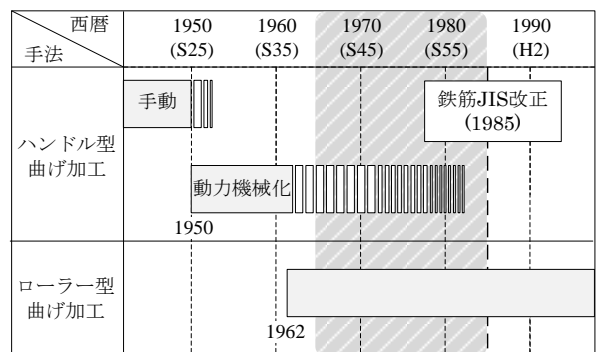
以上のことから、本研究では、ASR構造物で生じた鉄筋破断の要因として考えられる曲げ加工の影響について、ヒアリング等から再現した従前の方法と現在主流となっている方法で曲げ加工試験を行うことで、曲げ加工に伴う鉄筋の損傷評価を行った。

2. 曲げ加工方法とその特徴

2.1 加工方法の変遷

曲げ加工方法の変遷に関して、曲げ加工機製造メーカ、西日本圧接業協同組合、およびゼネコン OB へのヒアリング、ならびに普通鋼電炉工業会資料³⁾を基に取り纏めた概要を図-1に示す。なお、各曲げ加工の具体的な方法については3章において説明する。

1950年以前には、ハンドル型は手動による方法が主な加工方法であったが、1950年(昭和25年)に日本国内で初めて、手動部分を機械的な動力に置き換えたハンドル型機械曲げ機が販売された。ここで、簡単にハンドル型の原理を説明すると、鉄筋の曲げ加工部両端にあたる2点間を治具により固定し、これを折り曲げることで曲げ加工を行う方法である。その後、1962年に現在の曲げ加工機と同様に曲げ加工内側に加工芯を有するローラー型鉄筋曲げ機(以降、ローラー型)が開発され、現在ではこの手法が主流となっている。なお、図中の破線部分は、動力を機械化したハンドル型が併用されていたと想定される期間を示している。曲げ加工機の耐用年数は定かではないが、製造メーカへのヒアリングによれば、長い場合には約20年使用された場合もあったことから、ハンドル型曲げ加工機の併用期間を想定したものである。図-1より、鉄筋破断が生じた構造物の主な竣工年が1965年から1985年頃であることを勘案すれば、当該期間ではローラー型曲げ加工の他にハンドル型による曲げ加工も行われていた可能性が十分に考えられた。



斜線部分 : ASRによる鉄筋損傷構造物が竣工した年代

図-1 鉄筋の曲げ加工方法の変遷

*1 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (学生会員)

*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 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 (正会員)

2.2 鉄筋破断構造物における曲げ加工方法の推定

表-1 に既往の調査報告や文献、ヒアリング等から鉄筋破断が確認された構造物の中から、破断本数や破断状況、竣工年、使用鉄筋の形状等がデータとして入手できた9基の橋脚を示す。なお、節高と節変化量の計測方法は図-2 に示す。表-1 に示した橋脚で使用された鉄筋は、竣工年から判断して旧基準鉄筋が用いられており、現在の鉄筋と比較して、節高が高く節変化率が小さい形状を有している。道路橋示方書などで示されている規準値の2.00dを下回っていた。続いて、資料等の中に掲出されている鉄筋の写真を基に、節の変形状況などから、曲げ加工方法の推定を行った。なお、曲げ加工方法に伴う節形状の変化については、3章以降で詳細に説明する。観察の結果5橋脚(A, B, D, G, およびI橋脚)においてローラー型曲げ加工によると思われる形状変化を確認することができた。ただし、他の4橋脚については、鉄筋の形状変化を十分に確認できる資料に乏しいことから、曲げ加工方法の推定には至らず、これら4橋脚については、ハンドル型によって施工された可能性の否定できない結果となった。

3. ハンドル型による損傷状況

鉄筋の曲げ加工方法がローラー型に移行する以前に主流であったハンドル型について、加工に伴う損傷状況を調査した。今回使用した鉄筋のデータを表-2 に示す。なお、動力が機械化されたハンドル型についても原理は手動と同様であることから、手動による曲げ加工方法によって評価を行った。

3.1 曲げ加工方法

機械曲げ機の販売会社等からヒアリングした結果を基に、手曲げによる鉄筋の曲げ加工方法を再現した。なお、試験体は12本とした。図-3 に曲げ加工方法を示す。(a)に示すように、固定版上の4本のピンに鉄筋を固定し、ピンの端(A)から所定の距離(x)の位置(B)にハンドルを設置した。手曲げにおける曲げ加工半径は距離(x)を変えることで設定することができる。具体的には、距離(x)を大きくすると半径が大きくなり、小さくすると半径は小さくなる。今回使用した鉄筋はD16であることから、曲げ加工半径を1.50dにするために、距離(x)を曲げ加工部の内径と等しい37.7mm($16 \times 1.5 \times 2 \times \pi \div 4 = 37.7$)とした。次に、(b)に示すように、設置したハンドルを手動で図中の矢印の方向に動かすことで、鉄筋を90度に曲げ加工した。なお、ハンドル型の機械化は、(b)に示す作用を機械の動力に置き換えたものである。曲げ加工に伴う鉄筋の損傷状況を調査するために、曲げ加工部に着目して、形状の変化と亀裂発生状況について計測した。

表-1 ASR劣化構造物一覧

橋脚	竣工年	節形状	鉄筋径	曲げ加工半径(d)	節高(mm)	節変化率※	曲げ加工方法
A	1972	竹節	D16	1.58	1.15	0.075	ローラー型
B	1978	竹節	D13	1.57	1.00	0.094	ローラー型
C	1979	竹節	不明	—	—	—	不明
D	1979	竹節	D16	1.69	1.14	0.138	ローラー型
E	1979	竹節	D16	—	—	—	不明
F	1977	波節	D16	1.80	1.00	0.207	不明
G	1978	竹節	D16	1.70	1.10	0.091	ローラー型
H	1979	竹節	D16	—	1.22	0.080	不明
I	1985	竹節	D25	1.16	1.92	0.116	ローラー型

※：節変化率(節変化量mm)/鉄筋径(mm)

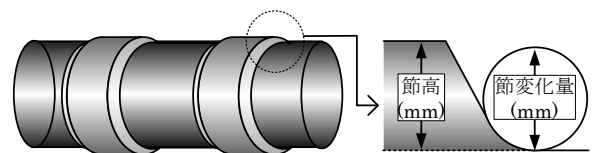
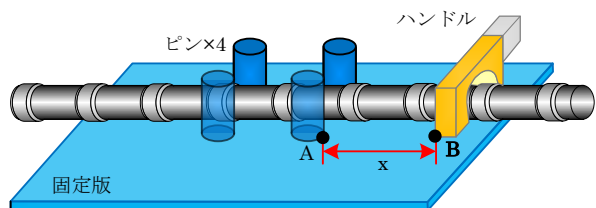


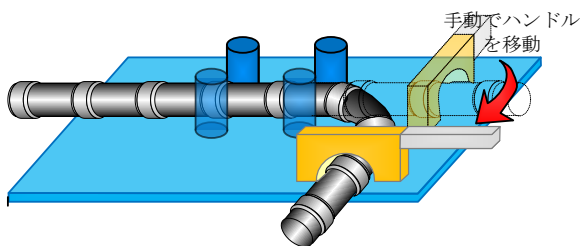
図-2 節高と節変化量の計測方法

表-2 使用する鉄筋

	使用年	節高(mm)	鉄筋径	節変化率	設定曲げ加工半径(d)
使用鉄筋	1969	1.00	D16	0.056	1.50d



(a) 鉄筋固定状況



(b) ハンドルの移動

図-3 ハンドル型による鉄筋曲げ加工方法

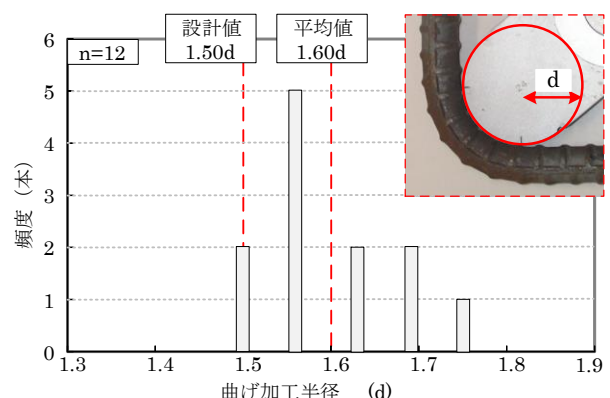


図-4 曲げ加工半径計測結果

3.2 計測結果

(1) 曲げ加工半径

図-4にRゲージを用いた曲げ加工半径の計測結果を示す。図より、計測値は1.50d~1.75dであり、平均値は1.60dとなった。今回計測された曲げ加工半径の最大値である1.75dから前述の距離(x)を算出すると、設定距離である37.7mmに対して6.2mm大きい43.9mmとなる。ここで、設定値に対する計測結果のばらつきについて説明する。距離(x)に差が生じた原因として、ハンドルは鉄筋径ごとにサイズを変えて使用するものであるがハンドルと鉄筋の間には約3mmのあそびが設けられており、誤差の要因として考えられる。また、ハンドルを設置する位置は施工者の目視判断であることから、数ミリのずれが生じることも予想される。これらのことから考えると、手曲げによる方法では場合によって曲げ加工半径に大きなばらつきが出る可能性が考えられる。

(2) 初期損傷状況

鉄筋の損傷状況を調査するために、曲げ加工部について節の変形と亀裂発生状況を計測した。図-5に初期損傷状況の計測方法を示す。曲げ加工部を切り出し、その部分を軸方向に1/2カットした後、カットした面を写真撮影して鉄筋形状をトレースする。次に、カットした試料の節周辺における亀裂発生状況について、顕微鏡(100~1000倍)を用いて観察した。なお、図中の番号1と2は鉄筋が固定版上のピンと当たる位置、番号4と5はハンドルを鉄筋に設置した位置である。また、節高の計測方法は、図中(a)に示すように、節付け根部分の両端である点ABを結んだ直線と節の頂点の距離(y)を節高とした。

図-6に初期亀裂発生状況を示す。なお、縦軸の亀裂率は亀裂深さを鉄筋径で除した値とした。図中の数値は各試験体で発生した最大亀裂率である。図より、亀裂率の最大値は試験体3の節5で計測された6.5%となり、各試験体の最大亀裂率の平均値は1.4%となった。ただし、1.0%より大きな亀裂は、節がピンと当たる位置(節番号1,2)とハンドルを設置する位置(節番号4,5)で発生しており、曲げ加工の中心位置(節番号3)で大きな亀裂は発生していなかった。

次に、図-7に最大亀裂が発生した試験体3の鉄筋形状のトレース結果を示す。なお、他の試験体でも同様の変形状況が確認されたことから試験体3を代表例として示した。ハンドルと当たる位置(節番号5)では、表-2で示した節高の初期値1.00mmに対して計測値は0.15mmとなっており、0.85mm節がめり込んだ状態であった。他の4つの節(節番号1~4)と比較すると、ハンドルを設置した位置では、極端に節がめり込むことが確認された。一方、曲げ加工中心位置(節番号3)では、節高0.97mmが計測され、節はほとんどめり込まないことが確認された。

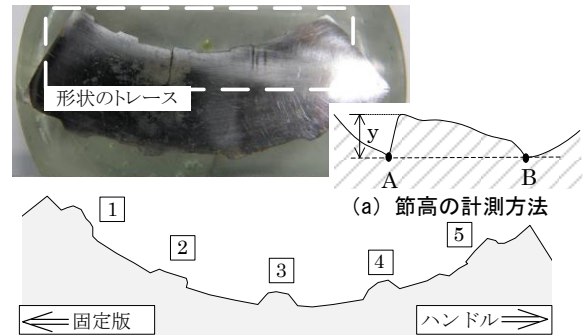


図-5 鉄筋の損傷状況調査方法

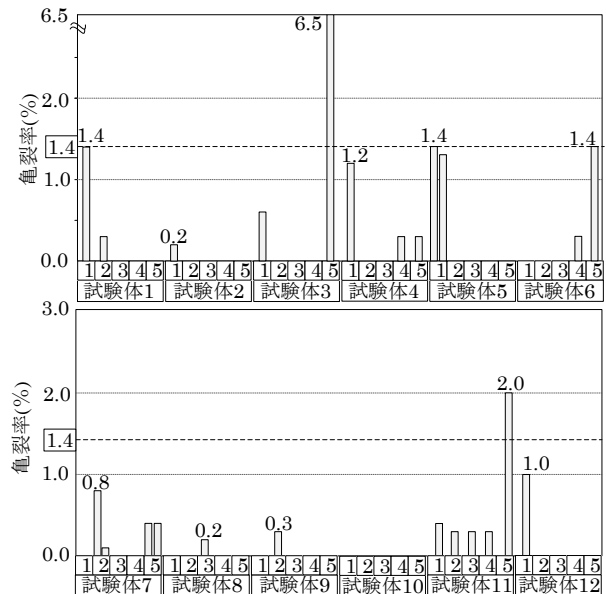


図-6 初期亀裂発生状況

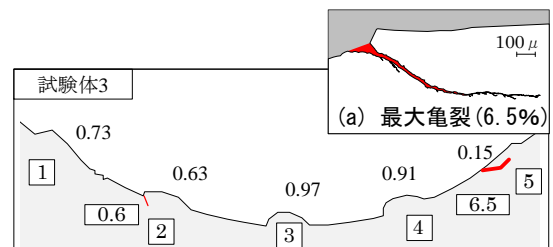


図-7 鉄筋形状と亀裂発生状況のトレース結果

次に、亀裂の発生状況について記述する。図-7(a)に示す。最大亀裂(亀裂率6.5%)の発生状況を観察した結果、節が剥がされるように亀裂が発生していることがわかる。図-3で示したように、ハンドル型ではハンドルの隅角部が1点で鉄筋に強い力を加えることになる。この接点において節がつぶされ、同時に剥離するような亀裂が発生したと推察される。ここで、実構造物からはつり出した破断鉄筋における破断面の角度を参考にすると、破断面は鉄筋に対して軸直角方向に生じている。このことから、今回のハンドル型で発生した最大亀裂は実構造物で確認されている鉄筋の亀裂と比較して、様相が異なるものであった。

4. ローラー型による初期損傷状況

現在、一般的に行われている鉄筋の曲げ加工方法であるローラー型曲げ加工方法について、曲げ加工に伴う初期損傷状況を調査した。

4.1 曲げ加工方法

図-8 にローラー型曲げ加工方法を示す。なお、評価に用いた鉄筋は表-2 に示したものである。図(a)に示すように、曲げ加工半径が $1.50d$ になる大きさに設定された加工芯(直径 48mm)を使い、横筋が加工芯に当たるように鉄筋をセットした。次に、図(b)に示すように、ローラーを機械式の動力によって矢印の方向に回転させることで、加工芯の円周に沿った曲げ加工を行った。図(a)の拡大図のように、本研究では、ローラーと鉄筋の隙間(A)をパラメータとし、隙間 3mm と隙間無し、ならびに隙間による差を明確に求めるため隙間 10mm を加えた 3 水準で試験を行った。なお、試験数は隙間ごとに 6 本とした。ここで、隙間(A)は作業性や機械に与える負荷を考慮し、一般的には 3mm 程度とすることがメーカーから推奨されている。しかしながら、施工者によって隙間の設定は異なることが考えられるほか、数種の鉄筋径に対応させるため、ローラーは可動式であることを考えると、設定値のずれや作業中の緩みも生じる可能性があるため、本研究では上記で示した 3 水準で試験を行った。

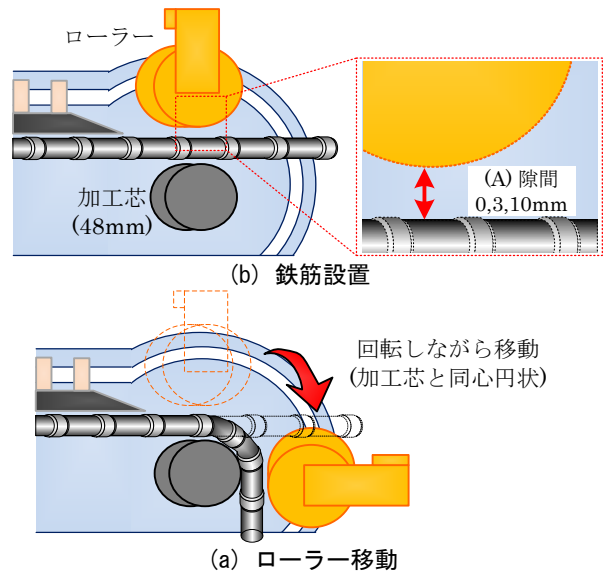


図-8 ローラー型曲げ加工方法

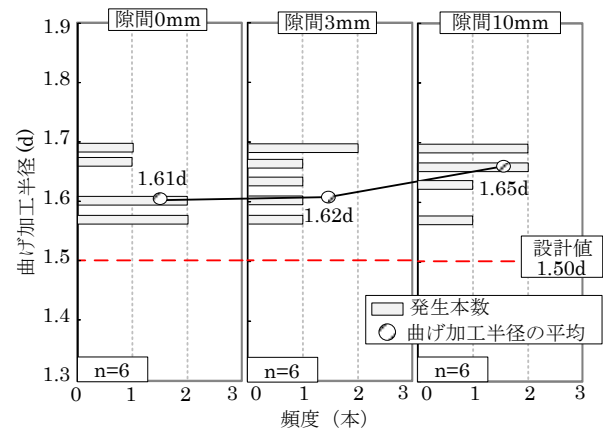


図-9 曲げ加工半径計測結果

4.2 計測結果

(1) 曲げ加工半径

図-9 に隙間の設定ごとに曲げ加工半径を計測した結果を示す。図より、隙間の大きさに関わらず、計測値は $1.57d \sim 1.69d$ となった。また、平均値は隙間 0mm で $1.61d$ 、隙間 3mm で $1.62d$ 、隙間 10mm で $1.65d$ となり、曲げ加工半径の平均値に差はほとんどみられなかった。ローラー型曲げ加工では、曲げ加工半径の大きさが鉄筋の曲げ加工部内側に当たる加工芯の大きさによって決まり、隙間の大小に関わらず、常に加工芯に沿った曲げ加工が行われたことから、ばらつきが小さくなったと考えられる。

(2) 初期損傷状況

3.2 章と同様に、曲げ加工した鉄筋の加工部を切り出し、亀裂発生状況と節の変形状況を調査した。図-10 に、亀裂率の計測結果を示す。図-6 と同様に、縦軸は亀裂率(亀裂深さ/鉄筋径; %)とし、各試験体の最大亀裂率を数値で示した。また、各試験体の 1~5 は節番号を示しており、節番号 3 が曲げ加工部中央の位置であり、両側に各 2ヶ所の計 5ヶ所の節を観察した。

図-10(a), (b), および(c)より、各試験体の最大亀裂は、隙間 10mm で 0.0%~1.1%、隙間 3mm で 0.0%~1.7%、隙間 0mm で 0.3%~3.3%となった。また、各 6本の試験体に発生した最大亀裂率をそれぞれ平均すると、隙間 10mm で 0.7%、隙間 3mm で 1.0%、隙間 0mm で 1.7%

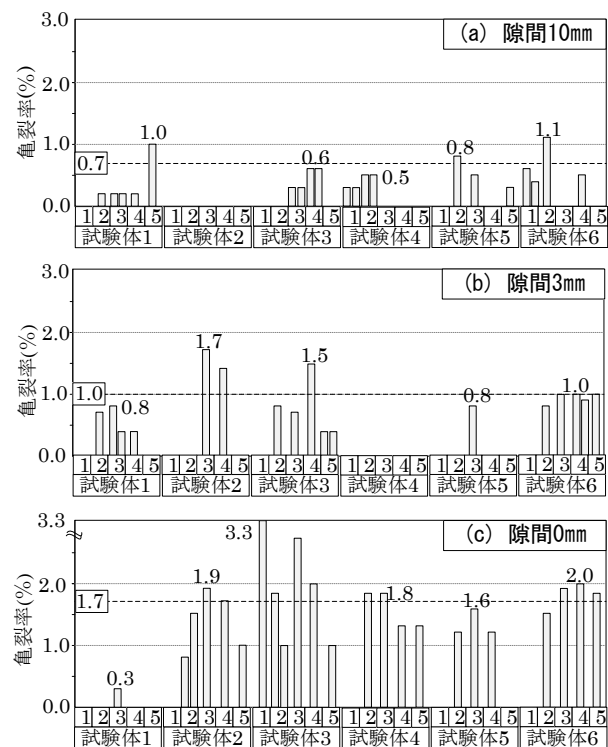


図-10 亀裂発生状況

となった。隙間ごとの亀裂率を比較すると、鉄筋とローラーの隙間が狭いほど亀裂率が大きくなっており、その傾向は、隙間 3mm と 10mm との差よりも、隙間 0mm と 3mm との差の方が顕著であった。また、各試験体で最大亀裂が発生した節の位置をみると、多くのは曲げ加工の中央付近（節番号 2, 3, 4）において発生していることが確認された。なお、図(b)に示す隙間 3mm の試験体 4 のように、全く亀裂が認められないものや、図(c)に示す隙間 0mm の試験体 1 のように、同水準の他の試験体と比べて亀裂が小さいものなど、計測結果に若干のばらつきも見受けられた。

続いて、図-11 に各隙間の設定において、最大の亀裂が発生した試験体各 1 本に隙間 0mm において他の 5 本とは異なり亀裂がほとんど見られなかった試験体 1 を加えた計 4 本の鉄筋形状をトレースした。なお、節の上に記載した数値は加工後の節高であり、節周辺で観察された亀裂の向きと亀裂率も併せて示した。

図(a)に示す隙間 10mm の試験体 6 では、4 個の節が観察断面に含まれており、節高の平均は 0.59mm となっていた。図(b)では、隙間 3mm の試験体 2 で 5 個の節高の平均が 0.48mm、同じく図(c)、および(d)では、隙間 0mm の試験体 3 で 0.19mm、試験体 1 で 0.30mm となっていた。以上より、隙間の大きさによって節のめり込み量は大きく異なっており、隙間 0mm では完全に節がめり込む(節高 0.00mm)など、隙間ごとのめり込み量の差は、隙間 0mm と 3mm の間で顕著になる傾向が認められた。

4.3 初期損傷の発生要因

(1) 隙間設定と節のめり込み量

隙間の違いとめり込み量の差に関して、ローラー型曲げ加工時における鉄筋とローラーの動きを模式図に示し、想定される要因について説明する。

図-12 に、ローラーと鉄筋の間の隙間を 0mm にした曲げ加工状況の模式図を示す。鉄筋とローラーは隙間無く接していることから、ローラーと加工芯との距離(AC)は鉄筋径とほぼ等しく、作用力は鉄筋軸に対してほぼ垂直に加わる。次いで、ローラーが矢印の方向に移動した際に、凸部となる横節はローラーと加工芯間の作用力が直接加わるため、大きく埋め込まれると考えられる。

図-13 に、ローラーと鉄筋の間に隙間を設けた場合の曲げ加工状況を示す。図(a)に示す通り、ローラーと鉄筋が接する位置は A' 点となる。ただし、鉄筋の曲げ加工は加工芯に依存することから、鉄筋の曲がり始める点は C' 点である。ここで、A' 点と加工芯の中心(O)を結んだ直線上には、鉄筋と加工芯の間に隙間(y)が生じることになる。続いて、図(b)に示すように、ローラーが移動していく際、図(a)で示した隙間(y)が維持された状態で鉄筋は曲げられる。この場合、鉄筋の曲がり点はローラーの移動位置

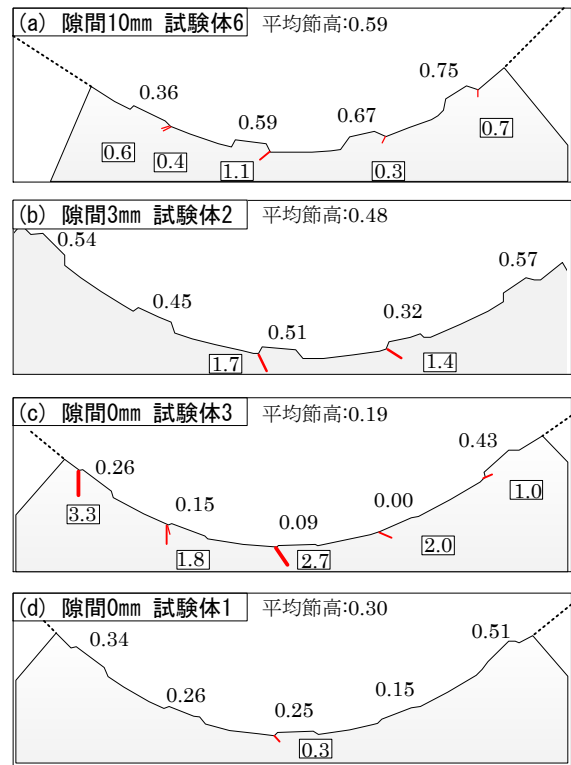


図-11 鉄筋形状トレース結果

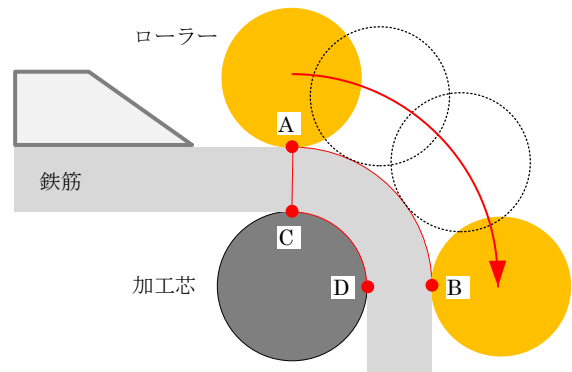
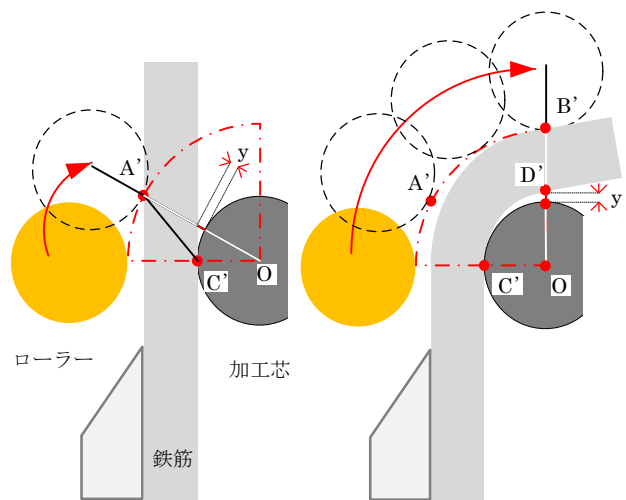


図-12 機械曲げに伴う鉄筋損傷状況(隙間 0mm)



(a) ローラーとの接点 (b) 鉄筋の変形状況

図-13 機械曲げに伴う鉄筋損傷状況(隙間有り)

より遅れるため、隙間(y)によって生じる空間の部分が応力を緩和する役割を果たしていると考えられる。なお、鉄筋とローラーの隙間(A)を0mmとした試験体1と3でめり込み量に差が生じたのも同様の要因と考えられる。すなわち、図-14に示すように、鉄筋設置時に横筋がローラーにあたる状態で鉄筋をセットした場合には、結果として節高(1.0mm)分の隙間が生じたことと同様であるため、節のめり込み量に差を生じたと考えられる。

(2) 節のめり込み量と初期亀裂率の関係

本項では、節のめり込み量と亀裂の関係について整理する。図-15に隙間0, 3, 10mmで計測を行った全ての節について、加工後の節高と発生した亀裂率をプロットした結果を示す。図より、隙間0mm, 3mm, および10mmの3水準でプロットの分布は異なっているものの、曲げ加工後の節高が小さくなり、節のめり込み量が大きくなると、初期亀裂率も大きくなる傾向が確認された。ここで、図-9で既示したように、鉄筋とローラーとの隙間の大小にかかわらず、図-15上のすべての点は、曲げ加工半径が1.57d~1.69dの範囲である。このことから考えると、同程度の半径で曲げ加工が行われた場合でも、例えば前項で示したような曲げ加工における設定の相違などによって節のめり込み量は異なる可能性があり、結果的にめり込み量が大きくなった鉄筋において、鉄筋損傷の危険性が高まることが考えられた。

5. まとめ

本研究では、ASRによる鉄筋損傷要因の1つである初期損傷に関し、曲げ加工方法の違いに着目した実験的検討を行った。現在一般的に実施されているローラー型曲げ加工方法とハンドル型曲げ加工方法について、曲げ加工に伴う節の変形性状、ならびに初期亀裂の状況を評価した結果、以下の知見が得られた。

- (1)ハンドル型曲げ加工方法では、曲げ加工半径の設定値1.50dに対して1.50d~1.75dとなり、ばらつきが大きくなった。曲げ加工部の損傷状況を調査した結果、中央では、節のめり込み量は総じて小さく、初期亀裂も生じにくいことが明らかとなった。次に、鉄筋を曲げる際に使用するハンドルが鉄筋に接する箇所では、亀裂率6.5%の大きな初期亀裂を示したが、初期亀裂の発生方向は実構造物で確認される鉄筋亀裂の方向とは異なるものであった。
- (2)現在一般的に行われているローラー型曲げ加工を行った結果、加工後の節高は、加工前の節高1.00mmに対して、隙間10mmで0.59mm、隙間3mmで0.48mm、隙間0mmでは0.19mmとなった。これより、曲げ加工に伴う節のめり込み量は鉄筋とローラーの間隔を変

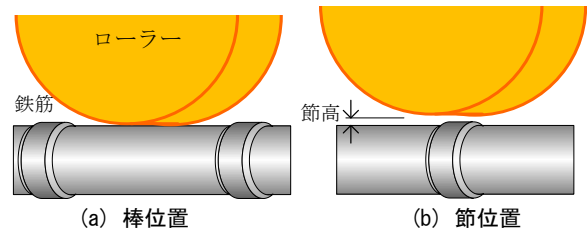


図-14 ローラーと鉄筋との接点

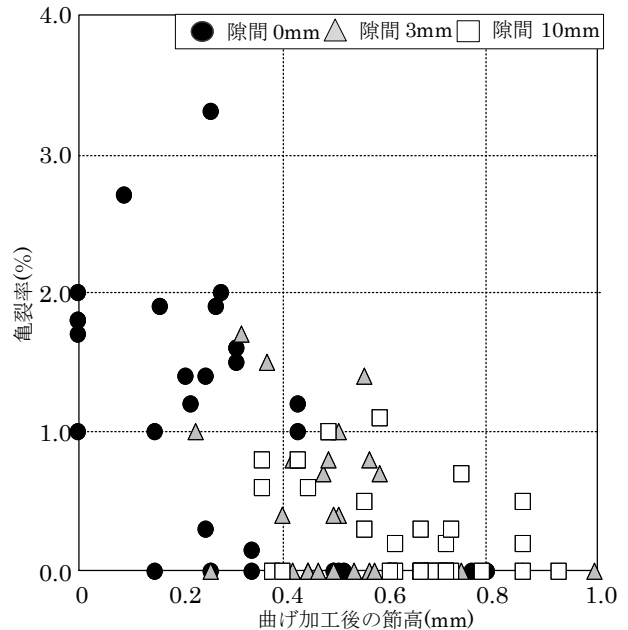


図-15 曲げ加工後の節高と亀裂量の関係

えることによって変化し、両者の隙間を小さくするほど、節のめり込み量が大きくなることを明らかとした。

(3)曲げ加工半径は、隙間の大小にかかわらず、1.57d~1.69dとなった。併せて、亀裂率と曲げ加工後の節高の関係を調査すると、節のめり込み量が大きくなると、初期亀裂率も大きくなる傾向が確認されたことから、同一の曲げ加工半径であっても、曲げ加工方法やその設定が変わることによって鉄筋の節のめり込み量とめり込みに伴う初期亀裂率が異なることを示唆した。

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－鉄筋破断と新たな対応－、コンクリートライブラリー、No.124、pp.I-32-65、2005
- 2) 幸左賢二、川島恭志、合田寛基、興昭展朗：ASR実構造物の鉄筋損傷に着目した調査・検討、構造工学論文集、Vol. 54A、pp. 723-730、2008.3
- 3) (社)日本鉄鋼連盟、普通鋼電炉工業会：電炉鉄筋棒鋼の研究、電炉鉄筋棒鋼研究委員会研究報告書、1987.3