

アルカリ骨材反応による鉄筋破断メカニズム推定のための材料試験

Material testing to presume mechanism of steel breaking by the alkali aggregate reaction

幸左賢二*, 川島恭志**, 眞野裕子***, 佐々木一則****

Kenji Kosa, Yasushi Kawashima, Yuko Shinno, Kazunori Sasaki

*正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

**正会員 中研コンサルタント関西支店 技術部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島7-1-55)

***学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

****正会員 阪神高速道路株式会社 技術管理室 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

The mechanism of breaking the steel bar at corner is reported. In this research, the material testing was done by using an old standard and a present steel bar. As a result, it has been understood that initial crack is generated by the bend processing, and the crack is progresses by giving tension for long term.

Key Words : alkali aggregate reaction, corner, initial crack

キーワード: アルカリ骨材反応, 曲げ加工部, 初期亀裂

1. はじめに

近年アルカリ骨材反応(日本において多く確認されているのはアルカリシリカ反応, 以下ASRと表記)等によるコンクリート構造物の劣化が問題となっている。

ASRはコンクリート中のアルカリと反応性骨材が化学反応を起こし、反応生成物が吸水膨張することにより、コンクリート内部に局所的な容積膨張を発生させる現象である。従来、ASRによる損傷は、コンクリートの体積膨張に伴う膨張圧によって発生するひび割れや、圧縮強度および静弾性係数の低下、ひび割れからの雨水の浸入

による鉄筋腐食などが問題視されてきたが、極端な耐力低下はないと考えられてきた。しかし、近年の調査により、ASR劣化構造物中において、鉄筋の曲げ加工部や圧接部が破断している事例が報告された¹⁾。鉄筋の降伏・亀裂・破断によって、耐荷性・耐震性が低下し、構造物が十分に機能しない可能性があることから、鉄筋破断は重大な損傷であると考えられ、現在破断メカニズムの解明が重要な課題となっている。

本研究では最も耐力低下に起因すると考えられる、ASRによる鉄筋曲げ加工部の破断に着目し、破断メカニズムの解明を目的としている。鉄筋破断の要因はASRによるコンクリートの膨張、鉄筋の材質、曲げ加工などの施工方法等が考えられるが、本研究では曲げ加工による初期亀裂に着目し、鉄筋の材質(成分、節形状)の違いによる破断への感受性についての検討を行った。

2. 本研究の流れ

ASRによるコンクリートの膨張により鉄筋には引張応力が発生していると考えられ、曲げ加工部に関しても同様に引張応力が作用していると考えられる。しかし、健全な鉄筋で引張試験を行った場合、破断面は絞りを伴った延性的な破断面となるのに対し、実際に破断した鉄筋の破断面は延性的ではなく、脆性的であることから、鉄筋にも破断に関わる要因があると推察され、鉄筋破断は複合的な要因によって発生していると考えられる。

図-1に本研究のフローを示す。本研究では、ASRによる鉄筋破断は「鉄筋」および「コンクリートの膨張」の2つの要因に分類し、実験を行った。材料に関する要因は鉄筋単体

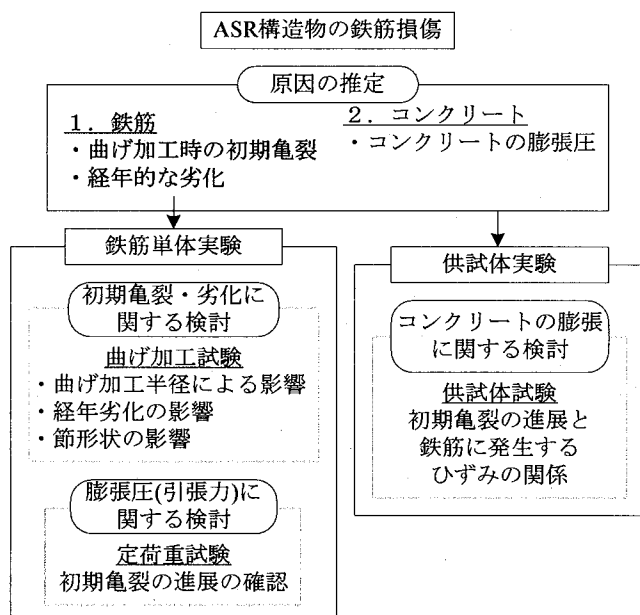


図-1 本研究のフロー図

の材料試験により検討を行い、さらに供試体実験でコンクリートの膨張を含めた検討を行った。本稿では鉄筋の材料試験について述べる。

材料試験においては、鉄筋の曲げ加工による影響を確認する試験（曲げ加工試験）とASRによる引張力を再現した定荷重試験の2種類を行った。

ASRにより劣化した構造物の鉄筋調査を行った結果、曲げ加工部において亀裂・破断が生じており、亀裂は曲げ加工部内側節付け根に発生していた²⁾。そこで、曲げ加工試験においては曲げ加工時に発生する曲げ加工部内側の亀裂の発生程度および破断への影響に関する実験を行った。パラメータは曲げ加工半径および経年劣化とし、さらに、竣工後30年以上経過している橋梁からはつり出した鉄筋も用いた。昭和60年代に異形鉄筋の節およびリブの付け根は、疲労強度の低下が懸念されたことから、緩やかな形状に変更され、応力集中しにくい形状に変更された^{3), 4)}。鉄筋破断が起こった構造物は竣工後30年近く経過しており、形状変化前の鉄筋を用いていると考えられるため、同時期の鉄筋を検討対象に加えた。

また、定荷重試験では、鉄筋に引張力を作用させることで、コンクリートの膨張圧により鉄筋に発生する引張応力を再現し、初期亀裂の進展に関する検討を行った。

3. 実験概要

3.1 曲げ加工試験概要

(1) パラメータ

検討ケースを表-1に示す。パラメータは曲げ加工半径とし、さらに現行鉄筋と竣工後30年経過した橋脚からはつり取ったD16鉄筋（以下、旧節形状鉄筋と称す）も検討対象に加えた。実際に破断した鉄筋はD16であったが、現行鉄筋においては一連の1/3スケールの供試体実験との関連から、D10鉄筋を用いて検討を行った。

実構造物で破断していたD16鉄筋の曲げ加工半径は1.8dであったが¹⁾、本検討ではD16のJIS規格値2.00dを基準とし、厳しい場合として1.00dと1.25d、規格を満たした場合として2.50dを検討した。また、旧節形状鉄筋は本数が限られていたため、曲げ加工半径は1.00dと2.00dの2ケースとした。

(2) 試験内容

① 曲げ加工部内側の亀裂の確認

本試験では、すべての鉄筋に対して90°の曲げ加工を施し検討した。曲げ加工による鉄筋の損傷状況を調べるため、全ての亀裂を測定対象として、亀裂の確認試験を実施した。曲げ加工部の内側の亀裂をマイクロスコープで撮影し、亀裂の開口幅および亀裂長さを測定した（図-2）。亀裂の開口幅は、1本の亀裂に対して亀裂のかみ合う部分の最大幅を測定して評価に用いた。マイクロスコープは3.0×4.5mmの範囲を45万画素で撮影できる精

表-1 試験ケース

鉄筋種類	パラメータ		試験	
	曲げ加工半径	ひずみ時効	亀裂の確認	引張試験
現行鉄筋 (D10)	1.00d	有, 無	3体	6体
	1.25d	有	3体	6体
	2.00d	有, 無	3体	6体
	2.50d	有	3体	6体
旧節形状鉄筋 (D16)	1.00d	—	6体	—
	2.00d	—	3体	—

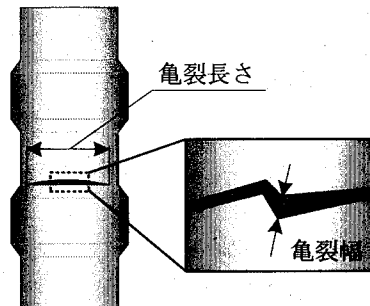


図-2 亀裂の測定

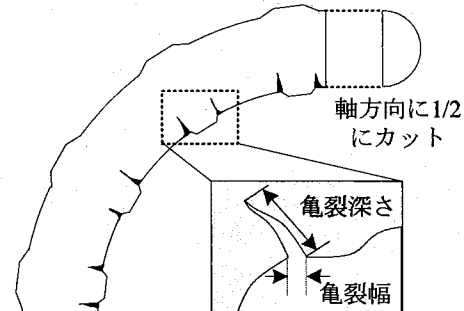


図-3 亀裂深さの測定

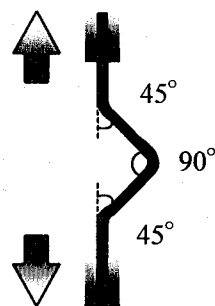


図-4 引張試験概要図

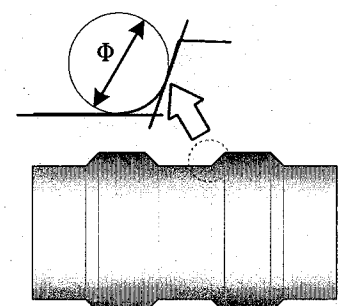


図-5 節形状の測定

度（0.01mm）のものを用いている。

その後、図-3に示すように、鉄筋を軸方向に1/2にカットし、顕微鏡を用いて50～200倍に拡大して断面を観察し、亀裂の深さを測定した。亀裂深さは亀裂の開口部分の中心から最奥部までの直線距離とした。

② 引張試験

現行鉄筋において、曲げ加工や経年劣化（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に、曲げ加工した鉄筋に対して引張試験を行った。ひずみ時効とは、鉄筋が加工後、時間の経過に伴い、引張強さは上昇、伸び率が低下し、鉄筋が脆くなる現象で、曲げ加工など強加工を受けた部分に生じると考えられる。引張試験は

試験機の関係上、図-4のように90°に曲げ加工した両端を45°に加工した。また、ひずみ時効は電気炉を用いて150℃、60分の加熱処理を行うことによって促進させた。

③ 成分分析

鉄筋に脆化を及ぼすP（リン）、S（硫黄）に関して、検討対象鉄筋とJIS規格を比較し、ひずみ時効に影響しやすいN（窒素）等の成分に関しても確認した。

④ 節形状の測定

曲げ加工部内側の亀裂は、節付け根に生じていることから、亀裂の発生要因として節形状が考えられる。よって、節付け根部分の曲率 ϕ を測定し評価した（図-5）。

3.2 定荷重試験概要

(1) パラメータ

定荷重試験のパラメータを表-2に示す。パラメータは、引張応力、腐食環境の再現とした。引張応力は、後述する引張試験結果において脆性破断となった鉄筋の破断強度の下限值（21kN）である0.8fy（fy：降伏応力375N/mm²）と0.6fyの2パターンとした。また、実際に破断した鉄筋において腐食が確認されたものもあったため、腐食環境を与えたパターンも検討した。本試験では、現行D10鉄筋を用い、曲げ加工半径はすべて1.00d、ひずみ時効はすべてのケースで考慮した。

(2) 試験体

定荷重試験においては一度90°に曲げ加工した鉄筋を再び直線になるように曲げ戻しを行い、図-6に示す実験装置に設置した。また、実構造物での破断は曲げ形状を保持しているため、実現現象の再現性は欠けるが、別途行っている供試体実験により曲げ加工の形状を保った状態での検討を行っている。試験体の両端にネジ切り加工を施した鉄筋を電気溶接し、溶接部分で腐食が進行しないように防食加工を施した。曲げ加工部（試験体の中心位置）が、溶接の熱によって遷移点を超える温度とならないようにするため、両端から10cm以上の余裕を設け、試験体を作成した。

また、腐食させた場合、試験体に腐食電流が発生すると考えられるため、装置に影響を与えないように、試験体と装置の間に絶縁体（アクリル製）を設置した。

(3) 試験内容

引張荷重は、図-6の装置に鉄筋を設置した後、上部のネジ切り部分のナットをスパナで締め上げながら設定荷重となるよう調整した。ただし、リラクセーションの影響により荷重が低下するので、その場合には常に一定となるように調節を繰り返し、誤差5%以内に収まるようにした。腐食環境は、曲げ加工部が腐食しないように配慮し、5.2%程度の濃度の塩水を脱脂綿に湿らせ、曲げ加工部より5cm下部の10cm区間に湿布することで再現

表-2 定荷重試験パラメータ

	曲げ加工半径	ひずみ時効	設定引張荷重	腐食環境
case1	1.00d	有	16.8kN(0.6fy)	有
case2	1.00d	有	21.4kN(0.8fy)	有
case3	1.00d	有	21.4kN(0.8fy)	無

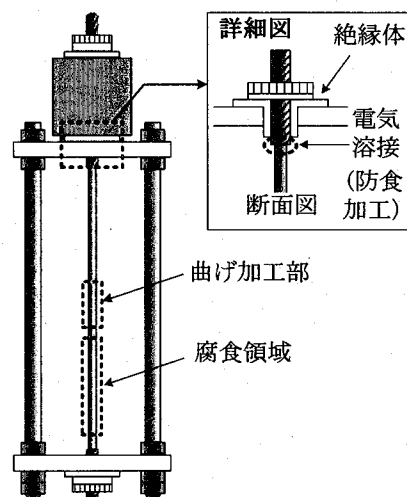


図-6 定荷重試験装置

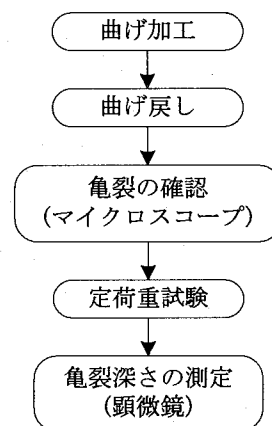


図-7 定荷重試験検討フロー

した。また、鉄筋の初期亀裂はマイクロスコープを用いて観察した。マイクロスコープによる亀裂の観察項目は、亀裂幅と亀裂長さとし、初期値を測定後、0.5～1.5ヶ月毎に載荷期間10ヶ月まで観察を実施した。

期間10ヶ月を経過した鉄筋は、荷重を除荷して装置からはずし、鉄筋を軸方向に1/2にカットし、顕微鏡で100～200倍に拡大して断面を観察し、亀裂深さを測定した。

4. 試験結果および考察

4.1 現行鉄筋の試験結果

(1) 曲げ加工時に発生する亀裂の測定結果

写真-1に曲げ加工部内側の亀裂の状況と、表-3に亀裂深さを示す。

亀裂はいずれも節付け根に発生しており、各試験体に

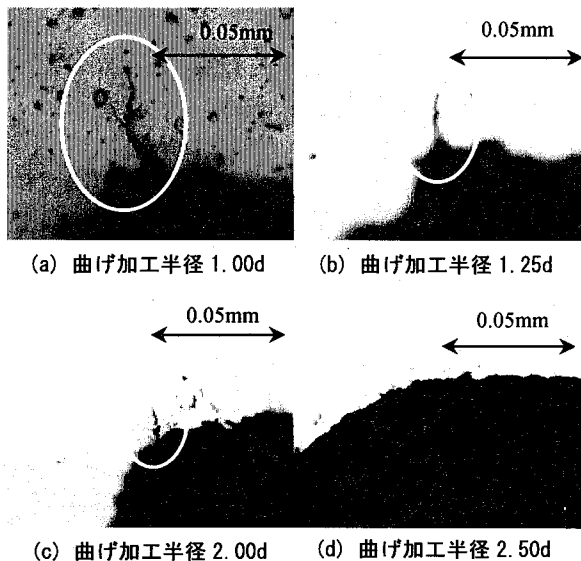


写真-1 最大亀裂（現行鉄筋）

において最大亀裂は曲げ加工部の中央で確認できた。

亀裂深さに着目すると、曲げ加工半径1.00dの鉄筋では最大で0.041mmの亀裂が確認されたが、曲げ加工半径2.00dでは0.01mm程度の亀裂が1本のみ確認でき、曲げ加工半径2.50dでは確認できなかった。よって、曲げ加工半径が小さいほど大きい亀裂が発生しやすいと考えられる。

亀裂の発生個数に着目すると、曲げ加工半径1.00dの場合平均で1本あたり2.7本、曲げ加工半径1.25dの場合1本あたり2.0本発生しているが、JIS規格の曲げ加工半径2.00d以上ではほとんど確認できなかった。よって、曲げ加工半径が小さいほど亀裂は多く発生すると考えられる。

(2) 引張試験結果

引張試験の結果を図-8、9、表-4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-8、9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全データを黒塗りで表記した。

図-8より、ひずみ時効の影響に着目すると、曲げ加工半径1.00d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試験体4本のうち2本は降伏前に破断した。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、より低荷重で破断したためと考えられる。曲げ加工半径2.00dの鉄筋は各荷重とも違いは確認できなかった。

次に図-9ではひずみ時効有りの条件で検討を行っている。図-9より、曲げ加工半径に着目すると、曲げ加工半径が極端に小さい1.00d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に破断に至った。一方、曲げ加工半径が大きい2.00dや2.50dの鉄筋は、降伏、最大、破断荷重もばらつきのない結果となった。

表-3 亀裂深さ

曲げ加工半径	鉄筋 No.	亀裂深さ(mm)				亀裂個数	個数	平均亀裂発生個数
1.00d	No.1	0.014	—	—	—	1	8	2.7
	No.2	0.041	0.010	0.011	—	3		
	No.3	0.015	0.012	0.015	0.016	4		
1.25d	No.1	0.014	0.012	0.012	0.011	4	6	2.0
	No.2	0.026	0.009	—	—	2		
	No.3	—	—	—	—	0		
2.00d	No.1	0.012	—	—	—	1	1	0.3
	No.2	—	—	—	—	0		
	No.3	—	—	—	—	0		

：各曲げ加工半径の最大値

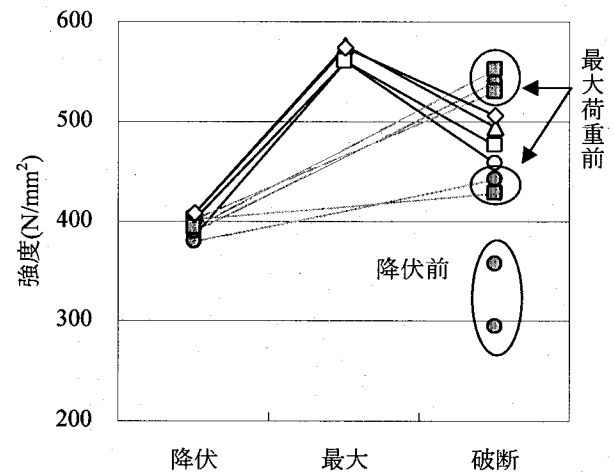
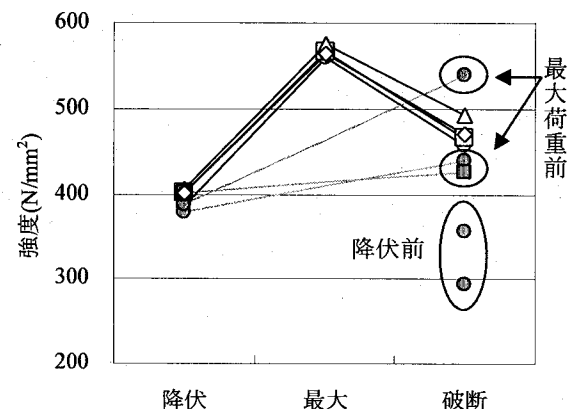


図-8 引張試験結果（ひずみ時効の影響）



延性破断（平均値）		脆性破断（全データ）	
○	1.00d	●	1.00d
△	2.00d	■	1.25d
□	1.25d	◆	2.50d

全データ：ひずみ時効有り

図-9 引張試験結果（曲げ加工半径の影響）

表-4 破断状況

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

写真-2, 3に破断状況を、表-5に各ケースの破断位置を示す。最大荷重前に破断したものはすべて曲げ加工部で破断しており、写真-2に示すような絞りのない、脆性的な破断となった。一方、最大荷重後に破断したものは曲げ加工部以外の箇所破断しており、写真-3に示すような絞りを伴う延性破断を起こした。なお、全ての鉄筋において、曲げ加工部が直線形状になった後で破断した。

後述するが、検討に用いた鉄筋の機械的性質は、延性破断を起こした鉄筋とほぼ同等の値を示している（表-7）。曲げ加工時に曲げ加工部内側に大きな亀裂が発生していない曲げ加工半径2.00d以上の鉄筋では、曲げ加工部以外で延性破断を起こしており、破断荷重の低下は見られない。一方、脆性破断した鉄筋は曲げ加工部で破断したことから、写真-1で示した曲げ加工部内側に発生した亀裂が起点となって低荷重で破断したと考えられる。また、実構造物においても、曲げ加工半径2.0d以下で破断した例が報告されていることから、曲げ加工半径が破断の一要因であると考えられる。

4.2 現行鉄筋と旧節形状鉄筋の比較

(1) 節形状の測定

写真-4, 5に現行鉄筋と旧節形状鉄筋の節形状を、表-6に節寸法の測定結果を示す。3つの節に対して測定し、表-6はその平均値を示している。

表-6より、節の変化位置の曲率は現行鉄筋が4.2mmであるのに対し、旧節形状鉄筋が1.1mmとほぼ4倍の差がある。急激な形状変化部では応力集中が起き、その結果節付け根部に亀裂が発生すると考えられるため、旧節形状鉄筋は亀裂の発生しやすい形状であったと考えられる³⁾。

(2) 成分分析

表-7, 8に検討に用いた現行鉄筋と旧節形状鉄筋の機械的性質および化学成分と豊福らの調査結果³⁾を示す。豊福らの調査は昭和62～63年にかけて実施されており、節形状は変化した後の調査である。

表-7より、検討に用いた旧節形状鉄筋、現行鉄筋ともに降伏荷重、引張強さ、伸びに関して、JIS規格値を満足していることから、十分強度を有する鉄筋と言える。

また、表-8より、鉄筋に脆化を及ぼすP（リン）およびS（硫黄）はJIS規格を満たしていることがわかる。ひずみ時効に影響しやすいN（窒素）も現行鉄筋とほぼ同程度であり、成分分析の結果、旧節形状鉄筋の品質に異常はなかったと言える。



破断箇所：曲げ加工部 破断箇所：曲げ加工部以外
写真-2 脆性破断面 写真-3 延性破断面

表-5 破断位置

曲げ加工半径	1.00d	1.25d	2.00d	2.50d
ひずみ時効	有り	無し	有り	有り
曲げ加工部	4本	3本	1本	—
曲げ加工部以外	2本	3本	5本	6本

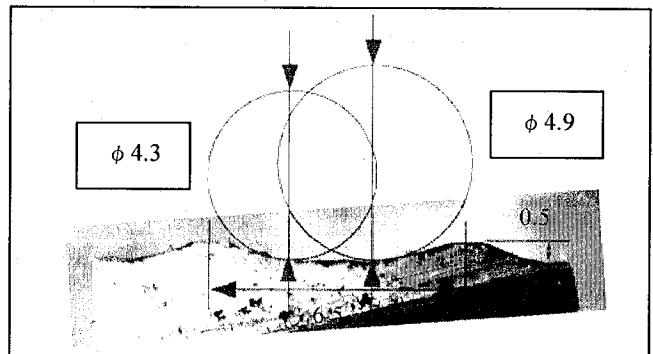


写真-4 現行鉄筋 (D10) の節形状

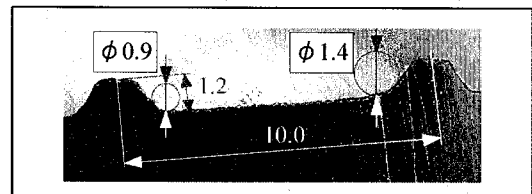


写真-5 旧節形状鉄筋 (D16) の節形状

表-6 節寸法の測定結果

節形状	径	節の平均間隔	節の平均高さ	節変化位置の平均曲率
旧節形状鉄筋	D16	10.1mm	1.12mm	1.1mm
現行鉄筋	D10	6.5mm	0.51mm	4.2mm
許容限度	D10	6.7mm(最大)	0.4～0.8mm	—
	D16	11.1mm(最大)	0.7～1.4mm	—

表-7 検討対象鉄筋と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(%)
旧節形状鉄筋	345	508	30
現行鉄筋	352～380	515～550	23～29
豊福らの調査 ³⁾	375	567	24
JIS規格	295以上	440～600	16以上

表-8 検討対象鉄筋とJISの比較 (化学成分)

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	N	P	S
旧節形状鉄筋	0.25	0.18	0.77	0.19	0.13	0.17	0.02	0.014	0.0092	0.018	0.03
現行鉄筋	0.23	0.1	0.59	0.35	0.07	0.22	0.01	<0.001	0.013	0.037	0.042
豊福らの調査 ³⁾	0.259	0.188	0.909	0.313	0.087	0.144	—	—	0.011	0.0289	0.0322
JIS規格	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<0.05	<0.05

(3) 亀裂の発生状況

図-10 に鉄筋の曲げ加工部の各節に発生した亀裂の最大亀裂幅と亀裂長さの関係を示す。

図-10より、旧節形状鉄筋・現行鉄筋ともに亀裂長さ・亀裂幅にばらつきが見られるが、現行鉄筋より旧節形状鉄筋の方が大きい亀裂が発生していることがわかる。また、平均亀裂長さを円周で除したものに着目すると、鉄筋径は異なっているが、両鉄筋とも亀裂長さが円周に占める割合は2割程度であることから、亀裂長さは鉄筋径に対して、ほぼ一定の割合で発生すると考えられる。

次に、写真-6 に各曲げ加工半径における最大の亀裂写真を、図-11 に亀裂深さと亀裂幅の関係について示す。この際旧節形状鉄筋は、図-10 において亀裂幅が大きく、亀裂の発生個数も多かった鉄筋 6 本に対して検討した。

まず、亀裂深さに着目すると、現行鉄筋は曲げ加工半径 1.00d, 2.00d とともに 0.1mm 以下であり、旧節形状鉄筋と比較すると微小であった。図-11 の現行鉄筋の凡例口 ■ が原点付近に集中していることからその差が明確である。両鉄筋とも曲げ加工半径 1.00d の方が大きな亀裂が発生しており、曲げ加工半径が等しい場合は、旧節形状鉄筋は現行鉄筋に比べ、平均で 10 倍以上の亀裂深さを示している。また、最大亀裂深さに着目すると、曲げ加工半径 1.00d の場合、初期亀裂の深さは、旧節形状鉄筋は鉄筋直径の 4% (0.633mm)、現行鉄筋は鉄筋直径の 0.4% (0.041mm) となっており、旧節形状鉄筋の方が損傷度が高いと言える。よって、節形状の違いにより、亀裂深さが大きくなると考えられるが、鉄筋径も異なるため、その影響も考えられる。

亀裂の発生個数は、現行鉄筋では曲げ加工半径が小さいほど発生個数が多い結果が得られたが、旧節形状鉄筋では曲げ加工半径 1.00d の場合 4.0 本、2.00d の場合 3.3 本となっており、大きな差異は見られない。

また、図-11 より、多くの亀裂は亀裂幅が 0.2mm 以下であり、亀裂幅に対して亀裂深さが大きくなっているが、亀裂幅と亀裂深さが同程度の亀裂も確認できる (図-11 の点線で囲っている部分)。これらの亀裂は曲げ加工部の中心位置ではなく、曲げ加工部の端部に発生していた (図-12 の点線で囲っている位置)。これは、曲げ機の引張力によって、亀裂幅が広がったと考えられる。しかし、このような亀裂が発生した鉄筋は少なく、曲げ機とのかみ合いによって、まれに発生すると考えられる。

4.3 定荷重試験結果

(1) 亀裂の進展度

表-9には、曲げ戻し直後と10ヶ月後における鉄筋の曲げ加工部内側をマイクロスコープで観察し、確認できた亀裂の本数、最大亀裂開口幅および最大亀裂箇所の亀裂長さをそれぞれ示す。最大亀裂開口幅はいずれの鉄筋においても曲げ加工部の中央位置であった。

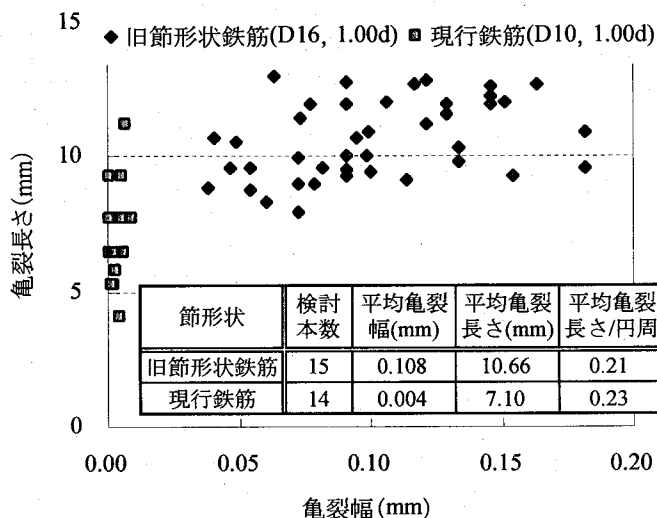
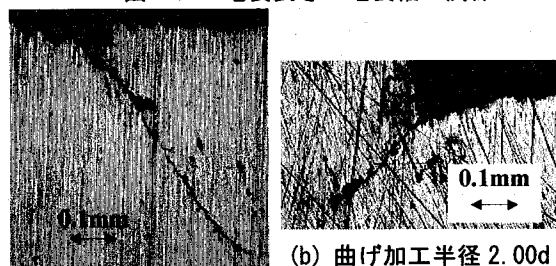


図-10 亀裂長さ－亀裂幅の関係



(a) 曲げ加工半径 1.00d

写真-6 最大亀裂 (旧節形状鉄筋)

記号	節形状	曲げ加工半径	平均亀裂深さ(mm)	最大亀裂深さ(mm)	平均亀裂発生個数
○	旧節形状鉄筋	1.00d	0.254	0.633	4.0
●		2.00d	0.193	0.270	3.3
□	現行鉄筋	1.00d	0.017	0.041	2.7
■		2.00d	0.012	0.012	0.3

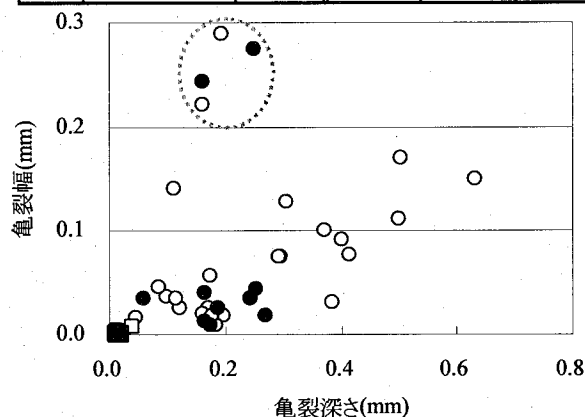


図-11 亀裂深さ－亀裂幅関係図

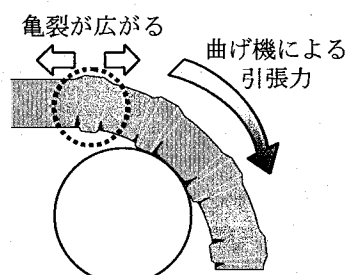


図-12 亀裂幅の拡大模式図

表-9 初期亀裂観察結果

	亀裂本数 (本)	初期亀裂		10ヶ月後	
		最大 亀裂幅 (mm)	亀裂 長さ (mm)	最大 亀裂幅 (mm)	亀裂 長さ (mm)
case1	5	0.009	7.75	0.063	8.85
case2	4	0.009	7.75	0.092	8.56
case3	2	0.006	6.44	0.065	7.48

図-13に亀裂長さおよび亀裂開口幅の経時変化を示す。亀裂開口幅はマイクロスコープで確認できた最大のものを示し、亀裂長さは亀裂開口幅が最大の箇所の亀裂長さを示している。図より、case1～3の全ての鉄筋において亀裂開口幅および亀裂長さの進展が確認できるが、亀裂開口幅は最大で10倍まで拡大しているのに対し、亀裂長さは最大で1.2倍程度であった。亀裂長さは载荷前にすでにリブの付け根付近まで達しており、その後はリブの拘束により進展が小さくなったと考えられる。

(2) 亀裂深さの観察結果

期間10ヶ月を経過した鉄筋切断面の最大亀裂幅測定結果を表-10に示す。また鉄筋の1/2カット面の代表的な顕微鏡画像を写真-7, 8に示す。写真-7と写真-8(a) (b)にはそれぞれcase1とcase2の亀裂状況を示す。case1の亀裂は、曲げ加工直後の亀裂状況(写真-1(a))と比較して亀裂の入口付近の幅が大きく開いており、曲げ戻しと持続荷重の影響を受けて深さ・幅ともに進展が認められるものの、幅の進展の影響が大きい状態であった。

一方、case2の亀裂は、入口付近はcase1と同様に大きく開いた状態であるが、この大きな亀裂の最奥部にかなり細かい亀裂が確認された。この微細な亀裂は、载荷荷重が0.6fyの鉄筋では1本も確認されていないが、0.8fyのcase2では4本中2本、case3では2本中1本と半数に認められた。

(3) 設定荷重の影響

鉄筋断面の顕微鏡観察の結果において、初期亀裂が進展したと考えられる幅の大きいものを一次亀裂(写真-8(a))とし、その奥に確認された微細な亀裂を二次亀裂(写真-8(b))と位置づける。期間10ヶ月における各亀裂深さを図-14に示す。設定荷重以外は同条件のcase1とcase2を比較すると、荷重が大きくなると、同じcase内における各一次亀裂の進展度合いの差が大きくなる傾向が見受けられた。すなわち、载荷荷重が増加すると全亀裂の亀裂深さが均等に進展するのではなく、特定の何本かに集中することによって二次亀裂の発生につながるということが明らかになった。設定荷重が0.6fyのcase1では、case2と同様に一次亀裂の最大値と最小値に差が生じているものの、亀裂深さ0.2～0.3mmを超える一次亀裂が生じていないことと、荷重がやや低いレベルのために二次亀裂を発生させる段階まで到達しなかったと考えられる。

さらに、初期亀裂発生時点からの亀裂深さの進展程度

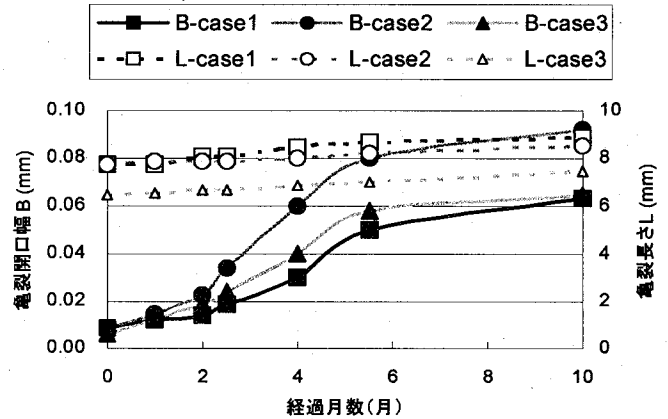


図-13 亀裂開口幅、亀裂長さの経時変化



写真-7 case1 亀裂画像

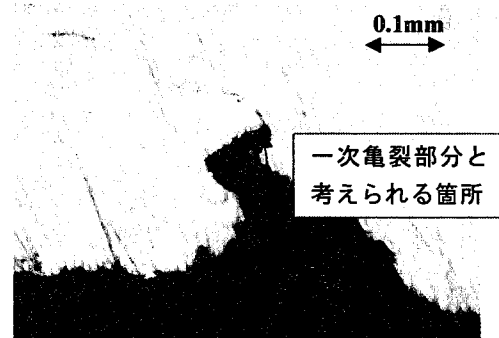


写真-8(a) case2 亀裂画像



写真-8(b) case2 亀裂画像拡大

を確認する。定荷重試験開始時における初期亀裂深さは、同じ曲げ加工半径(1.00d)で実施した曲げ加工試験直後の測定値と同様であると考えられる。曲げ加工試験時の初期亀裂深さは、平均で0.017mmである。この初期亀裂平均深さと定荷重試験の期間10ヶ月における一次亀裂および二次亀裂の平均深さの関係を表-11に示す。一次亀裂の平均深さは初期亀裂深さに対して、case1で6.7倍、case2で9.9倍であり、設定荷重が降伏応力に近づくほど大きくなることが確認できた。また、一次亀裂および二次亀裂を足し合わせると、最大で20倍の進展が見られた。

(4) 腐食環境の影響

本実験では、鉄筋の曲げ加工部のやや下に塩水湿布による腐食領域を設けた試験体とそうでないものと2ケース検討した。同荷重(0.8fy)で腐食をパラメータとしたcase2, 3を比較すると、腐食有りのcase2の方が亀裂深さが著しく大きい傾向が認められた。また、case1(0.6fy, 腐食有り)とcase3(0.8fy, 腐食無し)を比較すると、同程度の亀裂深さであること、case3の方に二次亀裂が発生していることから、亀裂の進展は腐食ではなく、引張力に大きく依存していると推測できる。

(5) 亀裂の進展機構

以上より、曲げ加工時の初期亀裂が同程度であっても、曲げ加工部が受ける引張応力の違いにより亀裂の進展形態が変化し、ASRによる膨張圧がある限界値を超えた場合、亀裂の進展深さも急激に大きくなると推察される。さらに、ASRにより鉄筋に発生する引張ひずみは降伏ひずみを超えていたとの実験報告⁶⁾もあることから、今後は降伏応力を超える領域での検討が必要と考えられる。

鉄筋の曲げ加工部内側の亀裂進展機構は、初期亀裂表面側ほど幅が大きく広がる状況で進展し、引張応力が大きくなると初期亀裂の最奥部に新たな微細亀裂が発生すると考えられる。

5. まとめ

今回、鉄筋材料試験を行うことにより、以下に示す結論を得た。

- (1) 現行鉄筋において、曲げ加工半径が小さいほど、大きな初期亀裂が多く発生することを確認した。曲げ加工半径1.00dの場合、6本中2本が降伏荷重前に破断したことから、初期亀裂がある場合、破断への感受性が高くなっていると考えられる。
- (2) 径が異なるものの、曲げ加工半径1.00dの場合、平均亀裂深さが旧節形状鉄筋は0.254mmであるのに対し、現行鉄筋は0.017mmと、10倍以上の差があったことから、節付け根の曲率が小さいほど、亀裂深さが大きくなると考えられる。
- (3) 定荷重試験の亀裂の進展観察結果より、曲げ戻しを行った後、降伏応力に近い引張力が作用する場合、亀裂の最奥部に二次亀裂が発生し、試験期間10ヶ月で亀裂深さが最大で20倍進展することを確認した。
- (4) (2)より、旧節形状鉄筋の初期亀裂が大きいこと、(3)より、降伏応力に近い荷重が作用している場合、初期亀裂が大きく進展することがわかった。また(1)より、初期亀裂の入った鉄筋は破断の感受性が高くなっていることから、例えば昭和60年以前の旧節形状鉄筋で曲げ加工半径が2.00dより小さく、ASRによる膨張が過大で鉄筋にかかる応力が降伏応力に近い場合、破断への感受性がさらに高まると考えられる。

表-10 鉄筋切断面の亀裂深さ測定結果

設定荷重	腐食環境	亀裂No.	亀裂深さ(mm)	一次亀裂深さ(mm)	二次亀裂深さ(mm)	亀裂個数
case1	0.6fy	有	No.1	0.150	0.150	5
			No.2	0.175	0.175	
			No.3	0.087	0.087	
			No.4	0.101	0.101	
			No.5	0.060	0.060	
case2	0.8fy	有	No.1	0.375	0.203	4
			No.2	0.060	0.060	
			No.3	0.600	0.364	
			No.4	0.045	0.045	
case3	0.8fy	無	No.1	0.224	0.178	2
			No.2	0.070	0.070	

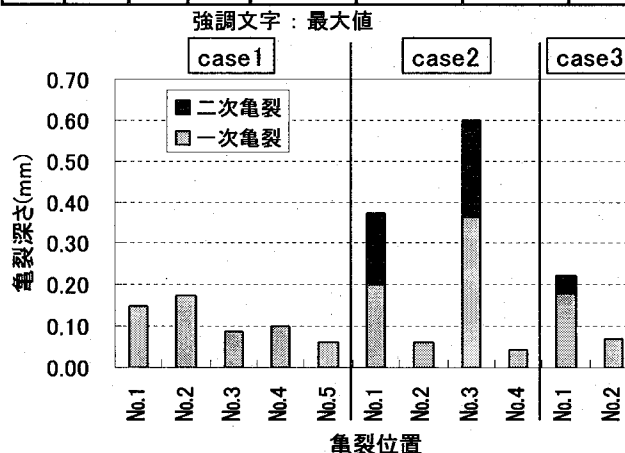


図-14 期間10ヶ月における各亀裂深さ

表-11 初期亀裂深さと一次・二次亀裂の関係

	① 一次亀裂 平均深さ (mm)	①/③	② 二次亀裂 平均深さ (mm)	②/③	③ 初期亀裂 平均深さ (mm)
case1	0.114	6.7	—	—	0.017
case2	0.168	9.9	0.204	12.0	
case3	0.124	7.3	0.046	2.7	

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、124, pp. I-2- I-77, 2005
- 2) 熊澤美早, 西岡敬治, 岩永巧, 佐々木一則：アルカリ骨材反応による鉄筋損傷の原因究明に関する調査報告, 土木学会第59回年次学術講演会pp.35-36, 平成16年9月
- 3) 豊福俊泰, 吉岡博幸：セメントおよび電炉鉄筋の品質実態調査, セメント・コンクリートNo.513, Nov.1989
- 4) 社団法人日本鉄鋼連盟, 普通鋼電炉工業会：電炉鉄筋棒鋼の研究, 昭和62年3月
- 5) 佐々木一則, 熊澤美早, 五十嵐弘行：アルカリ骨材反応による鉄筋損傷の原因究明に関する検討報告, 土木学会第60回年次学術講演会pp.31-32, 平成17年9月
- 6) 鳥居和之, 池富修, 久保善司, 川村満紀：ASR膨張によるコンクリート構造物の鉄筋損傷の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.595-600, 2001.6

(2005年9月10日受付)