

複数の鉄筋破断が生じたASR劣化構造物の特性分析

九州工業大学
九州工業大学 正会員 Ph.D. 幸左 賢二
住友大阪セメント(株) 上原 伸郎
富山県 博(工) 大代 武志

Abstract : By investigating the structure with breaking of several reinforcing bars due to ASR deterioration, it was found that there was no crack even around several broken rebars. Among the evaluated rebars, some had the lug shape easily to suffer initial damage due to flexural works, while the flexural work radius of all 88 taken-out rebar were smaller than $2.00d$. Thus, it was the initial crack, due to rebar shape and flexural work, that caused this damage. Besides, assessment suggested that breaking was possible at both positions that rebar easily or difficultly to break.

Key words : ASR, Structure, Breaking of reinforcing bars

1. はじめに

近年の調査では、アルカリシリカ反応(以下ASRと表記)による劣化が著しい構造物において、内部で20本以上の鉄筋が破断する現象が確認されている。現在までに、鉄筋が破断する原因については、鉄筋形状と曲げ加工時に起因して発生する初期亀裂に依存することが明らかとなっているが、複数の鉄筋が破断するような著しい損傷を十分には説明できていない。

そこで、本研究では、ASR劣化により複数の鉄筋が破断した橋脚を調査対象として、内部の鉄筋損傷と外観ひび割れの関係性、損傷鉄筋の分布の規則性について分析した。

また、対象橋脚から実配筋された鉄筋をはつり出し、節形状と亀裂発生位置の関係性を整理するとともに、曲げ加工方法と節の変形に着目して考察を加えた。

2. 実構造物の損傷状況

2. 1 実構造物の諸元

本研究では、複数の連続的な鉄筋破断が生じた北陸地区のD橋梁の橋脚梁部を検討対象とした。D橋は、昭和47年に完成した鋼下路式単純ワーレントラス橋で、橋脚は張出式小判型RC橋脚6基である(図-1)。平成元年にその躯体全面にひび割れが顕在化したため、エポキシ樹脂によるひび割れ注入および表面被覆による補修が行われた。この補修により4基は健全性を保持しているが、掛違い部があるP2およびP4橋脚では、補修後約5年が経過した頃から、ひび割れが表面被覆上に顕在化するなど、再劣化の進行が確認された。詳細調査により、複数箇所連続的な鉄筋破断が確認されたことから、P2橋脚は平成16年に、P4橋脚は平成17年に橋脚梁部の打換えが行われた¹⁾。また、その後の調査でP6橋脚においても鉄筋破断が確認され、平成18年に橋脚梁部の打換えが行われた。

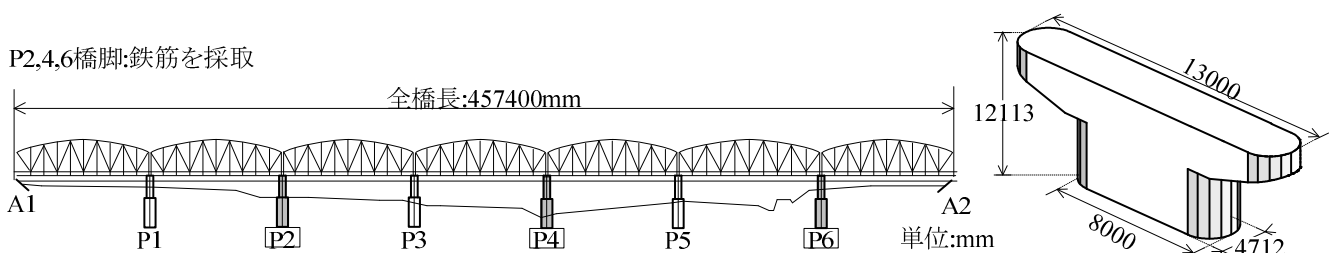


図-1 対象橋梁図

2. 2 対象橋梁の損傷状況概要

D 橋梁の P2 橋脚で、平成元年と平成 16 年に確認されたひび割れ観察結果を併せて図-2 に示す。図より、水平、鉛直方向共に顕著なひび割れが観察され、幅 0.2mm 以上を対象としたひび割れ密度は、平成元年時で 2.57m/m^2 、補修後 15 年経過時（平成 16 年）の調査では、表面被覆上からではあるが、 2.11m/m^2 のひび割れ密度が算出された。また、平成 13 年に行われたデンマーク法による促進膨張量試験では、0.4%に満たないものの不明確(0.19%, 0.26%)の判定がなされていることなどを勘案すると、D 橋では、補修後も ASR による劣化が進展していたと考えられる。

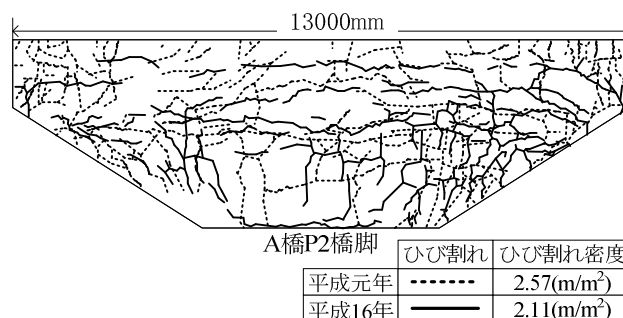


図-2 ひび割れ損傷状況

2. 3 破断鉄筋発生状況

図-3 に P4 橋脚隅角部の鉄筋損傷状況を示す。図中の丸プロットは、P4 梁部からはつり出した鉄筋の目視観察による結果を基に区分しており、破断が確認された鉄筋を破断鉄筋、亀裂が確認された鉄筋を亀裂鉄筋、亀裂が確認出来なかった鉄筋を健全鉄筋としている。図に示すように、梁上部では、調査本数 128 本に対し、破断鉄筋の合計本数が 24 本、亀裂鉄筋の本数が 26 本であり、全体の 4 割の鉄筋で損傷を生じていた。損傷状況の特徴として、単独で損傷を生じている箇所は 14 箇所、連続で 2 本以上損傷している箇所は 12 箇所を確認された。

以上のことから、P4 橋脚における鉄筋損傷を 2 つのパターンに分類した。1 つは、図-3(a)に示すように、破断鉄筋周辺の連続した鉄筋に破断や亀裂が進展しているケース（以後、複数損傷）、もう 1 つは、図-3(b)に示すように、破断や亀裂が生じた鉄筋の隣に配筋された鉄筋が損傷していないケース（以後、単数損傷）である。

3. 損傷鉄筋の分布

図-4 に P2, 4, 6 橋脚の隅角部 TU に配筋された 44 本の鉄筋を対象に、目視観察によって鉄筋の損傷状況を調査した結果を示す。破断鉄筋の本数は、P2 で 10 本、P4 で 10 本、P6 では 11 本であった。図より、全ての橋脚で単数損傷と複数損傷の 2 つの損傷パターンが確認された。ここで、各隅角部の

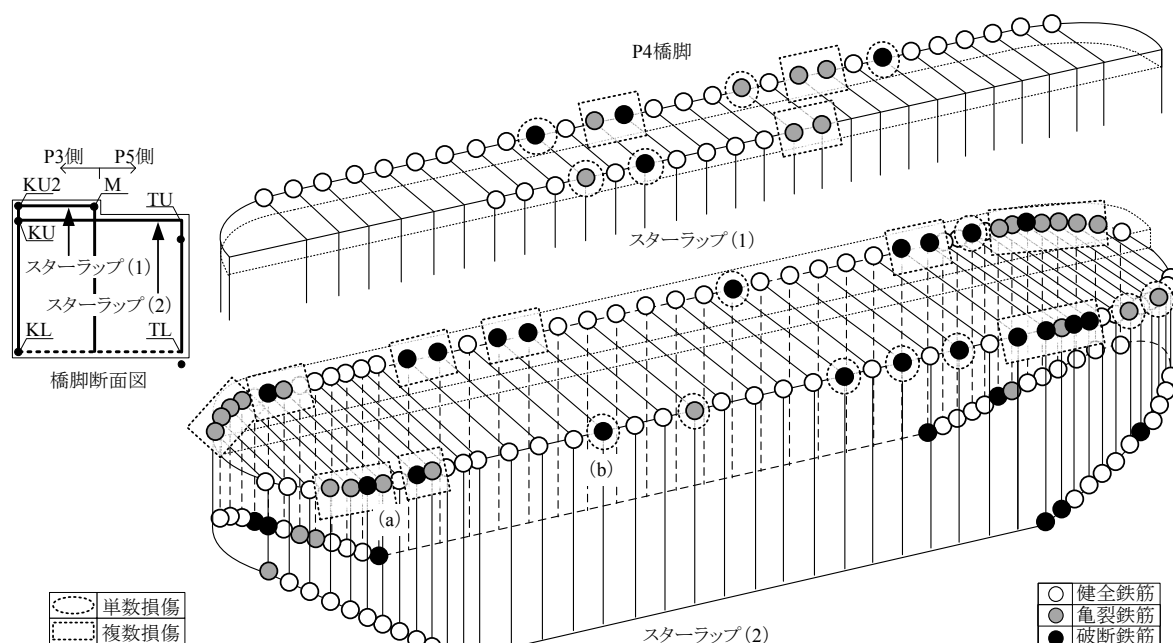


図-3 隅角部の鉄筋損傷状況

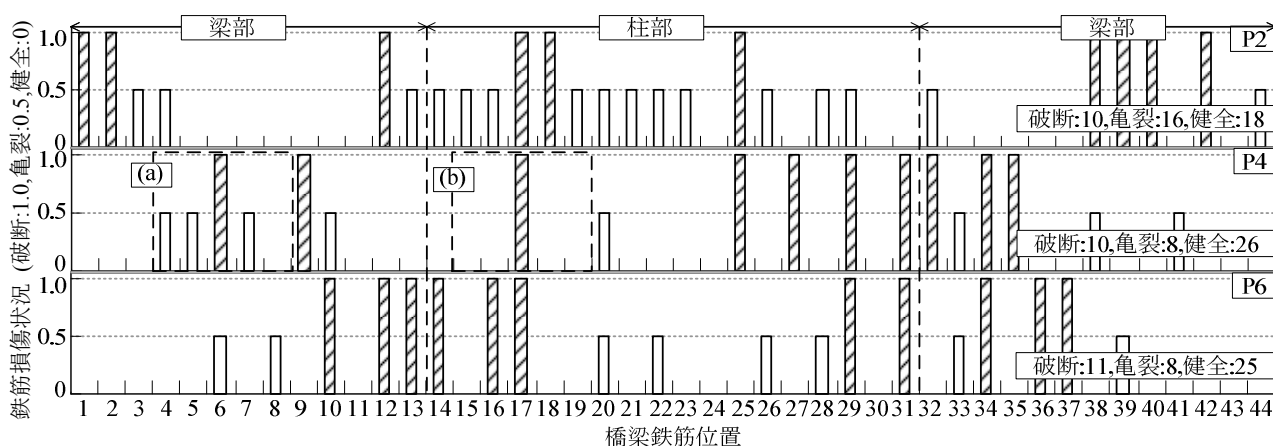


図-4 鉄筋損傷状況

損傷度を比較するために、健全鉄筋を 0.0、亀裂鉄筋を 0.5、破断鉄筋を 1.0 と数値化し、隅角部の損傷度を算出した。調査の対象とした P2, 4, 6 橋脚 TU 隅角部の損傷度は、P2 で 0.41, P4 で 0.38, P6 では 0.33 となり、同程度の損傷度であった。破断位置についても、支承反力が集中する梁部などで特定の位置に鉄筋破断が集中するような傾向は認められなかった。

3. 1 損傷鉄筋と外観ひび割れ特性

図-5 に P4 橋脚梁側面のひび割れ損傷状況を示す。なお、図中(a), (b)は、鉄筋損傷度の相違する 2 箇所を代表例として拡大図で示している。

図に示すように、梁側面中央部では、水平方向のひび割れが卓越しており、そのひび割れ密度は 2.71m^2 となっていた。一方で、隅角部拡大箇所(a), (b)の範囲では、それぞれ 1.93 , 1.78m^2 が算出され、損傷鉄筋近傍でひび割れ密度が大きくなるような傾向は認められなかった。また、損傷度が異なる(a)と(b)のひび割れ密度は同程度である。次いで、ひび割れの幅が特に大きいものに着目すると、梁上部隅角部の 1 箇所、梁下縁隅角部の 2 箇所において幅 10mm 以上が確認されている。上部で幅の大きなひび割れは、図中拡大箇所(b)と合致していることから、内部の鉄筋損傷が著しい場合は、コンクリート表面に特徴的な幅を有するひび割れが生じる場合があると考えられる。

3. 2 破断鉄筋周辺の鉄筋損傷分布

既往の研究²⁾では、鉄筋が破断した場合、破断箇所周辺の鉄筋が拘束力を受け持つこととなり、劣化が進むにつれて破断鉄筋の両隣から亀裂が徐々に進展し、最終的には破断に至ると推察している。この場合、破断鉄筋を基点として損傷鉄筋が規則的な分布を示すと考えられる。したがって以降では、

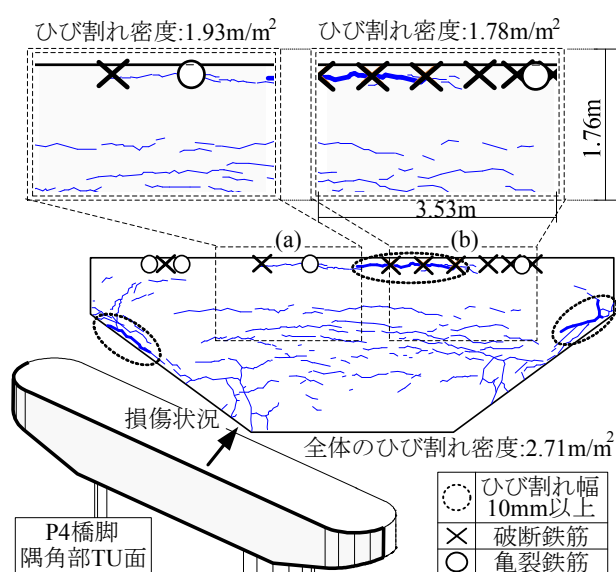


図-5 ひび割れ状況と鉄筋損傷状況の比較 (P4)

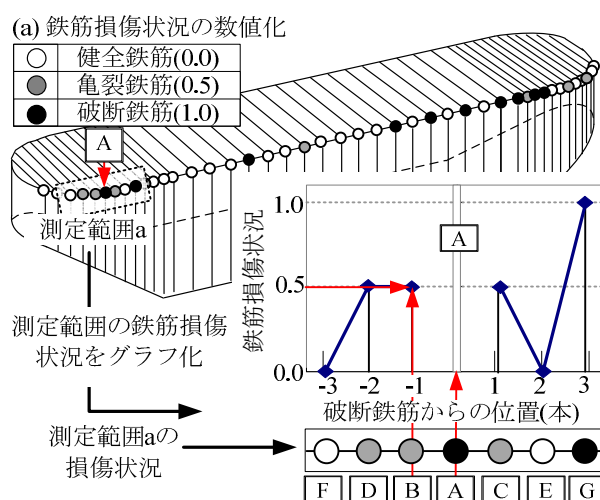


図-6 破断鉄筋周辺の損傷状況調査方法

損傷鉄筋の分布状況について詳細な分析を行う。

図-6 に、破断鉄筋周辺の損傷状況調査方法を示す。(図中 a)鉄筋の損傷度を数値化し、破断鉄筋から両隣3本の鉄筋を対象に、破断鉄筋周辺の損傷状況をグラフ化した。図中に、破断鉄筋Aを中心とした測定範囲aをグラフ化した方法を示す。破断鉄筋Aの両隣3本の鉄筋である、B～Gについてそれぞれの損傷度によって数値化し、グラフ上にプロットすることで、破断鉄筋周辺の損傷状況について分布図を作成した。

図-7 に破断鉄筋周辺の損傷状況を示す。(a)は、P4 橋脚の隅角部 TU について、全ての破断鉄筋(10 本)を対象に、損傷状況をグラフ化した結果を示す。同図に示した四角囲みの数値は、図-4 の横軸に示した鉄筋番号と対応している。(b)は、P4 橋脚隅角部 TU を対象に破断鉄筋からの位置ごとで損傷度を算出した結果を示す。損傷度とは、横軸(-1)の位置で、10 本中、6 本が健全鉄筋、2 本が亀裂鉄筋、2 本が破断鉄筋とすると、合計値 $3.0(0 \times 6 + 0.5 \times 2 + 1 \times 2)$ を本数 10 で割った値である 0.3 を損傷度としている。(c)は、P2, 4, 6 橋脚の隅角部 TU, KU を対象に、(b)と同様にして、平均損傷度を算出した結果を示す。

図(a)に示した具体例として、破断鉄筋両隣の鉄筋 1 本ずつ(合計 20 本)の損傷状況を示すと、健全が 11 本、亀裂が 5 本、破断が 4 本となっている。すなわち、破断鉄筋の隣では、むしろ健全鉄筋が多く分布していることが分かる。次いで、図(b)，(c)を見ると、1 つの隅角部、3 つの橋脚での平均ともに、破断鉄筋両隣の 3 本までの範囲で破断鉄筋を基点とし、周辺に損傷が拡大するような傾向は認められない。このことから考えると、複数の鉄筋が破断した現象は、鉄筋破断による応力の再分配だけでは説明できないと思われる。

他方で既往の研究³⁾では、鉄筋破断の要因には鉄筋の形状特性が大きく影響するとし、急激な節形状を有するものほど曲げ加工時のめり込みによって初期亀裂が生じやすく、この初期亀裂が進展することで、破断が生じるとしている。したがって次章では、節の变形と亀裂の発生状況を観察することで、鉄筋の状態から複数破断の要因について検討する。

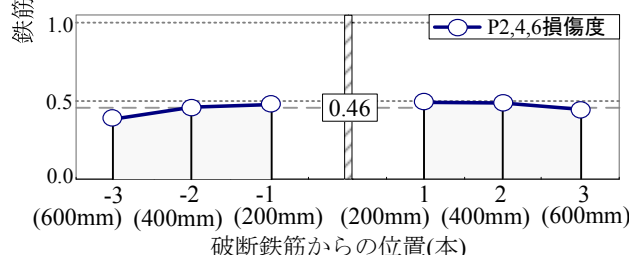
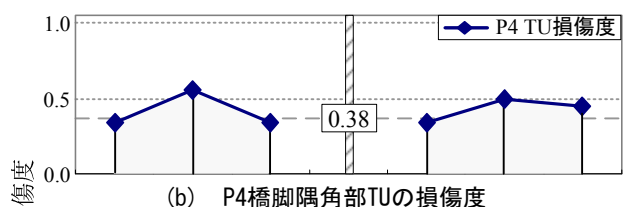
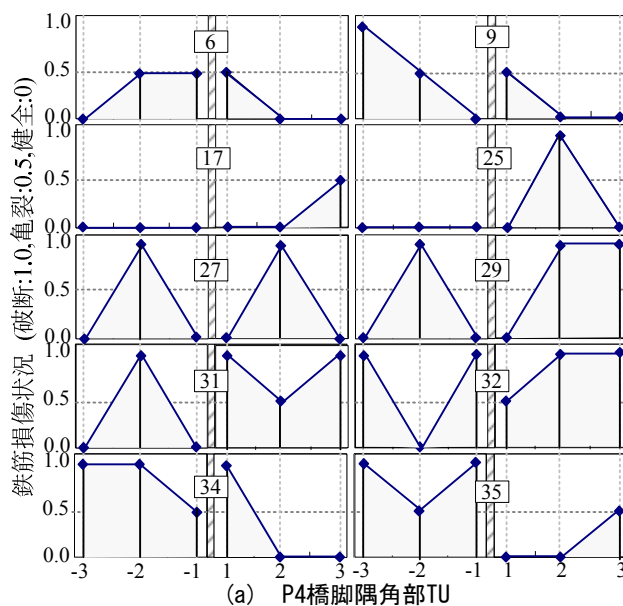


図-7 破断鉄筋周辺の損傷状況

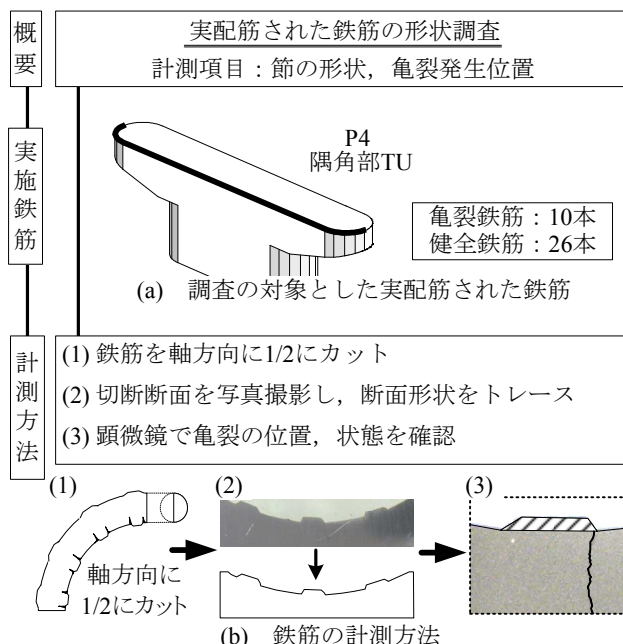


図-8 鉄筋形状調査フロー(実配筋された鉄筋)

4. 実配筋された鉄筋の評価

4. 1 実配筋された鉄筋の形状分析

図-8 に鉄筋の形状調査のフローを示す。実配筋された鉄筋の形状を評価するために、P4 橋脚の隅角部 TU の鉄筋を対象として、節高と亀裂発生位置の計測を行った。なお、調査した鉄筋は、亀裂鉄筋で 10 本、健全鉄筋で 26 本である。計測方法は、鉄筋を軸方向に 1/2 にカットし、鉄筋の形状をトレースすることで、節高と曲げ加工半径を計測し、次に、顕微鏡によって断面を観察することで、亀裂の発生位置を計測した。

図-9 に P4 橋脚隅角部 TU の (a) 亀裂鉄筋と (b) 健全鉄筋の形状を示す。また、それぞれの節について、節高を計測した結果を節上部に示す。なお、図中には、代表例として、亀裂鉄筋と健全鉄筋で 2 本ずつ示している。

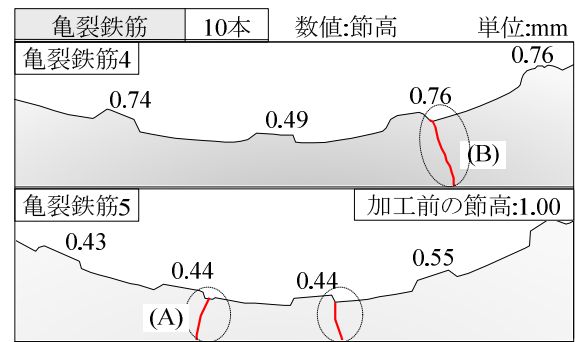
図より明らかなように、亀裂鉄筋と健全鉄筋の節形状には、明確な違いは認められなかった。また、亀裂鉄筋の亀裂発生位置は、(A) 節高の小さい位置で多く発生しているが、(B) 節高の大きい位置でも亀裂が発生していたことが確認された。

既往の研究³⁾によって、曲げ加工時に節がめり込むことで、節の付け根に初期亀裂が発生し、ASR 劣化による膨張によって、亀裂が進展することで、鉄筋は破断に至ることが明らかとなっている。今回の鉄筋でも節の付け根部分に亀裂が集中する現象は同様であるが、加工前後で節高の変化量が小さいことが確認された。したがって、次節では、曲げ加工時の節形状変化に着目した分析を行う。

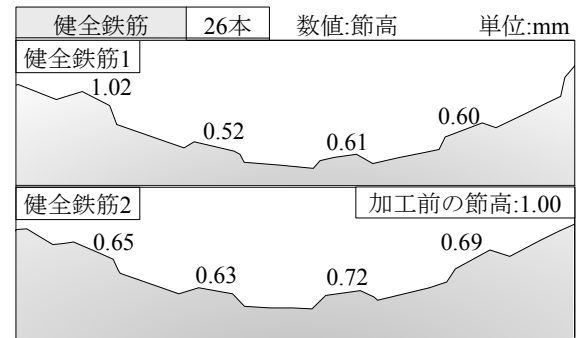
4. 2 曲げ加工した鉄筋の形状分析

橋脚に実配筋された鉄筋の直線部分を改めて曲げ加工し、その形状を分析することで、曲げ加工に伴う節の変化と亀裂発生位置について調査した。図-10 に、曲げ加工した鉄筋の形状分析方法を示す。鉄筋の曲げ加工方法では、曲げ加工芯を 1.0d とし、ローラー式の鉄筋曲げ加工装置を用いた。試験数は 10 本とした。なお、鉄筋形状の計測方法は図-8 (b) と同様とした。

図-11 に鉄筋形状の調査結果を示す。また、図-9 と同様に節高の計測結果を併せて示している。なお、図中には代表例として、試験体 2 本を示している。図より節形状を見ると、複数の箇所ですべて潰れている節が確認された。また、曲げ加工の中心位置で節のめり込みによると考えられる初期亀裂が発生していた。



(a) P4 橋脚隅角部 TU 亀裂鉄筋



(b) P4 橋脚隅角部 TU 健全鉄筋

図-9 鉄筋の形状計測結果

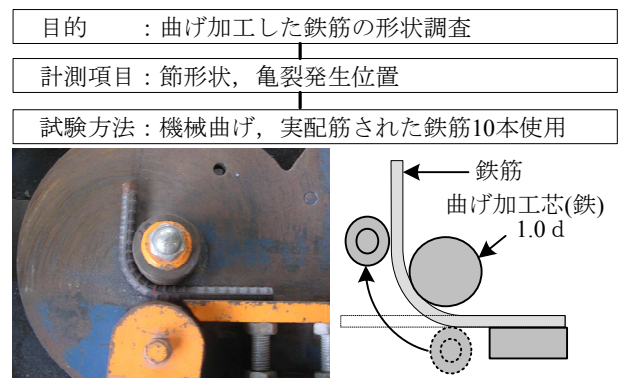


図-10 曲げ加工した鉄筋の形状分析方法

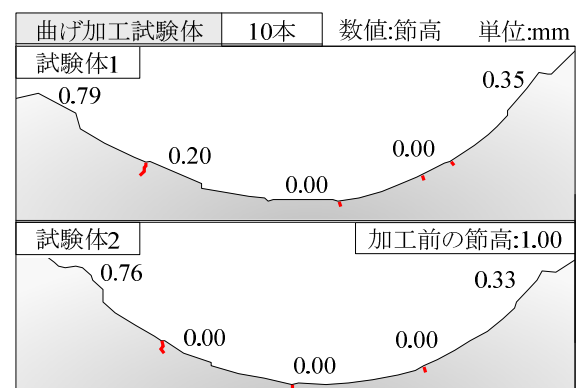


図-11 曲げ加工を行った鉄筋の形状

図-9 と図-11 に示したトレース図から、実配筋された鉄筋と本研究で曲げ加工した鉄筋の節形状を比較すると、両者は明らかに異なっていた。

4. 3 鉄筋形状の比較

図-12 に、機械曲げした鉄筋と D 橋からはつり出した鉄筋について、曲げ加工部の節形状と曲げ加工半径の計測結果を比較した。図-12 (2) より、D 橋からはつり出した鉄筋は、機械曲げした鉄筋と比較して、加工時に節高の変化量が小さく、曲げ加工半径にばらつきが大きいことがわかる。このことから、D 橋の施工当時に機械曲げ以外の方法で曲げ加工していた可能性が考えられた。

図-13 に、(1)機械曲げによる加工方法と(2)施工業者へのヒアリングによって得た昭和 40 年代の工事現場内での加工方法を模式図で示す。昭和 40 年代には、所期の曲げ加工半径となるように木材を複数本打ち付けた作業台の上で鉄筋の一端を図の様に固定し、他端を人力によって折り曲げることで加工を行っていた場合がある。この方法では、現在の加工芯に相当する部分は木材で硬度が低いために節高の変化量は小さくなると考えられる。また、人力部分の固定点が不明確であるため、曲げ加工半径が大きくばらつくと考えられる。このことから、D 橋の曲げ加工作業は現在と異なる方法で行われた可能性が高い。

対象橋脚において、著しい鉄筋損傷が生じていたことと、節高の変化との因果関係を現段階で明確に示すことは難しいが、例えば、節が残ることでコンクリートの膨張力がより伝わりやすくなり、初期亀裂を有する場合には、損傷に至りやすくなるなどの可能性も考えられる。

5. まとめ

複数の鉄筋破断が生じた橋脚を対象にして、内部鉄筋の損傷と外観ひび割れ状況の比較、損傷鉄筋の配列の調査、ならびに鉄筋の形状評価を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 外観ひび割れ密度と内部鉄筋の損傷は必ずしも比例関係に無い。また、破断鉄筋を基点とし、周辺に損傷が拡大する傾向は認められないことから、対象橋脚で複数の破断が発生したことは、損傷の生じ易い鉄筋が複数本配筋されたことが原因である可能性も考えられた。
- (2) 実配筋された鉄筋では、亀裂鉄筋と健全鉄筋で節形状に違いは認められず、節の付け根に亀裂が発生しているものの、曲げ加工部に位置する節で節高の変化量が小さいことが確認された。
- (3) はつり出した鉄筋は、加工前後で節高の変化量が小さく、曲げ加工半径にばらつきが大きい特徴があることから、手曲げによる曲げ加工が行われていた可能性が考えられた。

参考文献

- 1) 大代武志, 原田正彦, 中野政信, 中狭靖: コンクリート橋脚の ASR による再劣化と対策工法の選定, コンクリート工学, Vol. 44, No. 12, pp. 31-38, 2006. 12
- 2) 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破断の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 595-600, 2001. 7
- 3) 上原伸郎, 幸左賢二, 大代武志, 山口和成: 複数の鉄筋破断が生じた ASR 実構造物の鉄筋損傷評価, 構造工学論文集, Vol. 59A, 2013. 3

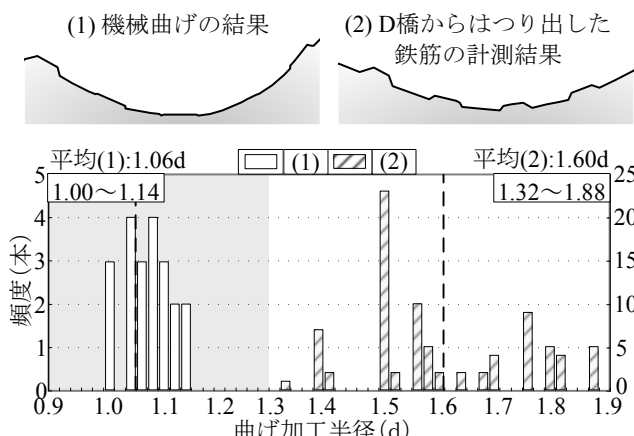


図-12 鉄筋形状計測結果の比較

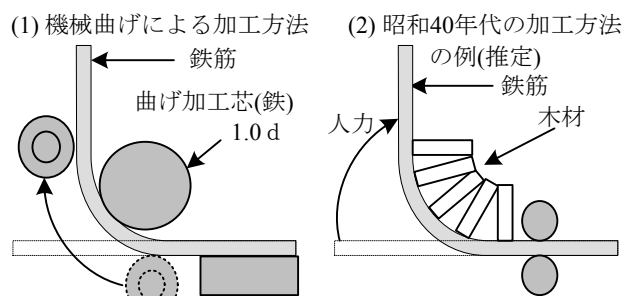


図-13 曲げ加工方法の模式図