論文　鉄筋破断が生じたASR構造物の損傷評価

山口　和成[*1]・幸左　賢二[*2]・大代　武志[*3]・上原　伸郎[*4]

要旨：ASRにより複数の鉄筋が破断した構造物を対象に，鉄筋破断と配筋の関係について，詳細な観察を行った結果，破断鉄筋の両隣りでも亀裂の進展していない鉄筋が数多く見られた。採取した鉄筋は，曲げ加工時に初期損傷を生じやすい節形状であり，はつり出した鉄筋88本の曲げ加工半径は，全て2.00d以下であった。このことから，本研究で対象としたASR構造物における鉄筋破断の生じやすさは，鉄筋形状と曲げ加工に起因して発生する初期亀裂に依存すると推察された。また，構造物中の鉄筋破断箇所は，配筋時に破断を生じやすい鉄筋と損傷が生じにくい鉄筋の2つが混在した可能性が示唆された。

キーワード：ASR，実構造物，鉄筋破断，曲げ加工半径

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下，ASRと表記）によるコンクリート構造物の顕著な劣化事例が報告されてから，既に30年以上が経過している。さらに，ASR劣化構造物中において，鉄筋の曲げ加工部が破断している事例が平成11年に報告され，近年の調査では，特にASR劣化が激しい構造物において，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，複数の鉄筋破断が生じた現象については，以下のような研究が実施されている。

例えば，鳥居ら[1)]は，フーチングの端部で鉄筋がすべて破断していた構造物を対象に，破断鉄筋の発生状況を調査している。その結果，長期におよぶ膨張作用が加わった場合には，最終的に破断鉄筋周辺から連続的な破断が起きると推測している。しかし，既往の研究[1)]で推測されている連続的な鉄筋破断のメカニズムは，対象とする構造物数が少ないため，他の破断構造物の劣化性状の確認や使用鉄筋の特徴把握などを行う必要がある。

そのため，本研究では，複数の鉄筋破断が確認された橋脚の梁隅角部を対象に，破断鉄筋の発生状況の分類，ならびに顕微鏡を用いた亀裂観察を行うことで，隅角部の亀裂進展状況の調査を実施した。

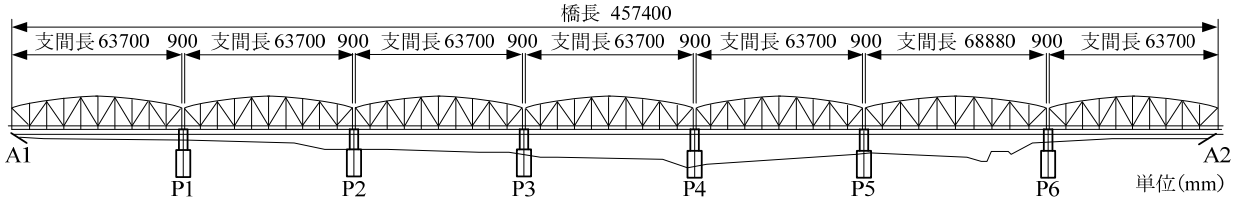
また，複数の鉄筋が破断した要因については，同橋脚から採取した鉄筋を対象に，鉄筋の節形状の測定を行い，その鉄筋の直線部を曲げ加工することで，曲げ加工時に発生し，破断に影響を与える初期亀裂を計測した。評価方法としては，得られた結果と現行鉄筋との比較から，複数破断が生じた鉄筋の材質を評価し，考察を加えた。

さらに，対象構造物の施工評価の1つとして，はつり出した隅角部の鉄筋を対象に，曲げ加工半径を計測し，JIS規格との比較から，複数破断が生じた橋脚における曲げ加工半径の特徴を明らかにした。

2. 実構造物の損傷状況

2.1 実構造物諸元

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**参照）。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実施された。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橋脚梁部では，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，複数箇所で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年に橋脚全体の打換えが行われている[2)]。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たことから，平成18年に橋脚の打換えが行われている。

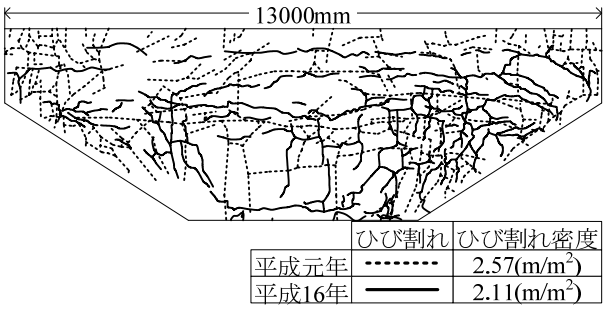


図－1　D橋全体図

*1 九州工業大学大学院　工学研究科建設社会工学専攻　（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 富山県富山土木センター　立山土木事務所工務課　博士（工学）　（正会員）
*4 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 対象構造物の損傷概要

図－2 に，D 橋梁の橋脚の中で経年的なひび割れ劣化の調査が行われた橋脚例として，P2 梁部のひび割れ損傷状況を示す。図では，平成元年と平成 16 年の調査時において確認されたひび割れ発生の状況を併せて示した。図に示すように，水平，鉛直方向共に顕著なひび割れが観察され，幅 0.2mm 以上のひび割れを対象としたひび割れ密度は，平成元年時の調査で 2.57m/m^2，補修後 15 年経過時（平成 16 年）の調査で，新規に発生したひび割れの密度は 2.11m/m^2 であった。以上のことから，D 橋では，補修後も顕著なひび割れによる劣化が生じていた。



図－2　ひび割れ損傷例

2.3 鉄筋損傷状況

(1) 対象橋脚の選定

本節では，複数の連続的な鉄筋破断の特徴について考察を加えるため，梁隅角部に配筋された鉄筋がすべて採取され，かつ配筋位置との対応が明らかとなっている D 橋 P4 梁部を詳細分析の検討対象に選定した。なお P4 橋橋脚梁部は，D 橋において鉄筋破断が確認され打ち換えが行われた 3 基のうちの 1 基である。

(2) 対象橋脚の破断鉄筋発生状況

ここでは，D 橋 P4 梁部における破断・亀裂鉄筋の発生状況の確認を行う。**図－3** に P4 梁部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，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おり，3 種類のプロットを用いて，損傷状況を示している。なお，プロットのない隅角部は，試料と配筋位置との対応が取れなかったため除外した。

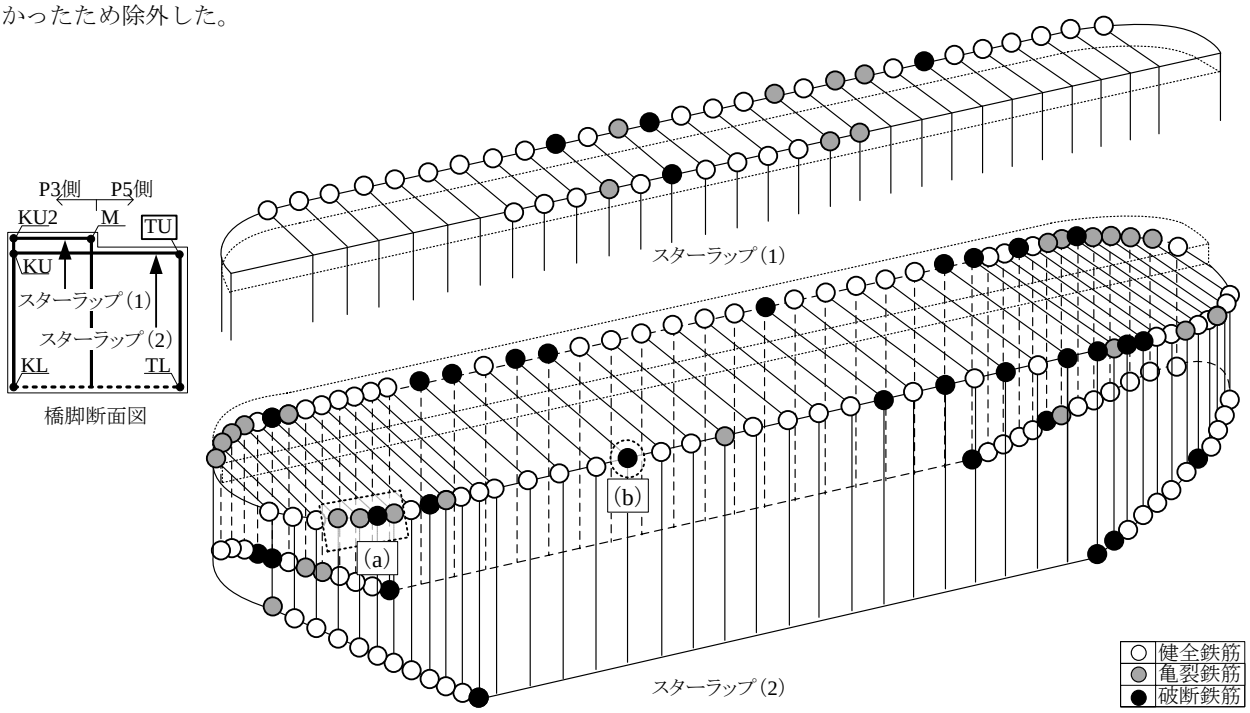
図に示すように，梁上部では，調査本数 128 本に対し，破断鉄筋の合計本数が 24 本，亀裂鉄筋の本数が 26 本であり，全体の 4 割の鉄筋で損傷を生じていた。損傷鉄筋の内，単独で損傷を生じている鉄筋は 14 本，連続で 2 本損傷している鉄筋は 16 本であった。残りの鉄筋 20 本では，連続的に 4 本以上の損傷を生じており，そのような箇所が 4 箇所確認できた。

以上のことから，P4 梁部における鉄筋損傷は，2 つの損傷パターンに分類できる。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，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である。

2.4 鉄筋損傷と配筋の関係性

(1) 健全鉄筋の亀裂進展状況

図－3 では，目視の観察結果を示しているが，目視では鉄筋に生じた亀裂を見落とした可能性もある。特に，**図－3** の図中（b）に示す箇所のように，破断鉄筋の両隣



図－3　隅角部の鉄筋損傷状況

りの健全鉄筋では，亀裂を生じていた可能性も考えられる。そのため，亀裂を計測することは，2 つの損傷パターンの要因や連続破断のメカニズムを評価する際に，有益な知見が得られると考えられる。

ここでは，亀裂の確認として，**図－3** に示す隅角部 TU を対象に，鉄筋の亀裂進展率の計測を行った。

図－4 に，亀裂進展率の計測例を示す。計測方法としては，曲げ加工部の鉄筋を軸方向に 1/2 にカットし，顕微鏡を用いて拡大した断面を観察することで，亀裂深さ（図中 b）を測定した。なお，亀裂進展率については，亀裂深さを鉄筋径（図中 a）で除した値とした。

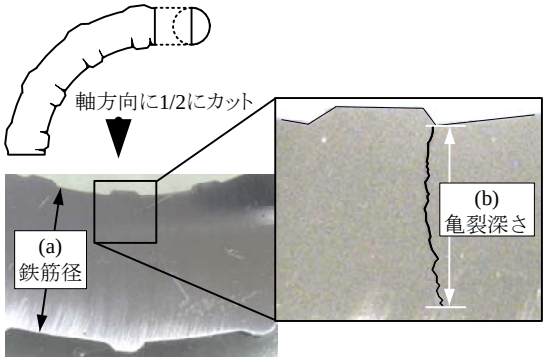
図－5 に，隅角部 TU の亀裂進展率の計測結果を示す。ここでは，10%毎に亀裂進展率を区分した。

図に示すように，亀裂鉄筋では，8 本中 2 本の鉄筋で亀裂進展率が 70～80%程度，残りの 6 本では，亀裂進展率が 30～50%程度の損傷を生じていた。このため，目視で亀裂が確認できる鉄筋では，概ね亀裂進展率 30%程度の亀裂が進展していた。

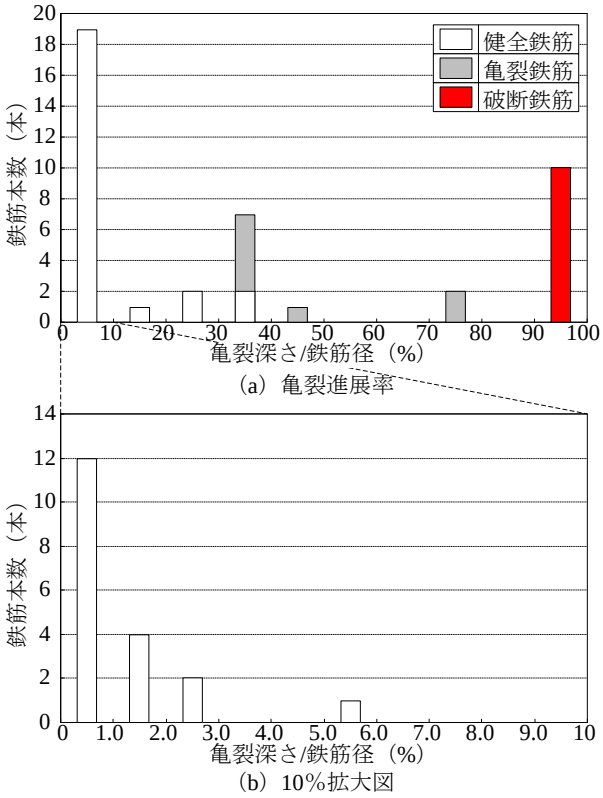
一方，健全鉄筋では，24 本中 2 本で亀裂進展率 30%程度の亀裂を生じていた。亀裂鉄筋の亀裂進展率を考慮すると，この 2 本の健全鉄筋については，目視観察時に亀裂を見落としたものと考えられる。また健全鉄筋のうち 3 本では，亀裂進展率 10%を超えていることから，これらについても供用中における亀裂の進展が疑われる。一方，残りの 19 本の健全鉄筋は，亀裂進展率が 10%以下であった。そのため，図中（b）では，10%以下の健全鉄筋の分布状況を細かく調べた。図に示すように，健全鉄筋の多くは，竣工後 40 年程度経過した時点においても，亀裂進展率は 3%以下であった。既往の研究[3] において，昭和 60 年以前の旧節鉄筋(竹節)を曲げ加工した際に発生する初期亀裂は，1.0d 曲げではあるものの 0～3%程度と考えられている。このことを考慮すると，健全鉄筋では，初期亀裂から，ほとんど亀裂が進展しなかった可能性が高い。

(2) 亀裂進展状況と配筋

ここでは，前項で得られた隅角部 TU の亀裂進展率を基に，配筋との関係性について検討した。



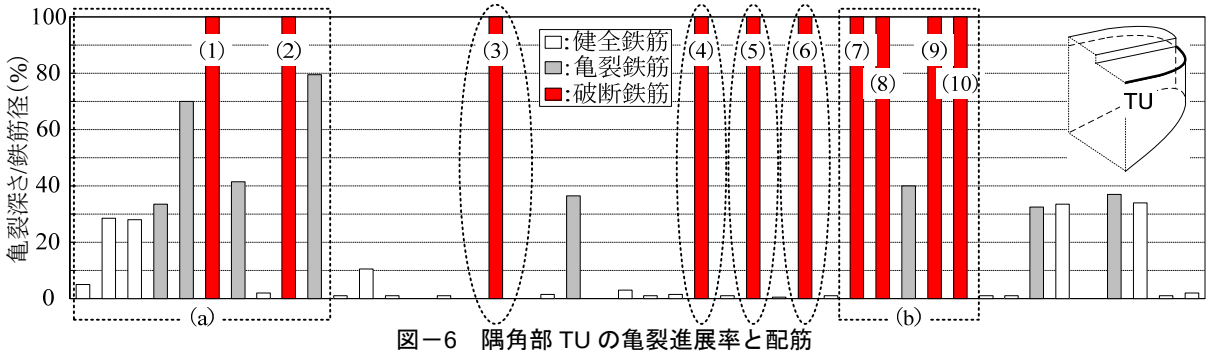
図－4　亀裂進展率の計測例



図－5　隅角部 TU の亀裂進展率

図－6 に，隅角部 TU における亀裂進展率と配筋の関係性を示す。なお，横軸は隅角部 TU の配筋順序に対応している。また，便宜上，破断鉄筋については番号を付した。

既往の研究[1] では，破断が生じた際に破断鉄筋の受け持っていた荷重を破断箇所周辺の鉄筋が分担すること



図－6　隅角部 TU の亀裂進展率と配筋

となり，劣化が進むにつれて，破断鉄筋の両隣りから亀裂が徐々に進展し，最終的には連続的な破断に至ると推察している。

図に示すように，破断鉄筋（1），（2）を含む損傷箇所（a）では，破断や亀裂鉄筋が連続的に並んでおり，前述の鉄筋破断メカニズムを示す損傷が生じているように見える。しかしながら，破断鉄筋（3）～（6）の箇所では，破断鉄筋の両隣りで亀裂がほとんど進展しておらず，単独で鉄筋破断が生じている。また，破断鉄筋（7）～（10）を含む損傷箇所（b）では，連続的な損傷を生じているように見えるが，破断鉄筋（7）と（10）では，隣の健全鉄筋で亀裂の進展は見られず，前述の連続破断メカニズムでは説明できない箇所が数多く見られた。

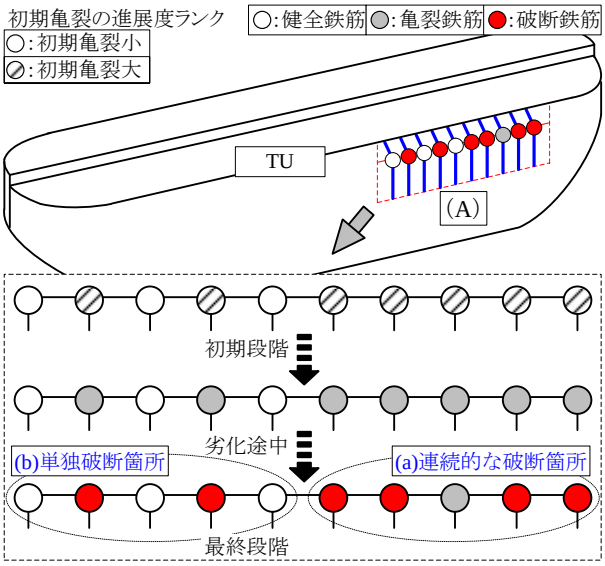
以上のことから，連続破断のメカニズムについて以下に考察する。**図－7** に，推定される連続破断のメカニズムを示す。なお，図中（A）に示す損傷箇所は，P4 梁部の損傷に対応している。連続的な破断は，破断箇所周辺から劣化が進展し，連続的な破断が起きる可能性も考えられる。一方で，スターラップ間隔は 200mm 程度であるため，隣接する鉄筋近傍の膨張応力は同程度であったと仮定すると，破断鉄筋の隣の鉄筋で損傷がほとんど認められなかった事例もあることから，図中（A）に示すように，初期亀裂が大きく，損傷の進展しやすい鉄筋が連続的に配筋された結果であるとも考えられた。そのため，3 章以降は損傷を生じやすい鉄筋の特徴を把握するための検討を行った。

3. 使用鉄筋の評価

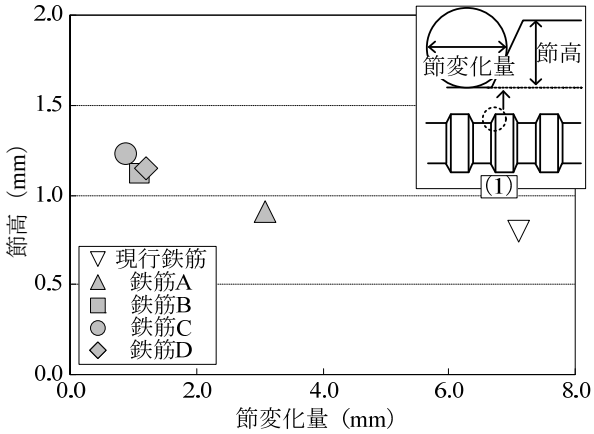
3.1 鉄筋材料試験

既往の研究[3)] では，鉄筋の曲げ加工時に発生する初期亀裂について評価しており，初期亀裂の発生の違いは，節形状が要因であることを明らかにしている。そこで，本章では，P4 梁部の鉄筋を対象に，節形状および曲げ加工時における初期亀裂の計測を行った。比較対象には，既往の研究[3)] で使用された旧節形状鉄筋 A，B，C および現行鉄筋を用いた。なお，既往の研究において使用された鉄筋 A～C は，1970 年代竣工の構造物から，はつり出した鉄筋である。

ここで，鉄筋 A，B については，採取したそれぞれの構造物で破断は確認されていないものの，鉄筋破断が多数報告されている阪神地区の構造物からはつり出した鉄筋である。なお，鉄筋 A は波節鉄筋，鉄筋 B は竹節鉄筋である。鉄筋 C は，北陸地区の橋脚から採取した竹節鉄筋で，採取した時点で破断は認められなかったものの，目視で十分に判断できる亀裂が生じていた。そのため，鉄筋 C は，鉄筋破断が生じる可能性の高い鉄筋と考えられる。なお，本章では，D 橋 P4 梁部から採取した竹節鉄筋を鉄筋 D とする。



図－7　連続破断の推定メカニズム



図－8　節形状観察結果

(1) 鉄筋の節形状

図－8 に，鉄筋 D の節形状の計測結果，および旧節形状鉄筋 A～C と現行鉄筋の節形状を示す。鉄筋 D の節形状を，図中(1)に示す方法で計測した結果，節高は 1.15mm，節変化量は 1.2mm であった。

まず，鉄筋 D と現行鉄筋の節高を比較すると，鉄筋 D の節高 1.15mm は，現行鉄筋の節高 0.80mm の 1.4 倍であった。一方，旧節形状鉄筋である鉄筋 B，C の節高はそれぞれ 1.12mm，1.22mm であり，鉄筋 D の節高はこれらと同程度であった。

次に，鉄筋 D と現行鉄筋の節変化量を比較すると，鉄筋 D の節変化量 1.2mm は，現行鉄筋の節変化量 7.1mm に比べて小さく，急激な節の立ち上がりを有していることが分かった。一方，旧節形状鉄筋である鉄筋 A，B，C の節変化量はそれぞれ 3.1mm，1.1mm，0.9mm であり，鉄筋 D の節変化量は鉄筋 B，C と同程度であった。

今回計測した鉄筋 D の節形状の結果から，鉄筋 D は現行鉄筋に比べて，節高が高く，節変化量が低い形状の鉄筋であることが認められた。

(2) 初期亀裂発生状況

節形状の測定結果より，鉄筋 D は節高が高く，節の立ち上がりが急であるため，初期亀裂が発生しやすい鉄筋形状と考えられる。そこで，鉄筋Dを実際に曲げ加工し，曲げ加工によって発生した初期亀裂を旧節形状鉄筋 A～C や現行鉄筋と比較した。

初期亀裂は，P4 梁部からはつり出した鉄筋 D の直線部を 1.0d で曲げ加工し，**図－4** に示した方法によって測定した。

図－9 に鉄筋 D の初期亀裂の計測結果，および旧節形状鉄筋 A～C と現行鉄筋の初期亀裂を示す。最大初期亀裂については，現行鉄筋が 1.44%であるのに対し，旧節形状鉄筋では鉄筋 A で 2.07%，鉄筋 B で 3.95%，鉄筋 C で 4.00%，鉄筋 D で 3.01%となり，今回計測を行った鉄筋 D では現行鉄筋の 2 倍以上の最大初期亀裂が発生していた。ここで，節形状・初期亀裂の結果より，鉄筋 B，C は鉄筋 D と同程度の傾向を示していることから，状況によっては複数破断が生じる可能性も考えられる鉄筋であった。

以上の結果から，鉄筋 D は，現行鉄筋に比べ，亀裂や破断などの損傷要因である鉄筋曲げ加工時の初期亀裂が発生しやすい鉄筋であると言える。

4. 対象橋脚の曲げ加工半径

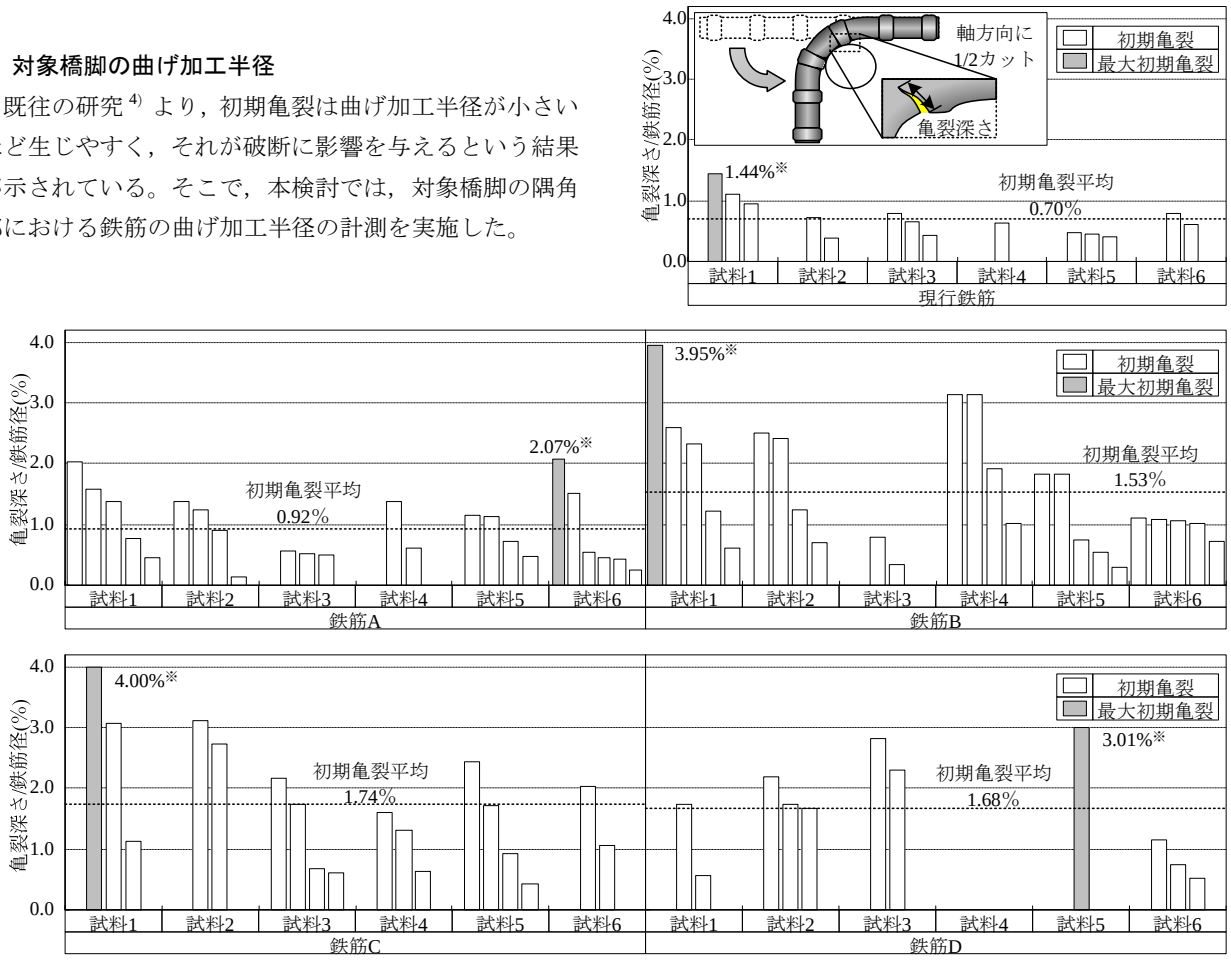
既往の研究[4] より，初期亀裂は曲げ加工半径が小さいほど生じやすく，それが破断に影響を与えるという結果が示されている。そこで，本検討では，対象橋脚の隅角部における鉄筋の曲げ加工半径の計測を実施した。

曲げ加工半径は，**図－10** に示すように，R ゲージを用いて計測した。なお，破断鉄筋は，図中（b）に示すように，破断面を合わせて曲げ加工半径の計測を行った。

図－11 に P4 梁部の隅角部から，はつり出した鉄筋 88 本の曲げ加工半径計測結果を示す。測定の結果，曲げ加工半径の平均値は 1.60d であり，最小値 1.32d から最大値 1.88d の範囲で広く分布しており，すべての計測結果において，道路橋示方書などで規定された最小曲げ加工半径 2.00d を下回る結果となった。

次に，P4 梁部の鉄筋の曲げ加工半径が，広く分布している現象について，既往の研究[4] で実施された曲げ加工時のばらつきの結果を用いて検討した。**図－12** に，既往の研究における曲げ加工時のばらつきの結果を示す。なお，筆者らの曲げ加工方法は，ローラー式の鉄筋曲げ加工装置を用いており，鉄筋の横節が曲げ加工芯に当たるようにして，90 度に曲げ加工を行っている。

図に示すように，曲げ加工時に生じるばらつきは，加工設定値 1.00d に対して，最小で 1.00d，最大で 1.14d であった。そのため，実験室の結果ではあるものの，曲げ加工時には，おおよそ 0.15d 程度のばらつきが生じるものと予想される。



図－9　初期亀裂の発生状況

曲げ加工時のばらつきについて，当時使用された加工機や加工方法は，既往の研究[4]で使用された曲げ加工試験機と同一とは限らないが，P4 梁部の鉄筋の曲げ加工半径の分布（0.50d）は，前述の 0.15d 程度のばらつきに比べて，3 倍以上の非常に大きな分布と言える。

ここで，曲げ加工半径と鉄筋損傷の関係性について評価を行う。**図－11** に示すように，破断・亀裂鉄筋は，曲げ加工半径 1.32d から 1.88d に分布している。同様に，健全鉄筋においても 1.40d から 1.90d に広く分布していた。曲げ加工半径 1.50d を例に示すように，同じ曲げ加工半径の鉄筋においても，破断・亀裂鉄筋と健全鉄筋が混在している状況であった。以上のことから，P4 梁部の鉄筋では，曲げ加工半径が 2.00d 以下で，初期亀裂が生じやすい曲げ加工が行われていた。しかしながら，曲げ加工半径が 1.40d の健全鉄筋や，1.88d の亀裂鉄筋が見られたことから，今回の計測結果においては，曲げ加工半径と鉄筋損傷に，明確な相関性は認められなかった。

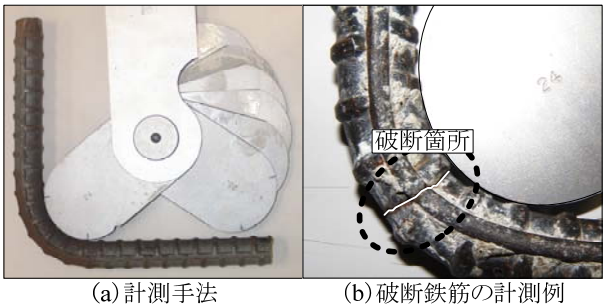
5. まとめ

本研究では，複数の連続的な鉄筋破断が生じるなど，顕著な ASR 劣化を示す D 橋梁部に着目し，分析を実施した。具体的には，破断鉄筋の発生状況の分類，複数破断が生じた構造物に使用された鉄筋の形状・初期亀裂について検討を加えた結果，以下の知見が得られた。

(1)D 橋梁部を対象に，鉄筋破断と配筋の関係性について詳細な観察を行った。評価方法の 1 つとして鉄筋の亀裂観察を行った結果，破断鉄筋の両隣りで，亀裂がほとんど進展していないケースが複数認められた。

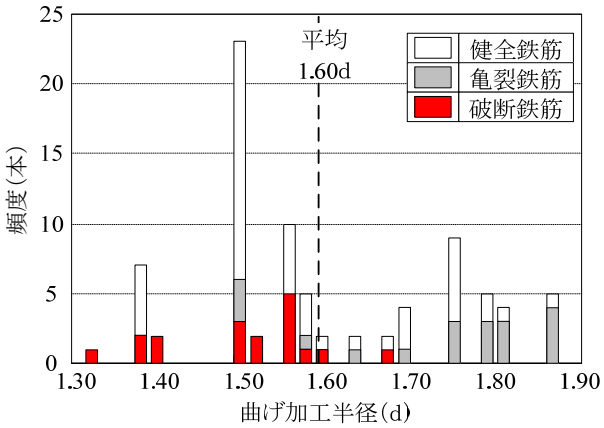
(2)D 橋に使用された鉄筋（鉄筋 D）を対象に，曲げ加工時に発生する初期亀裂，および採取鉄筋隅角部の曲げ加工半径を計測した。その結果，鉄筋 D は，現行鉄筋に比べ，亀裂や破断などの損傷要因である初期亀裂が発生しやすい鉄筋節形状であった。また，はつり出した鉄筋 88 本の曲げ加工半径は，全て 2.00d 以下であった。

(3)初期亀裂の観察結果より，同じ曲げ加工を行った場合においても，3%程度の初期亀裂が発生した鉄筋や全く初期亀裂が発生していない鉄筋も認められた。鉄筋破断の生じやすさは，初期亀裂が大きく影響すると考えられることから，構造物中の鉄筋破断箇所は，配筋時に初期亀裂が大きく破断を生じやすい鉄筋と損傷が生じにくい鉄筋の 2 つが混在した結果を示すものとも考えられる。

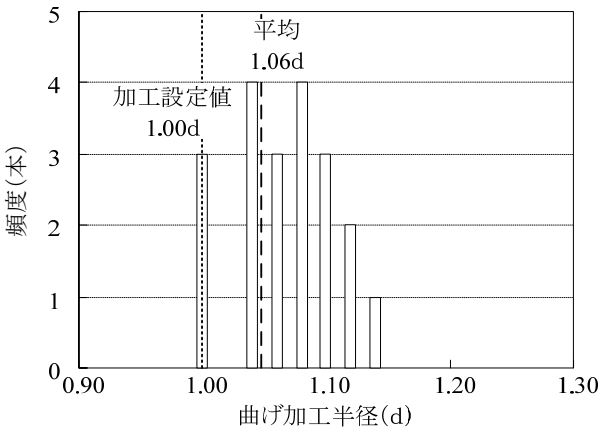


(a)計測手法　(b)破断鉄筋の計測例

図－10　曲げ加工半径の計測方法



図－11　P4 橋脚の曲げ加工半径



図－12　曲げ加工時のばらつき[4]

参考文献

1)　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

2)　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

3)　草野昌夫，幸左賢二，合田寛基，増田隆宏：ASR による鉄筋破断を生じた供試体の劣化性状評価，構造工学論文集，Vol. 57A，pp. 949-958，2011. 3

4)　幸左賢二，川島恭志，合田寛基，興梠展朗：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