

論文 アルカリシリカ反応により鉄筋破断が発生した RC 橋脚の詳細調査

小松原 昭則*1・鳥居 和之*2

要旨：富山県内の橋梁の RC 橋脚で、せん断補強筋の曲げ加工部に破断が確認された。使用鉄筋は高炉メーカーが製造した鉄筋 (SD295A) であった。また、この橋梁は冬期に凍結防止剤が散布され、伸縮装置からの塩分を含む漏水の影響を受けていた。本研究では、アルカリシリカ反応によるコンクリート劣化状況を詳細に調査するとともに、RC 橋脚の鉄筋の発生応力の測定および鉄筋の品質を調査した。その結果、RC 橋脚の鉄筋には降伏点以上の応力が発生していた。また、鉄筋の曲げ加工部には節に沿ったひび割れが発生し、その破断面は3段階からなる脆性的な亀裂の進展が生じていたことが判明した。

キーワード：アルカリシリカ反応, 凍結防止剤, 鉄筋破断, 高炉鉄筋, 鉄筋の実応力度

1. はじめに

北陸地方では、アルカリシリカ反応 (以下 ASR) による過大な膨張により鉄筋が破断する事例が多く報告されている^{1) 2) 3) 4) 5)}。北陸地方の主要な反応性岩種は安山岩であり、その反応性鉱物は、クリストバライトと火山ガラスである⁶⁾。クリストバライトは、非反応性の岩種との割合でペシマムが存在するのに対して、火山ガラスはペシマムが存在しないのが特徴である。北陸地方の安山岩は、両方の鉱物を含有することから、複雑な膨張挙動を示すことが想定される。一方、鉄筋の破断の多くは RC 橋脚であるが、フーチングや橋台での破断事例も報告されている。北陸地方の事例で共通することは、凍結防止剤の影響を受けること、日射および降雨の影響を受けること、鉄筋の曲げ加工部や圧接箇所であること、鉄筋の節の形状が竹節状であること、電炉鉄筋であることが挙げられる⁷⁾。

今回調査した富山県内の道路構造物は、コンクリートのはく落片対策として、重要交差箇所を主体に補修対策が進められていた。その中の掛違い橋脚のパラペットに鉄筋破断が確認された。パラペットは、伸縮装置からの漏水があり、冬期に散布される凍結防止剤の影響を長年にわたって受けていた。このため、ここ 10 年間で ASR によるひび割れが急速に発達し、鉄筋腐食にともなう浮き等の劣化も顕在化してきていた。破断が確認された鉄筋は、D16 のせん断補強筋であり、建設時の記録から、高炉メーカーが製造した鉄筋であることが判明している。

本研究では、鉄筋破断が確認された橋脚のコンクリートの劣化の特徴を調べるとともに、骨材の岩石学的特徴と構造物から採取したコアおよび鉄筋の力学的性質を詳細に検討した。さらに、RC 橋脚から取り出した鉄筋の材質を電炉鉄筋と比較検証した。

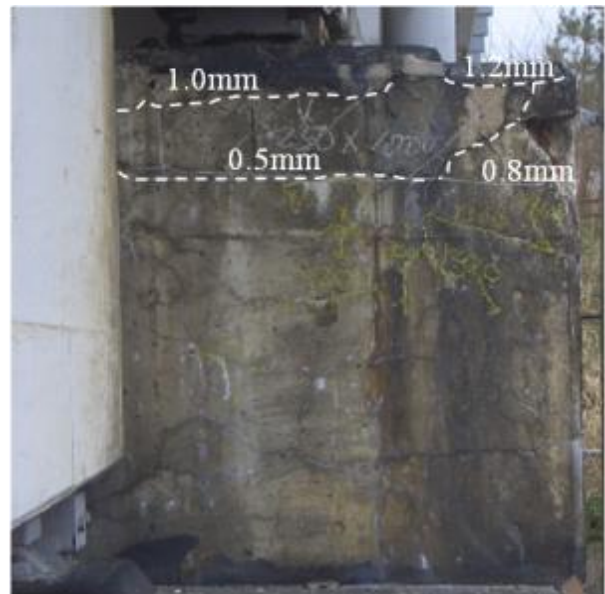


写真-1 鉄筋破断が確認された橋脚パラペット

2. 橋脚コンクリートの劣化および鉄筋の損傷状況

鉄筋破断が確認された道路橋 (以下 M 橋) は、2 径間 PC ポストテンション T 桁橋で、1980 年に供用している。それぞれの径間長の違いから桁高が異なり、掛違い橋脚ではパラペット (幅 1,100×高さ 1,300mm) を有する。M 橋は富山県富山市近傍の平野部に位置し、大代らが報告した鉄筋破断の事例³⁾の橋梁 (以下 A 橋) から 12km ほどしか離れていない。A 橋橋脚のコンクリートは骨材周囲に微細なひび割れが多数発生しており、ブレーカーで簡単に破壊できるような状態であった。したがって、両橋ともアルカリ総量規制以前の建設であることから、常願寺川水系の同様な骨材が使用された可能性があると推察された。M 橋の ASR は、1993 年に発見され、当初はひび割れとコンクリートの一部に変色が発生している程度であったが、2008 年にはコンクリートの浮きを確認さ

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (正会員)

*2 金沢大学理工研究域環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

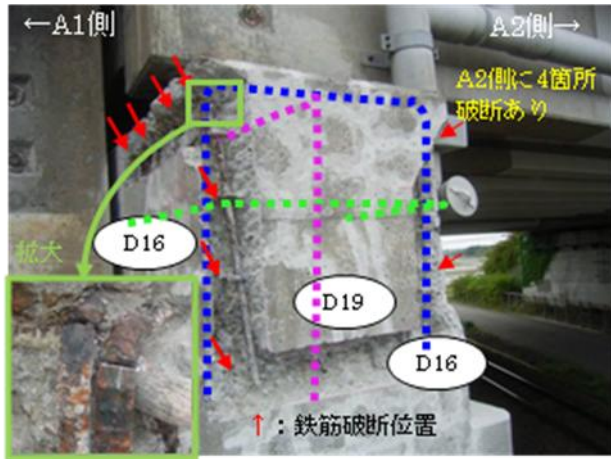


写真-2 鉄筋破断の位置および状況

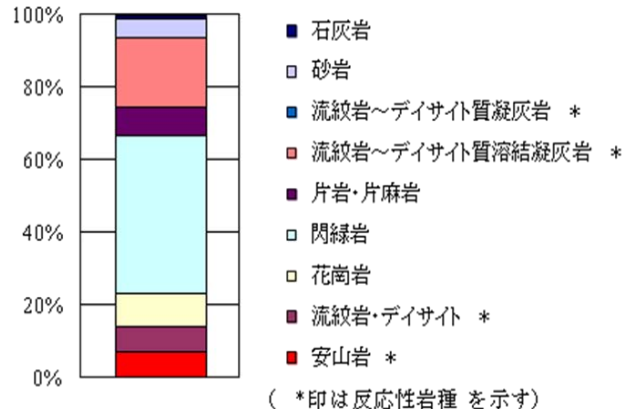


図-1 粗骨材の岩種構成率

れた。今回の調査で鉄筋破断が確認されたのは鉄筋の曲げ加工部であり、写真-1に示すように当該箇所には0.5～1.2mmの水平ひび割れが発生していた。鉄筋破断が確認されたのは路肩側であり、D16（ピッチ@300）のせん断補強筋および配力筋の曲げ加工部にて合計16箇所であった。また、鉄筋にはすでに腐食が発生しており、一部断面欠損も確認された（写真-2参照）。なお、鉄筋の節の形状は竹節状であった。一方、橋軸直角方向に配置されたD19の鉄筋には破断は生じていなかった。

3. 詳細調査の結果と考察

パラペットのA1側からA2側に向かって貫通コア（φ=55mm, L=1,100mm）を鉄筋破断近傍（以下損傷部）および凍結防止剤の影響を受けない橋脚センター（以下健全部）からそれぞれ2本ずつ採取し、コンクリートの性状を調査した。

3.1 粗骨材の岩種構成率

コア側面（L=200mm程度）に観察される骨材粒径5mm以上を対象に岩種判定を行い、岩種ごとの面積を集計することにより岩石の構成率を算出した。その結果を図-1に示す。コンクリート用骨材として川砂および川砂利が使用されていた。アルカリシリカ反応性の岩種として、火山岩系岩石の安山岩と流紋岩および凝灰岩が確認された。とくに、反応性の高い安山岩の構成率は7%であり、A橋の安山岩の構成率41%に比較して少なかった。北陸地方のASRは安山岩の構成率が高くなるほど深刻になることが報告されている⁸⁾。この結果より、M橋はA橋と比べてASRが進行していないものと推察された。

3.2 偏光顕微鏡によるASR劣化度の観察

内部のコアからコンクリート薄片を作製し、偏光顕微鏡を使って、ASRの劣化状況を確認した。写真-3は、安山岩粒子（川砂）の反応状況を示したものである。砂粒子から発達した0.1mm程度のひび割れがセメントペ

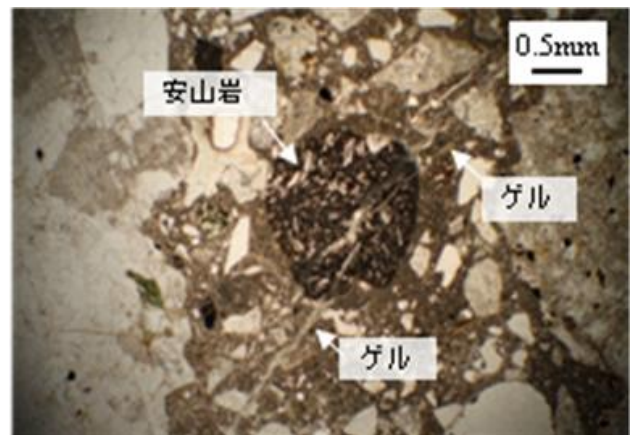


写真-3 川砂（安山岩）の反応（オープンニコル）

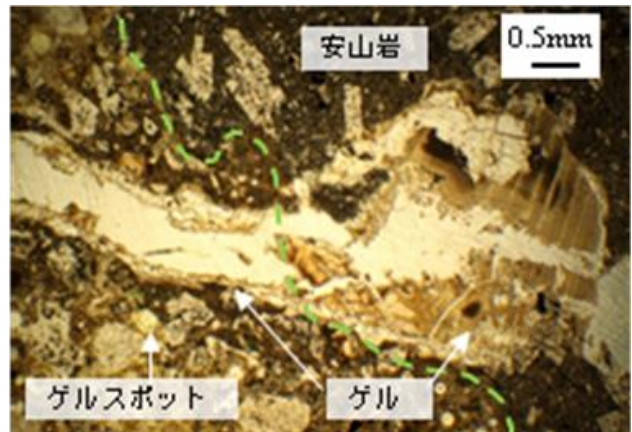


写真-4 川砂利（安山岩）の反応（オープンニコル）

ースト中に進展し、その中には非定形・非晶質のゲルで充填されていた。写真-4は、安山岩粒子（川砂利）の反応状況を示したものである。直径20mm程度の安山岩に幅1mm程度の大きなひび割れが発生し、セメントペースト中に達していた。同様に、安山岩中には非定形・非晶質のゲルが確認できた。また、安山岩の近傍には気泡内を充填するゲルも確認され、薄片観察で評価されるASR劣化度はかなり進行した段階であり⁸⁾、安山岩の反

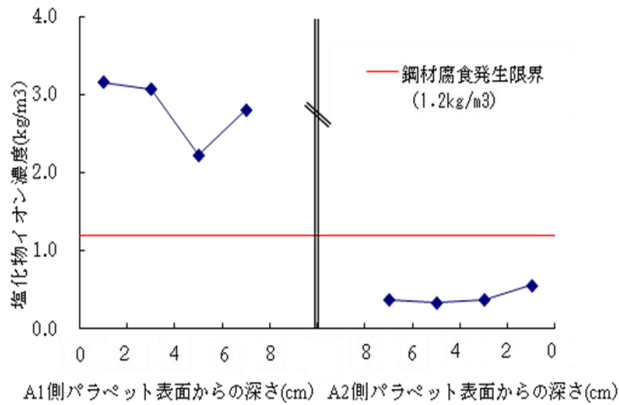


図-2 コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果

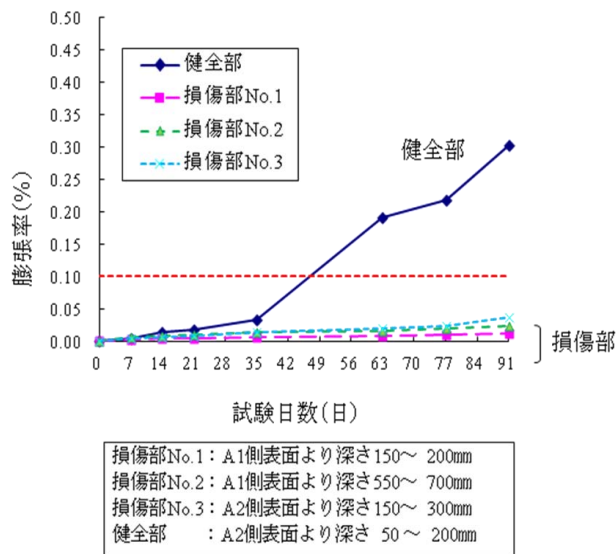


図-3 コアの促進養生試験（デンマーク法）の結果

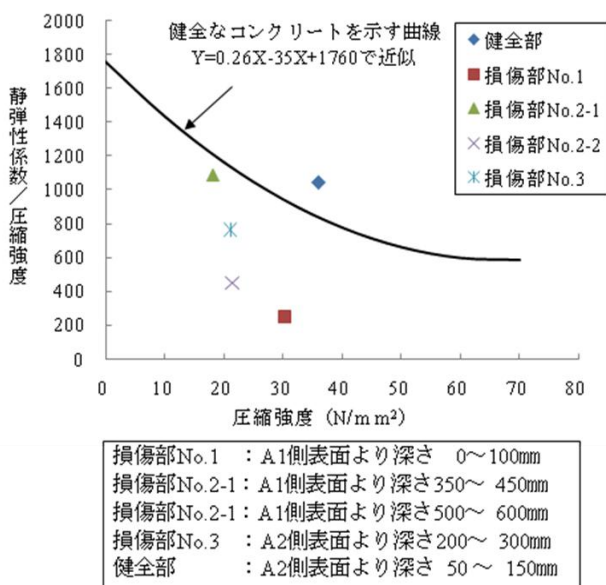


図-4 コアの静弾性係数/圧縮強度比と圧縮強度の関係

応程度は A 橋とほぼ同様な程度と判断された。川砂および川砂利がともに反応しているのが、常願寺川水系の骨材の ASR の特徴である。

3.3 塩分およびアルカリ量の測定結果

損傷部から採取したコアにて、パラペット表面から浸透した塩化物イオン濃度を測定した。測定は、JIS A 1154 による硝酸抽出であり、コンクリート中の全塩化物イオン濃度を調べた。その結果を図-2 に示す。パラペットの A1 側は伸縮装置の直下で、冬期に散布される凍結防止剤の影響を受けていたことから、高濃度の塩化物イオンの浸透が確認された。その値は鋼材腐食発生限界 1.2kg/m^3 を超えており、A 橋に浸透した塩化物イオン濃度より高かった。一方、A2 側では塩化物イオンの浸透はわずかなものであった。しかし、A2 側の鉄筋曲げ加工部でも破断が確認されており、鉄筋破断の発生原因として塩化物イオンの存在が絶対条件とされないと考えられた。

凍結防止剤の影響を受けないパラペット表面から深さ 50cm 程度の位置のコアを用いてコンクリート中の等価アルカリ量 ($\text{Na}_2\text{Oeq.}$) を測定した。測定はコンクリートの粉末試料の 40°C の温水抽出によるものである。等価アルカリ量は $2.9\sim 3.4\text{kg/m}^3$ であり、A 橋の $2.6\sim 2.9\text{kg/m}^3$ とほぼ同程度であった。

3.4 コアの促進養生試験の結果

M 橋が凍結防止剤の影響を受けていたことから、コンクリートの残存膨張性をデンマークの促進モルタルパー法に準拠したコアのデンマーク法 (温度 50°C 、飽和 NaCl 浸漬) にて評価した。試験では、貫通コアの一部を用いた。その結果を図-3 に示す。凍結防止剤の影響を受けていた損傷部では試験日数 91 日においても膨張率が 0.05% 以下であり、ASR がほぼ収束しているものと推察された。一方、凍結防止剤の影響を受けていない健全部の膨張率は、試験日数とともに膨張率が増加した。膨張率は A 橋と同程度であり、コンクリートの残存膨張の潜在性が認められた。橋脚の部位 (パラペットの路肩側とセンター) の中でも日射の影響、乾湿の繰り返し、凍結防止剤の影響の程度により、ASR の進行が大きく異なる結果となった。

3.5 コアの圧縮強度および静弾性係数試験の結果

貫通コアの一部にてコアの圧縮強度および静弾性係数試験を行った。試験結果を図-4 に示す。なお、縦軸をコアの静弾性係数/圧縮強度比としている。コンクリート設計基準強度 24N/mm^2 を下回り、 20N/mm^2 程度まで低下するとともに静弾性係数の低下も見られた。損傷部から採取したコアは、「健全なコンクリート」を示す曲線 (土木学会及び道路橋示方書で示されている設計の圧縮強度と静弾性係数の関係から導いた近似曲線) より下側にプロットされた。

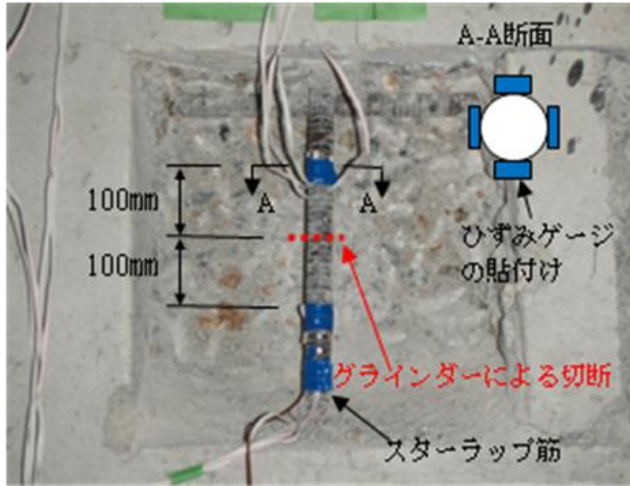


写真-5 鉄筋切断法による応力度の試験方法

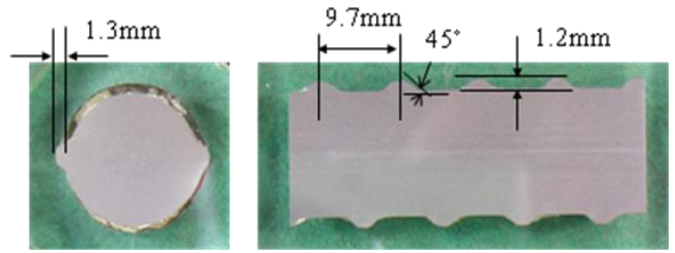


写真-6 鉄筋の節形状 (D16)

表-1 鉄筋の引張試験の結果

サイズ	降伏点	引張強さ
D16	373~381N/mm ²	555~555N/mm ²
D19	323N/mm ²	471N/mm ²

3.6 実 RC 橋脚の鉄筋応力度の測定結果

鉄筋に生じている応力度を推定するため、内部鉄筋の一部をはつり出し、鉄筋切断法⁹⁾にて応力度を検証した。ひずみゲージの貼付け状況および切断位置の関係を写真-5に示す。調査はせん断補強筋を対象とし、曲げ加工部に破断が確認されたものと破断していないものとを比較した。鉄筋が破断した箇所では約 1,800 μ (発生応力 370N/mm²)、破断していない箇所では約 1,400 μ (発生応力 290N/mm²) のひずみが確認された。なお、本データは、グラインダーによる切断時に発生する温度応力の補正を、ひずみゲージとともに熱電対により行なった。M橋の建設時の記録から、鉄筋は SD295A の規格のものが使用されており、これを考慮すると ASR の膨張により破断した鉄筋には降伏点以上の応力が常時発生していたものと推測された。

3.7 鉄筋の品質確認の結果

(1) 鉄筋の節形状

D16 の鉄筋を採取し、C カットおよび L カットすることで節の形状を調べた。結果を写真-6 に示す。節の間隔は 9.7mm、節の高さは 1.2~1.3mm、節と軸線との角度は 45° であり、JIS G 3112 規定を満足するのであった。

(2) 鉄筋引張強さ

破断した鉄筋の機械的性質を確認するため D16 を 3 本および D19 を 1 本採取し、鉄筋の引張強さを確認した。試験結果を表-1 に示す。降伏点および引張強さは JIS G 3112 の規定を満足するものであった。なお、D19 の方が D16 より強度的に小さい傾向を示した。これは現場から鉄筋を採取する際、ピック等で鉄筋に傷をつけたためと考えられた。

(3) 鉄筋の化学成分

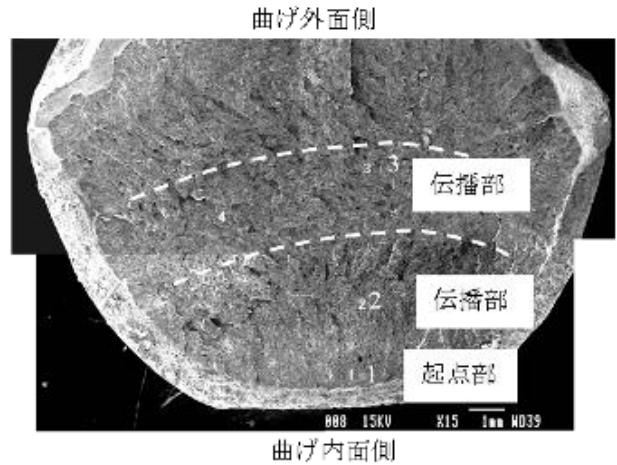
D16 および D19 の鉄筋の一部にて化学成分の分析を行った。C (炭素) および S (イオウ) は赤外線吸収法 (JIS G 1211 3)、N (窒素) は鉄および鋼中の窒素定量法 (JIS G 12283(4))、その他の元素はスパーク放電発光分光分析法 (JIS G 1253) により分析した。試験結果を表-2 に示す。この表には電炉および高炉鉄筋での一般的な化学成分も示した。化学成分の分析結果は JIS G 3112 を満足するものであったが、Si、Mn、Cu、Al、N の成分が電炉鉄筋の成分に類似した結果となった。とくに、N の含有量が多いことから、鉄筋を曲げ加工した際に、ひずみ時効の影響を受け、切り欠きじん性に劣る可能性が考えられた¹⁰⁾。

表-2 鉄筋の化学成分の分析結果 (mass %)

試料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	N
D16	0.27	0.16	0.84	0.035	0.018	0.11	0.010	0.071	0.20	<0.002	0.0135
D19	0.23	0.13	0.90	0.030	0.024	0.20	0.014	0.062	0.18	<0.002	0.0114
電炉 ⁹⁾	0.25	0.20	0.97	0.023	0.025	0.19	0.02	0.10	0.19	0.002	0.0116
高炉 ⁹⁾	0.22	0.33	1.40	0.027	0.021	0.06	0.01	0.02	0.06	0.007	0.0048
JIS G 3112 SD295A	—	—	—	0.05 以下	0.05 以下	—	—	—	—	—	—



写真-7 曲げ半径測定に使用した鉄筋 (D16)



曲げ内面側

写真-9 鉄筋破面の SEM 観察結果

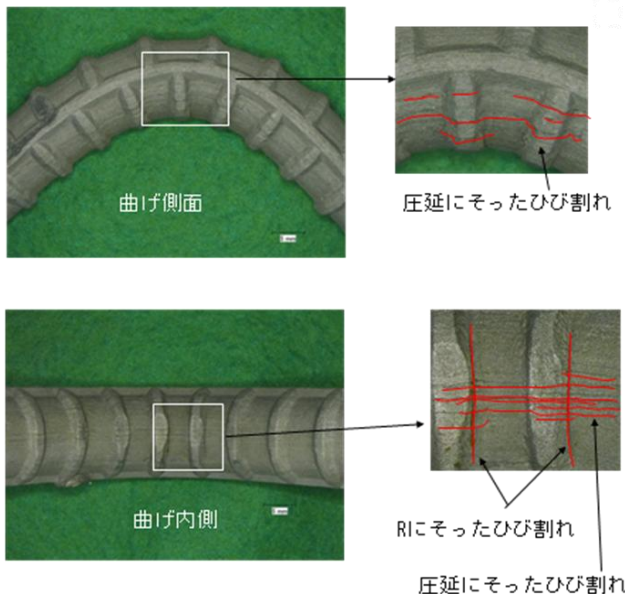


写真-8 鉄筋の曲げ加工部のひび割れ発生状況

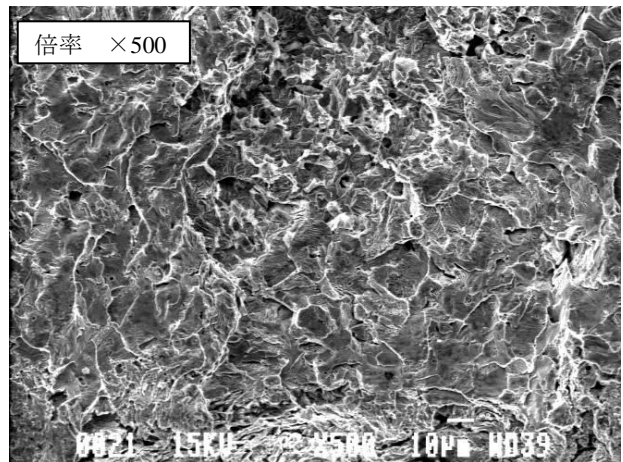


写真-10 1の位置(起点部)のSEM破面

(4) 曲げ半径の測定およびひび割れの確認

D16の鉄筋の曲げ加工部を採取して、表面を酸洗いした後、デジタルマイクロスコープを用いて、曲げ半径の推測、およびひび割れの有無を確認した。試験に用いた鉄筋を写真-7に示す。内側曲げ半径は17mmであり、鉄筋径の約1.1倍と推測され、設計鉄筋曲げ半径2.0倍を満足していなかった。

鉄筋のひび割れの発生状況を写真-8に示す。曲げ側面では、曲げ加工部の内面側において圧延に沿ったひび割れが発生していた。また、曲げ内側では節のR部と圧延方向に沿ったひび割れが確認された。なお、外面にはひび割れは発生していなかった。鉄筋の微細なひび割れの発生は、鉄筋の化学成分にてNが多く含有されていたことによるじん性の低下と鉄筋の曲げ半径が小さいことが原因と考えられた。

(5) 鉄筋破断面のSEM観察

曲げ加工部にて破断が確認された鉄筋を酸洗いし、破断面のSEM観察を行った。破断面を写真-9、破断面の

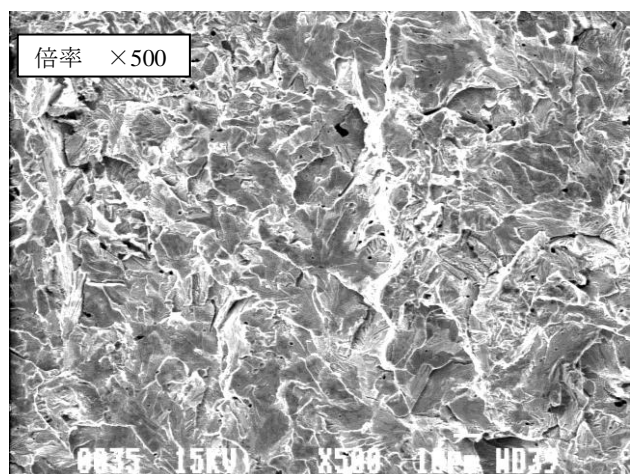


写真-11 2の位置(伝播部)のSEM破面

起点部と伝播部のSEM画像を写真-10および写真-11に示す。鉄筋の割れの起点部は曲げの内側であり、外側に向かって3段階に伝播していた。また、起点部および伝播部とも脆性的な破面を呈していた。写真-9に示す

ように脆性破壊は、起点から発生して点線ラインまで伝播して停止し、点線ラインから再度破壊（3段階に分けて）が発生したものと考えられた。このような破断形態は樽井¹¹⁾の報告と一致していた。

4. まとめ

高炉メーカーの鉄筋を使用した構造物で ASR 膨張による鉄筋破断が発見された。従来、高炉メーカーで製造された鉄筋は、じん性が高いので、ASR 膨張による破断の可能性は低いと考えられていた。本調査により得られた主要な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 破断した鉄筋は、D16 のせん断補強筋および配力筋の曲げ加工部であり、鉄筋の節形状は竹節であった。
- (2) 鉄筋破断が確認された箇所では、コンクリート表面に幅 1mm 程度の ASR によるひび割れが水平方向に発生していた。
- (3) コンクリートは ASR によるひび割れの発生と拘束の低下により、設計基準強度 24N/mm^2 に対して、 20N/mm^2 程度に低下していた。
- (4) 鉄筋破断箇所では、伸縮装置からの漏水により凍結防止剤の影響を受けており、断面欠損を伴った腐食が発生していた。
- (5) コンクリート中の川砂および川砂利中の安山岩粒子がともに激しく反応を生じていた。また、偏光顕微鏡観察より、ASR ゲルはセメントペースト中のひび割れを充填し、ゲルスポットが観察された。
- (6) 鉄筋切断法により RC 橋脚の D16 の鉄筋には $1,800\mu$ のひずみの発生が確認された。この値より発生応力を推定したところ 370KN/mm^2 が作用しており、鉄筋の降伏点 (SD295A 規格) を超えていた。
- (7) 現地で回収した鉄筋の材質試験より、鉄筋の降伏点は 370N/mm^2 であった。しかし、化学組成より N (窒素) の含有量が 0.014% と大きいことから、高炉メーカーで製造された鉄筋であるが、電炉鉄筋に類似した化学組成であった。
- (8) 鉄筋の曲げ半径を測定した結果、曲率 (R/D) は 1.1 であり、設計の 2.0 を満足していなかった。また、曲げ加工部には節に沿ったひび割れと圧延方向にひび割れが発生していた。
- (9) 鉄筋破断面の SEM 観察より、曲げ加工時に発生したひび割れを起点にして 3 段階の脆性的な破壊が生じていた。
- (10) 鉄筋破断の主たる原因は、鉄筋に N (窒素) が多く

含有されていたことによるじん性の低下、鉄筋の曲げ半径が小さいことによるひび割れの発生、さらに凍結防止剤の影響による過大な ASR 膨張の発生が複合したことによるものと考えられた。

参考文献

- 1) 鳥居和之：アルカリシリカ反応により劣化したコンクリート構造物の鉄筋破断の特徴，材料と環境，Vol.59, No.4, pp.117-120, 2010.
- 2) 鳥居和之，樽井敏三，大代武志，平野貴宣：能登半島の ASR 劣化構造物に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.779-784, 2006.
- 3) 大代武志，原田政彦，中野政信，中挾靖：コンクリート橋脚の ASR 劣化に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.44, No.12, pp.31-38, 2006.
- 4) 湊俊彦，鳥居和之：コンクリート構造物の鉄筋破断および配筋不良の ASR 劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.989-994, 2010.
- 5) 丑屋智志，出口一也，野村昌弘，鳥居和之：福井県の骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁に関する調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1007-1012, 2010.
- 6) 野村昌弘，小松原 昭則，畔柳 昌己，鳥居 和之：北陸地方における反応性骨材の岩石学的特徴とコアの残存膨張性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.953-958, 2010.
- 7) 土木学会コンクリート委員会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告～鉄筋破断と新なる対応～，コンクリートライブラリー，No.124, 2005.
- 8) 野村昌弘，小松原昭則，丑屋智志，鳥居和之：ASR 劣化構造物から採取したコアの残存膨張性評価の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.965-970, 2010.
- 9) 長田光司，小野聖久，丸屋剛，池田尚治：アルカリ骨材反応で生じた変状を起こしたコンクリート部材の耐震性能一現地調査と載荷実験による評価，コンクリート工学，Vol.44, No.3, pp.34-42, 2006.
- 10) 土木学会コンクリート委員会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告～鉄筋破断と新なる対応～，コンクリートライブラリー，No.124, p31, 2005.
- 11) 樽井敏三，鳥居和之：アルカリシリカ反応による鉄筋の破断機構，材料と環境，Vol.59, No.4, pp.143-150, 2010.