

論文 ASR 供試体の破断鉄筋周辺におけるひび割れ進展

益田 紘孝*1・幸左 賢二*2・上原 伸郎*3

要旨: 反応性骨材を用いた RC 供試体を作製し長期暴露試験を行った結果, 帯鉄筋隅角部において鉄筋破断が確認された。破断鉄筋周辺の外観ひび割れにおいて暴露開始から 1300 日を境にひび割れ密度は $7\text{m}^2/\text{m}^2$ から $17\text{m}^2/\text{m}^2$, ひび割れ幅は 0.6mm から 3.0mm まで急激に増加していた。破断鉄筋周辺の内部コンクリートにおいて幅 2.0mm の帯鉄筋位置を跨ぎ供試体表面と接続する特異的なひび割れが確認され, この特異的な内部ひび割れの発生に併せて供試体表面でも急激な幅の増加が発生すると推測された。また, 破断鉄筋に対して SEM 観察を行った結果, 実構造物と同様な破面形態であった。

キーワード: ASR, 長期暴露, 外観ひび割れ, 鉄筋損傷

1. はじめに

近年では, アルカリ骨材反応(以下, ASR)により劣化が生じたコンクリート構造物において鉄筋破断¹⁾が確認されている。破断鉄筋位置をひび割れ幅や密度などの外観ひび割れ状況から特定することは, 構造物に損傷を与えないため維持管理において非常に重要である。しかし, 現在までに破断鉄筋周辺の外観のひび割れ状況について経時的な計測によって検討を行った事例は少ない。

そこで筆者らは, ASR による外観ひび割れと鉄筋損傷や内部損傷の関係性について検討するために, $340\times 340\times 670\text{mm}$ の反応性骨材を用いた供試体を, 1(case1~3), 2(case4~6), 3(case7~9)の3シリーズ(表-1 参照)に分けて作製し, 屋外暴露実験²⁾を行っている。

シリーズ 1, 2 では, 外観ひび割れから定義した ASR 劣化度小, 中, 大の段階において, 主に ASR 劣化によるコンクリートの物性値の推移や内部コンクリートひび割れの進展などの内部損傷について検討を行った。

また, 本検討におけるシリーズ 3 では, 主に劣化度大の段階における鉄筋損傷や内部ひび割れについて検討をしている。この際, シリーズ 1, 2 と比べて鉄筋破断が生じやすくするために, 曲げ加工半径を 1.5d としたシリーズ 1, 2 よりも小さい 1.0d に変更することで, 鉄筋破断の要因のひとつである初期亀裂をより発生しやすくした。加えて, 暴露期間を延ばすことで ASR が鉄筋損傷に及ぼす影響を大きくした。その結果, 約 5 年間屋外暴露した case7 供試体において鉄筋破断が確認された。

本稿では, 破断鉄筋周辺のひび割れの詳細な観察および破断鉄筋破面に対して SEM 観察を行うことで, 破断鉄筋周辺のひび割れの進展傾向および ASR による鉄筋破断の再現性について検討した。図-1 に研究フローを

表-1 実験ケース

シリーズ	case	打設日	曲げ加工半径	暴露期間(日)	劣化度	主な項目
1	1	2007/8/3	1.5d	463	小	外観損傷 コンクリート 物性
	2			790	中	
	3			1149	大	
2	4	2008/3/12	1.5d	550	中	外観と内部損傷 の関係性
	5			1168	大	
	6			1538	大	
3	7	2008/9/18	1.0d	1845	大	外観と内部損傷 の関係性
	8			1523	大	
	9			暴露中	一	

□:本論文検討供試体

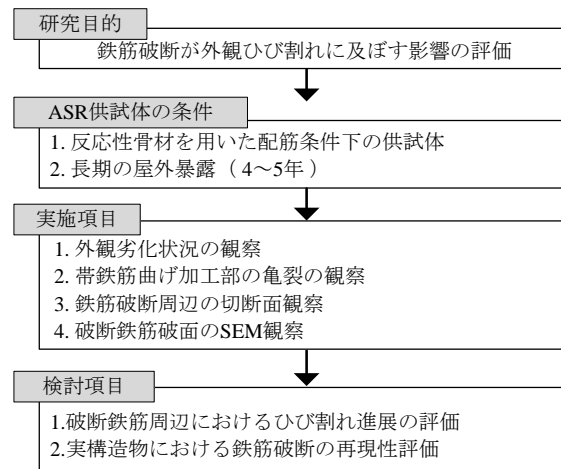


図-1 研究フロー

示す。

2. 供試体概要

2.1 供試体諸元

図-2 に供試体形状を示す。供試体は, 実際に ASR による損傷および曲げ加工部において鉄筋破断が確認されている橋脚梁部の寸法を基に 1/8 スケールとした。供試体両端面の帯鉄筋には, 鉄筋破断の生じた ASR 構造物

*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) セメント・コンクリート研究所 (正会員)

を模擬するため、構造物からはつり出した旧筋 D16 鉄筋を曲げ加工半径 1.0d で加工して配置した。なお、模擬した実橋脚と帯鉄筋比を合わせるため、供試体中央部分には現行 D10 鉄筋を使用した。今回主な検討対象とした ASR 供試体は、暴露期間 1523 日で試験を行った供試体(以下、case8 供試体)および暴露期間 1845 日の供試体(以下、case7 供試体)を用いた。

2.2 使用材料および配合

コンクリート配合は、W/C=46%，s/a=43%，単位水量は 175kg/m³であり、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。なお、設計基準強度は 35N/mm²とした。反応性骨材には、細骨材に長崎県産砕砂、粗骨材に北海道産砕石を使用した。反応性骨材の岩種はいずれも安山岩である。また、ASR の促進を目的として、コンクリートの等価アルカリ量を 8kg/m³に設定し、NaOH を添加した。

2.3 供試体劣化概要

(1) 外観ひび割れ状況

外観ひび割れの計測箇所は端面と下面を除いた東面、西面および上面とし、暴露日数に伴う外観ひび割れの経時変化を計測した。ひび割れ密度の算出方法は、供試体に直接マーキングをし、写真撮影を行い、パソコンのアプリケーション上でトレースすることで、ひび割れ総延長を求め、対象面積で除すことにより算出した。本研究における劣化程度の判定基準は、各供試体の 3 観察面(東面、西面、上面)におけるひび割れ密度の平均値によって評価した。

図-3 に外観ひび割れ密度の経時変化を示す。同図では、阪神高速道路公団が実施した構造物の健全度調査³⁾を参考に、供試体の劣化進展度を表す指標として、幅 0.2mm 以上のひび割れを対象にひび割れ密度を算出した。ひび割れ密度は、暴露開始から 790 日時点において case8, case7 供試体それぞれで 2.8m/m², 2.4m/m²、同じく 1090 日時点では、case8, case7 供試体のひび割れ密度はともに、4.3m/m² となっており、case8, case7 供試体は同様な傾向を示しながら、ひび割れは進展している。最終的なひび割れ密度は、case8 供試体は 1523 日で 6.72m/m²、case7 供試体は 1845 日で 9.14m/m² となっている。

図-4 に case7 供試体の東面を代表とした経過日数 1845 日における外観ひび割れ状況について示す。図-4 より、幅 0.20mm 以上のひび割れは、主に主鉄筋の方向に発生し、また、このひび割れを結ぶように幅 0.05mm 以上 0.20mm 未満のひび割れが亀甲状に発生した。

(2) 鉄筋損傷評価方法

鉄筋損傷の評価方法を図-5 に示す。鉄筋の観察は、曲げ加工部を軸方向に 1/2 にカットし、#1200 の研磨剤を用いて切断面を研磨した後、デジタルマイクロスコー

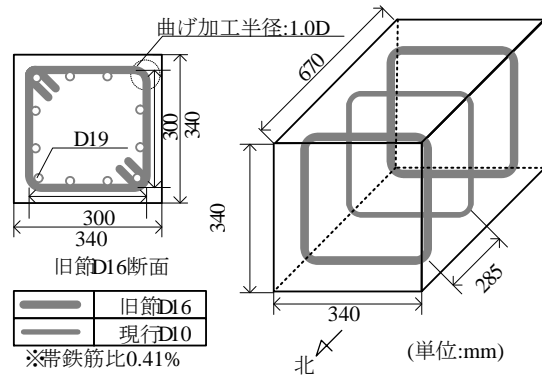


図-2 供試体形状

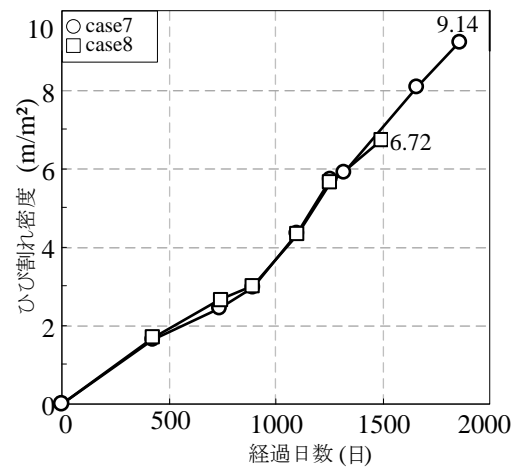


図-3 外観ひび割れ密度の経時変化

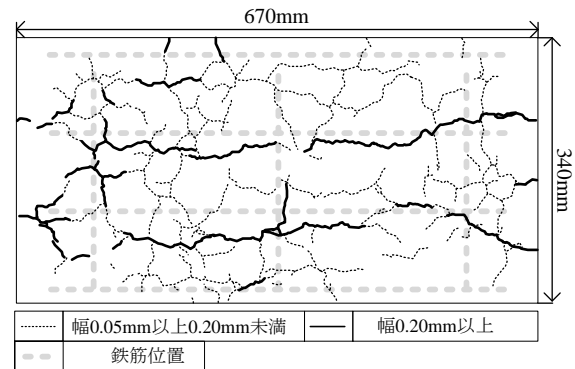


図-4 外観ひび割れ状況(東面)

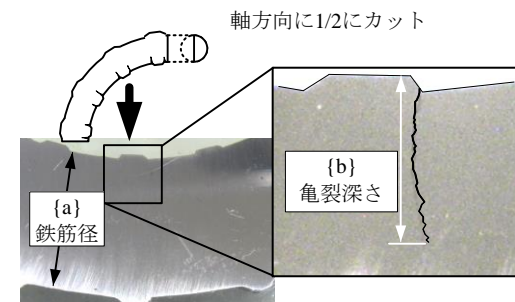


図-5 鉄筋損傷の観察方法

プを用いて 100~1,000 倍に拡大した画像によって行った。また、損傷程度の評価は、図-5[b]に示す亀裂深さを図中{a}に示す鉄筋径で除した値(以下、亀裂進展率)によって行った。

屋外暴露試験後に case7 供試体、および case8 供試体よりはり出した各供試体における鉄筋の損傷状況を図-6に示す。各鉄筋位置において、複数の鉄筋亀裂が確認され、白色は各鉄筋亀裂、灰色は各鉄筋位置における最大亀裂進展率を示している。観察の結果、case8 供試体(外観ひび割れ密度 6.72m/m²)では、鉄筋位置{1}~{4}でそれぞれ、31.5%、10.0%、6.1%、5.5%の最大亀裂進展率、case7 供試体(同 9.14m/m²)の鉄筋位置{1}、{2}、{4}でそれぞれ、14.8%、8.0%、40%の最大亀裂進展率が観察され、鉄筋位置{3}では、破断が確認された。なお、すべての鉄筋亀裂は節の付け根部分から発生していた。ここで、各鉄筋位置に発生した最大亀裂進展率の平均値は case8 供試体、および case7 供試体でそれぞれ 13.3%、40.7%であり、同じく外観ひび割れ密度も case7 供試体の方が case8 供試体よりも大きかったことを考えると、外観の劣化進展と同時に内部の鉄筋損傷も同様に進展していた可能性も考えられた。

3. 鉄筋破断によるひび割れの進展

本章では、鉄筋破断が生じた case7 供試体の帯鉄筋隅角部の近傍に着目し、鉄筋破断とひび割れ進展の傾向について検討を行った。

3.1 ひび割れ密度

(1) 評価範囲の設定手法

図-7に隅角部に着目した評価範囲について示す。評価範囲は、鉄筋位置{1}~{4}における近傍のコンクリート表面に設定することにした。なお、評価範囲の軸方向長さを 220mm、軸直角方向長さを 170mm と設定した。鉄筋位置{1}、{3}に対しては、それぞれ鉄筋位置を挟む評価範囲(a)と(b)、(d)と(e)の 2 範囲ずつ行った。鉄筋位置{2}、{4}に対しては、下面のひび割れ観察を行っていないため、それぞれ評価範囲(c)、(f)の 1 範囲ずつで評価を行った。

(2) 経時変化

図-8に各評価範囲におけるひび割れ密度(ひび割れ幅 0.2mm 以上)の経時変化について示す。暴露試験終了直前の経過日数 1845 日において、鉄筋位置{1} (亀裂進展率 14.8%)の評価範囲(a)、(b)におけるひび割れ密度は、それぞれ 7.6m/m²、3.8m/m²、鉄筋位置{2}(亀裂進展率 8.0%)の評価範囲(c)では、6.7m/m²であり比較的小さい値となっていた。一方、鉄筋位置{3}(破断鉄筋)の評価範囲(d)、(e)では両範囲とも 17.8m/m²、鉄筋位置{4}(亀裂進展率 40%)の評価範囲(f)では、12.0m/m²となっており、case7

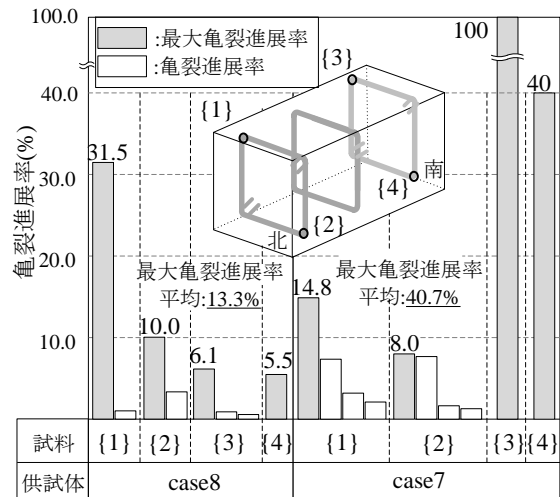


図-6 亀裂進展率の観察結果

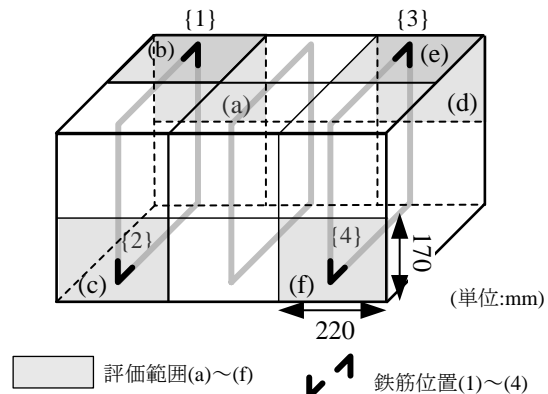


図-7 評価対象面

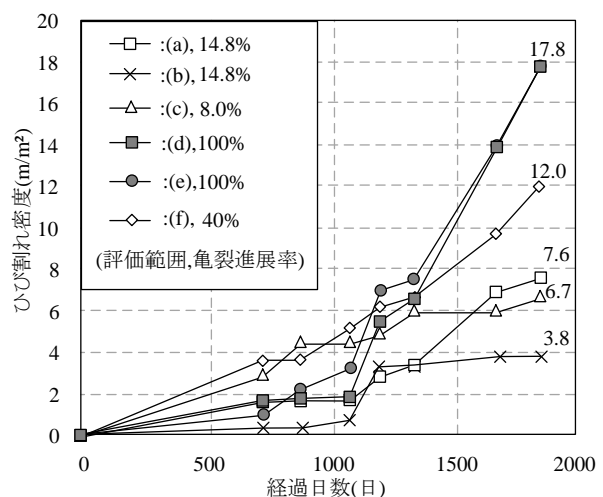


図-8 評価範囲の経時変化

供試体全体のひび割れ密度 9.14m/m²を上回っていることから、鉄筋損傷の大きな箇所においてはひび割れ密度も大きくなるような傾向が窺われた。破断鉄筋周辺である評価範囲(d)、(e)は両範囲とも暴露開始から 890 日では、ひび割れ密度は 2m/m²程度と比較的小さいが、1300 日から暴露終了直前の 1845 日にかけてひび割れ密度は約

7m/m²から約17m/m²まで急激に増加している。一方、亀裂進展率40%の評価範囲(f)は、ほぼ一様な傾向でひび割れ密度は増加しており、破断鉄筋と亀裂進展率40%の評価範囲におけるひび割れ密度の進展傾向に差異が見られた。

次に、経過日数 1845 日時点においてひび割れ密度が大きかった評価範囲(d)~(f)におけるひび割れ発生状況に着目した。図-9 に経過日数 1300 日と経過日数 1845 日時点におけるひび割れ状況の比較を示す。図-9 左側では、経過日数 1300 日時点のひび割れを灰色で示しており、図-9 右側では、経過日数 1300 日のひび割れに加えて経過日数 1845 日で新たに確認されたひび割れを黒色で示した。亀裂進展率40%の評価範囲(f)におけるひび割れの進展は、経過日数 1300 日時点で発生していたひび割れがそれぞれ僅かに延伸するような傾向であった。一方、破断鉄筋の評価範囲(e)、(d)のひび割れは、1300 日時点に発生していたひび割れが大きく延伸する、または新たなひび割れが発生しており、亀裂進展率40%の評価範囲(f)と比較してひび割れの進展傾向が大きく異なった。この要因として、1300 日以降に鉄筋が生じ、拘束力の低下によって破断鉄筋周辺は、ASR によるひび割れが進展しやすくなり、結果として 1845 日におけるひび割れは大きく進展したことが考えられる。

3.2 破断鉄筋周辺のひび割れ状況

鉄筋破断が生じた case7 供試体では、内部のひび割れ状況を把握するため、南側端面から供試体軸方向の145mm 位置において、供試体を軸直交方向に切断した。切断箇所は、評価範囲(d)、(e)内であり、破断した帯鉄筋の近傍に位置する部分である。図-10 に破断鉄筋周辺のひび割れ状況として、切断片の南西側隅角部を拡大した3次元ひび割れ損傷図を示す。

供試体内部のひび割れと繋がっていた供試体表面ひび割れを、同図に示すように[a]、[b]、[c]のひび割れとした。[b]、[c]は幅0.2mm以上0.4mm未満のひび割れであったが、[a]は全体的に幅1.0mm以上であり、幅の大きなひび割れとなっていた。供試体内部のひび割れ状況と併せてみると、[b]、[c]のひび割れと繋がっていた内部のひび割れはかぶり部分で拘束しているのに対して、幅の大きかった[a]のひび割れは、帯鉄筋位置を跨ぐ幅2.0mmの特異的なひび割れが連続していた。

次に、幅が全体的に大きくなっていた[a]のひび割れ幅の経時変化について分析を行った。図-11 (2) に示すように分析手法は、南面(0mm)から切断位置(145mm)位置まで測線を1mm 間隔で引き、鉄筋破断が起きたと推測される1300 日~1845 日で分析を行った。図-12 に破断鉄筋周辺のひび割れ幅の分布について示す。経過日数 1300 日時点において最大ひび割れ幅は0.6mm であり、南面か

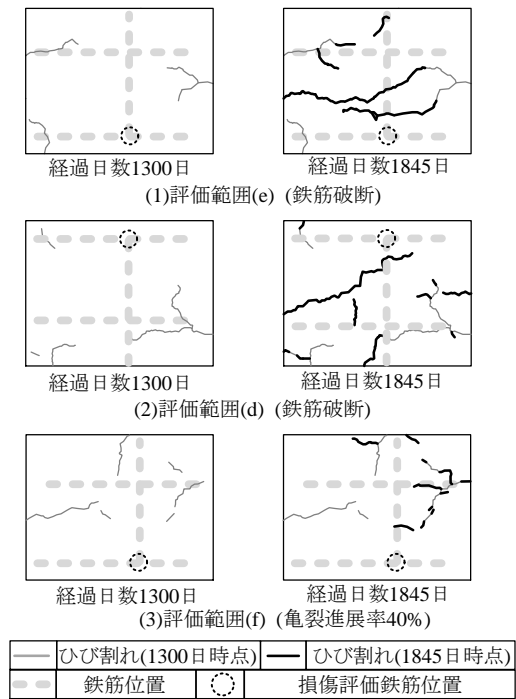


図-9 ひび割れ状況の比較

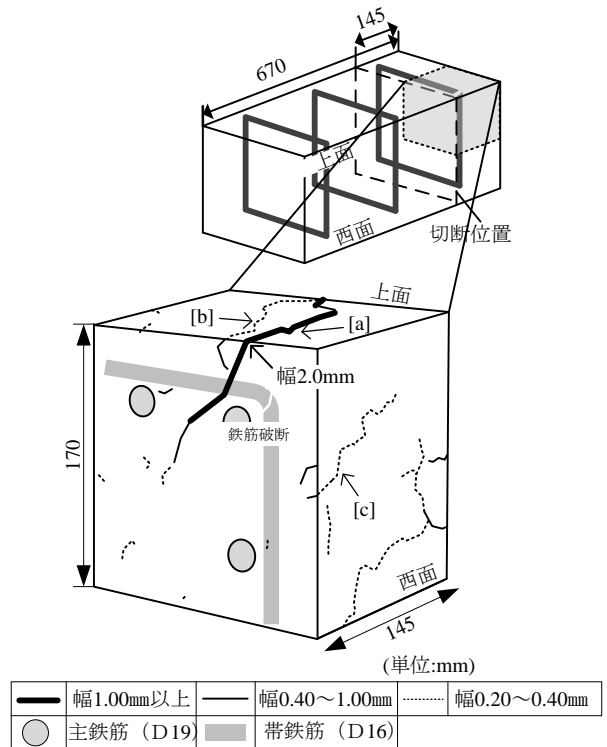


図-10 破断周辺のひび割れ状況

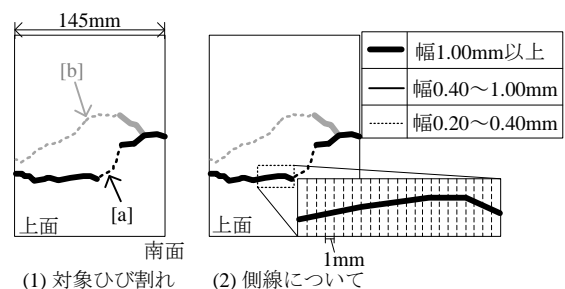


図-11 測線位置とひび割れ幅の分析手法

ら 45mm～145mm 位置においてはひび割れの発生が確認されなかった。経過日数 1845 日になると、0～18mm 位置において 0.6mm から 3.0mm へと急激なひび割れ幅の増加が確認され、ひび割れが発生していなかった 45mm～145mm の位置において幅 1.5mm ものひび割れが発生しており、1300 日から 1845 日にかけて[a]のひび割れ幅は全体的に著しく進展していた。

以上より、鉄筋破断による特異的な内部ひび割れの発生に併せて供試体表面でも急激なひび割れ幅の増加が生じたと考えられた。

4 破面状況について

本章では、case7 供試体の破断鉄筋に対して SEM 観察を実施した結果を実構造物の破面状況と比較することで ASR による鉄筋破断の再現性について検討した。

4.1 実構造物の破面状況

実構造物における破断鉄筋に対して SEM 観察を行った例は、阪神高速道路の例⁴⁾、北陸地方の例⁵⁾、沖縄地方の例⁶⁾を含めると合計 10 ケースあるが、破面に腐食が生じたことで破面観察が十分に行えていないケースもある。表-2 に腐食の影響が小さく破面の形態を観察できている 5 ケースの鉄筋損傷状況について示す。表に示すように、破断は竹節形状鉄筋のみならず、比較的亀裂が進展しにくいとされている波節形状鉄筋においても確認された。また、いずれの鉄筋破面にも初期亀裂の発生が見られ、この初期亀裂を起点に亀裂が進展しているが、脆性破面のみで破断に至ったパターンと脆性破面中に延性破面が見られたパターンの 2 パターンに分けられた。これらの破面模式図について図-13 に示す。

パターン 1 は、図-13(1)のように初期亀裂を起点に亀裂が伝播し破断に至ったとされている。このとき、破面は全体的に擬へき・へき開破面(脆性破壊)の様相を呈している⁴⁾。パターン 2 も、図-13(2)に示すように初期亀裂を起点として亀裂が伝播し破断に至っている。このとき、破面は全体的に擬へき・へき開破面(脆性破壊)の様相を呈しているが、パターン 1 とは異なりパターン 2 では、鉄筋径に対して約 40%の位置においてディンプル破面(延性破壊)が発生している。これより、延性破壊が確認された位置で亀裂は停止し、再度 ASR による膨張によって、亀裂が発生・伝播したことで、鉄筋は破断に至ったとされている⁵⁾。

以上より、ASR による実構造物の鉄筋破断は、脆性破面中に延性破面発生の有無はあるものの、初期亀裂を起点とし最終的に脆性破壊によって生じるものと判断した。

4.2 case7 供試体の破面状況

case7 供試体から破断鉄筋破面に対して SEM 観察を行

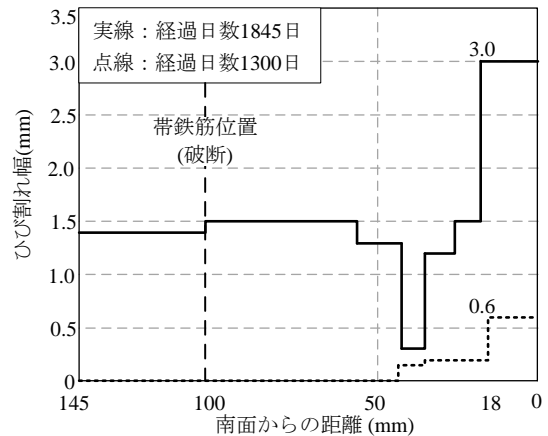


図-12 破断周辺ひび割れ幅分布の経時変化

表-2 実構造物の鉄筋損傷状況

	節形状	初期亀裂	破面形態
A	波節	有	脆性破壊のみ
B	竹節	有	脆性破壊のみ
C	竹節	有	脆性破壊のみ
D	竹節	有	脆性破壊+延性破壊
E	竹節	有	脆性破壊+延性破壊

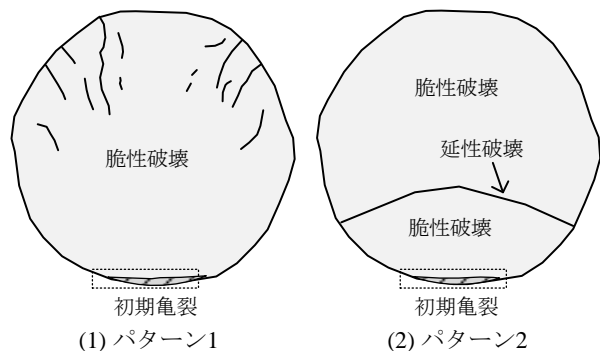


図-13 実構造物の破面模式図

った。図-14 に破断鉄筋の破面状況を示す。なお、図-14(1)には破面の全体、(2)には(1)の(A)～(F)における SEM 観察結果、(3)では、SEM 観察結果より推測される破面模式図について示している。図中(A)は初期亀裂と考えられる箇所であり、延性的に破壊していた。破面は全体的に、図中(B)、(D)、(F)の位置のように、擬へき開破面の様相を呈しており、脆性破壊によって亀裂は進展し、最終的に脆性破壊によって鉄筋破断に至っている。また、(B)、(D)および(D)、(F)間には、段差が生じており、帯状ではないが図中(C)、(E)のように部分的にディンプル破面(延性破面)が観察された。このことから case7 供試体の鉄筋破面は、図-13(2)のパターン 2 と同様に脆性破面中に延性破面が存在するような形態となっていた。

以上より case7 供試体の破断鉄筋は、初期亀裂を起点

とし、脆性破壊によって破断に至ったことから、実構造物と同様に破断したと判断された。また、図-14(3)に示すように、case7 供試体の鉄筋破面では脆性破面中に、鉄筋径に対して約 40%位置、約 70%位置に延性破壊が確認されている。この位置において鉄筋亀裂は停止し、再度 ASR による膨張により亀裂は進展し破断に至るような損傷形態であった。

5. まとめ

反応性骨材を用いた RC 供試体を作製し長期屋外暴露実験を実施した。以下に、外観ひび割れの経時変化と鉄筋損傷について本研究の範囲内で得られた結果を示す。

- 1) 1845 日間屋外暴露実験を行った供試体(以下、case7 供試体)の幅 0.2mm 以上の外観ひび割れ密度は $9.14\text{m}^2/\text{m}^2$ となっており、ひび割れ密度は、暴露時間の経過に伴って増加する傾向を示していた。また、case7 供試体において、幅 0.20mm 以上のひび割れは、主に主鉄筋の方向に発生し、また、このひび割れを結ぶように幅 0.05mm 以上 0.20mm 未満のひび割れが亀甲状に発生していた。
- 2) case7 供試体から鉄筋をはつり出した結果、鉄筋破断と亀裂進展率(亀裂深さ/鉄筋径)40%の損傷鉄筋が確認された。破断鉄筋周辺と鉄筋亀裂進展率 40%の評価範囲における外観ひび割れ密度は、経過日数 1845 日においてそれぞれ $17.8\text{m}^2/\text{m}^2$ 、 $12.0\text{m}^2/\text{m}^2$ と非常に大きな値を示していた。しかし、亀裂進展率 40%周辺の外観ひび割れは、単調増加する傾向に対して、破断周辺は、暴露開始から 1300 日から 1845 日にかけて急激に増加しており進展傾向に差が生じていた。これは、鉄筋破断周辺では鉄筋の拘束力の低下により、ひび割れは進展しやすい状況であったためと考えられる。
- 3) 破断鉄筋周辺において、経過日数 1300 日から 1845 日にかけて幅が急激に増加したひび割れが確認された。このひび割れは、内部において幅 2.0mm の帯鉄筋位置を跨ぐひび割れと接続していた。一方、内部においてかぶりより浅い位置で収束していたひび割れと接続する表面ひび割れ幅の増加は僅かであった。以上より、帯鉄筋位置を貫通するような内部ひび割れの発生に併せて急激な幅の増加が発生すると推測された。
- 4) case7 供試体の鉄筋破断面に対して SEM 観察を行った。その結果、初期亀裂を起点とし、脆性破壊によって破断に至ったことから、実構造物と同様に破断したと考えられ、ASR による鉄筋破断を模擬できたと判断された。

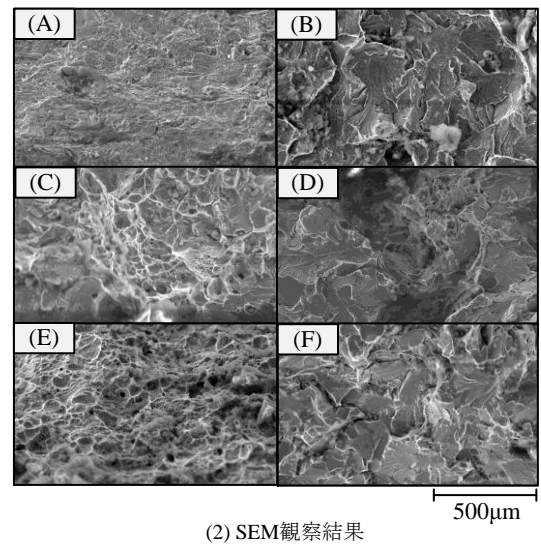
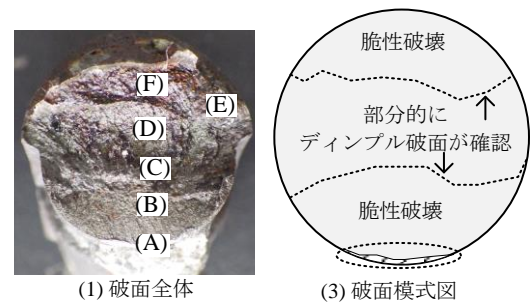


図-14 破断鉄筋破面状況(case7)

参考文献

- 1) 例えば、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. 989-994，2010.7
- 2) 例えば、増田隆宏，幸左賢二，草野昌夫，合田寛基：ASR 供試体を用いた実構造物内の鉄筋損傷評価，コンクリート年次論文集，Vol.31，No.1，pp. 1207-1212，2009.7
- 3) 阪神高速道路公団：コンクリート構造物の健全度に関する調査研究業務(その3)報告書，(財)阪神高速道路管理技術センター，1985.9
- 4) 佐々木一則：アルカリ骨材反応を生じた鉄筋コンクリート構造物の鉄筋破断原因究明と維持管理方法に関する研究，京都大学博士論文，pp. 60-69，2011
- 5) 樽井敏三，鳥居和之：アルカリシリカ反応による鉄筋破断機構，材料と環境，Vol. 59，No. 4，pp. 143-150，2010
- 6) 沿岸技術研究センター：平成 16 年度那覇港臨港道路泊大橋橋脚劣化調査検討委員会 第 2 回委員会資料，一般財団法人沿岸技術センター，2005.2