論文 ASR 膨張を模擬した供試体による鉄筋破断再現実験

柴田 綾野*1・幸左 賢二*2・草野 昌夫*3・西岡 勉*4

要旨:本研究では,鉄筋破断が外観損傷に与える影響について検討するために, ASR による膨張を膨張モル タルで模擬した供試体実験を実施した。この実験において,磁束密度の計測により破断時期を特定し,破断 時期と外観の経時変化を対応させることで破断に起因する外観損傷の特徴を検討した。その結果,本実験で は破断箇所外観で7mmの段差が確認された。これは破断が膨張初期で生じたため,その後も膨張が作用し破 断箇所に変形が集中することが要因として考えられた。また,内部損傷の観察から,内部からの膨張を受け, 帯鉄筋が曲げ戻されることで未破断箇所ではコンクリートと鉄筋の付着切れが生じる可能性を示唆した。 キーワード:アルカリ骨材反応,鉄筋破断時期,内部損傷

1. はじめに

ASR の著しく進行した構造物において,鉄筋の曲げ加 工部や圧接部で破断や亀裂が数多く確認されており¹⁾, 破断鉄筋の補強などの早急な対応が求められることか ら,破断の確認調査が行われている。鉄筋破断の確認は, はつり調査を行うのが一般的であるが,はつり調査は構 造物の躯体を傷つけるため,事前に外観損傷などから調 査箇所を絞り込むことが望ましい。しかしながら,鉄筋 破断箇所の外観劣化状況の特徴や,鉄筋破断が外観劣化 に与える影響について詳細に検討を行った例は少ない。

図-1に研究フローを示す。本研究では実構造物を 1/4 でモデル化して内部からの ASR 膨張を膨張モルタルで 模擬した供試体を用いた実験を実施した。この供試体で 鉄筋破断時期の特定,外観劣化の経時変化の計測を行い, ひび割れ,変形など外観損傷の経時変化と破断時期を対 応させ,破断が外観損傷に与える影響について検討を行 った。また,供試体隅角部断面を観察することで,内部 からの膨張を受けた鉄筋曲げ加工部に生じる破断など の内部損傷が外観損傷に与える影響について検討を行 った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に使用した供試体の形状および配筋形状を図-2 に示す。一般的に ASR 反応が顕在化するのに数年を要す るが、本実験では供試体内部に膨張モルタルを適用する ことで ASR 反応における内部からの膨張を短期間で模 擬した。ここで、供試体全断面を膨張モルタルとすると、 供試体自体が崩壊し、鉄筋とコンクリートの付着が保て ず内部からの膨張力を鉄筋に伝達できない場合がある。



そこで本実験では、鉄筋とコンクリートの付着が保たれた状態で、内部からの膨張により鉄筋が破断した場合を再現するため、普通コンクリートの断面中心を正方形状の中空とし、中空部分に膨張モルタルを打設することで内部からの膨張を模擬した。供試体寸法は916mm×916mm×1600mm、膨張モルタルの打設面積は456mm×456mmとし、帯鉄筋比は実際に鉄筋破断が確認されてい

*1 九州工業大学大学院 工学府 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式会社 セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)
*4 阪神高速技術株式会社 技術部 (正会員)

る橋脚と同様の0.22%とした。帯鉄筋は図中に示すよう に現行鉄筋, B鉄筋,C鉄筋を同一断面内に配置するた めフレア溶接を施した。また,B,C鉄筋は実際に鉄筋 破断が生じた実構造物からはつり出したものである。

2.1 計測項目及び方法

本実験では鉄筋破断時期がひび割れ,変形等の外観劣 化に与える影響の検討と,内部鉄筋の挙動を把握し破断 が外観に与える影響の要因を明らかにすることを目的 としている。そこで本供試体では外観のひび割れや変形, 磁束密度による破断時期の判定,帯鉄筋位置での供試体 断面観察を行った。

(1) ひび割れ計測

ひび割れ,変形の測定方法を図-3に示す。ひび割れ 計測の対象面は側面4面と上面とした.対象ひび割れは, 幅0.05mm以上のものとし,図-3(1)に示すように 100mm間隔で引いた測線に交わる位置でひび割れ幅を 測定した。なお,測定はひび割れ発生確認後より計測を 開始し,膨張速度が速く劣化進展が顕著である期間は0.5 時間ピッチ,ひび割れ発生が収束してからは1~2時間ピ ッチで計測を実施した。

(2) 変形計測

変形計測箇所は 200mm 間隔で配置した各帯鉄筋断面 とし、初期値と最終値は1段目から8段目までの全帯鉄 筋断面,膨張試験中の計測は,帯鉄筋1,3,5,7 段目 を対象として計測を行っている。測定方法は図-3(2) に 示すように帯鉄筋位置にアングルを配置し,精度 1mm の差し金を用いて,アングルと供試体間の距離を測定し た。測定点は図中に示すように供試体の端点[3]より 40mm,以降は100mm 間隔とした。膨張に伴う変形量は, 図中に示すように初期の測定長さ[1]から,膨張後の 測定長さ[2]を差し引くことで算出した。測定はひび 割れ測定と同様のピッチで行った。なお,試験中におけ る室温の変化は 5℃程度であり,アングルの熱膨張の影 響は小さいと判断した。

(3)破断時期の判定

図-4 に外観から鉄筋破断位置を特定する方法を示す。 図中(1)に示すのは鉄筋の着磁法である。鉄筋は強磁性体 であり,図に示すように磁石を近づけると鉄筋自体が磁 気を帯び,磁束を発生する。この現象を利用してコンク リート表面から鉄筋位置で磁石を滑らせることで鉄筋 に磁束を発生させる。この鉄筋から発生する磁束を図中 (2)に示すようにコンクリート表面の鉄筋位置で磁気セ ンサーを滑らせ,その変化を計測する。鉄筋が健全であ れば磁束密度は乱れないが,図中(2)に示すように鉄筋破 断が発生すると破断箇所で漏洩磁束が発生し,健全時か ら磁束が変化するため,その差を比較することで破断の 判断を行う。詳細は3章で後述するが今回の実験では上



記の測定を膨張モルタル打設前に実施し,膨張試験中は ひび割れ・変形計測と同様のピッチで計測した。計測を 行った箇所は全断面の隅角部計 32 箇所である。

(4) 帯鉄筋断面観察

図-5 に帯鉄筋断面の観察方法を示す。断面のはつり 出しは膨張試験終了後,図中(1)に示すようにコンクリー トのかぶり部分に大型カッターで切り込みを入れ,その 後図中(2)に示すように鉄筋隅角部周辺のコンクリート を保持した状態で帯鉄筋周辺の状況を写真で記録した。 断面の計測は1段目から順に下方に向けて行い,4つの 隅角部すべての計32箇所の断面を観察した。

3. 外観損傷状況の経時変化

3.1 破断時期,破断箇所の特定

本実験における供試体の鉄筋破断箇所を図-6 に示す。 図中に示すように3段目位置の現行鉄筋曲げ加工部で1 箇所の破断が確認された。また4章に後述するが,鉄筋 の破断は曲げ加工によってつぶれた節の付け根に沿っ て生じており,鉄筋破断面は実構造物で破断が確認され ている鉄筋と同様に,伸びや絞りが見られない脆性破面 となっていた。

図-7(1)に帯鉄筋の破断が磁束密度に与える影響の一 例として,破断鉄筋と健全鉄筋を模擬した供試体におけ る磁束密度の計測例を示す。ここでの着目箇所は構造物 での破断が多く報告されている帯鉄筋の曲げ加工部と し、曲げ加工部位置を 0m として供試体表面上の磁束密 度の計測を行っている。図に示すように健全鉄筋の場合 は曲げ加工部から±0.1m 範囲の磁束密度の変化量が約 50µT と小さいが,破断鉄筋の場合は約 450µT と変化量 が大きいことが分かる。この磁束密度の変化量の計測を 経時的に行うことで破断が生じた時期を特定すること が可能と考えられる。図-7(2)に本実験における鉄筋破 断箇所での磁束密度の計測結果を示す。これは、図-6 に示す鉄筋破断を確認した3段目での膨張モルタル打設 前と打設 2.8 時間後における磁束密度の計測結果となっ ている。今回の実験では、膨張モルタル打設 2.8 時間後 に鉄筋破断音が発生し、その後ただちに磁束密度の計測 を実施した。その結果,図中に示すように、膨張モルタ ル打設前の曲げ加工部から±0.1m 範囲の磁束密度の変 化量は約 15µT であるのに対し,破断音発生後に計測し た打設 2.8 時間後の場合の磁束密度の変化量は約 310uT となった。この結果から、モルタル打設 2.8 時間後を鉄 筋破断時期と判断した。

3.2 破断時期と外観経時変化の関係

図-8 にひび割れ損傷状況と測線ひずみの経時変化を 示す。ここに示す測線ひずみは、図-3(1)で計測したひ び割れ幅の合計を測線長 680mm で除した値を平均した



ものである。図中(1)に示すのは図-6に示す破断が発生 した箇所を含む側面2のひび割れ状況の経時変化,図中 (2)に示すのは側面1,2の測線ひずみの経時変化であり, 図中(1)の[1],[2],[3]は図中(2)の[1],[2],[3]と対応して いる。

本供試体では膨張モルタル打設 1.8 時間後にひび割れ の発生を確認し、以降前述した外観ひび割れの計測を実 施している。ひび割れ状況の経時変化に着目すると、鉄 筋破断前は供試体下面から幅 0.2mm 以下の微細なひび 割れが発生し、測線ひずみは 18µ であった。鉄筋破断時 には、供試体の側面全体にひび割れの発生が確認され、 幅も 0.2mm 以上に成長し測線ひずみは 498µ,幅 0.2mm 以上のひび割れを対象としたひび割れ密度は 1.07m/m² となった。その後膨張が収束するまでに、新規ひび割れ の発生や幅の成長が確認され、最終的な測線ひずみは 4123μ, ひび割れ密度は 3.51m/m²となった。また, 図中 (1)のひび割れ損傷の最終状況に示すように側面2では鉄 筋破断箇所を含む隅角部で幅の大きなひび割れが集中 して発生する傾向を確認した。ここで, 側面 1, 側面 2 の測線ひずみの経時変化に着目する。鉄筋破断時までは 側面 1, 2 の測線ひずみの値に差は見られないが, 鉄筋 破断の直後から最終までの間に側面 1 と側面 2 で測線ひ ずみの経時変化に大きな差が生じている。これは側面 2 の図中 A (破線囲み)に示す破断箇所を含む隅角部に発 生したひび割れが要因であると考えられる。また, 鉄筋 破断後の膨張モルタル打設 2.8 時間後以降も側面 1, 2 の 測線ひずみは進展していることから, 鉄筋破断は膨張の 初期の段階で発生しており, 鉄筋破断後も膨張が作用し ていると考えられる。

図-9 に供試体帯鉄筋位置での断面変形状況,図-10 に断面の面積増加率の経時変化を示す。なお,面積増加 率は以下に示す式(1)によって算出した。

図-9(1)に示すのが鉄筋破断の生じた帯鉄筋3段目の 断面変形状況,図-9(2)に示すのが鉄筋破断が生じてい ない未破断断面の帯鉄筋5段目の断面変形状況となって いる。ここで破断を生じた隅角部の含む2面を破断側, 破断側と対になる2面を未破断側とした。両者の最終変 形状況に着目すると,破断断面の破断側の面積増加量が 9312mm², 未破断側の面積増加量が4799mm², 未破断断 面の破断側の面積増加量が 6813mm², 未破断側の面積増 加量が4275mm²となっており、どちらも破断側の面積増 加量が大きくなる結果となった。次に面積増加率の経時 変化に着目する。図-10に示すように破断時までは破断 側、未破断側に大きな違いは見られないが、破断時から 最終までの間に破断側と未破断側の面積増加率の経時 変化に大きな差が生じている。また、断面の最終変形状 況からもわかるように,破断側,未破断側の面積増加量 の差は、未破断断面と比較して破断断面のほうが大きく なっている。この結果より、今回の実験のように鉄筋の 破断が早い段階で発生しその後も引き続き膨張が作用 する場合,破断が生じた隅角部では未破断箇所と比較し て面積増加量が大きくなり、その傾向は破断断面で最も 顕著になることを確認した。

3.3 破断箇所の外観損傷状況

前述したように破断が生じた隅角部では未破断隅角 部と比較してひび割れや面積増加量に差が見られた。そ こで本節では破断を生じた隅角部の損傷状況を詳細に 観察することで破断箇所の特徴について検討を行った。 図-11に破断隅角部の破断時と最終の損傷状況、未破



断隅角部の最終損傷状況を示す。なお図中(1),(2),(3) に示すのは,破断隅角部の破断時の損傷状況,最終損傷 状況,破断箇所の最終損傷となっており,図中(4)に示す のは未破断隅角部の最終損傷状況となっている。

また隅角部のひび割れは供試体の隅から 240mm 以内 に発生していたことから, 詳細観察は隅角部から 240mm 範囲を対象としている。

まず,鉄筋破断と判断した膨張モルタル打設から 2.8 時間後までの破断隅角部と未破断隅角部の挙動に着目 する。図中(1)に示すように,破断時の破断隅角部では, 拘束力の弱い供試体下面からひび割れが進展しており, 段差 3mm,ひび割れ幅 2mm となっていた。その他の未 破断隅角部の破断時における損傷も同様であり,破断が 生じたと考えられる打設 2.8 時間後の損傷状況は破断隅 角部,未破断隅角部に明確な違いは見られなかった。ま たこの時点では,破断隅角部ではひび割れが破断箇所に 達しておらず,破断箇所には外観上ひび割れが発生して いなかった。

次に、鉄筋破断以降の挙動について、破断隅角部と未 破断隅角部の比較を行う。破断隅角部においては、破断 後1時間でひび割れが上下端面に貫通するように発生し, 図中(1),(2)に示すように鉄筋破断時から打設後8時間後 の最終までの間に帯鉄筋3段目の破断箇所で段差が最も 大きくなった.破断箇所の最終状況を確認すると、図中 (3)に示すように段差が 7mm, ひび割れ幅が 3mm となり 破断箇所を中心として段差が上下に広がり,破断箇所に 損傷が集中するような特徴的な挙動を確認した。一方, 図中(4)に示すように未破断隅角部においては、拘束が弱 い供試体上面で, 段差 3mm, ひび割れ幅 0.7mm と比較 的大きな値とはなっているが,全体として損傷が小さく, ひび割れも上下面を貫通していない。この結果から,本 実験における破断隅角部の損傷の特徴として、鉄筋破断 が膨張の初期段階で発生し鉄筋破断後も膨張が作用す る場合は、破断箇所を中心にひび割れや段差が隅角部の 広い範囲で連続的に生じることを確認した。特に破断に よって拘束が弱くなった箇所の付近では、大きな段差が 発生することで変形が大きくなると考えられる。

4. 内部損傷状況

4.1 鉄筋破断状況

図-12 に本実験における鉄筋破断断面の状況と鉄筋破 断発生位置,実構造物における鉄筋破断面のマクロ写真 を示す。本実験における鉄筋破断面は比較的平坦で光沢 のある粒状破面であり,脆性的に破断した様相であった。 曲げ加工部外側の最終破断部にはシャーリップ(亀裂が 貫通する際に見られる引きちぎられたような帯状の部 分)が認められた。加えて,曲げ加工部内側の初期亀裂 発生位置から曲げ加工部外側に向かって放射状模様が 認められ,亀裂が曲げ加工部内側から外側へ向かって進 展していることが分かる。このような鉄筋破断面は図中 (2)に示すように実構造物においても確認されている²⁾。 また,図中(3)に示すように本実験における鉄筋破断は, 曲げ加工によってつぶれた節の付け根から発生してい



図-12 鉄筋破断状況

ることから,曲げ加工によって発生した初期亀裂が破断 の要因であると考えられる。

既往の研究³⁾から,曲げ加工半径が今回のように1.0d と小さい場合には初期亀裂のばらつきが大きく,現行鉄 筋でも比較的大きな初期亀裂が発生する可能性が考え られる。したがって,今回破断した現行鉄筋には,曲げ 加工の際に他の鉄筋よりも大きな初期亀裂が生じたと 推察される。

4.2 破断断面,未破断断面の比較

図-13 に破断箇所と未破断箇所の供試体断面状況を 示す。図-13(1)の破断断面に着目すると,[1]に示すよう に幅 6mm 程度の大きなひび割れが,[2]の鉄筋破断箇所 に重なるようにしてかぶり部分から帯鉄筋の内側まで 発生している。また,ひび割れが発生していないコンク リート部分では,鉄筋とコンクリートの付着が保たれて おり,図中[3]のように鉄筋の破断箇所では,破断面同士 が 3mm ほどずれるような変形となっていることを確認 した。本実験では,破断断面に鉄筋破断後も膨張が作用 することによって図中に示す破断箇所に変形が集中し, 外観と同様に内部においても幅の大きなひび割れが発 生したと考えられる。

図-13(2)に示す未破断断面においては、かぶり部分に 発生しているひび割れ幅が図中[4]に示すように 3mm と 破断箇所の内部ひび割れと比較して小さく、帯鉄筋内側 にひび割れの発生は確認されなかった。また、この未破 断断面では帯鉄筋曲げ加工部の外側にコンクリートと の付着切れを確認した。[5]に示す付着切れの範囲は曲げ 加工部範囲の 50mm を含む 73mm となっており、[6]に示 す付着切れ幅は 1~2mm 程度であった。

以上の結果から,破断断面と未破断断面における内部 鉄筋の挙動ついて以下に示す。前述したように本実験の ように早い段階で破断が生じた箇所では,破断後も膨張 が作用することで,破断位置で変形が局所化し,外観に 特徴的な損傷を生じる要因となることが考えられる。ま た,図中に示す破断箇所から外れる位置で変形は生じに くいため,コンクリートと鉄筋の付着は保たれると推察 される。一方未破断箇所では,破断箇所のように変形が 局所化せず,曲げ加工部全体が変形を負担するため,図 -13(2)の模式図に示すようにコンクリートと鉄筋の間 に付着切れが生じやすいと考えられる。

5 まとめ

本研究では,膨張コンクリートを用いて ASR を模擬 した供試体において,磁束密度による鉄筋破断時期の特 定と,破断の前後における外観損傷の経時変化,破断断 面・未破断断面の詳細な計測を実施し,以下の知見が得 られた。



- (1) 膨張モルタルを使用し ASR 劣化を模擬した供試体 実験で,鉄筋の破断が発生した箇所の外観のひび割 れと変形量を計測した。その結果,破断箇所近傍で 最も大きな段差が生じ,破断が生じた箇所の外観で は幅 3mm,段差 7mmの損傷を確認した。
- (2) 鉄筋破断断面と未破断断面の観察より,破断箇所では鉄筋とコンクリートの付着が保たれているのに対し,未破断箇所では鉄筋とコンクリートの付着切れが確認された。これは破断箇所では鉄筋の変形が局所化し,コンクリートと鉄筋の付着が保たれたためと考えられる。また,未破断箇所の付着切れは帯鉄筋曲げ加工部が内部からの膨張を受けることで生じた曲げ戻しの変形によって発生したと推察される。
- (3) 内部鉄筋の磁束密度の経時的な計測から破断時期 を特定し,破断の前後における外観損傷の経時変化 に着目した。その結果,今回の実験では鉄筋破断の 発生が膨張の初期段階で確認されるとともに,破断 時から最終に至る過程で,破断箇所では未破断箇所 には見られない大きな段差が生じていることを確 認した。このことから,鉄筋破断後も膨張が作用し 続ける場合は,破断箇所に変形が集中するため,外 観には段差などの特徴的な損傷を生じる場合があ ると考えられる。

参考文献

- 土木学会:アルカリ骨材反応対策小委員会報告書 -鉄筋破断と新たなる対応 - , コンクリートライブ ラリ, No.124 , pp.I-2-I-77, 2005.
- 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 工博第 3453 号, pp.160, 2011.9
- 川島恭志,幸左賢二,合田寛基,興梠展朗:ASR 実 構造物の鉄筋損傷に対する初期損傷の影響,コンク リート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1029 - 1034, 2008.7