

# 論文 大型 ASR 模擬供試体を使用した鉄筋破断再現実験

柴田 綾野\*1・幸左 賢二\*2・草野 昌夫\*3・合田 寛基\*4

**要旨:** 本研究は ASR の進行が鉄筋の曲げ加工部の損傷に及ぼす影響を把握し、亀裂進展原因の解明を目的とし、ASR 膨張を模擬した実構造物の 1/4 寸法の大型供試体を用いて、供試体内部で膨張圧を受けた場合の外観劣化の進展、鉄筋亀裂の進展を実験的に検討した。その結果、必ずしも外観のひび割れ、角度変形に比例して鉄筋亀裂が進展するのではなく、特定の旧基準節形状鉄筋においては角度進展量が小さい場合でも、急激に亀裂進展、破断が生じることを明らかにした。

**キーワード:** ASR, 鉄筋破断, 変形状

## 1. はじめに

ASR の著しく進行したコンクリート構造物において、鉄筋の曲げ加工部や圧接部で亀裂・鉄筋破断が数多く確認されている<sup>1)</sup>が、ASR の進行が鉄筋の損傷・破断に及ぼす影響は明らかになっていない。

図-1 に本研究フローを示す。過年度の研究<sup>2)</sup>では普通コンクリートの中空部分に膨張コンクリートを打設し、鉄筋種別、曲げ加工半径、環境条件をパラメータとした ASR 実橋脚に対して 1/8 寸法の小型供試体 case1~10 で実験を行い、内部膨張による鉄筋破断が本供試体で再現できること、現行鉄筋に比べて旧基準鉄筋で特に破断が顕著であることを確認した。また、外観劣化を実構造物に近づけるため供試体寸法を 1/8 から 1/4 に大型化し、帯鉄筋比、鉄筋種別、膨張量、曲げ加工半径をパラメータとした大型供試体 case11~15<sup>3)</sup>においては、帯鉄筋の変形に伴って供試体表面が丸く膨らむような変形すること、それに伴い、破断箇所で 2.0° 程度供試体の角度進展を確認した。

本研究では、これらの研究成果を基に、破断が生じやすい鉄筋を用いて破断の有無の相違点に着目した実験について考察する。具体的には、帯鉄筋比をパラメータとした供試体を作製し、発生した鉄筋破断箇所と未破断箇所について、外観劣化状況の比較を実施した。また、併せて帯鉄筋の破断の有無に着目した非破壊試験の適用性を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

図-2 に大型供試体 case11~15 のうち、case13, 15 の供試体形状、配筋形状を示す。本検討では、同一形状で帯鉄筋比を case13 では 0.22%、case15 では 0.31% と変化させ

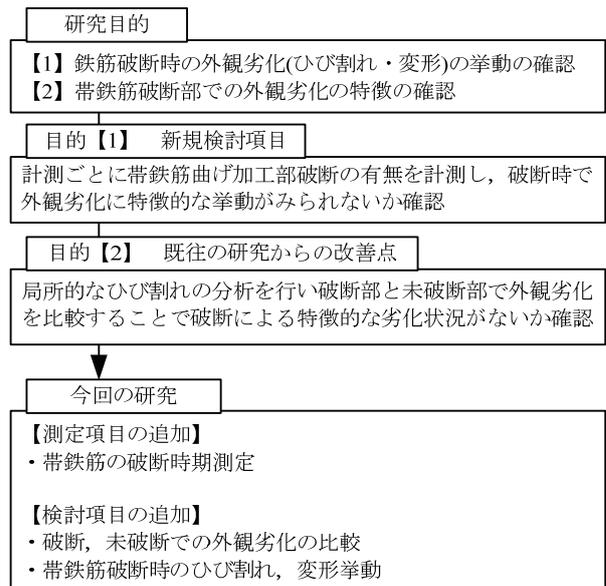


図-1 研究フロー

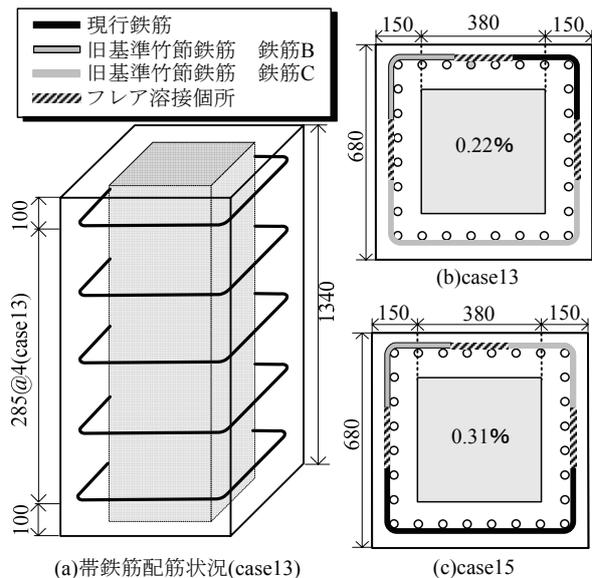


図-2 供試体形状

\*1 九州工業大学 工学部建設社会工学科 (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 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 九州工業大学大学院 工学研究科機能システム工学専攻 工博 (正会員)

ている。

図に示すようにASRにより内部に生じる膨張と、外観に生じる劣化状況を再現するため、膨張コンクリートを普通コンクリートの中央部に打設できるように中空形状を適用しており、普通コンクリートの強度は、実際に鉄筋破断が生じた単柱式橋脚RC梁の設計基準強度である27N/mm<sup>2</sup>を使用した。実強度はシリンダー試験によって確認しておりcase13で35N/mm<sup>2</sup>、case15で40N/mm<sup>2</sup>であった。また、膨張コンクリートに関しては、既往の研究<sup>2)</sup>と同条件の単位膨張量200kg/m<sup>3</sup>を使用し、著しい劣化状況を模擬した。

case13は図-2(a)に示すように、鉄筋破断が確認されている実橋脚の梁部と同様の帯鉄筋間隔285mm、帯鉄筋比を0.22%、また主鉄筋はD25鉄筋28本を使用して、主鉄筋比3.0%とした。鉄筋の曲げ加工半径は実際に使用される2.00dに対して厳しい条件である1.00dとしており、帯鉄筋は図-2(b)に示すように現行基準節D16鉄筋(以降、現行鉄筋)、旧基準竹節D16鉄筋2種(以降、B鉄筋、C鉄筋)を使用した。

B鉄筋およびC鉄筋は、それぞれ実際に鉄筋破断が生じた実構造物からは取り出したものである。図-3に今回使用した鉄筋の節形状を示す。鉄筋に発生する初期亀裂は鉄筋の節高さ、節変化率φ(図-3に示す節変化部の直線部の延長と、鉄筋の直線部の延長に接する円の直径)が影響を与えることが確認されている。今回使用した鉄筋においては、現行鉄筋で節高さ0.80mm、節変化7.1mm、と最も緩やかな節形状を有していた。B鉄筋で節高さ1.12mm、節変化率1.1mm、C鉄筋で節高さ1.22mm、節変化率0.9mmと、B、C鉄筋において節が高く、急激な節の立ち上がりを有していた。

以上の鉄筋を供試体の帯鉄筋として使用する際、加工後の鉄筋を120℃で10時間加熱処理し、ひずみ時効の再現を行った。

また、case15では図-2(c)に示すようにcase13と同様の3種の鉄筋を使用し、帯鉄筋曲げ加工部の箇所をcase13の現行鉄筋1箇所から2箇所、C鉄筋2箇所から1箇所に変更し、帯鉄筋間隔を190mm、帯鉄筋比0.31%に変更した。

## 2.2 各測定方法、測定ピッチ

### (1) ひび割れ測定(膨張量)

ひび割れ測定は図-4に示すように、鉄筋曲げ加工部を挟んだ供試体側面2面でひび割れをスケッチした。また、ひび割れ幅は0.05mm以上を対象とし、100mm間隔で主鉄筋軸直角方向に測線を計13本引き、測線に重なる位置で測定した。なお、測線ひずみは式(1)で算出した。

$$(\text{測線ひずみ}) = \frac{(\text{ひび割れ幅合計})}{(\text{測線長})} \quad (1)$$



図-3 使用鉄筋節形状

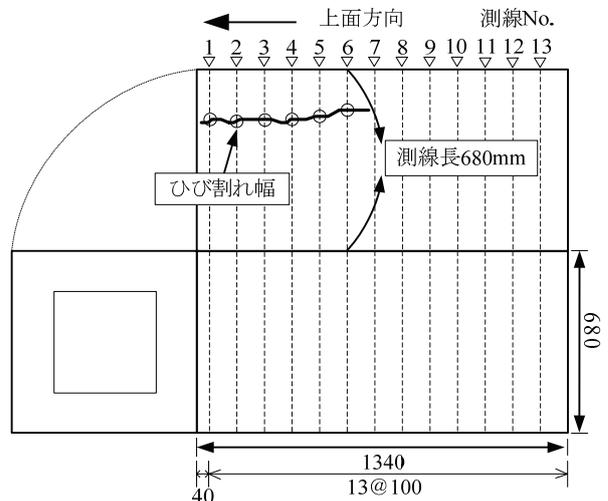


図-4 ひび割れ測定

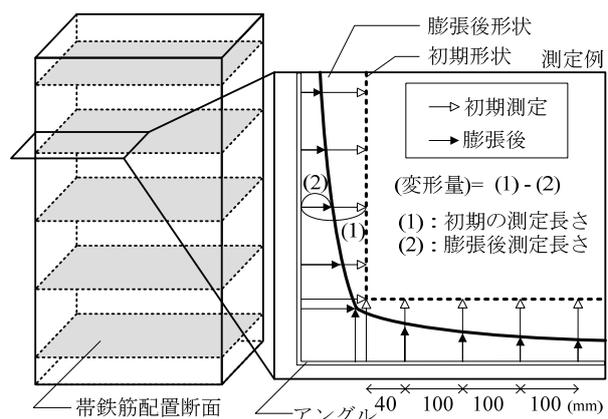


図-5 変形測定

測定はひび割れ発生確認後より開始し、実験実施時期が9月であったため膨張速度が速く劣化進展が顕著であるcase13は1時間間隔、打設時期が12月でひび割れの進展が比較的穏やかなcase15は2時間間隔で計測を実施した。

### (2) 変形量測定

case13, 15における変形計測は図-5に示すように各帯鉄筋断面を詳細に測定するため、供試体側面の各帯鉄筋位置における断面変形を測定した。

測定方法は帯鉄筋位置にアングルを配置し、供試体の端点より40mm、100mm間隔の位置から差し金(1mm目量)を用いて、水平に長さを測定した。膨張に伴う変形量は、図中に示すように初期の測定長さから、膨張後の測定長さを差し引くことで算出した。計測時間間隔はひび割れ測定と同間隔で行った。

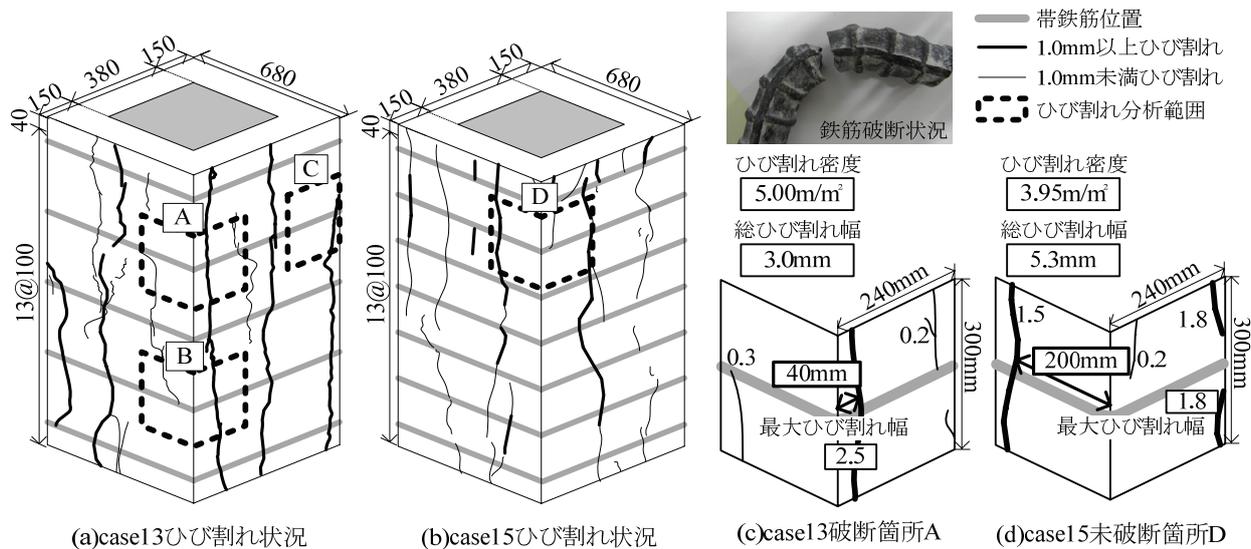


図-7 case13, 15 ひび割れ状況・分析箇所

### 3. 実験結果

#### 3.1 ひび割れ性状

図-6に、計測されたcase13, 15の測線ひずみとひび割れ密度の関係を示す。測線ひずみの対象ひび割れは幅0.05mm以上、ひび割れ密度の算出の対象ひび割れは幅0.2mm以上である。case13では打設後4.7時間でひび割れ密度、測線ひずみがそれぞれ6.04m/m<sup>2</sup>, 4740μ, case15では打設後7.7時間でそれぞれ4.62m/m<sup>2</sup>, 2007μとなり、ひび割れ密度、測線ひずみともに増加した。それ以降はひび割れ密度の進展が定常状態になり、測線ひずみのみが伸びている。これは新規ひび割れが発生せず、既存のひび割れ幅が進展したためであると考えられる。

最終段階での測線ひずみ、ひび割れ密度はcase13ではそれぞれ7010μ, 6.04m/m<sup>2</sup>, case15では、3914μ, 4.62m/m<sup>2</sup>となり、帯鉄筋比の増加によりcase15ではいずれも小さい値を示したが、両供試体ともに測線ひずみが4000μ程度見られており、劣化の終局状態を再現しているといえる。

図-7に、case13, 15の最終ひび割れ状況を示す。図-7 (a) よりcase13については供試体中央部と隅角部にそれぞれ供試体を上下に貫通するような幅の大きなひび割れが発生している。一方、図-7 (b) のcase15では供試体中央部付近にひび割れが発生し、隅角部でのひび割れの発生は少なかった。

ついで、本実験では、膨張終了後のはつり出しにより鉄筋破断が確認されたcase13と未破断のcase15の鉄筋破断・未破断箇所に着目したひび割れの分析を行った。case13では図-7 (a) より、鉄筋破断箇所A、Aと同一隅角部の未破断箇所B (4段目)、Aと同一断面の未破断箇所C (2段目) の3箇所を分析対象とした。case15では図-7 (b) よりAと同位置の分析箇所を1箇所設定し、未破断箇所D (2段目) とした。なお、鉄筋破断はcase13の破断

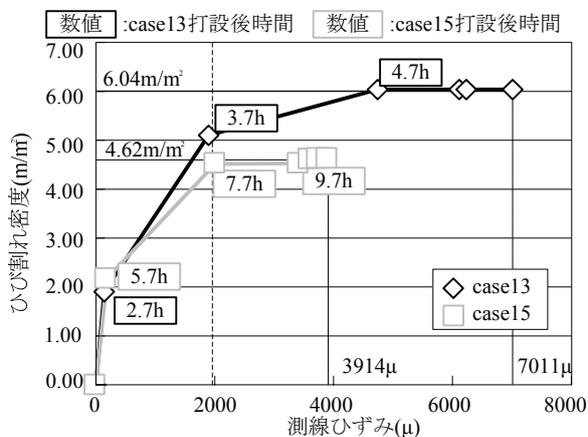


図-6 case13, 15 膨張特性

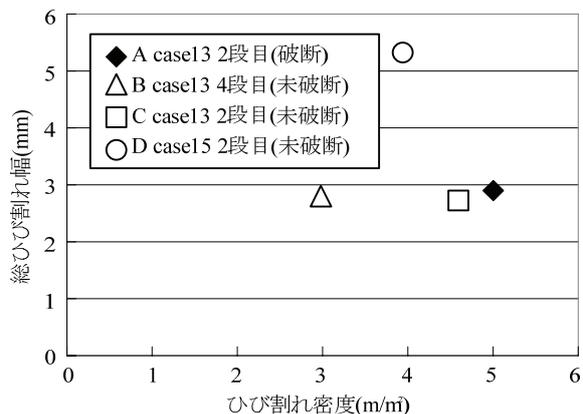


図-8 case13, 15 ひび割れ分析結果

箇所のみである。

分析範囲は、当該帯鉄筋を中心とするように、case13の帯鉄筋間隔285mmに近い値である高さ300mm, 当該帯鉄筋のコーナー部をはさみ、供試体の幅680mmの1/3に相当する幅240mmの範囲を対象とした。以上の分析範囲内に生じているひび割れについて幅、密度を合計し、分析範囲内に生じたひび割れの特徴について分析を行った。

図-7 (c), (d) では例としてcase13の破断箇所A, case15

の未破断箇所Dにおける分析結果を示す。 case13の破断箇所Aでは総ひび割れ幅3.0mm, ひび割れ密度5.00m/m<sup>2</sup>, case15未破断箇所Dについては総ひび割れ幅5.3mm, ひび割れ密度3.98m/m<sup>2</sup>となり, case15未破断箇所Dで総ひび割れ幅が多少大きくなる結果が得られた。これはひび割れ発生位置が, case13破断箇所Aにおいて隅角部から40mmであるのに対し, case15未破断箇所Dでは隅角部から200mmの位置で発生しており, 分析範囲内に幅の大きなひび割れが2本入ったため未破断箇所Dでの総ひび割れ幅が大きくなったためと考えられる。

図-8に4箇所のひび割れ密度, 総ひび割れ幅の分析結果を示す。総ひび割れ幅についてはcase13の3箇所ではいずれも3mm, case15で5mmとなっているが, 特に大きな差異は見られない。またひび割れ密度についても同様に破断箇所5m/m<sup>2</sup>とやや大きめとなったが, 特に大きな差異は認められない。以上をまとめるとひび割れにおいては破断箇所と未破断箇所では明確な差はなく, 破断箇所付近に特徴的なひび割れは認められなかった。

### 3.2 変形性状

帯鉄筋の亀裂進展と外観の変形との関係を確認するため, 帯鉄筋位置での供試体変形, 特に隅角部での角度進展に着目した。

図-9に供試体の角度進展測定方法を示す。供試体の端点aと, 端点から140mm(コンクリートかぶり厚プラス10φ)の変形測定点a, b, c点の3点の変位を測定することで角度進展の算出を行った。b, c点の変位についてはアングルを不動点とし, アングルから供試体までの垂直距離を膨張前後で測定することで算出した。端点aについては膨張によってアングルの不動点からずれるため, 膨張に合わせて2点からアングル供試体間の垂直距離を追従するように測定した。このa, b, cにおける3点の移動量を図中破線に示す初期状態からの距離として変形図を作成し, 角度を算出した。

図-10に供試体角度進展の測定例を示す。図に示すのはcase15, 2段目のC鉄筋側隅角部変形図である。

測定点b, c点での変位が4mm, 3mmと同程度, a点での変位が斜め方向に2.24mmとなった。図中の三角形abcから角度を算出し, 初期値90°からの角度の増加分1.62°を角度進展量とした。

鉄筋亀裂と隅角部における外観変形の関係を図-11に示す。亀裂進展量は, 膨張試験後に帯鉄筋をはつり出して曲げ加工部の鉄筋亀裂状況を外観から目視で観察した結果を使用した。

case13のB鉄筋, C鉄筋およびcase15のC鉄筋について鉄筋種別における亀裂および変形の進展差を比較する。角度進展量に着目すると, 全体で平均1.26°, B鉄筋で平均1.21°の角度進展がみられ, 鉄筋種別によ

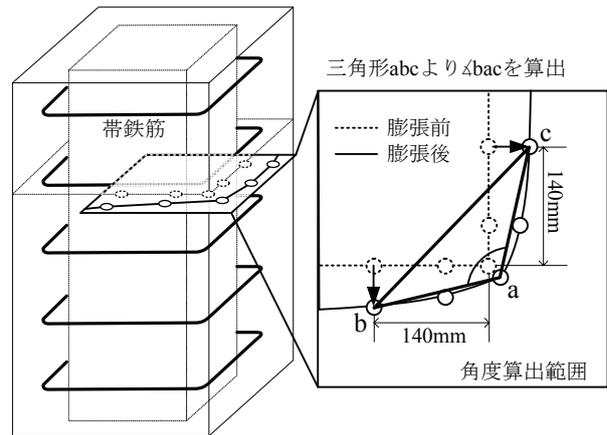


図-9 供試体角度算出方法

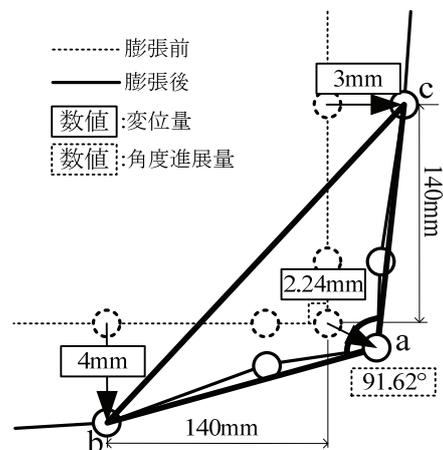


図-10 角度進展計測例 (case15 2段目)

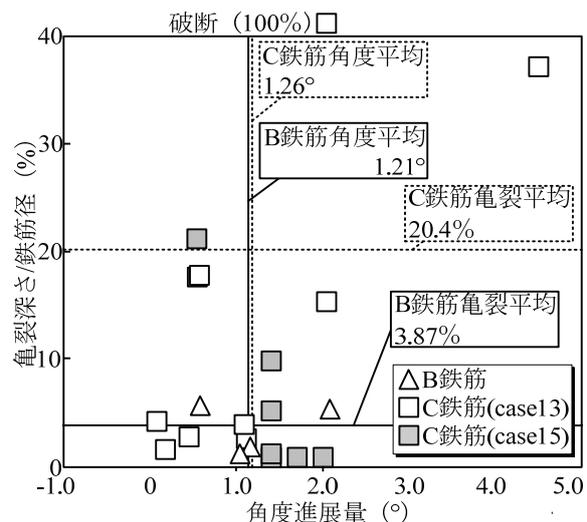


図-11 角度-亀裂の関係

って外観の角度に大きな差は生じなかった。

次に鉄筋の亀裂深さに着目するとC鉄筋の平均亀裂深さは20.4%, B鉄筋の平均亀裂進展深さは3.87%となり, 外観の変形に差が小さいにもかかわらず鉄筋種別によって亀裂の進展に大きな差が生じた。

また、C鉄筋においては外観の角度進展が $0.5^\circ$ を超えると20%以上、 $1.0^\circ$ を超えると30%以上の亀裂進展が発生しており、 $1.0^\circ$ 程度でも亀裂が進展する可能性があることがわかる。以上をまとめると亀裂の進展に与える影響は、外観の角度進展よりも鉄筋種別によるものが大きいと考えられる。

#### 4. 鉄筋破断非破壊試験

##### 4.1 鉄筋破断非破壊試験原理・方法

非破壊試験の着磁法を図-12 (a) に示す。図に示すように鉄筋は強磁性体であり、磁石を近づけると磁気を帯びると磁束を発生する。図-12 (b) に示すように鉄筋の損傷状況によってこの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。

鉄筋破断測定方法例を図-13 に示す。図-13 (a) に示すように側面1の帯鉄筋位置で磁石を数回往復させ着磁し、側面2にも同様に着磁を施し、次いで、図-13 (b) に示すように側面2の磁束密度を測定する。最後に、図-13 (a) に示すように側面1に再着磁を施した後、図-13 (b) に示すように側面1の磁束密度を測定する。

図-14 に、帯鉄筋の破断による磁束密度の影響を評価するためかぶりを50mmとし、破断鉄筋と健全鉄筋を比較した鉄筋破断測定結果例を示す。図に示すように鉄筋が健全な場合は0.5m付近で最大 $460\mu\text{T}$ 、0.1m付近で $-14\mu\text{T}$ 、破断鉄筋の場合は0.5m付近で $360\mu\text{T}$ 、0.1m付近で $-262\mu\text{T}$ とピークを迎え、この曲げ加工部から0.1mの磁束密度を比較することで破断と未破断を判断することが可能と考えられる。

今回の実験では上記の測定を膨張コンクリート打設時と、ひび割れ発生から2時間間隔での測定を行った。測定を行った箇所は破断の可能性が大きいB、C鉄筋が配置された計14箇所の隅角部である。

##### 4.2 破断試験結果

図-15 に、代表例としてcase15の7段目C鉄筋の隅角部における磁束密度の測定結果を示す。

図中に示すグラフは、供試体の膨張が開始した打設3時間後、供試体の膨張が収束した打設26時間後の測定結果を示す。また、破断の有無を判断するため、前述図-14における破断鉄筋の測定結果を併せて示す。

前述した図-14において、鉄筋破断における変化の着目点とした曲げ加工部から0.1mでは、磁束密度のピーク値が膨張開始から終局にかけて変化が生じておらず、 $-40\mu\text{T}$ であった。破断の基準とした $-262\mu\text{T}$ と比較して値が小さく、劣化の進展における値の変化も生じない結果となり、7段目C鉄筋の隅角部における破断は生じていないと判断できる。

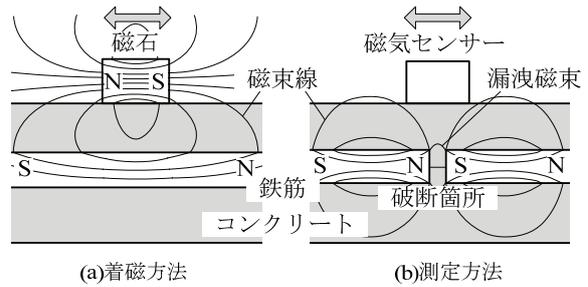


図-12 鉄筋破断測定原理

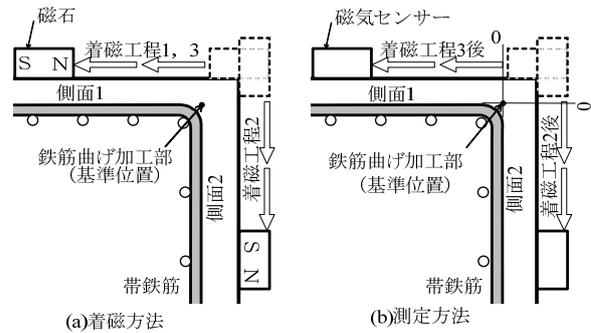


図-13 鉄筋破断測定方法例

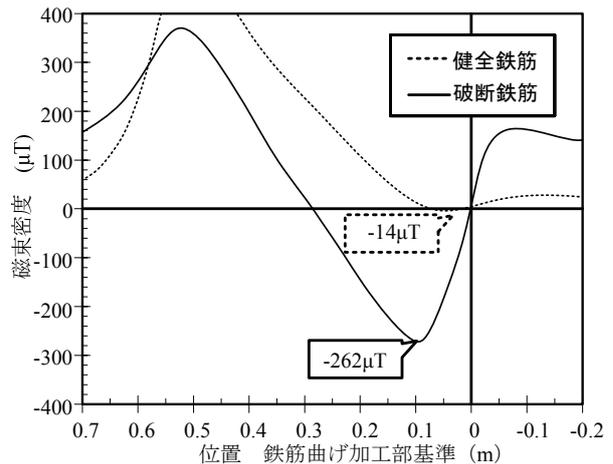


図-14 鉄筋破断測定結果例

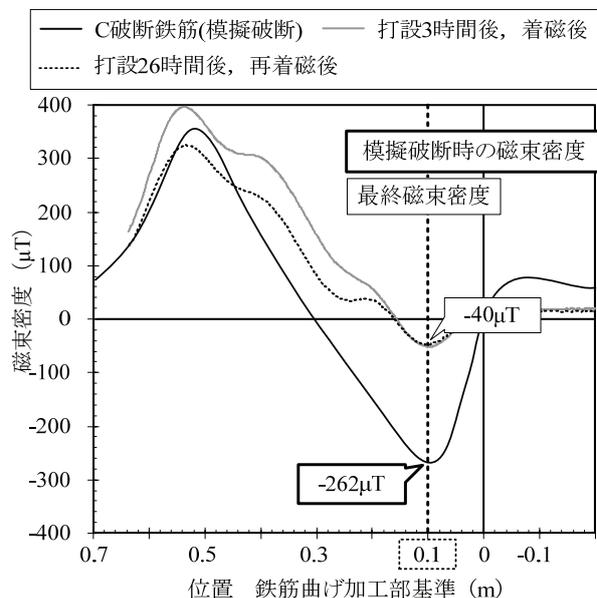


図-15 鉄筋破断測定結果

図-16、図-17にB、C鉄筋が配置された隅角部における曲げ加工部から0.1mの磁束密度の測定結果を示す。

1～7段目の測定結果について、曲げ加工部から0.1m付近の膨張後の磁束密度のピーク値と、鉄筋破断時に生じる曲げ加工部から0.1mの磁束密度の測定結果を示す。

1～7段目の測定結果について、曲げ加工部から0.1m付近の膨張後の磁束密度のピーク値と、鉄筋破断時に生じる0.1m位置のピーク値をそれぞれ比較することで、各帯鉄筋曲げ加工部における破断の有無を評価した。

図-16に示すB鉄筋の磁束密度は、膨張開始時に対して値が進展した箇所は3箇所あったが、最大でも $4\mu\text{T}$ の進展であった。また、膨張後の磁束密度が $-10\sim-25\mu\text{T}$ に分布するのに対して、破断鉄筋の磁束密度は $-247\mu\text{T}$ であることから、破断を生じた鉄筋は無いと判断できる。実験終了後、鉄筋はつり出しを実施したが、いずれの鉄筋においても亀裂の進展は認められなかった。

図-17に示すC鉄筋の磁束密度は、膨張開始時に対して全ての曲げ加工部で進展を生じており、5段目で最大 $27\mu\text{T}$ の進展を生じた。膨張後の磁束密度は $40\sim65\mu\text{T}$ であり、B鉄筋と同様に破断は生じていないと判断できる。

図-17には、実験終了時実施した鉄筋はつり出しによるC鉄筋の鉄筋亀裂進展状況を示し、関係性について考察を行う。

亀裂が $10\sim20\%$ の進展を生じた5段目、亀裂が $20\%$ 以上の進展を生じた3段目では、他の亀裂進展がほとんど生じていない箇所と比較しても、磁束密度の進展および磁束密度の最終値に差がなく、微細な亀裂進展状況では大きく磁束密度は進展しないと考えられる。

## 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、鉄筋の破断・未破断における特徴的な劣化現象の確認、鉄筋破断非破壊試験を実施し、以下の知見が得られた。

- (1) 膨張コンクリートを使用しASR劣化を再現した供試体実験より、ひび割れ密度がcase13で $6.04\text{m}^2$ 、case15で $4.62\text{m}^2$ と著しい劣化を生じた供試体2体で鉄筋破断と未破断箇所のひび割れ状況を比較した結果、隅角部における最大ひび割れ幅が2.5、1.8mmと明確な差は生じず破断に伴う外観特徴は生じなかった。
- (2) 供試体変形に伴う角度進展と、鉄筋曲げ加工部における亀裂進展度との関係性を評価した結果、隅角部は $1.0^\circ\sim2.0^\circ$ 程度角度が進展し、角度が大きい箇所で $20\%$ を超える亀裂や鉄筋破断が確認された。ただし、角度進展量が $1.0^\circ$ 未満の場合でも亀裂が約 $20\%$ 進展することもあり、必ずしも外観変形と鉄筋亀裂は比例

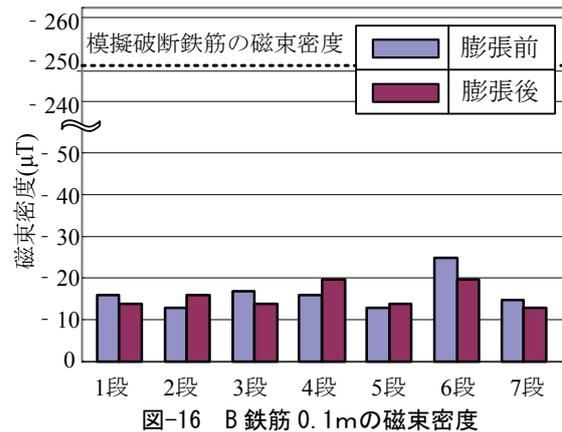


図-16 B鉄筋0.1mの磁束密度

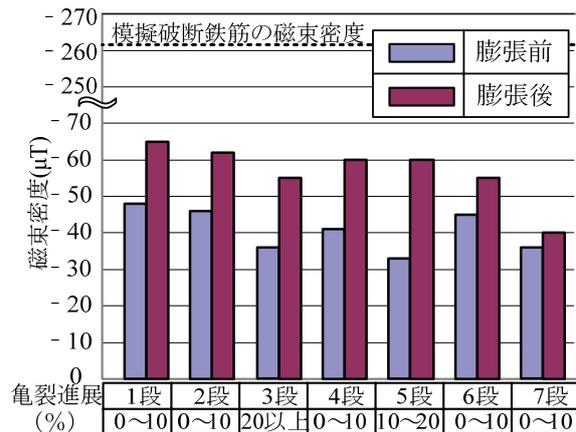


図-17 C鉄筋0.1mの磁束密度

関係にはなく、むしろ鉄筋種別が鉄筋亀裂の進展に与える影響が大きいことを確認した。

- (3) 非破壊試験結果により鉄筋破断の有無を確認した。その結果、磁束密度の変化は小さく、鉄筋破断は発生しない結果が得られた。実験後、供試体から鉄筋をはずり出し調査を実施し、鉄筋亀裂進展は生じるものの、鉄筋破断は発生していないことを確認した。

## 参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たな対応—、コンクリートライブラリーNo.124, pp. I-2- I-77, 2005
- 2) 興沼展朗, 幸左賢二, 川島恭志, 合田寛基：鉄筋の節形状とコンクリートの膨張が破断に与える影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.719-724, 2006.7
- 3) 稲垣裕之, 幸左賢二, 草野昌夫, 合田寛基：大型ASR模擬供試体を用いた各種鉄筋の亀裂進展度評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.977-982, 2010.7
- 4) 幸左賢二, 川島恭志, 合田寛基, 興沼展朗, 五十嵐弘行：アルカリ骨材反応による鉄筋破断を模擬した供試体実験、構造工学論文集, Vol.53A, pp.968-979, 2007.3