

論文 ASR を生じた構造物の隅角部の変形状の評価

土肥 宏記*¹・幸左 賢二*²・草野 昌夫*³・合田 寛基*⁴

要旨: 本検討は、ASR 劣化を生じた実構造物における変形状を把握し、鉄筋損傷との関係性を評価することを目的としている。まず、反応性骨材を使用した供試体を用いて外観のひび割れ状況、変形状況、採取コア物性値と鉄筋損傷の関係性を検討した。その結果、実験供試体では劣化の進展に伴い外観が円弧状に変形することおよび、鉄筋曲げ加工部での亀裂の進展を確認した。次いで、ASR 劣化が進行した実構造物で同様に変形状況を計測し、変形状は供試体と異なり直線部では変形は小さいが、隅角部に着目すると供試体と同様の角度進展を確認した。

キーワード: ASR, 実構造物, 劣化状況, 隅角部

1. はじめに

現在、アルカリ骨材反応（以下、ASR と記述）により損傷した構造物が数多く報告されており、構造物の耐力低下が懸念されることから鉄筋損傷の早期発見と、鉄筋破断を生じる可能性を持つ構造物の特定が望まれる。

ASR 膨張を模擬し、膨張コンクリートを用いた試験では、表面側のコンクリート部分で円弧状の変形を確認している。隅角部に着目すると 1.0° 程度の角度進展が生じ、内部では鉄筋曲げ加工部で亀裂の進展が確認されたことから、両者は相関性が高いと考えられる¹⁾。

しかし、ASR 膨張を再現する上で膨張材を混入しない普通コンクリート部分中空形状を採用しており、実際の ASR 構造物における中実断面とは断面形態が異なる。また、実構造物では変形計測時に内部の鉄筋損傷状況を把握することが出来ないため、変形と鉄筋損傷の関係を直接評価することが困難である。

そこで、本研究では図-1 のフローに示すように、反応性骨材を使用した供試体を作製し、屋外暴露環境下で長期計測を行った。2 供試体を使用して、ASR による実構造物の小程度の劣化（ひび割れは進展しているが内部の物性値は健全である状態）、中程度の劣化（外観劣化が十分に進展し、採取コア強度が設計基準強度を下回る状態）に対応する状態で試験を行う事により、経年劣化に伴うコア物性値、鉄筋亀裂の進展傾向を評価すると共に、供試体の変形状を確認し、両者の関係を検討した。

次いで、ASR 劣化を生じた実構造物で隅角部の変形状計測を実施し、小型供試体の変形状との比較を行った。

2. 反応性骨材を使用した供試体での劣化状況

2.1 供試体概要

本研究に使用した供試体形状を図-2 に示す。本実験

供試体は、既往の検討²⁾と同様の供試体の寸法である 340×340×670mm の直方体形状、かぶり厚は 20mm として作製した。セメントには普通ポルトランドセメント、反応性骨材には粗骨材に北海道産、細骨材に長崎産砕砂を使用した。また、ASR 促進のため、コンクリートの等価アルカリ量を 8kg/m³ に設定し、NaCl を添加している。なお、供試体の設計基準強度は実橋脚梁部と同程度の 35N/mm² とした。帯鉄筋比は 0.41% で、断面に合わせ矩形に加工した現行 D10 鉄筋と、昭和 60 年以前に建設された実構造物よりはつりだされた旧節 D16 鉄筋を使用した。

本実験は、2 供試体を用いて、実構造物の小程度の劣化、中程度の劣化に対応する状態で試験を行っており、小程度の劣化状態で試験を行った供試体を case1、中程度の劣化状態で試験を行った供試体を case2 としている。

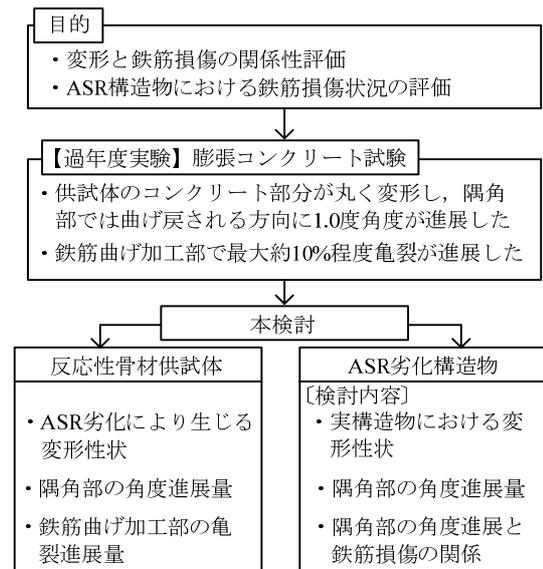


図-1 検討フロー

*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 工修 (正会員)

2.2 供試体の経年劣化状況

図-3 に供試体のひび割れ密度、測線ひずみの経時変化を示す。ひび割れ密度は下面を除く3側面を算出に使用している。後述する図-10 に示す実構造物の対象ひび割れ幅0.3mmと異なり、供試体では劣化が顕在化し、ひび割れ幅の進展が定常状態となる幅が0.2mmであることから、幅0.2mm以上のひび割れを算出対象としている。また、測線ひずみとは、図に示すように供試体上面に配置した標点を使用し、主鉄筋軸直角方向の2測線で計測した結果を測線長で除した値である。なお、図中のグラフではひび割れ密度は3側面の平均値、測線ひずみは2測線の平均値を示している。

供試体のひび割れ密度、測線ひずみはともに経過日数に比例して増加し、case1、case2ともに同様の進展傾向であった。case1では試験を行った経過日数452日の時点でひび割れ密度1.78m/m²、測線ひずみ2762μ、case2は経過日数790日でひび割れ密度3.98m/m²、測線ひずみ4102μとなり、ひび割れ密度、測線ひずみともcase2の劣化状況がcase1を上回った。

図-4 に供試体 case1、case2 の代表側面 B のひび割れ発生状況を示す。case1 ではひび割れ密度0.94m/m²であるが、ひび割れの発生方向は主鉄筋軸方向、軸直角方向で差異は見られない。case2 ではひび割れ密度3.77m/m²と劣化が進行しており、ひび割れの発生方向は、主鉄筋方向に卓越しており、ひび割れが連続性を持っていた。2供試体について詳細に経年劣化に伴うひび割れの発生傾向を確認するため、供試体側面を主鉄筋軸方向に68mm間隔で5等分し、各範囲におけるひび割れ発生量の比較を行う。

図-5 に供試体 case1、case2 のひび割れ発生状況を示す。ここでは、軸方向に対して45°以内のひび割れを検討対象としている。劣化小程度であるcase1では、側面Bの隅角部(範囲1,5)、側面Aの範囲4で幅0.2mm以上のひび割れが生じていない。また、上面の範囲1で4.99m/m²、範囲4で6.11m/m²、側面Bの範囲4で5.83m/m²とひび割れが比較的多く発生している箇所もあり、ASR膨張が初期の段階では、幅の広いひび割れ箇所の発生が各側面で異なる傾向にあった。劣化中程度であるcase2では、劣化の進展から各範囲でひび割れ密度の増加が確認できる。十分劣化が進行した状態では、側面Aの隅角部で7.81、1.59m/m²、中央部で10.25m/m²と、全体的に劣化進展する事が考えられる。

図-6 に採取コアを使用した圧縮強度、静弾性係数測定試験の結果を示す。各供試体軸直角方向からφ75mm(外径)のコア供試体を3体採取しており、図中の数値は3体の試験結果の平均値を示している。静弾性係数はcase1で17.9kN/mm²、case2で12.1kN/mm²、

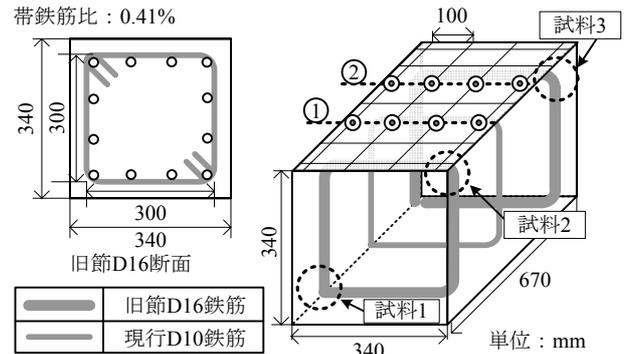


図-2 供試体形状

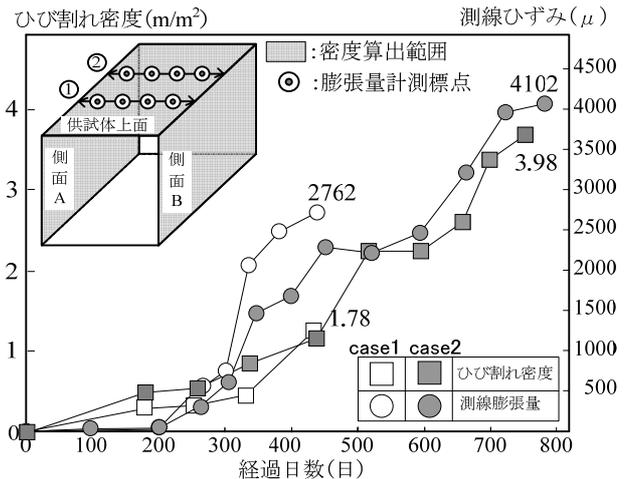


図-3 供試体ひび割れ密度・測線ひずみ

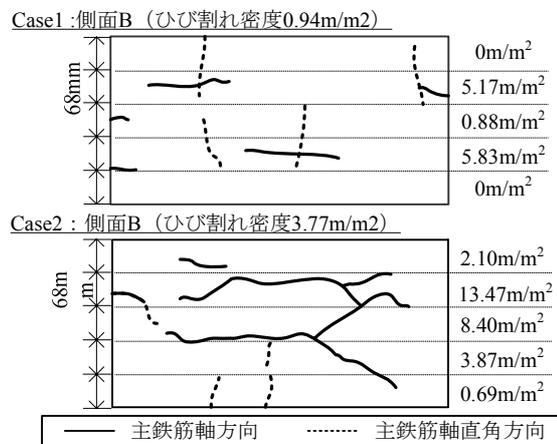


図-4 代表側面でのひび割れ発生状況

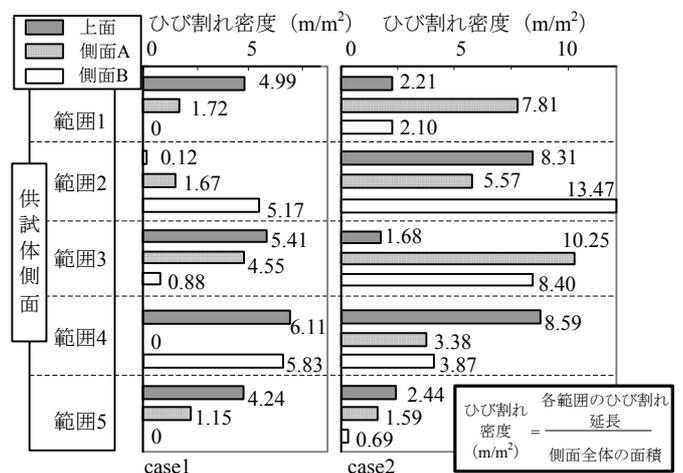


図-5 各劣化度におけるひび割れ発生状況

圧縮強度は case1 で 42.1N/mm^2 , case2 で 28.7N/mm^2 となり、静弾性係数、圧縮強度ともに劣化中程度の case2 では大きな低下が確認され、圧縮強度に関しては本実験供試体の設計基準強度 35N/mm^2 を下回る強度の低下状況であった。この結果と、後述の図-10、図-13 に示す実構造物の劣化状況との比較から、本実験供試体の劣化状況は case1 が実構造物における劣化小程度、case2 は劣化中程度に相当すると考えられる。

2.3 変形計測結果

ASR 膨張により生じる変形には、図-7 に示すように水平方向、鉛直方向に広がる一様変形と、隅角部の角度進展を伴う円弧状変形があるが、本検討では鉄筋曲げ加工部の損傷との関係性に着目し、円弧変形の計測を行う。計測方法は、供試体の3側面（上面、側面A、側面B）からそれぞれ一定距離離れた位置に固定点を設置し、固定点と供試体側面間の距離を50mm間隔で計測した。

図-8 に劣化中程度である case2 の変形計測結果を示す。上面、側面A、側面Bの最大変形量はそれぞれ0.96、0.91、1.73mmであり、側面Bが他の面に比べてやや大きく変形していた。各面で最大変形量が生じた位置は供試体中央部付近であり、図中の側面B側に示すように、隅角部から中央部にかけて変形量が増加していた。また、隅角部の角度進展を確認するため、隅角部頂点と隅角部から170mm離れた位置での変形計測点を結んだ直線のできる角度を用いて算出した結果、供試体隅角部で、 0.60° （上面、側面B間）、 0.31° （上面、側面A間）と角度が進展していた。

2.4 鉄筋亀裂進展計測結果

図-9 に鉄筋亀裂進展量の結果を示す。本研究では、材料試験により確認した曲げ加工直後の初期亀裂深さに対し、はつりだした鉄筋曲げ加工部での亀裂深さが初期亀裂を上回るものをASRによる亀裂進展量とした。亀裂の測定箇所は、図-2 に示すように旧節D16鉄筋の帯鉄筋曲げ加工部位置としており、はつりだした際に、鉄筋の節が最低2箇所含まれるように試料1~3を採取している。亀裂観察の結果、各試料で発生した亀裂の数は異なっており、case1の試料2では1本、case1の試料1、case2の試料2では4本亀裂の発生が試料内で確認された。試料内の亀裂1本のみが大きく進展する傾向は両供試体で同様であり、平均初期亀裂1.13%に対して最大の亀裂は、case1で4.72%（試料1）、case2で6.22%（試料2）と、どちらもASR膨張により進展したと判断できる亀裂深さを生じた。

以上のことから、ASR供試体で帯鉄筋曲げ加工部での鉄筋亀裂進展と共に、コンクリート部で隅角部の角度進展を伴う変形が生じることが確認された。

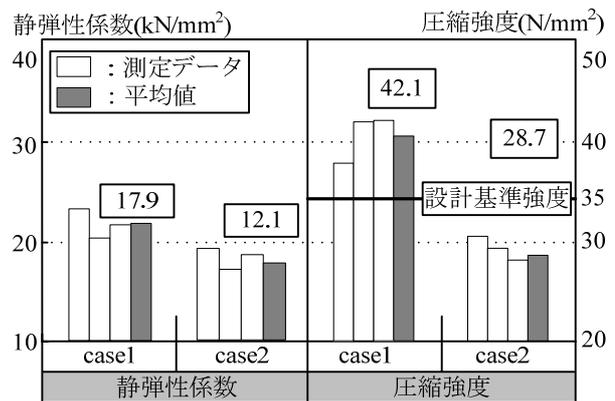


図-6 採取コア圧縮強度

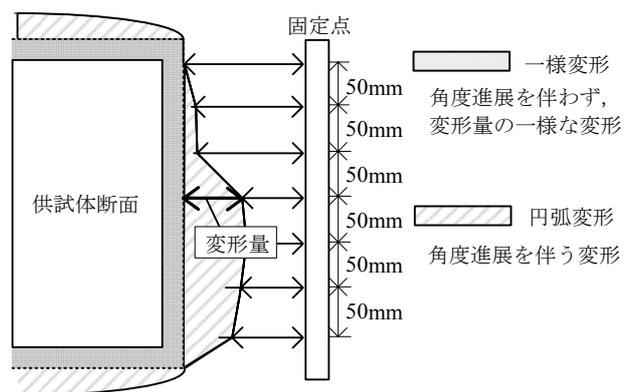


図-7 計測した変形の概要と変形量算出手法

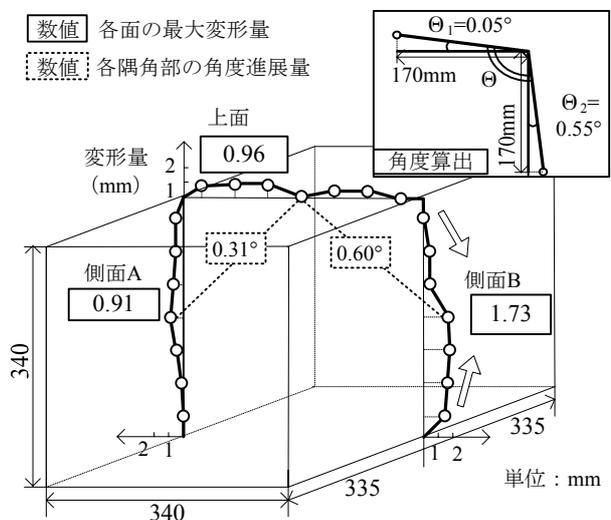


図-8 変形計測結果

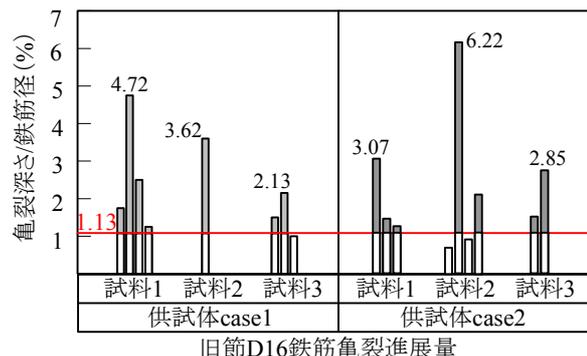


図-9 鉄筋損傷発生状況

3. 実構造物での劣化性状

3.1 変形計測橋脚の概要

実寸法の ASR 劣化構造物の変形性状を把握するため、昭和 51 年度に竣工した RCT 型梁橋脚 2 基（橋脚 A、橋脚 B）を用いて変形計測を行う。

図-10 に変形計測橋脚の累積ひび割れ密度の経年変化を示す。累積ひび割れ密度の算出は、下面と側面 2 面の計 3 面に生じた、幅 0.3mm 以上のひび割れを使用して行った。橋脚 A は竣工後 27 年で $0.71\text{m}^2/\text{m}^2$ 、橋脚 B では竣工後 27 年で $2.44\text{m}^2/\text{m}^2$ の累積ひび割れ密度となっている。図-10 に示すように、構造物管理機関では、ASR 橋脚が 87 基確認されており、中でも劣化が著しく、補強が行われている ASR 橋脚 18 基（C～T）での累積ひび割れ密度の平均は $2.31\text{m}^2/\text{m}^2$ であった。変形計測橋脚 A、B を橋脚 C～T と比較すると、橋脚 A は劣化小程度、橋脚 B は劣化中程度に相当する。

3.2 変形計測橋脚の劣化状況

図-11 に変形計測橋脚のひび割れ性状の経年変化を示す。ASR 劣化を生じた実構造物における中程度の損傷である橋脚 B で竣工後 9 年時のひび割れと、その後 12 年間で生じたひび割れである竣工後 21 年時のひび割れを比較すると、表面被覆を行った補修等の影響もあり竣工後 21 年時では新たなひび割れの発生が少ない。また、ひび割れの発生傾向としては竣工後 9 年時のひび割れでは主鉄筋軸方向、直角方向で同様の割合で生じているが、竣工後 21 年時では主鉄筋軸方向のひび割れ発生がほとんどであり、本実験供試体同様拘束の弱い方向に卓越したひび割れ発生状況となっていた。

図-12 に橋脚 B のひび割れについて、供試体と同様に構造物側面を 5 分割し、各範囲のひび割れ密度を分析した結果を示す。なお、竣工後 21 年までに発生した主鉄筋軸方向（主鉄筋となす角度 45° 以内）のひび割れを対象としており、分析範囲は図に示すように橋脚の張出し部の側面、下面を使用している。各範囲におけるひび割れ発生量は、梁側面の隅角部（範囲 1、5）では、 $0.82, 2.60\text{m}^2/\text{m}^2$ 、中央部（範囲 3）は $0.72\text{m}^2/\text{m}^2$ 、梁下面においても隅角部が $1.59, 3.52\text{m}^2/\text{m}^2$ 、中央部が $5.63\text{m}^2/\text{m}^2$ であり、橋脚 B では 5 範囲全てでひび割れが発生しているものの、発生量には若干の差が生じた。しかし、その他の橋脚を用いた検討でも全体的にひび割れが発生する傾向が得られたことから、前述の供試体 case2 と同様に、劣化中程度の橋脚 B においても、ひび割れは鉄筋損傷周辺の特定の箇所集中するのではなく、ほぼ構造物の全面に渡って発生していた。

図-13 に実構造物における採取コア強度を示す。図-10 に示す劣化が著しい橋脚（C～T）では、累積ひ

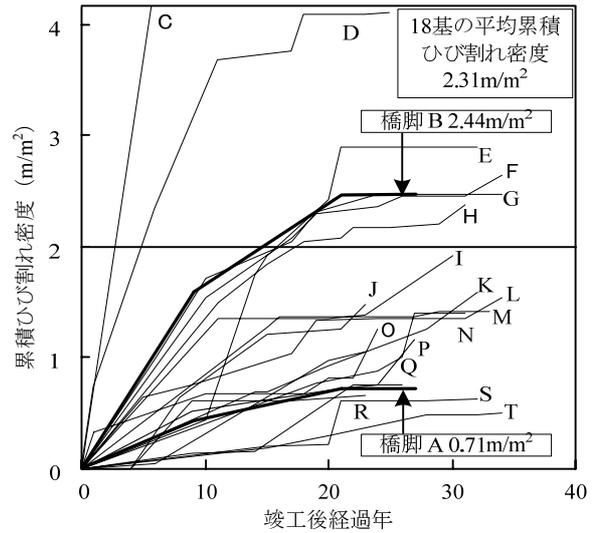


図-10 累積ひび割れ密度の経年変化

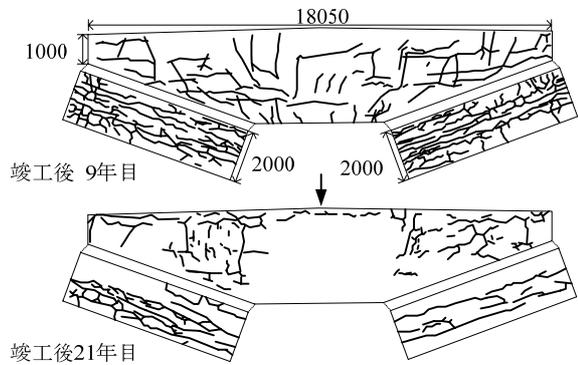


図-11 実構造物のひび割れ性状（代表橋脚 B）

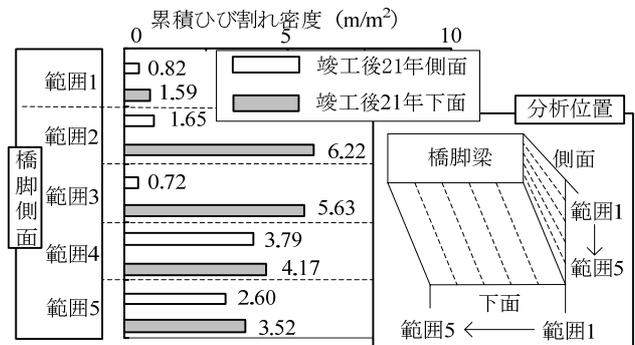


図-12 ひび割れ発生状況（代表橋脚 B）

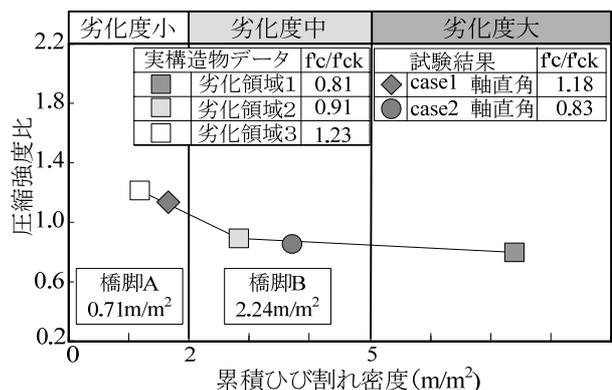


図-13 実構造物における採取コア強度



写真-1 変形計測状況

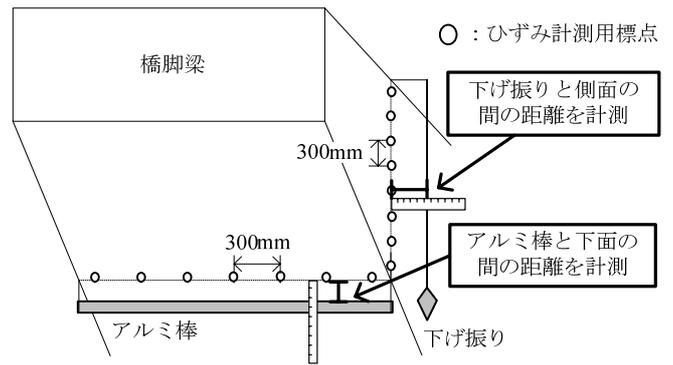


図-14 変形計測方法

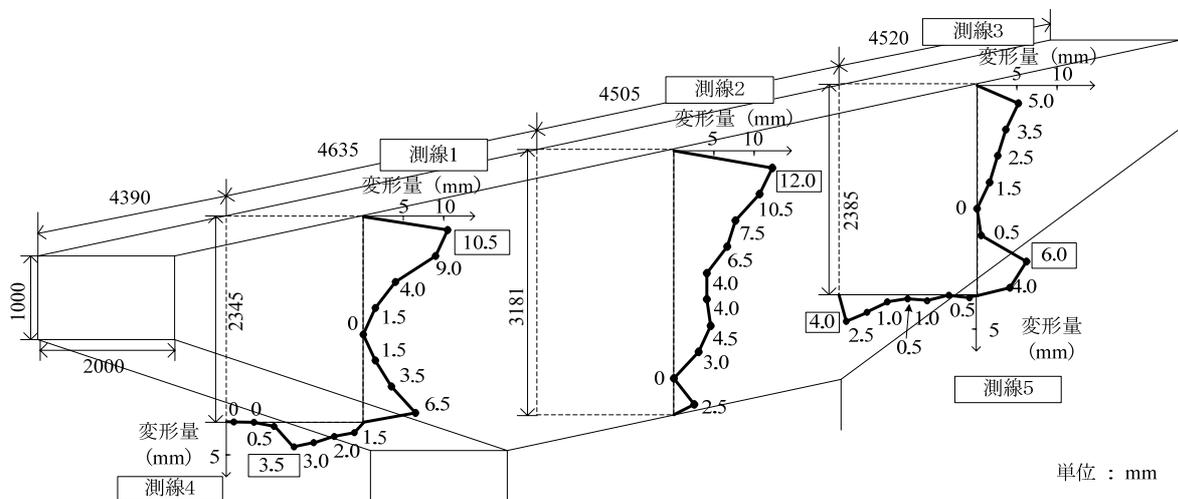


図-15 実構造物の変形計測結果

び割れ密度 2.0m^2 と 5.0m^2 を用いて実構造物の劣化程度を大, 中, 小と3段階に分類しており, 特に, 累積ひび割れ密度 2.0m^2 を境に圧縮強度が設計基準強度を下回ることが確認されている³⁾。本データから, コア採取が行われていない橋脚 A, B の圧縮強度を推定すると, 劣化度小にあたる橋脚 A では, ひび割れは進展しているが内部の物性値は健全である状態, 劣化度中にあたる橋脚 B では, 外観劣化が十分に進展し, 採取コア強度が設計基準強度を下回る状態にあると考えられる。本実験供試体 case1, case2 を, 実構造物同様に設計基準強度 $35\text{N}/\text{mm}^2$ で圧縮強度比 (圧縮強度 / 設計基準強度) をとった場合, case1 で 1.18, case2 で 0.83 となり, 実構造物の劣化度小の強度比 1.23, 劣化度中の 0.91 と比較しても, 強度比の低下傾向が概ね一致することから, 供試体 case1 と橋脚 A, 供試体 case2 と橋脚 B はそれぞれ同程度の劣化を生じていると考えられる。

3.3 代表橋脚での変形計測結果

写真-1, 図-14 に実橋の変形計測方法を示す。変

形の計測は図-15 に示す, 定期的膨張量を計測するために橋脚梁側面 (測線 1~3) および下面 (測線 4, 5) の線上に 300mm 間隔で設置されているコンタクトゲージ計測用標点位置を使用した。側面では, 下げ振りをコンクリート表面から一定距離離れた位置に垂直に垂らし, 下面ではアルミ棒が水平になるようにコンクリート表面から一定の位置に吊るすことで, 計測基準点を設置した。その後, 側面と下げ振り間の距離, 下面とアルミ棒間の距離をそれぞれ計測することで変形の形状の調査を行った。なお, 変形量の評価については供試体と同様に, 各側面で変形が最小である点を変形量 0mm として相対的な変形量の算出を行っている。

図-15 に, 橋脚 B の変形量計測結果を示す。梁側面の 3 測線の最大変形量は, 測線 1, 2, 3 で 10.5, 12.0, 6.0mm であり, それぞれ隅角部に最も近い計測点で生じている。梁張出部 (測線 1, 3) では, 隅角部で 5.0mm を越える比較的大きい変形量が生じ, 中央部に向かって変形量が小さくなっている。柱上部 (測線 2) では変形が天端から柱部に向かって小さくなる傾向とな

っている。また、梁下面の2測線では、最大変形量が3.5mm、4.0mmと、梁側面の最大変形量と比較するとやや小さい。ただし、最大変形は、測線4、5共に隅角部付近で生じており、梁側面と同様の傾向であった。

4. 供試体と実橋の劣化性状に関する比較

供試体と実構造物で変形状が異なっていたことから、図-16に示すように、劣化中程度である供試体 case2 と橋脚 B で変形状の比較を行った。なお、角度進展量を比較するための隅角部範囲は、帯鉄筋の曲げ戻しが鉄筋曲げ加工部と、曲げ戻しの際に発生する鉄筋の引張応力により、コンクリート部との付着の影響が強い範囲で生じると推察されることから「かぶり厚+曲げ加工半径+帯鉄筋フックを90°曲げした時の定着長である12Φ（ただしΦは鉄筋直径）」とした。

実構造物で隅角部範囲とその他の範囲（一様変形範囲）の変形に着目すると、橋脚 B の隅角部範囲では0.92°の角度進展であり、一様変形範囲では変形量が供試体中央部に漸減していることが確認された。また、供試体 case2 では、隅角部範囲で0.60°の角度進展が確認された。以上より、劣化中程度の供試体と実構造物では全体の変形状は異なっているが、隅角部に着目すると、どちらも角度進展が生じていることが確認された。

図-17に、各構造物の曲げ変形影響範囲で角度進展を算出した結果を示す。角度進展量は、「かぶり厚+曲げ加工半径+帯鉄筋フックの定着長である12Φ」に最も近い位置の変形量から算出している。その結果、劣化中程度の供試体 case2 と橋脚 B では、供試体 case2 で0.60°、0.31°、橋脚 B で0.93°、1.03°、また、橋脚 A では1.38°、2.24°と3構造物で0.31~2.24°の角度進展量が見られた。供試体 case2 で鉄筋亀裂進展と共に角度進展を伴う変形が生じており、鉄筋損傷と角度進展の関係性が確認されたことから、供試体と同様に角度進展が確認された実構造物でも、鉄筋損傷が生じる可能性が考えられる。

5. まとめ

本研究では、屋外暴露供試体およびASR劣化を生じた実構造物の変形状を比較分析することで以下の知見が得られた。

(1) 反応性骨材を使用して長期暴露試験を行った供試体（ひび割れ密度3.98m²）では、隅角部から中央部にかけて変形量が増加し、最大で1.73mmの変形が生じた。帯鉄筋曲げ加工部では鉄筋径に対して最大6.22%の亀裂進展量が確認されたことから、角度進展に伴い、帯鉄筋曲げ加工部の亀裂が進展することが確認された。

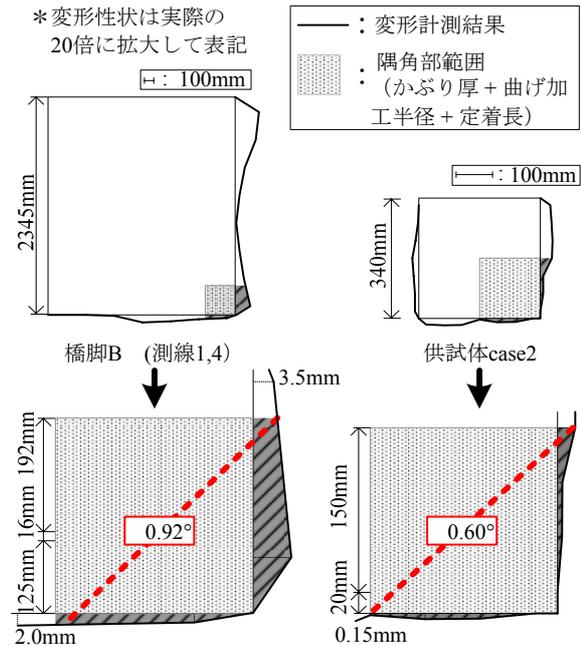


図-16 実構造物と供試体の変形状比較

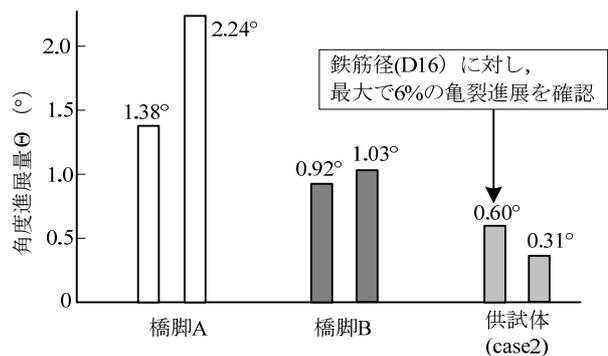


図-17 曲げ変形影響範囲での角度進展量比較

(2) 変形計測を行った実構造物（ひび割れ密度2.44m²）の変形は、隅角部から中央部にかけて変形量が小さくなり、実験供試体と変形状は異なっているが、隅角部に着目すると、どちらも0.31~2.24°の角度進展が生じていた。

参考文献

- 1) 稲垣裕之, 幸左賢二, 草野昌夫, 合田寛基: PC梁のASR劣化を模擬した大型供試体実験, プレストレストコンクリート技術協会 第18回シンポジウム論文集, pp.193-198, 2009.10
- 2) 幸左賢二, 川島恭志, 合田寛基, 興梠展朗: 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
- 3) 三浦正嗣, 幸左賢二, 久利良夫, 川島恭史: ASRを生じた実構造物の長期的な損傷度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1023-1028, 2008.7