

報告 棒形スキャナーを用いたアルカリシリカ反応による内部ひび割れの調査

河村 佳英*1・曾我部 正道*2・仁平 達也*3・谷村 幸裕*4

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) の劣化過程の評価にあたり、ひび割れ深さが判断材料となることがある。ひび割れ深さの計測法として、非破壊検査技術による種々の方法が提案されている。本報では、回転機構を備えたラインセンサーの一種である棒形スキャナーを用いて、ひび割れ深さを計測した。この結果、ASR 供試体と ASR 実構造物について、例えば、ひび割れ深さ、ひび割れ幅等のコンクリート内部のひび割れ分布状況を簡易に計測できた。また、骨材割れ、および骨材割れと連続する表面ひび割れの観察結果が、ひび割れ発生要因を ASR と判定するための補助的な判断材料となることがわかった。

キーワード: ASR, 骨材割れ, ひび割れ密度, ひび割れ深さ, 棒形スキャナー

1. はじめに

昭和 61 年にアルカリ骨材反応の抑制方法が JIS で規定され、その後に建設されたコンクリート構造物ではアルカリシリカ反応 (以下、ASR) による劣化の被害は、大幅に抑制されている。しかしながら、ASR の発生は完全には防止できておらず、現在でもその被害が散見される。ASR による劣化は、建設後数年から 10 年以上経過した後にはひび割れ発生という形で顕在化することが多い。

表-1 に、土木学会における ASR の各劣化過程の定義を示す¹⁾。現状において ASR の発生・進行を精度よく定量的に予測することは困難である。構造物の維持管理では、劣化過程を表に示すように潜伏期、進展期、加速期、劣化期に区分し構造物の外観上のグレードにより総合的に判断して健全度判定を行っている。このうち、特に加速期と劣化期は外観による判断が困難であるが、閾値としては構造物の耐荷力の低下が顕著か否かで判定が分かれる。耐荷力の低下は、構造物の安全確保に影響を及ぼすため、加速期と劣化期の区分においては的確な判断が求められる。

ASR による耐荷力の低下の要因について、膨張圧による鉄筋破断が報告されているほか、ひび割れからの劣化因子浸入による内部鉄筋の腐食が挙げられる。このことから、ASR が生じた構造物の健全度判定においては、発生したひび割れの深さ、例えばひび割れが鉄筋に達しているか否かなどが、判断材料として用いられる場合が多くある。

一般的な ASR の判定方法としては、1)外観ひび割れの特徴、2)採取試料の偏光顕微鏡観察、化学成分分析 3)ASR ゲルの確認、4)圧縮強度およびヤング率による力学的性

質の確認などが実施されている²⁾。しかし、前記の試験は、専門家へ依頼することが多いことから、時間とコストが必要となる。また、一般にひび割れ深さの計測は、構造物からのコア試料採取および観察、計測を要するため、実務上容易でない。本報では、棒形スキャナー³⁾に着目して、ASR ひび割れの特徴を利用した、ASR の可能性に関する簡易判定、および ASR 劣化過程の簡易な明確化手法について検討した。

本報の目的は、以下の通りである。

- (1) ASR 供試体に対して棒形スキャナーによるひび割れ深さの計測を試みる。
- (2) ASR が発生した実構造物に対して棒形スキャナーによるひび割れ深さの計測を試みる。
- (3) 上記のひび割れ計測画像を用いた、簡易的な ASR 判定の可能性について検討する。

表-1 土木学会における ASR の各劣化過程の定義

劣化過程	定義
潜伏期	ASR そのものは進行するものの膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生しない期間
進展期	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生するが、鋼材腐食がない期間
加速期	ASR による膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展し、鋼材腐食が発生する場合もある期間
劣化期	ひび割れの幅および密度が増大し部材としての一体性が損なわれる、鋼材の腐食による断面減少が生じる、鋼材の損傷が発生するなどにより、耐荷力の低下が顕著な期間

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 工修 (正会員)
 *2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 工博 (正会員)
 *3 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 工修 (正会員)
 *4 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 工博 (正会員)

2. 検討方法

2.1 棒形スキャナーの概要

図-1、表-2に棒形スキャナーの概要を示す。近年、構造物の調査では軽量のハンマードリル削孔を用いた微破壊による中性化や塩化物イオン濃度の調査が行われている。本報では上記の棒形スキャナーとドリル孔を用いた手法により、コンクリートの内部を観察した。従来のコア法に比べて、機材が軽量であること、作業に熟練を要しないこと、作業時間が短いこと等の利点が挙げられる。棒形スキャナーには、先端の棒形の筒の中に長さ210mmの接触画像センサーContact Image Sensor（以下、CISという）が組み込まれている。このCISを孔内で回転させながらスキャンすることにより内部の画像を得ることができる。ここで用いているCISは、一般的な複写機のガラス面下で用いられているライン状センサーと同種のものである。棒形スキャナーに用いたCISの解像度は600DPIで、1pixelは0.042mmに相当する。

実際の作業では、まず、コンクリート内部の鉄筋を探索し、これを避けてドリル削孔する。その後、孔内を簡易ポンプなどで洗浄し、棒形スキャナーでセンシングする。削孔径が小さな微破壊検査であるため、検査後に孔口に防水を施して存置することが可能である。後日、ひび割れの進展を確認する等のモニタリング手法にも活用できる。

2.2 ASR 供試体の概要

単純なひび割れのモニタリングであれば、力学的にひび割れを発生させることにより容易に検証できるが、本報では、ASRによって生じたひび割れの検証が目的であるため、供試体レベルではあるが、実際のASRひび割れを用いることとした。

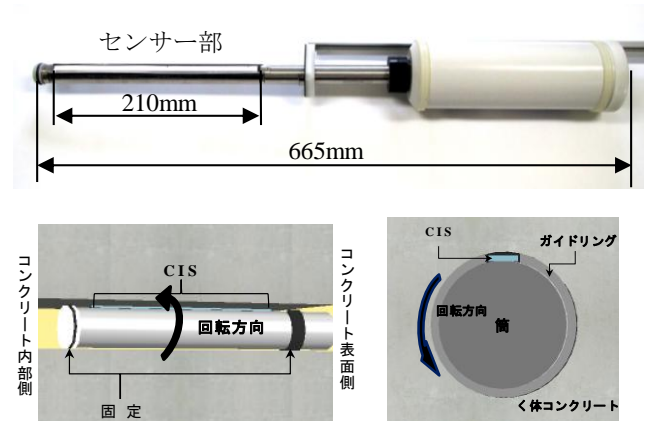
図-2に検討に用いたASR供試体の概要を示す⁴⁾。この供試体は、1988年に作成され、経年25年である。軸方向鉄筋比は1.01%、軸方向鉄筋のかぶり厚は52mmである。図中の赤丸印は、ひび割れの計測位置を示す。ひび割れに対する鉄筋の拘束効果を把握するため、同位置のひび割れを計測した。

今回使用したASR供試体のコンクリートの配合については、水セメント比55%、細骨材率47.0%、単位量は水193kg/m³、セメント350kg/m³である。同供試体には反応性骨材として、堆積岩が用いられている。練り混ぜ水に試薬のNaOHとKOHを添加し、全アルカリ量は、セメント重量に対し3.0%R₂O（R₂O=Na₂O+0.658K₂O）となるように調整されている。また、ペシマムを考慮し、反応性骨材混入率は60%に調整されている。

スキャンした画像データを用いて、測定位置ごとにひび割れ深さとひび割れ幅の関係について、データの整理を行った。



(a) 作業風景

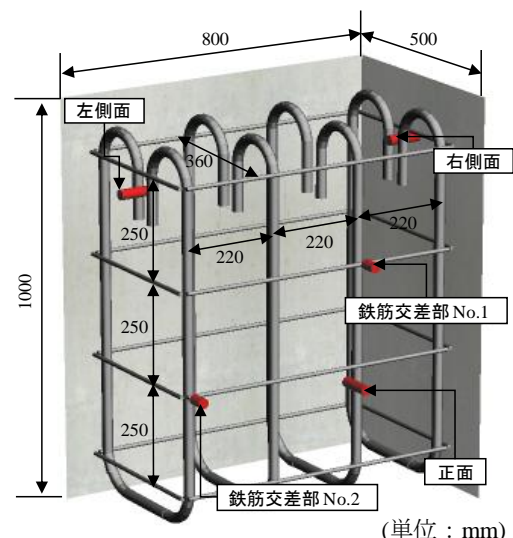


(b) 棒形スキャナー全体図

図-1 棒形スキャナーの概要

表-2 仕様

センサー長	210mm
最大読み取り深さ	削孔穴の孔口から 350mm
光学解像度	600DPI (1pixel : 0.042mm)
焦点距離	1mm
読み取り削孔サイズ	φ 24.5mm



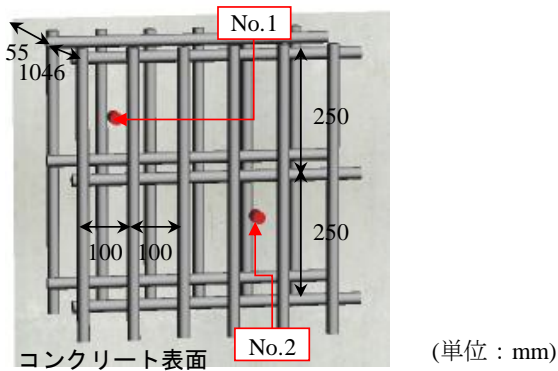
(単位 : mm)

軸方向鉄筋 : D25, せん断補強鉄筋 : D10

図-2 ASR 供試体の概要



(a) RC ラーメン橋台柱部外観

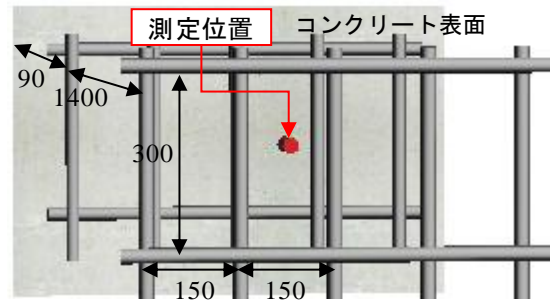


(b) RC ラーメン橋台柱部の配筋概要

図-3 RC ラーメン橋台の概要



(a) RC 橋脚外観



(b) RC 橋脚の配筋概要

図-4 RC 橋脚の概要

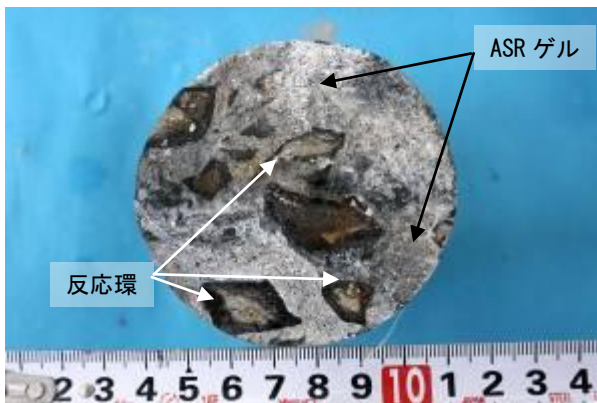


図-5 コア試料の断面 (RC ラーメン橋台)

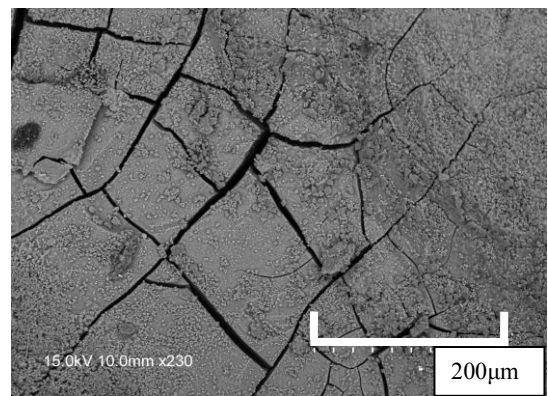


図-6 ASR ゲルの SEM 画像 (RC ラーメン橋台)

2.3 ASR 実構造物の概要

図-3 に著しい ASR 劣化が生じた RC ラーメン橋台柱部の概要を示す。断面寸法は、3800mm×1200mm である。柱の端部では鉛直方向、中央付近では亀甲状のひび割れが生じている。同図(b)中の赤丸印は、測定位置を示す。

柱端部と中央付近について各 1 箇所ずつ測定した。当該柱の軸方向鉄筋比は 0.99%、かぶりは 55mm である。

図-4 に著しい ASR 劣化が生じた RC 橋脚の概要を示す。断面寸法は、4000mm×1600mm である。全体的に亀

甲状のひび割れが生じている（く体表面に錆汁が見られるが、上記ひび割れから滲出したものではない）。く体の下部中央付近で、1 箇所測定した。当該橋脚の軸方向鉄筋比は 0.88%、かぶり 90mm である。なお、両構造物ともに SEM によるく体コア試料の ASR ゲル観察をはじめとした詳細な調査結果から、上記構造物のひび割れ主要因が ASR であることを確認している。

図-5 に RC ラーメン橋台から採取したコア試料の断面、図-6 にコア試料の ASR ゲルの SEM 画像を例示する。

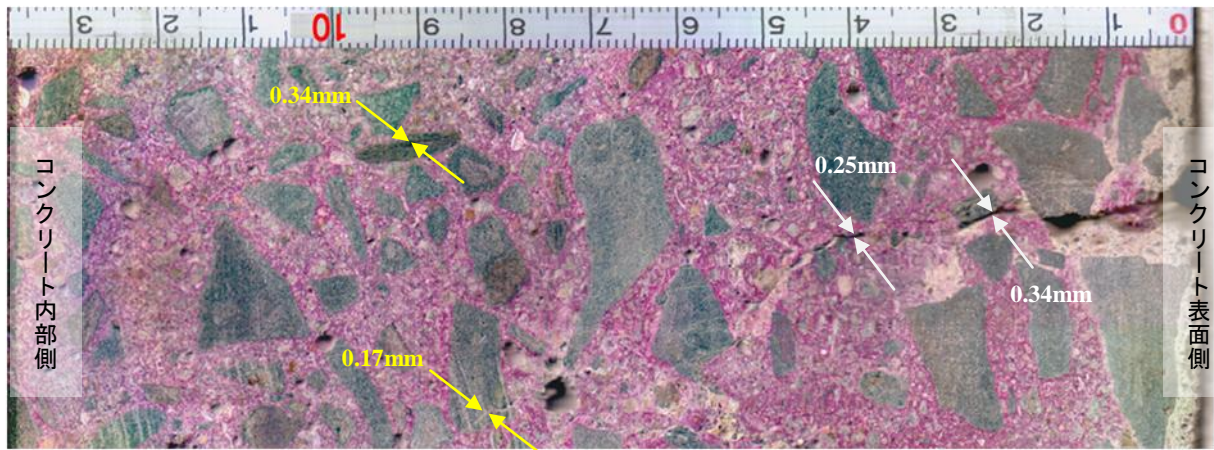


図-7 スキャニング画像の例 (RC 橋脚)



図-8 スキャニング画像の例 (RC ラーメン橋台)

3. 検討結果

3.1 スキャニング画像

上記図中の白矢印はひび割れの位置、黄色矢印は骨材割れの位置、青点線で囲まれた領域は白色物質で充填されたひび割れ、数値は割れ幅を示す。

図-7に棒形スキャナーによるRC橋脚のスキャニング画像の例を示す。図中の左側の変色部分は、フェノールフタレイン1%溶液を噴霧して中性化状況を確認したものである。同図から、コンクリート表面で観察されたASRひび割れの内部での状況、例えばひび割れの進展状況、骨材割れなどを観察できる。特に表面ひび割れと連続する骨材割れの存在は、骨材の膨張性を示唆するものと考えられる。このひび割れの要因は、凍害もしくはASRであることが多い。一般に前者の場合、スケリングやポップアウトなど外観の特徴により判別できることから、これを伴わないコンクリートで見られる前記ひび割れは、ASR判定材料の一つになりうると言えよう。

図-8に棒形スキャナーによるRCラーメン橋台のスキャニング画像の例を示す。表面ひび割れの先端が、白色物質で充填されている様子が観察できる。この白色物質がASRゲルであるか、エフロレッセンスであるかは不明だが、このような白色物質によるひび割れ先端の充填状況は、ASR供試体においても確認された。

上図からひび割れ深さの浅い位置においては、ひび割れがコンクリート表面に対して垂直であるが、コンクリート内部へひび割れが進展するに従って、表面と平行方向にカーブする傾向が、多くのスキャニング画像においても確認された。

なお、コンクリート表面では、ひび割れ幅が大きいのが、この部分はドリル削孔時に欠損が生じた部分である。他の供試体や実構造物の削孔も同様に、表面付近でひび割れの欠損が発生し、画像で解析したひび割れ幅が、事前にクラックスケールで計測した表面ひび割れ幅よりも大きくなる場合が多く見られた。この欠損の問題は、本手



図-9 削孔穴からそれるひび割れの例

法の課題と言えるが、事前に表面ひび割れ幅を確認しておけば、内部のひび割れ分析には影響を及ぼさないと考える。

他の留意点として、図-9に示すように本手法は、小口径の削孔穴を用いるため、削孔穴からひび割れがそれることがある。実際のひび割れ深さを過小評価することになるため、この点に留意する必要がある。この場合は、スキャン画像中の2本のひび割れが互いに連続することから、判別が可能である。

3.2 ひび割れ深さとひび割れ幅の関係

(1) ASR 供試体

図-10にASR供試体におけるひび割れ深さとひび割れ幅の関係を示す。ひび割れ幅の小さい領域に着目するため、ひび割れ幅のプロット上限範囲は2.0mmまでとした。また各凡例の横には、事前に計測した表面ひび割れ幅の値を併せて示した。同図の傾向からは、最大表面ひび割れ幅が、1.5mm程度(右側面)であるにも関わらず、いずれのひび割れも鉄筋に到達せず、最大30mm程度で止まっていることが分かる。配筋状況の若干異なる正面と側面を比較したが、明確な違いは見いだせなかった。実線で示した軸方向鉄筋とせん断補強鉄筋の交差部(以下、鉄筋交差部という)とそれ以外の箇所では、ひび割れ深さに差がみられ、前者が10mm前後で止まるのに対して、後者は、30mm程度に達していた。これは内部からの膨張圧を鉄筋が抑制しているためであると考えられる。このことから、実構造物においてひび割れ深さを判定する場合には、できるだけ鉄筋交差部のひび割れを避けた方がよいことが伺える。

なお、左右側面に明瞭な骨材割れは見られず、骨材とモルタルの界面に生じている割れが多く見られた。

(2) RC ラーメン橋台

図-11にASRが発生したRCラーメン橋台におけるひび割れ深さとひび割れ幅の関係を示す。図-10と同様に

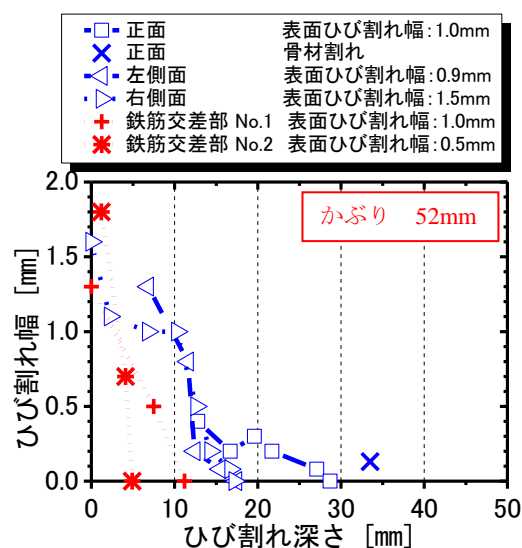


図-10 ひび割れ深さとひび割れ幅の関係 (ASR 供試体)

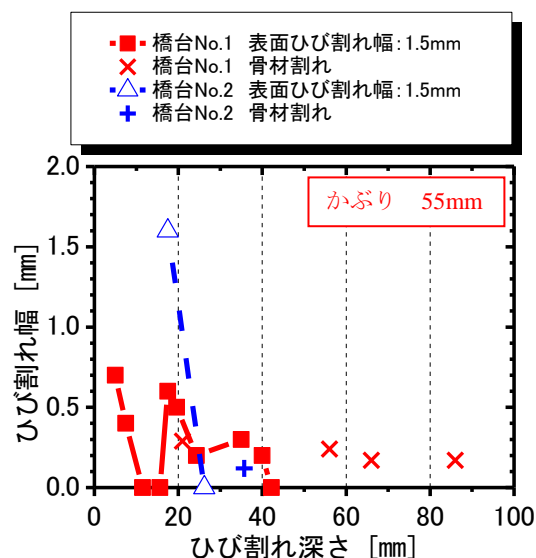


図-11 ひび割れ深さとひび割れ幅の関係 (RC ラーメン橋台)

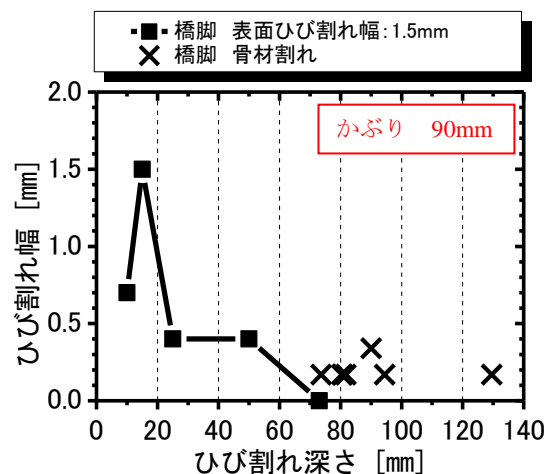


図-12 ひび割れ深さとひび割れ幅の関係 (RC 橋脚)

各凡例の横には、事前に計測した表面ひび割れ幅の値を併せて示した。事前計測した表面ひび割れ幅はどちらも1.5mmであったが、外観から雨掛かりが多いと推察されるNo.1の方では、ひび割れ深さは40mmであった。また、90mm程度までは、内部の骨材の割れが確認された。

ASRによる耐荷力の低下メカニズムは、前述のようにコンクリートの劣化と鋼材の腐食である。既往の文献⁵⁾では、ASRひび割れが鉄筋に達していても、鉄筋周囲に存在するアルカリシリカゲルの緩衝作用により、鉄筋の不動態被膜が保護されて腐食が抑制される可能性が示唆されている。つまり、ひび割れが鉄筋に達していなければ、ASR劣化を生じていない構造物と比べて、鉄筋が腐食する可能性はより低くなることが伺える。

当該構造物の鉄筋のかぶりは55mmである。ASRによる表面ひび割れ深さは、鉄筋のかぶりの範囲内であり、現時点においては耐荷性能に大きな問題は無いと考える。また、このひび割れにより極端に鋼材が腐食する可能性は低いと言ってよいであろう。よって、劣化過程の区分上、当該構造物は、加速期にとどまっていると判断される。

(3) RC橋脚

図-12にASRが発生したRC橋脚におけるひび割れ深さとひび割れ幅の関係を示す。130mm程度までは、内部の骨材の割れが確認されたが、ひび割れ深さは73mmであった。当該構造物のかぶりは90mmであり、同様に現時点において耐荷性能に大きな問題は無いと言えよう。劣化過程の区分上、当該構造物は、加速期にとどまっていると判断される。

以上の結果から、今回計測した構造物においては、ひび割れが、鉄筋に達しておらず、かぶりの領域で止まっていた。また、骨材割れは、鉄筋の拘束を受けるかぶりより内部側の領域においても点在することが確認できた。

3.3 ひび割れ深さと表面ひび割れ幅の関係

図-13にひび割れ深さと表面ひび割れ幅の関係を示す。参考として、本手法によらずコンクリートのひび割れ到達深さを表面ひび割れで判定することに関し、その他幾つかのASR供試体⁹⁾を含めて検討した。限られた計測データではあるが、両者に良好な相関関係は見られないことがわかる。したがって、表面ひび割れの計測結果からひび割れ深さを定量的に評価、推定することは、困難であると考えられる。

4. 結論

ASR供試体、および著しいASRが生じた2つの実構造物を対象として、棒形スキャナーを用いた微破壊検査により、ひび割れ深さ、骨材割れの深さを計測した。

結論は以下の通りである。

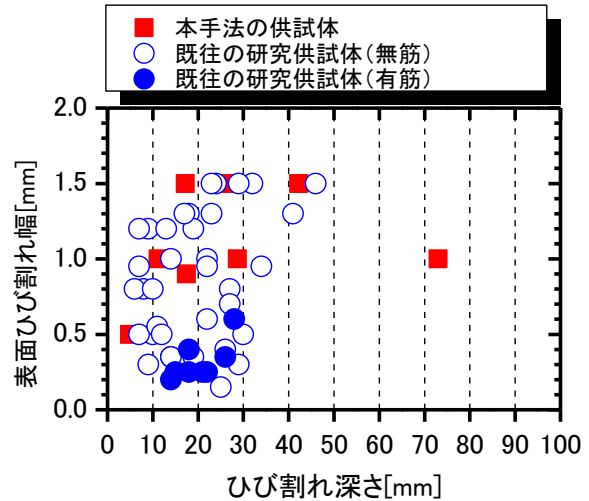


図-13 ひび割れ深さと表面ひび割れ幅の関係

- (1) コンクリート内部のスキャニング画像から、ASR供試体、実構造物ともにひび割れ深さを簡易に計測できることがわかった。
- (2) 骨材割れ、および表面ひび割れと連続する骨材割れを観察できることから、コンクリート内部のスキャニング画像が、ひび割れ発生要因をASRと判定するための補助的な判定材料となる可能性が示された。
- (3) 今回計測した範囲では、表面ひび割れ幅が1.5mm程度であっても、ひび割れ深さはかぶりの範囲内に留まっていることがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書(維持管理編), 丸善株式会社, 2007.
- 2) 小林一輔, 森弥広, 野村謙二: 圧縮載荷試験によるアルカリシリカ反応の診断方法, 土木学会論文集, No.460, V-18, pp.151-154, 1993.
- 3) 出水亨, 井上洋一, 伊藤幸広, 肥田研一: 棒状スキャナーによるコンクリート内部微破壊調査事例, 土木学会第63回年次学術講演会, 5-512, pp.1023-1024, 2008.
- 4) 高田潤, 中村亨, 立松英信: 大型供試体によるコンクリート構造物の劣化予測, 鉄道総研報告, Vol.4, No.9, pp.41-47, 1990.
- 5) 鳥居和之, 川村満紀: ASR損傷コンクリート橋脚の外部・内部損傷の実態, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, V-12, pp.567-568, 1999.
- 6) 黒川浩嗣, 谷村幸裕, 岡本大, 仁平達也: アルカリシリカ反応が生じたコンクリートの強度特性に関する実験的研究, 土木学会第62回年次学術講演会, 5-437, pp.873-874, 2007.