

論文 棒形スキャナを用いた ASR 供試体の内部ひび割れ観察

益田 紘孝*1・幸左 賢二*2・矢野 佑輔*3

要旨：暴露開始から約 3 年が経過した ASR 供試体から $\phi 25\text{mm} \times 600\text{mm}$ のコアを複数削孔し、計測可能深さ 600mm の棒形スキャナを用いて内部ひび割れ観察を行った。かぶりを除いた供試体内部において、従来の棒形スキャナで計測していた 50～300mm、新たに計測可能となった 300～600mm の 2 区間のひび割れ状況を比較した。その結果、2 区間の平均ひび割れ幅、長さは同程度であり、深さによるひび割れ状況について差は見られなかった。この要因として、コアを主鉄筋と平行に削孔していることから、計測範囲が深くなっても主鉄筋による拘束の影響は変わらなかったことが考えられる。

キーワード：ASR、長期暴露、外観ひび割れ、内部ひび割れ、棒形スキャナ

1. はじめに

現在, ASR により劣化を生じたコンクリート構造物において鉄筋破断, 圧縮強度の低下の内部損傷が報告¹⁾されており, 既往の研究²⁾では内部ひび割れの発生による圧縮強度の低下が確認されている。筆者らは, これまで表 - 1 に示すように, 外観損傷, 内部劣化度, 鉄筋損傷度評価を目的とした ASR 供試体を 15 体作製し, 供試体を自然環境に暴露することで ASR による内部劣化について検討を行っている。なお, 表の劣化度は阪神高速道路の構造物の劣化度判定に対応している。内部ひび割れを検討する手法のひとつとして, 棒形スキャナ³⁾が挙げられる。棒形スキャナは, $\phi 25\text{mm}$ のコア削孔後の穴に挿入して, $24.5\text{mm} \times 210\text{mm}$ のセンサによってスキャニングすることで, 内部の状況を観察できる装置である。一般的に用いられている棒形スキャナの計測可能深さは 350mm である。しかし, かぶり部分におけるひび割れは, コンクリート表面から内部に延伸しているひび割れが主であり, かぶりよりも深い内部の劣化状況を適切に評価することが重要と考えられ, 深さ方向 350mm より深い範囲での検討も必要と考えられる。そこで, 深さ方向 600mm の計測ができるように改良された棒形スキャナを用いて内部ひび割れ状況の検討を行った。具体的には, 暴露開始から 1245 日が経過した case15 供試体に対して $\phi 25 \times 600\text{mm}$ のコアを削孔し, 供試体の鉄筋領域や内部領域から $\phi 25\text{mm}$ コアを複数本削孔することで, 領域ごとのひび割れ状況について比較を行った。また, コアの削孔後に, コア内壁面の中央を軸方向に切断し, ひび割れ観察を行い, 棒形スキャナによる観察結果と比

表-1 供試体一覧

シリーズ	case	打設日	暴露期間 (日)	劣化度
I	1	2007/8/3	463	小
	2		790	中
	3		1149	大
II	4	2008/3/12	550	中
	5		1168	大
	6		1538	大
III	7	2008/9/18	1845	大
	8		1523	大
	9		暴露継続中	大
IV	10	2012/11/2	28	健全
	11		暴露継続中	中
	12		暴露継続中	中
	13		暴露継続中	中
	14		629	小
	15		1245	中

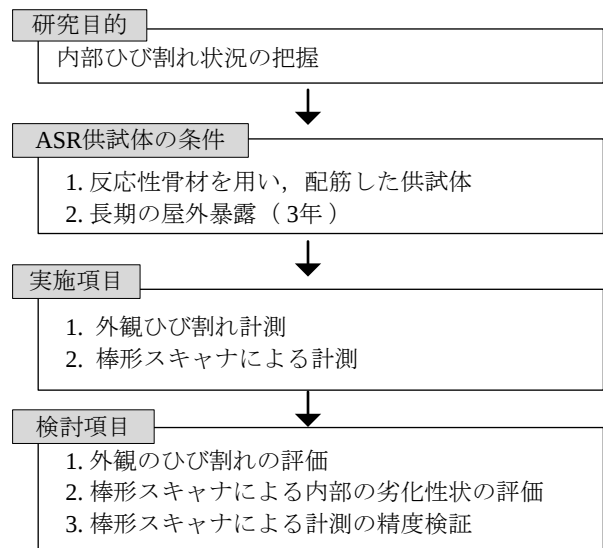


図-1 研究フロー

*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 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)

較することで、精度検証を行った (図-1 参照)。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

作製した供試体は計 15 体 (表 - 1 参照) であり、その内訳は、コンクリート物性値について検討を行ったシリーズ I (case1~3) の 3 体、外観損傷と内部損傷の関係について検討を行ったシリーズ II (case4~6) の 3 体、鉄筋損傷について検討を行ったシリーズ III (case7~9) の 3 体である。また、シリーズ IV (case10~15) の 6 体は、劣化度中、大のみの実験を行ったシリーズ II の不十分点を補うために作製している。本稿では、内部ひび割れ状況の把握を目的に、case15 供試体から $\phi 25 \times 600\text{mm}$ のコアを複数削孔し、棒形スキャナによる計測を実施した。case15 供試体の寸法は、図-2 (1) に示すように、 $340 \times 340 \times 905\text{mm}$ であり、かぶりは 20mm に設定し、鉄筋では SD295 を用いた⁴⁾。

2.2 使用材料および配 (調) 合

コンクリート配合は、 $W/C=46\%$ 、 $s/a=43\%$ 、単位水量は 175kg/m^3 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。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/m^3 に設定し、 NaCl を添加した。case15 供試体の主鉄筋は、D19 鉄筋を 12 本配置し、帯鉄筋は、供試体の端面から D16、D10、D16 を 235mm ピッチで 1 本ずつ配置している。D16 帯鉄筋は、昭和 50 年頃に建設された構造物からはつり出した竹節鉄筋の直線部分を曲げ加工し用いた。D19 の主鉄筋、および D10 の帯鉄筋には、現在、北九州地区で流通している鉄筋を用いている。主鉄筋の L 字加工部分については、コアの削孔の際、コアビットとの接触を避けるために、帯鉄筋に沿うように配筋している。

3. 外観ひび割れ

3.1 ひび割れ観察方法

外観ひび割れは、ひび割れ幅およびひび割れ長さを計測の対象とした。計測の対象面は東面、西面、および上面とし、外観ひび割れを経時的に計測した。ひび割れ幅の計測は、クラックスケールを用いて行った。また、幅 0.05mm 以上のひび割れを供試体に直接マーキングし、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長さを求めた⁴⁾。

3.2 観察結果

図-3 に case15 供試体におけるひび割れ密度の経時変

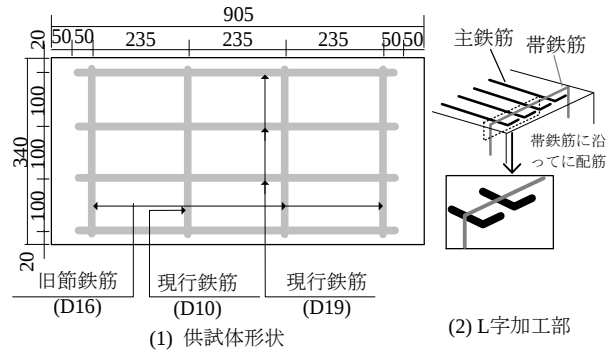


図-2 供試体形状

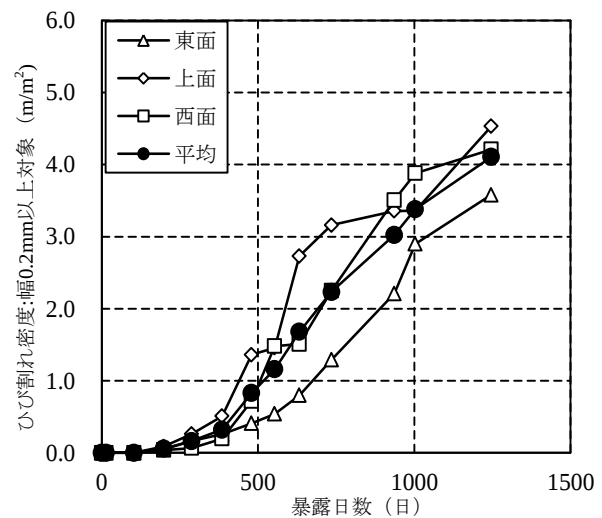


図-3 ひび割れの経時変化

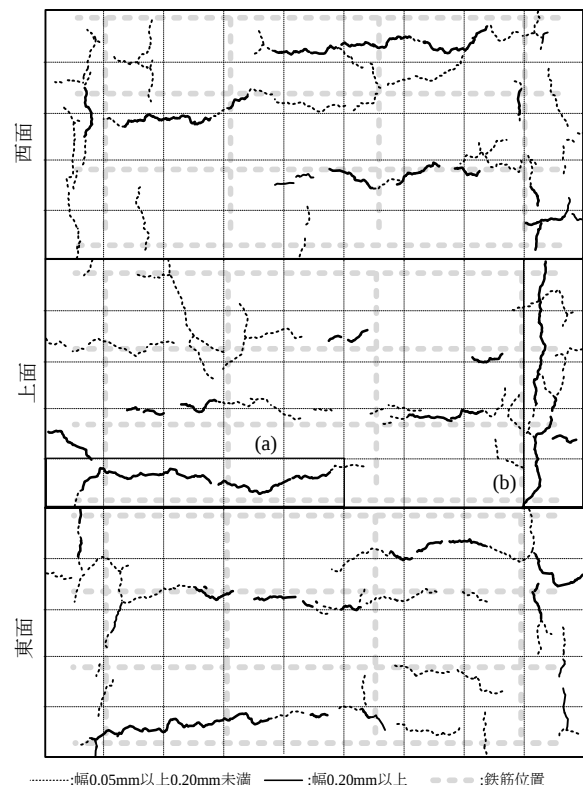


図-4 ひび割れの状況

化を示す。阪神高速道路公団が実施した構造物の健全度調査⁵⁾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。各面におけるひび割れは、暴露日数の経過に伴い増加しており、暴露試験終了時の東面、上面、西面におけるひび割れ密度は、それぞれ 3.6, 4.5, 4.2m/m² となっていた。図-4 に case15 供試体の東面、西面、上面の暴露試験終了時における外観ひび割れ状況を示す。供試体の劣化程度は中段階であることから、ひび割れは、いずれの面においても概ね供試体全域に確認された。また、帯鉄筋よりも内側の位置におけるひび割れは、図中(a)のように主鉄筋に沿って発生しており、帯鉄筋よりも外側におけるひび割れは、図中(b)のように帯鉄筋に沿うように発生していた。

図-5 に東面を代表としたメッシュ毎のひび割れについて示す。メッシュは、主鉄筋方向に 9 分割、帯鉄筋方向に 5 分割 (100×68mm) とした。メッシュ内のひび割れの評価は、図中(a)に示すようにメッシュ内のひび割れの端点と端点を結んだ直線の方法と長さで行った。なお、(b)のように、ひび割れの途中でメッシュ境界線が横断するような場合には、メッシュ境界線との交点を基点とし、ひび割れ長さ、方向を算出した。(c)のようにひび割れが枝分かれている場合は、ひび割れの端点と端点を結び、長い方のひび割れを対象とした。なお、メッシュ内に複数のひび割れが存在する場合は、各々のひび割れに対して評価した。図中 (2) にメッシュ毎のひび割れについて示す。図中[a]の供試体端面のメッシュ内におけるひび割れは、帯鉄筋に沿うような傾向が確認された。図-2 (2) のように主鉄筋 L 字加工部分を帯鉄筋に沿って配筋している影響により、ひび割れはこの L 字加工部に沿って発生したことが考えられる。また、図中 [a] 以外の帯鉄筋より深い位置においては、35 メッシュ中 23 メッシュであり、供試体全域でひび割れが確認されている。ひび割れの方に着目すると、主鉄筋に対して 45 度未満のひび割れが確認されたメッシュ数は 19 メッシュ、45 度以上は図-5 のように 4 メッシュであり、供試体表面に発生したひび割れは、主鉄筋(主鉄筋比 3.0%)による拘束の影響が帯鉄筋(帯鉄筋比 0.41%)よりも支配的であった。

4. 棒形スキャナによるひび割れ観察

棒形スキャナによる内部ひび割れ観察は、図-6 (1) に示すように、「かぶり領域」、「鉄筋領域」、「内部コンクリート領域」の 3 領域に対して実施した。なお、長さ 905mm の端部 305mm で切断し、長さは 600mm としている。これらの領域区分については、既往の研究^{4),6)}を参

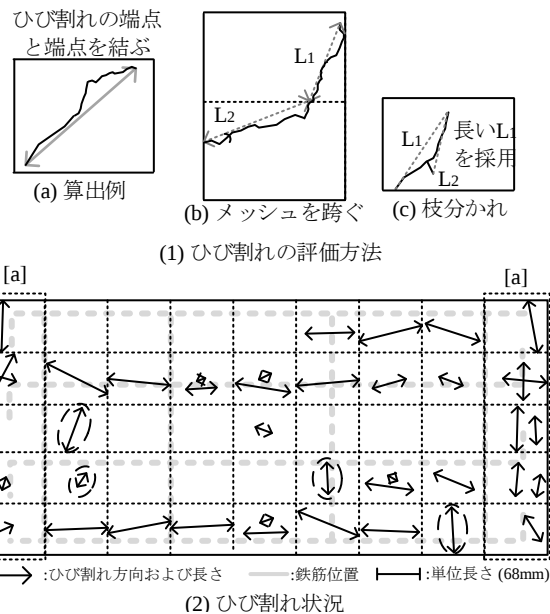


図-5 メッシュごとのひび割れ（東面）

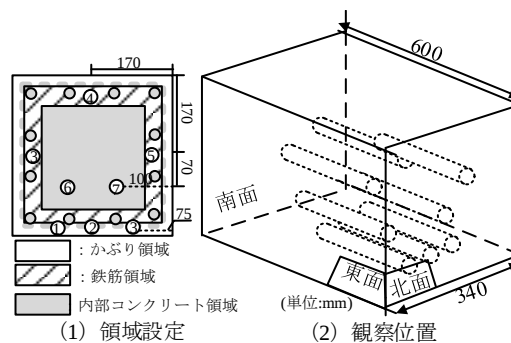


図-6 観察箇所

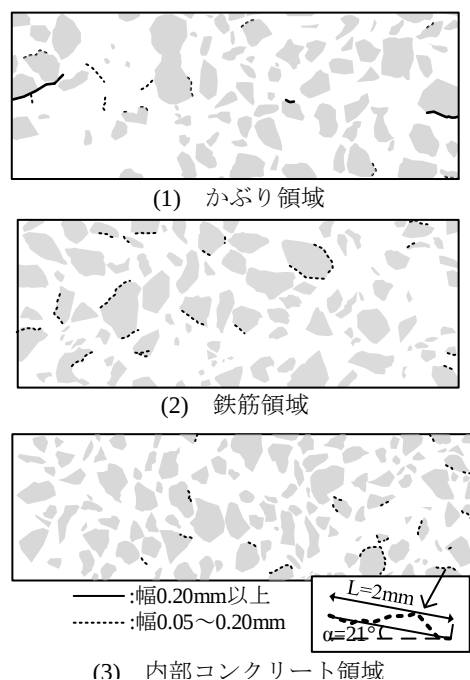


図-7 ひび割れ状況

考に、帯鉄筋方向の切断面は、(a)「かぶり領域」は、帯鉄筋の外側で鉄筋を含まない範囲とし、(b)「鉄筋領域」は、主鉄筋と帯鉄筋が配筋されている範囲とし、(c)「内部コンクリート領域」は、鉄筋が含まれない範囲である。具体的には、「かぶり領域」は、供試体表面からそれぞれ 20mm の深さまでとし、「鉄筋領域」は「かぶり領域」と「鉄筋領域」の境界からさらに深さ方向へ 40mm (コンクリート表面から 60mm) までとした。「内部コンクリート領域」は、図-6(1)に示すように供試体中心部分における 220×220mm の領域として設定した。図中(1)に示すような位置でコア削孔を行っている。なお、かぶり領域においては、削孔時に帯鉄筋と接触することが懸念されたため、コアはφ25×200mm のみの削孔となっている。また、削孔は、φ25×300mm のコアビット(φ25mm)で削孔後、600mm のコアビットに取り換えて行っている。削孔時、主鉄筋による接触などから、図中のコア番号 3, 4, 7 については、300mm の削孔となっており、5, 6 は 600mm まで削孔している。

図-7 に各領域における棒形スキャナによって得られた画像をトレースしたひび割れ状況について示す。図-7(1)~(3) は、それぞれ「かぶり領域」、「鉄筋領域」、「内部コンクリート領域」の観察結果を示している。「鉄筋領域」、「内部コンクリート領域」におけるひび割れは、骨材周りにのみ発生していたが、「かぶり領域」においては、骨材周りからモルタル部分にまで延伸しているひび割れも観察された。これらのひび割れに対して、ひび割れ長さ、幅、および角度でデータ整理を行った。ひび割れ長さおよび幅は、棒形スキャナから得られた画像に対してひび割れを、パソコンのアプリケーション上でトレースすることで長さを求めた。また、ひび割れ角度は、図-7(3) 右下に示すようにひび割れの端点と端点を直線で結び、その直線が主鉄筋方向となす角度で算出している。

図-8 に主鉄筋方向の領域ごとにひび割れ長さと幅について示す。ひび割れ長さの平均は、「かぶり領域」、「鉄筋領域」、「内部コンクリート領域」においてそれぞれ 8.6, 7.6, 6.6mm であった。ひび割れ幅の平均は、それぞれ 0.15, 0.09, 0.08mm であった。「かぶり領域」のひび割れは、「鉄筋領域」と「内部コンクリート領域」のひび割れよりも長さ、幅ともに大きくなっていた。これは、「かぶり領域」は、鉄筋拘束の影響が小さいことから、図中 (a) のような長く、幅の大きなひび割れが発生しやすくなっていたことが考えられる。

次に、深さの違いによるひび割れ状況の検討を行った。「かぶり領域」のコア削孔時に帯鉄筋を切ってしまうこ

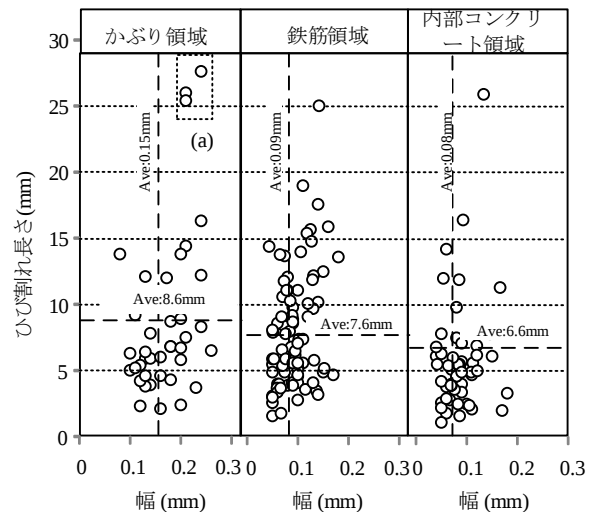


図-8 領域ごとのひび割れ長さ・幅

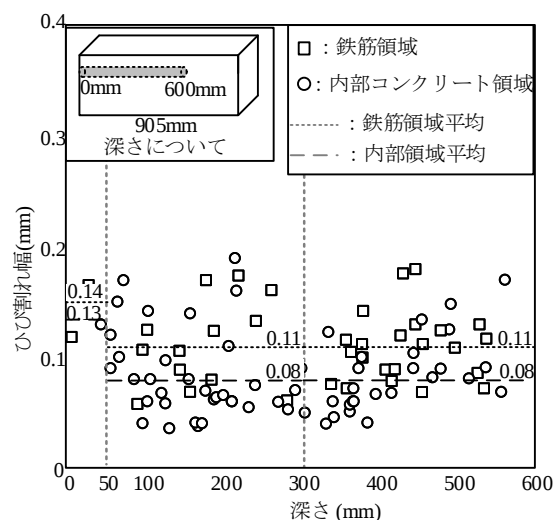


図-9 各深さにおけるひび割れ幅

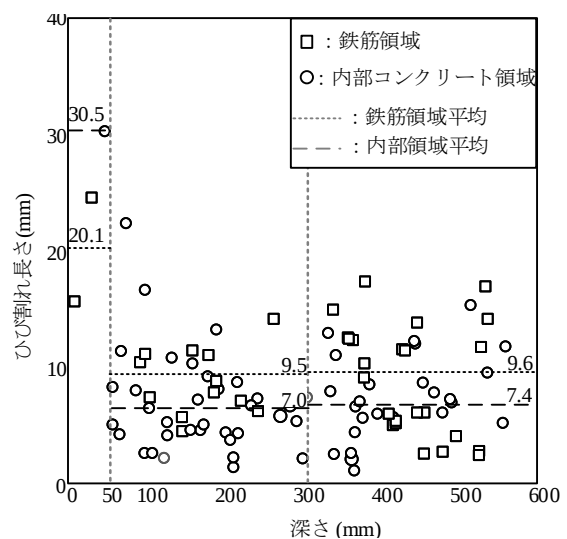


図-10 各深さにおけるひび割れ長さ

とが懸念されたため深さ 0~200mm のみの計測となっていることから、「鉄筋領域」、「内部コンクリート領域」

の 600mm まで削孔しているコア番号 5, 6 に対して実施した。

図-9 に各深さにおけるひび割れ幅を示す。なお、ひび割れの深さは、図-2 に示すように供試体端面からのかぶり部分は 50mm であるため 0~50mm、従来の棒形スキャナで計測していた 50~300mm、改良した棒形スキャナで計測可能となった 300~600mm の 3 つに区分した。それぞれの深さにおける鉄筋領域のひび割れ幅は、0.14mm, 0.11mm, 0.11mm となっており、内部領域におけるひび割れ幅は、それぞれ 0.13mm, 0.08mm, 0.08mm となっていた。ひび割れ幅は、供試体の深さに関係なく概ね様な値となるような傾向が窺われた。図-10 に各深さにおけるひび割れ長さについて示す。深さの区分については、図-9 と同様である。それぞれの深さにおける鉄筋領域のひび割れ長さは、20.4mm, 9.5mm, 9.6mm となっており、内部領域におけるひび割れ長さは、それぞれ 30.5mm, 7.0mm, 7.4mm となっていた。計測深さ 0~50mm のひび割れは、50mm より深いひび割れよりも長さは大きくなっていた。これは、0~50mm 範囲において、鉄筋拘束の影響が小さいため、ひび割れ幅および長さが進展しやすくなっていたことが考えられる。

深さ 50~300mm と深さ 300~600mm の平均ひび割れ幅、長さは同程度であり、2 領域のひび割れの発生本数の合計は、深さ 50~300mm では、45 本、深さ 300~600mm 範囲では 49 本とほぼ同程度でなっていたことから、深さによる内部の劣化状況について差は見られなかった。この要因として、コアを主鉄筋と平行に削孔していることから、計測範囲が深くなっても主鉄筋による拘束の影響は変わらないため、差が生じなかったと考えられる。

図-11 に領域ごとのひび割れの角度分布について示す。各領域における切断面のひび割れ角度を 15°毎に分類した。図より、「かぶり領域」におけるひび割れの約 5 割は供試体表面に対し 0 ~ 15°の角度をなして発生していた。「鉄筋領域」におけるひび割れの約 5 割は、0~30°となっており、角度が増加するにつれひび割れの割合は減少していた。これは、「鉄筋領域」におけるひび割れは主鉄筋に沿って発生するような傾向であることが考えられる。「内部コンクリート領域」におけるひび割れは、いずれの階級の角度の割合も約 10~30%程度となっていたが、角度が増加するにつれてひび割れの発生割合は若干減少するような傾向であり、「鉄筋領域」ほど顕著ではないが鉄筋拘束による影響が見られた。

5. 棒形スキャナの精度検証

棒形スキャナの計測精度の検証には、棒形スキャナに

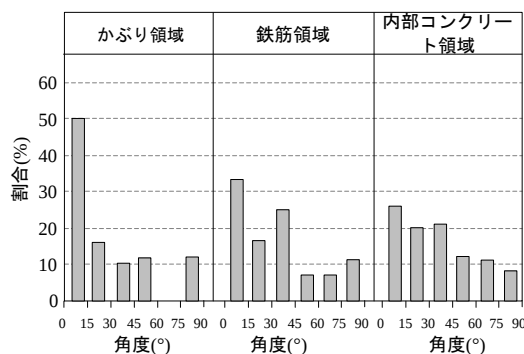


図-11 領域ごとのひび割れ角度分布

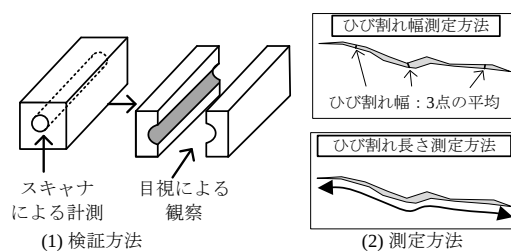


図-12 検証方法

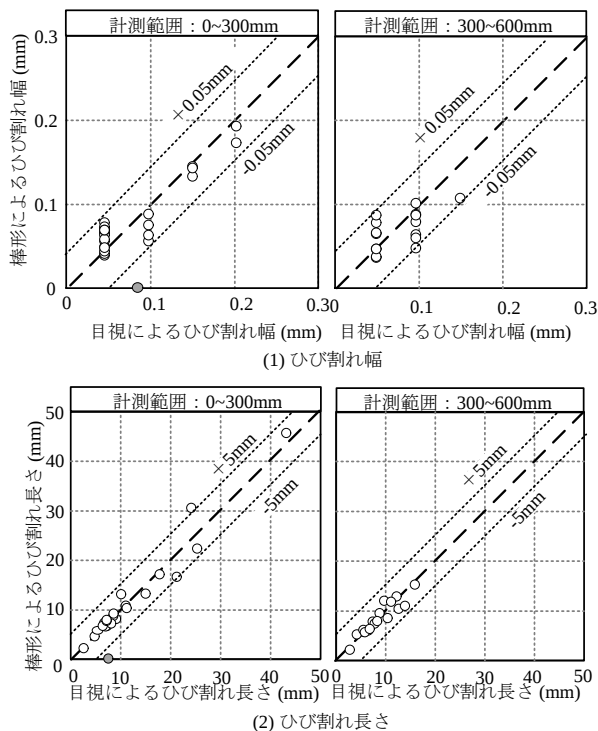


図-13 精度検証結果

よる計測後に、図-12 に示すように、コア孔周りを切断したコンクリートに対してコア孔の中央を軸方向に切断し、目視観察結果と展開画像の計測結果を比較することによって行った。目視観察は、コア孔を切断後、クラックスケールを用いてひび割れ幅ごとにマーキングし、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長さの計測を行った。精度検証は、「内

部コンクリート領域」における case15 供試体のコア内壁で行った。これまでの棒形スキャナの計測範囲は 0~300mm であったため、精度検証は、0~300mm の位置と延長をした距離 300~600mm に分けて実施した。

幅の精度検証の結果について図-13 (1) に示す。横軸は、目視によるひび割れ幅とし、縦軸は、棒形スキャナによる計測結果をプロットしている。計測範囲 0~300mm の目視による最大ひび割れ幅は、0.2mm であり、棒形スキャナの結果は、0.19mm となっており、最大ひび割れに対して、適切に評価できていた。また、0~300mm および 300~600mm の棒形スキャナによるひび割れの観察結果は、目視の結果に対して、概ね±0.05mm 以内に収まっており、ひび割れ幅は、精度よく観察できることが確認された。

長さの精度検証の結果について図-13 (2) に示す。図の横軸は、目視によるひび割れ長さとし、縦軸は、棒形スキャナによる計測結果をプロットしている。ひび割れは、10mm 未満のひび割れが大半を占めていた。これらのひび割れの誤差は、5mm 以内に収まっていたことからひび割れ長さは精度良く計測できたことが考えられる。計測範囲 0~300mm において、ひび割れ長さ 43mm のひび割れが発生しており、このひび割れの誤差は、約 6%となっており、長いひび割れに対しても適切な評価ができることが確認された。目視と棒形スキャナの観察結果において誤差が生じた原因として、内部のひび割れは、骨材まわりに発生していたひび割れが主であり、棒形スキャナでスキャンした画像の骨材とひび割れの濃淡差が小さい箇所が多く存在していたことから、ひび割れと骨材の境界部分が不鮮明になっていたことが考えられる。また、図-12, 13 の灰色のプロットで示すように棒形スキャナでは、計測できなかったひび割れが存在していた。この要因として、コア削孔は、コアビットをφ25mm×300mm から、φ25×600mm に取換えて実施しており、取換えの影響で孔が広がり、棒形スキャナとひび割れの焦点距離が合わなかったことが考えられる。

6. まとめ

本稿では、3 年間屋外暴露した case15 供試体を対象に、棒形スキャナによる内部ひび割れを実施し評価した。以下に本研究で得られた知見について示す。

- 1) case15 供試体は、供試体の西面、上面、東面それぞれ 11 範囲に分割し、ひび割れの発生状況について整理した結果、ひび割れは、偏りなく全域的発生することが確認された。
- 2) case15 供試体 から φ25mm×600mm のコアを複数削

孔し、棒形スキャナによる内部ひび割れ観察を実施した。得られた主鉄筋方向のひび割れ長さは、「かぶり領域」、「鉄筋領域」、「内部コンクリート領域」でそれぞれ、8.6, 7.9, 6.6mm であった。また、ひび割れ幅は、各領域において、0.15, 0.09, 0.08mm となっていた。かぶり領域は、鉄筋拘束の影響を受けにくく、また供試体の表面から延伸するひび割れが主であり、長さおよび幅が大きくなったと考えられる。

- 3) 深さの違いによるひび割れ状況について検討するため、かぶりを除いた従来の棒形スキャナで計測していた 50~300mm、改良した棒形スキャナで計測可能となった 300~600mm の 2 つの区間でひび割れ状況を比較した。その結果、深さ 50~300mm と深さ 300~600mm の平均ひび割れ幅、長さは同程度であり、深さによるひび割れについて差は見られなかった。これは、コアを主鉄筋と平行に削孔していることから、計測範囲が深くなっても主鉄筋による拘束の影響は変わらなかったと考えられる。
- 4) 精度検証を行った結果、ひび割れ幅は概ね±0.05mm 程度、ひび割れ長さは±5mm 未満に収まっており精度よく計測ができていた。しかし、ひび割れが大きく誤差が生じている箇所があった。この要因として、コア削孔時に、φ25×300mm のビットで削孔後にφ25×600mm のビットに取り換えて行った影響によりコア孔が広がり焦点が合わなかったことが考えられる。

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) 幸左賢二，久利良夫，川島恭志，三浦正嗣：ASR 構造物より採取したコアの力学的特性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 54A, No. 0, pp.750-758, 2008
- 3) 伊藤幸広，高橋洋一，宮本則幸：コンクリート構造物検査用棒形スキャナの開発，建設の施工企画，pp. 19-24, 2007.10.
- 4) 益田紘孝：小型供試体による A S R の劣化性状評価，九州工業大学大学院修士論文，2017
- 5) 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
- 6) 草野昌夫，幸左賢二，上原伸郎，柴田綾野：ASR 供試体の配筋条件下における内部劣化性状，構造工学論文集，Vol. 59A, pp.878-888, 2013