

論文 アルカリシリカ反応によるコンクリート内部ひび割れの評価

上原 伸郎*1・幸左 賢二*2・草野 昌夫*3・久保 佑太*4

要旨: ASR 供試体の長期暴露を行い、コンクリートの外観および内部ひび割れを詳細に目視観察するとともに、棒形スキャナを用いた内部観察手法の精度、適用性について評価した。ASR 供試体の内部では、骨材粒子の形状に沿う短いひび割れが特徴的に認められた。ASR 促進添加剤として NaCl と NaOH を用いた 2 体の比較から、外観ひび割れ性状および内部ひび割れの発生形態は、ほぼ同様と判断されたが、内部ひび割れの発生本数が異なる結果となった。小径コアと棒形スキャナによる ASR 内部観察では、削孔位置の違いに注意を要するとともに、ひび割れ端部の判定に起因する誤差が留意点として挙げられた。

キーワード: ASR, NaCl, NaOH, 内部ひび割れ, 棒形スキャナ

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASR）は、コンクリート構造物の内部に深刻なダメージを与えることは少ないとされてきた。しかし近年、構造物内部においても幅 2.0mm におよぶ顕著なひび割れが確認された事例¹⁾や、せん断補強筋曲げ加工部などで鉄筋が破断した事例²⁾など、配筋内部で生じた著しい劣化現象が報告されている。ASR 構造物の劣化程度に関する一次判断は、コンクリート表面に発生したひび割れなどの目視観察が基本となる。しかしながら、表面におけるひび割れの生成要因は ASR 反応自体によるものではなく、内部から膨張力が作用することによる曲げひび割れであるとの知見³⁾が示されていることなどを勘案すると、表面性状と内部性状は必ずしも連続的につながったものではないと言える。

したがって本稿では、配筋条件下で長期暴露試験に供した ASR 供試体を検討対象とし、配筋内に位置する内部コンクリートのひび割れ性状を詳細に観察するとともに、外観におけるひび割れ性状との比較などから、ASR によって内部コンクリートに生じるひび割れの特徴分析を行った。なお、検討対象とした 2 体の ASR 供試体には、促進添加剤として塩化ナトリウム (NaCl) と水酸化ナトリウム (NaOH) の 2 種類をそれぞれ添加し、両者の比較も行った。さらに、内部コンクリートの観察手法として、棒形スキャナを用いた小径コア内壁の展開画像による観察を行い、当該手法による ASR 内部ひび割れの観察精度と適用性について考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 供試体形状および配合

図-1 に供試体形状を示す。供試体は、ASR による損傷及び曲げ加工部での鉄筋破断が生じた建設後 20 年以

上経過した橋脚梁を例に、1/8 スケールのものとした。軸方向鉄筋は、実橋の引張主鉄筋比と等しくなるように 1 側面当たり D19 鉄筋を 4 本配置することとし、さらに、帯鉄筋の曲げ加工部に作用する膨張力を等価とするため、各辺の軸方向鉄筋比が同一となる正方形断面の供試体とした。帯鉄筋としては 3 本 (D10×1, D16×2) を図に示す通りに配置した。なお、かぶり厚は 20mm である。

コンクリート配合を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、反応性骨材には、細骨材に長崎県産砕砂、粗骨材には北海道産砕石をそれぞれ使用した。なお、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、コンクリート中における等価アルカリ量が 8kg/m³ となるようにアルカリ添加剤を添加した。

表-1 コンクリート配合

単位量 (kg/m ³)							
水	セメント	細骨材		粗骨材		促進添加剤	混和剤
		反応性	非反応	反応性	非反応		
175	381	431	287	509	509	11.6	1.14

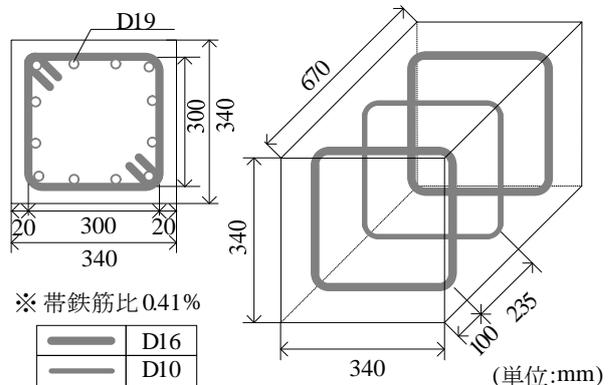


図-1 供試体形状

*1 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（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 工学部建設社会工学科

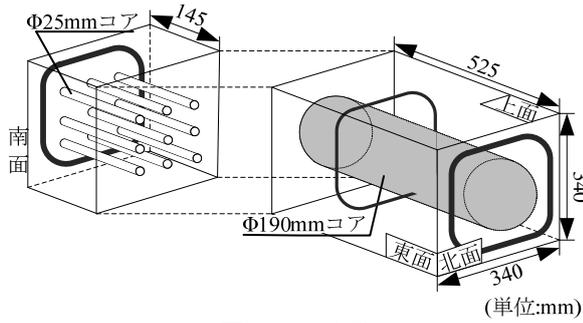


図-2 コア削孔位置

なお、筆者らは、ASR 劣化程度をパラメータとした一連の実験を行っており、今回は、アルカリ促進剤に NaCl を用いた供試体 (以後、case6 供試体)、および NaOH を用いた供試体 (以後、case8 供試体) について報告する。

2.2 コア削孔位置

図-2 にコア削孔位置を示す。図には暴露供試体の設置方位を併記している。本研究では、供試体内部のひび割れを目視によって観察するために、比較的大型の $\phi 190\text{mm} \times L525\text{mm}$ のコアを供試体断面の中心部分から採取した。また、case8 供試体については、棒形スキャナによって内部観察を行うための $\phi 25\text{mm}$ コアを図に示す供試体南面から 9 本 ($L=145\text{mm}$) 削孔した。なお、棒形スキャナ用のコア孔は、画像撮影後に軸方向に切断し、コア側面の目視観察も行った。

2.3 ひび割れ計測方法

ひび割れの目視観察では、供試体外観および内部ともに、クラックスケールによりひび割れ幅を計測した。観察対象とするひび割れ幅は、クラックスケールの最小目盛である 0.05mm 以上とした。ひび割れ長さは、観察後にデジタル画像として記録したもからアプリケーションソフトを用いてその延長を求めた。ひび割れ密度の算出は、ひび割れ長さの累積を観察対象面の面積で除すことにより求めた。なお、供試体内部のスキャン画像を用いたひび割れの判断では、PC 画面上で画像を注意深く観察した上、形状や色差からひび割れの判別を行っており、その精度については、本稿 4 章において後述する。

3. ひび割れ性状

3.1 外観ひび割れの経年変化

ASR 促進剤に NaCl を用いた case6 供試体と同じく NaOH を用いた case8 供試体の外観におけるひび割れ密度の経年変化を図-3 に示す。なお、同図では、阪神高速道路公団が実施した構造物の健全度調査⁴⁾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。case6 および case8 の経年変化を比べると、おおよそ 2 年後までの間で NaCl を用いた case6 供試体の方が NaOH を用いた case8 に比べてひび割れ密度の進展が速い。約 2 年後の両者の

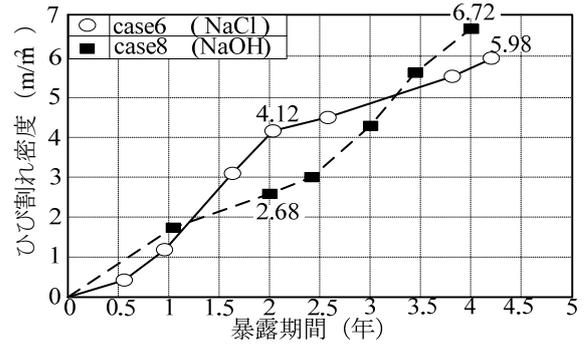


図-3 外観ひび割れ密度の経年変化

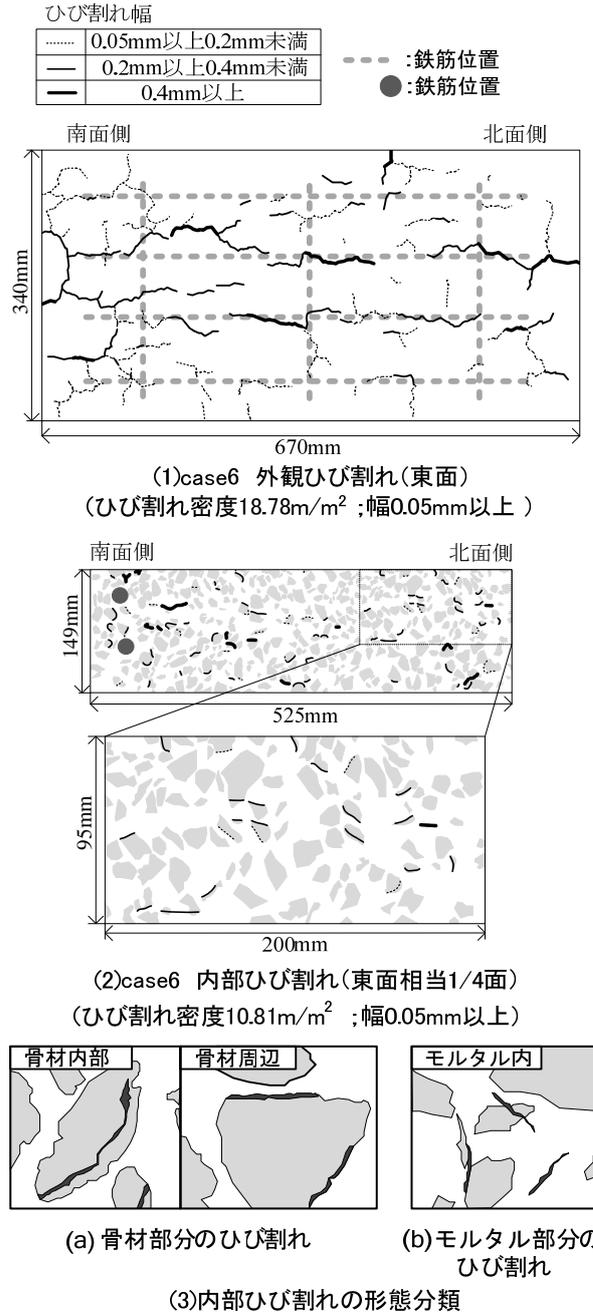


図-4 外観と内部ひび割れの性状比較 (case6; NaCl)

算出値を比較すると、case6 では $4.12\text{m}^2/\text{m}^2$ (2 年 1 ヶ月)、case8 では $2.68\text{m}^2/\text{m}^2$ (2 年) となった。一方、2 年経過以降では、ひび割れ密度の進展傾向が逆転し、約 4 年後の

値を比較すると、case6では5.98m²/m²、case8では6.72m²/m²となり、また、2年から4年後までの2年間におけるひび割れ密度の進展量は、case6で約1.86m²/m²、case8で約4.04m²/m²となった。

3.2 外観と内部ひび割れの比較

外観ひび割れと内部ひび割れの性状比較を図-4に示す。図では一例として、暴露期間の最終段階における(1)case6東面外観と(2)φ190mmコア側面から東面の深部に相当する1/4面を示している。また、ひび割れ表記は、0.05以上0.2mm未満、0.2以上0.4mm未満、および0.4mm以上の3水準で表記した。

外観ひび割れの特徴としては、図中(1)から明らかであるように、軸方向鉄筋に沿った比較的幅の広いひび割れが卓越するとともに、これらを連結するように微細なひび割れが発生している。なお、この形態はcase6とcase8の双方の外観全面において、ほぼ同様に認められる傾向であった。

一方、図中(2)から内部ひび割れの傾向を見ると、一部のもの、図中(3)(b)に示すような、モルタル部分で生じているものの、内部ひび割れの大部分は、図中(3)(a)に示すような骨材部分のひび割れとして発生していた。以上のことから、ASRによってコンクリート内部に発生したひび割れの特徴は、骨材の粒子形状に沿う短いひび割れが主要であると判断された。

3.3 促進添加剤が異なる供試体の内部ひび割れ比較

促進添加剤が異なる供試体 case6 (NaCl) と case8 (NaOH) の内部のひび割れ損傷図を図-5に示す。ひび割れ損傷図は、双方の暴露期間最終段階におけるφ190mm コア東側面を一例として示すものであり、幅0.05mm以上を対象としたcase6東面におけるひび割れ密度は10.81m²/m²、case8では同じく6.86m²/m²となっている。また、図-6では、内部ひび割れの発生形態を数値的に比較するため、図-4(3)に示したような骨材部分とモルタル部分にひび割れを分類し、その発生本数、長さ、幅、角度の比較を示した。なお、図-6(2)には、φ190mm コア全側面で観察されたすべてのひび割れを対象に幅ごとに分類したひび割れ密度の算出結果を併記している。

図-6(1)に示す通り、ひび割れ発生本数はcase6の333本に対してcase8では182本となっており、約1.8倍の差が生じた。また、図-6(2)に示すように、φ190mm コア全側面におけるひび割れ密度はcase6で10.41m²/m²、case8で7.26m²/m²であるが、幅0.2mm以上を対象として算出するとcase6では7.28m²/m² (4.95+2.33m²/m²)、case8では3.39m²/m² (2.13+1.26m²/m²)と約2倍の差が生じる結果となった。以上のように数値的な比較では、外観におけるひび割れ密度の算出値(図-3参照)で見られた両者の傾向(case6<case8)と内部ひび割れの傾向は逆転するも

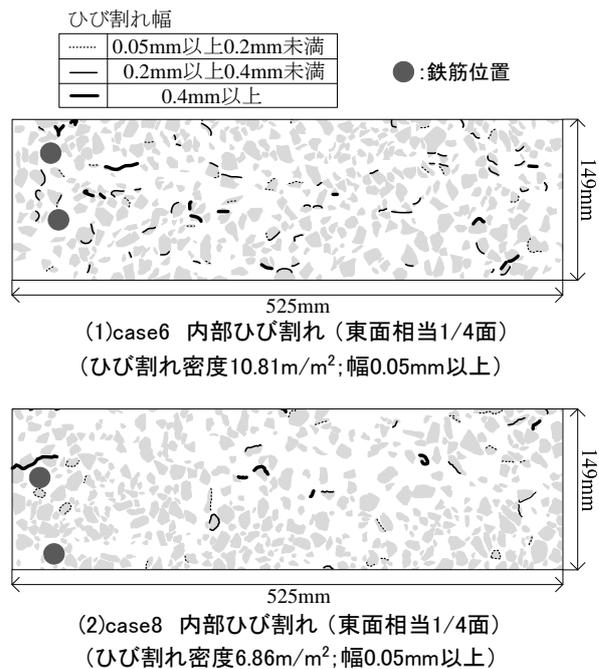
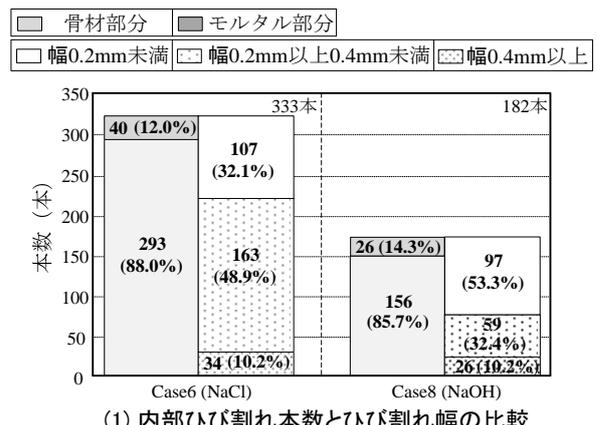


図-5 φ190mmコア東側面における内部ひび割れ損傷図



(1) 内部ひび割れ本数とひび割れ幅の比較

	case6 (NaCl)		case8 (NaOH)	
	骨材部分	モルタル部分	骨材部分	モルタル部分
平均長さ(mm)	9.0	15.3	11.6	17.2
平均幅(mm)	0.24	0.28	0.18	0.40
平均角度(°)	37.0	26.4	34.4	29.5
密度(m ² /m ²)	トータル	10.41	7.26	
	0.05~0.2mm	3.12	3.87	
	0.2~0.4mm	4.95	2.13	
	0.4mm以上	2.33	1.26	

(2) 内部ひび割れの形態比較

図-6 促進添加剤種類と内部ひび割れの傾向

のであった。

一方で、ASR反応によって生じた内部ひび割れの個々の形状に関して、その傾向を長さ、幅、角度の平均値で比較すると、ひび割れ長さにおいて若干case8の方がcase6よりも大きな数値となっているものの、図-6に図示したひび割れ損傷図を見ると、両者の内部ひび割れは、概ね骨材の粒子形状に沿った短いひび割れとして観察されるものであった。このことから、ひび割れ発生数量に関して、両者に明確な違いが生じたものの、ひび割れ個々

の発生形態における特徴としては、ほぼ同様の傾向であったと考えられた。

本研究では、NaCl と NaOH を促進添加剤として使用し、屋外暴露試験によってひび割れ性状の比較を行った。その結果、外観および内部の双方において、前述のようなひび割れ発生傾向の相違が認められた。一般的に、アルカリ促進剤の影響は、NaOH が OH⁻ イオンを直接供給するため比較的早期に反応が進み、劣化程度も大きいとされている⁵⁾。しかしながら、今回得られた傾向は、必ずしもこれと合致するものではなかった。ここで、推測の域を脱するものではないが、既往の研究例と今回の実験条件との相違点を考えると、差異の要因としては次の通り推察される。まず、本実験の促進剤添加量は 8kg/m³ (対セメント比 2.1%) であり比較的に量が多いこと、浸漬溶液ではなくコンクリートに添加していること、長期暴露によりゆっくりと反応が進行していること、さらには、骨材種類が異なることも要因の一つとして考えられる。

4. 棒形スキャナによる内部観察

棒形スキャナは付着切れ、剥離、中性化深さの判断などに適用されている⁶⁾。しかし、3.2 で述べたように、ASR によって生じる内部ひび割れは、主に骨材周りにおいてその粒径に沿う短いひび割れが多く、さらに、ひび割れ幅の計測については、前章までで記述したように、最少幅として 0.05~0.1mm 程度までが観察対象になると考えられる。

したがって本章では、棒形スキャナを用いた小径コア内壁の撮影画像を用いて、ASR 内部コンクリートのひび割れ形態を観察し、同一コアの目視観察結果と比較することでひび割れ観察精度の検討を行った。

4.1 棒形スキャナ計測方法

図-7 に棒形スキャナを用いた内部ひび割れの撮影方法を示す。具体的には、観察用の小径コア (φ25mm) を削孔し、洗浄および十分な乾燥ののち、図中(a)示すように棒形スキャナを挿入する。次いで、図中(b)のようにセンサを回転させることでコア内壁の展開画像を得ることができる。なお、センサの測定深さは 210mm である。

4.2 展開画像による計測精度の検証

棒形スキャナの計測精度の検証には、図-2 に示した 340×340×145mm 部分の断面中央付近において削孔した 9 本のコア孔を用いた。それぞれのコア内壁を棒形スキャナで撮影した後、図-8 に示すように、コア孔を軸方向に切断し、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棒形スキャナの精度検証を行った。

目視観察とスキャナ画像を用いた観察結果について、ひび割れ幅の比較を図-9、ひび割れ長さの比較を図-10 に示し、両図には誤差が生じた要因説明として、

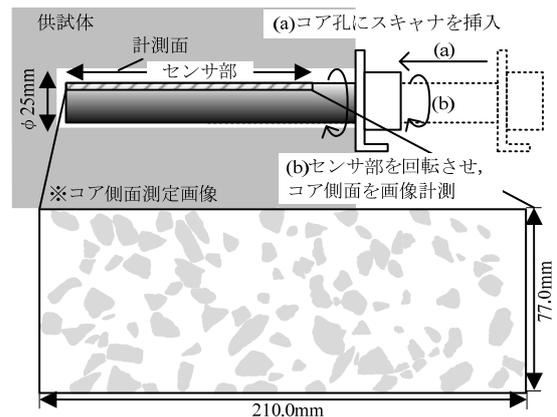


図-7 棒形スキャナ測定方法

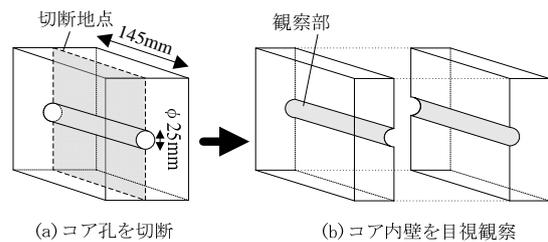
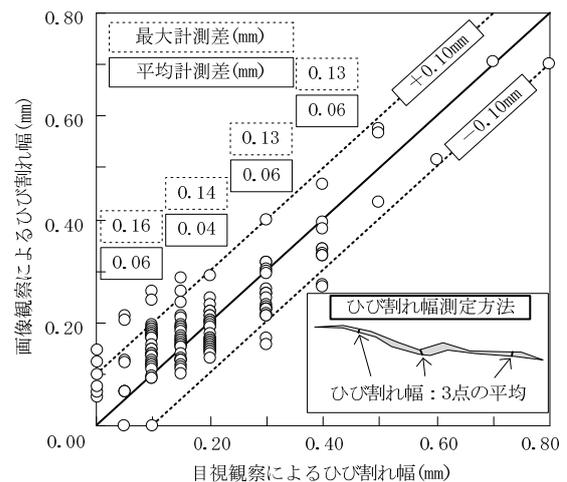
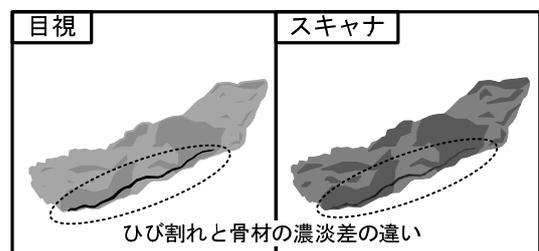


図-8 φ25mmコア目視観察方法



(1) 目視と画像による計測結果の比較(ひび割れ幅)



(2) ひび割れ幅に生じる誤差の要因(模式図)

図-9 棒形スキャナの計測誤差(ひび割れ幅)

観察されたひび割れの代表例を模式図にして併記した。

(1) ひび割れ幅の差

ひび割れ幅は、図-9(1)中に示すように、1つのひび割れに対して3点でひび割れと直交する方向に幅を計測し、その平均値を用いている。

図-9(1)より、ひび割れ幅の誤差について目視観察に

よる数値を基準として、ひび割れ幅ごとにその差を見ると、平均計測差は0.04~0.06mm程度となり、最大計測差は0.13~0.16となった。また、概ね±0.1mm程度の範囲にほとんどのひび割れ計測結果が含まれることから、ひび割れ幅に対する棒形スキャナの計測誤差は、±0.1mm程度であると判断される。ここで、図-9(2)には、ひび割れ幅の計測において生じた誤差の要因について示している。主に骨材内部に発生したひび割れを判断する際には、スキャン画像上で骨材自体と骨材内部のひび割れの濃淡差が小さくなることが多く、この場合には、ひび割れと骨材の境界部分が不鮮明になることから、ひび割れ幅の判断に誤差が生じたものと考えられる。なお、今回使用した棒形スキャナの解像度は600dpi（ピクセル長約0.042mm）であり、また、模擬ひび割れを観察し精度の検証を行った際に生じた誤差は、0.10mm~0.13mm程度であったとされている⁷⁾。この点からも今回の結果は、概ね妥当な範囲であると考えられる。

(2) ひび割れ長さの差

図-10(1)より、ひび割れ長さの誤差については、平均計測差で1.8mm、最大計測差は9.7mmであった。また、5本のひび割れを除いて±5mm程度の範囲に収まっており、このことから、棒形スキャナを用いた画像観察において、ひび割れ長さは比較的精度よく計測することが可能と判断される。

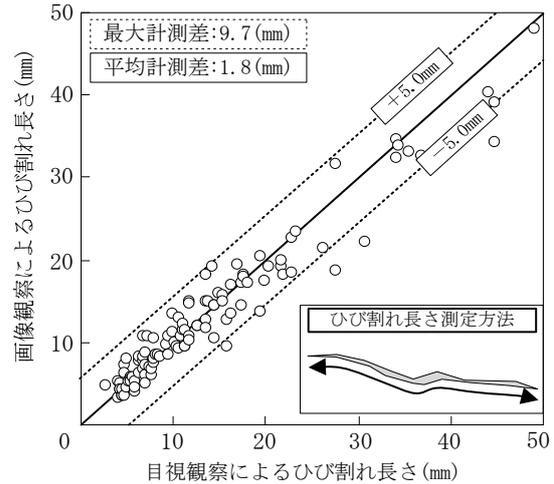
ここで、図-10(1)より、比較的大きな誤差が生じているものは、目視観察結果よりも画像観察結果において、ひび割れ長さが短く計測されたもの（図中X=Yの下側）である。この要因については、図-10(2)の模式図に示すように、ひび割れの端部でひび割れ幅が徐々に小さくなるような場合には、前項で示したひび割れ幅に生じる誤差の要因と同様に、骨材とひび割れの境界部分が不鮮明となる場合があり、その結果、目視で確認できたひび割れ端部が、棒形スキャナの画像ではひび割れとして認識できないことが主な原因として考えられた。

4.3 コア径が観察結果に与える影響

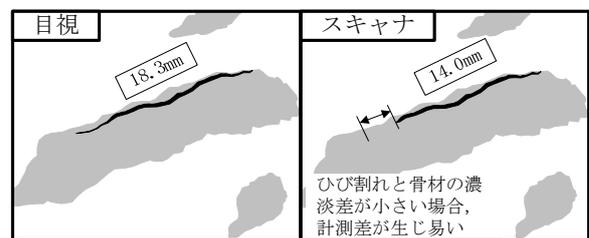
コア径の相違により観察面の曲率が変わることで、観察結果に差が生じることも考えられる。曲率が変化した場合には、ひび割れ延長が切断面によって分断される可能性が高まることから、ひび割れ長さの計測結果が最も影響を受けると想定される。したがって本項では、内部ひび割れの計測長さに着目し、φ190mm コア側面とφ25mm コア切断開口面との目視観察結果の比較を行った。

ひび割れ長さ計測結果を5mmごとに分類したひび割れ本数の分布を図-11に示す。なお、φ190mm コア側面の観察対象面積は313374mm²、φ25mm コア切断開口面の観察対象面積は102494mm²である。

計測された総ひび割れ本数は、φ190mm コア側面で



(1) 目視と画像による測定結果の比較(ひび割れ長さ)



(2) ひび割れ長さに生じる誤差の要因(模式図)

図-10 棒形スキャナの計測誤差(ひび割れ長さ)

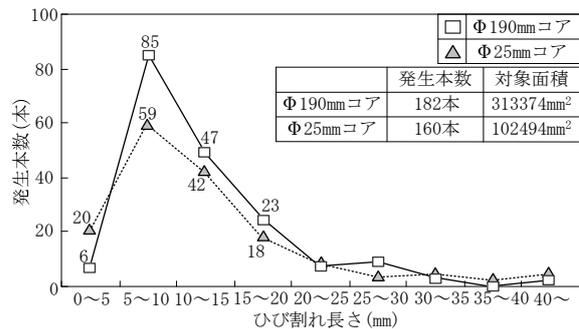


図-11 コア径の違いによるひび割れ長さ計測の比較

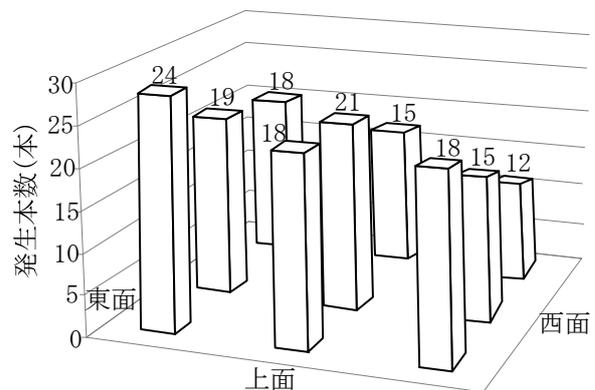


図-12 φ25mmコアの観察位置によるひび割れ本数の差

182本であり、φ25mm コア切断開口面では160本であった。ひび割れ長さごとの本数に着目すると、両者とも20mm以下のものが全体の約85%を占め、長さ5mm~10mmのひび割れが最も多く観察されるなど、ほぼ同様

の傾向として確認された。このことから、ひび割れの約85%が長さ20mm未満であった今回の実験においては、 $\phi 25\text{mm}$ と $\phi 190\text{mm}$ のコア側面の曲率の差が、ひび割れ長さの計測結果に与える影響は小さかったと考えられる。

一方で、両者の観察対象面積は前述の通り異なっており、 $\phi 25\text{mm}$ コア切断開口面におけるひび割れ本数を $\phi 190\text{mm}$ コア側面の面積で換算すると、換算ひび割れ本数は489本($160\text{本} \div 102494\text{mm}^2 \times 313374\text{mm}^2$)となる。換算本数にこのような差が生じた理由としては、観察箇所が同一ではないことが要因の一つとして考えられる。ここで、 $\phi 25\text{mm}$ の観察位置の違いによるひび割れ本数の差を図-12に示す。図中に示す西面、上面、および東面の表記は、図-2で示した供試体観察対象部位の方位を示している。

図-12より、 $\phi 25\text{mm}$ コアそれぞれの切断開口面で観察されたひび割れ本数は、12本から24本まで約2倍の差が生じていることが確認された。この結果から、コンクリート内部のひび割れは、鉄筋拘束の影響などにより偏在している可能性もあるため、コア削孔箇所が異なる場合には、コアの側面上に現れるひび割れ本数に差が生じることも考えられる。また、削孔径が小さい場合には、その傾向が顕著になると推察される。以上のことから、小径コアによって内部ひび割れを評価する場合には、削孔本数を十分に確保し、平均化を図るなどの注意が必要と考えられる。

5. まとめ

本研究では、促進添加剤としてNaCl、またはNaOHをコンクリートの等価アルカリ量としてそれぞれ 8kg/m^3 添加したASR供試体2体を作製し、約4年間の暴露試験後に外観ひび割れ性状とコンクリート内部のひび割れ性状を詳細に観察した。さらに、ASRが生じたコンクリートの内部観察手法として、小径コアを用いた棒形スキャナによる観察方法の精度、適用性について検討した。本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- 1) 本研究の実験条件下では、約4年後の外観ひび割れ密度がNaClを添加したもので 5.98m/m^2 、NaOHでは 6.72m/m^2 であった。ひび割れ密度の進展は2年後までNaClの方が速く、それ以降はNaOHの方が速い傾向となった。また、コンクリート内部のひび割れでは、NaClのひび割れ本数がNaOHの約2倍の量となった。
- 2) ASRによるコンクリート内部のひび割れは、85%程度以上を占める大部分が粗骨材周辺あるいは内部で発生しており、その形態としては骨材粒子の粒形に沿

った形状であることを明らかにした。

- 3) 棒形スキャナを用いた観察手法の精度を同一コア側面の展開画像と目視観察の比較によって検証した結果、その精度は、ひび割れ幅で $\pm 0.1\text{mm}$ 程度、ひび割れ長さで $\pm 5\text{mm}$ 程度であった。また、ASR内部ひび割れを観察する上では、ひび割れと骨材の境界部分における濃淡差に起因して、計測結果に誤差が生じる可能性があることを示した。
- 4) 今回検討したコア径の範囲($\phi 25\text{mm}$ 、 $\phi 190\text{mm}$)では、コア側面あるいは内壁面の観察によってASRコンクリート内部のひび割れ形態を同様に観察できると考えられたが、観察箇所の違いに起因するばらつきが生じる場合があり、特に、小径コアの場合には、十分な削孔本数の確保が必要であることを示唆した。

参考文献

- 1) Ono, K., Taguchi, M.: Long-Term Behavior of AAR Bridge Pier and the Internal Deterioration, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction pp. 1167-1174, 2000
- 2) 例えば、湊俊彦, 鳥居和之: コンクリート構造物の鉄筋破断および配筋不良のASR劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp.989-994, 2010.7
- 3) 例えば、鍵本広之, 川村満紀: 乾燥・湿潤繰り返しを受ける反応性骨材含有コンクリート円柱内部のひずみ, 相対湿度および表面ひび割れの進展, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 977-982, 2011.7
- 4) 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
- 5) 例えば、黒田保, 井上正一, 吉野公, 西林新蔵: コンクリートのASR膨張に与えるアルカリ含有量と促進養生条件の影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 9, pp. 163-171, 2009.10
- 6) 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
- 7) 志岐和久, 伊藤幸広, 石橋孝治, 山内直利, 宮本則幸: 棒形スキャナによるコンクリート構造物の検査精度に関する研究, 土木学会西部支部研究発表会, V-009, pp. 741-742, 2013.3