

論文 構造部材の特性と ASR ひび割れとの関係に関する実験的検討

山村 智^{*1}・児島 孝之^{*2}・葛目 和宏^{*3}・岡本 享久^{*4}

要旨： かぶり，鉄筋比，寸法形状等の構造部材特性が ASR ひび割れに与える影響を把握することを目的として，反応性骨材を用いた供試体の促進養生試験を実施した。実験結果では，鉄筋比が低下すると細かな亀甲状のひび割れを呈するだけでなく，幅の大きいひび割れの発生量が高くなった。また，寸法形状が大きい供試体では局所的ではあるが幅の大きなひび割れが発生することを確認した。また，実際の橋脚梁部分で見られるような主鉄筋軸方向に進展するひび割れが，直方体形状の供試体側面部分で確認できた。

キーワード： ASR ひび割れ，かぶり，鉄筋比 寸法形状

1. はじめに

近年，ASR によって過大な膨張が生じた橋脚の梁部分では鉄筋の曲げ加工部で破断を生じた事例が報告されている¹⁾。しかし現状では，ASR 劣化を生じた構造物に対する維持管理においては，鉄筋破断の有無や内部への劣化の進行を評価する適切な診断手法が確立されていない²⁾。さらに，耐荷性能についても ASR 膨張による鉄筋の破断，付着・定着不良により構造物の剛性の低下が生じ，耐荷力に支障をきたす恐れがあるとの報告³⁾もあり，ASR 劣化が過度に進展している構造物の耐荷性能を適切に評価する方法の確立が急務となっている。

本研究では，反応性骨材を用いて作製した道路橋 T 型橋脚梁部分を対象とした供試体を，促進養生で ASR 劣化を生じさせた。これは構造物の維持管理において基本となる外観目視点検での劣化状況の判定基準が明確になっていないため，コンクリート構造物のひび割れ状況の評価に関する基礎データを得ることを目的としたもので，本実験で設けた各要因が ASR 劣化によるひび割れに与える影響を把握することとした。

2. 実験概要

2.1 各供試体要因

本実験では安山岩系の反応性骨材を使用した鉄筋コンクリート供試体を 40 100%RH の促進養生で ASR によるひび割れ進展状況を検証した。コンクリート構造物の劣化進展の評価に関する基礎データを得ることを目的に，構造部材の特性であるかぶり 4 水準，鉄筋比 7 水準，寸法形状 3 水準とした要因がひび割れ性状に与える影響を把握できるように計画した。

(1) かぶり供試体

かぶり供試体断面図を図-1 に，かぶり供試体要因を表

-1 に示す。供試体寸法は 410×410×600mm とし，供試体によって，かぶりを 100mm, 25mm および 75mm, 50mm の組み合わせとした。

表-1 かぶり供試体要因

供試体名		K-75	K-100
かぶり		75mm, 50mm	100mm, 25mm
使用鉄筋		D6, D10, D19	
鉄筋比	圧縮側	0.102%	0.089%
	引張側	0.409%	0.478%
	スターラップ	0.125%	0.088%

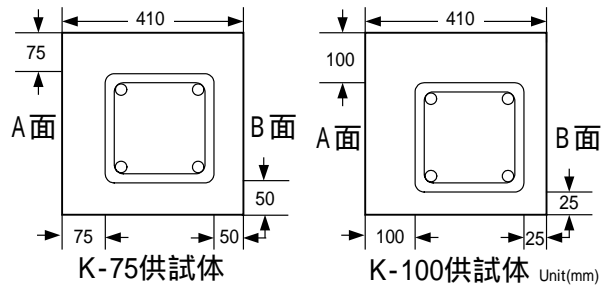


図-1 かぶり供試体断面図

(2) 鉄筋比供試体

鉄筋比供試体要因を表-2 に示す。供試体寸法は 250×250×600mm とし，使用鉄筋を 3 種類 (D-6, 10, 13)

表-2 鉄筋比供試体要因

供試体名	寸法 (mm)	使用鉄筋(鉄筋比)			スターラップ間隔 (mm)
		圧縮側	引張側	スターラップ	
No.1	250×250×600	D13(0.46)		D10(0.23)	250
No.2				D6(0.20)	125
No.3				D6(0.10)	250
No.4		D10(0.26)		D10(0.23)	250
No.5				D6(0.20)	125
No.6				D6(0.10)	250
No.7		D6(0.12)		D6(0.10)	250

*1 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 (正会員)

*2 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科教授 (正会員)

*3 (株)国際建設技術研究所 代表取締役社長 (正会員)

*4 立命館大学 理工学部 環境システム工学科教授 (正会員)

とした。またスターラップの間隔は 250mm, 125mm の 2 種類を挙げ、主鉄筋 3 水準、スターラップ 3 水準を組み合わせて計 7 種類の鉄筋比供試体を作製した。同じ寸法の無筋供試体も作製し、鉄筋比の違いがひび割れ性状に与える影響を検討した。

(3) 寸法形状供試体

供試体の形状は図-2 に示すように 600×600×600mm, 400×400×600mm, 200×200×600mm の 3 種類とした。これらの寸法形状供試体の作製要因を表-3 に示す。供試体寸法は、出来るだけ鉄筋比が同一となるように配置した。

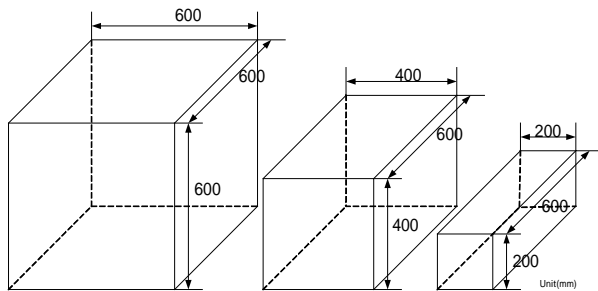


図-2 寸法形状供試体図

表-3 寸法形状供試体要因

供試体名	寸法(mm)	使用鉄筋 (鉄筋比%)		
		圧縮側	引張側	スターラップ
S-200	200 × 200 × 600	D6 (0.189)	D10 (0.420)	D6 (0.122)
S-400	400 × 400 × 600	D10 (0.102)	D19 (0.409)	D6 (0.079)
S-600	600 × 600 × 600	D16 (0.127)	D29 (0.412)	D10 (0.095)

2.2 使用材料

ASR 劣化は JIS A 1145(化学法)で無害ではないと判定された安山岩系反応性骨材を使用して再現した。反応性細骨材(密度 2.64g/cm³, 吸水率 3.11%), 反応性粗骨材(密度 2.67g/cm³, 吸水率 2.15%)を使用した。事前にペシマム試験を行い、反応性骨材と非反応性骨材の比率は粗骨材では反応性 50 : 非反応 50, 細骨材では反応性 40 : 非反応性 60 とした。セメントには普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³, 粉末度 3280cm²/g), 非反応性骨材として細骨材には野洲川産川砂(密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.58%), 粗骨材には能登産碎石(密度 2.69g/cm³, 吸水率 1.58%)を使用した。水セメント比は 62%, コンクリート中の目標アルカリ量は 12.0kg/m³ となるように NaCl を添加した。コンクリート示方配合を表-4 に示す。

表-4 コンクリート示方配合

Unit weight(kg/m ³)						AD No.70	NaCl (kg)
W	C	S		G			
		S1	S3	G1	G3		
168	271	512	350	500	494	0.27	20.1

2.3 測定項目

(1) 外観観察

ASR 劣化によるひび割れ性状の把握は、クラックスケールを用いたひび割れ幅の測定、ひび割れのスケッチによって行い、測定時のひび割れ状況およびひび割れ密度を整理した。なおひび割れ密度は(1)式を用いて、測定したひび割れの総延長を表面積で除して算出している。

$$D=L/A \quad (1)$$

ここで、D : ひび割れ密度 m/m², L : ひび割れ総延長 m, A : 供試体表面積 m²

(2) 膨張量測定

ASR 膨張量はコンタクトゲージ法により膨張量の経時変化として測定した。各供試体軸方向および周方向を測定し、軸、周方向の平均値をコンクリート表面の膨張量として 7 日材齢毎に整理を行った。

(3) 鉄筋ひずみ

各種鉄筋に鉄筋ゲージを貼付け ASR 膨張による鉄筋のひずみを測定し鉄筋ひずみから内部の膨張傾向を把握した。

(4) 超音波伝播速度

超音波測定装置としては PUNDIT(Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)を使用し、全供試体を対象に軸方向に透過させコンクリートの変質程度を評価した。伝播時間は測定位置で数回測定した最小時間とし、有効数字 3 桁まで求めた。測定に使用した振動子の直径は 64mm であった。

2.4 養生方法

ASR 劣化を短時間で進行させるため、作製した供試体を 40% R.H.100%の促進環境下で 355 日間養生した。

3. 実験結果および考察

3.1 かぶり供試体

(1) ひび割れ状況

図-3, 4 に K-75 および K-100 供試体の 355 日養生後のひび割れ状況図を示す。ひび割れ状況図の赤実線は幅 0.2 mm 以上のひび割れを示し、黒点線は幅 0.2 mm 未満のひび割れを示している。両供試体ともかぶりの大きな A 面の方がかぶりの小さな B 面よりひび割れが多く発生しているだけでなく、幅 0.2mm 以上のひび割れ密度も大きくなった。また、B 面同士を比較すると 25mm の方が 50mm よりひび割れが少なく、かぶり大きいほど幅 0.2mm 以上の大きなひび割れが多く発生することが分かった。

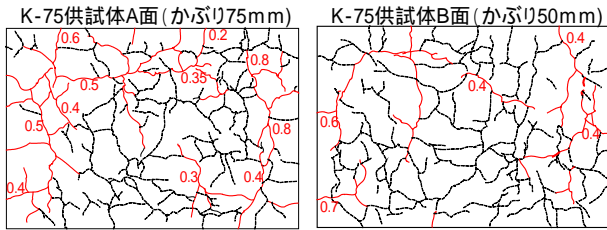


図-3 K-75 供試体ひび割れ状況図

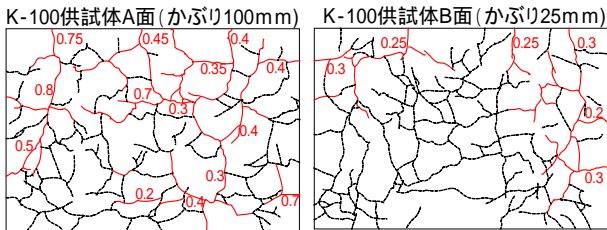


図-4 K-100 供試体ひび割れ状況図

(2) 膨張量および伝播速度

図-5 に各かぶり面の膨張量と伝播速度経時変化を示す。K-75 供試体において、かぶりによる膨張量は 75mm，50mm であまり大きな差はないが，K-100 供試体のかぶり 100mm の面での膨張量は約 5500 μ と他に比べて高い値を示す結果となった。

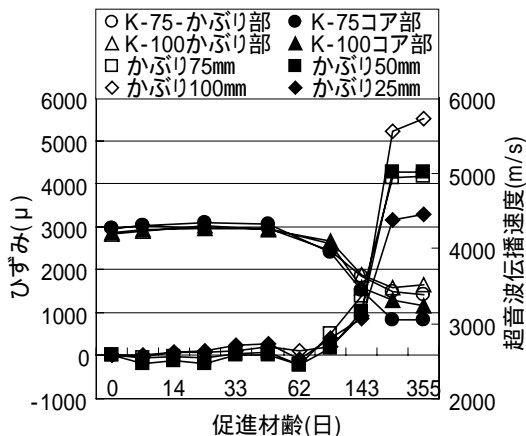


図-5 膨張量と伝播速度経時変化

促進材齢 355 日目での伝播速度は，初期値と比較し K-75 供試体コア部で約 70%，K-100 供試体コア部で約 75%まで低下しており，ひび割れ状況，膨張量とともに ASR 劣化の進展を明確に示した。次に，コア部分とかぶり部分の伝播速度を比較すると，K-75，K-100 供試体ともにコア部分がかぶり部分より遅くなった。これは，かぶり部分の測線が，主鉄筋に沿う位置であったため鉄筋の影響を受け，伝播速度がコア部より高い値を示したためと考えられる。

3.2 鉄筋比供試体

(1) ひび割れ状況および膨張量

促進材齢 355 日経過した供試体 No.1(鉄筋比が最大),No.7(鉄筋比が最小)の側面のひび割れ状況図を図

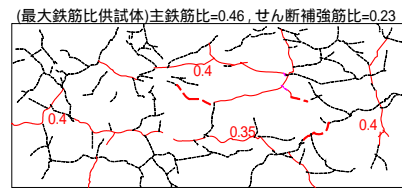


図-6 No.1 ひび割れ状況図

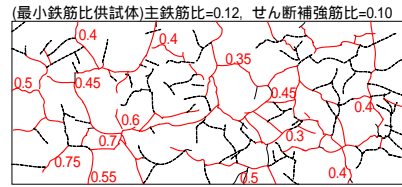


図-7 No.7 ひび割れ状況図

-6,7 に示す。図の赤実線はひび割れ幅 0.2mm 以上のものを示しており，黒点線は幅 0.2 mm未満のひび割れを示している。

図-6,7 のひび割れ状況を比較すると鉄筋比が少なくなると亀甲状のひび割れが多く発生していること，幅 0.2mm 以上のひび割れも鉄筋比に反比例して供試体で多く発生していることなどが分かる。また，ひび割れ幅に着目しても鉄筋比が最小の供試体で 0.75mm と幅の大きいひび割れが発生していた。

ここには図示していないが各供試体ともに 1 方向ではなく亀甲状のひび割れが発生していた。鉄筋比が低い供試体になるにつれて，ひび割れの亀甲模様は細かいものとなっていた。また No.1 ~ No.6 においては軸方向に走るひび割れの発生が目立つ傾向にあった。図-7 に示した No.7 の鉄筋比が最も低いが，軸方向だけでなく細かな亀甲状のひび割れが発生し，0.2mm 以上のひび割れ密度も他の供試体と比較し高い値を示していた。

図-8 に膨張量およびひび割れ密度の経時変化を示す。鉄筋比の小さい No.7 供試体ではひずみは軸方向 5500 μ、周方向 12000 μであるのに対して，鉄筋比の大きな No.1 では軸方向 1700 μ、周方向 9500 μと鉄筋の拘束効果がひずみに影響していることが分かる。また低鉄筋比供試体の方が(周方向ひずみ)/(軸方向ひずみ)の比率が小さく，幅の大きなひび割れが生じやすいことが分かる。

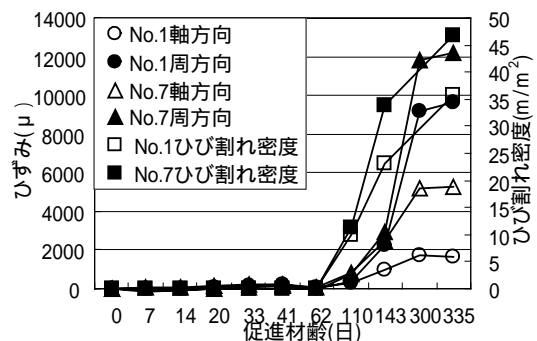


図-8 膨張量およびひび割れ密度

(2) 超音波伝播速度

図-9 に鉄筋比供試体 No.1 と No.7 の伝播速度およびひび割れ密度経時変化を示す。No.1,7 の伝播速度は促進養生 355 日経過時で 3700m/s となり、初期値 4400m/s と比較し約 15% 低下した。この値は従来の研究と類似した値となっており⁴⁾、適用範囲を限定する必要があるが機種が異なってもある程度似通った値が得られる可能性があると考えられる。また、伝播速度は促進材齢 48 日以降から急激に低下した。ひび割れ密度の増加と伝播速度の低下がほぼ同時期に起こっていることから、ASR 劣化によるコンクリートの微細ひび割れの進展を伝播速度の変化で捉えることができたといえる。

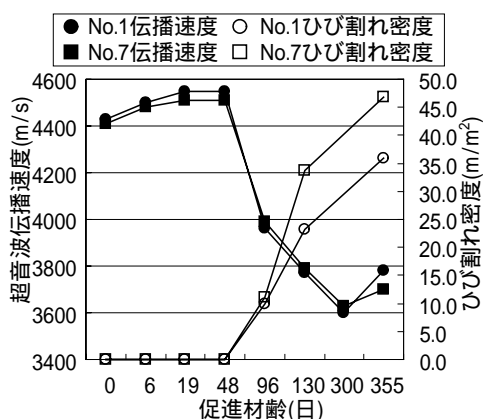


図-9 伝播速度、ひび割れ密度経時変化

(3) 主鉄筋比の違いによる比較

図-10 に主鉄筋比 0.46 の No.3、主鉄筋比 0.26 の No.6、主鉄筋比 0.12 の No.7 供試体のひび割れ状況を示す。各供試体のせん断補強筋比は同じである。

ひび割れ状況から No.3 と比較して No.6,7 では幅 0.2mm 未満の亀甲状のひび割れが多く発生していた。ひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れ状況を見ても鉄筋比が

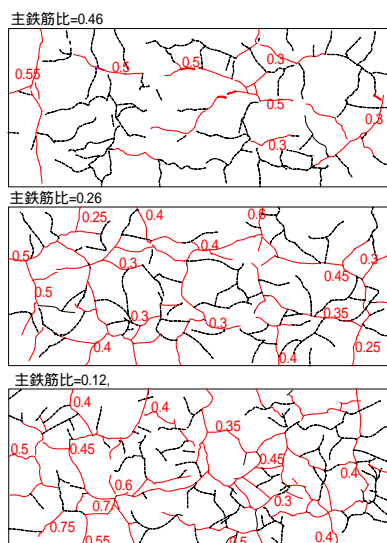


図-10 No.3,6,7 ひび割れ状況

低い No.6,7 において多く発生していた。特に No.7 において他の供試体では見られない幅 0.75mm の大きいひび割れが確認できた。No.3 では幅の大きいひび割れは主鉄筋の位置に主に見受けられたが No.6,7 では主鉄筋位置のほか供試体全体に発生していた。主鉄筋比の低下によって亀甲模様が細くなるだけでなく、幅の大きいひび割れが多く発生する傾向が見られた。

図-11 に供試体 No.3,6,7 供試体の膨張量経時変化を示す。中島らは主鉄筋比の違う供試体を用いた実験で軸方向の膨張よりも鉛直方向(周方向)の膨張量が卓越したという結果を報告しており⁵⁾、本実験においても周方向の膨張量が卓越している結果となった。軸方向の膨張量については No.3 1800 μ 、6 3000 μ 、7 5500 μ と鉄筋比が低下するほど膨張量が高い値を示した。これより主鉄筋が軸方向の膨張を拘束する作用を持っていると考えられる。

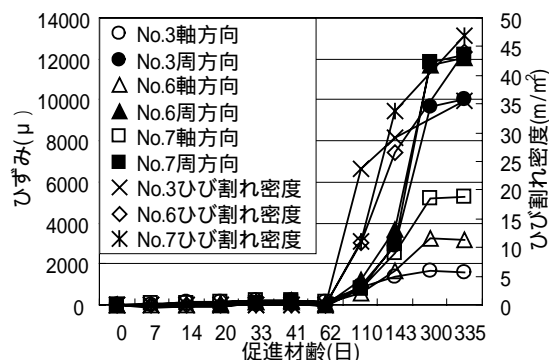


図-11 膨張量およびひび割れ密度

3.3 寸法形状供試体

(1) ひび割れ状況

図-12 に寸法形状供試体の外観ひび割れ状況図を示す。これらのひび割れ状況図は各供試体側面(A 面)を示しており、ひび割れの表示方法は前出のものと同様である。また、図に示す黒線、斜線はそれぞれ主鉄筋およびスターループの位置を示している。

全ての供試体において供試体全体に亀甲状のひび割れが発生している。また S-600, S-400 供試体では 0.2mm 以上のひび割れが主鉄筋曲げフック部分に沿うように発生していた。供試体側面において主鉄筋に沿うひび割れが発生していることからコア部分の膨張圧が拘束力の低い主鉄筋曲げフック部分に集中し鉄筋に沿うひび割れが発生したと考えられる。S-400 供試体ではひび割れ幅は最大で 0.55mm と S-600 供試体と比較して小さく、細かな亀甲状のひび割れが発生している。S-200 供試体において 0.2mm 以上のひび割れは側面中央部で軸方向に卓越している。S-600, S-400 供試体と比較して供試体側面中央部に軸方向に伸びるひび割れは S-200 供試体のみであり、鉄筋比供試体でも軸方向に伸びるひび割れは

確認されておりこれらから梁のような直方体形状のものでは軸方向にひび割れが進展し易いと考えられる。またひび割れ状況から供試体形状が大きいものでは発生するひび割れ幅は大きくなることが考えられる。これはコアのボリュームによって内部の ASR による膨張圧が高くなることが要因と考えられる。

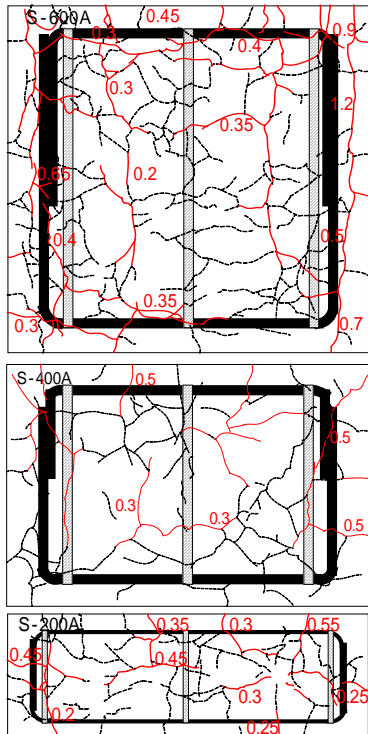


図-12 寸法形状供試体ひび割れ状況図

(2) 膨張量および伝播速度

図-13 に各供試体膨張量測定位置図を、図-14 に各供試体の膨張量経時変化を示す。S-200 供試体の測定結果から周方向の膨張量が軸方向の膨張量より卓越していることがいえる。これは鉄筋比供試体の膨張量の測定結果と同様の傾向を示している。実構造物の橋脚梁部分でも橋軸方向にひび割れが卓越していることが報告されている⁶⁾がそれと同様の傾向といえる。S-400 および S-600 の膨張量の結果についてひび割れ状況で多数のひび割れが確認されているにもかかわらず膨張量がさほ

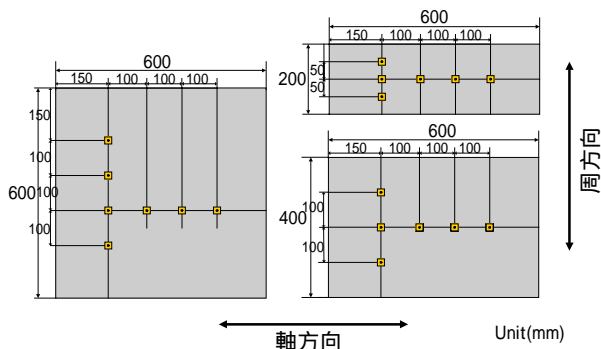


図-13 各供試体膨張量測定位置図

ど高い値を示していない結果となっている。図-13 に示すように S-600, S-400 供試体では膨張量測定位置が供試体中央に設置されているため S-200 供試体と比較して面全体の膨張量を捉えておらず S-600, S-400 供試体では適確に膨張量が評価できていないと考えられる。そのため各供試体の比較を軸および周方向のひび割れ密度を用いて検討した。

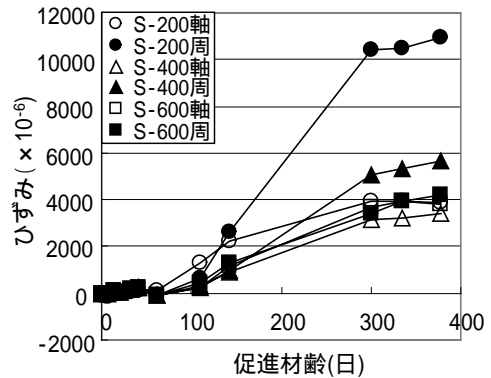


図-14 各供試体の膨張量経時変化

図-15 に各供試体の軸および周方向のひび割れ密度を示す。この結果から全ての供試体において軸方向のひび割れ密度が周方向のひび割れ密度より高い値を示していることがわかる。膨張量と比較すると S-600 では周方向、軸方向であまり差の無い結果となっていたがひび割れ密度では軸と周での差が明らかとなった。S-200, S-600 供試体では促進材齢 100 日過ぎたところでは軸方向ひび割れが周方向ひび割れ密度より低い値を示していたが劣化の進展に伴い促進材齢 355 日目には軸方向が卓越した結果となった。

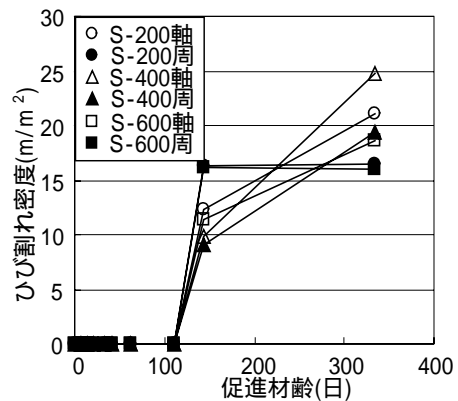


図-15 軸および軸直角方向ひび割れ密度

図-16 に伝播速度とひび割れ密度の経時変化を示す。伝播速度はひび割れ密度が高くなるにしたがって低下している。ASR 劣化によるひび割れなどによりコンクリートの変質度の低下がうかがえる。S-600, S-400 において伝播速度は 3000m/s 近くまで低下しているのに対し S-200 においては 3800m/s と高い値を示している。これは測定点が供試体端面であり断面が他の供試体よりも

小さく測定点から鉄筋位置までが近いことで鉄筋の影響を受けているものと考えられる。ひび割れ密度および膨張量の結果をみると他の供試体とともに劣化は進展していることから伝播速度はより低下していると考えられる。

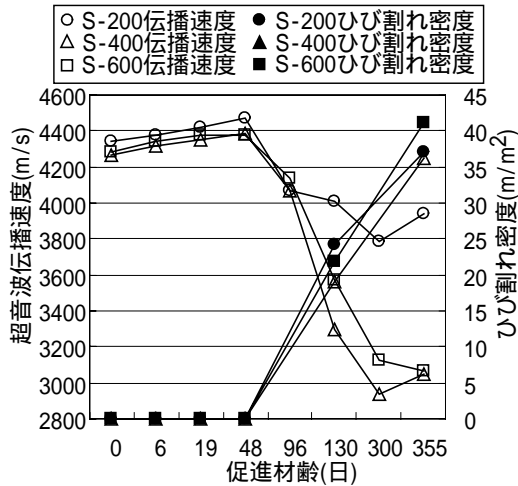


図-16 伝播速度とひび割れ密度経時変化

4. まとめ

以上より得られた結果を以下にまとめる。

- (1) かぶりが大きいかほど ASR 劣化により発生するひび割れの幅が大きくなることが確認できた。
- (2) 鉄筋比が低下することで幅の大きなひび割れが卓越する傾向が見られた。
- (3) 寸法形状の違いにより ASR 劣化によるひび割れ性状に違いが確認できた。寸法形状が大きいほどひ

び割れ幅の大きなひび割れが卓越する結果となった。これはコアのボリュームの違いによるものと考えられる。

- (4) 実構造物でも見られるように梁形状のものでは主鉄筋に沿う軸方向のひび割れが卓越する傾向があるといえる。

参考文献

- 1) 鳥居和之ほか：ASR 膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.595-600 (2001)
- 2) 金海鈺、葛目和宏、山本貴史、服部篤史、宮川豊章：ASR 劣化が顕在化した既設構造物の内部劣化の評価手法について、コンクリートの補修、補強、アップグレード論文集、第 6 巻、pp.95 ~ 102、2006.6
- 3) 宮川豊章：アルカリ骨材反応による鉄筋破断が生じた構造物の安全性評価（コンクリート委員会/アルカリ骨材反应对策小委員会中間報告）、土木学会誌、Vol.88、pp83-84、2003.9
- 4) 尼崎省二：超音波法によるアルカリシリカ反応の非破壊評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.751-756 (1990)
- 5) 中島俊和、久保善司、鳥居和之：ASR 膨張がコンクリート構造物の鉄筋破断に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、2003
- 6) 古賀友一郎、渡辺陽太、玉越隆史、渡邊良一：ASR 劣化した実構造物の耐荷挙動、土木学会第 61 回年次学術講演会、pp123-124、2006.9