

# 論文 ASR と鋼材腐食による複合劣化が生じた RC はり部材の耐荷特性やひび割れ特性

的場 良太\*1, 裏 泰樹\*2, 三方 康弘\*3, 麓 隆行\*4

**要旨:** ASR と鋼材腐食の複合劣化を生じた RC はり部材を作製し、載荷試験を行った。その結果、ASR を生じた RC はり部材において、せん断補強筋の定着部が破断している場合には健全なはり部材と比較してせん断ひび割れ発生後もせん断補強筋ひずみが増加しなかった。また、ASR により劣化を生じたコンクリートに対して、X 線 CT 撮影を活用して、内部のひび割れ状況の進展状況を把握することを試みた。その結果、コンクリート内部のペーストや骨材界面に生じる ASR のひび割れだけでなく、骨材内部の割れの進展状況を経時的に把握することができた。

**キーワード:** せん断, ASR, 鋼材腐食, 複合劣化, X 線 CT 撮影

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物に対する高耐久化や長寿命化が望まれており、塩害、ASR、中性化など単独による劣化現象の研究は多くされているが、複合劣化の研究は未だ少ないのが現状である。既往の研究<sup>2)</sup>より ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材において、せん断補強筋としての機能が低下することやせん断付着破壊に至る可能性があることが報告されている。既設構造物の安全性を評価する場合や補強の必要性を判断する上で、ASR と鋼材腐食による複合劣化が生じたはり部材のせん断耐荷力の評価手法を構築することが求められている。また、ASR 劣化を生じたはり部材のコンクリート強度、弾性係数を評価する上で、超音波伝播速度によるトモグラフィを用いる研究<sup>3)</sup>が報告されているが、コンクリートの内部のひび割れ特性が超音波伝播速度に及ぼす影響は明らかにされておらず、RC はり部材に対する超音波伝播速度と内部のひび割れ状況の相関を把握することが望まれている。そこで、本研究では ASR 単独の劣化、ASR と鋼材腐食による複合劣化が生じたはり供試体を作製し、それらの劣化がはり部材のせん断耐力に及ぼす影響について把握することとした。さらに、はり部材への適用に向けての第 1 ステップとして、はり供試体と同一のコンクリートを用いた ASR 劣化が生じた直径 100mm×高さ 200mm のテストピースに対して、X 線 CT 撮影によりコンクリート内部のひび割れの進展状況を観察するとともに、超音波伝播速度を経時的に把握することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 RC はり供試体

実験要因として、コンクリートの種類は健全 (N)、ASR (A)、ASR と鋼材腐食による複合劣化 (AC) の 3 種類を選定した。示方配合を表-1 に示す。せん断補強筋の定着不良がせん断耐荷特性に及ぼす影響を検討するためにせん断補強筋は破断無し、破断有りの 2 種類を選定した。ASR を生じた供試体、ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じた供試体の粗骨材には反応性骨材 (岩種: 輝石安山岩, 反応性鉱物: クリストバライト, トリディマイト, 火山ガラス) を使用した。添加アルカリとして、ASR 単独の劣化を生じさせる供試体には鋼材の防錆効果を有する  $\text{NaNO}_2$  を用い、ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じさせる供試体には  $\text{NaCl}$  を用いた。はり供試体は、幅×高さ=100×200mm の単鉄筋長方形断面を有する全長 1400mm の RC 単純はり部材 (コンクリートの設計基準強度:  $f_c=24\text{N/mm}^2$ ) を 2014 年と 2015 年にそれぞれ 6 体ずつ作製した。供試体は 4 週間湿布養生後、A シリーズ供試体は温度 40°C、相対湿度 90% の環境にて促進養生を材齢 406 日 (2014 年作製)、357 日 (2015 年作製) まで実施した。さらに AC シリーズ供試体は A シリーズ供試体と同様期間 (材齢 405 日 (2014 年作製)、350 日 (2015 年作製) まで) において促進養生を行い、3% 濃度の食塩水を週 6 日散布した。なお、N シリーズ供試体は 2014 年作製の供試体は気中養生、2015 年作製の供試体は散水養生 (週 6 日) を行った。全ての供試体の主鉄筋には D19 (SD345)、せん断補強筋には D6 (SD345) を使用した。載荷方法は  $a/d=2.35$  とした対称 2 点集中荷重とし、曲げスパン 300mm、せん断スパン 400mm とした。はり供試体の側面図・断面図を図-1、種類を表-2 に示す。

\*1(株)ニュージェック (正会員)

\*2 近畿大学大学院理工学研究科社会環境工学専攻 修士課程 (学生会員)

\*3 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 准教授 (正会員)

\*4 近畿大学理工学部社会環境工学科 准教授 (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合

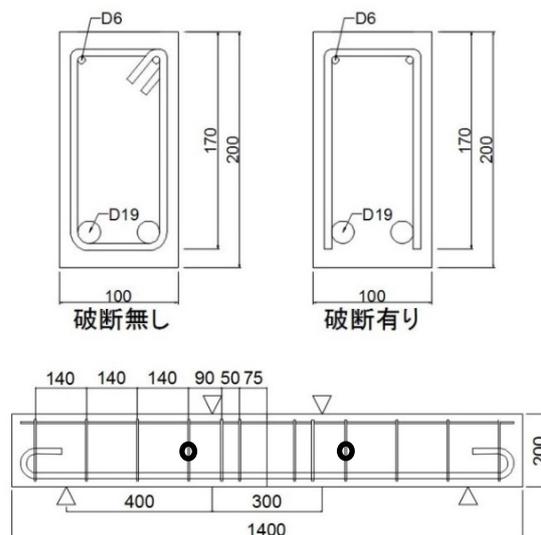
シリーズ	作製年度	供試体の種類	コンクリートの種類	NaCl添加	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
					w	C	S		G		NaNO <sub>2</sub>	NaCl	AE剤(cc)
							非反応	反応	非反応	反応			
N	2014年, 2015年	はり, CT <sup>*1</sup>	健全	無	183	290	791	0	988	0	0	0	725
A	2014年	はり	ASR	無	183	290	807	0	494	492	15.6	0	725
AC		はり, CT <sup>*1</sup>		有	183	290	807	0	494	492	0	13	725
A	2015年	はり		無	183	290	399	412	494	492	15.6	0	725
AC		はり		有	183	290	399	412	494	492	0	13	725

\*Gmax=20 (mm), スランプ:8 (cm), W/C=63 (%), Air=4 (%), s/a=45.8 (%)

\*1:CT 撮影用テストピース

表-2 はり供試体の種類

名称	コンクリートの種類	せん断補強筋の破断	作製年度
N-1-14	健全	無し	2014
N-2-14		有り	
A-1-14	ASR	無し	
A-2-14		有り	
AC-1-14	ASR+鋼材腐食	無し	
AC-2-14		有り	
N-1-15	健全	無し	2015
N-2-15		有り	
A-1-15	ASR	無し	
A-2-15		有り	
AC-1-15	ASR+鋼材腐食	無し	
AC-2-15		有り	



○:スターラップひずみ  
(単位: mm)

図-1 はり供試体の側面図・断面図

## 2.2 X線 CT 撮影

実験要因として、コンクリートの種類は健全と ASR の 2 種類を選定した。示方配合を表-1 に示す。健全なテストピースは 2014 年作製 N シリーズ, ASR のテストピースは 2014 年作製 AC シリーズである。なお, テストピースとして, CT 撮影用は普通コンクリート:N-CT, ASR コンクリート:A-CT とし 3 体ずつ, 同一のコンクリートを用いた圧縮試験・静弾性試験用は普通コンクリート:N, ASR コンクリート:A とし 18 体ずつ作製した。また, 超音波伝播速度試験は CT 撮影用, 圧縮試験・静弾性係数試験用ともに適用した。なお, 各試験項目の測定日の材齢を表-3 に示す。X 線 CT 装置内部の様子を写真-1 に示す。X 線の照射条件<sup>4)</sup>は, 電圧 220kV, 電流 100 $\mu$ A とした。1 回の測定で直径 100mm $\times$ 高さ 50mm の範囲を撮影し, 直径 100mm $\times$ 高さ 200mm のテストピースを高さ方向に 4 回にわけて撮影を実施した。本研究では 1voxel (3 次元画像の最小要素) を 0.123mm の立方体として 3 次元画像を得た。1 つの voxel はその空間位置にある物質の X 線吸収度合いを 8bit の階調で表現でき, ひび割れや空隙などはその幅により灰色から黒色として表示される。そのため, 目視で 0.1mm 程度のひび割れ幅が十分観測可能である。



写真-1 X線 CT 撮影装置の内部

表-3 各試験項目の測定日の材齢

測定項目	測定日の材齢		
	X線CT撮影	超音波伝播速度	圧縮強度・静弾性係数
N		28日, 308日, 391日, 455日, 483日	28日, 308日, 391日, 483日
N-CT	28日, 308日, 391日, 455日, 484日	28日, 308日, 391日, 484日	
A		28日, 308日, 391日, 455日, 485日	28日, 308日, 391日, 485日
A-CT	28日, 308日, 391日, 455日, 486日	28日, 308日, 391日, 486日	

### 3. RC はり供試体

#### 3.1 ASR 膨張

A シリーズ, AC シリーズはり供試体の ASR 膨張による軸方向ひずみを図-2 に示す. はり供試体における ASR 膨張を計測するために, はり供試体の両側面の主鉄筋位置(断面上縁から 170mm)にコンタクトチップを添付し, ASR 膨張を計測した. なお, 図中のひずみ値は計測値の平均値である. 2014 年に作製した A-1-14 供試体, AC-1-14 供試体は材齢約 400 日で 500 ( $\mu$ ), 750 ( $\mu$ ) のひずみが生じた. 2015 年に作製した A-1-15 供試体, AC-2-15 供試体は材齢約 350 日で 900 ( $\mu$ ), 1100 ( $\mu$ ) のひずみが生じた. 2015 年作製供試体は 2014 年作製供試体と比較して, ASR の膨張ひずみが大きくなった. これは, 2015 年作製供試体は粗骨材と細骨材の両骨材に反応性の骨材を使用したため, 膨張量が大きくなったと考えられる.

#### 3.2 ひび割れ状況

載荷試験前のはり供試体のひび割れ状況を図-3 に示す. A シリーズ供試体は, 主鉄筋位置における腐食ひび割れが見られず, ASR 膨張に伴う亀甲状のひび割れが顕著に見られ, 軸方向鉄筋の拘束力の少ない上面のひび割れが多い傾向が見られた. AC シリーズ供試体では, 亀甲状のひび割れに加えて主鉄筋位置にひび割れが確認できた. これは, ASR 膨張によるひび割れと鋼材腐食によるひび割れが生じたためだと考えられる.

#### 3.3 鉄筋の腐食量

鉄筋の質量減少率および腐食した鉄筋の見かけの弾性係数を表-4 に示す. なお, 鉄筋の質量減少率は載荷試験終了後の供試体から腐食鉄筋を取出し, 60°C の 10% クエン酸アンモニウム溶液に 24 時間浸漬し, 錆を除去した後に健全時の鉄筋の質量と比較して算出した. なお, 腐食鉄筋の断面積を特定することは困難であるため, 見かけの降伏強度, 弾性係数の算定には公称断面積を用いた. 質量減少率みると 2014 年度, 2015 年度ともに鉄筋の腐食は軽微であった.

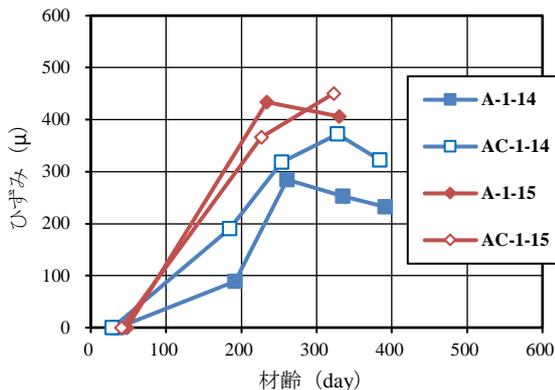
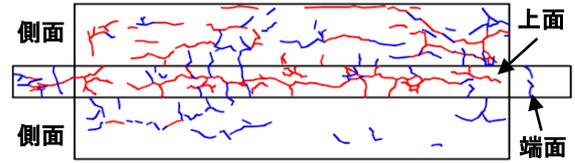
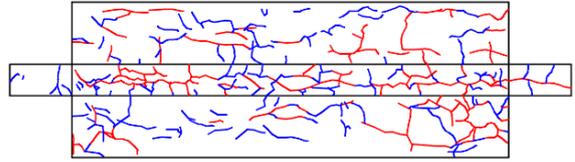


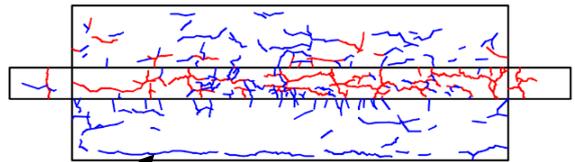
図-2 ASR 膨張による軸方向ひずみ (主鉄筋位置)



(a) A-1-15 (ASR)

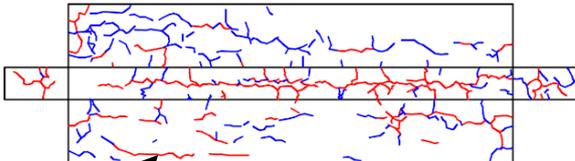


(b) A-2-15 (ASR)



鉄筋位置のひび割れ

(c) AC-1-15 (ASR+鋼材腐食)



鉄筋位置のひび割れ

(d) AC-2-15 (ASR+鋼材腐食)

— : 材齢 220 日におけるひび割れ  
— : 材齢 330 日におけるひび割れ

図-3 載荷試験前のはり供試体のひび割れ状況

表-4 腐食鉄筋の機械的特性

供試体名	質量減少率 (%)	見かけの降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	見かけの弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
AC-1-14	0.59	389.1	197.5
AC-2-14	0.48	390.4	199.7
AC-1-15	1.06	376.3	195.2
AC-2-15	1.20	370.3	192.1

### 3.4 最大荷重と破壊状況

はり供試体のコンクリート材齢 28 日と載荷試験時の諸強度を表-5、最大荷重と耐力計算値を表-6、荷重-中央変位関係を図-4、載荷試験後のひび割れ状況を図-5 に示す。すべての供試体において実測値が計算値を上回る結果となった。N-2-15 供試体はせん断ひび割れ発生後に圧縮斜材で荷重に抵抗していたものの、最終的にせん断補強筋の破断位置に割裂ひび割れが発生し、せん断引張破壊に至った。このことから、せん断補強筋が破断することにより、ひび割れ幅が破断位置において増大しトラス機構が形成しにくくなると考えられる。A-2-15、AC-2-15 供試体では主鉄筋位置に生じた劣化によるひび割れが載荷によって生じたせん断ひび割れと繋がり、主鉄筋位置のひび割れ幅が増大した。AC-2-15 供試体は AC-1-15 供試体と比較して、最大荷重が小さくなり、破壊形式が異なった。これは、同一のコンクリートを使用しているものの、せん断補強筋が破断しているため、せん断補強の機能が低下したこと、ケミカルプレストレス力が作用しにくくなったことから斜め引張破壊に至ったと考えられる。また、ASR のひび割れが生じている供試体では、斜めひび割れが ASR のひび割れに繋がる場合も見られた。このことから、せん断スパン内のせん断応力の伝達は ASR のひび割れが生じてない場合と比較して、複雑な経路となっていることが考えられる。

表-6 はり供試体の最大荷重と耐力計算値

名称	最大荷重 Pu(kN)	曲げ* 破壊荷重 計算値 Pub(kN)	せん断* 破壊荷重 計算値 2Vy(kN)	せん断耐力* 計算値 (kN)			破壊形式
				Vy	Vs	Vc	
N-1-14	159	108.77	101.60	50.80	30.51	20.30	せん断圧縮
N-2-14	166	109.32	101.60	50.80	30.51	20.30	せん断引張
A-1-14	118	105.31	100.94	50.47	30.51	19.97	斜め引張
A-2-14	112	105.21	100.94	50.47	30.51	19.97	斜め引張
AC-1-14	146	111.25	101.96	50.98	30.51	20.48	斜め引張
AC-2-14	118	111.36	101.96	50.98	30.51	20.48	斜め引張
N-1-15	176	150.38	113.46	56.73	30.51	26.23	斜め引張
N-2-15	137	150.38	113.46	56.73	30.51	26.23	せん断引張
A-1-15	164	124.38	105.20	52.60	30.51	22.09	曲げ引張
A-2-15	144	125.61	105.20	52.60	30.51	22.09	斜め引張
AC-1-15	169	103.83	100.86	50.43	30.51	19.92	曲げ引張
AC-2-15	141	103.43	100.86	50.43	30.51	19.92	斜め引張

\*実材料強度を用いて、ファイバー法により曲げ破壊荷重、土木学会のせん断耐力算定式によりせん断破壊荷重を算定した。鉄筋の降伏強度の算定に用いる鉄筋の断面積は公称断面積を用いた。

表-5 コンクリートの諸強度

供試体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
	28日強度	載荷試験時 ( )内は材齢	28日強度	載荷試験時 ( )内は材齢
N-1-14	18.69	18.7 (399日)	25.22	25.24 (399日)
N-2-14				
A-1-14	13.57	17.8 (406日)	20.95	18.57 (406日)
A-2-14				
AC-1-14	19.14	19.2 (405日)	25.86	25.82 (405日)
AC-2-14				
N-1-15	25.81	40.34 (356日)	28.84	35.85 (356日)
N-2-15				
A-1-15	24.78	24.12 (357日)	28.89	10.33 (357日)
A-2-15				
AC-1-15	22.23	17.69 (350日)	24.14	10.91 (350日)
AC-2-15				

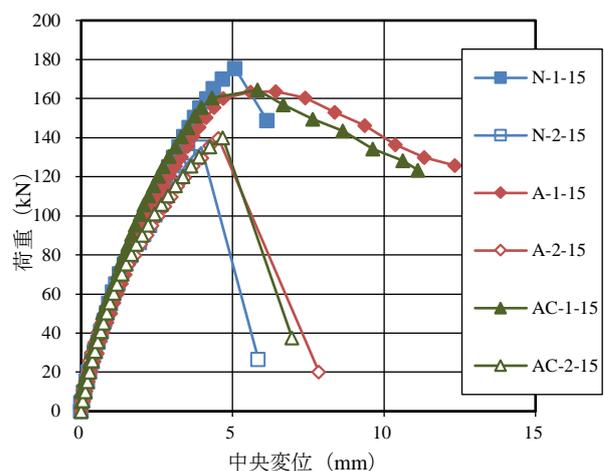
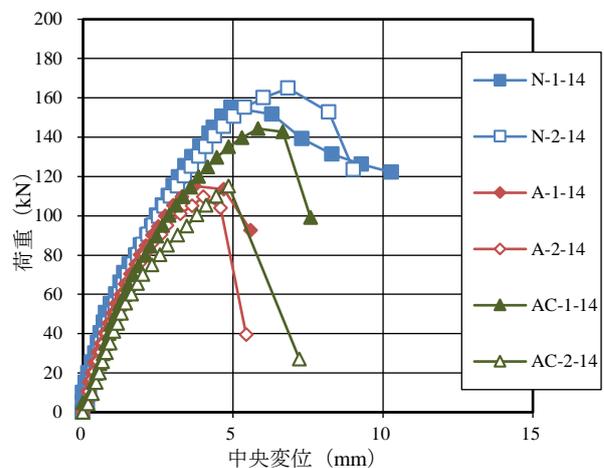


図-4 荷重-中央変位関係

### 3.5 せん断補強筋ひずみ

せん断補強筋ひずみの経時的变化を図-6 に示す。AC シリーズの供試体ではせん断補強筋の破断していない AC-1-15 供試体は ASR 膨張によって 1900 ( $\mu$ ) 程度のひずみが生じ、一方、破断している AC-2-15 供試体は 1100 ( $\mu$ ) 程度のひずみが生じた。荷重-せん断補強筋ひずみ関係を図-7 に示す。せん断補強筋の降伏ひずみは 2250 ( $\mu$ ) であるが、N-1-15 供試体はひずみが 2000 ( $\mu$ ) 程度に達しており、せん断ひび割れ発生後にせん断補強筋がせん断力を適切に負担した。一方、N-2-15 供試体はひずみが 1700 ( $\mu$ ) 程度となり、せん断補強筋が健全な N-1-15 供試体と比較して、ひずみが小さくなった。また、A-1-15、AC-1-15 供試体は曲げ引張破壊に至ったため、N-1-15 供試体と比較して、ひずみが小さくなった。A-2-15、AC-2-15 供試体は斜め引張破壊に至ったが、せん断補強筋を破断させたため、ひずみが 1000 ( $\mu$ ) に達しなかった。これは、せん断補強筋の端部から 14D の位置 (図-1 参照) にひずみゲージを添付しているが、その位置では鉄筋の定着長が不足しており、せん断補強筋の機能が低下したと考えられる。

## 4. X線 CT 撮影と材料強度試験

### 4.1 超音波伝播速度

超音波伝播速度の経時变化を図-8 に示す。A-CT は X 線 CT 撮影を行うテストピース 3 体の平均、A-CT-1 は 3 体のテストピースのうち、4.2 の考察に用いる代表 1 体の測定値である。初期値と比較して、A は約 36% 低下し、A-CT は約 19% 低下した。一方、N、N-CT は伝播速度の低下は見られなかった。

### 4.2 テストピース内部のひび割れ状況

超音波伝播速度試験と同一の材齢で A-CT-1 の CT 画像を図-9 (材齢 28 日)、図-10 (材齢 308 日)、図-11 (材齢 483 日) に示す。なお、CT 画像はテストピース上縁から 100mm である。矢印は ASR のひび割れと幅を示す。図-7 において、A-CT-1 の超音波伝播速度が初期値と比べ約 13% 低下した時 (材齢 308 日) に、骨材を貫通するひび割れが確認された。さらに、A-CT-1 の超音波伝播速度が初期値と比べ約 21% 低下した時 (材齢 483 日) に、新たに骨材の貫通ひび割れが複数発生していた。図-11、12 の粗骨材の拡大図に着目すると、材齢 0 日ではひび割れは観測されなかったが、材齢 308 日では骨材内部に 1 本のひび割れが生じ、さらに材齢 483 日では骨材中央部から別方向にひび割れが進展していることが確認された。このことから、骨材の割れによる骨材のかみ合わせ作用に及ぼす影響は不明であるが、はり部材のせん断耐力を評価する上で骨材の割れが部材の耐荷特性に影響を及ぼす可能性がある。

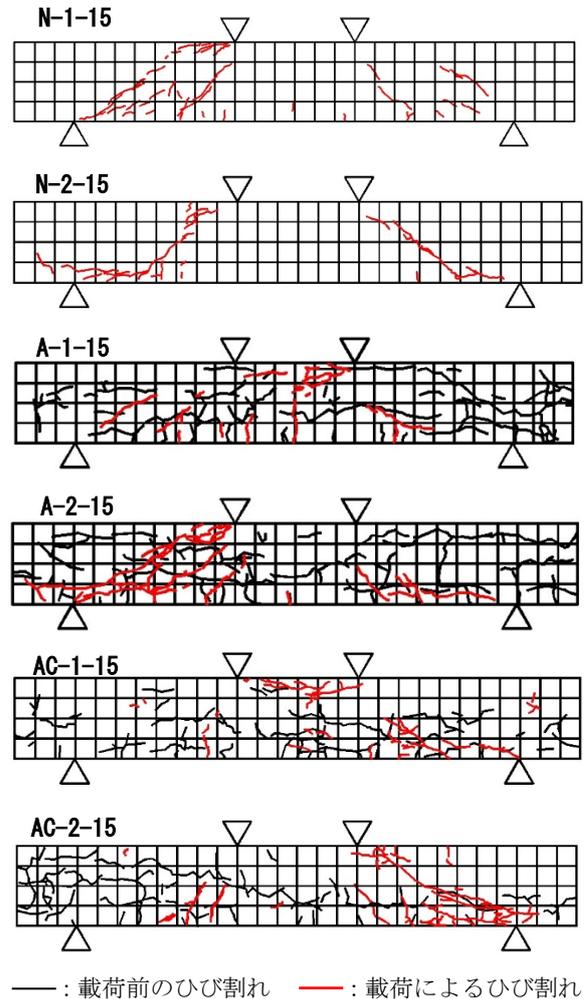


図-5 荷重試験後のひび割れ状況

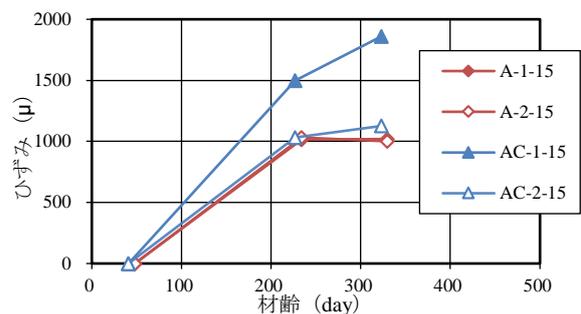


図-6 せん断補強筋ひずみの経時的变化

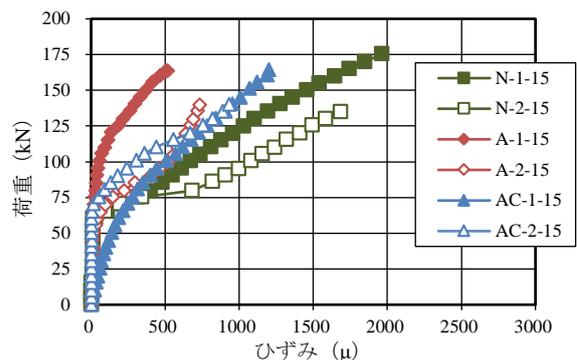


図-7 荷重-せん断補強筋ひずみ

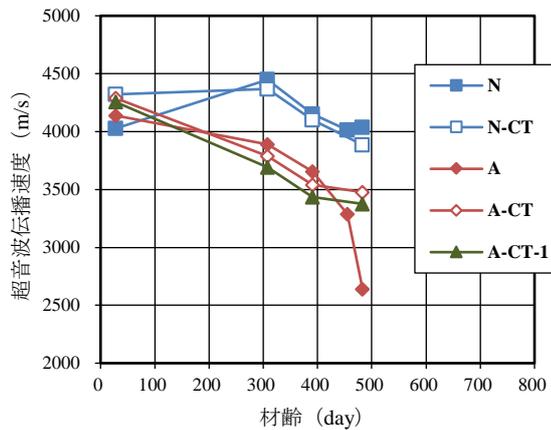


図-8 超音波伝播速度の経時変化 (3体の平均)

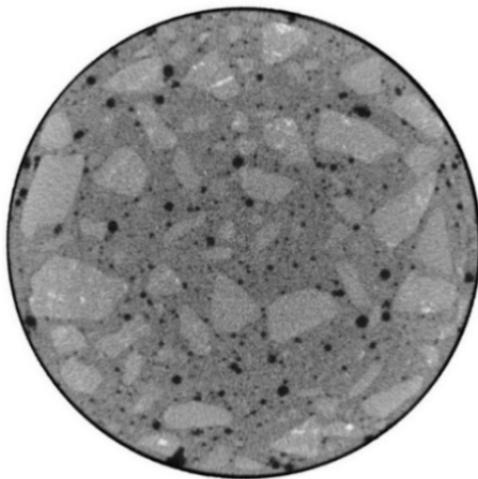


図-9 A-CT-1のCT画像 (材齢28日)

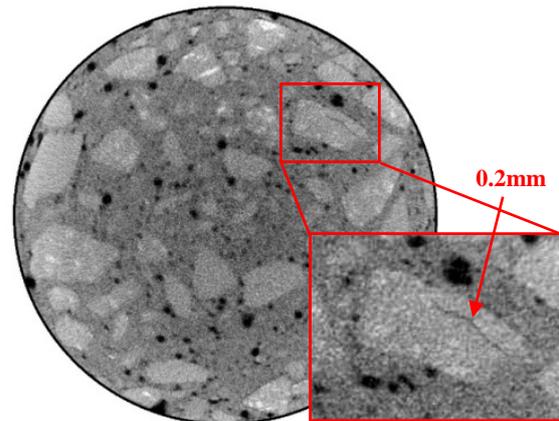


図-10 A-CT-1のCT画像 (材齢308日)

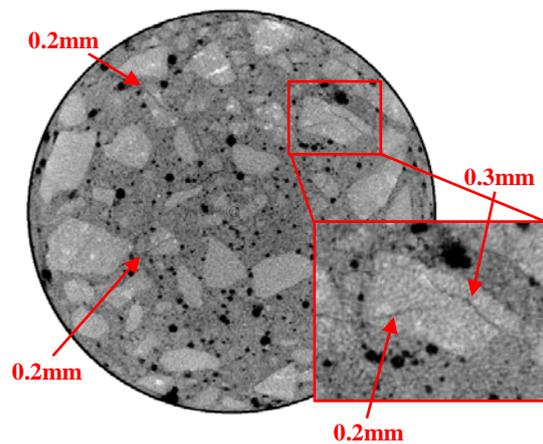


図-11 A-CT-1のCT画像 (材齢483日)

## 5. まとめ

- (1) Aシリーズ供試体は、ASR膨張に伴う亀甲状のひび割れが顕著に見られ、軸方向鉄筋の拘束力の少ない上面のひび割れが多い傾向が見られた。ACシリーズ供試体では、亀甲状のひび割れに加えて主鉄筋位置にひび割れが確認できた。
- (2) ASR単独の劣化、ASRと鋼材腐食の複合劣化を生じた供試体において、せん断補強筋の定着部が破断している場合には、主鉄筋位置に生じた劣化によるひび割れが荷重によってさらに開口すること、せん断補強筋ひずみが増加せず、せん断補強筋の機能が低下すること、せん断補強筋の拘束効果によるケミカルプレストレスの効果が低下する場合があります。
- (3) X線CT撮影により、コンクリート内部のペーストや骨材界面に生じるASRのひび割れだけでなく、骨材内部の割れの進展状況を経時的にとらえることができた。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号: 26420442)により実施した。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 的場良太, 三方康弘, 井上晋: ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材の曲げ・せん断耐荷特性に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, V-16, 2016.
- 2) 島津祥徳, 波多野雄士, 三方康弘, 井上晋: ASRと鋼材腐食による複合劣化が生じたPRCはりの曲げせん断耐荷特性, コンクリート工学論文集, Vol. 32, No.1, pp.1001-1006, 2010.
- 3) 葛目と宏, 真鍋英規, 小椋紀彦, 山本貴士, 宮川豊章: 超音波トモグラフィによるASR劣化したコンクリート内部性状の把握に関する検討, コンクリート構造物の補強, アップグレード論文報告集, 第13巻, pp.181-188, 2013.11
- 4) 麓隆行: 新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No.2, pp.182-191, 2013.