

ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたコンクリート構造物の 性能評価手法の構築

大阪工業大学工学部 教授 三方康弘

1. 研究の目的

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¹⁾は未だ少ないのが現状である。既往の研究より 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ーを用いる研究³⁾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、超音波伝播速度を把握することを目的とした。

2. 研究の方針

2.1 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。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 NaNO₂ 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 NaCl を用いた。

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 ³) | | | | | | | | |
|------|--------------|----------------------|-----------|--------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------------|------|----------|
| | | | | | w | C | S | | G | | NaNO ₂ | NaCl | AE剤 (cc) |
| | | | | | | | 非反応 | 反応 | 非反応 | 反応 | | | |
| N | 2014年, 2015年 | はり, CT ^{*1} | 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 ^{*1} | | 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

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。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¹⁾。供試体は4週間湿布養生後、Aシリーズ供試体は温度40℃、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。

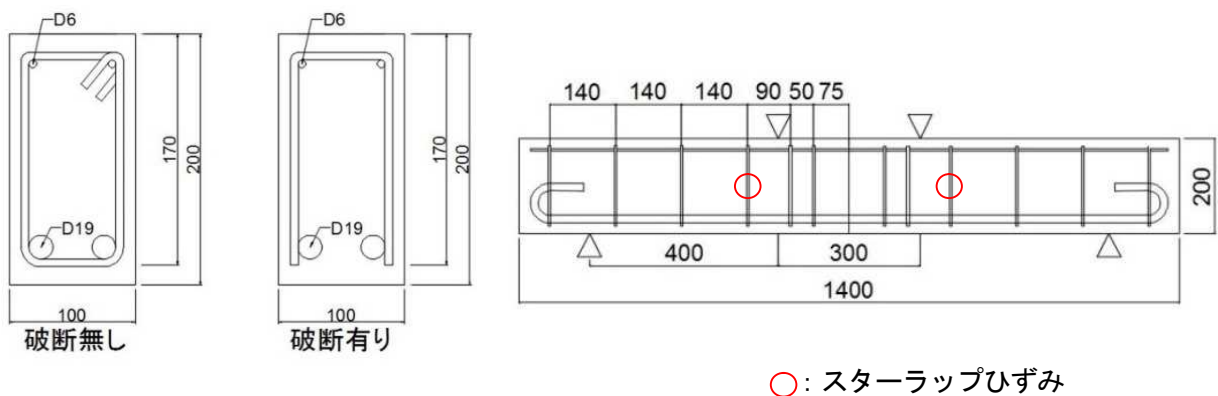


図-1 はり供試体の側面図・断面図（単位：mm）

2.2 解析的検討

劣化によりコンクリートと鉄筋の付着力が低下した供試体をモデル化し、汎用有限要素解析プログラム DIANA Ver. 9.6 において3次元非線形解析を行った。コンクリートと鉄筋の付着力低下を模擬するため、主鉄筋とコンクリートの間に付着要素を設定し、付着-すべり量関係を考慮することとした。コンクリートと鉄筋の付着応力-すべり関係を表現するモデルとして、カンチレバー型引抜き供試体の実験結果から提案する簡便なモデル（以下、実測モデルと記す）、島モデルにコンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会が提案する付着強度比を乗じたモデル（以下、塩害モデルと記す）の2種類を設定し、実験結果に対する付着応力-すべり関係モデルの整合性を検証することとした。カンチレバー型引抜き供試体の実験結果から、下記の各点の平均値を算出しモデル（実測モデル）を設定した。

- ① 最大付着応力度の1/3の値
- ② 最大付着応力度の0.9倍の値
- ③ 最大付着応力度
- ④ 自由端変位2mmの値
- ⑤ 自由端変位5mmの値

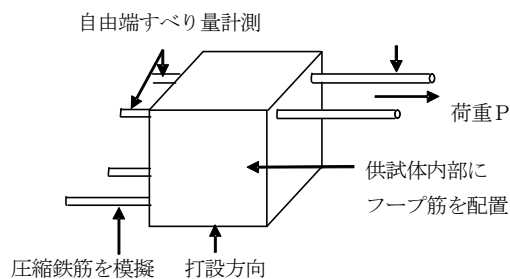


図-2 カンチレバー型引抜き供試体

解析モデルにおいて圧縮特性は破壊エネルギー G_{fc} を要素の等価高さ h で除することにより、要素寸法によらず一定の破壊エネルギーを消費し、解析結果が要素寸法の大きさの影響を受けないように配慮

した Nakamura らのモデルを用いた。一方、引張特性については、コンクリート標準示方書で定めているモデルを使用した。コンクリートのひび割れは、分散ひび割れモデルにて表現し、鉄筋の応力-ひずみ関係には、バイリニアモデルを用いた。ケミカルプレストレス量の評価には上田ら²⁾が提案する膨張予測モデルを用いた。

2.3 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。示方配合ははり供試体と同様である。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³⁾は、電圧 220kV、電流 100 μ A とした。1 回の測定で直径 100mm×高さ 50mm の範囲を撮影し、直径 100mm×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。

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 | |



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. 経過

供試体は 4 週間湿布養生後、A シリーズ供試体は温度 40℃、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。

4. 得られた結果

4.1 はり供試体

(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-3 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 (μ), 750 (μ) 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 (μ), 1100 (μ) 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.

(2) ひび割れ状況

载荷試験前のはり供試体のひび割れ状況を図-4 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) 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.

表-4 腐食鉄筋の機械的特性

| 供試体名 | 質量減少量 (%) | 見かけの降伏強度 (N/mm ²) | 見かけの弾性係数 (kN/mm ²) |
|---------|-----------|-------------------------------|--------------------------------|
| 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 |

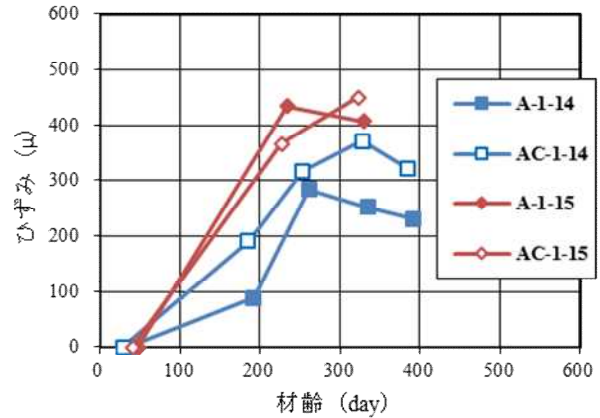


図-3 ASR 膨張による軸方向ひずみ (主鉄筋位置)

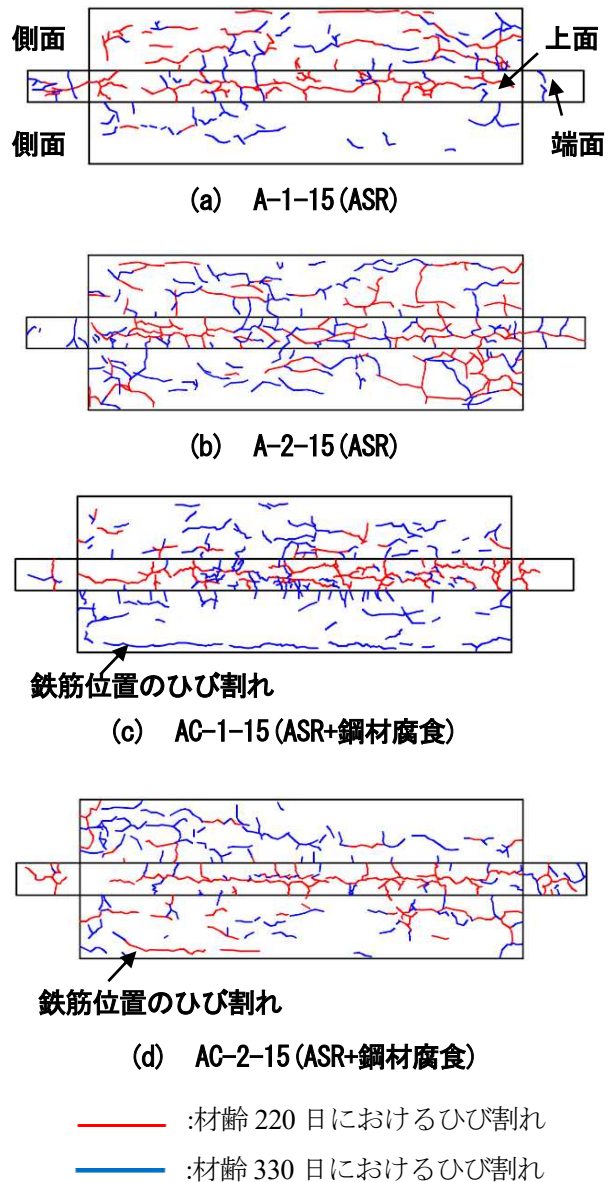


図-4 载荷試験前のはり供試体のひび割れ状況

なお、鉄筋の室料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%クエン酸二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。質量減少率から2014年度、2015年度ともに鉄筋の腐食は軽微であった。

(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-5、載荷試験後のひび割れ状況を図-6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。

表-5 コンクリートの諸強度

| 供試体名 | 圧縮強度 (N/mm ²) | | 静弾性係数 (kN/mm ²) | |
|---------|---------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
| | 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 | | | | |

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。

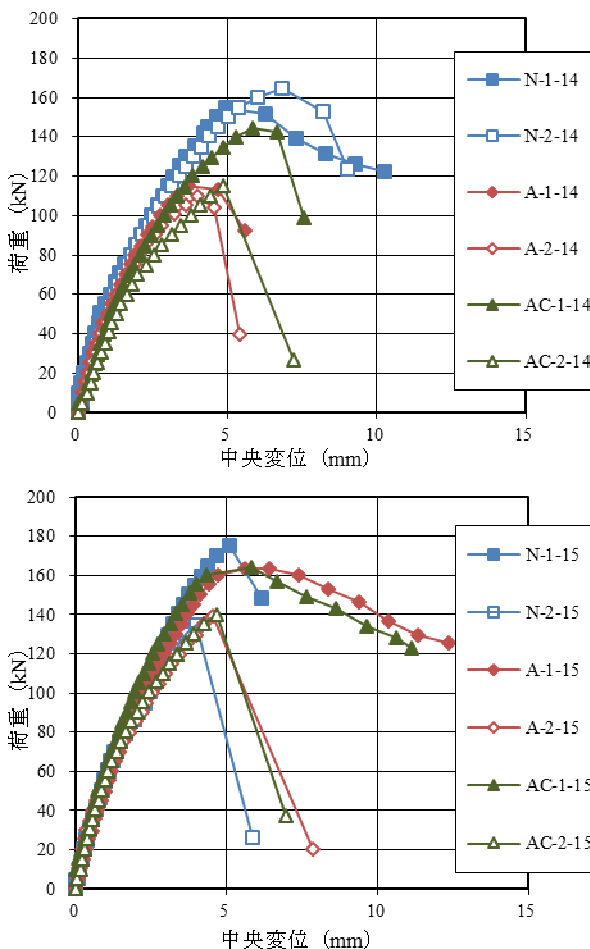


図-5 荷重-中央変位関係

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荷重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。

(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-7 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 (μ) 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 (μ) 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-8 に示す。せん断補強筋の降伏ひずみは 2250 (μ) であるが、N-1-15 供試体はひずみが 2000 (μ) 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 (μ) 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 (μ) 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

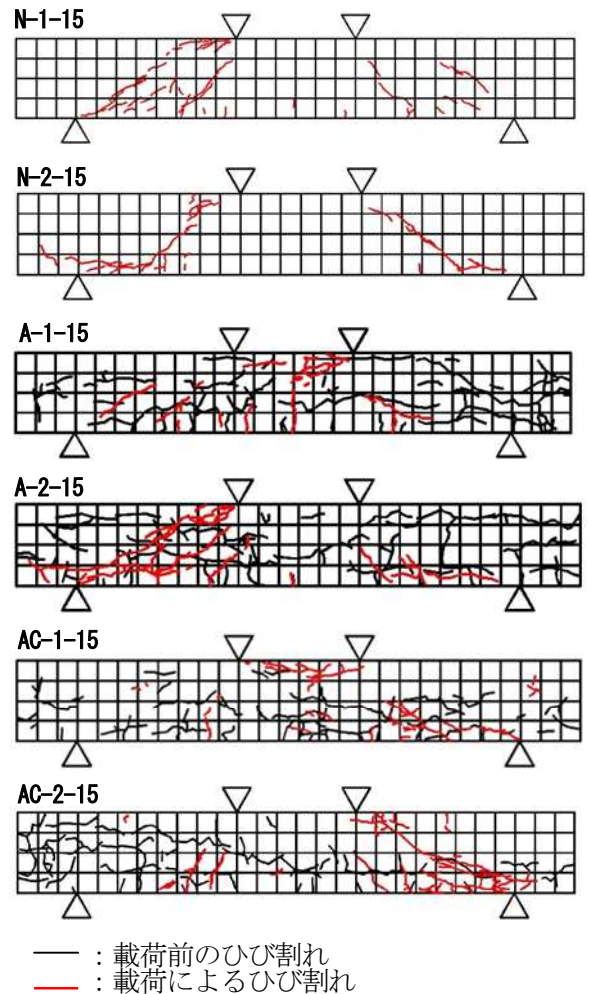


図-6 荷重試験後のひび割れ状況

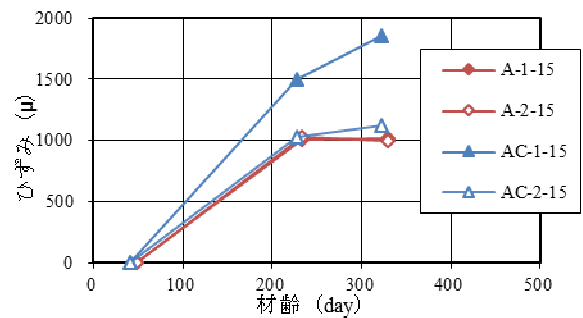


図-7 せん断補強筋ひずみの経時的变化

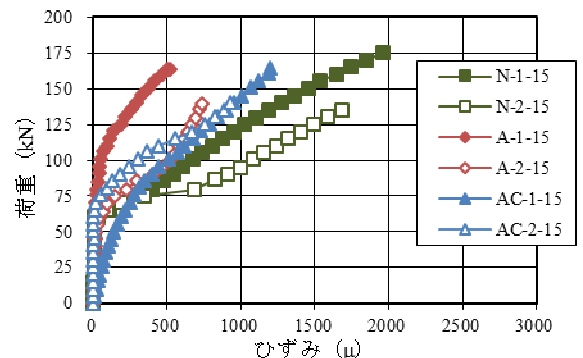


図-8 荷重-せん断補強筋ひずみ

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。

(6) 解析的検討

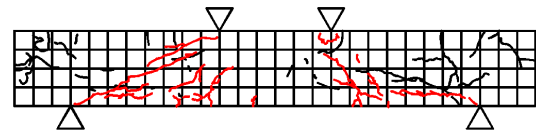
代表的な事例として、せん断補強筋の破断を模擬し複合劣化を生じた AC-2-14 の荷重試験後のひび割れ状況を図-9 に示す。また、有限要素解析によるひび割れひずみを図-10 に示す。実験ではせん断補強筋の破断を模擬していることから、荷重によるひび割れは破断位置において、割裂ひび割れが生じるとともに、荷重点に向けて斜めひび割れが生じた。一方、解析によるひび割れひずみ図では、せん断補強筋の破断位置における割裂ひび割れと荷重点に向かってせん断ひび割れが進展している状況を再現している。付着応力-すべり関係にカンチレバー型引抜き供試体から得られた実測モデルを用いた荷重-中央変位関係を図-11 に示す。実測モデルを用いた計算値は、作用荷重 80kN のせん断ひび割れの発生による剛性低下を生じた点を適切に評価し、作用荷重の最大値 118kN まで荷重と中央変位関係を精度良く推定できることを確認した。今回の試験データは鋼材の腐食量が軽微であったが、上述の付着特性の評価に加えて、腐食鉄筋の弾性係数や降伏強度、引張強度を適切に評価すること、ASR膨張によるケミカルプレストレス量やコンクリートの圧縮強度、弾性係数を適切に評価することによって、ASRと鋼材腐食による複合劣化を生じたRCはり部材のせん断耐荷特性と変形挙動が精度良く推定できることを確認した。

4.2 X線CT撮影と超音波伝播速度試験

(1) 超音波伝播速度

超音波伝播速度の経時変化を図-12 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、

(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。



— : 荷重前のひび割れ
— : 荷重によるひび割れ

図-9 荷重試験後のひび割れ状況

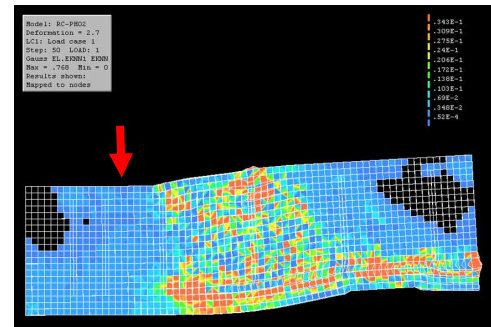


図-10 解析によるひび割れひずみ図

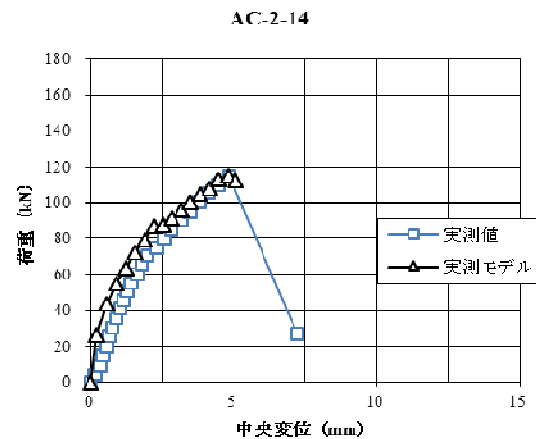


図-11 荷重—中央変位関係 (実測モデル)

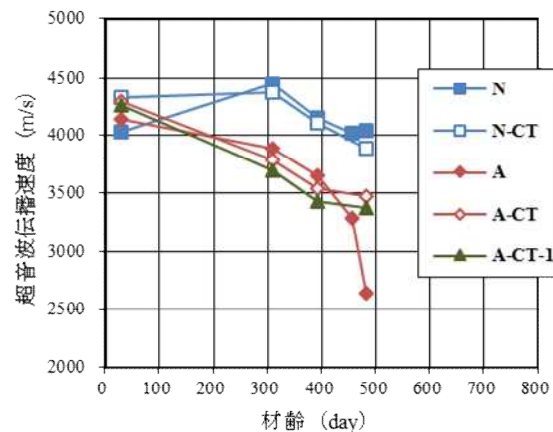


図-12 超音波伝播速度の経時変化 (3体の平均)

(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-13 (材齢 308 日), 図-14 (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-13 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-13, 14 の粗骨材の拡大図に着目すると, 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耐荷特性に影響を及ぼす可能性がある.

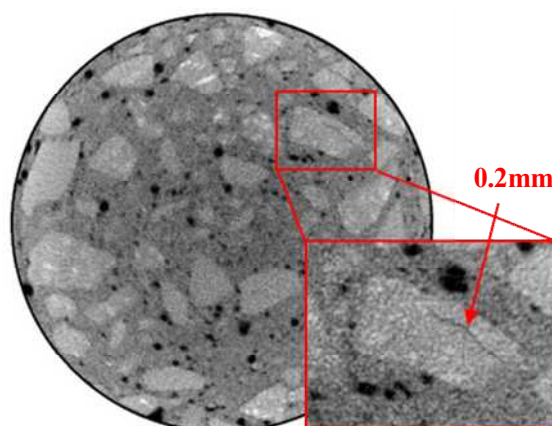


図-10 A-CT-1 の CT 画像 (材齢 308 日)

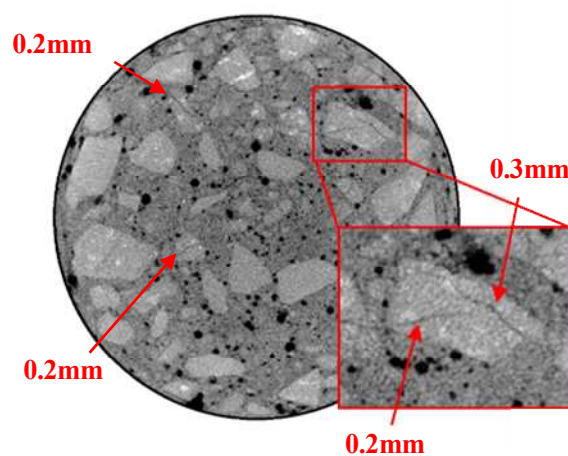


図-11 A-CT-1 の CT 画像 (材齢 483 日)

5. 結論

本研究により得られた結論を以下に示す.

- (1) 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載荷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可能性があると考えられる.
- (2) 有限要素解析において, 鉄筋とコンクリートの付着特性, 腐食鉄筋の強度特性, ケミカルプレストレス量やコンクリートの強度特性を適切に評価することによって, ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じた RC はり部材のせん断耐荷特性や変形挙動を精度良く推定できることを確認した.
- (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.

参考文献

- 1) 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, 裏泰樹, 三方 康弘, 麓 隆行, コンクリート工学年次論文報告集, 査読有り, Vol.39, No.1, pp.925-930, (公社)日本コンクリート工学会, 2017
- 2) 上田 尚史, 澤部 純治, 中村 光, 国枝 稔: アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.532-548, (公社)土木学会 2007.10
- 3) 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.