

論文 ASR 劣化が生じた PRC はり部材のせん断耐荷特性

田中 宏幸*1・三方 康弘*2・井上 晋*3

要旨: ASR 劣化を生じた PRC はり部材と比較用の普通コンクリート PRC 部材を作製し、載荷試験と 3 次元有限要素解析を行った。その結果、ASR 劣化を生じた PRC 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劣化によるひび割れが載荷によって生じたひび割れに繋がり、さらに開口する挙動を示した。また、解析では実験結果で生じたひび割れ性状を精度よく再現することができ、ASR 膨張を再現するためにケミカルプレストレスを導入することにより、たわみ剛性が向上し、せん断ひび割れ発生までの挙動を精度よく再現できた。

キーワード: ASR, PRC はり, せん断補強筋, せん断耐荷特性, 定着不良

1. はじめに

近年、コンクリート構造物に対する高耐久性や長寿命化が望まれている中、アルカリシリカ反応（以下、ASR と略す）による劣化を生じた橋脚の PC はり張出部¹⁾や PC プレテンション主桁において、せん断補強筋の隅角部の破断が確認されている。ASR 劣化によるコンクリートの圧縮強度・弾性係数の低下や ASR によるひび割れが曲げ耐力、せん断耐力、使用限界状態のたわみに影響を及ぼすこと、ASR 劣化は構造物に一樣に生じるわけではなく、雨掛かりの影響等により同一部材内において、劣化のばらつきが生じることが報告されており²⁾、コンクリートの強度特性、ひび割れ性状を精度良く評価し、構造物の安全性評価を行う技術が求められている。また、ASR 劣化により鉄筋破断が生じた PC、PRC はり部材の耐荷特性に関する研究は、RC はり部材に比べ、未だ少ない。そのような背景から、本研究では ASR 劣化を生じる PRC はり供試体と比較用の普通コンクリート PRC はり供試体を作製し、ASR 劣化の経時挙動の把握を行うとともに、載荷試験と 3 次元非線形解析を行い、ASR 劣化が生じた PRC はり部材のせん断耐荷特性を評価することを目的とした。

2. 実験概要

実験要因²⁾として、コンクリートの種類は健全、ASR の 2 種類を選定した。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（断面下縁側の隅角部を切断し、せん断補強筋の破断を模擬）の 2 種類を選定した（健全は NB、ASR は AB と称す）。ASR 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。ASR 劣化が生じた供試体に関して、NaCl を添加アルカリとして使用した。アルカリ総量 (Na₂Oeq) は 6.2kg/m³ である。

PRC はり供試体は 2016 年度に各 1 体、2017 年度は各 3 体作製した。2017 年度に作製した供試体の内訳として、せん断補強筋の破断無しが 1 体、破断有りが 2 体である。また、破断有りの 2 体のうち 1 体は炭素繊維シートの側面接着による補強効果を検討するために炭素繊維補強シートを貼り付けたもの（健全は NS、ASR は AS と称す）と炭素繊維補強シートを貼り付けていないものと比較を行った。ここで、橋脚のはり部材の補強を想定した場合、天端面は沓座が設置されていることや段付きはり形式の補強にも適用できるように側面 2 面のせん断スパンのみにシートを接着した。2016 年度、2017 年度作製 PRC はり供試体の示方配合は表-1 に示す。

供試体の概要として、2016 年度作製 PRC はり供試体は幅×高さ=200×500mm の単鉄筋長方形断面を有する全長 3400mm の PRC 単純はり部材（コンクリートの設計基準強度： $f'c=40\text{N/mm}^2$ ）であり、PC 鋼材は SWPR19L ($f_{py}=569\text{kN}$) を使用した。載荷方法は $a/d=1.95$ とした 1 点集中荷重とし、せん断スパン 900mm とした。2017 年度作製 PRC はり供試体は幅×高さ=100×250mm の単鉄筋長方形断面を有する全長 1600mm の PRC 単純はり部材（コンクリートの設計基準強度： $f'c=40\text{N/mm}^2$ ）であり、PC 鋼材は PC 鋼棒 $\phi 17\text{mm}$ ($f_{py}=279\text{kN}$)、炭素繊維シート（引張強度： 3400N/mm^2 ）を使用した。載荷方法は $a/d=2.22$ 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 500mm とした。全ての供試体において、主鉄筋は D19 (SD345)、せん断補強筋には D6 (SD345) を使用し、導入プレストレス量は断面下縁の応力を 2.1N/mm^2 とし、プレストレスロスは考慮してい

*1 協和設計（株）（正会員）

*2 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 教授（正会員）

*3 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科 教授（正会員）

ない。また、導入時の材齢は、2016年度作製 PRC はり供試体は 29 日、2017 年度作製 PRC はり供試体は 22 日である。いずれの PRC はり供試体も八幡工学実験場（京都府八幡市）にて野外曝露を行った。環境条件は年平均気

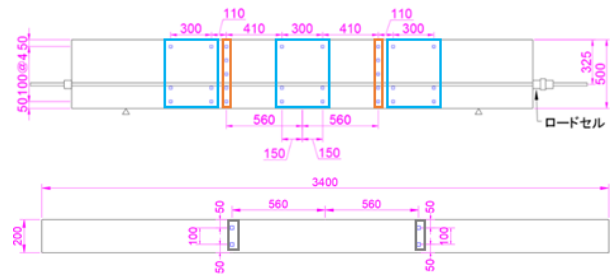
温 15.9 度、年平均湿度 66% である。2016 年度、2017 年度作製 PRC はり供試体の側面図・断面図を 図-1、 図-2、 図-3、 種類を表-2 に示す。

表-1 コンクリートの示方配合

| シリーズ | コンクリートの種類 | Gmax (mm) | スランプ (cm) | W/C (%) | Air (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|------|-----|------|----------|
| | | | | | | | W | C | S | | G | | NaCl | AE剤 (cc) |
| | | | | | | | | | 非反応 | 反応 | 非反応 | 反応 | | |
| N | 健全 | 20 | 8 | 45.5 | 4 | 44.1 | 178 | 391 | 746 | 0 | 1026 | 0 | 0 | 978 |
| A | ASR | | | | | 41.1 | 163 | 358 | 356 | 365 | 550 | 572 | 11.6 | 895 |

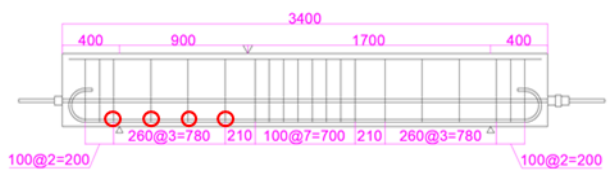
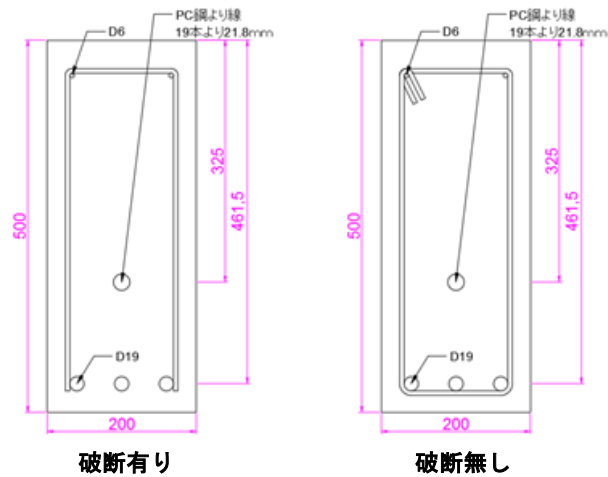
表-2 PRC はり供試体の種類

| 名称 | コンクリートの種類 | せん断補強筋の破断 | 炭素繊維シートの有無 | 作製年度 |
|-------|-----------|-----------|------------|------|
| NB-16 | 健全 | 有り | 無し | 2016 |
| AB-16 | ASR | | | |
| N-17 | 健全 | 無し | 無し | 2017 |
| NB-17 | | 有り | | |
| NS-17 | | 有り | | |
| A-17 | ASR | 無し | 無し | 2017 |
| AB-17 | | 有り | | |
| AS-17 | | 有り | | |

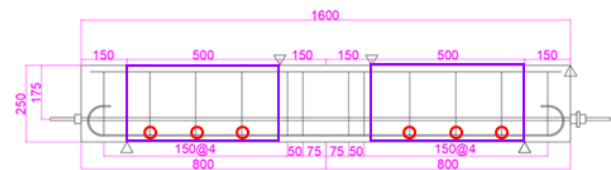
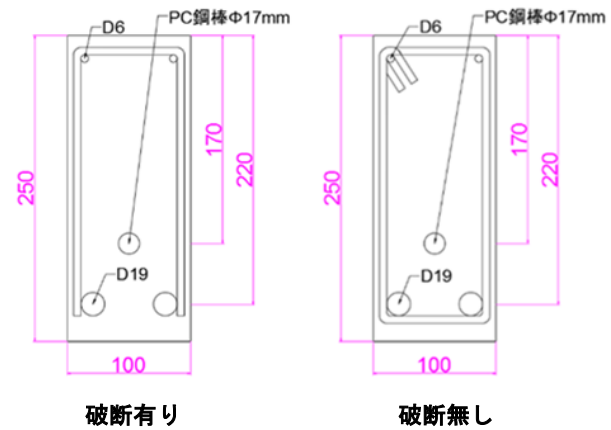


- : ゲージプラグの配置位置
- : ゲージプラグの測定方向 (水平)
- : ゲージプラグの測定方向 (鉛直)
- : ゲージプラグの測定方向 (上面)

図-2 ゲージプラグの配置位置 (2016 年度)



○ : スターラップの破断を模擬した箇所
 図-1 PRC はり供試体の断面図 (2016 年度)



- : スターラップの破断を模擬した箇所
- : 炭素繊維シート貼り付け位置

図-3 はり供試体の断面図 (2017 年度)

3. PRC はり供試体

3. 1 ASR 膨張

2016 年度作製した AB-16 供試体の ASR 膨張によるコンクリートひずみの経時的变化を図-4 に示す。PRC はり供試体における ASR 膨張を計測するためにゲージブラグを図-2 のように添付し、ASR 膨張を水平方向(軸方向)、鉛直方向、上面の 3 カ所計測した。なお、図中のひずみ値は各方向の計測値の平均値である。AB-16 供試体は材齢約 1000 日で水平方向に 1098(μ)、鉛直方向に 2713(μ)、上面に 3453(μ)のひずみが生じた。特に鉛直方向と上面の膨張量の増加が顕著であった。これは、軸方向鉄筋量の少ない上面やその周辺で計測した鉛直方向のひずみの数値が大きくなったことにより、鉛直方向と上面の膨張量の増加が顕著に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-5 に示す。全ての供試体において、ASR 膨張に伴う亀甲状のひび割れが顕著に見られ、軸方向鉄筋の少ない上面と供試体側面上部のひび割れが多い傾向であった。なお、シート接着を行う供試体は載荷試験直前にシート接着を行った。

3. 3 PC 鋼材の緊張力

2016 年度作製した NB-16 供試体、AB-16 供試体の PC 鋼材の緊張力の経時的变化を図-6 に示す。緊張力は定着板の外側にセンターホール型ロードセルを設置して計測を行った。NB-16 供試体は温度変化による緊張力の増減があるものの大きな変化は見受けられなかったが、AB-16 供試体は温度変化の影響を受けつつ、材齢に伴って増加し続けた。緊張力は導入時(109kN)と比較すると、材齢約 1000 日(132kN)で 121%となった。

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-3、最大荷重と耐力計算値を表-4、荷重-中央変位関係を図-7、載荷試験後のひび割れ状況を図-8、載荷試験後の NS-17 供試体の写真を写真-1 に示す。

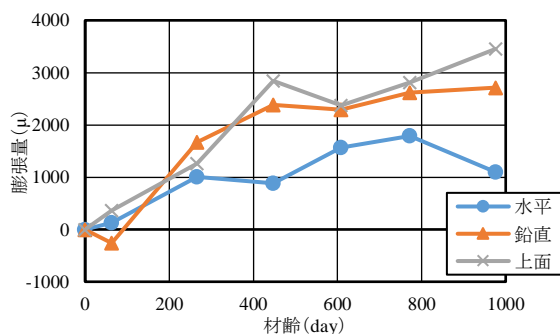
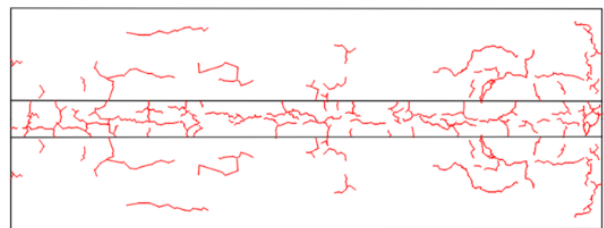
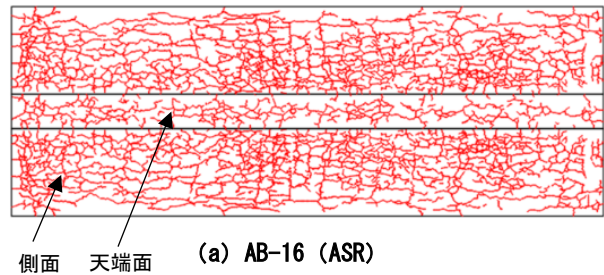
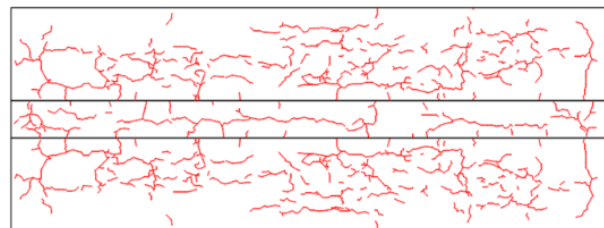


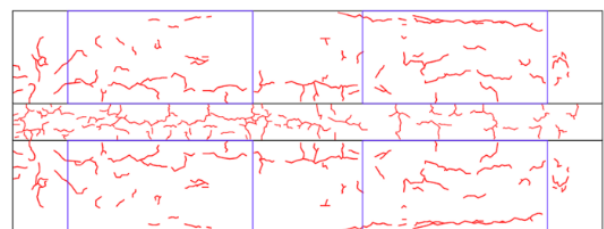
図-4 コンクリートひずみの経時的变化 (AB-16)



(b) A-17 (ASR)



(c) AB-17 (ASR)



□ : シート接着箇所

(d) AS-17 (ASR+炭素繊維補強シート)

図-5 載荷試験前のはり供試体のひび割れ状況

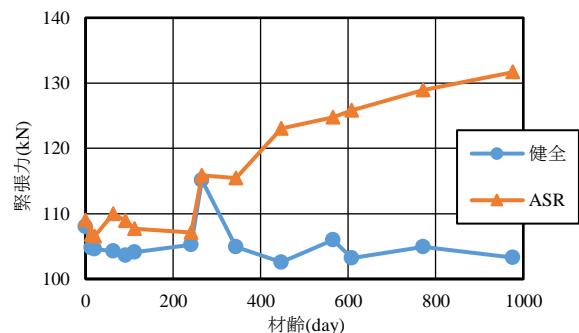


図-6 PC 鋼材の緊張力

2016年度作製の供試体において、AB-16 供試体では斜めひび割れが ASR 劣化によるひび割れと繋がり、ひび割れ幅が拡大した。NB-16 供試体と比較すると、荷重が 441kN まで荷重—変位関係がほぼ同様の挙動であったが最大荷重 441kN 以降において、荷重低下を生じ、最大荷重や最大荷重時の変位が小さくなった。また、鉄筋量が少ない供試体上部のひび割れ幅が増大した。

2017年度作製の供試体において、N-17 供試体は斜め引張破壊に至ったが、NB-17 供試体は斜めひび割れ発生後もタイドアーチ的な耐荷機構が形成され、最終的に曲げ圧縮部の圧壊による曲げ引張破壊に至った。なお、曲げ圧縮部の圧壊が生じていない場合はせん断破壊とした。NS-17 供試体は実測値が計算値よりも下回る結果となった。これは、シート上部の剥離を起点として、ウェブのかぶりコンクリートが剥離し、終局に至った(写真-1 参照)。AB-17 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や ASR により生じたひび割れと繋がり、主鉄筋位置のひび割れ幅が増大した。また、A-17 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、主鉄筋位置におけるひび割れが進展し、斜めひび割れ上部のコンクリートによって、圧縮ストラットが形成され、載荷点近傍のコンクリートが圧壊することにより最終的にせん断圧縮破壊に至ったと考えられる。また、AS-17 供試体は A-17 供試体に比べ、破壊形式は同じであったが、最大荷重と最大荷重時の変位が大きくなった。斜めひび割れ発生後に、シートの面内方向のせん断ずれが確認され、最終的に斜め引張破壊に至り、シート接着によるせん断耐力の向上が見られた。計算値 V_f はシート巻き立て補強³⁾を前提としているため、せん断破壊荷重の計算値には及ばないが、側面のみにシート

表-3 コンクリートの諸強度

| 名称 | 圧縮強度 (N/mm ²) | | 静弾性係数 (kN/mm ²) | | 引張強度 (N/mm ²) |
|-------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|
| | 28日強度 | 載荷試験時 0内は材齢 | 28日強度 | 載荷試験時 0内は材齢 | 載荷試験時 0内は材齢 |
| NB-16 | 43.8 | 53.4 (1137日) | 37.0 | 38.0 (1137日) | 4.6 (1137日) |
| AB-16 | 33.8 | 36.1 (1137日) | 36.5 | 24.5 (1137日) | 2.6 (1137日) |
| N-17 | 29.2 | 48.6 (714日) | 26.8 | 29.7 (714日) | 4.6 (714日) |
| NB-17 | | | | | |
| NS-17 | | | | | |
| A-17 | 24.8 | 38.6 (714日) | 28.0 | 16.0 (714日) | 2.6 (714日) |
| AB-17 | | | | | |
| AS-17 | | | | | |

を接着した場合にシートやかぶりコンクリートの剥離が生じなければ、補強に寄与するものと考えられる。

表-3 に関して、2016年作製はり供試体およびテストピースは 8月に打設を行い、屋内にてシートで覆い、28日間散水養生を実施したが、2017年作製はり供試体およびテストピースは 11月に打設を行った。養生温度の違いがコンクリート強度に影響を及ぼしたものと考えられる。

表-4 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 P _{ub} (kN) | せん断 ^{**} 破壊荷重 計算値 P _{us} (kN) | せん断耐力 ^{**} 計算値(kN) | | | | 破壊形式 |
|-------|----------------|---|--|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| | | | | V _y | V _s | V _c | V _f | |
| NB-16 | 515 | 437 | 386 | 252 | 150 | 102 | | 斜め引張 |
| AB-16 | 441 | 373 | 372 | 243 | 153 | 90.7 | | 斜め引張 |
| N-17 | 230 | 322 | 208 | 104 | 63.2 | 40.9 | | 斜め引張 |
| NB-17 | 240 | 322 | 208 | 104 | 63.2 | 40.9 | | 曲げ引張 |
| NS-17 | 191 | 322 | 376 | 188 | 63.2 | 40.9 | 84.1 | 剥離 |
| A-17 | 244 | 285 | 194 | 96.8 | 60.5 | 36.3 | | 斜め引張 |
| AB-17 | 238 | 285 | 194 | 96.8 | 60.5 | 36.3 | | せん断圧縮 |
| AS-17 | 251 | 285 | 349 | 175 | 60.5 | 36.3 | 77.9 | 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式により、せん断荷重を算定。

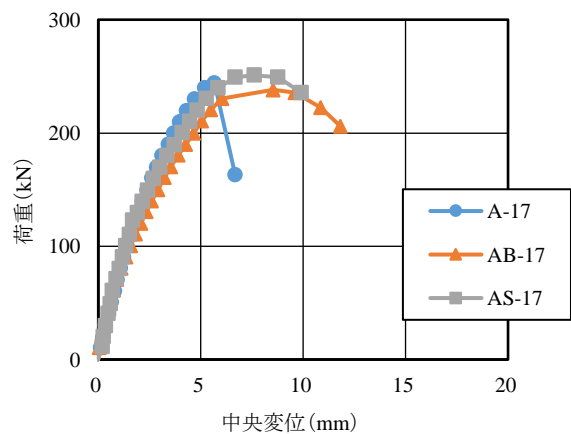
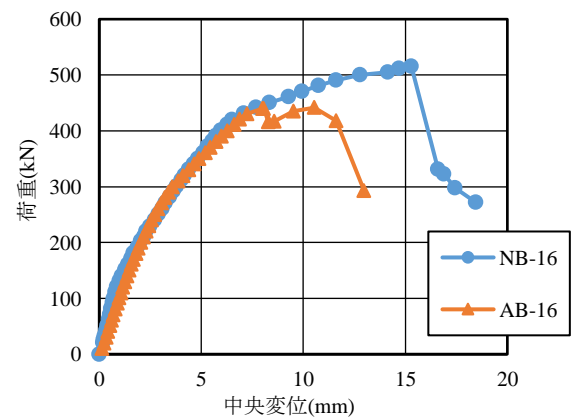


図-7 荷重—中央変位関係

4. 解析概要

2章で示した PRC はり供試体をモデルとし、汎用有限要素解析プログラム DIANA Version 10.3 において、3次元非線形解析を行った。構成側として、コンクリートの圧縮特性は Nakamura らが提案するモデル⁴⁾、引張特性はコンクリート標準示方書モデル、鉄筋の特性は Von-Mises モデル、付着特性は完全付着とした。ASR が生じた供試体において、ASR 膨張を再現するためにケミカルプレストレスを導入しており、その数値は上田らが提案した式⁵⁾にて算出し、算出値 (3.02N/mm²) と同等のケミカルプレストレスがモデル中央の主鉄筋位置のコンクリートに作用するまで温度荷重を導入する ASR 膨張解析を行った。

5. 解析結果

2016 年度作製 PRC はり供試体の NB-16 供試体と AB-16 供試体を対象とし、PRC はり供試体の最終ひび割れ状況を **図-9**、実験値および各モデルの解析値の荷重—中央変位関係を **図-10**、**図-11** に示す。**図-9** に関して、青色（寒色系）のコンター図はひび割れひずみが小さい箇所を示しており、幅が大きいひび割れが生じる箇所では NB-16 供試体では黄緑色、AB-16 供試体では赤色（暖色系）で表現している。NB-16、AB-16 供試体両方とも、せん断スパン部に広範囲のひずみ分布が見られ、実験結果のひび割れ性状をおおよそ表現できた。**図-10**、**図-11** に関して、NB-16 供試体の解析モデルは実験値と比較すると、降伏荷重および最大荷重が低下しているものの、降伏に至るまでの挙動は精度良く表現できている。AB-16 供試体の解析結果に関しては、ASR 膨張解析を用いてケミカルプレストレスを導入することにより、作用荷重による断面引張縁の引張応力が低減され、曲げひび割れ発生荷重の増加によってたわみ剛性が向上し、せん断ひび割れ発生に至るまでの挙動を精度良く表現できた。しかし、最大荷重や最大荷重時の変位が実験値よりもかなり小さくなる解析結果となった。これは、せん断補強筋の破断を有する部材に対して、載荷試験と解析を行っており、解析ではせん断補強筋負担せん断力を少なく見積っているが、実験ではせん断ひび割れ発生後もせん断補強筋がせん断力を負担しており、実験値との差が生じたものと思われる。このため、せん断補強筋の破断を有する ASR 劣化を生じた PRC はり部材のせん断耐力や変形性能を安全側に評価できたと考えられる。

6. まとめ

(1) ASR が生じた PRC はり供試体に関して、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。

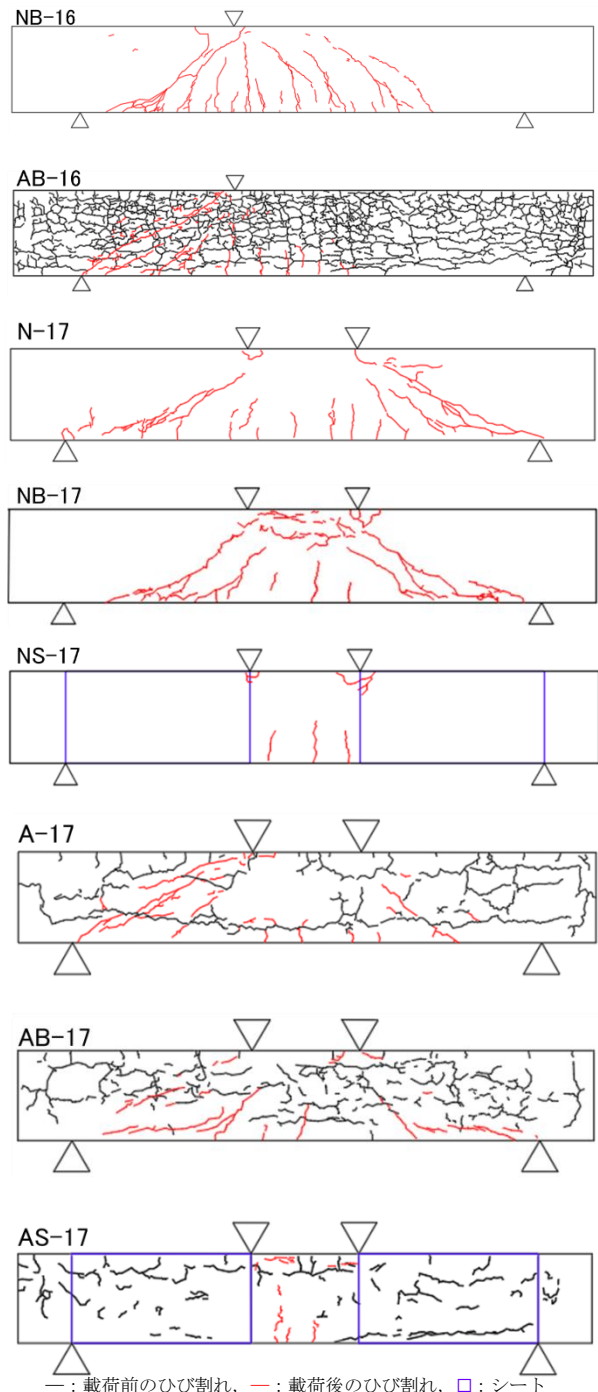
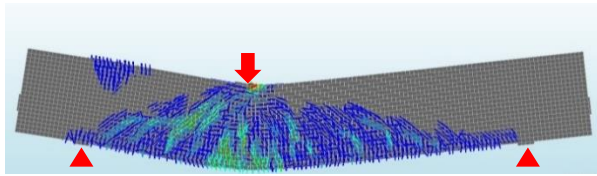


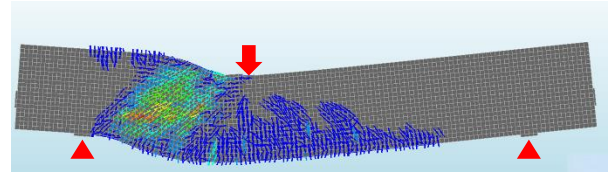
図-8 載荷試験後のひび割れ状況



写真-1 NS-17 供試体



(a) NB-16



(b) AB-16

図-9 最終ひび割れ状況

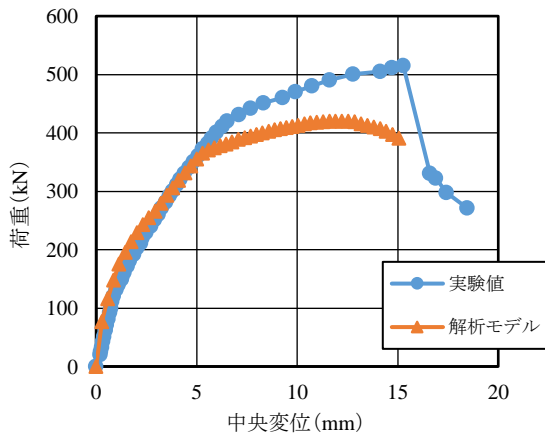


図-10 荷重-中央変位関係 (NB-16)

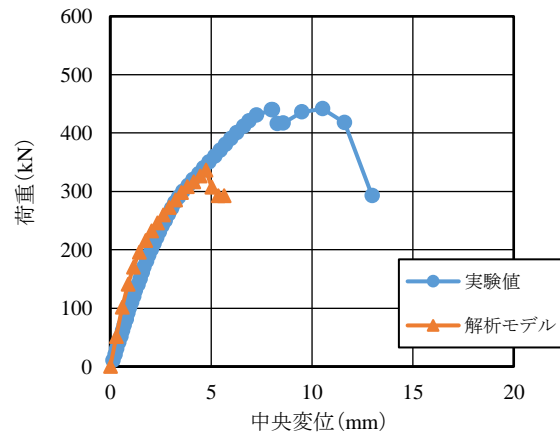


図-11 荷重-中央変位関係 (AB-16)

また、PC 鋼材の緊張力は導入時(109kN)と比較すると、材齢約 1000 日 (132kN) で 121%となった。

(2) 炭素繊維シートについて、AS-17 供試体は A-17 供試体に比べ、破壊形式は同じであったが、最大荷重と最大荷重時の変位が大きくなった。斜めひび割れ発生後にシートの面内方向のせん断ずれが確認され、最終的に斜め引張破壊に至ったことから、シート接着によってせん断耐力の向上に寄与したと考えられる。

(3) 解析に関して、両供試体において、せん断スパン部に広範囲のひずみ分布が見られ、実験結果のひび割れ性状をおおよそ表現できた。NB-16 供試体に関して、実験値と比較すると、降伏荷重および最大荷重が低下しているものの、降伏に至るまでの挙動は精度良く表現できた。また、AB-16 供試体に関して、ケミカルプレストレスを導入する ASR 膨張解析を行うことで、たわみ剛性を向上させ、せん断ひび割れ発生に至るまでの挙動を再現することができたが、実験値よりもかなり小さくなる結果となった。このことから、解析ではせん断補強筋負担せん断力を少なく見積っているが、実験ではせん断ひび割れ発生後もせん断補強筋がせん断力を負担しており、実験値との差が生じたと考えられる。このため、せん断補強筋の破断を有する ASR 劣化を生じた PRC はり部材のせん断耐力や変形性能を安全側に評価できたと考えられる。

謝辞

本研究は株式会社安部日鋼工業および JSPS 科研費 JP17K06522 の助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005
- 2) 田中宏幸，三方康弘，井上晋：ASR により劣化を生じた PRC 部材の経過観察に関する研究，令和元年度土木学会全国大会 第 74 回年次学術講演会，V-241，2019
- 3) 公益社団法人土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，2000
- 4) 斎藤成彦，中村光，檜貝勇：剛体バネモデルを用いた RC パネルのせん断二次破壊に関する解析的研究，土木学会論文集，V-55，No.704，pp.219~234，2002.5
- 5) 上田尚史・澤部純浩・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.4，532-548，2007.10