

# 論文 ASR と鋼材腐食により複合劣化を生じた RC はり部材の耐荷特性

三方 康弘<sup>\*1</sup>・福谷 祥<sup>\*2</sup>・井上 晋<sup>\*3</sup>

**要旨:** ASR と鋼材腐食により複合劣化を生じた RC はり部材の経時変化および曲げ耐荷特性を把握することを目的として、ASR と鋼材腐食が生じた RC はり供試体を作製し、劣化の種類、主鉄筋のフックの有無を要因として曲げ耐荷特性について検討するとともに、鉄筋とコンクリートの付着特性について付着供試体により評価した。その結果、ASR と鋼材腐食により複合劣化を生じた付着供試体の付着強度は、ケミカルプレストレスの影響により健全なコンクリートを用いた付着供試体の付着強度と比較して、増加する傾向を示した。

**キーワード:** ASR, 鋼材腐食, 複合劣化, 付着, 曲げ耐荷特性

## 1. はじめに

1980 年代に実施された建設省総合技術開発プロジェクトおよび日本コンクリート工学協会のアルカリ骨材反応調査研究委員会や 2003 年に実施されたアルカリシリカ反応（以下、ASR と記す）の全国調査の結果、ASR による劣化を受けた構造物は、我が国の幅広い地域に分布していることが指摘された。また、沿岸部のみならず凍結防止剤の散布の影響により、外部から塩化物イオンが供給され鋼材腐食を生じている事例<sup>1)</sup>も報告されている。

以上のことから、ASR により劣化したコンクリート構造物においては、ASR のひび割れにより水、酸素等の腐食因子が鋼材に供給されやすく、鋼材が腐食しやすい環境にあると言える。しかしながら、複合劣化に関する研究<sup>2)</sup>は未だに少ないのが現状である。

そこで本研究は、ASR や鋼材腐食による複合劣化を生じたはり部材の耐力評価を行うまでの基礎的な資料を得ることを目的として、ASR や鋼材腐食等の劣化要因や主鉄筋とコンクリートの付着特性が RC はり部材の曲げ耐荷特性に及ぼす影響について検討を行った。さらに、鉄筋とコンクリートの付着特性について JSCE-G503<sup>3)</sup>に準拠した付着供試体と、はり供試体と同一断面を有するはり断面を模擬した付着供試体により付着特性を評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 はり供試体

実験に用いる供試体の詳細を表-1 に、供試体の側面図と断面形状を図-1 に示す。実験要因として、(1) 劣化の種類: ASR (A シリーズ供試体), 鋼材腐食 (C シリーズ供試体), ASR と鋼材腐食による複合劣化 (AC シリーズ供試体), 健全 (N シリーズ供試体) の 4 種類を選定した。(2) 主鉄筋の定着部: 主鉄筋の端部に 180 度フックを有する供試体と、コンクリートと鉄筋による付着力

の低下が曲げ耐荷特性に及ぼす影響について検討するために、定着部の影響を排除した 180 度フックを有しない供試体を作製した。これらの実験要因から合計 8 体の供試体を作製した。

コンクリートの示方配合は表-2 に示す 3 種類とし、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および細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。なお、主鉄筋として 2-D16 (SD295A),せん断補強筋として D6 (SD345) を用い、せん断補強筋配置を 140mm (せん断補強筋比 Pw=0.46%) とした。

また、鉄筋とコンクリートの付着特性を評価するため、180 度フックを有しない供試体は供試体の両端部から主鉄筋を露出させ、載荷試験時に鉄筋の供試体に対する相対変位量（すべり量）を計測した。（図-1 参照）

表-1 はり供試体の詳細

シリーズ	供試体	劣化の種類	フックの有無	*1 養生期間(年)
N	N-F	健全	有り	28/365
	N		無し	28/365
C	C-F-1	鋼材腐食	有り	1
	C-1		無し	1
A	A-F-2	ASR	有り	2
	A-2		無し	2
AC	AC-F-2	ASR+ 鋼材腐食	有り	2
	AC-2		無し	2

\*1 : N-F, N 供試体の養生期間は 4 週間

\*1 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科准教授 博(工) (正会員)

\*2 大阪工業大学大学院 工学研究科都市デザイン工学専攻

\*3 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科教授 博(工) (正会員)

表-2 コンクリートの示方配合

シリーズ	G <sub>max</sub>	スランプ <sup>°</sup>	W/C	Air	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
						W	C	*1		*1		NaCl	*2 A (cc)
								S <sub>n</sub>	S <sub>r</sub>	G <sub>n</sub>	G <sub>r</sub>		
N	25	8	63	4.0	45.8	183	290	791	0	988	0	0	725
C	25	8	63	4.0	45.8	183	290	791	0	988	0	13.1	725
A, AC	25	8	63	4.0	45.8	183	290	396	411	494	492	13.1	725

\*1 S<sub>n</sub>:非反応性細骨材, S<sub>r</sub>:反応性細骨材, G<sub>n</sub>:非反応性粗骨材, G<sub>r</sub>:反応性粗骨材

\*2 A : AE 減水剤

コンクリートの材齢 28 日と載荷試験時の諸強度を表-3に示す。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 730 日まで実施した。Cシリーズ供試体は室内に保管し、材齢 365 日まで 3% 濃度の塩水を週 5 日散布した。ACシリーズ供試体は室内に保管し、材齢 365 日まで 3% 濃度の塩水を週 5 日散布した。その後、温度 40°C, 相対湿度 90% の環境にて促進養生を 730 日まで実施した。なお、載荷方法は曲げスパン 300mm, せん断スパン 600mm とした対称 2 点集中荷重方式 (a/d=3.53) とした。

## 2.2 付着強度試験供試体

ASR, 鋼材腐食, ASR と鋼材腐食による複合劣化がコンクリートと鉄筋の付着特性に及ぼす影響を把握するために、付着強度試験供試体を作製し、引抜き試験を行った。実験要因として(1)供試体の種類：土木学会規準 JSCE-G503 準拠供試体<sup>3)</sup>（以下、タイプ-1 付着供試体と記す）、はり断面模擬引抜き供試体（以下、タイプ-2 付着供試体と記す）の 2 種類を選定した。なお、タイプ-2 付着供試体は、はり供試体における主鉄筋とコンクリートの付着特性を検討するために、フープ筋でコアコンクリートと軸方向鉄筋を拘束し、はり部材を模擬した。(2)劣化の種類：はり供試体と同様の ASR (A シリーズ供試体)、鋼材腐食 (C シリーズ供試体)、ASR と鋼材腐食による複合劣化 (AC シリーズ供試体)、健全 (N シリーズ供試体) の 4 種類を選定した。なお、供試体の配合と養生方法ははり供試体と同等である。供試体の形状等を図-2 に示す。タイプ-1 付着供試体は各劣化要因に 5 体ずつ計 20 体、タイプ-2 付着供試体は各劣化要因に 3 体ずつ計 12 体の供試体を作製した。

## 3. 付着強度試験の実験結果

### 3.1 ひび割れ状況

タイプ-1, タイプ-2 付着供試体の引抜き試験前のひび割れ状況を図-3 に示す。タイプ-1 供試体の A, AC シ

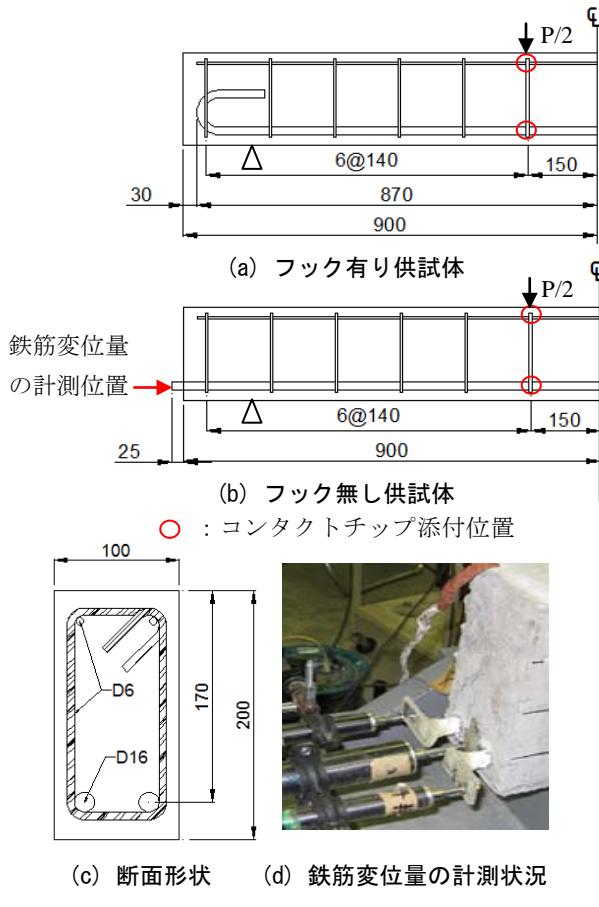


図-1 供試体の側面図と断面形状

表-3 コンクリートの諸強度

シリーズ	N	C	A	AC
材齢(日)	28	28	443	28
圧縮強度 $f_c^t$ (N/mm <sup>2</sup> )	25.0	21.5	28.2	31.2
弾性係数 $E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	21.9	25.6	32.1	28.3
	761	23.6	28.1	38.9
	28	15.4	28.0	13.4

リーズ供試体は供試体の全体にひび割れが発生し、最大ひび割れ幅は1mm以上であった。

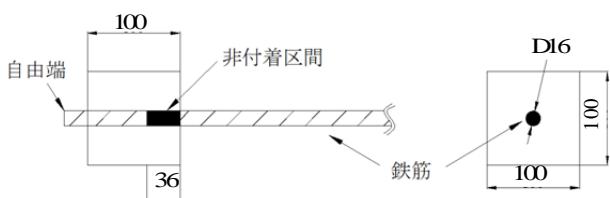
タイプ-2供試体において、Cシリーズ供試体は鋼材の腐食によって、鉄筋位置に腐食ひび割れが発生した。Aシリーズ供試体はASRのひび割れが供試体全体に発生し、ひび割れ幅は0.2mm以上のものが多かった。ACシリーズ供試体は全体にひび割れが発生しているものの、主鉄筋位置のひび割れ幅が大きかった。このことから、複合劣化を生じた場合には、腐食ひび割れの発生とASR膨張が共に生じることにより、鉄筋位置のひび割れ幅が増大する場合があると考えられる。

また、タイプ-2供試体はタイプ-1供試体と比較して、かぶり深さは小さいもののフープ筋の影響により、ひび割れ幅の増大が抑制され最大ひび割れ幅が小さくなつた。

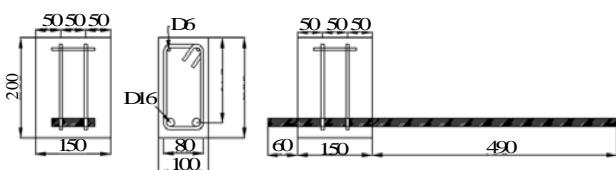
### 3.2 付着強度

コンクリートと鉄筋の付着強度を表-4に示す。タイプ-1供試体において、Nシリーズ供試体は全ての供試体の中で最も付着強度が大きかった。Aシリーズ供試体はNシリーズ供試体と比較して、ASRのひび割れの影響により付着強度が低下した。ACシリーズ供試体はASRのひび割れや鋼材腐食によって、ひび割れ幅が大きくなり、最も付着強度が小さくなつた。

一方、タイプ-2供試体において、A、ACシリーズ供試体はNシリーズ供試体と比較して、付着強度が大きかった。これはASRによる膨張をフープ筋が拘束したため、ケミカルプレストレスが発生し、コアコンクリートと異形鉄筋のふしによる機械的抵抗力が増大し、付着強度が増加したと推察される。なお、付着強度が増大するメカニズムについては、今後も更なる検討が必要である。Cシリーズ供試体は付着強度が低下することが想定されたが、塩水を1年間散布したことにより、鋼材腐食が生じたもののコンクリートが緻密になり、Nシリーズ供試体

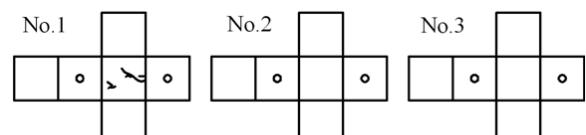


(a) タイプ-1 付着供試体

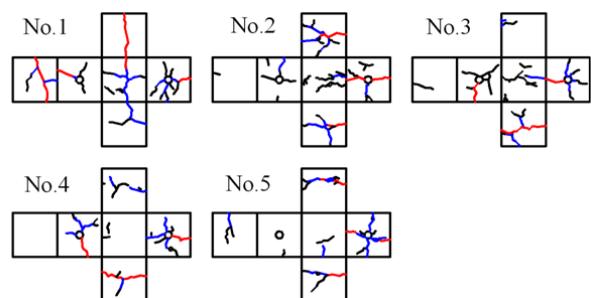


側面図 断面図 側面図  
(b) タイプ-2 付着供試体

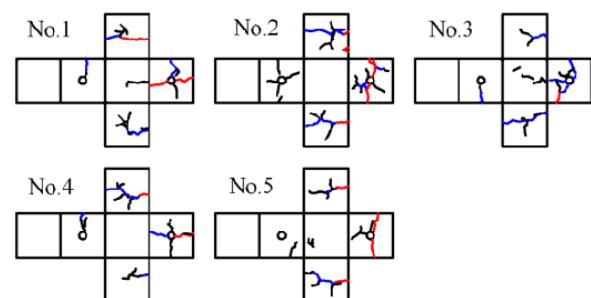
図-2 供試体の形状 (単位:mm)



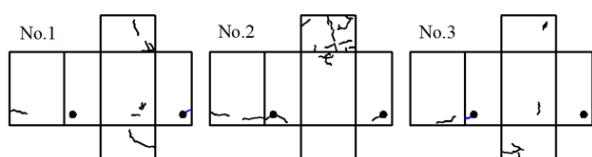
(a) Cシリーズ供試体 (タイプ-1)



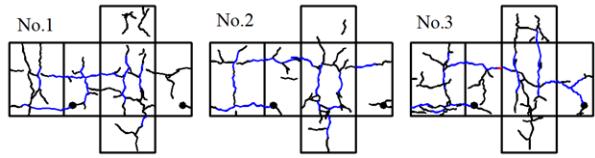
(b) Aシリーズ供試体 (タイプ-1)



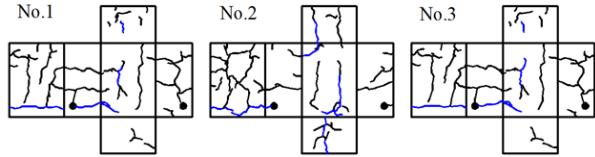
(c) ACシリーズ供試体 (タイプ-1)



(d) Cシリーズ供試体 (タイプ-2)



(e) Aシリーズ供試体 (タイプ-2)



(f) ACシリーズ供試体 (タイプ-2)

- : 0.2mm以下のひび割れ
- : 0.2mm以上1mm未満のひび割れ
- : 1mm以上のひび割れ

図-3 引抜き試験前のひび割れ状況

と比較して、付着強度が大きくなつた。

タイプ-1供試体とタイプ-2供試体と異なる傾向を示したことから、ASRにより劣化を生じたはり部材における鉄筋とコンクリートの付着特性を評価するためには、フープ筋の拘束によるケミカルプレストレスの影響を考慮する必要があると考えられる。

#### 4. はり供試体の実験結果

##### 4.1 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-4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鉄筋位置（断面上縁から30mmと170mm、図-1参照）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。

材齢735日の時点では、A-F-2供試体、A-2供試体は1400 ( $\mu$ )、1200 ( $\mu$ ) のひずみが生じた。一方、AC-F-2供試体、AC-2供試体は1100 ( $\mu$ )、700 ( $\mu$ ) のひずみが生じた。Aシリーズ供試体はACシリーズ供試体と比較して、ASRの膨張ひずみが大きくなつた。これはACシリーズ供試体の促進養生期間は材齢1年以降の1年間であるのに対して、Aシリーズ供試体の促進養生期間は約2年間であり、促進養生期間が異なることが要因である。

##### 4.2 ひび割れ状況

載荷試験前のはり供試体のひび割れ状況の一例を図-5に示す。C-F-1供試体は主鉄筋の腐食により主鉄筋位置に腐食ひび割れが発生し、ひび割れ幅は1mm未満であった。A-F-2供試体は全体にASRひび割れが発生しており、ひび割れ幅は1mm未満であった。AC-F-2供試体は材齢365日までASRの促進養生を行わず、塩水散布のみを実施していたため、材齢365日では主鉄筋位置にひび割れ幅1mm未満のひび割れが発生していたが、その後、ASRの促進養生を行うことにより、供試体の全体にひび割れが発生し、材齢730日では主鉄筋位置のひび割れ幅が1mm以上に拡大した。4.1 ASR膨張の結果から、AC-F-2供試体はA-F-2供試体と比較して、ASRの膨張量は小さいものの、最大ひび割れ幅は大きくなつた。

のことから、複合劣化を生じた場合には、腐食ひび割れの発生とASR膨張が共に生じることにより、鉄筋位置のひび割れ幅が増大する場合があると考えられる。

##### 4.3 鉄筋の腐食量

鉄筋の質量減少率および腐食した鉄筋のみかけの弾性係数を表-5に示す。なお、鉄筋の質量減少量は載荷試験終了後の供試体から腐食鉄筋を取り出し、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

表-4 コンクリートと鉄筋の付着強度

供試体	タイプ-1		タイプ-2	
	最大荷重 $P_{max}$ (N)	付着強度 $\tau_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	最大荷重 $P_{max}$ (N)	付着強度 $\tau_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )
N	40.7	12.74	41.0	5.46
C	38.0	11.77	49.2	6.56
A	28.2	8.87	63.5	8.47
AC	18.5	5.81	52.0	6.93

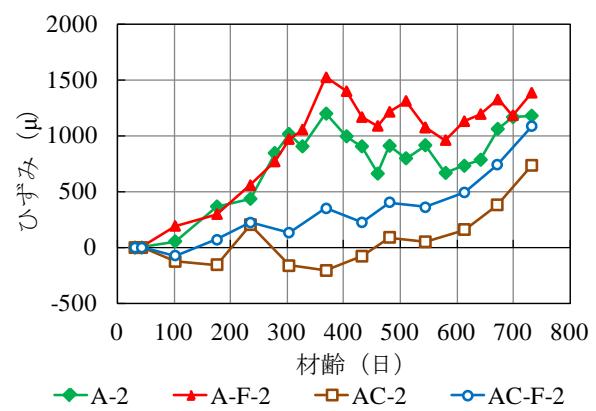


図-4 ASR膨張によるはり供試体の軸方向ひずみ

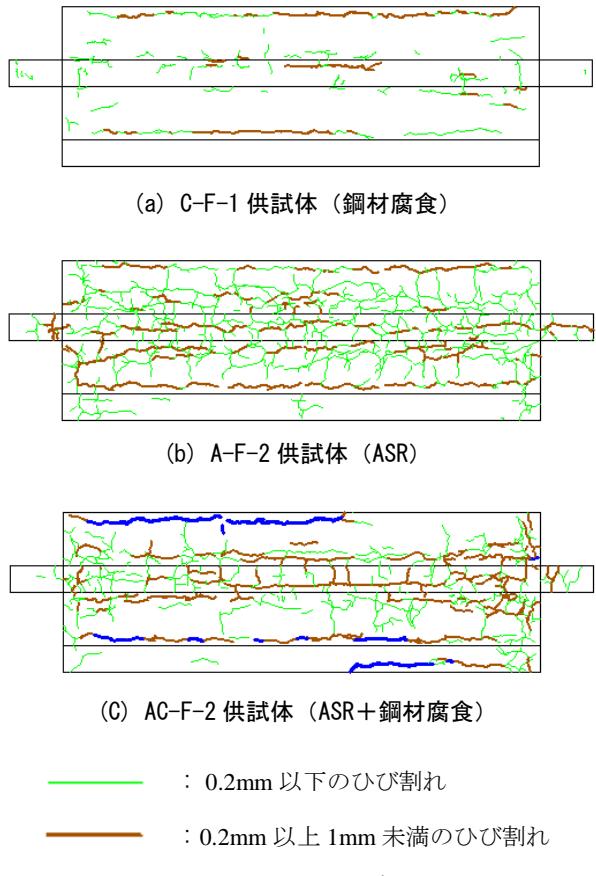


図-5 載荷試験前のはり供試体のひび割れ状況

けの降伏強度、弾性係数の算定には公称断面積を用いた。

各供試体の主鉄筋（2-D16）の質量減少率において、AC-F-2 供試体は 6.9% と 8.5% であり、C-F-1 供試体は 4.7% と 5.4%，A-F-2 供試体は 5.5% と 5.4% となった。複合劣化を生じた AC-F-2 供試体は C-F-1 供試体や A-F-2 供試体と比較して、主鉄筋の質量減少率が大きくなつた。このことから、主鉄筋位置のひび割れ幅と（4.2 ひび割れ状況参照）、鉄筋の腐食量には相関が見られた。

また、フックを有する供試体はフックを有しない供試体と比較して、質量減少率が大きくなつた。これはフックを有する供試体において、フック部の鉄筋は側面と端面から腐食因子が侵入することにより、フック部以外の部分と比較して腐食が顕著であったためである。

#### 4.4 最大荷重と破壊状況

各供試体の最大荷重と耐力計算値を表-6 に示す。荷重一鉄筋の相対変位量関係を図-6 に、供試体の破壊状況を図-7 に示す。

表-6 から、全ての供試体は曲げ引張破壊に至つた。また、複合劣化を生じた AC-F-2, AC-2 供試体は他の供試体と比較して、最大荷重が低下した。前述 4.3 鉄筋の腐食量から、AC シリーズ供試体は鉄筋の質量減少率が大きく、鉄筋断面積の減少が荷重低下の主要因である。

図-6 には、2 本の主鉄筋の両端部における供試体に対する相対変位量の絶対値の平均値（4 箇所の平均）を示す。（図-1(d) 参照）載荷試験時におけるフックの無い供試体の端部からの鉄筋の相対変位量（すべり量）は N 供試体が最も大きく、他の供試体は相対変位量が小さかつた。また、前述 3.2 付着強度におけるタイプ-2 付着供試体の試験結果を踏まえると、材齢が鉄筋とコンクリートの付着強度の増加に寄与しており、今回の供試体では ASR や鋼材腐食による鉄筋とコンクリートの付着強度

表-5 腐食鉄筋の機械的特性

供試体	主鉄筋	質量 減少率 (%)	見かけの 降伏強度 $f_{sy}$ (N/mm <sup>2</sup> )	見かけの 弾性係数 $E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )
C-1	No.1	1.6	354.8	198.4
	No.2	2.4	326.9	182.8
C-F-1	No.1	4.7	350.1	195.8
	No.2	5.4	357.8	200.1
A-2	No.1	3.7	329.1	184.1
	No.2	2.8	365.2	204.3
A-F-2	No.1	5.5	332.9	186.2
	No.2	5.4	359.7	201.2
AC-2	No.1	3.6	318.8	178.3
	No.2	5.4	331.8	185.6
AC-F-2	No.1	6.9	318.8	178.3
	No.2	8.5	330.6	184.9

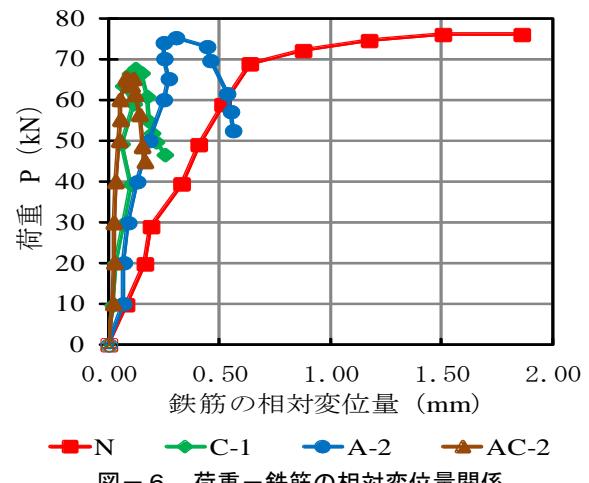


図-6 荷重一鉄筋の相対変位量関係

表-6 最大荷重と耐力計算値

シリーズ	供試体	劣化の種類	フックの有無	*1 養生期間	曲げ破壊荷重 $P_{ub}$ (kN)	せん断破壊荷重 $P_{us}$ (kN)	最大荷重 $P_u$ (kN)	破壊形式
N	N-F	健全	有り	28/365	62.7	86.7	75.2	曲げ引張
	N		無し	28/365	62.7	86.7	76.9	曲げ引張
C	C-F-1	鋼材腐食	有り	1	67.1	87.9	73.3	曲げ引張
	C-1		無し	1	62.5	87.9	67.8	曲げ引張
A	A-F-2	ASR	有り	2	60.9	86.2	74.7	曲げ引張
	A-2		無し	2	61.0	86.2	75.2	曲げ引張
AC	AC-F-2	ASR+	有り	2	63.3	91.4	67.4	曲げ引張
	AC-2		無し	2	63.5	91.4	65.2	曲げ引張

\*1 : N-F, N 供試体の養生期間は 4 週間

の低下はあまり顕著ではないと考えられる。また、厳密には非線形解析等により破壊荷重の評価を行うべきであるが、本論文では鉄筋に局所的な断面欠損が無く、付着強度の低下が顕著でないと仮定しコンクリートや腐食鉄筋の実材料強度を用いてファイバーモデルにより簡易的に曲げ破壊荷重を算定した。その結果、曲げ破壊荷重の計算値は最大荷重の実測値を安全側に評価した。

図-7から、N-F供試体はせん断ひび割れが支点から載荷点まで、せん断スパンの全域にわたってせん断ひび割れが発生し、最終的に曲げ圧縮部が圧壊し曲げ引張破壊に至った。一方、C-F-1供試体はせん断ひび割れが載荷点に近い位置に生じた。また、A-F-2、AC-F-2供試体はせん断ひび割れが確認されなかった。これはASRによる膨張が鉄筋に拘束されケミカルプレストレスが生じ、コンクリート負担せん断力が向上したためと考えられる。

とくに、複合劣化を生じたAC-F-2供試体は曲げひび割れが曲げスパンのみに発生し、ひび割れ分散性が低下した。これはAC-F-2供試体はA-F-2供試体と比較して、鉄筋の質量減少率が大きいことから、局所的に鉄筋が降伏しやすく、損傷が局所化したことや、曲げスパン内の曲げひび割れがASRのひび割れと繋がることにより、ひび割れが大きく開口したことが要因として考えられる。

#### 4.5 正規化した作用曲げモーメント-中央変位関係

コンクリート強度のばらつきが試験結果に与える影響を排除するために、載荷時の曲げモーメントを圧縮強度で補正し正規化を行った。正規化した作用曲げモーメント-中央変位関係の一例を図-8に示す。N-F供試体は最大曲げモーメント以降もじん性のある挙動を示した。一方、他の供試体はN-F供試体と比較して、最大曲げモーメント以降のじん性が低下する挙動を示した。これは主鉄筋の断面積の減少が主要因として考えられる。とくに、鉄筋の質量減少率が大きいAC-F-2供試体は曲げモーメントの最大値が小さく、じん性が低い挙動を示した。

#### 5. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 複合劣化を生じた場合には、腐食ひび割れの発生とASR膨張が共に生じることにより、鉄筋位置のひび割れ幅が増大する場合があると考えられる。
- (2) 付着強度試験の結果から、ASRにより劣化を生じたはり部材における鉄筋とコンクリートの付着特性を評価するためには、フープ筋の拘束によるケミカルプレストレスの影響を考慮する必要がある。
- (3) はり供試体の載荷試験の結果から、複合劣化を生じたはり供試体において、鉄筋の断面積の減少が作用曲げモーメントの最大値やじん性の低下の主要因であると考えられる。また、ASRによる膨張が鉄筋

に拘束されることによりケミカルプレストレスが生じ、その結果、コンクリート負担せん断力が向上し、せん断ひび割れが確認されなかった。さらに、鉄筋の質量減少率が大きい場合には、局所的に鉄筋が降伏しやすく、損傷が局所化する場合があると考えられる。

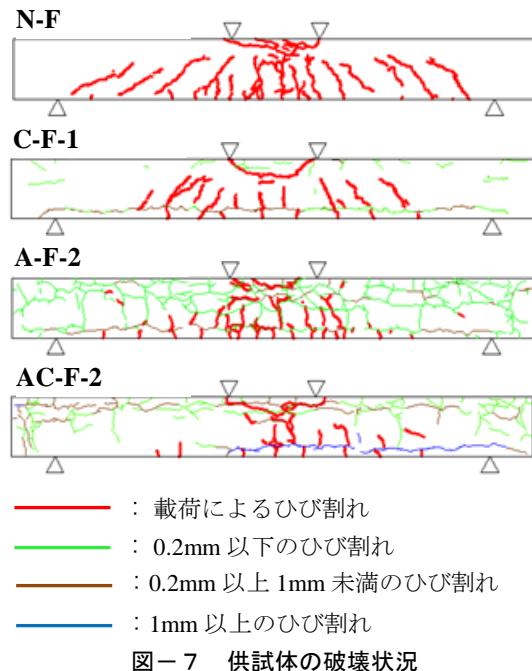


図-7 供試体の破壊状況

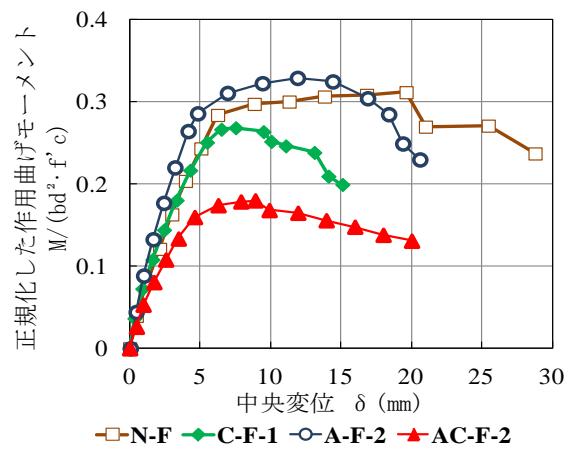


図-8 正規化した作用曲げモーメント-中央変位関係

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会, 2001.5
- 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を生じたPRCはりの曲げせん断耐荷特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.1, pp.1001-1006, 2010.6
- 3) 土木学会: 2010年制定コンクリート標準示方書規準編, 2010.11