Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

ASRが生じたRC部材のせん断耐荷性に関する実験的検討

松田, 豊樹
森川, 英典
王, 健

(Citation)
神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要,3:23-31

(Issue Date)
2011

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81003386

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要　第３号　23～31 頁　2011 年
doi:10.5047/gseku.j.2011.003

ASR が生じた RC 部材のせん断耐荷性に関する実験的検討

松田　豊樹[1*]・森川　英典[1]・王　健[1]

[1] 工学研究科市民工学専攻

（受付:March 30, 2011　受理:August 26, 2011　公開:September 15, 2011）

キーワード：　ASR、RC 部材、せん断、劣化状態、付着・割裂破壊

ASR は劣化外力が複合的に影響を及ぼすため、構造条件や使用材料、供用年数が同じであっても劣化の進行度合いは一様ではない。そのため、従来から ASR 劣化構造物の安全性評価を行うための様々な検討が行われているが、統一的な見解が得られていないのが現状であり、供試体毎の劣化状態を考慮した評価を行うことが重要であると考えられる。そこで本研究では、反応性骨材を用いて同条件で作製し、屋外曝露環境で ASR を促進させた供試体に非破壊検査を行い、供試体間・供試体内における劣化状態を評価した。さらに、載荷試験を行い、劣化状態を考慮した上で力学的性能を評価した。その結果、ASR によるせん断耐力の低下はみられなかった。しかし、最終的には望ましくない破壊形態である付着・割裂破壊で終局した。付着・割裂破壊は急激で脆性的な破壊形態であるだけでなく、解析手法や補強方法が確立していないことからも、維持管理をしていくという観点において望ましい破壊形態であるとはいえない。さらに、ASR が生じた供試体の中でも、引張鉄筋位置に ASR 先行ひび割れが生じた供試体では付着すべりが生じやすく、付着・割裂破壊で終局しやすいことがわかった。

緒　　言

アルカリシリカ反応（以下，ASR）劣化構造物の補修・補強を含めた早急な対策が求められているが，ASRは構造条件，使用材料や供用年数等が同じであっても，温度，湿度，日射等の劣化外力が複合的な影響を及ぼすため，劣化の進行度合いが一様でない。また，部材寸法の違いによっても劣化程度に差が生じる[1)]ため，いまだ十分な維持管理対策が確立されていない。ASR劣化構造物の安全性評価を行うために，従来からASRが生じたコンクリート部材について様々な検討が行われており，RCはり部材においては，ASR膨張が鋼材によって適切に拘束されている状態であれば部材の顕著な耐荷力の低下はみられないとされてきた。しかし，耐荷力が低下するケースも報告されており[2)]，さらに，ASR劣化によりコンクリート弾性係数に著しい低下がみられるものの，RCはりの部材剛性は低下しない事例が多く確認されている[2)]。しかし，剛性が低下するケースも確認されていることから，ASR供試体では，同曝露期間においても供試体内の骨材の分布状況等の違いによって，劣化状態，力学的性能，耐荷力，補強効果が異なることや，劣化程度，劣化状況の違いにより破壊形態が異なることが考えられる。そこで，ASRが生じたRC部材の維持管理を行う上では，こうした劣化状態が破壊形態に及ぼす影響を評価することが重要である。

そこで本研究では，反応性骨材を用いて同条件で作製した供試体を，引張鉄筋側が上面となるようにして屋外曝露を行い，より実構造物に即した条件下でASR劣化を促進させ，ASR劣化が構造部材に与える影響を把握するための実験的検討を行った。

Table 1 Specified mix proportion (A-series)

W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)							AD 減水剤 (kg/m^3)	NaOH (kg/m^3)
			W	C	S1	S2	S3	G1	G2		
63	20	48	183	290	279	120	411	495	493	2.90	8.45

※　S1:川砂, S2:海砂, S3:安山岩砕砂, G1:砕石, G2:安山岩砕石

1. 実験概要

本研究では三種の実験を行った。具体的な違いは，屋外曝露の方法，アルカリ添加剤の種類，曝露期間，補強方法である。順に「屋外曝露した構造部材のASR劣化状態と耐荷性能評価（以下，Aシリーズ）」，「実構造物に即した条件下で屋外曝露した場合のASR劣化状態と耐荷性能評価(以下，Bシリーズ)」，「実構造物に即した条件下で短期曝露した場合のASR劣化状態と耐荷性能評価(以下，Cシリーズ)」と題し，便宜上区別した。

1．1 Aシリーズ

Table 1に示方配合を示す。反応性・非反応性骨材の混合比率は，既往の同一骨材におけるペシマム試験結果[3)]を参考にして50%ずつとした。また，促進劣化させるためにアルカリ添加剤として劣化促進への影響が顕著とされているNaOHを用い，添加量は，等価Na_2O量で8kg/m^{3}となるように添加した。

供試体は，2005年8月に打設し，2週間の湿布養生の後，自然環境下で圧縮鉄筋側が曝露面となるように1年間，もしくは3年間暴露し，劣化の促進を行った。また，**Table 2**に供試体一覧を，**Fig. 1**にRCはり供試体の概略図を示す。断面は幅150mm，高さ240mm，有効高さ200mmの矩形断面を持つ，スパン1000mmのRCはりである。配筋は圧縮鉄筋にD13を2本，引張鉄筋にD16を3本，スターラップにはD6を用い150mm間隔で配置した。また，健全供試体ではせん断破壊する供試体でも，ASRが生じるとケ

Table 2 List of specimen (A-series)

供試体種類		曝露期間	補強	供試体名
せん断	健全	なし	無補強	A-FN
	ASR	1年	無補強	A-F1y-a
				A-F1y-b
				A-F1y-c
		3年	CFRP	A-F3y-a
				A-F3y-b

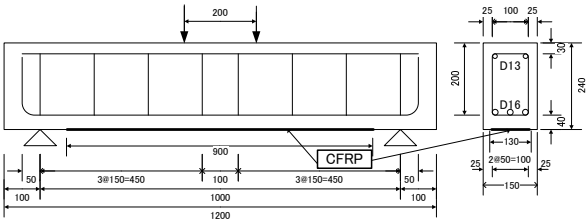


Fig. 1 Size of specimen

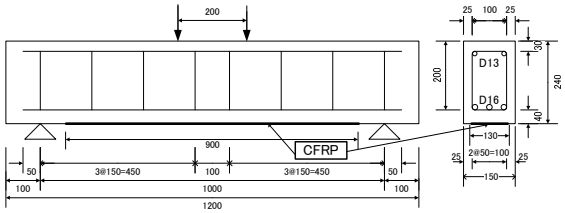


Fig. 2 Size of specimen
(B-series:Non Bend)

ミカルプレストレスの影響や先行ひび割れの影響によって，コンクリートが負担する耐力が増加し曲げ破壊が先行することが指摘されていることから，3年曝露時供試体においてはせん断スパン比を2.0とし，供試体下面には炭素繊維（以下，CFRP）シートによる曲げ補強を施して実験を行った。

1．2 Bシリーズ

Table 3に示方配合を示す．配合は基本的にAシリーズと同じであるが，AシリーズではNaOHの影響により若材齢時の強度に影響を与え，所定の初期強度が得られなかった。そこで本実験においては，自然環境下において多数存在し，供試体内に供給される可能性が高いNaClを用いてASRの促進劣化を行った。なお添加量は，等価Na_2O量で8kg/m^{3}である。供試体は，2008年7月の打設後2週間湿布養生し，屋外敷地にて曝露し，劣化の促進を行った。この時，より実環境に近い状態で劣化の促進を行うため， RCはり供試体は引張鉄筋側が上面となるようにして曝露を行った。**Table 4**に供試体一覧を示す。本実験では，近年ASRが原因で生じた鉄筋曲げ加工部の破断事例が報告されているが[4]，このような場合，脆性的な破壊，すなわち，せん断引張破壊が生じる可能性が考えられる[5]。そこで端部曲げ上げ定着の有無で簡易的に鉄筋破断状況を模擬し，ASRせん断供試体は端部定着あり，端部定着なし供試体を作製した。劣化供試体の曝露期間は1年設定し，打設の1年後2009年10月，夏季を過ぎた時期に載荷試験を行った。

Fig. 2にRCはり供試体の概略図を示す。形状はAシリーズと同じとし，引張鉄筋の端部曲げ上げ定着を確保した供試体と端部曲げ上げ定着なし供試体の配筋方法が異なる2種類の供試体を作製した。図には端部の定着を確保していない例を示している．また，ASRが生じるとコンクリートが負担する耐力が増加し曲げ破壊が先行することが指摘されていることから，健全供試体を含む全てのせん断供試体においてCFRP曲げ補強を施して実験を行った。

Table 3 Specified mix proportion (B-series)

W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)						AD 減水剤 (kg/m^3)	NaCl (kg/m^3)
			W	C	S1	S2	G1	G2		
63	20	48	181	287	422	432	466	475	5.74	12.40

※ S1:川砂，S2:安山岩砕砂，G1:砕石，G2:安山岩砕石

Table 4 List of specimen (B-series)

供試体種類			曝露期間	補強	供試体名
せん断	健全	定着あり	なし	CFRP	B−FN
	ASR	定着あり	1年	CFRP	B−F1y
		定着なし			B−NF1y

1．3 Cシリーズ

配合はBシリーズと同じであり，アルカリ添加剤はNaClを用いている。供試体形状はAシリーズと同様であるので省略する。供試体は，2010年6月の打設後2週間湿布養生し，曝露し，劣化の促進を行った。この時，Bシリーズ同様に，より実環境に近い状態で劣化の促進を行うため，RCはり供試体は引張鉄筋側が上面となるようにして曝露を行った。**Table 5**に供試体一覧を示す。なお，CシリーズにおいてはASRの影響のみに着目するためにCFRP曲げ補強は実施していない。また，曝露期間が進み劣化が進行すると，コンクリート内部のひずみゲージなどが損傷し，有効数が少なくなることから，Cシリーズにおいては曝露時期をASRが最も進行する夏季に集中し，劣化程度の不確定性によるばらつきが小さい時期に載荷を行い，有効データ数を十分に確保できる条件で実験を行った。劣化供試体の曝露期間は4ヶ月に設定し，2010年11月の夏季を過ぎた時期に載荷試験を行った。

Table 5 List of specimen (C-series)

供試体種類		曝露期間	補強	供試体名
せん断	健全	なし	無補強	C−FN
	ASR	4ヶ月		C−F4m

1．4 非破壊検査概要

本研究では，ASRがコンクリートの劣化状態を把握するためひび割れ調査を行った。供試体のひび割れ調査は，供試体の全面を対象とし，クラックスケールを用いてひび割れ幅を測定し，幅毎に分類しながらひび割れ長さをマジックインキでトレースすることで行った。ひび割れ長さの測定は，ひび割れ調査後に撮影した供試体の写真をパソコンに取り込み，そのデジタル画像から読み取った。ひび割れ幅の読み取り作業に用いたクラックスケール精度は0.05 mm間のものを用い，0.05-1.00mm間のひび割れでは0.05mmごと，1.00-2.00mm間のひび割れでは0.10mmごと，2.00-3.50mm間のひび割れでは0.50mmごとに読み取った。

1．5 CFRPシート施工方法

一部のせん断供試体におけるCFRPシート施工方法は，まず，シート接着界面をディスクサンダーにより研磨した後，プライマーを塗布した。プライマー塗布の後1日間養生し，塗布厚さ1mmとしてパテ施工を行った。パテ硬化後，CFRPシート(せん断用：幅×長さ=130×900mm)を接着樹脂により含浸・接着し，脱泡ローラーで脱泡した後，上塗りを施した。その上に離型シートをかぶせ，表面を均一に整え養生を行った。**Table 6**にシート施工に用いた接着樹脂の性質およびパテの性質を，**Table 7**にCFRPシートの性質および素材試験結果を示す。

Table 6 Characteristic of adhesive materials

対象	圧縮強さ (N/mm^2)	圧縮弾性率 (kN/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	引張弾性率 (kN/mm^2)
接着樹脂	92.8	3.20	50.9	3.65
パテ	71.9	5.18	－	－

Table 7 Characteristic of CFRP Sheet

繊維目付(g/mm^2)	600
設計厚さ(mm)	0.333
引張強度(N/mm^2)	4490
引張弾性率(kN/mm^2)	263

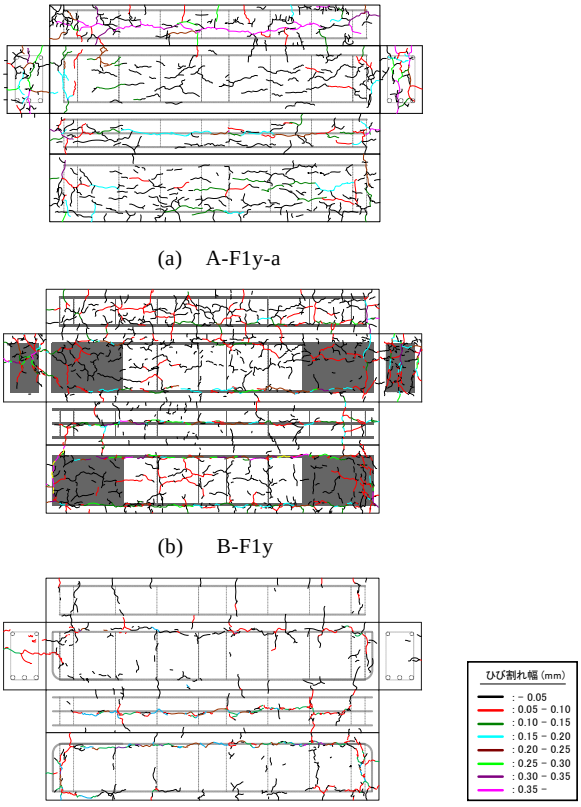
2. 非破壊試験結果

Fig. 4にA，BおよびCシリーズのひび割れ性状の比較を示す。これより，ASR膨張は鉄筋による拘束効果の小さい方向において進展する傾向にあるため，どちらの供試体においても軸方向に伸びるひび割れの発生がみられる。しかし， A-F1yにおいては，鉄筋のない位置において軸方向ひび割れが発生しているのに対し， B-F1yでは，鉄筋直上に顕著なひび割れが生じていることがわかる。このようなひび割れ状況に差異が生じた原因としては，Aシリーズではアルカリ添加剤として水和反応の遅延効果を有するNaOHを使用していたが，B，Cシリーズでは水和反応の促進効果を有するNaClを用いており，これらのアルカリ添加剤の違いがひび割れ性状に影響を及ぼした可能性がある。

そこで，引張鉄筋位置におけるひび割れ面積密度を算出し，AおよびB ，Cシリーズのひび割れ性状を比較した。**Table 8**にその結果を示す。これよりせん断供試体では，Bシリーズ1年供試体において引張鉄筋位置におけるひび割れ面積密度が大きく，Aシリーズ3年供試体と比較して，最大で2倍程度の差が生じていることがわかる。曝露1年のA-F1y供試体では全ての供試体において顕著な差がみられる。また，Cシリーズの曝露4ヶ月程度のひび割れとAシリーズ供試体と比較しても同程度のひび割れ面積密度であり，AおよびB ，Cシリーズの引張鉄筋位置のひび割れは定量的にみても違いがみられた。

Table 8 Crack area density of surface concrete at tensile rebars

供試体種類	曝露期間	供試体名	ひび割れ面積密度 (cm^2/cm^2)
Aシリーズ	1年	A-F1y-a	0.00128
		A-F1y-b	0.00171
		A-F1y-c	0.00083
	3年	A-F3y-a	0.00276
		A-F3y-b	0.00175
Bシリーズ	1年	B-F1y	0.00342
		B-NF1y	0.00212
Cシリーズ	4ヶ月	C-F4m	0.00160



(a)　A-F1y-a

(b)　B-F1y

(c)　C-F4m

Fig. 4 Crack condition due to ASR

3. 載荷試験結果

3. 1 Aシリーズ

3.1.1　載荷試験結果

載荷試験結果を**Table 9**に，劣化供試体の荷重－中央点変位関係を**Fig. 5**に示す。せん断破壊荷重においては，ストラットータイモデルによるせん断耐荷力の評価[6]も行った。評価に用いたモデルを**Fig. 6**に示す。供試体は左右対称のため半分のみの表示としている。ストラット部の破壊荷重相当値は各モデル値を供試体の実寸から算出し，ストラット部の面積を求めることで，コンクリートの圧縮強度から推定している。

まず，無補強供試体について比較を行う，健全供試体A-FNは斜め引張破壊，劣化供試体は全て曲げ破壊で終局した。最大荷重をみると，健全供試体A-FNは二羽式評価値[6]と同程度となっ

Table 9 Result of experiment (A-series)

供試体名		圧縮強度 (N/mm^2)	最大荷重 (kN)	示方書式 評価値(kN)	二羽式 評価値(kN)	ストラット部破壊 相当荷重(kN)	曲げ破壊荷重 計算値(kN)	40kN時剛性 (kN/mm)	破壊形式
無補強	A-FN	24.2	155.6	128.1	157.4	195.8	182.3	108.9	斜め引張破壊
	A-F1y-a	23.6	217.6	127.5	156.6	228.7	190.2	109.0	曲げ破壊
	A-F1y-b	23.6	223.1	137.0	167.8	239.8	193.6	131.6	
	A-F1y-c	23.6	222.6	133.4	163.6	219.6	187.8	112.7	
CFRP	A-F3y-a	25.3	253.0	129.0	158.8	244.5	326.1	192.5	付着割裂破壊
	A-F3y-b	25.3	212.5	129.0	158.8	245.1	326.6	156.9	

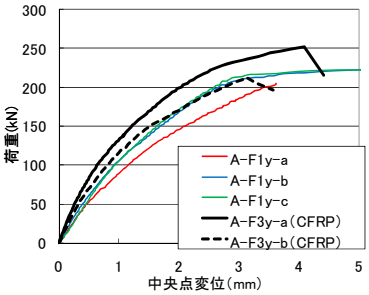


Fig. 5 Load-deflection (A-series: Deteriorated Specimen)

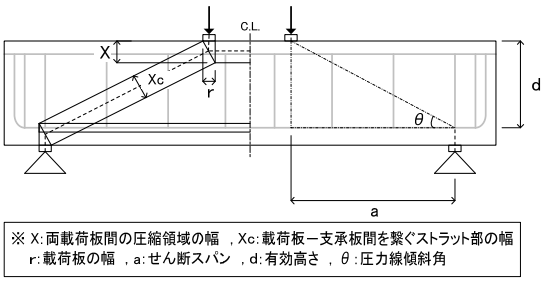


Fig. 6 Strut-tie model

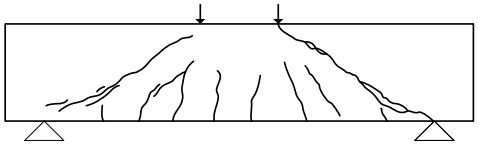
ていることがわかる。一方，劣化供試体A-F1yは曲げ破壊荷重計算値と同程度となっており，A-FNより4割以上の増加がみられる。また，ストラットータイによる破壊荷重が実験値と同程度あるいはそれ以上となっていることから，ASRの影響により通常の耐荷機構から変化したものと考えられる。これは，引張鉄筋の付着力が低下し載荷に伴い鉄筋がすべり，せん断耐荷機構が一部アーチ機構に移行し，せん断耐力自体は大きくなったと推測される。また，剛性についても劣化供試体では増加しており，劣化程度の大きいA-F1y-bでは40kN時の初期荷重段階から剛性の増加がみられた。これは，斜めひび割れが内側に卓越し曲げひび割れが全体的に内側に卓越したこと，それに伴うひび割れの分散性の低下による曲げひび割れの減少，ASR膨張によるケミカルプレストレスの導入により荷重初期段階では曲げひび割れが開口しにくかったことなど複数の要因が複合的に作用し，はり供試体では剛性は増加したものと考えられる。

次に，劣化供試体のみに着目する。劣化供試体のうちCFRPシートによる曲げ補強を実施していないA-F1yは全て曲げ破壊で終局したのに対し，シート補強供試体A-F3yは全ての供試体が定着部におけるコンクリートの付着・割裂破壊で終局した。いずれの供試体においてもストラット部におけるひび割れがみられ，特に劣化の進行していたA-F3y-aにおいてストラット部におけるせん断ひび割れの発達がみられた。しかし，徐々に引張鉄筋に沿ったひび割れが顕著となり，最終的には定着部の破壊に至った。A-F3y-aについては，実験値の最大荷重は高い値となっており，ストラットータイによるせん断破壊荷重と同程度となっていることがわかる。劣化程度が低いA-F3y-bではストラット部の破壊荷重より最大荷重は低いが，二羽式評価値よりもかなり大きくなっており，ASRの影響により耐荷機構が変化し，耐力自体は大きくなったと考えられる。また，**Table 8**に示したひび割れ面積密度を参照すると，劣化がより進行した供試体において耐力，剛性の力学的性能がより低下する結果はみられなかった。よってAシリーズにおいてはASRが進行しても力学的性能の低下はみられなかった。しかし，シート補強供試体A-F3yにおいては全て定着部の付着・割裂破壊で終局しており，これは非常に脆性的な破壊形式である。また，解析手法や補強方法が確立していないことからも，維持管理をしていくという観点においても望ましくない破壊形態であるといえる。

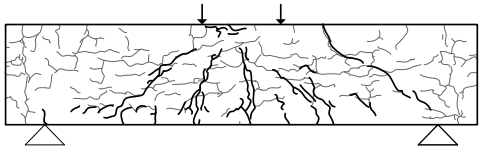
3.1.2　ひび割れ性状

載荷ひび割れ図の一例を**Fig. 7**に示す。支点－載荷点上に斜めひび割れが卓越したA-FNと比較すると，劣化供試体では斜めひび割れが曲げひび割れの影響を受けて，支点－載荷点上より内側に卓越していることがわかる。また，供試体中央近傍の曲げひび割れにおいては，ASRによる先行ひび割れが多くみられる供試体において，ひび割れ性状が複雑化していることがわかる。

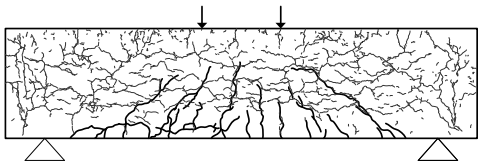
次に，シート補強供試体の載荷後ひび割れ性状をみると，A-F3y-a，A-F3y-bでは，曲げ補強によって無補強供試体に比べて斜めひび割れが卓越しているが，　A-FNと比べると内側にシフトしている傾向がみられる。また，割裂破壊により引張鉄筋沿いに軸方向ひび割れがみられる。



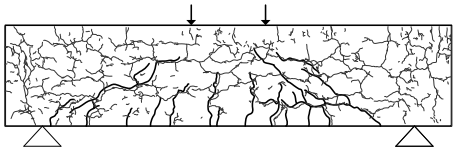
(a)　A-FN



(b)　A-F1y-a



(c)　A-F3y-a



(d)　A-F3y-b

―― ： ASR劣化による先行ひび割れ　―― ： 載荷によるひび割れ

Fig. 7 Crack condition (A-series)

3. 2 Bシリーズ

3.2.1　載荷試験結果

Table 10に載荷試験結果を示す。荷重－中央点変位関係を**Fig. 8** に示す。Bシリーズでは，健全を含む全ての供試体でCFRPシートによる曲げ補強を行っている。表より，健全供試体B-FNは

Table 10 Result of experiment (B-series)

供試体名※	圧縮強度 (N/mm^2)	最大荷重 (kN)	示方書式 評価値(kN)	二羽式 評価値(kN)	ストラット部破壊 相当荷重(kN)	割裂ひび割れ 兆候(kN)	60kN時剛性 (kN/mm)	破壊形式
B-FN	36.9	238.4	127.4	161.5	258.6	-	247.7	斜め引張破壊
B-F1y	32.7	259.5	124.8	157.6	253.1	167.0	182.6	付着・割裂破壊
B-NF1y	32.7	245.0	124.9	157.7	245.0	152.0	140.5	

※：全ての供試体においてCFRPシートによる曲げ補強を実施

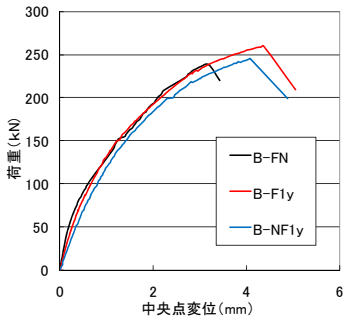


Fig. 8 Load-deflection (B-series)

斜め引張破壊で終局したのに対して，劣化供試体は引張鉄筋の曲げ上げによる端部定着の有無に関わらず，定着部におけるコンクリートの付着・割裂破壊で終局した。各供試体について最大荷重をみてみると，B-FNはストラットータイ破壊荷重より少し低い値であったが，B-F1yおよびB-NF1yもストラットータイ破壊荷重と同程度の値となっている。また，最大荷重自体もB-FNよりも最大荷重が増加している。これは，Aシリーズ同様に，付着すべりによって耐荷機構がトラス機構からアーチ機構へと移行したためであると考えられる。特に，BシリーズではAシリーズと異なり，引張鉄筋直上に顕著なひび割れがあり，鉄筋の付着すべりが生じやすい劣化性状であったと考えられる。また，60kN時の剛性は，B-F1yおよびB-NF1yともにB-FNよりも低い値となっている。この傾向はAシリーズでみられた傾向とは逆の傾向になっている。これは前述したように，Bシリーズでは引張鉄筋沿いに顕著なひび割れがみられ，このひび割れは載荷初期の段階から，荷重が増加するに伴い開口を始めた。はっきりとした開口が確認されたのは曲げひび割れが生じた後であるが，実際はもっと早期に目視できないレベルのひび割れ開口が始まっていたと考えられ，コンクリートのひび割れが開口することで初期剛性の段階から，剛性が顕著に低下したものと考えられる。また，端部定着の有無について比較すると，端部曲げ上げ定着ありのB-F1yよりも定着がないB-NF1yにおいて最大荷重および剛性が低くなっており，特に剛性については，初期荷重時から顕著に低下していることがわかる。

3.2.2　ひび割れ性状

Fig. 9にBシリーズ供試体の載荷ひび割れ図を示す。支点－載荷点上に斜めひび割れが卓越したB-FNと比較すると，劣化供試体では斜めひび割れが曲げひび割れの影響を受けて，支点－載荷点上より内側に卓越していることがわかる。また，CFRP補強の影響で曲げひび割れが分散し，ひび割れ経路はASR先行ひび割れに沿うようにして発達しており，供試体中央近傍の曲げひび割れにおいては，載荷ひび割れ性状が複雑化していることがわかる。さらに，引張鉄筋沿いに生じた顕著な先行ひび割れに

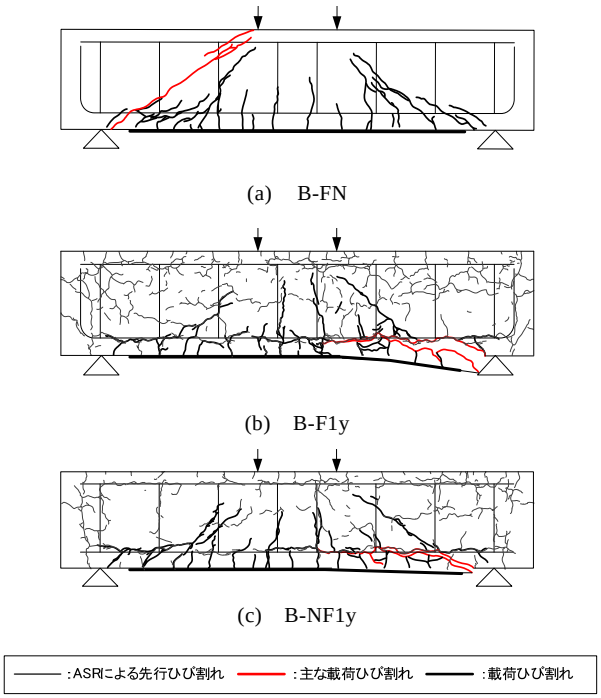
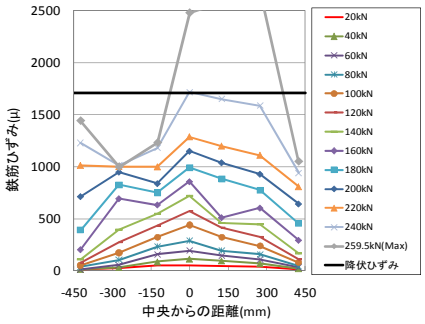


Fig. 9 Crack condition (B-series)

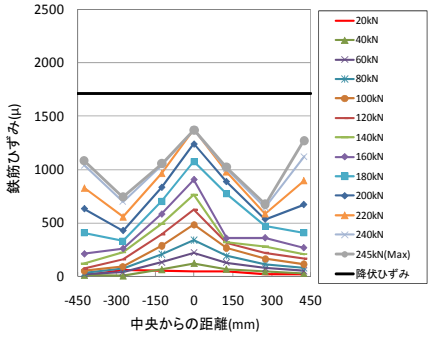
沿って軸方向ひび割れが進展しており，最終的にはこのひび割れが破壊性状に対して支配的なひび割れとなっている。この時，割裂ひび割れは，B-F1yは167kN前後，B-NF1yは152kN前後と早期に確認されており，最大荷重に到達するかなり前に望ましくない破壊形態への兆候がみられた。加えて，劣化程度はB-F1yにおいてより進行しており，引張鉄筋沿いのひび割れにも顕著な差がみられる（**Table 8**参照）。それにも関わらず，B-NF1yで先に割裂ひび割れが発生していることから，端部定着を確保していない供試体では数値以上に早く割裂破壊の兆候が生じると考えられる。

3.2.3　鉄筋ひずみ

Fig. 10に引張鉄筋ひずみ分布を示す。引張鉄筋は3本あり，中央の引張鉄筋にひずみゲージ貼付けを行った。図より，B-F1yは220kN前後から左側端部のひずみが増加して端部の付着が保持できなくなっているのに対し，B-NF1yにおいて180kN前後から両側端部の付着が確保されなくなり，ひずみが急増している。また，両者の最大荷重時における鉄筋ひずみ値を比較すると，端部曲げ上げ定着を確保したB-F1yのほうが高いひずみ値を計測している。つまり，端部曲げ上げ定着がないB-NF1yは，ASR劣化の影響受け，鉄筋端部で付着すべりが生じやすく，引張鉄筋が有効に機能していないものと考えられる。これらの結果か



(a)　B-F1y



(b)　B-NF1y

Fig. 10 Distribution of strain of main reinforcement bar

ら，Bシリーズにおける供試体には，ASR劣化に起因した付着すべりが生じており，その影響は端部曲げ上げ定着を確保していないB-NF1yにおいて顕著となっていて，引張鉄筋が有効に機能していないことがわかった。

3．3 Cシリーズ

3.3.1　載荷試験結果

Table 11に載荷試験結果を示す。荷重－中央点変位関係を**Fig. 11**に示す。Cシリーズでは全ての供試体においてCFRPシートによる曲げ補強を行っていない。

表より，健全供試体C-FNは斜め引張破壊で終局したのに対して，劣化供試体C-F4mは曲げ破壊で終局した。各供試体について最大荷重をみてみると，C-FNはストラットータイ破壊荷重と二羽式評価値の中間値であったのに対し，C-F4mもストラットータイ破壊荷重と二羽式評価値の中間値となっており，曲げ破壊計算荷重よりも大きな値となっている。また，最大荷重自体もC-FNよりも若干ではあるが増加している。これは，A，Bシリーズ同様に，ASR劣化によって付着がすべり，耐荷機構がトラス機構からアーチ機構へと移行したためであると考えられる。しかし，C-F4mは曝露後4ヶ月程度しか経過しておらず，劣化程

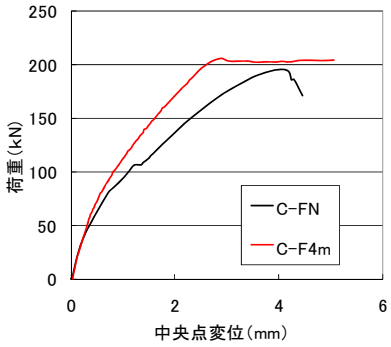


Fig. 11 Load-deflection (C-series)

度は低いので，A，Bシリーズと比較してその影響は小さいと推察される。また剛性についてみると，初期剛性の段階から増加していることがわかる。これはAシリーズ供試体と同様の傾向であり，ひび割れ鉄筋沿いに顕著なひび割れが生じたBシリーズとは逆の結果となった。Bシリーズと同様の劣化性状であるCシリーズで逆になった理由は，C-F4mにおいて引張鉄筋沿いのひび割れが片面にしか確認されておらず，加えて幅0.4mm以上の顕著なひび割れがほぼみられないほど劣化程度が低かったためだと考えられる。引張鉄筋の位置のひび割れ面積密度に着目してみても，C-F4mはAシリーズ供試体と同じ程度の数値であり，Bシリーズの1年曝露供試体とは倍程度の差がみられる（**Table 8**参照）。以上のことから，C-F4mでもBシリーズ同様に引張鉄筋沿いのひび割れが開口することで，剛性の低下が生じていたと考えられる。しかしその程度は低く，剛性の低下以上に，斜めひび割れが内側に卓越し曲げひび割れが全体的に内側に卓越すること，ひび割れの分散性の低下による曲げひび割れの減少，ASR膨張によるケミカルプレストレスの導入により荷重初期段階では曲げひび割れが開口しにくかったことなど複数の要因が複合的に作用し，Aシリーズ同様に剛性は増加したものと考えられる。

3.3.2　ひび割れ図

Fig. 12にCシリーズ供試体の載荷後ひび割れ性状を示す。C-F4mは側面の表と裏面で劣化性状が大きく異なり，それに伴い載荷ひび割れの伸展の仕方も異なった。そこで載荷ひび割れ図は表と裏の両面について示す。支点－載荷点上に斜めひび割れが卓越したC-FNと比較すると，A，Bシリーズ同様に，劣化供試体C-F4mでは斜めひび割れが支点－載荷点上より内側に卓越していることがわかる。また，ASRひび割れが引張鉄筋沿いに顕著に入っており，載荷に伴い先行ひび割れに沿った引張鉄筋沿いのせん断ひび割れと曲げひび割れが同時に卓越していき，終局時に曲げひび割れが大きく卓越し終局した。この傾向は引張鉄筋沿いのひび割れが入っていない表面ではみられず，曝露4ヶ月程度のASRでも，引張鉄筋沿いのひび割れは載荷状況に大

Table 11 Result of experiment (C-series)

供試体名	圧縮強度 (N/mm^2)	最大荷重 (kN)	示方書式 評価値(kN)	二羽式 評価値(kN)	ストラット部破壊 相当荷重(kN)	曲げ破壊荷重 計算値(kN)	60kN時剛性 (kN/mm)	破壊形式
C−FN	30.4	195.3	113.6	145.5	233.2	186.0	127.4	斜め引張破壊
C−F4m	32.2	207.8	114.3	146.7	243.0	185.1	166.8	曲げ破壊

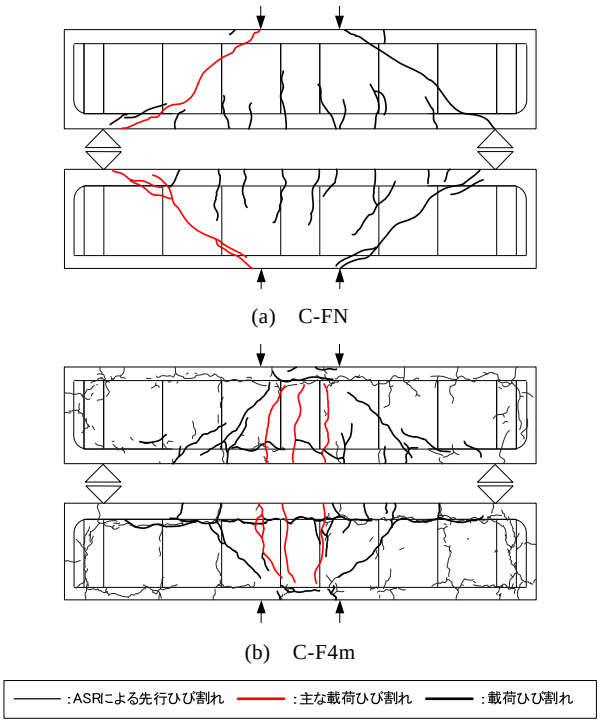


Fig. 12 Crack condition (C-series)

きく影響することがわかった。

3．4　劣化状態の違いによる耐荷性能の相違

ASRの劣化性状は劣化条件によって異なることが非破壊試験結果で明らかになり，その影響を受け各シリーズの耐荷性能には違いがみられた。**Table 12**に各シリーズの劣化および耐荷の特徴の一覧を示す。まず，各シリーズの耐荷特徴に変化を及ぼした要因であるが，供試体側面に生じたASRひび割れであると考えられる。これは，このひび割れに作用され，載荷ひび割れの伸展の経路が影響し，耐荷機構や付着が弱まる要因となったためである。劣化特徴はAシリーズが側面中央に顕著なひび割れが，B，Cシリーズが引張鉄筋沿いに顕著なひび割れがみられた。

耐荷の特徴についてみる。まず，最大荷重については全てのシリーズで増加している。これは，全ての供試体で付着すべりが生じており，せん断耐荷機構がトラス機構からアーチ機構に移行することで耐力が増加したものと考えられる。そして，せん断耐力が増加することで，A，Cシリーズの無補強供試体はせん断破壊型で設計された供試体にも関わらず曲げ破壊で終局した。しかし，Cシリーズでは引張鉄筋沿いのひび割れが生じており，載荷に伴うひび割れ開口で付着すべりが生じやすく，引張鉄筋の付着が確保できていない状況であった。加えてスターラップが降伏するほど，ストラット部に斜めひび割れが発展しており，純粋な曲げ破壊ではなく，曲げ破壊と鉄筋の付着がすべることによる付着・割裂破壊が複合した破壊形態であったと考察される。

次に，無補強では曲げ破壊が先行するため，Aシリーズの一部とBシリーズではシート補強を施して載荷を行ったところ，A，Bシリーズともに定着部の付着・割裂破壊で終局した。これは非常に脆性的な破壊形態であり，望ましい破壊形態とはいえない。特に引張鉄筋沿いのひび割れが生じたBシリーズでは，耐力自体はアーチ作用により増加しているが，早期に付着・割裂破壊の兆候がみられ，耐力以前に構造物としては危険な状態であったと考えられる。

また，剛性であるがA，Cシリーズでは増大，Bシリーズでは減少している。これはA，Cシリーズでは，斜めひび割れが内側に卓越し曲げひび割れが全体的に内側に卓越したこと，それに伴うひび割れの分散性の低下による曲げひび割れの減少，ASR膨張によるケミカルプレストレスの導入により荷重初期段階では曲げひび割れが開口しにくかったことなど複数の要因が複合的に作用し，初期剛性から増加したものと考えられる剛性も増大したと考えられる。しかし，Bシリーズでは引張鉄筋沿いに顕著なひび割れがみられ，このひび割れは載荷初期の段階から，荷重が増加するに伴い開口を始めた。A，Cシリーズ同様に載荷ひび割れの影響で剛性が増大していると考えられるが，それ以上にコンクリートのひび割れが開口することで剛性が顕著に低下し，全体的に剛性は低下したものと考えられる。Bシリーズと同様の劣化性状であるCシリーズで逆になった理由は，C-F4mにおいて引張鉄筋沿いのひび割れが片面にしか確認されておらず，Bシリーズ同様に引張鉄筋沿いのひび割れが開口することで，剛性の低下が生じていたと考えられるが，それ以上にASRによる載荷ひび割れの影響が顕著に現れ，Aシリーズ同様に剛性は増加したものと考えられる。

結　　言

本研究では、反応性骨材を用いて複数の供試体を作製、打設条件や曝露条件、曝露期間に着目し、それぞれ A、B、C シリ

Table12 Summary of results

供試体種類	劣化条件		劣化の特徴	耐荷特徴				
	暴露面	アルカリ添加剤		最大荷重	剛性	破壊形態		付着すべり
						無補強	シート補強	
Aシリーズ	上面（圧縮鉄筋側）	NaOH	**側面中央 上面** に顕著な ひび割れ	健全と比較し **増加**	健全と比較し **増加**	曲げ破壊	付着 割裂破壊	△
Bシリーズ	下面（引張鉄筋側）	NaCl	**引張鉄筋沿い 下面** に顕著な ひび割れ	健全と比較し **増加**	健全と比較し **低下**	-	付着 割裂破壊	◎
Cシリーズ	下面（引張鉄筋側）	NaCl	**引張鉄筋沿い** （C-F4mは片面のみ） ひび割れ 劣化程度：小	健全と比較し **増加**	健全と比較し **増加**	付着・割裂破壊 と曲げ破壊の複合	-	◎

ーズと 3 種のシリーズに区別し、それぞれの曝露条件や打設条件の違いが ASR 劣化性状に与える影響についても検討を行った。さらに、RC はり部材に載荷を行い、ASR 劣化性状を考慮した耐荷性を評価した。以下に得られた知見を示す。

(1) 曝露条件の違いに加えて、添加するアルカリ添加剤の種類によって ASR 劣化性状に影響を与えることがわかった。

(2) ASR 劣化が生じた RC せん断部材では、マイクロクラックに起因する引張鉄筋の付着すべりによって、せん断耐荷機構の一部がアーチ機構へ移行することがわかった。このアーチ作用による影響とケミカルプレストレスの影響によって、せん断耐荷力自体は大幅に増大することが明らかとなった。

(3) 曝露条件の異なるせん断部材，A，B，C シリーズ供試体を比較した結果，B，C シリーズ供試体は，引張鉄筋位置に生じた ASR 先行ひび割れの影響で A シリーズ供試体よりも付着すべりが生じやすく，付着・割裂破壊が生じやすいことがわかった.

(4) 引張鉄筋の端部曲げ上げ定着の有無について比較した結果，端部定着が確保されていないことによって，せん断耐力および部材剛性が低下することが明らかとなった.　また，端部定着が確保されていない供試体は，定着を確保した供試体よりも付着すべりが顕著に生じていることが明らかとなった。

(5) 引張鉄筋沿いのひび割れが顕著に生じた B シリーズ供試体では，引張鉄筋沿いのひび割れ開口によって剛性は低下した．一方，引張鉄筋沿いのひび割れが生じていない A シリーズ供試体，引張鉄筋沿いのひび割れが生じたが劣化程度が低い C シリーズ供試体では，載荷ひび割れとケミカルプレストレスによる曲げひび割れの抑制効果により初期剛性から剛性は増大した.

Literature Cited

1) Leslie. A. Clark, “Modeling the Structural Effects of Alkali-Aggregate Reactions on Reinforced Concrete”, ACI Materials Journal, pp.271-277, 1991.5-6.

2) Yamada, M., Sakamoto, K., “Transformation and Resisting Performance of RC beams with Alkali-Silica Reaction”, (in Japanese), Proceedings of the JCI, Vol.12, No.1, pp.835-840, 1990.6.

3) “Report About Maintenance of Pier of Alkali-Silica Reaction” , (in Japanese), Hanshin Expressway Public Corporation, 2003.

4) Japan Society of Civil Engineers, “Report By Committee about step of Alkali-Silica Reaction　－new step of deterioration of rod－”, (in Japanese), Concrete Library 124, 2005.8.

5) P. S. Chana, “Bond Strength of Reinforcement in Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction”, Transport and Road Research Laboratory, Contractor Report 141, 1989.

6) NIWA, J., “Base of concrete structure”, (in Japanese), SURIKOGAKUSYA, 2005.

Experimental Study on Shear Resisting Performance of RC Beams with Alkali-Silica Reaction

Toyoki Matsuda[1*] , Hidenori MORIKAWA[1] a, Jian WANG [1]

[1]*Graduate School of Engineering, Department of Civil Engineering*

Key words: ASR, RC Beams, Shear, Deterioration Condition, Undesired Failure Mode

The measures against maintenance of deteriorated concrete structures due to ASR have been keenly required. Therefore, various studies on the concrete members have carried out in order to evaluate the safety of deteriorated structures due to ASR. However, there is still no unified viewpoint about those since the characteristic feature of ASR deterioration has a lot of uncertainties. So, evaluation of deterioration condition of concrete members is important.

This thesis describes evaluation of deterioration condition of concrete members due to ASR and the influence to mechanical performance and shear resisting performance of RC beams. In this study, the plural specimens were manufactured using reactive aggregate in the concrete and exposed in the actual condition for three years. In addition, the deteriorated members were tested to evaluate different deterioration state within each member or among the members by non-destructive inspections and material tests. Furthermore, the loading tests of RC beams were performed to evaluate the shear resisting performance in consideration of deterioration condition. In this study, the degradation in the shear capacity did not occur by ASR. However, RC beam with ASR was finished in undesired failure mode. Furthermore, bond slip was easy to occur with RC beam that ASR precedence crazing occurred at the tensile reinforcing bars.