

論文 ASR によって劣化した RC はりおよび柱の力学挙動について

棚橋 和夫*¹・岩永 武士*²・小柳 洽*³・浅野 幸夫*⁴

要旨： ASRによる著しい損傷を生じたRCはりおよび柱の小型モデルについて載荷試験を行い、ASRを生じたRCはりの長期材令での力学挙動およびASRを生じたRC柱の軸圧縮下での力学挙動について検討した。鉄筋によるASRの膨張を拘束する作用により生じるケミカルプレストレス効果は、材令5年のRCはりにおいても材令2年と同等の状態を持続している。無筋の場合にASRにより著しく膨張して多くのひびわれが発生し著しく強度低下したコンクリートであっても、柱部材では、軸方向筋により膨張が拘束されることもあり最大耐力の大きな低下は見えられなかった。

キーワード： A S R、R C はり、R C 柱、膨張拘束、耐力

1. はじめに

ASR損傷を生じたRC部材の力学特性については、損傷した構造物の安全性評価の必要上従来から種々の検討がなされている。はり部材においては、鉄筋によるASRの膨張を拘束する作用により生じるケミカルプレストレス効果により、部材の剛性や耐力がかえって増大することも報告されている[1]。しかし、この効果の長期材令における持続性については明確にされていない。また、阪神大震災では、橋脚などの柱部材が損傷、崩壊したが、ASRによるひびわれが被害を大きくしたのではないかとの論議もある。そこで、ASRによる著しいひびわれ損傷を生じたRCはりおよびRC柱の小型モデルについて載荷試験を行い、ASRを生じたRCはりの長期材令での力学挙動およびASRを生じたRC柱の軸圧縮下での力学挙動について検討した。

2. 著しいASR損傷を生じたRCはりの長期挙動

2.1 実験概要

筆者らは2種類の鉄筋比の単鉄筋はりで、ASR損傷のある場合と損傷のない場合の材令2年での載荷試験結果について報告している[2]。本報ではさらに材令5年での載荷実験を行い、その力学挙動を材令2年と対比検討を行うこととした。

(1) 供試体および養生

供試体および配合については、前報[2]と同様である。ASR損傷した場合をABシリーズ、ASR損傷していない場合をNBシリーズとした。供試体寸法は10×18×170cmであり、鉄筋比の違いにより、それぞれをS(2D10;p=0.92%)およびL(2D13;p=1.66%)はりとし、材令2年の供試体はNBS, NBL, 2ABS, 2ABL、材令5年の供試体は5ABS, 5ABLと標記する。

供試体は、ASR促進のため材令28日以降温度40℃で4ヶ月散水養生を行った後、恒温室内（温度

* 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

* 2 岐阜大学 工学部土木工学科（正会員）

* 3 岐阜大学教授 工学部土木工学科（正会員）

* 4 岐阜県生コンクリート工業組合技術センター

20～25℃、湿度50～80%)に放置されたものである。なお、材令2年より材令5年に至る間の水分の補給は僅かであった。この間の膨張量の計測は行っていないが、ひびわれパターンに変化はなく、新しいひびわれの発生は認められなかった。

(2) 荷重および計測方法

材令2年では、ABS、ABLは各2本、NBS、NBLは各1本の試験を行ったが、材令5年ではABS、ABLは各2本の曲げ荷重試験を行った。試験はスパン125cm(50+25+50)の単純支持で対称荷重とし、荷重-荷重点変位ならびにモーメントスパン内のはりの回転角を計測した。回転角を計測するには、はり側面の上下縁から3cmの位置にストローク10mm、精度1/1000mmの高感度変位計を検長200mmで設置した。また、はり試験と同時に、供試体作成時に別途に作成された標準供試体によって静、動弾性係数および各種強度を求めた。

2.2 はり試験結果

ASRを生じた材令5年のS、Lはりともに材令2年のものと同様に曲げ破壊を生じた。なお、前報[2]に述べたように、材令2年のみの試験である鉄筋比の大きなNBLはりにはせん断破壊を生じている。材令5年のはりの荷重-変位関係を材令2年のものととも初期部分を図-1に、全体を図-2に示す。また、各材令の荷重-変位曲線より求めたひびわれ、降伏および終局モーメント(最大荷重時のモーメント)および荷重-中立軸比関係から求めた降伏時の中立軸比(中立軸高さ/有効高さ)を表-1に示す。図-1、2において材令5年でのABシリーズの荷重-変位関係は、S、Lはりともに材令2年と良く一致しており、材令による変化は見られなかった。ひびわれ発生後の荷重-変位曲線の傾きは、ABシリーズの方が、NBシリーズより小さくなるが、ABシリーズのひびわれ発生荷重が高い為、鉄筋降伏にいたる迄、同一荷重における変位そのものはABシリーズの方が小さい。ABシリーズのひびわれ、降伏および終局荷重において、材令による違いは見られなかった。

SおよびLはりの各材令での荷重-中立軸比関係を図-3および4に示す。材令5年におけるABシリーズのS、Lはりにおいては、降伏時の中立軸比は材令2年にほぼ等しい。また、材令5年におけるABシリーズの降伏時の中立軸比は材令2年と同様にNBシリーズと比較すると非常に大きかった。

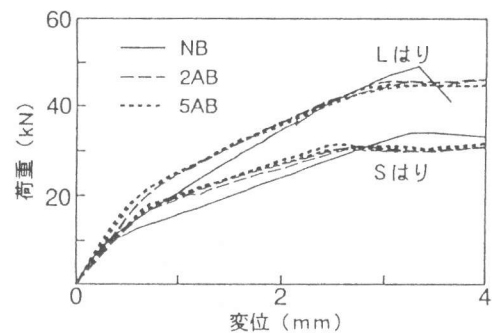


図-1 荷重-変位関係(初期)

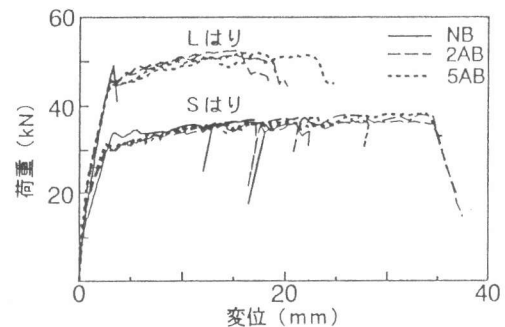


図-2 荷重-変位関係(全体)

表-1 はりのひびわれ、降伏および終局曲げモーメント

モーメント		NBS	2ABS	5ABS	5ABS/2ABS	NBL	2ABL	5ABL	5ABL/2ABL
ひびわれ	M _c	2.14	3.61	3.22	0.89	2.29	4.78	4.91	1.03
	M _{c t}	3.40	1.72	1.94	1.13	3.40	1.72	1.94	1.13
	M _c /M _{c t}	0.63	2.10	1.66	—	0.70	2.79	2.53	—
降伏	M _y	8.33	7.55	7.67	1.01	12.1	11.3	11.0	0.98
	M _{y t}	7.51	7.38	7.45	1.01	12.4	12.3	12.4	1.01
	M _y /M _{y t}	1.11	1.02	1.03	—	0.97	0.92	0.89	—
終局	M _u	8.95	9.14	9.22	1.01	12.1	12.7	12.7	1.00
	M _{u t}	7.98	7.98	8.40	1.05	13.8	13.1	13.2	1.01
	M _u /M _{u t}	1.12	1.15	1.10	—	0.87	0.97	0.96	—
降伏中立軸比		0.29	0.52	0.42	0.79	0.35	0.56	0.55	0.98
破壊形式		曲げ	曲げ	曲げ	—	せん断	曲げ	曲げ	—

(単位: kN・m)

各材令のABシリーズおよびNBシリーズのコンクリートの諸強度および静弾性係数を表-2に示す。材令5年のABシリーズの圧縮強度は、材令2年のNおよびABシリーズどほぼ同じである。ABシリーズの曲げ、引張強度および静弾性係数は、材令5年の方が多少増加している。これは僅かではあるがこの間の水分の補給の影響が考えられる。

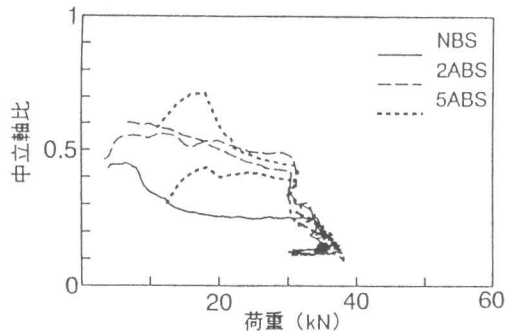


図-3 荷重-中点軸関係 (Sはり)

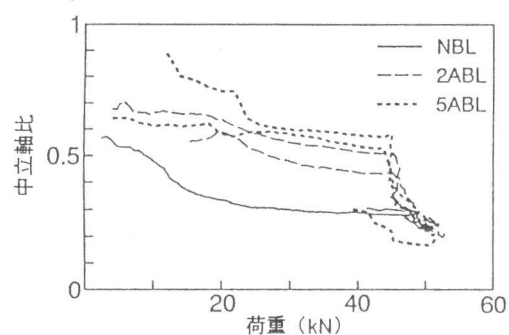


図-4 荷重-中点軸関係 (Lはり)

2.3 考察

はりの曲げひびわれ発生、降伏曲げおよび終局曲げモーメントの算定値(M_{ct} , M_{yt} , M_{ut})と、実測値(M_c , M_y , M_u)との比較を表-1に同時に示す。なお、 M_{ct} は、はりの下縁応力がコンクリートの曲げ強度に達した時ひびわれが発生するとして

表-2 コンクリートの諸性質

材令	シリーズ	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
2年	N	40.6	6.29	3.01	24.9
	A	40.3	3.18	2.70	17.8
5年	A	41.3	3.60	3.37	2.09

求めた。 M_{yt} は、コンクリートの応力分布を線形弾性とし、コンクリートの実測のヤング係数の比を用いて求めた。 M_{ut} は、コンクリートの応力ブロックを長方形とし、鉄筋の降伏強度から求めた。材令5年のABシリーズの M_{ct} は材令2年とほぼ同じであり、S, Lはりの M_c はいずれも M_{ct} の2~3倍であった。これは、ASRによりコンクリートの曲げ強度が低下し、 M_{ct} が小さくなったのに対し、RCはりでは、ASRによる膨張を鉄筋が拘束する作用によりケミカルプレストレスが生じ M_c が増大したためと考えられる。ABシリーズの M_y はNBシリーズに比べやや小さい。これは、ASRにより著しく膨張したRCはりは、鉄筋による膨張を拘束する作用によりケミカルプレストレスを生じ、RCからPCの特性に変化するため M_y が小さくなったと考えられる[3]。材令5年のABシリーズの M_{ut} および M_u は材令2年とほぼ同じで材令による違いはみられず、共にSはりでは M_{ut} が M_u より小さく、Lはりでは大きい。また、ABシリーズおよびNBシリーズの M_u および M_{ut} に違いは見られなかった。

これらの結果から、ASRにより膨張を生じたRCはりの材令5年の耐力や初期の剛性は材令2年のものと同等であり、鉄筋による膨張を拘束する作用により生じるケミカルプレストレス効果は、材令5年のはり供試体においても材令2年と同様の状態で持続していると考えられる。

3. 著しいASR損傷を生じたRC柱の力学挙動

3.1 実験概要

ASRによるひびわれ損傷を受けたRC柱の小型モデル(ACシリーズ)で帯鉄筋量を4種類、軸方向鉄筋量を2種類に変化させた場合と、無筋の供試体の軸圧縮力下における変形特性や終局耐力に関して、ひびわれ損傷を受けていないRC柱(NCシリーズ)と対比検討を行う。

(1) 使用材料

反応性骨材は、従来の研究により著しい膨張を生じる結果が得られている高原川産の川砂、砂

利及び角閃安山岩を混合したものであり[4]、粗・細骨材中の反応性骨材量を20%として用いた。非反応性骨材は根尾川産の川砂と揖斐川産の砂利を混合して用いた。セメントは普通ポルトランドセメント($R_2O=0.65\%$)である。鉄筋は、軸方向鉄筋にD6(f_y および f_u :44.7および58.5kgf/mm²)、帯鉄筋にD3(f_y および f_u :35.2および52.4kgf/mm²)の異形鉄筋を用いた。添加アルカリは、コンクリートの物性が大きく変化せず、かつ大きなひびわれを発生するもの[4]として Na_2SO_3 を添加し、全アルカリ量をセメント量の3.0%とした。

(2) 供試体種別

供試体寸法は、10×10×40cmとした。軸鉄筋比と帯鉄筋間隔の組み合わせによる供試体の種類を表-3に、また配筋図を図-5示す。軸筋は4本および8本の2種類とし、帯筋は供試体中央約30cmの区間をそれぞれ10, 7, 5, 5, 4cm間隔の4種類とし、その上下約5cmは載荷試験時に破壊が供試体中央で起こるように端部の補強として2.5cm間隔で配置した。また、かぶりはすべて8mmとした。さらに自由膨張の場合の膨張を測定するために、無筋の供試体を作製した。供試体は1種類につき3本作成した。また、圧縮強度試験用にφ10×20cmの円柱供試体を作製した。

表-3 柱供試体の種類

配合	軸方向鉄筋			帯鉄筋		供試体名
	径 (mm)	本数	鉄筋比 (%)	径 (mm)	間隔 (cm)	
AC	D6	0	0	D3	—	AC1
		4	1.27		10	AC2
					7	AC3
					5.5	AC4
					4.0	AC5
		8	2.53		5.5	AC6
NC	D6	0	0	D3	—	NC1
		4	1.27		10	NC2
					7	NC3
					5.5	NC4
					4.0	NC5
		8	2.53		5.5	NC6

(3) 配合および養生

ACおよびNCシリーズの配合は、 $W=50\%$ 、 $s/a=45\%$ で一定とした。

供試体は材令1日で脱型し、その後温度20℃の恒温室で1週間気中養生を行った。そして、ASRを促進させるため下部に水をはったポリケース(約35×25×50cm)に供試体を入れ、ポリケースごと温度40℃、湿度90%以上の恒温室で養生した。ポリケース内はほぼ湿度が100%であった。円柱供試体についても同様の養生を行った。

(4) 載荷試験およびその他の測定

柱供試体側面に250mm間隔で埋め込んだ真鍮製プラグ間をホイットモア型ひずみ計で2週間ごとに測定することより膨張ひずみの経時変化を求めた。その後、材令5ヶ月で一軸載荷試験を行った。また、供試体中央の側面の変形を測定するためストローク10mm、精度1/1000mmの高感度変位計を校長200mmとして設置した。

また、4側面の中央にひずみゲージを貼りつけ、偏心が少なくなるように載荷を行った。同時に円柱供試体により圧縮強度、静弾性係数を求めた。

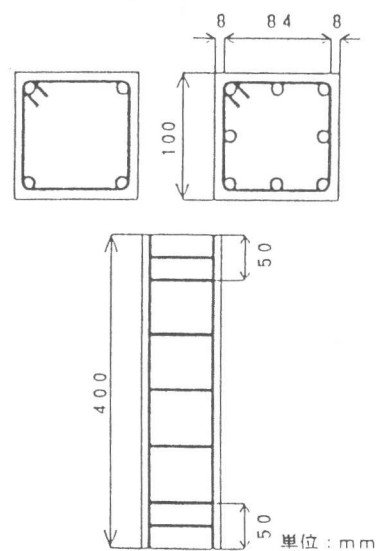


図-5 柱の配筋図

3.2 実験結果

(1) 膨張ひずみ、圧縮強度および静弾性係数測定結果

図-6にACシリーズの柱供試体の軸方向膨張ひずみの経時変化を示す。無筋の供試体においては、材令150日で約5500μの膨張が生じているが、軸筋4本の供試体においては、帯筋間隔によらず約1500μで、さらに軸筋8本の供試体においては、800μであった。軸方向筋量による膨張の拘束効果の違いは従来からの報告[5]と同様の傾向にある。

AC、NCシリーズの圧縮強度、静弾性係数を表-4に示す。ACシリーズの供試体の圧縮強度は、NCシリーズ供試体の70%まで低下し、静弾性係数においては約30%の低下がみられた。

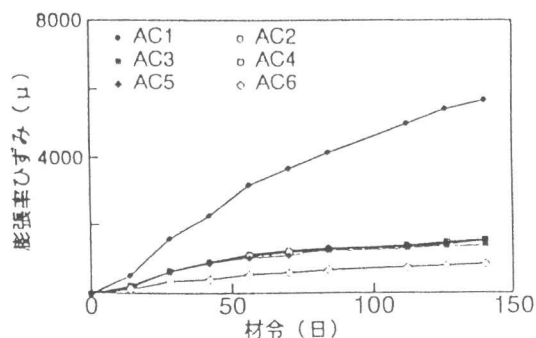


図-6 膨張ひずみの経時変化

表-4 コンクリートの諸性質

シリーズ	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
A	26.5	9.90
N	36.6	28.5
A/N	0.72	0.34

2.3.2 柱の載荷試験結果

柱供試体の最大荷重(N'_o)の試験結果の3本の平均をまとめて表-5に示す。また、荷重-変位曲線の代表例を図-7に示す。ここで、柱供試体の荷重-変位曲線の比較のため両者を最大荷重およびその時の変位で基準化してそれぞれを荷重比-変位比関係として図-8および9に示す。供試体に破壊が起ってから供試体中央の変形を正確に測定することが困難であった。なお、試験時において最大荷重以降の荷重の低下は、帯鉄筋間隔が大きい場合は急激に低下し、間隔が5.5cm以下の場合は緩やかに低下していく傾向が見られた。

表-5 柱の最大荷重

供試体名	N'_o (kN)	N'_{o1} (kN)	$\frac{N'_o}{N'_{o1}}$	$\frac{N'_o}{N'_{o(CI)}}$
AC1	241	—	—	1.00
AC2	358	277	1.29	1.48
AC3	357		1.28	1.48
AC4	367		1.32	1.52
AC5	374		1.35	1.55
AC6	417	330	1.26	1.73
NC1	416	—	—	1.00
NC2	459	363	1.27	1.10
NC3	441		1.22	1.06
NC4	429		1.19	1.03
NC5	434		1.20	1.04
NC6	444	414	1.07	1.07

2.4 考察

柱の最大荷重(N'_o)の算定値(N'_{o1})を表-5に同時に示す。なお、コンクリート強度はそれぞれの円柱供試体から求めた圧縮強度を用い通常の帯鉄筋柱に用いられる加算式で算定した。両シリーズの最大荷重は、軸方向筋を入れることにより増加する傾向がみられたが、本研究で用いた程度の帯鉄筋間隔ではその影響はほとんどみられなかった。無筋であるAC1の最大荷重の実測値は、NC1の実測値に対し40%程度低下しているが、鉄筋比の増加につれて両者の差は少なくなり軸方向鉄筋比が大きい場合は両者の差は6%程度であった。また、図-7の荷重-変位曲線において、NCシリーズの無筋の場合と軸方向筋を入れた場合には大きな違いはないが、ACシリーズにおいては無筋の場合に比べ鉄筋比が増加すると初期の剛性ならびに耐力が増加する様子が良く判る。無筋の場合に比べてNCシリーズでは軸方向鉄筋比が増加

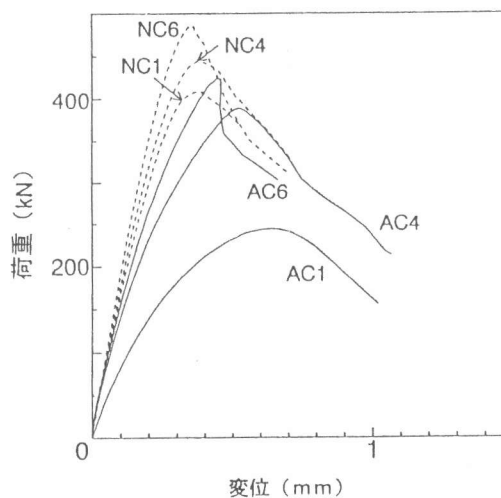


図-7 荷重-変位関係の代表例

しても最大荷重はそれほど増加しないが、ACシリーズの軸筋4本の場合は最大荷重は約50%増加し、軸筋8本の場合は70%程度増加している。荷重-変位曲線を基準化した図-8、9においてNCシリーズの荷重比-変位比関係は直線的でばらつきも少ないが、ACシリーズにおいては曲線的で広がりも大きい。このことは、ACとNCシリーズの相違を良く表している。また、竹村ら[6]の試験結果によると同一強度の場合は、ASRを生じた柱の終局耐力はASRを生じていない柱より10~25%高くなるという報告があるが、ASRを生じた柱の耐力は強度の低下した無筋コンクリート柱の強度から推定されるものよりはるかに大であることが明かとなった。これらより無筋の場合にASRにより著しく膨張して多くのひびわれが発生し強度が著しく低下したコンクリートであっても、軸方向筋により膨張が大きく拘束されひびわれ発生が少なくなり最大耐力は大きくは低下しないことが判明した。

3. まとめ

ASRによる著しい損傷を生じたRCはりおよび柱の小型モデルについて載荷試験を行い、ASRを生じたRCはりの長期材令での力学挙動およびASRを生じたRC柱の軸圧縮下での力学挙動について検討し、以下の結論を得た。

(1) 鉄筋によるASRの膨張を拘束する作用により生じるケミカルプレストレス効果は、材令5年のはりにおいても材令2年と同等の状態で持続している。

(2) 無筋の場合にASRにより著しく膨張して多くのひびわれが発生し、著しく強度低下したコンクリートであっても、柱部材では、軸方向筋により膨張が拘束され、ひびわれ発生も少なく、最大耐力の大きな低下は生じなかった。

【参考文献】

- [1] 例えば、小柳 治・六郷恵哲・石田裕哉：アルカリ骨材反応によるひびわれとRC部材の性状、セメント技術年報、39巻、pp352-355、1985
- [2] 小柳 治ほか：著しいAAR損傷を生じたRCはりの挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol15、No. 1、pp947-952、1993
- [3] 高井重信ほか：AAR損傷による鉄筋初期応力を有するRCはりの挙動、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp551-552、1995
- [4] 松井祐一ほか：アルカリ種別とアルカリ量による反応性骨材を用いたモルタルの特性について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 1、pp1079-1084、1994
- [5] 矢村ほか：コンクリート工学年次論文集Vol. 11、No. 1、pp135-140、1989
- [6] 竹村和夫・米倉亜州夫・谷村充：アルカリ骨材反応を生じた帯鉄筋柱の一軸圧縮特性、第44回セメント技術大会論文集、pp684-689、1990

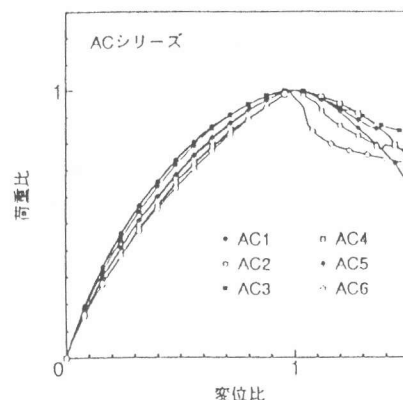


図-8 荷重比-変位比関係(AC)

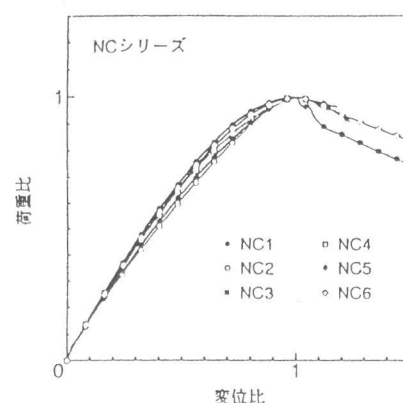


図-9 荷重比-変位比関係(NC)