

論文 ASR によるせん断補強筋の破断が RC はり部材のせん断耐荷特性に及ぼす影響

高橋 勇希^{*1}・澤井 健二^{*2}・三方 康弘^{*3}・井上 晋^{*4}

要旨：近年，ASR 損傷コンクリート構造物中の鉄筋の曲げ加工部および圧接継手部の破断事例が複数報告されている。このような構造物に関しては，設計時における前提条件が必ずしも担保されない可能性があり，ASR の進行の程度や鉄筋破断が構造物の耐荷特性に与える影響を把握しておく必要がある。そこで，本研究では ASR 損傷によりせん断補強筋に破断を生じた RC はり部材のせん断耐荷性状を明確にすることを主目的とし，反応性骨材を使用したコンクリートを用い，その付着強度ならびに ASR 劣化を生じた RC はり部材のせん断耐荷性状を普通コンクリートを用いた供試体と比較・検討した。

キーワード：ASR，鉄筋破断，付着強度，せん断耐荷特性

1. はじめに

従来，ASR 損傷については鉄筋の健全性が確保できていれば，ASR による劣化が多少進行していてもケミカルプレストレスの効果などもあり，構造安全性が著しく低下するような危険な状態には至らないとの認識があった。しかし，近年 ASR 損傷によりコンクリート中の鉄筋の曲げ加工部や圧接継手箇所が破断している事例が複数報告されており，損傷の程度によっては設計時における前提条件が必ずしも担保されなくなる可能性があることが明らかとなった。このような構造物に対する安全性の評価方法は未だ確立されておらず，特に ASR 劣化を生じたコンクリート構造物中の破断鉄筋の有効性および付着・定着状態が耐荷力に及ぼす影響を明確にしておく必要がある。そこで，本研究では ASR 損傷によりせん断補強筋に破断を生じた RC はりのせん断耐荷性状を明らかにすることを目的とし，ASR 劣化を生じた RC はり供試体および付着強度試験体の載荷試験を実施し，普通コンクリートを用いた供試体とその性状を比較・検討した。

2. 付着強度試験

2.1 試験概要

付着強度試験は，土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着強度試験方法 (JSCE-503)」¹⁾ に準じて行った。図-1 に示すような 100×100×100mm のコンクリート角柱の中心に全長 1m の鉄筋を埋め込んだ供試体を対象とし，コンクリートには温度 40℃，湿度 100% の促進環境下で 12 ヶ月保管した ASR コンクリート (100×100×400mm の曲げ供試体の自由膨張量で約 4900 μ)，材齢 19 日の普通コンクリートの 2 種類を用いた。また，鉄筋には D6，D10，D13 および D16 の 4 種類を用い，各組合せで 6 体ずつ計 48 体作製した。なお，付着長は鉄筋径によらず径の 4 倍としている。使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。本実験で使用した反

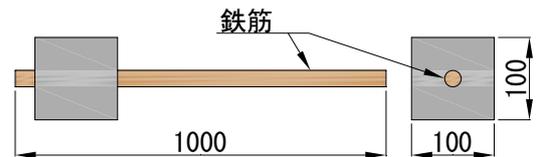


図-1 付着強度試験体 単位：mm

表-1 コンクリート示方配合
普通コンクリート

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
					水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		NaCl	AE減水剤 (cc)
							非反応性 S _n	反応性 S _r	非反応性 G _n	反応性 G _r		
25	8	70	4	46.4	165	236	882	0	1020	0	0	590

ASR コンクリート

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
					水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		NaCl	AE減水剤 (cc)
							非反応性 S _n	反応性 S _r	非反応性 G _n	反応性 G _r		
25	8	63	4	45.8	183	290	394	411	507	492	13.1	726

*1 大阪工業大学大学院 博士前期課程都市デザイン工学専攻 (正会員)

*2 大阪工業大学大学院 博士前期課程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講師 博(工) (正会員)

*4 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)

応性骨材は安山岩系の岩種であり、そのアルカリシリカ反応性試験（化学法 JIS A 1145:2001）結果を表-2に示す。また、コンクリートの諸強度を表-3に、鉄筋の機械的性質を表-4に示す。

2.2 試験結果と考察

(1) 破壊形式

付着強度試験結果を表-5に示す。今回の試験での破壊形式は、自由端変位が増大しながら最大荷重から荷重が徐々に低下する拔出し破壊、最大荷重到達直後にコンクリートが割裂する破壊の2種類となった。普通コンクリート供試体と ASR コンクリート供試体の同鉄筋径での破壊形式を比較すると、両者とも D10 および D13 で2種類の破壊形式が混在している。D10 の場合、割裂で破壊した供試体の数は普通コンクリートが上回り、D13 の場合、ASR コンクリートが普通コンクリートを上回る結果となった。同一破壊形式間で最大付着応力度を比較すると、普通コンクリートの場合、割裂で破壊した供試体の値が拔出しで破壊した供試体の値より高くなっている。一方、ASR コンクリート供試体の場合、割裂で破壊した供試体の値が拔出し破壊した供試体の値より低くなっている。従って、普通コンクリートで割裂破壊した供試体は、締固めが良好であったために拔出しに対する抵抗力が高くなった結果割裂破壊したと考えられ、ASR コンクリートで割裂破壊した供試体は既存のひび割れにより割裂破壊に対する抵抗力が減少したため割裂破壊に至ったと考えられる。このことから、ASR コンクリート供試体の場合、割裂に対する感受性が高くなっていると言える。

(2) 最大付着応力度

各供試体の平均最大付着応力度のグラフを図-2に示す。普通コンクリート供試体と ASR コンクリート供試体の最大付着応力度を比較すると、鉄筋径 D10、D13 および D16 の供試体の場合、普通コンクリート供試体の最大付着応力度が ASR コンクリート供試体の値を上回って

いる。しかし、鉄筋径 D6 の供試体の場合のみ ASR コンクリートの最大付着応力度が上回る結果となった。既往の研究²⁾によれば4000 μ 程度の膨張の場合、鉄筋径の4倍以上のかぶりあれば、付着強度は ASR の影響を受けないとされている。本研究の D6 鉄筋の場合、かぶりは鉄筋径の8倍程度であるので、ASR 損傷による付着強度の劣化より、ケミカルプレストレスの影響の方が大きくなったと考えられる。

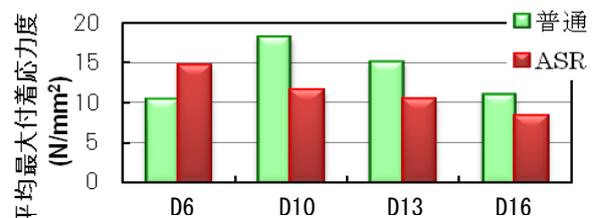


表-2 骨材のアルカリシリカ反応試験結果

骨材の種類	アルカリ濃度 減少量 Rc (mmol/L)	溶解シリカ 量 Sc (mmol/L)	判定結果
細骨材	113	572	無害でない
粗骨材	114	573	無害でない

表-3 コンクリート諸強度

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 E _c (kN/mm²)
普通	28.8	27.1
ASR	28.4	8.49

表-4 鉄筋の機械的性質

鉄筋の種類	降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)
D6	404	560	186
D10	325	493	194
D13	308	476	182
D16	337	482	201

表-5 付着強度試験の詳細と試験結果

供試体名	コンクリートの種類	鉄筋径 (mm)	平均付着応力度		破壊形式別 平均最大付着応力度		破壊形式
			0.002D 時 (N/mm²)	最大 (N/mm²)	拔出し (N/mm²)	割裂 (N/mm²)	
N-D6	普通	6	5.1	10.4	10.4	—	拔出し : 6
N-D10	普通	10	7.6	18.2	16.2	22.2	拔出し : 4 割裂 : 2
N-D13	普通	13	8.4	15.1	13.9	16.2	拔出し : 3 割裂 : 3
N-D16	普通	16	7.3	11.0	—	11.0	割裂 : 6
ASR-D6	ASR	6	7.6	14.7	14.7	—	拔出し : 6
ASR-D10	ASR	10	6.1	11.6	11.8	10.5	拔出し : 5 割裂 : 1
ASR-D13	ASR	13	6.8	10.4	12.5	10.0	拔出し : 1 割裂 : 5
ASR-D16	ASR	16	6.3	8.3	—	8.3	割裂 : 6

3. RC はり試験

3.1 試験概要

はり試験には図-3 に示すような断面を有する、長さ1800mm の RC 単純はりを用いた。その内訳はせん断補強筋が健全な供試体 (a)、せん断補強筋の付着不良を模擬した、閉合スターラップの全周の付着を無くした供試体 (b)、鉄筋破断を模擬した、せん断補強筋の断面引張縁側隅角部を切断した供試体 (c)、付着不良および鉄筋破断を模擬し、断面引張縁側隅各部を切断するとともに、切断位置から 10φ の区間の付着を無くした供試体 (d) である。また、コンクリートには付着強度試験と同様に表-1 に示した普通コンクリートと ASR コンクリートを用いた。なお、ASR コンクリートの載荷時の材齢は434日である。主鉄筋には2-D16、せん断補強筋には D6 スターラップを用いた。また、せん断補強筋間隔は、100mm ($p_w=0.63\%$) および 140mm ($p_w=0.45\%$) とした。これらの要因の組合せにより、合計 18 体の供試体を作製した。試験時のコンクリートの諸強度を表-6 に、供試体の詳細を表-7 に示す。

表-7 には各供試体のファイバー法による曲げ耐力計算値、ならびに土木学会コンクリート標準示方書³⁾によるせん断耐力計算値 (V_c , V_s , V_y)、最大荷重実測値および破壊形式を併せて示している。なお、 V_c の計算にはケミカルプレストレスの効果は考慮していない。また、供試体はせん断補強筋が健全な場合、曲げ破壊が先行するように設計されている。荷重は図-4 に示すように曲

げスパン 300mm、せん断スパン 600mm とした対象 2 点集中荷重載荷方式 ($a/d=3.53$)とし、破壊に至るまで単調漸増荷重を実施した。

表-6 RC はり試験用コンクリート諸強度

コンクリートの種類	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
普通	34.5	3.2	31.4
普通*	32.2	2.6	27.5
ASR	23.1	1.38	6.52

*: N100T-2, N140T-2 に使用

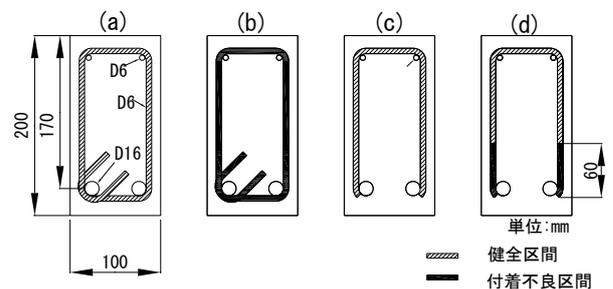


図-3 せん断補強筋図

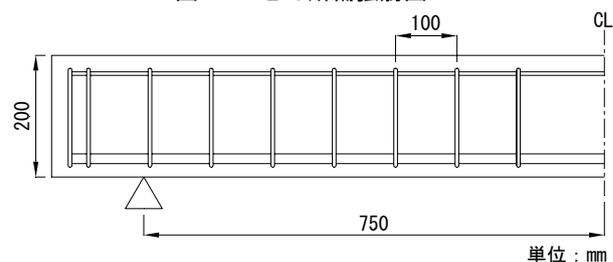


図-4 配筋図例 (s=100mm)

表-7 RC はり供試体の詳細および試験結果

供試体名	コンクリート種類	スターラップ破断	スターラップ付着	スターラップ間隔s(mm)	曲げ耐力計算値 Pu(kN)	V _c (kN)	V _s (kN)	V _y (kN)	最大荷重実測値 P _{MAX} (kN)	破壊形式
N100	普通	無	良	100	64.9	25.3	35.7	61.0	76.4	曲げ引張破壊
N100F	普通	無	不良*1	100	64.9	25.3	35.7	61.0	75.0	曲げ引張破壊
N100T-1	普通	有	良	100	64.9	25.3	35.7	61.0	68.4	曲げ降伏後のせん断破壊
N100T-2	普通	有	良	100	64.8	24.7	39.5	64.2	73.3	曲げ引張破壊
N100FT	普通	有	不良*2	100	64.9	25.3	35.7	61.0	62.5	斜め引張破壊
N140	普通	無	良	140	64.9	25.3	25.5	50.8	76.9	曲げ引張破壊
N140F	普通	無	不良*1	140	64.9	25.3	25.5	50.8	76.7	曲げ引張破壊
N140T-1	普通	有	良	140	64.9	25.3	25.5	50.8	73.5	曲げ引張破壊
N140T-2	普通	有	良	140	64.8	24.7	28.2	52.9	66.2	斜め引張破壊
N140FT	普通	有	不良*2	140	64.9	25.3	25.5	50.8	59.3	斜め引張破壊
ASR100	ASR	無	良	100	63.8	24.0	39.5	63.5	73.5	曲げ引張破壊
ASR100F	ASR	無	不良*1	100	63.8	24.0	39.5	63.5	72.2	曲げ引張破壊
ASR100T	ASR	有	良	100	63.8	24.0	39.5	63.5	73.2	曲げ引張破壊
ASR100FT	ASR	有	不良*2	100	63.8	24.0	39.5	63.5	70.6	せん断付着破壊
ASR140	ASR	無	良	140	63.8	24.0	28.2	52.2	77.4	曲げ引張破壊
ASR140F	ASR	無	不良*1	140	63.8	24.0	28.2	52.2	71.2	曲げ引張破壊
ASR140T	ASR	有	良	140	63.8	24.0	28.2	52.2	72.7	曲げ引張破壊
ASR140FT	ASR	有	不良*2	140	63.8	24.0	28.2	52.2	62.2	せん断付着破壊

*1: 全集合着なし, *2: 切断位置より10φ区間付着なし

3.2 試験結果と考察

(1) 載荷前のひび割れ状況

載荷前の供試体側面のひび割れ状況の一例を図-5に示す。なお、示しているひび割れは幅0.2mm以上としており、幅0.2mm以下のひび割れについては今回の考察から除外している。せん断補強筋の付着・定着状況で比較すると、せん断補強筋が健全な供試体には幅0.2mm以上のひび割れが他の供試体と比較し、あまり発生しておらず、せん断補強筋によりひび割れの開口が抑制されていることが考えられる。せん断補強筋に付着不良を模擬している供試体については、供試体全体にひび割れが分布しており、せん断補強筋の付着を無くすことによりASRのひび割れの開口を抑制する効果が減少していると言える。せん断補強筋に破断のみを模擬した供試体では、主鉄筋位置での軸方向ひび割れの進展が顕著であり、せん断補強筋に付着・定着双方を模擬した供試体ではその傾向がさらに強くなる結果となった。その原因として、せん断補強筋の隅角部を破断させることにより、ASRによるコアコンクリートの膨張を拘束する効果が減少し、その膨張が主鉄筋位置で集約して現れたことが考えられる。なお、せん断補強筋間隔の違いによる影響は特に確認できなかった。

(2) 載荷前の膨張量

はり供試体で計測した膨張量の変化の一例と、はり供試体と同じ配合で作製した自由膨張量計測用の曲げ供試体の膨張量の変化を図-6に示す。なお、膨張の測定は脱型日から約1ヶ月間隔で行い、はり供試体は、供試体上縁から30mmの位置および下縁から30mmの位置の軸方向の膨張量をコンタクトゲージにより測定した。

載荷前の膨張は、曲げ供試体で、4900 μ となった。一方、はり供試体は、せん断補強筋性状の違いにより若干の差はあるものの、いずれの供試体も上縁側で1300 μ 程度であり、せん断補強筋性状が軸方向の膨張量に影響を与えない結果となった。しかし、今回の膨張量の測定は軸方向のみであったため、ひび割れの進展状況より、軸直角方向の膨張量には差が現れていることが考えられる。

また、下縁から30mmの位置の膨張量を主鉄筋に生じているひずみとし、ケミカルプレストレス量を計算すると、下縁の応力で約1.8N/mm²のケミカルプレストレスが導入されていた。

(3) 最大荷重と破壊形式

本実験における破壊形式は曲げ引張破壊、斜め引張破壊、せん断付着破壊の3種類となった。曲げ破壊で終局した供試体の最大耐力はすべて計算値を上回り安全側の数値となっている。ただし、せん断補強筋性状で比較すると、せん断補強筋が健全な供試体が最も高い値を示す結果となった。コンクリートの種類で比較すると、せん

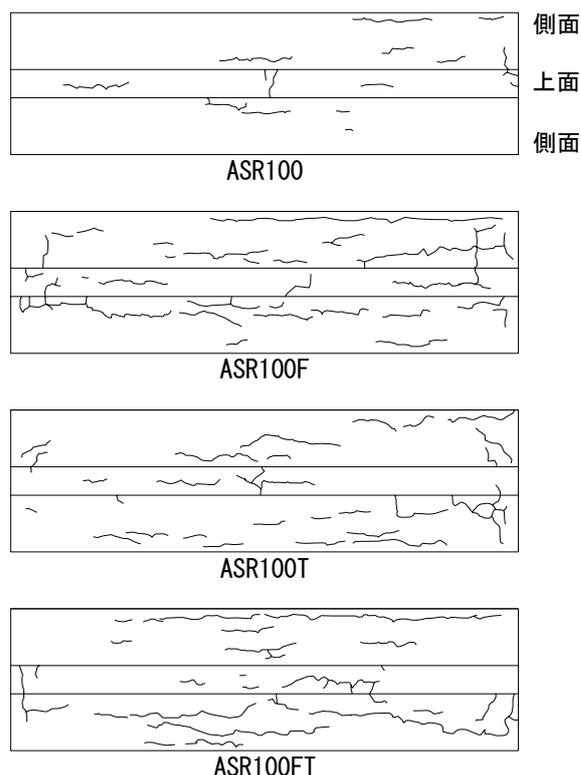


図-5 載荷前ひび割れ状況 (s=100mm)

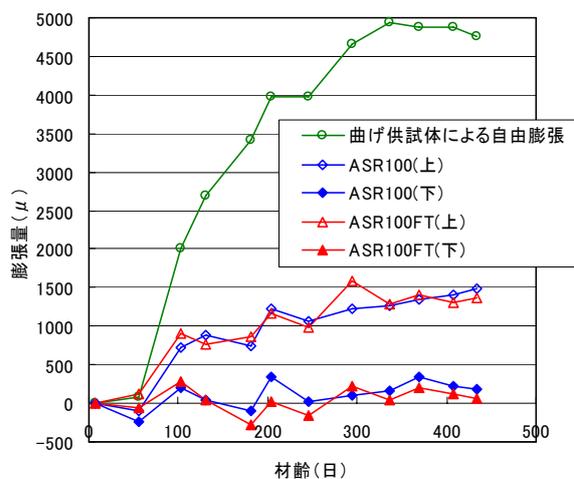


図-6 載荷前膨張量例
(曲げ供試体, ASR100, ASR100FT)

断補強筋が健全な場合は最大荷重にあまり差が現れなかったことから、多少ASRが進行していても、せん断補強筋が健全であれば耐力にはほぼ影響を与えないことがわかる。一方、せん断補強筋に付着不良を模擬している供試体の場合、ASRコンクリート供試体の最大荷重が若干低下しており、曲げ耐力が減少する結果となった。これは、せん断補強筋の付着不良によるひび割れ抑制効果の減少が、曲げスパンの圧縮域コンクリートの強度に影響を与えたためであると考えられる。せん断補強筋に鉄筋破断のみを模擬した供試体に関しては、普通コンクリートではせん断破壊した供試体が存在するのに対し、

ASR コンクリートではせん断破壊する供試体が存在しなかった。ASR コンクリート供試体は、膨張により軸方向および軸直角方向のケミカルプレストレスが導入されており、その影響が現れたものと考えられる。すなわち今回の実験では、ASR が生じている場合、せん断補強筋の劣化要因が鉄筋破断のみであれば、鉄筋破断によるせん断耐荷力の減少よりもケミカルプレストレスによる補強効果が上回る結果となった。また、せん断補強筋に付着・定着不良を模擬した供試体の場合、両者の破壊形式はせん断破壊となったが、最大荷重を比較すると ASR コンクリート供試体の実測値が高く、やはりケミカルプレストレスの効果が現れる結果となった。

(4) 荷重によるひび割れ

各供試体の終局時のひび割れ状況を図-7 に示す。

まず、せん断補強筋の状態でのひび割れ状況を比較すると、普通コンクリート供試体の場合、せん断補強筋が健全な場合はせん断ひび割れの進展があまり顕著でないのに対し、付着不良を模擬した場合はせん断ひび割れの進展が顕著であり、また、せん断ひび割れが1本に集約される傾向が認められた。せん断補強筋に破断を模擬した場合、付着割裂ひび割れの進展が確認された。同せん断補強筋間隔で異なる破壊形式の供試体 N100T-1,2 を比較すると、曲げ破壊した供試体はせん断破壊した供試体より、付着割裂ひび割れの進展が顕著であり、それによりせん断スパンの主鉄筋の付着が減少し、アーチ機構が卓越した結果、曲げ破壊に至ったことが考えられる。ASR コンクリート供試体の場合、せん断補強筋が健全なものおよびせん断補強筋に付着不良を模擬した供試体にはせん断ひび割れの進展はほとんど確認できなかった。鉄筋に破断を模擬した供試体には、普通コンクリート同様に付着割裂ひび割れの進展が確認でき、付着・定着不良の供試体に関してはその傾向が強くなる結果となった。せん断補強筋の断面引張縁側隅角部を切断すると、主鉄筋のダウエル力に対する抵抗力が減少するため、付着割裂ひび割れが進展するものと考えられる。また、せん断補強筋の切断位置から 10φ の付着を無くした場合、せん断補強筋の付着によるダウエル力に対する抵抗力がほぼ期待できないため、更に付着割裂ひび割れが顕著に進展する結果となった。

コンクリートの種類で比較すると、せん断補強筋の隅角部に破断を模擬していない供試体に関しては、ASR コンクリート供試体のせん断ひび割れの進展が比較的少量であり、ケミカルプレストレスの効果を示唆する結果となった。せん断補強筋に破断を模擬した場合、ASR コンクリート供試体には普通コンクリート供試体より顕著に付着割裂ひび割れが進展する結果となった。この原因として、主鉄筋により軸方向のケミカルプレストレスが導

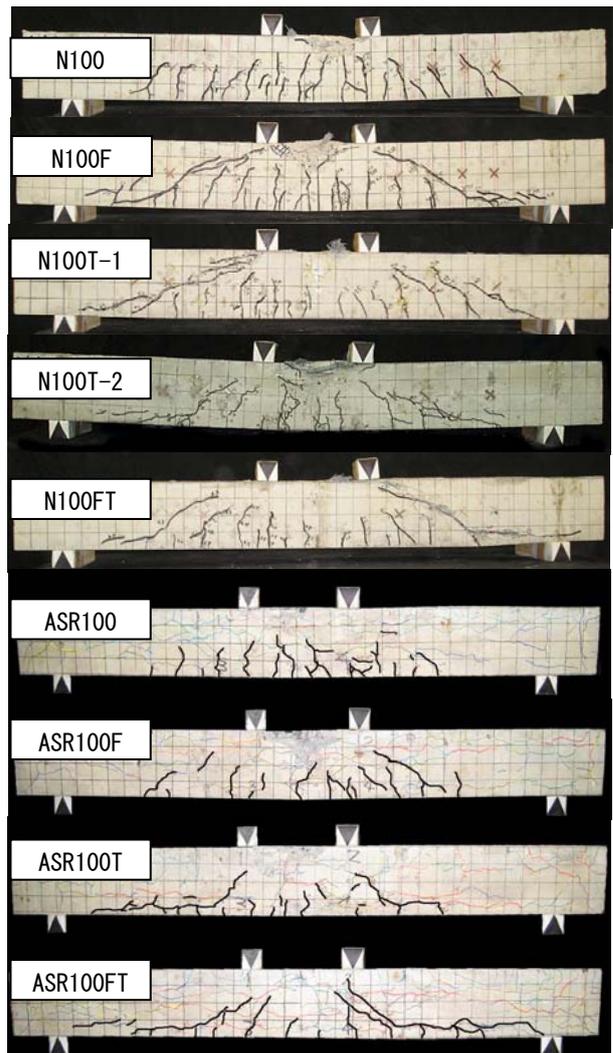


図-7 終局時ひび割れ状況 (s=100mm)

入されていることや、荷重前から主鉄筋位置に軸方向ひび割れが発生していたことが挙げられる。

また、前項の付着強度試験によりせん断補強筋が降伏するために必要な定着長を算出し、各供試体の荷重によって発生したひび割れとの関係でせん断補強筋の有効性を確認すると、鉄筋破断を模擬した供試体では付着割裂ひび割れが支配的となるため、有効な定着長はほぼ確保できていないことになった。また、それらの荷重-せん断補強筋ひずみ関係を参照しても抵抗している様子はほとんど確認できなかった。このことから、ASR コンクリート供試体ではトラス機構よりもアーチ機構で抵抗している可能性が高いことが示唆される。

(5) 荷重-中央変位関係

荷重-中央変位関係の一例を図-8 に示す。

普通コンクリート供試体間で比較を行うと、曲げ破壊で終局した供試体に関しては、60kN 付近での剛性にあまり差が無く、ほぼ同等の変形性能を示す結果となった。しかし、付着不良を模擬した供試体の場合 55kN 付近で

一旦荷重が低下しており、せん断ひび割れの開口とせん断補強筋が抵抗し始めるタイミングに差が生じていることを示唆している。また、せん断破壊した供試体に関しては荷重 40kN 付近で剛性が低下し始め、66kN で急激な荷重低下を伴うせん断破壊で終局しているが、最大荷重付近の剛性の差はあまり顕著ではなく、普通コンクリート供試体の場合、せん断補強筋の破断は部材の剛性にあまり影響を与えない結果となった。付着・定着不良を模擬した供試体では 30kN 付近から剛性が低下し始める傾向を示した。これは、付着割裂ひび割れの進展によりせん断変形が増加し始めたことが原因であると考えられる。

ASR コンクリート間で比較を行うと、荷重 45kN 付近までせん断補強筋の状態によらず、ほぼ同様の荷重-中央変位関係を示している。これより、ケミカルプレストレスにより載荷初期はせん断変形が抑制されていたことが考えられ、せん断補強筋の状態によってせん断変形が発生し始める荷重に差が無いことが言える。せん断補強筋が健全な供試体と付着不良のみを模擬した供試体を比較すると、45kN 付近で付着不良を模擬した供試体の剛性が低下する傾向を示した。この原因として、せん断補強筋に付着不良を模擬すると ASR 劣化時に膨張を拘束する効果が減少し、軸直角方向のケミカルプレストレス量が減少したことが考えられる。定着不良を模擬した供試体に関しては、コアコンクリートの拘束効果の減少によるケミカルプレストレスの減少および付着割裂ひび割れの進展が剛性の減少の原因であると考えられる。また、付着・定着不良を模擬した供試体の場合はその要因が更に顕著になることが予想され、その影響が強くなったと考えられる。

4. まとめ

本研究では、 $100 \times 100 \times 400$ mm の曲げ供試体の自由膨張量で約 4900μ の ASR 損傷を生じたコンクリートの付着強度ならびに ASR によりせん断補強筋が破断した RC はりのせん断耐荷性状について検討を行った。得られた主な結果および今後の課題を以下にまとめる。

- (1) D10, D13 および D16 については ASR 損傷が生じると、最大付着応力度が低下する傾向を示した。しかし、D6 の場合 ASR コンクリートの最大付着応力度が普通コンクリートより高い値を示した。D6 供試体の場合、鉄筋径の 8 倍程度のかぶりが確保されており、充分なかぶりが確保されている場合、今回の ASR 劣化の程度であれば付着強度にほとんど影響を与えないと考えられる。しかし、鉄筋径に対するかぶりが 4.5 倍以下であれば、ASR による既存のひび割れにより破壊形式が割裂に対する感受性が増加し、付着強度が低下する傾向が認められた。

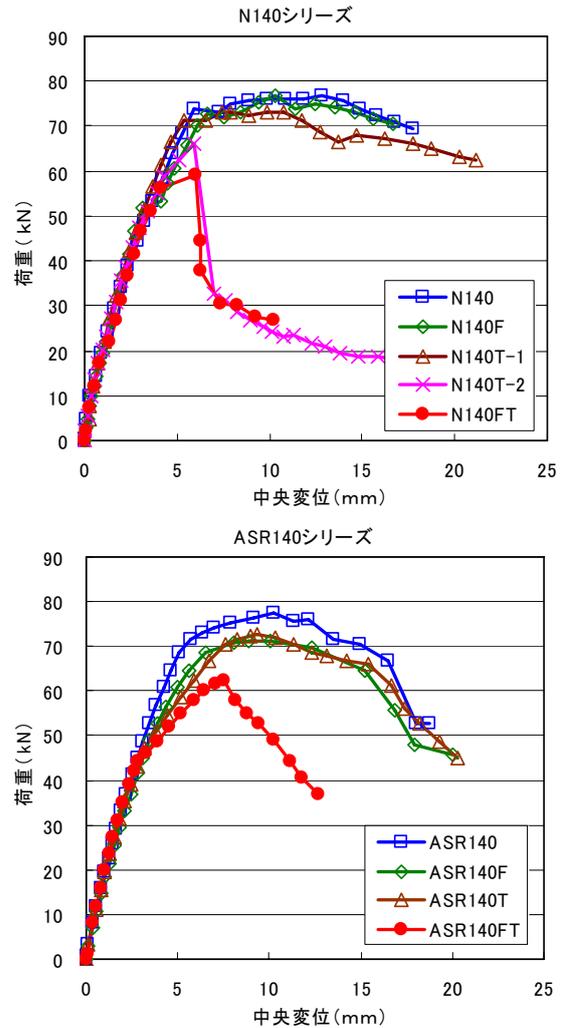


図-8 荷重-中央変位関係例 (s=140mm)

- (2) せん断補強筋に破断を模擬した場合、ASR 劣化時に主鉄筋に沿ったひび割れの進展が顕著になり、そのひび割れが載荷時に付着割裂ひび割れへと進展する傾向が認められた。また、本実験での ASR 劣化の程度であれば、鉄筋破断がせん断耐荷力に与える影響は小さく、鉄筋破断による耐荷力の減少よりケミカルプレストレスによる効果が上回る結果となった。しかし、今回の検討は実構造物での膨張と鉄筋破断の関係を必ずしも反映しているわけではなく、残存ケミカルプレストレスの影響も含め今後も詳しく検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（規準編），2007.5
- 2) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書（鉄筋破断と新たなる対応），コンクリートライブラリー124，pp. II-85-II-89，2005.8
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），2002.3