

論文 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

島津 祥徳*1・波多野 雄士*2・三方 康弘*3・井上 晋*4

要旨: ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じた PRC はり部材の経時変化および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 PRC はり供試体を作製し、せん断補強筋の性状と配置間隔、プレストレス導入量を要因として耐荷特性について検討するとともに、既報告である ASR 単独の劣化を生じた供試体の耐荷特性との比較検討を行った。その結果、複合劣化を生じた供試体は ASR 単独の劣化を生じた供試体と比較して、鋼材腐食の影響により、主鉄筋に沿ったひび割れが顕著に開口したこと、せん断補強筋の腐食により、その機能が低下する挙動が見られた。

キーワード: ASR, 鋼材腐食, 鉄筋破断, 複合劣化, PRC はり, 耐荷特性

1. はじめに

近年、アルカリシリカ反応（以下、ASR と記す）により鉄筋破断が生じた RC はり部材の耐荷特性に関する知見¹⁾は蓄積されつつあるものの、PC, PRC はり部材の耐荷特性については未だ不明な点が多い。そこで、ASR 劣化した PRC はり部材のせん断耐荷特性について以前に報告²⁾を行った。

当初は ASR の劣化度の違いが ASR 劣化した PRC はり部材のせん断耐荷特性に及ぼす影響について、検討する予定であったが、ASR が収束していたことから、ASR 単独の劣化だけでなく、塩水を散布することにより、鋼材腐食を生じさせ、ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じた PRC はり部材の曲げせん断耐荷特性について検討することとした。

本研究は、塩害と ASR による複合劣化による鋼材腐食やコンクリート劣化、ASR によるせん断補強筋の破断等が PRC はり部材のせん断耐荷特性に及ぼす影響について、せん断補強筋の形状と配置間隔、プレストレス導入量を要因とし比較検討を行った。また、既往の研究¹⁾と比較した。

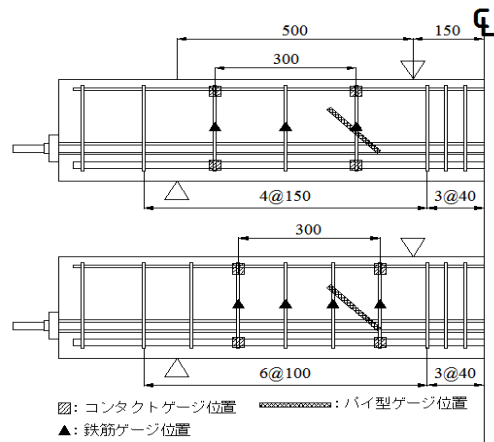
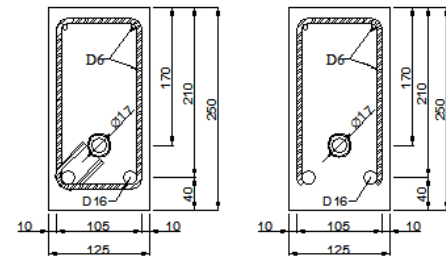


図-1 配筋図 (単位: mm)



(a) 健全スターラップ (b) 定着不良スターラップ

図-2 断面図 (単位: mm)

表-1 コンクリートの示方配合 (N: 普通コンクリート, AC: 複合劣化したコンクリート)

供試体	Gmax (mm)	sl (cm)	W/C (%)	air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
						W	C	S		G		NaCl	A (cc)
								Sn	Sr	Gn	Gr		
N	20	8	45.5	3.0	44.1	178	391	746	0	1026	0	0	3.91
AC	25	8	45.5	3.0	41.1	163	358	356	365	550	572	11.59	3.58

Sn: 非反応性細骨材, Sr: 反応性細骨材, Gn: 非反応性粗骨材, Gr: 反応性粗骨材, A: AE 減水剤

*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 JIP テクノサイエンス (株) 解析技術部 工修 (正会員)

*3 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)

*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)

2. 実験概要

本研究では、図-1 に示すような、125mm×250mm×1800mm の長方形断面 PRC はり部材を用いた。コンクリートの示方配合は表-1 に示す 2 種類とし、ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じた供試体（以下、AC シリーズと記す）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。主鉄筋には 2-D16，せん断補強筋には D6，PC 鋼材には φ17 を使用した。コンクリートの諸強度を表-2，鋼材の機械的性質を表-3 に示す。

実験要因として、(1) 劣化の種類：健全な供試体（以下、N シリーズと記す），ASR と鋼材腐食による複合劣化を生じた供試体の 2 種類を選定した。(2) せん断補強筋の性状：健全なもの（図-2(a)），ASR 損傷による鉄筋破断を模擬するため，せん断補強筋の引張側隅角部を切断したもの（図-2(b)）の 2 種類を選定した。(3) せん断補強筋間隔：s=100mm（せん断補強筋比： $p_w=0.51$ ）と s=150mm（ $p_w=0.34$ ）の 2 種類を選定した。(4) 断面引張縁側の応力：2N/mm² と 4N/mm² の 2 種類を選定した。これらの要因の組み合わせより，合計 5 体の供試体を作製するとともに，既往の研究²⁾である ASR 単独の劣化を生じた供試体 4 体（以下 A シリーズと記す）と併せて，供試体の一覧を表-4 に示す。なお，いずれの供試体も，計算上は鉄筋が曲げ降伏後にせん断破壊至り，PC 鋼材は降伏しないように設計した。

作製した供試体は 4 週間湿布養生後，AC シリーズ供試体は促進養生を実施し，その後，材齢 715 日から 3% 濃度の塩水を週 5 日散布養生を行った。なお，材齢 715 日時点では，ASR 膨張はほぼ収束していた。

載荷試験方法は，等曲げ区間 300mm，曲げせん断区間 500mm とした対称 2 点集中荷重方式（a/d=2.38）とし，破壊に至るまで単調漸増型荷重とした。なお，AC シリーズ供試体の載荷時の材齢は 1088 日であり，100×100×400mm の曲げ供試体の自由膨張量で約 4900 μ の膨張量を有し，A シリーズは約 4600 μ の膨張量を有していた。

3. 供試体の劣化状況

3.1 供試体の ASR 膨張量

ASR 劣化したはり供試体のせん断スパン内の上縁から 20mm および下縁から 40mm の位置においてコンタクトゲージにより軸方向の ASR 膨張を測定した。その結果の平均を図-3 に示す。せん断補強筋比の違いにより，膨張量には明瞭な差が生じなかった。また，せん断補強筋が健全な AC150-2 供試体は，せん断補強筋が定着不良の AC150T-2 供試体と比較して，軸方向の膨張が抑制される傾向が見られた。定着不良の AC150T-2 供試体は，

表-2 コンクリート諸強度

コンクリート	N	AC	
材齢 (day)	28	28	1088
圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	46.5	50.4	33.8
引張強度 f_t (N/mm ²)	3.49	4.24	2.25
曲げ強度 f_b (N/mm ²)	5.09	6.96	3.09
ヤング係数 E_c (kN/mm ²)	27.3	34.0	22.2

表-3 鋼材の機械的性質（健全時）

鋼材	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D6	432	591	201
D16	331	492	200
φ17	1000	1123	201

表-4 供試体の詳細

シリーズ	供試体名	劣化の種類	せん断補強筋		断面下縁の応力 (N/mm ²)
			鉄筋破断	配置間隔 (mm)	
N	N150-2	健全	無	150	2
A	A150-2	ASR	無	150	2
	A150T-2	ASR	有	150	2
	A150T-4	ASR	有	150	4
	A100T-2	ASR	有	100	2
AC	AC150-2	複合劣化	無	150	2
	AC150T-2	複合劣化	有	150	2
	AC150T-4	複合劣化	有	150	4
	AC100T-2	複合劣化	有	100	2

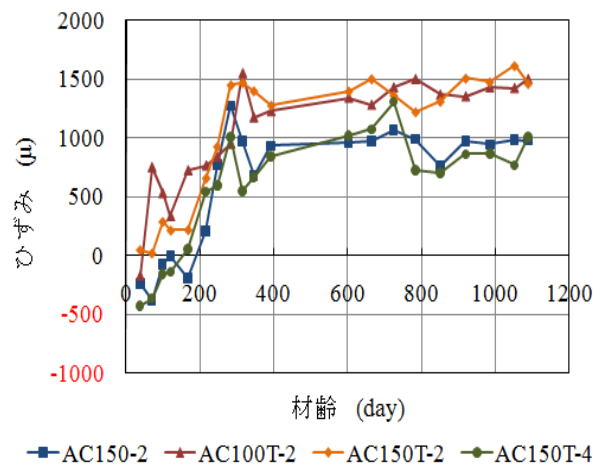


図-3 コンクリート膨張量

健全な AC150-2 供試体と比較して、コンタクトゲージを添付した位置のコンクリートが定着不良の影響により、膨張ひずみの拘束効果が弱まり、軸方向のひずみが大きくなったものと考えられる。プレストレス導入量が大きい AC150T-4 供試体は、プレストレス導入量が小さい AC150T-2 供試体と比較して、軸方向の ASR 膨張が抑制される傾向が現れた。これは、プレストレス導入量が大きいため、ASR 膨張による軸方向の膨張がプレストレスで抑制されたものと考えられる。

3. 2 載荷前ひび割れ状況

載荷前の供試体のひび割れ状況を図-4、ひび割れ密度を表-5に示す。なお、ゲージ等を張り付けた面を表面、ひび割れを観察した面を裏面とした。また、下面はひび割れが発生していなかったため、除外している。なお、ひび割れ密度は、各ひび割れの長さから供試体の面積(下面を除く)で除したものである。表-5にはAシリーズ供試体も併せて記載している。せん断補強筋が健全な AC150-2 供試体は、せん断補強筋が定着不良の AC150T-2 供試体と比較すると、ひび割れ幅 1mm 以上のひび割れ密度が小さくなる傾向を示した。これは、せん断補強筋が健全なため、ASR 膨張を拘束しひび割れ発生および開口を抑制したものと考えられる。せん断補強筋比が大きい AC100T-2 供試体は、せん断補強筋比が小さい AC150T-2 と比べ、ひび割れ幅 0.2mm 未満のひび割れ量にあまり差はないものの、ひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れ量が少ない結果となった。これは、せん断補強筋比が大きいため、ASR 膨張によるひび割れ開口を抑制したものと考えられる。導入プレストレス量が大きい AC150T-4 供試体は、導入プレストレス量が小さい AC150T-2 供試体に比べ、ひび割れ密度が減少した。これは、導入プレストレス量が大きいため、ひび割れの開口を抑制したためと考えられる。

このことより、せん断補強筋の定着が健全であること、せん断補強筋比および導入プレストレス量が大きいことが、ASR 膨張によるひび割れを抑制する効果があることが示された。とりわけせん断補強筋比が大きい場合、ひび割れ抑制効果が高まる結果となった。

ASR 単独の劣化を生じた A シリーズ供試体と比較すると、複合劣化した AC シリーズ供試体は、全体のひび割れ密度が増加するとともに、ひび割れ幅 1mm 以上のひび割れが主鉄筋沿いに発生した。これは、ASR 膨張および鋼材腐食により、主鉄筋に沿ったひび割れ幅が顕著に開口したものと考えられる。

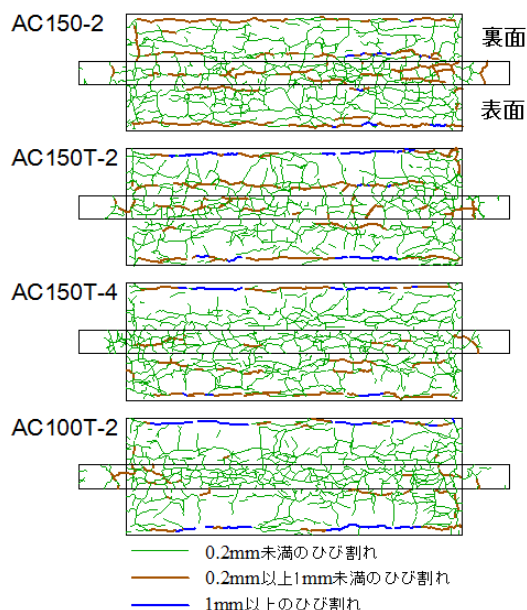


図-4 載荷前ひび割れ図

表-5 各供試体のひび割れ密度

供試体名	ひび割れ密度 (mm/mm ²)			
	L	M	H	Σ
A150-2	0.0140	0.0103	0.0000	0.0243
A150T-2	0.0194	0.0079	0.0004	0.0277
A150T-4	0.0116	0.0135	0.0000	0.0251
A100T-2	0.0139	0.0109	0.0001	0.0249
AC150-2	0.0246	0.0059	0.0003	0.0308
AC150T-2	0.0255	0.0061	0.0016	0.0332
AC150T-4	0.0247	0.0035	0.0007	0.0289
AC100T-2	0.0241	0.0021	0.0014	0.0276

L: 幅 0.2mm 未満, M: 幅 0.2mm 以上 1mm 未満,

H: 幅 1mm 以上, Σ: LMH の合計

表-6 主鉄筋の質量減少率と機械的性質

供試体名	鉄筋	質量減少率 (%)	降伏強度*1 (N/mm ²)	ヤング係数*1 (kN/mm ²)
AC150-2	表面	1.53	329	200
	裏面	0.96	330	189
AC150T-2	表面	1.57	325	202
	裏面	1.49	329	181
AC150T-4	表面	1.46	327	200
	裏面	1.72	341	202
AC100T-2	表面	0.84	315	190
	裏面	0.50	320	195

*1: 腐食鉄筋の降伏強度, ヤング係数は載荷試験終了後の供試体から鉄筋を取り出し, 引張試験を実施した。なお, 断面積には全て公称断面積を使用した。

表-7 PRC はりの詳細および試験結果

シリーズ	供試体名	劣化の種類 ^{*1}	せん断補強筋		断面 下縁 の応力 (N/mm ²)	曲げ破壊 荷重 ^{*2} 計算値 Pub (kN)	せん断耐力計算値				最大 荷重 実測値 Pu (kN)	破壊形式
			鉄筋 破断	配置 間隔 (mm)			Pus (kN)	Vy (kN)	Vc (kN)	Vs (kN)		
N	N150-2	健全	無	150	2	206.2	128.8	64.4	33.6	30.8	191.8	曲げ引張
A	A150-2	ASR	無	150	2	140.7	115.9	57.9	27.1	30.8	215.3	曲げ引張
	A150T-2	ASR	有	150	2	140.7	115.9	57.9	27.1	30.8	213.8	曲げ引張
	A150T-4	ASR	有	150	4	150.8	119.0	59.5	28.7	30.8	189.8	曲げ引張
	A100T-2	ASR	有	100	2	140.6	146.7	73.3	27.1	46.2	218.7	曲げ引張
AC	AC150-2	複合劣化	無	150	2	173.5	126.8	63.4	32.6	30.8	221.5	曲げ引張
	AC150T-2	複合劣化	有	150	2	173.8	127.1	63.5	32.7	30.8	215.6	曲げ引張
	AC150T-4	複合劣化	有	150	4	184.7	132.9	66.4	35.6	30.8	221.1	曲げ引張
	AC100T-2	複合劣化	有	100	2	173.9	158.6	79.3	33.1	46.2	207.6	曲げ引張

*1: ASRはASR単独の劣化を生じた供試体, 複合劣化はASRと鋼材腐食による複合劣化を生じた供試体

*2: 鋼材の降伏強度, コンクリートの圧縮強度には実材料強度を用いて, ファイバー法により曲げ破壊荷重を算定した。なお, 腐食鉄筋の降伏強度は載荷試験終了後の供試体から鉄筋を取り出し引張試験を実施した。(表-6参照)

3. 3 腐食評価

塩水散布によって腐食した主鉄筋を10%クエン酸二アンモニウム溶液(60℃)に24時間浸漬後, 素地をいためないように腐食生成物を除去した後, 質量減少率と機械的性質を測定した。この結果を表-6に示す。せん断補強筋比が大きいAC100T-2供試体の質量減少率が小さくなる結果となった。これは, AC100T-2供試体は他の供試体と比較して, せん断補強筋をより密に配置していたため, ASRによるひび割れ密度が小さくなり, 塩分の浸透が少なくなったものと考えられる。

4. 載荷試験結果と考察

4. 1 最大荷重と破壊状況

各供試体の最大荷重と破壊形式および各耐力計算値を表-7, 供試体の破壊状況を図-5に示す。計算値条件について, 健全なN150-2供試体は, コンクリート諸元を表-1に示す材齢28日強度, 鋼材の機械的性質を表-4に示す値を用いた。また, 複合劣化を生じたACシリーズ供試体は, コンクリート諸元を表-1に示す材齢1088日強度, 鋼材の機械的性質を表-6に示す値を用いた。これらの値を用い, ファイバー法による曲げ破壊荷重の計算値, および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(Vc, Vs, Vy)を計算した。なお, Vc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。

健全なN150-2供試体は, 荷重の増加とともに, せん断スパン内のひび割れが進展したが, 曲げスパン内のコ

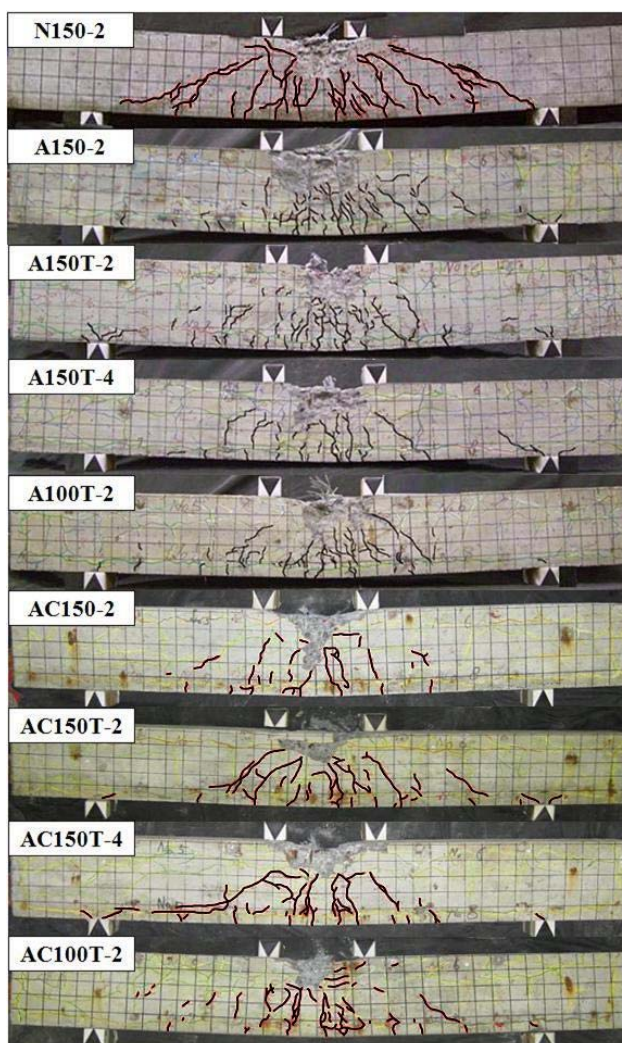


図-5 破壊状況

ンクリートが圧壊し曲げ引張破壊に至った。一方、複合劣化を生じた AC シリーズ供試体は、N150-2 供試体と比較して、表面および裏面ともにせん断スパン内のひび割れの進展があまり顕著でなかった。これは、ASR 膨張によるケミカルプレストレスの影響からコンクリート負担せん断力が向上したものと考えられる。

せん断補強筋が健全な AC150-2 供試体は、せん断補強筋が定着不良な AC150T-2 供試体と比較すると、せん断補強筋が健全なため、せん断補強筋が有効に機能し、せん断ひび割れの進展が顕著に表れなかったと考えられる。導入プレストレス量が多い AC150T-4 供試体で付着割裂ひび割れが確認された。これは、導入プレストレス量が多かったことおよびせん断補強筋の引張側隅角部の切断による主鉄筋の拘束効果の低下に伴うダウエル作用の低下および鉄筋腐食による付着力の低下により、付着割裂ひび割れが発生しやすくなったと考えられる。

曲げひび割れの本数をスパン全長で除した平均ひび割れ間隔と比較すると、複合劣化を生じた AC シリーズ供試体は、ASR 単独の劣化を生じた A シリーズ供試体と比較して、平均ひび割れ間隔が AC シリーズ供試体は約 107mm、A シリーズ供試体は約 74mm であったことから、ひび割れ分散性の低下が見られた。これは、鋼材腐食による付着力の低下によるものと考えられる。また、AC150T-2、AC150T-4 供試体は、A150T-2、A150T-4 供試体と比較すると、せん断ひび割れの進展が顕著となった。これは、せん断補強筋も鋼材腐食による付着力の低下が生じ、せん断補強筋が有効に機能しなかったものと考えられる。

4. 2 荷重—中央変位関係

複合劣化を生じた AC シリーズ供試体と健全供試体の荷重—中央変位関係の一例を図-6 に示す。また、劣化の種類による比較として、N150-2、A150-2、AC150-2 供試体の荷重—中央変位関係の一例を図-7 に示す。複合劣化を生じた AC シリーズ供試体と比較すると、図-6 より、せん断補強筋が定着不良である AC150T-2 供試体は、せん断補強筋が健全な AC150-2 供試体と比較すると、ほぼ同様の挙動を示した。荷重 150kN から 200kN までの測定点を直線で結び、剛性を算出すると、導入プレストレス量が多い AC150T-4 供試体は 30.4kN/mm、AC150T-2 供試体は 17.0kN/mm となり、前者は後者と比較して剛性が約 78.8%増加したものの、中央変位 25mm 付近で荷重低下が生じる挙動を示した。このことから、導入プレストレス量が多い場合には、剛性が向上するものの、じん性が低下する可能性があるものと考えられる。

劣化の種類で比較すると、図-7 より、複合劣化を生じた AC150-2 供試体および ASR 単独の劣化を生じた

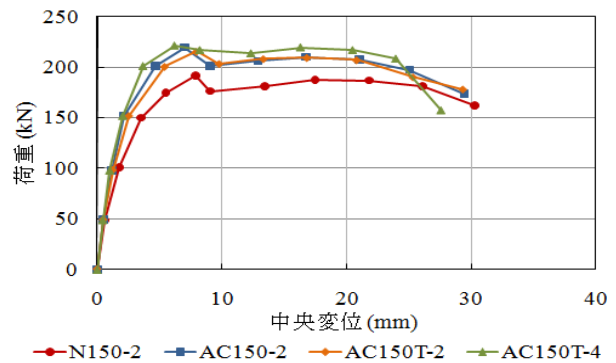


図-6 荷重—中央変位関係の一例

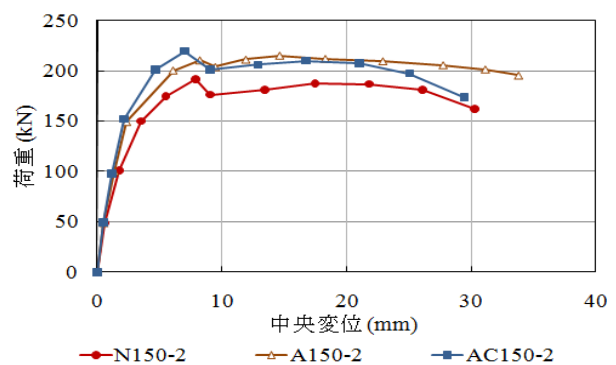


図-7 荷重—中央変位関係の一例

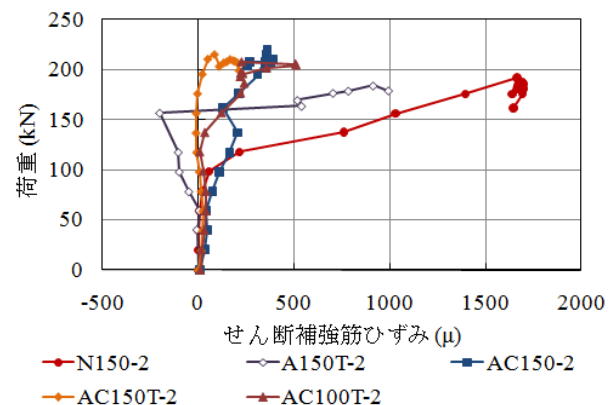


図-8 荷重—せん断補強筋ひずみ関係

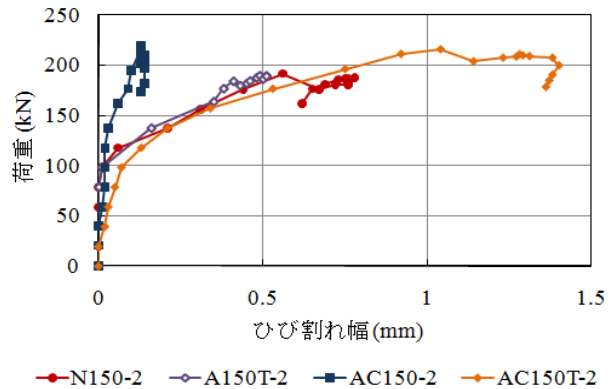
A150-2 供試体は、健全な N150-2 供試体と比較して、剛性および最大荷重が大きくなる挙動を示した。これは、ASR 膨張によるケミカルプレストレスにより、剛性が高まったものと考えられる。複合劣化を生じた AC150-2 供試体は 19.3kN/mm、ASR 単独の劣化を生じた A150-2 供試体は 13.7kN/mm となり、前者は後者と比較して約 40.9%増加したが、中央変位が 20mm を超過すると、荷重の低下がより顕著になった。これは、AC150-2 は、A150-2 に比べて、前述の 2. で記述した通り、自由膨張量が大きかったことにより、ケミカルプレストレスが大きくなり、剛性が向上した。また、鋼材腐食により主鉄筋の付着力が低下したためじん性が低下したものと考えられる。

4.3 荷重－せん断補強筋ひずみ関係

荷重－せん断補強筋のひずみとの関係を図－8 に示す。なお、せん断補強筋のひずみは図－1 で示した位置で計測し、各せん断補強筋に生じたひずみの平均としている。健全な N150-2 供試体は斜めひび割れ発生後、せん断補強筋にひずみが生じたのに対し、複合劣化を生じた AC150-2 供試体は、ひずみが顕著に生じなかった。これは、ASR 膨張によるケミカルプレストレスの効果により、コンクリート負担せん断力が増加し、せん断ひび割れの発生を抑制したものと考えられる。AC150T-2 供試体は、AC150-2 供試体と比較すると、せん断ひび割れが明瞭に発生しているにもかかわらず、同一荷重時におけるせん断補強筋ひずみが小さくなった。これは、平均ひずみを用いたことを踏まえると、せん断補強筋の定着不良によって、せん断補強筋があまり有効に機能しなかったためと考えられる。劣化の種類で比較すると、複合劣化を生じた AC150T-2 供試体は、ASR 単独の劣化を生じた A150T-2 供試体と比べてせん断ひび割れが明瞭に生じているにもかかわらず、せん断補強筋ひずみが顕著に生じなかった。これは、AC150T-2 は A150T-2 と比較して、前述の 2. で記述した通り、自由膨張量が大きいため、ケミカルプレストレスによる V_c が増加したこと、また、せん断補強筋の腐食による付着力の低下により、せん断補強筋ひずみが小さくなったものと考えられる。ASR 単独の劣化が生じた供試体では、せん断補強筋に定着不良を生じていてもせん断補強筋の定着長が確保されることにより、せん断補強筋として機能するが、さらに、せん断補強筋の腐食による複合劣化が生じることにより、せん断補強筋の付着が低下し、せん断補強筋の機能が低下する場合があると考えられる。

4.4 荷重－せん断ひび割れ幅関係

せん断ひび割れ幅は、図－1 に示す位置においてパイ型ゲージにより計測した。起点側の結果の一例を図－9 に示す。複合劣化した AC150-2 供試体は、健全な N150-2 供試体と比較すると、ケミカルプレストレスの影響により荷重の増加に伴うせん断ひび割れ幅の開口が顕著でなかった。AC150T-2 供試体は、AC150-2 供試体と比較すると、荷重の増加に伴うせん断ひび割れの開口が顕著に見られた。これは、4.3 で述べたように、せん断補強筋があまり有効に機能していないため、せん断ひび割れの開口が顕著に見られたと考えられる。複合劣化が生じた AC150T-2 供試体は、ASR 単独の劣化が生じた A150T-2 供試体と比較して、荷重の増加に伴うせん断ひび割れ幅の開口が顕著に見られた。これは、鉄筋腐食による付着力の低下により、せん断補強筋の機能が低下し、せん断ひび割れの開口を抑制できなかったものと考えられる。



図－9 荷重－せん断ひび割れ幅関係の一例

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) 複合劣化を生じた供試体は、ASR 単独による劣化を生じた供試体と比較して、鋼材腐食の影響により、主鉄筋位置のひび割れ幅が大きくなった。
- (2) 複合劣化を生じた供試体は、ASR 単独による劣化を生じた供試体と比較して、曲げひび割れの分散性が低下したことや、せん断補強筋の腐食によってせん断補強筋の機能が低下する傾向が見られた。
- (3) 複合劣化を生じた供試体は、主鉄筋が腐食しているものの質量減少率が 1%程度であったため、曲げ破壊荷重にほとんど影響を及ぼさなかった。
- (4) ASR 単独の劣化が生じた供試体では、せん断補強筋に定着不良が生じて、せん断ひび割れの発生位置によって、定着長が確保される場合には、せん断補強筋として機能するが、さらに、せん断補強筋の腐食による複合劣化が生じると付着が低下し、せん断補強筋の機能が低下する場合がある。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号:20760293)により実施した。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 稲増 克行, 高橋 勇希, 三方 康弘, 井上 晋: ASR 膨張に伴うせん断補強筋の破断が RC はり部材の耐荷特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No.1, pp1255-1260, 2008
- 2) 波多野 雄士, 三方 康弘, 井上 晋: ASR 劣化した PRC はり部材のせん断耐荷特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.1, pp981-986, 2008
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2003.3