

論文 ASRが生じたRCはり部材のせん断耐荷機構とUFCパネル接着による補強効果

松田 豊樹^{*1}・森川 英典^{*2}・瀧 靖文^{*3}・川口 哲生^{*4}

要旨: 近年, ASRによる鉄筋破断の報告がある。また, 定着破壊や付着破壊などの望ましくないせん断破壊形態に支配される可能性が示されている。そこで本研究では, 引張鉄筋の端部定着の有無により簡易的に鉄筋破断を模擬することに加え, UFCパネル接着による補強効果についても検討を行った。その結果, せん断耐力の低下は見られなかったが, ASRの影響で定着部における割裂破壊で終局し, その兆候も終局よりかなり前に生じた。加えて, 端部の定着を確保していない供試体においてその兆候は早く見られた。また, UFCパネル接着によってせん断補強した供試体は, 端部の定着の有無に関わらずその補強効果が確認された。

キーワード: ASR, RCはり部材, せん断, 端部定着, UFCパネル, 補強

1. はじめに

アルカリシリカ反応(以下ASR)が生じると, 材齢・使用材料等の条件が同じであっても温度・日射等の環境条件の違いによって, 劣化の進行度合いが異なることが知られている。また近年, ASRが生じることで鉄筋が破断する事例も報告¹⁾されており, 耐荷性能への影響が懸念されている。さらに, 定着破壊や付着破壊などの望ましくないせん断破壊形態に支配される可能性も懸念されており²⁾, 適切な維持管理を施すためにはASRが生じたRCはり部材のせん断耐荷性能の評価に加え, せん断耐荷力の向上および破壊形態の改善を目的とした補強が必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供試体を作製し, 屋外曝露環境でASR劣化を促進させ, ASRが生じることによってRCはり部材のせん断耐荷機構に生じる影響について検討を行った。加えて, 超高強度繊維補強コンクリート(以下UFC)パネル接着による補強効果についても検討を行った。

神戸市産砕石)を用いて作製した。反応性・非反応性骨材の混合比率は50%ずつとした。また, 促進劣化させるためのアルカリ添加剤については, 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Na₂O量で8kg/m³である。打設後2週間の湿布養生の後, 自然環境下で1年間曝露を行った。また曝露時, より実環境に近い状態で劣化の促進を行うため引張鉄筋側が上面となるようにして曝露を行った。

供試体の一覧を表-2に, 供試体の形状を図-1にそれぞれ示す。前述したように近年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。そこで本研究では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ている。また, 健全時にはせん断破壊する供試体でも, ASRが生じた供試体ではせん断耐力が増加し, 曲げ破壊が先行することが報告されている²⁾。そこで本研究の供試体については全て炭素繊維(以下CFRP)シート接着による曲げ補強を実施した。シート施工は, 屋外曝露終了後, 載荷試験直前に行った。また, はり端部には補強を施していない。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

RCはりに用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。供試体は, 反応性骨材(北海道産安山岩の砕砂, 砕石)と非反応性骨材(大阪府淀川水系産川砂および兵庫県

シート施工方法³⁾⁴⁾は以下に示す通りとした。シート接着界面を研磨した後, プライマーを塗布し, パテ施工を行った。パテ硬化後, シート(幅×長さ=130×900[mm])

表-1 示方配合

W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						AE 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

表-2 供試体一覧

供試体種類			UFC補強	供試体名
健全	せん断破壊型	定着有	無	S-1
		定着無	有	S'-NF-1
劣化	せん断破壊型	定着有	無	S'-F-1
		定着無	有	S'-NF-2

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 博士前期課程 (正会員)
 *2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 教授 工博 (正会員)
 *3 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 博士前期課程
 *4 太平洋セメント(株) 中央研究所技術企画部 工修 (正会員)

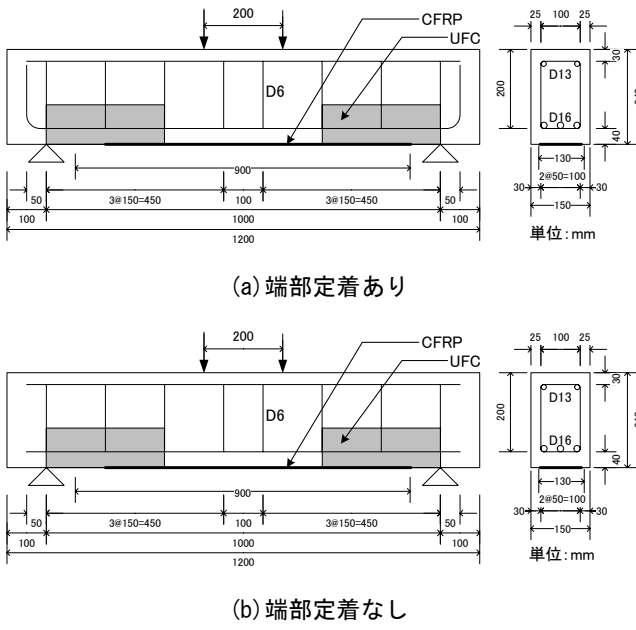


図-1 セン断供試体の側面図および断面図

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。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表-3に、シートの性質およびシートの素材試験結果を表-4にそれぞれ示す。

次に、せん断供試体におけるUFCパネル接着の施工方法を以下に示す。UFCパネル接着は供試体曝露後、シート施工後に行った。まず、UFCパネル接着界面をディスクサンダー、UFCパネル側接着面をダイヤモンドキャップホイールで研磨する。UFCパネル、コンクリートの両接着面に接着樹脂を塗布し、圧着固定した後、2週間の養生を行う。表-5に接着樹脂の性質を、表-6にUFCの物性値をそれぞれ示す。なお、本実験に使用したパネ

表-3 CFRP 接着に用いた接着樹脂およびパテの性質

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	-	-

表-4 CFRP シートの性質および素材試験結果

繊維目付 (g/m 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
破断ひずみ (μ)	17180

表-5 UFC パネル接着に用いた接着樹脂の性質

性能	圧縮強さ (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	圧縮弾性率 (kN/mm ²)
接着樹脂	73.5	23.5	3.7

表-6 UFC の材料特性値

性能	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
UFC	2.55	210	43	10.8	54

ルの厚さは、既往の研究⁵⁾によりコンクリートとの一体性が良いことが示された7mmとした。

2.2 非破壊検査概要

本研究では、ASRが生じた供試体の劣化状態を評価するために非破壊検査を実施した。

ひび割れ調査については、各供試体に生じた幅0.05mm以上のASRひび割れを対象とし、マーキングした。

膨張量測定は、鉛直方向および供試体軸方向と軸直角方向の3方向で測定を行った。コンタクトチップ貼付位置を図-2に示す。なお、標点間距離は100mmまたは150mmである。

超音波伝播速度の測定は円柱供試体、RCはり供試体について行った。測定は、円柱供試体では供試体高さ方向で行い、RCはり供試体では供試体軸方向と軸直角方向の2方向で行った。RCはり供試体における超音波伝播速度の測定位置を図-3に示す。

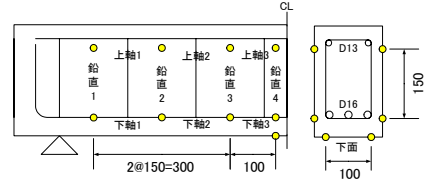


図-2 コンタクトチップ貼付位置 (単位:mm)

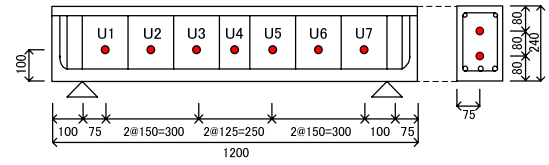


図-3 超音波伝播速度測定位置 (単位:mm)

3. 劣化状態の評価

3.1 ひび割れ調査

ひび割れ状況の一例を図-4に示す。また、ひび割れ調査より得られたひび割れ状況を定量的に扱うために、本実験ではひび割れ面積密度の算出を行った。ひび割れ長さ密度の算出は、上面、下面、側面については供試体軸方向×供試体軸直角方向=100×50(mm)のメッシュ、端面については50×50(mm)のメッシュで分割し、個々のメッシュ、または複数のメッシュ内のひび割れ長さ、ひび割れ面積(ひび割れ幅×長さ)の総和をそのメッシュ面積で除すことを行った。各面毎のひび割れ面積密度の算出結果を表-7に示す。

これらより、曝露面である下面においてもひび割れ面積密度は卓越しておらず、むしろ上面と比較して小さい値となっている。これは、上面と比較して下面の鉄筋量は多く、環境条件の違い以上に鉄筋の拘束鋼材量の違いが影響したものと考えられる。また、端部曲げ上げ定着を施した供試体においては、曲げ上げ鉄筋に沿うように

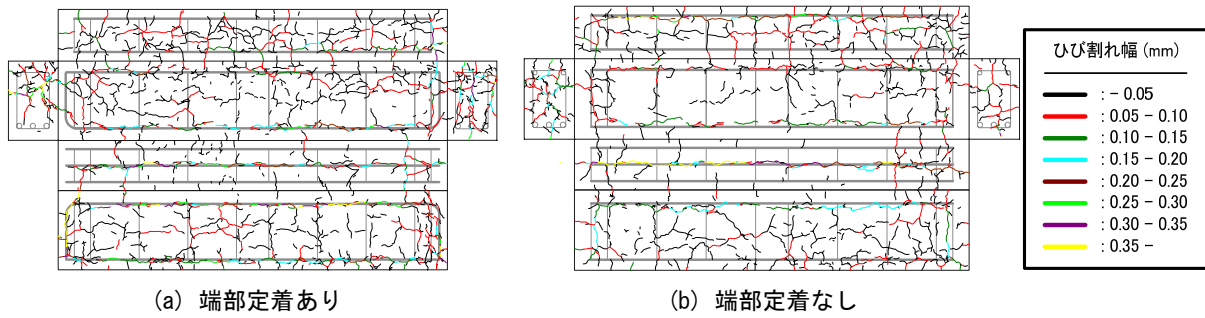


図-4 ひび割れ状況(材令 455 日)

表-7 ひび割れ面積密度測定結果

供試体名	ひび割れ面積密度 (cm ² /cm ²)				
	上面	下面	側面	端面	全面
S'-F-1	0.0027	0.0021	0.0031	0.0053	0.0031
S'-F-2	0.0035	0.0017	0.0026	0.0047	0.0028
S'-NF-1	0.0033	0.0032	0.0019	0.0030	0.0026
S'-NF-2	0.0036	0.0025	0.0028	0.0030	0.0030

表-8 膨張量測定結果

供試体名	膨張量 (μ)			
	下面		側面	
	軸直角	鉛直	上軸	下軸
S'-F-1	5852	5632	2645	1417
S'-F-2	2365	6074	2605	571
S'-NF-1	9640	5117	1431	1187
S'-NF-2	5388	6867	831	824

ひび割れが発生しており、端面のひび割れ面積密度が他面より大きくなっている。端部曲げ上げ定着を施していない供試体においてはそのようなひび割れは見られていない。また、本研究の供試体では、ひび割れ幅が大きい主なひび割れは鉄筋に沿う様にして発生しており、特に側面の引張鉄筋沿い、下面の中央鉄筋沿いにおいて顕著に進展している。

3.2 膨張量

膨張量測定結果を表-8 に示す。表より、供試体種類に関わらず、膨張量の大きさは下面軸直角方向と鉛直方向が大きく、上軸、下軸方向は比較的小さい。これは環境条件の影響を最も受けやすく、鉄筋による拘束効果も小さい下面軸直角方向の膨張量が大きくなり、供試体側面においては、鉄筋による拘束効果が小さい鉛直方向の膨張量が軸方向より大きくなったものと考えられる。また、下軸と比較して上軸の膨張量が大きくなっているのは、鉄筋による拘束効果が小さいためであると考えられる。以上から、環境条件と鉄筋の拘束効果が劣化程度に影響しているものと考えられる。

3.3 超音波伝播速度

超音波伝播速度の供試体軸直角方向と軸方向の平均値の比較を図-5 に示す。図より、曝露を行っておらず ASR が生じていない健全供試体 S-1 では、超音波伝播速度は軸直角方向で 4400(m/s)程度、軸方向で 4500(m/s)程度であるが、曝露後 1 年が経過し ASR が進行することで端部の定着の有無に関わらず軸直角方向で 400～

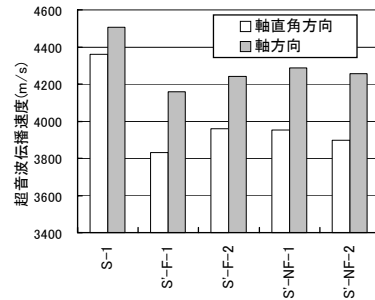


図-5 超音波伝播速度測定結果(軸、軸直角方向)

500(m/s)、軸方向で 300(m/s)程度、超音波伝播速度に低下が見られた。しかし、端部の定着の有無によって超音波伝播速度に顕著な差は見られなかった。また、供試体種類に関わらず、軸直角方向と比較して軸方向の超音波伝播速度が速く、軸方向より軸直角方向の劣化が進んでいることがわかる。これは、軸直角方向と比較して軸方向では拘束効果が大きく、劣化程度に差が生じたためであると考えられる。

3.4 力学的性能

コンクリートの力学的性能を検討するために円柱供試体(φ100×200[mm])を作製した。はり供試体と同配合、同条件で打設し、同じ環境で同じ期間曝露した。円柱供試体の圧縮試験結果を表-9 に示す。なお、ここでの健全供試体はアルカリ添加剤 NaCl を添加しておらず、材齢 28 日で載荷を行った。

表より、ASR 劣化供試体において供試体全面において 0.05mm 程度のひび割れが見られたが、圧縮強度の低下は見られなかった。これは、ASR による強度低下よりも水和反応による強度増加が大きかったため、健全供試体と比べ圧縮強度が増加したと考えられる。しかし、弾性係数には顕著な低下が見られた。既往の研究で ASR の影響は弾性係数に表れることが明らかになっており⁶⁾、本研究でも同様の結果が得られた。

表-9 圧縮強度試験結果

曝露期間	材令	供試体種類	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
0年	28日	健全	31.3	25.3
1年	455日	ASR	34.6	12.9

表-10 載荷試験結果

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	せん断破壊荷重計算値(kN)			60kN時剛性 (kN/mm)	せん断ひび割れ 発生荷重(kN)	付着割裂ひび割れの 兆候が生じた荷重(kN)	破壊形態
			示方書	二羽式	ストラットタイ				
S-1	36.9	238.4	178.5	212.6	273.1	247.7	118.0	-	斜め引張
S'-F-1	32.7	259.5	176.0	207.0	265.5	182.6	159.0	167.0	定着部割裂
S'-F-2	32.7	273.6	-	-	-	140.5	216.0	235.0	
S'-NF-1	32.7	245.0	176.2	209.0	257.7	173.9	118.0	152.0	
S'-NF-2	32.7	263.3	-	-	-	192.1	159.0	184.0	

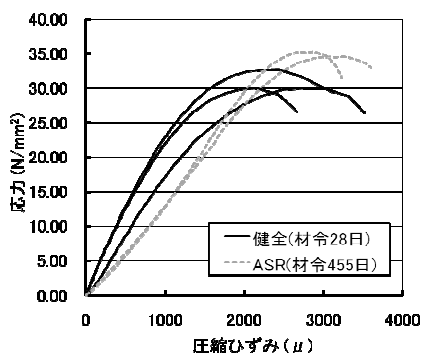
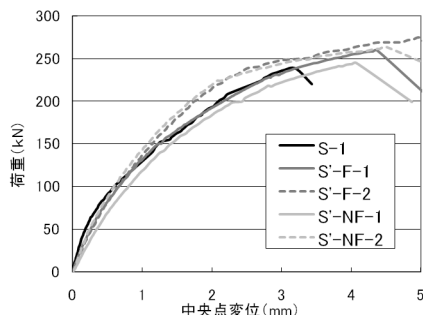
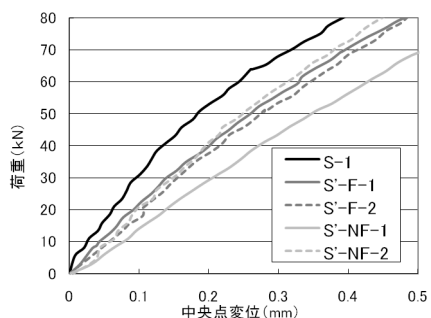


図-6 応力-ひずみ関係(円柱供試体)



(a) 全体図



(b) 初期荷重時

図-7 荷重-変位関係

次に、図-6に円柱供試体の応力-ひずみ関係を示す。これより、劣化供試体において最大応力時の圧縮ひずみは増加していることがわかる。よって、ASRが生じたコンクリートは、変形抵抗性の低下に加え、最大応力時の変形量自体も大きくなることわかった。

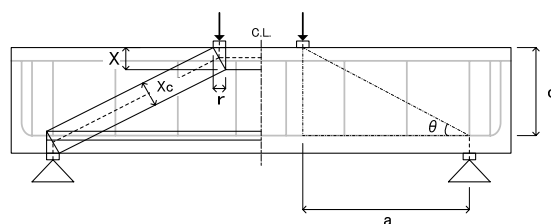
4. せん断耐荷機構と UFC パネル接着による補強効果に関する検討

4.1 載荷試験結果

載荷試験結果を表-10に、荷重-変位関係を図-7に

表-11 モデルの各設定値

供試体名	r (mm)	X (mm)	Xc (mm)	a (mm)	d (mm)	θ (°)
S-1	12	71.7	69.3	402	205	27.2
S'-F-1	10	61.5	59.4	400	202	26.8
S'-F-2	10	60.6	58.6	400	203	26.9
S'-NF-1	10	59.5	57.6	400	202	26.8
S'-NF-2	10	61.0	58.8	400	205	27.1



※ X: 両載荷板間の圧縮領域の幅, Xc: 載荷板-支承板間を繋ぐストラット部の幅
r: 載荷板の幅, a: せん断スパン, d: 有効高さ, θ: 圧力線傾斜角

図-8 ストラットタイモデル

示す。せん断破壊荷重計算値には二羽式評価値、式(1)~(3)を使用した⁷⁾。

$$V_u = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = 0.2f_c'^{1/3} (10^3/d)^{1/4} p_w^{1/3} (0.75 + 1.0 \cdot 4d/a) b_w d \quad (2)$$

$$V_s = A_w f_{wy} (z/s) \quad (3)$$

ここで、 f_c' : コンクリート圧縮強度(N/mm²)、 p_w : 軸方向鉄筋比、 a : せん断スパン長(mm)、 d : 有効高さ(mm)、 b_w : 幅(mm)、 A_w : せん断補強鉄筋1組の断面積(N/mm²)、 f_{wy} : せん断補強鉄筋降伏強度(N/mm²)、 $z = (7d)/8$ である。

加えて、せん断破壊荷重においては、ストラットタイモデルによるせん断耐荷力の評価も行った。評価に用いたモデルを図-8に、各供試体における設定値を表-11に示す。供試体は左右対称のため半分のみを表示している。また、ひび割れ性状を図-9に示す。まず、CFRPシート接着による曲げ補強のみを行った供試体について比較を行う。健全供試体 S-1 は斜め引張破壊に近いせん断破壊で終局したのに対して、ASR劣化供試体は端部の定着の有無に関わらず、引張鉄筋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生じ、せん断ひび割れの発達が見られたが、徐々に引張鉄筋に沿ったひび割れが顕著となって定着部の破壊に至った。初期剛性においては健全供試体と比較して劣化供試体で低下が見られたが、最大荷重は健全供試体と比較して劣化供試体において増加する結果が得られた。また、その値は健全供試体では二羽式評価値と近い値となっているが、

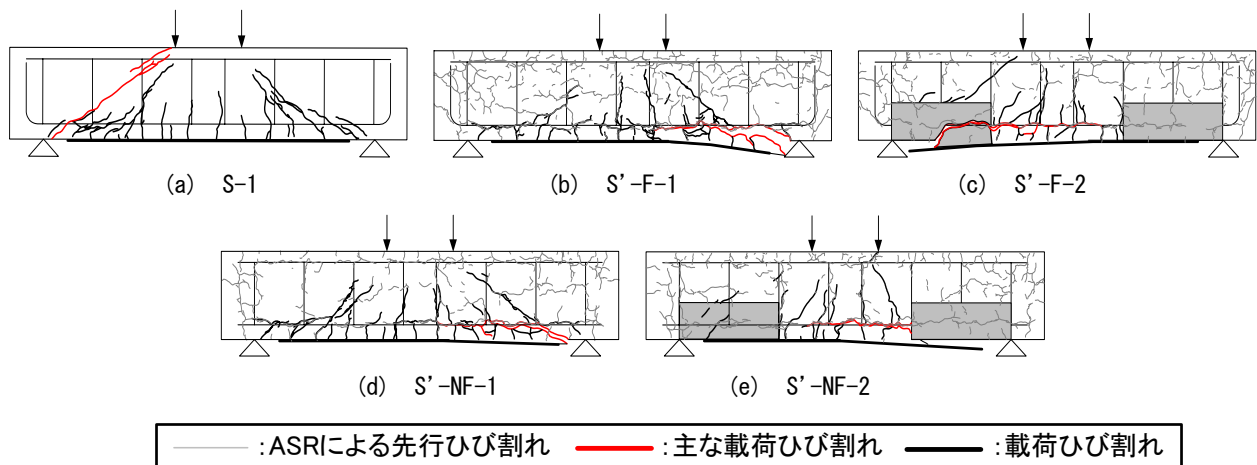


図-9 ひび割れ性状

劣化供試体ではストラットタイによるせん断破壊荷重と同程度となった。劣化供試体では、シート補強供試体の荷重試験後、定着部の割裂破壊で剥き出しになった引張鉄筋とコンクリートの間には隙間が見られていることから、ASRにより付着強度が低下し、荷重の進展に伴い付着すべりが生じたと考えられる。つまり、引張鉄筋とコンクリート間の付着が低下することにより、せん断耐荷機構が一部アーチ機構に移行し、部材軸と傾斜した圧縮ストラット部で支配的に抵抗することで、せん断耐力が増加したものと考えられる。しかし、最終的な破壊の形態は引張鉄筋定着部における付着割裂破壊であり、望ましいせん断破壊形態であるとはいえない結果となった。また、端部の定着を確保した供試体 S'-F-1 と確保していない供試体 S'-NF-1 を比較すると、端部定着を確保した S'-F-1 が定着を確保していない S'-NF-1 よりせん断耐力が大きくなった。しかし、ASR 先行ひび割れに沿うようにして発達した割裂ひび割れは、S'-F-1 では 167kN 前後、S'-NF-1 では 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である付着割裂破壊の兆候が見られた。この破壊形態は鉄筋とコンクリートの一体性を失うものであり、設計上想定しにくい、望ましくない破壊形態であると考えられる。

次に、CFRP シート接着による曲げ補強に加え、UFC パネル接着によるせん断補強を行った供試体について比較を行う。シート補強のみを行った ASR 劣化供試体は、せん断ひび割れが引張鉄筋直上の先行ひび割れに沿うように進展していき、最終的に定着部におけるコンクリートの割裂破壊で終局した。そこで定着部の破壊を抑制するように図-1 のように UFC パネル接着を行った。しかし、端部の定着の有無に関わらず最終的に定着部におけるコンクリートの割裂破壊で終局した。しかし、シート補強のみを行った劣化供試体と比較して最大荷重は 15~20kN 増加した。剛性に関しても、端部定着を確保し

た S'-F-1 ではせん断ひび割れ発生荷重である 159kN 以降で剛性の低下が見られるのに対して、UFC パネル補強を行った S'-NF-2 では低下は見られなかった。また、せん断ひび割れ発生荷重は 216kN であり、UFC パネルによりせん断ひび割れの発生を抑制したと考えられる。特に、端部の定着を確保していない S'-NF-1 と S'-NF-2 では初期剛性から差が大きく見られた。また、シート補強のみを行った ASR 劣化供試体は最大荷重に到達するかなり前である 160kN 前後で付着割裂破壊の兆候が見られたのに対して、S'-F-2 では 235kN、S'-NF-2 では 184kN 前後で UFC パネルにひび割れが入り始め、UFC パネルの剥離兆候が見られてまもなく終局に至った。これより、UFC パネル補強により最大荷重が増大すること以上に望ましくない破壊形態の抑制に効果があったと考えられる。

4.2 鉄筋ひずみ分布

本研究では、中央の引張鉄筋において鉄筋ひずみゲージを貼り付け、荷重時に鉄筋ひずみの測定を行った。

図-10 に劣化供試体における引張鉄筋ひずみ分布を示す。なお、S'-F-2、S'-NF-2 における灰色部は、UFC パネルで補強された範囲を示している。まず、端部曲げ上げ定着ありの供試体 S'-F-1、S'-F-2 を比較すると、S'-F-1 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、S'-F-2 では最大荷重後も端部の付着が確保されており、UFC パネル補強が鉄筋付着に対して効果を発揮していることが見受けられる。次に、端部曲げ上げ定着なしの供試体 S'-NF-1、S'-NF-2 を比較すると、S'-NF-1 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ことが分かる。一方、S'-NF-2 は S'-NF-1 で鉄筋端部のひずみが急増した 180kN 付近を越えても端部付着を確保していることから、UFC パネルによる補強効果が確認できるが、最終荷重付近では端部付着が確保されていない結果となった。しかし、引張鉄筋上に UFC パネル補強を施すことで鉄筋端部の付着すべりをある程度抑制す

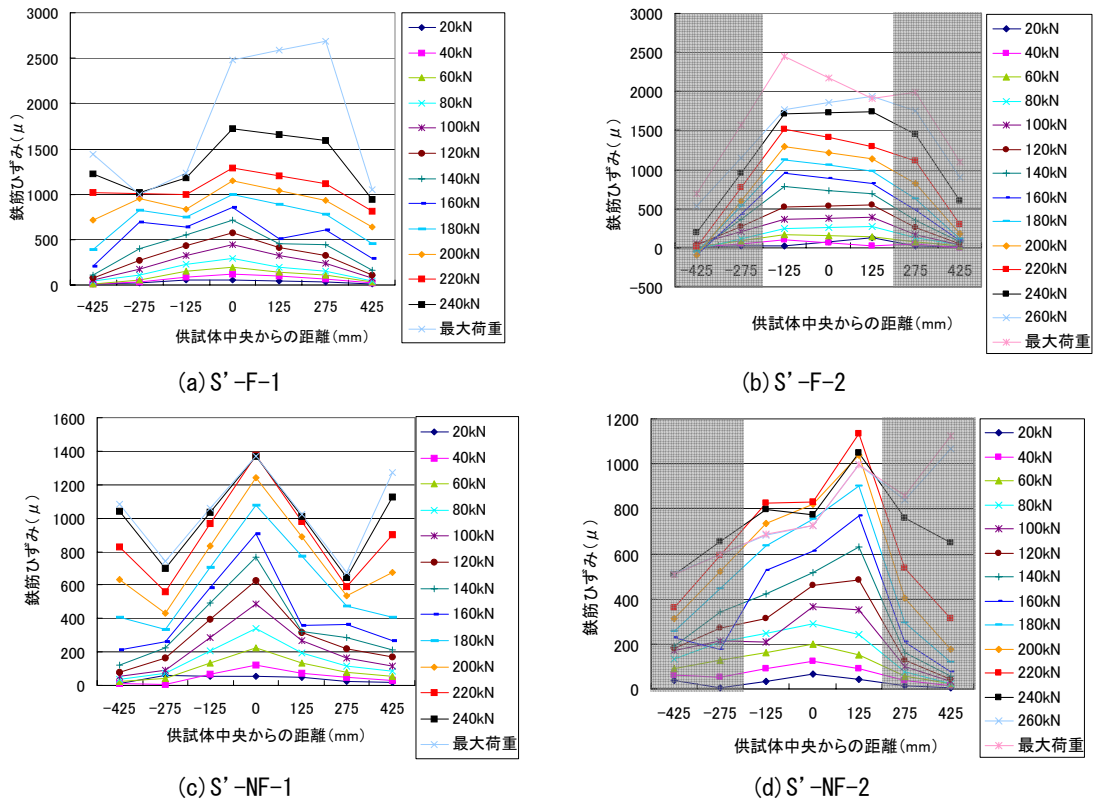


図-10 引張鉄筋ひずみ分布

ることができ、定着部の割裂破壊に対して効果があると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ひび割れ調査結果より、ひび割れ幅の大きい主なひび割れは主鉄筋沿いに生じている。また、端部曲げ上げによる定着の有無によりひび割れ状況が異なることがわかった。
- (2) 膨張量、超音波伝播速度の測定結果より、環境条件および拘束鋼材比の違いにより劣化状態が異なることがわかった。また、端部の定着の有無によって劣化程度に顕著な差は見られなかった。
- (3) 荷重試験の結果より、ASRの進行に伴うせん断耐力の低下は見られず、引張鉄筋の付着すべりによってせん断耐力機構の一部がアーチ機構に移行し、せん断耐力が増大することがわかった。しかし、最終的に引張鉄筋の付着割裂・定着破壊が生じることがわかった。また、終局よりかなり前に付着割裂破壊の兆候が生じることがわかった。
- (4) 荷重試験の結果より、端部の定着を確保した供試体より、端部定着を確保していない供試体がせん断耐力は小さくなることがわかった。また、付着割裂破壊の兆候も端部定着を確保していない供試体で早く生じることがわかった。
- (5) 荷重試験結果および鉄筋ひずみ分布より、引張鉄筋

上に UFC パネル補強を施すことで鉄筋端部の付着すべりをある程度抑制することができ、定着部の割裂破壊に対して効果があることがわかった。

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たな対応－，コンクリートライブラリー 124，2005.8.
- 2) 北野剛，森川英典，湯浅康史，小林秀恵：ASR劣化したRCはり部材のせん断耐荷機構に関する実験的評価，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，第7巻，pp.77～84，2007.11.
- 3) 全国上下水道エポキシ工事業協会：炭素繊維ライニング補強工法，1999.7.
- 4) 阪神高速道路株式会社：CFシートを用いたRC床版の補強要領(案)，pp.8～11，1999.3.
- 5) 笠松大輔，森川英典，高田祐介，川口哲生：超高強度繊維補強コンクリートパネル接着によるRC部材の補強効果の評価，土木学会年次学術講演概要集V，pp.997～998，2008.9.
- 6) 岩田卓，森川英典，北野剛，小林秀恵：ASRにより劣化したコンクリートおよびRC部材の状態評価，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，第8巻，pp.201～208，2008.10.
- 7) 二羽淳一郎：コンクリート構造の基礎，数理工学社，2005.11.