# 論文 ASR 膨張を生じたコンクリートと鉄筋の付着割裂特性に関する研究

山本 貴士\*1・葛目 和宏\*2・玉越 隆史\*3・宮川 豊章\*4

要旨:鉄筋破断の生じた ASR 劣化構造物において鉄筋の付着・定着機能が十分発揮されない場合,構造物の 耐荷性能が低下する可能性がある。本研究では,ASR 劣化コンクリートと鉄筋の付着特性を明らかにするこ とを目的として,反応性骨材を用いて作製したコンクリート供試体を促進膨張劣化させ,ASR 膨張を生じた コンクリートと鉄筋の付着挙動を検討した。その結果,最大 0.13%程度までの軸方向の膨張量においては, 横補強筋に破断が見られず有効に膨張を拘束していれば付着強度の低下は生じないことがわかった。また, 試験結果をもとにした ASR 劣化 RC 部材の耐荷性能評価における破断鉄筋の考慮方法を示した。 キーワード: ASR,鉄筋破断,付着割裂,超音波伝播速度,横補強筋

#### 1. はじめに

これまで報告されている ASR 劣化構造物中の鉄筋破 断は,鉄筋のコンクリート中での定着を確保するために 施された曲げ加工域や閉合部で生じていることが多い。 RC 構造は,コンクリートと一体化した鉄筋が主として 引張材として機能することでその力学的性能を発揮す る。したがって,破断した鉄筋であってもコンクリート との一体性が確保できていれば引張材として十分に機 能する。しかし,ASR 劣化した部材でコンクリートが膨 張にともなう劣化損傷を受けると鉄筋とコンクリート の付着性能が低下すると考えられる。すなわち,構造細 目によって確保されていた定着が,破断によって損なわ れ,さらにコンクリートのASR 膨張劣化にともなって鉄 筋の十分な定着性能が発揮されず耐荷性能が低下する ことが予想される。

そこで本研究では、反応性骨材を用いて作製したコン クリート供試体に対して促進暴露によって ASR 膨張劣 化を生じさせ、劣化した供試体中の鉄筋に対して引抜き 試験を行い、ASR 膨張が鉄筋の付着・定着特性に与える 影響を明らかにすることを目的とした。

### 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体の形状・寸法を図-1 に示す。幅×高さ=200<sup>B</sup>× 300<sup>H</sup> mm の矩形断面を有する全長(付着試験長さ)が 400(200), 400(300), 400(330), 500(400)mm の引抜き供試 体を作製した。コンクリートは,水セメント比 0.63 の配 合とした。反応性細骨材および粗骨材(北海道産安山岩)



\*2 (株) 国際建設技術研究所 代表取締役社長 工修 (正会員)

\*3 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部道路構造物管理研究室 室長 工修

\*4 京都大学 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

と,非反応性細・粗骨材を,それぞれペシマムとなる割 合で配合した。また,等価アルカリ量 8.00kg/m<sup>3</sup>となる よう NaOH を添加した。

引抜き試験対象の鉄筋は、すべての供試体でかぶり 25mm で配筋した。D16 (SD295A) および D19 (SD295A) を用いる供試体では、後述の 2.2(1)に示すかぶり鉄筋径 比にて断面隅角部に 4 本配置した。これらの供試体は、 いずれも健全において鉄筋降伏前に付着割裂破壊に至 る設計とした。一方、D10 (SD295A)を用いる供試体で は、後述の 2.2(4)に示す付着試験長さにて、1 供試体に 付き断面短辺中央上下端に1本ずつ、合計2本を配置し た。これらの供試体は、付着試験長さの最も短い 200mm であっても健全において鉄筋降伏に至る設計とした。鉄 筋の付着試験長さ以外の非付着区間には 0.2mm 厚のビ ニルシートを鉄筋周囲に布テープで巻きつけてコンク リートとの付着を切った。

供試体は, 脱型後 28 日間散水湿布養生を行い, それ 以降は4日間40℃(95%RH)と3日間20℃(60~70% RH)を1サイクルとする促進暴露環境下に277日置いた。 健全供試体の配合は促進暴露用供試体と同じとし,引抜 き載荷試験を膨張前(未膨張時)に行った。健全供試体 は各要因1体ずつ, ASR 劣化供試体は各要因2体ずつ

(D10 供試体では1体ずつ)作製した。また,自由膨張 挙動を測定するために,鉄筋を配さない同形状・寸法の 供試体を1体作製した。

# 2.2 実験要因

# (1) かぶり鉄筋径比

かぶりと鉄筋径の比(c/\0, c:かぶり, \0;鉄筋径)は, コンクリートと鉄筋の付着に影響を与える。これまで, c/\0の大きな供試体での検討は見られるが,引抜き対象の 鉄筋周辺のコンクリートの膨張拘束が小さくなると考 えられる c/\0の小さな領域での検討が必要である。そこ で,かぶりを一定(25mm)とし,鉄筋にD16(SD295A), およびD19(SD295A)の2種類を用いてかぶり鉄筋径比 の影響を検討した。このとき,かぶりと鉄筋径の比 c/\0 は,それぞれ1.6,1.3となる。

### (2) 横補強筋の有無

引抜き対象の鉄筋を取り囲む横補強筋の有無は, コン クリートと鉄筋の付着に影響を与える。また, ASR によ るコンクリートの膨張は, 横補強筋の有無による拘束状 態の相違によって異なる。そこで, 引抜き対象鉄筋に対 して横補強筋がないものと, 引抜き対象鉄筋を取り囲む 形で 135°フック付き D6 (SD295A) スターラップを横 補強筋として配筋したもので比較検討した。

横補強筋の配筋量は,面積比 pw (=Aw/(b·s<sub>s</sub>), Aw:横 補強筋配筋間隔内における横補強筋の総断面積 (D6:31.67mm<sup>2</sup>×4), b:供試体幅(200mm), s<sub>s</sub>:横補強筋 配筋間隔(200mm))で0.16%である。

# (3) 横補強筋隅角部破断の有無

横補強筋隅角部破断が,主筋の付着・定着特性あるい は膨張拘束効果に与える影響を検討するために,横補強 筋隅角部の破断の有無について検討した。隅角部の破断 は,横補強筋の各辺の直線部に相当する部分に対して D6 の直線筋を組み合わせて作製することにより模擬した。 破断を模擬した横補強筋の概要を図-1に示す。

#### (4) 付着試験長さ

ASR 膨張劣化コンクリート中で引張を受ける鉄筋が 降伏するために必要な付着長を検討するために,付着試 験長さを 200mm, 300mm および 400mm の 3 種類を設定 した。これらは,引抜き対象の鉄筋として D10 (SD295A) を用い,かぶり 25mm としてかぶり鉄筋径比 c/φ=2.6 と なる供試体を用いて検討した。

以上の供試体一覧を,膨張劣化指標測定および引抜き 載荷試験結果とともに表-1に示す。

### 2.3 膨張劣化指標の測定項目

(1) 膨張率

ASR 膨張量の測定は、コンタクトゲージ(精度 1/1000mm)法で行った。測定用の標点プラグは、アクリ ル板にゲージプラグをネジ留めしたものを打設時に型 枠底面および打設面に設置することで供試体に埋め込 んだ。測定用ゲージプラグの埋め込み位置を図-2に示 す。軸方向の長さ変化は、検長 250mm にて供試体 1 体 につき計4点(打設面2点,底面2点)で測定した。横 方向の長さ変化は、検長 150mm にて計4点(打設面2 点,底面2点)で測定した。膨張率は、測定した膨張量 をそれぞれの基長で除すことにより求めた。

### (2) ひび割れ密度

供試体の表面にて 0.1mm 以上の幅を有するひび割れ をスケッチした。このひび割れスケッチを用い,幅0.2mm 以上のひび割れ幅に対して,その総延長を供試体の表面



ASR	鉄筋	$c/\phi^{*1}$	p* <sup>2</sup> (%)	p <sub>w</sub> * <sup>3</sup> (%)	横補強筋 破断	L* <sup>4</sup> (mm)	f'c* <sup>5</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向 膨張率 (%)	軸直角 方向 膨張率 (%)	ひび割れ 密度 (m/m <sup>2</sup> )	超音波 伝播速度 (m/s)	$\frac{{\tau_b}{*}^6}{(N/mm^2)}$	破壊 形式* <sup>7</sup>
健全	D10	2.6	0.23	0		200 300 400	17.5					Y Y Y	
	D16	1.6	1.3	0	なし	330						3.42 3.58	S S
	D19	1.3	1.9	0								3.39	S
				0.16	 あり							3.87	S S
劣化	D10	2.6	0.23			200	26.3	0.48	0.53	6.81	3410		Y
				0		300		0.41	0.63	6.97	3480		Y
						400		0.33	0.76	9.81	3610		Y
	D16	1.6	1.3	0				0.11	0.60	6.62	3450	3.34	S
				Ū		330		0.13	0.55	6.25	3420	3.39	S
				0 16	なし			0.08	0.39	4.36	3450		Y
				0.10				0.07	0.45	4.62	3470		Y
	D19	1.3	1.9	0				0.04	0.74	8.07	3260	3.06	S
								0.06	0.57	5.75	3480	3.01	S
				0.16	なし			0.06	0.50	4.49	3360	4.40	S
								0.04	0.43	5.19	3440	4.44	S
					あり			0.12	0.47	5.16	3410	3.21	S
								0.08	0.44	4.99	3330	3.08	S

表-1 実験要因および結果

\*1: かぶり鉄筋径比, \*2: 鉄筋比, \*3: 横補強筋比, \*4: 付着試験長さ, \*5: コンクリート強度,

\*6: 付着強度, \*7: 破壊形式 (S: 付着割裂, Y: 鉄筋降伏)



## 図-3 引抜き載荷試験の概要

積で除すことによりひび割れ密度(m/m<sup>2</sup>)とした。

### (3) 超音波伝播速度

超音波伝播時間の測定位置を図-2 に示す。超音波の 伝播が鉄筋の影響を受けることが想定される鉄筋近傍 ではなく,供試体の中央軸方向において透過法による超 音波の伝播時間を計測した。測定距離を伝播時間で除す ことにより伝播速度(m/sec)を算出した。

# 2.4 引抜き載荷試験および測定項目

引抜き載荷装置の概要を図-3 に示す。鉄筋をセンタ ーホール型油圧ジャッキに通し,鉄筋の端部に鋼板2枚 を溶接して定着し,引抜き力を与えた。載荷は荷重端変 位で制御し,約0.05mm毎に計測しながら変位を漸増さ せた。引抜き荷重,自由端変位,荷重端変位を測定した。

### 3. 実験結果および考察

### 3.1 膨張劣化性状

膨張測定および載荷試験結果の一覧を表-1に示す。 供試体軸方向の膨張率は、軸方向の鉄筋比が大きくな るにつれて小さくなった。鉄筋拘束の小さい D10 供試体 では、約 0.48%までの膨張が現れた。これに対し、鉄筋 比 1%以上の D16 および D19 供試体では、最大でも 0.13% 程度であった。供試体軸直角方向の膨張率についても、 横補強筋ありの供試体(横補強筋比 0.16%)で 0.39~ 0.50%と、横補強筋なしの供試体(0.55~0.74%)に比べ て小さく抑えられている。

また,供試体軸方向の膨張率は,横補強筋破断なしの 方が破断ありに比べて小さくなった。軸方向の膨張量測 定位置は,横補強筋の破断模擬位置に近い鉄筋直上であ る。このため,破断位置で拘束力が小さくなっている破 断あり供試体で,ひび割れがひずみ測定区間と交差する ことがあり,その場合膨張率が大きく測定されたと考え られる。これに対し,横方向の膨張率は,破断の有無の 影響が見られない。横方向の膨張量測定位置は,横補強 筋破断模擬位置を端部とする内側であり,破断を模擬し ていても横補強筋の直線部分の拘束の影響で,破断模擬 の有無の影響が現れなかったと考えられる。 膨張ひび割れの状況の一例を図-4 に示す。供試体表 面には 0.1mm 以上の不規則なひび割れが多数生じてい たが,引抜き対象の鉄筋に沿った顕著なひび割れは確認 できなかった。ひび割れ密度は,D10 供試体で 7~10m/m<sup>2</sup>, D16,D19 供試体で 4.5~8m/m<sup>2</sup>程度,特に横補強筋なし の供試体で 6m/m<sup>2</sup>以上となるものがあった。

超音波伝播速度は、すべての ASR 劣化供試体において 3300~3500m/s 程度であった。なお、劣化前の健全状態 での超音波伝播速度は、同配合の供試体(劣化供試体と 同一の供試体ではない。)において約4700m/sであり、健 全時より1000 m/s程度低下したと推定できる。ASR コン クリートへの適用性は不明であるが、参考までに超音波 伝播速度によるコンクリート品質分類の一例<sup>1</sup>に照らし 合わせると、3100~3700 m/sの「やや良」の域にあるこ とになる。また、本研究では、引抜き試験を行った劣化 供試体の健全時の超音波伝播速度を測定していなかっ た。このため、以降の考察において、超音波伝播速度の測定





(b) 横補強筋あり, 破断なし





精度や信頼性を考慮すると、点検において、ASR 劣化を 生じた箇所の健全時の超音波伝播速度が既知である場 合には、速度の絶対値でなく劣化による相対的な低下率 を指標とするのが望ましいと考えられる。

# 3.2 引抜き載荷試験結果

# (1) かぶり鉄筋径比の影響

横補強筋なしD16およびD19供試体の付着強度-膨張 率関係を図-5に示す。付着強度,膨張率ともに供試体 2体の平均値でプロットしている。

いずれの供試体も最大付着応力に到達するまで自由 端変位がほとんど増加せず,最大付着応力以降は急激な 割裂ひび割れをともなった付着割裂破壊に至った。

D19 供試体では、0.06%程度の膨張によって若干の付 着強度の低下が見られた。一方、D16 供試体は D19 供試 体よりも大きな膨張率(0.13%)に至っているものの、 付着強度の低下は見られなかった。すなわち、かぶりの 小さい鉄筋の方が鉄筋引抜けに対する拘束抵抗力が小 さく、ASR 膨張ひび割れにともない低下した鉄筋周辺コ ンクリート強度の影響が大きく現れたといえる。

ただし、いずれの供試体においても、最大 0.13%程度 の軸方向膨張率の劣化までの範囲においては、コンクリ ート標準示方書<sup>2)</sup>の付着強度(コンクリート強度 30N/mm<sup>2</sup>で2.70N/mm<sup>2</sup>)を満足している。

# (2) 横補強筋の有無の影響

横補強筋なしおよび横補強筋ありD19供試体の付着強



図-5 付着強度-膨張率関係(かぶり鉄筋径比の影響)



図-6 付着強度-膨張率関係(横補強筋有無の影響)



図-7 付着強度-膨張率関係(破断の有無の影響)

度-膨張率関係を図-6に示す。

横補強筋の有無に係わらず,最大付着応力に到達する まで自由端変位がほとんど増加せず,最大付着応力以降 は割裂ひび割れをともなった付着割裂破壊に至った。

軸方向膨張量 0.06%程度の膨張において,横補強筋な しでは付着強度が若干低下する傾向にあるのに対し,横 補強筋ありでは付着強度が増加している。横補強筋が軸 直角方向への膨張を拘束することによって生じる引抜 き鉄筋周辺への圧縮拘束力の作用によって付着力が向 上したと考えられる。D16 供試体の横補強筋ありでは, 健全供試体で付着割裂破壊が生じているのに対し,この 拘束効果によって,ASR 膨張を生じたものは全ての鉄筋 において引抜き荷重が鉄筋の降伏荷重に達して鉄筋が 降伏した。既往の研究成果<sup>3)</sup>では,かぶり鉄筋径比 c/φ=4 の付着試験供試体で 0.15%程度の膨張量において,健全 に比べて付着強度が増加している。今回の D16 および D19 供試体は, c/φ =1.3~1.5 と既往研究よりも小さく, 拘束の効果が現れにくいことも想定できたが,同様に膨 張拘束による付着強度の増加が見られた。

### (3) 横補強筋隅角部破断の有無の影響

横補強筋隅角部の破断なし,破断ありの D19 供試体の 付着強度-膨張率関係を図-7 に示す。

横補強筋隅角部の破断がない供試体では,ASR 膨張に よって付着強度が増加していたのに対し,隅角部の破断 がある供試体では付着強度の低下が見られた。隅角部の 破断模擬位置は引抜き対象鉄筋周囲であり,この位置の コンクリートの膨張拘束が十分でなく,膨張ひび割れに よるコンクリートの強度低下が局所化した可能性があ る。ただし,あらかじめ横補強筋隅角部に不連続部を設 けているため,横補強筋が破断してから膨張ひび割れに 対する拘束が減少するであろう実際の破断をともなっ た ASR 劣化以上に厳しい条件となっていることが予想 される。なお,載荷試験中に確認はできていないが,引 抜き荷重作用時に付着割裂破壊の進展が隅角部の破断 位置に集中し,特に ASR 膨張を生じている場合において, この拘束の小さい隅角部破断位置に集中した膨張ひび



割れの影響が大きく現れた可能性もある。

#### (4) 付着試験長さの影響

鉄筋が降伏するために必要な付着長を検討したD10供 試体では,健全およびASR劣化のいずれの供試体につい ても引抜き荷重が鉄筋の降伏荷重に達しており鉄筋が 降伏した。このように,付着長 200mm でも鉄筋降伏が 生じていることから, c/фが 2.6以上あれば,鉄筋に沿っ たひび割れのない軸方向膨張率 0.48%までの範囲におい て,少なくとも鉄筋径の 20 倍の付着長があれば定着が 可能であると考えられる。

#### (5) 超音波伝播速度と付着強度の関係

付着強度-超音波伝播速度関係を図-8に示す。なお, ASR 劣化供試体のすべての鉄筋について付着強度をプ ロットした。

付着強度と伝播速度の関係に明らかな関係は認めら れないが、伝播速度3,500m/sを下回った場合、付着強度 の低下が大きなものもみられる。このことから、十分な 付着強度を期待できる超音波伝播速度値の下限として、 3,500m/sを設定できる可能性がある。ただし、超音波伝 播速度の測定結果の項でも述べたように、劣化前に内部 欠陥やひび割れがない状態で、超音波伝播速度約 4,500m/s以上を有するコンクリートにおいて、ASR 膨張 劣化が生じた場合が対象となる。

# 3.3 ASR 劣化 RC 部材の耐荷性能評価における破断鉄筋 の考慮方法

ASR 劣化部材の保有耐荷性能照査において,破断損傷 した鉄筋が有効に引張材として機能するか否かは,当該 鉄筋の付着に着目することで判断できる。しかし,付着 強度の低下を定量的に取り扱うことができるまでの知 見は,現時点で不足している。そこで,ASR 劣化したコ ンクリートと鉄筋の付着は鉄筋周囲のひび割れや浮き を判断材料に,鉄筋に沿ったひび割れが存在する場合に は付着力が喪失あるいは喪失している恐れがある<sup>4)</sup>とし て,安全側に評価することが多いと考えられる。これに 対し,鉄筋に沿ったASR 膨張ひび割れがない場合であっ ても,耐荷性能評価にあたって破断した鉄筋を完全に考 慮しない算定とした場合,極度に安全側の評価に結びつ くこともありうる。そこで以下では,本研究の成果を利 用した,劣化程度によって有効に機能する鉄筋とそうで ない鉄筋をスクリーニングする一手法を提示する。

まず,破断した鉄筋に沿ったひび割れがない場合において,鉄筋周囲のコンクリートの劣化程度を超音波伝播 速度により把握する。超音波伝播速度が3,500m/sを下回 らないとき,前述のとおり,対象とする鉄筋の付着強度 は少なくとも設計時の強度は下回っていないと判断で きる。すなわち,この対象とする破断鉄筋は耐荷性能算 定に考慮しても良いと云える。なお,鉄筋に沿ったひび 割れが存在する場合<sup>5)</sup>や超音波伝播速度が3,500m/sを下 回る場合は,本研究の成果を超える劣化範囲となる。例 えば,かぶり鉄筋径比1.5,軸方向膨張率約0.15%の劣化 において,横補強筋のない場合,付着強度が健全時の40% 程度まで低下するとした既往の研究成果<sup>6</sup>などを含めて, 更なる検討を必要とする。

さらに,超音波伝播速度が3,500m/sを下回らないとき, 対象とする鉄筋を取り囲む横補強筋の有無に着目する。 横補強筋が存在し,この横補強筋の隅角部が破断してお らず健全な状態であるならば,ASR 膨張劣化が生じてい ても膨張拘束力が対象とする鉄筋に作用する。したがっ て,付着強度は設計時の強度以上を有しており,破断鉄 筋を耐荷性能算定に考慮しても良いと判断できる。

一方,横補強筋が存在しない,あるいは横補強筋の隅 角部に破断が存在するとき,付着強度は低下する傾向に あったものの,設計時の強度は下回っていなかった。す なわち,この場合も破断鉄筋を耐荷性能算定に考慮して も良いと判断できる。なお,隅角部の破断したスターラ ップが対象となる鉄筋に相当する場合,通常これを取り 囲む横補強筋は存在しないため,「横補強筋が存在しな い」場合として取り扱うことになる。

以上のように,破断した鉄筋の付着特性を考慮するこ とによって,破断した鉄筋を有する ASR 劣化 RC 部材の 耐荷性能評価における精度の向上が期待できるが,付着 に対して厳しい条件となる鉄筋に沿ったひび割れが存 在するようなより大きな劣化領域での検討を含め,さら なるデータの蓄積が必要である。

### 4. 結論

以下に、本研究の範囲内で得られた主な結果をまとめ て、本論文の結論とする。

(1) かぶり鉄筋径比が 1.3 から 1.6 の範囲にある,健全時 に鉄筋が降伏せず付着割裂破壊を生じる条件の引抜 き供試体において,鉄筋に沿ったひび割れのない軸 方向膨張率 0.13%までの ASR 膨張劣化の範囲では, 付着強度の大きな低下は見られなかった。

- (2) かぶりと引抜き対象鉄筋径の比が大きい、あるいは 引抜き対象鉄筋を取り囲む横補強筋が破断のない状 態で存在する場合、ASR 膨張に対する拘束圧がより 対象鉄筋に作用しやすい状況となるため、付着強度 が健全時に比べて増加することもある。しかし、横 補強筋が存在しない、あるいは横補強筋の隅角部に 破断が存在するとき、ASR 膨張の増加にともない付 着強度が低下する傾向を示した。
- (3) かぶり鉄筋径比 2.6 で健全時に鉄筋が降伏する付着 試験長さとした供試体において,鉄筋に沿ったひび 割れのない軸方向膨張率 0.48%までの ASR 膨張劣化 の範囲では,少なくとも鉄筋径の 20 倍の付着長があ れば定着が可能であると考えられる。
- (4) ASR 膨張劣化によって超音波伝播速度が 3,500m/s を 下回った供試体では、付着強度の低下が若干大きく なるものが見られた。
- (5) ASR 劣化を生じた RC 部材の耐荷性能評価において, 破断した鉄筋が有効に引張材として機能するか否か を,本研究の結果を利用して判断する手法を示した。

本研究の一部は,国土交通省「道路政策の質の向上に 資する技術研究開発」の研究課題「ASR 劣化構造物安全 性能評価手法の開発(研究代表者:宮川豊章)」に対する研 究費の援助を受けて実施したものであることを記し,謝 意を表します。また,本研究の遂行にあたって,神戸大 学教授 森川英典先生,大阪工業大学教授 井上晋先生, 京都大学准教授 服部篤史先生に貴重なご指導,ご助言 を賜りました。心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 日本材料学会:建設材料実験, pp.232, 2008.3
- 2) 土木学会:2007 年制定コンクリート標準示方書[設 計編], pp.34, 2008.3
- 3) 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24,第 II 編,pp.II-84~II-87,2005.8
- (4) 武田達也,玉越隆史,廣松新:ASR 劣化を模擬した 鉄筋コンクリート部材の付着性状実験,土木学会第 60 年次学術講演会講演概要集, 5-019, pp.37-38, 2005.9
- 5) 山本貴士,成清公平,服部篤史,宮川豊章:ASR 膨 張ひび割れを模擬したコンクリートと鉄筋の付着 特性,コンクリート工学年次論文集,Vol.29,No.1, pp.1293-1298, 2007.7
- P. S. Chana : Bond Strength of Reinforced in Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction, Transport and Road Research Laboratory, Contractor Report 141, 1989.