

論文 鉄筋腐食に伴い定着不良を生じた RC はり部材の残存せん断耐荷性状に及ぼすかぶり厚の影響

金塚 智洋*1・小川 和真*2・村上 祐貞*3

要旨: 本研究では、鉄筋腐食に伴い定着不良を生じた RC はり部材の残存せん断耐荷性状に及ぼすかぶり厚の影響評価を目的として、かぶり厚の異なる鉄筋腐食 RC はり部材に対して曲げ載荷試験を行った。鉄筋腐食に伴う付着性能の劣化により主鉄筋の抜け出しによる付着割裂破壊を呈する場合、主鉄筋の定着領域まで荷重が伝達され、主鉄筋の定着領域における付着応力性状が残存耐力に支配的な影響を及ぼすことが明らかとなった。また、定着領域における付着応力性状はかぶり厚と定着領域近傍の腐食ひび割れ性状の影響を受けることが明らかとなった。

キーワード: かぶり厚, 定着不良, 付着割裂破壊, 付着応力性状, 腐食ひび割れ性状

1. はじめに

鉄筋腐食を生じた RC 構造物の構造性能の変化に関して現在までに有用な知見が蓄積されつつある。せん断耐荷性状に関しては、主鉄筋の腐食に伴い付着が低下することでアーチ耐荷機構が形成され、非腐食時よりもせん断耐力が増加する場合のあることが既往の研究より報告されている^{1), 2)}。

一方、これらの研究の多くは、主鉄筋の定着が設計時と同様に十分確保された状態において検討がなされている。しかしながら、アルカリ骨材反応により、主鉄筋端部の曲げ加工部が破断するという事例が報告されており、この場合、設計時に想定された定着が確保されていないことが懸念される³⁾。この種の構造物の構造性能についても、定着が十分に確保されている場合と同様の検討が必要である。

一方、既往の研究において、鉄筋腐食した RC はり部材の耐荷性能には鉄筋の断面減少のみならず腐食ひび割れ性状も影響し、定着不良時には特にその影響が大きいことが指摘されている⁴⁾。鉄筋腐食膨張圧に起因したかぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状は、かぶり厚によって異なる性状を示すことから、鉄筋腐食を生じた既存 RC 構造物の耐荷機構や耐荷性状を定量的に評価する上で、かぶり厚と腐食ひび割れ性状を関連付けて検討する必要があるが、現状では鉄筋腐食した RC はり部材の耐荷性状および定着性能とかぶり厚の関係について検討した研究はほとんどない。

そこで、本研究では鉄筋腐食に伴い定着不良を生じたせん断破壊先行型 RC はり部材において、かぶり厚が残存せん断耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験手法

2.1 試験体概要および実験パラメータ

試験体の形状寸法および配筋を図-1に、実験パラメータを表-1に示す。試験体の断面形状は9種類あり、有効高さおよびかぶり厚が異なる。有効高さは130mm, 180mm, 240mmの3水準、かぶり厚は40mm, 50mm, 60mmの3水準である。

主鉄筋には、鉄筋降伏による曲げ破壊を防ぐため、高張力ネジブシ鉄筋(USD685)D19を60mm間隔に2本配筋し、せん断破壊が先行する断面諸元とした。

コンクリートの配合を表-2に示す。設計基準強度は

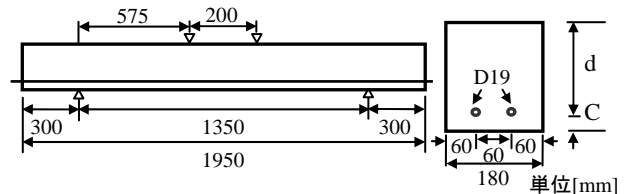


図-1 試験体概要

表-1 実験パラメータ

試験体名	かぶり厚 C (mm)	a/d	設定腐食率 (%)	有効高さ d (mm)
C60-a/d4.42	60	4.42	10	130
C60-a/d3.19		3.19		180
C60-a/d2.40		2.40		240
C50-a/d4.42	50	4.42		130
C50-a/d3.19		3.19		180
C50-a/d2.40		2.40		240
C40-a/d4.42	40	4.42		130
C40-a/d3.19		3.19		180
C40-a/d2.40		2.40		240

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (正会員)

*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科

*3 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

30N/mm²であり、練混ぜ水には、鉄筋腐食を促進させるため5%NaCl水溶液を用いた。なお、セメントは早強セメントを使用した。

2.2 腐食試験手法

鉄筋の腐食手法は、設定した腐食率が比較的早期に得られ、その制御が容易である電食試験法を採用した。

電食試験は既往の研究⁴⁾を参考に、5%NaCl水溶液を満たした水槽内に試験体を設置し、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続した後、直流電流を積算電流量が1000hr・Aに到達するまで通電した。

腐食試験終了後、腐食ひび割れ幅を100mm毎に2箇所クラックスケールで計測した。

鉄筋腐食の評価指標として、試験前後の鉄筋の質量減少率を用いた（以下腐食率と称する）。なお、非腐食時の鉄筋の質量は事前に計測し、単位長さ当たりの質量は一樣と仮定した。

載荷試験終了後、試験体からはつり出した鉄筋は、10%濃度クエン酸アンモニウム溶液に24時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に質量を計測した。主鉄筋の腐食率の測定は、主鉄筋を100mm間隔に切断して実施した。

2.3 載荷方法および測定項目

載荷は変位制御(0.5mm/min)で行い、図-1に示すように載荷点間隔200mm、支点間距離1350mmの2点集中載荷による曲げ載荷試験である。せん断スパン比(以下a/d)は3水準であり4.42、3.19および2.40である。

測定項目は、スパン中央部のたわみ、はり中央部の圧縮縁のひずみおよび主鉄筋の軸方向ひずみである。スパン中央部のたわみは1/100mm変位計を試験体中央に設置して測定した。

鉄筋の軸方向ひずみの測定にあたり、鉄筋腐食に伴うひずみゲージの破損を防ぐため、ひずみゲージの貼り付け位置を鉄筋内部とした貼り合わせ鉄筋⁴⁾を用いた。なお、ひずみゲージの貼り付け間隔は50mm間隔とし、配筋した2本の主鉄筋のうち1本のみを対象に計測した。

表-2 コンクリートの配合(設計基準強度30N/mm²)

G _{max} (mm)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
25	60	169	282	810	1009	2.82

3. 実験結果

3.1 腐食性状

表-3に実験結果の一覧と非腐食時のせん断破壊時の荷重算定値(2V_c)を合わせて示す。非腐食時のせん断耐力算定値V_cは以下の二羽式により求めた⁵⁾。

$$V_c = 0.2f_c^{1/3}(100p_t)^{1/3}\left(\frac{10^3}{d}\right)^{1/4}\left(0.75 + \frac{1.4d}{a}\right)b_w d \quad (1)$$

ここで、 f_c :コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 p_t :軸引張鉄筋比、 d :有効高さ(mm)、 a :せん断スパン長(mm)、 b_w :部材幅(mm)である。

図-2(a)~(i)に各試験体の腐食ひび割れ性状を示す。全ての試験体において、最小かぶり面において鉄筋軸に沿った腐食ひび割れおよび錆汁の漏出が確認された。かぶり厚が60mmの試験体においては、底面と側面のかぶり厚さが同様であることから、側面においても鉄筋軸に沿った腐食ひび割れおよび錆汁の漏出が確認された。

図-3にかぶり厚と腐食ひび割れ面積の関係を示す。ここで腐食ひび割れ面積とは、腐食ひび割れ幅にひび割れ長さを乗じたものである。かぶり厚と腐食ひび割れ面積に明確な相関は認められない。一般に、かぶり表面に腐食ひび割れが発生する時点での腐食率はかぶり厚が大きい程大きくなる。一方、腐食ひび割れがかぶり表面に到達した以降は、腐食ひび割れは一定の角度で開口するため、単位腐食率当たりの腐食ひび割れ幅の増加率はかぶり厚が大きい程大きくなることが指摘されている⁵⁾。本研究においては、いずれの試験体も主鉄筋の腐食率は同程度であることから、この両者の影響により、かぶり厚と腐食ひび割れ面積の関わりに相関が認められなかったものと考えられる。

3.2 破壊性状

図-2(a)~(i)に各試験体の載荷試験終了時における側面の破壊ひび割れ性状を示す。試験体C40-a/d4.42を除く全ての試験体において、載荷点よりに斜めひび割れが発生し、荷重の増加に伴い徐々にこのひび割れを起点として鉄筋軸に沿った水平ひび割れが発達した。最終的に試験体端部まで水平ひび割れが貫通し、はりは破壊に至っており、破壊モードは付着割裂破壊と判断される。

表-3 実験結果

試験体名	腐食率 (%)	腐食ひび割れ面積 (mm ²)		破壊荷重 (kN)	せん断耐力算定値×2 2V _c (kN)	破壊モード	圧縮強度 (N/mm ²)
		スパン全長	破壊側定着領域近傍				
C60-a/d4.42	6.4	3493	573	62.5	72.1	付着割裂	33.5
C60-a/d3.19	7.3	2109	414	115.5	92.0	付着割裂	33.5
C60-a/d2.40	8.9	3896	851	87.0	116.4	付着割裂	31.2
C50-a/d4.42	6.8	1723	332	50.5	72.1	付着割裂	34.5
C50-a/d3.19	7.3	2024	353	103.0	92.0	付着割裂	34.5
C50-a/d2.40	7.1	2917	752	94.0	116.4	付着割裂	32.4
C40-a/d4.42	7.0	2553	753	53.0	72.1	斜め引張	35.6
C40-a/d3.19	8.1	4715	596	62.5	92.0	付着割裂	32.2
C40-a/d2.40	7.1	2038	433	119.5	116.4	付着割裂	32.7

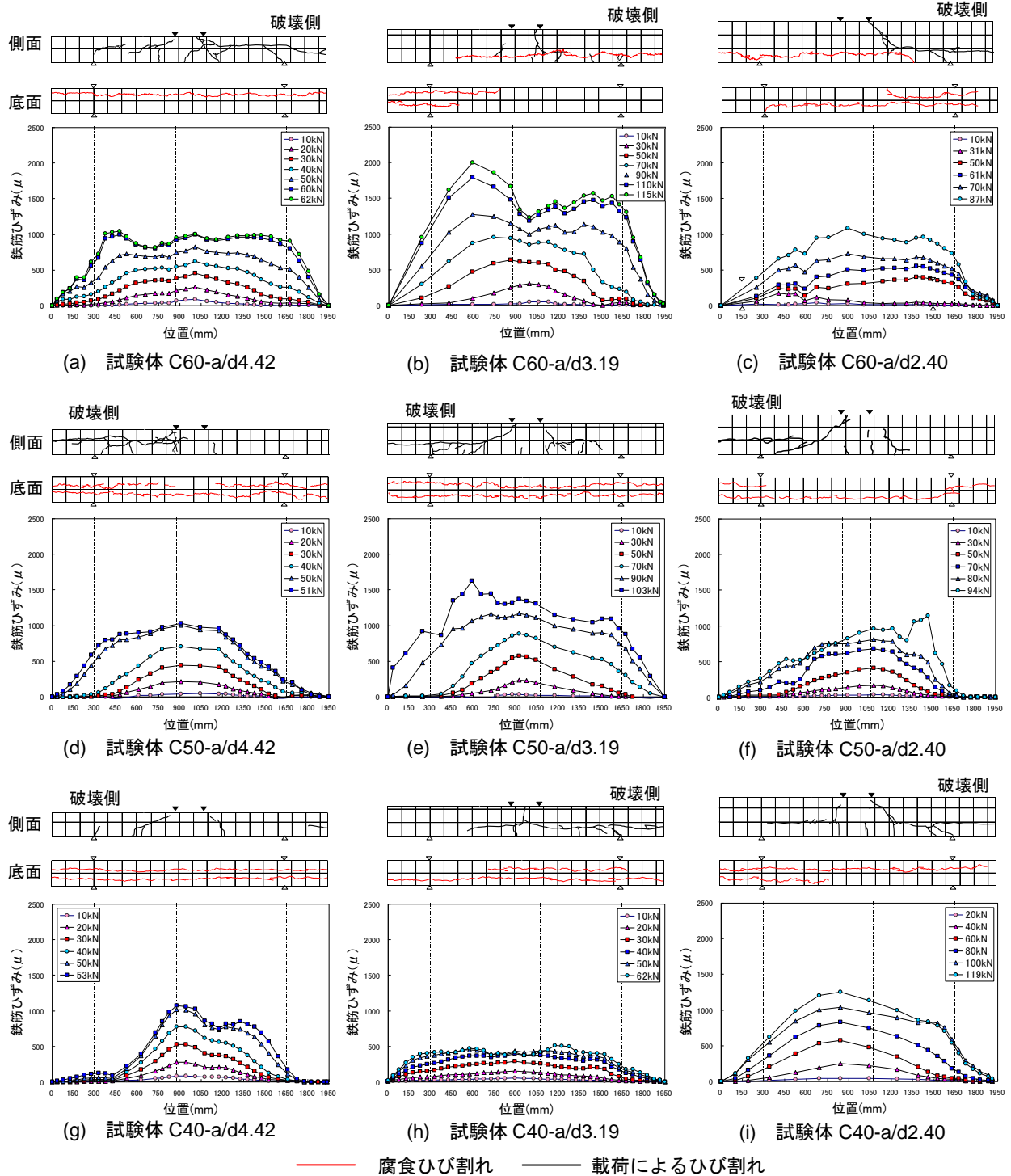


図-2 荷重試験結果

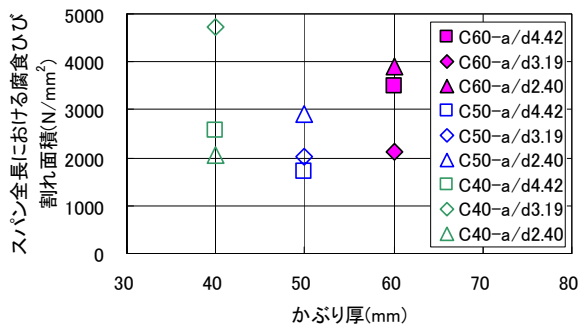


図-3 かぶり厚と腐食ひび割れ面積

試験体 C40- a/d4.42 においては、他の試験体と同様に荷重点よりに斜めひび割れが発生したが、他の試験体とは異なり水平ひび割れは発生しなかった。スパン右側の定着部においてわずかに水平ひび割れが発生しているが、これは最大荷重以降に発生したひび割れである。後に詳述する鉄筋ひずみ分布性状を鑑みても、最大荷重時に定着領域まで荷重の伝達はなされていないことから、破壊モードは付着割裂破壊ではなく斜め引張破壊と判断される。なお、試験体 C40- a/d4.42 のみが斜め引張破

壊を呈したことは、腐食ひび割れ性状や付着応力性状等が要因として挙げられるが現在検討中である。

3.3 荷重と中央変位

図-4 に荷重と中央変位の関係を示す。a/d が 4.42 である試験体では、全ての試験体において、表-3 に示す設計時のせん断破壊荷重(2Vc)に比べて耐力は小さい値を示した。また、かぶり厚が小さくなるにしたがい、耐力は低下する傾向を示した。

a/d が 3.19 である試験体では、a/d が 4.42 の場合と同様、かぶり厚が小さくなる程、破壊荷重は小さい値を示した。また、かぶり厚が 60mm および 50mm の試験体において、設計時のせん断破壊荷重と比較すると鉄筋腐食によって非腐食時よりも耐力が増加した。

一方、a/d が 2.40 である試験体では、設計時のせん断破壊荷重と比較して、かぶり厚が 60mm および 50mm の試験体において、耐力は大幅に低下した。また、かぶり厚の大きい試験体に比べて、かぶり厚の小さい試験体の方が耐力が大きい。これは、耐力の低下に腐食ひび割れ性状が大きな影響を与えたものと考えられ、このことは 4.3 節において詳述する。

また、本実験では a/d を変数とする際、有効高さ d を変化させたが、せん断スパン長 a による影響については今後検討する必要がある。

3.4 耐荷機構

図-2 (a)~(i)に各荷重レベル時における主鉄筋のひずみ分布を示す。C40-a/d4.42 を除く試験体において、載荷初期では、支点間のみひずみが増加し、定着領域においてはほとんどひずみが確認されず、支点間のみで荷重を保持している。荷重の増加に伴い支点間のひずみがほぼ一様となり、定着領域においてもひずみが確認されることから、支点間の付着が損失し、定着領域まで荷重の伝達がなされている。

一方、斜め引張破壊を呈した試験体 C40-a/d4.42 においては、最大荷重時においても定着領域においてほとんどひずみが確認されず、定着領域まで荷重の伝達はなされていない。

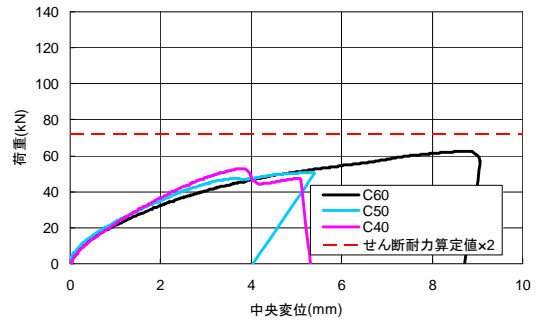
図-5(a)~(c)に一例として C60 シリーズ試験体の荷重と破壊側の定着領域近傍(0mm~400mm)およびせん断領域近傍(400mm~775mm)における平均付着応力との関係を示す。

付着応力の算出方法は以下に示す通りである。微小区間において、鉄筋の力の釣合い方程式は次式で表される。

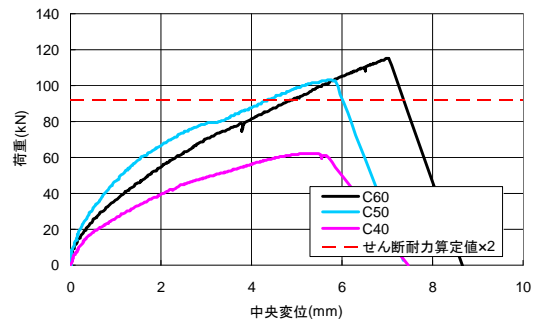
$$\frac{dP_{sx}}{dx} = \pi D_s \tau \quad (2)$$

ここで P_{sx} : 鉄筋力, D_s : 鉄筋径, τ : 付着応力である。式(2)中の鉄筋力増分 dP_{sx} は次式で表される。

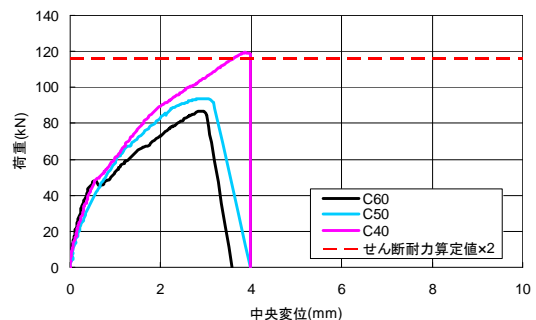
$$dP_{sx} = A_s E_s d\varepsilon_s \quad (3)$$



(a) a/d 4.42 試験体



(b) a/d 3.19 試験体



(c) a/d 2.40 試験体

図-4 荷重と中央変位

ここで、 A_s : 鉄筋断面積, E_s : 鉄筋弾性係数, $d\varepsilon_s$: 鉄筋のひずみ増分である。

式(3)を式(2)に代入し、整理すると

$$\frac{A_s E_s d\varepsilon_s}{dx} - \pi D_s \tau = 0 \quad A_s = \frac{\pi D_s^2}{4} \quad \text{より} \quad \tau = \frac{D_s E_s}{4} \frac{d\varepsilon_s}{dx} \quad (4)$$

なお、式(4)中の鉄筋ひずみ勾配は、対象となる測定点に隣接する 2 点を含む 3 点で 2 次近似して算出し、鉄筋径は腐食率を考慮した値である。

付着応力を平均化した各領域の設定については、図-2 に示した鉄筋ひずみ分布性状より、鉄筋ひずみ勾配が緩やかとなる位置が端部から概ね 400mm であったことから、定着領域を試験体端部(0mm)から 400mm とした。せん断領域に関しては、等曲げ区間近傍では曲げひび割れが発生し、付着応力に影響を及ぼすことから、400mm ~ 775mm とした。

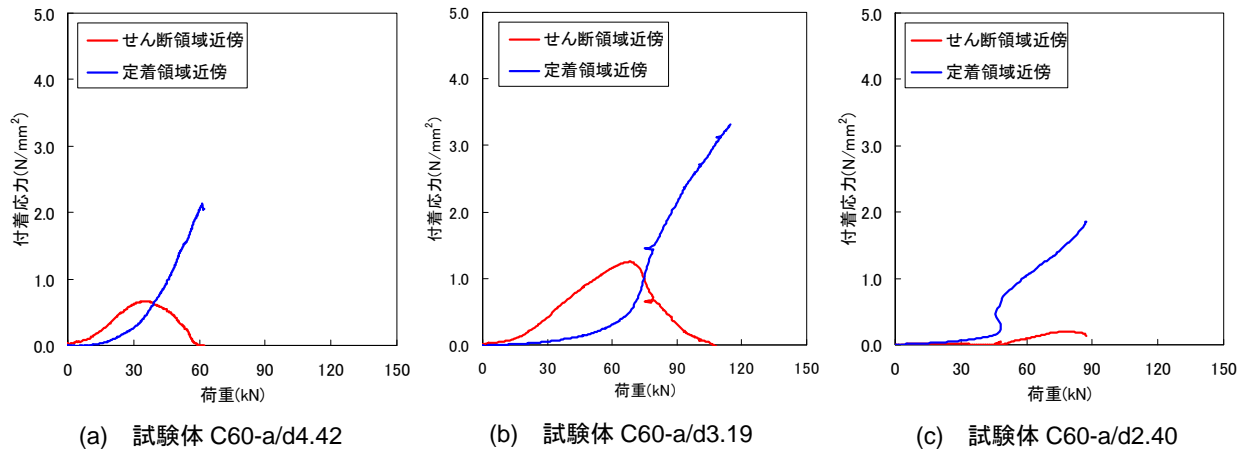


図-5 荷重と破壊側各領域の付着応力(C60 シリーズ)

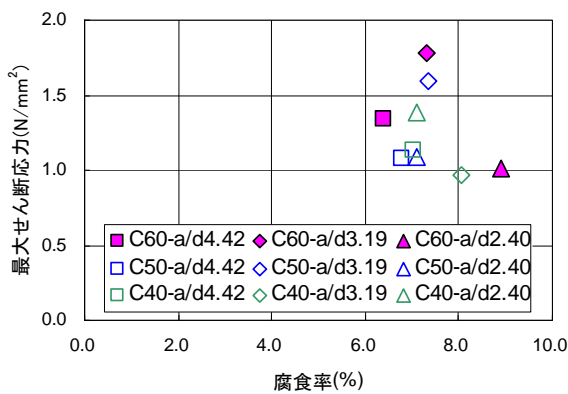


図-6 腐食率と最大せん断応力

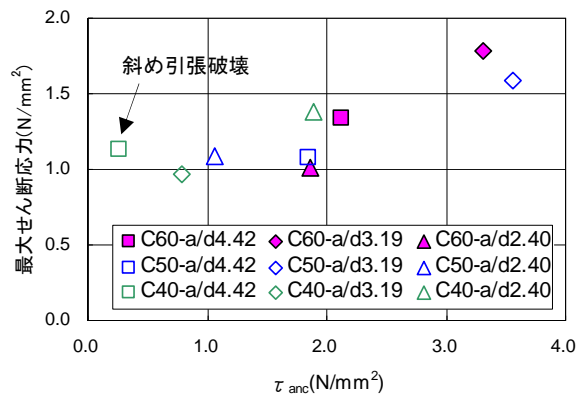


図-7 τ_{anc} と最大せん断応力

試験体 C60-a/d4.42 および C60-a/d3.19 では、荷重初期ではせん断領域近傍における付着応力が増加し、定着領域近傍における付着応力がほとんど作用しておらず、荷重の大部分をせん断領域近傍で保持しているものと考えられる。しかしながら、荷重の増加に伴い、せん断領域近傍における付着応力は急激に低下し、その一方で定着領域近傍における付着応力が急激に増加した。一方、試験体 C60-a/d2.40 では、荷重初期の段階から定着領域近傍において付着応力が発生し、せん断領域近傍では付着応力はほとんど生じていない。いずれの場合においても、荷重終局時には、せん断領域近傍における付着応力がほとんど消失し、定着領域近傍における付着応力の存在によって荷重の大部分を保持していたものと考えられる。この傾向は、付着割裂破壊を呈した全ての試験体において同様であった。これは荷重の増加に伴い、せん断領域における付着応力が損失することで、定着領域まで荷重が伝達されたことを示している。すなわち、荷重初期から、或いは荷重の増加に伴いせん断領域近傍の付着応力が低下することで、せん断力に対する抵抗機構は、はり機構からアーチ機構へと移行が始まるものと思われる。そして、主鉄筋の定着不良により、完全なアーチが形成される過程で鉄筋の抜け出しが生じ、はりには破壊に至ったものと判断される。

なお、本実験では主鉄筋のみを有する RC 部材に対して検討を行っている。一般の実構造物にはせん断補強筋が配筋されており、せん断補強筋の拘束効果により、主鉄筋の付着劣化を抑制することが既往の研究より報告されている⁴⁾。せん断補強筋の存在がアーチ耐荷機構の形成に影響を及ぼす可能性があり、この影響については今後検討する必要がある。

4. 鉄筋腐食したかぶり厚の異なる RC はりの残存せん断耐荷性状に及ぼす影響評価

4.1 主鉄筋の腐食率と耐荷力

図-6 は各試験体における主鉄筋の平均腐食率と最大せん断応力(V_u/bd)の関係を示したものである。腐食率と最大せん断応力との間には明確な相関は認められず、このことは、破壊の直接的要因が鉄筋腐食による鉄筋断面積の減少ではないことを示唆している。斜め引張破壊を呈した試験体 C40-a/d4.42 を除く全試験体において鉄筋の抜け出しによる付着割裂破壊を呈したことより、破壊の直接的要因は主鉄筋の付着劣化であると考えられる。また、前掲した鉄筋ひずみ分布性状、荷重と各領域における付着応力の関係からも、残存耐力に支配的な影響を及ぼすのは特に定着領域近傍の付着応力性状であると考えられる。

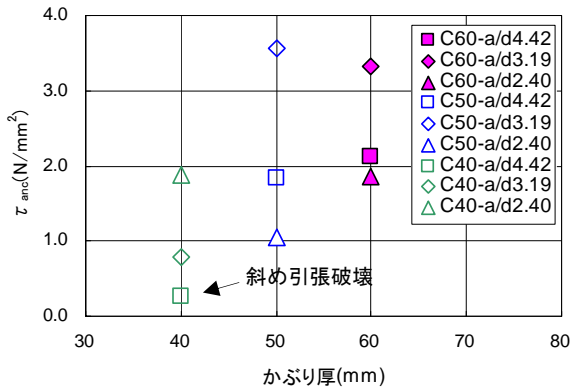


図-8 かぶり厚と τ_{anc}

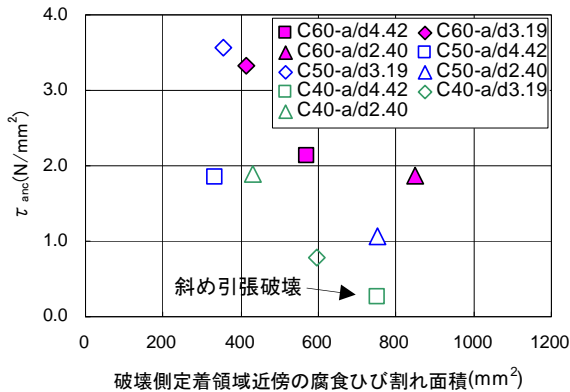


図-9 破壊側定着領域近傍の腐食ひび割れ面積と τ_{anc}

4.2 付着応力性状と耐力

図-7 は定着領域近傍の最大平均付着応力 (τ_{anc})と最大せん断応力の関係を示したものである。最大せん断応力は、 τ_{anc} が低下するにしたがい減少する傾向を示した。

このことから、本実験のように鉄筋腐食によって主鉄筋の付着劣化が生じ、主鉄筋の抜け出しによる付着割裂破壊を呈する場合は、現有の耐力に定着領域近傍の付着応力性能が極めて重要な影響因子となる。言い換えれば、定着領域近傍の付着応力性能から残存耐力を予測することが可能であると考えられ、 τ_{anc} を構造諸元や外観変状データと関連付けることで、残存耐力をある程度予測できるものと思われる。

4.3 かぶり厚と腐食ひび割れ性状が定着領域近傍における付着応力性状に及ぼす影響

図-8 に τ_{anc} とかぶり厚の関係を示す。全体的にかぶり厚が大きいく程、 τ_{anc} は大きくなる傾向を示した。

図-9 に τ_{anc} と破壊側定着領域近傍における腐食ひび割れ面積の関係を示す。全体的に腐食ひび割れ面積の増加に伴い、 τ_{anc} は低下する傾向を示した。

これらのことから、 τ_{anc} はかぶり厚と腐食ひび割れ面積の影響を大いに受けるものと思われる、これらの影響を考慮することで定着領域における付着応力性能をある程度推定できるものと思われるが、その定量的評価については、部材の寸法や配筋状況を考慮する必要があり、今後更なる検討が必要である。

5. 結論

本研究ではかぶり厚の異なる鉄筋腐食に伴い定着不良を生じた RC はり部材の残存せん断耐荷性状について実験的検討を行った。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 主鉄筋のみを配筋した鉄筋腐食 RC はり部材において、せん断耐荷機構はスパン内の付着劣化の影響により、はり機構からアーチ機構に移行する場合があるが、定着不良の影響により不完全アーチとなり、主鉄筋の抜け出しによる付着割裂破壊を呈する場合がある。
- (2) 鉄筋腐食に伴う定着劣化により付着割裂破壊が生じる場合、定着領域近傍における付着応力性状が耐力の低下に支配的な影響を与える。
- (3) (2)の場合における定着領域近傍における付着応力性能は、かぶり厚が大きいく程大きくなり、定着領域近傍における腐食ひび割れ面積の増加に伴い低下する傾向がある。

謝辞：東京鐵鋼株式会社よりネジフシ鉄筋を提供いただいた。ここに感謝の意を表します。

本研究の一部は山口育英奨学会の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 佐藤吉孝, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章：鉄筋腐食の生じた RC 部材のせん断耐荷特性の検討, アップグレード論文報告集, Vol.4, pp.33-38, 2004
- 2) Xin XUE, 関博, 広森紳太郎：鉄筋が腐食した RC はりのせん断耐荷挙動に関する研究, 土木学会論文集 E, vol.65, No.2, pp.161-177, 2009.4
- 3) 宮川豊章：アルカリ骨材反応による鉄筋破断が生じた構造物の安全性評価, 土木学会誌, vol88, no.9, pp83-84, 2003.9
- 4) 村上祐貴, 大下英吉, 鈴木修一, 堤知明：鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究, 土木学会論文集 E, vol.64, No.4, pp.634-649, 2008.12.
- 5) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 325 号, V-5, pp167-176, 1986
- 6) 河村圭亮, Tran Khoa Kim, 中村光, 国枝実：鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1007-1012, 2010