

フック定着部の損傷が鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響

中央大学 学生会員 ○松永 将人
長岡工業高等専門学校 金塚 智洋
長岡工業高等専門学校 正会員 村上 祐貴
中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年、既存のコンクリート構造物において、塩害、中性化、アルカリ骨材反応、化学的浸食等の経年劣化が深刻となっている。その一方で、わが国では建設後年数を経た構造物の増加、ならびに社会資本投資力の減少により、既存の構造物を長期供用する必要性が増大していることから、経年劣化を前提とした維持管理が求められるようになってきている。

RC 構造物に生じる劣化現象は、上述のように多岐にわたるが、その中でも、特に鉄筋の腐食は耐荷性能や変形性能といった構造性能に及ぼす影響が大きいことが知られており、海水飛沫や飛来塩分の強い地域が多いわが国にとって、鉄筋腐食した既存 RC 構造物の現有の構造性能を定量的に評価可能とする手法の確立は強く望まれている。

鉄筋腐食した RC 構造物の構造性能評価に関する研究は過去にも多数実施されており、曲げ耐力については主鉄筋の腐食劣化を考慮することで、現行の曲げ耐力評価手法を用いてある程度評価可能とされている^{1),2)}。せん断耐力については、主鉄筋の付着劣化によりアーチ耐荷機構が形成され、せん断耐力は非腐食時よりむしろ増加すると報告されている場合が多い^{3),4)}。これらの知見は、主鉄筋端部定着が十分に機能した状態で得られている。しかしながら、近年、アルカリ骨材反応による鉄筋曲げ加工部の破断や凍結防止剤の使用による部材端部の著しい鉄筋腐食により、主鉄筋定着部に損傷を受けた構造物の存在が報告されており、定着部の腐食劣化が現有の構造性能に及ぼす影響について検討する必要がある。

そこで、本研究では定着部に腐食劣化を生じた RC はり部材の載荷試験を行い、定着部の腐食劣化が現有のせん断耐荷性状に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の形状と寸法及び配筋を図-1 に示す。ipb シリーズ試験体はフック定着部を設けていない試験体であり、鉄筋形状による幾何学的な拘束を有しない試験体である。H シリーズ試験体は、フック定着部を設けた試験体である。試験体形状は両シリーズとも同様であり、長さ 1950mm、断面形状は幅 180mm、梁高 170mm、220mm および 280mm の 3 種類である。

主鉄筋には、降伏による曲げ破壊を防ぐため、高張力ネジフシ鉄筋 D19(USD685)を用いた。コンクリートの配合は表-1 に示す通りである。設計基準強度は 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。

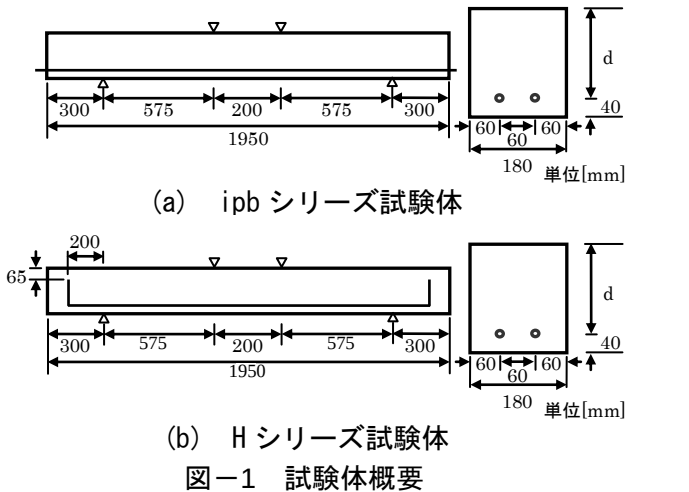


表-1 コンクリートの配合

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

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。5%NaCl 水溶液を満たした水槽内に試験体を浸漬し、鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続し、所定の積算電流量に到達するまで通電した。なお、電食試験は材齢 7 日後に実施することを標準とした。

2.3 実験パラメータおよび荷重試験方法

実験パラメータは表-2 に示すように、主鉄筋定着フックの有無（有：H シリーズ，無：ipb シリーズ），せん断スパン比 (a/d) および主鉄筋の腐食率である。 a/d は 2.40, 3.19 および 4.42 の 3 水準であり，せん断スパン長 a は一定で有効高さ d が異なる。主鉄筋の目標腐食率は 10% であり，はり全長にわたり鉄筋を腐食させた。ただし，試験体 H(3.19)-d130-10s は，支点間のみ鉄筋を腐食させ，定着部の鉄筋は電食の対象外とした。なお，フック定着部を有しない ipb シリーズ試験体の実験結果の一部は既往の研究で報告している⁵⁾。

荷重試験は変位制御(0.5mm/min)で行い，荷重点間隔 200mm として 2 点集中荷重を静的に荷重させた。

3. 実験結果

3.1 腐食性状

表-2 に各試験体の主鉄筋の平均腐食率を示すように，いずれの試験体においても概ね目標値に近い値を示した。なお，H シリーズ腐食試験体の腐食率はスパン内の平均値である。

かぶりコンクリートの腐食ひび割れ性状は，ipb シリーズ試験体では，底面に鉄筋軸に沿った腐食ひび割れが，はり全長にわたり発生した。H(3.19)-d180-10s を除く H シリーズ試験体では，底面に鉄筋軸に沿った腐食ひび割れが発生し，側面には，フック鉛直部に沿って腐食ひび割れが発生した。支点間のみを腐食させた H(3.19)-d180-10s 底面においても，支点外側の領域まで腐食ひび割れが発生したが，その幅は全長腐食試験体に比べて小さく，錆汁の漏出は認められなかった。荷重試験終了後，鉄筋をはつり出し，目視によって観察した結果，腐食は極軽微であったことから，支点外側領域のかぶりコンクリートのひび割れの発生は，支点間に発生し

表-2 実験パラメータ

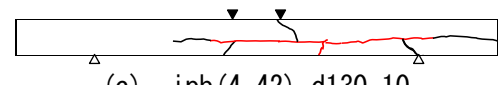
シリーズ	試験体名	せん断スパン比 a/d	有効高さ d (mm)	腐食率 (%)	最大荷重 (kN)
H	H(2.40)-d240-10	2.40	240	9.6	129.1
	H(3.19)-d180-10	3.19	180	9.1	90.0
	H(3.19)-d180-10s			10.7	108.5
	H(4.42)-d130-10	4.42	130	9.6	56.5
ipb	ipb(2.40)-d240-10	2.40	240	7.1	119.5
	ipb(3.19)-d180-10	3.19	180	8.1	62.5
	ipb(4.42)-d130-10	4.42	130	7.1	39.5



(a) ipb(2.40)-d240-10

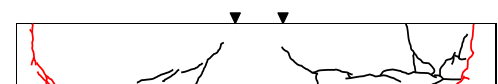


(b) ipb(3.19)-d180-10

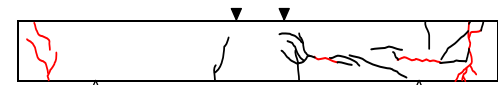


(c) ipb(4.42)-d130-10

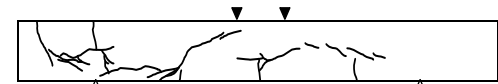
—— 終局時の破壊ひび割れ — 腐食ひび割れ
図-2 破壊ひび割れ(ipb シリーズ)



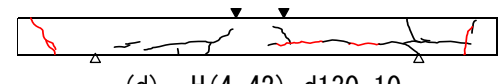
(a) H(2.40)-d240-10



(b) H(3.19)-d180-10



(c) H(3.19)-d180-10s



(d) H(4.42)-d130-10

—— 終局時の破壊ひび割れ — 腐食ひび割れ
図-3 破壊ひび割れ(H シリーズ)

た腐食ひび割れの伝播が主たる要因であると考えられる。

3.2 破壊性状

図-2 および図-3 に各試験体の終局時における破壊ひび割れ性状を示す。まず，フック定着部を有しない ipb シリーズ試験体は，荷重点より斜めひび割れが発生した後，鉄筋軸に沿った付着割裂ひび割れが支点を越えて発生しており，付着割裂破壊を生じた。

次に，H シリーズ腐食試験体では，ipb シリーズ試験体と同様に，斜めひび割れが荷重点より発生

し、荷重の増加に伴い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、はり端部方向に進展した。変形が進むにつれて支点上縁のコンクリートに曲げひび割れが発生し、下方に進展した。最終的に、この曲げひび割れ先端とフック鉛直部の腐食ひび割れが連結したことでやはり破壊に至った（定着上縁破壊と称する）。これは、支点内側では、鉄筋の腐食により付着が損失し、支点近傍まで高レベルの鉄筋力が伝達されたことで、コンクリートの変形が増大し、これに対し、支点外側の領域ではフックが直角を保持してこの変形に抵抗することにより、支点上縁のコンクリートに曲げ引張力が作用したことが要因として考えられる。

3.3 荷重と中央変位

図-4(a)～(c)に各試験体の荷重と中央変位の関係を a/d 毎に示す。図中には式(1)より算出した各試験体の非腐食時のせん断破壊時の荷重算定値 ($2V_c$)を示した⁶⁾。なお、荷重算定に際し、圧縮強度を 30N/mm^2 とした。

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

ここで、 f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)、 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。

いずれの a/d においても、H シリーズは ipb シリーズに比べて耐力は大きく、定着フックの存在により鉄筋腐食に伴う耐力低下が抑制されている。また、 $a/d=2.40$ および $a/d=3.19$ の H シリーズ試験体の耐力は非腐食時の破壊荷重算定値の同程度大きい。これは、既往の研究と同様、鉄筋腐食に伴う主鉄筋の付着劣化により、アーチ耐荷機構が形成されたためであると考えられる。アーチ耐荷機構の形成が、主鉄筋の付着劣化に起因することを鑑みれば、ipb シリーズ試験体においても、アーチ耐荷機構が形成されていると考えられるが、主鉄筋定着部においても鉄筋腐食が生じていること、フック定着による幾何学的な拘束を有しないことから、アーチ耐荷機構が形成される過程で、主鉄筋が定着部からの抜出し、H シリーズのような耐力増加が生じなかったと考えられる。また、 $a/d=3.19$ において、定着部に損傷を生じていない試験体 H(3.19)-d180-10s が、やはり全長

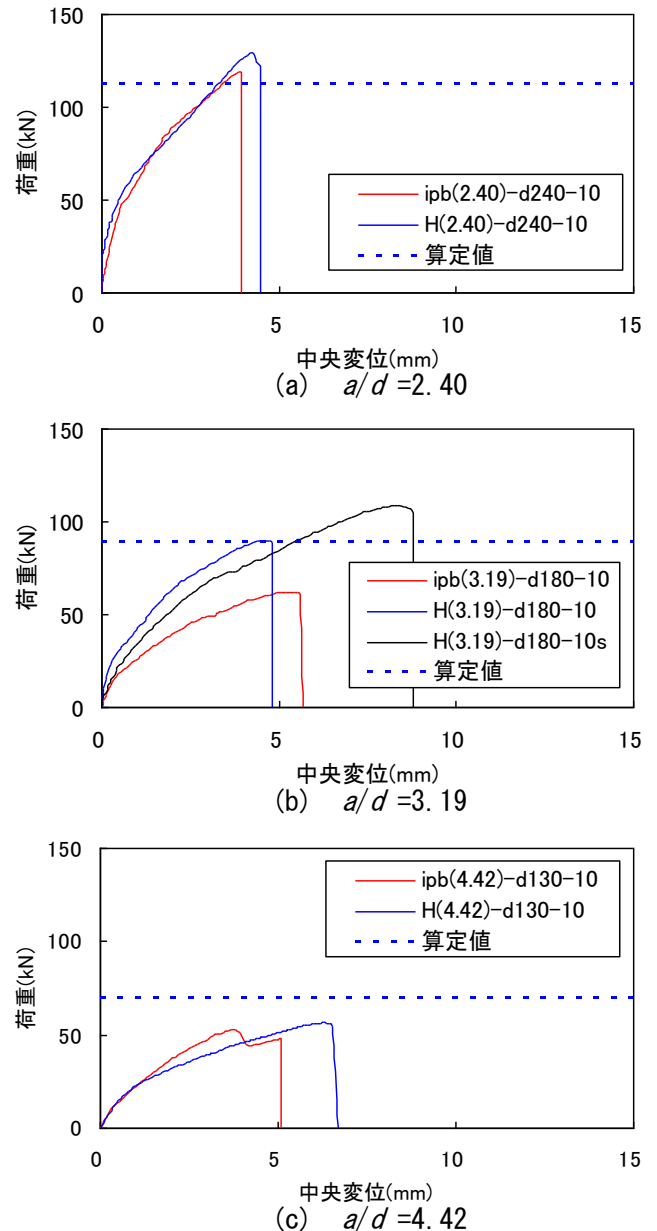


図-4 荷重と中央変位

にわたり鉄筋腐食した H(3.19)-d180-10 に比べて約 20kN 増加した。このことは、フック部の腐食ひび割れ性状が定着上縁破壊時の耐力に影響することを示唆する結果である。

4. 定着部の損傷がせん断耐荷性状に及ぼす影響

図-5 に式(1)より算定した非腐食時の破壊荷重で正規化した各試験体の耐力比と主鉄筋の平均腐食率の関係を示す。腐食率と耐力非の間には明確な相関関係は認められず、本実験における破壊の直接的要因が主鉄筋の断面減少ではなく、定着部の損傷であることと整合する。

図-6 に各試験体の耐力比と a/d の関係を示す。 a/d が大きい程、耐力比は低下する傾向が認められ、ipb

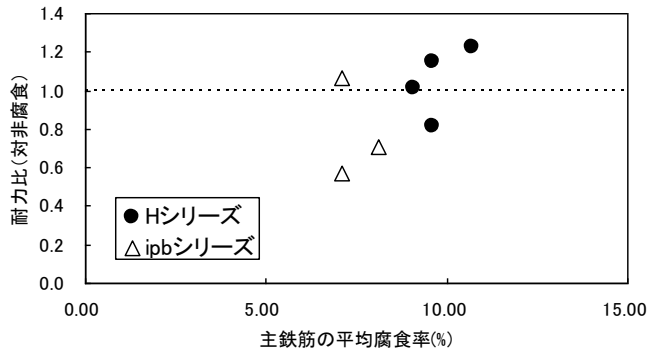
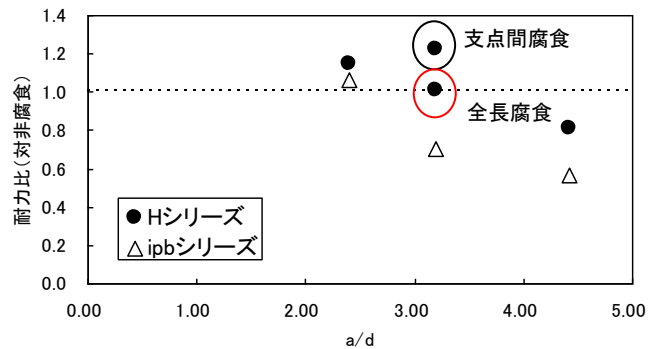


図-5 耐力比～主鉄筋の平均腐食率

図-6 耐力比～ a/d

シリーズでは $a/d=3.19$, H シリーズでは $a/d=4.42$ の時点で、耐力比が 1.0 を下回る結果となった。これは、 a/d が大きくなるにしたがい、せん断スパンに形成される圧縮ストラットの幅が小さくなり、アーチ耐荷機構による耐力増加が期待できないものと考えられる。また、 $a/d=3.19$ の試験体に着目すると、支点間のみ腐食を生じさせた試験体の耐力比は約 1.2、定着フック有で腐食を生じた場合は約 1.0、定着フックを有しない試験体の耐力比が約 0.7 でありフック定着部の存在とフック部の腐食劣化性状が耐荷性状に大きな影響を及ぼし、ipb シリーズをフック定着部の破断と位置付ければ、定着部に著しい腐食損傷を生じた場合、せん断耐力が大幅に低下する可能性がある。

本実験においては、基礎的な実験のため、せん断補強筋や圧縮鉄筋が配筋されておらず、今後は、これら鉄筋が配筋された状態で定着上縁破壊と鉄筋腐食の関係について更なる検討を進めていく。

5. 結論

本研究では、定着部に腐食劣化を生じた RC はり部材の載荷試験を行い、定着部の腐食劣化が現有のせん断耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 定着部に直角フックを有する主鉄筋のみを配筋した鉄筋腐食 RC はりにおいて、支点間の付着劣化の影響により定着部まで荷重が伝達し、アーチ耐荷機構が形成された際、支点上縁に負曲げが発生し、定着上縁破壊を呈する場合がある。
- (2) 支点上縁の負曲げの発生は、支点間の付着損失に伴うコンクリートの変形の増大と、支点外側領域においてフックが直角を保持してこの変形に抵抗することにより生じるものと考えられる。
- (3) 耐力の低下割合はフック部の腐食ひび割れの程度が大きい程、増加する傾向にある。また、 a/d が大きいほどアーチ耐荷機構による耐力増加は期待できない。

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。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造的な性能、コンクリート技術シリーズ 71, 2006.
- 2) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響, 土木学会論文集, Vol.62, No.3, pp.542-554, 2006.
- 3) 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.
- 4) 松尾豊史, 酒井理哉, 松村卓郎, 金津努：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.69-77, 2004.
- 5) 村上祐貴, 董衛, 大下英吉, 鈴木修一, 堤知明：鉄筋腐食により定着不良を生じた RC 梁部材の耐荷性状評価, 土木学会論文集 E2, vol.6, No.4, pp.605-624, 2011.12.
- 6) 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, pp.167-176, 1986