

論文 フック定着部が鉄筋腐食 RC はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響

金塚 智洋*1・村上 祐真*2・大下 英吉*3

要旨：本研究では、主鉄筋定着部に直角フックを有する腐食 RC はり部材の曲げ載荷試験を行い、フック定着部が鉄筋腐食 RC はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響について検討した。鉄筋腐食に伴う付着性能の劣化により主鉄筋定着部まで荷重が伝達される場合、支点近傍の上縁コンクリートに発生する負曲げの影響により、アーチ耐荷機構を保持できずに定着上縁破壊を呈する場合がある。この場合の耐力低下は a/d 、有効高さ、フック部の腐食ひび割れ性状に影響することが明らかとなった。

キーワード：鉄筋腐食、フック、定着、定着性能、せん断スパン比

1. はじめに

現在までに RC はり部材のせん断耐荷性状に関して、主鉄筋の腐食に伴い支点間の付着が低下することでアーチ耐荷機構が形成され、非腐食時よりも耐力が増加する場合のあることが報告されている¹⁾。アーチ耐荷機構による作用せん断力に対する抵抗には、主鉄筋端部の定着が十分に確保される必要があるが、定着が十分に確保されていない場合には、定着部における付着応力性状が残存せん断耐力に支配的な影響を及ぼす。

このような背景から、著者らは鉄筋腐食により定着不良を生じた RC はりの残存せん断耐荷性状について検討を行ってきた。その結果、支点間の付着劣化により定着領域まで荷重が伝達される場合、定着不良の影響により主鉄筋端部の抜出しが生じ、非腐食時と比較して耐力は著しく低下することを明らかとした^{2,3)}。

一方、実構造物においては鉄筋の定着を確保するために、主鉄筋端部にフックを設けていることが一般的であるが、その場合における鉄筋腐食がフックによる主鉄筋の拘束効果や耐荷性状に及ぼす影響について検討した事例は少ない。

そこで、本研究では鉄筋腐食を生じた定着部に直角フックを有するせん断破壊先行型 RC はり部材の載荷実験を行い、フック定着部が鉄筋腐食 RC はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響について検討を行なった。

2. 実験手法

2.1 試験体概要および実験パラメータ

実験パラメータおよび実験結果の一覧を表-1 に、試験体の形状寸法および配筋を図-1 に示す。図-1(a)に示す H シリーズ試験体は引張主鉄筋端部定着部を直角フックとした試験体である。一般に、実構造では主鉄筋端部定着部に補強筋を配筋するが、本実験ではフック定着

部の腐食劣化が主鉄筋の拘束効果に及ぼす影響について検討するため、補強筋は配筋していない。せん断スパン比 (a/d) は 2.40, 3.19, 4.42 であり、それぞれ有効高さおよびせん断スパン長が異なる。

図-1(b)に示す ipb シリーズは定着フックを設けていない試験体である。 a/d は H シリーズと同様であるが、せん断スパン長は一定であり、有効高さが異なる。

なお、ipb(2.40)-d240-10 および ipb-(3.19)-d180-10 試験体は既報の実験結果である³⁾。ipb(4.42)-d130-10 試験体に関しては既報において斜め引張破壊を呈したことから、本研究において再実験を実施した。

主鉄筋には曲げ引張破壊を避けるため、高張力ネジブシ鉄筋(D19-USD685)を用いた。

コンクリートの配合を表-2 に示す。設計基準強度は 30N/mm^2 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。

各試験体の名称は試験体パラメータの概略を表しており、シリーズ名、 a/d 、有効高さ、設定腐食率が示されている。なお、10s とは支点間の鉄筋のみを腐食させた試験体であり、Nb は非腐食試験体、Nn は支点間の鉄筋のアンボンド処理を施した非腐食試験体を表す。アンボンド処理は支点間の主鉄筋の節を粘土で埋め、ビニールテープを巻き付け、グリスを塗付することで行った。

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。

本研究においては、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ることとした(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律と仮定した。

載荷試験終了後、試験体からはり出した鉄筋は、10%

*1 長岡工業高等専門学校 専攻科環境都市工学専攻 (正会員)

*2 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)

*3 中央大学 理工学部 都市環境学科教授 博(工) (正会員)

表-1 実験パラメータおよび実験結果

シリーズ	試験体名	有効高さ d(mm)	せん断スパン比 a/d	せん断スパン長 a(mm)	試験体長 L(mm)	腐食率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	破壊モード	
H	H(2.40)-d240-10	240	2.40	575	1950	9.6	28.7	129.3	定着上縁	
	H(2.40)-d180-Nb		2.40	432	1664	0.0	28.9	113.4	斜め引張	
	H(2.40)-d180-10		2.40	432	1664	6.3	29.1	120.8	定着上縁	
	H(3.19)-d180-10		3.19	575	1950	9.1	24.0	90.0	定着上縁	
	H(3.19)-d180-10s		3.19	575	1950	10.7	30.9	108.5	定着上縁	
	H(3.19)-d180-Nn		3.19	575	1950	0.0	32.9	139.5	定着上縁	
	H(4.42)-d180-Nb	180	4.42	795	2390	0.0	32.3	89.2	斜め引張	
	H(4.42)-d180-10		4.42	795	2390	11.5	34.7	76.1	斜め引張	
	H(2.40)-d130-Nb		130	2.40	312	1424	0.0	31.1	136.8	斜め引張
	H(2.40)-d130-10			2.40	312	1424	9.8	37.3	119.0	フックせん断
	H(3.19)-d130-Nb			3.19	415	1630	0.0	31.1	85.3	斜め引張
	H(3.19)-d130-10			3.19	415	1630	7.7	31.9	86.5	定着上縁
H(4.42)-d130-10	4.42	575		1950	9.6	30.8	56.5	定着上縁		
ipb	ipb(2.40)-d240-10	240		2.40	575	1950	7.1	32.7	119.5	付着割裂
ipb(3.19)-d180-10	180	3.19	8.1	32.2			62.5	付着割裂		
ipb(4.42)-d130-10	130	4.42	5.7	36.2			39.5	付着割裂		

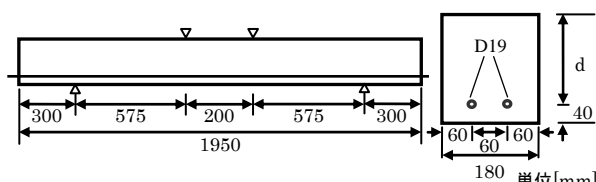
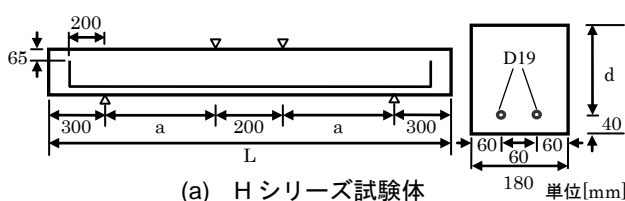


図-1 試験体概要

表-2 コンクリートの配合

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	

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、支点間の主鉄筋を 100mm 間隔で切断して実施した。

2.3 荷重方法および測定項目

荷重は変位制御(0.5mm/min)で行い、図-1 に示すように静的 2 点集中荷重による曲げ荷重試験とした。

主たる測定項目は、主鉄筋の腐食率、スパン中央部のたわみ、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際しては、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合せ鉄筋を用いた。鉄筋ひずみの測定は 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。なお、H(2.40)-240-10 試験体、H(4.42)-d130-10 試験体および非腐食試験体については鉄筋ひずみを測定していない。

3. 実験結果

3.1 腐食性状

表-1 に各試験体の主鉄筋腐食率を示す。表中の腐食率は区間ごとに計測した腐食率の平均値である。H シリーズ試験体の腐食率はスパン内の平均値とした。

いずれの試験体においても主鉄筋全体の平均腐食率は、概ね目標値に近い値を示した。

H シリーズ腐食試験体においては、底面には鉄筋軸に沿って、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 試験体においても、支点外側の領域まで腐食ひび割れが発生したが、ひび割れ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。

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ほぼ全長にわたり発生した。

3.2 破壊性状

図-2(a)~(n)に H シリーズ試験体および ipb(4.42)-d130-10 試験体の終局時における破壊ひび割れ性状を示す。非腐食試験体の破壊モードは斜め引張破壊であった。

H(4.42)-d180-10 および H(2.40)-d130-10 を除く H シリーズ腐食試験体では、斜めひび割れが荷重点よりに発生し、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ほぼ端部方向に進展し、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た。最終的に、支点上縁コンクリートの曲げひび割れが定着部側面に発生した腐食ひび割れに連結したことで破壊に至った(定着上縁破壊と称する)。

H(3.19)-d180-Nn は、支点間の付着が無いため、斜めひび割れは発生しなかったが、最終的には腐食試験体と同様に支点上縁に曲げひび割れが発生し、そのひび割れ

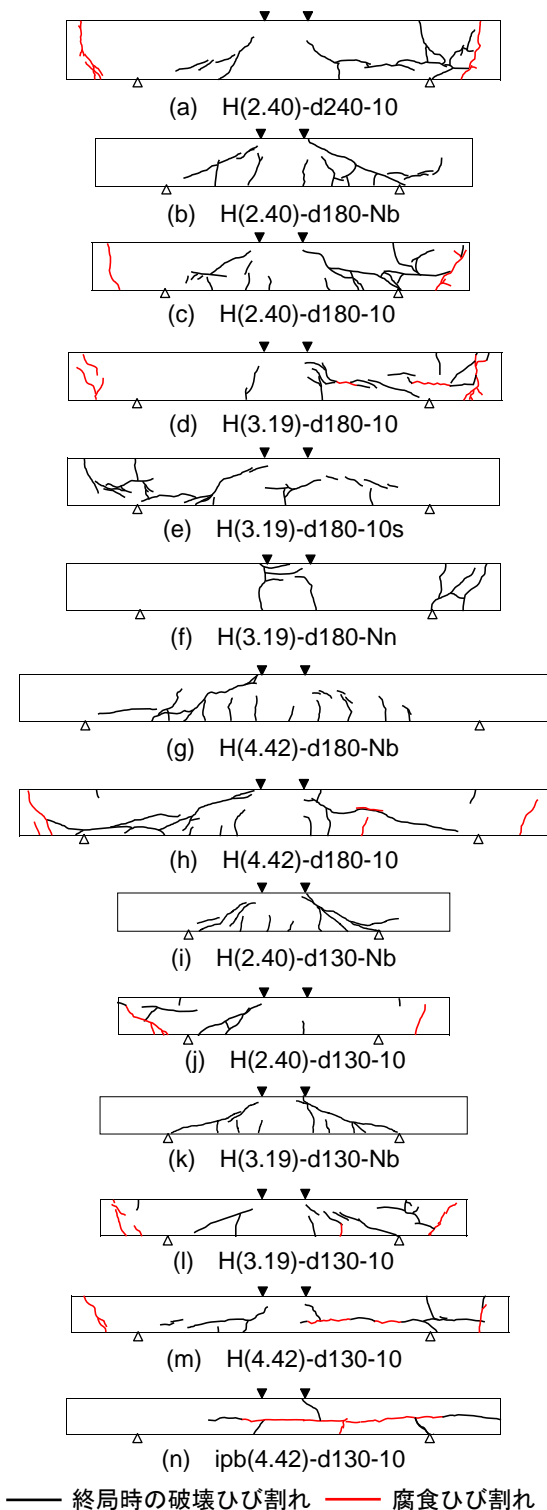


図-2 荷重試験結果

がはり下縁まで進展することで破壊に至った。

H(4.42)-d180-10 試験体では、わずかに支点上縁コンクリートに曲げひび割れが発生したが、最終的にせん断スパン中央部に発生した曲げひび割れに斜めひび割れが進展し、斜め引張破壊を呈した。

H(2.40)-d130-10 試験体では、フック端部を起点として、スパン中央方向に水平ひび割れが進展し、破壊に至った（フックせん断破壊と称する）。H(2.40)-d130-10 試

験体においても、支点上縁コンクリートに曲げひび割れが発生したが、フック部の腐食ひび割れやせん断ひび割れとの連結は認められず、上述した定着上縁破壊とは異なる破壊機構であると考えられる。このような破壊を呈した要因は、フック鉛直部の長さが短いため、鉄筋の拔出しによりフック鉛直部近傍のコンクリートに大きな支圧力が作用したためであると考えられる。

ipb シリーズにおいては、H シリーズと同様に、水平ひび割れが発生したが、水平ひび割れがはり端部まで進展し、付着割裂破壊を呈した。

3.3 荷重と中央変位

図-3(a)~(c)にHシリーズ試験体の荷重と中央変位の関係を有効高さごとに示す。また、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。

せん断耐力算定値 V_c は以下の二羽式により求めた⁴⁾。

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

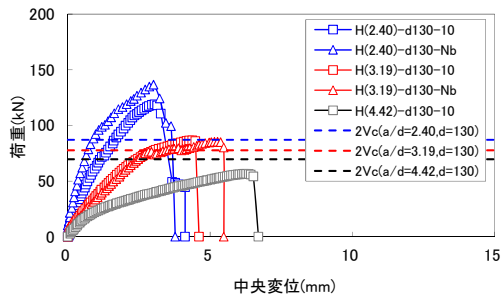
ここで、 f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 p_t : 軸引張鉄筋比、 d : 有効高さ(mm)、 a : せん断スパン長(mm)、 b_w : 部材幅(mm)である。なお、コンクリートの圧縮強度は設計基準強度 ($f'_c=30\text{N/mm}^2$) を用いた。

図-3(a)~(c)より、全ての断面において、 $a/d=2.40$ の試験体は $2V_c$ と比較して耐力が増加した。腐食試験体では、後述するように支点間の付着が損失しており、はり機構によるせん断抵抗寄与分は非腐食時に比べ低下していると思われるが、強固なアーチ耐荷機構が形成されたため、耐力が $2V_c$ を上回ったものと考えられる。 $a/d=3.19$ および $a/d=4.42$ の全長腐食試験体においては、耐力は荷重算定値に比べ大幅な増加は認められなかった。これは、 a/d が大きいほど、アーチ耐荷機構が形成されにくくなるためであると考えられる。

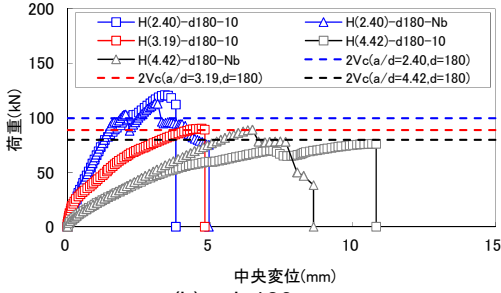
図-4に $a/d=3.19$ ($d=180$) である試験体の耐力を示す。アンボンド試験体の耐力が最も大きく、全長腐食試験体と比較して耐力は約 35kN 大きい。支点間のみ腐食した試験体においても全長腐食試験体の耐力と比較して約 20kN 大きい。いずれの試験体も定着上縁破壊を呈したことを鑑みれば、フック部の腐食ひび割れ性状が定着上縁破壊時の耐力に影響するものと考えられる。また、全長腐食試験体はフックを有さない ipb 試験体の耐力よりも約 30kN 大きく、腐食時においても定着フックによる主鉄筋の拔出し抑制効果が認められる。

3.4 耐荷機構

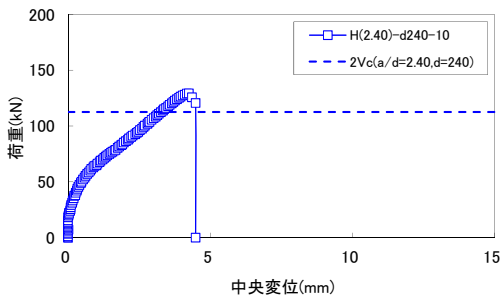
図-5に一例としてHシリーズの有効高さ $d=180\text{mm}$ である全長腐食試験体およびアンボンド試験体の各荷重レベル時における主鉄筋のひずみ分布を示す。なお、フック部においては、鉄筋を折り曲げない場合における



(a) d=130mm



(b) d=180mm



(c) d=240mm

図-3 荷重と中央変位

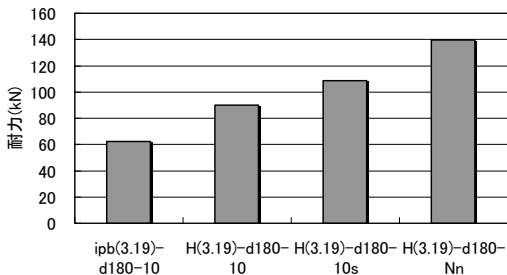
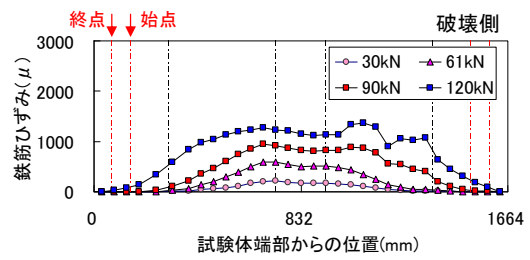


図-4 a/d=3.19(d=180mm)試験体の耐力比較

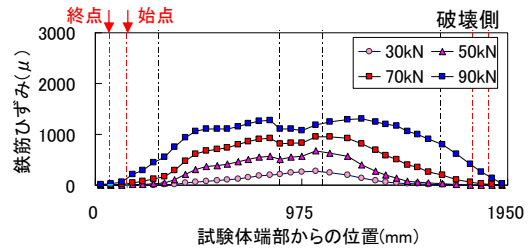
試験体端部からの位置を示している。図中の赤色の破線はフック折り曲げ開始点および終了点位置を、黒色の破線は荷重点および支点の位置を示す。

各腐食試験体において、低荷重レベル時では支点外側の主鉄筋定着領域においてひずみの発生は認められない。荷重の増加に伴い、ひずみ勾配が緩やかになるとともに、破壊側のスパンでは主鉄筋定着領域においてもひずみが発生している。アンボンド試験体では、荷重初期から定着領域のひずみが増大しており、低荷重レベル時からアーチ耐荷機構が支配的であると思われる。

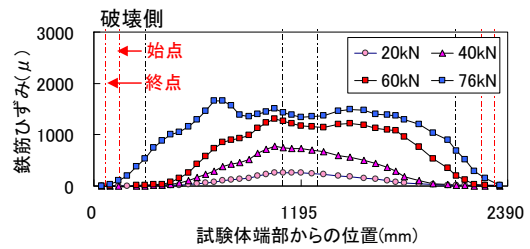
斜め引張破壊を呈した H(4.42)-d180-10 試験体においては、終局時においても破壊を生じたせん断スパンのひずみ勾配は大きく、支点間の付着劣化が比較的軽微であったものと推察される。



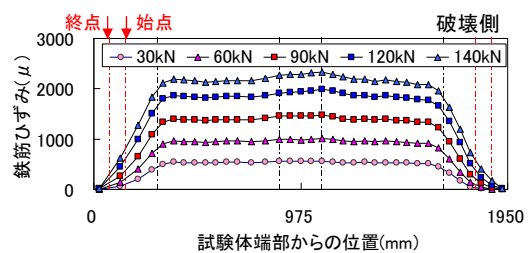
(a) H(2.40)-d180-10



(b) H(3.19)-d180-10



(c) H(4.42)-d180-10



(d) H(3.19)-d180-Nn

図-5 鉄筋ひずみ分布性状

4. フック定着部が腐食 RC はりの耐荷性状に及ぼす影響

4.1 各種材料劣化と耐荷力

図-6 に H シリーズの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) の関係を示す。両者には明確な相関関係は認められず、破壊の直接的要因が主鉄筋の断面減少ではないことを示唆している。

一例として H(3.19)-d180-10 試験体について、図-7 に各荷重レベル時における付着応力分布を、図-8 に荷重と破壊側の定着領域 (0~400mm) およびせん断領域 (400~775mm) の平均付着応力の関係を示す。付着応力は計測した鉄筋ひずみを用いて算出した。なお、付着領域を平均化した各領域は、図-5 に示した鉄筋ひずみ分布性状や曲げひび割れ発生による付着応力への影響を考慮し設定した。荷重の増加に伴い、せん断領域における付着応力が低下し、定着領域における付着応力が増大している。この傾向は斜め引張破壊を呈した H(4.42)-d180-10 試験体を除く全ての腐食試験体において

確認された。このことはすなわち、作用せん断力に対する主たる抵抗機構が、はり機構からアーチ機構へ移行したことを示している。

図-9に各試験体における定着性能 (τ_{anc}) と最大せん断応力 (V_u/bd) の関係を示す。ここで、定着性能とは、破壊側定着領域の最大荷重時における平均付着応力である。また、図中には ipb シリーズ試験体および村上らにより実施された定着部に補強筋を配筋し、主鉄筋端部をプレートにより固定したアンボンド試験体 (ipb シリーズと同じ断面諸元) の結果も示している²⁾。定着上縁破壊を呈した試験体において、最大せん断応力は定着性能の増加に従い増加する傾向を示した。また、 a/d が小さいほど同一定着性能に対する最大せん断応力は大きい。村上らは定着性能に基づく定着不良を生じた RC はり部材の耐力について以下の評価式を提案している²⁾。

$$\frac{V_{cor}}{V_{arch}} = 1 - \left(0.941 \left(1 - \frac{\tau_{cor}}{\tau_{arch}} \right) - 0.0748(a/d) \right) \leq 1.0$$

$$\tau_{arch} = \frac{1.256(a/d)V_{arch}}{n \cdot l_d \cdot \pi \cdot D}$$

$$V_{arch} = [4.861 \exp(-0.402 \cdot a/d)] \cdot V_c \quad (2)$$

ここで、 V_{cor} ：定着不良試験体のせん断耐力、 V_{arch} ：アンボンド試験体のせん断耐力、 τ_{cor} ：定着不良試験体の定着性能、 τ_{arch} ：アンボンド試験体の定着性能、 a/d ：せん断スパン比、 n ：主鉄筋の本数、 D ：鉄筋径、 l_d ：定着領域、 V_c ：斜め引張破壊時のせん断耐力である。

図-10に式(2)より算出した各試験体のせん断耐力算定値とHシリーズ試験体における実測のせん断耐力との関係を示す。決定係数は0.751であり、フックを有する場合においても破壊時における定着性能に基づいて耐力を概ね評価可能であった。図-7に一例を示したように、定着上縁破壊を生じたHシリーズ試験体は、終局付近では、支点間の付着がほぼ消失し、定着領域のみ付着が発生した。このことより、終局付近では、アーチ耐荷機構によってせん断力の大部分に抵抗しており、ipbシリーズと同様にせん断耐力に a/d と定着性能が支配的な影響を及ぼす状況下にあったと考えられる。

4.2 耐力低下に及ぼす a/d の影響

図-11に定着上縁破壊を呈した各試験体のアーチ耐力比 (V/V_{arch}) と a/d の関係を示す。なお、各試験体のアーチ耐力 (V_{arch}) は式(2)より算出した。

全長腐食試験体において、 a/d が小さい程、鉄筋腐食によるアーチ耐力からの低下割合は増加した。これは、図-9より a/d が小さいほどアーチ機構による耐力増加が見込めるが、その一方で腐食に伴う定着不良によって耐力低下も顕著に生じるものと考えられる。

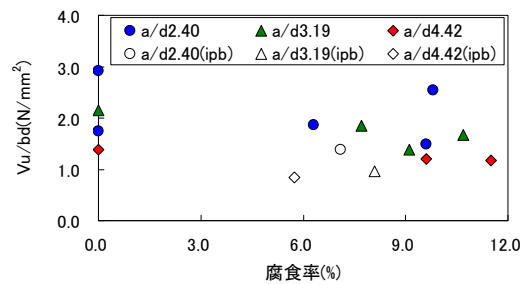


図-6 最大せん断応力と主鉄筋平均腐食率

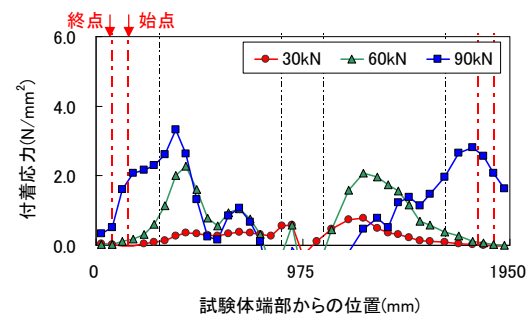


図-7 付着応力分布(H(3.19)-d180-10)

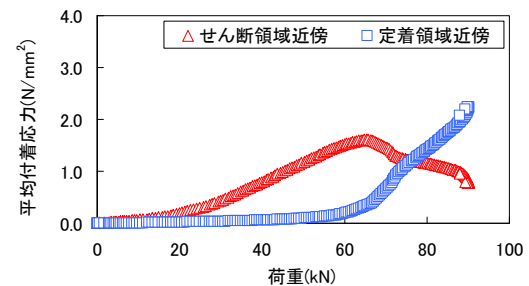


図-8 荷重と各領域の付着応力(H(3.19)-d180-10)

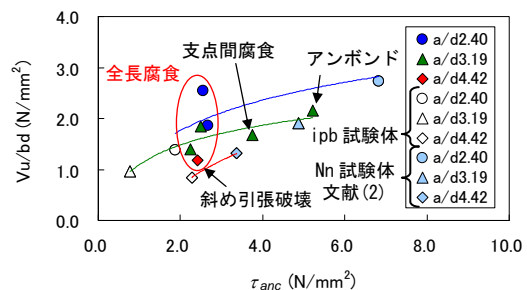


図-9 最大せん断応力と定着性能

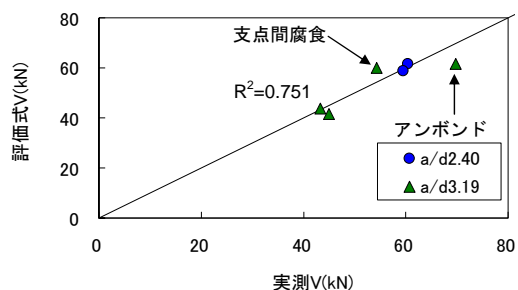


図-10 評価式(1)と実験値の比較

アンボンド、支点間腐食試験体において、 V/V_{arch} は全長腐食試験体に比べ大きい値を示しているが、これはフック定着部の腐食ひび割れ性状の影響によるものと考えられる。

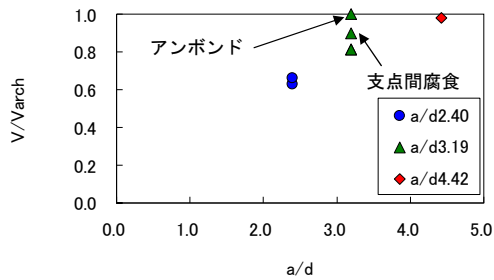


図-11 アーチ耐力比と a/d

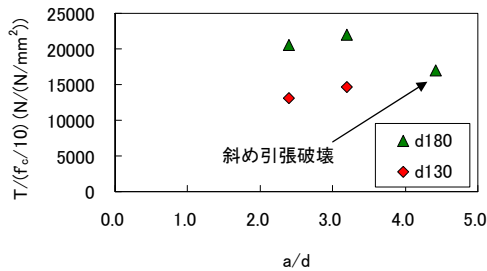


図-12 $T/(f_c/10)$ と a/d

4.3 定着上縁破壊のメカニズム

図-9より、Hシリーズ全長腐食試験体の定着性能は、ほぼ同じ値であることがわかる。図-5に示すように、定着上縁破壊を呈した試験体は支点間の付着の損失により支点近傍まで高レベルの鉄筋力が伝達されていたことから、支点間の付着が損失したことでたわみが増加し、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するものと考えられる。

そこで、図-12にHシリーズ全長腐食試験体の最大荷重時における支点近傍の作用鉄筋力と a/d の関係を示す。定着上縁破壊は、コンクリート強度の影響を受けると考えられることから、作用鉄筋力をコンクリートの引張強度で除することでコンクリート強度の影響を考慮した。なお、引張強度は圧縮強度の 1/10 倍と仮定した。また、定着上縁破壊はフック定着部の腐食ひび割れ性状の影響を受けるものと考えられるが、全長腐食試験体では、全ての試験体においてフック定着部に同程度の腐食ひび割れが発生したことから、定着部の腐食劣化性状に大きな差異は無いと考えられる。

定着上縁破壊を呈した腐食試験体において $T/(f_c/10)$ は a/d によらず有効高さが同じ試験体ごとにはほぼ一定であり、定着上縁破壊を呈した試験体の耐力は、支点近傍に伝達される鉄筋力およびコンクリート強度の影響が大きく、a/d の影響は小さいものと思われる。また、 $T/(f_c/10)$ は有効高さの大きい試験体の方が大きい。これは、有効高さが大きいほど曲げ剛性が大きく、また、引張力に抵抗する領域が大きいことから、同鉄筋力時に作用する曲げ引張応力が相対的に小さいためであると考えられる。なお、斜め引張破壊を呈した試験体においては、定着部

まで十分に荷重が伝達されていないことから作用する鉄筋力が小さいため、 $T/(f_c/10)$ は他の試験体と比較して若干小さい値を示していると考えられる。

5. 結論

本研究では、鉄筋腐食を生じた定着部に直角フックを有するせん断破壊先行型 RC はり部材の載荷実験を行い、定着フックが鉄筋腐食を生じた RC はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響について検討を行なった。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るが、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) 定着フックを有する場合において、既往の文献の定着性能に基づくアーチ耐力評価式に適応させた結果、腐食試験体の耐力を概ね評価することができた。
- (3) (1), (2) の場合におけるアーチ耐力の低下割合は a/d が大きいほど低下する傾向にあり、フック定着部の腐食ひび割れの程度が大きいほど増加する傾向にある。
- (4) 定着上縁破壊は、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。

謝辞：東京鐵鋼株式会社よりネジ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) 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
- 2) 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.
- 3) 金塚智洋, 小川和真, 村上祐貴：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の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.833-838, 2011
- 4) 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