

# 論文 鉄筋腐食した RC はり部材の残存耐荷性能に及ぼす定着性能の影響

村上 祐貴\*1・塩谷 文彬\*2 堤 知明\*3・大下 英吉\*4

**要旨:** 本研究では、鉄筋腐食により定着不良を生じた RC 梁部材の残存耐荷性状を評価可能とすることを目的として、断面諸元、鉄筋腐食レベル、定着性能などをパラメータとした RC はり部材に対して載荷実験を実施した。その結果、著しく主鉄筋の付着劣化が生じた状態では、荷重が定着領域まで伝達し、はりの耐荷機構に変化が生じることが明らかとなった。さらに、その際の耐荷性状は定着性能および  $a/d$  に大きく影響することを明らかにした。また、実験結果に基づき定着不良を考慮した鉄筋腐食を生じた RC はり部材のせん断耐力評価手法を提案した。

**キーワード:** 鉄筋腐食, 残存耐力, 定着性能, せん断スパン比

## 1. はじめに

現在、構造物を新設する時代から、既設構造物を適切に維持管理し長期的に使用する時代へと移り変わっており、近年では各種劣化損傷を生じた RC 構造物の構造性能について多方面で研究が実施されている。特に、中性化や塩害による鉄筋腐食劣化は種々ある劣化現象の中でも構造性能に直接影響を及ぼす場合が多いことから、盛んに研究が行われ、また体系的な取り組みもなされている。

鉄筋腐食を生じた RC はり部材の残存耐荷性状について有用な知見が蓄積されつつあるが、これら研究の多くは、主鉄筋の定着が設計時と同様に十分に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、過度の腐食或いはアルカリ骨材反応などの複合劣化によって、定着フック曲げ加工部が破断し、定着が不十分となることが懸念される。したがって、十分に定着が確保された状態における曲げ耐荷性状やせん断耐荷性状に対する検討に加えて、定着不良を生じた状態での各種耐荷性状に及ぼす鉄筋腐食の影響について検討することも非常に重要な位置付けにある。

このような背景から、著者らは定着不良を生じた腐食 RC はりの残存耐荷性能についての検討を行ってきた<sup>1)</sup>。その結果、残存耐荷性状は、単に主鉄筋の平均腐食率のみに依存するのではなく、主鉄筋の腐食の不均一性や付着応力性状、腐食ひび割れ性状等の影響も大きく受けることを指摘した。しかしながら、既往の研究においては、残存耐荷性状に及ぼす影響因子について言及するに留まっており、それら影響因子が耐荷性状に及ぼす影響の定量化に際しては十分ではなく、また、部材の形状・寸法も一種類のみに対する検討であった。

そこで、本研究では鉄筋腐食を生じた RC はり部材の残存耐荷性状について主鉄筋の定着性能という観点に立脚して統一的に評価可能とする手法の構築を目的とした。具体的には、主鉄筋の平均的な腐食率に加えて、形状寸法の異なる RC はり部材に対して鉄筋腐食の不均一性や腐食ひび割れ性状および主鉄筋とコンクリートの付着性能の低下といった鉄筋腐食に起因した各種腐食劣化現象が、RC はり部材の残存耐力性状に及ぼす影響について実験的検討を行うとともに、鉄筋腐食を生じた RC はり部材の耐荷機構の遷移ならびに耐荷性状評価を提案した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体の形状寸法および配筋を図-1 に示す。試験体は3種類であり、L シリーズは幅 240mm、高さ 200mm、長さ 2100mm、H シリーズは幅 210mm、高さ 260mm、長さ 2100mm、D シリーズは幅 240mm、高さ 340mm、長さ 2400mm である。また、L シリーズおよび H シリーズでは定着長を 150mm とし、D シリーズではその 2 倍の 300mm とした。

主鉄筋には L シリーズおよび H シリーズでは D16 異形鉄筋(SD295A)を使用し、D シリーズでは D22 異形鉄筋(SD345)を使用した。また、定着補強として D6(SD295A)を配筋した。2.2 節において後述するが、定着筋量(本数)を試験体によって変更している。

コンクリートの配合は表-1 に示す通りであり、設計基準強度は  $30\text{N/mm}^2$  である。また、鉄筋の材料試験結果は表-2 に示す通りである。設計時の曲げ耐力およびせん断耐力算定値を表-3 に示す。なお、各種耐力の算出

\*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科助教 工博 (正会員)

\*2 中央大学 理工学部都市環境学科

\*3 東京電力株式会社 技術開発研究所 工博 (正会員)

\*4 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

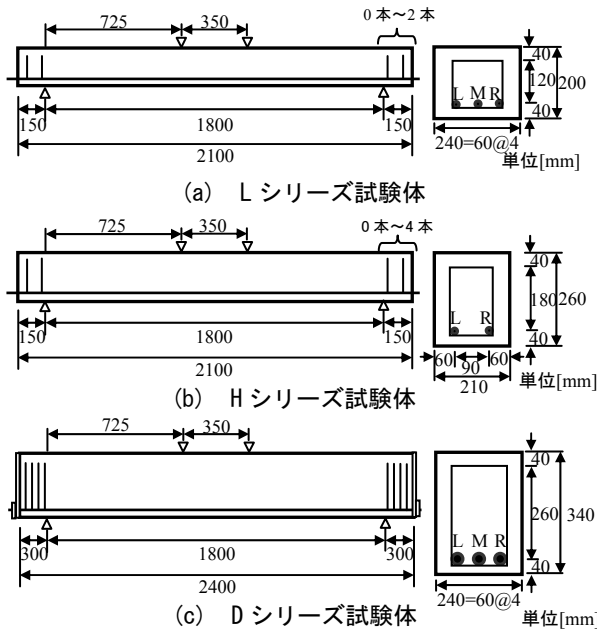


図-1 試験体概要

表-1 コンクリートの配合(設計基準強度:30N/mm<sup>2</sup>)

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
20	60	10	5.0	168	280	826	996	2.80

表-2 鉄筋の材料試験結果

鉄筋径	規格	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
D6	SD295A	438	557	2.0×10 <sup>5</sup>
D16		369	523	2.0×10 <sup>5</sup>
D22	SD345	400	579	2.0×10 <sup>5</sup>

に際しては、コンクリートの圧縮強度は各試験体の平均値および鉄筋の降伏応力は実測値を用いた。また、せん断耐力は、コンクリート分担分 (Vc) を二羽式<sup>2)</sup>から算出した。LシリーズおよびHシリーズは曲げ破壊先行型の断面諸元であり、Dシリーズはせん断破壊先行型の断面諸元である。

## 2.2 実験パラメータ

実験パラメータを表-3に示す。実験パラメータは、断面諸元、主鉄筋の腐食レベル、定着筋量などである。各試験体の名称は、図-2に示すように試験体パラメータの概略を示している。本研究では、鉄筋腐食が進み、かぶりコンクリートのひび割れが顕著化し、腐食劣化が耐荷力への影響が著しく生じる加速度後期から劣化期のRCはりを主たる対象とする。主鉄筋の目標平均腐食率は、LおよびHシリーズでは10%および20%とした。Dシリーズの主鉄筋の目標平均腐食率は5%および10%とした。

Lシリーズでは、定着筋は0本(主鉄筋のみ)および2本の2水準とした。なお、試験体L-S2-10ubは定着筋にビニールテープを巻きつけアンボンド処理を施した。Hシリーズでは定着筋の本数は0本、2本、3本および4

表-3 実験パラメータおよび実験結果

シリーズ	試験体名	設定腐食率 (%)	腐食率 主鉄筋 (%)	定着筋 (%)	曲げ耐力 示方書 (kN)	せん断耐力 二羽式 Vc(kN)	破壊荷重 (kN)	破壊モード	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
L	L-S0-0	-	-	-	80.5	42.8	94.9	曲げ	30.8
	L-S0-10	10	10.2	-			53.1	付着割裂	31.6
	L-S0-20	20	18.6	-			34.3	付着割裂	35.5
	L-S2-0	-	-	-			91.4	曲げ	30.3
	L-S2-10	10	10.1	39.2			69.8	せん断	30.4
	L-S2-20	20	16.4	42.6			59.2	せん断	28.0
H	L-S2-10ub	10	11.3	-	76.8	45.4	52.9	付着割裂	30.1
	H-S0-0	-	-	-			101.1	曲げ	30.4
	H-S0-10	10	10.8	-			80.7	付着割裂	30.9
	H-S0-20A	20	19.0	-			75.4	付着割裂	30.8
	H-S0-20B	20	20.9	-			39.9	付着割裂	33.9
	H-S2-10	10	7.4	29.9			85.9	せん断	27.8
D	H-S2-20	20	18.2	27.3	313.3	188.5	72.4	付着割裂	30.3
	H-S3-20	20	12.3	10.5			74.9	付着割裂	33.1
	H-S4-20	20	16.0	10.3			64.4	付着割裂	37.8
	W-S4-0	-	-	-			173.4	せん断	27.0
	W-S4-5	5	6.0	34.9			203.5	せん断	29.6
	W-S4-10	10	12.0	45.4			236.5	せん断	27.3
D-SF	W-SF-0	-	-	-	313.3	188.5	179.3	せん断	28.0
	W-SF-5	5	5.5	30.3			243.6	定着上縁	29.9
	W-SF-10	10	7.4	35.7			207.4	定着上縁	32.5

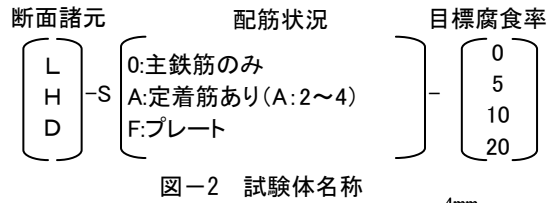


図-2 試験体名称

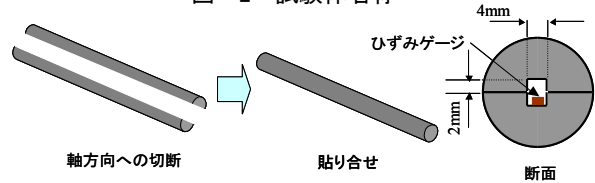


図-3 貼り合わせ鉄筋概要

本の4水準とした。なお、目標腐食率が20%である試験体については、試験体を2体作成したため、それぞれH-S0-20AおよびH-S0-20Bと称することとする。Dシリーズでは、定着筋の本数はいずれの試験体も4本配筋した。さらにD-SFシリーズでは図-1(c)に示すように試験体端面にプレートを設置し、ナットを用いて主鉄筋を端部に完全に固定した。

## 2.3 腐食試験方法

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。電食試験の概要は既往の研究を参照されたい<sup>1)</sup>。鉄筋腐食の評価指標は、試験前後の鉄筋の質量減少率(腐食率)を用いることとした。いずれの腐食試験体も主鉄筋全体の平均腐食率は、ほぼ目標値に近い値を示している。

## 2.4 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に示したように荷重点間隔350mm、支点間距離1800mmの静的4点曲げ荷重試験である。せん断スパン比はLシリーズでは4.53、Hシリーズ試験体では3.30、Dシリーズでは2.42である。

測定項目は、鉄筋の腐食率、腐食ひび割れ幅、スパン中央部のたわみおよび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変位計を荷重点直下に2点、試験体中央に1点設置して測定した。

鉄筋の軸方向ひずみの測定であるが、ひずみゲージを鉄筋表面に貼り付けた場合、鉄筋腐食によってゲージは

破損する。本実験においては、ひずみゲージの貼り付け位置は鉄筋内部とし、図-3 に示すように鉄筋を軸方向に切断した後、その断面に2×4mmの溝を掘り、ひずみゲージ(検長2mm)を貼り付けた。その後、2対の切断された鉄筋をエポキシ樹脂接着剤により接合し一本の鉄筋とした。

鉄筋ひずみの測定は、48mm間隔とし、配筋した主鉄筋のうち、LシリーズおよびDシリーズはM鉄筋、HシリーズはL鉄筋を対象として測定を行った(図-1参照)。

### 3. 定着性能の異なる腐食したRCはりの破壊性状

#### 3.1 Lシリーズ試験体(a/d:4.53)

図-4にLシリーズ試験体の荷重と中央変位の関係、図-5に破壊ひび割れ性状を示す。まず、非腐食試験L-S0-0では主鉄筋は降伏に至り、破壊モードも曲げ引張破壊を示した。

次に、耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響であるが、平均腐食率が約10%であるL-S0-10の耐力は非腐食時の約56%、平均腐食率が20%時の耐力は健全時の約33%まで低下し

た。また、その破壊は極めて脆性的であり、図-5(b)および図-5(c)に示すように斜めひび割れが載荷点近傍に発生し、付着割裂ひび割れへと進展して、はりは破壊に至った。

図-5にL-S0シリーズ試験体の主鉄筋のひずみ分布を示す。まず、図-5(a)に示す鉄筋が非腐食である試験体L-S0-0のひずみは放物的な分布性状を示し、荷重が90kNの時点では等曲げ区間の鉄筋が降伏した(降伏ひずみは約1800 $\mu$ )。また、支点間で付着があることから、主鉄筋の定着領域近傍では、ひずみはほとんど生じていない。

一方、腐食試験体に関しては、荷重の増加に伴ってせん断スパンのひずみ勾配が緩やかになるとともに、定着領域までひずみが発生している。これは、鉄筋腐食に伴い主鉄筋とコンクリートの付着劣化が生じたためであり、せん断区間内で荷重を保持できず主鉄筋定着領域まで比較的大きな荷重が伝達されたわけである。S0シリーズにおいては、定着領域まで荷重伝達がなされると、腐食に伴い定着不良を生じていることから、端部から鉄筋が抜出し、はりは破壊に至ることとなり、定着性能が耐荷性状に極めて重要な位置付けとなるわけである。

定着筋を配筋したL-SAシリーズ試験体では、図-4に示すように鉄筋腐食を生じた場合では、健全時に比べて耐力は低下しているものの、腐食に応じた耐力の低下量はL-S0シリーズに比べて大幅に抑制されている。

一方、定着筋をアンボンドとしたL-S2-10ubでは、L-S0シリーズ腐食試験体と同様、耐力が大幅に低下するとともに極めて脆性的な破壊性状を示しており、定着筋の付着劣化が耐荷性状に非常に大きな影響を及ぼすことを

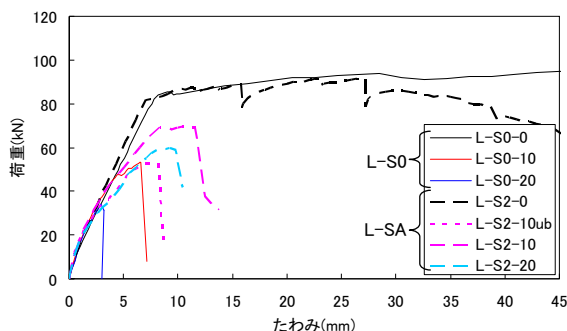


図-4 荷重と中央変位 (Lシリーズ a/d:4.53)

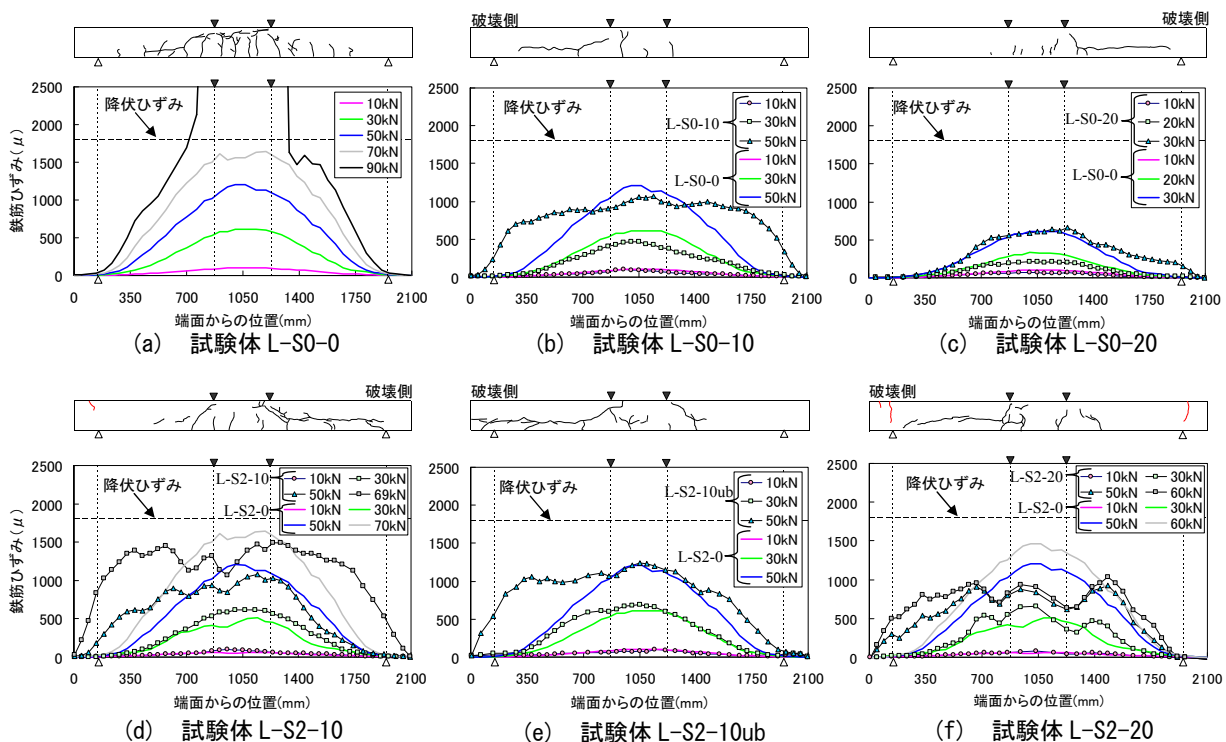


図-5 載荷試験結果 (Lシリーズ)

示唆している。既往の研究において、主鉄筋下側領域においてせん断補強筋の付着劣化が生じると、せん断耐荷性能が低下することが報告されている<sup>1),3)</sup>。定着筋に関しても、主鉄筋の付着劣化により定着部まで荷重が伝達される場合には、定着筋の付着性能が耐荷性状に大きな影響を及ぼすこととなる。

### 3.2 H シリーズ試験体(a/d:3.30)

図-6にHシリーズ試験体の荷重と中央変位の関係を示す。H-S0-10およびH-S0-20Aでは、鉄筋腐食に伴う耐力の低下割合はLシリーズ腐食試験体に比べて小さく、破壊も延性的な挙動を示した。これに対して、H-S0-20BではH-S0-0に比べて耐力は大幅な低下を示すとともに、極めて脆性的な破壊性状を示した。H-S0-20AとH-S0-20Bの主鉄筋の平均腐食率はほぼ同じであることから、主鉄筋の付着応力性状の違いが耐力に大きな影響を及ぼしているものと考えられ、後に詳述する。

Hシリーズ試験体の破壊ひび割れ性状は図-7に示すように、H-S0-10およびH-S0-20Aでは、主鉄筋に沿ったひび割れが支点近傍或いは支点を越えて発生しており、

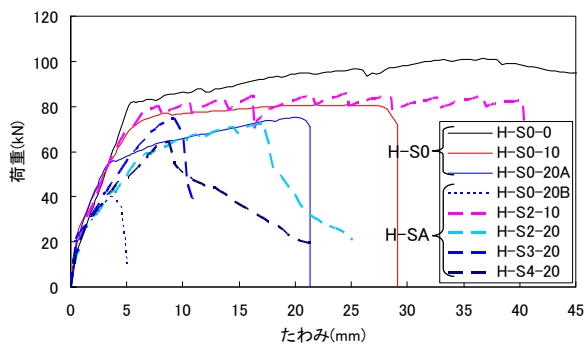


図-6 荷重と中央変位 (Hシリーズ a/d:3.30)

L-S0 シリーズと同じく、鉄筋腐食に伴い破壊モードが曲げから付着割裂破壊へと移行したことが確認される。

次に定着筋を配筋したH-SAシリーズ試験体であるがH-S2-10とH-S0-10の荷重と中央変位を比較すると残存耐力に差異はない。これは、図-7(b),(e)に鉄筋ひずみ分布を示すように定着破壊を生じる前に等曲げ区間において主鉄筋が降伏に至ったためである。また、主鉄筋の平均腐食率が約20%であるH-S2-20とH-S0-20Bを比較すると、定着筋を配筋したことで、残存耐力の低下が大幅に抑制され、変形性能も向上している。

定着筋量の多いH-S3-20およびH-S4-20においては耐力の低下は抑制されているが、試験体H-S2-20とは明確な差異は生じておらず、本実験の範囲内では定着筋による主鉄筋の拘束効果は期待できるものの、その効果を発揮する量には上限値があるものと判断される。

### 3.3 D シリーズ試験体(a/d:2.42)

図-8にDシリーズ試験体の荷重と中央変位の関係、図-9に破壊ひび割れ性状を示す。図-8より、鉄筋腐食を生じた試験体の耐力は非腐食試験体よりも大きい。このことは、鉄筋腐食により支点間の付着応力が低下しせん断力に対する支配的な耐荷機構がアーチ機構に移行したと考えられる。

LシリーズおよびHシリーズにおいても、主鉄筋のひずみ分布を鑑みれば、荷重の増加とともに支点間の付着は損失しており、梁機構によるせん断抵抗は期待できず、主たるせん断力への抵抗機構はアーチ耐荷機構によるものと思われるが、Dシリーズのような腐食に伴う耐力増加は顕著ではない。これは、LシリーズおよびHシリ

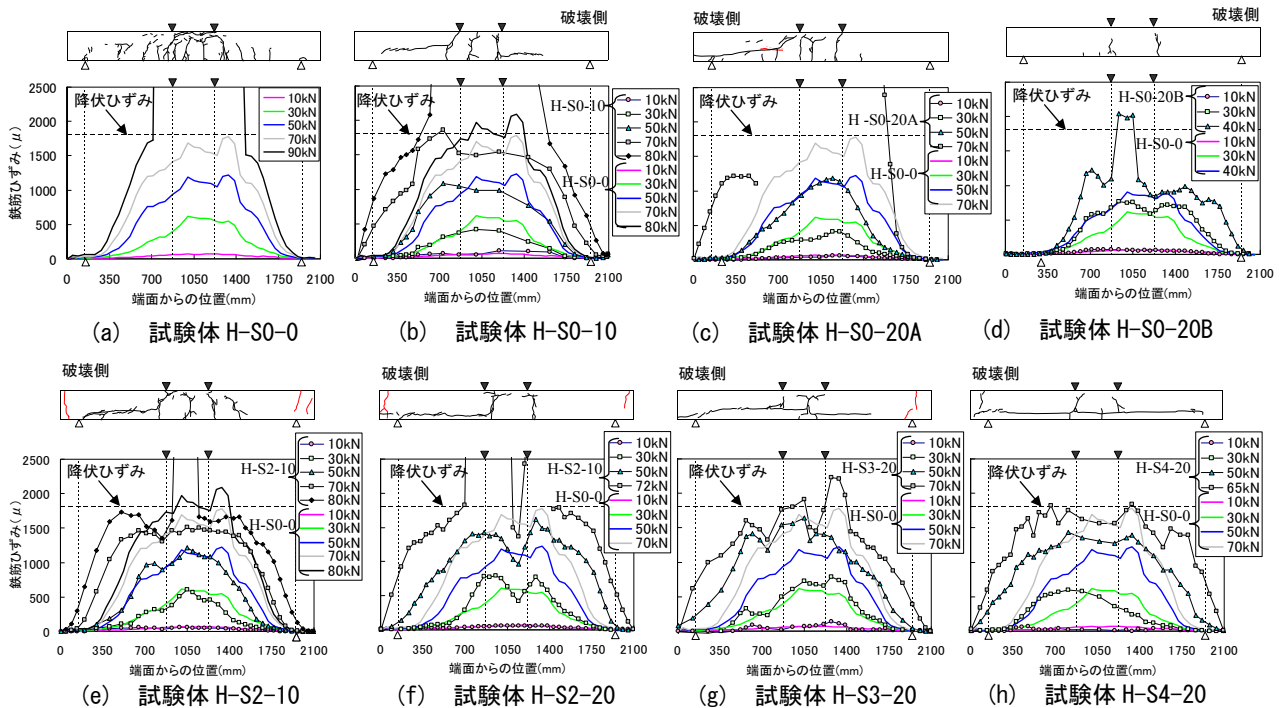


図-7 載荷試験結果 (Hシリーズ)

ーズの定着長がDシリーズに比べて短いため、アーチ期耐荷機構の形成の過程で主鉄筋の抜出が生じたことと、アーチ角度の影響があるものと考えられる。

#### 4. 鉄筋腐食を生じた RC はりの耐荷性状に及ぼす主鉄筋の腐食と耐荷力

##### 4.1 主鉄筋の腐食率と耐荷力

図-10は、各試験体における主鉄筋の平均腐食率と耐力比の関係を示したものである。腐食試験体の耐力は、非腐食時のコンクリートのせん断耐力算定値(表-3参照)を用いて正規化した。

せん断或いは付着割裂破壊を生じた試験体については、主鉄筋の平均腐食率と耐力比の相関は低い。

図-10には、XUEらによる提案式から算出した腐食RCはりのせん断耐力と主鉄筋の平均腐食率との関係を破線で示す<sup>4)</sup>。LシリーズおよびHシリーズでは評価式に比べて全体的に耐力は低い。特に、Hシリーズにおいては、全く異なった傾向を示している。これは、XUEら

の評価式が完全定着状態における腐食RCのせん断耐力を想定しているためであり、XUEらもこのことを指摘している。したがって、本試験体のように腐食に伴って定着不良が生じた場合においては、完全なアーチ機構が形成される過程で主鉄筋が抜け出してしまうため、定着性能を考慮する必要がある。

一方、Dシリーズに関しては、評価式に比べて若干小さいものの、腐食率に応じて増加する傾向は同じであり、完全定着状態に近いものと判断される。

そこで、次節においては定着不良を生じたLシリーズおよびHシリーズを対象として、残存耐力に定着性能が及ぼす影響を評価することとする。

##### 4.2 定着性能がせん断耐荷性状に及ぼす影響

図-11にせん断破壊或いは付着割裂破壊を生じた試験体の定着領域における平均付着応力の最大値(定着性能)と試験体の単位幅当りの耐力の関係を示す。平均付着応力は、計測した鉄筋ひずみから算出した。図-11に示すように、いずれのシリーズにおいても定着性能の低下に伴い耐力はほぼ線形的に低下しており、定着性能が残存耐力に支配的な影響を及ぼすことが確認される。また、Hシリーズ試験体はLシリーズ試験体に比べて同一定着性能に対する耐力が大きい値を示している。これは、せん断スパン比の影響であり、Hシリーズ試験体は、Lシリーズ試験体に比べてせん断スパン比が小さいことにより、アーチ角度が相対的に大きくなったためであると考えられる。

この影響を試験体の単位幅当りの耐力にせん断スバ

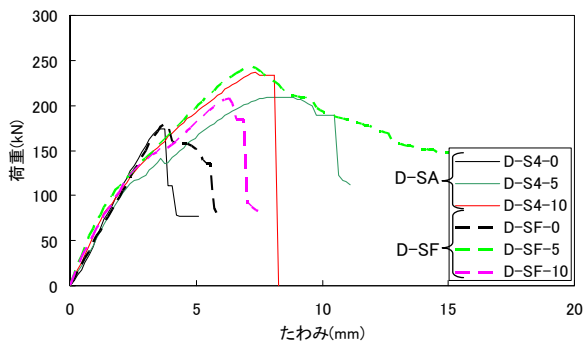


図-8 荷重と中央変位 (Dシリーズ a/d:2.42)

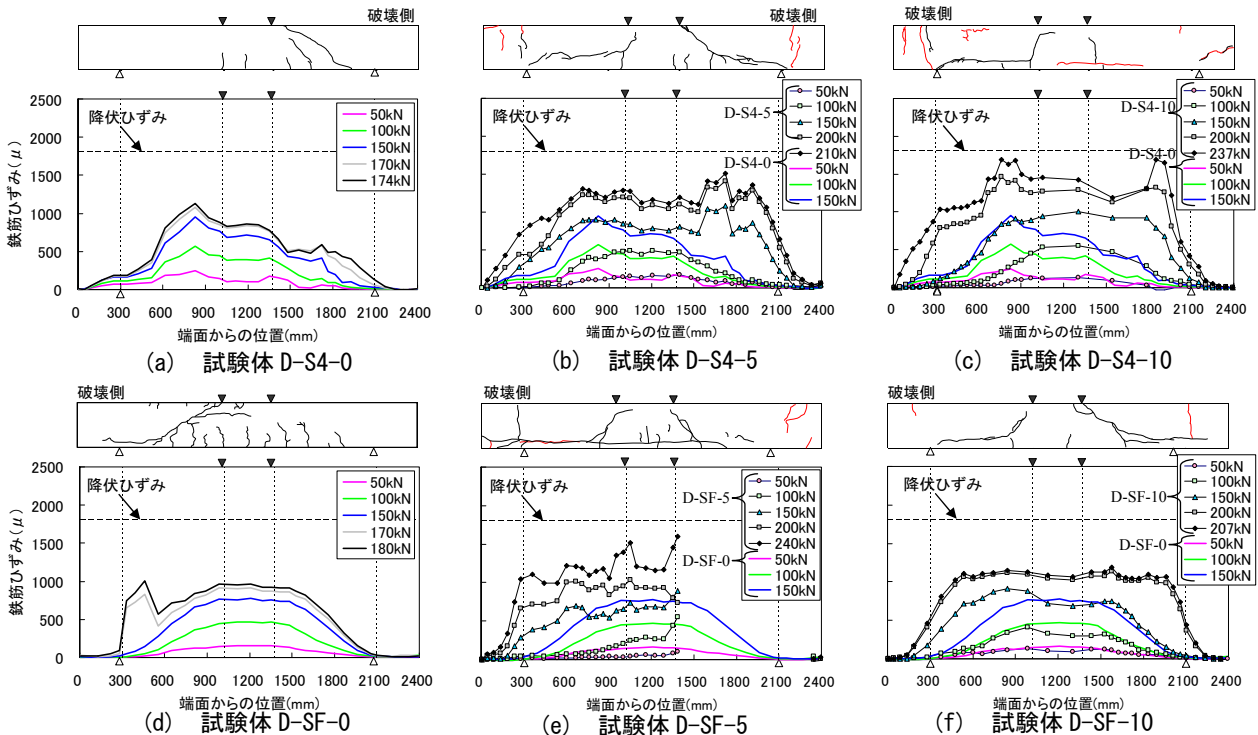


図-9 載荷試験結果 (Dシリーズ)

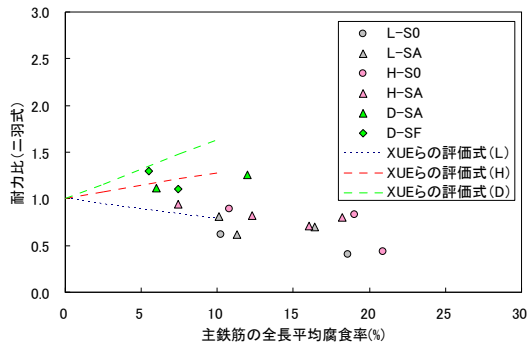


図-10 耐力と主鉄筋の平均腐食率

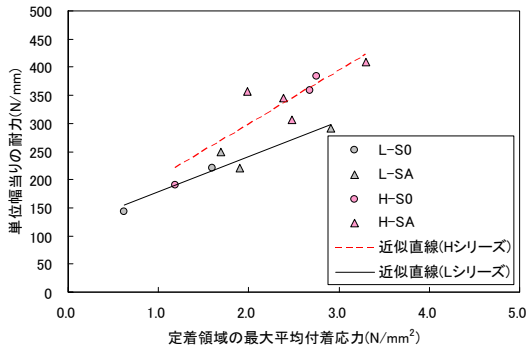


図-11 試験体の単位幅当りの耐力と定着性能

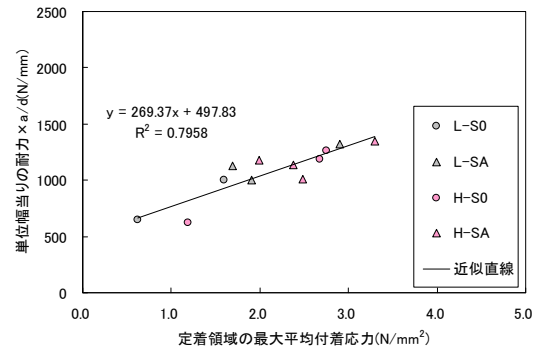


図-12 試験体の単位幅当りの耐力×a/dと定着性能

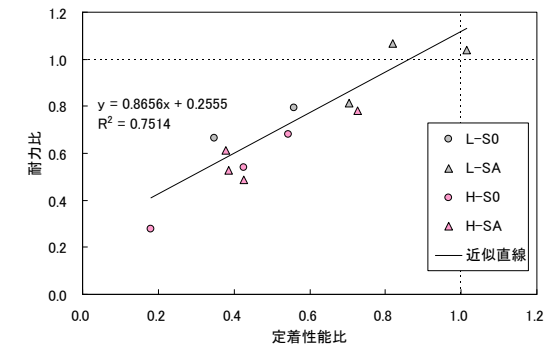


図-13 耐力比と定着性能比

ン比を乗ずることにより、 $a/d$  を考慮した耐力と定着領域の平均付着応力の最大値との関係を図-12 に示す。定着領域の平均付着応力の最大値（定着性能）と  $a/d$  を考慮したせん断耐力は、試験体シリーズによらずほぼ一義的な関係を示している。

図-10 に示した XUE らによる完全定着状態時の腐食 RC はりのせん断耐力評価式は式(1)に示すようになる<sup>4)</sup>。

$$V = \alpha_1 \cdot V_{c0} \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 1 + [0.16 - 0.04a/d] \cdot C_m$$

ここで、 $a/d$ : せん断スパン比、 $C_m(\%)$ : 軸引張鉄筋の平均腐食率、 $V_{c0}$ : 軸引張鉄筋のみの健全なはり部材のせん断耐力である。

式(1)より、各腐食試験体の完全定着状態におけるせん断耐力を算出した後、図-12 に示した耐力と定着性能の直線近似式を用いて完全定着状態でのせん断耐力を得るのに必要な定着性能を式(2)により逆算した。

$$\tau_{anc} = ((2V/b) \cdot a/d - 497.83) / 269.37 \quad (2)$$

ここで、 $b(\text{mm})$ : はり幅、 $\tau_{anc}(\text{N/mm}^2)$ : 定着領域の最大平均付着応力である。

式(1)および式(2)より算出した完全定着状態でのせん断耐力および定着性能を 1.0 として、各腐食試験体のそれらを正規化すると、図-13 に示すようになる。同図に示すように、両者には比較的良好な線形関係が確認され、本実験の範囲内ではあるが、定着不良の影響によるせん断耐力の低下を概ね評価することが可能である。

## 6. 結論

本研究では形状・寸法の異なる RC はり部材に対して鉄筋腐食によって定着不良を生じた場合の残存耐力性状について実験的検討を行うとともに、その評価手法を提案した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) アーチ耐荷機構が形成される場合における破壊形態は、定着不良が生じた場合、不完全なアーチ機構となり破壊形態は付着割裂破壊となる。その場合、定着性能は、はりの残存耐力に支配的な影響を及ぼす
- (2) 定着不良によって不完全なアーチ機構が形成された場合のせん断耐力は、せん断スパン比と定着性能を考慮することで、ある程度評価することができる

## 参考文献

- 1) 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.631-649, 2008.12
- 2) 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
- 3) 前川宏一, 中村光, 佐藤靖彦, Kukrit TOONGOENTHONG: せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.973-978, 2004
- 4) 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