# 論文 コンクリート部材のせん断補強筋腐食がひび割れ幅に及ぼす影響に ついて

# 濱 茜\*1・岸本 一蔵\*2

要旨:本研究では,せん断補強筋の腐食がせん断ひび割れ性状に及ぼす影響を検討するため,鉄筋の腐食促進を行った RC 試験体を対象に実験を行った。その結果,一方向引抜き試験では鉄筋に腐食が生じている場合,抜け出し開始時の荷重は大きくなり,最大平均付着応力度も大きくなるが,最大値以降急激に平均付着応力度は低下した。一方,せん断補強筋を模擬した試験体に対する試験でも,腐食量が増すと鉄筋応力ーすべり関係における剛性が小さくなった。これらの結果から判断すると,せん断補強筋の腐食量が増大すると,腐食のない場合に比べひび割れ幅が大きくなることが予想される。

キーワード:腐食量, せん断補強筋, 付着強度, せん断ひび割れ幅

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐久性を考える上で, 鋼材腐食は最も重要な項目であり, RC 構造物の諸力学 的性能を低下させる。諸力学的性能の低下は,鋼材の有 効断面積の欠損,あるいは腐食生成物の堆積に伴うひび 割れ発生や付着劣化により起こる。

鋼材腐食に関する研究は過去より多く行われているが, 鋼材腐食が構造性能へ及ぼす影響の程度は,対象とする 部材種や部材の部位,腐食程度などの影響を受け複雑で あるため,定量的な答えは得られていない。さらに,既 往の研究は主に主筋(太径の鋼材)を対象としたものが 多く,せん断補強筋(細径の鋼材)を対象とした研究は 少ない。実際の梁などの構造部材を考える場合,せん断 補強筋は主筋に比べて外側に配筋されており,かぶりは 薄い。したがって,実際にはせん断補強筋は主筋よりも 先に腐食が生じる可能性が高い。腐食によりせん断補強 筋の力学的性能が低下するとせん断耐力が低下し<sup>1)</sup>,部 材の破壊モードが通常の設計で想定される曲げ破壊系か らせん断破壊系に変化する可能性がある。これは構造物 全体の耐震性能に非常に大きな影響を及ぼす。よってせ ん断補強筋の腐食についての検討は重要なテーマである。

本研究では、せん断補強筋の腐食が部材の力学的性能, 特にせん断ひび割れ性状に及ぼす影響を検討するため, 鉄筋の腐食促進を行った RC 試験体を対象に実験を行った。

#### 2. 実験概要

本研究は, せん断補強筋の腐食の影響を検討する第一 段階の研究であるため, 基礎的な検討として次の2つの 実験を行った。

シリーズA:腐食した細径鉄筋の付着性状(τ-S関係)

\*2 近畿大学 建築学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

を求めるための基礎実験として,コンクリート中に埋設 した鉄筋を腐食させた試験体の鉄筋一方向引抜き試験

シリーズ B: せん断補強筋が腐食した場合のせん断ひ び割れ性状を検討するため,梁部材から1本のせん断補 強筋の一部を含む部分を切り出したものを模擬した試験 体のひび割れ発生試験(詳細は後述)

### 2.1 一方向引抜き試験(シリーズ A)

#### 2.1.1 試験体概要

表-1に試験体一覧,表-2に材料強度を示す。

図-1 にシリーズ A の試験体を示す。シリーズ A では かぶり厚の異なる 2 種類の試験体を作製した。寸法は W200×L471×H200(mm)と W200×L639×H200(mm)で ある。内部に異形鉄筋 D13 (SD490)を所定のかぶり厚 となるよう3本配置した。鉄筋は、付着(試験)区間が

試験体名	かぶり厚	目標腐食量	通電時間	積算電流量
	[mm]	[%]	[hour]	[A•hour]
A-1-1~3	40	-	-	-
A-2-1~3		5	168	10.08
A-3-1~3		8	264	15.84
A-4-1~3		16	528	31.68
A-5-1~3	60	-	-	-
A-6-1~3		5	168	10.08
A-7-1~3		8	264	15.84
A-8-1~3		16	528	31.68
B-1	30	-	-	-
B-2		15	504	111.89
B-3		25	840	186.48
B-4		35	1176	261.07

表-1 試験体一覧

表-2 材料強度

	コンクリート		鉄筋 D13	
シリーズ	圧縮強度	割裂強度	降伏強度	ヤング率
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	$[kN/mm^2]$
Α	22.5	2.39	_	_
В	33.6	2.29	347	194

<sup>\*1 (</sup>株) 鴻池組 (正会員)



150mm となるようにビニールテープを巻いて付着絶縁 区間を設けた。また、付着区間を腐食させる区間(腐食 対象区間)とし、同区間外が腐食しないようエポキシ樹 脂を塗布した。養生は打設後28日間の気中養生とした。 パラメータはかぶり厚(40mm,60mm),目標腐食量(無, 5%,8%,16%)とした。

鉄筋の腐食促進は電食により行った。**写真-1**に電食の様子を示す。鉄筋を陽極、銅板を陰極とし、直流安定 化電源を用いて通電し、電流密度は既往の研究<sup>2)</sup>を参考 に 1mA/cm<sup>2</sup>とし、電食槽の電解溶液には NaCl5%水溶液 を使用した。電食の通電時間は目標腐食量を満たすよう、 式(1)<sup>3</sup>により設定した。

$$W = 0.766I_t \tag{1}$$

ただし, W:腐食量[g], I<sub>t</sub>:積算電流量[A·hour]

電食終了後,載荷を行った。載荷後,内部の鉄筋を取 り出し,取り出した鉄筋の腐食対象区間を切り出し,ク エン酸水素二アンモニウム 10%水溶液に 24 時間浸漬し 錆を除去した。錆を除去した後,質量,長さを計測し, 単位長さあたりの質量を求め,式(2)より腐食量を算出し た。目標腐食量と実腐食量の比較を図-2 に示す。

$$W = \frac{W_n - W_a}{W_n} \times 100 \tag{2}$$

ただし, W:腐食量[%], W<sub>n</sub>:健全鉄筋の単位長さあ たりの質量[g/cm], W<sub>a</sub>:腐食鉄筋の錆除去後の単位長さ あたりの質量[g/cm]

# 2.1.2 試験方法

シリーズAの試験体の引抜試験の載荷方法を図-3に 示す。試験体の引抜き側に鉄板,油圧ジャッキ,ロード セルを設置し,鉄筋端部のねじ加工部にナットを取付け 固定した。油圧ジャッキにより鉄筋に引張力を作用させ, ロードセルにより引張力を計測した。また,試験体の自 由端側に変位計を設置し,鉄筋のすべり量を測定した。

# 2.2 RC 梁部材を模擬したひび割れ実験(シリーズ B)

シリーズBでは、実際のRC梁部材から1本のせん断 補強筋の一部が含まれるように切り出したものを模擬し た試験体を作製し(図-4),せん断補強筋を電食により 腐食させ、腐食したせん断補強筋とひび割れ性状との関 係を検討した。ただし、このような試験体に、長手方向 に直接引張載荷することは物理的に難しい。そこで、載 荷時に試験体に曲げモーメントを発生させ、試験体にひ び割れを発生させることでひび割れ性状について検討を 行った。

# 2.2.1 試験体概要

表-1に試験体一覧,表-2に材料強度を示す。

図-5 にシリーズ B の試験体を示す。寸法は W148× L595×H200(mm)である。試験体内部に「せん断補強筋 となる鉄筋」をかぶりが 30mm となるように異形鉄筋 D13 を 1 本配置した。「主筋となる鉄筋」は長さ 75mm のステンレス鋼ϕ22 とし, せん断補強筋の折曲げ部に 3D プリンターにより作製した樹脂製の部品(図−6)で固定 した。付着(試験)区間は 515mm とした。腐食対象区 間以外の腐食を防ぐため,図中の範囲にエポキシ樹脂を 塗布した。養生は打設後 28 日間の水中養生とした。パラ メータは目標腐食量(無, 15%, 25%, 35%)とした。

鉄筋腐食はシリーズ A と同様, 電食により行った。

## 2.2.2 試験方法

鉄筋腐食による付着性状の違いがひび割れ性状とどの ような関係となるかを検討するため、シリーズBでは次 のような方法で試験を行った。先に述べたように、試験 体は「梁部材より1本のせん断補強筋の一部を含む部分 を切り出したもの」を模擬した形状であり、せん断ひび 割れは図-4(d)のようになる。したがって、ひび割れは 試験体長手方向に存在するせん断補強筋を直交方向に横 切るように発生させることになるが、同試験体を長手方 向に直接引張載荷し、ひび割れを発生させるのは制御の 難しさから現実的ではない。そこで、図-7 に示すよう に,試験体長手方向の下面両端付近を支点とし,上面中 央に力を加えることによりひび割れを発生させた。この 場合、ひび割れは曲げモーメントにより発生することに なるが、本実験では鉄筋の付着とひび割れ幅の関係を検 討することが目的であるため、本載荷方法を用いること は大きな問題とならないと判断している。シリーズ B で は、この「曲げモーメントにより生じた、せん断ひび割 れを模擬したひび割れ」を単に「ひび割れ」と称する。 載荷により各試験体に生じたひび割れは各1本である。

載荷は 200kN 万能試験機を用いて行った。ひび割れを 誘発させるため、試験体底部中央にせん断補強筋と直交 方向に切込みを設けた。試験体側面のせん断補強筋位置 にパイゲージを取付け、ひび割れ幅(鉄筋の抜け出し量) を測定した。このひび割れ幅の 1/2 を鉄筋の片側すべり 量とする。試験体底部に変位計を設置し、上下方向の変 位を計測した。また、試験体内部の鉄筋にひずみゲージ を貼付け、鉄筋ひずみを計測した(ただし、腐食させた 試験体では計測できなかった)。

#### 3. 実験結果

# 3.1 一方向引抜き試験(シリーズ A)

# 3.1.1 平均付着応力度-すべり量関係

図-8 にかぶり厚,目標腐食量別の平均付着応力度-すべり量(τ<sub>ave</sub>-S)関係を示す(実験装置の不具合により 測定できなかったものは除く)。平均付着応力度は式(3) により算出した。

$$\tau_{ave} = \frac{\mathrm{T}}{\varphi \cdot \mathrm{I}} \tag{3}$$



ただし、τ<sub>ave</sub>: 平均付着応力度[N/mm<sup>2</sup>], T: 引張力[N], φ: 鉄筋の周長[mm], 1: 付着区間長さ[mm]

破断により最大平均付着応力度が決定したもの(**図**-8 中「**R**」)を除くと,τ<sub>ave</sub>-S 関係の形状は,腐食の程度に より1)~3)の3つにわけることができる。

1)腐食がない場合(A-1, A-5):載荷早期に抜け出しが 始まり,抜け出し量増加とともに徐々に平均付着応力度 が上昇する。この場合,抜け出し開始時から最大平均付 着応力度までの耐力上昇程度は大きい。平均付着応力度 は,最大値以降緩やかに低下する。

2)腐食量が小さい場合(A-2, A-6):抜け出し開始時の 荷重は1)に比べて大きくなり2倍程度であった(図中(い)) が,抜け出し開始時から最大平均付着応力度までの耐力 上昇程度は1)に比べて小さい。平均付着応力度は,1)と 同様に最大値以降緩やかに低下する。

3)腐食量が大きい場合(例えばA-4):抜け出し開始時 の荷重がさらに大きくなり,1)の抜け出し開始時の荷重 の4倍程度であった(図中(ろ))。抜け出し開始と同時に ひび割れが発生するため,抜け出し開始時から最大平均 付着応力度までの耐力上昇はほとんどなく,平均付着応 力度は最大値以降急激に低下する。

以上の結果をまとめると,腐食が生じた場合,抜け出 し開始時の荷重が大きくなる傾向がみられ,また,抜け 出し開始時から最大平均付着応力度までの耐力上昇程度 は小さくなる。一方,最大値以降急激に平均付着応力度 は低下する。



なお、かぶり厚の違いは $\mathbf{2}-8$ が示すように $\tau_{ave}$ -S 関係の形状に大きな影響を及ぼさなかった。

#### 3.1.2 腐食量-最大平均付着応力度関係

図-9 に腐食量-最大平均付着応力度関係を示す。本 実験においては、腐食が生じた場合、最大平均付着応力 度は上昇し、腐食量が 5%程度であっても腐食がない場 合に比べて2倍程度以上上昇した(破断によって最大耐 力が決定したもの(図中上方向矢印)はそれ以上の付着 耐力がある)。

かぶり厚40mmの試験体では、腐食量が15%程度まで 腐食が進行すると腐食ひび割れが発生し、最大耐力(= 最大平均付着応力度)は低下する傾向にあるが(図中二 重丸囲い),かぶり厚60mmの試験体では、腐食量が15% 程度であっても腐食ひび割れは発生せず、最大耐力はほ とんど低下しなかった。したがって、腐食が生じ、腐食 ひび割れがない場合には、腐食量10~15%程度で最大耐 力は腐食がない場合と比べて2倍程度以上になる。

# 3.2 RC 梁部材を模擬したひび割れ実験(シリーズ B)

# 3.2.1 荷重-すべり量関係

腐食を発生させたすべての試験体の底面で、せん断補 強筋に沿って腐食ひび割れが生じていることが確認され た。(図-5で示す試験体の底面、写真-2)

図-10 にすべての試験体の荷重-すべり量 (P-S) 関係を示す。同図より、いずれの試験体の場合でも P-S 関係は次の 1)~3)の領域からなるトリリニアの形状となっている。1)載荷開始~ひび割れ発生までの領域、2)ひび割れ発生~荷重上昇が小さくなるまでの領域、3)荷重上



昇が小さい領域,の3領域。

更に詳細にみると腐食程度の違いにより次の様な傾向 がある。

腐食無し(B-1):ひび割れが発生するまでに0.005mm 程度のすべりが発生しており(図中青●印),ひび割れ発 生(約 30kN)後,ひび割れ発生時荷重の2倍程度(約 57kN)まで荷重が上昇している。

腐食程度小(B-2):ひび割れが発生するまでのすべり 量は腐食無しに比べて小さく0.001mm程度である。ひび 割れ発生後は、すべり量増大に伴う荷重増加程度(図中 (は))は腐食無しに比べ小さく、最大荷重も小さくなっ ている。

腐食程度 大 (B-3, B-4): ひび割れが発生するまでの すべり量は, B-1, B-2 の場合に比べて大きく, 0.02~ 0.03mm 程度であった。ひび割れ発生後の荷重上昇の程 度は B-3(平均腐食量 19.94%)では B-1, B-2 に比べて大幅 に小さく,より腐食程度の大きい B-4(平均腐食量 31.89%) ではひび割れ発生時に最大荷重となり (図中(に)), その 後荷重は低下している。

以上をまとめると,以下のようになる。

ひび割れ発生直後の挙動: B-1 (腐食なし), B-2 (腐食 程度小)では付着が良好なため,ひび割れ発生時のコン クリートの伸び量(=鉄筋のすべり量)は小さくなる。 特に B-2 (平均腐食量 6.40%)では、シリーズAの引抜 き試験結果からも分かるように、腐食程度が小さい場合 平均付着応力度が大きくなり、B-1 よりもすべり量は小 さくなったと思われる。これに対し、腐食量が大きいB-3、 B-4 の場合、付着力が大きく低下しているためひび割れ 発生時のすべり量は大きくなったと推測される。ただし、 ひび割れ発生時のすべり量が最も大きい B-4 でもその値 は 0.03mm 程度であり、ひび割れ発生時、あるいはその 直後のひび割れ挙動については、(上の記述のように腐食 の影響はあるものの)すべり量の絶対値が小さいため構 造体として見た場合の影響は小さいと考えられる。

ひび割れ発生後の挙動:これに対して,ひび割れ発生 後の荷重上昇程度(トリリニアでモデル化した場合の第 2剛性)は,腐食のない B-1 で最も大きく,腐食の程度 が大きくなるにしたがって小さくなっている。これは, 付着が良好な場合は鉄筋軸方向に狭い範囲で鉄筋が伸び ることになるため,図-11に示すように,ひび割れ幅が 同じであればひずみは大きくなり,荷重増分は大きくな るためである。この結果,P-S 関係(=鉄筋応力-すべ り関係)の剛性は大きくなる。これに対し,腐食量が大 きく,付着力が低下する場合には,鉄筋軸方向に広い範 囲で鉄筋が伸びることになり,ひび割れ幅が同じであれ ば,鉄筋に発生するひずみは小さく,荷重増分も小さい。 したがって,P-S 関係(=鉄筋応力-すべり関係)の剛



写真-2 腐食ひび割れ



性は小さくなる。以上のことを、同じ荷重がせん断補強 筋に作用した場合を考えると、図-12に示すように、腐 食程度が大きいものほど剛性が小さくなることから、せ ん断ひび割れが発生すると、せん断ひび割れ幅は大きく なることが予想される。

#### 3.2.2 腐食量-最大引張力関係

図-13 は腐食量と最大引張力の関係を示した図であ る。同図には平均腐食量を断面欠損率であると仮定して 求めた時の鉄筋降伏時の引張力(以後理論値と略記)も 併記している。なお,最大引張力は式(4)~(6)より算出し た。腐食がない場合,実験値は理論値より24%程度大き い値を示したが,腐食量が大きくなるに従い,実験値と 理論値の差が小さくなった。これは,腐食量が大きくな ると腐食程度の(鉄筋軸方向の)不均一により,平均腐 食量よりも大きい腐食量,つまり断面欠損率が大きい箇 所において耐力が決定されたためと考えられる。なお, B-4(平均腐食量31.89%)では,鉄筋破断時に最大引張 力が発生しており(その他の試験体ではコンクリートの 圧壊により発生),同時点での鉄筋応力は降伏強度ではな く引張強度であったため,実験値と理論値の差が B-3(平

$$M = \frac{PL}{4}$$
(4)

均腐食量19.94%)と同程度となったものと思われる。

$$M = T \cdot j \tag{5}$$

$$M_u = 0.9d \cdot (1 - \frac{W}{100})a_t \cdot \sigma_y \tag{6}$$

ただし, M:モーメント[Nmm], M<sub>u</sub>:終局モーメント [Nmm], P:荷重[N], L 載荷支点間距離[mm], T:引張 力[N], j:応力中心間距離[mm], d:有効せい[mm], W: 腐食量[%],  $a_t$ :鉄筋の断面積[ $mm^2$ ],  $\sigma_y$ :鉄筋の降伏応 力度[ $N/mm^2$ ]

#### 3.3 実験のまとめ

シリーズBは、シリーズAのような従来の引抜き試験 とは異なり、引張を受ける鉄筋の端部が鉄筋(主筋を模 擬した鉄筋)により拘束されているため、ひび割れ発生 後の急激な耐力が低下する現象は見られない。しかしな がら、腐食が大きい場合、付着が低下する現象はシリー ズAと同様であり、このことから、せん断ひび割れが発 生すると、同じ荷重条件におけるひび割れ幅は大きくな ることが予想される。ただし、シリーズA、Bの両者の 結果の整合性の詳細な検討は今後の課題である。

## 4. まとめ

本研究では、せん断補強筋の腐食が部材のひび割れ性 状へ及ぼす影響を検討するため、鉄筋の腐食促進を行っ たRC試験体を対象に2種類の実験を行った。その結果、 以下の結論を得た。

(1) (一方向引抜き試験)腐食が生じた場合,抜け出し 開始時の荷重が大きくなり,抜け出し開始から最大耐力 までの耐力上昇程度は小さくなる。

(2) (一方向引抜き試験)腐食が生じた場合,最大平均 付着応力度は大きくなるが,引抜きが発生すると同時に 鉄筋材軸方向にひび割れが発生し,急激に付着耐力が低 下する。

(3) (一方向引抜き試験) 腐食が生じ,腐食ひび割れが 発生していない状況では,腐食量 10~15%程度で最大平 均付着応力度は 2 倍以上になる。

(4) (せん断ひび割れ模擬実験) ひび割れ発生直後の鉄筋 すべり量(=ひび割れ幅)は、腐食量が小さい場合は小 さく、腐食量が大きい場合は大きくなった。ただし、そ の絶対値は小さいため、構造体として見た場合の腐食の 影響は小さいと考えられる。

(5) (せん断ひび割れ模擬実験)腐食程度が大きくなる に従い,鉄筋応カーすべり関係の剛性は小さくなる。よ って腐食程度が大きいほど(同じ荷重条件では)ひび割 れ幅は大きくなることが予想される。

(6) (実験のまとめ) 腐食が生じると平均付着応力度(= 付着耐力) は上昇するが,抜け出しが発生すると急激に 耐力を失う。そのため,せん断ひび割れが発生すると, 同じ荷重条件におけるせん断ひび割れ幅は大きくなるこ とが予想される。

#### 謝辞

本実験を行うにあたり,共英製鋼株式会社より鉄筋の 提供を受けました。ここに深く感謝申し上げます。また, 本研究遂行に協力していただいた,斉藤將大君((株) NIPPO), 槻直也君(前田建設工業(株)),濱嵜望君((株) 錢高組),向井早紀さん(近畿大学卒業生)に深く感謝い たします。

#### 参考文献

 石橋壇,岸本一蔵,益尾潔:こぶ付きスリーブ鋼管を 用いた機械式定着の梁主筋定着性能に関する実験結果の 考察,コンクリート工学年次論文集,vol.36,No.2, pp.181-186,2014

2)碇本大,荒木弘祐,服部篤史,宮川豊章:両引き試験 による鉄筋腐食と付着強度に関する研究,コンクリート 工学年次論文集,Vol.28,No.2,pp.661-666,2006 3)田森清美,丸山久一,小田川昌史,橋本親典:鉄筋の 発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研 究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.10,No.2, pp.505-510,1988