# 論文 持続荷重を受ける鉄筋腐食した RC はりの腐食ひび割れと構造挙動

Phetkaysone Anongdeth<sup>\*1</sup>・沼口 文彦<sup>\*2</sup>・石田 剛朗<sup>\*3</sup>・佐藤 良一<sup>\*4</sup>

要旨:本研究では飛来塩分の影響を受ける実構造物の使用状態を想定し,持続荷重を受ける RC はりに塩水 噴霧を行い,鉄筋の腐食を促進させた。鉄筋腐食によるひび割れ幅の軸方向分布を明らかにして,作用持続 荷重による鉄筋応力,かぶりの観点から腐食ひび割れ幅特性を検討した。さらに腐食ひび割れに及ぼす曲げ ひび割れの影響とともに,腐食がたわみに及ぼす影響をも考察した。その結果,せん断区間で軸方向分布し た腐食ひび割れ幅は等曲げ区間のそれと同等以上の傾向であった。また,腐食ひび割れは曲げひび割れから 進展し,長期たわみの増加に及ぼす腐食の影響は鉄筋応力 300N/mm<sup>2</sup>のはり供試体にみられた。 キーワード:腐食ひび割れ幅,時間依存たわみ,鉄筋応力,かぶり,せん断力

#### 1. はじめに

沿岸域にあるコンクリート構造物では、風や台風によ り運ばれる塩化物による鉄筋腐食が大きな問題となっ ている。一方,鉄筋コンクリート (RC)構造物において は一般にひび割れ発生が認められており,このひび割れ はコンクリートへの水分及び塩化物等の物質移動を容 易にしていると考えられている。そのため、予めひび割 れを導入したコンクリート部材への水分・塩化物浸入に よる鉄筋腐食に関する研究は比較的多く見られる<sup>1),2)</sup>。 また,持続載荷し,ひび割れを導入した RC はりを用い て腐食機構や構造挙動を検討した研究も見られるが<sup>3),4</sup>, エポキシ被覆鉄筋を用いていたり,電食により強制腐食 されているなど,必ずしも実情に即して構造挙動を積極 的に検討したものではない。したがって,持続荷重下で 鉄筋腐食が生じる場合のたわみ等の構造挙動を長期に わたって検討した例はほとんどないといえよう。

そこで筆者らは、鉄筋応力度、かぶりを要因として、 持続荷重を受ける RC はりに塩水噴霧を行い、ひび割れ 部の水分浸入、鉄筋腐食、時間依存たわみ等を検討した <sup>5)</sup>。その結果、曲げひび割れ域の鉄筋腐食開始には鉄筋 応力、かぶりの相違はほとんど影響しない、腐食ひび割 れ幅は鉄筋応力度が 300N/mm<sup>2</sup> と極端に大きい場合とか ぶりが 20mm と小さい場合に大きくなること、長期たわ みには載荷日数 1000 日程度では腐食による大きな影響 は見られないことなどを明らかにした<sup>5)</sup>。

本研究は、上記の検討を、その後1年にわたり、持続 載荷後約 1380 日まで行った結果を報告するもので、特 に、腐食ひび割れ状況及び腐食ひび割れ幅の特性と断面 力の分布、すなわちせん断力の作用との関係付けを明ら かにするとともに、長期たわみに及ぼす鉄筋腐食の影響 について検討している。

# \*1 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 (正会員) \*2 広島県 (非会員) \*3 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 助教 工修 (正会員) \*4 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 教授 工博 (正会員)

#### 2. 実験概要

# 2.1 供試体概要及び養生方法

RC はり供試体は、普通ポルトランドセメントを使用 し、**Table 1**に示す配合のコンクリートを用いて作製した。 W/C は 60%, スランプは 8.5cm, 空気量は 3.1%である。 検討パラメータはかぶりと鉄筋応力度であり、鉄筋応力 度が異なることは曲げひび割れ幅も異なることを意味 する。かぶり厚さおよび鉄筋応力度は, Table 2 に示すよ うに, 20, 30, 40mm および 100, 200, 300N/mm<sup>2</sup>のそ れぞれ3段階に設定している。かぶり厚さを変化させる 際,はりの有効高さは供試体の断面図を Fig.1 に示すよ うに 210mm と一定とした。従って、かぶり厚さを 20、 30, 40mm と変化させているので、はり高さはそれぞれ 240, 250, 260mm となる。引張鉄筋には異形鉄筋 D19SD295A を 2 本用いた。また,はり供試体の幅,全長, スパン長、等曲げ区間長、せん断スパン長は、それぞれ 200, 2400, 2100, 850, 650mm である。なお, ひび割れ 部および非ひび割れ部からの水分浸入状況を把握する ために、すべての供試体のスパン中央付近のひび割れ断 面と,鉄筋応力 100N/mm<sup>2</sup>の供試体 (NC3-100) のせん 断スパン中央断面に, 電気抵抗測定用ステンレス製電極 棒 ( $\phi$ =2mm) を埋設している<sup>5</sup>)。

すべての供試体は打込み直後から脱型までの間, コン クリート打込み面を湿潤状態に保った。脱型は材齢4~6

**Table 1 Mixture proportion** 

Maximum size of coarse aggregate (mm)		Water-Cement ratio [W/C] (%)		Sand percentage [s/a] (%)
20		60		47
Water	Cement	Sand	Coarse	Water reducing and air-
(kg/m)	(kg/III )	(kg/m)	(kg/m)	entraining agent (kg/m)
175	292	833	956	8.76

日に順次行い,材齢 64 日まで供試体への水分の出入り を防いだ。その後,供試体に水分を供給し,材齢 72 日 に飽和状態になった供試体の電気抵抗を測定した後,室 内気中乾燥下に曝露した。

# 2.2 載荷試験及び塩水供給方法

RC はり供試体の載荷は、材齢 75 日から順次開始し、 材齢 79日で5セット(1セット2体) すべての供試体に ついて所定の持続荷重を与えた。なお,載荷方法は,Fig.2 に示すように2体の供試体を積み上げ, PC 鋼棒を締め付 ける方法により行なった。導入荷重は Table 2 に示すよ うにひび割れ断面における鉄筋応力の計算値がそれぞ れ 100, 200, 300N/mm<sup>2</sup>となるように載荷を行った。ま た,所定の荷重を導入後は,載荷荷重の変動が±3%以内 となるように、定期的に荷重の調節を行なった。所定の 持続荷重を導入した後,負の曲げモーメントを受ける上 段のRCはり供試体の引張縁(供試体底面)に対し、材 齢83日(載荷完了後4日)より3%塩化ナトリウム(NaCl) 溶液の噴霧を開始した。噴霧の頻度および量は 50cc/週を 1 サイクルとして 75 サイクル行い, それ以後は 100cc×2 回/週を1サイクルとして行った。噴霧は, RC はりの場 合載荷版の幅が 100mm であることから、載荷位置から 50mm の範囲を除き,スパン 2100mm のうち中心 2000m の範囲を対象として行った。なお、上述したように、本 研究で検討するはり供試体 (NC beam) は, Fig.2 の載荷 図に示すように引張縁(底面)すなわち噴霧面が上側で あるので、塩水は重力の作用を受けてひび割れに浸入す ることとなる。

# 2.3 測定方法

噴霧面の軸方向に沿う腐食ひび割れ幅,スパン中央の たわみおよびはり側面引張鉄筋位置での曲げひび割れ 幅を測定した。曲げひび割れ幅は,RC はり供試体両側 面の引張鉄筋位置に貼付したコンタクトチップの標点 間距離(100mm)をコンタクトゲージ により測定した。 腐食ひび割れ幅はクラックスケールとコンタクトゲー ジを併用し,たわみは,Fig.2 に示すようにはり両側面の スパン中央に設置した高感度変位計(精度:1/1000mm) により測定した。

# 3. 実験結果および考察

#### 3.1 腐食ひび割れ幅の経時変化

かぶりが同一で鉄筋応力度が異なる場合の,また鉄筋 応力度が同一でかぶりが異なる場合の最大腐食ひび割 れ幅と載荷後の経過日数の関係をFig.3(a)とFig.3(b)にそ れぞれ示す。Fig.3(a)によれば,鉄筋応力度が300N/mm<sup>2</sup> の場合の腐食ひび割れは,最も早く発生しさらにひび割 れ幅も著しく大きい。またその増加率は1100日以降,そ れ以前と比べて,明らかに大きくなっている。鉄筋応力

# Table 2 Nomenclature of examination parameters



Fig.2 Test setup for sustaining load

度が100および200N/mm<sup>2</sup>の場合もともに1100日以降ひ び割れ幅の増加率は大きくなっているが,鉄筋応力度の 相違の影響は顕著ではない。

かぶりの影響は, **Fig.3(b)**にみられるように, 20mmの 場合が圧倒的に大きく, かぶりが 30mm と 40mmの差異 の影響はみられない。

# 3.2 腐食ひび割れに及ぼす曲げひび割れの影響

Fig.4 に,NC3-200 を例として,底面に加えて側面の腐 食ひび割れの進展状況を示す。図中の数値は腐食ひび割 れを確認した持続載荷後の経過日数であり,丸で囲んだ 数値は最も早く発見した腐食ひび割れである。ただし, 図中の数値は確認をした日数であり,発生はそれ以前に 生じている可能性がある。

この図によれば、曲げひび割れ間隔が100mm~150mm と広くないため、多くの腐食ひび割れが連続しやすく必 ずしも明瞭ではないが、不連続ひび割れの観察から曲げ ひび割れを起点として腐食ひび割れが進展することが 分かる。

さらに、本研究のように曲げひび割れが十分に分散し ている場合には、少なくとも腐食ひび割れ発生の半年後



Fig.3 Maximum corrosion crack widths

にはひび割れ間を連続する腐食ひび割れが生じ,およそ 2 年後(1380 日)には多くの連続する腐食ひび割れが生じ る。このことは、本研究のような条件では、腐食ひび割 れがいったん生じるとかなり早い時期にひび割れが連 続化し、急速に劣化が進行するといえよう。

# 3.3 腐食ひび割れ幅分布

Fig.5 および Fig.6 に持続載荷後 1380 日時点における, 同一かぶり厚で鉄筋応力が異なる場合,同一鉄筋応力で かぶり厚が異なる場合,それぞれの RC はり供試体の引 張側(底面)におけるひび割れ進行状況及び腐食ひび割 れ幅分布を示す。なお,ひび割れ性状図中に示した数字 は持続載荷後の経時日数を表し,腐食ひび割れ幅分布図 では引張側底面における鉄筋 2 本に沿って発生した腐食 ひび割れ幅の最大値を示す。また,横軸の数値はひび割 れ図と対応した,左端からの距離を示す。同位置で 3 体の ひび割れ幅を示しているが,それらの位置は NC3-200 の 棒グラフの位置に対応させている。

Fig.5 の腐食ひび割れ進展状況によれば、かぶりが

30mm と同一であっても,鉄筋応力度が 300N/mm<sup>2</sup> (NC3-300) の場合は,100N/mm<sup>2</sup>(NC3-100) 及び 200N/mm<sup>2</sup>(NC3-200) の場合と異なり,腐食ひび割れは 載荷版に至る範囲に広く進展しているが,最大腐食ひび 割れ幅と対応して,後者のNC3-100とNC3-200の両者に は大きな差は見られない。

Fig.5 の下図に示したそれぞれのはりの腐食ひび割れ 幅分布によれば、NC3-300 の腐食ひび割れ幅は最大でお よそ 5mm~6mm に達し、せん断域にも広く進展してい る。その大きさと分布性状は、他の2体のRC はりと比 べ相当異なっている。実際にはない大きさの持続荷重で はあるものの、明らかに荷重の大きさの影響が認められ る。しかし、NC3-100 と NC3-200 を比べれば、せん断域 にも生じているものの、特に荷重の大きさの差異の影響 は認められない。これから、本測定の範囲では、実際上 検討の対象となる死荷重による鉄筋応力度が 100 N/mm<sup>2</sup> ~200N/mm<sup>2</sup> にある場合には、腐食ひび割れ幅におよぼ す荷重の大きさの影響はないといえよう。



Fig.4 The influence of flexural cracks on the development of corrosion cracks (Beam NC3-200)



Fig.5 Corrosion crack patterns and longitudinal variations crack width of beams having the same cover thickness but the different levels of reinforcement stress



Fig.6 Corrosion crack patterns and longitudinal variations crack width of beams having the different cover thickness but the same level of reinforcement stress

鉄筋応力度を 200N/mm<sup>2</sup> と同一にしてかぶり厚さの影 響を示した Fig.6 によると、かぶり 20mm の NC2-200 の 腐食ひび割れ進行は、他の RC はりと比べ著しく、かつ ひび割れ幅も大きい。しかし、かぶり 30mm (NC3-200) とかぶり 40mm (NC4-200)の RC はりとの差は見られ ない。既往の研究 5)によれば、噴霧された塩水は、かぶ りが異なっていた場合であっても、瞬時に鉄筋位置に浸 入し、そのためもあって腐食はほぼ同時期に発生するこ ととともに、非ひび割れ域では15mm弱の深さまで噴霧 後瞬時に浸入することも明らかにされている。また, RC はりの引張部では、持続荷重下で節の抵抗作用により内 部ひび割れ、特にひび割れ近傍では円錐状の内部ひび割 れが生じ、これとともに鉄筋とコンクリート間に剥離の 生じる可能性が指摘されている<sup>6</sup>。したがって、かぶり が小さくなれば、非ひび割れ域でも、塩化物イオンが鉄 筋に到達しやすく、その浸入を容易にする断面内の内部 ひび割れ域が相対的に大きくなることから、腐食ひび割 れが広範囲に生じたと考えられる。NC3-200 と NC4-200 の差異は今後の実験結果を待ちたい。

せん断力の影響は、NC2-200 の場合、一定の最大曲げ モーメント区間の腐食ひび割れ幅を上回るひび割れ幅 はせん断域で生じてはいないが、曲げモーメントの大き さの割には大きなひび割れ幅が生じている点から、ある と考えられる。また、NC3-200 と NC4-200 の場合にもせ ん断域の腐食ひび割れ幅は最大で 1mm 程度であるが、 曲げモーメントの大きさに対応する値以上の腐食ひび 割れ幅がせん断域で生じており、明らかにせん断力の影 響が認められる。

#### 3.4 腐食がたわみに及ぼす影響

Fig.7(a) に腐食進行中の時間依存性たわみに及ぼす鉄 筋応力度の影響を,また Fig.7(b)にかぶりの影響をそれ ぞれ示す。Fig.7(a)によれば、たわみの増加速度の点から 見た場合, NC3-200 及び NC3-100 のたわみは進行速度を 漸減しながら増加し,腐食損傷のない場合の進行速度と 類似している<sup>7)</sup>。しかし,最も鉄筋応力度の大きい NC3-300の場合は、およそ経過日数800日を境にたわみ の進行速度が増加している。一般に時間依存性たわみは, 付着に起因するコンクリートの引張剛性よりもコンク リートのクリープと収縮による圧縮部コンクリートの 変形に大きく依存すると考えられている。NC3-200 及び NC3-100の場合はこの考えで説明される。すなわち、こ れらの RC はりでは, 腐食ひび割れが生じているものの, Fig.5(a)に示すように、腐食ひび割れ幅は NC3-300 に比 べ相当に小さく,かつ曲げモーメントの小さい載荷点付 近では腐食ひび割れがほとんど生じていず、せん断域に おいて定着機能が、ある程度は、保持されているためと 考えられる。これに対し、NC3-300の場合はせん断域に



Fig.7 Deflection of beam specimens under sustained loading and corroding

おいても大きな腐食ひび割れが生じ,あたかもアンボン ド鋼材のようにせん断域の定着機能が低下しつつある ためと思われる。

一方, Fig.7(b)によると,腐食ひび割れが広範囲に進展 した NC2-200 の場合であっても,急速なたわみ進展は見 られない。この性状の説明は,NC3-300 に対して行った 説明では困難である。かぶりが小さく相対的に付着割裂 作用に対する拘束効果が小さく,また内部ひび割れの影 響も相対的に大きく,腐食前から定着機能が十分でない のかもしれない。この点は今後の十分な検討が必要であ る。かぶりの相対的に大きな NC3-200 と NC4-200 の場合 は,載荷日数 500 日あたりでたわみが急増し,その後は NC2-200 と同様なたわみ増加を示している。これは付着 剛性の低下による,かぶりの相違によるコンクリートの 引張剛性低下が原因と思われるが,腐食ひび割れ発生と 日数が整合しないため,今後の検討課題としたい。

# 4. まとめ

本研究では、鉄筋応力度、かぶりおよびせん断力の観

点から主に腐食ひび割れ幅とその軸方向分布,および腐 食がたわみに及ぼす影響について持続載荷後約 1380 日 までの範囲で検討した。本研究で得られた主な結果は以 下の通りである。

- (1) 腐食ひび割れは、曲げひび割れから発生し、本研究 のようにひび割れ分散が安定状態にある場合には、 連続しやすい。
- (2) 腐食ひび割れ幅は、かぶりと鉄筋応力度の影響を受け、それらが 20mm、300N/mm<sup>2</sup>の場合には極端に大きくなる。
- (3) 腐食ひび割れ幅は曲げモーメントの大きさ,すなわち曲げひび割れ幅に対応することなく、曲げモーメントの比較的小さいせん断区間においても大きな値となる場合がある。
- (4) 長期たわみに及ぼす腐食の影響は、載荷日数800日 以降に、最も鉄筋応力度が大きいはりNC3-300でみ られた。また、かぶりに応じてはり高さが異なるは りのたわみは、載荷日数700日以降、ほとんど等し くなった。

# 参考文献

- 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三, 出光隆: 種々の海 洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄 筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.91-104, 1998.8
- 2) 川東龍夫, 葛目和宏, 宮川豊章:海洋環境に長期間

暴露された鉄筋コンクリートはりの劣化過程と耐 久性評価,土木学会論文集,No.613/V-42, pp.71-83, 1999.2

- Nobuaki Otsuki, Shin-ichi Miyazato, Nathaniel B. Diola, and Hirotaka Suzuki: Influences of Bending Crack and Water-Cement Ratio on Chloride-Induced Corrosion of Main Reinforcing Bars and Stirrups, ACI materials journal, Vol.97, NO.4, pp.454-464, 2000.7
- Sanchun Yoon, Kejin Wang, W. Jason Weiss, and Surendra P. Shah: Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of Reinforced Concrete, ACI materials journal, Vol.97, NO.6, pp. 637-644, 2000.11
- Phetkaysone Anongdeth, 沼口文彦, 石田剛朗, 佐藤良

   :持続荷重下で塩水噴霧を受ける RC はりの腐食
   ひび割れと構造挙動, コンクリート工学論文集,
   Vol.29, No.1, pp.1401~1406, 2007.7
- 6) 氏家勲,廣河和男,佐藤良一,安齋慎介:鉄筋コン クリート部材の長期ひび割れ幅とかぶりコンクリ ートの損傷,コンクリート工学年次論文集,Vol.22, No.1, pp.463-468, 2000.6
- 佐藤良一,氏家勲,鈴木雅博,北條泰秀:鉄筋コン クリート曲げ部材の長期変形挙動およびその解析 法に関する研究,土木学会論文集,No.634/V-45, pp.27-41, 1999.11