

## 論文 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

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**：実構造物の使用状態を想定した持続荷重を受ける RC はりに対して塩水噴霧を行い腐食促進させた。ひび割れ・損傷蓄積が RC はりの腐食状況・構造挙動に及ぼす影響を把握するために鉄筋のかぶり厚さ・引張鉄筋の応力レベルをパラメータとして検討を行った。その結果、ひび割れが生じている領域の鉄筋腐食の開始、たわみ性状には大きな違いが見られなかったが、最大腐食ひび割れ幅にかぶり厚さ、応力レベルの影響が見られた。

**キーワード**：持続荷重, 塩水噴霧, 水分移動, 曲げひび割れ, 腐食ひび割れ, たわみ

## 1. はじめに

コンクリート構造物の性能照査体系への移行に向け、耐久性の研究が盛んに行われている。鉄筋腐食と鉄筋コンクリート構造物は一般にひび割れを有しており、ひび割れの存在がコンクリート内部への水分及び塩化物の浸入を容易にしていると言える。そのため、ひび割れを有するコンクリート部材の塩化物浸入による鉄筋の腐食の研究は比較的多く見られる。しかし、実構造物の上部工のように持続荷重が载荷された状態での研究は多くはない。

そこで本研究では、飛来塩分の影響を受ける実構造物を想定し、持続荷重を受ける RC はり供試体に塩水噴霧を行った。検討パラメータとして、鉄筋のかぶり厚さ及び応力レベルをそれぞれ 3 段階に設定し、塩水浸入、鉄筋腐食の開始時期、腐食ひび割れ幅に及ぼすこれらの影響と RC はりの構造挙動について、载荷後約 1020 日までの範囲で、実験的に検討した。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体概要及び養生方法

本研究で製造したコンクリートの配合を表 1 に示す。W/C は 60% を採用した。RC はりのパ

ラメータとして、表 2 に示すように鉄筋のかぶり厚さを 20, 30, 40mm, 鉄筋応力レベルを 100, 200, 300N/mm<sup>2</sup> のそれぞれ 3 段階に設定した。はりの有効高さは、供試体の断面図を図 1 に示すように、210mm で一定とした。パラメータとして、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。配筋は、D19SD295A の引張鉄筋を 2 本とした。すべての供試体の幅、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。

すべての供試体のスパン中央付近に、ひび割れ部からの水分浸入状況を把握するために、電気抵抗測定用ステンレス製電極棒( $\phi=2\text{mm}$ )を埋設した。さらに非ひび割れ部の上記状況を把握するため、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も電極棒を埋設した。

さらに RC はり供試体に加え、収縮特性、クリープ特性を把握するために無拘束供試体、圧縮クリープ供試体をそれぞれ RC はりと同時に作製した。それぞれの断面を RC はりの基本となるかぶり 30mm 供試体と同一とし、無拘束供試体

\*1 広島大学 工学部 第 4 類 (正会員)

\*2 広島県 (正会員)

\*3 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 助手 修士(工学) (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)

表-1 供試体配合

粗骨材最大寸法 (m)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	AE減水剤	AE助剤
20	60	47	175	292	833	956	2.92	5.84

が 200×250×750mm, 圧縮クリープ供試体が 200×250×800mmとした。なお、圧縮クリープ供試体の軸方向断面中央には載荷用 PC 鋼棒のシーすとして塩化ビニル製パイプ(外形 32mm) を予め設置し、ポストテンション方式によりコンクリートに応力を導入した。載荷応力は載荷時材齢の圧縮強度の 20%とし、載荷時材齢は 7, 28, 515 日とした。

すべての供試体は、打込み直後から脱型まで、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 日に順次行ない、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、ステンレス電極間の抵抗値が一定値に収束したことにより、供試体が飽和状態になったとし、供試体を室内気中乾燥下に暴露した。

## 2.2 載荷試験

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 体すべての供試体について所定の荷重の導入を完了した。載荷方法は、図-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。導入荷重は表-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> となるように設定した。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。

## 2.3 塩水噴霧による乾湿繰り返し環境

所定荷重を導入した後、持続荷重下の RC はり供試体の引張縁に対し、材齢 83 日(載荷完了後 4 日)より 3%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。噴霧の範囲について、載荷方法の関係上支点位置から 50mm の

範囲を除き、支点間距離 2100mm のうち中心 2000mm の範囲を噴霧の対象とした。なお、本研究で検討するはり供試体には、図-2 に示すように、負の曲げモーメントを与えているので噴霧面は引張縁となる。

## 2.4 測定方法

RC はりの構造挙動としてたわみ、及びはり側面引張鉄筋位置での曲げひび割れ幅、噴霧面での腐食ひび割れ幅を測定した。たわみに関しては、図-2 に示すようにはり両側面のスパン中央に高感度変位計を設置し、中央点における変位

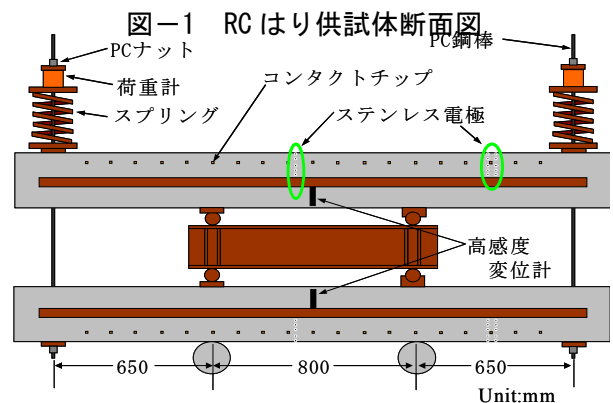
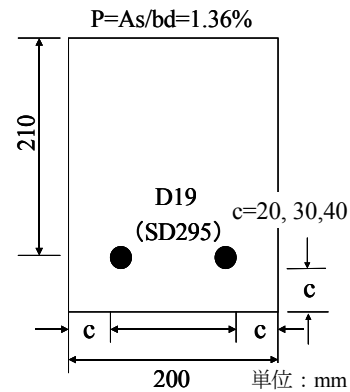


図-2 RC はり供試体

表-2 供試体の実験条件

からり厚さ	鉄筋応力		
	100 N/mm <sup>2</sup>	200 N/mm <sup>2</sup>	300 N/mm <sup>2</sup>
20 mm		NC2-200	300 N/mm <sup>2</sup>
30 mm	NC3-100	NC3-200	NC3-300
40 mm		NC4-200	

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、コンタクトチップを100mm 間隔で貼り付け、コンタクトゲージにより測定した。腐食ひび割れ幅に関しては、鉄筋の軸方向と直角方向に、噴霧面及び側面にコンタクトチップを40mm の間隔で所定の位置に貼り付け測定した。さらに、図-2 に示すようにはあらかじめ供試体内部に埋設したステンレス電極間の電気抵抗をLCRメーターで測定しコンクリート内部の水分の状況を間接的に把握し、自然電位法によって鉄筋の腐食発生状況を確認した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 塩水噴霧による水分浸入状況

図-3 に、一例として、146 サイクル時の水分浸入状況を示す。なお、本研究では飽和時の各電極間の抵抗  $R_{sat}$  で各水分状況の抵抗値  $R$  を除したものを相対抵抗と定義し、各水分状態はこの相対抵抗の逆数 $\times 100$  を用いて表し、100 に近づくほど湿潤となることを示している。また、図中の凡例に示した  $W_s$  と  $\sigma_s$  は電極位置の曲げひび割れ幅と鉄筋の応力度を示す。

この図によれば、NC4-200 を除き、ひび割れの生じた領域ではかぶり、鉄筋応力に拘わらず、噴霧により水分は瞬時に浸入することが分かる。

しかし、鉄筋応力が  $100\text{N/mm}^2$  と低い NC3-100 の非ひび割れ部では、相対抵抗の変化は小さく、ひび割れ部と明確な差が認められる。

噴霧によるひび割れ部の水分浸入深さは、かぶりの大

きい方が、また鉄筋応力の大きい方が深くなることが認められ、50~70mm の範囲にある。ただし、鉄筋応力が  $300\text{N/mm}^2$  の場合には、若干ではあるが、90mm 程度まで浸入している傾向が認められる。ちなみに非ひび割れ部の浸入深さはおよそ 25mm である。これらのことから、ひび割れ幅が 0.1mm 程度以上で、かぶりが 40mm 以下であれば、本実験の噴霧条件では、水分は鉄筋表面に到達するといえる。しかし、ひび割れが生じていない部分では、浸入深さが 25mm 程度であるので、水分が瞬時に鉄筋に到達することはなく、塩化物は時間とともに鉄筋表面に移動することになる。

#### 3.2 RC はりの腐食状況

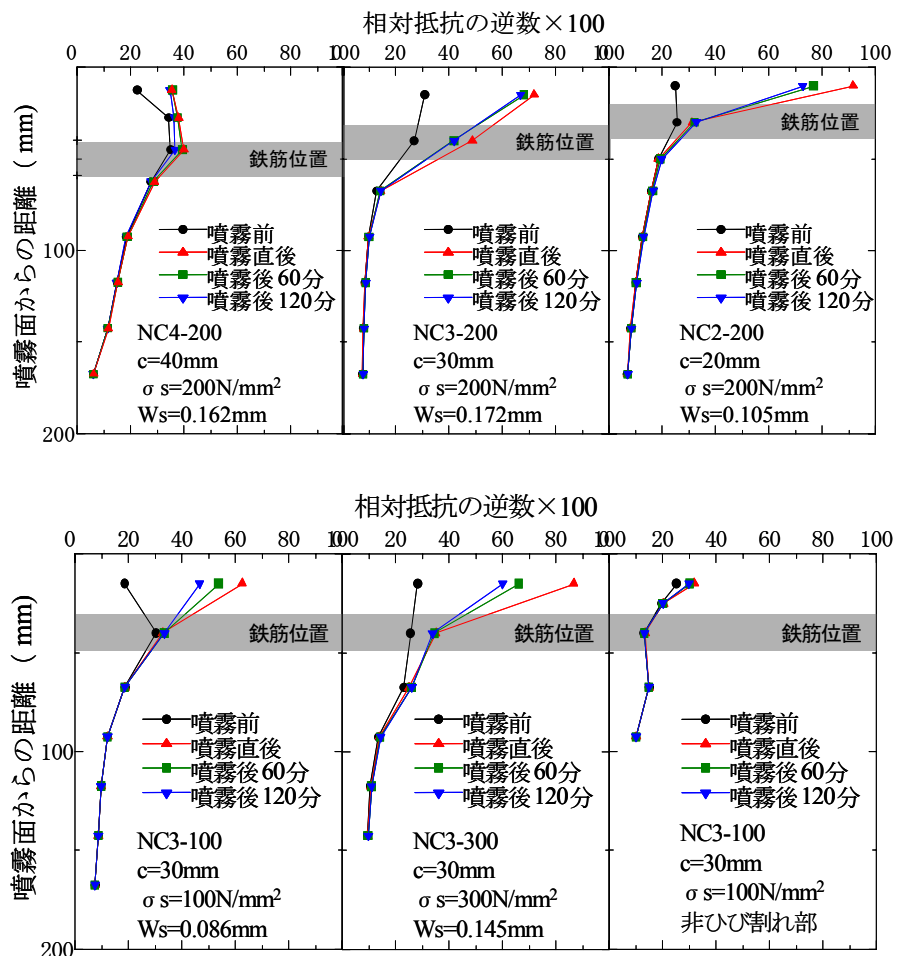


図-3 水分移動状況 (146Circle)

図-4 に曲げひび割れ部及び非曲げひび割れ部での自然電位の経時変化を示す。ここで、非ひび割れ部とは、静的载荷直後に曲げひび割れ

が生じていない支点近傍の部分の意味し、自然電位はその部分で計測したものである。NC2-200, NC3-300 は持続载荷中に曲げひび割れが生じて

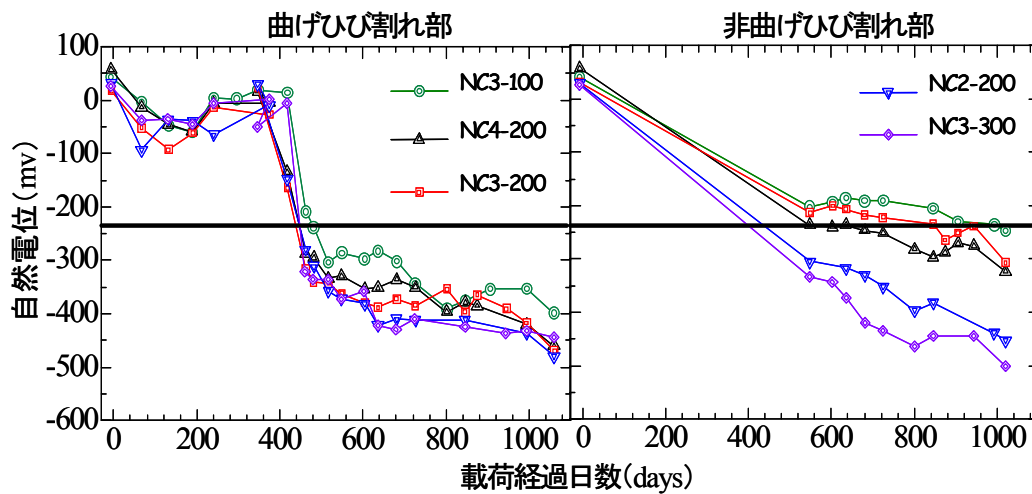


図-4 自然電位の経時変化

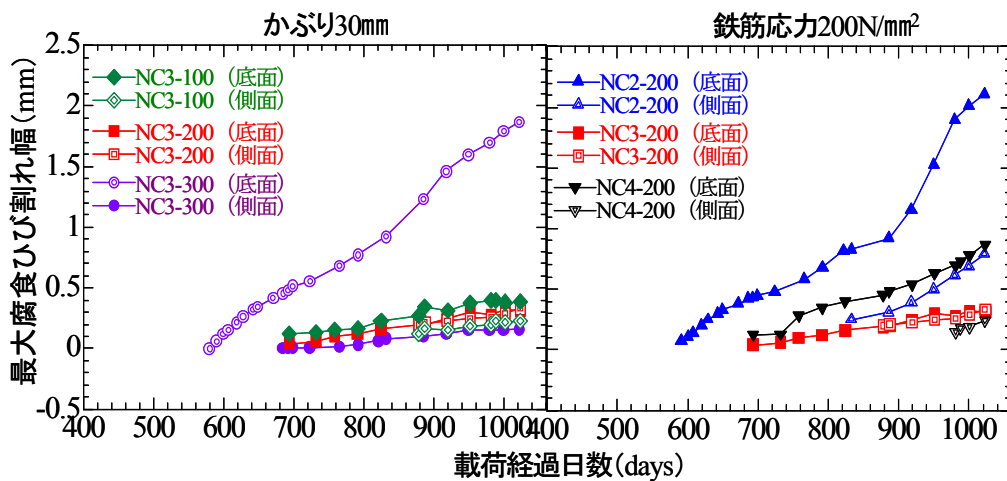


図-5 最大腐食ひび割れの経時変化

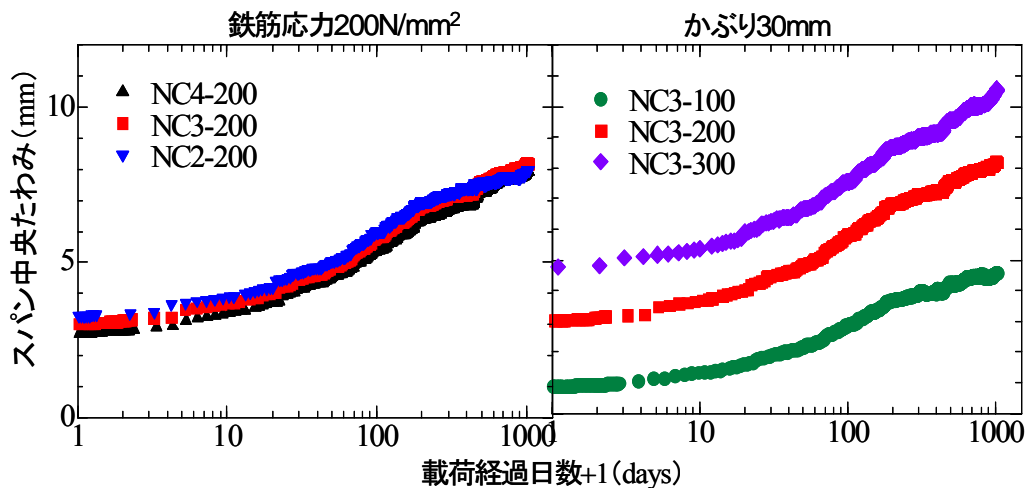


図-6 たわみ経時変化

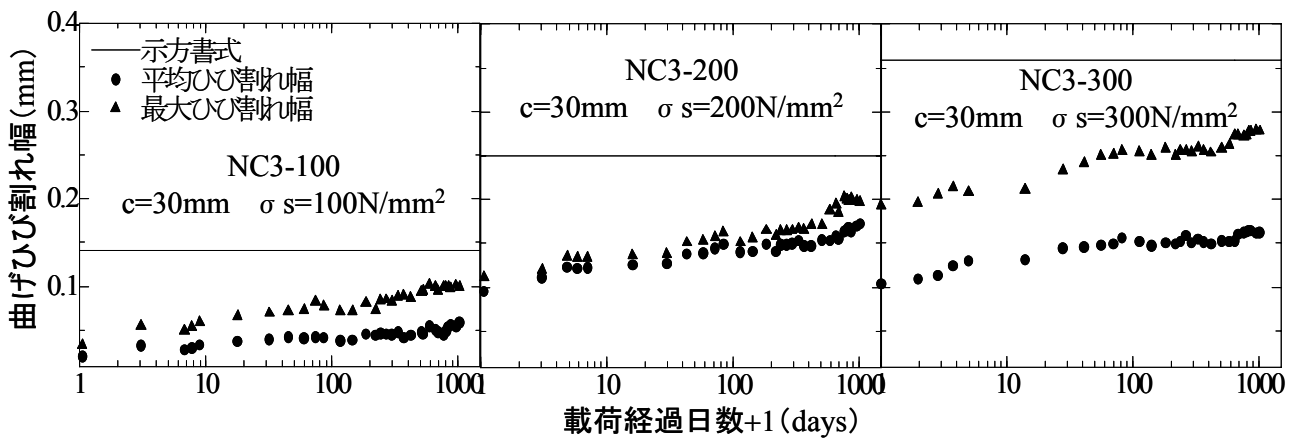


図-7 曲げひび割れ幅の経時変化 (かぶり 30mm)

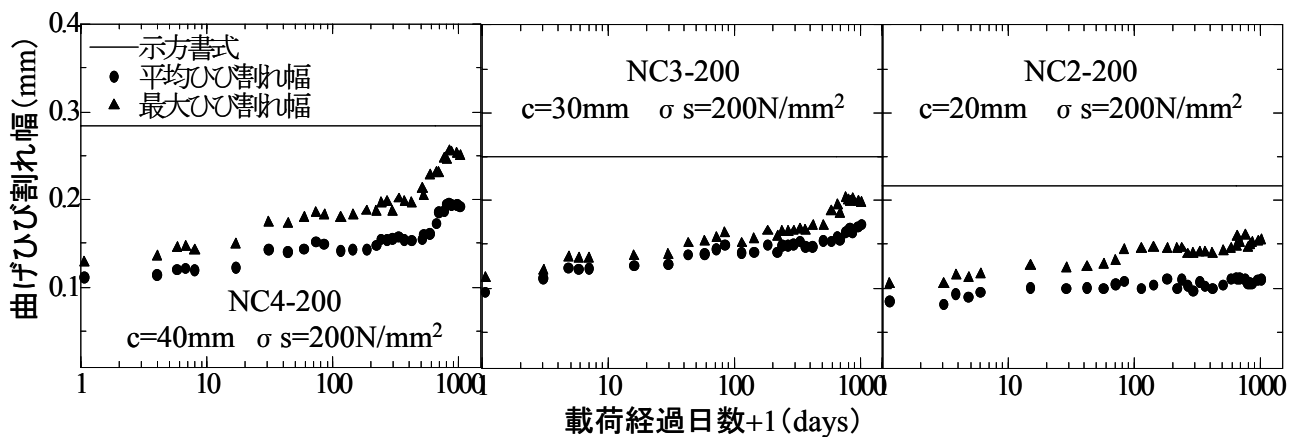


図-8 曲げひび割れ幅の経時変化 (鉄筋応力 200N/mm<sup>2</sup>)

いる。また、測定された電位の評価方法として ASTM C876<sup>2)</sup>により、-230mV 以下とならば 90% 以上の確率で腐食が生じていると判断する。曲げひび割れ発生域においては各供試体ともに材齢約 450 日で腐食反応が開始しておりかぶり、鉄筋応力の差の影響はみられない。これは、3.1 に述べたように、本実験の範囲では、いずれの条件であっても水分が直ちに鉄筋表面に到達することによると思われる。直ちに鉄筋に塩水が到達する一方、比較的早期に腐食が生じないのは、はりの含水量が高く鉄筋表面の塩分濃度が低い可能性がある。一方、非ひび割れ部においては、NC3-100 と NC4-200 供試体の腐食発生の可能性は相対的に小さく、経過日数 1100 日では腐食ひび割れは生じていない。

腐食ひび割れ発生については、载荷後約 600 日に NC3-300 と NC2-200 供試体、約 700 日に他の 3 供試体の噴霧面に腐食ひび割れが発生して

いるのを確認した。また、供試体の噴霧面とともに供試体の側面において、NC3-100, NC4-200, NC3-200, NC2-200 及び NC3-300 はそれぞれ約 880 日, 980 日, 880 日, 820 日及び 700 日に鉄筋に沿った腐食ひび割れの発生を確認した。図-5 に各供試体の最大腐食ひび割れ幅の経時変化を示す。最大腐食ひび割れ幅は载荷後約 1000 日に NC3-100, NC4-200, NC3-200, NC2-200, NC3-300 供試体はそれぞれ 0.39, 0.87, 0.32, 2.11, 1.87mm となった。

鉄筋応力の異なるかぶり 30mm 供試体の場合、最も鉄筋応力が大きい供試体は腐食ひび割れ発生が早く、腐食ひび割れ幅の経時変化も比較的に大きくなった。また、等曲げ区間で最大腐食ひび割れ幅が確認できた鉄筋応力 100 及び 200N/mm<sup>2</sup> 供試体に対し、300N/mm<sup>2</sup> 供試体ではせん断区間に最大腐食ひび割れを確認した。これは、鉄筋応力が大きくなるにつれてせん断区

間において、等曲げ区間に比べ大きな付着応力すなわち節によるかぶりコンクリートの割り裂き作用によると考えられる。

かぶりの異なる鉄筋応力  $200\text{N/mm}^2$  供試体の場合は、最もかぶりが小さい NC2-200 供試体は供試体の噴霧面及び側面において、腐食ひび割れが比較的顕著に生じた。最大腐食ひび割れ幅はせん断区間であるが、腐食ひび割れ状況は供試体の引張面の全体的に広がった。

### 3.3 RC はりの構造挙動

図-6 に各供試体のたわみ経時変化を示す。左の図は同一鉄筋応力度でかぶりが異なる場合で、右の図はかぶりが同一で鉄筋応力度が異なる場合の結果である。

これによれば、かぶりによって長期たわみは明確な差が見られない。かぶりにより腐食ひび割れ幅に差が見られることを考慮すれば、現時点の範囲では、鉄筋の腐食の程度によって長期たわみはあまり変わらないといえる。このことは、長期たわみは引張部に引張剛性よりも圧縮部コンクリートのクリープと乾燥収縮の影響が大きいことを意味する。ちなみに載荷後 1000 日におけるクリープ係数はおよそ 3.5、乾燥収縮は  $450 \times 10^{-6}$  であった。これらの供試体にははり供試体と同様な条件で塩水噴霧した。

かぶりが同一で鉄筋応力が異なる場合も腐食ひび割れ幅に差が見られるものの長期たわみに差が見られない。これも上述の理由と考えられる。

図-7 にかぶりが 30mm と同一で、鉄筋応力が異なる場合の曲げひび割れ幅の経時変化を示す。すべての供試体で腐食ひび割れが生じているが、腐食ひび割れ幅の小さい NC3-100 の曲げひび割れ幅に腐食の影響は見られない。しかし、NC3-200, NC3-300 の場合は載荷日数 700 日以降に増加率が高くなる傾向が認められる。これは腐食による付着剛性の低下が原因と考えられる。

図-8 に長期曲げひび割れ幅に及ぼすかぶりの影響を示している。この場合かぶりが 40、

30mm と大きい場合のひび割れ幅増加率が高い。かぶりが大きい場合の腐食ひび割れ幅が小さいことを考えると、乾燥収縮の進行に伴って、かぶりコンクリートの内部ひび割れによる面外変形が卓越した可能性が考えられる。

また、すべての供試体において、示方書<sup>3)</sup>の計算式より測値が小さく安全側であるが、今後腐食の進展により鉄筋との付着剛性低下により、ひび割れ幅がさらに増大することが考えられる。

### 4. まとめ

本研究の範囲で以下のことが明らかになった。

- (1) 噴霧によるひび割れ部の水分浸入深さは、かぶりの大きい方が、また鉄筋応力度の大きい方が深くなることが認められ、50~70mm の範囲にある。このため水分浸入は 20-40mm の鉄筋位置まで到達した。非ひび割れ部の浸入深さはおよそ 25mm であった。
- (2) 腐食反応の開始時期は、曲げひび割れ域ではかぶり厚さ及び鉄筋応力の影響が見られなかったが、非曲げひび割れ部においてはそれらの影響が見られた。
- (3) 腐食ひび割れ幅は、かぶりが小さくなると、また鉄筋応力度が大きくなると大きい。
- (4) 長期たわみに及ぼす腐食の影響は大きくはない。これは、圧縮部コンクリートのクリープと乾燥収縮が卓越して影響するためと考えられる。
- (5) 長期曲げひび割れ幅に腐食の影響がある可能性が認められた。その機構については今後の継続的実験を要する。

### 参考文献

- 1) 例えば, Sanchun Y., "Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of Reinforced Concrete" ACI, VOL.97 NO.6, 2000
- 2) ASTM C876: Half cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 3) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書【構造性能照査編】 ,2002