

# 論文 持続荷重下で腐食進行する RC はり部材の長期構造挙動の検討

Phetkaysone Anongdeth<sup>\*1</sup>・山田 龍平<sup>\*2</sup>・佐藤 良一<sup>\*3</sup>

**要旨:** 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、鉄筋腐食を促進させた。RC はりの持続荷重後およそ 5 年半における鉄筋腐食状況、腐食ひび割れ及び時間依存性変形をかぶり 3 種及び鉄筋応力度 3 レベルをパラメータとして、検討した。その結果、腐食ひび割れ幅は巨視的に鉄筋応力度が大きくなるにつれて大きくなるが、詳細に見れば、曲げせん断域の腐食ひび割れ幅は、最大モーメント区間のそれよりも大きくなる。時間依存性たわみの大きさと増加率は、土木学会標準示方書によるクリープ係数、乾燥収縮、長期有効曲げ剛性式を用いた計算値より大きい。

**キーワード:** 持続荷重, かぶり, 鉄筋応力, 腐食ひび割れ, たわみ

## 1. はじめに

沿岸域や寒冷地にあるコンクリート構造物では、飛来塩分や凍結防止剤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) 構造物では一般にひび割れ発生が認められているが、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する場合がある。水分や塩化物といった劣化因子の浸入は、鉄筋の腐食を促進し、構造物の耐久性に大きな影響を与える。このため、鉄筋腐食に及ぼすひび割れの影響に関する検討<sup>1), 2), 3)</sup>が、予めひび割れを導入し、その後除荷した供試体を用いて、行われていた場合が、除荷をしている点では実情を反映したものとは言えない。また、これらと異なり、実構造物の上部工のように持続荷重を負荷した状態での実験はいくつか行われているものの、腐食機構の解明に力点を置き構造挙動の検討が行われていない<sup>4)</sup>、電食による強制腐食をさせている<sup>5)</sup>など、必ずしも実情に即したものとはいえない。

そこで前報<sup>6), 7)</sup>は、鉄筋応力度及びかぶりを要因として、実構造物の死荷重を想定した持続荷重を受ける RC はりに塩水噴霧を行い、ひび割れ部の水分浸入、鉄筋腐食開始時期、腐食ひび割れ特性、時間依存構造挙動についての検討を行った。本論文は、これをさらに延長したもので、その後の約 2 年にわたり、材齢 5 年 9 ヶ月 (2100 日) まで行った結果を報告するとともに、これらと同様のパラメータで、載荷時材齢を変えた場合の実験結果も合わせて報告する。また、土木学会示方書によるクリープ係数、乾燥収縮、長期有効曲げ剛性式を用いたたわみの計算値と実測値を比較し、鉄筋腐食が RC はりの長期的な挙動に及ぼす影響を検討する。

## 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、表-1 に示す配合のコンクリートを用いて作製した。ここでは、W/C は 0.60、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とした。表-2 はすべての供試体名一覧を示す。なお、前報で用いた供試体はシリーズ 1 はり、同様のパラメータで載荷時材齢を変えた場合の供試体はシリーズ 2 はりとし、供試体名の前に 1, 2 を付けてある。また、シリーズ 3 のはりは無載荷はりを示している。かぶり厚さおよび鉄筋応力度は、表-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。鉄筋応力度が異なることにより、曲げひび割れ幅も異なることを意味する。また、かぶりを変化させる際、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 と一定とした。従って、かぶりを 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。さらに、はり供試体は、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> の供試体のせん断スパン中央断面に、電気抵抗測定するためのステンレス製電極棒 ( $\phi=2\text{mm}$ ) を埋設している。

養生条件に関しては、すべての供試体が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 日に順次行い、供試体にラップフィルムを巻きつけ、濡らした養生マットをかけ、さら

*1 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻	工修 (正会員)
*2 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)
*3 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)

にラップフィルムを巻きつけることにより、水分の出入りを防いだ。材齢 45 日より、ラップフィルムを巻いた状態で大気中に暴露した。シリーズ 1 は、材齢 64 日より、供試体に水を供給し、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、室内気中乾燥下に暴露した。シリーズ 2 及びシリーズ 3 は、それぞれ材齢 478 日及び 1,050 日より、シリーズ 1 と同様に、供試体に水を供給し、材齢 495 日及び 1057 日に飽和状態にした後、室内気中乾燥下に暴露した。なお、上述した水供給の目的は、噴霧開始前の初期電気抵抗値を統一することであり、はり供試体を飽和状態にすることである。

### 2.2 RCはりの載荷方法

RCはり供試体の載荷について、シリーズ1及びシリーズ2は、それぞれ材齢75日及び505日から順次開始し、材齢79日及び510日で、それぞれ5セット（1セット2体で）の供試体に所定の持続荷重を与えた。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。表-2に示すように、ひび割れ断面における鉄筋応力度の計算値がそれぞれ100, 200, 300N/mm<sup>2</sup>となるように初期荷重大きさを設定した。その所定の荷重を導入した後は、図-2に示すように、ナットの締め付けにより、荷重の変動が±3%以内となるように、定期的に調節した。また、シリーズ2はりには、所定の荷重を導入する前に、はり中央付近のステンレス電極位置の1点のみにローラーを配し、その点での鉄筋応力の計算値が100N/mm<sup>2</sup>となるように荷重をかけた。この一点載荷の目的は、ステンレス電極位置にひび割れを導入し、より正確な水分移動状況を把握するためである。

### 2.3 塩水供給方法

所定の持続荷重の載荷後、シリーズ1及び2は、それぞれ材齢83日及び511日より、負の曲げモーメントを受ける上段のはりの引張縁（供試体底面）に、3%塩化ナトリウム（NaCl）溶液を噴霧した。噴霧量及び頻度に関

表-1 コンクリートの配合

最大骨材寸法 (mm)		水セメント (W/C) (%)		細骨材率 (s/a) (%)
20		60		47
W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	AE減水剤・AE助剤 (kg/m <sup>3</sup> )
175	292	833	956	8.76

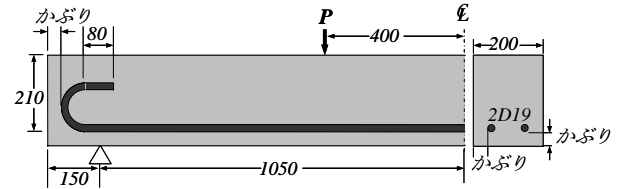


図-1 RCはり供試体概要図

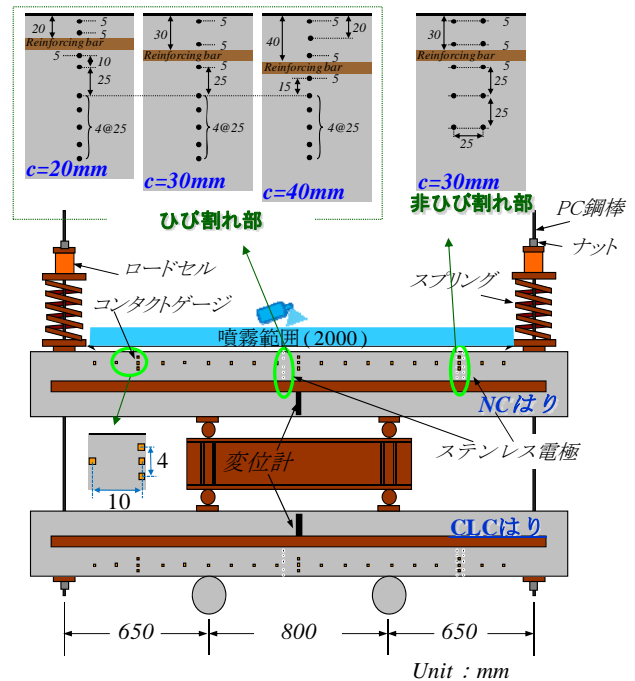


図-2 はり供試体の載荷方法及び噴霧の範囲

表-2 RCはり供試体一覧

	供試体名	パラメータ		1点載荷	持続載荷 開始材齢(日)	3%NaCl溶液の噴霧条件		
		かぶり(mm)	鉄筋応力(N/mm <sup>2</sup> )			開始材齢(日)	量及び頻度	
RCはり供試体	シリーズ1	1NC3-100	30	100	なし	80	83	410日間→(50cc×1)/週 その後(100cc×2)/週
		1NC4-200	40	200				
		1NC3-200	30	200				
		1NC2-200	20	200				
		1NC3-300	30	300				
	シリーズ2	2NC3-100	30	100	あり	510	511	(100cc×2)/週
		2NC4-200	40	200				
		2NC3-200	30	200				
		2NC2-200	20	200				
		2NC3-300	30	300				
	シリーズ3	3NC3	30	-	-	-	1066	410日間→(50cc×1)/週 その後(100cc×2)/週
		3NC2	20	-				
3NC4		40	-					

しては、表-2に示すように、シリーズ1及びシリーズ3は、噴霧開始から410日までに50cc×1回/週を行い、それ以後は100cc×2回/週を行った。シリーズ2は、噴霧開始から100cc×2回/週の噴霧条件で行った。また、噴霧範囲としては、載荷版(100mm)の部分を除き、スパン2100mmの中心部2000mmの範囲に対し行った。なお、上述したように、本研究で検討するはり供試体(NCはり)は、図-2に示すように、引張縁(底面)すなわち噴霧面が上側であることにより、塩水は重力の作用を受けながら、ひび割れに浸入することとなる。

## 2.4 測定項目および測定方法

測定項目は、はり側面引張鉄筋位置での曲げひび割れ幅、ひび割れ部の水分浸入、腐食ひび割れ幅、スパン中央のたわみである。図-2に示すように、引張鉄筋に垂直な曲げひび割れ幅は、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ゲージの標点間距離(100mm)をコンタクトゲージにより測定した。また、引張鉄筋に平行な腐食ひび割れ幅はコンタクトゲージ(評点間距離 40mm)とクラックスケールを併用して測定した。そして、たわみについては、はり両側面のスパン中央に設置した高感度変位計により測定した。水分移動はひび割れ部に埋め込んだステンレス電極間の電気抵抗を LCR メーターで測定することで間接的に測定した。なお、載荷により、電極位置にひび割れが必ずしも、一致しないため、表-3には、載荷時(材齢 80 日)及び材齢 2100 日の最大曲げひび割れ幅とともに、電極位置からその近傍のひび割れまでの距離範囲を示す。

## 3. 結果および考察

### 3.1 鉄筋の腐食状況

#### (1) 自然電位の経時変化

鉄筋腐食開始の判別に、照合電極に銀塩化銀電極(飽和)による自然電位法を用いた。測定された電位の評価方法として ASTM C876<sup>8)</sup>により、-230mV以下となれば90%以上の確率で腐食が生じていると判断する。

図-3に、各シリーズにおける曲げひび割れ部での自然電位の経時変化を示す。この図より、シリーズ1は(50cc×1)/週の410日間の塩水噴霧で、いずれのはりも-100mV以上の自然電位を示している。しかし、噴霧を(100cc×2)/週にしてから約48日、自然電位が急激に低下し、いずれのはりも-230mV以下となり、鉄筋腐食反応が開始したと考えられる。一方、シリーズ2はりについては、塩水噴霧後51日にその急激な低下が見られた。これらの結果より、前報<sup>6)</sup>にも述べたように、鉄筋の腐食反応開始はかぶりの違い、または鉄筋応力の違いに影響はないことはシリーズ2はりにも見られた。また、シリーズ1はりでは(100cc×2)/週の噴霧を行ってから、シ

リーズ2はりとあまり変わらない期間で、鉄筋腐食反応開始と思われる自然電位の急激的な低下が見られることから、(50cc×1)/週の410日間の塩水噴霧条件では、噴霧された塩水がかぶりコンクリートに吸水され、ひび割れを通じて鉄筋に到達していないためと考えられる。また、本実験の水分移動状況に関しては、前報<sup>6)</sup>の通りである。

シリーズ3はりでは無載荷の場合であり、シリーズ1と同様な塩水供給条件で行った結果、噴霧を(100cc×2)/週にしてから382日、かぶり20mmである最もかぶりの小さいはりに腐食反応開始が見られた。また、(100cc×2)/週の噴霧後540日にかぶり30mmのはりがその反応が見られ、かぶり40mmのはりでは現時点においても腐食が

表-3 最大曲げひび割れ幅及び、電極位置からその近傍のひび割れまでの距離

供試体名	$W_{f,max}^{1*}$ (mm)		$l_{bar}^{2*}$ (mm)	
	材齢80日(載荷時)	材齢2100日		
シリーズ1	1NC3-100	0.02	0.13	0.5~24
	1NC4-200	0.12	0.30	0.0~26
	1NC3-200	0.11	0.23	0.0~23
	1NC2-200	0.10	0.21	0.0~23
	1NC3-300	0.19	0.34	0.0~21
シリーズ2	2NC3-100	0.08	0.20	0.0~23
	2NC4-200	0.14	0.31	0.0~13
	2NC3-200	0.14	0.26	0.0~14
	2NC2-200	0.13	0.23	0.0~11
	2NC3-300	0.22	0.42	0.0~21

<sup>1\*</sup>  $W_{f,max}$  : 最大曲げひび割れ幅

<sup>2\*</sup>  $l_{bar}$  : 電極位置からその近傍のひび割れまでの距離範囲(最短~最長)

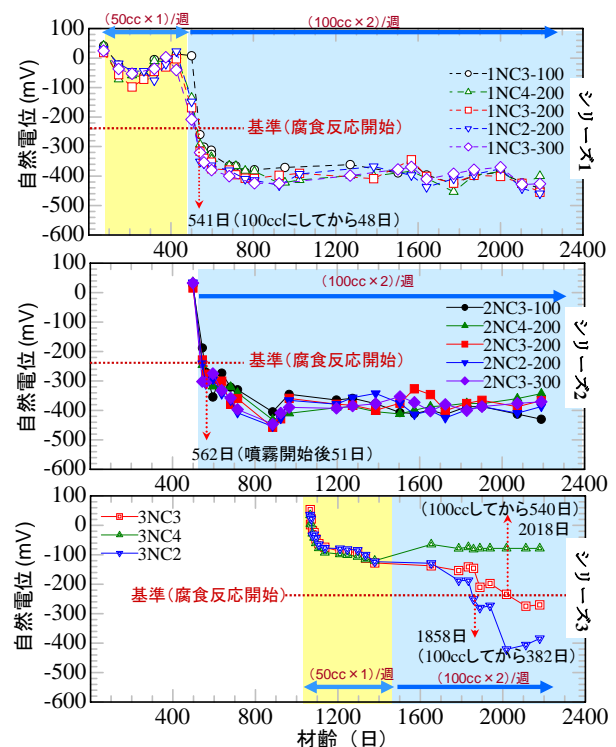
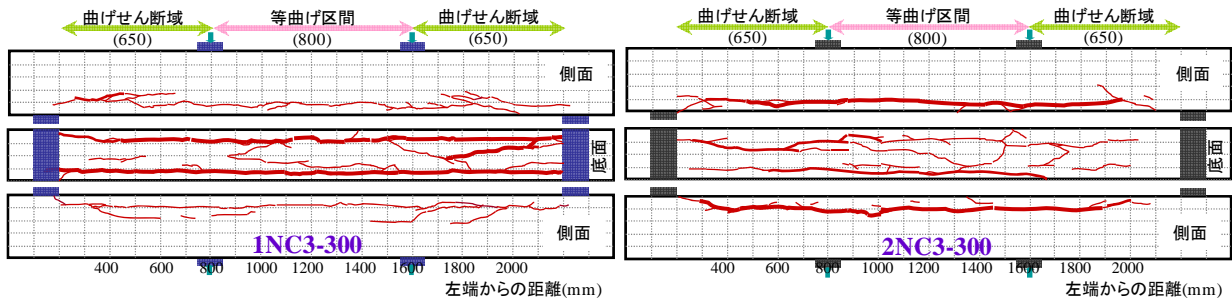


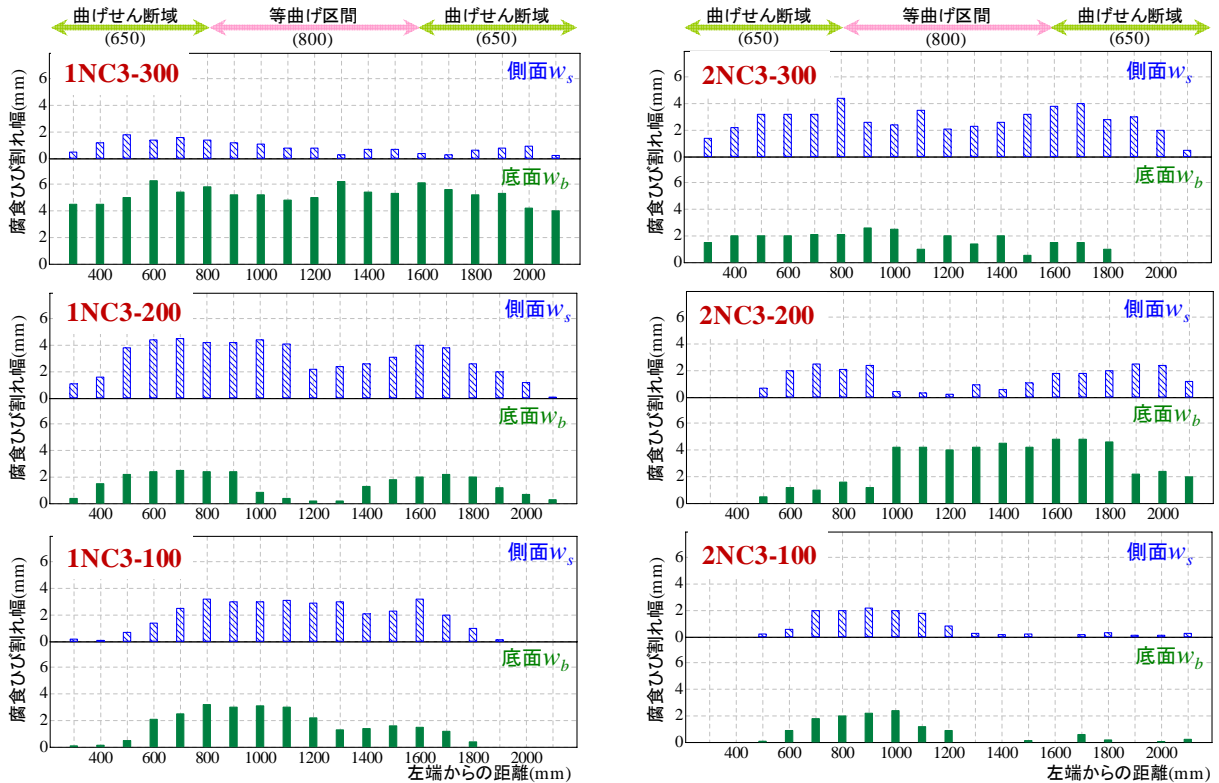
図-3 自然電位の経時変化



(a) シリーズ 1 はり

(b) シリーズ 2 はり

図-4 はりの腐食ひび割れ状況 ( $C=30\text{mm}$ ,  $\sigma=300\text{N/mm}^2$ )



(a) シリーズ 1 はり

(b) シリーズ 2 はり

図-5 はりの腐食ひび割れ幅分布 (鉄筋応力が異なる場合)

未だ不確定である。これにより、無荷重の場合、すなわち曲げひび割れが存在していない場合では、定説どおり、かぶり小さくなると、鉄筋の腐食反応開始時期が早くなると考えられる。また、シリーズ1の結果と比較すると、かぶりが20mm及び30mmの場合において、腐食反応開始時期がそれぞれ約11ヶ月及び1年4ヶ月の差が見られ、明らかに曲げひび割れ有無の影響が腐食反応開始に及ぼした。

## (2) 腐食ひび割れ特性

図-4 及び図-5 には、一例として鉄筋応力が最も大きく、そのために力学的損傷の大きい NC3-300 はりの、材齢 2100 日時点の腐食ひび割れ状況及び、鉄筋応力が異なる場合の腐食ひび割れ幅分布を示す。なお、図-5 の腐食ひび割れ幅分布では引張側底面における鉄筋 2 本

に沿って、底面で発生した腐食ひび割れ幅  $W_b$  及び側面で発生したもの  $W_s$  の最大値を示す。さらに、横軸の数値は図-4 のひび割れ図と対応して、左端からの距離を示す。

図-4、図-5 によれば、噴霧開始後 410 日間(50cc×1)/週の塩水噴霧を受けた 1NC3-300 の腐食ひび割れ幅は、引張側底面の幅が側面のそれより大きく、噴霧開始から(100cc×2)/週で行った 2NC3-300 の場合と異なった性状を示している。これは、1NC3-300 はりの場合、前述したように、(100cc×2)/週の噴霧では直ちに鉄筋に塩分が到達し、腐食が開始する一方、410 日間(50cc×1)週の場合は、自然電位が-100mV 程度であることから、鉄筋に塩分が到達しておらずかぶりコンクリートに蓄積されたと考えられる。この蓄積された塩分により、引張側の鉄

筋表面部に腐食が先行して起こったことによる可能性  
がある。一方、2NC3-300 はりの場合、噴霧開始後直  
ちに（約 50 日後）腐食反応が開始したことから、鉄筋表  
面全体に腐食が起こったと考えられる。以上の点につ  
いては、偶発的な面も考えられるので、さらにデータを蓄  
積して検討する必要がある。

図-5に示したはりの腐食ひび割れ幅で注目すべきは、  
後述の図-7に示すように、腐食ひび割れ幅は巨視的  
には鉄筋応力度が大きくなるにつれて大きくなるが、詳細  
に見れば鉄筋応力度に必ずしも依存しない点である。す  
なわち、曲げせん断域の腐食ひび割れ幅は、最大モー  
メント区間のそれよりも大きなものがある。これは、曲  
げせん断域では、せん断力に起因する付着応力が生じ、  
この付着応力が節の機械的抵抗によるためと考えられ  
る。すなわち、傾斜した節前面の抵抗力の半径方向成  
分が、腐食膨張圧に加算されるためと思われる。

図-6に材齢2100日の等曲げ区間及びせん断域での最大腐食ひび割れ幅に及ぼす鉄筋応  
力度とかぶりの影響を示す。なお、縦軸は底面の腐食ひび割れ幅 $W_b$ と側面のひび割れ幅 $W_s$   
の平均値である。この図より、全体的みると両シリーズのはりにおいて、鉄筋応力度が大  
きくなると、またはかぶりが小さくなると、せん断域でも等曲げ区間でも、腐食ひび割れ  
幅が大きくなるのがわかる。また、せん断域の最大腐食ひび割れ幅はいずれのはりでも  
等曲げ区間のものに比べ、ほぼ同等の大きさ、場合によってはそれ以上の大きさを示して  
おり、上述でも述べたように、せん断力による影響が考えられる。

図-7にシリーズ1及びシリーズ2はりの底面と側面の最大腐食ひび割れ幅の和の経時変  
化を示す。図-7(a)と図-7(b)はそれぞれかぶりが同一で鉄筋応力度が異なる場合と鉄筋  
応力度が同一でかぶりが異なる場合を示す。いずれの場合も、腐食ひび割れ幅は、材齢の  
経過とともにほぼ比例的に増加する。

図-7(a)の鉄筋応力度が異なった場合では、両シリーズ  
とも、鉄筋応力度が大きくなると腐食ひび割れ幅の大き  
くなるが、鉄筋応力度への依存の程度には法則性は明確  
ではない。

かぶりの影響は、図-7(b)にみられるように、シリー  
ズの条件に関わらず、20mm の場合が圧倒的に大きく、  
かぶりが 30mm と 40mm の差異の影響は小さい。

### 3.3 時間依存性変形特性

図-8に鉄筋応力度ごとの時間依存性たわみの実測値

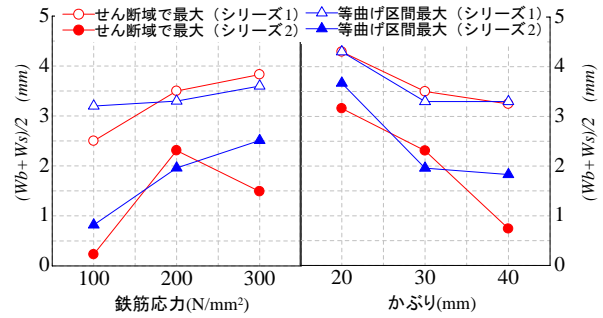
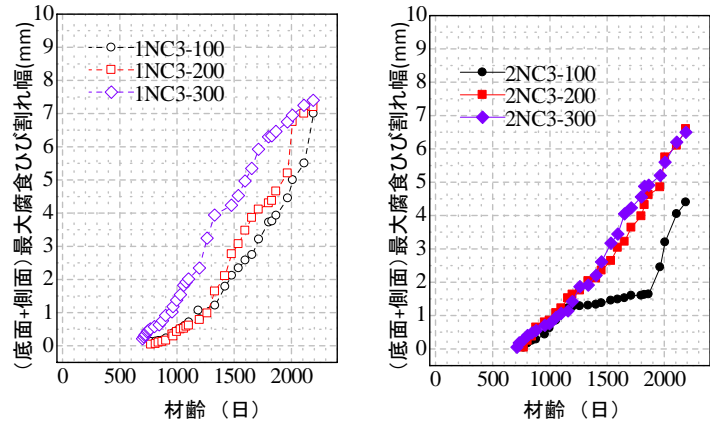
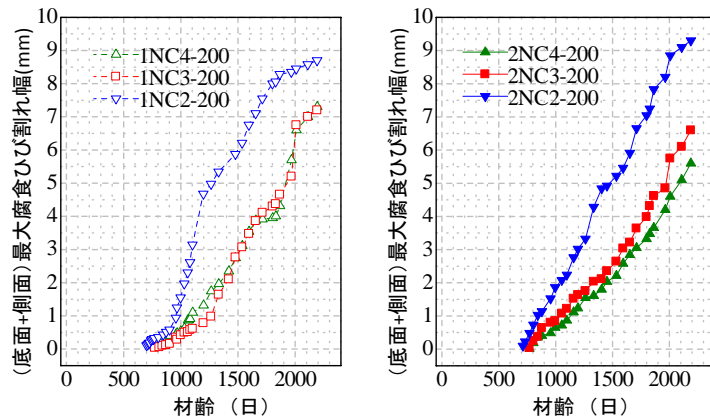


図-6 等曲げ区間及びせん断域での腐食ひび割れ幅  
(材齢 2100 日の時点)



(a) 鉄筋応力が異なる場合



(b) かぶりが異なる場合

図-7 最大腐食ひび割れ幅

を計算値と比較して示す。計算に用いたクリープ係数、  
乾燥収縮、長期有効曲げ剛性式は、いずれも土木学会標  
準方書<sup>9)</sup>による。

これらによれば、荷重時材齢が若い方はたわみが大き  
くなるとみられる。実測値はいずれの場合も計算値より  
大きい。腐食ひび割れ発生前においても計算値が実測値  
より小さいことを考慮すれば、相違の理由として①計算  
に用いたクリープ係数が実際より小さい、②塩水噴霧に  
より収縮勾配が断面に生じている、等が考えられる。た  
わみの増加率の観点から見ても実測値は計算値より大

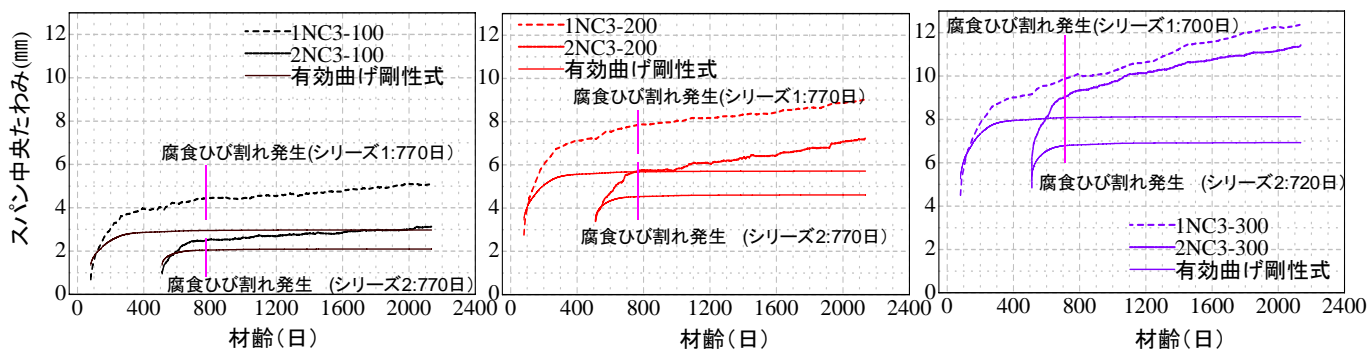


図-8 時間経時の中央たわみ（鉄筋応力が異なる場合）

きい。長期のたわみの多くは、圧縮部コンクリートのクリープ、収縮に依存するため、この予測精度を検討するとともに、腐食の影響は、アンボンドの考え方も取り入れて検討する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 腐食ひび割れ幅は巨視的には鉄筋応力度が大きくなるにつれて大きくなるが、詳細に見れば、曲げせん断域の腐食ひび割れ幅は、最大モーメント区間のそれよりも大きくなる。これは、曲げせん断域のせん断力に起因する傾斜した節前面の抵抗力の半径方向成分が、腐食膨張圧に加算されるためと思われる。
- (2) 鉄筋応力度が大きくなると腐食ひび割れ幅は大きくなるが、鉄筋応力度への依存の程度には法則性は明確でなく、かぶりの影響は20mmの場合が圧倒的に大きく、かぶりが30mmと40mmの差異の影響は小さい。
- (3) 腐食反応開始後の腐食ひび割れ発生時期はシリーズ1とシリーズ2の差が認められず、時間経過による腐食ひび割れ幅の増加率もほぼ同じく、かぶりと鉄筋応力の影響を受けている。
- (4) 時間依存性たわみの大きさと増加率は、土木学会標準示方書によるクリープ係数、乾燥収縮、長期有効曲げ剛性式を用いた計算値より大きい。この差に及ぼす腐食の影響は明確ではなく、今後の課題となった。

#### 参考文献

- 1) 田中和幸, 矢田一也, 石田剛朗, 佐藤良一: ひび割れ部での塩水浸透に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.941-946, 2006.7

- 2) 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
- 3) 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
- 4) Nobuaki Otsuki, Shin-ichi Miyazato, Nathaniel B. Diola, and Hiroataka 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
- 5) 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
- 6) Phetkaysone Anongdeth, 沼口文彦, 石田剛朗, 佐藤良一: 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
- 7) Phetkaysone Anongdeth, 沼口文彦, 石田剛朗, 佐藤良一: 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, コンクリート工学論文集, Vol.30, No.1, pp.831~836, 2008.7
- 8) ASTM C876: Half cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 9) 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