

# 論文 塩害を受ける RC 建造物の目視点検情報のモデル化

鈴木 修一\*<sup>1</sup>・堤 知明\*<sup>2</sup>・吉田 郁政\*<sup>3</sup>・大下 英吉\*<sup>4</sup>

**要旨:** 塩害を受ける RC 建造物の観測情報に基づく耐久信頼性評価を行うために目視点検情報のモデル化を試みた。限界状態の指標に鉄筋腐食率を用いた耐久信頼性評価を行うことにしたため、目視点検情報には鉄筋腐食率と密接な関係にあり、定量化も図り易い腐食ひび割れ幅を用いた。鉄筋腐食率とひび割れ幅の関係は、電食により鉄筋を腐食させた RC 梁供試体の実験データを整理して設定した。目視点検は劣化ランクで評価されることが多いことを考慮して、モデル化でも劣化状態を 4 つのランクに区分した。そして、実験データに基づいて各劣化ランクの確率を算定し、ばらつきを定量的に評価した目視点検情報モデルを作成した。

**キーワード:** 目視点検, 塩害, 腐食ひび割れ幅, 鉄筋腐食率, ばらつき

## 1. はじめに

RC 建造物の維持管理では、劣化の程度を点検・調査し、現状の把握および将来予測を行い、その結果に基づき補修、補強あるいは取替えの有無およびその実施時期の計画が行われる。既設建造物の点検・調査データは非常にばらつきが大きいので、安全に建造物を維持管理する場合、これまでは早期の劣化段階で補修が行われてきた。しかし、昨今、半世紀にわたり建設されてきた RC 建造物の多くが補修・取替え時期を迎え、施設管理者は限られた予算の中で、これまで以上に適切に建造物の維持管理の意思決定を行うことが求められている。

既設建造物の劣化現象のもつばらつきが非常に大きいことを踏まえると、適切に劣化を予測するためには、不確定性を考慮した意思決定、すなわち信頼性評価に基づく意思決定の仕組みが有効な手段となる。これまで蓄積されてきた既往の点検データの積極的な活用も重要である。近年、塩害を受ける新設建造物を対象とした耐久信頼性評価に関する研究が行われており<sup>1), 2)</sup>、それらの研究成果を踏まえて既設建造物に対しても耐久信頼性評価が行われた<sup>3)</sup>。現場位置で得られる観測情報から劣化予測に関わるパラメータの確率分布を更新し、それに基づく橋脚の劣化予測に対する信頼性評価事例が示された。例示での限界状態の指標は限界塩化物イオン濃度、ひび割れ発生時の鉄筋腐食率および劣化期開始時の鉄筋腐食率である。観測情報にはコンクリート中の塩化物イオン濃度と目視点検の 2 種類を想定した。目視点検では、一般に、RC 建造物の表面に発生する腐食ひび割れの長さ・幅、剥離・剥落の程度、錆汁、エフロッセンスの有無等の把握が行われる。したがって、限界状態の指標である

鉄筋腐食率は、目視点検情報から直接的には得ることができない。そこで、鉄筋腐食と密接な関係にあり、さらに定量化を図り易い腐食ひび割れ幅を目視点検の劣化に関する指標として用い、腐食ひび割れ幅を鉄筋腐食率と関連付けることにした。これまでも腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係については研究が行われてきた<sup>4), 5), 6)</sup>。しかし、両者の関係は十分に把握されているとは言い難く、評価方法はまだ統一が図られていない。その不確定性については、近年、ようやく議論されはじめたのが現状である<sup>7), 8)</sup>。そこで、大下らの RC 部材の残存耐力評価<sup>9), 10), 11)</sup>の実験データに基づき、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係を整理し、ばらつきを定量的に評価した目視点検情報のモデル化を試みた。

本論文では、既設建造物の耐久信頼性評価事例において目視点検情報を設定する際に行われた目視点検情報のモデル化に関する検討内容について述べる。

## 2. 腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係

### 2.1 実験概要

大下らは、電食により鉄筋を腐食させた RC 梁供試体を用いて曲げ荷重試験を行い、鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力について実験的な研究を実施している<sup>9), 10), 11)</sup>。

供試体は、設計基準強度を 30N/mm<sup>2</sup> とし、表-1 に示す配合のコンクリートを使用している。練り混ぜ水は、鉄筋腐食を促進させるため 5%NaCl 水溶液を用いている。

研究で作成された供試体のうち本検討のデータとして用いた 30 供試体の形状および配筋状態を図-1 に示す。供試体はせん断補強筋の配筋状態の相違により 3 つのタイプに分類できる。タイプ A は 9 供試体、タイプ B は 8 供

\*1 東電設計 (株) 土木本部 耐震技術部 (正会員)

\*2 東京電力 (株) 技術開発研究所 設備基盤技術グループ 工博 (正会員)

\*3 武蔵工業大学 工学部 都市工学科教授 工博

\*4 中央大学 理工学部 土木工学科教授 工博 (正会員)

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

Gmax (mm)	W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	S	G	混和剤	NaCl	
20	60	10	5.0	168	280	826	996	2.8	8.8	

表-2 供試体タイプ別試験データ数

供試体タイプ	鉄筋名称	腐食ひび割れ発生状態	データ数
タイプA (9供試体)	L及びR鉄筋	底面のみ	407
	M鉄筋	底面及び側面	25
タイプB (8供試体)	L及びR鉄筋	底面のみ	584
	M鉄筋	底面及び側面	48
タイプC (13供試体)	L及びR鉄筋	底面のみ	988
	M鉄筋	底面及び側面	48
合計			3150

試体、タイプ C は 13 供試体である。いずれの場合も供試体形状は 240×200×2100mm であり、主鉄筋には異形鉄筋 D16 (SD295A) を 60mm 間隔に 3 本配筋している。これらの 3 本の鉄筋を、以後、中央の鉄筋は M 鉄筋、左右の鉄筋は L および R 鉄筋と呼ぶことにする。主鉄筋の下面からの被りは L, M および R 鉄筋ともに 40mm、また L および R 鉄筋の側面からの被りは 60mm である。タイプ A はせん断補強筋なし、タイプ B は主鉄筋の定着部のみ定着筋(せん断補強筋)を配筋した場合、タイプ C はせん断補強筋を等間隔に配筋した場合である。タイプ B の定着筋は、図では 2 本であるが、その他に 1,3 および 4 本の場合がある。タイプ C のせん断補強筋間隔は、図では 80mm であるが、その他に 160 あるいは 240mm の場合がある。せん断補強筋には D6 (SD295A) を使用した。

鉄筋を腐食させるための電食は、図-2 に示すように NaCl 水溶液を満たした水槽内に供試体を設置し、主鉄筋を陽極側、銅板を陰極側に接続して直流電流 20A を通電した。主鉄筋の目標腐食率を 5, 10, 20 および 30% とし、予備実験で得られた知見をもとに、腐食量を積算電流量で制御した。

実際の鉄筋腐食率は、供試体作成前に計測した鉄筋重量と曲げ載荷試験後に計測した鉄筋重量の重量差より求めている。曲げ載荷試験後の鉄筋重量は以下のようにして計測した。主鉄筋を供試体からはり出し、20℃の 10% 濃度クエン酸第二アンモニウム溶液に 24 時間浸漬させ、腐食生成物を除去する。そして、腐食生成物を除去した主鉄筋を 50mm 間隔に切断し、切断した個々の鉄筋片の重量を測定する。ただし、タイプ A の供試体うち 4 供試体の鉄筋重量は、左右の定着部およびせん断区間からそれぞれ 1 箇所ずつ、等曲げ区間 1 箇所の 5 つの領域から

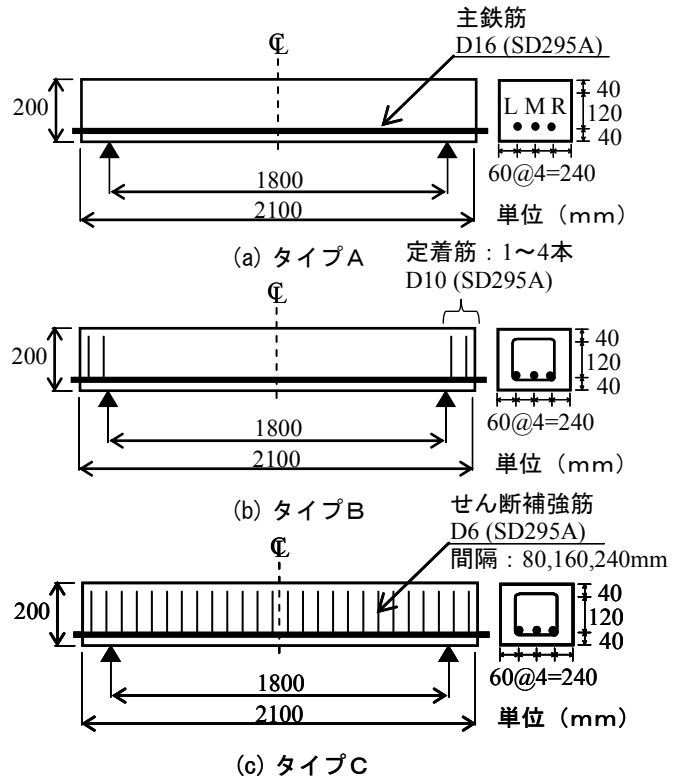


図-1 供試体の形状および配筋状態

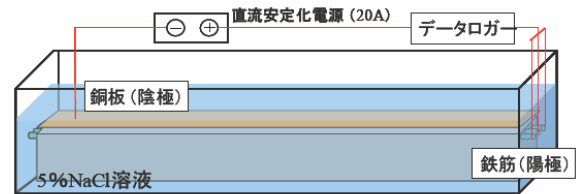


図-2 電食試験概要

鉄筋を 100mm 切り出して計測したものである。

一方、腐食ひび割れについては、曲げ載荷試験前に、底面、側面および上面で生じた腐食ひび割れをすべてスケッチした。腐食ひび割れ幅は、クラックスケールを用いて切断した 1 つの鉄筋片に対して 2 箇所までデータが得られるように計測した。そして、その平均値を鉄筋片に対する腐食ひび割れ幅の値とした。

## 2.2 実験結果

### (1) 全データによる整理

2.1 で述べた実験の計測データを整理したところ、対となる鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅データは 3150 データであった。表-2 にそれらのデータをタイプ別に集計した結果を示す。L および R 鉄筋に生じた腐食ひび割れは、底面だけに発生する場合と底面と側面の両方に発生する場合がある。そこで、本検討では、腐食ひび割れ幅が底面と側面に発生する場合は、両者のひび割れ幅の和を腐食ひび割れ幅とした。

図-3 は測定した鉄筋腐食率を供試体ごとに整理して平

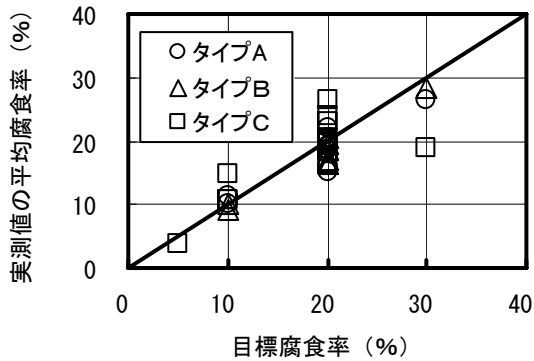


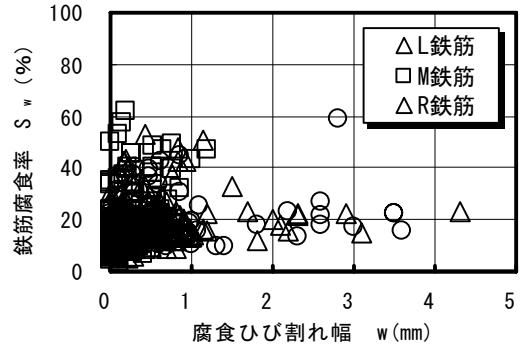
図-3 目標腐食率と実測値の平均腐食率との関係

均腐食率を求め、それと目標腐食率との関係を示したものである。目標腐食率 30% に対して実際の平均腐食率が 18.8% の供試体、目標腐食率 20% に対して実際の平均腐食率が 26.4% の供試体もあるが、それ以外の平均腐食率は目標腐食率の±5% 以内に収まっており、実験は想定どおりの鉄筋腐食率を実現している。平均腐食率の最大は 28.4% であった。

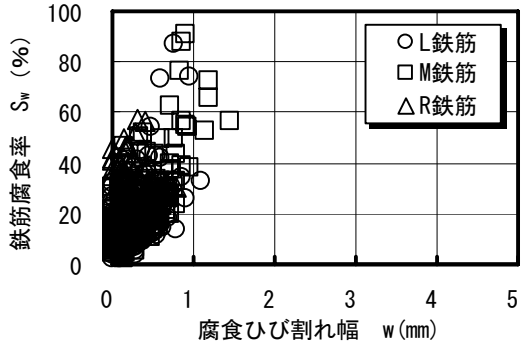
図-4 に腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係を示す。いずれのタイプにおいても腐食ひび割れ幅、鉄筋腐食率ともにばらつきが大きい。電食試験では、最初に腐食ひび割れが生じたところで、局部的に鉄筋腐食が進行する傾向がある。そのため、平均腐食率が 30% 以下に制御された供試体にも係わらず、鉄筋腐食率が 90% と極端に腐食しているデータも存在した。

タイプ別に比較すると、タイプ B と C は腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係に似た傾向が見られるものの、タイプ A はそれらと異なる傾向を示した。特にタイプ A の L および R 鉄筋の腐食ひび割れ幅はタイプ B および C に比べてかなり大きい。これは、タイプ A の L および R 鉄筋に生じる腐食ひび割れは、タイプ B および C のようにせん断補強筋により拘束されないためと考えられる。M 鉄筋に生じる腐食ひび割れ幅が L および R 鉄筋のように大きくならないのは、L および R 鉄筋の膨張圧により両側から拘束されるためと考えられる。図-1 に示すようにタイプ B は定着部のみ定着筋により拘束されているものの、他の領域はタイプ C のようにせん断補強筋による拘束はない。したがって、定着筋により拘束されている領域以外では、タイプ A と同じような傾向が見られると考えていたが、実際には全領域をとおしてタイプ C と類似した傾向を示した。これは端部の拘束が供試体全領域の腐食ひび割れ幅に影響を与えていることを示唆している。詳細は不明だがとても興味深い結果である。

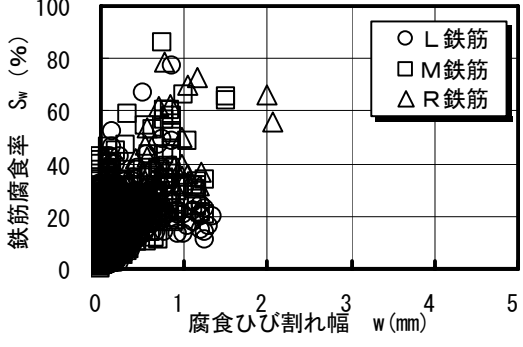
腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の相関性を調べると、タイプ A の相関係数は 0.22、タイプ B の相関係数は 0.54、タイプ C の相関係数は 0.46 であった。タイプ A にはほとんど相関が見られないが、タイプ B および C はある程度



(a) タイプ A

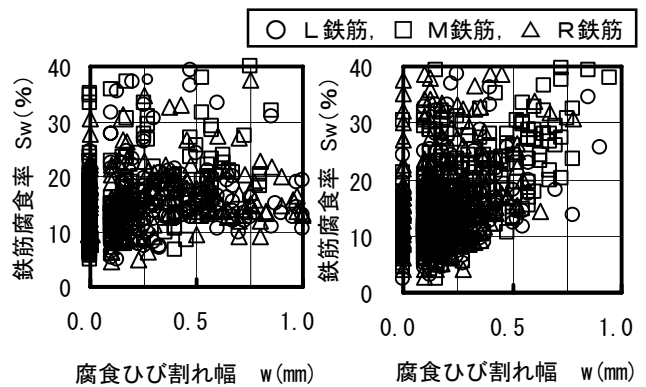


(b) タイプ B



(c) タイプ C

図-4 腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係



(a) タイプ A

(b) タイプ B

図-5 腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係、拡大図

の相関が見られた。図-5 はタイプ A および B の腐食ひび割れ幅 1.0mm 以下の領域を拡大したものである。図-4 同様、かなりデータが密集しているものの、タイプ B に比べてタイプ A の腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の相関が非常に低いことが確認できる。

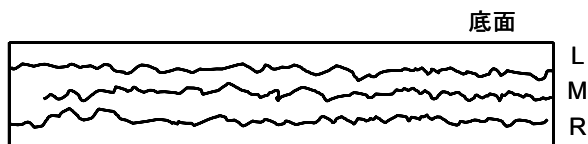


図-6 腐食ひび割れ発生状況の一例

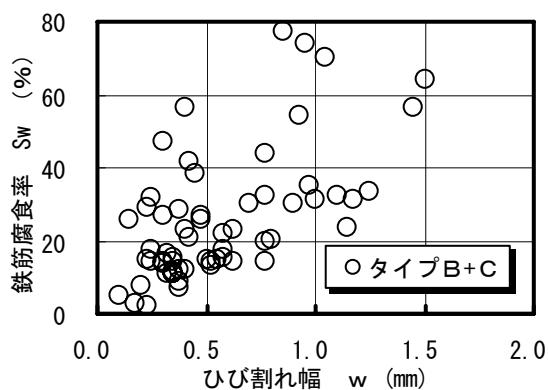


図-7 モデル作成用のデータ

## (2) 目視点検情報のモデル化に用いるデータの整理

目視点検の劣化度の判定には、一般に、点検範囲のうち厳しい箇所の情報を用いると考えられる。そこで、目視点検情報のモデル化においても、本実験データすべてを用いるのではなく、劣化状態の進んだ箇所のデータを選択して用いることにした。

1体の供試体には3本の主鉄筋が配筋されている。腐食ひび割れの多くは、図-6に示すように底面の鉄筋位置表面に、鉄筋に沿うように発生していた。そこで、1本の鉄筋に対して発生した腐食ひび割れを1グループと考え、それらのうちで最も大きな腐食ひび割れ幅とその位置の鉄筋腐食率を、グループの代表値として扱うことにした。

1章で述べたように、本論文の目的は橋脚の耐久信頼性評価事例に用いる目視点検情報のモデル化である。橋脚の場合、主鉄筋はせん断補強筋によって拘束されているはずである。したがってタイプCの条件に近い。タイプBの実験結果はタイプCとあまり相違が見られないが、タイプAの実験結果は明らかに異なる傾向を示している。また、タイプAには腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の相関もほとんど見られないため、目視点検情報のモデル化に用いないことにした。したがって、タイプBおよびCを合わせると21供試体あり、1供試体あたり3個のデータが得られるため、用いるデータ数は63(=21×3)となった。図-7に、以上のような考えに基づいて整理した腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係を示す。腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の相関性は、相関係数で0.64となり、全データによる整理結果に比べて向上した。

表-3 劣化度と劣化状態

劣化度	鉄筋腐食率 $S_w$ (%)	劣化状態 <sup>注)</sup>	劣化度 <sup>注)</sup>
1	$S_w < 2.3$	鉄筋腐食が進行している段階で進展期の前期～中期に相当する。	{1}
		コンクリート表面に劣化が顕在化しているが、まだ腐食ひび割れは発生していない段階であり、進展期の後期に相当する。	{2}
2	$2.3 \leq S_w < 5$	かぶり部分に腐食ひび割れが発生しており、加速期に相当する。	{3}
3	$5 \leq S_w < 20$	かぶりコンクリートの大部分に腐食ひび割れが発生しており、加速期の後期に相当する。	{4}
4	$20 \leq S_w$	鉄筋の断面欠損が顕著になる段階であり、劣化期に相当する。	{5}

注) 参考文献14)における劣化度と劣化状態の定義

## 3. 劣化ランクの設定

### 3.1 既往の資料に基づく鉄筋腐食率のランク分け

各種維持管理マニュアル等<sup>12), 13), 14)</sup>に示されているとおり目視点検結果は劣化ランクで評価することが多く、腐食ひび割れ等の各劣化ランクの状態を示す基準に従って判定が行われる。港湾技研資料<sup>14)</sup>では劣化状態と鉄筋腐食率の関連付けを行い、鉄筋腐食率を劣化ランクの閾値として用いている。そこで、本検討では同資料を参考にして、表-3に示すように鉄筋腐食率に基づいて劣化ランクを設定することにした。同資料では劣化ランクを5つに区分している。しかし、ひび割れ幅から劣化ランク{1}と{2}を区別することはできない。そこで、劣化ランク{1}と{2}を1つの区分にまとめ、劣化ランクを4つに区分した。そして、鉄筋腐食の閾値は、2.3%以下(劣化ランク1)、2.3から5%(劣化ランク2)、5から20%(劣化ランク3)、20%以上(劣化ランク4)とした。なお、同資料では劣化ランク{1}と{2}の鉄筋腐食率の閾値は、ひび割れ発生時の鉄筋腐食率として一律1%としているが、表-1に示した大下らの供試体作成条件に対して式(1)、(2)に示した秋山らの方法<sup>2)</sup>を用いて腐食ひび割れ発生の限界腐食減量  $Q_c$ (mg/mm<sup>2</sup>)を算定した。それを鉄筋腐食率に変換して劣化ランク1と2の鉄筋腐食率の閾値を2.3%とした。秋山らの方法は、 $Q_i$ 、関らが提案した腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係式<sup>4)</sup>に腐食量算定式のばらつきを考慮する係数  $U_q$  を乗じたものである。算定に当たって、 $U_q$ には3.86を用い、コンクリートの弾性係数には  $E_c=28000$ (N/mm<sup>2</sup>)を用いた。

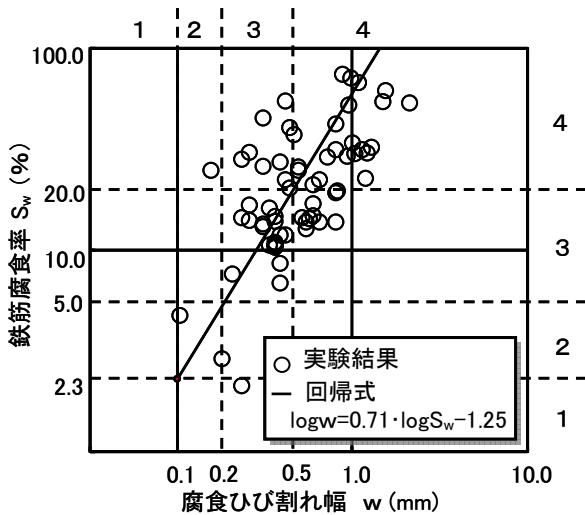


図-8 実験データと劣化ランクの関係

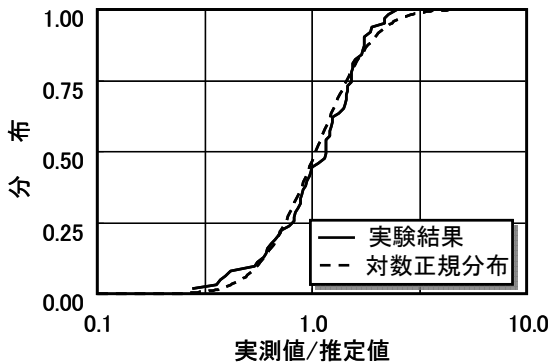


図-9 回帰式まわりのばらつき分布

$$Q_{cr} = U_q \frac{\rho_s}{\pi(\gamma-1)} \times \left( \alpha_0 \beta_0 \frac{0.22(2c+d)^2 + d^2}{E_c(c+d)} f'_c{}^{2/3} + \alpha_1 \beta_1 \frac{c+d}{5c+3d} w_c \right) \quad (1)$$

ここで、 $\rho_s$ ：鉄筋密度(=7.85mg/mm<sup>3</sup>)、 $\gamma$ ：腐食生成物の体積膨張率(=3.0)、 $d$ ：鉄筋径(mm)、 $c$ ：鉄筋かぶり(mm)、 $f'_c$ ：コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_c$ ：コンクリートの弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $w_c$ ：ひび割れ幅(=0.1mm)である。 $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ はかぶり、鉄筋径、およびコンクリート圧縮強度の影響を考慮する補正係数である。

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= (-0.0005d + 0.028) \cdot c + (-0.0292d + 1.27) \\ \beta_0 &= -0.0055 f'_c + 1.07 \\ \alpha_1 &= (0.0007d - 0.04) \cdot c + (0.0663d + 5.92) \\ \beta_1 &= -0.0016 f'_c + 1.04 \end{aligned} \quad (2)$$

### 3.2 実験データに基づく腐食ひび割れ幅のランク分け

腐食ひび割れ幅のランク分けは、以下に述べるように実験結果に基づく腐食ひび割れ幅の腐食鉄筋率への回帰式より、鉄筋腐食率の閾値に対応する腐食ひび割れ幅を閾値とした。図-7によればモデル作成に用いる実験データは、腐食ひび割れ幅、鉄筋腐食率ともに値が大きくなるほどばらつきが大きくなる傾向が見られる。そこで、両者のばらつきは変動係数一定としてモデル化すること

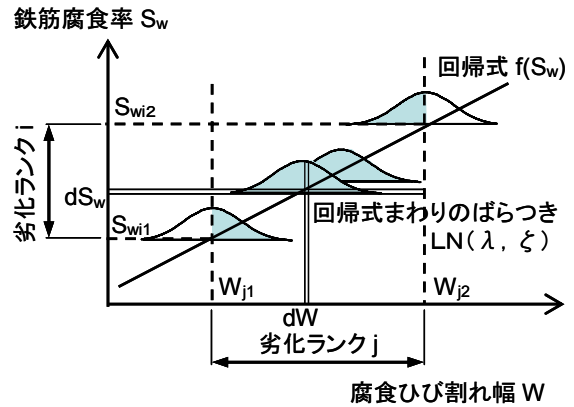


図-10 確率算定方法の概念図

表-4 観測情報の不確定性

		腐食ひび割れ幅ランク (目視点検)			
		1	2	3	4
鉄筋腐食率ランク	1	0.809	0.157	0.031	0.003
	2	0.262	0.427	0.301	0.010
	3	0.023	0.149	0.606	0.223
	4	0.000	0.005	0.235	0.761

にした。実験データを図-8に示すようにlog軸上で整理して回帰させた。回帰式は、腐食ひび割れ発生限界腐食率と実験結果との整合性を考え、鉄筋腐食率 $S_w=2.3\%$ のとき、腐食ひび割れ幅 $w=0.1\text{mm}$ になるように作成した。回帰式は $\log w = 0.71 \log S_w - 1.25$ と求められた。その結果、各劣化ランクの腐食ひび割れ幅による閾値は、求めた回帰式より、0.1mm以下(劣化ランク1)、0.1から0.2mm(劣化ランク2)、0.2から0.5mm(劣化ランク3)、0.5mm以上(劣化ランク4)とした。

### 4. 各ランクに対する不確定性評価

図-9は回帰式に対するばらつき分布を示したものである。図中にはばらつき分布に当てはめた対数正規分布曲線( $\lambda=0.036$ 、 $\zeta=0.488$ )も示しているが、両者は良好に一致している。そこで、回帰式まわりのばらつきは全領域にわたって対数正規分布曲線で当てはめることが可能であると仮定して、定義した劣化ランクの区分、回帰式のばらつきに対する確率 $P_{i,j}$ を式(3)により算定した。添え字の*i*および*j*は、*i*が鉄筋腐食率の劣化ランク、*j*が腐食ひび割れ幅の劣化ランクを意味する。図-10は式(3)の概念を示したものである。

$$P_{i,j} = \frac{1}{S_{w_{i2}} - S_{w_{i1}}} \times \int_{S_{w_{i1}}}^{S_{w_{i2}}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta w} \int_{-w_{j1}}^{-w_{j2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln w - (2.3f(S_w) + \lambda)}{\zeta} \right)^2 \right] dw \right\} dS_w \quad (3)$$

ここで、 $f(S_w)$  : 回帰式 ( $=0.71 \log S_w - 1.25$ )、 $S_{wi1}, S_{wi2}$  : 鉄筋腐食率の劣化ランク  $i$  の下限値および上限値 ( $i=1,2,3,4$ )、 $w_{j1}, w_{j2}$  : 腐食ひび割れ幅の劣化ランク  $j$  の下限値および上限値 ( $j=1,2,3,4$ ) である。

算定した確率を表-4に示す。各列はひび割れ幅、すなわち目視点検に基づく劣化ランクを、各行は鉄筋腐食率に基づく劣化ランクを表している。以上のモデルを用いると、ばらつきを定量的に評価した目視点検情報を用いて、文献3) のように既設構造物の耐久信頼性評価を行うことができる。

## 5. まとめ

電食により鉄筋を腐食させた RC 梁供試体の実験データを用いて腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係を整理し、目視点検情報のモデル化を試みた。その結果および得られた知見を以下に示す。

- (1) 電食により鉄筋腐食させた RC 梁供試体の腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係にはある程度の相関が見られるものの、ばらつきが極めて大きい。
- (2) 各供試体において腐食ひび割れ幅の大きい箇所の腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係を整理したところ、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の間には正の相関が見られ、ばらつきは変動係数一定の傾向が見られた。
- (3) 腐食ひび割れ幅の大きい箇所のデータを用いて腐食ひび割れ幅の鉄筋腐食率への回帰式を求め、その回帰式まわりのばらつきの分布状態を調べた。その結果、対数正規分布曲線と良い対応が見られた。
- (4) 各種維持管理マニュアル等に示された劣化ランクを踏まえて、目視点検情報となる腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率を4つの劣化ランクに区分した。回帰式まわりのばらつきを対数正規分布でモデル化して、定義した劣化ランクの確率を求め、ばらつきを定量的に評価した目視点検モデルを作成した。
- (5) 本研究の目視点検モデルは、ある特定の形状で、かつせん断補強筋を有する RC 梁部材の実験結果に基づいて設定したものである。したがって、せん断補強筋を有しない場合、あるいは鉄筋被り、鉄筋径等が異なれば、本研究で設定した劣化ランクの腐食ひび割れ幅の閾値は異なってくる。しかし、せん断補強筋を有する既設構造物に限定すれば、ばらつきの大きさはある程度の一般性があると考えられる。したがって、本研究で作成した目視点検モデルは、せん断補強筋を有する既設構造物の目視点検に対する信頼性指標として役立つものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.385-401, 2006.
- 2) 佐藤広和, 李月鳳, 秋山充良, 鈴木基行: 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1071-1076, 2007.
- 3) コンクリート技術シリーズ No.83 コンクリート構造物の信頼性設計法に関する小委員会(336 委員会) 成果報告書, 2008.
- 4) Qi Lukuan, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.161-171, 2001.
- 5) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1988.
- 6) 荒木弘祐, 高谷哲, 服部篤史, 宮川豊章: 弾性体を用いた鉄筋腐食膨張のモデル実験におけるひび割れ幅と換算腐食減量の関係, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.91-92, 2006.
- 7) 岡崎雅弘, 下村匠, 松尾洋: 鉄筋軸方向の非一様性に着目したコンクリート中の鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅に関する検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.1, pp.857-862, 2003.
- 8) 松田耕作, 横田優, 荻山和樹, 松島学: 塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.30, No.1, pp.807-812, 2008.
- 9) 村上祐貴, 木下哲秀, 鈴木修一, 福本幸成, 大下英吉: 鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集 第 17 巻 1 号 pp.61-74, 2006.
- 10) 村上祐貴, 山内佑樹, 堤知明, 大下英吉: 鉄筋腐食した RC 梁部材の残存曲げ耐力に及ぼすせん断補強筋の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.727-732, 2006.
- 11) 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) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等 維持管理標準・同解説(構造物編) 基礎構造物・抗土圧構造物, 付属資料 8, 2007.
- 13) 社団法人日本土木工業協会: 実務者のためのコンクリート構造物の維持管理マニュアル, 2000.
- 14) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也: 棧橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1001, 2001.

- 1) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 塩害環境下におけ