



# 塩害劣化の不確定性を考慮したRC橋の耐荷力評価における安全係数のキャリブレーション

狩野, 裕之  
森川, 英典

---

(Citation)

神戸大学大学院工学研究科紀要, 1:36-42

(Issue Date)

2009

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81002720>



## 塩害劣化の不確定性を考慮したRC橋の耐荷力評価における 安全係数のキャリブレーション

狩野 裕之<sup>1\*</sup>・森川 英典<sup>1</sup>

<sup>1</sup>工学研究科市民工学専攻

(受付:October 13, 2009 受理:January 18, 2010 公開:January 21, 2010)

キーワード: 塩害, 不確定性, 安全係数, 曲げ耐力, セン断耐力

塩害により劣化したRC橋の主桁の断面耐力について, 劣化要因の不確定性を確率変数とする統計的手法によることなく, 既往の確定論的手法により簡便にかつ安全側の評価を行うことを目的として, 劣化要因の不確定性を既往の設計計算手法に考慮するための安全係数について検討した。実橋3橋の現場試験に基づき塩害による劣化要因の不確定性を考慮した信頼性解析結果と, 既往の設計計算手法により得られた断面耐力との比較により, 計算手法の違いによる影響および塩害による鉄筋腐食の影響に対する安全係数を提案し, 現実的な評価値として信頼性解析における95%非超過確率値に対するキャリブレーションを行った。鉄筋腐食を考慮する安全係数は鉄筋腐食の進行に伴う不確定性の増加が曲げ耐力に与える影響を考慮するため, 腐食の状態をパラメータとした関数とした。また, 計算値と実構造物の断面耐力のばらつきを考慮する安全係数を提案し, 複数の実橋の桁に対して実施された破壊試験結果と計算値との比較を行った既往の研究を参考に設定した値を例示した。既往の設計計算手法に本研究で設定した塩害劣化による不確定性を考慮した安全係数を適用することで断面耐力を安全側に評価できた。

### 緒 言

島国である我が国においては, 海岸付近に多くのコンクリート構造物が存在し, 塩害による劣化はかねてから社会問題となっている。日本海沿岸の厳しい塩害環境下のみならず, 比較的緩やかな環境である内海に位置する橋梁においても, 近年, 経年的な塩害による劣化が顕在化しており, 例えば沿岸部に位置する架設年の古い中小規模のRC橋では, 点検により, かぶりのはく落, 露出した鉄筋の腐食や断面欠損が確認されることも多い。橋梁の維持管理はこれまでの事後保全的な維持管理から予防保全型への移行が促されており, 今後の日常的な維持管理の中で, このような橋梁はますます増加することが予想されることから, 合理的な性能評価手法の早急な構築が望まれる。

塩害により劣化した橋梁の部材の耐荷力や構造物の安全性を検討する場合には, 局部的な鉄筋腐食などに特徴づけられる劣化要因の不確定性を考慮する必要がある。著者らはこれまで塩害劣化RC橋について, 材料強度, 環境条件等の劣化要因の不確定性を考慮した曲げ破壊に対する安全性評価手法, およびせん断破壊に対する安全性評価手法の検討を行っている<sup>1), 2)</sup>。

これらの検討では, まず, 劣化要因の不確定性を考慮した鉄筋腐食の劣化予測を行い, 得られた劣化予測曲線は現場試験実施時点の鉄筋の腐食速度による補正を行う。劣化予測結果に基づき, 断面力については鉄筋腐食による断面剛性の低下を考慮した格子モデル, 耐荷力については腐食による鉄筋の力学特性の低下や付着性能の低下を考慮した有限要素モデルによる信頼性解析を実施し, 時間軸を考慮した安全性評価を行っている。

しかし, 実務において対象構造物の安全性を評価する場合, その都度, 確率変数を設定して信頼性解析を行うことは非常に煩雑な作業を伴う。このため, このような統計的手法によることなく, 劣化要因の不確定性を安全係数として考慮し, 従来の確定論的手法により簡便に安全性の評価を行うことは合理的な維持管理の観点から有用であると考えられる。

このような背景から, 本研究は塩害で劣化した構造物の耐荷力に着目し, 既往の設計計算手法により耐荷力を評価する場合に考慮する劣化要因の不確定性を考慮した安全係数について検討を行ったものである。

### 1. 検討手順

本研究では, 既往の設計計算手法に考慮すべき安全係数の設定およびキャリブレーションを既報の実橋における現場試験に基づく劣化要因の不確定性を考慮した信頼性解析結果<sup>1), 2)</sup>との比較により行った。Figure 1に検討手順を示す。

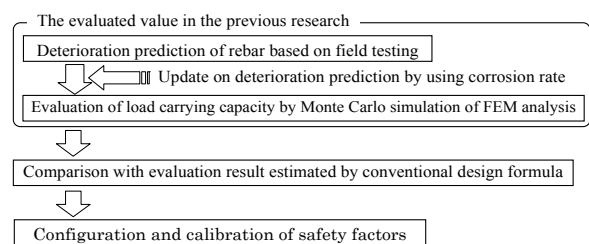


Fig. 1 Flowchart of this research

Table 1 Specification of target bridges

Name	Bridge type	Bridge length (Span length)	Number of span	Width	Constructed year	Design load	Investigated age	Structural specification		Distance from coast
								Number of girder	Number of cross beam	
Bridge I	RC-T Girder	11.10m (-)	1	5.50m	1959	TL-14	45	3	3	50m
Bridge S	RC-T Girder	35.18m (11.1m: Span 1)	3	6.95m	1954	T-9	50	4	3	700m
Bridge M	RC-T Girder	10.6m (-)	1	6.50m	1962	T-20	44	4	3	15m

## 2. 現場試験結果を考慮した塩害劣化RC-T桁の耐力評価

上述のように、塩害により劣化したRC-T桁の信頼性解析による曲げ耐力、せん断耐力は既報の評価結果を用いたことから、ここでは概要のみを示す。

### 2. 1 対象橋梁の概要

対象橋梁3橋(I橋, S橋, M橋)の諸元等をTable 1に示す。いずれも1950年～1960年代に建設されたRC-T桁橋であり、塩害に起因するひび割れや一部かぶりに離れが見られたため、外観調査、鉄筋腐食モニタリング、超音波伝播速度、詳細ひび割れ調査などの現場試験が行われた。ただし、S橋については3スパンのうち1スパンのみを対象とした。

### 2. 2 現場試験結果に基づく劣化予測

鉄筋腐食の劣化予測はFigure 2に示すように最外縁の鉄筋を対象としたモンテカルロ法により行った。Figure 3は得られる劣化曲線の概念である。変動条件は施工誤差や環境条件によるパラメータの空間的なばらつきを考慮するため、現場試験結果等を参考にTable 2のように設定した。ただし、表面塩化物量の標準偏差はコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に示される安全係数1.3により95%の信頼性が確保されるばらつきを仮定し、初期含有塩化物量は空間的なばらつきは少ないと考え、確定値とした。なお、かぶり、表面塩化物量、拡散係数は対数正規分布で仮定した。

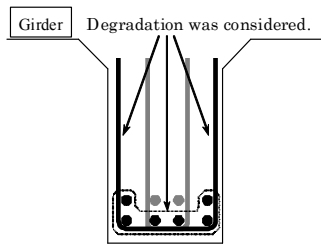


Fig. 2 Target rebar in deterioration prediction

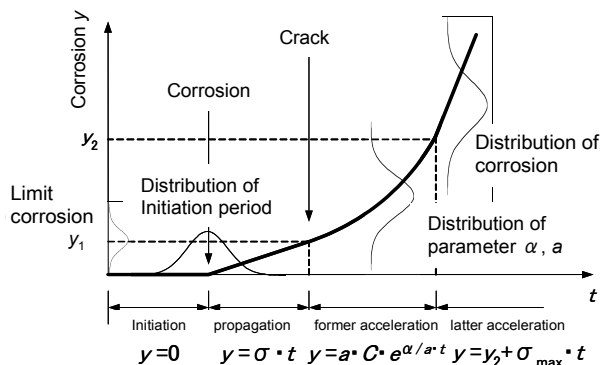


Fig. 3 Conceptual figure of deterioration prediction

Table 2 Deterioration factors

Bridge			I			S		M				
Girder			A	B	C	A	B	C	A	B	C	D
Main rebar	Diameter [mm]		10 ϕ 28			8 ϕ 28		10 ϕ 28				
	Cover [mm]	mean	49			57		90				
		SD	7.9			7.9		7.9				
Stirrup	Diameter [mm]		4 ϕ 12			4 ϕ 8		4 ϕ 9				
	Cover [mm]	mean	30			20		15	25			
		SD	9.3			9.3		9.3				
Chloride ion content on concrete surface [kg/m <sup>3</sup> ]			mean	8.7	12.4	10.5	1.1	10.0	3.14	3.95	3.93	
			SD	1.4			0.8	1.14				
Apparent diffusion coefficient [cm <sup>2</sup> /year]			mean	0.23	0.10	0.16	6.97	5.13	2.20	2.81	3.03	
			SD	0.06	0.03	0.04	1.16	1.10				
Initial chloride ion content in concrete [kg/m <sup>3</sup> ]			mean	0.75			0.63		0.02			
			SD	—			—		—			

#### 2.2.1 劣化予測手法

潜伏期の予測はFickの第2法則により、コンクリート中の鋼材位置における塩分量が腐食発生限界濃度  $C_{lim}=1.2 \text{ kg/m}^3$ <sup>3)</sup> になる時点とした。

進展期は鉄筋腐食の開始からひび割れが発生するまでの期間であるが、本研究では加速期との連続性を考慮し、進展期の腐食速度は加速期初期の腐食速度と仮定した。このとき、進展期の予測に必要なパラメータとなるひび割れ発生限界腐食量は既往の文献<sup>4)</sup>を参考にEq. (1)に示す森永式を用いた。

$$y_1 = 1.204 \times \left(1 + \frac{2d}{\phi}\right)^{0.85} \times \frac{\phi}{2} \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここに、 $y_1$ : ひび割れ発生限界腐食量[ $\text{mg/mm}^2$ ],  $d$ : かぶり[mm],  $\phi$ : 鉄筋径[mm]

加速期以降は鉄筋の腐食量に着目した劣化予測を行った。腐食量はFigure 4に示す関係<sup>5)</sup>より次式で表すことができる。

$$y = a \cdot C \cdot \exp\left(\frac{a}{a'} \cdot t\right) \quad (2)$$

$$a = 0.354 \cdot \exp(0.1498 \cdot d/\phi), \quad a' = 54.82 \cdot d - 1.17$$

ここで、 $y$ : 単位面積あたりの腐食量[ $\text{mg/mm}^2$ ],

$a = 0.354 \cdot \exp(0.1498 \cdot d/\phi)$ ,  $C$ : 腐食開始直後のひび割れ幅[mm],  $a' = 54.82 \cdot d - 1.17$

鉄筋表面での一様腐食を仮定し、RC部材の性能評価に適用するために、劣化予測で推定された腐食量をEq. (3)により腐食減量率 $\Delta w$ に変換した。

$$\Delta w = \frac{y \pi \phi}{\frac{1}{4} \pi \phi^2 \gamma_r} = \frac{4y}{\phi \gamma_r} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta w$ : 鉄筋の腐食減少率,  $\gamma_r$ : 鉄筋の単位体積質量[ $\text{mg/mm}^3$ ]

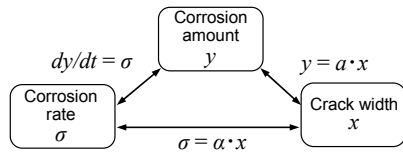


Fig. 4 Model of corrosion deterioration

### 2.2.2 腐食速度を用いた劣化予測曲線の修正

劣化予測は安全側の評価を与える必要があるが、合理的な維持管理の観点からは最新の情報（点検結果等）により逐次修正されるべきである。本来は信頼性の低い劣化評価パラメータを直接修正することが望ましい。しかし、今回、不確定性を考慮したパラメータが非常に多く、修正すべきものの特定が現状では困難なため、鉄筋腐食モニタリングから得られた分極抵抗値より点検時点での腐食速度を推定し、幾何的に劣化予測曲線を修正した。鉄筋腐食モニタリングから得られた係数 $\eta$ に基づく、劣化曲線の修正の概念をFigure 5に示す。

### 2.3 耐力解析

劣化予測より推定した腐食減量率を用いて各橋梁各桁の耐力力の低下をFEM解析のモンテカルロシミュレーションにより推定した。解析諸元をTable 3、解析モデルをFigure 6に示す。コンクリート要素は平面応力要素、鉄筋は線要素とし、コンクリート要素と鉄筋要素の接触接点には付着を考慮したバネ要素を導入し、鉄筋腐食による付着剛性の低下をEq. (4)で与えた<sup>6)</sup>。

$$\begin{cases} k = 1.0 & (0 \leq \Delta w < 0.0068) \\ k = \frac{0.5351 \times 11620 (\Delta w + 1.317)^{-1.014} + 166.55}{3245.5} & (0.0068 \leq \Delta w) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 $k$ : 付着剛性残存率

コンクリート要素は圧縮側の応力ひずみ関係をコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に準じトリリニア型でモデル化し、引張側は引張限界ひずみまでを弾性範囲とし、引張限界ひずみ以降は引張軟化を考慮した。また鉄筋要素は完全弾塑性型でモデル化し、付着バネ要素は鉄筋の引抜試験結果をもとにトリリニア型でモデル化した。載荷方法は、曲げについては支間長の全長に、せん断については主桁に最も不利な応力が生じるように支間長の3/4の区間に等分布荷重を載荷した。なお、せん断については曲げ破壊を防止するため、主鉄筋の降伏強度を増加させ、曲げ圧縮部のコンクリート要素の圧縮強度を増加させた。腐食した鉄筋の力学的性質の低下は以下の関係式<sup>7)</sup>を用いた。

$$E' = (1 - 1.13 \cdot \Delta w) \cdot E \quad (5)$$

$$f' = (1 - 1.98 \cdot \Delta w) \cdot f \quad (6)$$

ここに、 $E'$ : 腐食後の鉄筋弾性係数、 $E$ : 健全時の鉄筋弾性係数、 $f'$ : 腐食後の鉄筋降伏強度、 $f$ : 健全時の鉄筋降伏強度

鉄筋腐食の劣化予測に基づく腐食減量率および耐力力の経年的な低下の解析結果をFigure 7に示す。ただし、外挿データの適用を避けるため、鉄筋腐食減量率の5%超過確率値が35%<sup>7)</sup>以下（超過確率5%として $\Delta w$ の平均値+1.645 $\sigma_{\Delta w}$ が35%以下）となる範囲のデータのみ示している。

Figure 7より、塩害による経年的な鉄筋腐食の進行に伴い、3橋の耐力力は低下している。曲げ耐力については健全時（0年）

から鉄筋の腐食が比較的軽微な範囲では平均値（白黒実線）とその標準偏差 $\sigma_R$ に対する95%非超過確率値（平均値から-1.645 $\sigma_R$ 安全側の値）（白黒破線）との差はほとんど見られない。これは健全時の鉄筋の力学特性にはばらつきを考慮していないこと、対象とした3橋のコンクリート強度のばらつきの範囲では曲げ耐力にほとんど影響を与えないことによると考えられる。一方、せん断耐力については平均値と95%非超過確率値には概ねコンクリートの圧縮強度のばらつきに応じた差異が見られる。

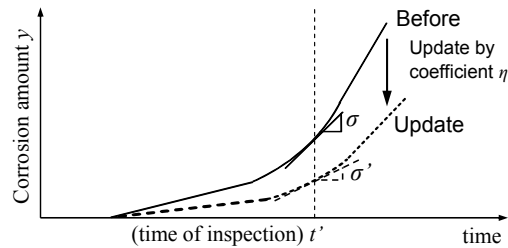

Fig. 5 Update of prediction by using  $\eta$ 

Table 3 Analytical Parameters

Bridge			I	S	M
Concrete element	Compressive strength [N/mm <sup>2</sup> ]	mean	50.0	12.6	28.2
		SD	4.5	2.2	5.1
	Tensile strength [N/mm <sup>2</sup> ]	mean	3.1	1.2	2.1
		SD	following distribution of compressive strength		
	Elastic modulus [kN/mm <sup>2</sup> ]	mean	33.2	18.2	27.0
		SD	same as above		
	Tensile strain limit [ $\mu$ ]	mean	94	115	79
SD		same as above			
Rebar element	Yield strength [N/mm <sup>2</sup> ]	295			
	Elastic modulus [kN/mm <sup>2</sup> ]	200			
	Yield strain [ $\mu$ ]	1475			
	Tensile rebar	10 $\phi$ 28	8 $\phi$ 28	10 $\phi$ 28	
	Stirrup	4 $\phi$ 12	4 $\phi$ 8	4 $\phi$ 9	
	Compressive rebar	14 $\phi$ 13	16 $\phi$ 13	16 $\phi$ 13	

## 3. 既往の設計計算手法による断面耐力との比較

### 3.1 既往設計計算式による断面耐力の算定

既往の設計計算手法による断面耐力の算定はコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に準じた。既設構造物の断面耐力の評価は現場試験から得られる情報により行うことを想定し、Table 2から得られる確率分布に基づきコンクリートの圧縮強度の特性値を設定した。腐食した鉄筋については、劣化予測結果より得られる腐食減量率 $\Delta w$ の確率分布から特性値を求め、Eq. (6)によりみかけの降伏強度を与えることで考慮した。ただし、信頼性解析結果との比較検討を行うため、新設構造物の断面耐力算定の際に考慮される、材料係数、部材係数は考慮していない。Figure 7に算定結果（色付き実線）を示す。

既往の設計計算手法と信頼性解析における95%非超過確率値（平均値-1.645 $\sigma_R$ ）を比較すると、曲げ耐力については既往の設計計算手法による算定値の方がやや低く、逆にせん断耐力についてはやや高めとなっている。健全時（0年）における差の程度はTable 4に示すように曲げ耐力で0.97～0.88（3～12%）、せん断耐力で1.05～1.15（5～15%）であった。

### 3.2 信頼性解析結果との比較

鉄筋腐食が進行した場合の既往の設計計算手法と信頼性解析における95%非超過確率値の断面耐力を比較するため、Table 4に示される健全時の比で既往の設計計算式による算定結果を除

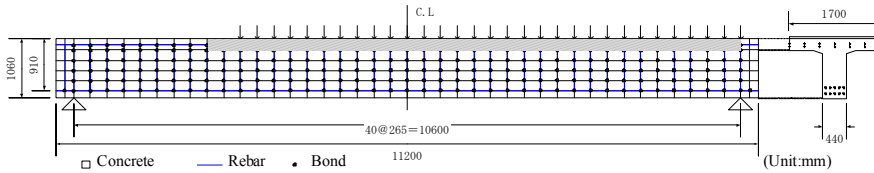
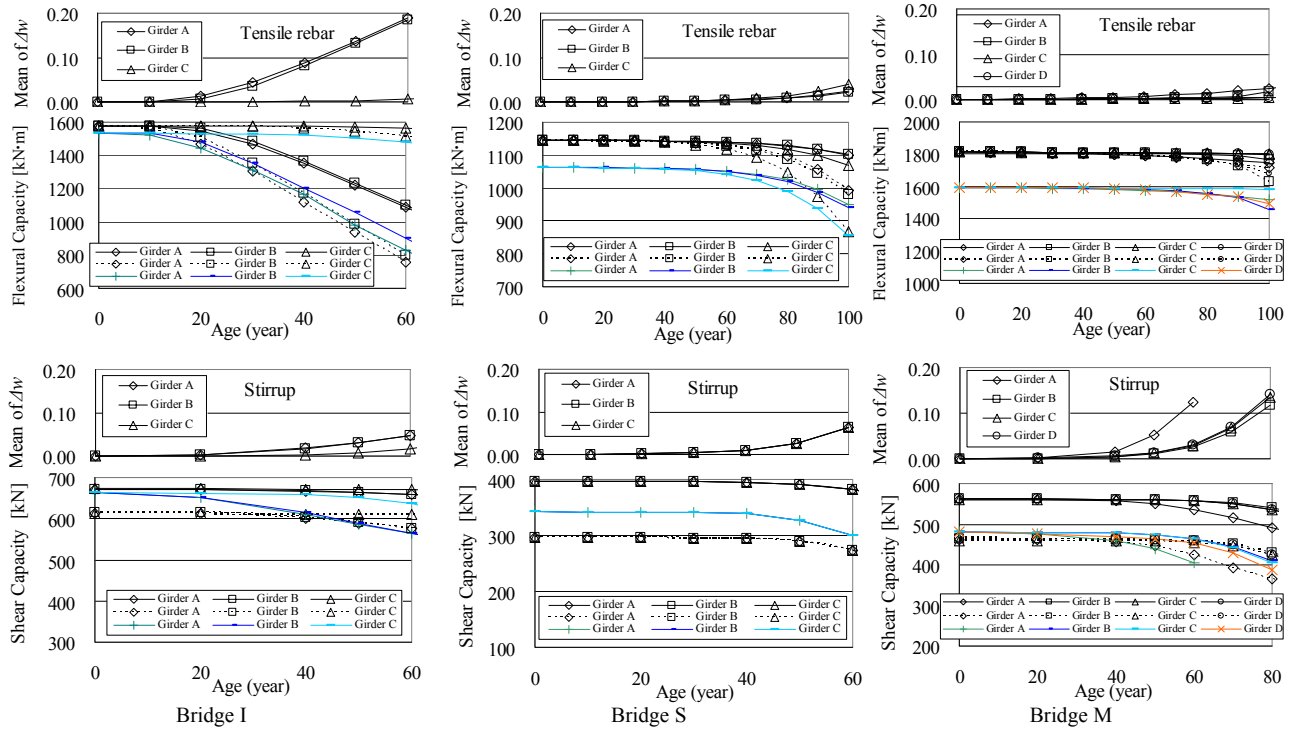


Fig. 6 An example of FEM model for shear capacity

Table 4 Ratio of initial values according to Figure 7

	Bridge I	Bridge S	Bridge M
Flexural capacity	0.97	0.93	0.88
Shear capacity	1.08	1.15	1.05



Note: The full line indicates mean by reliability analysis, the dashed line indicates 95% non-exceedance probability value, and the colored line indicates estimation by conventional calculation formula.

Fig. 7 Degradation of load carrying capacity (Upper; Flexural capacity, Lower; Shear capacity)

して補正したものを Figure 8 に示す。

曲げ耐力の算定結果は鉄筋腐食の進行に伴い、どの橋梁も既往の設計計算手法による算定結果より信頼性解析における 95% 非超過確率値の方が低くなった。これは、FEM による信頼性解析では腐食減量率の増加に伴う鉄筋の付着性能の低下を考慮しているため、主にその影響によるものと考えられる。すなわち、塩害で劣化した RC-T 桁の曲げ耐力を既往の設計計算手法により評価する場合、劣化の程度に応じて適切な安全係数を考慮する必要があることを示唆している。

一方で、せん断耐力の算定結果はどの橋梁も既往の設計計算手法による算定結果の方が低くなっている。これは、スターラップの腐食した RC-T 桁のせん断耐力を既往の設計計算手法であるトラス理論により評価する場合、今回の検討条件および対象とした腐食減量率の範囲ではスターラップの腐食による付着性能の低下の影響を考慮した信頼性解析よりも概ね安全側の評価を与えるものと考えられる。

#### 4. 不確定性を考慮した安全係数の検討

既往の設計計算手法により、塩害劣化による不確定性を考慮

した RC-T 桁の曲げ、せん断に対する断面耐力を評価するための安全係数について、3 章での考察に基づき検討した。塩害劣化による不確定性を安全係数として考慮した断面耐力を Eq. (7) のように定義し、信頼性解析における 95% 非超過確率値を現実的な評価値としてキャリブレーションを行った。

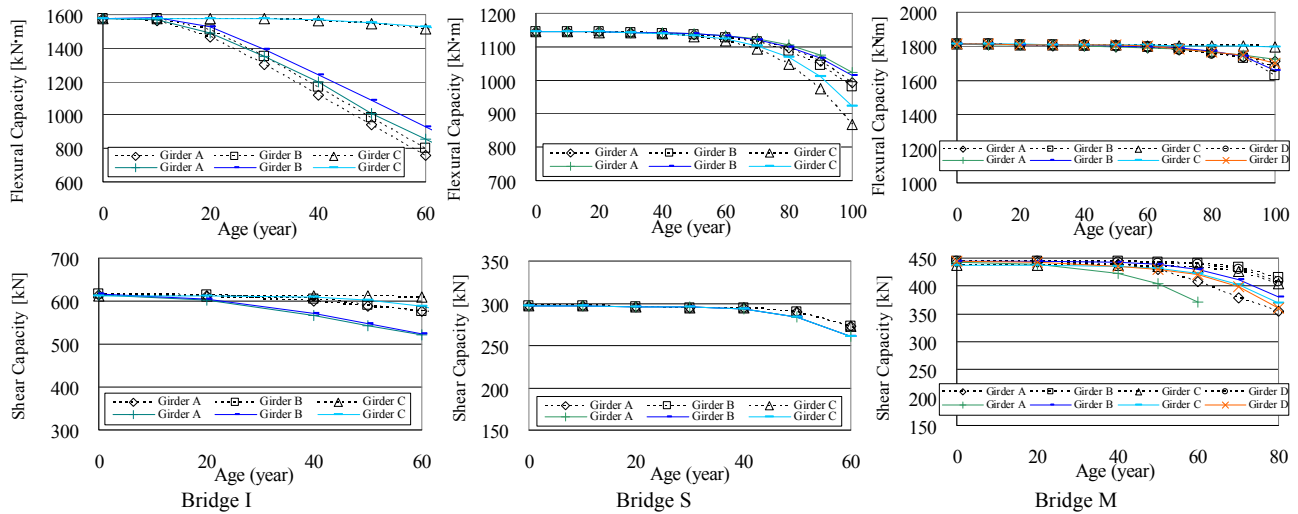
$$R_{\text{deg}} = \frac{R(f_k)}{\Gamma(X)} = \frac{R(f_k)}{\gamma_1(x_1) \cdot \gamma_2(x_2) \cdot \gamma_3(x_3)} \quad (7)$$

ここに、 $R_{\text{deg}}$ : 塩害劣化による不確定性を考慮した断面耐力、 $R(f_k)$ : 既往の設計計算式による断面耐力、 $f_k$ : 材料強度の特性値、 $\Gamma(X)$ : 塩害劣化による不確定性を考慮した安全係数、 $\gamma_1(x_1)$ : 計算手法の違いを考慮する安全係数、 $\gamma_2(x_2)$ : 鉄筋腐食の影響を考慮する安全係数、 $\gamma_3(x_3)$ : 計算値と構造物の実際の断面耐力との不確定性を考慮する安全係数、 $X, x_1, x_2, x_3$ : 変数

##### 4.1 計算手法の違いによる影響を考慮する安全係数

既往の設計計算手法および信頼性解析による断面耐力算定結果はその初期値（健全時）に Table 4 に示す若干の相違が見られた。初期値には塩害劣化による不確定性は含まれていないため、両者の相違とそのばらつきは主に計算手法の違いによるものと





Note: The dashed line indicates 95% non-exceedance probability value by reliability analysis and the colored line indicates adjusted estimation by conventional calculation.

Fig. 8 Adjusted result of load carrying capacity (Upper; Flexural capacity, Lower; Shear capacity)

考え、計算手法の違いによる影響を考慮する安全係数として  $\gamma_1(x_1)$  を定義した。ただし、 $\gamma_1$  は本来、コンクリート強度や断面寸法等の断面諸元の不確実性が計算手法に及ぼす影響に応じた確率量として取り扱うべきものと考えられる。しかし、現状では確率量としての取り扱いを検討するだけの十分なデータが得られていないため、Table 4 に基づき、曲げについては 1.0、せん断については 3 橋のうち最も安全側の評価となる 1.15 を用いた。

#### 4.2 塩害による鉄筋腐食の影響を考慮する安全係数

鉄筋腐食が進行した場合の既往の設計計算手法による曲げ耐力の算定結果は、信頼性解析より高く評価されたため、その影響を考慮する安全係数として  $\gamma_2(x_2)$  を定義した。Figure 8 より、鉄筋腐食の進行に応じた影響度を考慮するため、 $\gamma_2$  はその影響要因の関数として定義する必要がある。ここでは、鉄筋腐食減量率の平均値  $\Delta w$ 、その標準偏差  $\sigma_{\Delta w}$ 、引張鉄筋全体に占める腐食鉄筋の割合  $r_{\text{corr}}$  を影響要因として、Figure 8 の既往の設計計算手法による算定結果と信頼性解析における 95% 非超過確率値 (平均値  $-1.645\sigma_R$ ) の比が 1.0 以上のデータ (安全側に補正が必要なデータ) について回帰分析を行った。Figure 9 に示すように指数関数との高い相関が見られたが、データ数が十分とはいえないことや安全側の評価を与える観点から、Eq. (8) に示すような縦軸切片を 1.0 とした全てのデータを包含する 1 次関数を定義した。

$$\gamma_2(x_2) = 14.21 \cdot x_2 + 1 \quad (8)$$

$$x_2 = \Delta w \cdot \sigma_{\Delta w} \cdot r_{\text{corr}} \quad (\Delta w + 1.645 \cdot \sigma_{\Delta w} \leq 0.35)$$

一方、せん断耐力の算定結果は、いずれの橋についても既往の設計計算手法による算定結果は安全側の評価となっていることから、1.0 とした。

#### 4.3 計算値と構造物の実際の断面耐力との不確実性を考慮する安全係数

実際の構造物の耐荷力は上述した要因の他にも種々の不確実性によりばらつきが生じる可能性がある。そこで、そのような不確実性を考慮する安全係数として  $\gamma_3(x_3)$  を定義した。 $\gamma_3$  についても  $\gamma_1$  と同じく、断面諸元等に依存した確率量として取り扱うべきものと考えられるが、現状では十分なデータが得られていないとはいえない。

一例として、顕著な劣化を生じていない複数の実橋の桁に対して実施された破壊試験による断面耐力と計算値との比較を行った既往の研究<sup>8)</sup>では、特異な破壊形態を示したケースを除いた両者の比率の分布について、その変動係数は曲げ 11.3%、せん断 7% である。この不確実性を 95% 非超過確率に相当する安全係数に換算すると曲げ 1.2、せん断 1.1 となる。

しかし、塩害による劣化の影響が顕著となった場合、両者の比率は変化することが考えられる。その検証として、顕著な塩害劣化の生じた実橋あるいは大型供試体による破壊試験結果を統計的に整理することが今後の課題である。

本研究ではこの影響を無視して上述の安全係数を用いることとした。

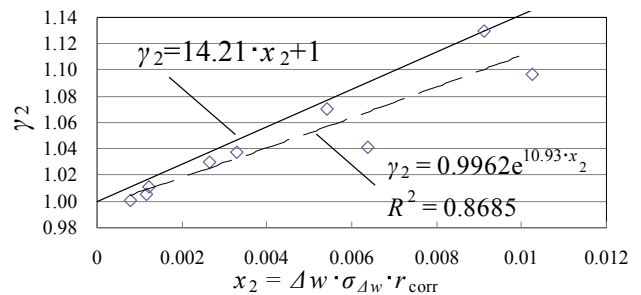
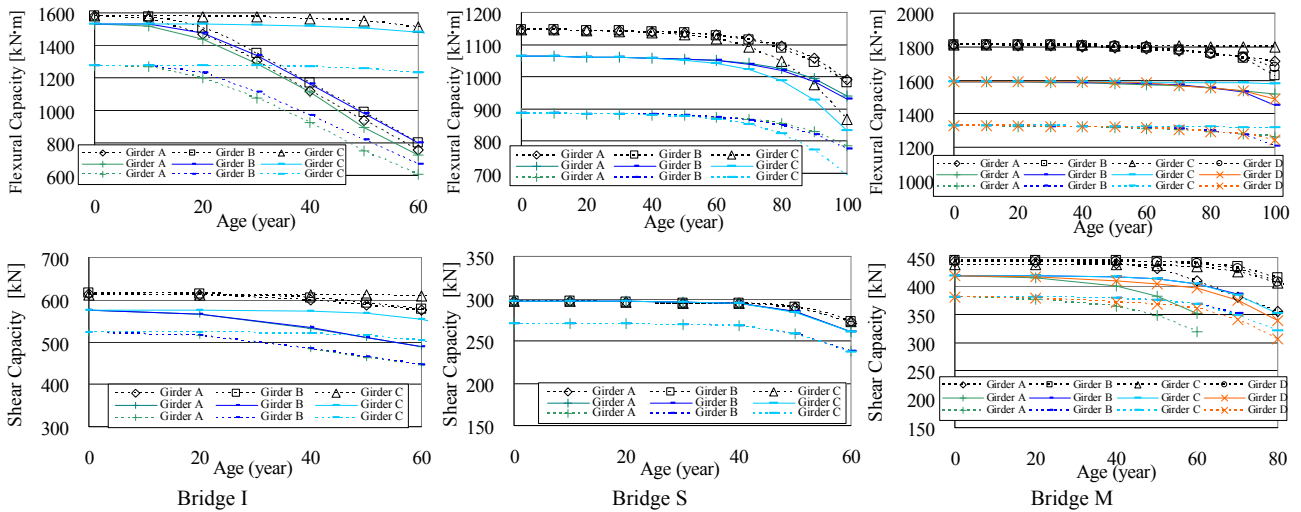


Fig. 9 Regression analysis result of  $\gamma_2$

#### 4.4 安全係数を適用した断面耐力の算定結果

上述の検討により設定した安全係数の一覧を Table 5 に示す。また、Table 5 の安全係数を Eq. (7) に適用した結果を Figure 10 に示す。既往の設計計算手法に安全係数  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  を適用 (色付き実線) することで、信頼性解析における 95% 非超過確率値より概ね安全側の断面耐力を与えるものとなっている。また、 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  に加え、 $\gamma_3$  を適用 (色付き破線) することでさらに安全側の評価を与えることができる。



**Note:** The dashed line indicates 95% non-exceedance probability value by reliability analysis, the colored full line indicates estimation by conventional calculation in consideration of  $\gamma_1$  and  $\gamma_2$ , and the colored dashed line indicates estimation by conventional calculation in consideration of  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  and  $\gamma_3$

**Fig. 10** The application result of safety factor (Upper; Flexural capacity, Lower; Shear capacity)

**Table 5** Calibrated safety factor

	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
Flexural capacity	1.0	According to Equation 8	1.2
Shear capacity	1.15	1.0	1.1

## 結 言

本研究では塩害により劣化した RC-T 桁の断面耐力を既往の設計計算手法により簡便に評価するため、劣化要因の不確定性を考慮した安全係数について検討した。

既設構造物に劣化が生じた場合の評価においては、定量的な評価法や劣化予測の精度、材料特性のばらつきや劣化範囲の分布、試験データの不足などによる不確定性の取り扱いが問題となる。このため、これらの不確定性を統計的手法により評価した実橋3橋における現場試験に基づく信頼性解析結果と既往の計算手法による断面耐力とを比較することにより、3種類の要因に対する安全係数の提案およびキャリブレーションを行った。

ただし、本研究でキャリブレーションを行った安全係数は、支間長10m程度のRC-T桁橋を対象としたものであり、コンクリートの圧縮強度については実橋での調査結果、腐食した鉄筋の性能低下については既往の研究<sup>7)</sup>により設定している。その範囲は、コンクリート圧縮強度の平均値が12.6～50.0N/mm<sup>2</sup>、鉄筋の腐食減量率は35%以下である。このため、この範囲を超える著しい劣化を生じたものについては本研究で提案した安全係数を適用することはできないことに留意する必要がある。

しかし、現状の知見に基づき本研究で設定した上述の条件の範囲では、塩害により劣化したRC-T桁の断面耐力は既往の設計計算手法に提案した安全係数を適用することにより、簡便にかつ現実的な安全側の評価を与えるものと考えられる。

また、劣化した既設構造物における種々の不確定性がさらに詳細に評価できるようになれば、より精度の高い統計的手法とのキャリブレーションが可能となり、さらに現実的な安全係数を設定することができると考えられる。今後の研究の進展が期待される。

## Literature Cited

- 1) Kojima, D., Morikawa, H., Okamoto, S. and Kishi, S., "Safety Evaluation of RC Bridges with Chloride Induced Deterioration Based on Field Testing" (in Japanese), Proceedings of the JCI, Vol.27, No.2, 1579-1584 (2005)
- 2) Kano, H. and Morikawa, H., "Assessment and Characteristic Analysis of Safety for Shear Failure on Deteriorated RC Bridges Due to Chloride Attack Based on Field Testing", Proceedings of the 10th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp.3061-3068 (2009)
- 3) Japan Society of Civil Engineers, "Standard Specifications for Concrete Structures 2002 (Structural Performance Verification)", (2002)
- 4) Kobayashi, T., Yonezawa, T. & Shitto, K., "Diagnosis on Rebar Corrosion" (in Japanese), 161, Tokyo: Morikita Publishing, (1993)
- 5) Japan Concrete Institute, "Report of the Committee on Rehabilitation of Concrete Structures" (in Japanese), (1998)
- 6) Morita, Y., Morikawa, H. and Kobayashi, H., "Performance Evaluation Methodology in Consideration of Seasonal Variations and Degradation of Rebar in Concrete Member" (in Japanese), Proceedings of the JCI, Vol.24, No.2, 1519-1524 (2002)
- 7) Lee, H. S., Tomosawa, F., Noguchi, T. and Kage, T., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam Damaged by Rebar Corrosion" (in Japanese), Proceedings of the JCI, Vol.19, No.1, 1147-1152 (1997)
- 8) Miyamoto, A., Morikawa, H. and Ishida, M., "Structural Safety Evaluation of Concrete Bridges Based on Uncertainty Analysis Using Statistical Data" (in Japanese), Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.472/V-20, 49-58 (1993)

## **Calibration of Safety Factor for Evaluation of Load Carrying Capacity in Consideration of Uncertainty on Deteriorated RC Bridges due to Chloride Attack**

Hiroyuki KANO<sup>1\*</sup> and Hidenori MORIKAWA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Graduate School of Engineering, Department of Civil Engineering*

**Key words:** Chloride Attack, Uncertainty, Safety Factor, Flexural Capacity, Shear Capacity

This paper proposed new safety factors in consideration of uncertainty on deteriorated RC bridges due to chloride attack in order to apply to conventional calculation method. That is intended to evaluate conservatively by conventional deterministic method without evaluating by statistical method in consideration of uncertainties of deterioration factors as probability variables. Two safety factors, safety factor for discrepancy of calculating method and safety factor for corrosion of rebar, were proposed as a result of comparison between the capacity obtained by reliability analysis in consideration of uncertainties of deterioration factors and the capacity of cross section obtained by conventional calculation method. Then, the calibration to 95% non-exceedance probability value in the reliability analysis as a realistic evaluation value was carried out. However, the safety factor for corrosion of rebar was defined as the function of which the parameters were given by corrosion state, in order to consider the influence that an increase of uncertainty according to degradation of rebar gave to the flexural capacity. Moreover, the safety factor to consider variation in load carrying capacity of actual structure was proposed. And then, an example was set by referring to the previous research that compared between the destructive test result executed to the girders on a number of existing bridges and the calculation result. The capacity of cross section was evaluated conservatively by applying the proposed safety factors to the conventional calculation method.