

### 3. 健全度（劣化）予測：BMS本体機能

#### 3. 1 コンクリートの塩害の劣化予測

##### 3. 1. 1 健全度

塩害の健全度ランクは、土木学会「2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]」<sup>1)</sup>に示される塩害による劣化過程毎に、表-3.1.1に示すとおりに設定した。劣化過程の定義を、表-3.1.2に示す。

劣化予測に用いる定量的な値は、コンクリートに損傷が現れる前の「潜伏期～進展期」とコンクリートに変状が発生する「加速期～劣化期」の2つの期間に分けて設定した。

- ・潜伏期～進展期：「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）H16年3月」<sup>2)</sup>（以下「塩害特定点検」という。）を参考に、塩化物イオン濃度とした。
- ・加速期～劣化期：総プロ「塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）」<sup>3)</sup>における外観調査、はつり調査による鋼材腐食の損傷状況と損傷写真を参考に、鋼材の体積減少率とした。

表-3.1.2 劣化過程の定義<sup>1)</sup>

劣化過程	定 義
潜伏期	鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひびわれ発生までの期間
加速期	腐食ひびわれ発生により腐食速度が増大する期間
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間

表-3.1.1 塩害に対する健全度ランク

劣化過程	塩害特定 点検 判定区分	健全度 ランク	定量的な値による評価	劣化状態
潜伏期	A	I	塩化物イオン濃度微量*)	腐食ひび割れ無し
		II	塩化物イオン濃度 < 1.2 kg/m <sup>3</sup> 10年以内に 1.2kg/m <sup>3</sup> 以上 にならないと予測される	腐食ひび割れ無し
	B	III	塩化物イオン濃度 < 1.2 kg/m <sup>3</sup> 10年以内に 1.2kg/m <sup>3</sup> 以上 になると予測される	腐食ひび割れ無し
進展期	C	IV	塩化物イオン濃度 ≥ 1.2kg/m <sup>3</sup>	腐食ひび割れ無し
鋼材の体積減少率 < 0.05			腐食ひび割れ発生 錆汁が見られる	
0.05 ≤ 鋼材の体積減少率 < 0.2**)			腐食ひび割れ多数発生 錆汁が見られる 部分的～連続的な剥離・鉄筋 露出が見られる 鉄筋腐食が広範囲に見られる PC 鋼線の腐食・破断が見られ る	
0.2 ≤ 鋼材の体積減少率			腐食ひび割れ多数発生 ひび割れ幅が大きい 錆汁が見られる 剥離・鉄筋露出が全域にわた り見られる 鉄筋断面の有意な減少が全域 にわたり見られる PC 鋼線の破断が全域にわた り見られる	
加速期 ～ 劣化期		V		

注 \*) 下部構造の塩化物イオン試験の結果、上部構造のかぶりの代表値に相当する深さの試料で全塩化物イオン量の含有量が 1.0kg/m<sup>3</sup> に達しておらず、上部構造でもすぐに塩害劣化は生じないと判断できる場合を意味する。

\*\* ) 鋼材の体積減少率が 0.2 (20%) に達した時点を耐久性上の限界、劣化期の終点と考えることとした。<sup>9)</sup>

### 3. 1. 2 劣化予測モデル

コンクリート部材の塩害に対する健全度は、統計分析を用いるまでのデータが揃っていないこともあり、塩害特定点検における予防保全的な考え方に準じて、理論式を用いて各劣化過程の経過年により予測するものとする。

#### (1) 潜伏期の予測

潜伏期の予測は、塩化物イオンの拡散予測式により、コンクリートの塩害による鉄筋腐食発生時期を鋼材位置における塩化物イオン濃度から求めるものとする。塩化物イオンの拡散予測式は、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>を基本とし、鋼材の発錆限界値は、全塩化物イオン量  $1.2\text{kg/m}^3$  とする。

潜伏期の予測において必要なデータ及びデータの設定方法を、表-3.1.3 に示す。ここで、特定点検結果が無い場合のコンクリート表面における塩化物イオン濃度については、全国の飛来塩分量の調査結果に基づいて検討された土木研究所の共同研究報告書<sup>4)</sup>を用いて設定する。

以下に、塩化物イオンの拡散方程式（フィックの第2法則）<sup>1) 4) 5)</sup>を示す。

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) + C(x,0)$$

ここに、 $C(x,0)$ ：初期含有塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

塩害特定点検により塩化物イオン試験を実施した場合は、塩化物イオン濃度分布より設定する。

塩害特定点検結果がない場合は、 $0.3\text{kg/m}^3$  とする。

$C_0$ ：表面における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

塩害特定点検により塩化物イオン試験を実施した場合は、塩化物イオン濃度分布より設定する。

塩害特定点検結果がない場合は、次式を用いて設定する。

$$C_0 = 1.2 \cdot C_{\text{air}}^{0.4}$$

$$C_{\text{air}} = C_1 \cdot d^{-0.6}$$

$C_1$ ：1km 換算飛来塩分量 ( $\text{mdd} \cdot \text{NaCl}$ )

地域区分	$C_1$
A	0.62(1.0)
B	0.92
C	0.34

注：地域区分 A において、台風の頻度が高いことを考慮して  $1\sigma$  を加えた値とする場合には、 $C_1$  は 1.0 を用いる。

$d$ ：海岸線からの距離(km)

ただし、海上や海岸線上で 0km の場合は  $0.001\text{km}$  とする。

$x$ ：コンクリート表面からの距離(cm)

$t$ ：供用開始からの時間 (年)

$D_c$ ：塩化物イオンの見かけの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )

塩害特定点検により塩化物イオン試験を実施した場合は、塩化物

イオン濃度分布より設定する。

塩害特定点検結果がない場合は、次式を用いて設定する。

$$\log D_c = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \text{ (普通ポルトランドセメント)}$$

$$\log D_c = -3.0(W/C)^2 + 5.4(W/C) - 2.2 \text{ (高炉セメント)}$$

W/C : 水セメント比(%)

表-3.1.3 コンクリート部材の塩害（潜伏期）における必要データの設定方法

必要項目	設定方法	データがない場合の対応方法
塩化物イオンの見かけの拡散係数	塩害特定点検による、塩化物イオン濃度分布計算	水セメント比：架設年、構造形式より設定（表-3.1.4、表-3.1.5 参照） セメント種類：MICH I より設定
コンクリート表面における塩化物イオン濃度	塩害特定点検による、表面塩化物イオン濃度の測定結果	海岸からの距離：MICH I の塩害地域距離又は塩害地域区分より設定
かぶり	塩害特定点検による、かぶりの調査結果	かぶり：架設年、構造形式、塩害対策区分より設定（表-3.1.4、表-3.1.5 参照）

表-3.1.4 上部工における必要データの設定方法（特定点検がない場合）

架設年	項目	塩害対策区分	構造形式				備考
			RC 桁	プレテン PC	ポストテン PC	床版	
1983年度以前	かぶり (cm)	—	3.5	2.5	3.5	3.0	道路橋示方書 S.53 <sup>8)</sup> より
	W/C(%)	—	55	35	40	55	ミナムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(II) <sup>4)</sup> より
1984年度以降	かぶり (cm)	I	7.0	5.0	7.0	5.0	道路橋の塩害対策指針(案) <sup>6)</sup> より
		II	5.0	3.5	5.0	4.0	
		III	3.5	2.5	3.5	3.0	
	W/C(%)	—	50	35	40	50	道路橋の塩害対策指針(案) <sup>6)</sup> 道路橋示方書 H.14 <sup>7)</sup> より

表-3.1.5 下部工における必要データの設定方法（特定点検がない場合）

架設年	項目	塩害対策区分	橋脚	橋台	備考
1983年度以前	かぶり (cm)	—	7.0	7.0	道路橋示方書 S.53 <sup>8)</sup> より
	W/C(%)	—	60	60	道路構造物の今後の管理・更新等のあり方委員会第3回資料より
1984年度以降	かぶり (cm)	I	7.0	7.0	道路橋の塩害対策指針(案) <sup>6)</sup> より
		II	7.0	7.0	
		III	7.0	7.0	
	W/C(%)	—	55	55	

## (2) 進展期の予測

進展期の期間を決定する主要因は、鋼材の腐食速度とコンクリートにひび割れが発生するときの腐食量である。このうち、鉄筋の腐食速度を決定する最も重要な要因は、鋼材表面への酸素供給量と考えられ、これを実構造物で定量的に評価することは極めて難しく、進展期の期間を予測することは困難とされている<sup>9)</sup>。また、既往の研究結果<sup>10)</sup>によれば、かぶり 5cm の場合、水セメント比に拘わらず腐食開始からひび割れ発生までの期間は5年以内と、進展期の期間は他の劣化期間に比べて非常に短期間であるとされている。

これらを踏まえ、本システムでは、進展期の期間をゼロと仮定し、鋼材腐食発生時点（鋼材位置での全塩化物イオン量が 1.2kg/m<sup>3</sup>に達した時点）から、加速期以降の腐食速度で劣化が進行するものとする。

## (3) 加速期、劣化期の予測

加速期及び劣化期は、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生した後の鋼材の腐食速度によって、その期間を予測する。腐食ひび割れ発生以降の鋼材腐食速度の予測式としては、以下の式が提案されている<sup>9)</sup>。

$$Vred = (4ac / (\Phi \times \gamma_{FE})) \times e^{(\alpha/a) \times t}$$

ここに、  
 $Vred$  : 体積減少率  
 $\gamma_{FE}$  : 鉄筋の単位体積質量 (mg/cm<sup>3</sup>) = 7,850  
 $a$  : 腐食量とひび割れ幅を関係付ける係数  
 $c$  : 腐食による初期ひび割れ幅 (cm)  
 $\Phi$  : 鉄筋径 (cm)  
 $\alpha$  : 腐食速度とひび割れ幅を関係付ける係数  
 $t$  : 鋼材位置での全塩化物イオン量が 1.2kg/m<sup>3</sup>に達してからの経過年数

この式を構成する係数については、塩害による損傷を受けた次の条件に該当する橋梁の調査結果をもとに回帰分析を行い、求めることとした。

- ・ 竣工後、塩害調査実施までの間に補修履歴がない
- ・ 竣工年度及び調査年度が既知である
- ・ 塩化物イオン濃度の測定結果がある
- ・ 塩害による損傷状況（外観状況及び鋼材の腐食状況）が把握されている
- ・ 帯鉄筋のかぶりが既知である

まず、腐食による初期ひび割れ幅を  $c=0.001\text{cm}$  と仮定し、上記の腐食ひび割れ発生以降の鋼材腐食速度の予測式を次のように変換する。

$$Vred = (4a \times 0.001 / (\Phi \times 7850)) \times e^{(\alpha/a) \times t}$$

$$Vred \cdot \Phi = 5.10 \times 10^{-7} a \times e^{(\alpha/a) \times t}$$

次に、各対象橋梁の  $t$  と  $Vred \cdot \Phi$  の値に対して、変換した関数をあてはめ、回帰分析により係数  $\alpha$ 、 $a$  の値を求める。

表-3.1.6 に各対象橋梁の  $t$  及び  $Vred \cdot \Phi$  を示す。

回帰分析においては、既往の研究成果<sup>9)</sup>を参考に、 $\alpha$ 、 $a$  の値に次の制約条件を設けて非線形最小二乗法を実施した。

・制約条件： $300 \text{ mg/cm}^3/\text{年} \leq \alpha \leq 1,000 \text{ mg/cm}^3/\text{年}$ 、 $700 \text{ mg/cm}^2 \leq a \leq 2,500 \text{ mg/cm}^2$   
 回帰分析の結果は、次のとおりである。

$$\alpha = 430 \text{ mg/cm}^3/\text{年}$$

$$a = 2,100 \text{ mg/cm}^3$$

$$c = 0.001 \text{ cm} \text{ (仮定：前提条件)}$$

$$\therefore V_{red} = (4ac / (\Phi \times \gamma_{FE})) \times e^{(\alpha/a) \times t} = 1.07 \times 10^{-3} / \Phi \times e^{0.205 \times t}$$

また、本システムでは、最外縁の鉄筋（帯鉄筋）の径は次のとおりに設定している。

$$\Phi = 1.3 \text{ cm}$$

表-3.1.6 各対象橋梁の  $t$  及び  $V_{red} \cdot \Phi$

	橋名	位置	潜伏 期間 T2 (年)	調査時 の経過 年数 T (年)	腐食ひび割 れ発生以降 の経過年数 t=T-T2	鉄筋径 $\Phi$ (mm)	鋼材体積 減少率 Vred	$V_{red} \cdot \Phi$
1	A橋	第2スパン、 G3 桁海側	8	32	24	D13	0.125	0.16
2	B橋	P1-P2、 G4 桁海側 P1 側	4	25	21	D10	0.0375	0.038
		P1-P2、 G4 桁海側 P2 側	7	25	18	D10	0.00	0.00
		P12-P13、 G4 桁海側 P12 側	3.5	25	21.5	D10	0.125	0.13
		P26-P27、 G4 桁海側	3.5	25	21.5	D10	0.125	0.13
3	C橋	第2スパン、 G1 桁海側	8.5	29	20.5	$\Phi 9$	0.0375	0.034
4	D橋	G3 桁海側	6.5	32	25.5	D13	0.125	0.16

(4) 劣化予測モデルの模式図

(1) ~ (3) による塩害における健全度予測モデルの模式図及び健全度ランクのしきい値を、図-3.1.1 及び表-3.1.7 に示す。

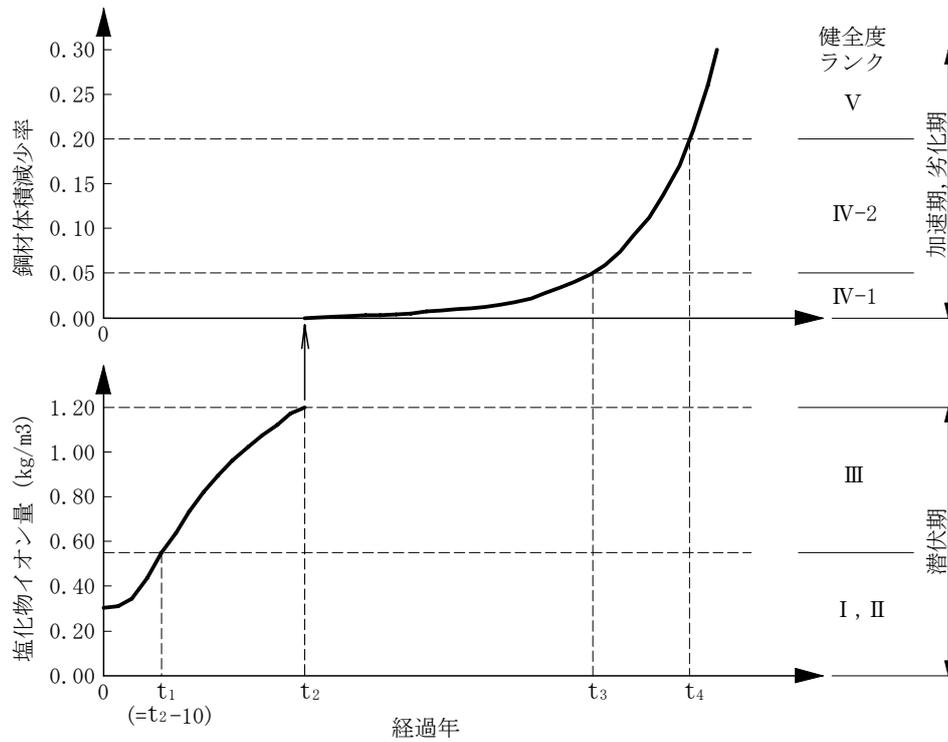


図-3.1.1 健全度（劣化）予測モデル

表-3.1.7 健全度ランクとしきい値の関係

健全度 ランク	劣化過程	理論式による評価
I	潜伏期	全塩化物イオン量：微量
II		全塩化物イオン量 < 1.2 kg/m <sup>3</sup> 10年以内に 1.2kg/m <sup>3</sup> 以上にならないと予測される
III		全塩化物イオン量 < 1.2 kg/m <sup>3</sup> 10年以内に 1.2kg/m <sup>3</sup> 以上になると予測される
IV	IV-1	進展期 全塩化物イオン量 ≥ 1.2kg/m <sup>3</sup>
	IV-2	加速期 劣化期 鋼材の体積減少率 < 0.05 0.05 ≤ 鋼材の体積減少率 < 0.2
V		0.2 ≤ 鋼材の体積減少率

### 3. 1. 3 現状健全度に対する定量的な値の特定

現状の健全度ランクは、表-3.1.1 の劣化状態から求めることができる。将来の劣化を予測するためには、現状における定量的な値を算出する必要があり、この算出方法は、次のとおりである。

- ・腐食ひび割れがない場合の定量的な値は塩化物イオン濃度であり、この値については、測定値がある場合はその値を用い、無い場合には経過年から設定する。
- ・腐食ひび割れ発生以降の定量的な値は鋼材の体積減少率であり、この値については、定期点検における「ひび割れ」及び「剥離・鉄筋露出」の損傷の程度を、表-3.1.8 により変換する。なお、「ひび割れ」及び「剥離・鉄筋露出」の両方の損傷がある場合は、健全度ランクの低い値を採用する。

表-3.1.8 定期点検結果の鋼材体積減少率への変換方法（塩害）

損傷の種類	区分	H16 定期点検における損傷程度の区分		鋼材体積減少率：Vred (健全度ランクへの対応)
		最大ひびわれ幅に着目した程度	最小ひびわれ間隔に着目した程度	
ひび割れ	b	小	小	Vred=0.00 (ランクIV-1)
	c	小	大	
	c	中	小	
	d	中	大	Vred=0.02 (ランクIV-1)
	d	大	小	
	e	大	大	
剥離・鉄筋露出	c	—	小	Vred=0.00 (ランクIV-1)
	d	—	小	Vred=0.02
	e	—	大	(ランクIV-1)

注：直近の点検が S63 定期点検の場合は、次に示す対応表を用い、H16 定期点検への変換を行う。

定期点検結果の対応表

S63 定期点検				H16 定期点検	
損傷の種類	X	Y	Z	判定	損傷程度の区分
ひび割れ	小	小	小	OK	b
	大	小	小	OK	b
	小	小	大	OK	c
	大	小	大	OK	c
	小	中	小	IV	c
	大	中	小	III	c
	小	中	大	IV	d
	大	中	大	III	d
	小	大	小	III	d
	大	大	小	II	d
	小	大	大	II	e
	大	大	大	II	e
剥離・鉄筋露出	—	小	小	IV	c
	—	小	大	III	c
	—	大	小	III	d
	—	大	大	II	e

### 3. 1. 4 将来健全度の評価フロー

塩害の影響を受ける地域の個々の橋梁について、図-3.1.2のフローにしたがい、将来健全度評価を行う。

まず、startのフローで、塩害特定点検の有無を確認し、<1>又は<2>のフローを選択する。なお、竣工時に塩害対策（塗装鉄筋使用、コンクリート表面塗装、その他）を実施した橋梁については、別途の方法で将来予測を行うこととし、本システムでは対応していない。

塩害特定点検無しの場合は<1>のフローとなり、表-3.1.4又は表-3.1.5に示す値を用いて劣化予測モデルに必要な値を算出して劣化予測モデルを作成する。そして、目視点検の有無を確認し、無しの場合（直轄では定期点検を実施しており、このケースは極稀である。）は（A）のフローに進む。有りの場合は、損傷の有無を確認し、損傷有りの場合は（C）のフローに、損傷無しの場合は、橋梁架設年から点検年までの経過年がT2（劣化予測モデルでの潜伏期の最終年）に達したかどうかで、（A）又は（B）のフローに進む。

塩害特定点検有りの場合は<2>のフローとなり、塩害特定点検結果の値を用いて劣化予測モデルを作成する。そして、損傷の有無を確認し、損傷有りの場合は（C）のフローに、損傷無しの場合は、鋼材位置での全塩化物イオン量（塩害特定点検結果の値を用いる。）が1.2kg/m<sup>3</sup>以上か未満かで、（B）又は（D）のフローに進む。

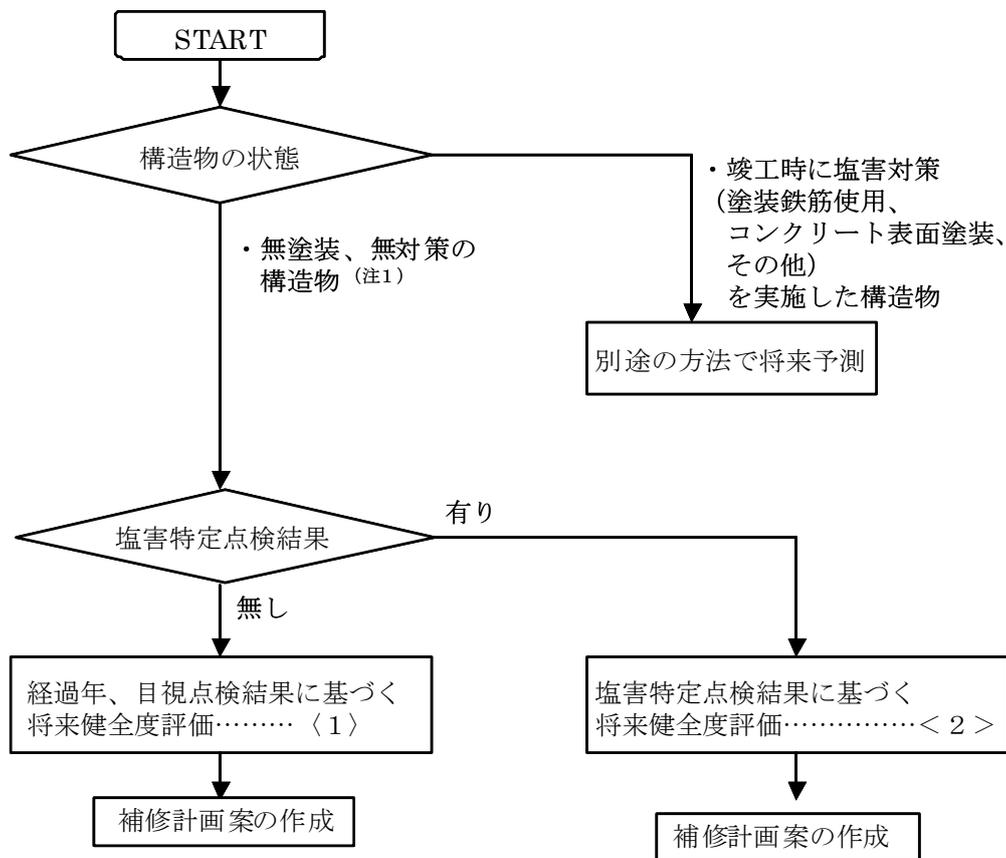
（A）のフローは、塩害特定点検がされておらず、点検結果がない又は点検により損傷

が見られない状態であることから、点検年における塩化物イオン量又は鋼材体積減少量を推測することができないので、劣化予測モデルをそのまま用いて将来予測を行うものである。

(B) のフローは、現状が加速期にある場合である。＜1＞のフローから飛んできた場合は、鋼材位置での全塩化物イオン量が測定されてなく、損傷も見られないことから、経過年のみで加速期の始めと仮定したものである。したがって、劣化予測モデルから求まるT2との間に生じた乖離分を、劣化予測モデルを平行移動させることにより解消させる。一方、＜2＞のフローから飛んできた場合は、鋼材位置での全塩化物イオン量が測定されており  $1.2\text{kg/m}^3$  以上と加速期にあることは明らかなものの損傷は見られないことから、鋼材体積減少率は0と推測し、これも加速期の始めと仮定したものである。

(C) のフローは、塩害による損傷が確認されており、加速期にあることが明らかな場合である。＜1＞のフローから飛んできた場合は、鋼材体積減少率を表-3.1.8 にしたがって0.00又は0.02と仮定し、劣化予測モデルから計算される値が一致するよう、劣化予測モデルを平行移動させる。＜2＞のフローから飛んできた場合も同様である。

(D) のフローは、塩害による損傷が確認されてなく、鋼材位置での全塩化物イオン量も  $1.2\text{kg/m}^3$  未満であり、潜伏期にあることが明らかな場合である。劣化予測モデルから求まる塩化物イオン量と塩害特定点検結果の塩化物イオン量を一致させるよう、劣化予測モデルを補正する。



(注1)

- ・過去に塩害による劣化を補修した構造物については、その補修材料、補修工法、補修規模によって健全度の回復度合いやその後の劣化速度が異なると考えられる。ここでは、過去に実施された補修工法をシステムで設定した代表的補修工法と補修後の健全度の関係に対応付け、その考え方を適用するものとする。

(注2)

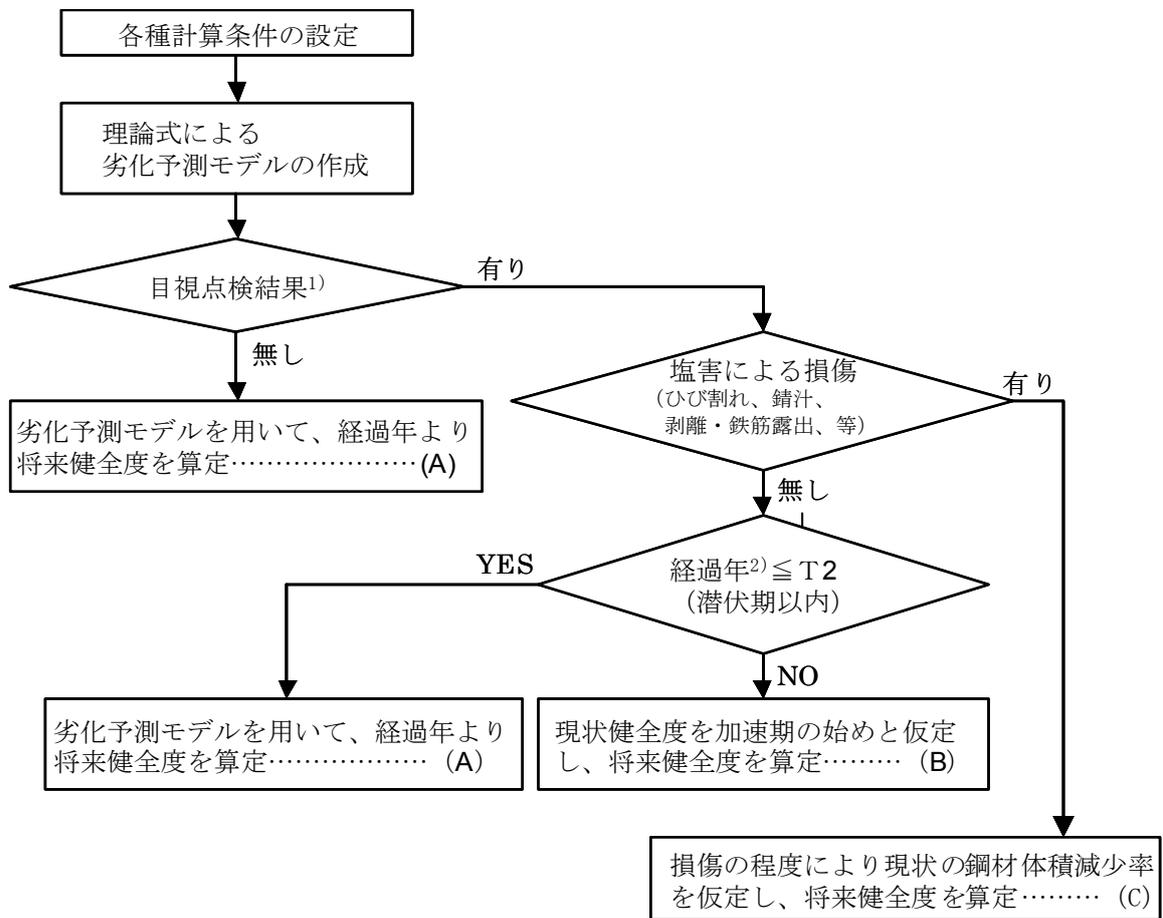
- ・コンクリート表面塗装など、竣工時に塩害対策が施されている構造物については、塩害による劣化の発生を防止することが可能であると考えられるため、表面塗装等の塩害対策工自体の健全性を別途管理するものとする。
- ・塗装鉄筋など、防錆効果の高い鋼材を使用している構造物については、塩害の影響を受けない地域にあるとみなす。

(注3)

- ・以下の図-3.1.2におけるグラフのT1、T2、T4の定義は、次のとおりである。  
 T1：10年後に鋼材位置での全塩化物イオン量が1.2kg/m<sup>3</sup>に達する経過年数  
 T2：鋼材位置での全塩化物イオン量が、1.2kg/m<sup>3</sup>に達する経過年数  
 T4：鋼材の体積少率が限界値0.2に達する経過年数

図-3.1.2 塩害における将来健全度予測フロー (start)

< 1 > 経過年、目視点検結果に基づく将来健全度評価



1) 定期点検など、近接目視により損傷度を判定する点検

2) 橋梁架設年から点検年までの経過年数

図-3.1.2 塩害における将来健全度予測評価フロー< 1 >

< 2 > 特定点検結果に基づく将来健全度評価

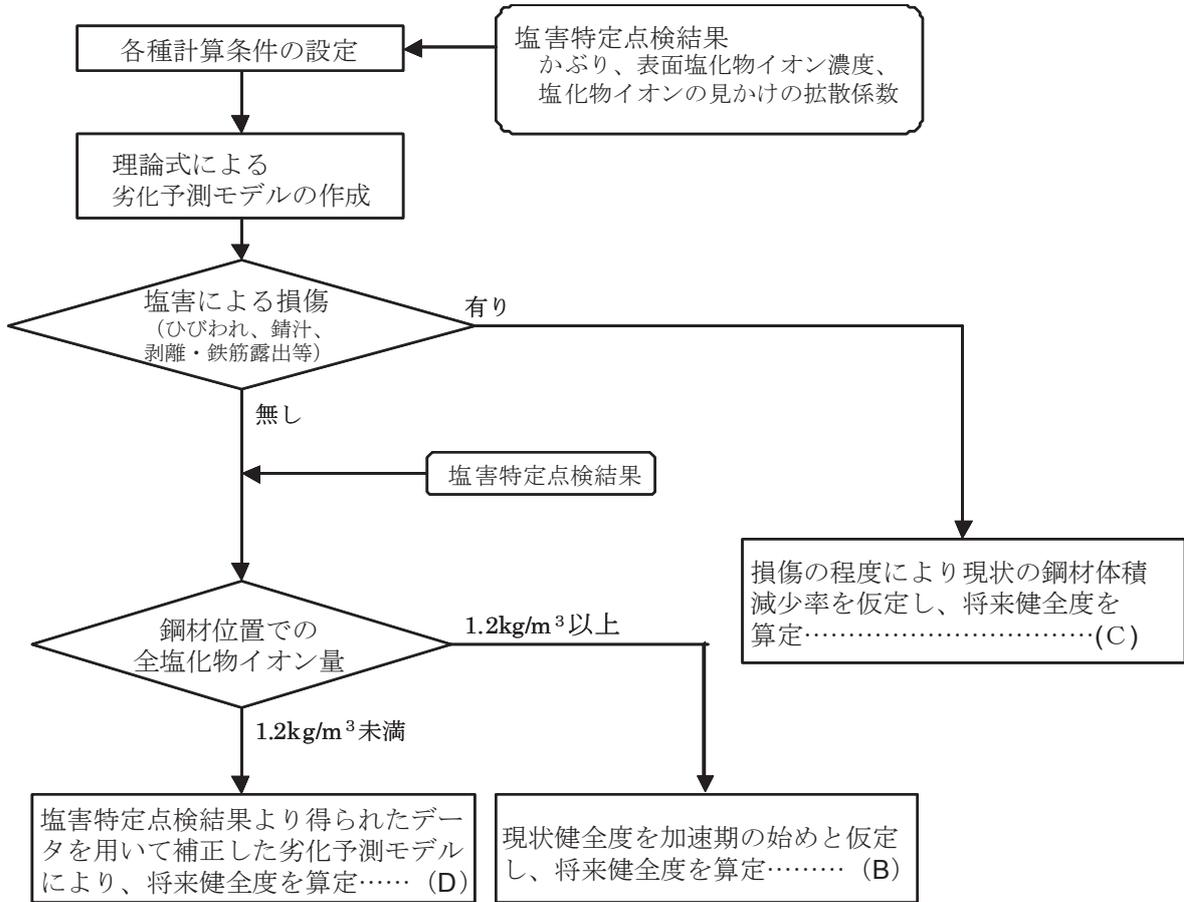


図-3.1.2 塩害における将来健全度予測評価フロー< 2 >

(A) 劣化予測モデルをそのまま用いて、将来の塩化物イオン量又は鋼材体積減少率を算定

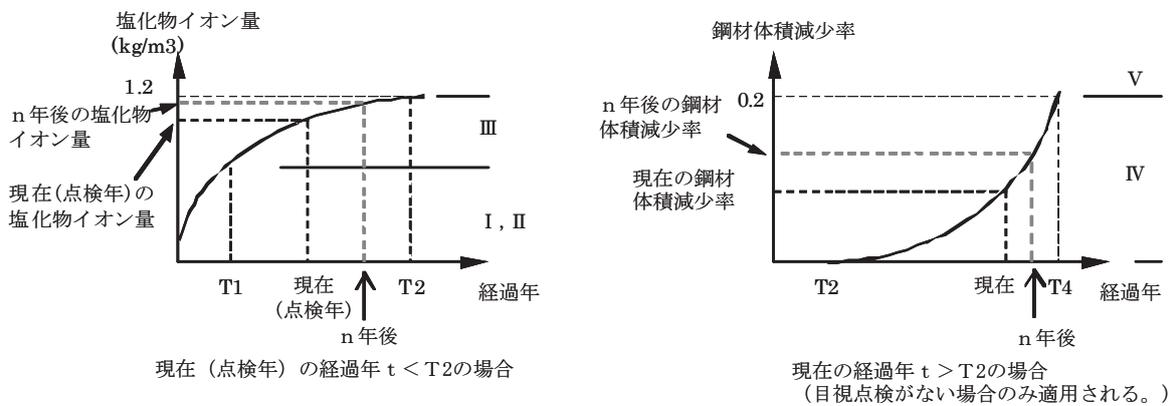


図-3.1.2 塩害における将来健全度予測評価フロー< A >

(B) 点検時の健全度を加速期の始めと仮定し、加速期以降の劣化予測モデルをシフトして、将来の鋼材体積減少率を算定

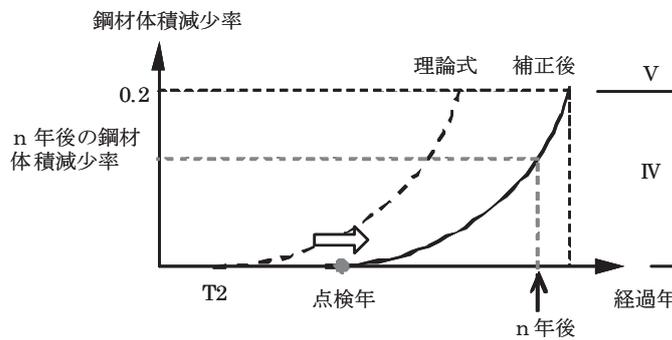


図-3.1.2 塩害における将来健全度予測評価フロー< B >

(C) 鋼材体積減少率を 0.00 又は 0.02 と仮定し、劣化予測モデルをシフトして、将来の鋼材体積減少率を算定

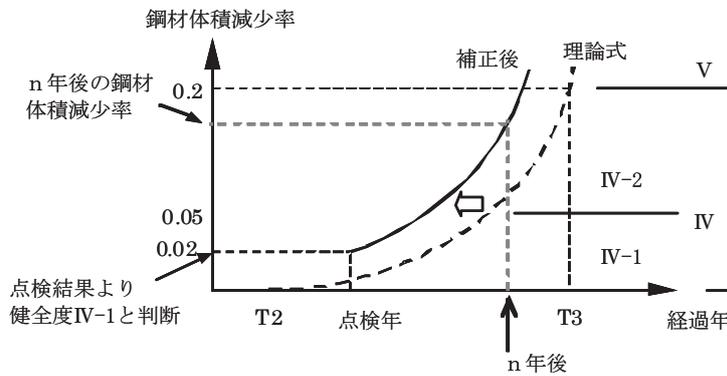


図-3.1.2 塩害における将来健全度予測評価フロー< C >

(D) < 2 > から：特定点検結果より得られたデータを用いて補正した劣化予測モデルにより、現状健全度を算定

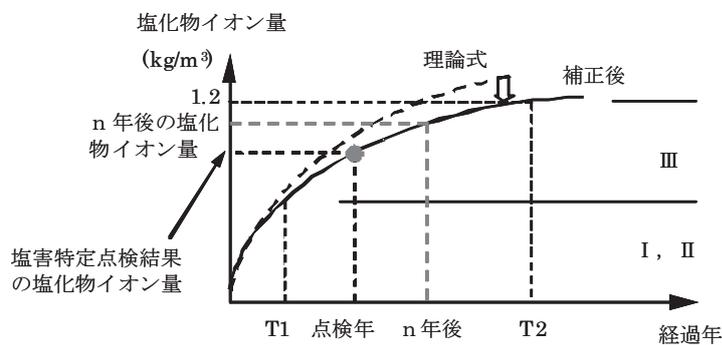


図-3.1.2 塩害における将来健全度予測評価フロー< D >

### 3. 1. 5 劣化予測モデルの検証

#### (1) 検証方法

塩害における健全度予測モデルの検証を、以下の2つの方法で実施した。図-3.1.3に検証方法のイメージ図を示す。また、検証に使用する鋼材体積減少率の設定は、表-3.1.9に示すとおりとした。

- ①塩害による損傷を受けた橋梁を対象に、点検時の経過年数と点検結果の損傷状態に至る予測年数を比較する。
- ②潜伏期についての検証として、点検年における塩化物イオン濃度が発錆限界値  $1.2\text{kg/m}^3$  を越えていれば発錆していると考え、点検時の経過年数から予測される損傷の有無と実際の損傷の有無を比較する。

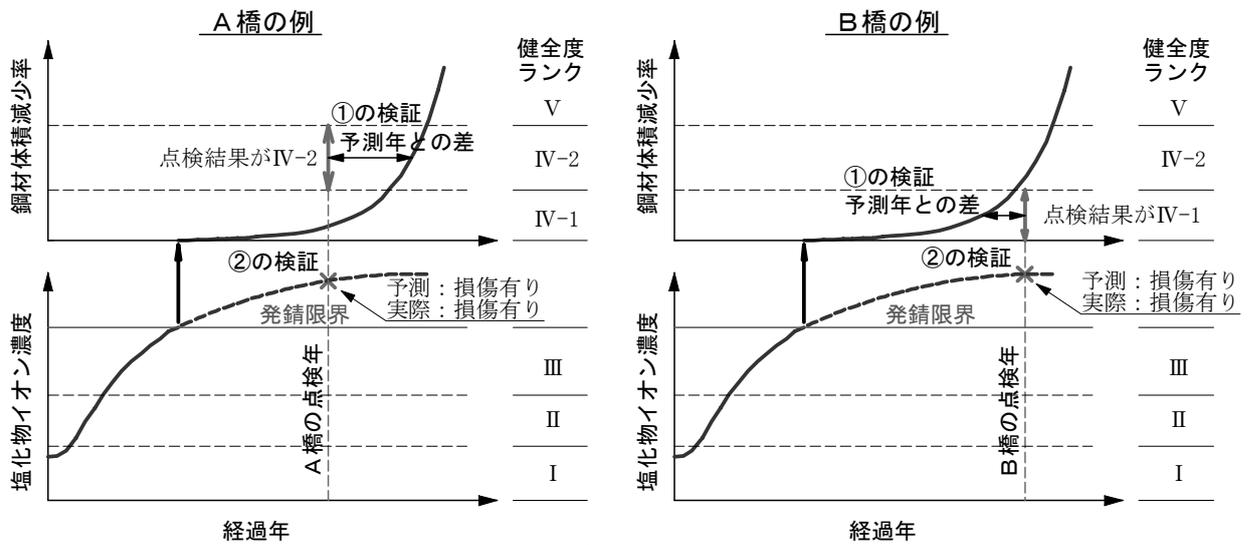


図-3.1.3 検証方法のイメージ図

表-3.1.9 鋼材体積減少率の設定

塩害調査結果		鋼材体積減少率 Vred	今回の検証に使用するVred
損傷状況	※損傷度		
ごく軽微なひび割れや、錆汁が認められる場合	IV	0.00~0.025	0.01
ひび割れ、錆汁、あるいは剥離が部分的に認められる場合	III		0.02
ひび割れ、錆汁、剥離、あるいは剥落が連続的に認められる場合	II	0.025~0.05	0.04
鋼材の露出や破断、またはコンクリートの断面欠損が認められる場合	I	0.05~0.20	0.125

※建設省 総合技術開発プロジェクト コンクリート橋の耐久性向上技術の開発  
(財)土木研究センターによる

剥離・鉄筋露出の判定区分		今回の検証に使用するVred
損傷状況	※損傷度	
剥離・鉄筋露出の面積が $0.1\text{m}^2$ 以上である	II	0.04
剥離・鉄筋露出の面積が $0.1\text{m}^2$ 未満である	III	0.02
剥離のみが生じ、その面積が $0.1\text{m}^2$ 未満である	IV	0.01

※土木研究所資料「橋梁点検要領(案)における損傷度判定基準

(2) 検証対象橋梁

検証は、北陸地方と東北地方と東北地方におけるコンクリート桁をサンプル抽出して行った。検証橋梁の諸元を表-3.1.10に示す。

表-3.1.10 塩害対象橋梁

表-1.1 北陸地方 A事務所

名称	構造形式	架設竣工年	供用年数	塩害地域区分	海岸からの距離(km)	補修あるいは調査年	経過年数	補修内容	調査結果	推定鋼材体積減少率
AA	プレキャスト桁	1971	33	B-I	0.1	2002	31		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AB	ボスキャスト桁(合成)	1962	42	B-I	0.0	2002	40		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AC	プレキャスト桁	1967	37	B-I	0.1	2002	35		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AD	プレキャスト桁	1972	32	B-I	0.0	2002	30		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AE	ボスキャスト桁	1966	38	B-I	0.1	1999	33		ひび割れ、鉄筋露出：Ⅱ	0.04
AF	プレキャスト桁	1966	38	B-I	0.0	1998	32		ひび割れ、鉄筋露出：Ⅱ	0.04
AG	プレキャスト桁	1964	40	B-II	0.2	2002	38		軽微なひび割れ：Ⅳ	0.01
AH	RC T桁	1965	39	B-I	0.1	2002	37		軽微なひび割れ：Ⅳ	0.01
AI	プレキャスト床版	1963	41	B-I	0.1	2002	39		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AJ	ボスキャスト桁	1970	34	B-I	0.1	2002	32		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AK	ラーメン橋	1987	17	B-I	0.0	1998	11		軽微なひび割れ：Ⅳ	0.01
AL	プレキャスト床版	1967	37	B-I	0.1	2002	35		軽微なひび割れ：Ⅳ	0.01
AM	プレキャスト床版	1966	38	B-I	0.1	2002	36		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AN	プレキャスト床版	1966	38	B-I	0.1	2002	36		ひび割れ、錆汁部分的：Ⅲ	0.02
AO	プレキャスト床版	1966	38	B-I	0.1	2002	36		ひび割れ、錆汁部分的：Ⅲ	0.02
AP	プレキャスト床版	1966	38	B-I	0.1	2002	36		軽微なひび割れ：Ⅳ	0.01
AQ	プレキャスト桁	1969	35	B-I	0.1	2002	33		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AR	プレキャスト桁	1966	38	B-I	0.1	2002	36		ひび割れ、錆汁部分的：Ⅲ	0.02
AS	プレキャスト桁	1974	30	B-I	0.1	2002	28		ひび割れ、錆汁部分的：Ⅲ	0.02
AT	プレキャスト桁	1937	67	B-I	0.1	2002	65		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AU	プレキャスト桁	1952	52	B-II	0.2	2002	50		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AV	単純桁	1967	37	B-I	0.1	2002	35		ひび割れ、錆汁部分的：Ⅲ	0.02
AW	単純桁	1979	25	B-I	0.1	2002	23		ひび割れ、錆汁部分的：Ⅲ	0.02
AX	単純桁	1975	29	B-I	0.0	2002	27		ひび割れ、錆汁多数：Ⅱ	0.04
AY	RC 中空床版	1990	14	B-I	0.1	2002	12		軽微なひび割れ：Ⅳ	0.01

表-1.2 東北地方 B事務所

名称	構造形式	架設竣工年	供用年数	塩害地域区分	海岸からの距離(km)	補修あるいは調査年	経過年数	補修内容	調査結果	推定鋼材体積減少率
BA	ボスキャスト桁	1988	16	B-III	0.40	1998	10		異常なし	※1
BB	ボスキャスト桁	1964	40	B-III	0.30	1998	34		橋軸方向ひび割れ：Ⅲ	0.02
BC	ボスキャスト桁	1966	38	B-I	0.10	1981	15	外ケーブル+鋼板被覆		0.125
BD	RC T桁	1969	35	B-III	0.30	1998	29		ひび割れ、錆汁：Ⅲ	0.02
BE	ボスキャスト桁	1967	37	B-III	0.40	1998	31		部分的ひび割れ：Ⅳ	0.01
BF	ボスキャスト桁	1965	39	B-II	0.20	1997	32		橋軸方向ひび割れ多数：Ⅰ	0.125
BG	ボスキャスト桁	1965	39	B-III	0.30	2002	37		ひび割れ、鉄筋露出：Ⅱ	0.04
BH	プレキャスト桁	1960	44	B-I	0.01	1998	38		間詰め部に錆汁：Ⅳ	0.01
BI	プレキャスト桁	1963	41	B-II	0.20	1998	35		異常なし	※1
BJ	ボスキャスト桁	1988	16	B-I	0.01	1998	10		異常なし	※1
BK	ボスキャスト桁	1986	18	B-I	0.01	1998	12		異常なし	※1
BL	ボスキャスト桁	1964	40	B-I	0.01	1981	17	外ケーブル+鋼板被覆		0.125
BM	ボスキャスト桁	1964	40	B-I	0.01	1982	18	外ケーブル+鋼板被覆		0.125

※1. 点検結果で異常なしの場合は、年数を特定できないため、予測年数との比較においては検証橋梁から除外する。

(3) 検証結果

① 実際の経過年数と予測年数の比較

図-3.1.4 に予測誤差率を、図-3.1.5 に誤差範囲を、表-3.1.11 に実経過年数と予測年数の比較を示す。予測年数と実際の経過年数との誤差は、53%が誤差率±20%以内となり、概ね妥当であることが確認された。

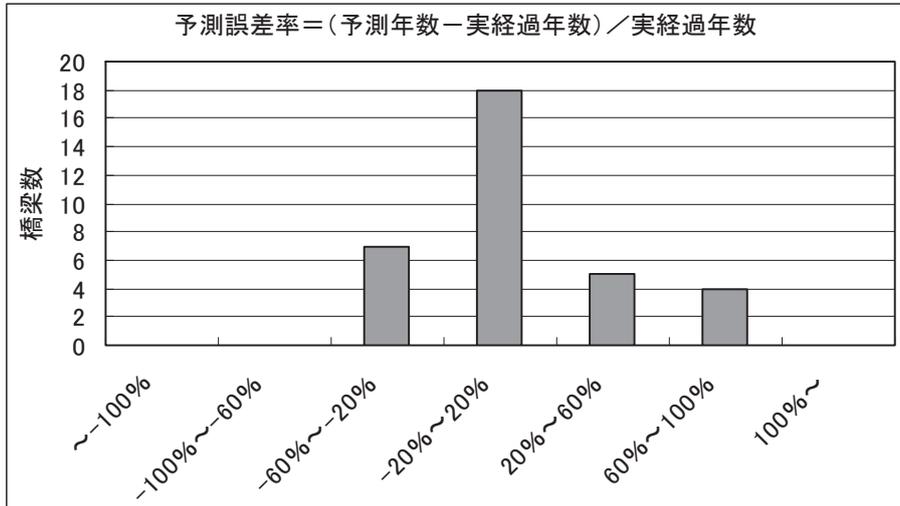


図-3.1.4 塩害の検証結果（予測誤差率）

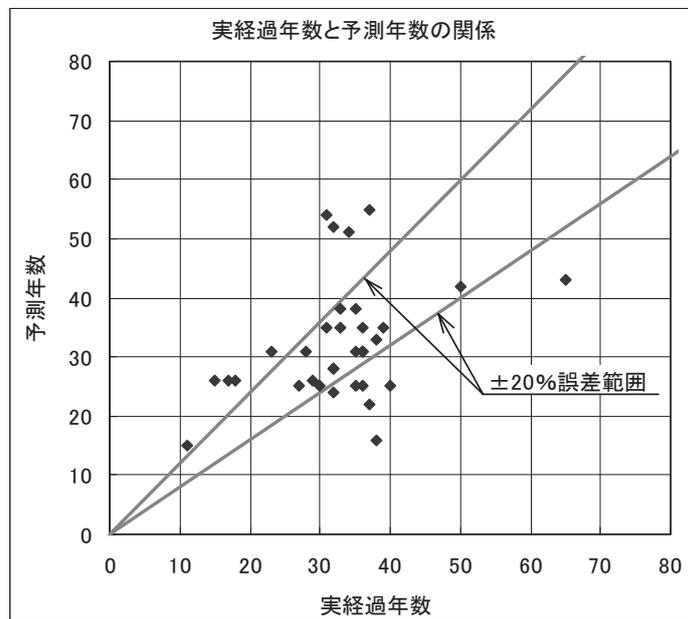


図-3.1.5 塩害の検証結果（誤差範囲）

表-3.1.11 実経過年数と予測年数の比較

名称	A 実経過年	B 予測年数	C/A (%)	C=B-A	損傷度
AA	31	35	12.9	4	Ⅱ
AB	40	25	-37.5	-15	Ⅱ
AC	35	38	8.6	3	Ⅱ
AD	30	25	-16.7	-5	Ⅱ
AG	38	33	-13.2	-5	Ⅳ
AH	37	22	-40.5	-15	Ⅳ
AI	39	35	-10.3	-4	Ⅱ
AJ	32	28	-12.5	-4	Ⅱ
AL	35	25	-28.6	-10	Ⅳ
AM	36	35	-2.8	-1	Ⅱ
AN	36	31	-13.9	-5	Ⅲ
AO	36	31	-13.9	-5	Ⅲ
AP	36	25	-30.6	-11	Ⅳ
AQ	33	35	6.1	2	Ⅱ
AR	36	31	-13.9	-5	Ⅲ
AS	28	31	10.7	3	Ⅲ
AT	65	43	-33.8	-22	Ⅱ
AU	50	42	-16.0	-8	Ⅱ
AV	35	31	-11.4	-4	Ⅲ
AW	23	31	34.8	8	Ⅲ
AX	27	25	-7.4	-2	Ⅱ
AY	32	28	-12.5	-4	Ⅱ
BB	34	51	50.0	17	Ⅲ
BC	15	26	73.3	11	Ⅰ
BD	29	26	-10.3	-3	Ⅲ
BE	31	54	74.2	23	Ⅳ
BF	32	52	62.5	20	Ⅰ
BH	38	16	-57.9	-22	Ⅳ
BL	17	26	52.9	9	Ⅰ
BM	18	26	44.4	8	Ⅰ
BG	37	55	48.6	18	Ⅱ
AE	33	38	15.2	5	Ⅱ
AF	32	24	-25.0	-8	Ⅱ
AK	11	15	36.4	4	Ⅳ

## ②潜伏期における発錆有無の予測結果と実損傷の比較

図-3.1.6 に経過年数と発錆の有無の関係を、表-3.1.12 に対象橋梁における発錆状況を示す。潜伏期における発錆有無の整合率は89%となり、概ね妥当であることが確認された。

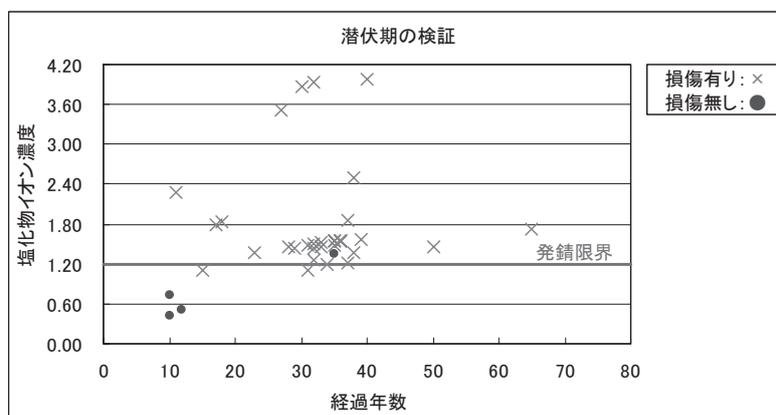


図-3.1.6 潜伏期の検証

## ③今後の課題

予測年数と実際の経過年数に関しては、今後さらに、健全度ランク別に予測誤差を分析することなどにより、予測精度の詳細検討を進める必要がある。

潜伏期における発錆有無の整合については、今後は、塩分量の予測結果と発錆状況との不整合、特に鉄筋位置での塩化物イオン濃度の予測値が  $1.2\text{kg/cm}^3$  以下にもかかわらず発錆しているケースの原因について詳細調査し、劣化予測モデルの改良検討を進める必要がある。

表-3.1.12 対象橋梁における発錆状況

(1) 実際に発錆している橋梁

	経過年数	塩化物イオン量	損傷度
1	31	1.49	II
2	40	3.98	II
3	35	1.49	II
4	30	3.86	II
5	38	1.37	IV
6	37	1.85	IV
7	39	1.57	II
8	32	1.43	II
9	35	1.54	IV
10	36	1.55	II
11	36	1.55	III
12	36	1.55	III
13	36	1.55	IV
14	33	1.52	II
15	36	1.55	III
16	28	1.45	III
17	65	1.73	II
18	50	1.45	II
19	35	1.54	III
20	23	1.37	III
21	27	3.52	I
22	29	1.44	III
23	32	1.26	I
24	38	2.50	IV
25	17	1.79	I
26	18	1.84	I
27	37	1.21	II
28	33	1.45	II
29	32	3.93	II
30	11	2.27	IV
31	32	1.50	IV
32	34	1.19	III
33	15	1.10	I
34	31	1.10	IV

(2) 損傷が無い橋梁

	経過年数	塩化物イオン量	損傷度
1	10	0.73	損傷なし
2	10	0.43	損傷なし
3	35	1.35	損傷なし
4	12	0.50	損傷なし

### 3. 2 RC床版の疲労に対する劣化予測

#### 3. 2. 1 健全度

RC床版の疲労破壊実験結果に基づく研究成果<sup>1)</sup>によると、疲労損傷度と床版の総たわみ率(総たわみ量/載荷荷重)の関係より表-3.2.1の劣化過程が考えられるとされ、疲労損傷度とひび割れ密度との関係を床版の設計年次で区分し、表-3.2.2の関係が導き出されている。

表-3.2.1 疲労損傷度と劣化過程の関係<sup>1)</sup>

疲労損傷度	劣化過程
0.0 ~ 0.2	潜伏期 (初期段階)
0.2 ~ 0.5	進展期 (中間期)
0.5 ~ 0.8	加速期 (中間期)
0.8 ~ 1.0	劣化期 (最終段階)

表-3.2.2 疲労損傷度とひび割れ密度の関係<sup>1)</sup>

疲労損傷度	ひび割れ密度
0.2	6m/m <sup>2</sup> (S39 道示)
0.5	8m/m <sup>2</sup> (S39 道示)
1.0	10m/m <sup>2</sup> (S39 道示)

本システムではこれを参考に、健全度ランクは、表-3.2.3に示すとおりに設定した。

劣化予測に用いる定量的な値は、疲労損傷度とした。表には、ひび割れ密度との関係も参考に示した。

表-3.2.3 RC床版の疲労に対する健全度区分

劣化過程	健全度ランク	定量的な値による評価		劣化状態
		疲労損傷度 D=N/Nf	ひび割れ密度 Cd(m/m <sup>2</sup> )	
潜伏期	I	D < 0.1	0 ≤ Cd < 3	ひび割れ無し~1方向ひび割れ
	II	0.1 ≤ D < 0.2	3 ≤ Cd < 6	1方向ひび割れ、格子状でない
進展期	III	0.2 ≤ D < 0.5	6 ≤ Cd < 8	格子状直前~格子状で網細化が進んでいる
加速期	IV	0.5 ≤ D < 0.8	8 ≤ Cd < 9	格子状で、幅0.2mm以上のひび割れがかなり目立ち、部分的角落ち、漏水、遊離石灰も見られる
劣化期	V	0.8 ≤ D < 1.0	9 ≤ Cd	格子状で、ひび割れが貫通し、連続的な角落ち、漏水、遊離石灰が見られる

### 3. 2. 2 劣化予測モデル

RC床版の疲労に対する健全度は、統計分析を用いるまでのデータが揃っていないこともあり、理論式による疲労損傷度により予測するものとする。

#### (1) 疲労損傷度の算出

疲労損傷度とは、疲労破壊に至る荷重の繰返し回数に対する、累積される荷重の繰返し回数の比率である。このとき、累積される荷重の繰返し回数は、大型車交通量を用いて算出する。

対象とする床版は「鋼橋」と「コンクリート桁橋」のRC床版のみとし、プレストレスが導入されている床版は対象外とする。

以下に疲労損傷度の算出式を示す。

$$D = \frac{N}{N_f}$$

ここに、 $D$ ：疲労損傷度、 $N$ ：繰返し回数、 $N_f$ ：疲労破壊に至る繰返し回数

#### ①疲労破壊に至る繰返し回数

$N_f$ は、次式に示すマイナー12乗則（松井ら）を用いて算出する。

$$\log\left(\frac{P}{P_{SX}}\right) = -k \log N + \log C$$

ここに、 $N$ ：繰返し回数       $P$ ：基本輪荷重 (kgf)：98kN とする。

$k$ ：0.07835

$C$ ：1.2366 (湿潤状態と仮定)

$P_{SX}$ ：はり状化した床版の静的せん断破壊強度 (kgf)

$$= 2B \cdot (\tau_{max} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m)$$

$B$ ：はりの有効幅 (cm) =  $b + 2d_d$

$b$ ：載荷版の配力筋方向の辺長 (20cm)

$d_d$ ：引張側配力鉄筋方向の有効高さ (cm) (かぶり深さ、主鉄筋径、配力鉄筋径より計算)

$$= \text{床版厚} - \text{かぶり} - \text{主鉄筋径} - \text{配力鉄筋径}/2$$

$\tau_{max}$ ：コンクリートの最大せん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$$= 0.252f_{ck} - 0.000246f_{ck}^2$$

$X_m$ ：主鉄筋断面の中立軸深さ (cm) (床版厚、鉄筋量より算出)

$$X_m = -n \frac{(As + As')}{b} + \sqrt{\left\{ \frac{n(As + As')}{b} \right\}^2 + \frac{2n}{b} (dAs + d'As')}$$

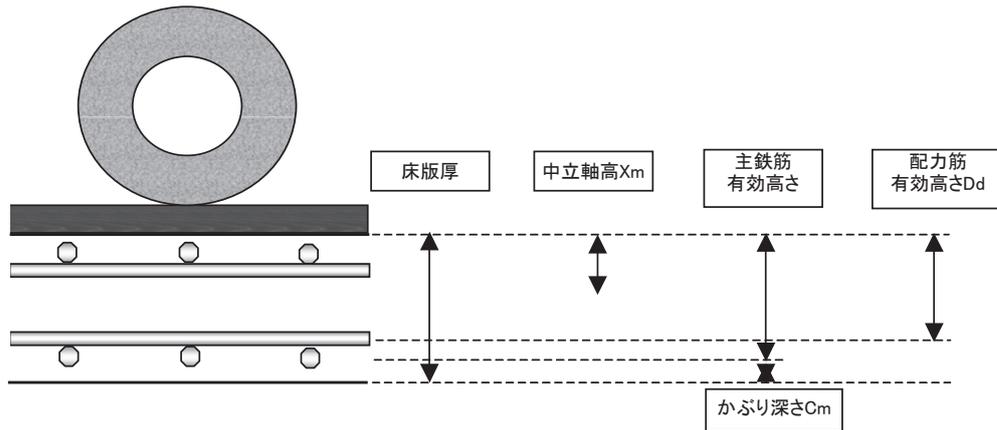
$\sigma_{tmax}$ ：コンクリートの最大引張応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) =  $0.583f_{ck}^{2/3}$

$C_m$ ：主鉄筋のかぶり深さ (cm)

$$= \text{かぶり} + \text{主鉄筋径}/2$$

$f_{ck}$ ：コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

[出典：2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]制定資料 土木学会]<sup>1)2)</sup>



## ②繰返し回数

基本輪荷重の繰返し回数は1年単位で設定する。具体には、センサス年度を基準に、過去の交通量については平均伸び率 $\alpha=1.03$ を用いて任意の期間に対する基本荷重の累積繰返し回数 $N$ (台)を算定する。劣化予測を行う将来については、一定( $\alpha=1.00$ )で推移するものとする。

疲労損傷度を計算する際に必要となる $N$ の具体的な算定手順は、次のとおりである。

- ①交通センサスより、対象とする各橋梁位置での大型車交通量 $A$ を設定
- ②センサス年度における基本輪荷重の繰返し回数 $N_d$ (台/年)を算定

基本輪荷重(98kN)の1日当たり繰返し回数 $N_d$ は、平成6年~12年に全国81箇所車両重量調査結果を基に設定した次式を用いて(図-3.2.1、図-3.2.2参照。)、大型車交通量を基本輪加重に換算することにより算定する。

$$N_d = 4 \times 10^{-7} \times (A/2)^{2.29}$$

ここに、 $N_d$ : 1日当たりの基本輪荷重の繰返し回数(台/日)

$A$ : 大型車交通量(台/日)

- ③ $N_d \times 365$ 日を、年当たり繰返し回数とする。

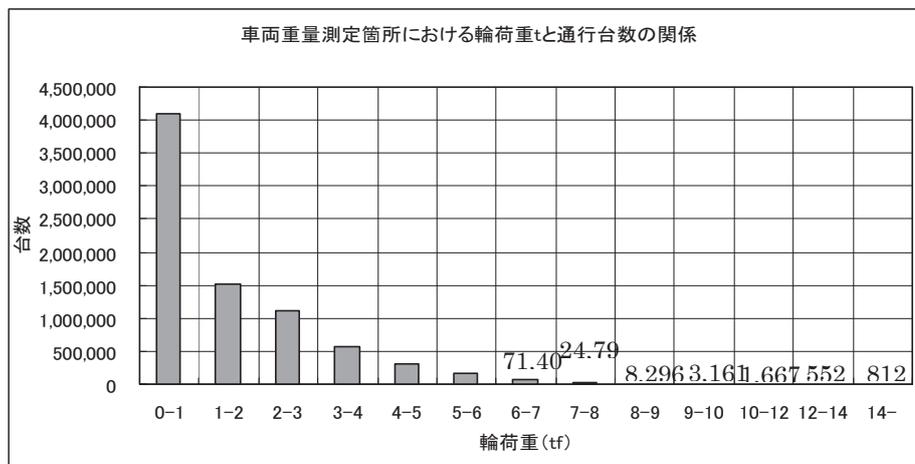


図-3.2.1 各輪荷重の総通行台数分布

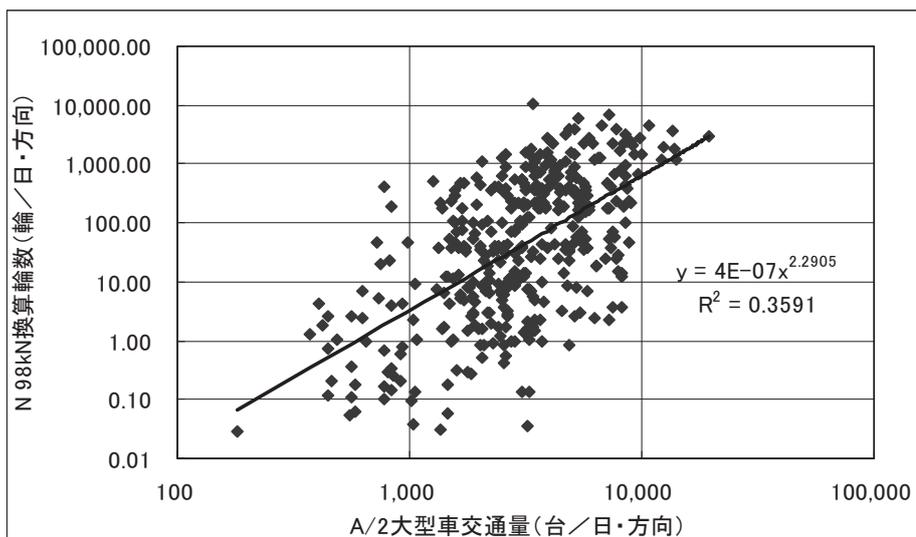


図-3.2.2 大型車交通量と 98kN 換算輪数の関係

(2) 劣化予測モデルの模式図

R C床版疲労の劣化予測モデルの模式図及び健全度ランクのしきい値を、図-3.2.3 及び表-3.2.4 に示す。

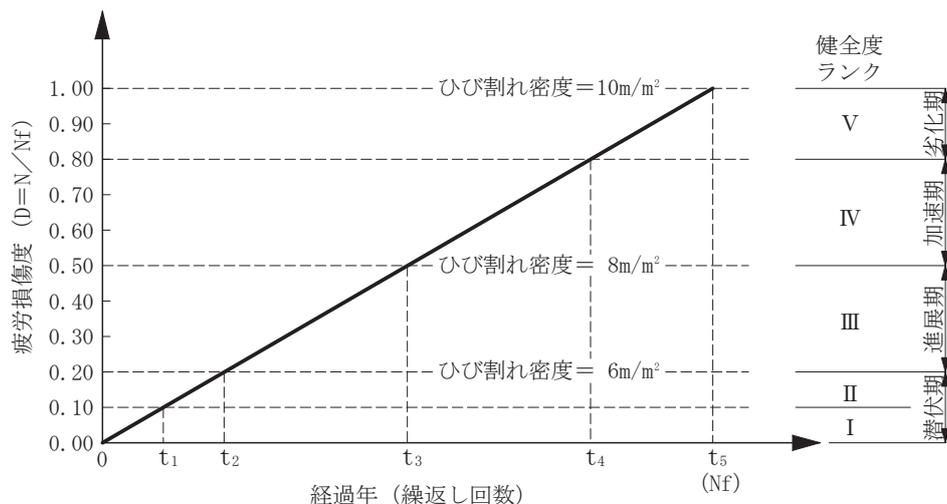


図-3.2.3 健全度 (劣化) 予測モデル

表-3.2.4 健全度ランクとしきい値の関係

健全度 ランク	劣化過程	疲労損傷度 D=N/Nf	ひび割れ密度 Cd(m/m <sup>2</sup> )
I	潜伏期	D < 0.1	0 ≤ Cd < 3
II		0.1 ≤ D < 0.2	3 ≤ Cd < 6
III	進展期	0.2 ≤ D < 0.5	6 ≤ Cd < 8
IV	加速期	0.5 ≤ D < 0.65	8 ≤ Cd < 9
		0.65 ≤ D < 0.8	
V	劣化期	0.8 ≤ D < 1.0	9 ≤ Cd

※：床版防水工がなされていない場合に適用する。

### 3. 2. 3 現状健全度に対する定量的な値の特定

現状の健全度ランクは、表-3.2.3 の劣化状態から求めることができる。将来の劣化を予測するためには、現状における定量的な値を算出する必要があり、この算出方法は、次のとおりである。

- ・橋梁定期点検における「床版ひび割れ」及び「抜け落ち」の損傷の程度を、表-3.2.5により健全度ランクへ対応させる。なお、「床版ひび割れ」及び「抜け落ち」の両方の損傷がある場合は、「抜け落ち」を優先させる。

表-3.2.5 定期点検結果の健全度ランクへの変換方法（RC床版の疲労）

損傷の種類	H16 定期点検における 損傷程度の区分	疲労損傷度 D への変換	健全度ランク への対応
床版ひび割れ	a	$D = D_1 / 2$ = 0.05	I
	b	$D = (D_1 + D_2) / 2$ = 0.15	II
	c	$D = (D_2 + D_3) / 2$ = 0.35	III
	d	$D = (D_3 + D_4) / 2$ = 0.575	IV-1
	e	$D = (D_4 + D_5) / 2$ = 0.725	IV-2
抜け落ち	e	$D = (D_4 + D_5) / 2$ = 0.725	IV-2

※  $D_1=0.1$ 、 $D_2=0.2$ 、 $D_3=0.5$ 、 $D_4=0.65$ 、 $D_5=0.8$

注：直近の点検が S63 定期点検の場合は、次に示す対応表を用い、H16 定期点検への変換を行う。

定期点検結果の対応表

S63 定期点検					H16 定期点検
損傷の種類	X	Y	Z	判定	損傷程度の区分
床版ひび割れ	小	小	小	IV	a
	小	小	大	IV	b
	小	中	小	IV	c
	小	大	小	III	c
	小	中	大	III	c
	小	大	大	III	c
	大	小	小	IV	c
	大	小	大	III	d
	大	中	小	III	d
	大	大	小	II	d
	大	中	大	II	e
抜け落ち	—	大	—	II	e

### 3. 2. 4 将来健全度の評価フロー

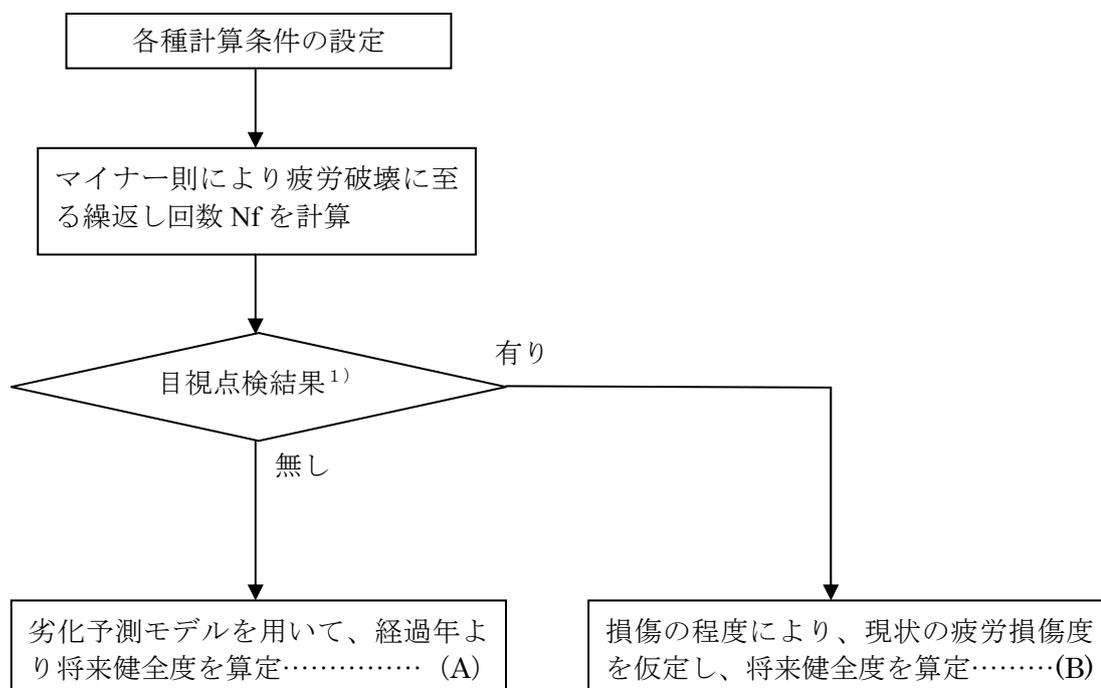
RC床版の疲労を受ける個々の橋梁について、図-3.2.4のフローにしたがい、将来健全度評価を行う。

まず、3. 2. 2によって疲労破壊に至る繰り返し回数 $N_f$ を計算する。

そして、目視点検の有無を確認し、無しの場合（直轄では定期点検を実施しており、このケースは極稀である。）は（A）のフローに進む。有りの場合は、（B）のフローに進む。

（A）のフローは、点検結果がない場合であり、床版ひび割れ又は抜け落ちの状況から疲労損傷度を求めることができないことから、劣化予測モデルをそのまま用いて将来予測を行うものである。

（B）のフローは、床版ひび割れ又は抜け落ちの点検結果から、点検時の疲労損傷度を求め、その値と劣化予測モデルから計算される値が一致するよう、劣化モデルを修正する（ $N_f$ を変更する。）。補正した劣化モデルにて、将来予測を行う。



1) 定期点検など、近接目視により損傷度を判定する点検

図-3. 2. 4 RC床版の健全度評価フロー(start)

(A) 劣化予測モデルをそのまま用いて、経過年より将来健全度を算定

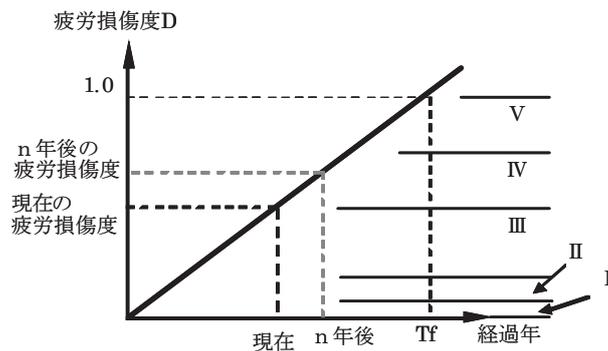


図-3.2.4 RC床版の健全度評価フロー(A)

(B) 定期点検結果から得られたデータを用いて点検時健全度を一致させた後、将来健全度を算定

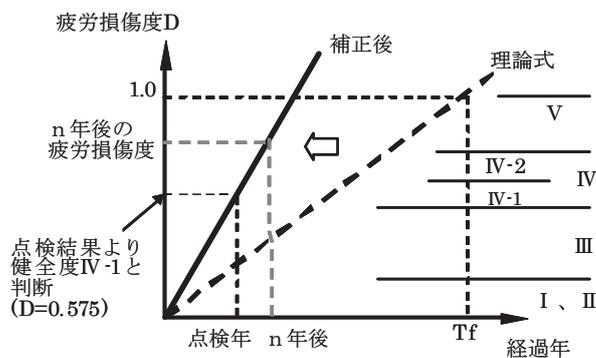


図-3.2.4 RC床版の健全度評価フロー(B)

### 3.2.5 劣化予測モデルの検証

#### (1) 検証方法

RC床版の劣化予測モデルについて、架設年、床版厚、床版支間長、大型車交通量による分析を行い、次の方法により検証した。

- ・ RC床版の点検結果(又は補修工法)から想定される疲労損傷に対し、点検時点の経過年数(補修時点の経過年数)と、その損傷状態に至る予測年数の差による検証を行う。
- ・ なお、床版は、常時湿潤状態と仮定とする。

#### (2) 分析パラメータの設定

##### ① 架設年

1970年以前と1971年以降でRC床版の設計基準(曲げモーメント式、鉄筋の許容応力度、コンクリートの設計基準強度等)が変わっているため、旧基準(1970年以前)(以下「旧」という。)で設計された橋梁と新基準(1971年以降)(以下「新」という。)で設計された橋梁の分類を行う。

## ② 床版厚

床版厚については、次の3種類に分類する。

- ・ 床版厚 15、16、17cm . . . 薄い
- ・ 床版厚 18、19cm 
- ・ 床版厚 20cm . . . 厚い

## ③ 床版支間

床版支間については、次の3種類に分類する。

- ▲ 床版支間  $L$  が短い . . .  $(L - L_a) < -0.2$  [単位 : m]
-  . . .  $-0.2 \leq (L - L_a) \leq 0.2$
- ◆ 床版支間  $L$  が長い . . .  $(L - L_a) > 0.2$

※床版支間の長短は、床版厚によって定めた想定床版支間長  $L_a$  (表-3.2.6 参照) に対しての相対的長短を表している。 $L_a$  は、旧・新での適用基準を元に床版の断面計算を参考に決定した。

表-3.2.6 想定床版支間長  $L_a$

床版厚	～S45	S46～
t=15	2.80	1.80
t=16	3.00	2.00
t=17	3.20	2.20
t=18	3.30	2.40
t=19	3.50	2.60
t=20	3.80	2.90

## ④ 大型車交通量

大型車交通量は、次の3種類に分類する。

- ・ 12,000 台未満 . . . 少ない
- ・ 12,000 台以上 30,000 台未満 
- ・ 30,000 台以上 . . . 多い

## (3) 検証対象橋梁

検証対象の橋梁は、全国のRC床版を有する橋梁のうち、次の条件に当てはまる57橋とする。

- ① 大型車交通量 (24 時間) が 9,000 台以上の橋梁
- ② 点検前に補修履歴がない橋梁
- ③ 床版厚と床版支間が明確で、床版厚が 15cm～20cm の橋梁
- ④ 点検前に補修履歴がある場合は、補修工法が明確な橋梁

この場合、次を仮定した。

- ・ 縦桁、床版桁増設が点検前に行われている場合は、点検年をその補修が行われた年とし、健全度ランクはIV-1(疲労損傷度 0.50)に対応するものとする。
- ・ 全長打ち換えが点検前に行われている場合は、点検年をその補修が行われた年とし、健全度ランクはIV-2(疲労損傷度 0.70)に対応するものとする。
- ・ 補修内容が「床版(その他)」の場合は軽微な補修であると判断し、補修歴があるとみなさず、点検結果をそのまま用いる。

検討対象橋梁の諸元を、表-3.2.7に示す。

表-3.2.7 R C床版検討対象橋梁の諸元

	名称	架設竣工年	点検年	経過年	大型車交通量	車線数	センサ年	床版厚さ (cm)	床版支間	床版主鉄筋	床版配力筋	疲労損傷度
1	A	1961	1996	35	13399	4	1997	18.0	2.30	D16 @ 25.0	D13 @ 15.0	0.70
2	B	1955	1996	41	14793	4	1997	16.0	1.60	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.70
3	C	1951	2002	51	15228	4	1997	17.0	2.80	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
4	D	1964	1994	30	16878	4	1997	19.0	3.00	D16 @ 20.0	D13 @ 24.0	0.35
5	E	1963	1991	28	16093	6	1997	18.0	3.45	D16 @ 15.0	D13 @ 30.0	0.50
6	F	1963	1991	28	23104	6	1997	19.0	3.20	D16 @ 26.8	D13 @ 10.0	0.50
7	G	1973	1999	26	52595	6	1997	20.0	2.90	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
8	H	1964	1983	19	39500	6	1997	20.0	4.00	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.70
9	I	1972	1987	15	33926	6	1997	20.0	3.45	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
10	J	1973	1987	14	52595	6	1997	20.0	3.45	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
11	K	1968	1994	26	52595	6	1997	18.0	2.90	D16 @ 10.0	D13 @ 22.0	0.50
12	L	1965	1988	23	42269	6	1997	19.0	2.10	D16 @ 15.0	D13 @ 21.0	0.50
13	M	1962	1984	22	38000	6	1997	17.0	2.90	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.70
14	N	1973	1999	26	33926	6	1997	20.0	2.90	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.35
15	N	1973	1999	26	33926	6	1997	20.0	2.90	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.35
16	O	1964	1985	21	39500	6	1997	17.0	2.80	D16 @ 10.0	D13 @ 20.0	0.50
17	P	1974	1988	14	39500	6	1997	20.0	2.90	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
18	Q	1961	1988	27	29629	4	1997	18.0	2.30	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
19	R	1974	1988	14	52595	6	1997	20.0	2.90	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
20	s	1972	1986	14	33926	6	1997	20.0	3.45	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
21	T	1964	1996	32	52595	6	1997	16.0	1.86	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.35
22	U	1968	1986	18	39500	6	1997	18.0	3.00	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
23	V	1966	1991	25	13287	6	1997	18.0	2.45	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
24	W	1973	1991	18	13287	6	1997	18.0	2.45	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
25	X	1964	1996	32	13876	6	1997	18.0	3.00	D16 @ 10.0	D13 @ 25.0	0.50
26	Y	1967	1991	24	11835	6	1997	19.0	3.20	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
27	Z	1978	1996	18	9800	4	1997	19.0	2.40	D16 @ 20.0	D16 @ 27.0	0.35
28	AA	1968	1996	28	13331	4	1997	18.0	3.25	D16 @ 10.0	D13 @ 25.0	0.50
29	AB	1969	1996	27	13331	4	1997	18.0	3.20	D16 @ 10.0	D13 @ 20.0	0.50
30	AC	1968	1995	27	10333	4	1999	16.0	3.10	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
31	AD	1974	1995	21	10333	4	1999	16.0	1.00	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.35
32	AE	1963	1996	33	10247	4	1999	15.0	1.52	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.35
33	AF	1970	1994	24	12843	4	1997	20.0	2.70	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
34	AG	1969	1998	29	18390	4	1997	17.0	2.60	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.35
35	AH	1976	2002	26	15315	4	1997	17.0	1.80	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
36	AI	1972	1998	26	15315	4	1997	20.0	2.75	D16 @ 25.0	D16 @ 10.0	0.35
37	AJ	1977	2002	25	20078	4	1999	19.0	3.60	D22 @ 25.0	D13 @ 12.5	0.15
38	AK	1970	1998	28	10370	4	1999	19.0	2.25	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
39	AL	1974	2002	28	18348	4	1999	19.0	2.30	D19 @ 12.5	D16 @ 25.0	0.35
40	AM	1968	1998	30	20426	4	1991	16.0	1.00	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.35
41	AN	1961	1998	37	23818	8	1994	19.0	1.70	D16 @ 12.5	D16 @ 30.0	0.35
42	AO	1961	1998	37	23818	8	1994	19.0	1.70	D16 @ 12.5	D16 @ 30.0	0.35
43	AP	1968	1997	29	11597	2	1994	19.0	2.49	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.35
44	AQ	1962	1995	33	10309	2	1994	17.0	3.00	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.35
45	AR	1977	2001	24	21135	4	1994	16.0	0.98	D16 @ 20.0	D13 @ 30.0	0.50
46	AS	1987	1997	10	10633	2	1994	16.0	1.00	D16 @ 15.0	D13 @ 30.0	0.35
47	AT	1949	1989	40	9279	6	1994	19.0	5.50	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
48	AU	1964	2001	37	11903	4	1994	18.0	9.70	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.50
49	AV	1974	1995	21	9244	4	1990	18.0	3.50	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.15
50	AW	1968	1997	29	11244	6	1997	18.0	3.25	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.70
51	AX	1975	1997	22	11244	6	1997	18.0	3.25	D19 @ 15.0	D19 @ 30.0	0.50
52	AY	1968	2002	34	42269	6	1997	18.0	2.10	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.35
53	AZ	1968	2002	34	42269	6	1997	18.0	2.10	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.70
54	CA	1972	1996	24	9800	4	1997	19.0	2.40	D16 @ 10.0	D16 @ 26.0	0.50
55	CB	1973	1996	23	9800	4	1997	17.0	2.00	D16 @ 10.0	D16 @ 22.0	0.50
56	CC	1969	1994	25	23513	4	1994	16.0	1.65	D16 @ 15.0	D16 @ 30.0	0.35
57	CD	1971	1996	25	10650	6	1994	19.0	2.60	D16 @ 20.0	D16 @ 30.0	0.50

#### (4) 分析結果

##### ① 架設年

架設年の新・旧で区分した実経過年と予測年数の関係を、図-3.2.5に示す。旧は予測年数が短く下側に分布する点が多く、一方、新の分布は全体に及んでおり特徴がないと言える。

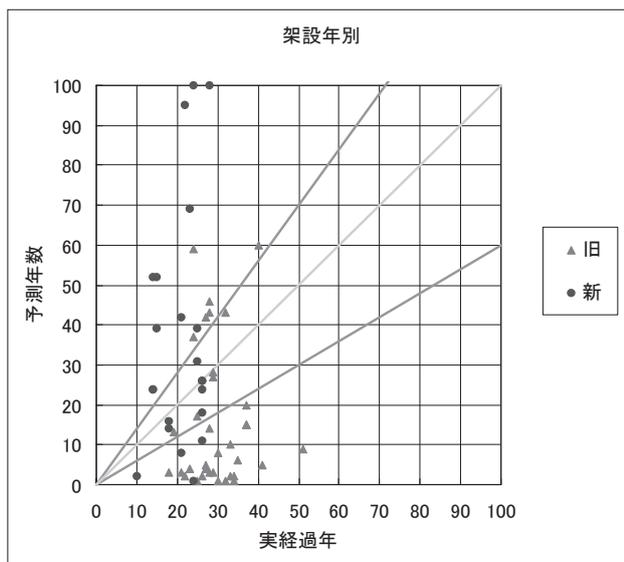


図-3.2.5 架設年別集計

##### ② 床版厚

床版厚で区分した実経過年と予測年数の関係を、図-3.2.6に示す。床版厚が「薄」い点は予測年数が小さく下側に分布しているのに対し、床版厚が「厚」い点は予測年数が大きく上側に分布している。床版厚が「並」の点は全体に及んでおり、特徴は見られない。

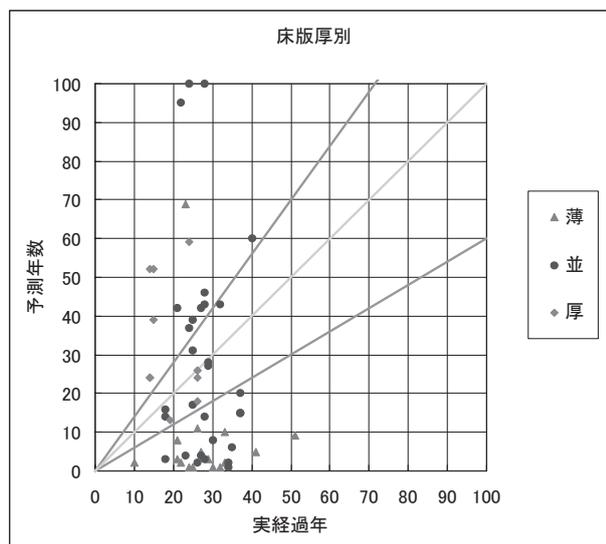


図-3.2.6 床版厚別集計

##### ③ 大型車交通量

大型車交通量で区分した実経過年と予測年数の関係を、図-3.2.7に示す。交通量による分布に傾向は見られない。

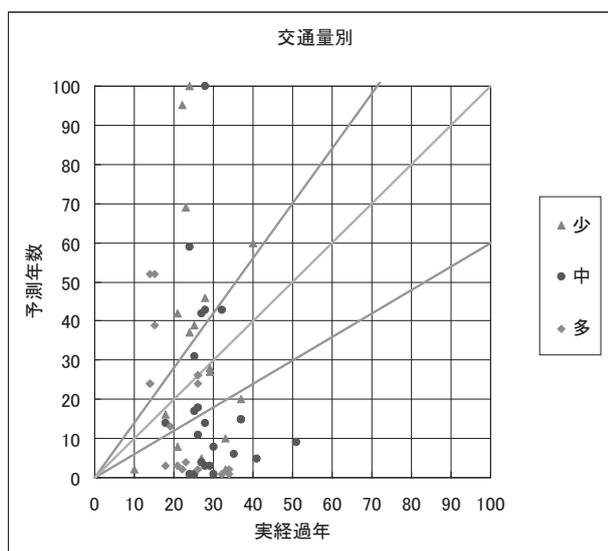


図-3.2.7 交通量別集計

#### ④床版支間

架設年の新・旧別に、床版支間で区分した実経過年と予測年数の比較を、図-3.2.8、図-3.2.9にそれぞれ示す。

架設年が「旧」の場合、床版支間の短い▲は予測年数が小さい下側に分布している。

架設年が「新」の場合、床版支間の短い▲は予測年数が小さい下側に分布しており、床版支間の長い◆は予測年数の大きい上側に分布しているのがわかる。

「新」「旧」をまとめて、図-3.2.10、表-3.2.9に示す。図の上下の線以内（誤差40%以内）の橋梁は全体の22%である。

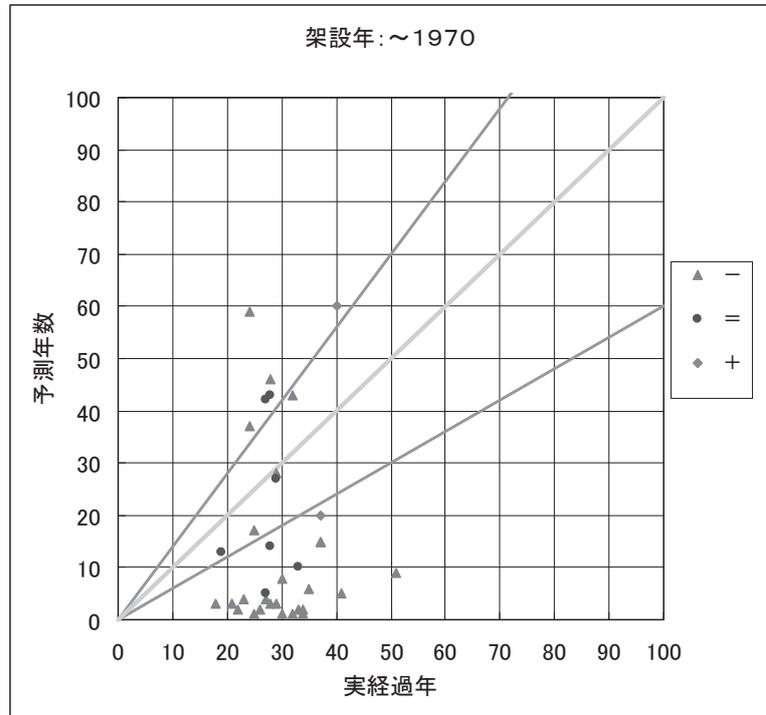


図-3.2.8 旧の床版支間別集計

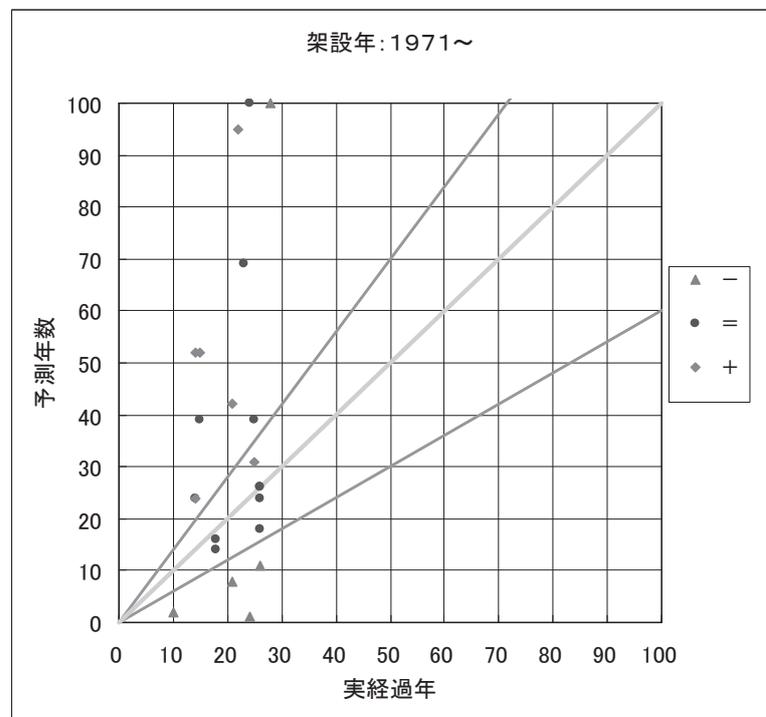


図-3.2.9 新の床版支間別集計

- ▲ : 支間短い
- : 支間中
- ◆ : 支間長い

(5) 今後の課題

今後さらに、予測精度を向上させるための検討を進める必要がある。

参考に、検討状況を次に示す。

○補正係数の設定

(4) の分析はマイナー12乗則(松井ら)の式によって行っており、それには床版支間Lは考慮されていない。鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式(土木学会論文集第348号/V-1 1984年8月<sup>13)</sup>)の論文によれば、支持スパン長(L)の載荷板長(a)に対する比が4以下の場合、せん断耐荷力式に修正提案式を適用している。また、床版支間と床版厚との比(L/t)をパラメータにとると、L/tが小さくなると破壊形式がせん断圧縮破壊となり、破壊強度は大きくなる。一方、L/tが大きくなると曲げ破壊が卓越してくるため破壊強度は低下すると考えられる。そこで、床版支間と床版厚による補正を試みることにする。

補正の方法は、床版支間と床版厚による補正係数(表-3.2.8参照)をせん断破壊強度 $P_{sx}$ に乗じることにより行うこととする。

この補正係数で補正したケースを図-3.2.11、表-3.2.10に示す。実経過年と予測年数の誤差が40%以内に入る橋梁は44%となり、床版支間長の補正により予測精度が向上したことが確認できる。

表-3.2.8 床版支間長による補正係数

架設年：S45以前

床版厚(cm)	$L-La < -0.2$	$-0.2 \leq L-La \leq 0.2$	$0.2 \leq L-La$
t=15	1.25	1.0	1.0
t=16			
t=17			
t=18	1.00		
t=19			
t=20			
t=21			

架設年：S46以降

床版厚(cm)	$L-La < -0.2$	$-0.2 \leq L-La \leq 0.2$	$0.2 \leq L-La$
t=15	1.05	1.0	1.0
t=16			
t=17			
t=18	1.00	1.0	0.95
t=19			
t=20	1.00	1.0	0.9
t=21			

注：Lは床版支間(m)。

Laは想定床版支間(m)であり、表-3.2.6から求める。

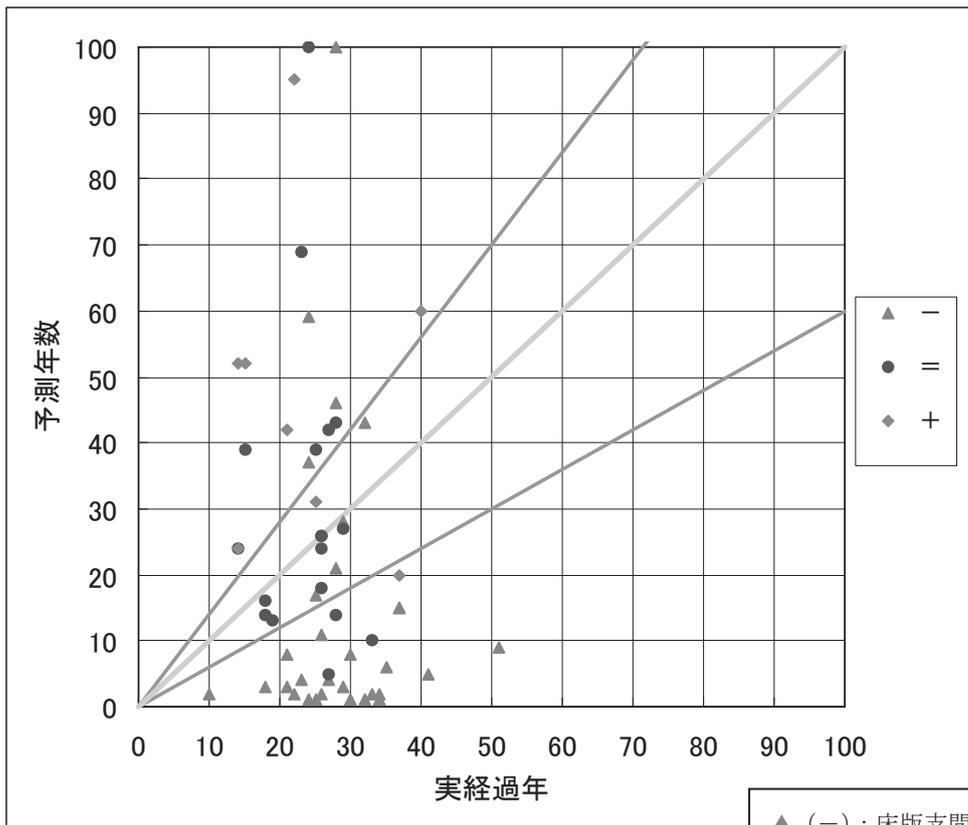


図-3.2.10 床版支間別集計

- ▲ (-) : 床版支間短い
- (=)
- ◆ (+) : 床版支間長い

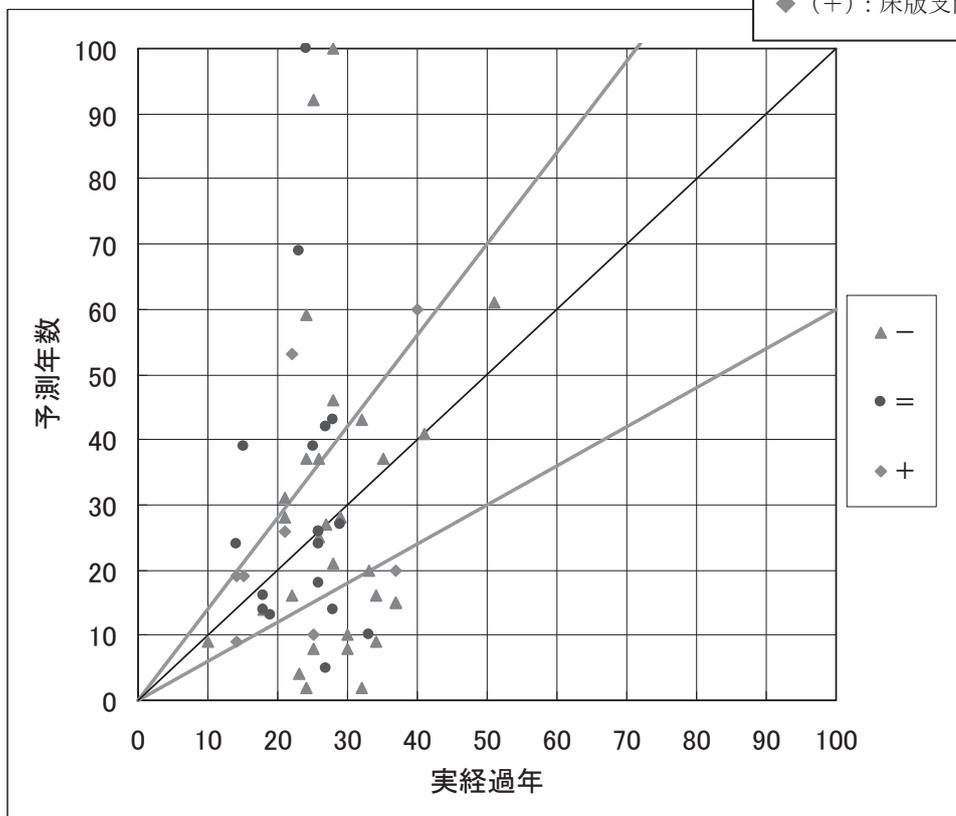


図-3.2.11 補正係数を設定した場合の床版支間別集計

表-3.2.9 補正無しの場合

	名称	実経過年	予測年数	誤差	床版厚さ (cm)	架設 竣工年	床版支間 L(m)	想定床版支間 La(m)	L-La	交通量
1	A	35	6	-29	18.0	1961	2.30	3.30	-1.00	13399
2	B	41	5	-36	16.0	1955	1.60	3.00	-1.40	14793
3	C	51	9	-42	17.0	1951	2.80	3.20	-0.40	15228
4	D	30	8	-22	19.0	1964	3.00	3.50	-0.50	16878
5	E	28	14	-14	18.0	1963	3.45	3.30	0.15	16093
6	F	28	21	-7	19.0	1963	3.20	3.50	-0.30	23104
7	G	26	24	-2	20.0	1973	2.90	2.90	0.00	52595
8	H	19	13	-6	20.0	1964	4.00	3.80	0.20	39500
9	I	15	52	37	20.0	1972	3.45	2.90	0.55	33926
10	J	14	24	10	20.0	1973	3.45	2.90	0.55	52595
11	K	26	2	-24	18.0	1968	2.90	3.30	-0.40	52595
12	L	23	4	-19	19.0	1965	2.10	3.50	-1.40	42269
13	M	22	2	-20	17.0	1962	2.90	3.20	-0.30	38000
14	N	26	26	0	20.0	1973	2.90	2.90	0.00	33926
15	N	26	26	0	20.0	1973	2.90	2.90	0.00	33926
16	O	21	3	-18	17.0	1964	2.80	3.20	-0.40	39500
17	P	15	39	24	20.0	1974	2.90	2.90	0.00	39500
18	Q	27	4	-23	18.0	1961	2.30	3.30	-1.00	29629
19	R	14	24	10	20.0	1974	2.90	2.90	0.00	52595
20	S	14	52	38	20.0	1972	3.45	2.90	0.55	33926
21	T	32	1	-31	16.0	1964	1.86	3.00	-1.14	52595
22	U	18	3	-15	18.0	1968	3.00	3.30	-0.30	39500
23	V	25	17	-8	18.0	1966	2.45	3.30	-0.85	13287
24	W	18	14	-4	18.0	1973	2.45	2.40	0.05	13287
25	X	32	43	11	18.0	1964	3.00	3.30	-0.30	13876
26	Y	24	37	13	19.0	1967	3.20	3.50	-0.30	11835
27	Z	18	16	-2	19.0	1978	2.40	2.60	-0.20	9800
28	AA	28	43	15	18.0	1968	3.25	3.30	-0.05	13331
29	AB	27	42	15	18.0	1969	3.20	3.30	-0.10	13331
30	AC	27	5	-22	16.0	1968	3.10	3.00	0.10	10333
31	AD	21	8	-13	16.0	1974	1.00	2.00	-1.00	10333
32	AE	33	2	-31	15.0	1963	1.52	2.80	-1.28	10247
33	AF	24	59	35	20.0	1970	2.70	3.80	-1.10	12843
34	AG	29	3	-26	17.0	1969	2.60	3.20	-0.60	18390
35	AH	26	11	-15	17.0	1976	1.80	2.20	-0.40	15315
36	AI	26	18	-8	20.0	1972	2.75	2.90	-0.15	15315
37	AJ	25	31	6	19.0	1977	3.60	2.60	1.00	20078
38	AK	28	46	18	19.0	1970	2.25	3.50	-1.25	10370
39	AL	28	100	72	19.0	1974	2.30	2.60	-0.30	18348
40	AM	30	1	-29	16.0	1968	1.00	3.00	-2.00	20426
41	AN	37	15	-22	19.0	1961	1.70	3.50	-1.80	23818
42	AO	37	15	-22	19.0	1961	1.70	3.50	-1.80	23818
43	AP	29	28	-1	19.0	1968	2.49	3.50	-1.01	11597
44	AQ	33	10	-23	17.0	1962	3.00	3.20	-0.20	10309
45	AR	24	1	-23	16.0	1977	0.98	2.00	-1.02	21135
46	AS	10	2	-8	16.0	1987	1.00	2.00	-1.00	10633
47	AT	40	60	20	19.0	1949	5.50	3.50	2.00	9279
48	AU	37	20	-17	18.0	1964	9.70	3.30	6.40	11903
49	AV	21	42	21	18.0	1974	3.50	2.40	1.10	9244
50	AW	29	27	-2	18.0	1968	3.25	3.30	-0.05	11244
51	AX	22	95	73	18.0	1975	3.25	2.40	0.85	11244
52	AY	34	1	-33	18.0	1968	2.10	3.30	-1.20	42269
53	AZ	34	2	-32	18.0	1968	2.10	3.30	-1.20	42269
54	CA	24	100	76	19.0	1972	2.40	2.60	-0.20	9800
55	CB	23	69	46	17.0	1973	2.00	2.20	-0.20	9800
56	CC	25	1	-24	16.0	1969	1.65	3.00	-1.35	23513
57	CD	25	39	14	19.0	1971	2.60	2.60	0.00	10650

表-3.2.10 補正係数を設定した場合

	名称	実経過年 A	予測年数 B	誤差 B/A	床版厚さ (cm)	架設 竣工年	床版支間 L(m)	想定床版支間 La(m)	L-La	交通量	疲労損傷度
1	A	35	37	1.0571	18.0	1961	2.30	3.30	-1.00	13399	0.70
2	B	41	41	1.0000	16.0	1955	1.60	3.00	-1.40	14793	0.70
3	C	51	61	1.1961	17.0	1951	2.80	3.20	-0.40	15228	0.50
4	D	30	8	0.2667	19.0	1964	3.00	3.50	-0.50	16878	0.35
5	E	28	14	0.5000	18.0	1963	3.45	3.30	0.15	16093	0.50
6	F	28	21	0.7500	19.0	1963	3.20	3.50	-0.30	23104	0.50
7	G	26	24	0.9231	20.0	1973	2.90	2.90	0.00	52595	0.50
8	H	19	13	0.6842	20.0	1964	4.00	3.80	0.20	39500	0.70
9	I	15	19	1.2667	20.0	1972	3.45	2.90	0.55	33926	0.50
10	J	14	9	0.6429	20.0	1973	3.45	2.90	0.55	52595	0.50
11	K	26	25	0.9615	18.0	1968	2.90	3.30	-0.40	52595	0.50
12	L	23	4	0.1739	19.0	1965	2.10	3.50	-1.40	42269	0.50
13	M	22	16	0.7273	17.0	1962	2.90	3.20	-0.30	38000	0.70
14	N	26	26	1.0000	20.0	1973	2.90	2.90	0.00	33926	0.35
15	N	26	26	1.0000	20.0	1973	2.90	2.90	0.00	33926	0.35
16	O	21	31	1.4762	17.0	1964	2.80	3.20	-0.40	39500	0.50
17	P	15	39	2.6000	20.0	1974	2.90	2.90	0.00	39500	0.50
18	Q	27	27	1.0000	18.0	1961	2.30	3.30	-1.00	29629	0.50
19	R	14	24	1.7143	20.0	1974	2.90	2.90	0.00	52595	0.50
20	S	14	19	1.3571	20.0	1972	3.45	2.90	0.55	33926	0.50
21	T	32	2	0.0625	16.0	1964	1.86	3.00	-1.14	52595	0.35
22	U	18	14	0.7778	18.0	1968	3.00	3.30	-0.30	39500	0.50
23	V	25	92	3.6800	18.0	1966	2.45	3.30	-0.85	13287	0.50
24	W	18	14	0.7778	18.0	1973	2.45	2.40	0.05	13287	0.50
25	X	32	43	1.3438	19.0	1964	3.00	3.30	-0.30	13876	0.50
26	Y	24	37	1.5417	19.0	1967	3.20	3.50	-0.30	11835	0.50
27	Z	18	16	0.8889	19.0	1978	2.40	2.60	-0.20	9800	0.35
28	AA	28	43	1.5357	18.0	1968	3.25	3.30	-0.05	13331	0.50
29	AB	27	42	1.5556	18.0	1969	3.20	3.30	-0.10	13331	0.50
30	AC	27	5	0.1852	16.0	1968	3.10	3.00	0.10	10333	0.50
31	AD	21	28	1.3333	16.0	1974	1.00	2.00	-1.00	10333	0.35
32	AE	33	20	0.6061	15.0	1963	1.52	2.80	-1.28	10247	0.35
33	AF	24	59	2.4583	20.0	1970	2.70	3.80	-1.10	12843	0.50
34	AG	29	28	0.9655	17.0	1969	2.60	3.20	-0.60	18390	0.35
35	AH	26	37	1.4231	17.0	1976	1.80	2.20	-0.40	15315	0.50
36	AI	26	18	0.6923	20.0	1972	2.75	2.90	-0.15	15315	0.35
37	AJ	25	10	0.4000	19.0	1977	3.60	2.60	1.00	20078	0.15
38	AK	28	46	1.6429	19.0	1970	2.25	3.50	-1.25	10370	0.50
39	AL	28	100	3.5714	19.0	1974	2.30	2.60	-0.30	18348	0.35
40	AM	30	10	0.3333	16.0	1968	1.00	3.00	-2.00	20426	0.35
41	AN	37	15	0.4054	19.0	1961	1.70	3.50	-1.80	23818	0.35
42	AO	37	15	0.4054	19.0	1961	1.70	3.50	-1.80	23818	0.35
43	AP	29	28	0.9655	19.0	1968	2.49	3.50	-1.01	11597	0.35
44	AQ	33	10	0.3030	17.0	1962	3.00	3.20	-0.20	10309	0.35
45	AR	24	2	0.0833	16.0	1977	0.98	2.00	-1.02	21135	0.50
46	AS	10	9	0.9000	16.0	1987	1.00	2.00	-1.00	10633	0.35
47	AT	40	60	1.5000	19.0	1949	5.50	3.50	2.00	9279	0.50
48	AU	37	20	0.5405	18.0	1964	9.70	3.30	6.40	11903	0.50
49	AV	21	26	1.2381	18.0	1974	3.50	2.40	1.10	9244	0.15
50	AW	29	27	0.9310	18.0	1968	3.25	3.30	-0.05	11244	0.70
51	AX	22	53	2.4091	18.0	1975	3.25	2.40	0.85	11244	0.50
52	AY	34	9	0.2647	18.0	1968	2.10	3.30	-1.20	42269	0.35
53	AZ	34	16	0.4706	18.0	1968	2.10	3.30	-1.20	42269	0.70
54	CA	24	100	4.1667	19.0	1972	2.40	2.60	-0.20	9800	0.50
55	CB	23	69	3.0000	17.0	1973	2.00	2.20	-0.20	9800	0.50
56	CC	25	8	0.3200	16.0	1969	1.65	3.00	-1.35	23513	0.35
57	CD	25	39	1.5600	19.0	1971	2.60	2.60	0.00	10650	0.50

### 3. 3 鋼部材の塗装劣化・腐食の劣化予測

#### 3. 3. 1 健全度

鋼部材の塗装劣化・腐食の健全度を予測する対象は、鋼部材の塗膜劣化から腐食に至る一連の劣化過程のうち、部材全体に平均的に進行する劣化のみとした。漏水、滞水等により比較的厳しい腐食環境にある桁端部や支承部周辺に見られるような局所的な劣化については、本システムから離れて、個別に評価、対応を行う必要がある。

「鋼橋塗膜調査マニュアル、(社)日本鋼構造協会」<sup>14)</sup>によると、外観状態とさび発生面積との対応について表-3.3.1が示されている。

表-3.3.1 さび発生面積と塗膜劣化レベル<sup>14)</sup>

評価点 (RN)	発生状態		さび発生限界標準図
	発生面積(%)	外観状態	
3	$X < 0.03$	異常なし。 誰が見ても外観的にはさびが認められないか、さびらしきものがあったとしても無視し得る程度のも	
2	$0.03 \leq X < 0.3$	僅かにさびが見られる。 さびが観測される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると思われる状態。	
1	$0.3 \leq X < 5.0$	明らかにさびが見られる。 誰が見ても発錆部分が多く、何らかの処置をほどこさなければならない状態。	
0	$5.0 \leq X$	見かけ上ほぼ全面にわたってさびが見られる。早急に塗料を塗り直さなければならない状態。	

評価点 (RN) の内容

評価点	内容
3	異常又は劣化が全く認められないか、もしあったとしても極めて局所的でしかも微小なため、塗膜の機能から無視し得る程度のも。
2	異常又は劣化はやや見られるが、塗膜機能は維持している。
1	異常又は劣化は相当進み、塗膜は機能の極限に達しているか、すでに越えている。
0	異常又は劣化が進み、塗膜の存在価値を失っている。

本システムではこれを参考に、健全度ランクは、鋼部材の塗装の劣化過程毎に、表-3.3.2に示すとおりに設定した。

劣化予測に用いる定量的な値は、さび発生面積とした。

表-3.3.2 鋼部材の塗装劣化に対する健全度区分

劣化過程	健全度 ランク	定量的な値による評価	劣化状態
		さび発生面積 (%)	
1. 健全	I、II	$X < 0.03$	異常なし。 誰が見ても外観的にはさびが認められないか、さびらしきものがあったても無視し得る程度のもの
2. 点さび発生	III	$0.03 \leq X < 0.3$	僅かにさびが見られる。 さびが観測される部分以外の塗膜の防食性能はほぼ維持されていると思われる状態。
3. 全面点さび 4. 防錆効果の失効	IV	$0.3 \leq X < 5.0$	明らかにさびが見られる。 誰が見ても発錆部分が多く、何らかの処置を施さなければならない状態。
5. 全面さび	V	$5.0 \leq X$	見かけ上ほぼ全面にわたってさびが見られる。早急に塗料を塗り直さなければならない状態。

### 3. 3. 2 劣化予測モデル

鋼部材の塗装劣化・腐食に関する予測モデルは、統計データが比較的多く揃っていることから統計分析を用い、さび発生面積 0.03%、0.3%、5.0%となる経過年数を直線式で設定する。図-3.3.1 に劣化予測モデルを示す。

#### ①さび発生面積が 0.03%に達する t1 年

後述の定期点検結果の分析結果から得られた、塩害地域以外で一般塗装系の平均経過年数を用い、次式にて設定する。

定期点検結果の分析結果

- ・さび発生面積が 0.03%に達する年数… 6 年
- ・さび発生面積が 0.3%に達する年数… 11 年

→ さび発生面積が 0.3%に達する年数 t2 年 (②) の 6/11 年目とする。

#### ②さび発生面積が 0.3%に達する t2 年

塗装の塗替え時期と考えられるため、後述の定期点検結果の分析結果及び塗装に関する文献を参考に設定する。

#### ③さび発生面積が 5.0%に達する t3 年

後述の定期点検結果の分析結果から得られた、塩害地域以外で一般塗装系の平均経過年数を用い、次式にて設定する。

定期点検結果の分析結果

- ・さび発生面積が 0.3%に達する年数… 11 年
- ・さび発生面積が 5.0%に達する年数… 15 年

→ さび発生面積が 0.3%に達する年数 t2 年 (②) の 15/11 年目とする。

以上の結果を、表-3.3.3 に示す。

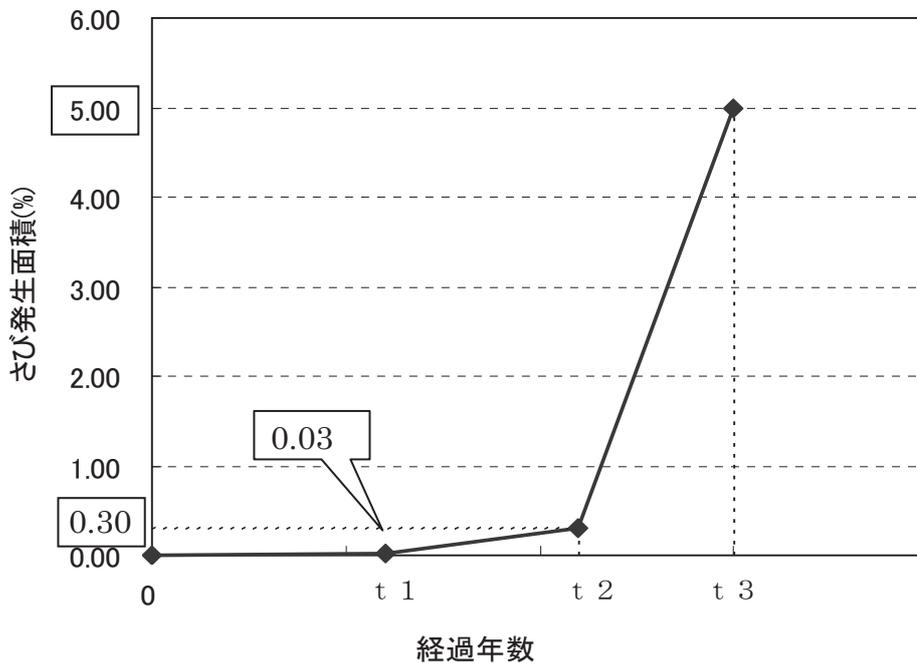


図-3.3.1 健全度（劣化）予測モデル

表-3.3.3 塗装系別塗替え間隔設定値

塗装仕様	t 1		t 2		t 3	
	塩害地域以外	塩害地域	塩害地域以外	塩害地域	塩害地域以外	塩害地域
一般塗装系 (A,B 塗装系)	8 年	適用外	15 年	適用外	21 年	適用外
重防食塗装系 (C 塗装系、ふっ素樹脂塗装)	27 年	16 年	50 年	30 年	68 年	41 年

### 3. 3. 3 現状健全度に対する定量的な値の特定

現状の健全度ランクは、表-3.3.2 の劣化状態から求めることができる。将来の劣化を予測するためには、現状における定量的な値を算出する必要があり、この算出方法は次のとおりとする。

- ・定期点検結果における「腐食」及び「防食機能の劣化」の損傷の程度を、表-3.3.4 によりさび発生面積に変換する。なお、「腐食」及び「防食機能の劣化」の両方の損傷がある場合は、「腐食」を優先する。

表-3.3.4 定期点検結果のさび発生面積への変換方法(腐食・防食機能の劣化)

損傷の種類	区分	H16 定期点検における 損傷程度の区分		さび発生面積 への変換
		損傷の深さ	損傷の面積	
腐食	b	小	小	0.0%
	c	小	大	0.0%
	d	大	小	5.0%
	e	大	大	
防食機能の劣化	c	—	—	0.0%
	c	—	—	0.0%
	d	—	—	0.03%
	e	—	—	0.3%

注：直近の点検が S63 定期点検の場合は、次に示す対応表を用い、H16 定期点検への変換を行う。

定期点検結果の対応表

S63 定期点検				H16 定期点検
損傷の種類	Y	Z	判定	損傷程度の区分
腐食	小	小	III	b
	小	大	II	c
	大	小	II	d
	大	大	II	e
塗装劣化	小	小	OK	c
	小	大	IV	c
	大	小	IV	d
	大	大	III	e

### 3. 3. 4 将来健全度の評価フロー

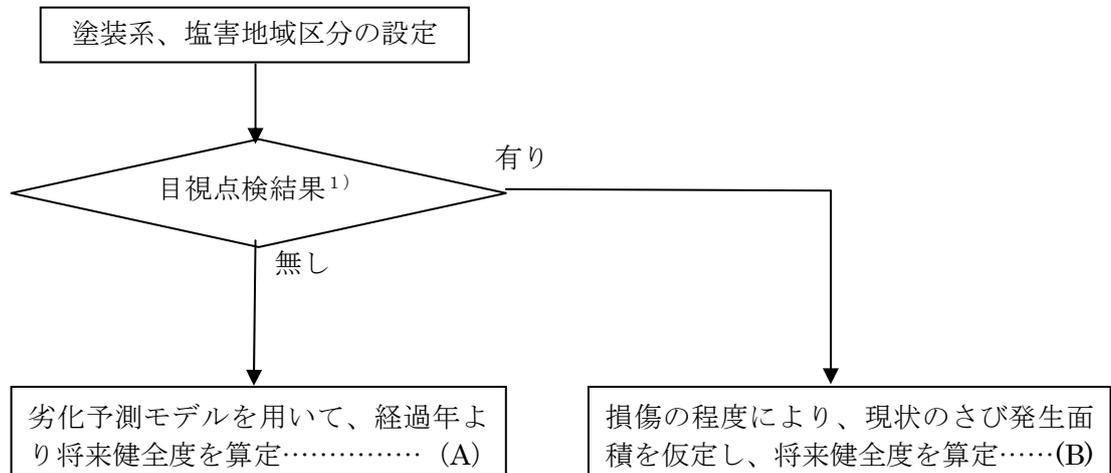
図-3.3.2 のフローにしたがい、将来健全度評価を行う。

まず、塗装系、塩害地域区分の確認を行う。

そして、目視点検の有無を確認し、無しの場合（直轄では定期点検を実施しており、このケースは極稀である。）は（A）のフローに進む。有りの場合は、（B）のフローに進む。

（A）のフローは、点検結果がない場合であり、塗装の劣化状況からさび発生面積を求めることができないことから、劣化予測モデルをそのまま用いて将来予測を行うものである。

（B）のフローは、防食機能の劣化及び腐食の点検結果から、点検時のさび発生面積を求め、その値と劣化予測モデルから計算される値が一致するよう、劣化モデルを修正する（傾きは変えず、平行移動する。）。補正した劣化モデルにて、将来予測を行う。



1) 定期点検など、近接目視により損傷度を判定する点検

図-3.3.2 塗装の劣化・腐食の健全度評価フロー(start)

(A) 劣化予測モデルをそのまま用いて、経過年より将来健全度を算定

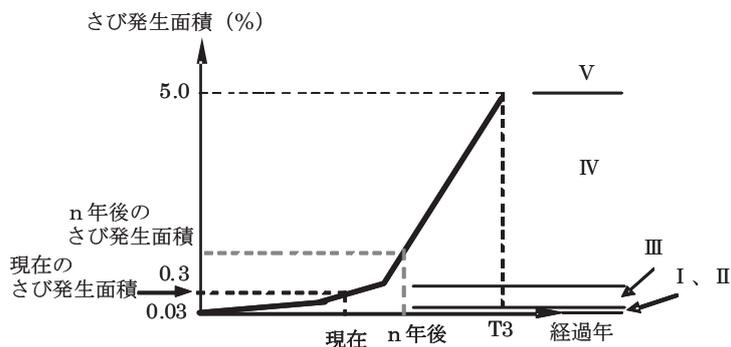


図-3.3.2 塗装の劣化・腐食の健全度評価フロー(A)

(B) 定期点検結果から得られたデータを用いて点検時健全度を一致させた後、将来健全度を算定

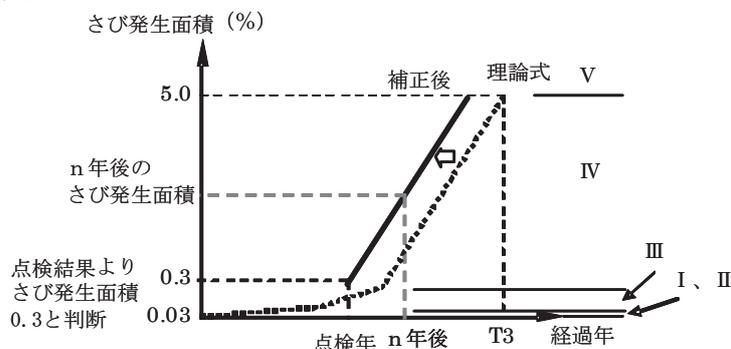


図-3.3.2 塗装の劣化・腐食の健全度評価フロー(B)

### 3. 3. 5 劣化モデルの設定根拠

#### (1) 定期点検結果の分析

分析は、定期点検結果の定性的評価をさび発生面積に変換して統計処理することにより行うこととした。なお、統計処理では、データの多い S63 定期点検結果を用いた。表-3.3.5 に点検結果をさび発生面積へ変換する関係を示す。

表-3.3.5 S63 定期点検結果のさび発生面積への変換

塗装劣化	(小 大)	→	さび発生面積 0.03%
〃	(大 大)	→	〃 0.3%
腐食	(小 大)	→	〃 5.0%
	(深さ 拡がり)		

#### ①対象データの検討

統計処理の対象データは、以下のとおりとする。

ア)対象部材：主桁、横桁、縦桁

1)対象損傷：塗装劣化、腐食

2)塗装劣化あるいは腐食の損傷が確認されているデータ

3)塗装履歴のあるデータ

ただし、再塗装が実施されているにもかかわらずデータが未入力場合は塗装後の経過年数を過大評価する可能性があるため、塗装履歴の明確なデータのみを対象とした。

4)スパン単位の損傷データ（スパン内で最も損傷度の高い点検結果を代表値とする。）

表-3.3.6 に、塗装系と塩害地域区分の категорияで分類して、塗装劣化及び腐食それぞれの点検データ数（すべての判定区分について）を示す。

表-3.3.6 カテゴリー分類した点検データ数

評価部材	損傷の種類	塗装仕様	カテゴリー分類	点検データ数			
				総数	部材単位	スパン単位	
主桁、横桁、縦桁	塗装劣化	A	塩害地域	2,376	458	69	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	25,469	5,477	1,142
				凍結防止剤散布なし			
			小計	27,845	5,935	1,211	
		B	塩害地域	68	17	6	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	4,073	783	69
				凍結防止剤散布なし			
			小計	4,141	800	75	
		C	塩害地域	36	6	2	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	4	3	1
				凍結防止剤散布なし			
			小計	40	9	3	
	合計	32,026	6,744	1,289			
	腐食	A	塩害地域	3,367	737	104	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	28,194	7,245	1,677
				凍結防止剤散布なし			
			小計	31,561	7,982	1,781	
		B	塩害地域	1,117	207	18	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	3,252	927	160
				凍結防止剤散布なし			
			小計	4,369	1,134	178	
		C	塩害地域	69	15	3	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	88	14	2
				凍結防止剤散布なし			
小計			157	29	5		
合計	36,087	9,145	1,964				

さらに、これらのうち以下の判定区分に該当し、かつ塗装履歴のあるデータのみを集計した結果を表-3.3.7に示す。

- ・ 塗装劣化（大、大）
- ・ 腐食（小、大）

分析は、ある程度統計分析可能なデータ数のある、塩害地域以外、A、B塗装系で実施することとした。

表-3.3.7 カテゴリー分類した点検データ数（塗装履歴あり）

評価部材	損傷の種類	塗装仕様	カテゴリー分類	点検データ数		点検データ数 (塗装履歴あり)		
				部材単位	スパン単位	部材単位	スパン単位	
主桁、横桁、縦桁	塗装劣化 (大、大)	A	塩害地域	14	8	0	0	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	668	121	258	43
				凍結防止剤散布なし				
			小計	682	129	258	43	
		B	塩害地域	8	5	0	0	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	77	8	0	0
				凍結防止剤散布なし				
			小計	85	13	0	0	
		C	塩害地域	0	0	0	0	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	0	0	0	0
				凍結防止剤散布なし				
			小計	0	0	0	0	
	合計	767	142	258	43			
	腐食 (小、大)	A	塩害地域	22	3	19	1	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	351	83	110	15
				凍結防止剤散布なし				
			小計	373	86	129	16	
		B	塩害地域	22	5	0	0	
			塩害地域外	凍結防止剤散布あり	3	2	3	2
				凍結防止剤散布なし				
小計			25	7	3	2		
C		塩害地域	0	0	0	0		
		塩害地域外	凍結防止剤散布あり	0	0	0	0	
			凍結防止剤散布なし					
		小計	0	0	0	0		
合計	398	93	132	18				

## ②点検データの分析結果

対象部材は主桁、塩害地域以外、一般塗装系（A、B塗装系）の分析結果を、図-3.3.3から図-3.3.5に示す。

各さび発生面積が発生する平均経過年数及び標準偏差は次のとおりとなった。

- ・さび発生面積 0.03%  
平均経過年数=12.0年 標準偏差=5.6年
- ・さび発生面積 0.3%  
平均経過年数=10.5年≒11年 標準偏差=7.5年
- ・さび発生面積 5.0%  
平均経過年数=14.9年≒15年 標準偏差=8.3年

設定した  $t_2=15$  年に比べ、平均は 11 年と、やや短い期間という結果であった。

また、3.3.2において、さび発生面積 0.03%、5.0%に達する年数の推計に用いた「さび発生面積 0.03%」に達する年数は、次のとおりとした。

- ・平均経過年数 12 年は、0.3%となる平均経過年数 11 年より長く、整合がとれないため、1 標準偏差を差し引き、 $12 \text{年} - 5.6 \text{年} = 6.4 \text{年} \rightarrow 6 \text{年}$ とした。

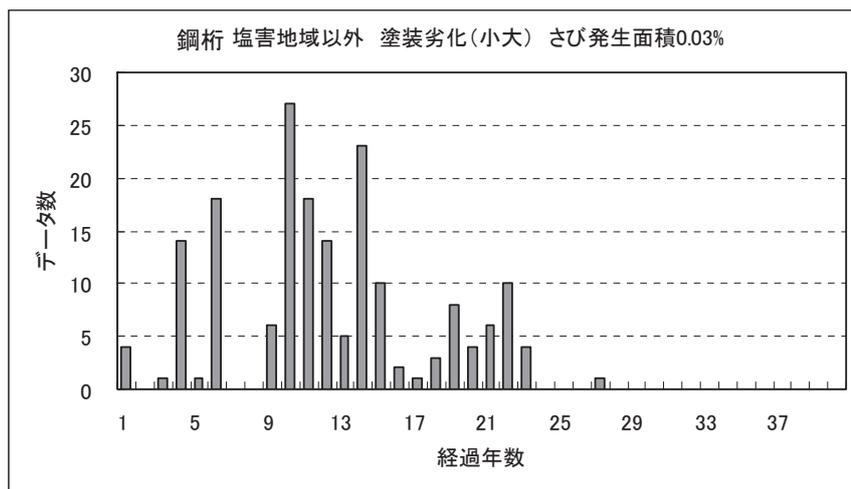


図-3.3.3 さび発生面積 0.03%の経過年数分布

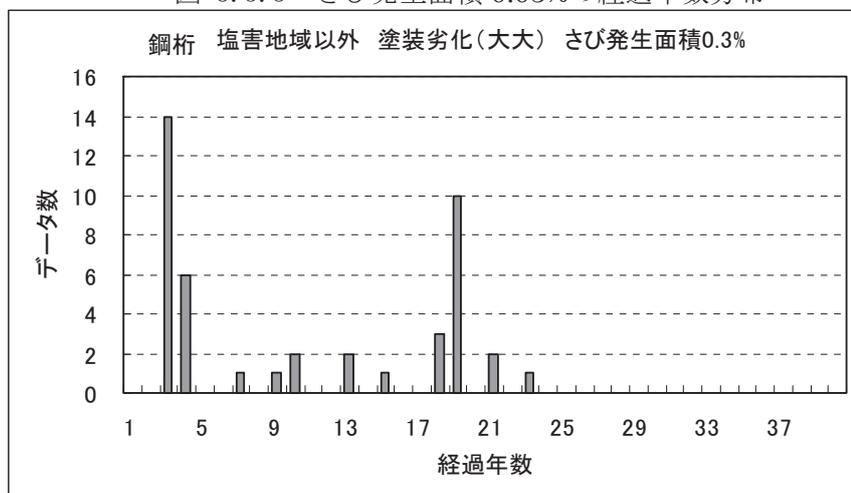


図-3.3.4 さび発生面積 0.3%の経過年数分布

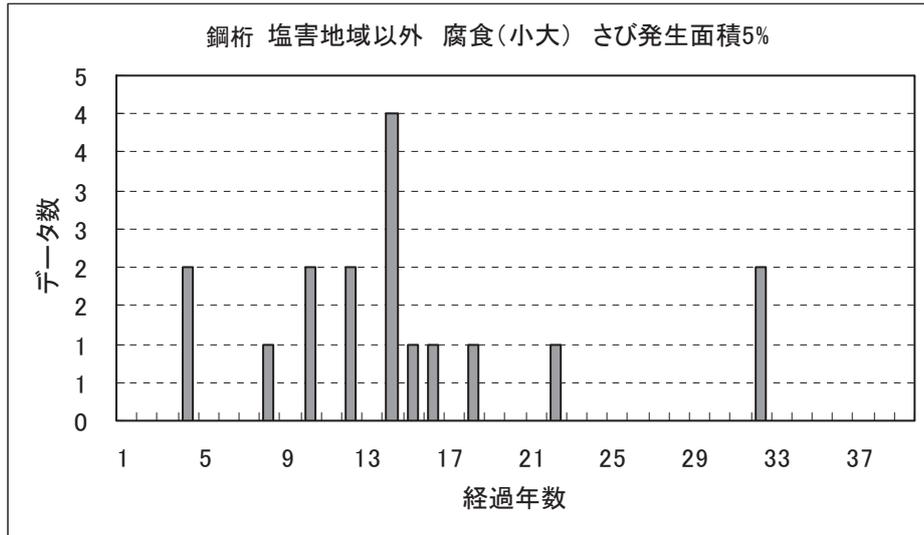


図-3.3.5 さび発生面積 5%の経過年数分布

(2) 推定耐久年数 ((社) 日本橋梁建設協会推定)

表-3.3.8 に塗装系別推定耐久年数を示す。設定した一般塗装系の t2 は、A系では一般環境に、B系塗装ではやや厳しい環境に、C系塗装の塩害地域以外では一般環境とやや厳しい環境の中間に、C系塗装の塩害地域では厳しい環境に相当する。

表-3.3.8 塗装系別推定耐久年数<sup>15)</sup>

初期仕様		A-1	B-1	C-1	C-2 (全工場塗装)	C-4 (全工場塗装)	I: 薄膜形重防食 (全工場塗装)
塗替え仕様		a-1	b-1	c-1	c-1	c-3	c-1
塗装名称		長油性フタル酸樹脂塗装	塩化ゴム系塗装	ポリウレタン樹脂塗装	ポリウレタン樹脂塗装	ふっ素樹脂塗装	ポリウレタン樹脂塗装
環境	一般環境 (山間部)	15年	20年	40年	40年	60年	30年
	やや厳しい環境 (市街地部)	10年	15年	30年	30年	45年	20年
	厳しい環境 (海岸部)	—	10年	20年	20年	30年	—

(3) 期待耐用年数 ((社) 日本鋼構造協会推定)

表-3.3.9 に塗装系の期待耐用年数を示す。設定した t2 は、一般塗装系では少し長い期間となっており、重防食塗装系では一致している。

表-3.3.9 塗装系の期待耐用年数<sup>16)</sup>

		一般環境	厳しい腐食環境
一般塗装系		10年	適用外
重防食塗装系	ポリウレタン樹脂塗装系	30年	20年
	LCC 低減重防食塗装系 (ふっ素樹脂塗料)	50年	30年

(4) 塗替え実績調査結果 ((社) 日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会)

表-3.3.10 に環境、前回塗装系別塗替え周期を示す。設定した一般塗装系の  $t_2=15$  年に対する平均塗替え間隔は、13年～14年である。

### 5. 塗替え周期

平成11年度に会員が受注した塗装工事報告書より、前回の塗装履歴のあきらかなもの62件(表-50 発注者別有効件数)について、前回塗装からの年数を調べ、環境、前回塗装系別に整理したものを表-51に示す。

下表のとおり、有効件数62件と少なく統計値として満足できるものではないので参考程度として示す。

表-50 発注者別有効件数

	発注者	有効件数	発注者	有効件数
	国土交通省	東北地整	1	沖縄総合事務局
関東地整		4	日本道路公団	10
中部地整		2	首都高速道路公団	4
北陸地整		4	阪神高速道路公団	0
近畿地整		1	本州四国連絡橋公団	0
中国地整		10	名古屋高速道路公社	1
四国地整		2	福岡・北九州高速道路公社	2
九州地整		17		
北開発局		2		
合計		43	合計	19
		総合計		62

※地整→地方整備局、北開発局→北海道開発局

表-51 環境、前回塗装系別塗替え周期(年)

環境 塗装系	環境	環境1 (市街地)	環境2 (工場地帯)	環境3 (海岸)	環境4 (田園地帯)	環境5 (山間部)	環境6 (海上)	平均年数
	前回 塗装系 (件数)	A	14	—	1	6	10	—
B		10	—	11	3	2	1	14年5ヶ月
C		1	—	1	—	—	—	11年1ヶ月
平均年数		14年2ヶ月	—	13年4ヶ月	13年3ヶ月	14年11ヶ月	8年2ヶ月	13年11ヶ月

全国平均塗替え周期は13年11ヶ月であった。昨年は13年0ヶ月(有効件数47件)であり、若干延びている。

環境別に見ると、市街地は14年2ヶ月、海岸は13年4ヶ月、田園地帯は13年3ヶ月、山間部は14年11ヶ月、海上は8年2ヶ月であった。工場地帯のデータはなかった。

表-3.3.10 環境、前回塗装系別塗替え周期<sup>17)</sup>(上表では表-51)

### 3. 4 定期対策・定期交換を行う部材

本システムでは、定期対策・定期交換を実施する部材は、支承及び伸縮装置とした。

#### 3. 4. 1 健全度

支承、伸縮装置の健全度は、定期点検結果より変換した定量的な健全度指標（100 点満点）と対応付け、表-3.4.1 に示すとおりとした。

劣化予測に用いる定量的な値は、この健全度指標とした。

表-3.4.1 支承・伸縮装置の劣化に対する健全度区分

健全度ランク	定量的指標 R
I	$80 \leq R \leq 100$
II	$60 \leq R < 80$
III	$40 \leq R < 60$
IV	$20 \leq R < 40$
V	$0 \leq R < 20$

#### 3. 4. 2 劣化予測

支承・伸縮装置の劣化については、まず、定期点検結果に応じて表-3.4.2 に示す点数に換算する。なお、評価単位内において、複数の損傷が発生している場合は、最も低い結果を代表値として採用する。

表-3.4.2 支承、伸縮装置の定期点検結果による健全度評価

換算点数	鋼製支承、鋼製伸縮装置の損傷程度			
	破断	腐食	ゆるみ・脱落	亀裂
20	e			
60		e	e	e
80		d		
90		c	c	

換算点数	支承の機能障害
20	e : 支承が有すべき変位追随などの機能が損なわれている

換算点数	路面の凹凸（伸縮装置）
20	e : 路面に凹凸が生じており、段差量が 20mm 以上
90	c : 路面に凹凸が生じているが、段差量が 20mm 未満

次に、図-3.4.1 示す劣化予測モデルにより点検年での評価を行い、換算点数が 20 を下回る時期を算出する。

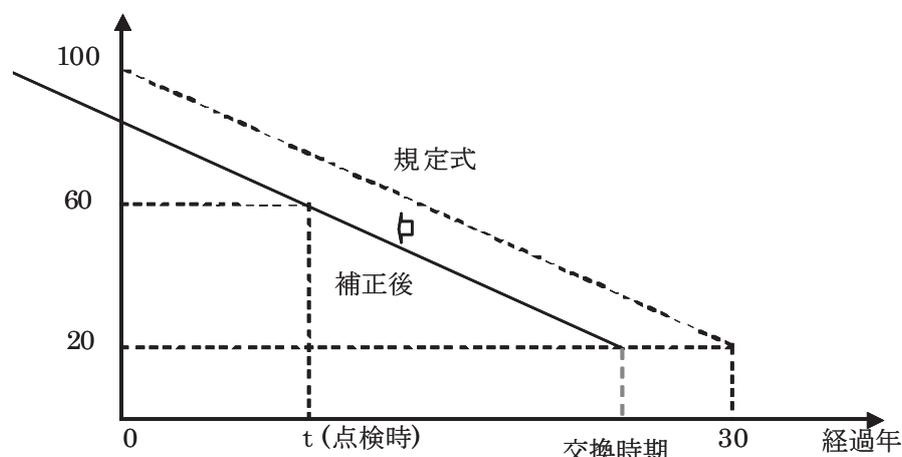


図-3.4.1 支承・伸縮装置の塩害の劣化予測モデル  
( $t$ 年で点検結果が腐食  $e$  の場合の例)

### 3. 4. 3 交換時期

3. 4. 2の換算点数が 20 を下回る時期に、交換する。

損傷がない場合の交換時期は、次のとおりとする。

#### ① 支承

1995年(平成7年)に発生した兵庫県南部地震以降に、

- ・「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説(案)」(平成7年2月)
- ・「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料(案)(平成7年6月)

の中で、支承については、「ゴム支承とすることが望ましく、可能な限り免震支承とすること」との記述がされた。

また、平成8年12月には、道路橋示方書・同解説V耐震設計編が上記復旧仕様を受け大幅に改訂された。その中で、ゴム支承については、橋梁の種類によりタイプA、タイプBに区分されている。タイプA及びタイプBのゴム支承は、ともに地震時水平力に対しせん断ひずみをもって抵抗する支承であり、半永久的(150~200年程度)な物性を有している(メーカーへのヒアリングによる。)。その結果、これらの支承は標準的な評価期間内には取替えることなく用いることができると考えられる。

以上より、本システムでは、支承の交換に関して次のように考えるものとする。

#### a)1995年以前に架設された橋梁について

- ・MICHIデータ上、ゴム製の支承はすべてゴムパッド型の支承として取扱う。  
→ 寿命を100年と仮定する。

#### b)1996年以降に架設された橋梁について

- ・すべての支承は、タイプA又はタイプBとして取り扱う。

→ 寿命を半永久的（150年）と仮定する。

支承の交換時期を表-3.4.4に示す。なお、鋼製支承の交換時期は、耐用年数をもとに設定している。

## ② 伸縮装置

伸縮装置の耐用年数は、（社）日本橋梁建設協会の推定値<sup>15)</sup>を参考に、表-3.4.4のとおりを設定した。

表-3.4.4 支承、伸縮装置の点検時に損傷が無い場合の交換時期

部材		交換時期
鋼製支承		30年
ゴム支承	パッド型	100年
	タイプ A、B	150年
ゴム製伸縮装置		30年
鋼製伸縮装置		30年

## 参考文献

- 1) 【2001年制定】コンクリート標準示方書[維持管理編]、土木学会
- 2) コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)、平成16年3月、国道・防災課
- 3) 建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書<第二編>、昭和63年11月、建設省
- 4) ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅱ) —コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討一、平成12年12月、建設省土木研究所共同研究報告書第258号
- 5) 【2002年制定】コンクリート標準示方書[施工編]、土木学会
- 6) 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説、昭和59年2月、(社)日本道路協会
- 7) 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編、平成14年3月、(社)日本道路協会
- 8) 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編、昭和53年1月、(社)日本道路協会
- 9) 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、JCI、1998
- 10) 関博：コンクリート部材の寿命予測・鉄筋の腐食を中心として、コンクリート工学、Vol29, No.8, 1991.
- 11) 道路橋床版の疲労耐久性に関する検討業務報告書、平成15年、国土技術政策総合研究所
- 12) 【2001年制定】コンクリート標準示方書[維持管理編]制定資料、土木学会
- 13) 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文集第348号/V-1、1984年8月
- 14) 鋼橋塗膜調査マニュアル、平成5年9月、(社)日本鋼構造協会
- 15) 鋼橋のライフサイクルコスト、平成13年10月、(社)日本橋梁建設協会
- 16) 鋼橋塗装 LCC 低減のために、平成14年8月、(社)日本鋼構造協会
- 17) 鋼道路橋塗装工事実態調査報告書(平成11年度)、平成13年3月、(社)日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会

## おわりに

本資料は、国土交通省が運用している橋梁マネジメントシステムのうち、劣化予測手法について取りまとめたものである。システムで用いられている劣化予測や劣化予測の対象については、現段階ではまだまだ改善の余地が大きいものであり、適用に際しては十分な注意が必要となる。

現在、H16 定期点検が概ね一巡しつつあるところであり、概ねの橋梁において S63 定期点検結果と H16 定期点検結果が揃い両者を対比することで損傷の進展状況等を分析することが可能となりつつある。これらのデータを詳細に分析し、例えば損傷が発生するまでの期間は理論式を、一旦損傷が発生した後は統計分析結果による式を適用するなどの劣化予測の精度向上、さらには予測可能な損傷の追加等の検討を行っているところである。

また、新設橋のコンクリートの塩害や RC 床版の疲労については、知見の蓄積を踏まえた対策が道路橋示方書で明記されており、各規定を遵守して造られていれば原則として損傷は生じないはずである。よって、点検により損傷の発生が認められない限り、劣化予測は不要とも考えられる。適用に際しての留意が必要である。

予防保全的な計画的維持管理を進めていくことが今後も求められている。BMS の予測結果を鵜呑みにすることなく、BMS の「できていること」と「できていないこと」の特徴をよくわきまえて便利なツールとして使いこなすことが求められ、当室としても今後とも改良を進めていく考えである。