

技術審議会
長期維持管理技術委員会(平成28年度 第1回)
平成29年 1月5日

維持管理計画に係るマネジメントシステム
高度化検討状況(劣化モデル検討)

- ① 従来の劣化モデルの考え方
- ② 大規模更新・修繕事業の対象箇所選定
- ③ 大規模修繕の劣化モデルの考え方
- ④ 対策方法と劣化モデルの考え方
- ⑤ PC桁の劣化モデル
- ⑥ RC床版の劣化モデル

従来の劣化モデルの考え方

□ 半永久的寿命を仮定した繰り返し補修劣化モデル

- 構造物の寿命は永続的であり、損傷補修を繰り返すことで構造物の性能を維持できると仮定
- 損傷の発生過程は一部構造物の諸元に依存するが、概ねランダムな過程として考えることができ、確率モデルで劣化モデルを構築
- マルコフ過程を前提として推移確率行列で劣化過程を表現

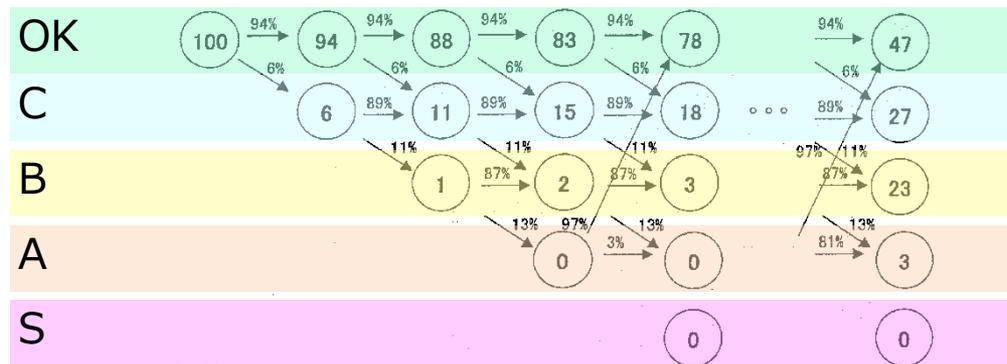


図 マルコフ過程に基づく確率的劣化モデルの概念図



構造物の寿命が有限とする大規模修繕・更新を検討するためには、劣化モデルの考え方を再整理する必要がある

大規模更新・修繕事業の対象箇所選定

大規模更新・修繕事業の対象箇所選定

- 大規模修繕・更新事業における対象箇所選定の考え方
 - 「基本選定条件」に基づき、対象箇所を一次選定

【基本選定条件】

- A) 再劣化と再補修を繰り返す構造物
- B) 再補修が困難な構造物
- C) 複合的な要因で機能回復が困難な構造物

構造種別	検討構造物	基本選定条件
基礎	鋼製フーチング	A)
橋脚	RC橋脚(ASR等)	B)
桁(コンクリート)	有ヒンジPC橋	A)
	PCポステン桁	A)
桁(鋼)	鋼桁(疲労損傷)	A)
	鋼桁(端部腐食)	A)
床組	RC床版(補強済み)	B)
	鋼床版(疲労損傷)	A)
橋梁	上下部構造(複合的な要因で機能低下)	C)

□ 大規模修繕・更新事業における対象箇所選定の考え方

- 一次選定した対象箇所について、構造形式や損傷の状況、立地条件等を踏まえて、「修繕対象」「更新対象」を選定
- 更新については、基本選定条件＋対象箇所個別の事情、で判断
- 修繕については、基本選定条件を踏まえ、適用示方書等で判断

大規模更新対象

対象構造(分類)	箇所	選定理由
鋼製 フーチング (A)	湊町	・地下街の上に位置し、荷重軽減のため鋼製基礎を採用 ・地下水の上昇により、常に乾湿状態を繰り返し、腐食が進行 ・点検補修困難
有ヒンジ PC橋 (A)	京橋 ・ 喜連 瓜破	・設計当初に想定された以上の変形が継続進行 ・今後、垂れ下がりの進行もしくは再進行が見込まれ、路面の段差が拡大
橋 梁 (C)	湊川	・狭隘な空間に建設するためコンパクトな鋼構造で、 <u>変形しやすく、疲労亀裂が多発</u>
	大豊橋	・兵庫県南部地震で被災したが、早期復旧のため補修し再利用 ・大阪万博に間に合わせるため、府道の橋梁の一部を阪神高速として再整備 ・路面の高低調整に用いたコンクリートの重量増は、当初設計時に考慮されておらず、 <u>床版や桁に損傷が多発</u>
	法円坂	・地下遺跡への影響軽減のため薄い鋼構造で、 <u>変形しやすく、疲労亀裂が多発</u>
補強済 RC床版 (B)		・S48より前の道示を適用した床版厚が薄い。 ・雨水浸入や荷重の繰返作用による砂利化 ・河川上での建設など施工条件が厳しい区間は、潜在的な品質に係る弱点を有する

大規模修繕対象

	選定対象構造		選定基準			
	構造種別	対象構造	道示・基準	損傷状況		
				選定単位	損傷内容	損傷の判定ランク
床版	RC床版	鋼板補強済み	【道示】S48より前	径間	補強鋼板の損傷(不良音・漏水)	潜在的弱点を有する径間 Aランク(更新) B・Cランク
	鋼床版(疲労)	Uリブ	【道示】H14より前	橋梁	鋼床版の損傷(疲労亀裂)	-
桁	PC桁	ポステン	【基準】S60より前	径間	主桁部の損傷(漏水・シース露出)	-
	鋼桁(疲労)	活荷重比の高い桁	【道示】S48より前	径間	-	-
	鋼桁(腐食)	桁端部	【基準】S54より前	梁上	桁端部の損傷	(繰返し発生) Aランク
脚	RC橋脚	柱・梁	-	脚	柱・梁の損傷(ASR判定等)	劣化度IV, III

出典：平成26年度 第2回長期維持管理技術委員会資料(H26.10.30)

□ 大規模修繕の選定の考え方

- PC桁：ポステンT桁橋のPCケーブル上縁定着構造が、床版防水がなされていない期間に雨水のシース内部への浸透の原因となり、PCケーブルの損傷へと進展しPC桁の安全性低下につながるため、対象となっている。
- 鋼床版、RC床版：疲労を考慮していない床版が交通荷重の繰り返し载荷により疲労損傷しており、鋼床版については通常なき裂対策では根本的な解決にならないこと、RC床版については疲労対策としての補強鋼板が、継続した疲労蓄積によって再劣化する恐れがあることに加え、鋼板補強の次の対策が明確でないことから、対象となったものである。
- このような選定の考え方を踏まえ、さらに損傷に影響のある施工なども考慮して、大規模修繕の劣化モデルを構築するための劣化要因について、以下の様に設定した。

- ①外的要因：構造物がおかれた使用環境で、外部からうける作用
- ②内的要因：構造的な弱点となる構造
損傷の原因となる材料
施工精度など

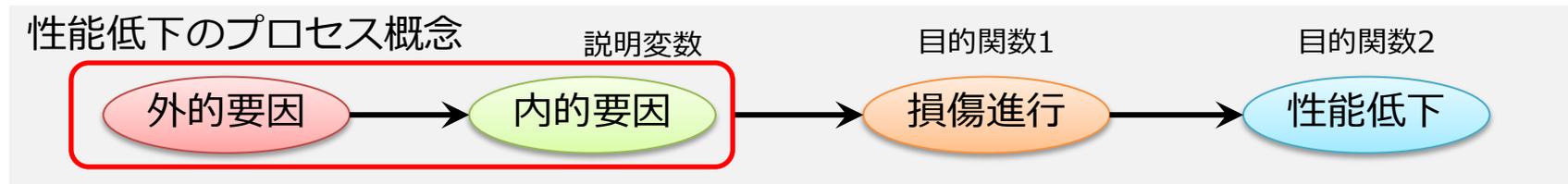
大規模修繕の劣化モデルの考え方

□ 大規模修繕の劣化モデルの考え方

□ 性能低下のプロセス

- ① 外的要因が作用→② 構造物の内的要因が作用し構造物が劣化→
- ③ 損傷が顕在化→④ 性能(安全性、使用性)の低下

□ 外的要因・内的要因が説明変数、損傷、性能が目的関数

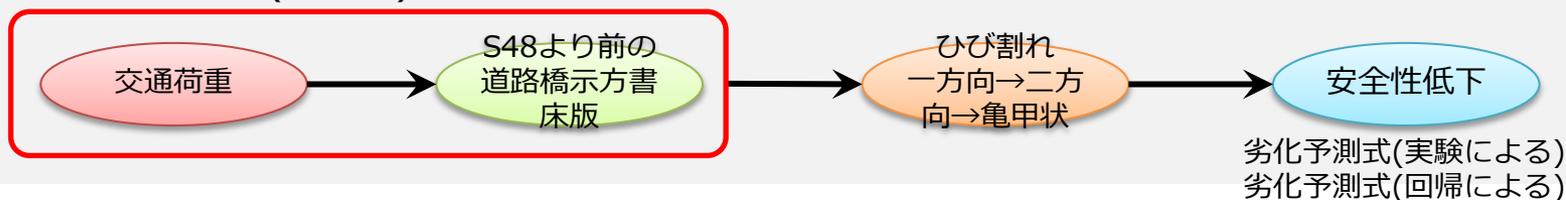


	外的要因	内的要因	損傷	性能
PC桁	雨水供給 中性化、塩害他 床版防水の有無	上縁定着構造 グラウト不良 材料の物性値 ASR	ひび割れ 漏水、遊離石灰 はく離・欠落、鉄筋露出	安全性の低下
RC床版 (補強済)	交通荷重 雨水供給 中性化、塩害他 床版防水の有無	低疲労耐久性構造 アンカーの施工 材料の物性値 ASR	不良音、漏水・遊離石灰	安全性の低下 使用性の低下

劣化予測における説明変数と目的関数との関係

- 理想的には、外的要因と内的要因が明確で、これらを説明変数として目的関数である損傷数、性能を数式化して劣化予測（例：RC床版疲労）
- 実際には、中性化・塩害など様々な外的要因が作用し、不均質な物性値など内的要因のばらつきなどを踏まえると、実現象に忠実な劣化予測式の設定が困難

RC床版疲労の場合(理想型)



ところが実際は. . .

実際のパターン(RC床版疲労の例)



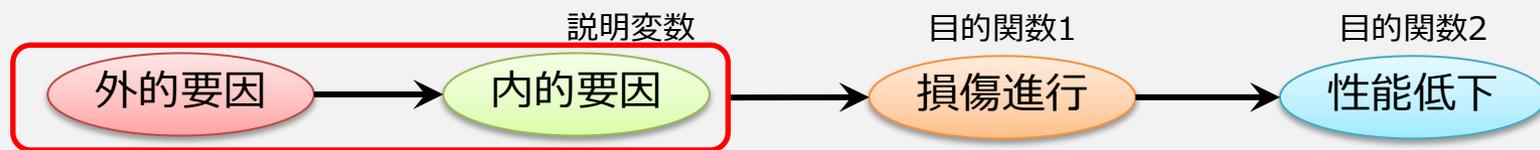
目視点検結果のみでは、外的要因、内的要因を全て定量化することは困難

要因と損傷の因果関係が不明確で確定的に目的関数を設定できない

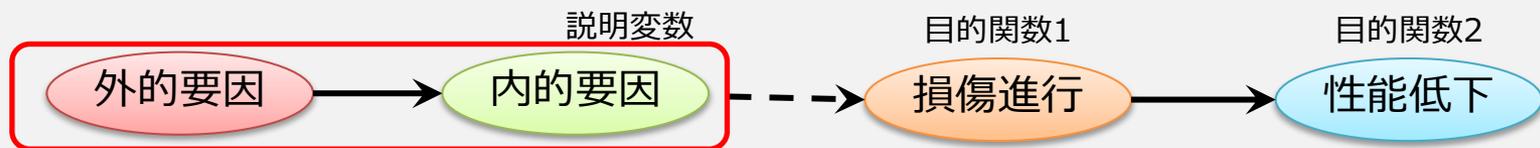
劣化予測方法の選択の考え方

- 損傷と要因(外的・内的)との間に相関関係が見出せる場合には、確定モデルを採用可能
- 損傷と要因(外的・内的)との間に明確な相関関係が見出せない場合には、確率モデルを採用

損傷と要因との間に相関関係が見出せる場合



損傷と要因との間に明確な相関関係が見出せない場合



RC床版では、損傷と要因との間に明確な相関がみられなかったため、確率モデルを採用

※平成27年度の鋼床版き裂については相関関係が見出せており、回帰モデルを採用

対策方法と劣化モデルの考え方

□ 大規模修繕の劣化モデルの考え方

- 外的要因は当該箇所_に立地する限りは原則として排除できない
- 大規模修繕では内的要因を排除

これらを踏まえ

大規模修繕に関する劣化モデルの考え方を以下のように整理

① 対策前の劣化モデル

- 内的要因を有した状態
- 対策前の点検結果に基づいて劣化モデルを構築
- 選択するモデルは劣化特性や設定説明変数に応じて適切なモデルを採用

② 通常修繕の劣化モデル

- 対策による内的要因の排除なし
- 補修実施箇所において補修前後の損傷の増加の違いに着目し劣化モデルを設定

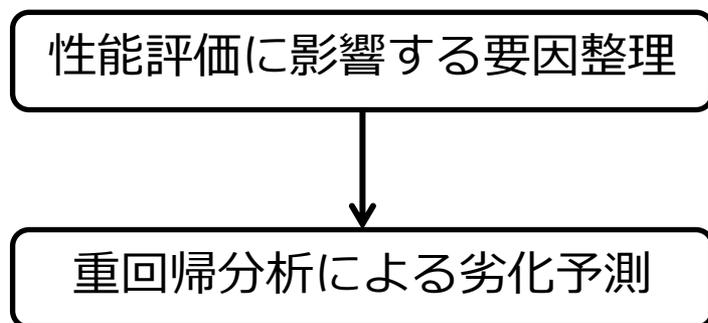
③ 大規模修繕の劣化モデル

- 内的要因が排除された構造における点検結果に基づいて劣化モデルを構築

PC桁の劣化モデル

□ PCポステンT桁ひびわれの劣化予測を行う

- 本検討では、以下の手順で劣化予測を行う。



相関分析では性能に影響を与える因子を見出せていないが、一般論で性能に影響を与える因子を整理する。

重回帰分析によるひびわれ損傷数の進展を予測する。

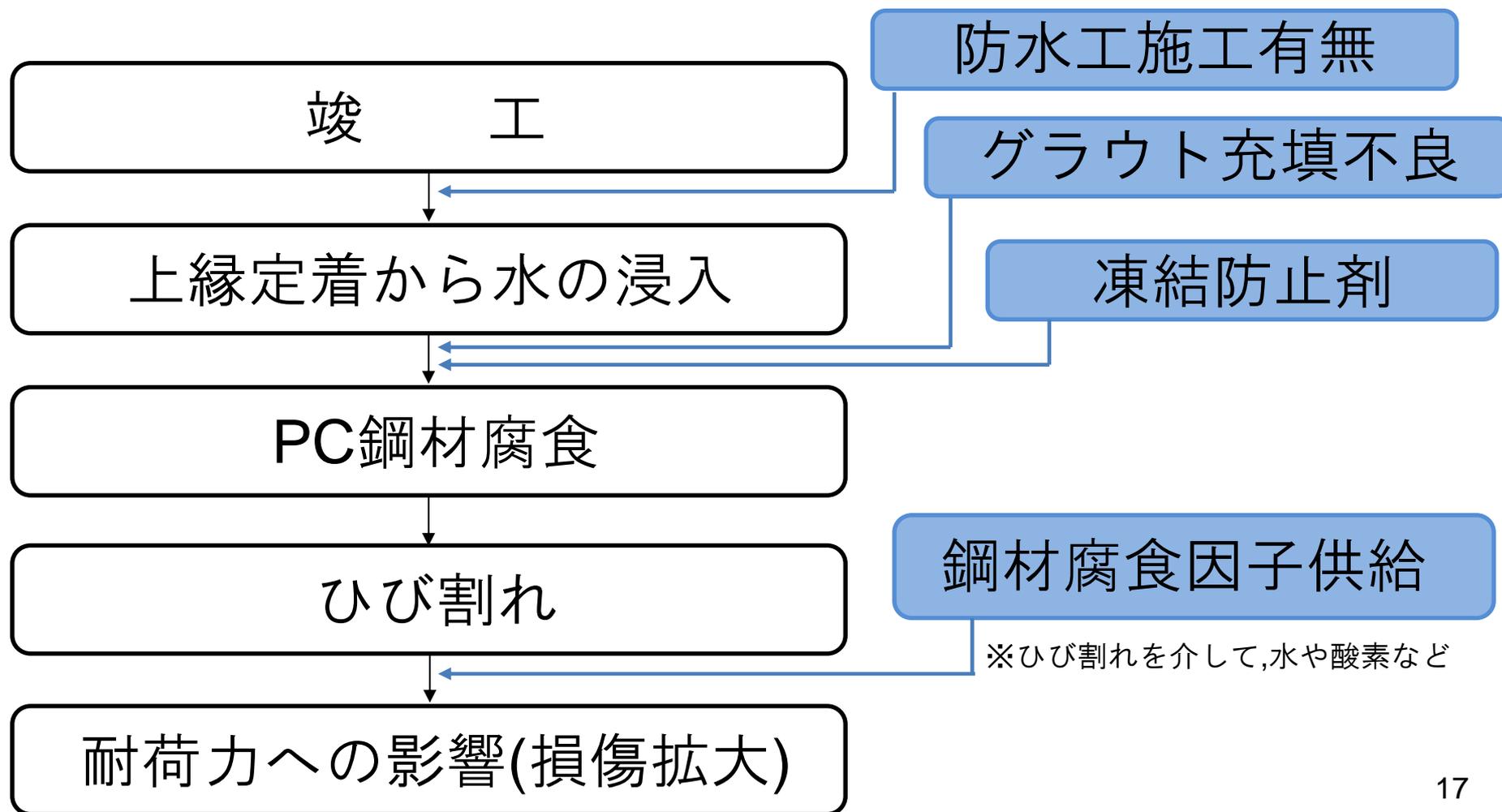
□ PC桁の損傷に影響を与える要因

- PC桁に生じる損傷の発生要因を整理した。

		PC ポステン T桁
外的要因	施工	防水層の施工有無
	外力	交通荷重の繰り返し, 過積載車両
	環境	凍結防止剤, 腐食因子供給(水,酸素)
内的要因	設計	上縁定着の有無
	施工	グラウト充填不良
	材料	骨材(ASR),内在塩分,防水材料

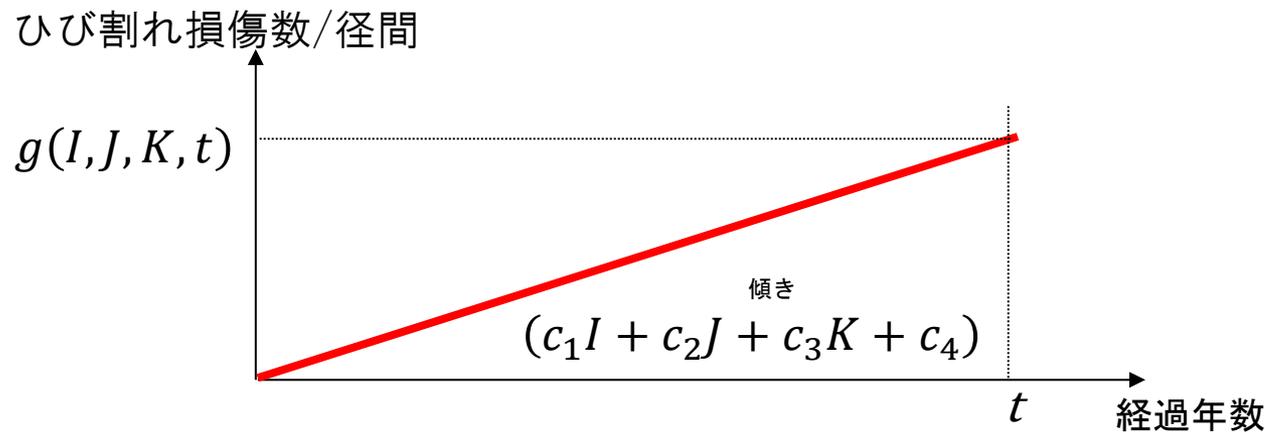
□ PC桁の損傷に影響を与える要因

- PC桁に生じる損傷の発生要因を整理した。



□ PCポステンT桁の重回帰式のイメージ

ひび割れ増加予測式： $g(I, J, K, t) = (c_1I + c_2J + c_3K + c_4) \times t$



図：劣化モデルのイメージ

I : 1984年竣工、 J : 床版防水までの年数、 K : 漏水・遊離石灰損傷の有無

c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 : 回帰係数

□ 重回帰分析結果

	1984以前	防水層施工までの年数	漏水遊離石灰損傷有無	切片
係数	0.0029	0.0026	0.0279	0.0000
t値	0.0344	1.0753	0.5023	計算せず

□ 係数に係る項目は、下記の3つである。

- ・ 1984以前

(建設が1984年以前で上縁定着ありを示す)

- ・ 防水層施工までの年数

(防水層の施工までに水の浸入が想定される)

- ・ 漏水・遊離石灰損傷有無

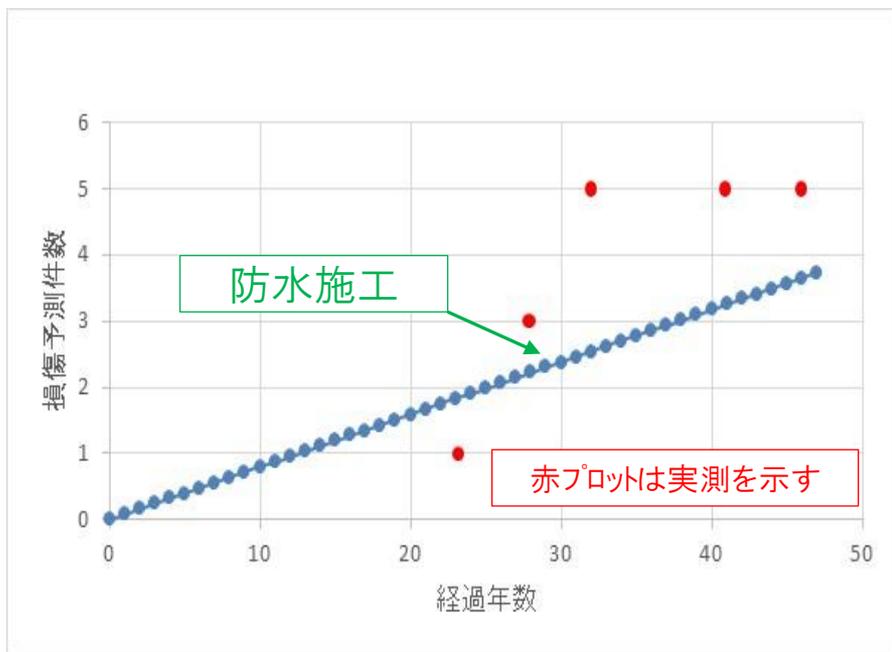
(水の浸入を示す外観変状と考えられる)

□ 観測数が少なく t 値も低いですが、何れの項目も正の係数であり、一般的に想定される現象と矛盾しない。

重相関 R	0.56
重決定 R ²	0.31
観測数	36

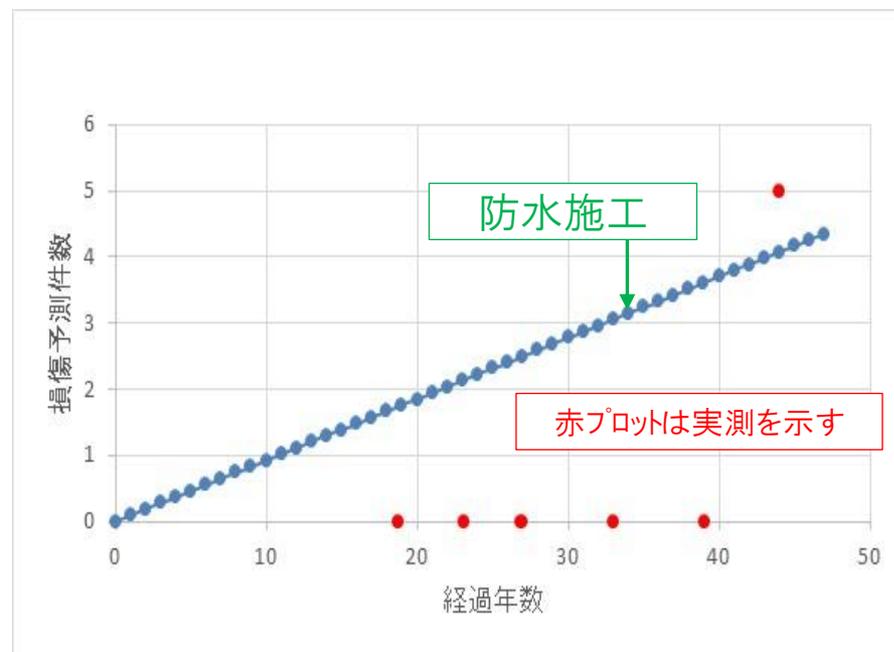
劣化予測と実測値

予測と実測値の比較(その1)



【堺線の一例】

建設年度: 1969年(上縁定着あり)
 損傷予測: 3.7件(2016年現在)
 実損傷数: 5.0件(2016年現在)
 防水施工: 1998年(建設後29年)
 漏水石灰: なし

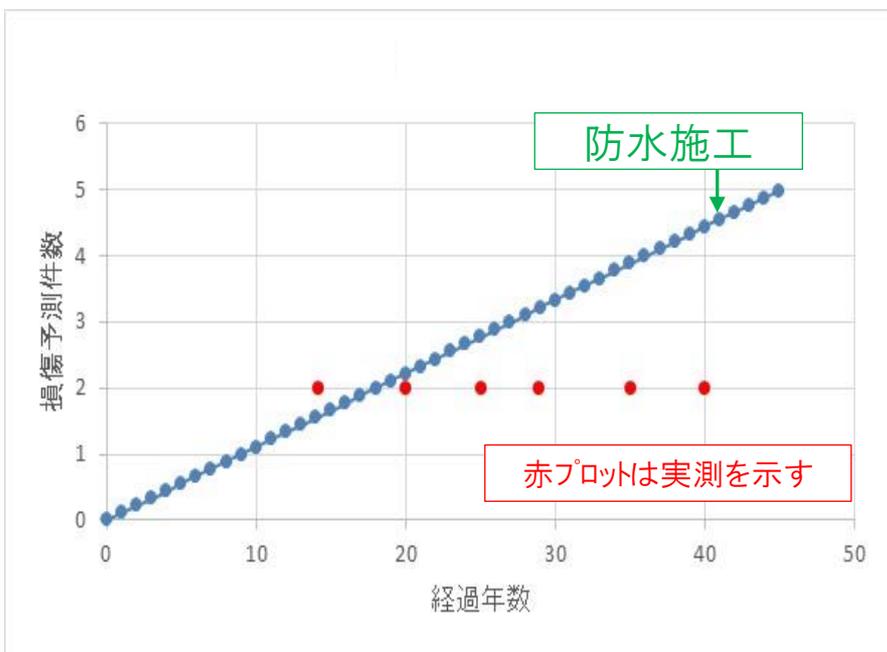


【松原線の一例】

建設年度: 1969年(上縁定着あり)
 損傷予測: 4.3件(2016年現在)
 実損傷数: 5.0件(2016年現在)
 防水施工: 2012年(建設後34年)
 漏水石灰: なし

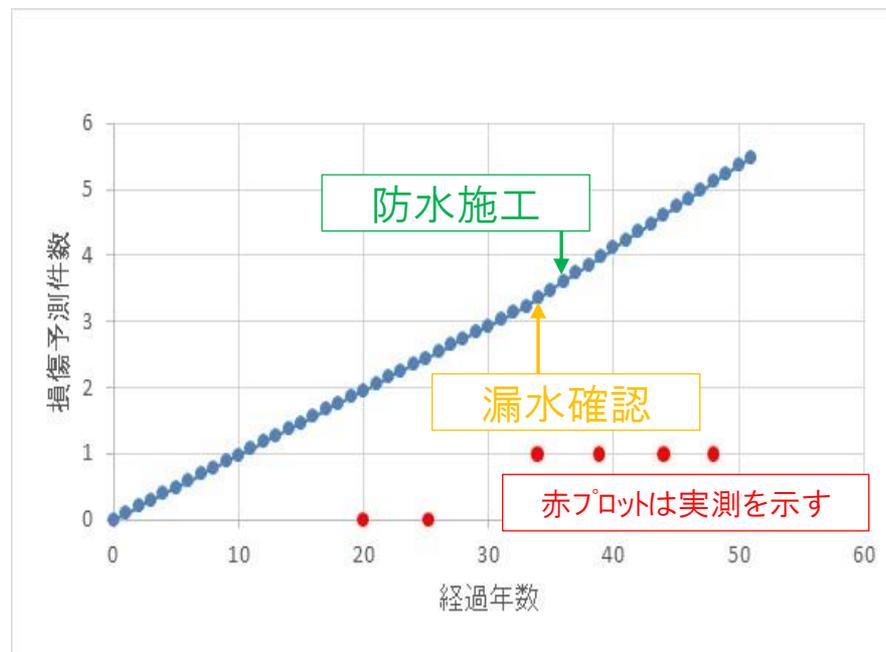
劣化予測と実測値

予測と実測値の比較(その2)



【東大阪線の一例】

建設年度：1971年（上縁定着あり）
 損傷予測：5.0件（2016年現在）
 実損傷数：2.0件（2016年現在）
 防水施工：2012年（建設後41年）
 漏水石灰：なし

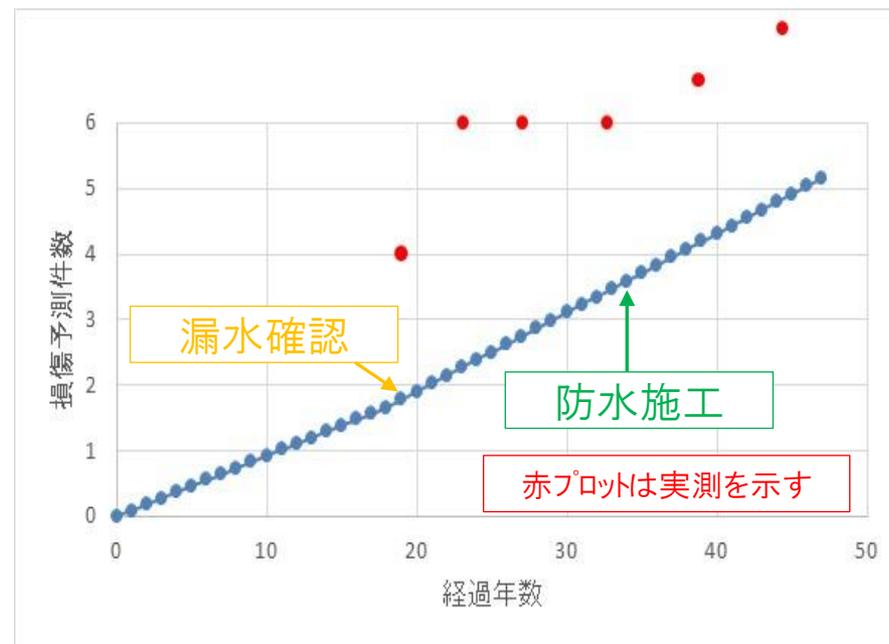
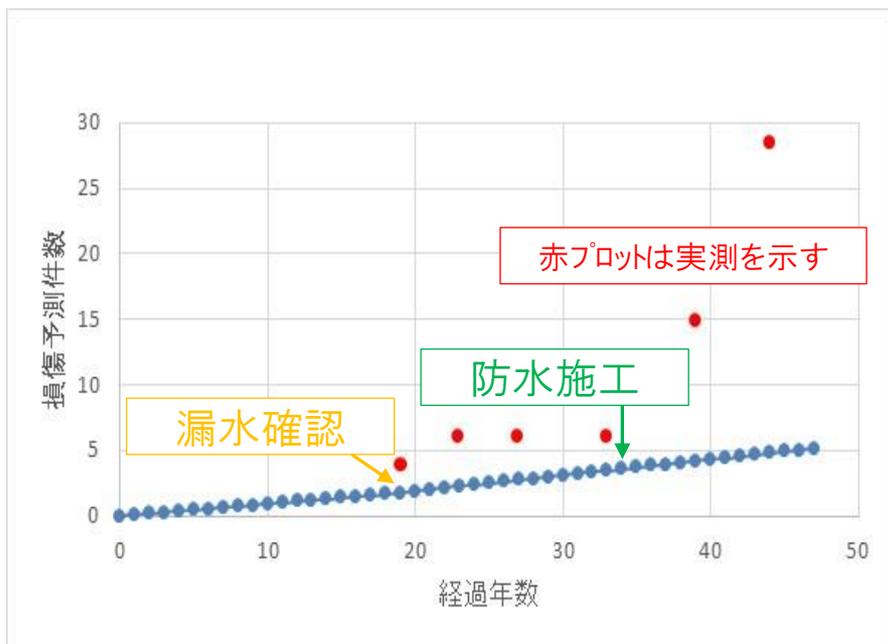


【環状線の一例】

建設年度：1965年（上縁定着あり）
 損傷予測：5.5件（2016年現在）
 実損傷数：1.0件（2016年現在）
 防水施工：2001年（建設後36年）
 漏水石灰：あり（建設34年後確認）

劣化予測と実測値

予測と実測値の比較(その3)



【松原線の一例】

建設年度：1969年（上縁定着あり）

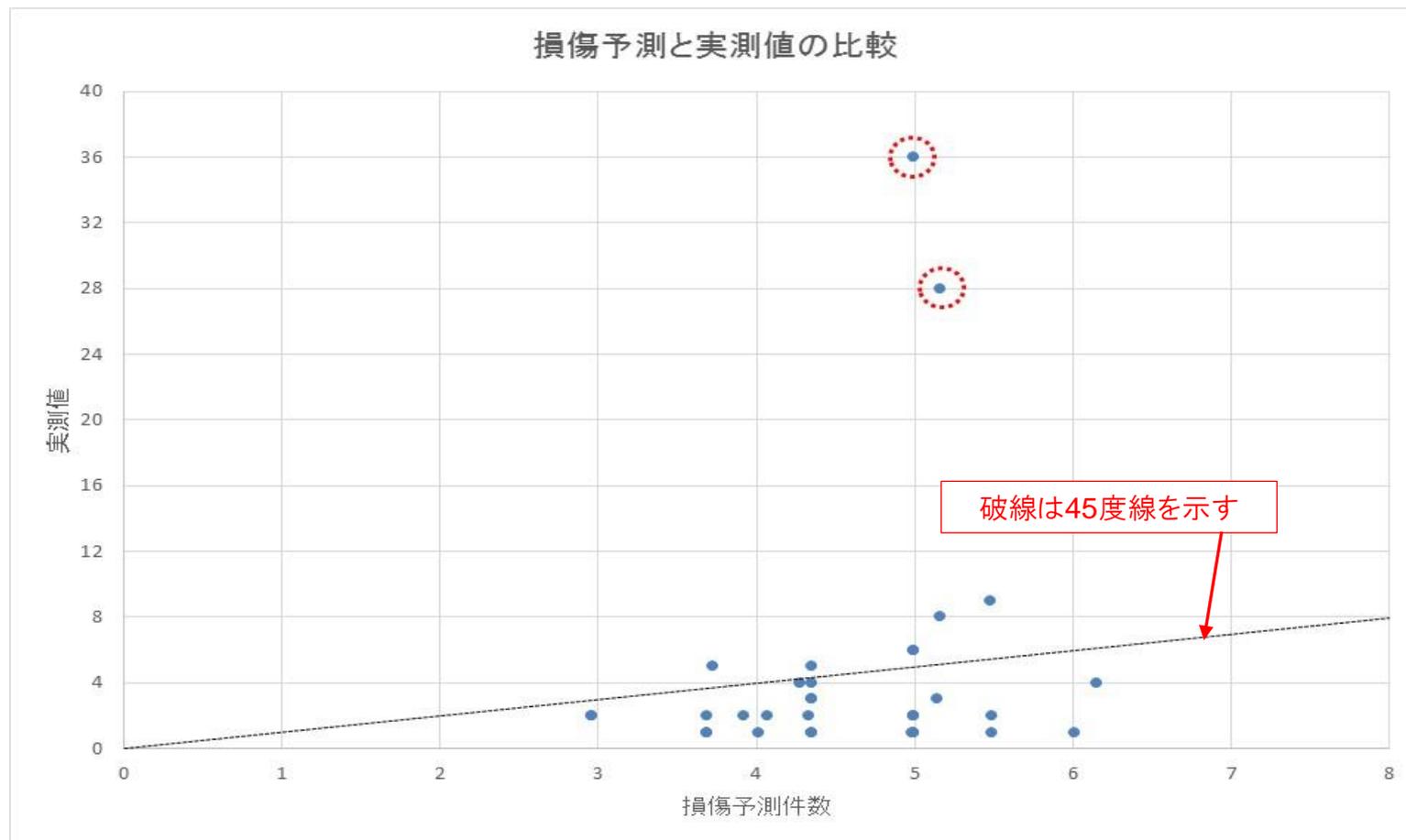
損傷予測：5.2件（2016年現在）

実損傷数：28件（2016年現在）

防水施工：2003年（建設後34年）

漏水石灰：あり（建設後19年）

□ 劣化予測と実測値の比較

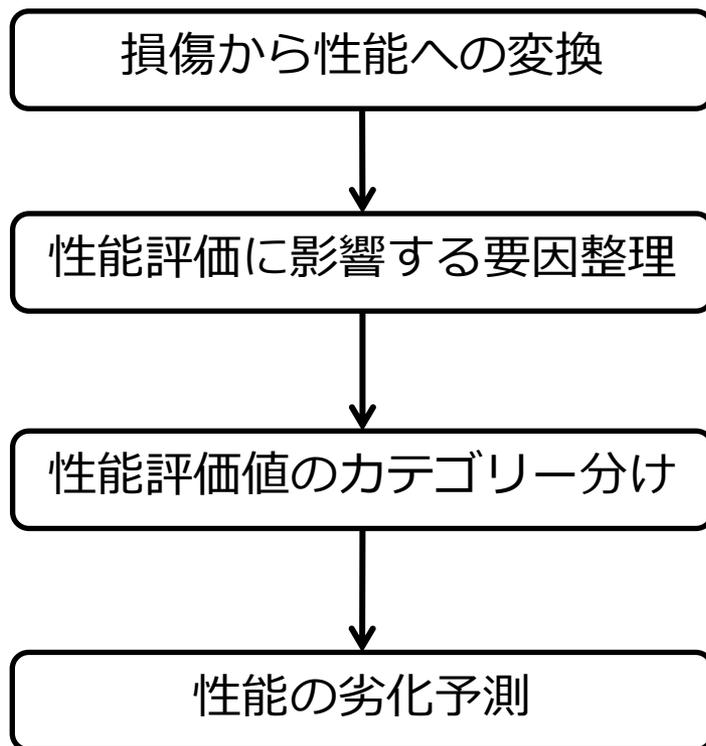


- 斜線は1:1（45度線）を示している。
- 約8割程度は、安全側（実測値 < 予測件数）の評価であった。
- 実測値が突出するケースがあった。

RC床版の劣化モデル

□ 性能評価指標の劣化予測を行う

- 本検討では、以下の手順で劣化予測を行う。



定義した変換式に従い、損傷から性能への変換を行う。

相関分析では性能に影響を与える因子を見出せていないが、一般論で性能に影響を与える因子を整理する。

安全性、使用性について、推移確率行列を作成するためにカテゴリー分け。

安全性、使用性について、マルコフ過程を前提として性能の劣化予測を行う。

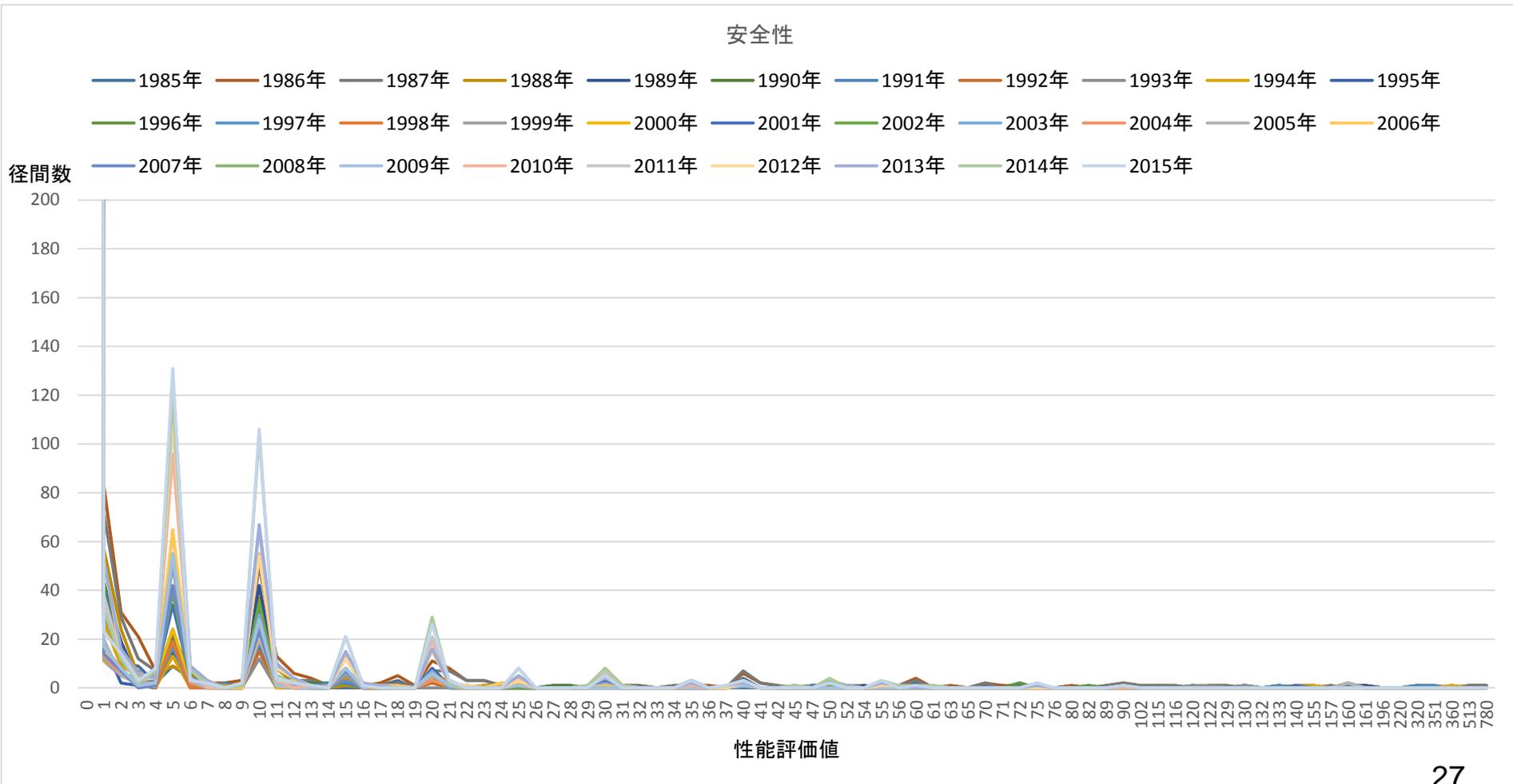
□ 性能劣化に影響する要因整理

- 相関分析では、性能と橋梁諸元等との相関が明確にみられなかった。
- ただし、劣化予測の計算時に再度説明変数として考慮するために、一般論として考えられる劣化要因を整理する。

		未補修床版	補修済床版
外的 要因	施工	舗装打ち替え時の床版上面切削 防水層施工の有無	舗装打ち替え時の床版上面切削 防水層施工の有無
	外力	交通荷重の繰り返し载荷 過積載車両	交通荷重の繰り返し载荷 過積載車両
	環境	雨、飛来塩分、凍結防止剤	雨、飛来塩分、凍結防止剤
内的 要因	設計	適用示方書(基準) 床版種別	補修前適用示方書(基準) 床版種別、継手の処理
	施工	施工精度	鋼板の接着の程度
	材料	骨材(含ASR)、内在塩分	骨材(含ASR)、内在塩分

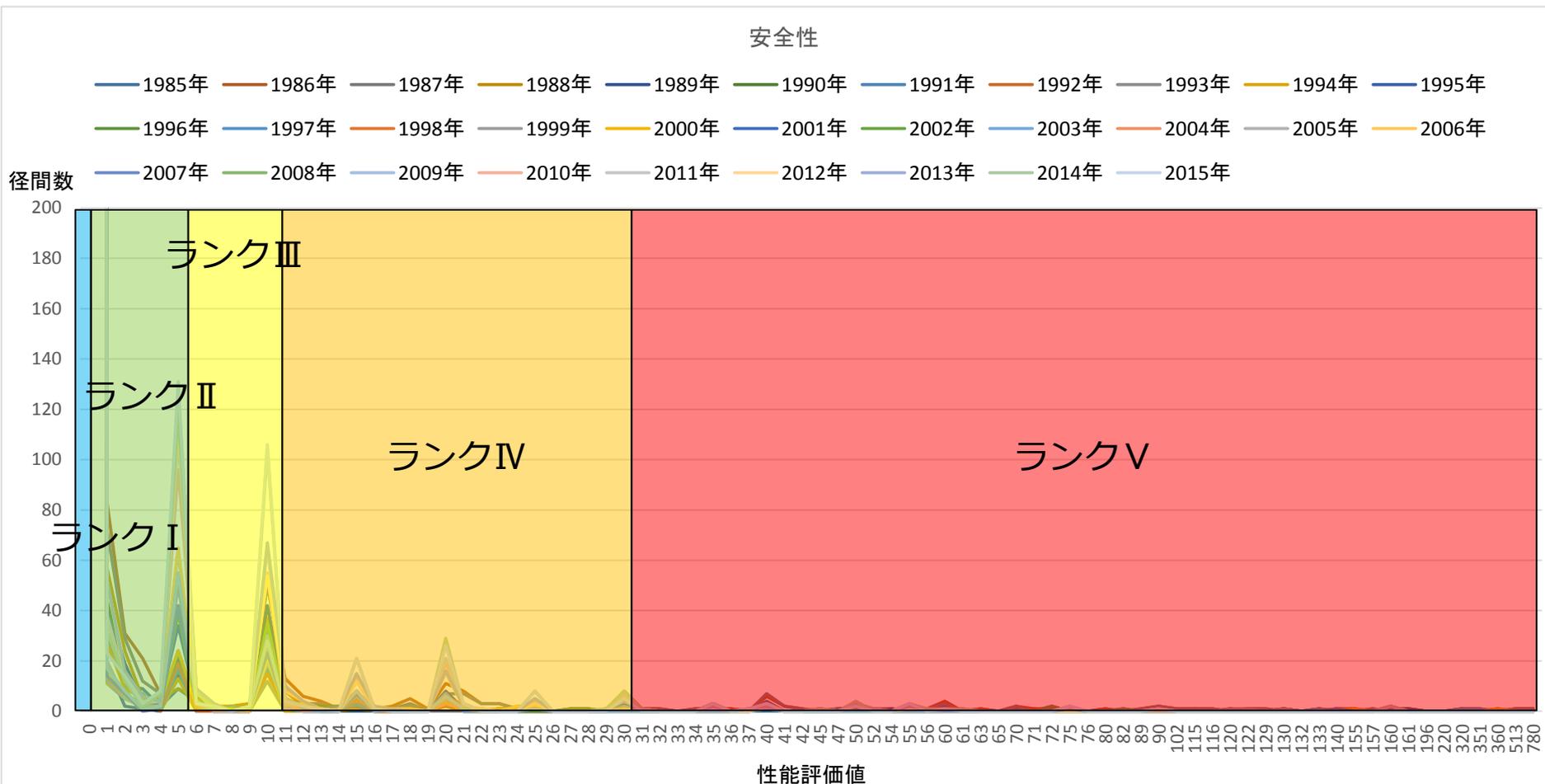
□ 性能評価値のカテゴリー分け

- 安全性の度数分布は0、5、10、15、20でピークがみられる。
- 劣化予測を行うためには、これらをカテゴリー化する必要がある。



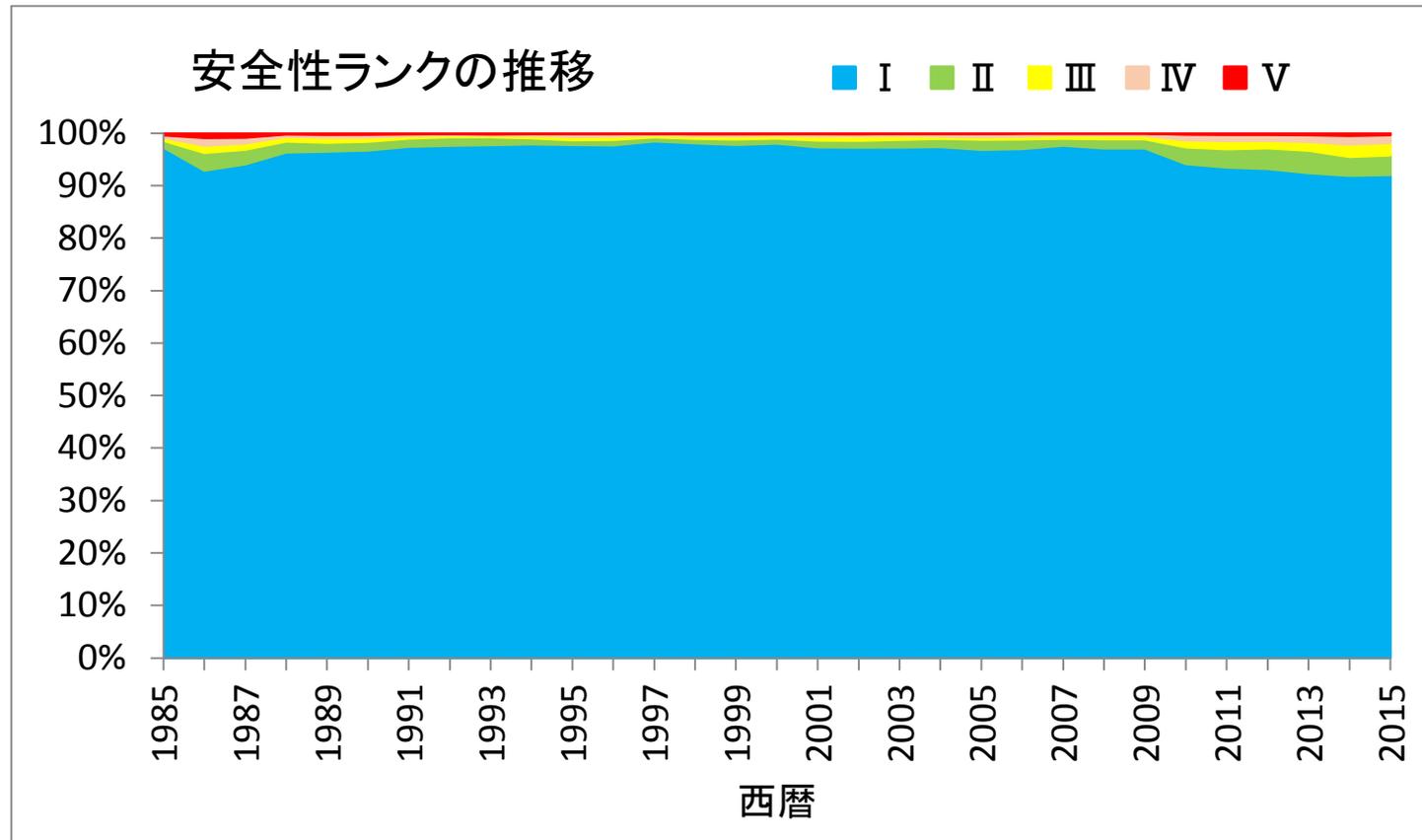
□ 推移確率行列の作成にむけて

- 便宜的に、値を0、1-5、6-10、11-30、30-780の5段階でランク分けすると以下のようなになる。



□ 安全性ランクの推移

- 現況の性能評価値を5段階に分け時系列で並べた結果、全体の90%以上はIであり、概ね健全である。



□ 推移確率行列の計算式

- 点検結果より導出した性能評価値に基づいて、下図の推移確率行列を最尤推定法により計算する。

確率推移 行列		来年の性能				
		I	II	III	IV	V
今年 の性 能	I	$P_{I I}$	$P_{I II}$	$P_{I III}$	$P_{I IV}$	$P_{I V}$
	II	0.0	$P_{II II}$	$P_{II III}$	$P_{II IV}$	$P_{II V}$
	III	0.0	0.0	$P_{III III}$	$P_{III IV}$	$P_{III V}$
	IV	0.0	0.0	0.0	$P_{IV IV}$	$P_{IV V}$
	V	0.0	0.0	0.0	0.0	$P_{V V}$

- 同一ランクに留まる確率: $P_{ii} = \exp(-\theta_i Z)$
- 1ランク推移する確率: $P_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{-\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z)\}$
- 2ランク以上推移する確率: $P_{ij} = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \sum_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) (j = I, \dots, J)$
- Vに推移する確率: $P_{ij} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} P_{ij} (i = 1, \dots, J-1)$
 θ_i : ランク*i*に関するハザード関数、*Z*: 推移確率の間隔(1年)、*J*: 最も下のランク、**V**
 なお、 $\theta_i = \beta_0^i + \beta_1^i \times x_1 + \dots$ とすることで、ハザード関数に交通量等の説明変数を考慮可能

□ 推移確率行列のグループ

- 性能と構造諸元との間に相関がみられなかったため、竣工年、床版補強の有無等については、推移確率の説明変数ではなく、それぞれの分類ごとに入力データを作成し、劣化予測を行う。
- ただし、累積交通軸数は連続的に変化するため推移確率の説明変数として劣化予測を行う。

表 1973年以前竣工床版の計算ケース

グループ	当該グループで考慮した条件				説明変数
1	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
2	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
3	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
4	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
5	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
6	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
7	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
8	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	

 データ数が少ない等の理由で計算できなかった項目

 同じ計算としてまとめる

□ 推移確率行列のグループ

- 1974年以降の入力データは1973年以前の入力データの半分程度であるため、細かく分類した計算ができなかった。

表 1974年以降竣工床版の計算ケース

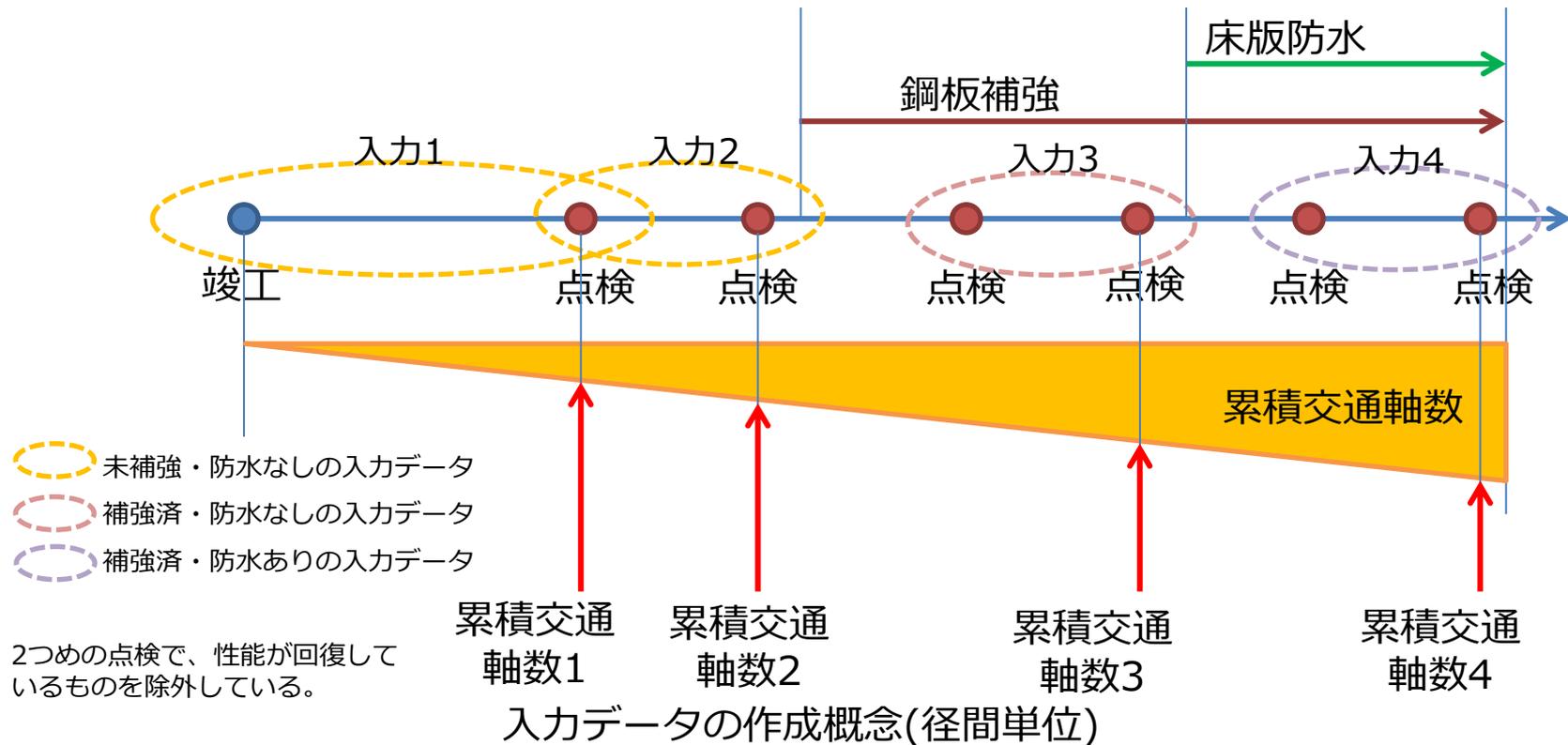
グループ	当該グループで考慮した条件				説明変数
9	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
10	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
11	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
12	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
13	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
14	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
15	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	
16	1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版	床版防水あり	累積交通軸数
	1974年以降竣工	床版補強なし	軽量コンクリート床版	床版防水なし	

 データ数が少ない等の理由で計算できなかった項目

 同じ計算としてまとめる

□ 計算に入力するためのデータ作成

- 1径間における隣り合う2つの点検時点での性能評価値と点検間隔が最低限必要であり、これが入力データの最小単位。
- 鋼板補強、床版防水など構造単位で入力データを分類し、各分類の入力データを作成
- 各入力データの2つ目の点検時点での累積交通軸数を説明変数と設定(例：入力1に対して累積交通軸数1)

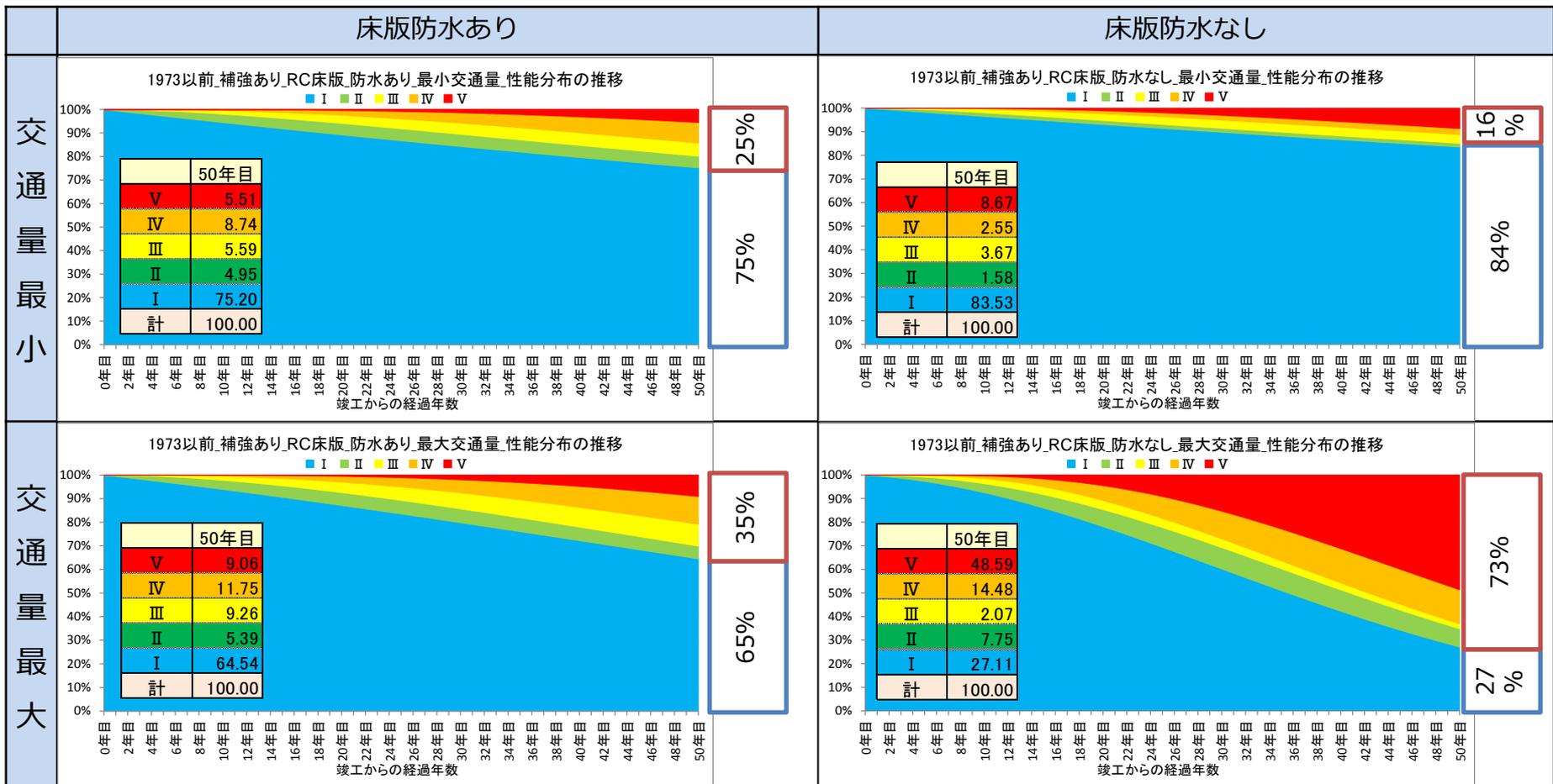


RC床版の劣化モデル

劣化予測結果(その1)

- 交通量(交通軸数)が多くなるほど劣化が速くなる。
- ランクVについて、床版防水が無い方が50年目の損傷発生率が高い。

1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版
1974年以降竣工	床版補強なし	軽量Co床版



性能 II から V の割合

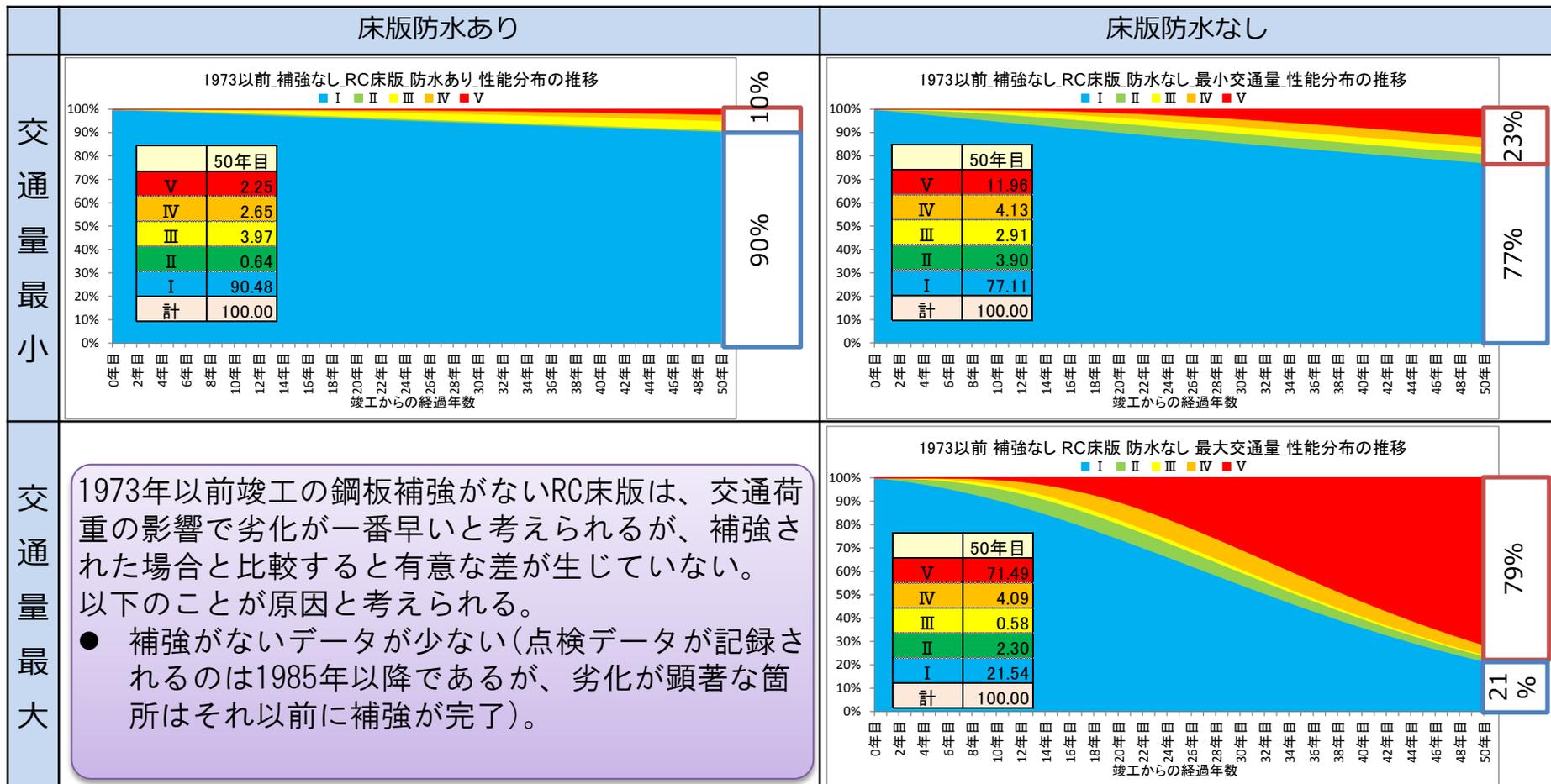
性能 I (Aランク以上損傷なし) の割合

RC床版の劣化モデル

1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版
1974年以降竣工	床版補強なし	軽量Co床版

劣化予測結果(その2)

- 床版防水がない場合には、交通量が多いほど劣化が早い。
- 床版防水がある場合の方が床版防水がない場合よりも劣化が遅い。
- RC床版については、床版補強がある場合よりも劣化が遅い。

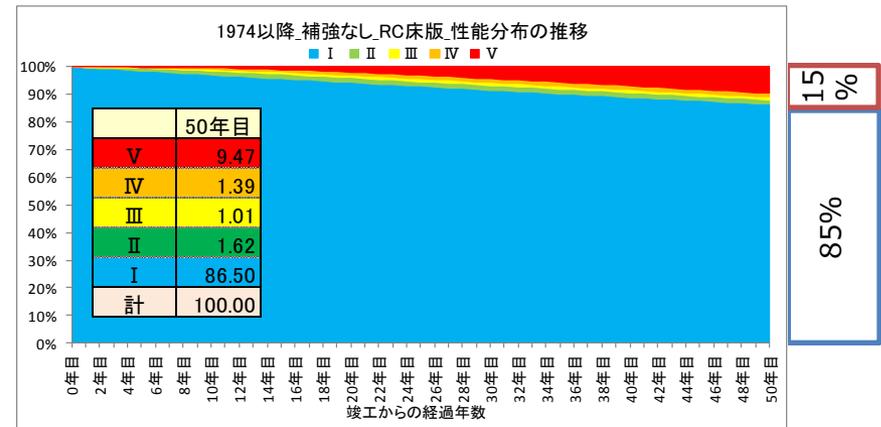
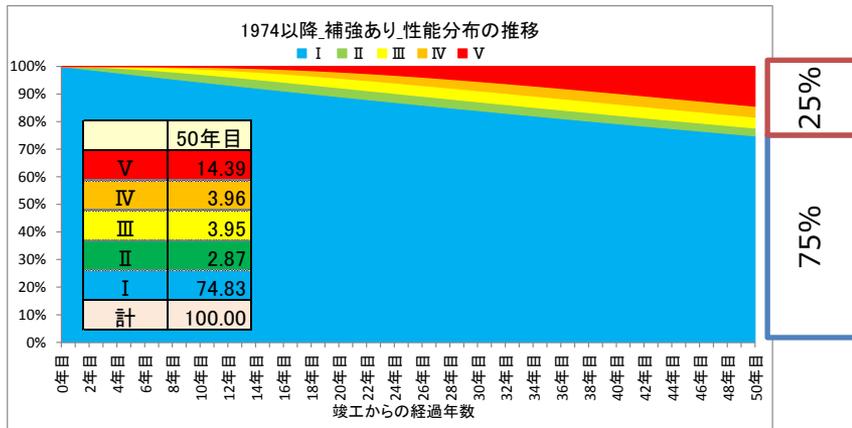


劣化予測結果(その3) - 1974年以降竣工 -

- 1974年以降竣工床版で補強されている径間が少ないため、床版種別、防水の有無、交通量を区別して計算できなかった。
- 床版補強されていない床版のほうが、床版補強されている場合よりも劣化が遅い。
- 鋼板補強されている床版は、亀甲状のひび割れ等補強が必要と判断できる損傷が生じていた。補強後も損傷が継続して発生していたと考えられ、そのため、補強された床版のほうが劣化が速くなった可能性が考えられる。
- 1974年以降竣工床版で補強が必要な損傷が発生した一因として、床版品質の問題も考えられる。

1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版
1974年以降竣工	床版補強なし	軽量Co床版

1973年以前竣工	床版補強あり	RC床版
1974年以降竣工	床版補強なし	軽量Co床版



性能 II から V の割合
性能 I (Aランク以上損傷なし)の割合

□ 劣化予測結果まとめ

- ① 交通軸数が考慮できる場合には、交通軸数が多いほうが劣化が速い。
- ② 床版防水がないほうが、あるほうよりも劣化が速い。
- ③ 1973年竣工床版のほうが、1974年竣工床版よりも劣化が速くなる傾向がある。
- ④ 1973年以前竣工の床版で床版防水がない場合、鋼板補強がない床版のほうが、鋼板補強がある床版よりも劣化が速い。
- ⑤ 1973年以前竣工の床版の劣化モデルは概ね妥当を考えられる。
- ⑥ 1974年以降竣工の床版については、床版の品質など説明変数が適切に設定できていなかったことが原因で、鋼板補強された床版のほうが、鋼板補強されていない床版よりも劣化進行は速く評価した可能性が考えられる。現状で、品質に関する情報が不足しているため、今後、劣化モデルへ反映可能な品質評価方法等について検討することが考えられる。