

# 鋼構造物の劣化予測技術

愛媛大学 全 邦釘

2016年6月22日(水)

「鋼構造物の長寿命化技術」に関する講習会

# 劣化予測とは

- 構造物の健全度が、経年によってどの程度低下するか将来にわたって予測すること。目的は以下のように多岐に渡る。
  - 構造物の安全性や事故の防止
  - 補修や補強などの措置の最適な時期の把握
- 個々の構造物に着目した劣化予測(ミクロ)
  - 管理する構造物群の中長期的な維持管理計画の策定
  - ライフサイクルコストの低下や予算平準化など予算計画の策定

# 劣化予測・2通りのアプローチ

- 物理現象からのアプローチ
  - 腐食
    - 塗膜の耐食性試験→防食機能の劣化の予測
    - 板厚減少の予測→耐荷力低下の予測
      - 普通鋼
      - 耐候性鋼材
  - 疲労
    - 疲労き裂の発生予測
    - 疲労き裂の進展予測
  - etc...
- 統計的・確率論的アプローチ
  - 劣化曲線による方法
  - 遷移確率を用いる方法(マルコフ連鎖)
  - etc...

# 物理的アプローチ

- 環境を再現した実験や現地試験により、将来の劣化を予測する。
- 物理量を直接予測することが多い
  - 板厚減少
  - 塗膜劣化
  - 疲労き裂進展
- いわゆるグレーディングの予測と異なり、精度よく危険度などの評価ができる可能性
- ただし、環境が変わる場合は？

# 塗膜の耐食性試験

- 塩水噴霧試験や複合サイクル試験  
(JIS Z 2571, JIS K 5621など)
- あらかじめ, 塩水噴霧試験や複合サイクル試験,  
大気曝露試験を実施して促進倍率を求めておけば  
塗膜や板厚の劣化予測に用いることが可能
- 例えば, 塩水噴霧30 ,0.5H→ 湿潤30 湿度95%1.5H  
→ 乾燥50 湿度20%2H→ 乾燥30 湿度20%2Hといった試験で  
あれば, 促進倍率 $A_c$ は以下のように求められる.

$$A_c = 9.14w_s^{-0.62} \quad (w_s \text{は飛来塩分量}(mdd))$$



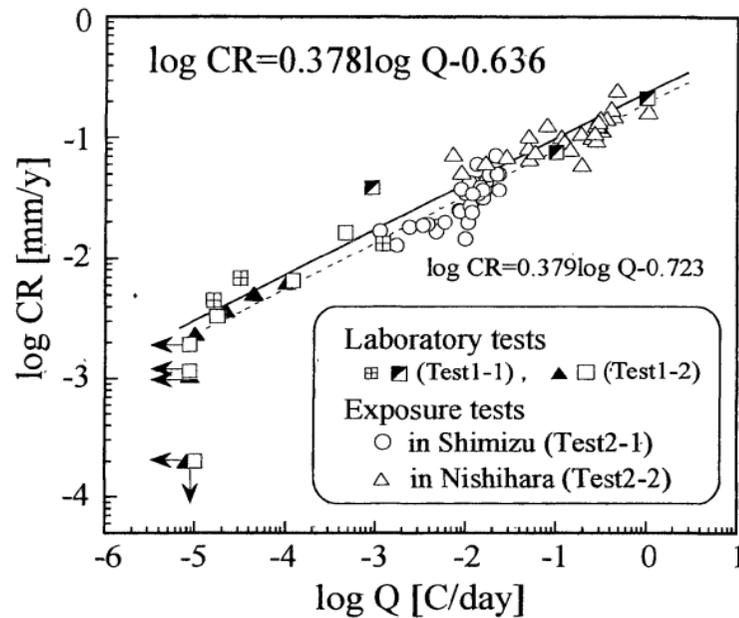
# 電流量からの板厚減少予測

- 鋼構造物の耐荷力低下は板厚減少に起因→板厚減少予測は重要
- 腐食による板厚減少速度は環境により異なるのでこれらを考慮し推定することが重要
- 流れる電流量と腐食速さに関係

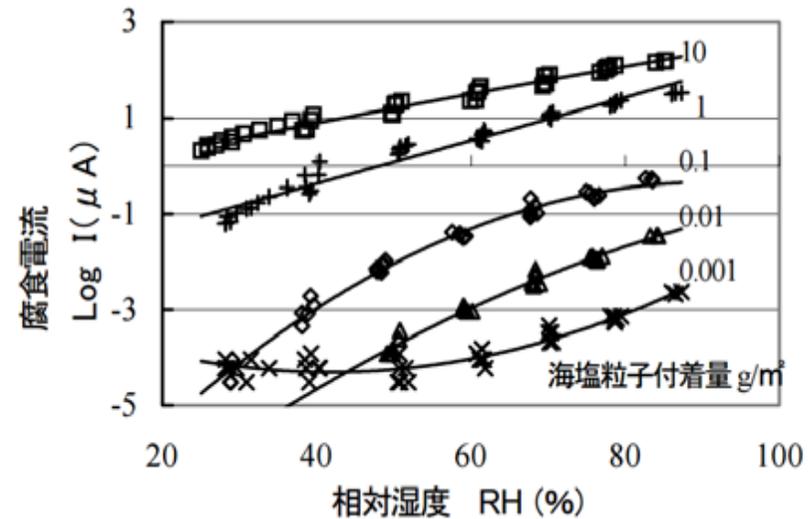
$$\log CR(\text{Fe}) \left[ \frac{\text{mm}}{\text{y}} \right] = 0.378 \log Q \left[ \frac{\text{c}}{\text{day}} \right] - 0.636 \quad CR(\text{Fe}): 1\text{年あたりの腐食速さ}, Q: \text{電流量}$$

- 電流量さえわかれば年間腐食量を計算できる。
  - 海塩粒子付着量と電流・相対湿度の関係
  - ACMセンサにより求めているもの

# 電気量からの板厚減少予測



電気量と鋼材の腐食速度の関係



海塩粒子付着量と電流・相対湿度の関係

押川ら, 材料と環境, Vol.51, No.9, pp.398-403, 2002.

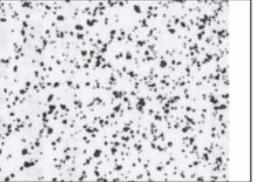
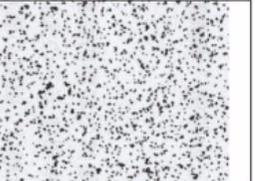
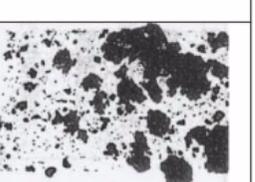
森, 本四技報, Vol.25, No.96, pp.25-30, 2001.

# 耐候性鋼材の板厚減少

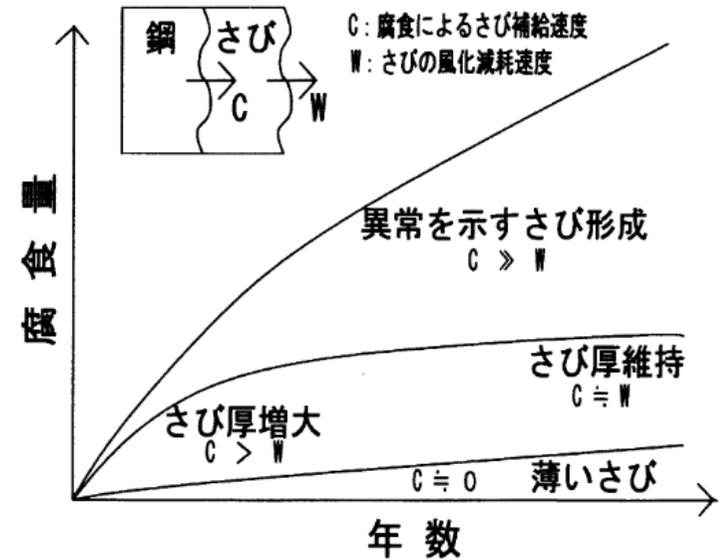
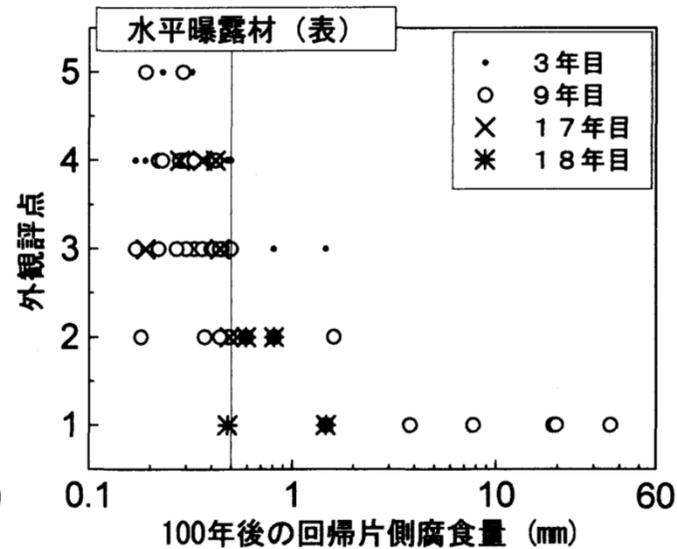
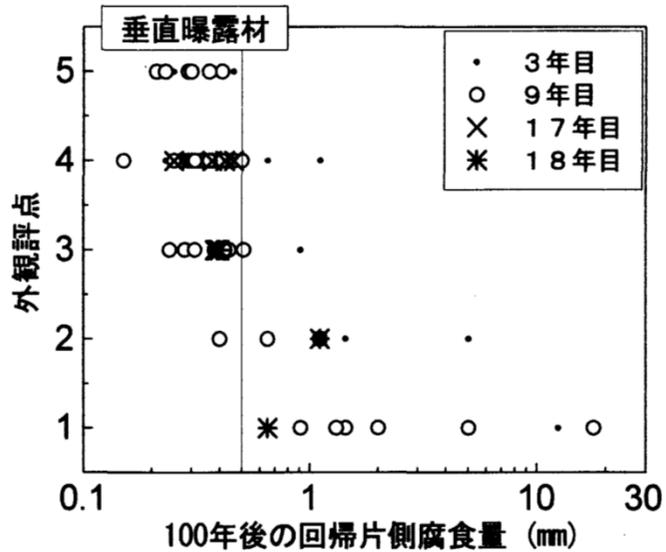
- 土木研究所，鋼材倶楽部（現日本鉄鋼連盟 日本橋梁建設協会）の**暴露試験**
- **飛来塩分量と板厚減少量**の間の高い相関関係

$$Y = AX^B$$

- 暴露試験後1, 3, 5, 7, 9年目の計測結果から求められた係数A, Bと，外観調査の評点が整理されている．

評点	桁下暴露試験の写真	実橋での例	
		(接写写真)	セロファンテープ試験
5			
4			
3			
2			
1			
	↔ 20mm	↔ 10mm	↔ 10mm

# 耐候性鋼材の板厚減少

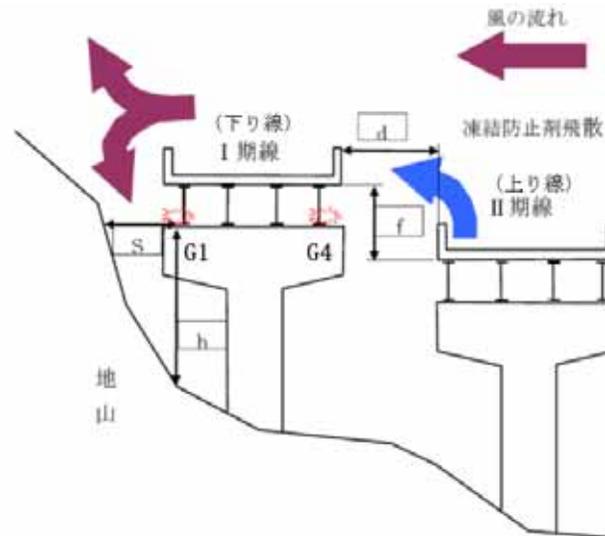


紀平ら, 土木学会論文集No.745/I-65, 2003.

# 耐候性鋼材の板厚減少

実地試験の実例@四国

10年以上, 試験片を現地暴露し, 板厚減少を定期的に計測している.



# 疲労き裂の発生予測

- 基本的に、疲労照査と同様の流れ

1. 構造物に作用する荷重や応力の測定
2. レインフロー法などによる応力頻度分布の評価
3. 疲労等級の選定,あるいはホットスポット応力の計算
4. 累積損傷度の計算

$$D = \sum \left( \frac{n_i}{N_i} \right)$$

5. 疲労き裂の発生予測

# 疲労き裂の進展予測

- 破壊力学的アプローチによる評価

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{\pi r}} \cos(\theta/2) \begin{Bmatrix} 1 - \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2) \\ 1 + \sin(\theta/2) \sin(3\theta/2) \\ \sin(\theta/2) \cos(3\theta/2) \end{Bmatrix}$$
$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2G}} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{Bmatrix} \cos(\theta/2) [\kappa - 1 + 2 \sin^2(\theta/2)] \\ \sin(\theta/2) [\kappa + 1 - 2 \cos^2(\theta/2)] \end{Bmatrix}$$

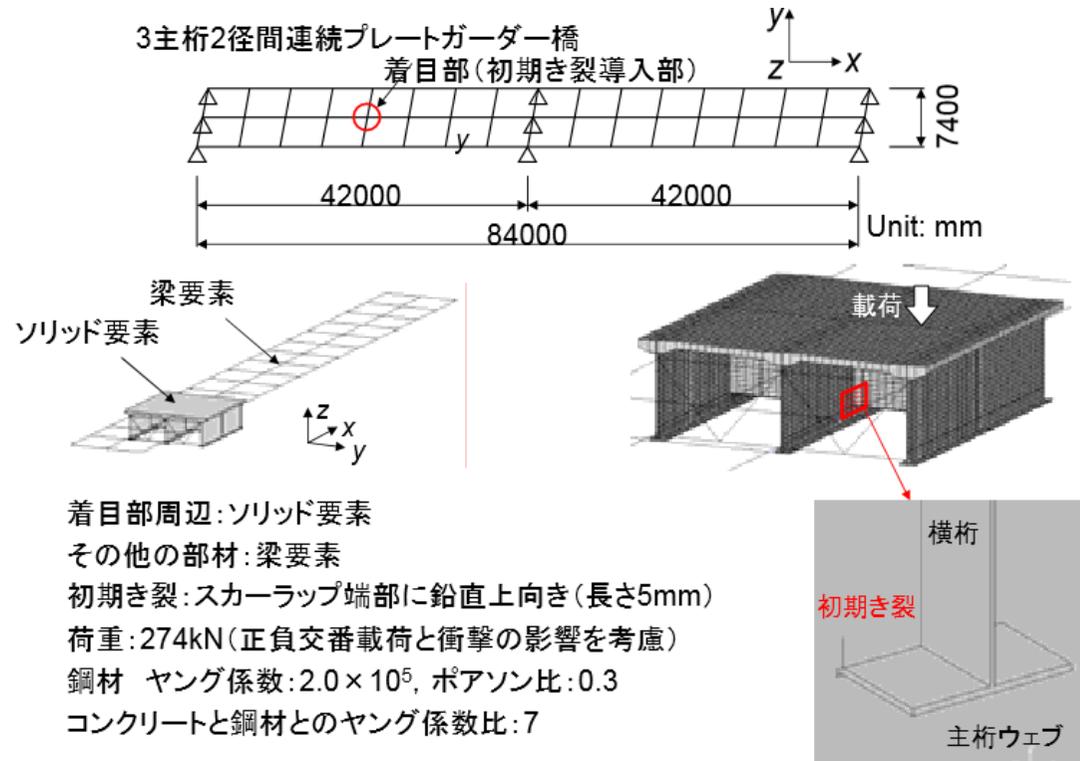
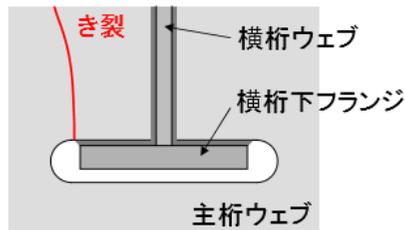
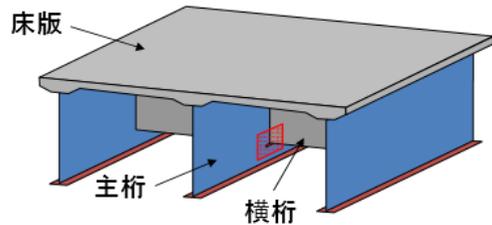
- 疲労き裂進展寿命の大半は疲労き裂寸法が小さい間に費やされる
- 脆性・延性破壊や全断面降伏などの破壊モードに移行するき裂寸法である限界き裂寸法は、構造物架設場所の最低気温や靱性値などを影響因子として持つ
- コストパフォーマンス

# 山添橋の解析例

## プレートガーダー主桁 - 横桁交差部の疲労き裂

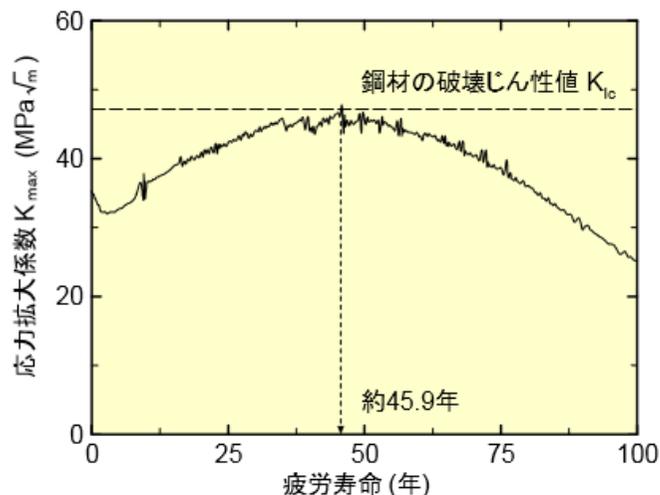


名阪国道の橋梁保全に関する検討委員会 参考資料より



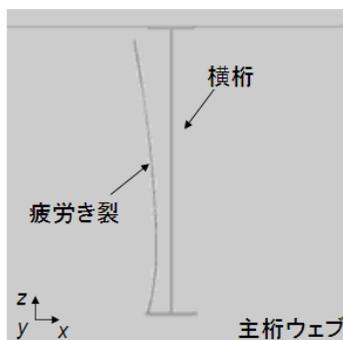
# 山添橋の解析例

初期き裂長	5mm
最低使用温度	0°C
鋼材	SM490材
鋼材強度	315MPa (許容応力 185MPa)
シャルピー値(0°C)	14J
ぜい性破壊荷重	死荷重+T-60荷重 (衝撃考慮)
疲労荷重	T-20荷重(衝撃考慮)
日交通量	60000台/日
大型車混入率	50%



$K_{Ic}$ はシャルピー値から推定

- 解析によりこれまで難しかったものが評価可能に.
- 局部応力基準の疲労照査法
- 破壊力学解析による余寿命推定などは有望
- 補修・補強効果の定量的な評価に使える
- ただし実績を積む必要がある.



# CTOD試験による破壊靱性値の検討

- CTOD試験は、欠陥が存在する構造物の破壊靱性評価法
- き裂が急速に進展する直前のき裂先端開口量 (CTOD値) の測定
- ねばい材料ほどCTOD値が大きくなる
- CTOD値がわかれば、脆性破壊に移行する限界き裂長 $2a_c$ が評価できる

$$2a_c(T) = \frac{2\delta_c(T)E\sigma_Y(T)}{\pi\sigma^2}$$

$\delta_c$  : CTOD値(mm)

$\sigma$  : 公称応力(MPa)

$\sigma_Y$  : 試験温度における材料の降伏点  
又は0.2%耐力(MPa)

$E$  : 縦弾性係数(MPa)

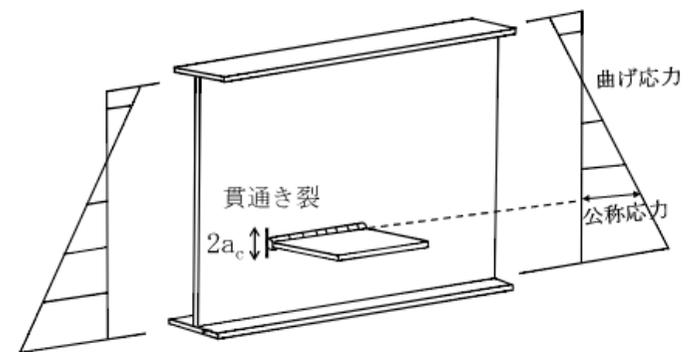


図15 限界き裂長の対象とした主桁面外  
ガセット継手

# 物理的アプローチの問題点

- 実験値のばらつきが評価されている事例が少ない  
(そもそも, 多数の実験ができる環境はあまりない)
- 実験・解析にかかる手間が非常に大きい
- 環境や材料, 外力(交通量など)が様々であり, また設計条件や履歴も異なる. また, 実験で全てのパラメータをカバーすることは現実的ではない. ということは, 例えば, 構造物群の全ての構造物に対して, いくつかの構造物から得られている実験結果を用いて劣化を予測するのは注意を要する.

# 劣化予測・2通りのアプローチ

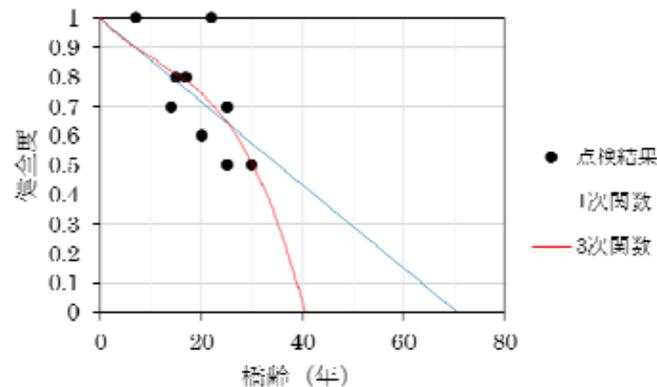
- 物理現象からのアプローチ
  - 腐食
    - 塗膜の耐食性試験→防食機能の劣化の予測
    - 板厚減少の予測→耐荷力低下の予測
      - 普通鋼
      - 耐候性鋼材
  - 疲労
    - 疲労き裂の発生予測
    - 疲労き裂の進展予測
  - etc...
- 統計的・確率論的アプローチ
  - 劣化曲線による方法
  - 遷移確率を用いる方法(マルコフ連鎖)
  - etc...

# 統計的・確率論的アプローチ

- 劣化曲線や、マルコフ連鎖モデルなどにより、点検結果の推移およびそれぞれの部材や環境条件から将来の劣化を予測
- 劣化曲線
  - 例えば、各部材の実測点検データを経年ごとにプロットし、そこから回帰により劣化曲線を導出し、それにより将来の状態を予測する手法
  - その際に用いるデータとしては点検対象の構造物の点検結果のみを用いる場合、あるいは環境や構造が類似した構造物の点検結果を全て用いる場合がある
- マルコフ連鎖モデル
  - 離散的なグレーディングが、次の時点でどう推移するかを示す遷移確率を用いる方法
  - 将来のグレーディングの確率的評価・割合評価が可能

# 劣化曲線を用いる方法

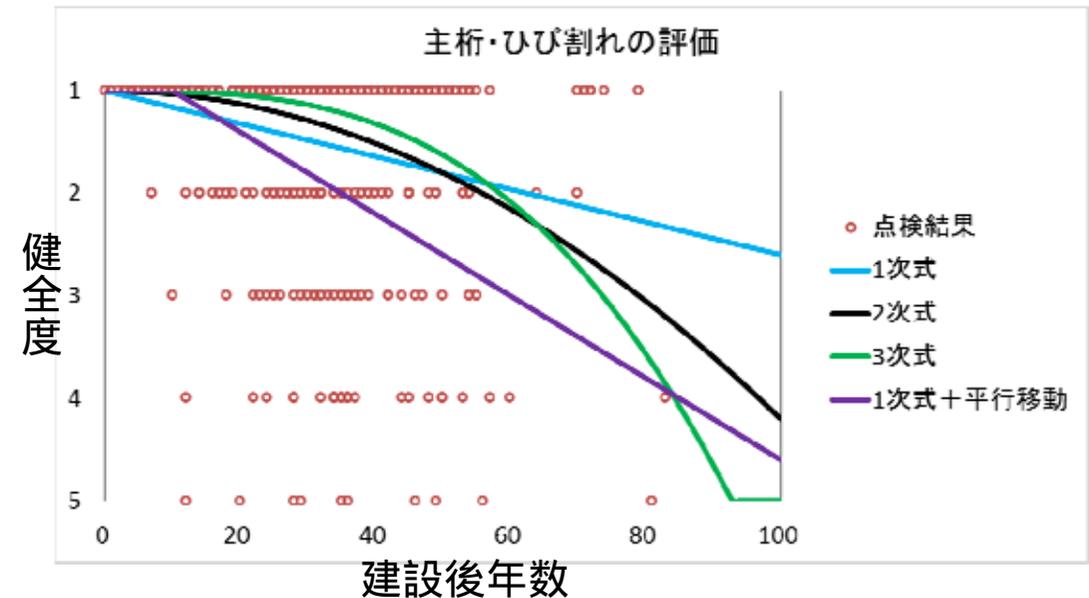
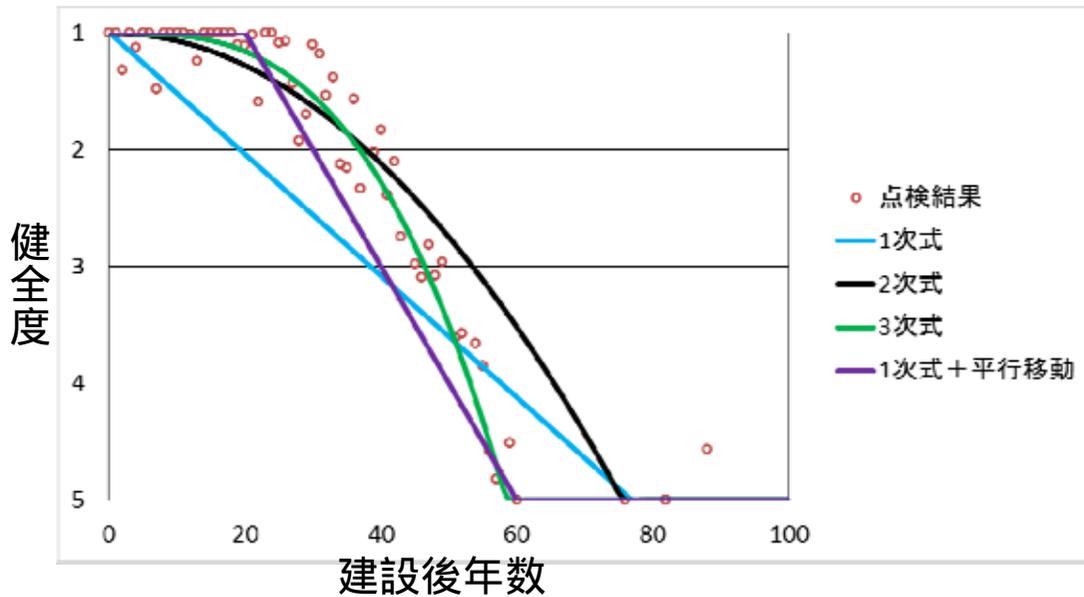
- データから回帰的に曲線を求めることで、将来を予測する
- 1次式～4次式, 0.5次式, 指数関数, あるいはそれらに平行移動をプラスしたものなどが存在している.



- 当然, 大きく変化する. 何故その予測手法を採用?
- そもそも, 評点1～評点5は等距離なのか?

# 劣化曲線を用いる方法

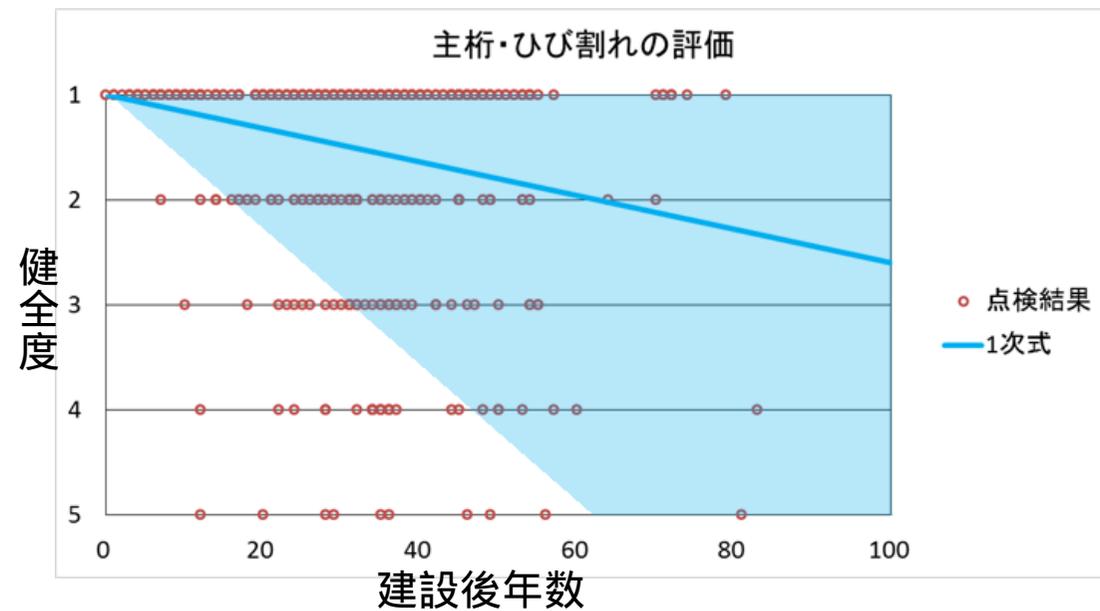
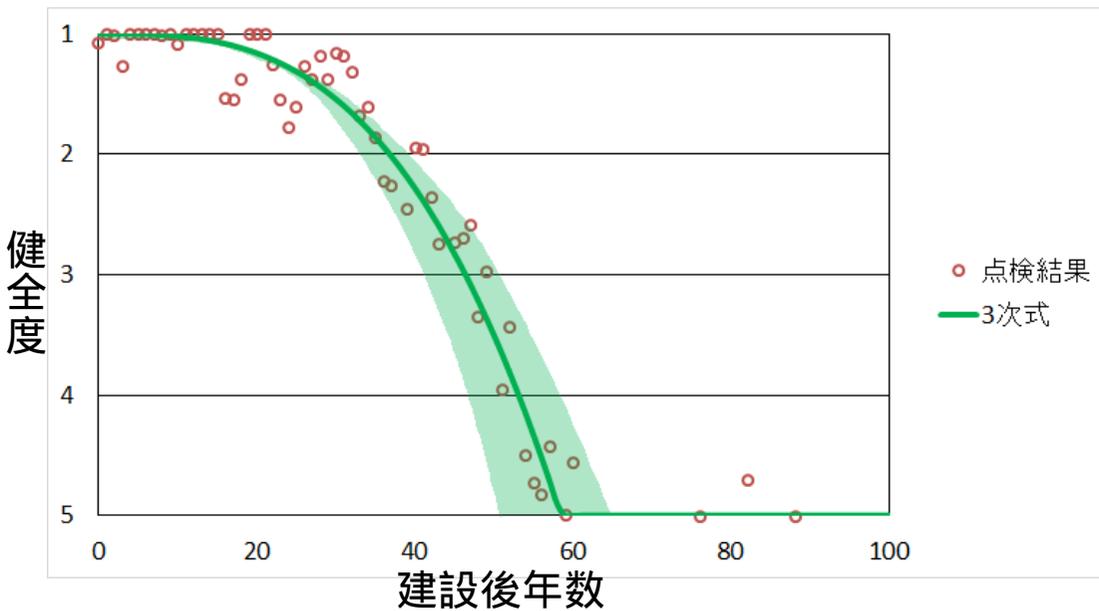
- データが十分あれば、一番「合う」曲線を選ぶという考えはある。



- しかし、ばらつきが大きい場合は？

# 劣化曲線を用いる方法

- ばらつきを評価する必要性
- 信頼区間・予測区間



# マルコフ連鎖を用いる方法

- 劣化を予測したい部材の劣化度を例えば5段階(もっとも良い状態が評点1, もっとも悪い状態が評点5)に分類し, それらの存在確率・割合を $P_1 \sim P_5$ とすると, 時間経過に伴う状態の変化は以下の式で表される.

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} 1 - \pi_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & 1 - \pi_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi_{23} & 1 - \pi_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{34} & 1 - \pi_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{45} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_p$$

- 添字の $f$ は一定期間経過後,  $p$ は現在の健全度の存在割合を意味している.  $\pi_{ij}$ は一般に遷移確率と呼ばれ, 点検結果の統計的な処理, あるいは専門家の知見などにより求められる.

# マルコフ連鎖を用いる方法

•  $P_1 \sim P_5$  が存在割合

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} 1-\pi_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & 1-\pi_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi_{23} & 1-\pi_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{34} & 1-\pi_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{45} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_p$$

$t$ 年後に右边が

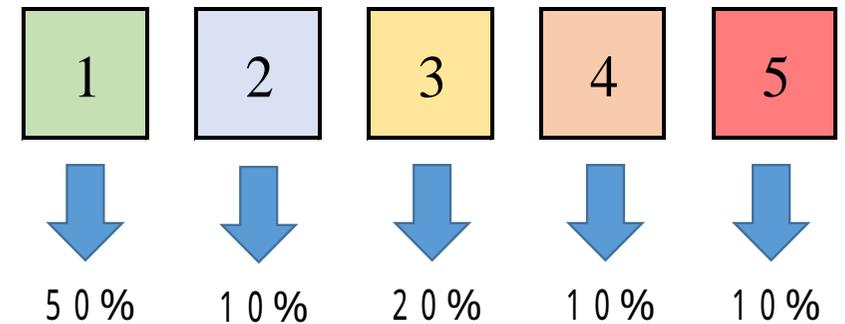
$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_p = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{pmatrix} \text{ とすると}$$

1	1	1	1	3	3
2	1	1	2	3	3
2	4	4	4	3	3
5	1	1	1	1	1
5	5	1	1	1	1

# マルコフ連鎖を用いる方法

## • $P_1 \sim P_5$ が存在割合

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} 1-\pi_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & 1-\pi_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pi_{23} & 1-\pi_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pi_{34} & 1-\pi_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{45} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_p$$



という確率で、健全度 1 ~ 5 のそれぞれが実現する

$t$ 年後に右边が

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix}_p = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{pmatrix} \text{ とすると}$$

# 留意点

- 遷移確率は常に一定？
- そもそも点検結果が正しい前提 / それでも情報は失われている
- 一般的に健全度が悪い部分はデータが少ない
  - 例えば $2 \rightarrow 1$ といったデータはほとんどない
  - $5 \rightarrow 4$ と $2 \rightarrow 1$ は距離が一緒である保証がないので、同じ遷移確率を使うのは不適切な可能性
  - ベイズ的な考え
- 遷移確率は一体何を説明変数としているのか
  - 他の橋梁のデータを使うことが適切なのかどうか
- 確率と割合、どちらを求めているか正しく認識していないと混乱する
- 確率 + 割合は考慮可能であるが(評点4の割合は95%の確率で30% ~ 50% など)、研究ベースでも余り見かけず、実務で使われている事例は確認できていない
- 劣化曲線と同様に、ばらつきの問題もある

# ばらつきを減らすためには

- 大数の法則をベースとした考え
  - それぞれのばらつきが大きくても、多くの橋梁の和のばらつきは小さくなる（構造物の総数が大きい時、平均的な劣化予測が期待値に収束する）
  - そういう意味で、マクロ的な予測（構造物群に着目した劣化予測）には向いていると考えられる。
  - 一方で、ミクロ的な予測（構造物の劣化予測）を行う際は相当注意すべき。
- 説明変数を増やす、吟味する
  - 劣化に影響を与える要因は何なのか？
  - 環境・交通・施工etc

# 目的に応じた劣化予測手法

- 個々の構造物に着目した劣化予測(ミクロ)
  - 構造物の安全性や事故の防止
  - 補修や補強などの措置の最適な時期の把握
  - 物理現象からのアプローチが適していると考えられる
  - 統計的アプローチを用いる場合は相当な考察が必要
- 構造物群に着目した劣化予測(マクロ)
  - 管理する構造物群の中長期的な維持管理計画の策定
  - ライフサイクルコストの低下や予算平準化など予算計画の策定
  - 物理現象からのアプローチは、手間の面から実用的ではない
  - 統計的アプローチでは大数の法則によるメリットが得られる

# 劣化予測での留意点のまとめ

- 劣化予測は不確定な将来を予測するものであり、当然ばらつきが存在する。
- すなわち、劣化予測を行う際は、ばらつきがあるということを理解した上でその結果を用いることが重要となる。
  - 特に、ばらつきの定量化が出来れば望ましいが...
- n段階へ評価を離散化している場合、失われる情報への留意
- 環境条件などが異なっている場合の将来予測の変化
- 何故劣化予測を行うか、その目的を明確化することが望まれる
  - 特に、目的と手段の混同は避けるべき
- 目的を明確化していれば、採用した手法の妥当性が理解される。