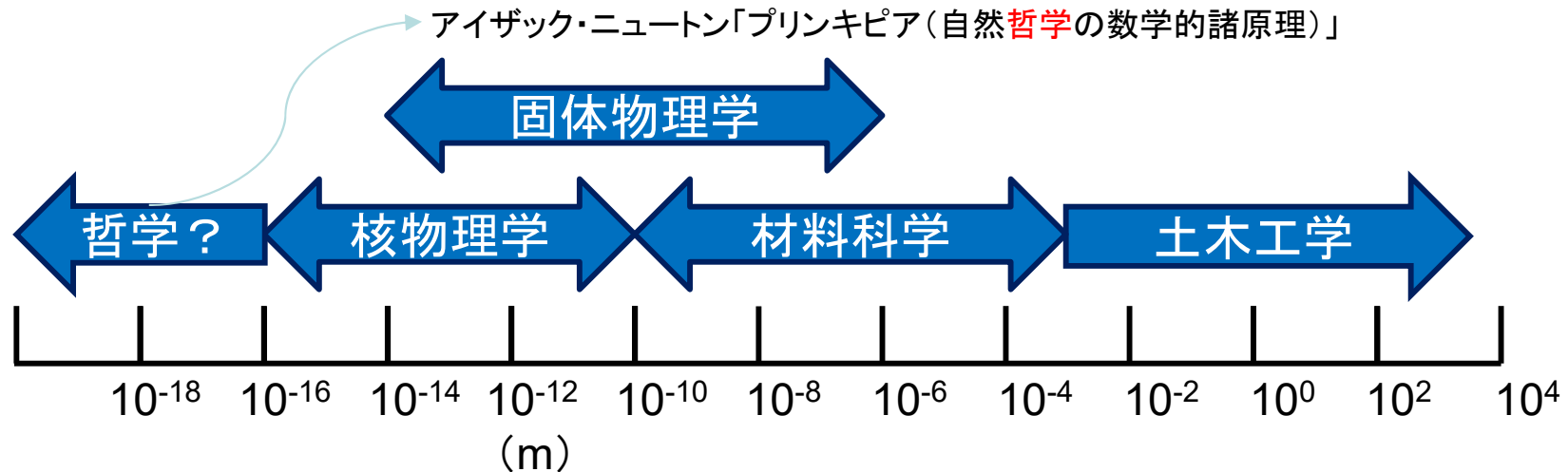


既存コンクリート構造物の 性能の評価とその課題



京都大学 経営管理大学院
(併任) 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
教授 山本 貴士

社会インフラ構造物の時空間スケール



19世紀後半：
製鋼技術の確立，ポルトランドセメント製造

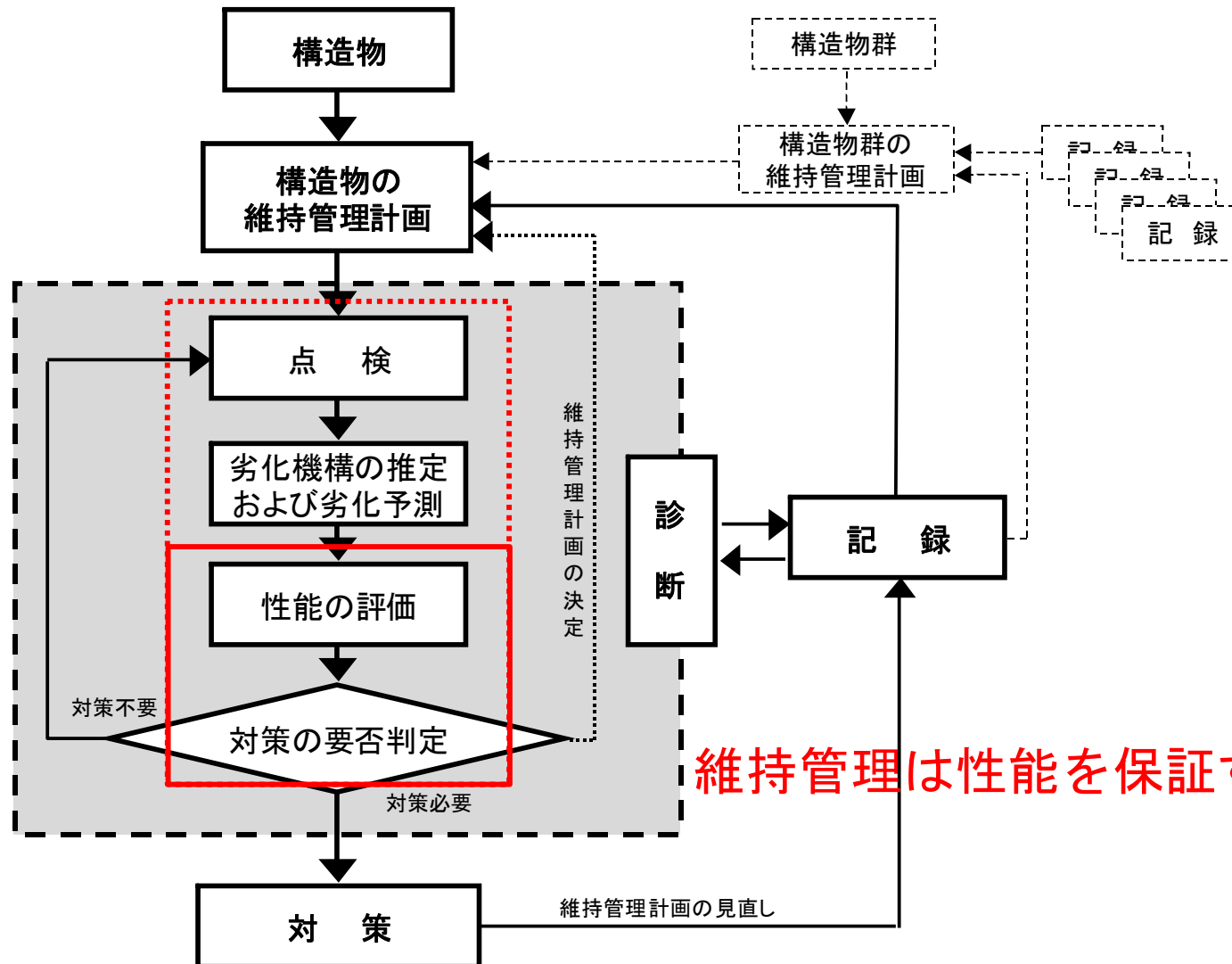
近代土木インフラの設計耐用年数100年

ポルトランドセメント Joseph Aspdin (1824年)
ポルトランド島 (英) の高級建築資材であった石灰岩に風合いが似ていることから「ポルトランドセメント」。

鉄筋コンクリート Joseph Monier (1867年 パリ万国博覧会出展，特許)
メッシュ筋入り植木鉢

コンクリート構造物の維持管理

土木学会コンクリート標準示方書 [維持管理編]



維持管理は性能を保証するためのツール

コンクリート構造物の劣化機構

➤ 鋼材腐食に関するもの

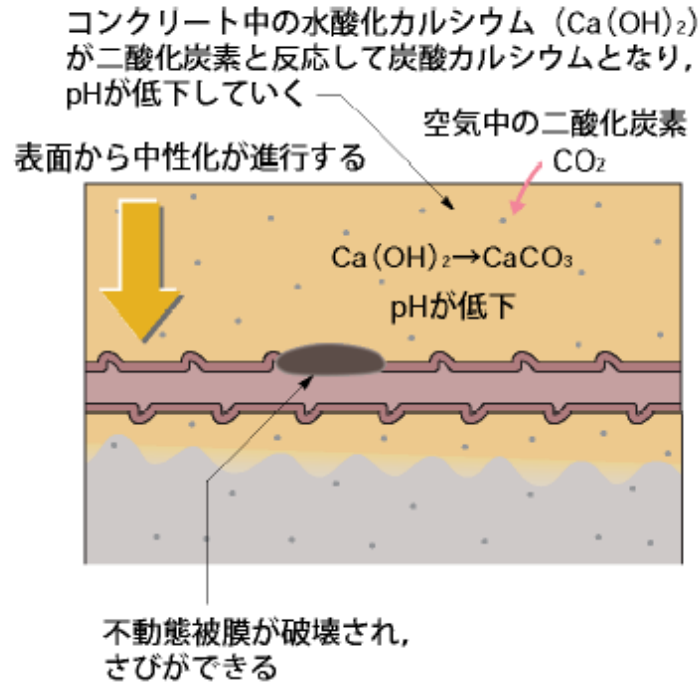
- 中性化と水の浸透
- 塩害

➤ コンクリートの劣化に関するもの

- 凍害
- 化学的侵食
- アルカリシリカ(ASR)反応
- 疲労
- すりへり

中性化・塩害

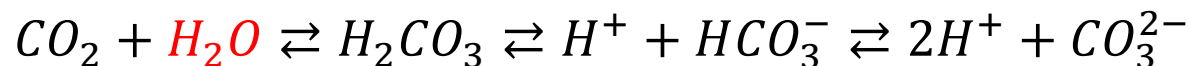
中性化



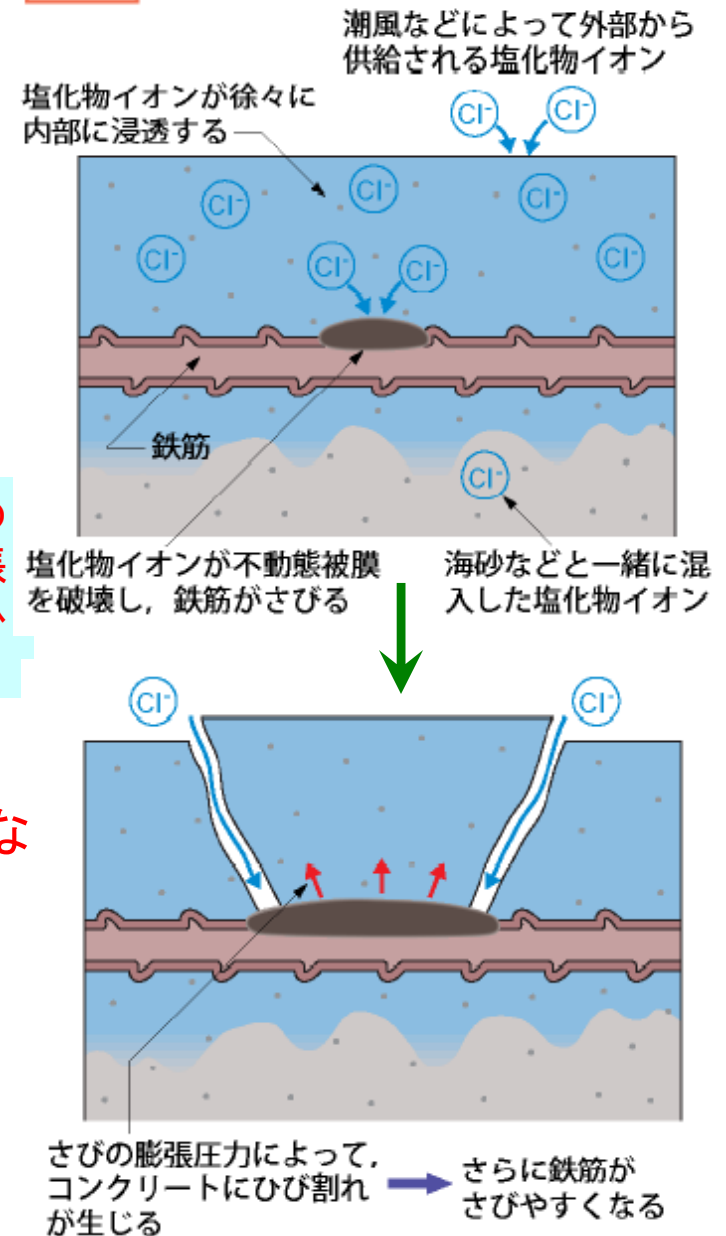
腐食生成物の体積は元の鉄より大きく、この膨張によりコンクリートにひび割れが発生

- コンクリート中の気体の拡散は、**水分で閉塞されていない空隙**で起こる。

- 拡散係数は、気相に比べて液相ではきわめて小さい。
- 一方、水がないと **CO_2 の溶解**が起こらない。

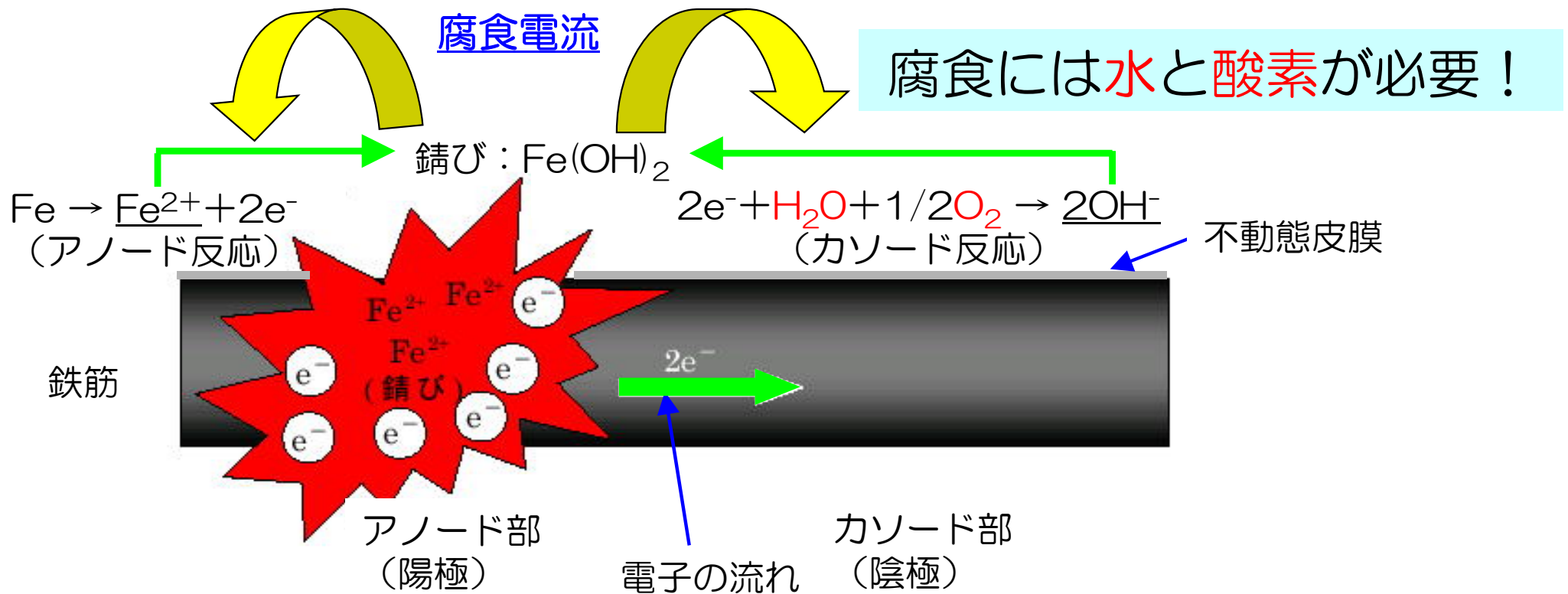


塩害

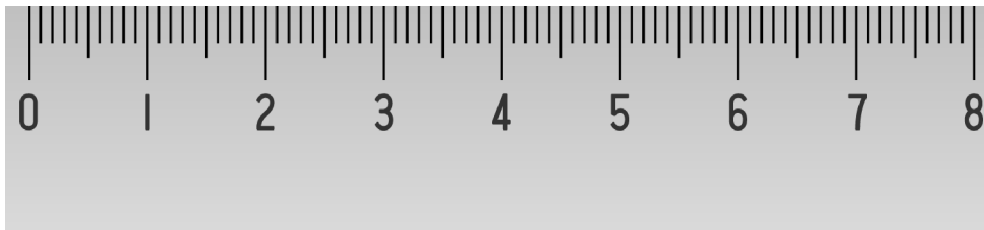


鋼材の腐食反応の概念

“錆びる” = 電池が形成



性能の評価および判定



評価：性能値，等級（グレード），区分などを「定める」行為

現在の性能，グレード

比較

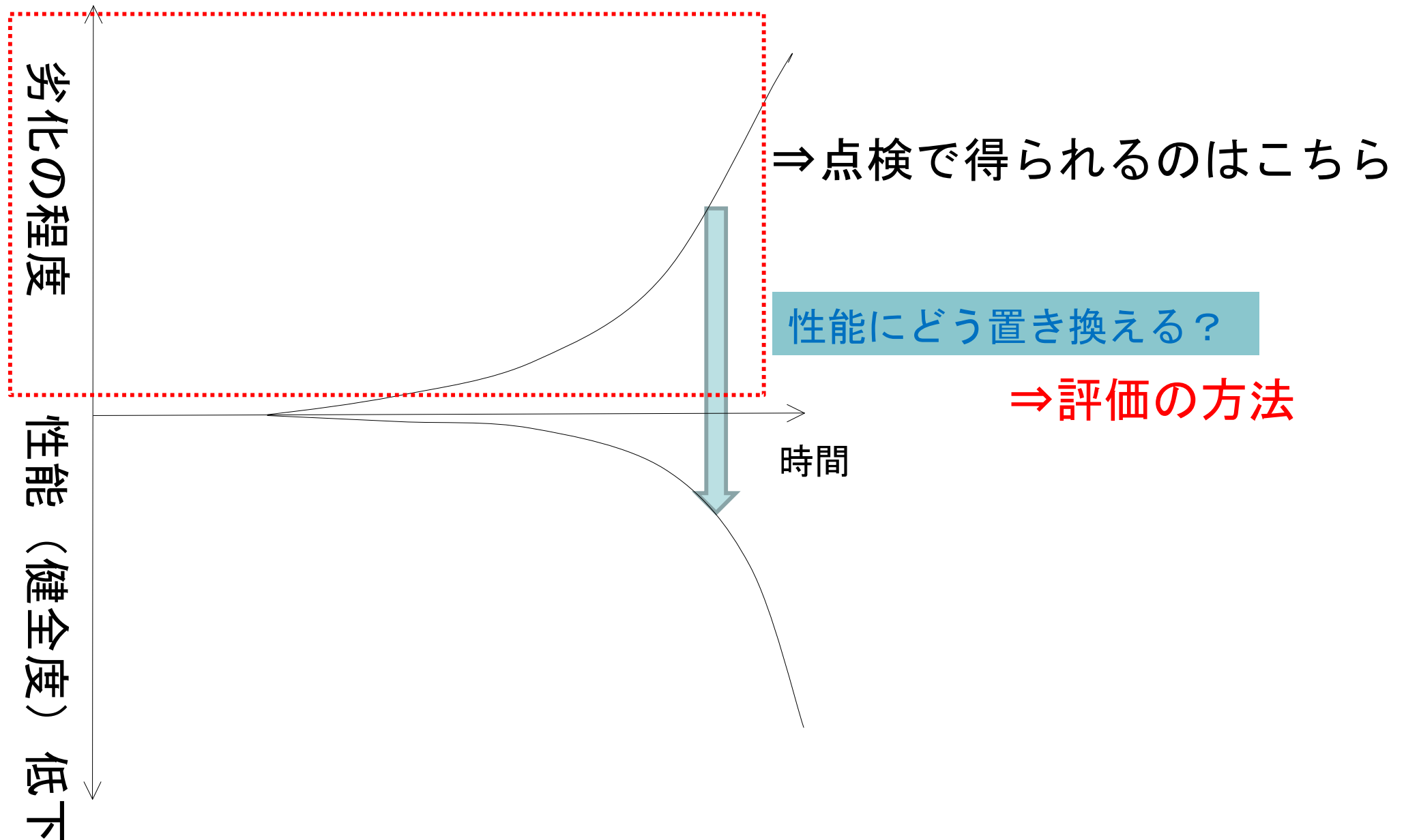
（照査，検査，・・・）

要求性能，限界値，管理値

（対策の要否の）判定

管理者，技術者の判断も入る．

性能, 健全度と劣化の程度



性能評価の方法

1. 評価したい性能に応じて適切な評価手法を選定
2. 点検時だけでなく、将来を予測
⇒劣化機構（劣化の原因）推定の重要性

[方法]

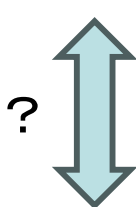
- 外観上のグレードによる方法
- 設計での評価式による方法
- 非線形有限要素解析による方法
- 実構造物の載荷試験，振動試験による方法

橋梁定期点検要領

対策区分の判定区分

判定区分	判 定 の 内 容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある。

健全性の診断における判定区分



区分		
I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

※「損傷」⇒コンクリート標準示方書〔維持管理編〕の「変状」

技術者の高度な判断が必要！

詳細性能評価

概略性能評価

(外観上のグレードを用いる方法)

- ・ 構造物の外観上の変状やグレードから性能を評価 (経験的)

詳細性能評価

(設計での評価式, 有限要素解析)

- ・ 式や解析を利用して性能を評価 (定量的)

詳細性能評価が活かされる場面

概略性能評価
(外観上のグレード)

- ・簡易かつ迅速
- ・評価できる性能の種類が
広範

多数の構造物管理

第三者影響度や美観など外観
や近接点検で分かるもの

詳細性能評価
(設計での評価式)
(有限要素解析)

力学的な根拠
評価, 判断が容易

補修・補強設計
説明責任

安全性, 使用性の力学面に
関する性能

性能評価の階層

マクロ

グレーディング

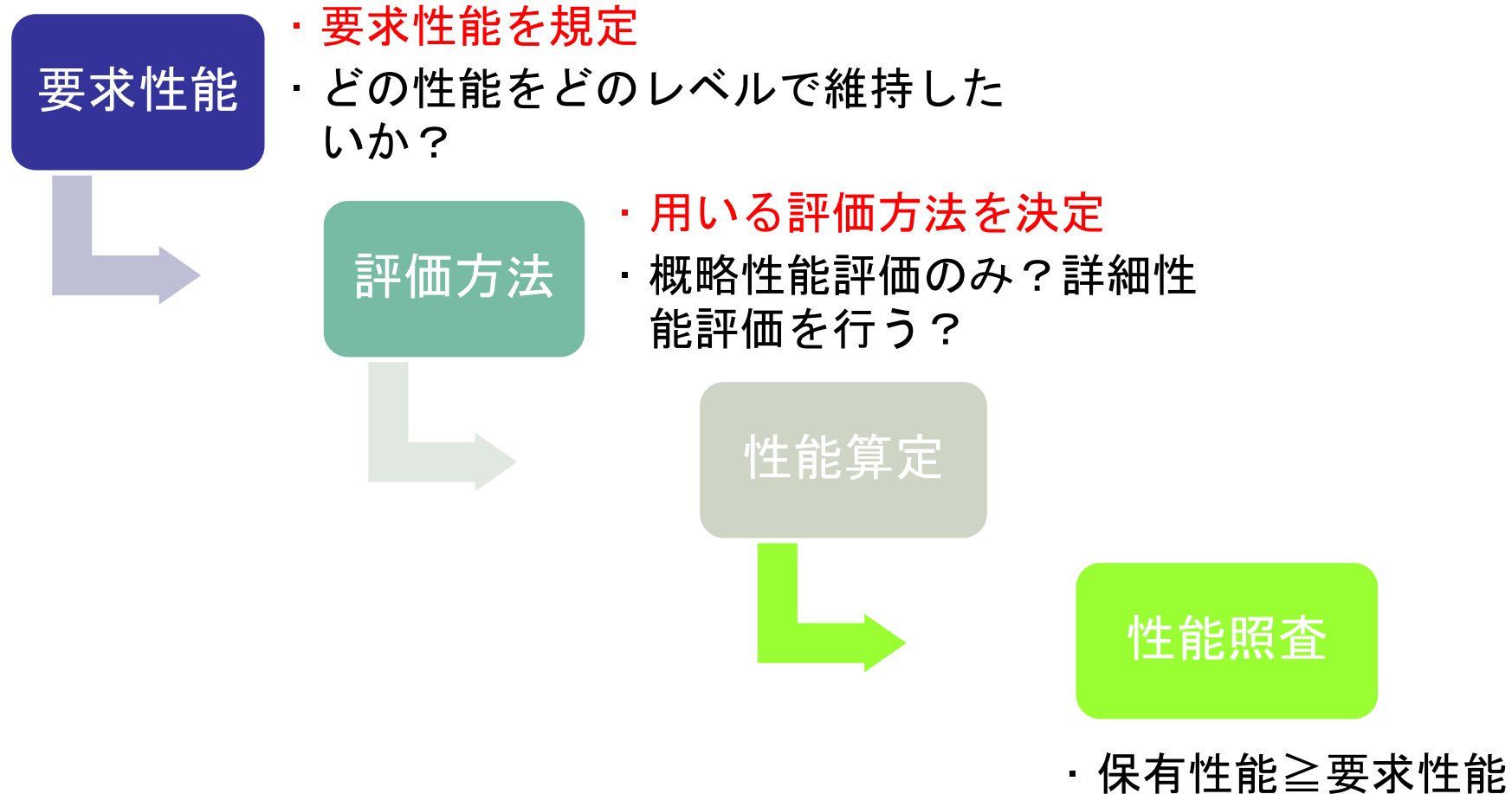
経験的

- ・ 設計式
曲げ耐力算定式
- ・ 線材モデル
ファイバーモデル

定量的

有限要素モデル

維持管理計画



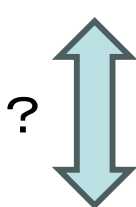
性能を評価する方法を計画しておく！

橋梁定期点検要領

対策区分の判定区分

判定区分	判 定 の 内 容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事で対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある。

健全性の診断における判定区分



区分		
I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

※「損傷」⇒コンクリート標準示方書〔維持管理編〕の「変状」

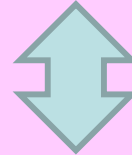
技術者の高度な判断が必要！

腐食ひび割れ幅を利用した概略性能評価

技術力に左右されにくい点検の目安となる指標の導入



腐食ひび割れ幅情報からの推定腐食量



概略性能評価

詳細調査の必要な腐食量の目安

健全性の診断における判定区分（道路橋定期点検要領）

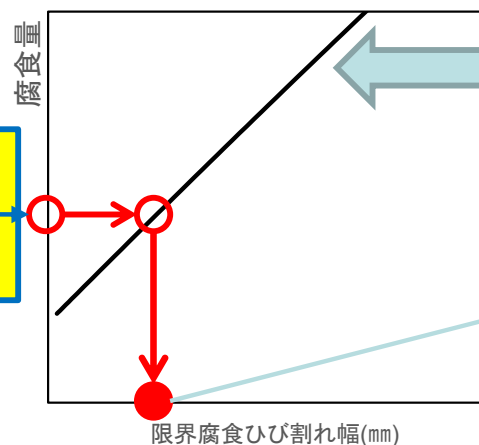
区分		内容
I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
II(C1)	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III(C2)	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

腐食ひび割れ幅利用の流れ

区分		内容
I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、または生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

技術者の経験、鍊度への依存大

腐食量－ひび割れ幅推定モデル



詳細調査が必要となる
限界腐食量を設定
(概略性能評価)

環境条件

➤ 腐食生成物の違いを考慮

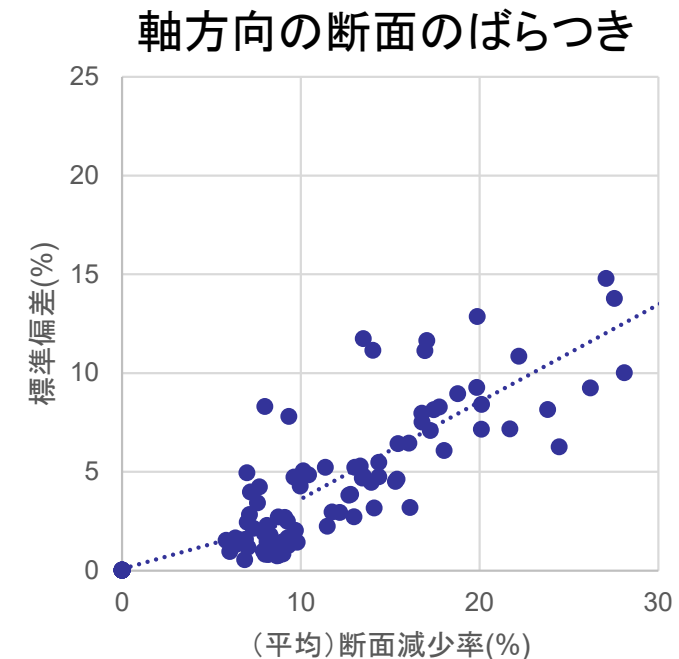
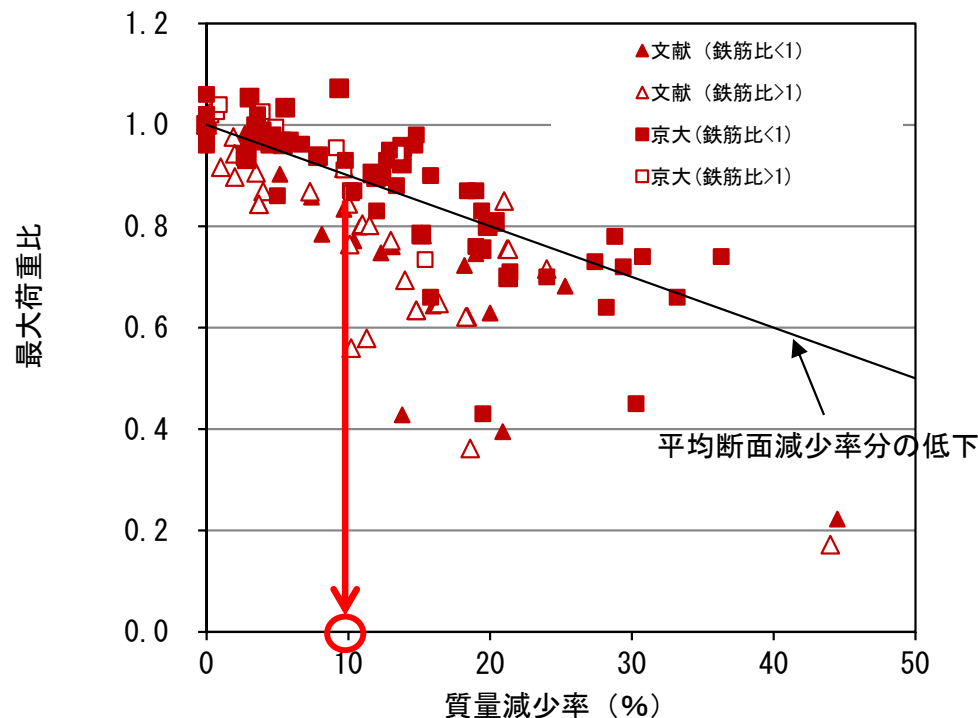


詳細調査の要否判断
(概略性能評価)

技術力に左右されにくい点検の目安となる限界
腐食量，限界腐食ひび割れ幅の導入

曲げ耐荷力を指標とした詳細調査要否判定のための腐食量

- 腐食RC曲げ供試体の載荷実験結果を整理
 - 曲げ引張破壊(設計)
- ⇒10%程度までは平均化した腐食量で評価可能
(RCの前提を満足したRC断面解析利用可能な領域)
- ⇒10%以上で破壊形式が変化(耐荷力が低下)しやすくなる



鉄筋の腐食量推定に用いるための腐食ひび割れ幅－腐食量関係

数値シミュレーションによる定式化

- ・詳細点検が必要となる腐食量の目安(約10%)まで
- ・一次関係式で評価できるひび割れ幅(約1mm)までの範囲で定式化

腐食量 = α (かぶり, 側方かぶり, 体積膨張倍率) $\times w$ + (かぶり, 鉄筋径, コンクリート強度, 体積膨張倍率)

$$r_{loss} = \frac{1.5}{\gamma - 1} \left(r_0 + \frac{w}{0.024 \left(c/L_{sp} \right)} \right) \dots \dots \dots \text{(式①)}$$

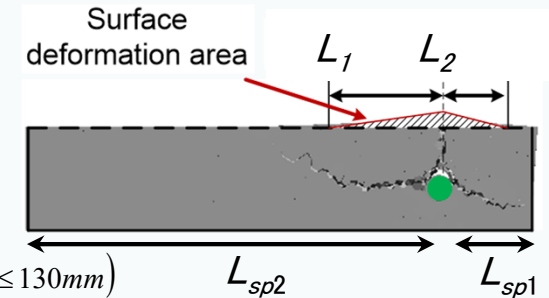
r_{loss} : 半径減少量(mm), r_0 : 腐食ひび割れ発生時の半径減少量(mm), w : ひび割れ幅(mm), γ : 体積膨張倍率, c : かぶり(mm), d : 鉄筋径(mm), f_t : コンクリートの引張強度(N/mm²), L_{sp1} , L_{sp2} : 側方かぶり(mm)

$$r_0 = \left(18.07 \left(\frac{c}{d} \right) + 5.11 \right) \left(\frac{f_t}{2.5} \right)^{0.38}$$

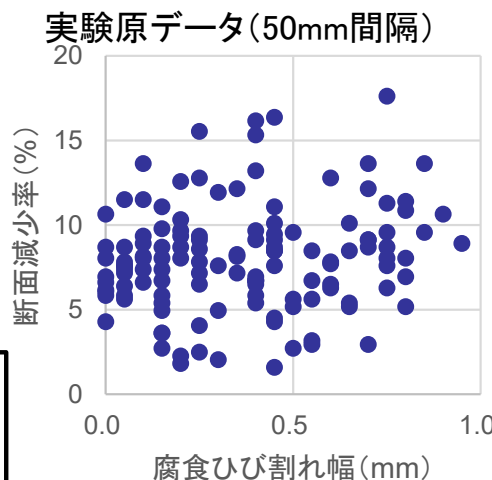
$$L_{sp} = L_1 + L_2$$

$$L_1 = 0.59L_{sp1} + 19.07 \quad (L_1 \leq 185\text{mm})$$

$$L_2 = \begin{cases} L_1 & (L_{sp2}/L_{sp1} = 1) \\ 0.59L_{sp2} + 19.07 & (L_{sp2}/L_{sp1} > 1, \quad L_2 \leq 130\text{mm}) \end{cases}$$

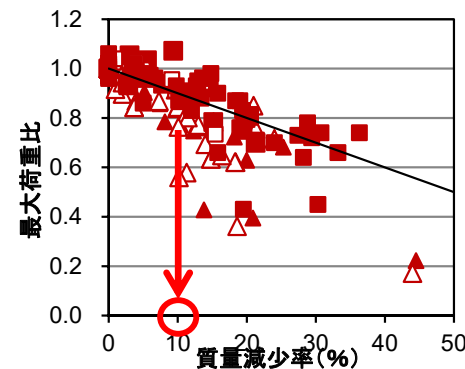


室内実験(乾湿繰返し)によるひび割れ幅と腐食量の関係とのフィッティング



空間平均化による検討

平均腐食量で評価可能な領域の上限を求めたい

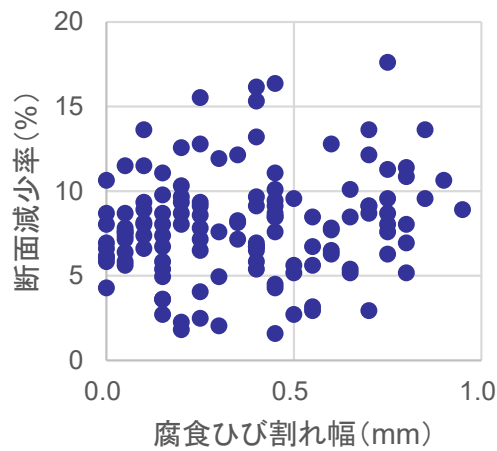


腐食生成物と環境条件の関係

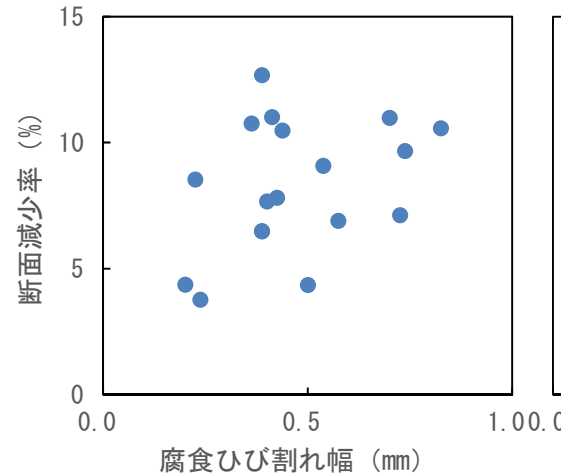
環境条件	さびの状態	腐食速度	体積膨張倍率
湿潤	鉄筋表面に薄い黒さび層が形成 (一部赤さびが混じることもある)	小さい	2.5倍程度
湿潤 (初期欠陥)	- 生成した赤さびが溶出する - 孔食が生じることがある	大きい	溶出
乾燥	鉄筋表面に薄い赤さび層が形成	小さい	3.1倍程度
乾湿繰返し	黒さび層状さびが形成 (さび層表面には赤さびが生成していることも多い)	大きい	2.1倍程度



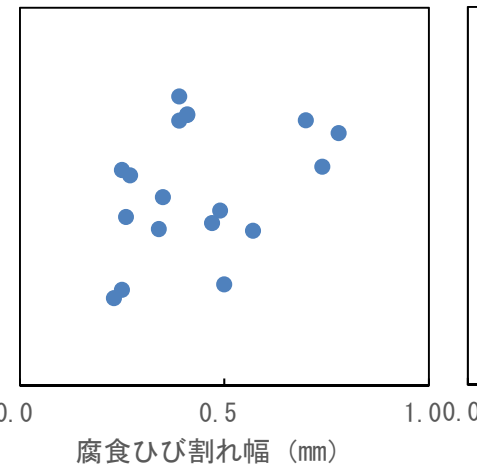
領域平均化した腐食ひび割れ幅－腐食量関係



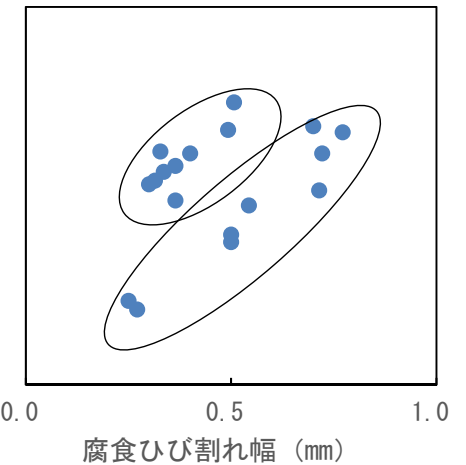
実験原データ(50mm間隔)



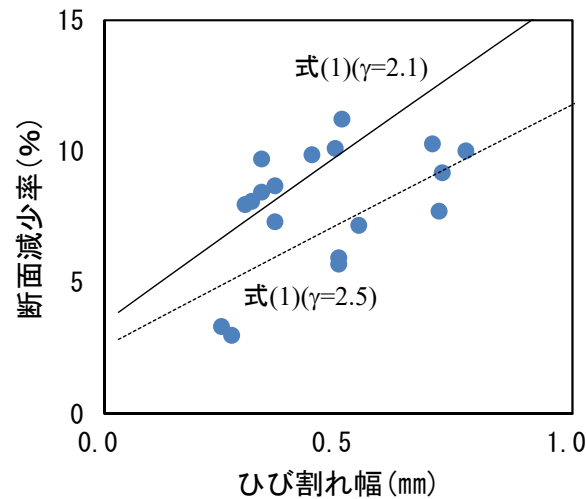
(a)平均化長さ150mm



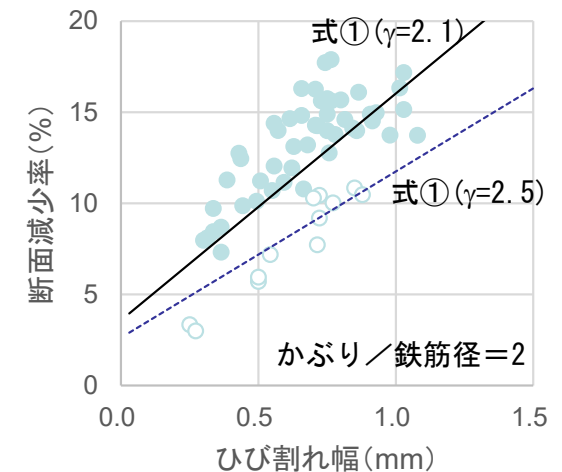
(b)平均化長さ200mm



(c)平均化長さ300mm



$$r_{loss} = \frac{1.5}{\gamma - 1} \left(r_0 + \frac{w}{0.024(c/L_{sp})} \right) \dots\dots\dots (式①)$$



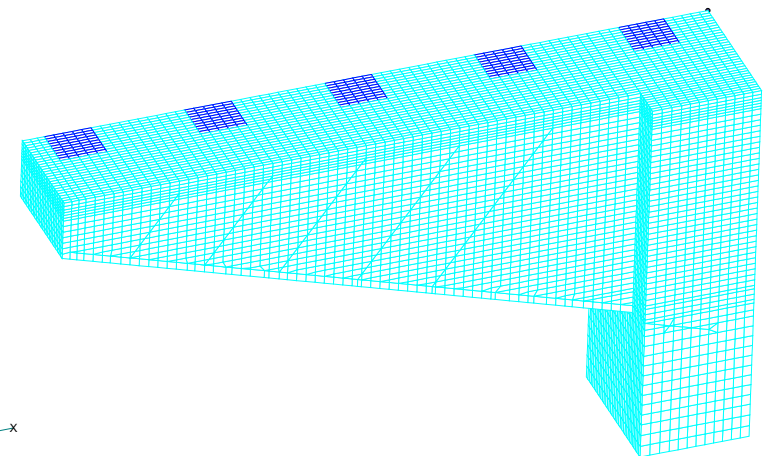
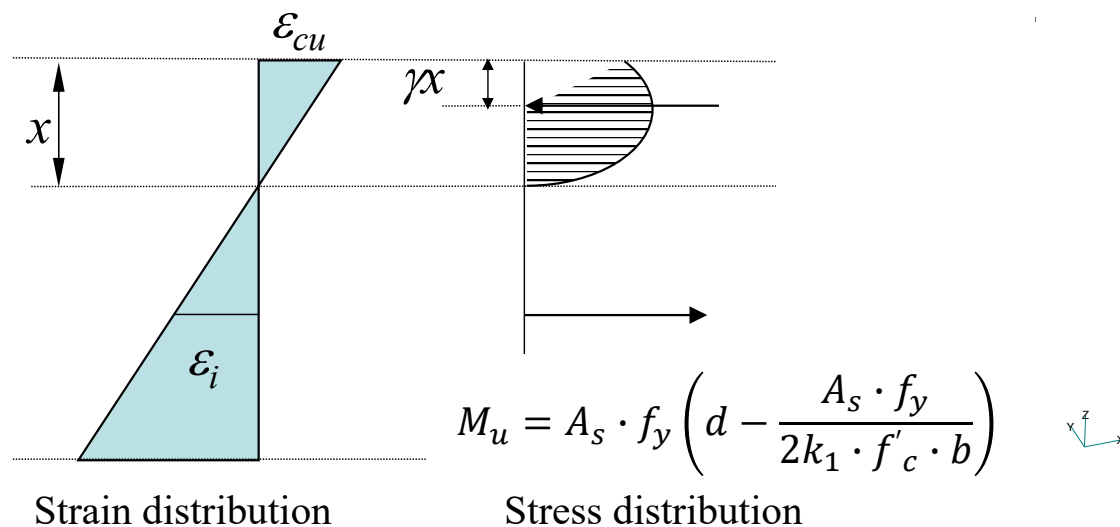
詳細性能評価に必要な情報

概略性能評価（グレーディング手法）

- ・ 近接目視やたたき点検結果を利用

詳細性能評価

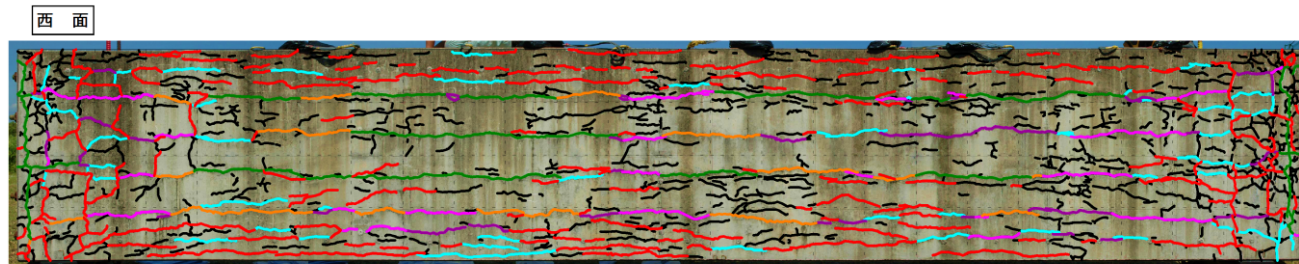
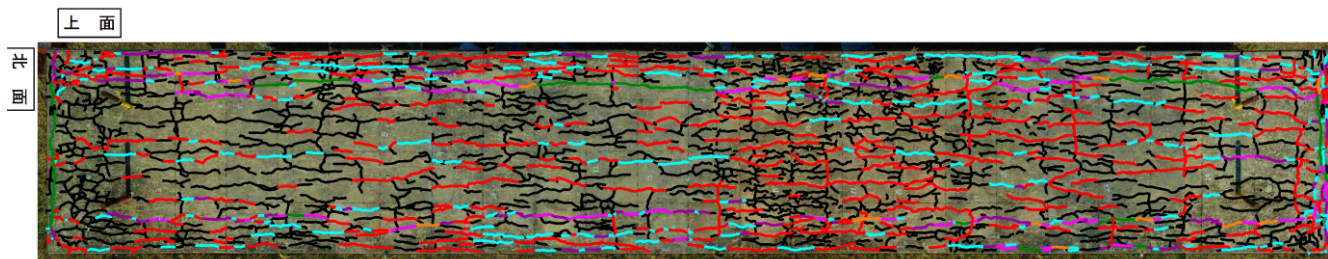
- ・ 力学的な諸量が入力値として必要
- ・ 配筋，コンクリート強度，鉄筋断面積， . . .



劣化の分布

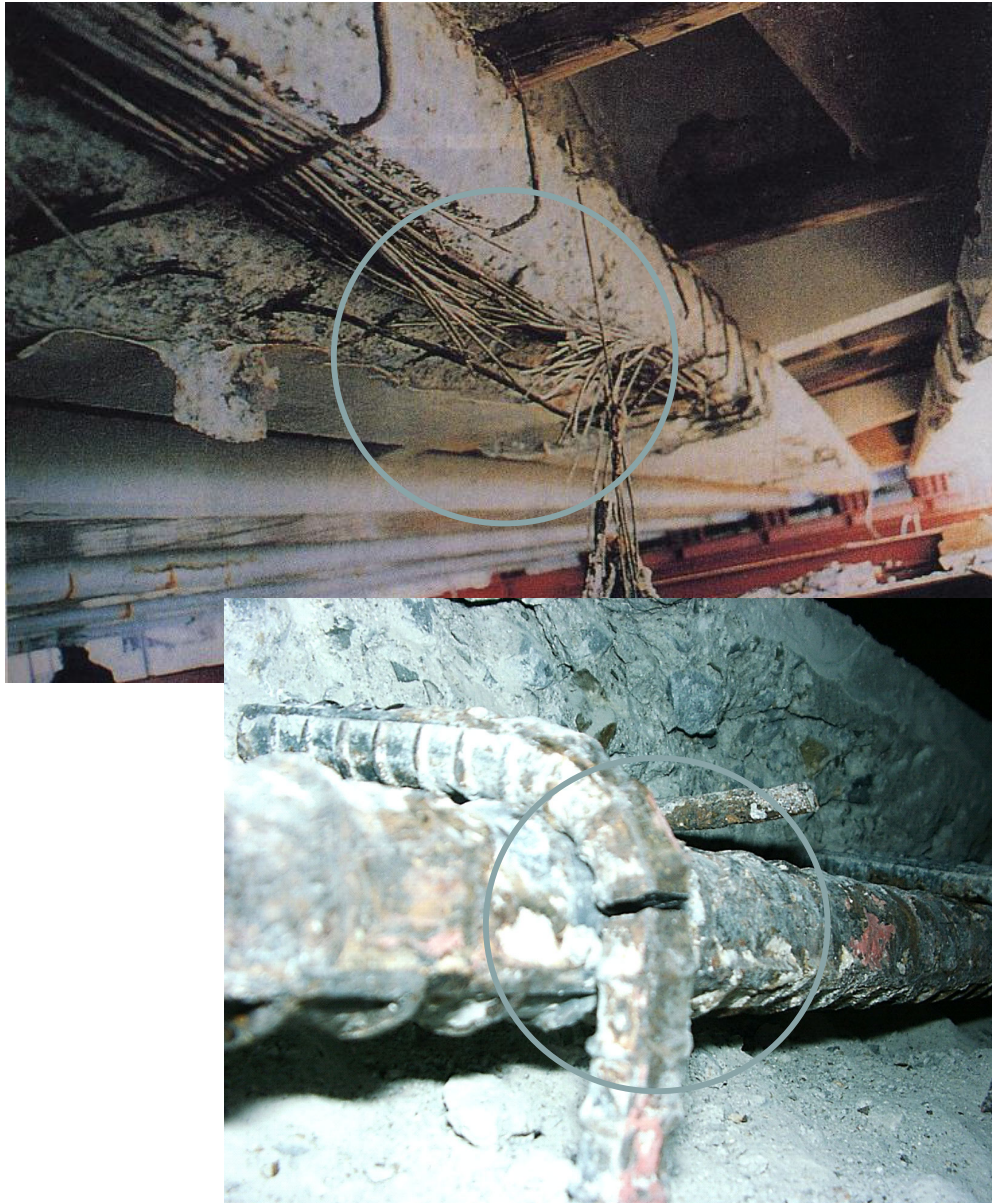


塩害劣化部材中の腐食鉄筋



ASR劣化部材の
コンクリートの膨張
に伴うひび割れ

RC (PC) 構造の前提 (構造細目)



最小鉄筋量は満足？

定着部は満足？

設計式，線材モデル利用の留意点

設計式，線材モデル

- ・材料の力学特性を平均的に使える場合に有効

RC断面の曲げ耐力算定式の例

$$M_u = \underbrace{A_s}_{\downarrow} f_y \left(d - \frac{A_s \cdot f_y}{2k_1 \cdot f'_c \cdot b} \right) \rightarrow \text{引張鉄筋は定着されている必要}$$

どこの断面積を使う？

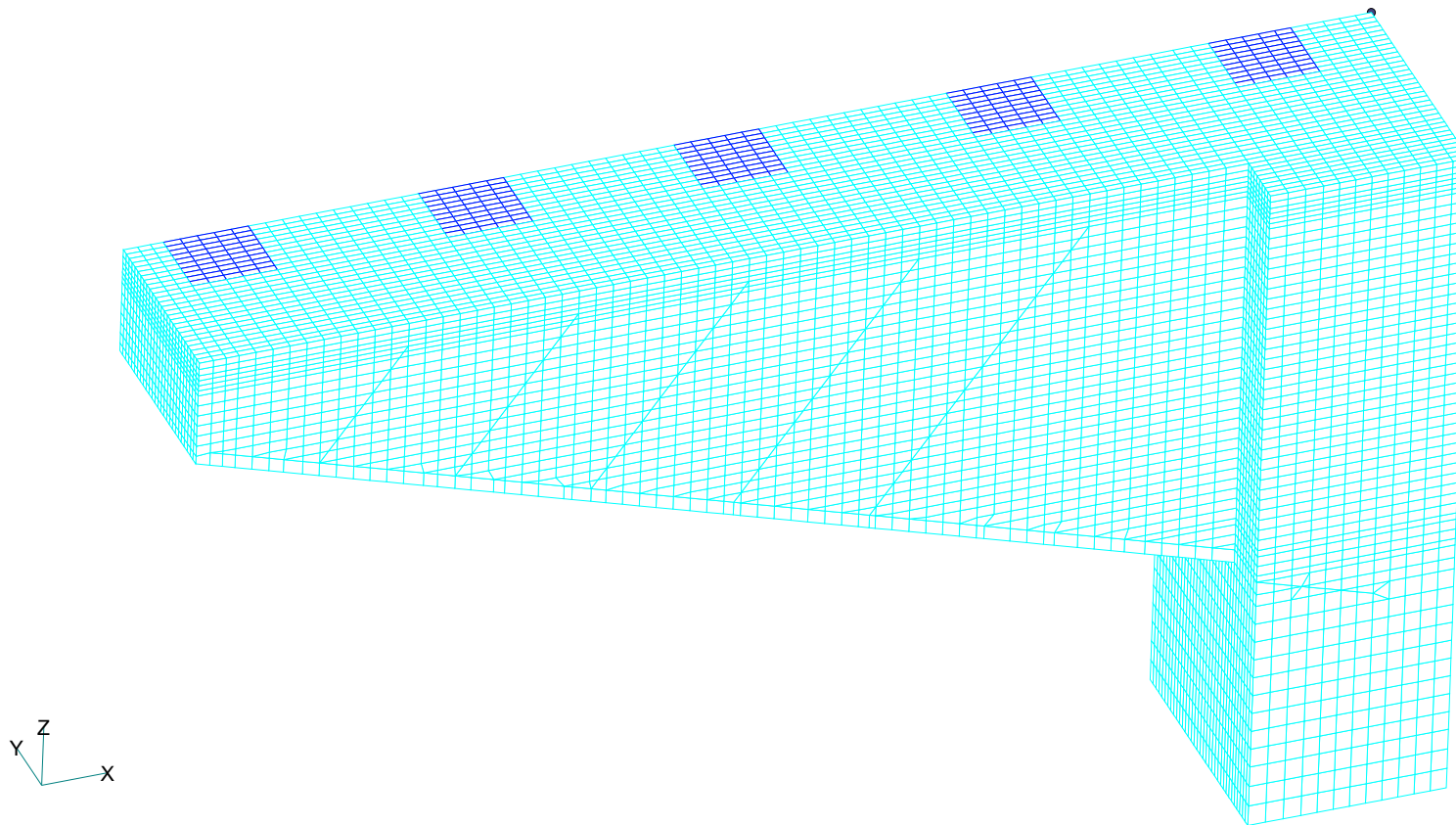
- ・コンクリート強度や鉄筋断面積をどのように平均化？
- ・構造細目は大丈夫？（設計式が使えない！）
- ・材料係数（安全係数）は？

高度な判断が必要な場合も！

有限要素モデルの利用

劣化の空間分布を反映させた入力が可能

- ・ 理論的には劣化の分布を忠実に再現可能



劣化の空間情報の入力

コンクリート

- ・ 変状（ひび割れ，剥離・剥落）
- ・ 力学特性

鉄筋

- ・ 配筋，かぶり
- ・ 腐食状況（断面積）
- ・ 力学特性

付着・定着

- ・ 鉄筋周囲の変状（ひび割れ，剥離・剥落）
- ・ 構造細目（フック，継手）

点検から
適切な情報
を入手

- ・ 目視，机上調査
- ・ 非破壊試験
- ・ 破壊試験

点検手法と入力情報の精度



劣化の程度とサンプル数

(塩害の例) 鉄筋の断面欠損の分布をできるだけ正確に知りたい!

領域の劣化程度

劣化程度に応じた腐食状況調査

腐食状況の調査方法

劣化小

ひび割れ, さび汁なし

たたき, 自然電位により健全性の確認
はつりにより鉄筋の腐食量の直接測定
(サンプル数は少なくてよい)

劣化中

ひび割れ, 剥離が発生

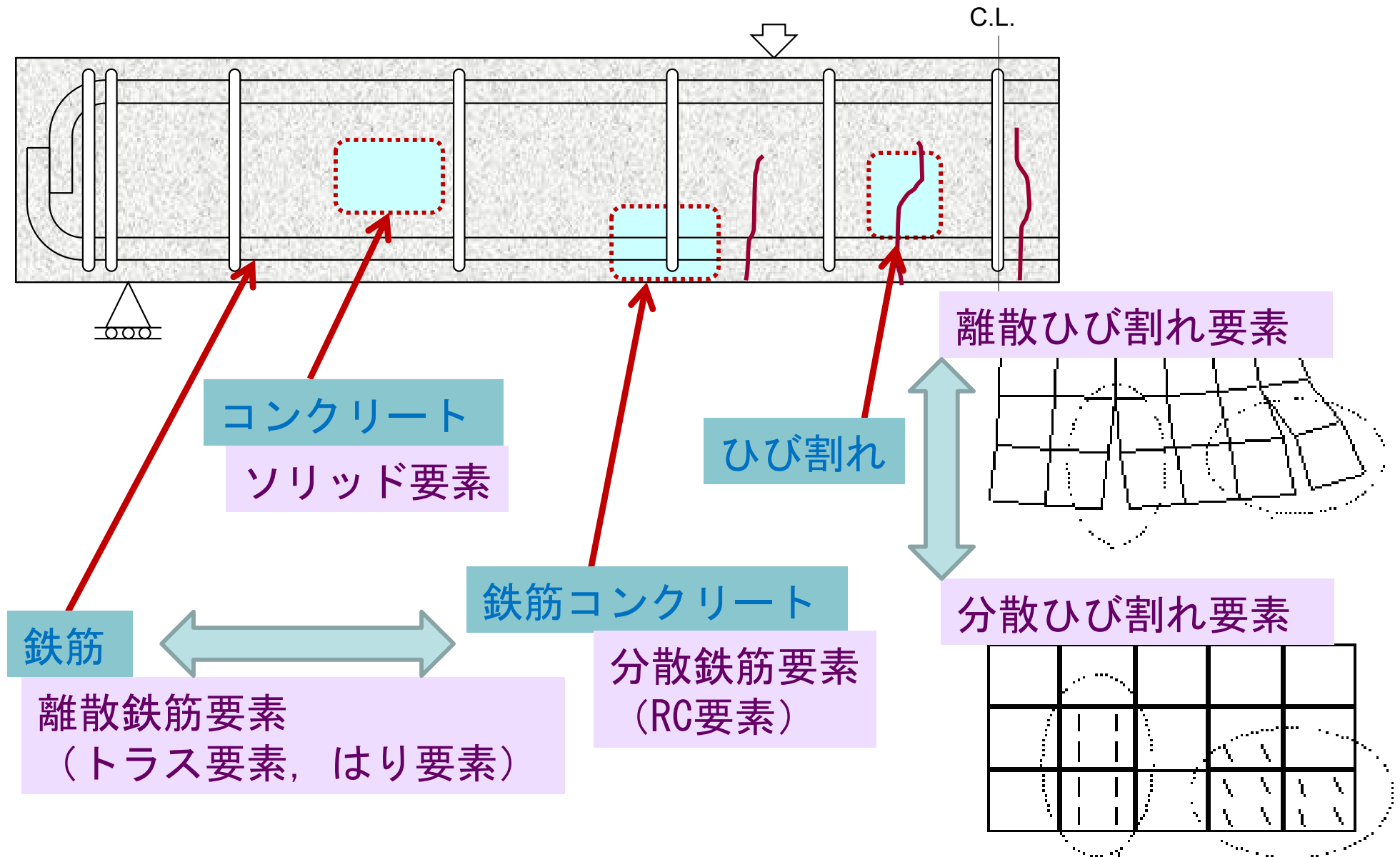
はつりにより鉄筋の腐食量の直接測定
ひび割れ幅により内部の腐食量を推定
(サンプル数?)

劣化大

鉄筋が露出している

目視により鉄筋の腐食状況を確認
腐食量の測定
(サンプル数は少なくてよい)

有限要素法による材料のモデル化手法



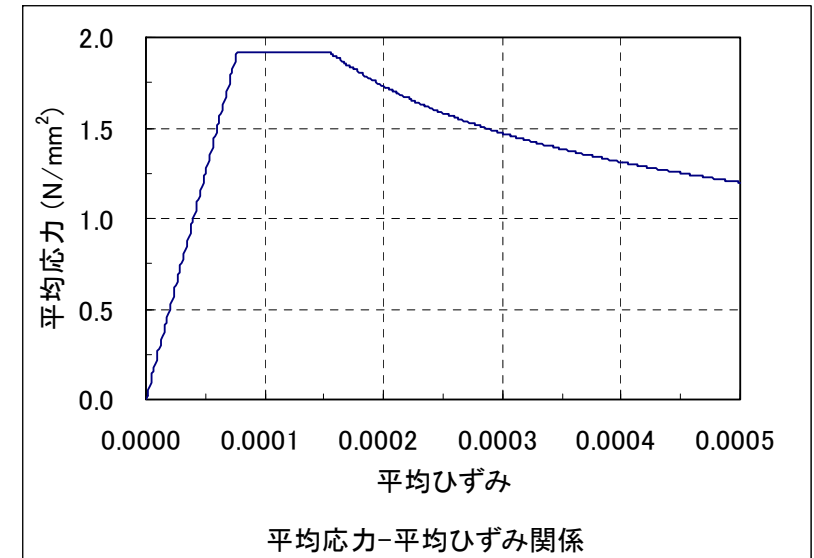
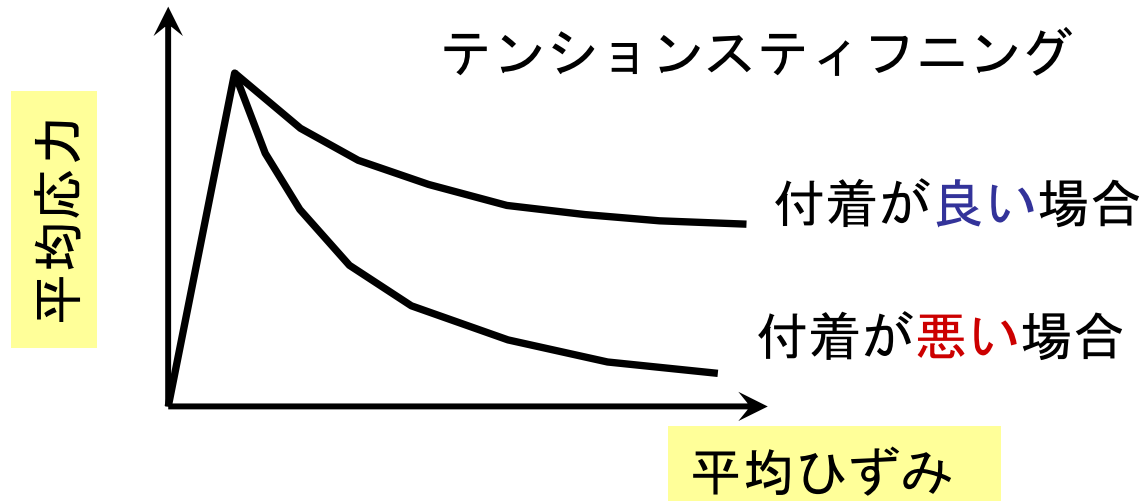
鉄筋とコンクリートの付着のモデル化手法

- 鉄筋はRC構造の屋台骨→耐力への影響が大きい

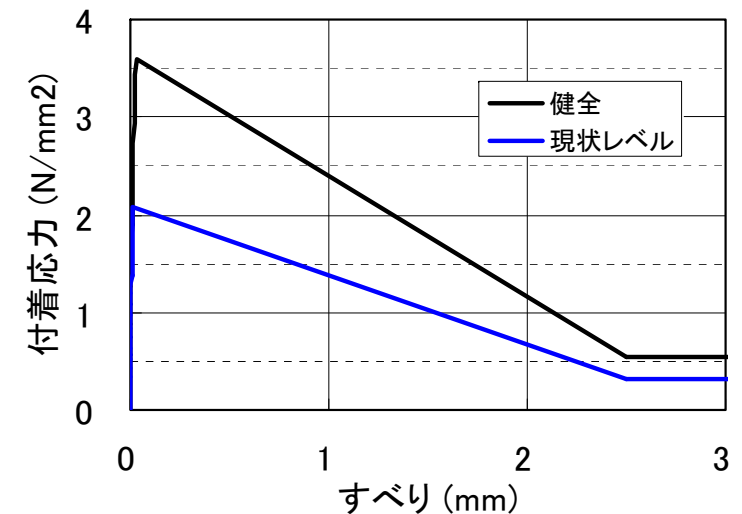
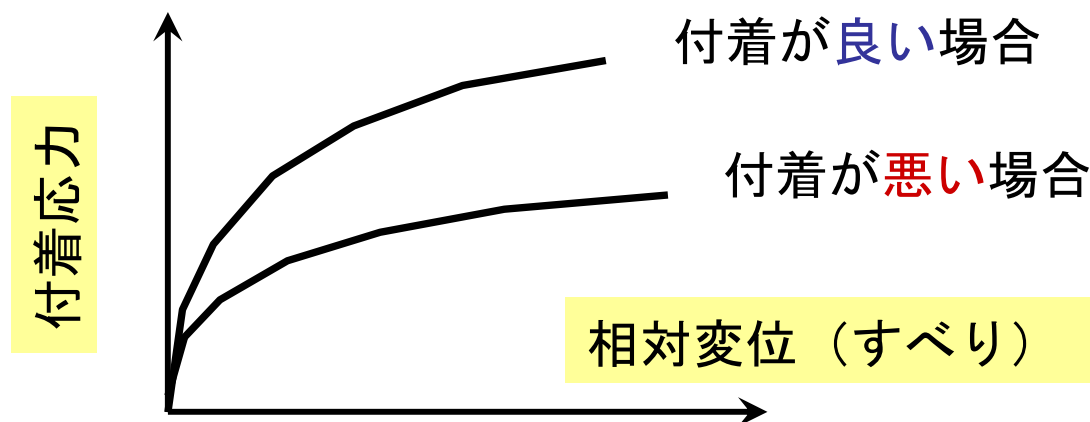
鉄筋		付着	
要素モデル	腐食の取り扱い	要素モデル	付着劣化の取り扱い
離散鉄筋要素	断面積, 応力-ひずみ関係	付着要素	付着応力-すべり関係
分散鉄筋要素 (RC要素)	鉄筋比, 平均応力-平均ひずみ	なし (完全付着)	コンクリートの引張剛性モデル 鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係に考慮

付着のモデル化と劣化の影響

分散鉄筋要素 (RC要素)



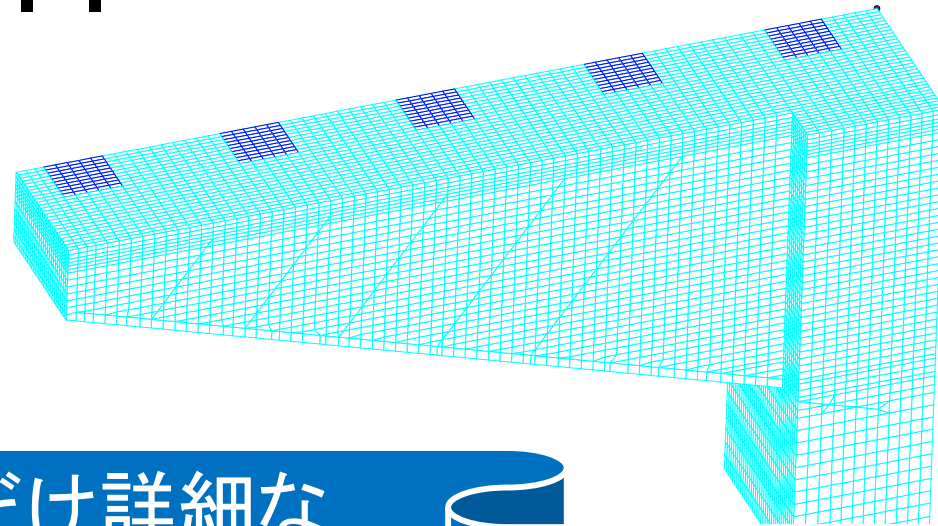
離散鉄筋要素 + 付着要素



有限要素モデルへの劣化情報の入力

劣化の空間分布を反映させた入力が可能

- ・ 理論的には劣化の分布を忠実に再現可能
- ・ しかし、 . . .



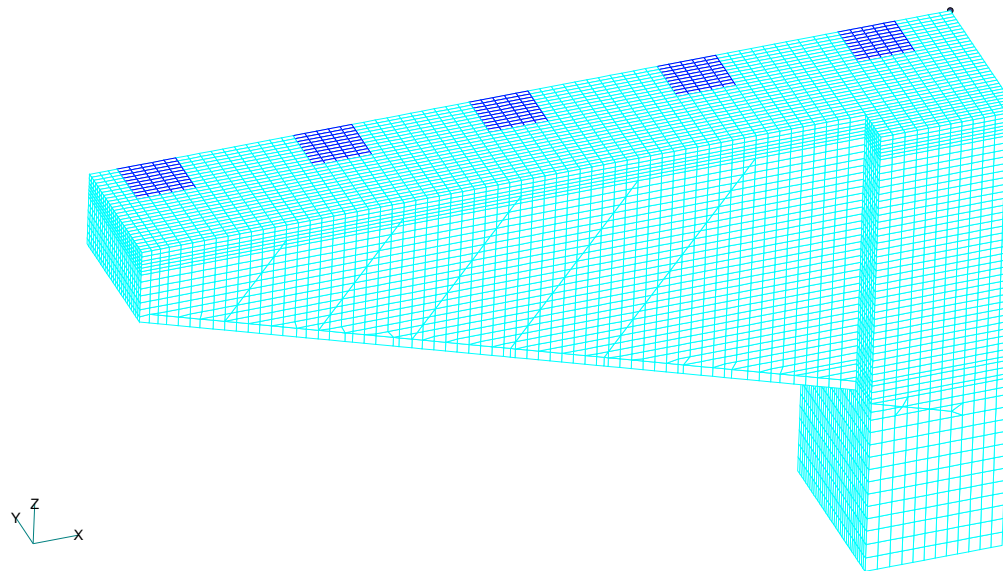
できるだけ詳細な
力学特性データ

労力, 時間,
コスト

有限要素モデルへの劣化情報の入力

要素はある程度の大きさをもつ

- ・ 要素内は平均化
- ・ 要素の中でさらに劣化の分布があると・・・

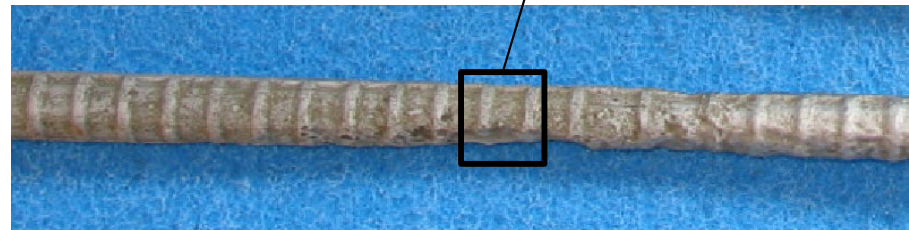


劣化（鉄筋腐食量） 分布の取り扱い

平均化領域：小
（要素分割小）

鉄筋断面積（鉄筋比）：低減
鉄筋の応力－ひずみ関係：健全

要素の大きさ



劣化（鉄筋腐食量） 分布の取り扱い

平均化領域：大

（要素分割大，ファイバー法）

鉄筋断面積（鉄筋比）：（平均腐食量に）低減

鉄筋の応力－ひずみ関係：降伏点，ヤング係数低減

鉄筋断面積（鉄筋比）：健全

鉄筋の応力－ひずみ関係：降伏点，ヤング係数低減

鉄筋断面積（鉄筋比）：（最大腐食量に）低減

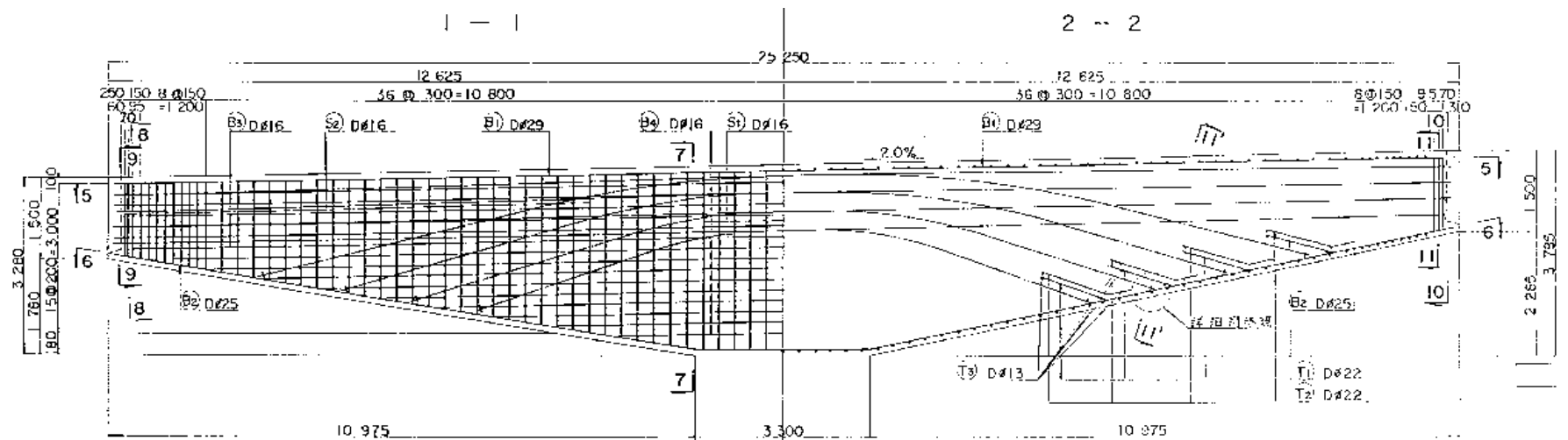
鉄筋の応力－ひずみ関係：健全



要素内の最小の断面の
影響を考慮

要素の大きさ

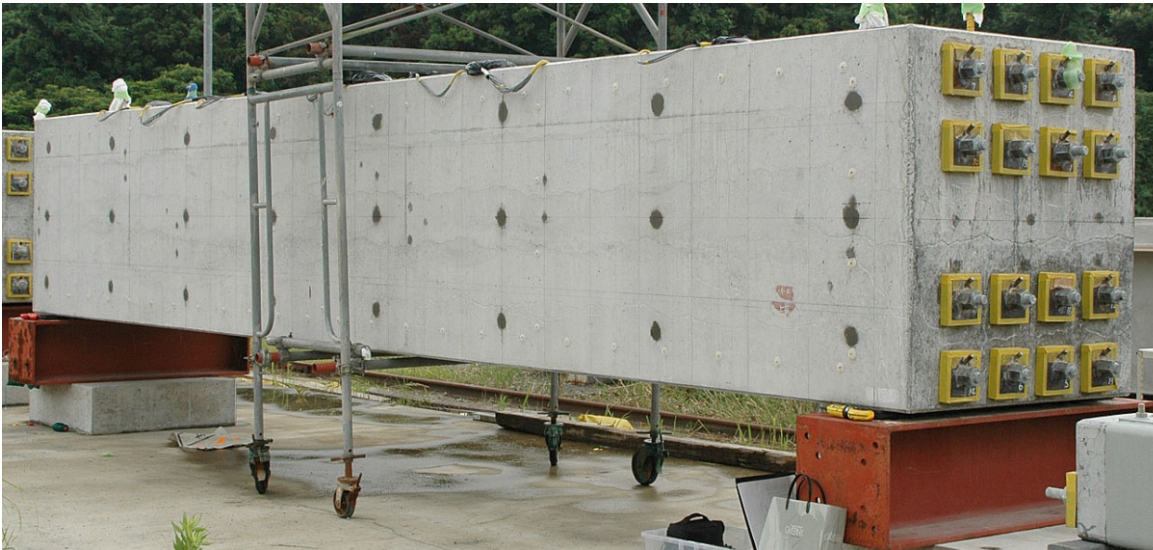
ASR劣化構造物の耐荷性能評価



ASR劣化構造物の耐荷性能評価 ～大型PCはり供試体の長期計測結果～

供試体の概要

材齢約2700日(7.5年)まで屋外曝露し、長期計測を実施



大型供試体 (約28ton)

幅 $B = 1.200 \text{ m}$

高さ $H = 1.250 \text{ m}$

長さ $L = 7.500 \text{ m}$

反応性、健全各1体

ASR劣化供試体としては世界最大級

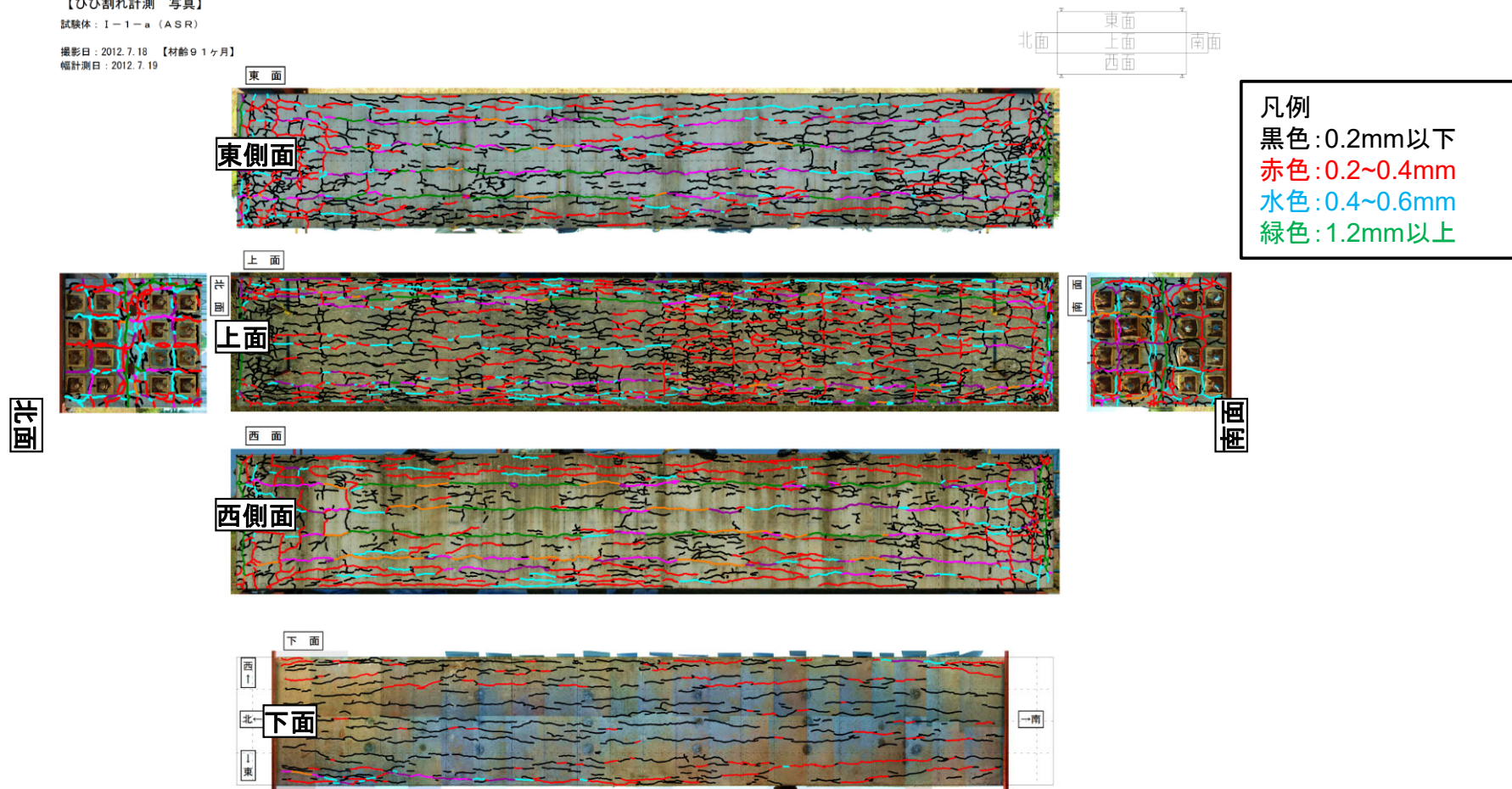
長期計測結果

【ひび割れ計測 写真】

試験体: I-1-a (ASR)

撮影日: 2012. 7. 18 【材齢9ヶ月】

幅計測日: 2012. 7. 19



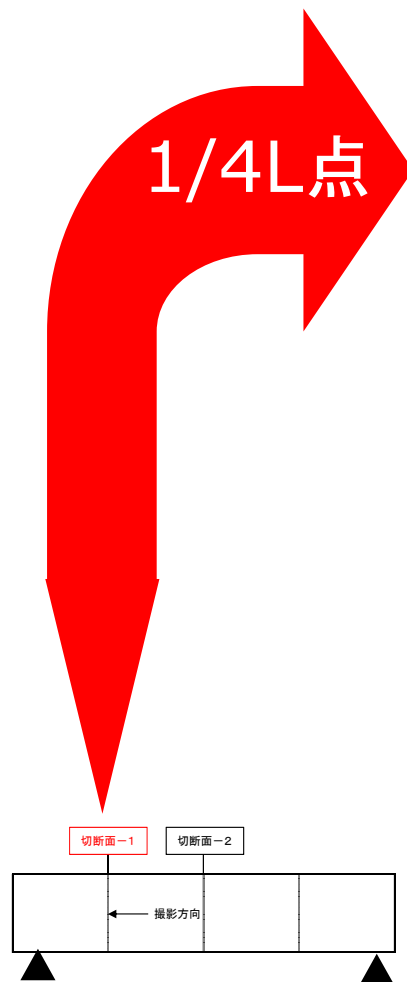
雨に曝される上面が最もひび割れが多い.

PC鋼材張力の変動ほとんどなし.

(初期: クリープ卓越, 7.5年まで: 膨張への拘束卓越, 以降: ?)

断面内のひび割れの様子

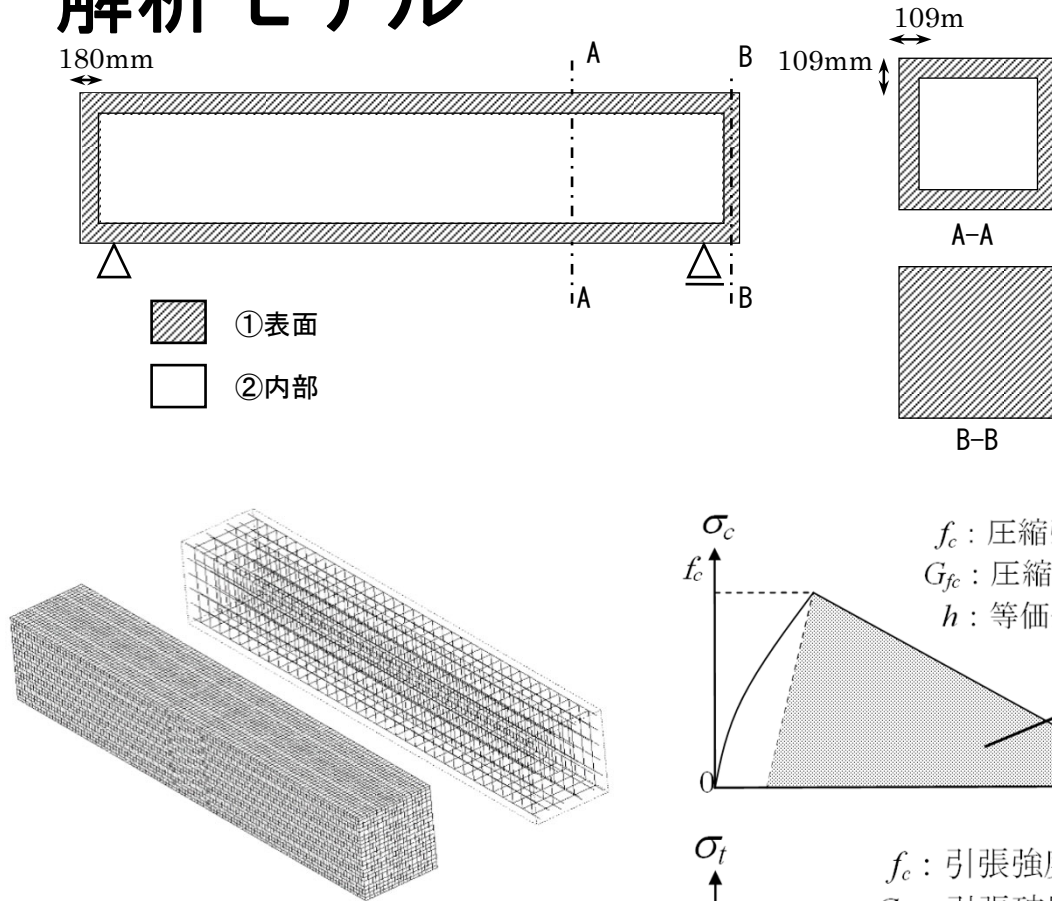
破壊試験終了後、ワイヤーソーで切断し、断面の状況を確認
写真は(1/4L点での状況)



視認できるASRのひび割れは、表面部(かぶり部)

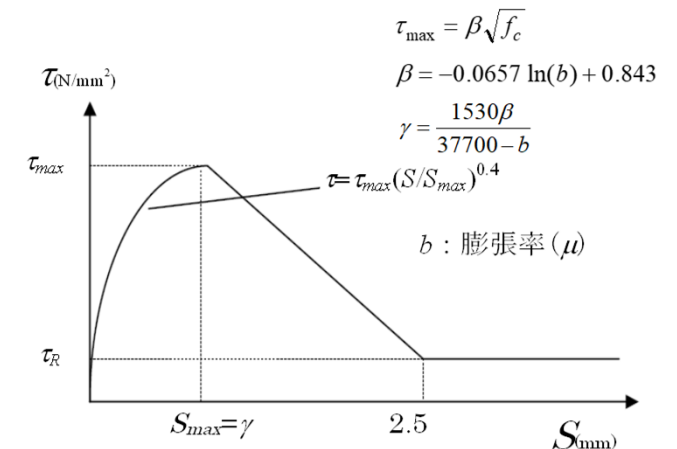
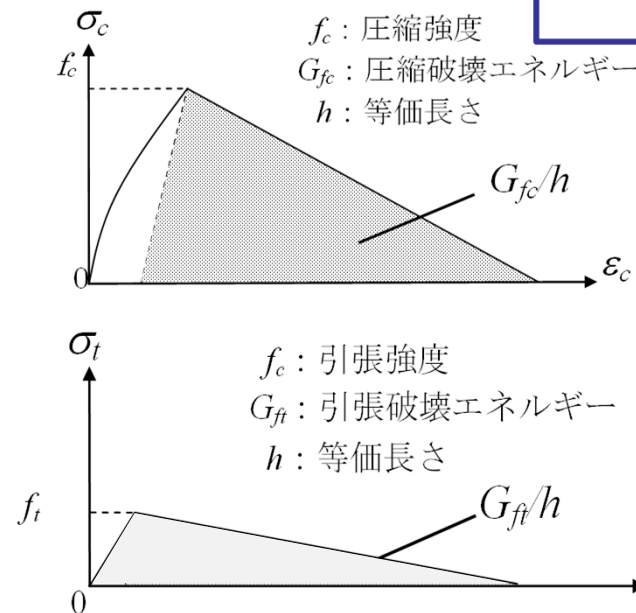
曲げ載荷試験の再現解析

解析モデル

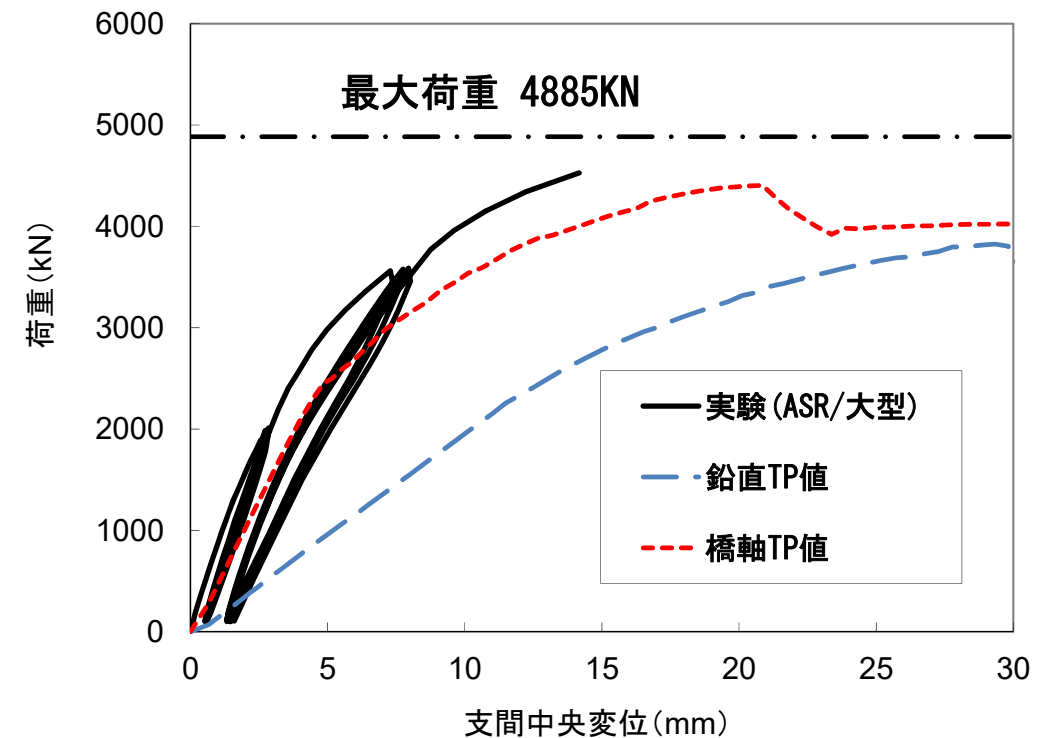
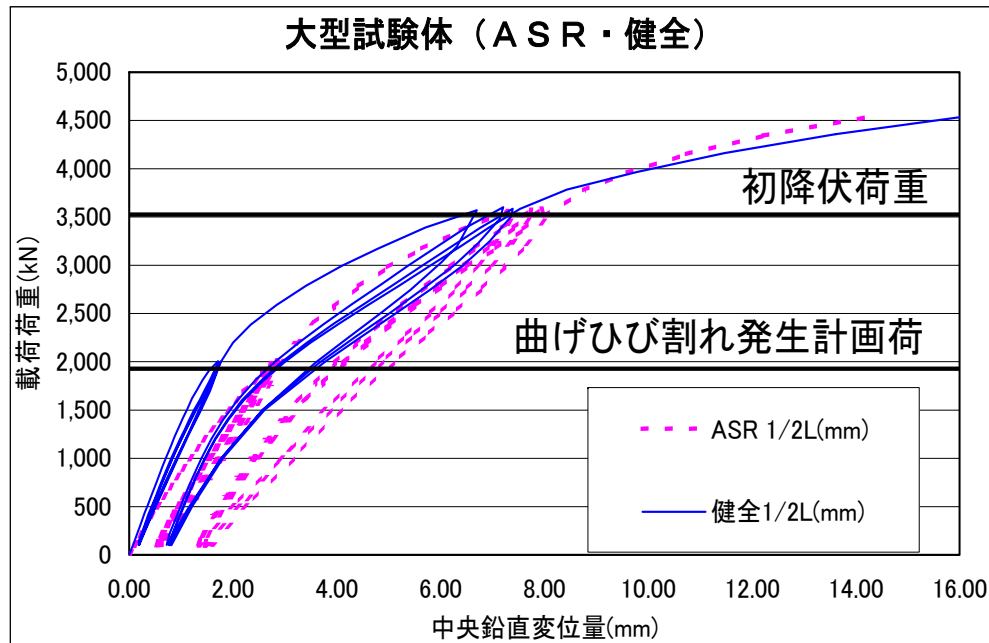


解析条件

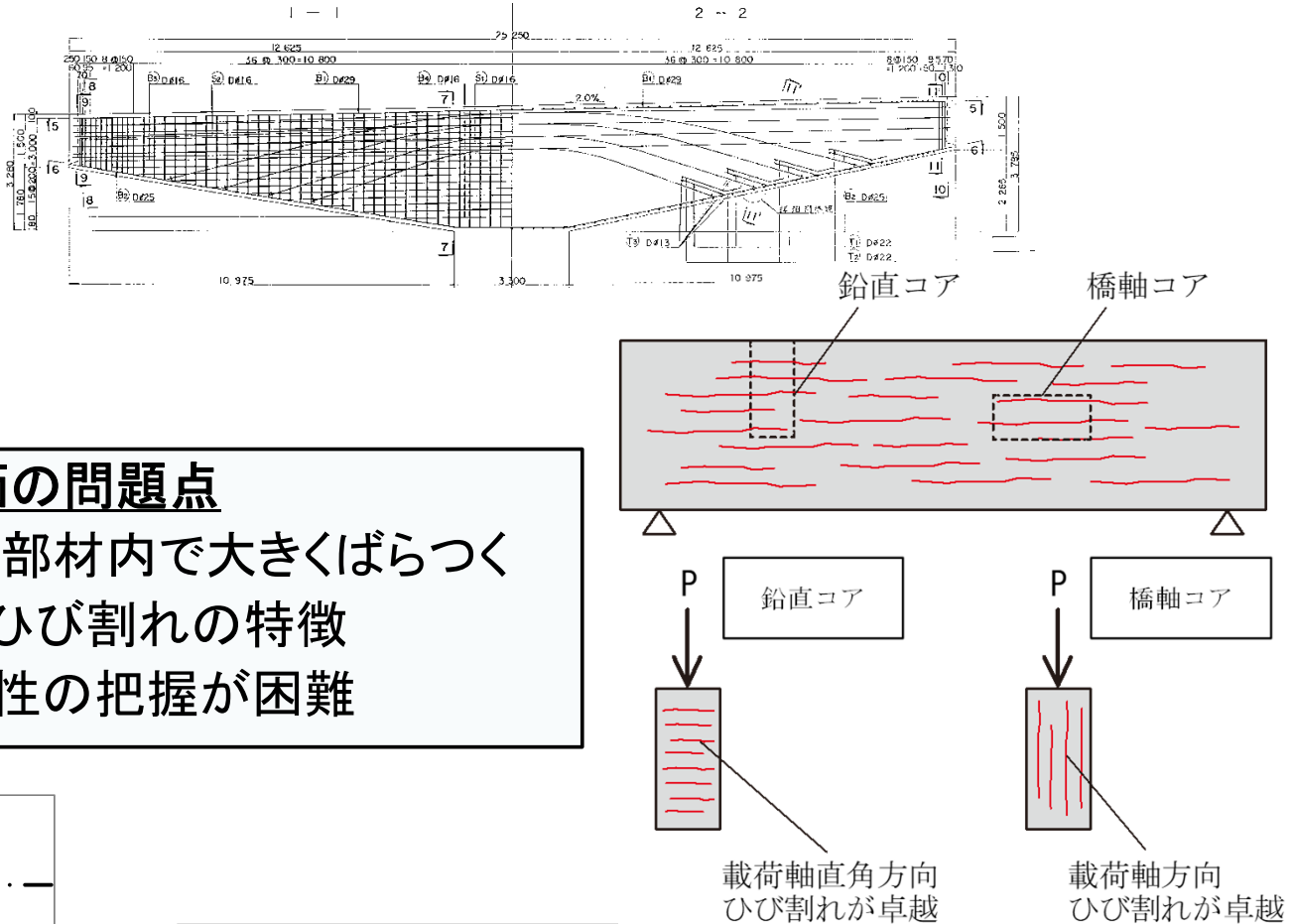
- ・汎用FEMコードDIANA
- ・3次元ソリッド要素(6節点アイソパラメトリック完全積分)
- ・固定ひび割れ
- ・PC鋼材は完全付着
- ・鉄筋は付着-すべりを考慮
- ・ケミカルプレストレスは張力増分として入力



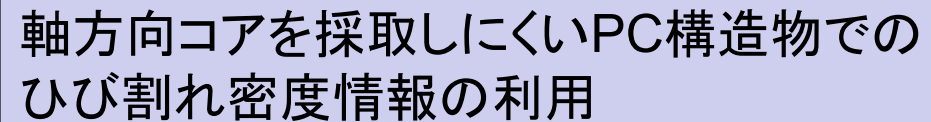
載荷実験および解析の結果



入力値によっては、解析結果が合わないことも！



- ASRによる劣化は、構造物や部材内で大きくばらつく
- PC構造物のASR劣化に伴うひび割れの特徴
- コアによるコンクリート力学特性の把握が困難



詳細調査の要否判定に用いる概略評価

おわりに

- ・ どの性能をどのレベルで評価したいか計画する.
- ・ 性能評価に必要な手法を選定する.
- ・ 性能評価手法に必要な入力情報を整理する.
- ・ 入力情報を得るための点検手法, 精度, 数量を把握する.
- ・ 劣化は空間的に分布をもつ.