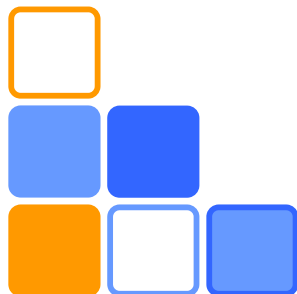


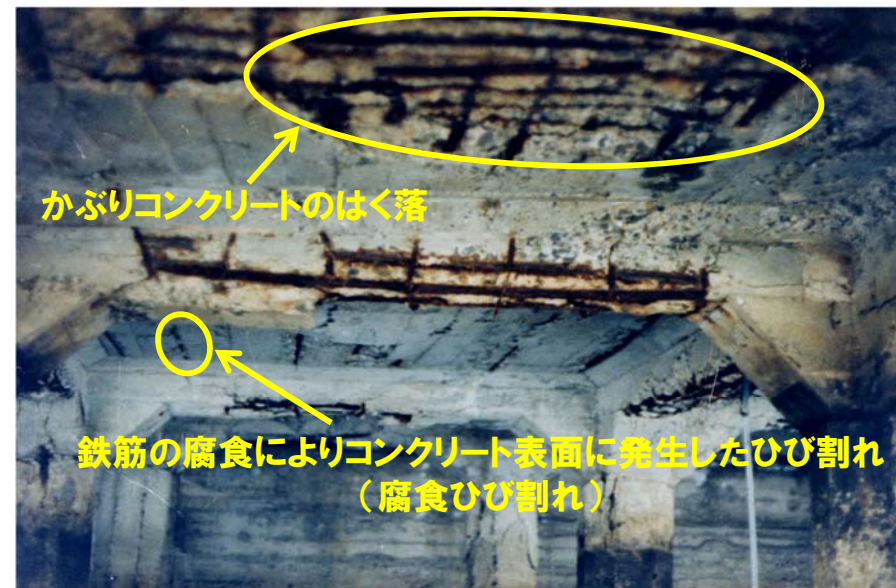
非破壊評価を援用した港湾コンクリート 構造物の塩害劣化予測手法の開発



大阪大学大学院 鎌田敏郎
佐賀大学大学院 ○内田慎哉



塩害劣化したRCスラブの一例



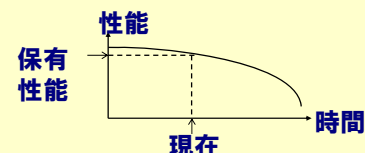
コンクリート構造物の合理的な維持管理(理想)

①点検・調査

目視:ひび割れ
テストハンマー:圧縮強度
電磁波レーダ法/電磁誘導法:鉄筋径, かぶり厚さなど
EPMA:塩化物イオン濃度量
自然電位法/分極抵抗法:鉄筋腐食程度など

②保有性能評価 劣化予測

・耐荷性能
・使用性能
・耐震性能
・耐久性能
など

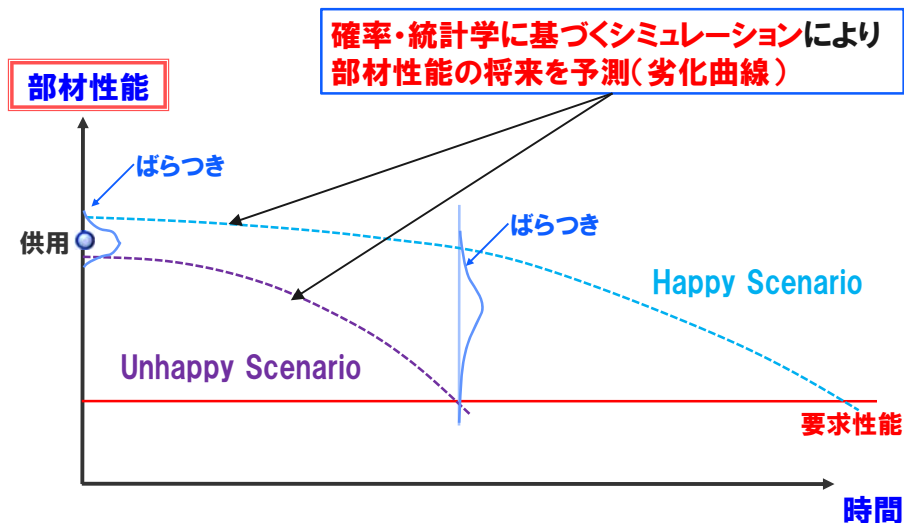


③補修・補強対策 の検討

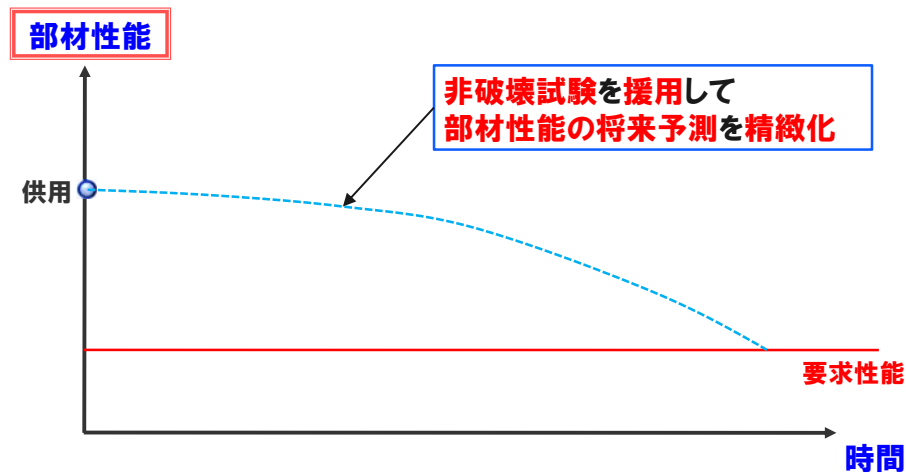
・コスト
・耐用年数
・設計手法
・性能改善度
・施工条件 など



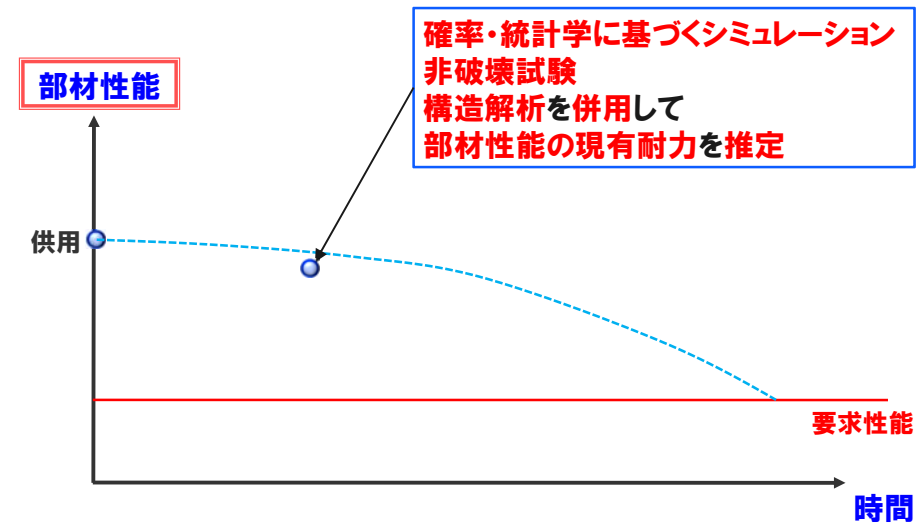
開発した手法①



開発した手法②

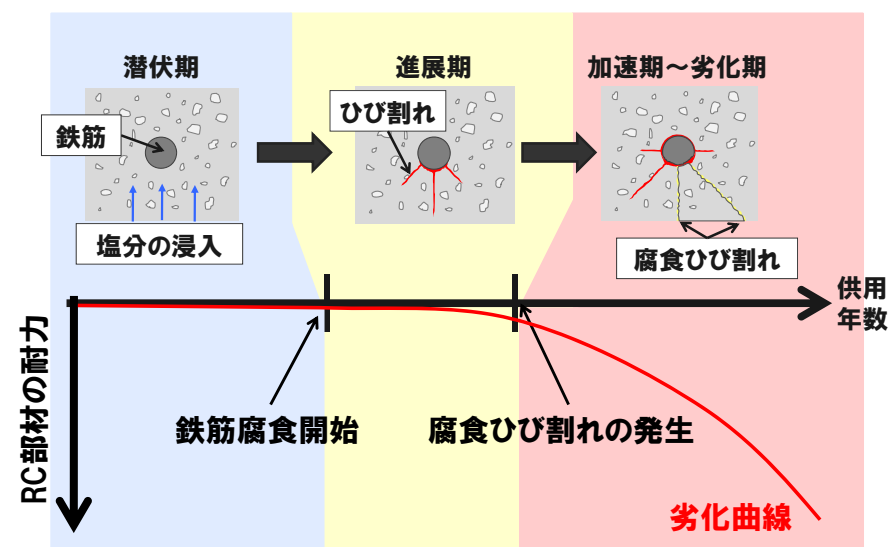


開発した手法③



①確率・統計学に基づくシミュレーションにより 部材性能の将来を予測する手法

塩害を受けるRC部材の劣化進行過程 土木学会 コンクリート標準示方書【維持管理編】



目的

塩害によるRC部材の劣化進行過程を確率過程を含む数値モデルとして取り扱い、

①飛沫帯にあるRCスラブを対象に、

- ・部材の設置環境条件（表面塩化物イオン濃度）

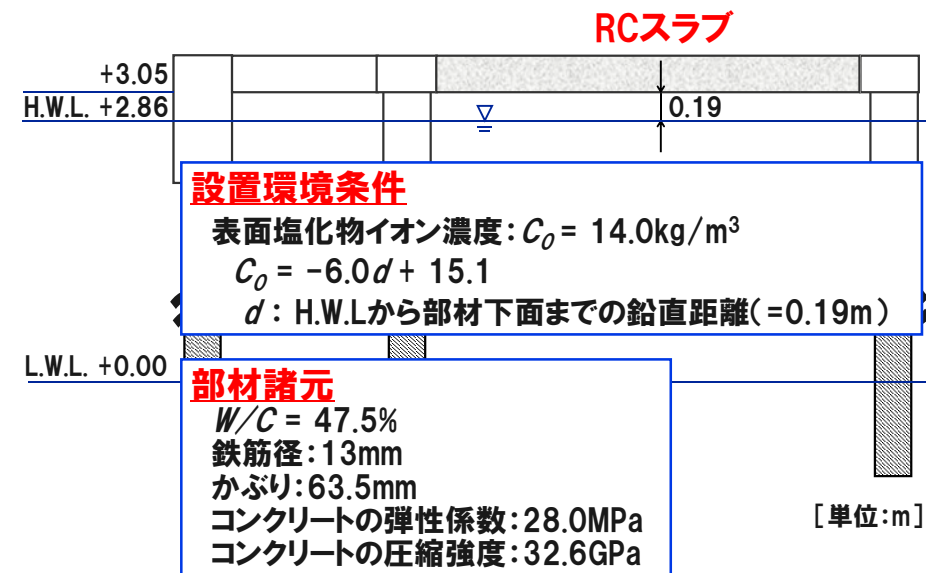
- ・部材諸元（かぶりなど）

から「曲げ耐力に関する劣化曲線」の導出を試みた。

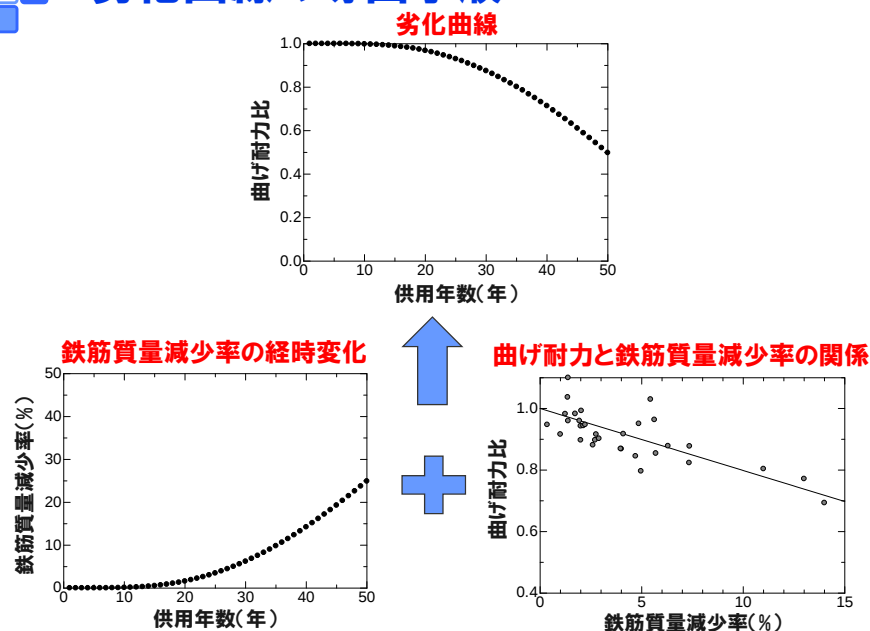
②「劣化曲線から推定した曲げ耐力（本研究）」と

「载荷試験により実測した曲げ耐力（港空研データ）」とを比較することにより劣化曲線の妥当性の検証を行った。

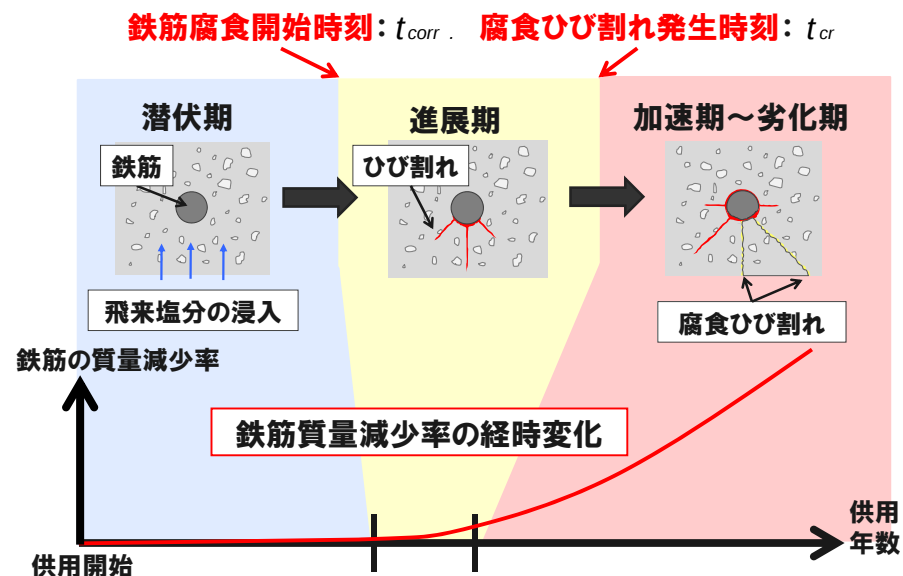
RCスラブの設置環境条件および部材諸元



劣化曲線の導出手順



鉄筋質量減少率の経時変化の求め方



鉄筋腐食開始時刻の算出方法

$$g_1 = \text{鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度} - \text{Fickの拡散方程式により求まる鉄筋位置の塩化物イオン濃度}$$

$$g_1 = C_{\text{lim}} - C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \frac{c}{2\sqrt{Dt}} \right\}$$

C_{lim} : 鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m³)
 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度(kg/m³)
 c : かぶり(cm)
 D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)
 t : 供用開始からの経過時間(年)

確率変数(MCMにより10000個の観測値を生成)

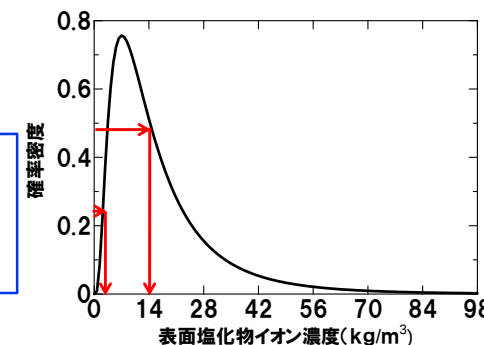
鉄筋腐食開始時刻の算出方法

$$g_1 = \text{鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度} - \text{Fickの拡散方程式により求まる鉄筋位置の塩化物イオン濃度}$$

$$g_1 = C_{\text{lim}} - C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \frac{c}{2\sqrt{Dt}} \right\}$$

表面塩化物イオン濃度の確率分布

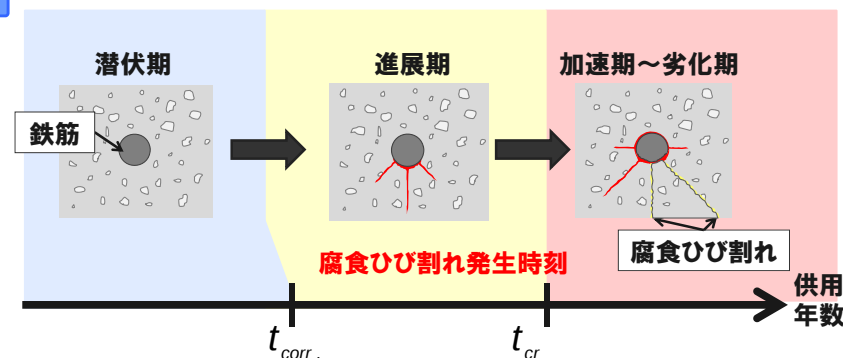
統計モデル: 対数正規分布
 平均値: 14.0kg/m³
 標準偏差: 5.5kg/m³



鉄筋腐食開始時刻の算出方法

$$\text{鉄筋腐食開始時刻: } t_{\text{corr.}} = \frac{1}{4D} \left\{ \frac{0.1c}{\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{\text{lim}}}{C_0} \right)} \right\}^2$$

腐食ひび割れ発生時刻の算出方法



$$g_2 = \text{腐食ひび割れ発生時の腐食量} - \text{腐食ひび割れ発生前の腐食速度} \times \left[\text{任意の時刻} - \text{鉄筋腐食開始時刻} \right]$$

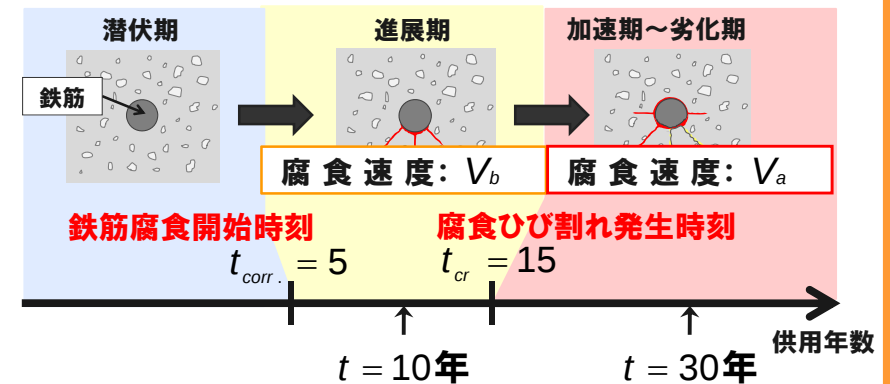
$$g_2 = W_c - V_b \times \left[t - t_{\text{corr.}} \right]$$

確率変数(MCMにより10000個生成)

腐食ひび割れ発生時刻の算出方法

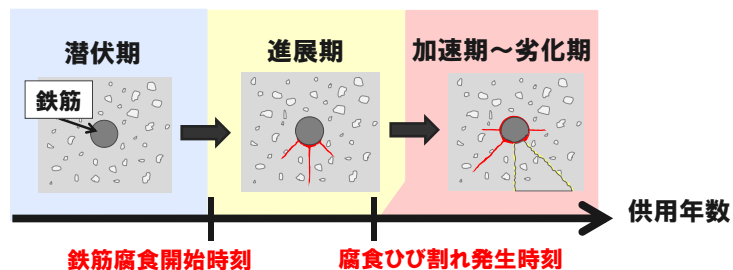
$$\text{腐食ひび割れ発生時刻: } t_{cr} = t_{corr.} + \frac{W_c}{V_b}$$

鉄筋質量減少率の具体的な算出手順



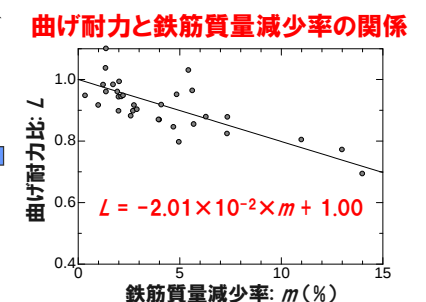
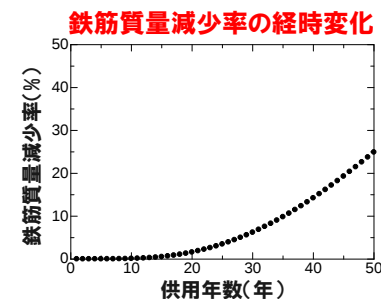
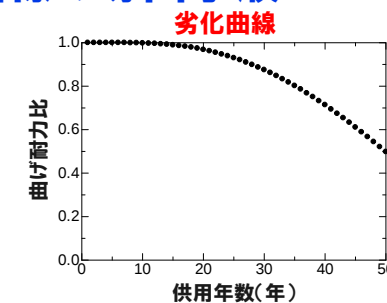
$$\text{鉄筋質量減少率} = V_b \times (10\text{年} - 5\text{年})$$

$$\text{鉄筋質量減少率} = V_b \times (15\text{年} - 5\text{年}) + V_a \times (30\text{年} - 15\text{年})$$

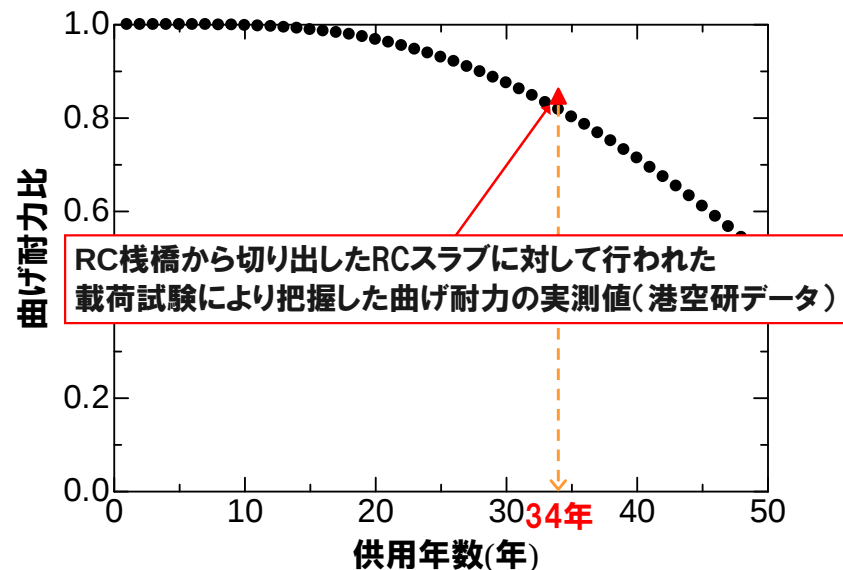


シミュレーション回数	$t_{corr.}$	t_{cr}	供用年数ごとの鉄筋の質量減少率(%)					
			1年	2年	...	20年	...	50年
1回	5年	15年	0%	0%	...	2%	...	7%
2回	3年	13年	0%	0%	...	3%	...	10%
3回	7年	30年	0%	0%	...	1%	...	4%
...	...	...	...	...	...	...	...	...
10000回	5年	20年	0%	0%	...	1%	...	6%
鉄筋の質量減少率の平均値			0%	0%	...	3%	...	9%

劣化曲線の導出手順



曲げ耐力に関する劣化曲線の導出結果



実橋から切り出したRC部材に対する 非破壊試験の援用方法に関するケーススタディ



- ②非破壊試験を援用して部材性能の将来予測
を精緻化する手法
- ③確率・統計学に基づくシミュレーション
非破壊試験/構造解析を併用して
部材性能の現有耐力を推定する手法

非破壊試験などによる調査概要

①目視

④中性化深さ

⑤EPMA



②電磁波レーダ法, 電磁誘導法

③テストハンマー

非破壊試験などによる調査結果

①目視

→ 加速期(表面に腐食によるひび割れが一部発生)

②電磁波レーダ法, 電磁誘導法

→ 鉄筋径: 25mm, かぶり厚さ: 44mm
鉄筋位置: 下面側に4本

③テストハンマー

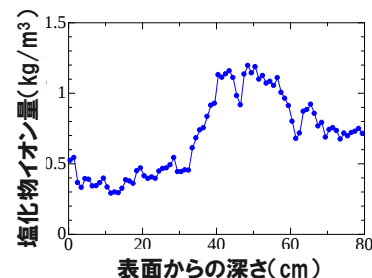
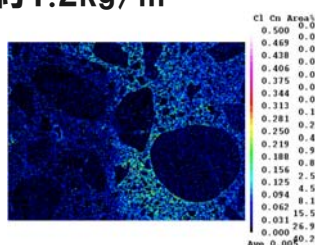
→ 圧縮強度: 39.2MPa

非破壊試験などによる調査結果

④中性化深さ
→ 約2cm



⑤EPMA
→ 約1.2kg/m³



劣化曲線の導出条件

非破壊を援用しない場合

設置環境条件

飛来塩分: 0.099mdd (mg/dm²/day)
内在塩分: 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5kg/m³

部材諸元

W/C = 50%
鉄筋径: 19, 22, 25mm
かぶり: 30, 40, 50mm
コンクリートの弾性係数: 28.0GPa
コンクリートの圧縮強度: 30.0MPa

非破壊を援用した場合

設置環境条件

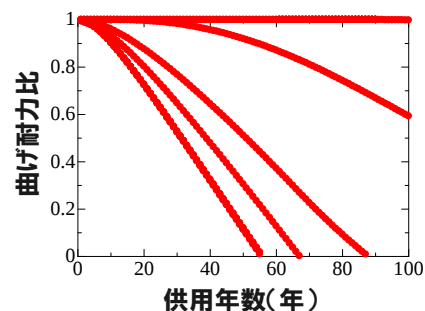
内在塩分: 1.2kg/m³

部材諸元

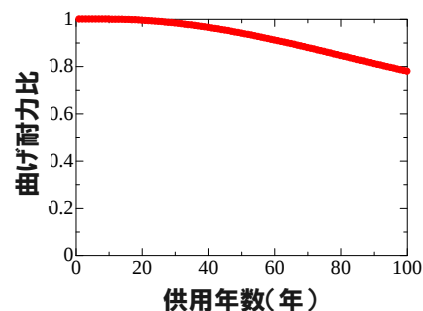
W/C = 50%
鉄筋径: 25mm
かぶり: 44mm
コンクリートの弾性係数: 31.0GPa
コンクリートの圧縮強度: 39.2MPa

劣化曲線

非破壊を援用しない場合



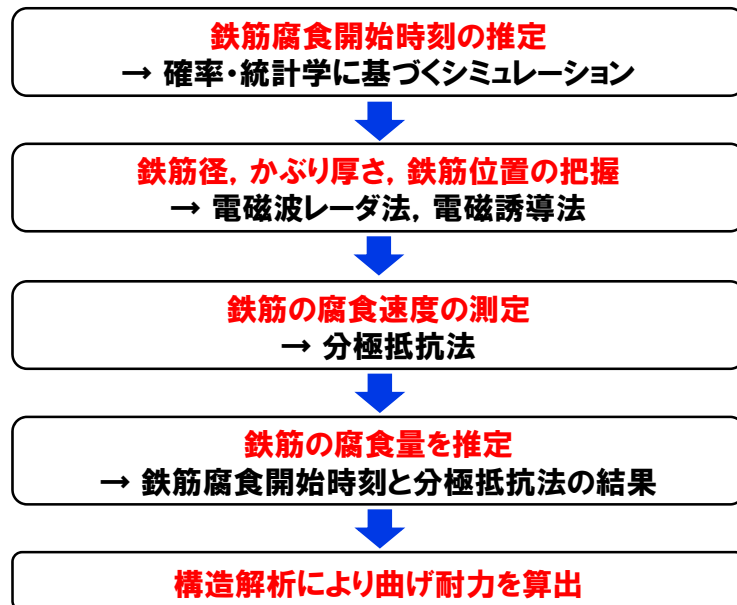
非破壊を援用した場合



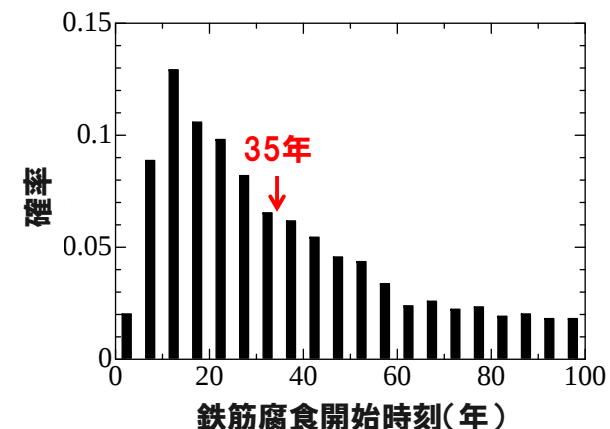
劣化曲線

③確率・統計学に基づくシミュレーション
非破壊試験/構造解析を併用して
部材性能の現有耐力を推定する手法

部材の現有耐力を推定する手順



鉄筋腐食開始時刻の推定



非破壊試験などによる調査概要

①目視

④中性化深さ

⑤EPMA



②電磁波レーダ法, 電磁誘導法

③テストハンマー

⑥自然電位法

⑦分極抵抗法

非破壊試験などによる調査結果

②電磁波レーダ法, 電磁誘導法

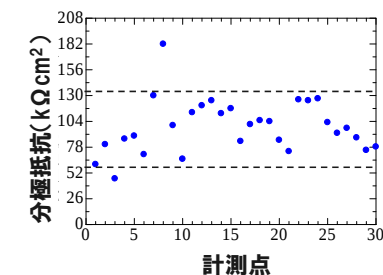
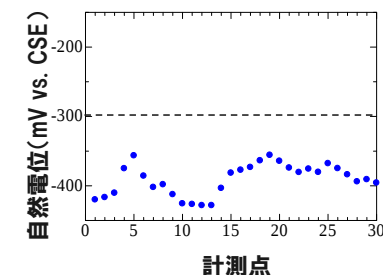
→ 鉄筋径: 25mm
かぶり厚さ: 44mm
鉄筋位置: 下面側に4本

⑥自然電位法

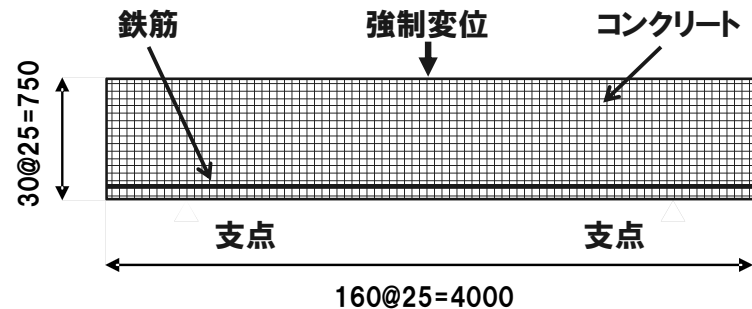
→ 90%以上の確率で腐食あり
(ASTM C 876)

⑦分極抵抗法

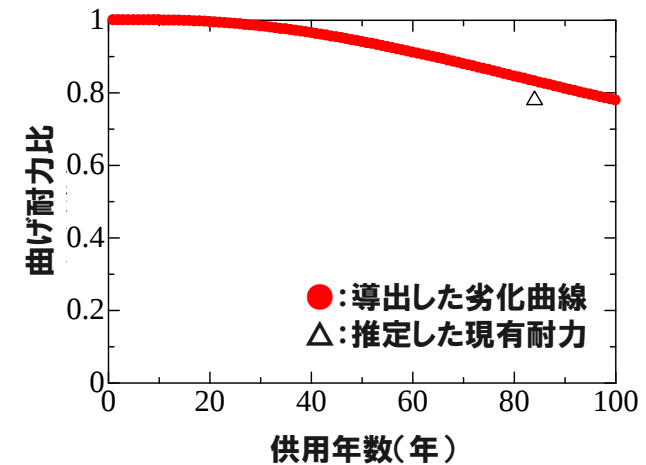
→ 低～中程度の腐食速度
(CEB)



解析の概要



劣化曲線と現有耐力との比較



まとめ

1. 塩害によるRC部材の劣化進行過程を確率過程を含む数値モデルとして取り扱い、モンテカルロシミュレーションにより、RC部材が設置されている環境条件および部材設計諸元から、部材の曲げ耐力に関する劣化曲線を導出する方法を構築した。
2. 実橋から切り出したRC部材を対象に、上記1の劣化予測手法に対して非破壊試験を援用した劣化予測手法も新たに提案した。
3. シミュレーションによる劣化予測手法および非破壊試験などの調査により鉄筋の腐食量を推定し、これをインプットデータとした構造解析により、現有曲げ耐力を推定する方法を構築した。
4. 上記2および3で推定した曲げ耐力は、比較的良い対応を示した。
5. 非破壊試験を援用した劣化予測手法は、シミュレーションによる劣化予測手法と比較して劣化予測の精度が向上する可能性があることを明らかにした。