

Assessing the Reliability of Reinforced Concrete Structures under Coupled Degradation Effect of Crack Development and Rebar Corrosion

Development and Rebar Corrosion



王 眺, 李 春鶴, 欒 堯, 石田 哲也
 wangtiao@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
 東京大学コンクリート研究室



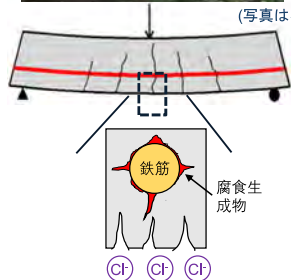
研究の背景

研究背景

海洋環境におけるRC構造物の塩害



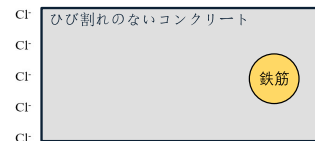
(写真はネットから)



鉄筋の腐食によってひび割れが発生したが、腐食過程はひび割れの進展と密接に関連する。

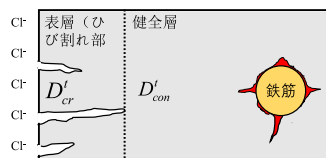
課題

腐食の評価は現在、主にひび割れの無い健全なコンクリートを対象としている。



$$C_d = \gamma_d C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times c}{2\sqrt{D_d \times t}} \right) \right\}$$

ひび割れが発生したコンクリート



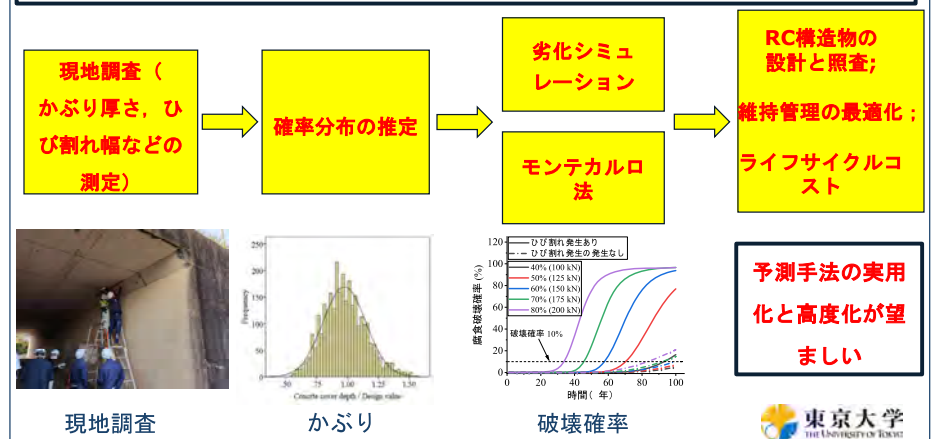
ひび割れの進展と鉄筋の腐食を連成する評価・予測システムの構築が必要。

確率的評価システム

供用期間中のRC 構造物には多くの不確実因子がある:

塩化物イオンの拡散係数、コンクリートのかぶり、表面塩化物量、温度など

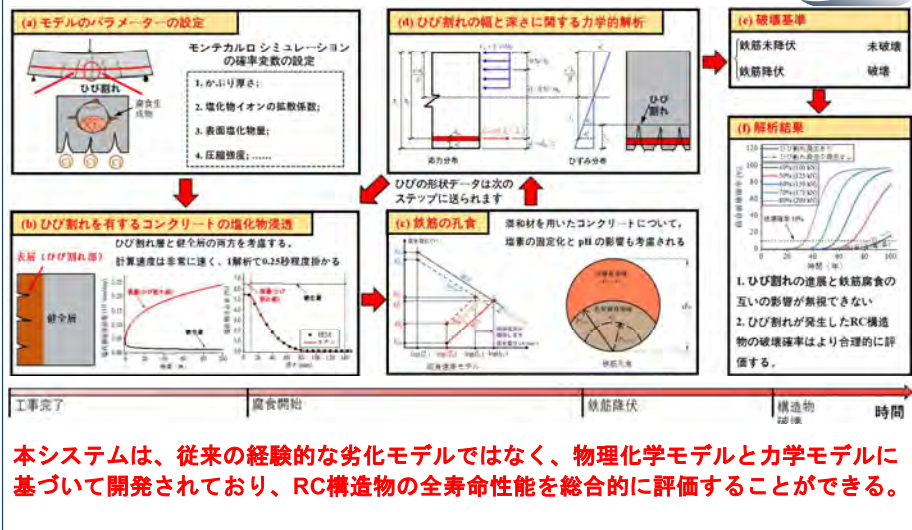
信頼性解析には数百万回のサンプリング、高効率なアプローチが不可欠



解析システムの構成



解析システムの構成



ひび割れが発生したコンクリートの塩化物イオンの拡散特性

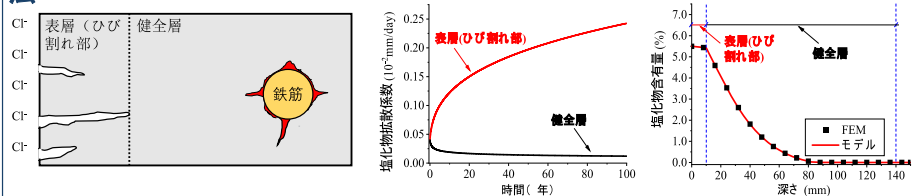


迅速な数値アプローチ



ひび割れが発生したコンクリートの塩化物イオン浸透の新たな解析手法

Wang et al., Struct. Infrastruct. E. 2021



$$C = \begin{cases} C_0 + [A_n \sin(\lambda x / \sqrt{D_1}) + B_n \cos(\lambda x / \sqrt{D_1})] \exp(-\lambda^2 t), & 0 < x < h_1 \\ C_0 + \{A'_n \sin[\lambda(x-h_1) / \sqrt{D_2}] + B'_n \cos[\lambda(x-h_1) / \sqrt{D_2}]\} \exp(-\lambda^2 t), & h_1 < x \end{cases}$$

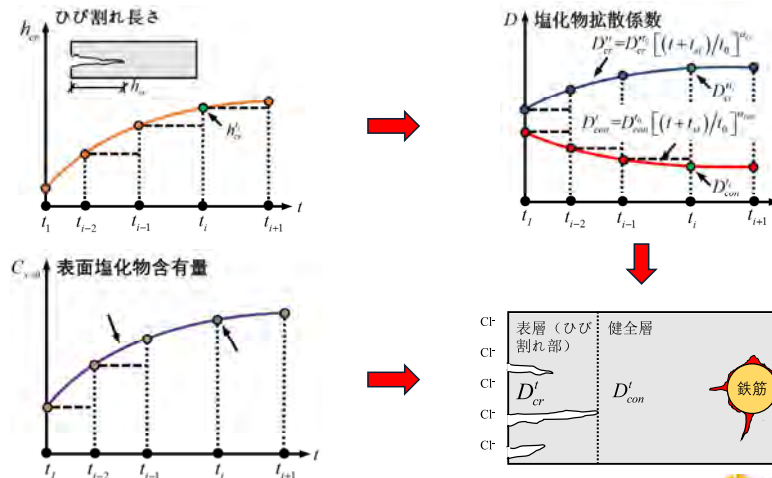
$$C = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n f_n(x) \exp(-\lambda_n^2 t)$$

$$f_n(x) = \begin{cases} \sin(\lambda_n x / \sqrt{D_1}), & 0 < x < h_1 \\ \frac{\sin(\lambda_n h_1 / \sqrt{D_1}) \cos[\lambda_n(x-h_1-h_2) / \sqrt{D_2}]}{\cos(\lambda_n h_2 / \sqrt{D_2})}, & h_1 < x < h_1 + h_2 \end{cases}$$

ひび割れが発生したコンクリートの塩化物の拡散



ひび割れが発生したコンクリートの塩化物拡散の時間依存性について、ステップ関数を用い解析を行う。

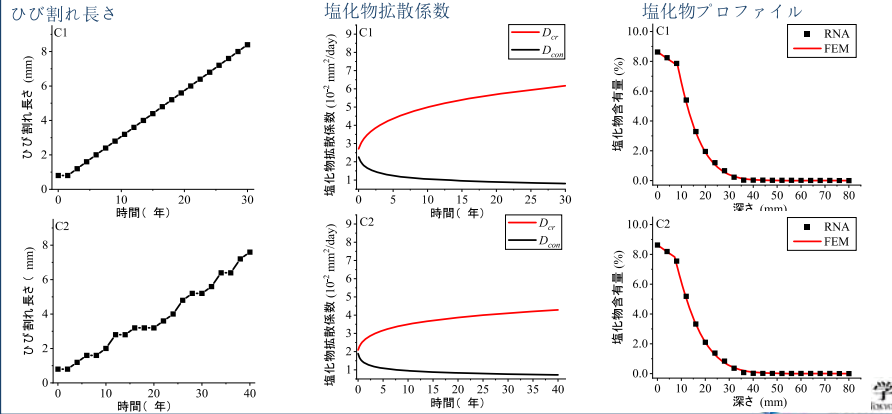


塩化物イオン拡散の検証



有限要素法 (FEM) を用いた RNA の検証

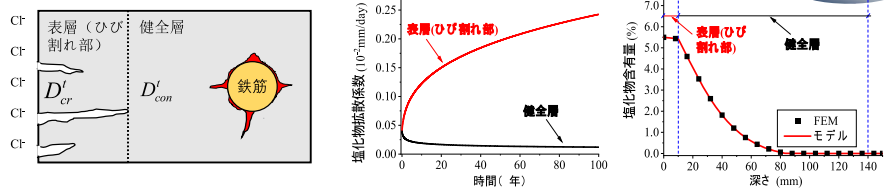
Case	D_{cr}^0 (mm ² /day)	D_{con}^0 (mm ² /day)	α_{cr}	α_{con}	$C_{s=0}^+$ (wt% binder)	$C_{s=0}^-$ (wt% binder)	t_{cr} (year)	t_{con} (day)	t_0 (day)
C1	2.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}	0.20	-0.25	3.0	3.5	30.0	180	120
C2	2.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	0.15	-0.20	3.0	3.5	40.0	120	90



計算時間



ひび割れが発生したコンクリートの塩化物イオンの拡散過程



計算時間 (モンテカルロ、100 万回のサンプリング、100 年、ラップトップ)

	C1	C2	C3	C4	Average
FEM (s)	5,332	6,589	7,680	7,577	
RNA (s)	0.2048	0.2301	0.3008	0.2642	
FEM/RNA	26,035	28,635	25,532	28,679	27,220

FEM: 475.65 年

RNA: 69.44 時

計算可能!!!



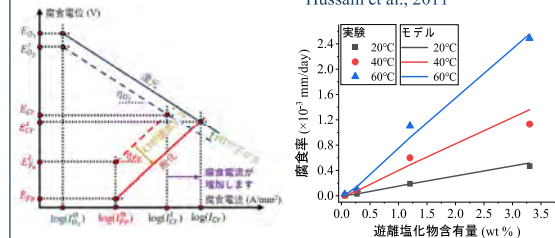
腐食モデル



腐食モデル

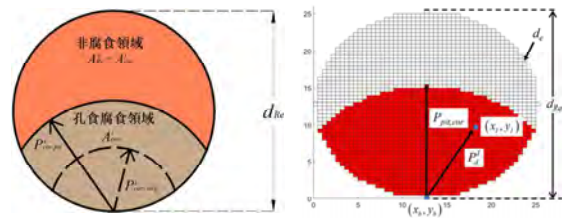


腐食速度モデル



腐食速度モデルは、pH、塩化物含有量、温度などの因子を取り入れるため、混和材の使用が腐食過程に及ぼす影響が再現できる。

鉄筋腐食モデル



鉄筋腐食は孔食であり、本モデルに取り入れる。

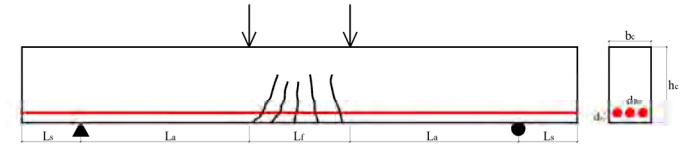
力学的解析



力学的解析

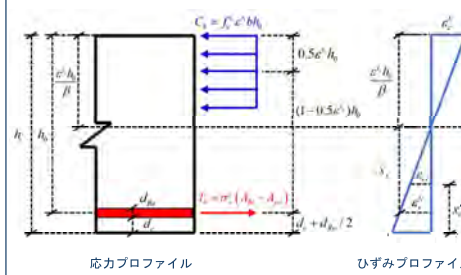


曲げ作用を受けるRC構造物



平面保持の仮定

ひび割れが発生したコンクリートの塩化物拡散係数



$$D_{cr}^t = \left[D_{con}^{t_0} + 3 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \epsilon_{sh}^t \right) D_{cr,k} \right] m_{t_0}^{T_0}$$

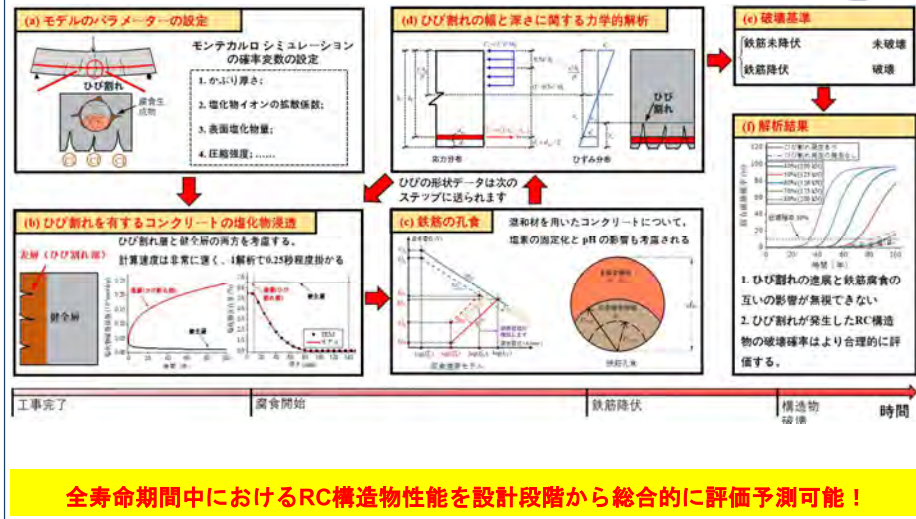
ひび割れ深さ

本システムでは、ひび割れの進展と鉄筋の腐食過程の解析を連成する。

解析システムの構成



解析システムの構成

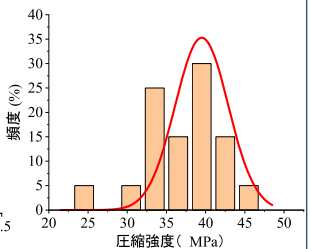
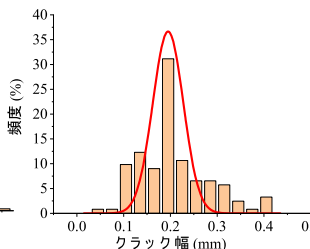
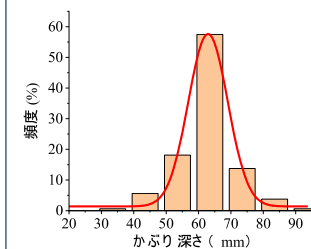
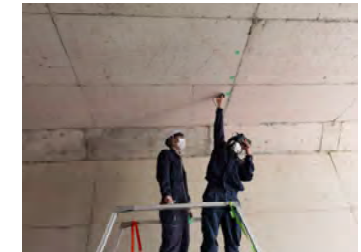


宮崎での現地調査



国道220号線（宮崎市区間）の現地調査

国土交通省 九州地方整備局 宮崎河川国道事務所





解析結果

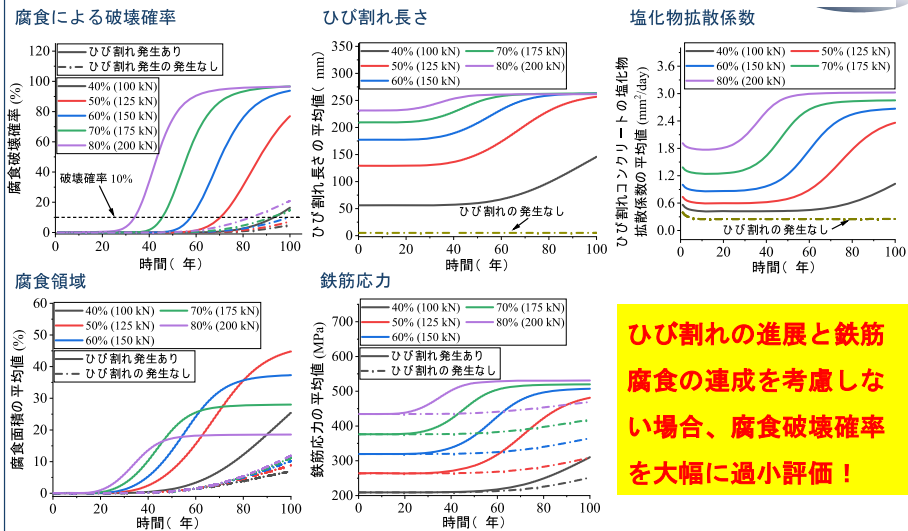


荷重レベルの影響

荷重レベル



荷重レベルの影響（ひび割れ進展なし：ひび割れ深さ5mm）



異なる混和材（SCMs）に

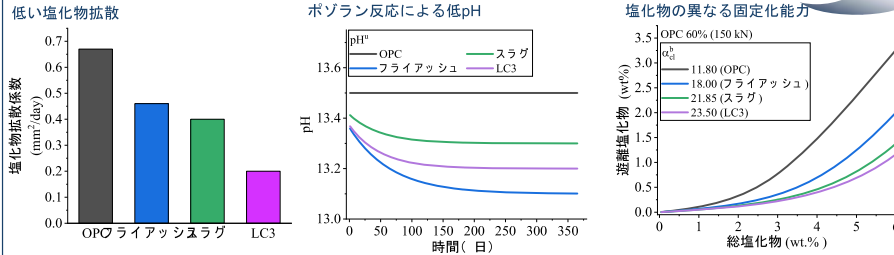
よる影響



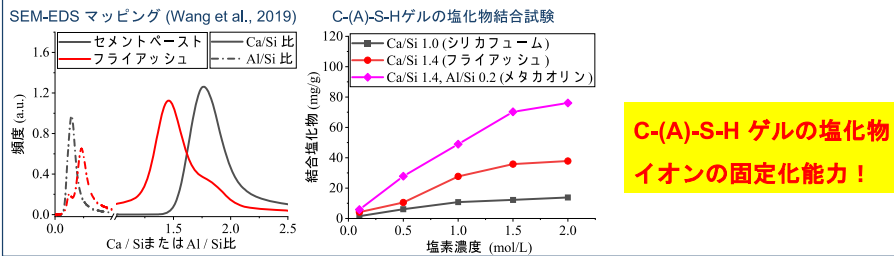
異なる混和材の使用による影響



SCMは、塩害環境におけるRC構造物の耐久性を大幅に向上させる。



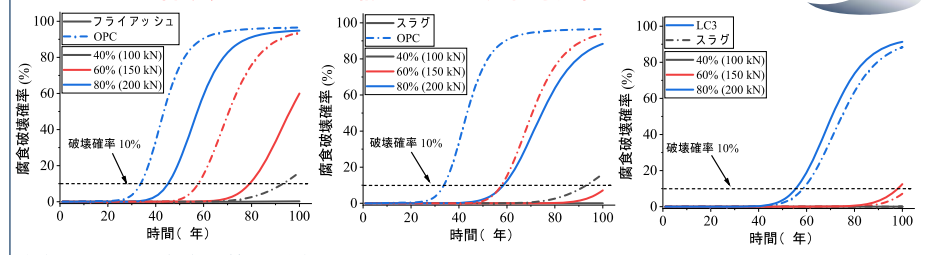
本研究の最新の実験結果は、SCMの塩化物固定化に対する影響が複雑であることが確認された。



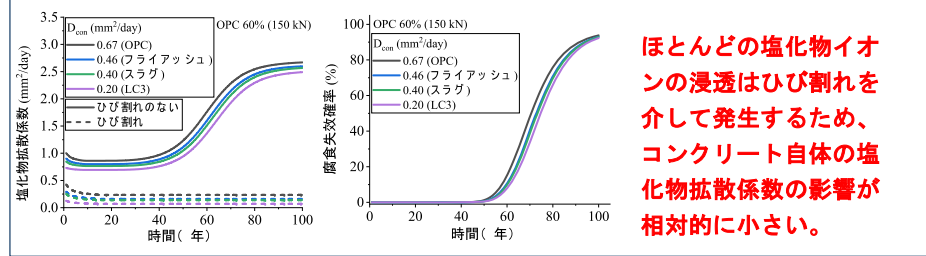
異なる混和材の使用による影響



SCMは、塩害環境におけるRC構造物の耐久性を大幅に向上させる。



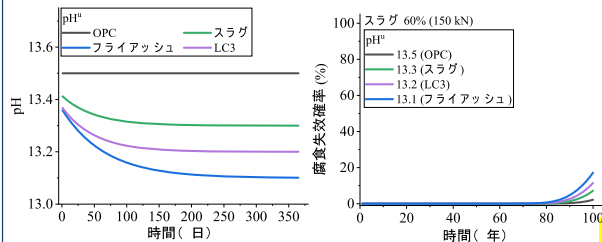
塩化物イオン拡散係数の影響



異なる混和材の使用による影響

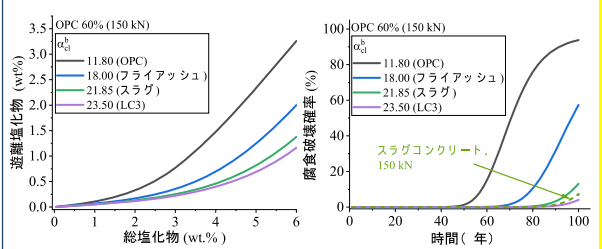


pHの影響



pHは、RC構造の腐食破壊率に大きな影響を与える。

塩化物イオンの固定化の影響

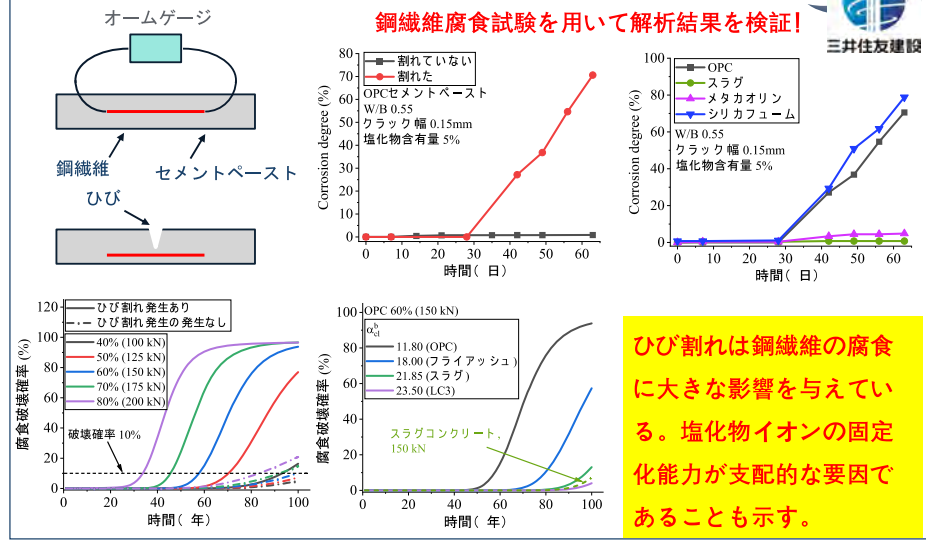


塩化物イオンの固定化は、支配的な影響要因であることを示す。スラグおよびLC3などのアルミニウムが豊富なSCMは、海洋環境下のRC構造により適していることを示す。

実験的検証



鋼繊維腐食試験 (三井住友株式会社様のご協力)



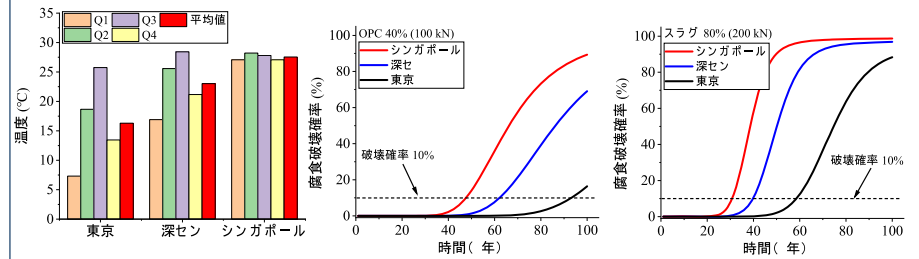


温度の影響

温度の影響



温度の影響



気温の影響を検討するために3つの都市を選択。

気象データは地方の気象局によって(1981-2010年に)収集されたデータ。

→ 気温の影響を無視してはならないことを示す。

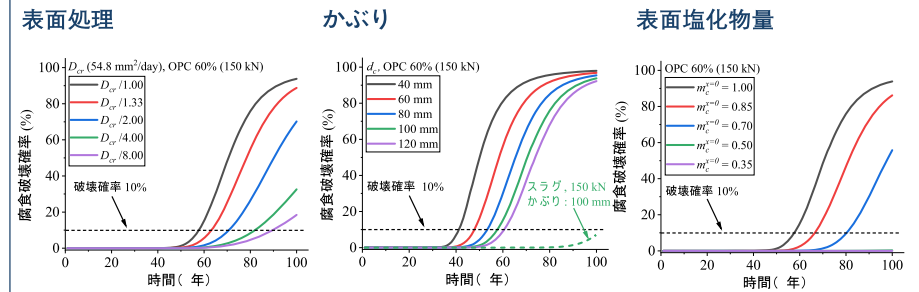


実構造物への展開

実構造物への展開



実構造物への展開



本解析システムは、コンクリートの表面処理、かぶり厚さ、表面塩化物物量などの影響を再現でき、設計・維持管理の最適化および照査への適用が可能。

将来の目標と謝辞



将来の目標

1. 水とおよび細孔構造を検討することで、精度向上が可能。
2. 3次元の力学解析モデルを用いることで、縦方向の鉄筋の鋼腐食に関連する空間的変動を考慮することが可能。
3. 腐食進展による、せん断破壊、疲労劣化の検討も可能。

謝辞

一般財団法人 大成学術財団 (2020~2022) 財政的支援に深くお礼申し上げます。

宮崎河川国道事務所の技術支援・協力にお礼申し上げます。

