

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760405

 研究課題名（和文） 非破壊評価技術を援用したコンクリート構造物の
新しい劣化予測システムの構築

 研究課題名（英文） Development of Deterioration Prediction Methods for RC Members based
on Non-Destructive Evaluation Technique

研究代表者

内田 慎哉（UCHIDA SHINYA）

佐賀大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：70543461

研究成果の概要（和文）：本研究では、まず、コンクリート部材の力学的性能の予測を対象とした「統計的手法による劣化予測手法」を、実構造物へ適用可能な手法となるように高度化する。続いて、複数の非破壊評価技術を駆使し、それぞれの測定結果に基づいて予測結果（劣化曲線）を更新する「非破壊評価技術を援用した劣化予測手法」を構築した。その結果、本研究で開発した手法により、コンクリート部材の劣化予測を高精度で定量的に評価できることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In this study, at first, deterioration prediction methods based on statistical simulation for flexural load bearing capacity of RC members (deterioration curve) under chloride attack was developed. Secondly, update methods of deterioration curve by results of non-destructive testing was approached. As a result, it was revealed that these methods developed in this study could evaluate deterioration of RC members exposed to marine environment quantitatively with high accuracy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

 キーワード：鉄筋コンクリート，塩害，非破壊試験，劣化予測，耐力，劣化曲線，劣化進過程，
ベイズ更新

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の劣化予測の方法としては、土木学会 コンクリート標準示方書【維持管理編】において、劣化機構を塩害とした場合、鉄筋位置での塩化物イオン濃度の計算値から鉄筋の発錆時期を予測する方法が示されている。この方法では、コンクリート部材に要求される安全性や使用性などの力学的性能を直接的に評価することはできない。したがって、ライフサイクルコストを考慮した計画的・合理的な維持管理を現実のものとするためには、構造物が保有する現在の力学的性能や将来の性能低下を定量的か

つ高精度で予測する方法の確立が急務である。

このような背景から、申請者は、既往の研究を一部参考にして、対象とする構造物の環境（飛来塩分量など）や部材の諸元（鉄筋かぶりなど）に関するデータのみから、塩害環境下にあるコンクリート構造物の力学的性能を予測することが可能な汎用性の極めて高い「統計的手法による劣化予測手法」の提案を行った。しかしながら、本手法により導出した力学的性能に関する劣化曲線の妥当性について十分な検証は行なっていない。また、時間の経過とともに推定した性能にバラ

ツキ(精度の幅)を持たせることができない。そのため、バラツキを低減する方法論やアイデアがあっても、それを現実を実施することは不可能である。加えて、同一部材内での劣化程度の違いを反映させた劣化予測を行なうこともできないといった問題を有している。

2. 研究の目的

本研究では、まず、これまで申請者が研究を進めてきた、コンクリート部材の力学的性能の予測を対象とした「統計的手法による劣化予測手法」を、実構造物へ適用可能な手法となるように高度化する。続いて、複数の非破壊評価技術を駆使し、それぞれの測定結果に基づいて予測結果(劣化曲線)を更新する「非破壊評価技術を援用した劣化予測手法」の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 統計的手法による劣化予測手法の高度化

① 曲げ耐力に関する劣化曲線の導出

塩害環境下にある RC 部材を対象として、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、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モンテカルロシミュレーション(以降、MCM)により、部材の曲げ耐力の劣化曲線を導出する方法を検討した。

② 劣化進行過程の推移の導出

曲げ耐力に関する予測手法を活用して鉄筋の腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻を算出し、この結果に基づき各劣化過程の期間(潜伏期、進展期、加速期および劣化期)をそれぞれ推定するとともに、供用年数に対する各劣化期間の推移を求める方法についての検討を行った。

(2) 統計的手法による劣化予測手法の実橋梁に対する適用可能性

塩害劣化した実橋梁から切り出した RC 部材に対して、対象部材の環境条件および部材諸元の調査を行い、調査結果に基づいた部材の曲げ耐力に関する劣化曲線の導出を試みた。

(3) 非破壊評価技術を援用した劣化予測手法

前述の(2)で導出した劣化曲線に対して、非破壊試験結果をインプットデータとする構造解析により現有曲げ耐力を求める手法により推定した耐力を用いてベイズ更新することにより、曲げ耐力に関する劣化曲線を精緻化する方法を検討した。

4. 研究成果

(1) 統計的手法による劣化予測手法の高度化

① 曲げ耐力に関する劣化曲線の導出

対象とした RC 部材は、栈橋上部工の RC スラブである。設置環境条件として、コンク

リート表面の塩化物イオン濃度： $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$ を、港湾の施設の技術上の基準・同解説および H.W.L. から部材下面までの距離： $d[=0.19\text{m}]$ から、 $14.0\text{kg}/\text{m}^3$ と算定した。部材諸元は表 1 に示す。

表 1 RC スラブの部材設計諸元

スラブ厚さ(mm)	350	
引張側主鉄筋	直径： $\phi(\text{mm})$	13
	かぶり： $c(\text{mm})$	63.5
コンクリートの圧縮強度： $f'_c(\text{N}/\text{mm}^2)$	32.6	
コンクリートの弾性係数： $E_c \times 10^3(\text{kN}/\text{mm}^2)$	28	
水セメント比： $W/C(\%)$	47.5	

算定した C_0 および RC スラブの部材諸元から、曲げ耐力の劣化曲線を導出した。具体的には、まず、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度などのバラツキを考慮するために、これらを確率変数として取り扱い、実構造物での調査結果などから確率変数の確率分布および統計量を設定した。その後、「鉄筋の腐食開始時刻」および「腐食ひび割れ発生時刻」を、MCM を用いて推定した。これらの推定結果を用いて、供用年数ごとに、同じく MCM により鉄筋の質量減少率の平均値を求め、「鉄筋の質量減少率の経時変化」を算出した。さらに、「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係」を整理した。最後に、「鉄筋の質量減少率の経時変化」と「曲げ耐力比と鉄筋の質量減少率との関係」から「曲げ耐力に関する劣化曲線」を導出した。

鉄筋腐食発生の判定と腐食開始時刻の算出方法について概説する。任意の供用年数： $t(\text{年})$ における鉄筋位置の塩化物イオン濃度： $C(\text{kg}/\text{m}^3)$ が、 $C_{lim}[=1.2\sim 2.5(\text{kg}/\text{m}^3)]$ を超えた場合に、鉄筋腐食と判定した ($g_1 < 0$ で鉄筋腐食発生)。判定式： $g_1 = 0$ として t について解くと、 $t_{corr.}(\text{年})$ が算出できる。以下に判定式および $t_{corr.}$ 算出式をそれぞれ示す。

$$g_1 = C_{lim} - C(c, C_0, D, t) \quad (1)$$

$$C = x_1 \left[C_0 \left\{ 1 - \text{erf} \frac{0.1(c + c_{error})}{2\sqrt{x_2 D t}} \right\} \right] \quad (2)$$

$$t_{corr.} = \frac{1}{4x_2 D} \left\{ \frac{0.1(c + c_{error})}{\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{lim}}{x_1 C_0} \right)} \right\}^2 \quad (3)$$

$$\log_{10} D = -3.9 \left(\frac{W}{C} \right)^2 + 7.2 \left(\frac{W}{C} \right) - 2.5 \quad (4)$$

式(1)~(3)の確率変数： $C_{lim}, x_1, C_0, c_{error}, x_2$ は、MCM により 10,000 回発生させ、 $t_{corr.}$ を 10,000 回算出した。

腐食ひび割れ発生の判定とひび割れ発生時刻の算出方法について概説する。任意の供

用年数： t (年)における鉄筋の腐食量： Q (mg/cm²)が、 W_c (mg/cm²)を超えた場合に、腐食ひび割れ発生と判定した ($g_2 < 0$ で腐食ひび割れ発生)。判定式： $g_2 = 0$ として t について解くと、 t_{cor} (年)が算出できる。以下に判定式および t_{cor} 算出式をそれぞれ示す。

$$g_2 = x_3 \eta W_c - Q(V_b, t_{cor}, t) \quad (5)$$

$$Q(V_b, t_{cor}, t) = V_b(t - t_{cor}) \quad (6)$$

$$t_{cor} = t_{cor} + \frac{x_3 \eta W_c}{V_b} \quad (7)$$

$$W_c = \frac{100 \rho_s}{\pi(\gamma - 1)} \left[\alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ [2(c + c_{error}) + \varphi]^2 + \varphi^2 \}}{E_c(c + c_{error} + \varphi)} (f'_c)^2 + \alpha_1 \beta_1 \frac{c + c_{error} + \varphi}{5(c + c_{error}) + 3\varphi} W_{cr} \right] \quad (8)$$

ここで、 η ：腐食ひび割れ発生時の腐食量に関する補正係数[=3.68]、 ρ_s ：鉄筋の密度[=7.85(mg/mm)]、 γ ：腐食生成物の体積膨張率[=3.0]、 $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$ ：補正係数である。式(5)～(8)の確率変数： x_3, V_b, f'_c は、試行回数10,000回のMCMによりそれぞれ発生させ、 t_{cor} を10,000回算出した。

鉄筋の質量減少率の経時変化の算出方法について概説する。MCMにより生成した t_{cor} 、 t_{cor} および標本観測値を用いて、腐食ひび割れが既に発生している場合(式(9))、鉄筋は腐食しているが腐食ひび割れは発生していない場合(式(6))および鉄筋が腐食していない場合(式(10))のケースごとに腐食量をそれぞれ算出した。続いて、式(11)から供用年数ごとに鉄筋の質量減少率の平均値： ω_{ave} をそれぞれ算出した。

$$Q(V_b, V_a, t_{cor}, t_{cor}, t) = V_b(t_{cor} - t_{cor}) + V_a(t - t_{cor}) \quad (9)$$

$$Q = 0 \quad (10)$$

$$\omega_{ave} = \frac{1}{10000} \left[100 \sum_{i=1}^{10000} \left\{ \frac{Q_i}{(\rho_s/4)} \times 100 \right\} \right] \quad (11)$$

式(9)の確率変数： V_a は、10,000回のMCMにより発生させた。

曲げ耐力に関する劣化曲線の導出方法について概説する。「鉄筋の質量減少率の経時変化」と「鉄筋の質量減少率と曲げ耐力比との関係」から、RCスラブの劣化曲線(図1中の●)を導出した。

切り出したRC部材を対象として行われた曲げ載荷試験の結果から得られた曲げ耐力比(図1中の△)と、導出した劣化曲線から推定した曲げ耐力比(図1中の●)は、概ね一致した。

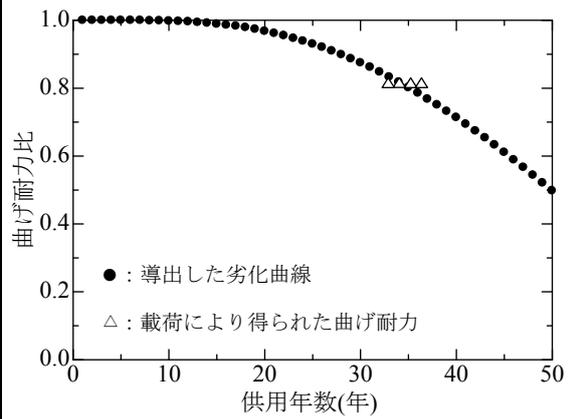


図1 曲げ耐力の劣化曲線

②劣化進行過程の推移の導出

上記①の手法を活用し、鉄筋の腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻を算出し、この結果に基づき各劣化過程の期間(潜伏期、進展期、加速期および劣化期)をそれぞれ推定するとともに、供用年数に対する各劣化期間の推移を求める方法を提案した。得られた結果を図2に示す。

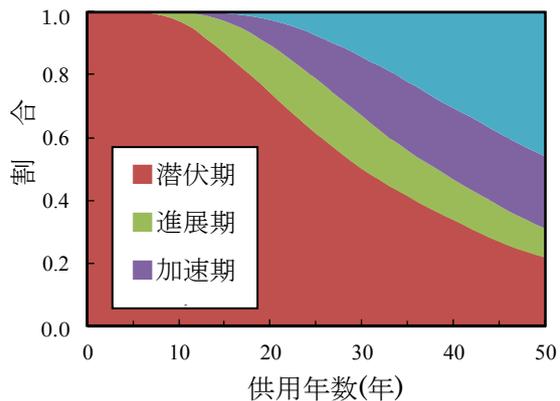


図2 劣化期間の推移

(2) 統計的手法による劣化予測手法の実橋梁に対する適用可能性

①実橋から切り出したRC部材の概要

対象とするRCはり部材は、海岸線から約5kmに位置し、供用年数84年の部材である。海風比率および平均風速はそれぞれ0.290、2.0m/sである。飛来塩分量および表面塩化物イオン濃度は、前述の海岸線からの距離、海風比率および平均風速に基づき、既往の研究を参考に、0.099mddおよび0.411kg/m³と推定した。

②調査概要およびその結果

テストハンマーによるコンクリートの圧縮強度の推定、自然電位法による鉄筋の腐食可能性の判定、分極抵抗法による鉄筋の腐食量の推定およびEPMA(電子線マイクロアナ

ライザ : Electron Probe Micro Analyzer) による内在塩分量の調査を行った。その結果, 圧縮強度は 39.2kN/mm^2 と推定した。自然電位は, ほとんどの計測点で -350mV を下回る結果となり, 90%以上の確率で腐食ありと判定した。分極抵抗により測定した腐食速度からは, 鉄筋は低~中程度の腐食速度を示していると判断した。EPMA 分析の結果からは, 内在塩分は最大値で 1.2kg/m^3 ということがわかった。EPMA の結果を図 3 および図 4 にそれぞれ示す。

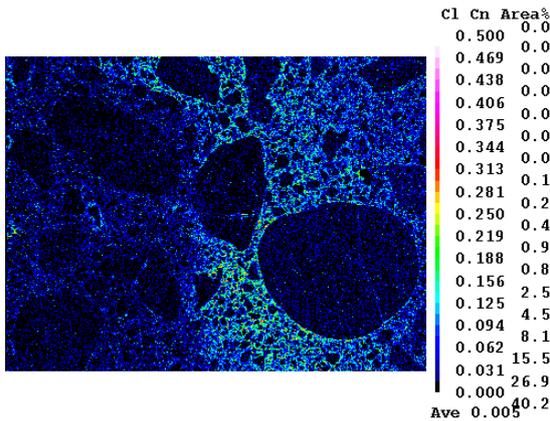


図 3 塩素の面分析データ (Cl 濃度で表示)

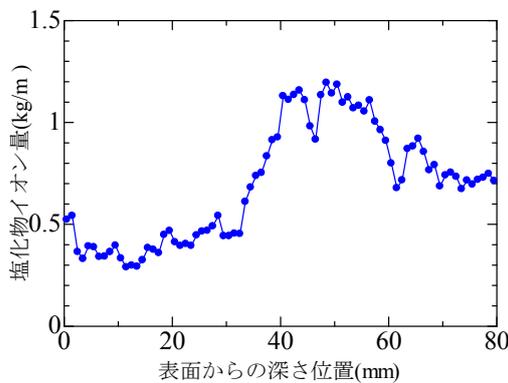


図 4 コンクリート中の塩化物イオン濃度

③調査結果に基づく対象 RC 部材の劣化曲線の導出

表面塩化物イオン濃度, RC スラブの部材諸元および調査結果から, 曲げ耐力の劣化曲線を導出した。得られた結果を図 5 に示す。図中の●, ■, □は, 鉄筋質量減少率の平均値から導出した劣化曲線, 信頼区間 95% の下限値および上限値にそれぞれ対応しており, それぞれを平均シナリオ (更新前), 悲観シナリオ (更新前) および楽観シナリオ (更新前) と定義した。

- (3) 非破壊評価技術を援用した劣化予測手法
①非破壊試験に基づく現有曲げ耐力の推定

実橋から切り出した RC 部材を対象として, 劣化予測手法により推定した鉄筋腐食開始時刻, 分極抵抗法による非破壊試験結果および構造解析から, 切り出し RC 部材の現有曲げ耐力を推定する方法の検討を行った。具体的には, 対象とする RC 部材に対して劣化予測手法を適用し, 鉄筋の腐食開始時刻を求める。次に推定した鉄筋の腐食開始時刻および分極抵抗法による非破壊試験結果から, 鉄筋の腐食量を推定する。例えば, 計測された分極抵抗の逆数に定数 (0.026) を乗じることに より腐食電流密度を算出し, この値から 4. (2) ③で算出した鉄筋の腐食開始時刻を用いて鉄筋腐食量を推定した。この結果とテストハンマーにより推定した圧縮強度, 鉄筋の物性値から, 構造解析より現有曲げた耐力を推定した。結果を図 5 (図中の◆) に示す。

②劣化曲線の精緻化

図 5 で導出した k 本の独立な劣化曲線を時間 t の関数として $f(t, k)$ と表現する。本研究では, 非破壊と構造解析を併用した現有曲げ耐力推定手法 (以降, NDT-FEM 手法) により更新される劣化曲線が, 図 5 に示す劣化曲線の重み付き荷重和で表わすことができると考える。このとき, 供用年数 t (年) における曲げ耐力比 L' は,

$$L' = \sum_{k=1}^K \omega(k) f(t, k) + \varepsilon \quad (12)$$

として表現できる。ここに, $\omega(k)$ は, k 本目の劣化曲線に対して割り当てられた重みであり,

$$\sum_{k=1}^K \omega(k) = 1 \quad (13)$$

が成立する。重みベクトルは次式で表す。

$$\omega = (\omega(1), \dots, \omega(K)) \quad (14)$$

供用開始時点から時間が経過し, 供用年数 T に達したと考える。さらに供用年数 $t(t=0, \dots, T)$ (年) において, NDT-FEM 手法により曲げ耐力比に関するデータ $L^{0,T} = (L^0, \dots, L^T)$ が獲得できたと考える。観測値により修正された劣化予測モデルの事後確率密度関数 $\pi(\omega, \phi | L^T)$ はベイズの定理,

$$\pi(\omega, \phi | L^{0,T}) \propto L(L^{0,T} | \omega, \phi) \pi(\omega) \pi(\phi) \quad (15)$$
により算出することができる。ここで, $L(L^{0,T} | \omega, \phi)$ は NDT-FEM 手法により推定した曲げ耐力 $L^{0,T}$ が観測される同時生起確率密度 (尤度) であり, $\pi(\omega)$, $\pi(\phi)$ は確率変数である ω と ϕ の事前確率密度関数である。

図 5 に示す楽観シナリオ (更新前), 悲観シナリオ (更新前), 平均シナリオ (更新前) を有する RC 部材に着目する。まず, 劣化モデル(12)を算出するために, 各パラメータの値として, $\gamma_1=2.66$, $\gamma_2=1.95$, $\omega(1)=0.54$, $\omega(2)=0.46$, $\eta=2.00$, $\xi=2.00$, $\phi=4.00$ と設定した。

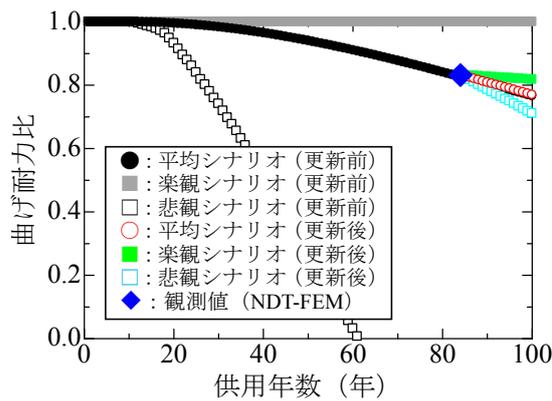


図5 曲げ耐力比と供用年数との関係

表2 更新後のパラメータ推計結果

パラメータ	期待値 (更新前)	期待値 (更新後)	95% 信頼区間	
$\omega(1)$	0.54	0.91	0.47	0.99
$\omega(2)$	0.46	0.09	0.01	0.53
ϕ	4	2.56	0.12	3.06

図5より供用開始後84年の時点でNDT-FEM手法を実施することにより曲げ耐力比0.832(図5◆)がわかった。図5では観測値は平均シナリオよりも高い値を示しており、これに基づいて劣化予測モデルを更新する。MCMC法により20,000個のサンプルを発生させ、後半10,000個のサンプルを事後分布からの標本として記録した。更新後の劣化予測モデルのパラメータ $\omega(1)$ 、 $\omega(2)$ 、 ϕ の期待値、95%信頼区間を表2に示す。期待値を更新前と更新後で比較した場合、楽観シナリオの重み $\omega(1)$ が増加するとともに、悲観シナリオの重み $\omega(2)$ が減少しており、平均シナリオよりも安全側であるという観測値の情報が反映されていることがわかる。図4には表2の推計結果を式(2)へと代入して具体化したNDT-FEM手法の実施時点(供用開始後84年)以降の劣化予測を併せて示している。例えば、供用開始後100年時点に着目したとき、観測値(曲げ耐力)が得られることで楽観シナリオと悲観シナリオで表される95%信頼区間が更新前の[1.00 0.00]から更新後の[0.82 0.71]へと縮小しており、曲げ耐力比の予測精度が向上していることが確認できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 田中伸幸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 寺地悠紀: 塩害環境下にあるRC部材の塩害劣化進行過程の予測手法に関する基礎研究, コン

クリート工学年次論文集, 査読有, Vol.35, 2013(掲載決定)

- ② 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 田中伸幸: 塩害環境下にあるRC部材の各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測に与える影響に関する感度分析, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.34, No.1, pp.880-885, 2012

- ③ 田中伸幸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 関 翔太: 塩害環境下にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法とその有効性の検証, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.34, No.1, pp.886-891, 2012

[学会発表](計11件)

- ① 田中伸幸, 内田慎哉, 松岡弘大, 鎌田敏郎, 貝戸清之: 塩害を受けるRC部材の曲げ耐力に関する劣化曲線の更新手法に関する基礎研究, 平成25年度全国大会 土木学会第68回年次学術講演会, 第V部門, 日本大学, 2013.9(発表決定)

- ② 田中伸幸, 内田慎哉, 松岡弘大, 鎌田敏郎, 貝戸清之: 塩害環境下にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化曲線の更新手法に関する基礎研究, 平成25年度土木学会関西支部年次学術講演会, 大阪市立大学, 2013.6.8(発表決定)

- ③ 寺地悠紀, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 田中伸幸, 伊藤幸広: 飛沫帯にあるRC部材を対象とした塩害劣化進行過程の予測手法に関する研究, 平成24年度土木学会西部支部研究発表会, 熊本大学, 2013.3.9

- ④ 田中伸幸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 伊藤幸広, 寺地悠紀: 各種劣化因子の変動が飛沫帯にあるRCスラブの力学性能の予測に与える影響に関する感度分析, 第56回日本学術会議材料工学連合講演会, 京都テルサ, 2012.10.29

- ⑤ 内田慎哉, 鎌田敏郎, 伊藤幸広, 出水 享, 松田 浩, 田中伸幸: 塩害環境下にあるRCスラブの力学性能に関する予測手法とその有効性の評価, 第56回日本学術会議材料工学連合講演会, 京都テルサ, 2012.10.29

- ⑥ 鎌田敏郎, 内田慎哉, 田中伸幸: 塩害環境下にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法とその有効性の検証, セメント・コンクリート関西発表会2012, 大阪科学技術センター, 2012.10.4

- ⑦ 関 翔太, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 田中伸幸: 飛沫帯にあるRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法とその妥当性の評価, 平成24年度全国大会 土木学会第67回年次学術講演会, 第V部門, 名古屋大学, 2012.9.5

- ⑧ 田中伸幸, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 飛沫帯にあるRC部材における各種劣化因子の変動が曲げ耐力の予測結果に与える影響に

関する感度分析,平成24年度全国大会 土木学会第67回年次学術講演会,第V部門,名古屋大学,2012.9.5

- ⑨ 田中伸幸,内田慎哉,鎌田敏郎,関 翔太:塩害を受けるRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法とその有効性の評価,平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会,神戸市立工業高等専門学校,2012.6.9
- ⑩ 関 翔太,内田慎哉,鎌田敏郎,田中伸幸:飛沫帯に位置するRC部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法とその有効性の検証,平成23年度土木学会西部支部研究発表会,鹿児島大学,2012.3.3
- ⑪ 内田慎哉,鎌田敏郎,木下真一:塩害環境下にあるコンクリート部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法,日本コンクリート工学会九州支部 若手研究者による研究シーズ発表会,福岡国際会議場,2011.9.13

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 慎哉 (UCHIDA SHINYA)
佐賀大学・工学系研究科・助教
研究者番号:70543461