

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21360206
 研究課題名（和文）
 NDT と統計的手法の融合によるコンクリート部材の性能評価と劣化予測の高精度定量化
 研究課題名（英文）
 High precision quantification of performance evaluation and deterioration prediction for RC members based on integration of statistical simulation into NDT methods
 研究代表者
 鎌田 敏郎（KAMADA TOSHIRO）
 大阪大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：10224651

研究成果の概要（和文）：本研究では、塩害環境下にある RC 部材を対象として、統計的手法に基づいて曲げ耐力に関する劣化曲線を導出する方法（【統計的手法による劣化予測】）を検討した上で、【NDT-FEM による耐力推定手法】の高度化も併せて行い、両手法を組み合わせた劣化曲線の逐次更新手法（【劣化曲線の逐次更新手法】）の開発を行った。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構造性能や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 method based on statistical simulation for flexural load bearing capacity of RC members under chloride attack was developed. Secondly, non-destructive evaluation method for mechanical performance for RC members with corroded rebars was improved. Finally, sequential update methods by using both deterioration prediction method and non-destructive evaluation method were developed. As a result, it was revealed that these methods developed in this study could evaluate mechanical performance and estimate 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
2009 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	9,200,000	2,760,000	11,960,000

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，構造解析，耐力，劣化曲線，劣化予測，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定量的な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、例えば、劣化機構を塩害と想定したケースにおいて鉄筋位置での塩化物イオン濃度の計算値か

ら鉄筋の発錆時期や腐食ひび割れの発生時期を推定する方法などが示されている。しかしながら現存する方法は、いずれも部材の安全性能や使用性能などコンクリート部材に要求される主たる構造性能を直接的に評価できるものではない。

このような背景から、申請者は、鉄筋を腐食させた RC はり供試体を対象に、各種非破壊試験 (NDT) を適用し、その結果を劣化損傷度マップとして描いた後、これをインプットデータとする構造解析 (FEM) を行う【NDT-FEM による耐力推定手法】の開発を行ってきた。しかしながら現状では、部材の耐荷性能を精度良く推定できる段階には至っていない。

一方、構造物の劣化予測の手段として、統計的手法に基づいて劣化予測を行う方法がある。この手法は、既存の供用中のコンクリート構造物の目視点検データを母集団とする確率モデルを構築した上で、将来の劣化予測を行うものである。これは、時間軸を意識した手法であるため、現状の点検データを基に将来を予測することが可能である反面、時間の増大とともに予測結果におけるバラツキも大きくなる傾向を持つ。さらに、劣化予測結果を適宜確認する方法がない場合は、バラツキを最小化するための工夫を施すことができないなどの問題も有している。

2. 研究の目的

本研究では、塩害環境下にある RC 部材を対象として、統計的手法に基づいて曲げ耐力に関する劣化曲線を導出する方法 (【統計的手法による劣化予測】) を検討した上で、【NDT-FEM による耐力推定手法】の高度化も併せて行い、両手法を組み合わせた劣化曲線の逐次更新手法 (【劣化曲線の逐次更新手法】) を開発することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 統計的手法による劣化予測

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の導出する方法論の開発を行った。さらに、対象とした部材において載荷試験を行って把握した実際の曲げ耐力と比較し、導出した劣化曲線の妥当性についての検証も併せて行った。

(2) 感度分析手法

上記(1)の【統計的手法による劣化予測】を応用して、鉄筋腐食および鉄筋腐食ひび割れ発生時刻を推定し、その結果から塩害劣化進行過程における潜伏期および進展期の各期

間を算出、さらに、期間ごとに 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ついての感度分析を行った。

(3) NDT-FEM による耐力推定手法の高度化

ひび割れ幅測定および分極抵抗法を併用した非破壊試験から FEM 解析を用いて部材の曲げ耐力を推定する手法の検討を行った。また、本手法の妥当性を検証するため、載荷試験により実測した曲げ耐力との比較も併せて行った。

(4) 劣化曲線の逐次更新手法

上記(1)で開発した【統計的手法による劣化予測】で導出した劣化曲線に対して、上記(3)で高度化した【NDT-FEM による耐力推定手法】により把握した曲げ耐力の結果を用いてベイズ理論により劣化曲線を更新し、耐力推定以降の劣化曲線のバラツキを低減する (精緻化) する方法論を開発した。

4. 研究成果

(1) 統計的手法による劣化予測

①対象とした RC 部材の概要

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 (kg/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： ϕ (mm)	13
	かぶり： c (mm)	63.5
コンクリートの圧縮強度： f'_c (N/mm^2)	32.6	
コンクリートの弾性係数： $E_c \times 10^3$ (kN/mm^2)	28	
水セメント比：W/C (%)	47.5	

②曲げ耐力に関する劣化曲線の導出方法

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 (年)における鉄筋位置の塩化物イオン濃度： C (kg/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、 $t_{corr.}$ (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/cm^2)が、 W_c (mg/cm^2)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、 $t_{cra.}$ (年)が算出できる。以下に判定式および $t_{cra.}$ 算出式をそれぞれ示す。

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

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

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

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

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、 $t_{cra.}$ 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 $t_{corr.}$ 、 $t_{cra.}$ 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： $\omega_{ave.}$ をそれぞれ算出した。

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

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

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

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。

③導出した劣化曲線の検証

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。

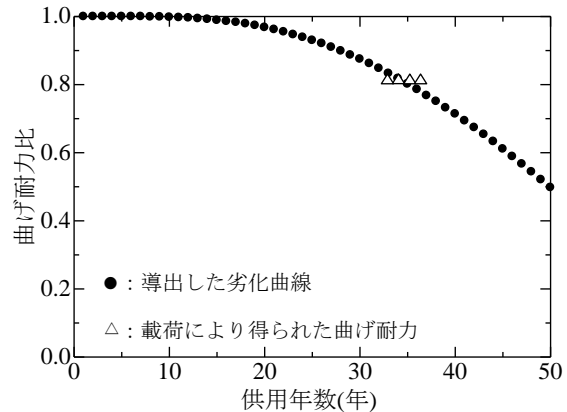


図1 曲げ耐力の劣化曲線

(2) 感度分析手法

①塩害劣化進行過程の潜伏期および進展期の算出方法

統計的手法による劣化予測に示す方法により、鉄筋腐食開始時刻を求めた。すなわち、10,000個の $t_{corr.}$ に対し、供用年数5年毎にカウントし、さらに総数10,000個で除すことにより、腐食発生する確率を算出した (図2参照)。この平均値を鉄筋腐食開始時刻 (供用年数26年) とした。したがって、潜伏期は、供用年数0～26年となる。続いて、同様の手順により腐食ひび割れ発生時刻を算出した。その結果を、ひび割れ発生時刻は供用年数31年、潜伏期は供用年数26～31年を得た。

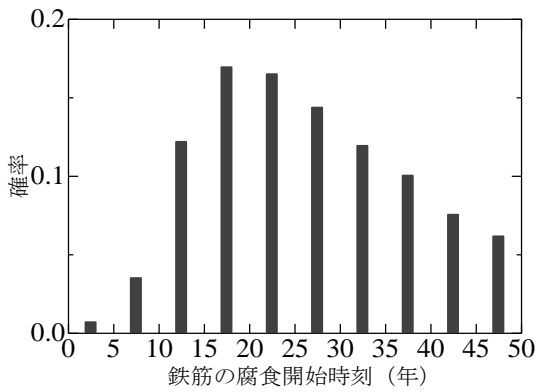


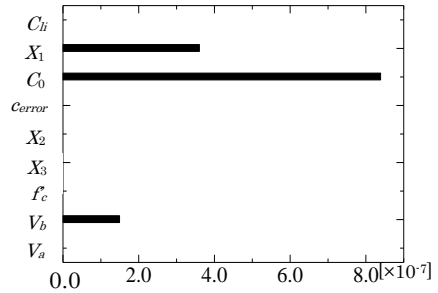
図2 鉄筋の腐食開始確率

②感度分析の方法および結果と考察

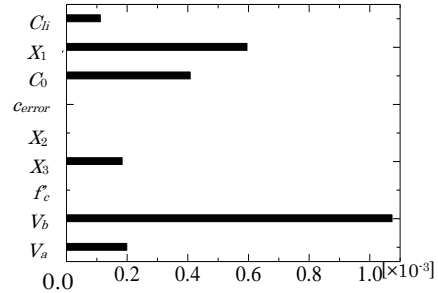
例えば、鉄筋位置での塩化物イオン濃度： X_1 の変動が曲げ耐力に与える影響を把握する場合は、以下の手順により計算を行った。すなわち、 X_1 の累積分布関数を算出し、確率40%および60%に相当する標本観測値 $x_{40\%}$ および $x_{60\%}$ をそれぞれ求める。次に、確率変数 X_1 の標本観測値である $x_{40\%}$ を確定値とし、その他の $C_{lim}, C_0, C_{error}, X_2, X_3, f'_c, V_b$ および V_a を確率変数として取り扱い、設定した供用年数における曲げ耐力比を算出する。同様に、標本観測値 $x_{60\%}$ を確定値として上記の計算により曲げ耐力比を求める。以上の手順にしたがって、全ての確率変数における標本観測値 $x_{40\%}$ および $x_{60\%}$ をそれぞれ求め、それぞれに対応する曲げ耐力比を算出した。各確率変数で得られた2つの曲げ耐力比のうち、値が小さいものを当該確率変数における曲げ耐力比とし、図1で求めた曲げ耐力比（基準値）から差し引いた。これを「曲げ耐力比の基準値と曲げ耐力比の最小値との差」と定義した。得られた結果を図3に示す。ただし、最小値が基準値より大きい場合は0とした。図より、5年目（潜伏期）では、 C_0 の変動が曲げ耐力比に与える影響が大きいことがわかる。15および25年目では、 C_0 に加えて、 X_1 および V_b の影響も大きくなっていることが確認できる。供用年数30年目（進展期）では、15および25年目と同様に、 V_b, C_0, X_1 の順に曲げ耐力に与える影響が大きくなっている。

(3) NDT-FEMによる耐力推定手法の高度化

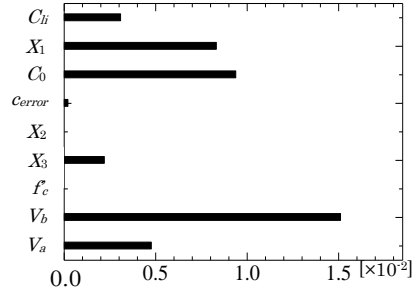
NDT-FEMによる耐力推定手法で推定した結果を図4に示す。図には载荷により把握した実際の曲げ耐力の結果も併せて示している。提案する手法では、鉄筋降伏荷重が25kN程度、曲げ耐力が約29kNとなった。一方、载荷試験では、鉄筋降伏荷重が約20kN、曲げ耐力は約25kNであった。したがって、鉄筋腐食の不均一性を非破壊試験により評価した上でFEM解析を実施する本手法により、曲げ耐力を適確に推定できることが明らかとなった。



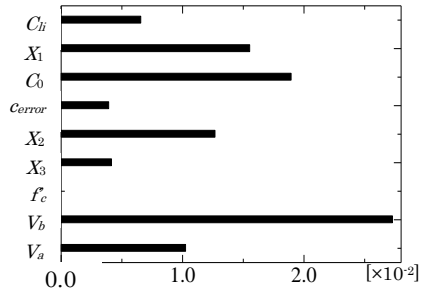
a) 供用年数5年目



b) 供用年数15年目



c) 供用年数25年目



d) 供用年数30年目

図3 感度分析結果

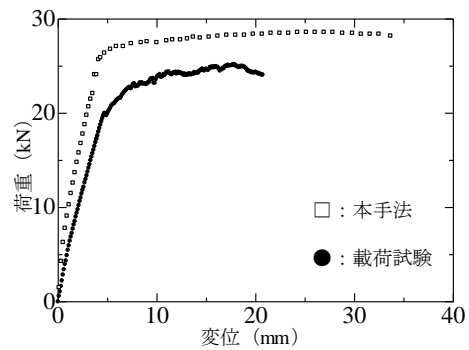


図4 NDT-FEMによる耐力推定手法の結果と载荷試験結果との比較

(4) 劣化曲線の逐次更新手法

統計的手法による劣化予測で導出した劣化曲線に対して、NDT-FEMによる耐力推定手法で観測した耐力を用いてベイズ更新する方法について概説する。統計的手法による劣化予測で導出した図1の劣化曲線に対して、曲げ耐力の95%信頼区間の上限値および下限値も併せて示した結果を図5に示す。

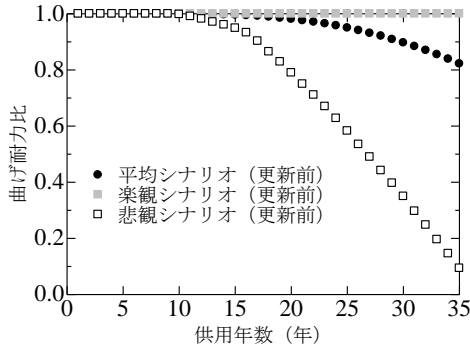


図5 統計的手法により導出した劣化曲線

統計的劣化予測モデルについて概説する。図5で算出した 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 NDT-FEM による耐力推定手法により更新される劣化曲線が、図5で算出した劣化曲線の重み付き荷重和で表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。 $f(t,1)$ は図5に示す悲観シナリオ (更新前)、 $f(t,2)$ は楽観シナリオ (更新前) を採用する。これにより、曲げ耐力比の信頼区間 95%における上限値と下限値の情報を劣化予測モデルに組み込むことが可能となる。ここで、 ω の具体的な確率密度関数 (事前確率密度関数) が、ディリクレ分布に従うと仮定する。ディリクレ分布の確率密度関数 $D(\omega|\gamma)$ は、

$$D(\omega|\gamma) = \Psi(\gamma) \prod_{k=1}^2 \{\omega(k)\}^{\gamma_k-1} \quad (13)$$

とする。これにより、NDT-FEM による耐力推定手法により得られた曲げ耐力比の観測値が加わることで、ベイズ更新により観測値に適合した劣化予測モデルを得ることが可能となる。

NDT-FEM による耐力推定手法により得られた観測値が、図5に示す劣化曲線の分布の平均値 (平均シナリオ (更新前)) L'_{ave} よりも危険側の場合の事例を図6に示す。供用年数 25 年目の時点で更新前および更新後と比較すると、曲げ耐力比の予測精度が向上し

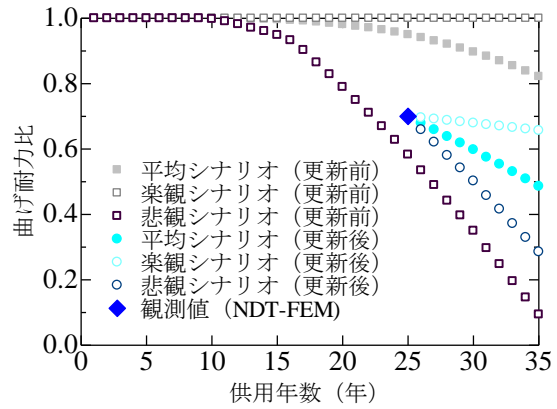


図6 劣化曲線の更新結果

ていることが明らかとなった。なお、ここで提案した手法は、逐次更新を踏まえたものである。

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15件)

- ① 田中伸幸, 内田慎哉, 松岡弘大, 鎌田敏郎, 貝戸清之: 非破壊試験および構造解析による塩害劣化した RC 部材の曲げ耐力に関する劣化曲線の逐次更新手法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, 第12巻, 2012 (投稿中)
- ② 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, 2012
- ③ 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, 2012
- ④ 貝戸清之, 起塚亮輔, 伊藤哲男, 橋爪謙治, 出口宗浩: 床版かぶりコンクリートの剥離・剥落発生リスクと最適点検政策, 土木学会論文集 F4, 査読有, Vol.68, No.1, 2012, pp.11-27
- ⑤ 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 各種統計指標が RC 部材の曲げ耐力の予測に与える影響に関する感度分析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, 第11巻, 2011, pp.219-226
- ⑥ 福田泰樹, 貝戸清之, 橋爪謙治, 横山和昭: RC 床版の統計的劣化予測と補修効果の事後評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, No.2, 2011,

- pp.1495-1500
- ⑦ 仁平達也, 松岡弘大, 貝戸清之, 轟俊太郎: 複合劣化による RC 部材の剥離・剥落に関する統計分析, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, No.1, 2011, pp.737-742
 - ⑧ 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 飛沫帯にある RC 部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, No.1, 2011, pp.887-892
 - ⑨ 内田慎哉, 鎌田敏郎, 木下真一: 塩害環境下にある RC 部材の曲げ耐力の予測手法に関する基礎研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, 第 10 巻, 2010, pp.207-214
 - ⑩ 木下真一, 鎌田敏郎, 内田慎哉: 鉄筋腐食によりひび割れが生じた RC はり部材の曲げ耐力の非破壊評価手法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, 第 10 巻, 2010, pp.215-220
 - ⑪ 起塚亮輔, 貝戸清之, 伊藤哲男, 西川秀: 目視点検データに基づく橋梁床版のかぶりコンクリートの剥離・剥落に関する統計分析, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.2, 2010, pp.1441-1446
 - ⑫ 田中 尚, 藤森裕二, 貝戸清之, 小林潔司, 安野貴人: 加速劣化ハザードモデル: コンクリート中性化予測への適用, 土木学会論文集 D, 査読有, Vol.66, No.3, 2010, pp.329-341

[学会発表] (計 19 件)

- ① 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 回年次学術講演会講演概要集, 2012.9.5, 名古屋大学
- ② 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講演概要集, 2012.6.9, 神戸市立工業高等専門学校
- ③ 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 各種統計指標の変動が塩害を受ける RC 部材の曲げ耐力の予測結果に与える影響に関する感度分析, 第 55 回日本学術会議材料工学連合講演会講演概要集, 2011.10.20, 京都教育文化センター
- ④ 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 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妥当性の検証, 平成 23 年度全国大会 土木学会第 66 回年次学

- 術講演会講演概要集, 2011.9.7, 愛媛大学
- ⑤ 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 飛沫帯にある RC 部材の曲げ耐力の予測方法に関する研究, 平成 23 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 2011.6.12, 関西大学
- ⑥ 福田泰樹, 貝戸清之, 橋爪謙治, 横山和昭: 統計的劣化予測に基づく補修優先順位の設定と相対的事後評価, 第 43 回土木計画学研究・講演集, 2011.5.29, 筑波大学
- ⑦ 木下真一, 内田慎哉, 鎌田敏郎: 塩害環境下に曝された RC スラブの曲げ耐力に関する劣化予測とその妥当性の検証, 日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集, 2010.10.26, ハートピア京都
- ⑧ 起塚亮輔, 貝戸清之, 伊藤哲男, 出口宗浩: 橋梁床版のかぶりコンクリートの剥離・剥落に関する統計的劣化予測と分析, 平成 22 年度全国大会 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 2010.9.3, 北海道
- ⑨ 山本健太, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 木下真一: 塩害を受けるコンクリート部材の曲げ耐力の予測手法に関する基礎的検討, 平成 22 年度全国大会 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 2010.9.3, 北海道
- ⑩ 木下真一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 宗像晃太郎: 鉄筋腐食によりひび割れが生じた RC はり部材における非破壊試験に基づく曲げ耐力推定手法, 平成 22 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 2010.5.22, 京都大学

[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

鎌田 敏郎 (KAMADA TOSHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10224651

(2) 研究分担者

貝戸 清之 (KAITO KIYOYUKI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30467550

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