

平成22年 5月 24日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19360198  
 研究課題名（和文）：マルチセンシングシステムによる海洋コンクリート構造物の長期性能定  
 量化手法の構築

研究課題名（英文）：Multi sensing evaluation system for long term performance of concrete  
 structures in marine environment

## 研究代表者

武若 耕司 (TAKEWAKA KOJI)  
 鹿児島大学・大学院理工学研究科（工学系）・教授  
 研究者番号：10155054

研究成果の概要（和文）：本研究は、海洋コンクリート構造物の完全非破壊型塩害予知システムの構築を目的とし、ハードおよびソフトの両面から実験的ならびに解析的検討を実施した。主な研究成果は以下の通り。①構造物の劣化進行を予測する塩害劣化シミュレーションモデルを構築した。②供用構造物中の塩害劣化進行をモニタリングし、構造物の劣化予知が出来るシステムを確立した。③劣化予知にあたって既定値とすべきパラメータ（腐食発生限界塩化物イオン濃度やひび割れ発生限界鉄筋腐食量）を定量化した。

研究成果の概要（和文）：The objective of this research is to propose a new non destructive prediction system for deterioration of concrete structures in marine environment. From the experimental and analytical examinations, following results were obtained. (1)New simulation models to estimate the progress of chloride induced deterioration were constructed. (2)New monitoring and prediction system for in-service concrete structures in marine environment were established. (3)The critical values of parameters for deterioration prediction were quantitatively determined.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：マルチ腐食センサ、モニタリング、劣化シミュレーション、塩化物イオン  
 塩害劣化、海洋環境下、自然電位、鉄筋腐食

## 1. 研究開始当初の背景

社会資本整備のために構築される各種構造物は、後世に引き継ぐべき大事な資産である。特に、港湾、海岸ならびに外洋に位置するコンクリート構造物（以下、海洋コンクリート構造物と称す）には重要なものが多く、その長期にわたる健全性の保持は極めて大

事であるが、その一方で、これらの構造物は塩害環境という耐久性上極めて厳しい環境にあるために、わが国のみならず諸外国においても数多くの劣化事例が存在している。このため、このような構造物においては、十分な耐久性が確保されるような綿密な設計を行うとともに、予定供用期間中その耐久性を

確実に維持するためには、予防保全をベースとした適切な維持管理を行っていくことが必要不可欠となる。そして、この予防保全の観点から必要となってくるのが、構造物の状態を逐次観測し、その情報から将来の劣化現象を予想し、対策の必要性の有無を事前に警告する、いわゆる劣化予知システムの構築である。この劣化予知は、大別すると次の2つとなる。1つは、劣化現象をモデル化し、そのモデルを用いた構造物の劣化状況シミュレーションによって将来を予測する手法である。もう1つは、実構造物における劣化現象をモニターして実現象を連続的に把握し、その情報を基に将来を予測する手法である。そして、この両者を組み合わせることで、より精度の高い予知が可能になる。

一方、海洋コンクリート構造物の劣化は、コンクリート中を浸透し内部に蓄積した塩化物イオンによりコンクリート内部の鉄筋が腐食してコンクリートにひび割れやはく離を生じさせる、いわゆる塩害によって引き起こされる。したがって、その予知にあたっては、先ず、コンクリート中の塩化物イオンの浸透深さやその量を予測できることであり、次に、内部鋼材の腐食発生やその進行状況についての予測が重要となる。

## 2. 研究の目的

研究代表者および研究分担者らは、過去20年以上にわたって、海洋コンクリートの塩害メカニズムの解明とこれを抑制するための各種手法を提案してきたが、それらの成果をベースとして、現在、この劣化現象をコンピュータ上でビジュアルにシミュレーションできるモデルの構築を進めている。同時に、塩化物イオンの浸透や鉄筋腐食のモニタリング手法についても、プロトタイプセンサを開発し、その実用化を図るための検討に着手しているところである。そこで本研究では、これらの研究成果を有機的に結び付け、海洋コンクリート構造物の完全非破壊型塩害予知システムを構築するために、ハードおよびソフトの両面から実験的ならびに解析的検討を行うことを目的としている。

本研究の内容を大別すると次の3つに分けられる。

(1) 塩害劣化現象をモデル化し、そのモデルを用いて構造物の劣化状況をシミュレートすることで将来を予測する塩害劣化シミュレーションモデルの構築：「塩化物イオンの浸透」→「鉄筋腐食の発生」→「マクロセル腐食の進行」→「腐食ひび割れの発生」という一連の塩害劣化の進行状況を、コンピュータ上に構築した2次元あるいは3次元鉄筋コンクリートモデルの中で再現し、構造物の寿命を予測する。

(2) 供用構造物中の塩害劣化進行をモニターし、その情報から将来の構造物の劣化予知が出来るシステムの構築：コンクリート中への塩化物イオン浸透過程のモニタリングを行うためのセンサ(以下、塩分センサと称す)ならびにコンクリート中の鋼材腐食発生や腐食速度を定量的に把握できるマルチ腐食センサの開発および、これらのセンサを用いた構造物の維持管理システムを構築する。

(3) 劣化予知にあたって既定値とすべき値の定量・定式化：上記(1)、(2)の情報を有機的に結合させ、精度の高い海洋コンクリート構造物の完全非破壊型塩害予知システムの構築を行う際、「腐食発生限界塩化物イオン濃度」や「ひび割れ発生限界鉄筋腐食量」などのパラメータの定量・定式化が必要となる。このための理論的考察ならびに実験、調査を実施する。

## 3. 研究の方法

### (1) 塩害劣化現象のモデル化

本モデルは、コンクリート環境について、骨材や空隙の存在をランダムに設定できコンクリートの品質のばらつきをも表現できる「コンクリートモデル」と、このコンクリートモデル中を拡散浸透する「塩化物イオンの移動モデル」および塩化物イオンが鉄筋到達した後の「鉄筋腐食モデル」とから構成されている。本研究では、以下の手順でコンクリートモデルおよび塩化物イオン移動モデルを構築する。

#### ①コンクリートモデルの開発

コンクリートモデル開発のコンセプトは以下の通り。

- ・コンクリートモデルにおいても実際のコンクリートと同様に、セメントペースト、骨材、空隙から構成されるものとする。
- ・骨材および空隙のモデル中への配置は任意に設定できるシステムとする。

これらのコンセプトの元、次の2つの方向からコンクリートモデルを構築する。

(A) 図-1に示すように、骨材および空隙を球形と見なし、大きさや数については、骨材の粒度分布および細孔径分布範囲内で、モデル中にランダムに配置することで、骨材及び空隙の位置座標を決定させる。

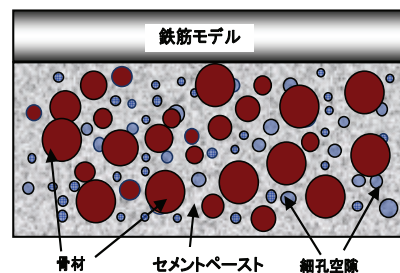


図-1 骨材球・空隙球モデル

(B) 図-2 に示すように、ボロノイ分割を適用したランダムに2次元に広がるmmオーダーのトラス要素によるネットワークを構築し、その際、図に示すように粗骨材、モルタル、その界面、ひび割れ、空隙を個別にモデル化することで、コンクリート中を再現することを試みる。

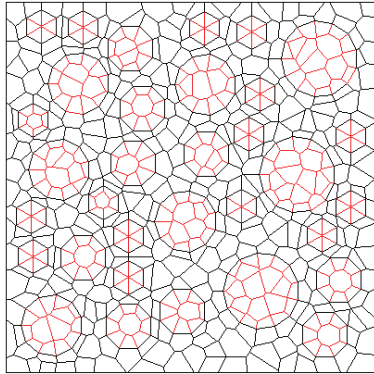


図-2 ボロノイ分割モデル

②塩化物イオン移動モデル

上記(A)および(B)のモデルともに、例えば、図-3 に示すようなモルタル、骨材-モルタル界面、空隙ならびにひび割れを通るイオン移動の1次元の物質移動解析を、コンクリートモデル中で繰り返し行うことによって、塩化物イオンのコンクリート中における2次元的な広がり表現する。

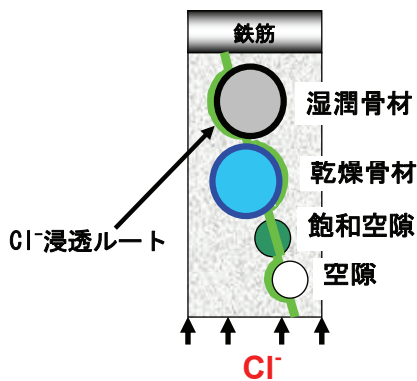


図-3 塩化物イオン浸透ルート

(2) 塩害劣化モニタリングシステムの構築  
塩化物イオン浸透センサおよびマルチ腐食センサともに、考えられる幾つかの方法について、プロトタイプセンサを試作し、その実用化の可能性を主に、室内実験(促進劣化試験など)によって検討する。

①塩化物イオン浸透センサの開発

コンクリート中の塩化物イオン量を測定できる可能性がある幾つかの具体的方法を抽出し、その実用性について先ず、コンクリート環境を模した擬似溶液を用いた実験によ

り予備検討を行う。

(A) 塩化物イオン量の間接的測定方法：塩化物が存在することによってセンサ部が変化する(例えば、鉄が腐食する)、あるいは周辺コンクリートの性状が変化する(コンクリートの電気抵抗や電気容量に違いが生じる)状況をモニタリングすることによって塩分浸透状況を把握しようとする方法。図-4 は、このタイプのセンサの一例であり、鉄線の腐食をモニターすることにより、塩化物イオンの浸透位置を把握するもの。

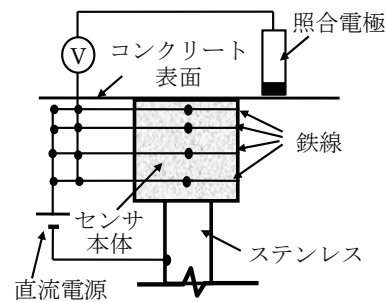
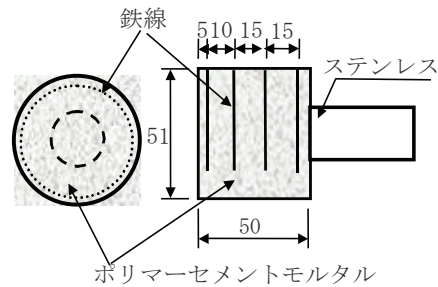


図-4 塩化物イオン浸透センサの例

(B) 塩化物イオン量の直接的測定方法：例えば、イオン選択性電極の原理を応用し、塩化物イオンと反応し溶出する金属をセンサとして使用し、これが塩化物イオンと反応する際に発生する電気化学的情報をモニタリングすることにより、センサ位置の塩化物イオン量を定量化する方法。

②マルチ腐食センサの開発

コンクリート中の鋼材腐食速度のモニタリング手法についても、手法を絞らず、複数の観点から、センサあるいは測定システムの開発の可能性を探る。

(A) 鋼材の腐食速度の指標である分極抵抗をコンクリート中に埋め込まれたセンサによって測定できる手法。

(B) 埋設型照合電極と比抵抗測定センサ(状況によっては、上記塩化物イオン浸透センサを利用して測定)を組み合わせたセンサを構造物中の適当な位置に配置し、それらのデータの解析値からマクロセル電流密度を推定する手法

(3) 劣化予知のためのパラメータ定量化

劣化予知にあたって既定値とすべき値の定量・定式化に関する検討のうち、コンクリート中で鋼材の腐食が開始する塩化物イオン濃度の定量化のための検討を主体として行う。

(A) コンクリート中の細孔溶液を模した水溶液を用いた実験：コンクリート中の鋼材腐食は、鋼材と接する細孔溶液の組成が大きく関係していることから、図-5(a)に示すような  $\text{Cl}^-$  と  $\text{OH}^-$  の比に着目した溶液実験により、鋼材腐食感受性を実験的に検討する。

(B) コンクリート中の鋼材腐食モニタリング試験：図-5(b)に示すように、腐食領域の特定および照合電極の埋設による連続的な鋼材のモニタリングなど、試験方法に工夫を加え、腐食発生時期を特定し、その時点でのコンクリート中の塩化物イオン量を測定することにより限界塩化物イオン濃度を定量化する。

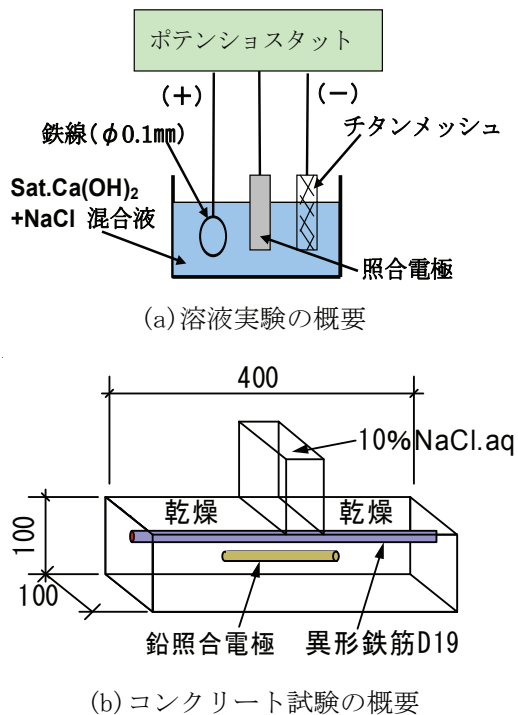


図-6 鋼材腐食発生限界塩化物イオン量定量化試験方法の例

4. 研究成果

(1) 塩害劣化現象のモデル化

①骨材球モデル

骨材および空隙を球で表現し、それらの配置や径を表現に即した範囲でランダムに設定することが可能な鉄筋コンクリートモデルを提案し、それを用いた走査線型の塩分浸透モデルおよび鉄筋腐食モデルを組み合わせ、コンクリート品質のばらつきの影響を考慮し

た塩害劣化三次元シミュレーションモデルを開発した。さらに、このシミュレーションモデルを、ブリーディングの影響や多方向からの塩分浸透を考慮できるように改良した。

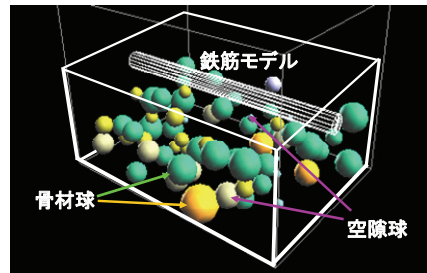


図-7 3次元塩害劣化モデル

②メソスケール数値解析モデル

荷重や凍害を受けるコンクリートのマクロスケールの物質透過性を再現する、メソスケールの損傷に基づくメソスケール数値解析手法を開発した。この解析手法では、塩化物イオンの拡散と水分の移動を考慮している。荷重や凍害によって生じる損傷(ひび割れ)によって、塩化物イオンの浸入が早まるという実験結果を再現可能なことを確認した。また、圧縮応力や引張強度以下の引張応力を受けている場合でも塩化物イオンの浸入速度が早まること、コンクリートの乾燥状態によって、塩化物イオンの浸入が大きく異なることも再現した。さらに、複合劣化シミュレーションに必要な、疲労および持続荷重下のコンクリートの挙動を再現するための、メソスケールの構成則と数値解析プログラムを開発した。これにより、モルタルにおける、繰返し及び持続荷重下のマクロスケールのひずみの増加や強度の劣化のメカニズム、その载荷速度や履歴の依存性を示した。劣化の要因がひび割れの発生と進展であり、これにより塩化物イオンの浸入速度に影響を与えることが予想される。

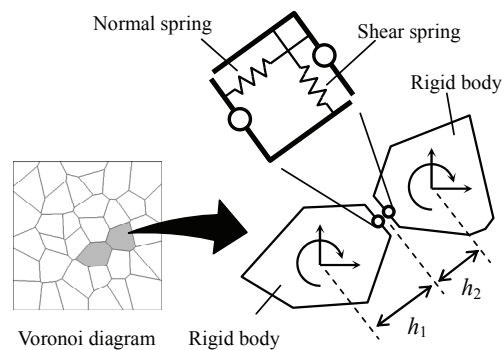


図-8 剛体ばねモデルの概要



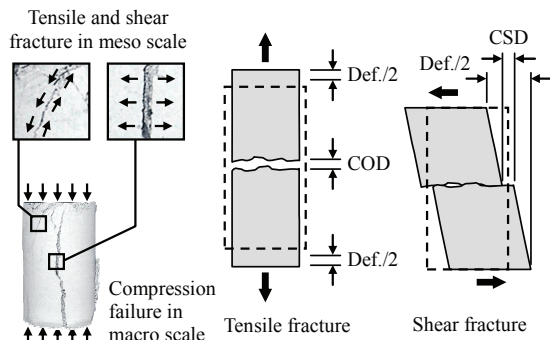


図-9 メソスケールでの破壊モード

(2) 塩害劣化進行のモニタリング技術

①塩分浸透センサ

開発中の塩分浸透センサを埋設した大型試験体を海洋環境下に暴露した結果、腐食浸透センサによるコンクリート構造物の塩害劣化モニタリングシステムの信頼性を確認した。さらに、塩害劣化モニタリングシステムを応用し、温泉環境下における硫酸イオンの浸透モニタリングへの適用の可能性についても確認した。また、ブリーディングが塩分浸透センサの感度に悪影響を及ぼすのを避け、さらにモニタリング精度を向上させるため、センサ形状を改良した新型センサを開発し、その性能についても確認した。

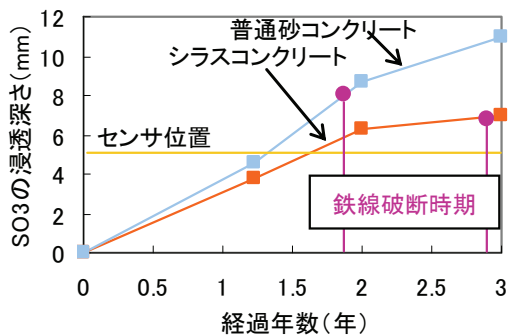


図-10 腐食センサの精度確認の一例

②マルチ腐食センサ

鉄筋を埋設したコンクリート供試体中に、あわせて照合電極を埋設し、供試体表面の一部に塩水を接触させて塩化物イオンを供給しつつ、照合電極により自然電位の経時変化を測定する実験を行った。その結果、自然電位の経時変化から、鉄筋の腐食発生時点を明確にとらえることができることを確認した。

(3) 劣化予知のためのパラメータ定量化

鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度を、セメント溶液中およびコンクリート中で実験的に検討した結果、限界塩化物イオン濃度は、セメント量および  $[C1] / [OH]$  でパラ

メータ化することにより評価可能であることを確認した。また、その普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、使用するセメント量に応じて腐食発生限界塩化物イオン濃度が異なることを明らかにした。さらに、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの腐食発生限界塩化物イオン濃度は、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比べて、同等かやや高く、塩化物イオン拡散係数は、平均で普通ポルトランドセメントの 1/9 倍程度であることを確認した。

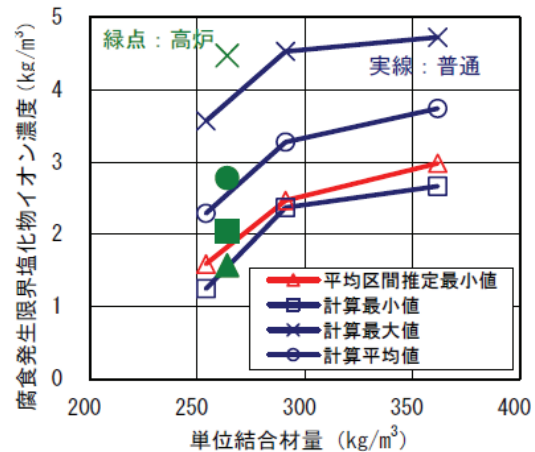


図-11 単位結合材量と腐食発生限界塩化物イオン濃度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

①堀口賢一、丸屋剛、武若耕司、コンクリート中の鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度、大成建設技術センター報、査読無、42、2009、08-1-08-7

②L.C. Wang and T.Ueda, Meso-scale modeling of chloride diffusion in concrete with consideration of effects of time and temperature, Water Science and Engineering, 査読有, Vol.2, No.3, 2009, pp.58-70

③L.C.Wang and T.Ueda, Mesoscopic simulation of chloride ion diffusion in frost-damaged concrete, International Journal of Modelling, Identification and Control, 査読有, Vol.7, No.2,2009, pp.148-154

④T. Ueda, M. Hasan, K. Nagai, Y.Sato and L.C. Wang, Mesoscale Simulation of Influence of Frost Damage on Mechanical Properties of Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, 査読有, Vol.21, No.6,2009, pp.244-252

⑤武若耕司、丸屋剛、下村匠、山口明伸、竹田宣典、塩害に対するコンクリート構造物の耐久性照査の現状と将来、コンクリート工学、査読有、Vol.47、2009、pp.23-32

- ⑥松元淳一、武若耕司、山口明伸、梅木真理、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物の塩害と炭酸化の複合劣化機構に関する研究、土木学会論文集 E、査読有、Vol.65、2009、pp.378-391
- ⑦L.Wang, T.Ueda, S.Honda, Prediction of Diffusivity for Frost-Damaged Concrete by the Mesoscopic Truss Network Model, Advances in Concrete Structural Durability, 査読無, Vol.1, 2008, pp.267-273
- ⑧T. Ueda, Rational Durability Design and Maintenance for Frost Attack and Combined Effects, Advances in Concrete Structural Durability, 査読無, Vol.1, 2008, pp.165-171
- ⑨T. Ueda, Structural Performance and Modeling of Concrete Damaged under Combined Effects, Sustainable Concrete Technology and Structures in Local Climate and Environment Conditions, 査読無, pp.33-43
- ⑩L.C Wang and T. Ueda, Mesoscopic simulation of water absorption in frost damaged concrete, Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, 査読無, Vol.2, 2008, pp.979-985
- ⑪K.Matsumoto, Y.Sato and T.Ueda, Mesoscopic simulation and damage estimation of mortar under high-stress fatigue loading, Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, 査読無, Vol.2, 2008, pp.1171-1177
- ⑫T.Yamaguchi, K.Takewaka and T.Nakazaki, Long-term durability of reinforced concrete structures using “Shirasu concrete” in an actual marine environment, Sustainable Concrete Technology and Structures in Local Climate and Environment Conditions, 査読無, pp.1062-1068
- ⑬K.Matsumoto, Y.Sato, T.Ueda and L.Wang, Mesoscopic, Analysis of Mortar under High-Stress Creep and Low-Cycle Fatigue Loading, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, Vol.6, No.2, 2008, pp.337-352
- ⑭L.C. Wang, M.Soda and T.Ueda, Simulation of Chloride Diffusivity for Cracked Concrete Based on RBSM and Truss Network Model, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, Vol.6, No.1, 2008, pp.143-155
- ⑮堀口賢一、丸屋剛、武若耕司、腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.29、No.1、2007、pp.1377-1382
- ⑯石田健太、武若耕司、山口明伸、前田聡、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量の定量評価に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.29、No.3、2007、pp.1065-1070
- ⑰岩永真弘、武若耕司、山口明伸、前田聡、

鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化三次元シミュレーションモデルの構築、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.29、No.1、2007、pp.1053-1058

⑱松浩嗣、佐藤靖彦、上田多門、剛体バネモデルによる持続および繰り返し荷重を受けるモルタルの時間依存破壊解析、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.29、No.3、2007、pp.811-8116

〔学会発表〕(計7件)

①堀口賢一、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリート中の腐食発生限界塩化物イオン濃度、土木学会第64回年次学術講演会、2009.9.2、福岡大学(福岡県)

②山口明伸、鉄筋コンクリートモデルを用いた塩分浸透性の評価に関する一考察、土木学会第64回年次学術講演会、2009.9.4、福岡大学(福岡県)

③中崎豪士、大型RC部材の海洋曝露実験によるシラスコンクリートの塩害抵抗性検討、土木学会第63回年次学術講演会、2008.9.12、仙台(東北大学)

④堀口賢一、腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響、コンクリート工学年次大会2007、2007.7.13、仙台

⑤松浩嗣、剛体バネモデルによる持続および繰り返し荷重を受けるモルタルの時間依存破壊解析、コンクリート工学年次大会2007、2007.7.13、仙台

⑥石田健太、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量の定量評価に関する実験的検討、コンクリート工学年次大会、2007.7.12、仙台

⑦山口明伸、鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化三次元シミュレーションモデルの構築、コンクリート工学年次大会、2007.7.12、仙台

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

武若 耕司 (TAKEWAKA KOJI)  
鹿児島大学・大学院理工学研究科(工学系)・教授  
研究者番号：10155054

### (2) 研究分担者

上田 多門 (UEDA TAMON)  
北海道大学・工学部・教授  
研究者番号：00151796

丸屋 剛 (MARUYA TSUYOSHI)  
大成建設(株)・技術センター・研究員  
研究者番号：20393712

山口 明伸 (YAMAGUCHI TOSHINOBU)  
鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号：50305158