

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 7 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360208

研究課題名（和文）道路アセットマネジメントの実用システム開発

研究課題名（英文）Development for Practical Road Asset Management System

研究代表者

那須 清吾 (NASU SEIGO)

高知工科大学・経営学部・教授

研究者番号：30373129

研究成果の概要（和文）：橋梁等のアセットマネジメントシステムを構築した。異なる環境にある任意の橋梁に対して、決められた運用条件下の最小化されたコストで最適な補修シナリオを自動的に作成するシステムである。橋梁群全体の維持予算管理も対応している。また、劣化予測の精度を大きく左右し、橋梁の主な劣化要因の一つとして飛来塩分の新しい測定方法が開発されたと共に RC 鉄筋の腐食過程を定量化した。

研究成果の概要（英文）：An asset management system for bridges is developed. The system is able automatically to generate a large number of maintenance scenarios (repair pattern) and select the best one from the consideration of LCC minimization for the bridges having arbitrary maintenance policy and environmental conditions. The system is able to handle the budget management of a whole bridge system. In addition, a new method and equipment to estimate airborne chloride with particle sizes distribution and quantified model for rebar corrosion rate were developed, which are critical components that determine the overall accuracy of the system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

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：土木工学、維持・管理、土木材料、建設マネジメント、施工

1. 研究開始当初の背景

社会基盤のアセットマネジメントシステムは既にいくつも開発されているが、普及しているとは言い難い。その原因は以下の項目が考えられる。

(1) 個々の橋梁の健全度を行う現場技術者と橋梁群全体の予算管理者との間の必然

的なギャップが存在する。

(2) 持続的に精度向上を図るようなシステム機構維持が無いと考えられる。

(3) 社会、経済、自然、技術と言った外部環境の変化に対応していないと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では普及を妨げている原因を明らかにし、実用的な道路アセットマネジメントシステムを構築する。具体的には、1. 現場技術者の感覚に馴染み、2. 持続的な精度向上によるシステム機能維持、3. 外部環境の変化に対応するシステムメンテナンス、を可能とするシステムを構築する。

そして、構築したアセットマネジメントシステムを国及び自治体の実構造体の管理に適用させ、その有効性を検証して信頼性を向上させることにより実用性を高める。

本研究で開発したシステムの全体像を図1に示す。高知県の橋梁点検システムを対象とした。橋梁の設計・環境データや管理・維持基準を入力し、各橋梁の最適な補修計画を提案すると共に橋梁群全体の短中期予算が管理可能なシステムである。

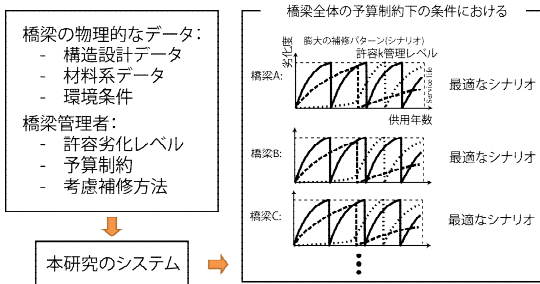


図1 本研究で開発したシステムの全体像

3. 研究の方法

本システムは複数の数式モデル（開発したものと既存のもの）の組み合わせで構築した。具体的なモデル以下に示す。

(1) 構造物への飛来塩分予測モデル：感水紙を用いて海岸付近の飛来塩分を捕集し、高さ毎の粒子粒径の分布を画像分析する実験装置・測定方法を開発した（以下の図）。その結果を用いて既存の飛来塩分予測モデルへ適用させ、飛来塩分の予測を行う。

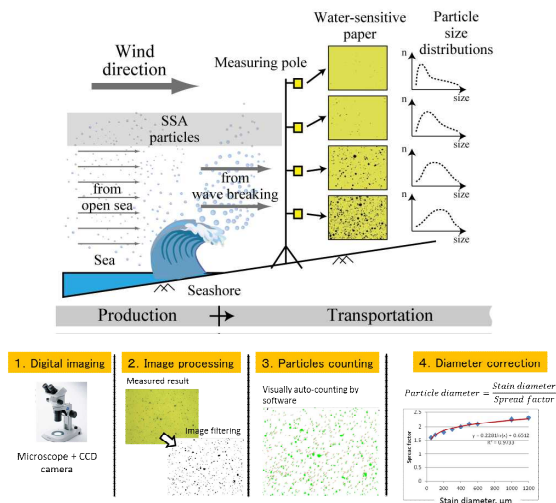


図2 新しい飛来塩分測定方法の概要

(2) 塩分浸透モデル：既存の物質拡散式を用いて、表面補修後のコンクリート内部の逆流現象を考慮した。

(3) 実験によるコンクリート中の鉄筋腐食速度の定量化：鉄筋コンクリート構造物の維持管理に必要な不可欠な情報はコンクリート中の鉄筋腐食速度である。しかし、その実測にはコンクリート中に鉄筋を埋設し、硬化したコンクリート中から取り出す等の手間が生じ、かつ、膨大な数の試験体を要するため、行われた例は少ない。

コンクリート中の鉄筋腐食速度を合計16配合のコンクリート中に埋め込んだ鉄筋の腐食量で2年間測定する実験により定量化した。水セメント比4種類（0.40, 0.50, 0.55, 0.60）、塩化物イオン濃度4種類（1.2, 2.2, 3.2, 4.2 kg/m³）の合計16種類である。セメントは低熱ポルトランドセメントを用い、粗骨材寸法は13 mm、鉄筋はSD450の異形鉄筋D19を用いた。

供試体寸法は長さ200 mm、幅150 mm、高さ70 mmとした。鉄筋（長さ220 mm）を3本平行に純間隔30.5 mmで配置した。かぶり厚さを30 mm（全供試体共通の値）とし、それ以外の5面をアルカリ骨材反応防止用の塗料でシールし、水分が一面のみから侵入するようにした。供試体（合計800個余り）は20℃に保った水槽に入れ、1週間のうち1日間を水漬、6日間を湿潤状態にするサイクルを繰り返した。試験開始当初の1年間は2週間に一度、2年目は1週間に一度、割裂により取り出し、長さ100 mm分の腐食部分を削り取る（鏝落とし）ことにより腐食量を測定した。

(4) コンクリートかぶりひび割れモデル（既存）

(5) 補修効果モデル：主要の補修工法（電気防食、断面補修、表面被服・含侵、脱塩、更新）の効果を検討し、劣化モデルへのパラメータ調整を行うことで模擬的に補修効果を再現した。

(6) 劣化のばらつき評価モデル：高知県から得られた橋梁の点検結果を用い、劣化のばらつきを分析した。実際の劣化ばらつきを再現できるように劣化予測モデルを拡張した。

ばらつきの要因は多数あるため、要因全てのばらつきを考慮するとモデルが煩雑になる。さらに、現時点で不確定なばらつきの要因もあり、必ずしも高い精度の予測結果を得られないため、「ばらつきの要因」ではなく、様々な要因の結果である「劣化速度」に着目する。初期条件で得られた腐食速度に対し、劣化速度を0倍（全く劣化しない要素もあるため）から実橋の劣化分布を十分にカバーできる範囲の倍数までばらつかせる。ただし、以下の図の様に劣化速度を等倍にばらつかせても実橋の劣化分布と整合しないため、点検結果を基に補正を行う。

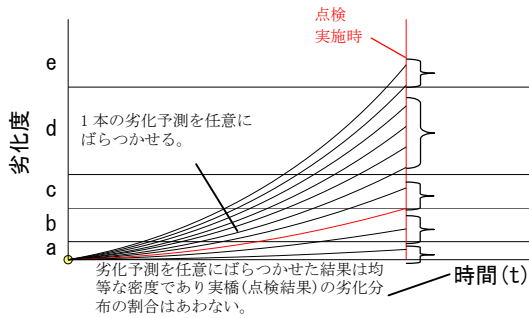


図3 劣化ばらつきの表現

(7) 補修シナリオ作成フレームワーク：予め設定された許容管理レベル以下に橋梁の劣化状態を保つように劣化予測をしながら、補修パターンを自動的に生成させ、すべて可能な補修シナリオを作成する。ある環境条件の中に任意橋梁についての補修シナリオの安全性、経済性、実用性を考慮し、最適なシナリオを提案する。劣化のばらつきを有する橋梁の補修シナリオについてはより詳細な補修シナリオを作成し、部分的な補修も検討可能なフレームワークで設計した。

(2)-(7)のモデルは図4に示すように構成される。

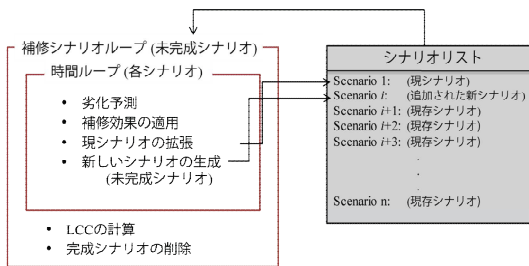


図4 補修シナリオ作成と劣化予測

時間ループによって劣化予測を行い、補修イベントが発生した時にすべての適用可能な補修工法の数だけで未完成のシナリオ（橋梁の供用期間に満たないシナリオ）を生成し、シナリオリストに追加する。時間ループは一つずつ未完成シナリオ（現シナリオ）を取入れ補修工法を適用し、現シナリオを拡張（今回の補修イベントを追加）しながら新しい未完成シナリオを生成する。時間ループ内に未完成シナリオが供用期間まで成長し、補修シナリオの一つとしてカウントされ、シナリオリストから削除される。その時に発生した補修コストを集計し、シナリオのコストになる。次に補修シナリオループがシナリオリストから次の未完成のシナリオを取入れ、繰り返しのシナリオ作成過程が始まる。この繰り返しのシナリオ作成過程はシナリオリストの中のシナリオがなくなるまで行われ、最終的に複数の補修シナリオが得られる。シナリオ生成は以下の図の木々の枝すべてのルートを検索するようなものである。

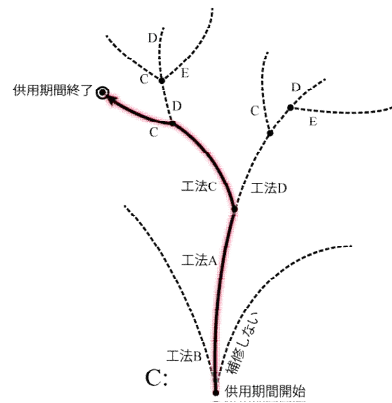


図5 補修シナリオ作成のイメージ

劣化のばらつきを考慮したシナリオ作成については劣化分布をばらつかせる。点検結果と整合するように補正した劣化予測に対しては、図6に示すように最も早い劣化予測が補修タイミングに達した時に同じ劣化状態にあるものを同時に補修することとする。

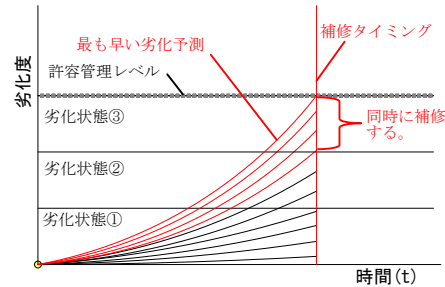


図6 補修タイミングと範囲

(8) 点検結果による予測結果補正モデル：劣化予測結果と実際の劣化状況が調和するように、点検結果を用いた劣化予測の補正アルゴリズムを導入した。

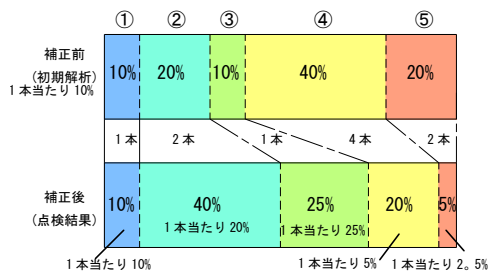


図7 劣化予測における劣化度割合と補正のイメージ

(9) 橋梁群対応フレームワーク：複数の橋梁を考慮した場合、橋梁群全体の維持管理予算や橋梁個々の補修シナリオを計算する。
 (10) 予算管理モデル：予算制約が設定された場合、予算不足の時期に発生した補修イベントをシフトさせ、予算を考慮したシナリオを作成する。優先順位の高い橋梁は先に予算を取り、最善な補修シナリオに近い状態で維持される。優先順位は現在の劣化状態から次

の劣化状態に突入した時に必要となる補修費用の順で決める。

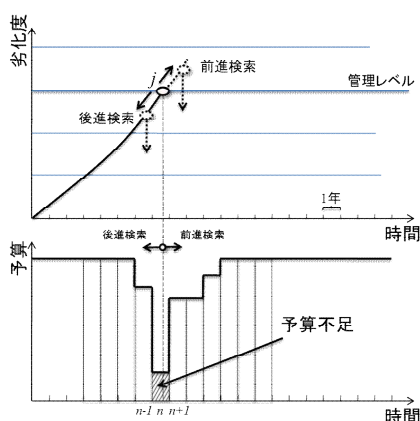


図8 予算不足時の実施検索

尚、システム開発のプログラミング言語はVB.NETを用いた。

4. 研究成果

(1)アセットマネジメントシステムのミクروسケール：ミクروسケールは橋梁単位のソリューションであり、現場技術者に必要な情報である。

解析例として高知県の点検データを用いて、実際の橋梁においてシナリオ解析を実施し、最適シナリオとLCCの算出を行った。解析は塩害の影響を受けて劣化している高知県管内のPC・RC橋のうち、点検データが多いPC橋の「五台山橋」とRC橋の「益野二の橋」を対象とする。

① 五台山橋の最適補修シナリオ

「五台山橋」について補修シナリオ解析を実施した。補修選定一覧と解析結果を図9に示す。五台山橋の劣化のばらつきは点検結果を用いて考慮した結果、シナリオ No. 1～No. 95(5.0倍～0.25倍)までを使用する。また、初期の管理レベルは「4」として最適シナリオ解析を実施した。解析の結果、最も劣化速度が速い劣化予測の補修シナリオは供用開始時に「表面含浸工法」を適用し、供用開始から43.5年目に劣化度が管理レベル4に達する。その時の補修工法は「断面修復工法」を適用しており、供用開始から60.1年目に管理レベル3に達する。その際は「電気防食工法」を採用している。また、劣化速度が2番目以降のシナリオについては、シナリオ No. 2～No. 84までは最も劣化速度が速い劣化予測と同じ補修シナリオとなった。シナリオ No. 85は供用開始から43.5年目でもひび割れが入っていない劣化状態であり、管理レベル3(ひび割れ限界)に達していない。よって、シナリオ No. 85は別途に最適シナリオ解析を実施することとなる。最適シナリオ解析

の結果、シナリオ No. 85は供用開始時に「表面含浸工法」を適用することには変わりはないが、供用開始から66.1年目に初めて管理レベル4(剥落限界)に達する。その時の補修工法は断面修復工法を採用しており、その後の劣化度は管理レベルに達する前に供用期間である100年を迎える。シナリオ No. 86～No. 95まではシナリオ No. 84と同じ補修シナリオとなる。

シナリオNo.	1回目補修 供用年 補修工法	2回目補修 供用年 補修工法	3回目補修 供用年 補修工法
No. 1～No. 84	0 表面含浸	43.5 断面修復	60.1 電気防食
No. 85～No. 95	0 表面含浸	66.1 断面修復	-

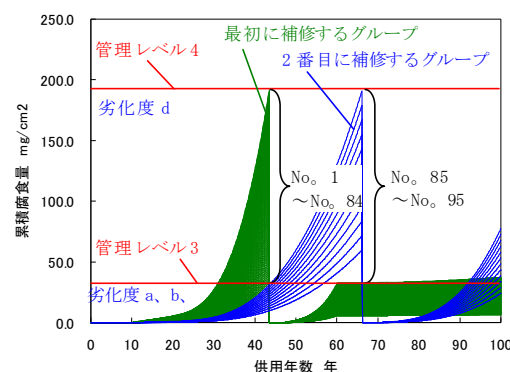


図9 五台山橋解析結果

② 益野二の橋の最適補修シナリオ

「益野二の橋」について補修シナリオ解析を実施した。補修選定一覧と解析結果を図10に示す。益野二の橋の点検結果を用いて劣化のばらつきを考慮した結果、劣化予測 No. 1～No. 87(4.4倍～0.05倍)までを使用する。また、初期の管理レベルは五台山橋と同様に「4」として最適シナリオ解析を実施した。解析の結果、解析に用いた中で「最も劣化速度が速い劣化予測」(シナリオ No. 1)の補修シナリオは供用開始時に「表面被覆工法」を適用し、供用開始から52.1年目に劣化度が管理レベル4に達する。その時の補修工法は「表面被覆」+「断面修復工法」を適用しており、供用開始から72.1年目に「表面被覆」の効果が無くなるため、再度「表面被覆」を実施するシナリオとなっている。また、劣化速度が2番目以降のシナリオについてはシナリオ No. 2～No. 61まではシナリオ No. 1と同じ補修シナリオとなった。シナリオ No. 62～No. 70は供用開始から52.1年目までは、No. 1と同じシナリオをたどるが、供用開始から72.1年目は、供用期間中に管理レベル4に達しないため、「表面被覆」を実施しなくても良いシナリオとなっている。また、No. 71～No. 84については、供用開始52.1年目でひび割れが入っていない劣化状態であり、管理レベル3(ひび割れ限界)に達していない。よって、

シナリオ No. 71 は別途に最適シナリオ解析を実施することになる。最適シナリオ解析の結果、シナリオ No. 71 は供用開始時に「表面被覆工法」を適用することによりは無いが、供用開始から 73.2 年目に初めて管理レベル 4(剥落限界)に達する。その時の補修工法は「表面被覆」+「断面修復工法」を採用しており、その後の劣化度は管理レベルに達する前に供用期間である 100 年を迎える。なお、シナリオ No. 85~No. 87 は供用開始時に表面被覆を実施すれば供用 100 年の間に劣化度が管理レベルに達することはない。

シナリオNo.	1回目補修		2回目補修		3回目補修	
	供用年	補修工法	供用年	補修工法	供用年	補修工法
No. 1~No. 61	0	表面被覆	52.1	表面被覆 断面修復	72.1	表面被覆
No. 62~No. 70	0	表面被覆	52.1	表面被覆 断面修復	-	-
No. 71~No. 84	0	表面被覆	73.2	表面被覆 断面修復	-	-
No. 85~No. 87	0	表面被覆	-	-	-	-

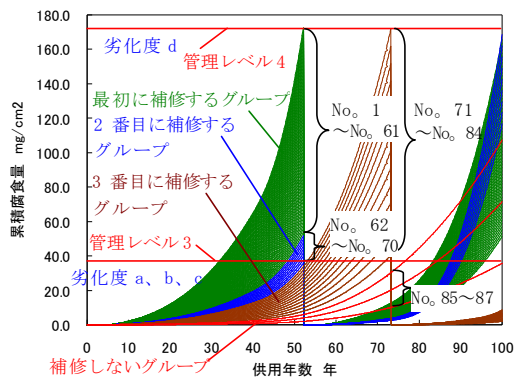


図 10 益野二の橋解析結果

(2) アセットマネジメントシステムのマクロスケール：マクロスケールは橋梁群全体に関わると共に維持管理予算のソリューションであり、予算管理者に必要な情報である。

解析例として、異なった予算制限において 3000 橋の架空コンクリート橋梁を管理する場合の補修費用と安全性のリスクを図 11 に示す。補修費用は橋梁の面積当たりに計算されるが、ここでは各橋梁も面積が 1m² 一律と仮定した。

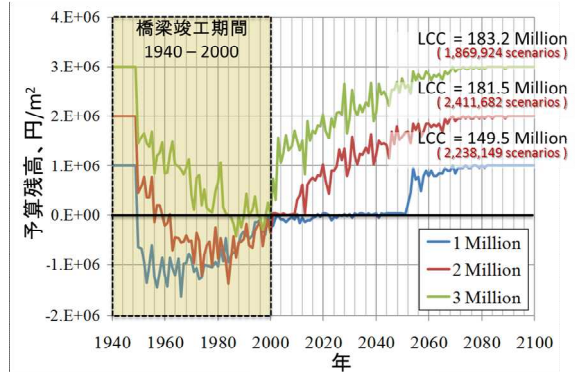


図 11 橋梁群を対象とした
予算残高の結果

橋梁は 6 つの変数によってランダムに作成した(竣工年: 1940 年-2000 年、管理レベル: 1-3、供用期間: 70-100 年、コンクリートかぶり: 30-100mm、w/c 比: 50%-60%、表面塩分濃度: 1.0-6.0kg/m³)。年毎の予算制限を 100、200、300 万円/m² と設定した。

年毎の予算 制限, 円/m ²	補修されてい ない橋梁	補修されるが、 良い状態を 維持できない 橋梁	管理レベル 以内に維持 できる橋梁
	100万	17%	13%
200万	2%	3%	95%
300万	0%	1%	99%

図 12 解析例：予算レベルと維持可能な
橋梁数の状態

予算が低すぎた場合は維持出来る橋梁の数も減る一方、予算設定が高すぎる場合は維持できる橋梁の数も増えるが活用されていない予算も残る。

(3) 飛来塩分測定

結果例として開発した測定装置を用いて高知県の太平洋に面した海岸沿いで測定を行った。海岸は砂浜であり、測定時の風速は 5-8m/s、波高は 1-1.2m 測定位置は海岸線から 30m の状況である。測定期間は感水紙上の粒子の染みの濃度によって決まる。この測定での測定期間は 30-80 秒である。この様な短い測定期間は測定結果と粒子の発生環境条件に結びつきやすく予測モデル化に適用し易い。図 13 は複数の測定ケースの海水粒子サイズの分布(1m の高さのみ)を示す。最小粒子サイズは約 20 μm まで測定可能である。

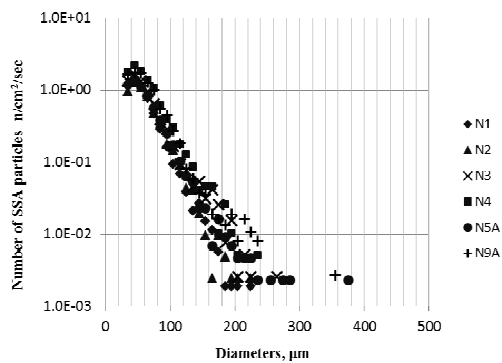


図 1.3 高さ 1 m における海水粒子の分布

図 1.4 は以上の測定結果より粒子の体積に塩分濃度を掛けて得られた高さ方向と塩分の流束を示す。このような情報はインフラ構造物の維持管理（劣化予測、保全計画）に必要不可欠である。

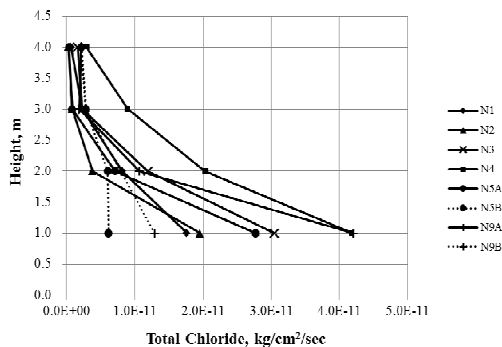


図 1.4 高さ方向の飛来塩量分布

(4) 鉄筋腐食モデル

実験結果から、定式化したコンクリート中の鉄筋腐食速度 $V=A[W/C]^{\alpha}[Cl^{-}]^{\beta}$ の係数 α と β を回帰分析により求めた。その結果、 $\alpha=0.96$ 、 $\beta=0.53$ となった。 $R=0.85$ であった。

鉄筋腐食速度の試験結果

	W/C=0.6	0.55	0.50	0.40
[Cl] = 1.2 kg/m ³	1.74E-05	1.87E-05	2.87E-05	1.60E-05
2.2 kg/m ³	3.65E-05	3.50E-05	2.53E-05	1.54E-05
3.2 kg/m ³	3.86E-05	3.92E-05	3.25E-05	2.52E-05
4.2 kg/m ³	3.91E-05	3.63E-05	4.31E-05	3.45E-05

【単位：g/mm²・day】

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 2 件)

- ① Nattakorn B.、Kokubo S.、Nasu S.、Measurement of Airborne Chloride Particle Sizes Distribution for

Infrastructures Maintenance, Journal of Society for Social Management System、査読あり、SMS11-9461、2011
http://management.kochi-tech.ac.jp/ssms_papers/sms11-9461_30873f1425def449186bac4256ac506b.pdf

- ② Nattakorn B.、Nasu S.、Development of Integrated Bridge Management System, Journal of Society for Social Management System、査読あり、SMS10-138、2010、
http://management.kochi-tech.ac.jp/ssms_papers/sms10_138%20SSMS2010%20nattakorn.pdf

[学会発表] (計 3 件)

- ① Nattakorn B.、Repair Scenarios Generation at Arbitrary Time in Bridge Maintenance、社会マネジメントシステム学会、2012 年 5 月 4 日、高雄 (台湾)
- ② Nasu S.、Measurement of Airborne Chloride Particle Sizes Distribution for Infrastructures Maintenance、社会マネジメントシステム学会、2011 年 9 月 15 日、コロンボ (スリランカ)
- ③ Nattakorn B.、Development of Integrated Bridge Management System、社会マネジメントシステム学会、2010 年 3 月 5 日、高知 (日本)

[その他]

招待講演

- ① Nattakorn B.、“橋梁全体の LCC 最小化を成す定期点検戦略”、コンクリート構造物の補修・補強に関するフォーラム、2011 年 7 月 26 日、高知新聞放送会館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

那須 清吾 (NASU Seigo)
 高知工科大学・経営学部・教授
 研究者番号：30373129

(2) 研究分担者

大内 雅博 (OUCHI Masahiro)
 高知工科大学・工学部・准教授
 研究者番号：80301125

ナタコーン ボンコッゲサクル (Nattakorn Bongochgetsakul)
 高知工科大学・社会マネジメントシステム研究センター・助教
 研究者番号：10436553