

◆特集：戦略的な道路構造物マネジメント◆

塩害を受けるコンクリート橋の維持管理手法に関する検討

古賀裕久* 渡辺博志** 中村英佑***

1. はじめに

塩害とは、コンクリート構造物の劣化原因の一つで、コンクリート中に大量の塩分（塩化物イオン）が含まれる場合に、鉄筋表面の不動態被膜が破壊され、構造物中の鉄筋が急速に腐食するものである。コンクリート橋の塩害は、劣化の速度が比較的速く、かつ、劣化が著しく進行した後では完全に補修することが難しいので、コンクリート橋の維持管理上、最も注意が必要な劣化原因の一つである（図-1）。

塩害を引き起こす塩分には、海からの飛来した塩分や凍結防止剤として散布された塩分など外部からもたらされたものと、砂や混和剤など、コンクリートの材料に含まれていた塩分がある。材料に含まれる塩分については、旧建設省の通達「コンクリート中の塩化物総量規制について」などにより、1987年以降は、レディーミクストコンクリート中の塩分量が受入れ検査時に測定されることになったため、その影響は小さくなっている。

一方、外部からもたらされる塩分については、新設橋梁では、構造物が建設される地域や海岸線からの距離を考慮して、最小かぶりを大きくするなどの対策が取られている。しかし、過去に建設されたコンクリート橋には、最新の道路橋示方書の規定よりもかぶりが小さく、塩害が生じるおそれがある橋梁もある。

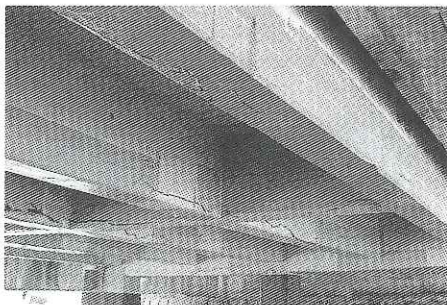


図-1 塩害による損傷の例

そこで、塩害を受ける可能性のある既存コンクリート橋を将来にわたって安全に利用するためには、適切な維持管理活動を行い、必要に応じて補修などの対策を早期に講じなければならない。

2. 塩害を受けるコンクリート橋の点検

土木学会のコンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹⁾では、塩害で劣化するコンクリート構造物の劣化進行過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4つの状態に分類して整理している（図-2）。

コンクリート橋の点検は、目視により橋梁の外観に現れた損傷を発見することを主体としている。しかし、塩害の場合、コンクリート橋の表面に腐食ひび割れなどの損傷が発生するのは、図-2の加速期に移る段階であり、ひび割れ箇所以外でも鉄筋の腐食が始まっているおそれがある。また、その後の対策が遅れると、劣化が急速に進行するおそれがある。

そこで、国土交通省では、塩害による劣化を早期に発見するため、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」（平成16年3月、以下、塩害特定点検（案）²⁾）を定め、コンクリート橋への塩分の侵入状況を定期的に点検することとしている。構造物マネジメント技術チームは、塩害特定点検（案）の作成に関わり、また塩害特定点検（案）で得られた点検結果の活用を検討しているので、本報では、その検討状況を報告する。

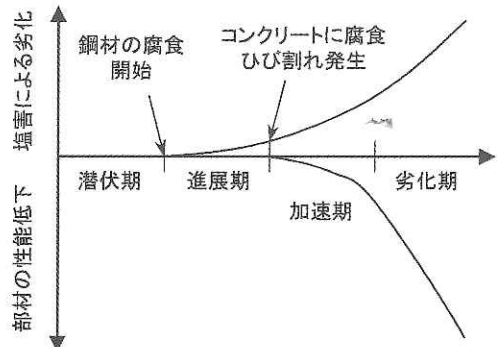


図-2 塩害による劣化進行過程¹⁾

A Study on the Maintenance Methods for Concrete Bridges Deteriorated by Salt Attack

3. 塩害を受けるコンクリート橋の点検・評価手法に関する検討

3.1 検討の概要

塩害に関するこれまでの研究の結果、外部からコンクリート中へ侵入する塩分の量や分布については、Fickの拡散方程式により、概ね予測できると考えられている。したがって、点検結果から橋梁に飛来する塩分の量やコンクリート中の塩分の拡散係数を明らかにすることで、将来の時点における塩分の分布状況が予想でき、塩分の影響による鉄筋の発錆時期を予測することができる。

しかし、実際には、試験結果の精度や理論と実際の現象との乖離などの問題があり、塩害によるコンクリート橋の劣化を正確に予測することは難しい。そこで、点検に基づく将来予測の精度を明らかにし、かつ精度の向上を図るため、①試料の採取方法、②点検箇所による調査結果の違い、③点検結果に基づく将来予測の精度について、過去の調査結果の整理や、新たな実験・調査により検討した。また、これらの検討結果を参考に、点検結果を用いた塩害を受けるコンクリート橋の簡易

評価システムの開発を行っている。

3.2 試料の採取法についての検討^{3),4)}

コンクリート中に侵入した塩分の量を調査する際には、分析に用いる試料を採取して試験を行う必要がある。この試料として、従来は、φ100mm程度のコアを採取することが多かった。しかし、点検のため定期的に試料を採取する必要があること、コンクリート橋の上部構造には鉄筋が密に配置されていること、PC構造物などコンクリートにプレストレスが導入されている場合があることなどを考慮すると、構造物に与える影響がより小さい方法で試料を採取できることが望ましい。そこで、ドリルを用いた試料採取法を検討した。しかし、試料の採取量を少なくすると、試料が調査箇所を適切に代表しないものとなり、試験結果に大きなばらつきが生じるおそれがある。

そこで、あらかじめ一定の塩分量を含むように調整したコンクリート供試体を作製し、試料の量や採取方法が試験結果の信頼性に与える影響を検討した。その結果、例えば以下の知見を得た。

- (1) 試料をコアとして採取した場合の試験結果と、ドリル微粉末として採取した場合の試験結果

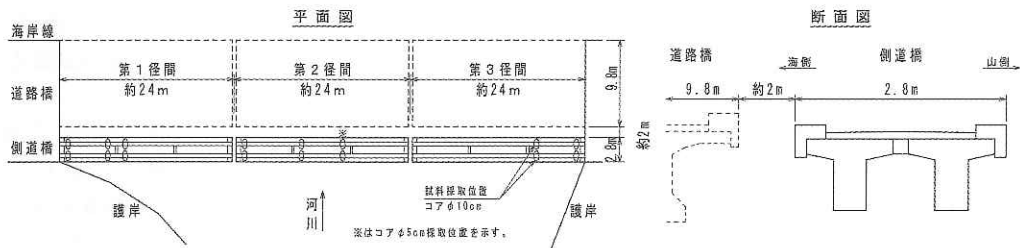
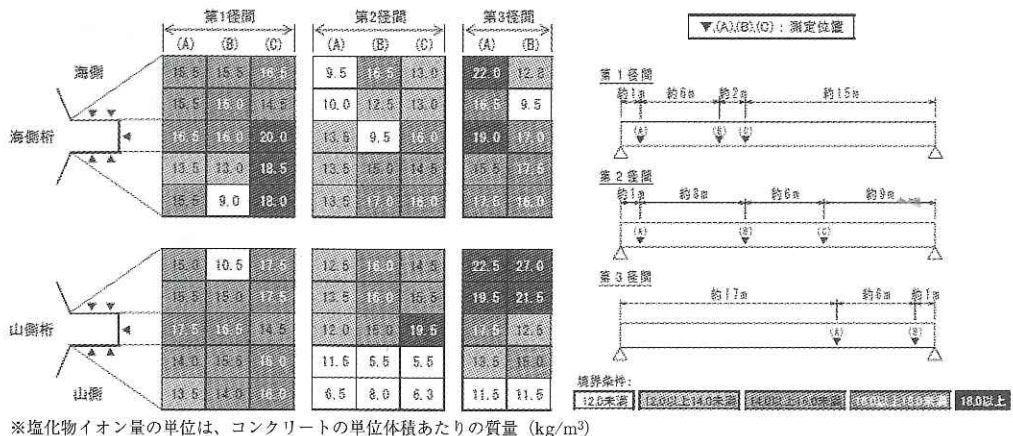


図-3 調査橋梁の概略図



※塩化物イオン量の単位は、コンクリートの単位体積あたりの質量 (kg/m³)

図-4 調査箇所による表面塩化物イオン量の違い

には、その平均値では、明確な違いが見られなかった。

- (2) 全塩化物イオン量の試験結果の誤差を変動係数として表すと、約100gのコア試料を分析した場合7%、約8gのドリル微粉末（ドリルで削孔した際に生じる微粉）13%であった。

なお、近年、試験方法としてJIS A 1154が定められ、1回の試験に用いる試料の量は10g程度とされている。この場合の試験結果の変動係数は、約8gのドリル微粉末を試験した場合（13%）と同じか、わずかに小さい程度になるものと考えられる。

3.3 点検箇所についての検討⁵⁾

飛来塩分などとして供給される塩分の量は、一つのコンクリート橋の範囲であっても、その位置により大きく異なりうる。そこで、16年間塩害環境で供用されたコンクリート橋から多数の試料を採取し、調査箇所による塩分の侵入量の違いを調べた。この橋梁はポストテンション方式3径間PC単純T桁（2主桁）の側道橋でコンクリート表面には変状が見られず、目視点検では比較的健全と評価される状態であったが、本線の道路橋の架替えにともない撤去されたものである（図-3）。

図-4に試料採取位置と試験結果から推定した表面塩化物イオン量の分布を示す。調査の結果、この橋梁では、風通しが比較的よい第2径間では表面塩化物イオン量が小さく、近くに護岸があったために風通しが悪かった第1径間で表面塩化物イオン量が比較的大きかった。一方、山側または海側など特定の面で表面塩分量が多い／少ないという傾向は見られなかった。

また、この橋梁では、試験結果から推定した塩化物イオンの見掛けの拡散係数にも、径間による大小が見られた。見掛けの拡散係数は、風通しがよい第2径間で大きい傾向があった。

なお、調査結果から鉄筋（かぶり70mm）の腐食が始まるまでの時間を推定すると、調査箇所によって竣工後22年～208年と大きな違いがあった。腐食開始までの時間には、表面塩化物イオン量よりも見掛けの拡散係数の大小が大きく影響を与えていた。

3.4 点検結果を用いた将来予測に関する検討

3.4.1 検討の概要

すでに述べたように、コンクリート中に外部から侵入した塩分の量や分布については、Fickの拡散方程式を用いて予想できる。しかし、この予想

の妥当性について、実構造物で検証された結果はほとんどない。この理由としては、硬化コンクリート中の塩化物イオン量の試験方法や試験結果に基づく将来予測方法が提案されたのが比較的最近であること、試験に費用がかかることから試験の実施が塩害による損傷が著しい橋梁に限られていたこと、このため調査後に補修がされるなどして新旧の調査結果を比較することができなくなっている場合が多いこと、などが挙げられる。

今回、土木研究所で所有する、塩害を受けた橋梁の点検・調査結果を精査した結果、複数の調査年にわたってコンクリート中の塩化物イオン量の試験結果が残っている橋梁は7橋しかなかった。ここでは、比較的多くの情報が残されていた、2橋の調査結果を簡単に紹介する。また、これら7橋とは別に、塩害を受けたコンクリート橋の災害復旧のための撤去に伴い、過去に塩化物イオン量の試験が行われた下部構造の調査を行う機会を得たのでその結果を報告する。

3.4.2 旧A橋・旧B橋調査結果を用いた将来予測精度の検証

旧A橋、旧B橋は1964年竣工のポストテンション方式PC単純桁橋（T桁、I桁）で、日本海に面する海岸線に位置していた。これらの橋梁では、1980年と1991年に塩化物イオン量の試験が行われている。

旧A橋の試験結果のうち、同一の桁から試料を採取したと見られるデータを図-5に示す。また、旧B橋の試験結果のうち、同一の桁から試料を採取したと見られるデータを図-6に示す。

旧A橋の二回の試験で得られた結果には、関係は認められなかった。1991年の試験結果は、1980年の試験結果や試験結果から推定される1991年時点の塩分分布と比較して著しく塩化物イオン量が小さく、補修された箇所を対象としている可能性もある。しかし、現存する資料からは、試料採取位置を特定することはできず、この点を確認することはできなかった。

旧B橋についても、1980年の試験結果から1991年の状況を予想することは難しい。この理由としては、旧A橋と同様、補修の影響や、調査位置による塩分進入状況の違いが考えられるが明確ではなかった。

コンクリート橋に侵入する塩化物イオンの将来予測を行う場合、定期的に部材から試料を採取して塩化物イオンの径時変化を追跡することが、そ

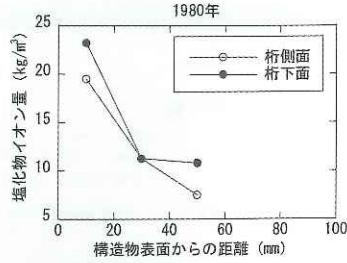


図-5 旧A橋調査結果

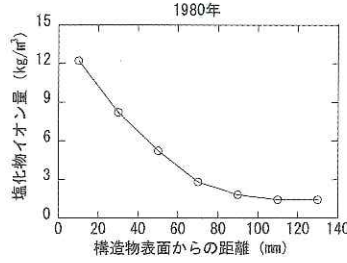


図-6 旧B橋調査結果

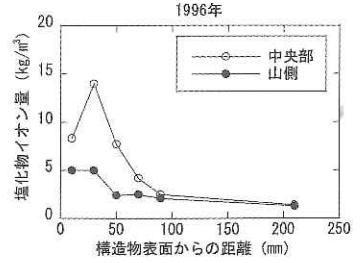
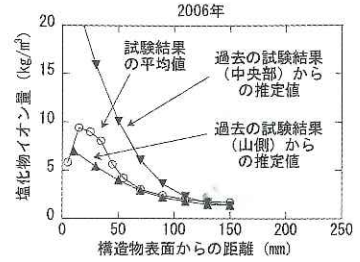
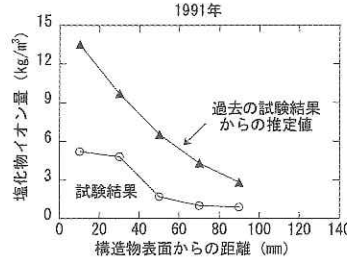
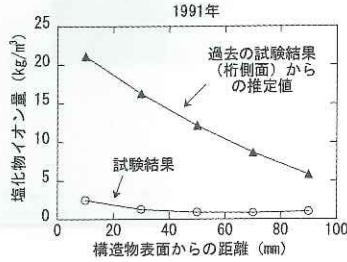


図-7 旧C橋調査結果



の予測精度を向上する上で重要である。しかし、旧A橋や旧B橋の例を見ても分かる通り、過去の調査位置を厳密に特定できない場合には、試験結果を適切に評価することは不可能である。塩化物イオンの測定結果をデータベースとして残し、将来予測に役立てようとする場合は、どの部材(桁)から採取したというだけでなく、正確な採取位置を図面上に記した資料も合わせて保存しなければならないものと考えられる。

3.4.3 旧C橋調査結果を用いた将来予測精度の検証

旧C橋は1975年に架設された橋梁で、太平洋に面する海岸線に位置していた。上部構造は、塩害のため、複数回にわたる補修・補強を受けていたが、下部構造については、特別な補修が実施されておらず、過去の調査結果(1998年ごろと推定)も残されていた。そこで、この橋梁が災害復旧のため撤去されるのを機に2006年に調査を行った。調査箇所は、二回の調査ともP3橋脚のはり部である。塩化物イオン量の試験結果を図-7に示す。なお、2006年の調査では、1996年の調査における中央部および山側のコアが採取された位置のなかほどにあたる約1.2m×0.3mの範囲で7本のコアを採取した。図-7にはその平均値を示した。

1996年の調査では、同一の橋脚のはり部でも、中央部と山側で塩化物イオン量の試験結果に大きな違いがあった。2006年に試験を行った結果は、この二カ所の調査結果から予想される塩化物イオン量の中間に位置していた。

表-1 点検結果から推定された表面塩化物イオン量及び見掛けの拡散係数

推定項目	1996年		2006年
	中央部	山側	1996年調査箇所の中間
表面塩化物イオン量 (kg/m ³)	25.5	6.7	9.5~22
見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	0.45	0.6	0.18~0.6

なお、個々のコアの試験結果から表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数を算出すると表-1のようになった。表面塩化物イオン量に関しては、調査時期の違いによる変化は認められなかったが、見掛けの拡散係数は、2006年の調査結果の方が1996年の調査結果と比較すると小さくなっている場合が多く、その平均値では約0.32cm²/年、標準偏差は0.14cm²/年であった。

3.4.4 将来予測に関する検討結果のまとめ

Fickの拡散方程式を用いた将来予測の信頼性を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 今回検討した3橋のうち2橋では、過去の試験結果から推定される塩化物イオン量と、実際に試験によって確かめられた値が大きく異なっていた。この理由として、試料採取箇所が大きく離れていた可能性がある。しかし、試料採取位置の記録が残されていない場合が多く、明確にはできなかった。

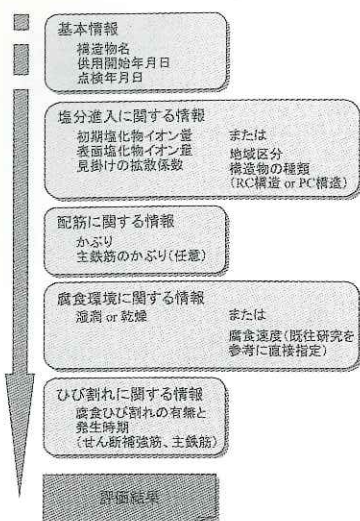


図-8 評価に用いる項目

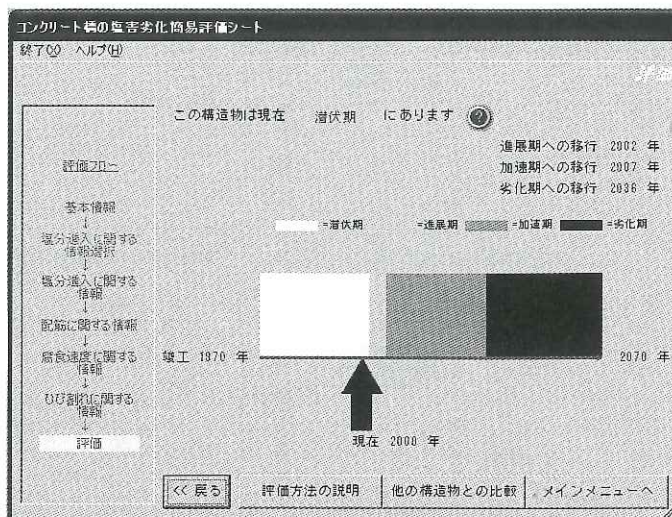


図-9 評価結果の表示例

(2) 調査結果を比較すると、ほぼ全ての場合で、時間の経過と共に見掛けの拡散係数が低下していた。このことから、ある時点での点検結果から算出した見掛けの拡散係数を用いて、Fickの拡散方程式を用いた将来予測を行うと、実際よりも安全側の(塩分が多く侵入するとする)予測結果が得られるものと考えられる。

3.5 点検結果を用いた塩害を受けるコンクリート橋の簡易評価システムの開発

3.2~3.4節の検討で整理したように、外部から侵入する塩分の量や分布の将来予測の精度は、必ずしも高くない。しかし、塩害を受けるコンクリート橋の損傷を点検し、点検結果に基づいて推定した劣化度や路線の重要度等に応じて優先度の高い橋から補修補強をするといった戦略的な維持管理を実施していくためには、何らかの手法で点検結果を客観的に評価する必要がある。そこで、道路橋に関するこれまでの検討結果や土木学会のコンクリート標準示方書[維持管理編]⁶⁾を参考に、塩害特定点検(案)による点検結果を活用する簡易評価システムを開発している。

この簡易評価システムによる評価を行う際の入力項目は、図-8の通りである。必ずしもこれらの全てが評価に必要なものではなく、点検結果の有無に応じて入力項目を選択することになっている。

評価の結果としては、①構造物が現状で、コンクリート標準示方書に示された四つの劣化進行過程(潜伏期、進展期、加速期、劣化期)のいずれ

に該当するか判定した結果、②構造物が次の劣化過程に移行する時期を推定した結果を示すことにしている(図-9)。

この簡易評価システムは、現在も開発中であるが、この作業を通じて、次章に示す課題が明らかになった。

4. 今後の検討課題

4.1 鉄筋の腐食速度

構造物の外部から侵入する塩分の量や分布についてはこれまでも数多くの研究が行われ、鉄筋が腐食するまでの期間を推定できるようになっている。しかし、鉄筋の腐食が始まった直後(図-2で潜伏期から進展期以降の直後)であれば、まだ、部材としての耐荷性能には影響が生じていない段階にある。腐食開始後の劣化の進行を予測するためには、鉄筋の腐食速度を推定する必要がある。しかし、現状では、鉄筋の腐食速度を推定する手法は確立されていない。

塩害による鉄筋の腐食速度に関する検討事例として、我が国では、森永⁷⁾や仁村ら⁸⁾の研究がある。これらの検討では、塩化物イオンの濃度、コンクリートの水セメント比、鉄筋のかぶり、鉄筋径(森永のみ)から腐食速度を求める方法が提案されている。一方、海外における検討では、コンクリート中の相対湿度の変化によって、腐食速度が100倍以上も異なるとしたものもある⁹⁾。今後、種々の要因が腐食速度に与える影響を整理し、塩害を受けた構造物の腐食速度を適切に評価する

方法が求められる。

4.2 ひび割れの影響

かぶりコンクリート部に腐食ひび割れが生じると、鉄筋の腐食に必要な水や酸素が供給されやすくなり、図-2に見られるように塩害による部材の性能低下が急速に進むおそれがあると考えられている。また、コンクリート構造物には、乾燥収縮や水和熱に起因するひび割れや、荷重作用によるひび割れが生じうるが、これらのひび割れから塩分などの劣化因子が侵入するおそれもある。

コンクリートのひび割れは、目視で比較的容易に調査することができるため、これを用いたコンクリート橋の評価方法もいくつか提案されている。しかし、ひび割れが耐久性に与える影響についての既往の検討結果を見ると、影響があるとする報告とないとする報告の双方があり¹⁰⁾、全ての場合で、ひび割れが耐久性に影響を与えるとは考えにくい。今後、橋梁の点検結果などをさらに蓄積し、耐久性に影響のあるひび割れとそうでないものを評価する方法を確立することが求められる。

5. まとめ

本報では、塩害を受けるコンクリート橋の点検・評価手法を確立するために行っている①塩化物イオン量の試験に用いる試料の採取方法に関する検討、②点検箇所についての検討、③点検結果を用いた将来予測の信頼性に関する検討、④点検結果を活用した簡易評価システムの開発について紹介した。また、これらの検討によって明らかになった今後の研究課題を示した。

この報告が、塩害を受けた構造物の点検・調査・補修などの維持管理を行う際に、少しでも参考になれば幸いです。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p.99、平成13年1月
- 2) 国土交通省：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領 (案)、平成16年4月
- 3) 古賀裕久、松浦誠司、渡辺博志：コンクリート中の塩化物イオン量測定の見誤差について、土木技術資料、47巻、2号、pp.58-63、平成17年2月
- 4) 渡辺博志、古賀裕久、松浦誠司、小松原健：コンクリート中の塩化物イオン量測定の見誤差に関する検討、土木研究所資料、第3987号、平成17年11月
- 5) 小松原健、渡辺博志、古賀裕久、中村英佑：塩害を受けたコンクリート構造物の塩化物イオン量の分布状況、Vol.28, No.1, pp.2051-2056、平成18年6月
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，pp.97-112、平成13年1月
- 7) 森 永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究、東京大学学位論文、昭和61年
- 8) 仁杉 巖、廣田良輔、鳥取誠一、宮本征夫、稲葉紀明、朝倉俊宏：鉄道土木構造物の耐久性、山海堂、平成14年7月
- 9) Tuuti, K. : Corrosion of steel in concrete, CBI Forskning, Reseach report Fo 4.82, Stockholm, Swedish cement and concrete research institute, 1982
- 10) 今本啓一：ひび割れ幅の許容値、コンクリート工学、Vol. No.5, pp.67-74、平成17年5月

古賀裕久*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部構造物
マネジメント技術チーム主任研
究員
Hirohisa KOGA

渡辺博志**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部構造物
マネジメント技術チーム主席研
究員
Hiroshi WATANABE

中村英佑***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部構造物
マネジメント技術チーム研究員
Eisuke NAKAMURA