

我が国のコンクリート技術の特徴と課題

渡辺博志*

1. はじめに

コンクリートはセメントの製造技術が江戸時代末期に海外より技術導入されて以降、主要な建設材料として現在も多く、多くの構造物に使用されている。その間、コンクリートに関する多くの技術が日本においても開発され現在に至っている。本稿では、コンクリート技術の分野において、海外と比較した日本の技術開発の特徴をまとめるとともに、今後に向けての検討課題について述べることにする。

2. コンクリート技術の面から見た日本の技術開発の特徴

コンクリートに求められる性能は非常に多岐にわたり、技術開発の方向もさまざまである。コンクリート構造物の耐久性向上、施工の省力化、高強度化による適用性の拡大などは、さしずめ全世界において共通したテーマであるが、個別の研究ターゲットとなると各国の独自性が見受けられる。この独自性は、気候条件や社会的ニーズなどが反映された結果である。すなわち、我が国において発展してきたコンクリート技術の特徴について他国との比較を行う際、まずは、コンクリートの側面から見た環境条件や社会的な条件についての日本の特徴をふまえておく必要があると感じる。

2.1 立地条件の側面

日本は北海道から沖縄まで気候の変化に富んでおり、また周囲を海洋に取り囲まれている関係から、厳しい塩害環境に置かれるとともに、凍害による損傷対策も重要となる場所である。また、世界で有数の地震国であり、コンクリート構造物の設計においても、大きな地震荷重を見込むことが一般的である。

2.1.1 骨材事情

コンクリート材料の基本である骨材事情について言えば、堆積岩や火成岩など多種多様の資源を用いられる状況にある。このことは、一方でアル

カリ骨材反応を生じる骨材が広く分布することにもつながっている。このように、日本のコンクリート構造物は、環境条件への配慮みならず、耐久性の確保のためにはコンクリート材料の配合や材料の選定、ひいては厳密な施工管理など、多くの技術的な検討が必要な状況に置かれていることが分かる。

骨材事情の変遷について統計データによると、図-1¹⁾に示すように川砂利から砕石にその主役が移行している。今後、良好な骨材資源がそのまま利用可能である保証はなく、特に自然環境の保護の観点からは、骨材品質規格の見直しや、再生骨材、スラグ骨材などの産業副産物起源骨材の有効活用が求められるところであり、その方面の調査研究が活発になってきている。

2.1.2 コンクリート構造物の耐震性能

鉄筋コンクリート部材の耐震性の確保のためには、部材の変形性能やせん断耐力を正確に評価する技術が必須となる。これらの評価技術についても日本の技術レベルはトップクラスのものとなっている。耐震性能を向上させるには、帯鉄筋の配筋量の増加が伴うが、これは一方で配筋の施工が困難となりやすい。中間帯鉄筋によるコアコンクリートの拘束効果を確実に発揮することが重要となるが、このためには中間帯鉄筋の端部定着を確実に行わなければならない、施工上のネックとなることが多い。近年、さまざまな定着方法を工夫した鉄筋が開発され、施工性が改善されてきた。これらの技術も我が国独自に発達してきたものであり、耐震性が求められるコンクリート構造物の建設の合理化に寄与するものであろう。

2.1.3 塩害対策

コンクリート構造物の塩害のように、環境条件に起因する深刻な劣化に対して耐久性を確保しようとした場合、環境条件の定量的な情報すなわち飛来塩分量の把握が必要となる。飛来塩分量を定量的に把握することにより、塩害に対する耐久性設計の道が開けるようになる。この点については、これまでも土研で観測が実施され、飛来塩分量

Current Research and Development on concrete technology in Japan

骨材供給構造の推移

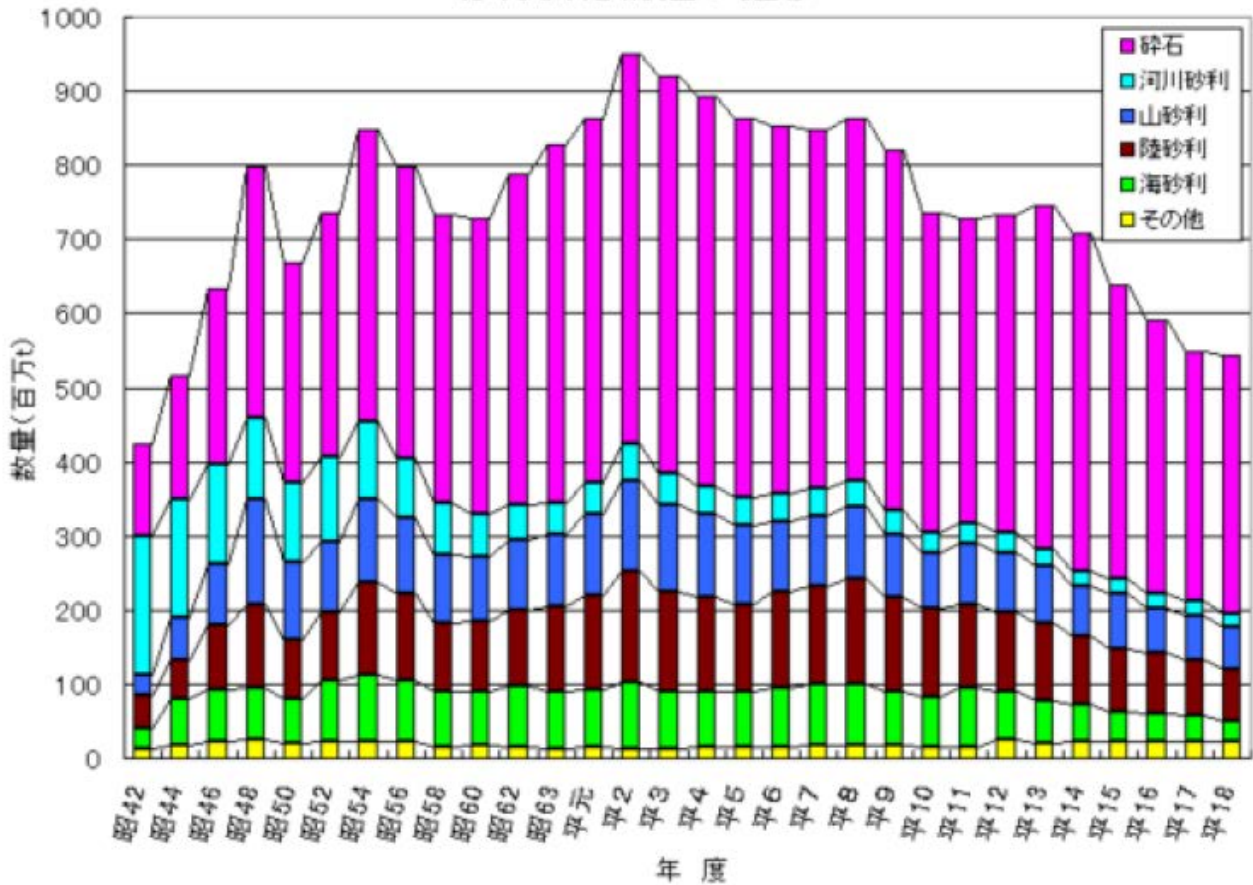


図-1 骨材供給量の変遷¹⁾

の測定技術の確立とその測定結果をまとめたデータの蓄積が行われた。その結果に基づき塩害対策を講じる上での地域区分の設定が示されている。このような環境外力の定量化手法および設計への反映手法は他国の参考になるものであろう。

2.2 社会的ニーズから見た側面

社会的ニーズにより技術開発の方向性も大きく左右されることになる。ここでは、①環境問題、特にリサイクル、②既設コンクリート構造物の維持管理、③コンクリートの品質検査、に関わる日本の技術開発の特徴について述べることにする。

2.2.1 リサイクル

環境問題に対する社会的な関心の高まりに応じて、コンクリートに関する技術開発にも新たな要素が加わることとなった。その一つが環境の面であり、廃棄物の有効活用やコンクリート廃材のリサイクル技術が注目を集めている。コンクリート廃材はこれまで主として路盤材として再利用がなされてきたが、今後はコンクリート用骨材への利

用も積極的に取り組むべき課題となる。

より高品質な再生骨材を得るため、加熱すりもみ法などの製造方法の検討が進められている。良質な再生骨材は、当然これを用いたコンクリートの品質も良好であるが、このような高品質の再生骨材を製造するためには、骨材に付着したセメントペーストやモルタルの除去が必要となる。このため、ペーストなどの除去に要するコストやエネルギーが増大するとともに、再生骨材製造時に発生する微粉の増大を招き、その処理のための負担がかかることにもつながる。

従って、再生骨材の活用を図るためには、良質な再生骨材の製造技術のみならず、品質は多少劣るものの簡易に製造可能な再生骨材の活用方法・規準も合わせて整備する必要がある。このような趣旨に則り、利用技術規準類の整備も進展しており、再生骨材Hについては近日中にJIS A 5308レディーミクストコンクリートに組み込まれるとともに、再生骨材M,Lについてもそれぞれを用いた

表-1 再生骨材の品質

項目	再生骨材H		再生骨材M		再生骨材L	
	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材
絶乾密度(g/cm ³)	2.5以上	2.5以上	2.3以上	2.2以上	測定結果を報告	
吸水率(%)	3.0以下	3.5以下	5.0以下	7.0以下	7.0以下	13.0以下
すりへり減量(%)*)	35以下	—	—	—	—	—
微粒分量(%)	1.0以下	7.0以下	1.5以下	7.0以下	2.0以下	10.0以下
不純物量**)	各種上限値規定		各種上限値規定		—	
粒形判定実積率(%)	55以上	53以上	55以上	53以上	—	
備考	JIS A 5021 コンクリート用再生骨材H		JIS A 5022 再生骨材Mを用いたコンクリート		JIS A 5023 再生骨材Lを用いたコンクリート	

注：*) 再生粗骨材Hのすりへり減量は舗装版に用いる場合に適用する。

**）不純物はA（タイル、れんが等）～F（木片、紙くずなど）の6分類について規定

コンクリートとしてのJIS化がなされた。ここで表-1は再生骨材の品質を示したものである。再生骨材の品質としては、L、M、Hの順に高く設定されている。ここで、再生骨材Hは天然骨材とほぼ遜色のない程度まで品質が高められたものであり、一般の生コンクリートとして汎用的に使用されることが想定されているため、骨材としてのJIS規格化がなされている。これに対し、再生骨材MLについては、これを用いたコンクリートの性能上、例えば凍結融解作用が必ずしも要求されない箇所への利用など、その用途が限定されるものであることから、コンクリートとしての規格化がなされたものである。

上記の通り、再生骨材について、その品質の区分と用途に対して柔軟な規格化をおこない、その活用を進める方針は我が国独自のものである。これ以外にも、例えば焼却灰を活用したエコセメントについてもJIS化にまでこぎ着け、実用化を達成している。

2.2.2 維持管理

既設コンクリート構造物の維持管理の合理化も社会的なニーズが高いものである。コンクリート構造物の維持管理に関する技術開発としては、例えば電気防食・脱塩など電気化学的な補修工法の実用化、外ケーブルによる補強技術などが挙げられる。また、コンクリート中の鉄筋腐食に関する非破壊検査、モニタリング技術なども高度化されつつある。その他、既設コンクリート構造物の点検の合理化に向けたものとして、ひび割れのデジ

タル画像による記録解析技術、赤外線サーモグラフィによる剥離調査などは、我が国の技術レベルが高い分野であると考えられる。

近年では簡易点検手法に関する我が国独自の技術として、近赤外分光法²⁾や電磁誘導法³⁾といった非破壊によりコンクリート構造物に含まれる塩化物イオンを把握する技術が開発されつつある。これまでは、既設コンクリート構造物中の塩化物イオン量の測定は、コンクリート構造物から採取した試料を化学分析することにより実施されており、費用ならびに労力が多大に要するものであった。これらの非破壊手法による技術が実用化すれば、塩害が懸念される構造物の点検の省力化やコスト削減に大きく寄与するものであると考えられる。

2.2.3 材料ならびに施工に関する品質検査

コンクリート構造物の品質は、使用材料の選定ならびに配合の管理状況、および施工の良否が大きな鍵を握ることとなる⁴⁾。コンクリートの品質検査は、これらが適切に実施されていることを証明するものであり、とりわけ粗漏工事を防止し品質確保を目指すうえで、品質検査の果たす役割は大きい。

コンクリート材料の品質に関する品質検査は通常打ち込み前にはスランプ試験・空気量試験が実施されてきた。また、初期塩化物イオンの混入に起因した塩害による早期劣化の抑止対策として、原着コンクリートの塩化物イオンの測定が昭和60年代から実施されるようになった。

スランプ試験はコンクリートの施工性の評価だけでなく、練り上がりコンクリート中に含まれる水量が適切であることを検査する役割も併せ持ったものである。しかしスランプ試験に測定誤差がつきまとうことや、各種混和材料の普及にともない、これのみでは正確な単位水量を把握することが不可能である。このため、コンクリートの品質検査の一項目として、単位水量の測定方法の開発が行われ、現在では多くの工事において品質検査のための試験として運用されている。

また、施工後のコンクリートについて非破壊・微破壊試験による強度確認や、かぶり検査が実施されようとしている。

これらの品質検査手法の充実、生コンの加水問題など施工上の不適切な事実が認められたことに端を発したものではあるが、少なくとも新たに構築されるコンクリート構造物の品質に対する信頼性の向上に大きく寄与している。

生コンクリートの国際規格であるISO22965および現在最終ドラフト案がまとめられているコンクリート施工に関するISO/WD22966においても、このような品質に対する透明性確保のための具体策を示すには至っていない。コンクリートの品質検査のための試験方法や検査体系は、いずれも日本で独自に開発されてきたものであり、今後海外にも情報発信する価値が十分あるものと考えられる。

3. 今後の課題

近年、コンクリート構造物の設計においても、性能照査型の設計体系が強く意識されるようになってきている。すなわち、コンクリート構造物に要求される性能を明確に設定し、要求性能を満足することを直接的に照査・検証する手法に移行してきている。

コンクリート構造物の品質は、施工の良否にも大きく依存する。このため、施工品質を中間技術検査や完了検査等によって確認する取り組みが導入されようとしている。当然、このような綿密な施工検査が実施されている構造物では、コンクリートの品質に対する信頼性が高いものとなっている。

このような背景のもとで、技術の現状に対する課題がいくつか浮かび上がる。例えば、性能照査

について言えば、コンクリートに対する要求性能として、圧縮強度があまりに強調される余り、それ以外の性能に対して余り目が向けられてこなかったことが反省としてあげられる。

また、施工に関連する点として、施工の品質の定量的な評価と、設計との調和が十分配慮されてこなかった事が挙げられよう。

いずれにしても、コンクリート分野の個別要素技術の開発とともに新技術を活用するためのシステムや規準の整備も重要なところである。例えば、図-2に示すとおり、欧州規格では、コンクリート材料から設計、補修に関する総合的な規格類が整備されつつあり、これらは今後ウイーン協定に基づき近い将来ISOに導入されることも予想される。個別要素技術については我が国の優位性が認められるものの、総合的な体系化についてはやや立ち遅れの観がないわけでもなく、海外EU規格やISO規格の整備状況もふまえ、今後必要となる研究課題について触れてみたい。

3.1 コンクリートの要求性能の多様化と設計技術の高度化への対応

圧縮強度は、コンクリートに要求される性能の基本であることは事実であるが、余程の低強度ではない限り鉄筋コンクリート部材の終局耐力に大きな影響を及ぼすものではない。これは、主引張鉄筋量はつり合い鉄筋比以下であり、部材の曲げ耐力は鉄筋量に支配されるためである。大きな軸力が作用する柱部材や常時圧縮応力度が作用するプレストレストコンクリート部材を除くと、コンクリートの圧縮強度はクリティカルにはなり得ない。強度面よりむしろ、塩分浸透性や透気性・透水性が小さくなることにより、耐久性の向上を実現できる点に着目すべきであると考えられる。

ところが、コンクリートの塩分浸透性や透水性を短期に測定する技術が十分に発達していないため、圧縮強度を代替指標として頼っている現状である。もし、コンクリートの耐久性に直結する指標を簡易かつ短期に測定する技術が実用化できれば、例えば”塩害地域向け100年コンクリート”といったように直接耐久性を指定することが可能となる。実際、生コンクリートの品質に関する海外規格をみると、例えば前述のISO22965では、強度だけではなく耐久性にも着目した思想が見え始めている。

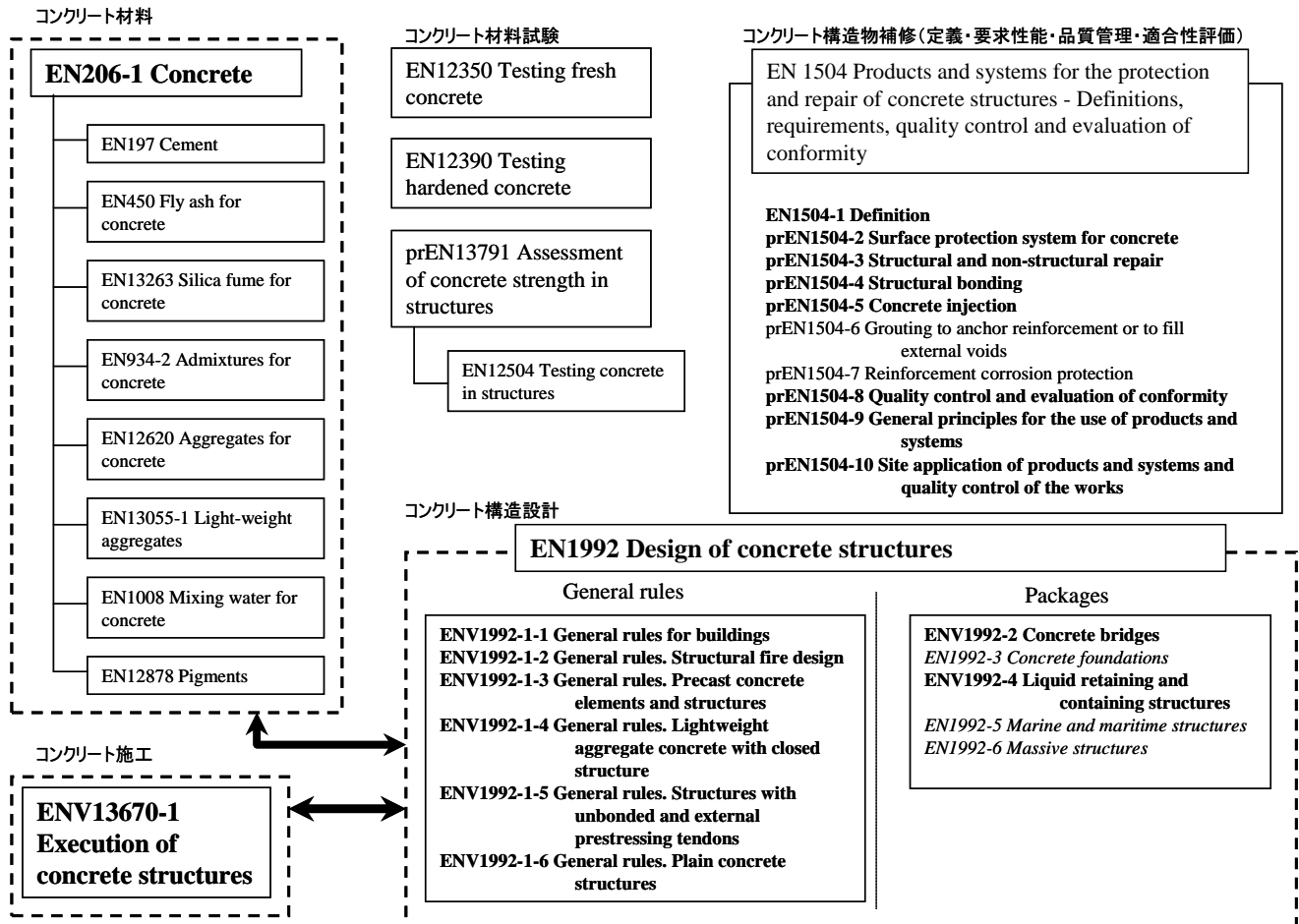


図-2 コンクリートに関連するEN規格(2004年調査時点)

また、近年コンクリートの収縮によるひび割れの発生が何かと話題になっている状況にある。2007年の土木学会コンクリート標準示方書の改定において、コンクリートの収縮ひずみについて800 μ m/mを標準として設定されてきたものが、従来特に測定を行わない場合には、その1.5倍の1200 μ m/mに改められたことは記憶に新しい。ひび割れ発生リスクの低減を出来るだけ優先したい場合では、コンクリートの圧縮強度よりはむしろ収縮量を性能の指標として設定することもあり得る。ただし、この場合に重要なことは、長期にわたって進行するコンクリートの収縮ひずみについて、短期間に推定可能もしくは、最大収縮量を担保しうる技術を確立しておかなければ、収縮量を性能として設定することの実効性が伴わない。コンクリートの収縮量の短期予測技術については、研究の緒についたばかりであり、今後の実現が待ち望まれるところである。

3.2 施工の信頼性と設計条件

一方、構築される構造物の重要度や信頼性に対する要求レベルに応じて、施工品質管理体制を設計の前提条件として定める手法も有ろう。例えば構造物の設計に関わる一般原則を定めた欧州規格EN1990:2002の附属書では、構造物の重要度に応じて施工時のチェック体制を定め、構造物の信頼性を確保する手法を採用している。

これらは、見かけ上表裏の関係にあるが、コンクリートの施工に関わる品質管理・検査の程度は、当該構造物の設計条件とリンクしているものとする考え方は共通している。

ここで求められる課題は、品質管理・検査体制の優劣を、信頼性指標ひいては部分係数や構造物係数などの定量的な指標としていかに表現するかどうかであろう。これが実現できれば、ともすれば施工時の負担の増加として余り歓迎されない品質管理・検査作業の増加に対するモチベーションも付与することができ、ひいては円滑な普及にもつな

がるものと考えられる。

3.3 補修材料に関する性能の明確化と性能の検証方法

近い将来、既設の構造物について補修を必要とする事例が一層増えるであろうことは想像に難くない。コンクリート構造物について言えば、断面修復による補修の頻度が増加すると思われる。

断面修復に用いられる材料は、ポリマー系材料を混和したセメントモルタルや表面含浸材など、非常に多種にわたる。

ところが、我が国においては、これらの補修用材料について、材料に要求される性能の整理や、その性能を評価するための試験方法が十分に確立していない状況にある。土木学会から2003年に断面修復材料の試験規格が提案されたが、例えばコンクリートの補修に関する欧州規格EN1504と比べると、補修の用途に応じた必要性能の明確化の点で今後改善の余地が残されていると考えられる。

例えば乾湿や温冷・凍結融解といった環境作用が繰り返す状況での剥離抵抗性の評価や、電気的性質・酸素透過性・透湿性など補修部の鉄筋の腐食防止に関わる性能など、補修を施した構造物の耐久性を確保する上で必要となる各性能指標の設定について十分な検討が必要となる。また、補修を適用する部位について、単にかぶりコンクリートの増厚を目指したものか、あるいはかぶりの増加だけではなく補修部位にプレストレスを導入するなど、構造的な性能も要求するのによっても補修材料に要求される性能は異なったものとなる。いずれにしても適切な補修材料の選定や補修設計の高度化に向けて、補修原理に基づき修復材料の要求性能の明確化と検証法の確立は重要な課題であると考えられる。

3.4 損傷を生じたコンクリート構造物の状態の定量的な評価技術

3.3と同様、維持管理に関わるテーマであるが、何らかの損傷を生じたコンクリート構造物の耐荷性能などの状態を定量的に評価する技術が今後重要度を増すものと思われる。数年前に、アルカリ骨材反応の影響により鉄筋が破断するに至った事例が発見され、改めて損傷を生じた構造物の耐荷性能の検証の重要性が認識された。

このテーマについては、海外でも十分な研究がなされておらず、適切な指針類が整備されていない状況にある。

4. まとめ

2007年フランスにおいて過酷環境下のコンクリートの挙動に関する第5回国際会議が開催された。会議報告⁵⁾にも有るとおり約40カ国からの参加があり、200編の論文発表がなされた。このうち、日本人研究者が著者に名前を連ねている論文は35編にのぼる。この分野における日本の研究活動がいかにか活発であるかを裏付けるとともに、今後この分野において日本がオピニオンリーダーの役割を果たしてゆくことになるとと思われる。しかし、一方では各種規準類の整備を急ぐ必要もあり、さらなる研究の進展と知見の集積が求められる。

参考文献

- 1) 日本砕石協会ホームページ：
<http://www.saiseiki.or.jp/kotsujukyu.html>
- 2) 石川幸宏、金田尚志、魚本健人、矢島哲司：近赤外分光イメージングによるコンクリート中の塩分の定量化に関する提案、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.28、2006
- 3) 溝渕利明、林大介、須田久美子、横関康祐：電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定法の実構造物への適用性に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.26、2004
- 4) 古賀裕久、河野広隆、渡辺博志：コンクリート構造物の健全度に関する実態調査結果、土木技術資料、Vol.42、No.12、2000
- 5) 古賀裕久：過酷環境下のコンクリートの挙動に関する第5回国際会議参加報告、土木技術資料、Vol.49、No.4、2007

渡辺博志*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループ基礎材料
チーム上席研究員、工博
Dr. Hiroshi WATANABE