

コンクリートの耐久性向上に関する研究

研究第二部 主任研究員 三井健司

はじめに

コンクリートは、住宅・社会資本を形成する主要な資材であり、コンクリート構造物のストック量は膨大なものになっている。

コンクリート構造物の品質は、設計、セメントや骨材などの材料、さらには施工や外的環境の影響を受けて変化する。このため、同一構造物内でも品質レベルに差がでる性状を有している。このような性状を克服して要求性能を満足するために、その材料、施工方法、構造に関する規格・基準類が整備され、監督・検査等により品質が確認されてきた。

しかし、平成11年に起きた山陽新幹線トンネルのコンクリート剥落事故に端を発し、近年、コンクリート構造物の品質について信頼性を損ねかねない事例が発生しており、従前以上に適切な建設・維持管理を行い、コンクリート構造物の耐久性向上を図ることが求められている。一方、コンクリート標準示方書の性能規定化等、品質向上に関する新たな取り組みがなされ、これらの成果を構造物の建設・維持管理に反映させていくことが求められている。コンクリート構造物の耐久性を向上させることは、劣化による剥落被害を防止するのに有効なだけでなく、ライフサイクルを通じた費用の最少化、ひいては社会コストの最小化と便益の最大化のため重要なことである。

このような状況を背景に、JICEでは改めてコンクリート構造物の耐久性を維持・向上させる観点から、構造物の建設システム及び維持管理の今後のあり方について検討を行った。検討にあたり、コンクリート構造物の現状把握を行うため、先ず既設コンクリート構造物の耐久性に関する実態調査を行うとともに、環境条件や製作年度と健全度の関係等について分析を行い、コンクリート構造物の耐久性向上に関する提言を取りまとめた。また、提言に対するフォローアップとして、水セメント比の規定等の技術基準についての検討を行った。

調査概要

1 調査方法

既設コンクリート構造物の実態調査は、建設省、運輸省、農林水産省の3省合同調査として実施した。対象とした構造物は、全国の橋梁上部工、橋梁下部工、高架橋、擁壁、カルバート、河川構造物、トンネルの6種類である。最初に2645件の構造物について基本調査を行い、その結果に基づき、北海道、沖縄および各建設局のブロックごとに比較のコア抜きが容易な橋梁下部工、擁壁、カルバート、河川構造物を対象（鉄道関係においては高架橋とトンネルについても対象）として、健全であると考えられる構造物と比較的狀態が悪いと考えられる構造物をそれぞれ同数選定することとし、3省合同で合計193件の構造物を選定し詳細調査を行った。

(1) 基本調査

基本調査は、施工記録と目視等により、調査年月日、構造物名、所在地、構造物形式、竣工年、変状状況、ハンマーによるたたき等の調査を行った。調査した構造物の種類と竣工年の関係を図-1に示す。

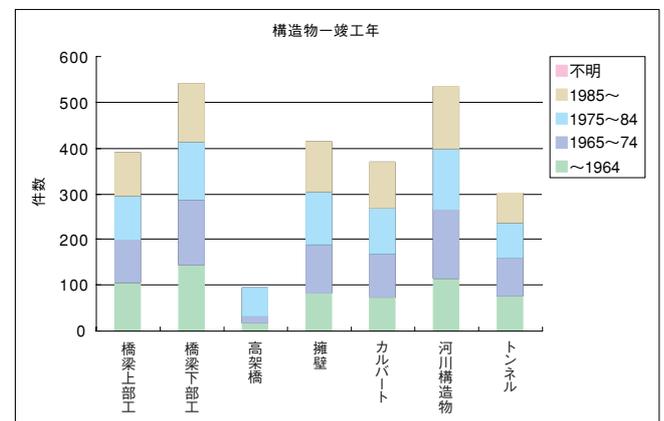


図-1 構造物の種類と竣工年 (基本調査)

(2) 詳細調査

詳細調査は、基本調査に基づき、健全な事例と劣化事例

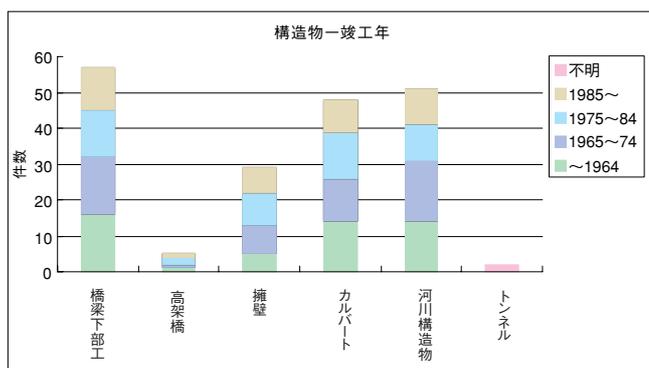


図-2 構造物の種類と竣工年 (詳細調査)

を選定し、各種試験のためのコア採取 (各箇所3本づつ、合計579個) とかぶり測定を実施した。採取したコアを用いて、圧縮強度、ヤング係数、塩化物イオン濃度、中性化深さ等の試験を行った。調査した構造物の種類と竣工年の関係を図-2に示す。

2 調査結果

(1) 基本調査

基本調査を行った箇所を対象として、写真や図面等を参考に、コンクリート部材としての劣化の程度および劣化要因についての判定を行い、コンクリート構造物の耐久性に関する実態を把握した。損傷度判定標準を表-1のように定め、劣化原因を表-2に示す5つの要因の中から推定した (複数該当有り)。

竣工年と劣化度の関係を図-3に、劣化要因の推定結果を図-4に示す。

図-3を見ると、竣工年が古いほど劣化の占める割合が高く、年が経つとともに劣化が進行していく傾向が認められる。また、図-4より劣化要因としては、構造物全般に「コンクリート低品質 (コン低品質)」と「配筋不良」が原

表-1 劣化度判定基準 (トンネル以外の構造物)

劣化度	一般的状況
V	劣化が著しく、補修・補強を行う必要がある。劣化のために構造物の耐力や使用性が低下していることが明白なもの。
IV	劣化が著しく、詳細調査を行い補修するかどうか検討する必要がある。劣化のため構造物の耐力や使用性に悪影響がでているおそれがあるもの。あるいは、放置するとさらに劣化が進行することが十分に予想されるもの。
III	劣化が認められ、追跡調査を行う必要がある。現時点では即座に構造物の耐力や使用性に影響を与えないが、将来的には劣化が進行することも予想されるもの。
II	劣化の兆候が認められる。軽微なひび割れや錆汁等が認められ、条件によっては劣化が進行することも予想されるもの。
I	劣化の兆候が認められず、健全なもの。

表-2 劣化要因とその一般的特徴

劣化要因	一般的特徴
コンクリート低品質	・打込み不良による豆板の発生や骨材分離が目立つもの ・コールドジョイントが目立つもの ・遊離石灰等による表面変色が著しいもの
配筋不良	・鋼材の露出が認められるもの ・多量の錆汁が認められる場合で、塩分の大量供給が考え難く、かぶり不足が懸念されるもの
アルカリ骨材反応	・アルカリ骨材反応に特有の亀甲状のひび割れが認められるもの
塩害	・塩分が外部から供給される環境にあり、鋼材の腐食が認められるもの
凍害	・凍害が予想される地域で、コンクリートの凍結融解に起因する角欠け等が認められるもの

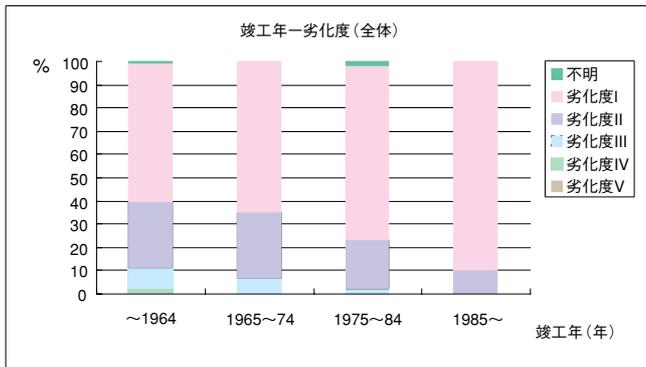


図-3 竣工年と劣化度の関係

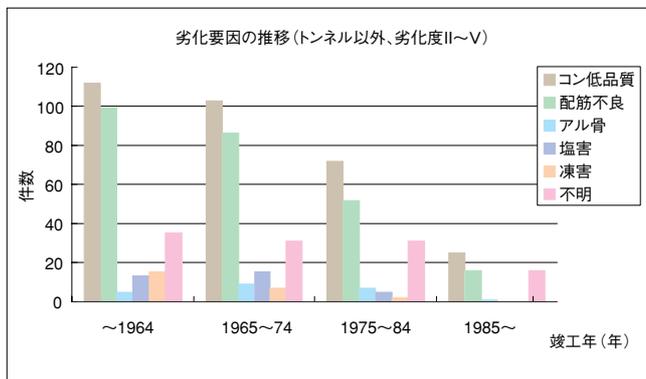


図-4 竣工年別劣化要因の推定結果

因と推定されるものが多く、「アルカリ骨材反応（アル骨）」や「塩害」、「凍害」などコンクリート材料そのものや周辺環境に起因するものは少ない結果であった。

「コン低品質」と判断されたものには、豆板やコールドジョイントのように施工に起因することが明らかなものと、エフロレッセンスの析出やコンクリート表面の変状など原因が必ずしも明確でないものがあったが、前者が比較的目立った。また、配筋不良と判断されたものは、そのほとんどがかぶり不足に起因した鋼材露出および錆汁の流出であった。

すなわち、劣化要因としては、施工に起因するものが大部分を占めており、これらの結果から、施工時のコンクリート打設（打込み、締固め、養生）やかぶりの確保を確実にすることが重要であることがわかる。

(2) 詳細調査

①鉄筋のかぶり

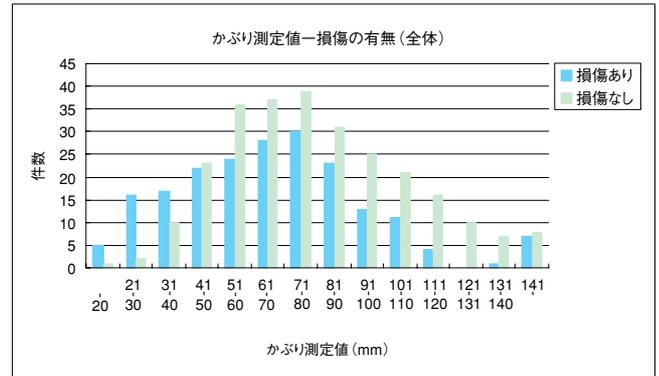


図-5 各コア抜き位置でのかぶり測定値

健全なコンクリート構造物（劣化度i）と損傷があったコンクリート構造物（劣化度ii以上）のかぶりの測定値（コア抜き位置）を図-5に示す。

健全な事例ではかぶりの平均が82.0mmであるのに対し、劣化が認められる事例の場合は平均69.0mmであり、劣化の認められる構造物は、相対的にかぶり小さい傾向にある。

コンクリートの劣化に対しては、必ずしもかぶりだけでは説明できないが、かぶりを確保することがコンクリートの耐久性に対する1つの必要条件であると言える。

②中性化速度係数

コンクリート打設におけるポンプ圧送工法は1965年以降に普及したと考えられる。この影響を見るため、1964年以前と65年以降の中性化速度係数の分布を図-6に示す。

1965年以降は64年以前と比べて、中性化速度係数の小さいものと大きいものの両端で頻度が低くなり、中性化

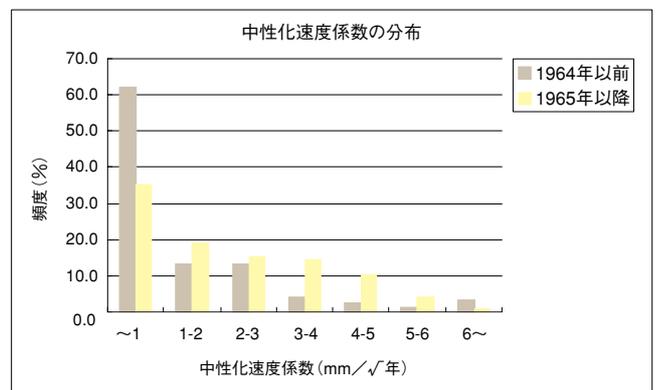


図-6 中性化速度係数の分布

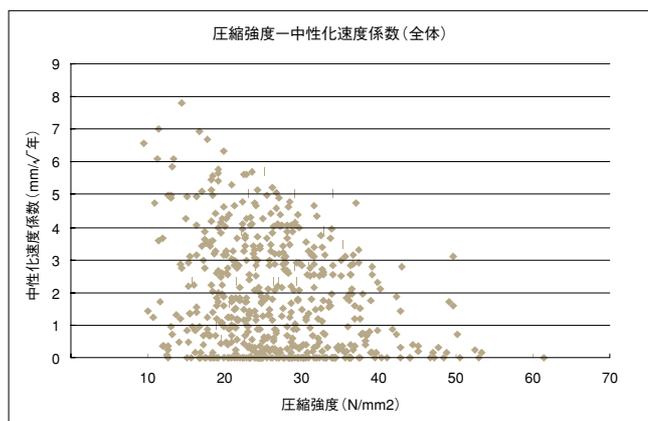


図-7 中性化速度係数と圧縮強度の関係

速度係数が1～6mm/√年の範囲ではそれが高くなっていることが認められる。この傾向と劣化の関係については不明であるが、この傾向はポンプ圧送工法の普及によりコンクリートの品質が一定化したことによるものと推測される。

中性化速度係数とコアの圧縮強度との関係を図-7に示す。

両者の間に明確な因果関係は認められないが、強度が大きくなるにつれ中性化速度のばらつきが小さく、かつ遅くなっていることから、コンクリートの強度を大きくすると、中性化による劣化に対して信頼性を向上させることができ、逆に強度が小さい場合には、中性化が遅い事例と速い事例が混在しているが平均的には速くなるため、信頼性が低下する傾向にある。

コンクリート構造物の 耐久性向上に関する提言とそれに基づく対応

1 提言要旨

調査結果を基に、建設省、運輸省、農林水産省が共同で設置した「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会（委員長：町田篤彦埼玉大学教授）」は、コンクリート構造物の建設システムや維持管理システムのあり方についての提言を行った。

- ①劣化が認められ、追跡調査を必要とする程度（劣化度iii）以上に劣化している構造物が5%あり、劣化は経年によ

る影響が最も大きいことが分かった。

- ②第三者被害を防止し、耐久性を確保・向上するためには、設計・施工・維持管理において充分な対応をすべきである。
- ③土木学会の「コンクリート標準示方書[施工編]耐久性照査型」（平成12年1月）を実際の構造物の設計・施工に活かすため、基準類やマニュアルの整備を推進する。
- ④構造物の重要度に応じて設定した耐用年数の下で、要求性能を満足するよう材料選定、配合、設計、施工方法、維持管理を計画することを基本とすべきである。
- ⑤耐久性の要求性能に対応した水セメント比の制限値を明示するとともに、施工段階で水分量確認を行い、耐久性の確保を図る。
- ⑥施工においては、要求された品質水準を確実に満たすための品質管理システムを充実する。
- ⑦劣化の兆候のある構造物や部位を効率的に見出し、安全性を確保する点検システムを構築することが重要である。
- ⑧維持管理のためには、建設、点検、補修・補強に関する記録を適切に保存することが重要であり、構造物毎の台帳をデータベース化することが望ましい。
- ⑨基準類の性能規定化、水分量試験方法、非破壊検査技術、補修・補強技術などについて、新しい技術の研究・開発に取り組み、実用化を図ることが望まれる。

2 提言に基づく対応（水セメント比の規定）

コンクリート構造物の耐久性向上を図る上で重要となるのは、鋼材のかぶり、コンクリートの水セメント比である。

国土交通省では、平成13年3月に「土木コンクリートの品質確保について」の通達で、一般の環境条件の場合の鉄筋コンクリート構造物に使用するコンクリートの水セメント比の上限値を従来の60%から55%に修正した。これは、代表的な劣化現象の中性化と塩害について、設計耐用年数を100年とし、現行の標準的な鋼材のかぶりを確保できるような水セメント比を試算した結果に基づいて行われた。試算には、土木学会の「H11年度コンクリート標準示方書[施工編]耐久性照査型」を用い、使用する係数

等については、国土交通省で蓄積した実構造物におけるデータに基づいて定めた値を用いた。

中性化に関する照査結果と塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査結果を以下に述べる。

(1) 中性化に関する照査

照査計算に用いる安全係数は、 γ_p を1.1とし、その他の安全係数は全て1.0とした。ここで、 γ_p とはコンクリートの中性化速度係数の予測値 αp の精度に関する安全係数である。

①高炉セメントを使用する場合

(橋梁下部工、地覆・高欄等)

高炉セメントを使用し、水セメント比を55%、設計耐用年数100年とした場合の試算結果を図-8に示す。算定される中性化深さは、おおよその条件下において、現行の道路橋示方書に規定される橋梁下部工の最小かぶり70mm、現状の地覆高欄における標準かぶり60mm以内に収まることが確認された。ただし、塩分環境下で、かつ環境作用程度係数 $\beta_e=1.6$ (乾燥しやすい環境、南向き)にある地覆・高欄については、状況に応じてW/Cと設計かぶりの検討を行う必要がある。

②ポルトランドセメントを使用する場合(橋梁上部工)

ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を55%、

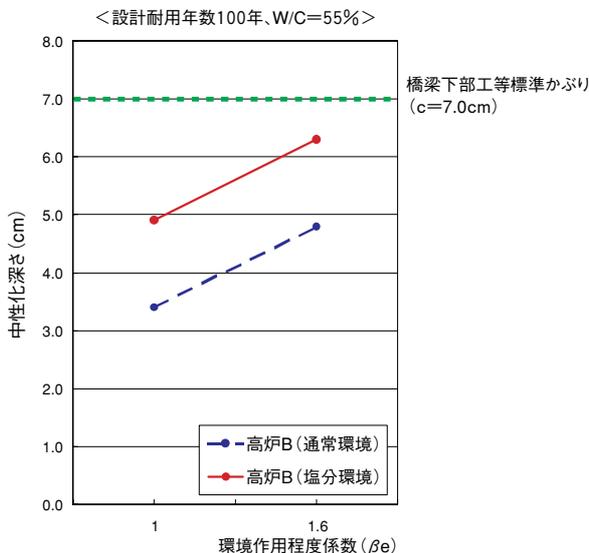


図-8 環境程度係数と必要かぶりの関係

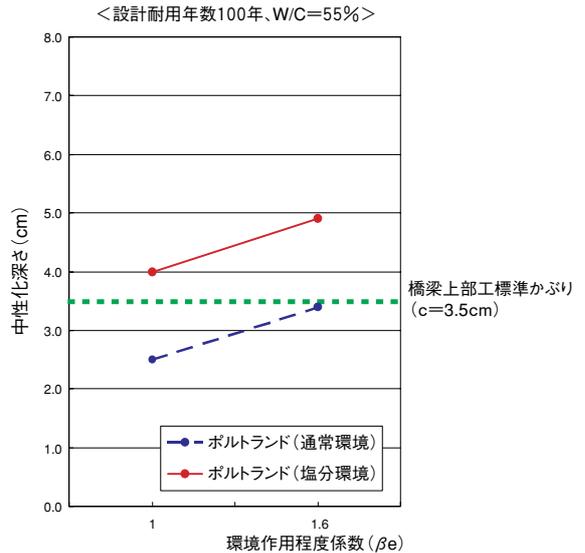


図-9 環境程度係数と必要かぶりの関係

設計耐用年数100年とした場合の試算結果を図-9に示す。算定される中性化深さは、通常環境下では35mm以下であり、現行の道路橋示方書に規定される橋梁上部工の最小かぶり35mm以内に収まることが確認された。ただし、塩分環境下での中性化深さは40mm以上となり、そのような環境にある場合には、状況に応じてW/Cと設計かぶりの検討を行う必要がある。

(2) 塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査

照査計算においては、国土交通省で蓄積した実構造物におけるデータに基づき、安全係数を全て1.0として用いた。また、コンクリート表面における塩化物イオン濃度(C_o)については、土木研究所提案式を参考に $1.0(kg/m^3)$ を用いた。これは、おおよその地域において海岸線より1km内陸における値である。

①高炉セメントを使用する場合

(橋梁下部工、地覆・高欄等)

高炉セメントを使用した場合における、水セメント比と耐用年数の関係を図-10に示す。算定される鋼材の必要かぶりは20mm以下であり、現行の道路橋示方書に規定される橋梁下部工の最小かぶり70mm、現状の地覆高欄における標準かぶり60mm以内に収まることが確認された。ただし、海岸線より1km以内にある場合には、その

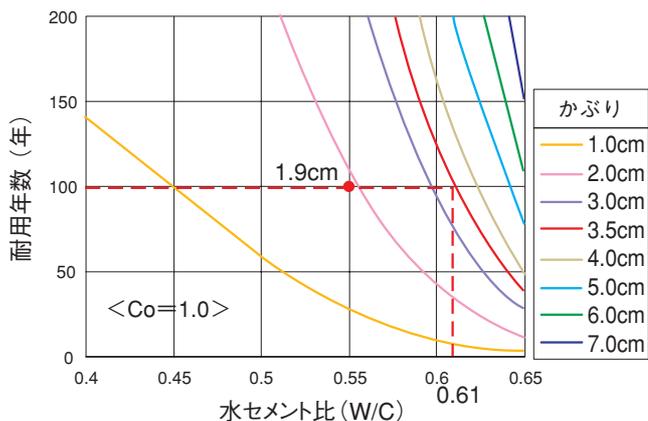


図-10 水セメント比と耐用年数の関係

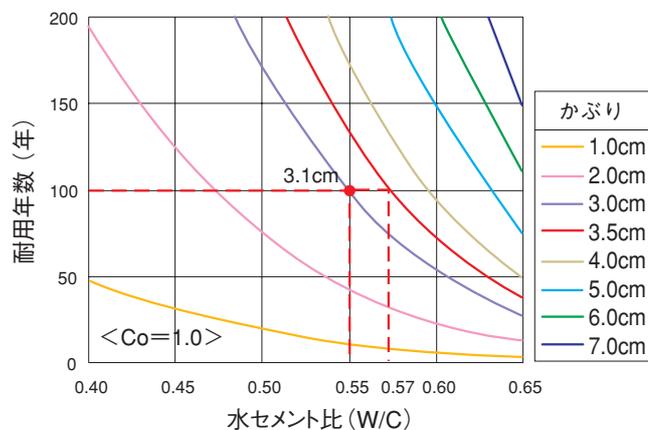


図-11 水セメント比と耐用年数の関係

距離に応じてコンクリート表面における塩化物イオン濃度に Co が増大するため、状況に応じて W/C と設計かぶりの検討を行う必要がある。

②ポルトランドセメントを使用する場合（橋梁上部工）

ポルトランドセメントを使用した場合における水セメント比と耐用年数の関係を図-11に示す。算定される必要かぶりは35mm以下であり、現行の道路橋示方書に規定される橋梁上部工の最小かぶり35mm以内に収まることが確認された。ただし、凍結融解作用を受ける場合には、コンクリート標準示方書に示されるように鋼材腐食発生限界濃度（ C_{lim} ）の値を小さくする必要があり、その状況に応じて W/C と設計かぶりの検討を行う必要がある。ま

た、海岸線より1km以内にある場合についても、その距離に応じてコンクリート表面における塩化物イオン濃度に Co が増大するため、状況に応じて W/C と設計かぶりの検討を行う必要がある。

今後の課題

コンクリートの剥落の事例を契機に実態調査も含め、コンクリート構造物全般の課題について検討した。実態調査では、劣化が認められ、追跡調査を必要とする程度（劣化度iv）以上に劣化している構造物が5%あり、劣化は経年による影響が最も大きいことが分かった。

コンクリート構造物の耐久性向上に関する諸課題を解決するためには、基準類及び設計法の整備、材料や施工、品質管理、補修・補強等の技術開発の推進が重要である。

塩害とアルカリ骨材反応に対しては、1986年にコンクリート中に含まれる塩化物量の総量規制やアルカリ骨材反応の暫定対策が出され、それ以後に製造されたコンクリート構造物では、塩害やアルカリ骨材反応の兆候は見られず、規制による効果が出ているものと考えられる。

しかし、一方では、資源循環型社会の誘導の観点から、建設廃棄物をはじめとする資源のリユース・リサイクルが求められており、経済産業省の「循環型社会の構築に向けたセメント産業の役割を検討する会」（座長・長瀧重義新潟大学教授）は、セメント産業が廃棄物・副産物を大量に受け入れてリサイクルし循環型社会構築の一翼を担っている現状を確認した上で、一層の貢献を果たすための方策を提示している。これによると、セメント産業の廃棄物利用拡大のため、法規制の見直しや廃棄物を利用したセメントの利用促進等5項目が柱となっており、この中にはセメント中の塩分量規制の緩和も含まれている。

塩分値の規制緩和については、資源の有効活用や環境負荷の低減には有効であるが、コンクリート構造物の更なる長寿命化には相反するものとなる恐れがあるため、今後検討を要する課題である。