

コンクリート構造物耐久性診断システムの開発

東 邦和* 栗本雅裕* 白石文雄*
石井敏之* 廣中哲也*

1. まえがき

トンネル覆工および高架橋のコンクリート片落下事故をきっかけに、コンクリートの耐久性の不足が社会問題として大きく取り上げられるようになった。種々の調査が行われコンクリート構造物の劣化の実態が次第に明らかにされつつある。また、急速な経済発展とともに整備されてきた社会資本の基盤であるコンクリート構造物の長寿命化および維持管理の重要性が認識されるようになってきた。このような社会的な背景から、コンクリートの耐久性および劣化に関する研究^{1), 2)}が活発に行われている。また、コンクリート標準示方書もこの状況に対処するため、耐久性評価および劣化予測に関して大幅に改定された³⁾。

劣化の中でも、深刻な問題とされているのが塩害、中性化による早期の鉄筋腐食である。この鉄筋腐食により、RC構造物にはひび割れ、錆汁等が発生し、美観・景観上の問題が生じる。さらに劣化が進行すると、コンクリートの剥離・剥落、構造物の耐荷力不足といった劣化現象により、第三者への影響、安全性、使用性といった機能に問題が現れてくる。

これらのことからコンクリート構造物の長寿命化、最適な維持管理を目的としてコンクリート構造物の診断・評価システムを開発した。診断・評価システムは目視観察による評価、塩害・中性化の予測および補修した場合の劣化進行の予測およびライフサイクルコストを考慮した最適な維持補修計画の作成等の機能を有している。本報告ではこれらの機能について簡単に概要を紹介する。

2. 診断・評価システムの概要

本システムでは、コンクリート構造物の劣化程度と

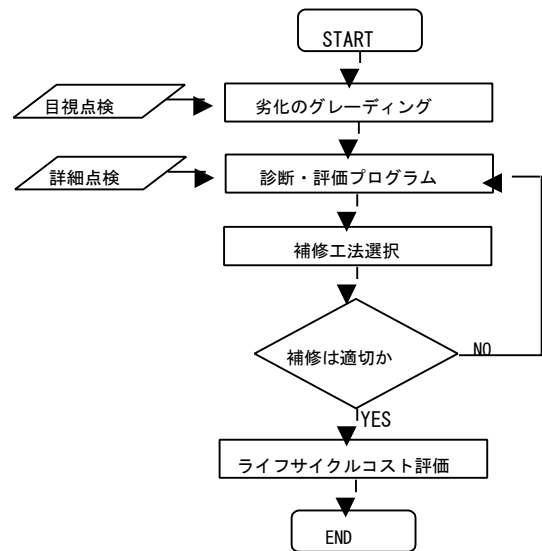


図-1 診断・評価の流れ

将来の劣化進行の予測を診断・評価することができる。診断・評価のフローを図-1に示す。

診断の流れは、①目視観察による劣化のグレーディング、②劣化予測を目的とした診断評価プログラム、③ライフサイクルコスト評価に分けられている。特長および用途を次に示す。

a. 特長

- ① 劣化のグレーディング、診断・評価、ライフサイクルコスト、補修工法の選定を含めて、トータルな検討が可能
- ② 逆解析による測定データからの塩化物イオンの拡散係数の推定
- ③ 補修後の塩化物イオンの浸透予測
- ④ 炭酸ガスと水酸化カルシウムの反応モデルによる中性化進行の予測

b. 用途

- ① 劣化して補修が必要な構造物の劣化程度の把握
- ② 新設構造物の塩害・中性化の予測
- ③ 補修工法の選択とライフサイクルコスト評価

*技術研究所

3. グレーディング

RC構造物の維持管理のために適切な対策（補修・補強）を行うには、劣化の現状（劣化原因、劣化度）を把握することが重要である。劣化のグレーディングは、土木学会基準³⁾に準拠したものであり目視観察によるデータを入力することにより劣化原因を推定することができる。劣化機構としては、中性化、塩害、凍害、化学的侵食、アルカリ骨材反応、床板の疲労を対象としている。

例として、塩害の劣化グレーディングを図-2に示す。劣化グレーディングは潜伏期、進展期、加速期および劣化期に分けられている。潜伏期は塩化物がコンクリート内に浸透し、進展期において鋼材の腐食が始まる。また、加速期ではコンクリートに腐食ひび割れが始まり、劣化期において剥離・剥落が発生する。

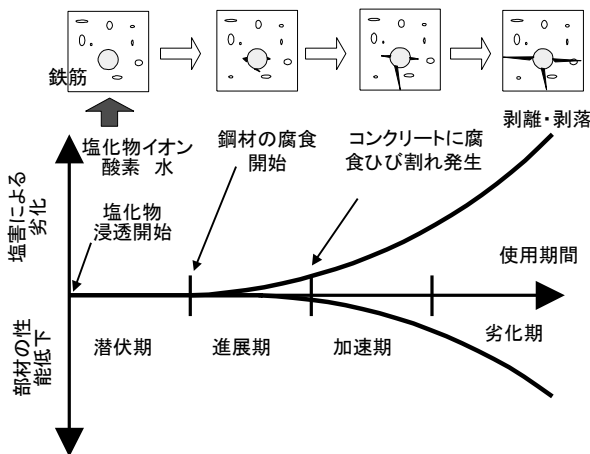


図-2 劣化グレーディング

写真-1に示す構造物を対象とした劣化原因推定シートの回答項目の一部を表-1に示す。調査にしたがって表に示す項目を選ぶことにより、構造物の主な劣化原因が推定できる。

4. 診断・評価プログラム

4.1 塩化物イオンの浸透解析

コンクリート中の鉄筋は不動態皮膜で保護されている。この不動態皮膜は塩化物イオンがコンクリート中に存在すると破壊され鉄筋の腐食が始まる。発錆によりコンクリートにひび割れが生じさらに鉄筋の腐食が加速する。塩害は塩化物イオンを原因とした鉄筋の錆



写真-1 塩害劣化による橋の腐食

表-1 劣化原因推定シート

コンクリート構造物の劣化状況シート
環境条件、使用条件、劣化状況および劣化グレードについて以下の質問に回答ください
回答日： 年 月 日

(1) 対象構造物についてご記入下さい。
1.1 構造物の種類 : 鉄筋コンクリートラーメン形式栈橋
1.2 施工年 (西暦でお答えください) 1975
1.3 状況調査年 (西暦でお答えください) 2001

(2) 外的劣化要因についてお答えください
《環境条件に関する質問です》 (a～cでお答え下さい)

2.1 塩分の供給について (海岸からの距離) c
a. ①海岸からの距離が500m以上または
②海岸からの距離が100～500mで途中に遮蔽物がある
b. 海岸からの距離が100～500mで途中に遮蔽物がない
c. 海岸からの距離が100m以内

2.2 地域による凍害危険度ランク a
a. ①凍結融解作用はないか、ほとんど考えられない、or
②凍結融解作用を受けるが水の供給はない
b. 凍結融解作用を受けしかも水の供給がある
c. 凍結融解作用が頻繁に起こり、しかも水の供給がある

2.3 温泉地域 a
a. 化学作用はないか、ほとんど考えられない
b. 化学作用を受けるが常時ではない
c. 温泉や酸性河川などに接しており、常に化学作用を受ける
《使用条件に関する質問です》 (a～cでお答え下さい)

2.4 乾湿繰り返し c

によるコンクリートのひび割れ、剥離、鋼材の断面減少を引き起こす劣化現象である。

塩化物イオンには「初期塩分」と「外来塩分」がある。初期塩分は硬化促進剤として用いられた塩化ナトリウムや海砂の不純物としてコンクリートに混入されたものである。また外来塩分はコンクリートの硬化後に潮風、海水飛沫などから供給されコンクリート表面から浸透したものである。

塩化物イオンの拡散の予測には、式(1)の Fick の拡散方程式を適用した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Dc \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに

C : 塩化物イオン濃度(kg/m³)
 D_c : 拡散係数 (cm²/day)
 x : コンクリート表面からの距離(cm)
 t : 時間(day)

塩害に関する基礎データを得ることを目的に実施した暴露試験における塩化物イオン濃度を図-3に示す。普通ポルトランドセメント（水セメント比 50%）の海水飛沫があたる環境下での計測結果である。また、暴露期間は 32 ヶ月である。コンクリート表面の塩化物イオン濃度は 4.8~7kg/m³ でコンクリート標準示方書に示されている 9~13kg/m³ に比較して小さい値であった。また暴露期間が長くなるにしたがってコンクリート内の塩化物イオン濃度が高くなっている。

次に、図-3に示した 20 ヶ月の計測結果と式(1)を適用して求めた塩化物イオン濃度分布の比較を図-4に示す。この結果は逆解析を適用して計測値から拡散係数を同定し、その拡散係数を用いて濃度分布を求めたものである。計測値を良好に近似している

また、標準示方書では式(2)を適用して拡散係数を算定する。

$$\log D = 4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47 \dots (2)$$

ここに D : 拡散係数 (cm²/day)

W/C : 水セメント比

式(2)より求めた拡散係数は 0.00459cm²/day、同定結果は 0.00346cm²/day であった。

同定した拡散係数を用い 50 年後までの塩化物イオン濃度を予測した結果を図-5に示す。コンクリート表面から 2~12cm までの位置での濃度分布の経時変化を示したものである。また図中の限界濃度はコンクリート標準示方書において示されている鉄筋の発錆限界濃度である。深さ 4cm では約 4 年後、6 cm では 9 年後に限界濃度に達している。

この結果に対して 8 年後に補修した場合の検討を行う。補修はコンクリート表面からの塩分浸透を遮断する表面被覆、鉄筋位置までのコンクリートを撤去し新しいコンクリートに打ち替える断面修復および表面被覆と断面修復の 2 工法を同時に施工した場合の 3 種類である。断面修復工の概念を図-6に示す。断面修復工は図に示すように塩化物イオン濃度が高い部分のコンクリートを撤去し新しいコンクリートに置き換える。補修部分のコンクリートは塩化物イオンを含まない状態であり、その後コンクリート表面および補修部分よ

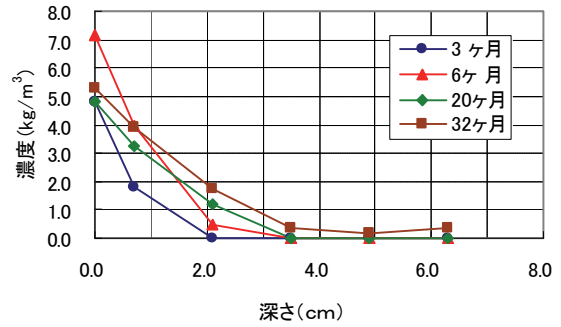


図-3 塩化物イオン濃度分布(暴露試験結果)

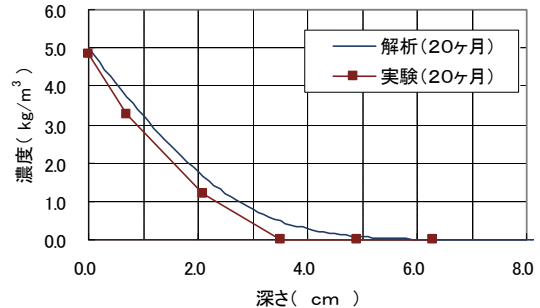


図-4 塩化物イオン濃度分布(解析結果の比較)

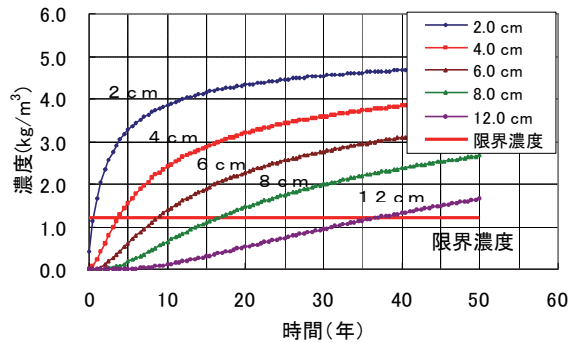


図-5 塩化物イオン濃度分布予測結果

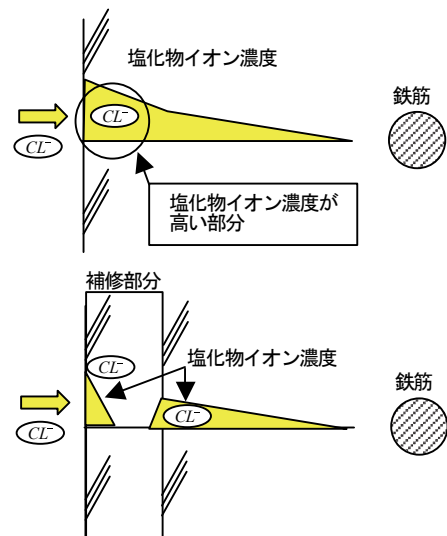


図-6 断面修復工の概念

り深い位置に存在する塩化物イオンの補修部分への浸透が始まることになる。したがって塩化物イオン濃度が鉄筋の発錆限界濃度に達する時間を遅らせることができる。

補修を行った場合の塩化物イオン濃度の変化を図-7に示す。鉄筋のかぶりを4 cm と想定して、コンクリート表面からの深さが4 cm の位置の濃度変化を示した。補修は8年後に行い、その時の塩化物イオン濃度は0 kg/m³にもどっている。また、表面被覆工法の場合は新設時に行ったとして解析した。

補修をしない場合は4年後、表面被覆は13年後、断面修復は15年後、断面修復と表面被覆を同時に施工した場合は24年後に鉄筋の発錆限界濃度1.2kg/m³に達している。補修を行わない場合の8年目には鉄筋に錆を生じさせていることになる。この時点で錆を除去して、断面修復と表面被覆を同時に施工した場合には発生限界濃度に再び到達するのは24年となり、16年間耐用年数を延ばすことができることになる。高塩分環境下では塩化物イオンの浸透は早く、構造物新設時に塩害対策を検討しておく必要がある。

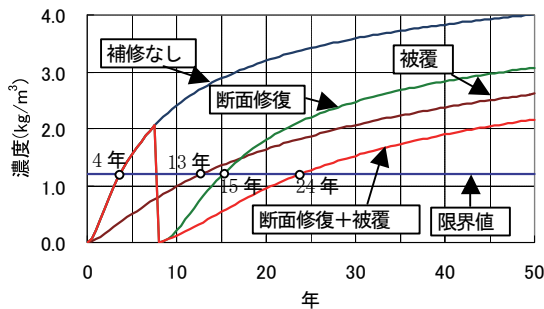


図-7 補修した場合の塩化物イオン濃度

4.2 中性化の進行の解析

コンクリートの中性化は大気中の二酸化炭素が表面から内部に浸透・拡散しコンクリート中の水酸化カルシウムと反応して炭酸カルシウムとなりコンクリートがアルカリ性から中性となって鉄筋の防錆性が失われる現象である。したがって、コンクリートの中性化は鉄筋を腐食させる要因として鉄筋コンクリートの耐久性に極めて重要な影響を持ち、多くの実験的あるいは理論的な研究が行われてきた^{1), 2)}。

中性化深さは、二酸化炭素の拡散が Fick の拡散方程式に従うとして中性化期間 (T) 中性化深さ (X) との間に $X = A\sqrt{T}$ の関係 (A : 中性化速度係数) が成り立つとして多くの場合検討されている。

また、中性化は一般に式(3)に示される化学反応式によって表される。



式(3)に基づいて本報告では式(4)、式(5)で中性化の検討を行う。式(4)は二酸化炭素の拡散、式(5)は水酸化カルシウムの減少量を示している。また式(4)の右辺第2項は二酸化炭素と水酸化カルシウムの反応による二酸化炭素の減少量で反応速度はアレニウスの式^{1), 2)}に従うと仮定した。

$$\frac{\partial C_o}{\partial t} = \frac{\partial^2 C_o}{\partial x^2} - kC_oC_a \cdots \cdots (4)$$

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = -kC_oC_a \cdots \cdots (5)$$

ここに C_o : 二酸化炭素濃度(kg/m³)
 C_a : 水酸化カルシウム濃度(kg/m³)
 k : 反応速度定数(1/day)

式(4)、式(5)を適用した中性化解析の妥当性を検証するため促進中性化試験を実施した。促進試験の配合ケースを表-2に示す。水セメント比を50、60、70%とした。

表-2 配合ケース

水セメント比 W/C (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (セメント量×%)
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
50	185	370	767	977	0.25
60	185	308	790	1006	0.25
70	185	264	806	1027	0.25

促進中性化試験の一例を写真-2に示す。写真の側部白色部分が中性化している領域である。このようなデータから中性化深さを測定した結果を図-8に示す。図中の実線は解析結果を示しており、実験結果を近似できている。水セメント比が大きいほど中性化の進行が速く、促進中性化期間が6ヶ月の場合では、水セメント比が70%の場合は50%に比較して中性化深さは7倍程度となっている。

次に、図-8に示した中性化深さの算定方法について述べる。コンクリートがアルカリ性から中性に変化する状況を水酸化カルシウムの減少量で判定している。この水酸化カルシウム濃度の分布を水セメント比が60、70%の場合について図-9に示す。市販されている普通ポルトランドセメント中のけい酸三カルシウム

およびけい酸二カルシウムの比率の平均は約 50%および 26%であり、普通ポルトランドセメントの水和率が 100%の場合、セメント単体量あたりの水酸化カルシウムの量は約 30%となる。ここでは水和率を 80%として初期の水酸化カルシウム量とした。したがって、水セメント比が 60%、70%の場合にそれぞれ 74kg/m^3 、 63kg/m^3 となる。また、図中の中性化判定濃度はコンクリートの pH が 12.5 を示す水酸化カルシウム濃度 1.3kg/m^3 である。水セメント比が 70%の場合促進中性化期間 3ヶ月でコンクリート表面から 1cm まで中性化判定濃度以下になっており、中性化と判定した。また、水セメント比が 60%の場合は 0.5cm で、中性化の速度は水セメント比 70%に比較して 1/2 程度を示している。図-8 に示した中性化深さの解析結果は上述した方法で求めたものである。

中性化に対する補修効果に関する計算例を図-10 に示す。無補修の場合に中性化深さが 3.8cm となっており、鉄筋のかぶりを 4cm と仮定し 30 年で表面被覆および断面修復工を施工した計算例である。表面被覆の場合はコンクリート表面において二酸化炭素を遮断するため 30 年以降は中性化速度が急激に小さくなっている。また、断面修復した場合は 4cm までのコンクリートが打ち替えられるため中性化は再びコンクリート表面から始まることになる。また、断面修復工に使用したコンクリートは既設のコンクリートより水セメント比が小さいものであるため、中性化の進行も若干遅くなっており 100 年後でも中性化深さは 4cm に達していない。

5. ライフサイクルコスト

LCC (ライフサイクルコスト) は、構造物の効用の大と総費用の削減を検討するために、構造物の供用期間中に発生する騒音、大気汚染等による損失、環境対策、構造物の利便性による便益と、構造物の計画・設計から建設、維持管理、廃棄までにかかる総費用を含めたものである。

LCC は、土木構造物にとって馴染みのうすいものであり、また損失や便益といったものを貨幣価値に置き換えることが難しい問題を含んでいる。しかし、現在の社会情勢において、RC 構造物の供用期間での機能確保や延命化には、多額の維持管理費用や更新費用

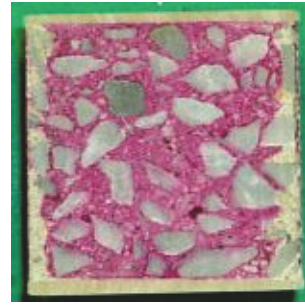


写真-2 中性化試験結果

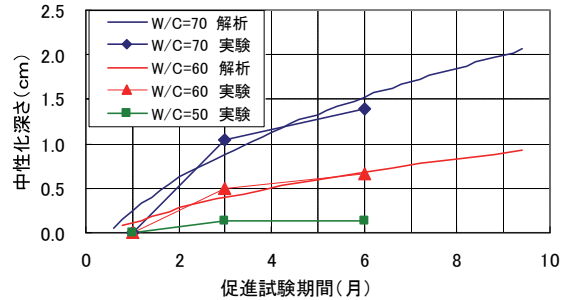


図-8 促進中性化試験結果

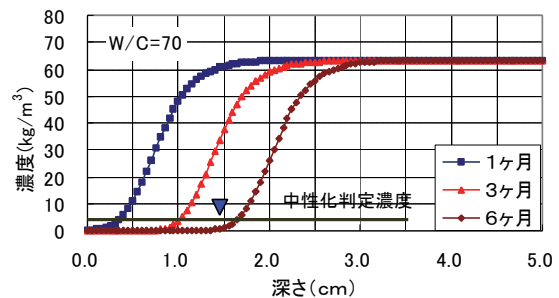
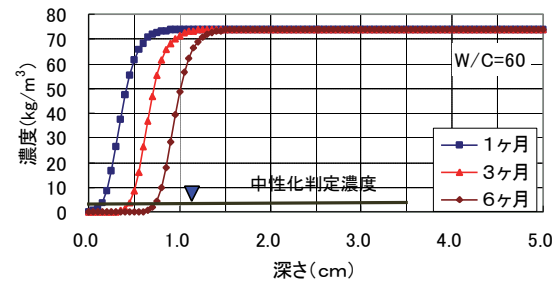


図-9 水酸化カルシウム濃度分布の変化

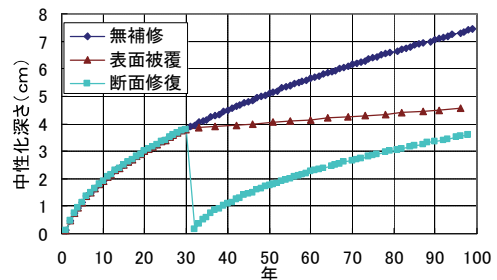


図-10 補修の有無による中性化深さ

が必要であるため、これら費用を含めて社会資本施設の整備を合理的に行う必要性に迫られている。

今回、LCCの定義を「構造物に必要とされる費用を初期投資費用（計画、設計、施工）、維持管理費用（点検、評価、対策）、廃棄・更新費用（解体、処分）の総計として、現在の価値に等価換算したもの」として、表-3に示す条件を設定してLCCを算出することとした。ただし、現在検討できる劣化機構は塩害のみで、補修は鋼材腐食前に実施するという制約条件を設けている。また、計算は①コンクリートの拡散係数、②鋼材位置での塩化物イオン濃度、③構造物の耐用年数、④補修工法有無による構造物のLCC、の4項目である。検討年数100年で、補修無しと補修として表面保護と断面修復を行った場合のLCCの計算結果を表-4と図-11に示す。

LCCは補修無し>表面保護>断面修復の順となり、このケースでは断面修復による構造物の維持管理計画がより適切な方法であることがわかる。また、検討年数100年での維持管理費用は初期投資費用よりも大きくなり、LCCの削減には維持管理費用の低減、つまりより適切な維持管理計画を選定していく必要がある。

表-3 LCC算出の条件設定

条件設定項目		算出方法
構造物寿命		法定耐用年数 鋼材腐食断面減少率
劣化判定	コンクリート	劣化の評価・診断 コンクリート標準示方書
	補修後	劣化の評価・診断 補修毎に設定
費用	初期投資	建設費のみ
	維持管理	点検費と補修費の合計 点検は初期、日常、定期の選択 補修は表面保護、断面修復、防錆の選択
	廃棄	解体・処分費のみ
経済動向	物価上昇・金利は考慮しない	
技術動向	進歩によるノウハウは考慮しない	
社会状況	使用・環境条件変動は考慮しない	

表-4 LCC算出結果 (単位百万円)

	初期	維持	廃棄	計	備考
補修無し	440	81	250	771	点検種類減
表面保護	220	293	0	513	補修8回
断面修復	220	240	0	460	補修4回

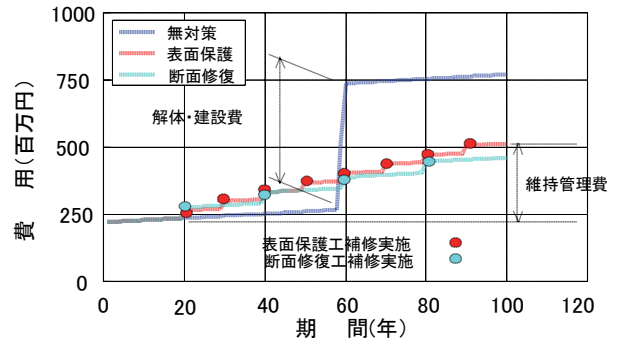


図-11 ライフサイクルコストの比較

6. 結論

新規の建設需要が停滞する中で、建設市場全体に占めるリニューアル（維持修繕）工事の割合が増加している。コンクリート構造物の長寿命化、最適な維持管理を目的としてコンクリート構造物の診断・評価システムを開発し、実際のリニューアル工事に適用し、次の結果が得られた。

- ① 劣化原因推定システムを使うことにより、熟練者でなくても構造物のグレーディングが可能である
- ② 塩害・中性化の診断評価手法は実験結果を良好に近似し劣化予測に適用することができる
- ③ 評価診断手法は補修を含めた形での劣化予測が可能で最適な補修工法の選択ができる
- ④ 構造物のライフサイクルコストを評価することにより構造物の総合的な維持管理計画の提案ができる

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学協会、「コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書」、2000年5月
- 2) 日本コンクリート工学協会、「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書」、2001年5月
- 3) 土木学会、「コンクリート標準示方書」、平成11年版(1999)および2002年版