

コンクリート構造物の維持管理と構造物の安全性

魚本 健人

1970年代から1990年代に建設された大半のコンクリート構造物がたとえ老齢化してもこれらをうまく活用することが重要になっている。このためには、既存構造物の安全性を検討し、必要に応じて補修・補強を施しつつ100年、200年と利用できるような計画と実施が急務である。維持管理が適切に行われないと、剥落事故や口座オフ職による構造物の安全性が確保されなくなる。以上のような我国の現状を踏まえ、本文はコンクリート構造物の安全性確保のためにどのような技術が重要となるか、また最近の新しい非破壊検査について解説したものである。

キーワード：コンクリート構造物，維持管理，非破壊検査

1. はじめに

今日の都市基盤の殆どにはコンクリートが使用されている。即ち、現在の都市基盤整備にはコンクリートはなくてはならないものになっているということが言えよう。しかし、1999年6月には山陽新幹線の福岡トンネルでのライニングコンクリートの剥落事故が発生し、北九州トンネル（1999年10月）および室蘭本線の礼文浜トンネル（1999年11月）でも同様な事故が報道された。また、多くのコンクリート道路橋、新幹線の高架橋からのコンクリート剥落や、アルカリ骨材反応による橋脚上部の鉄筋破断（2004年）などがマスコミで報道され、にわかにコンクリート構造物の劣化について多くの人々の関心を引くようになった。

一方、この10年を見ると、昨年の台風23号に代表される多くの台風による水害、地盤崩壊、阪神淡路大震災や新潟中越地震に代表される多くの地震、海外ではあったもののスマトラ沖地震による津波の被害、韓国で発生した地下鉄での火災、ニューヨークで発生したテロリズムによる災害など都市基盤の安全性を損なう可能性を秘めている多くの災害がある。これらの災害は構造物の劣化が進行すればするほどより大きなものになる可能性がある。しかし、我が国では経済の発展が遅々として進んでおらず、新規構造物の建設は多くを望むことはできないのが現状である。

以上のことを踏まえると、1970年代から1990年代に建設された大半の構造物がたとえ老齢化してもこれらをうまく活用することが重要になっている。このた

めには、既存構造物の安全性を検討し、必要に応じて補修・補強を施しつつ100年、200年と利用できるような計画と実施が急務である。以上のような我が国の現状を踏まえ、本文ではコンクリート構造物の安全性確保のためにどのような技術が重要となるかについて説明する。

2. 維持管理時代の到来

既に戦後50年以上を経過しているが、この間に建設されたコンクリート構造物は膨大である。現在まで約90億m³のコンクリートが使用されているが、例えば橋梁の場合を例にとると今までに建設された橋梁数は14万橋であり、これから建設後20年、50年経過する橋梁数の予測は図-1に示す通りとなる。一

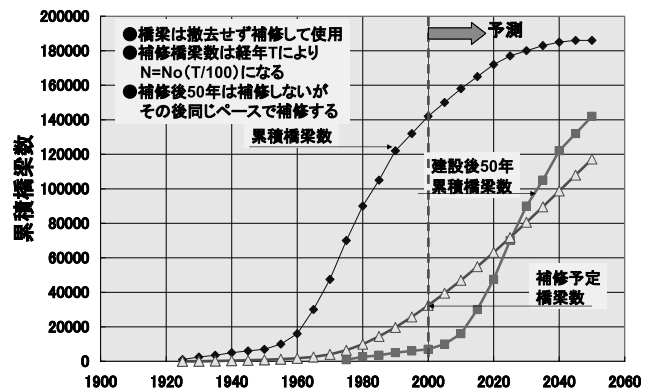
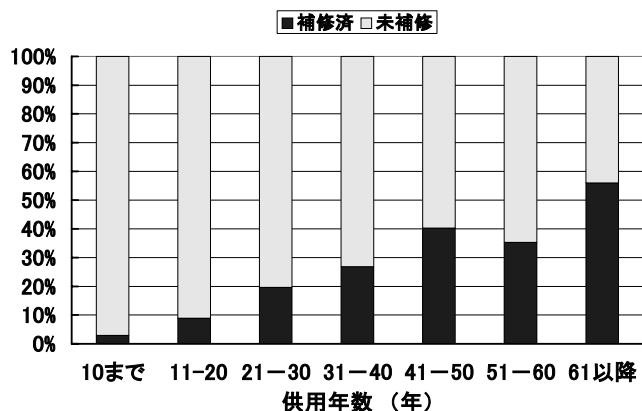


図-1 我国の新規建設された橋梁数と50年経過した橋梁数および補修予定橋梁数の予測



図—2 補修済みのコンクリート構造物（土木）割合（耐久性研究委員会）

方、図—2に示すように建設後の経過年数とともに補修しなければならない構造物は増大し、50年経過後ではその約半数が補修されている。これらの図から明らかなように、2000年以降50年経過する橋梁数は急激に増大するため、補修・補強する必要のあるコンクリート構造物は急激に増大するものと予想される。

これらの図から予想されるように、これからの補修・補強を要する構造物の量は半端でなく、これから2040年までに補修される構造物は今まで建設されてきた構造物の約半数に近いものになると考えられる。なお、若年層の人口が急激に減少しており、21世紀末には日本の人口が現在の半分の6000万人程度になる可能性も指摘されており、当然、建設技術者数も大幅に減少すると考えられる。このため、維持管理業務に関する技術者1人当たりの仕事量は増大すると予想される。

3. 維持管理の問題点

近代において、我が国のように数十年という短期間で著しい経済発展、建設投資が行われた国は存在せず、既設構造物の維持管理を行う上で新たな問題を生じさせている。問題点としては種々あるが技術的に重要なものは以下の3つであると考えられる。

①高度成長時代に建設された多くのコンクリート構造物は技術的にもまだ発展途中であった時代に大量に建設されたため、それまではあまり問題とされなかった「塩害」、「アルカリ骨材反応」、「硫酸塩劣化」などの各種劣化に対する対策が常に後手になったことである。このため、海砂の問題のようになり多量の塩化物がコンクリート中に混入された構造物や、大量の反応性骨材および高アルカリセメントが使用された構造物などが多数存在し、その一部は安全性を脅かすような著しい劣化が生じている。この

ような構造物の場合、補修・補強を行わなければならないが、新幹線の高架橋のように現在使用中の重要構造物では、撤去して新たに建設することは困難で、使用中に少しずつ補修・補強しなければならないことは大変である。

②耐震技術に象徴されるように、時代とともに研究が進み、示方書などにおいて構造物の安全性や環境への配慮の方法が変更されてきた。このため建設時には正しいとされてきた構造物が、現在では不適切（既存不適格）な構造物と見なされ、現状の規準に適合させるためには大量の各種構造物の補強・改修が必要になったことである。これは、阪神大震災時に多くの古い構造物が崩壊したことを踏まえて、特定の年代以前に建設された構造物が、これと同様な地震が発生した場合に崩壊することが予想されるからである。外部から簡単に対処できる場合は良いが、そうでない場合には既存構造物を使用しながら適切に補強することには種々の困難がともなうことに留意する必要がある。

③短期間で大量の構造物を維持管理することが要求されるため、特定の構造物を種々ある方法のうち「どの方法で補修・補強することが適切であるか」の評価が判定される前に多くの構造物を補修・補強しなければならないことになることである。欧州の石造構造物のように長い年月をかけて、経験的にもどの方法が良いかが明らかになってから対処してきたが、我が国の場合にはその評価が定まる前に対処しなければならず、同じ失敗を何度も繰り返す可能性を秘めている。学会等においても実験・解析等を実施し、早急に再劣化のメカニズムを解明し、提言を行うことが必要とされている。

これらの問題について概略の説明を以下に示す。

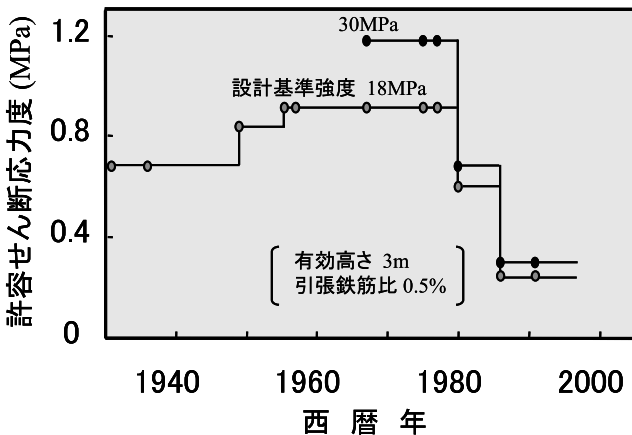
4. 既存構造物の性能評価手法の開発

(1) 重要な構造物の安全性の確保

既存構造物の場合、建設後長い年月が経過している場合には、その構造物の設計図書や施工記録などが残っておらず入手できないことが多い。このため、構造物の内部に関しては非破壊検査などを行うことでその構造がどのようなになっているかを明らかにすることになる。しかし、実際の構造物の場合には断面寸法が大きく、内部の詳細までを計測することは困難である。このため、構造物の安全性や使用性を照査することができないことになる。

そこで、構造物の安全性や使用性を照査するために

は、対称構造物の建設時に使用されていた各種の基準を使用して、「復元設計」を行う手法が考えられる。必ずしもいつも正しい復元設計が行えるとはいえないが、少なくとも戦後の構造物であればかなり正確に復元設計することができる。また、その復元設計が正しいか否かは非破壊検査により鉄筋量等を確認することで判定できる。このような手法を用いることで既存構造物の80%程度は安全性や使用性を照査することが可能となる。構造物の数が多いためどの程度の期間かかるかは不明であるが、少なくとも首都機能を担っているような重要構造物について設計図書も含めた台帳を完備させることが急務である。なお、図—3に示したコンクリートの許容せん断応力度（土木学会：コンクリート標準示方書）の変遷を見ると明らかなように、実構造物は設計・施工された時代によって鉄筋量も大幅に変化している。結果的に、最新の基準で評価をすると、既存構造物は構造形式、設計時期などによって異なった安全性、使用性を有していることになる。なお、最終的には次に述べるような構造物の劣化・変状の予測を取り入れて性能の照査を行う必要がある。



図—3 コンクリートの許容せん断応力度の変化（岡村甫ほか：土木学会）

(2) 経年後の劣化・変状の予測

既存構造物は、長期間の使用に対し徐々に劣化しますが、その劣化性状を定量的に精度よく予測する技術はまだ十分に開発されていない。特に、これからは材料レベルの問題と構造レベルの問題の融合が重要であり、そのための研究・開発が急務である。

鉄筋コンクリート部材の劣化では最も重要な問題として、コンクリート中の鋼材の腐食があげられる。コンクリートの中酸化やコンクリート中への塩化物イオンの浸透による鉄筋の腐食を取り上げると、既に多くの研究機関等において定量的なモデル化の研究が行われている。鋼材の腐食に伴う部材の構造特性の変化に

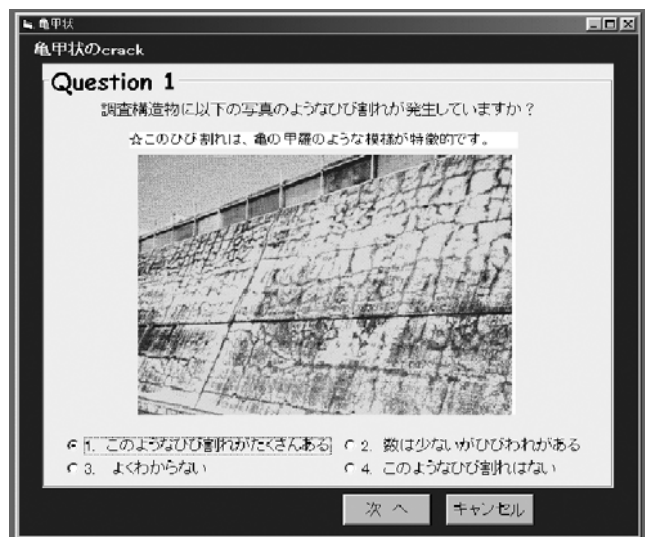
ついてはある程度明らかにされているため、既に得られたモデルを用い、構造部材や構造物の劣化・変状を予測し、実証試験を繰返せば、この数年以内に構造物の性能評価技術が開発されるものと予想される。

化学的侵食、アルカリ骨材反応については、上記のコンクリート中の鋼材腐食に関する研究と比較して材料レベルの研究も遅れている。特に上下水道施設に関しては劣化もかなり深刻で効果的な対策が取れずにいるため、予測はできても対処できないということが起きている。アルカリ骨材反応については、拘束鉄筋の破断が発生しておりそのメカニズムについてまだ明らかでない。しかし、そのモデル化が行われ、ある程度の精度で膨張量などが予測できつつあることから、多少ラフであっても性能評価を行う技術を確立させる必要がある。

(3) 実構造物の検査およびモニタリング技術の開発

コンクリート構造物の検査技術として他分野で発達してきた非破壊検査（超音波、レーダ法、赤外線法など）の適用が広く試みられている。その多くは、欠陥（ひび割れ、内部空洞等）および鉄筋の検知であり、コンクリート自体の品質、劣化に伴う変状を検知する手法の開発は未だ無い。

定期的な検査の結果どのように劣化が進行しているかを記録にとどめるためには目視検査のための補助ツールが必要である。一つの方法として目視検査を実施、記録を作ると同時に経験や勘に頼ることなく構造物全体の劣化の進行度と原因を判定できるエキスパートシステムが考えられ、そのひな形は東京大学生産技術研究所で開発されている（図—4）。ユーザは、画面に

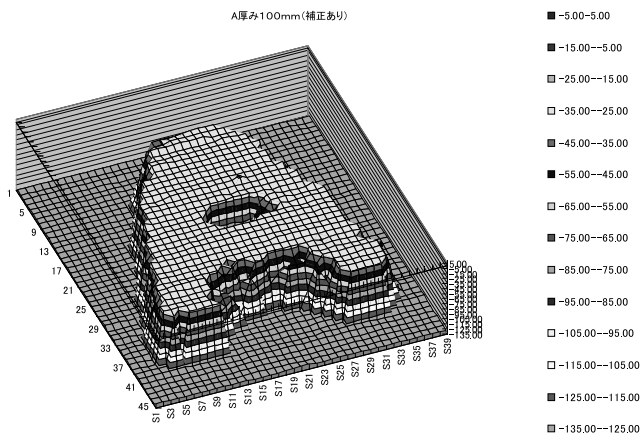


図—4 構造物の劣化診断エキスパートシステムの画面（東京大学生産技術研究所）

表示される写真を見ながら、構造部の形態、立地条件、コンクリート表面のひび割れなどの状態について質問に答えることで、システムが構造物の劣化状況を診断する方法である。簡便さを考慮するとこれからは携帯電話による利用が行えるようなシステムとすることが必要となろう。

構造物にマイクロチップを埋め込み、航空機の「フライト・レコーダ」のようにイベントを記録する「構造物イベントレコーダ」の開発が行われれば、構造物の受けた外力その他の情報をきちんと把握することが可能となる。このような装置が開発されれば、現場においても必要に応じて建設当時の設計図（ない場合には復元設計図書）、補修履歴、構造物が受けた地震、建替え・補修の時期といった情報を把握することができるようになる。また、災害後にイベントレコーダを調査することで、災害の経験を社会の共有財産として生かすことが可能となる。

コンクリート内部の欠陥などの検出に関しても現在、建設の世界で出回っている非破壊検査技術の多くは、検査結果の読み取りに「特別なスキル」を要し、いまだユーザにとって使い勝手のよい技術とはいえない。図一5はコンクリート内部に存在する空隙を超音波計測した結果を示したもので、素人でも直感的に内部構造を理解することができる。このような表示を行うことができれば、非破壊検査に関して特別なスキルのない技術者でも容易に扱える。この種の技術は市場との関係で定まるものと予想される。

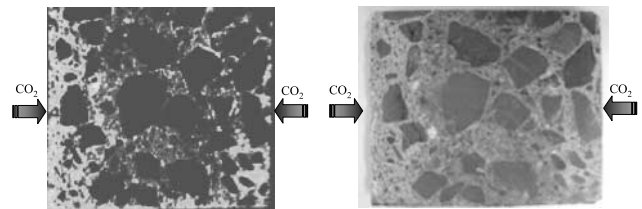


図一5 空隙を有するコンクリート試験体とその探索結果

構造物の性能評価手法が具体的に確立されていないことから、どのような情報を、どの程度の精度で収集することが必要であるかに関する検討は少ない。都市基盤安全工学国際研究センターで実施している実構造物のモニタリングでも変形性能に関しては、光ファイ

バ、レーザードップラー、加速度計等の適用が行われており、構造物の性能を評価するためには解析結果と計測結果を用いて評価しなければならない。このため多くの構造物の性能を評価するためには、個々の構造物ごとに構造物の特性を考慮した必要最小限の計測で評価できるシステムを構築することが必要である。ほぼ弾性体と見なせる鋼構造物の場合には現在でもある程度評価することが可能であるが、コンクリート構造物の場合には理論的な検討とともに、劣化にともなう変化をも考慮した実証試験を行い、精度を確認するとともにその精度を上げるための開発を実施する必要がある。

コンクリートの劣化は、主に化学的劣化と物理的な劣化に分けられる。化学的な劣化を伴う場合は、コンクリート表面においてもその兆候が見られるため、コンクリート表面に生じた化学変化を検知できる手法の開発が必要となる（図一6）。既に当研究室で開発してきた近赤外線分光法もこの目的のために実施してきた開発研究であるが、さらに実構造物への適用方法の開発などが重要となる。



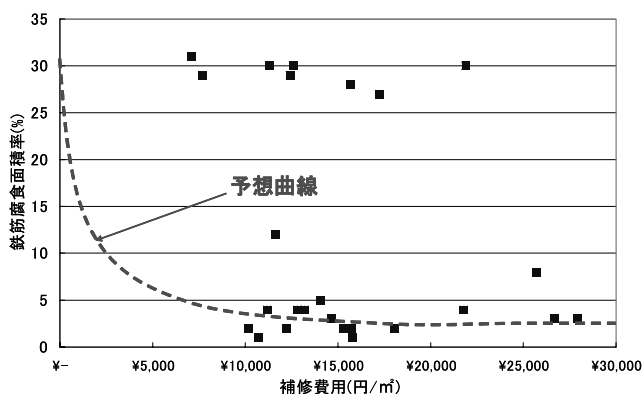
図一6 マルチスペクトル法による分光画像とフェノールフタレイン溶液による中性化検出（東京大学生産技術研究所）

5. 安全性確保のための補修・補強

現状の補修・補強は必ずしも理論的な設計思想に基づいて実施されているとは言い難く、どちらかと言えば、対処療法的なものが多い。このため、最近では補修後数年で劣化する（再劣化）事例が報告されている。今までに行われている方法を構造安全性および耐久性の面から評価することが求められており、当研究室では企業との共同研究でこの問題を研究している。実験に時間がかかるためなかなか評価が難しいが、データの公表等を行うことでより実情に合致した評価が行えるものと考えている。

図一7は1996年10月に日本コンクリート工学協会の「補修工法研究委員会報告書」のデータを整理したもので、海洋および内陸で断面修復・コーティング工法で補修した鉄筋コンクリート梁の暴露4.5年の暴露結果である。この図から明らかなように、今まで行

われてきた補修は高い費用をかけたものほど高い防食性を有しているわけではない。即ち、現在の技術レベルでは補修の良し悪しを値段では比較出来ないことを示している。また、現状では部分補修が多く、決して美観・景観性能が良い状態ではない。社会基盤ストックの中には都市のシンボル、文化的価値を有するものもあり、美観・景観性能を考慮した補修設計（絵画の修復技術等の応用）が確立されることが望まれる。



図一七 補修費用とコンクリート内部の鉄筋腐食率の関係

経済的な側面から補修・補強も捉えることが大切であるが、そのための方法としてLCC (Life Cycle Cost) の算定がある。現在もこの算定は行われているが、4. (1), (2), (3) で述べた技術が確立されていないため、結果の妥当性が乏しい。これからはこれらの技術を確立させるとともに、高い精度のLCC算定方法を確立させることが重要である。なお、将来の予測には不確定な要因が含まれており、リスクマネジメント的な概念を付加した手法の適用が必要となろう。

6. おわりに

コンクリート構造物の劣化に関しては、地域特性が極めて高く、全国で類似する研究が多く、貴重な情報が埋もれている。日本のコンクリートに関する技術は欧米と比較しても遜色ないが、10年以内にメンテナンス技術を確立する必要があることから、国家戦略として実施することが重要である。このため大学ならびに研究機関が中核となる中核研究機関を設置し、あらゆるデータベースを一元的に管理し、劣化解析、モニタリング、緊急時対策など多くの場面で利用することが必要である。

《参考文献》

- 1) トンネル安全問題検討会報告書-事故の原因推定と今後の保守管理のあり方, 2000.2
- 2) コンクリート構造物におけるコールドジョイント問題と対策, コンクリートライブラリー, No.103, 土木学会, 2000.7
- 3) トンネルコンクリート施工指針(案), コンクリート・ライブラリー, No.102, 土木学会, 2000.7
- 4) 2001年制定 コンクリート標準示方書(維持管理編), 土木学会, 2001.1
- 5) コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会報告書, 東京大学生産技術研究所, 1999.3
- 6) 平田, 魚本: 超音波法によるコンクリート内部のひび割れ形状の可視化, セメント技術大会講演要旨, 2001.5
- 7) 星野, 魚本: コンクリート梁に発生させたひび割れへの樹脂注入に関する検討, 土木学会第54回年次論文学術講演会講演概要集, 第5部, V-42, pp84-85, 1999.9

【筆者紹介】

魚本 健人 (うおもと たけと)
芝浦工業大学 工学部 土木工学科

