

V-2 コンクリート構造物の維持管理計画に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
 研究期間：平 12～平 15
 担当チーム：構造物マネジメント技術チーム
 研究担当者：河野 広隆、渡辺 博志、
 片平 博、久田 真、
 古賀 裕久

【要旨】

わが国では膨大な数のコンクリート構造物が社会資本として利用されており、今後もこれらの構造物を利用していくために、効率的な維持管理を実施していくことが必要である。本研究は、そのために必要な非破壊試験を活用した構造物診断技術や、これを構造物群の維持管理戦略の策定に活かす手法などを提案することを目標として実施した。その結果、自然電位法による鋼材の腐食確率推定や反発度法によるコンクリート強度推定について、既存の調査法を改善するための知見が得られた。これらの成果を合わせて、合理的にコンクリート構造物の定期点検等を行うための「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」を発刊した。また診断マニュアルやその支援ソフトを使用して、維持管理戦略を検討する例を示した。

キーワード：維持管理、コンクリート、非破壊試験、塩害、腐食、

1. はじめに

わが国では膨大な数のコンクリート構造物が社会資本として利用されており、今後もこれらの構造物を活用していくためには、構造物の劣化の有無、その進行状況を正確に把握し、適切な時期に適切な補修・補強を行うことが必要である。このため、構造物の維持管理手法の大系化が求められている。

また、これまで構造物の点検は、通常の場合、目視による外観調査を主体に行われてきた。しかし、特に塩害により劣化した構造物の事例などでは、劣化の進行が速いことと、劣化がある程度進行した場合には補修が困難であることなどのため、目視調査で変状が発見されてから補修・補強などの検討を行った場合、多額の費用がかかるおそれがあることも明らかになりつつある。このため、非破壊試験などを活用して、構造物の変状を早期に発見する定期点検手法の確立が求められている。

そこで、本課題では、通常の日視による定期点検に非破壊試験による点検を追加し、より合理的な構造物の調査・診断を行う技術や、これらの診断結果を利用して複数の構造物

を計画的に維持管理する維持管理戦略の策定手法について検討した。

2. 研究項目

2.1 研究項目の概要

本課題で実施した具体的な研究項目は、以下の通りである（図-1）。

- ①コンクリート構造物の劣化実態の調査
- ②実構造物における調査・診断事例の蓄積

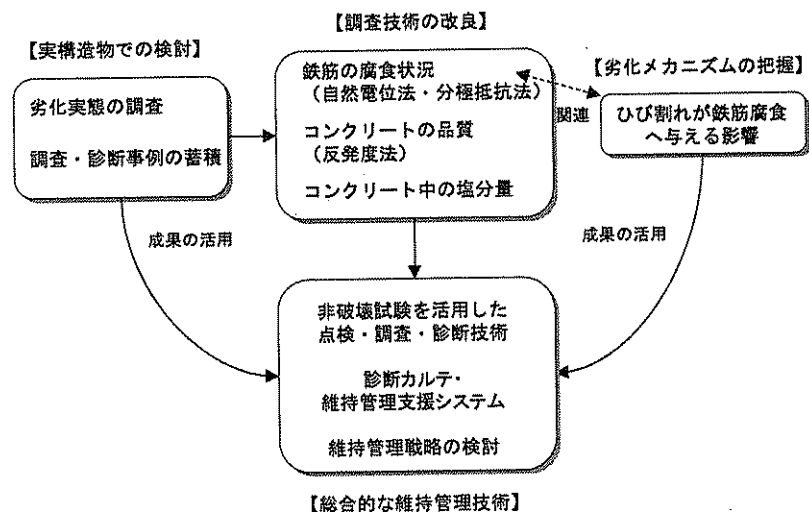


図-1 本課題の研究項目の関連

③種々の試験・調査手法に関する検討

③-1 自然電位法・分極抵抗法に関する検討

③-2 反発度法に関する検討

③-3 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法に関する検討

④ひび割れが鉄筋の腐食に与える影響に関する検討

⑤非破壊試験を活用した構造物の点検・調査・診断技術（健全度診断マニュアル）の検討

⑥診断カルテや診断結果の活用に関する検討

⑦維持管理戦略に関する検討

なお、これらの検討項目のうち、①、②、③-1、③-2、⑤については、土木研究所と日本構造物診断技術協会との共同研究（コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究、平成13～平成14年度）として行った。

次章から、上記の各研究項目について、研究手法・研究結果の概要を紹介する。

3. 構造物の劣化実態の調査

3.1 調査の目的

社会資本として利用されている膨大な数のコンクリート構造物を効率的に維持管理する方法を検討する上では、実際の構造物における劣化や初期欠陥の発生理由や、補修・補強の実態を把握することが必要である。

しかし、著しい劣化が生じた事例や先端的な補修・補強を行った事例に注目が集まる一方、一般的な構造物の置かれている状況については、学術的な観点からは、十分な調査がなされていないのが実状である。このため、我が国の社会資本ストックが全体としてどのような状況にあるのかといった観点で参考になる情報は、十分ではない。

そこで、本課題では、実構造物の健全度の実態を明らかにすべく、旧建設省が1999年9月から11月の間に実施した「土木コンクリート構造物に対する実態調査」¹⁾で得られたデータを、詳細に分析した。また、実構造物に用いられているコンクリートの品質等についても検討した。

3.2 調査方法

旧建設省が行った実態調査は、1999年9月から11月までの期間に、建設年次や地域に偏りが無いように選定された2099件の構造物に対する目視調査、目視調査を行った構造物のうち、152件の構造物に対するコア試料を用いた詳細調査、100件の施工現場におけるレディーミクストコンクリートの調査から

なる。なお、目視調査の対象となった構造物は、橋梁上部構造・橋梁下部構造・擁壁・カルバート類・河川構造物（水門等）・トンネルの6種類である。

目視調査では、コンクリート表面の変状の有無が調査されたほか、構造物の周辺環境等についてデータが集められた。詳細調査では、コンクリートの圧縮強度・中性化深さ・含有塩化物イオン量などの試験が行われた。このように、実態調査では多数の情報が得られているが、本報では、そのうち特に構造物の補修実態について整理・検討した結果を紹介する。

3.3 構造物の補修・補強の実態

近年、構造物の維持管理への関心の高まりを受けて、記録の重要性が指摘されている。しかし、現状では、構造物の補修については、十分な記録が残されていない場合も多い。劣化実態調査では、構造物に施された直近の補修についてアンケート形式で調査したので、その結果を分類して構造物ごとに整理した。

例として、橋梁下部構造の補修原因・目的を表-1に示す。橋梁下部構造については、構造物の劣化等に対して行った表面被覆などの他、耐震性向上のために行った桁座拡幅なども、“補修”内容として記載されていた。そこで、このように構造物の技術基準の変化に対応すべく実施されたものは、ここでは“改修”と呼ぶことにする。

補修または改修が実施された構造物の割合を、構造物の種類、構造物の竣工後の経過年数で整理して、図-2、図-3に示す。図-2から、構造物の種類では、トンネルや橋梁上部構造、河川構造物などで補修されている事例が多いことがわかる。なお、トンネルの補修では、漏水の防止あるいは排水に係わる内容が多かった。

表-1 既存の橋梁下部構造の補修目的

分類	補修目的	件数
補修	桁座コンクリートの補修	6
	ひび割れ注入	4
	表面被覆	3
	角欠け部の補修	3
	洗掘補強	1
	詳細不明	13
	桁座拡幅	23
改修	落橋防止装置の設置	4
	橋脚耐震補強	12
補修以外	上部構造の補修・補強等	14

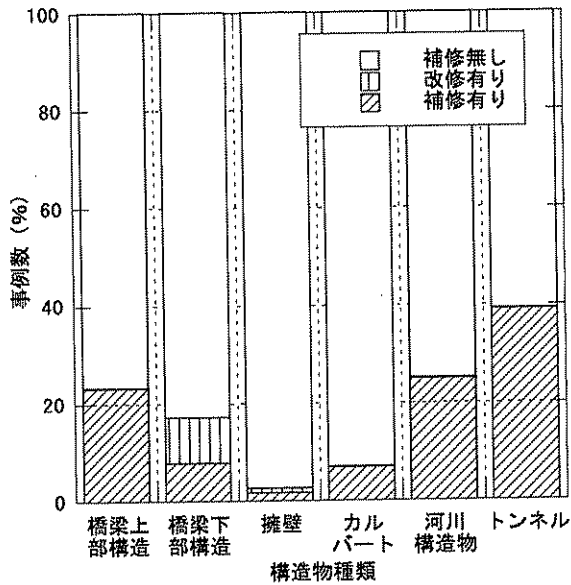


図-2 構造物の種類と補修実施の有無

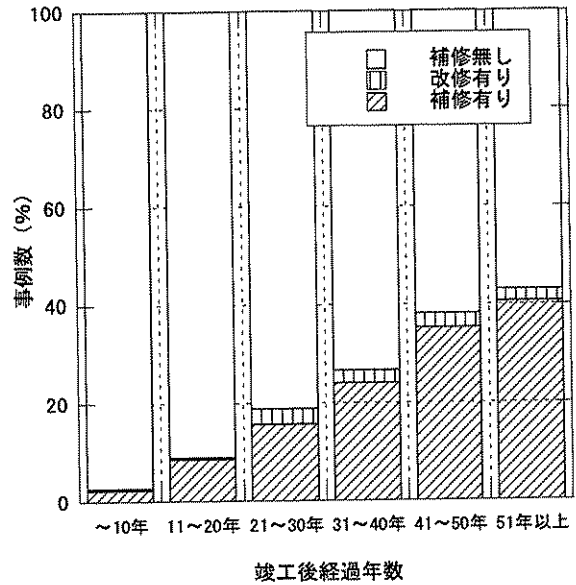


図-3 構造物の竣工年と補修実施の有無

一方、図-3から、構造物に何らかの補修がなされている確率は、竣工後の経過年数にほぼ比例していることが分かる。この理由としては、新たに建設される構造物の品質が向上していること、構造物の劣化が経年にほぼ比例する形で表面化していること、の二通りの可能性が考えられるが、今回の一時点での調査結果からこれを明らかにすることはできない。今後の検討課題である。

3.4 その他の主要な結果

補修実態以外の調査結果については、本報では詳細を省略するが、得られた主な知見として、以下のものがある。

- ①構造物の目視調査結果を用いた劣化度判定の結果、今後、補修等を視野に入れて点検等を行っていくことが必要な構造物が、約5%あった。
- ②特定の年代の構造物が早期に劣化するという傾向は認められない。
- ③コンクリートの品質は、その平均では、年代にかかわらずほぼ一定である。ただし、古い構造物では、コンクリートの品質が良い事例と悪い事例の双方が目立ち、品質のばらつきが大きいものと推定される。
- ④構造物の劣化原因としては、かぶり不足など、施工に起因するものが多い。ただし、著しく劣化している事例の劣化原因としては、塩害やアルカリ骨材反応など、コンクリート材料や周辺環境に起因するものが目立つ。

- ⑤1980年代後半のアルカリ骨材反応抑制対策およびフレッシュコンクリート中の塩分総量規制は、構造物の耐久性確保に、大きな成果を挙げている。

- ⑥実構造物でも、コンクリートの炭酸化（中性化）が、構造物中の塩化物イオンの分布に影響を与えていることが認められる。

なお、これらの知見を、「非破壊試験を活用した構造物の点検・調査・診断技術の検討」や「診断カルテや師団結果の活用に関する検討」などの際に、活用するため、土木研究所資料²⁾³⁾を作成した。また、調査結果の概要および一部については、学会論文などとして広く紹介した⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

4. 実構造物における調査・診断事例の蓄積

4.1 調査の目的

土木研究所では、過去に日本構造物診断技術協会と共同研究を行い、「コンクリート構造物の非破壊検査マニュアル」⁸⁾や「コンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案)」⁹⁾をとりまとめ、非破壊試験等を活用してコンクリート構造物の点検を行って構造物の変状を早期に発見する方法を提案してきた。しかし、実際の構造物における適用事例が少なく、特にその現場適用性について検討する必要があった。

そこで、本課題では、撤去・解体される4つの構造物を対象に、種々の試験・調査を行い、現場適用性や結果の妥当性を検討した。

4.2 調査方法

架替えに伴って解体撤去された、旧暮坪陸橋の橋脚、旧芦川橋の主桁・橋台、旧榊橋（榊の字は、正しくは“木+示+申”であるが、本報では略字を使用）の橋脚の4つの構造物を調査した。旧暮坪陸橋および旧芦川橋は、日本海沿岸の厳しい塩害環境に置かれていた構造物である。旧榊橋は、これらとの比較のために調査対象とした構造物で、一般環境にあり、特に劣化の兆候は見られないが、増大する交通需要への対応のため撤去が決まった構造物である。

調査は、各種非破壊試験、後日試験室での各種試験に用いるためのコア試料採取、鉄筋のはつり調査の順に行い、非破壊試験やコア試料の分析結果とはつり出した鉄筋の腐食状況を比較した（表-2）。また、旧暮坪陸橋の調査および旧芦川橋上部構造の調査では、共同研究を実施している日本構造物診断技術協会の技術者も加わり、複数の調査者が複数の機器を用いて同じ試験・調査を実施し、結果の個人差等についても検討した。本報では、土木研究所が担当した試験・調査の結果の一部について紹介する。

4.3 調査結果

鉄筋の自然電位の測定結果を表-3に示す。塩害により鉄筋の一部に腐食が生じていた旧暮坪陸橋および旧芦川橋の測定結果に注目すると、腐食の程度が大きい調査箇所ほど卑の（小さな）自然電位が測定される傾向があり、自然電位の測定は鉄筋の腐食状況の調査方法として有効であることが確認された。

表-2 実構造物を対象に試験・調査を行った項目

調査項目	試験順序
① 外観目視調査	
② はく離箇所調査（赤外線表面温度計）	
③ コンクリートの含水率（静電容量法）	
④ コンクリートの電気抵抗（4点法）	現地調査
⑤ 透気係数	一日目
⑥ 反発度法による圧縮強度推定	
⑦ かぶり、鉄筋位置（電磁誘導法、電磁波反射法）	
⑧ 中性化深さの測定	
⑨ 腐食状態（自然電位法）	
⑩ はつり調査（鉄筋の腐食状態の確認、かぶり・鉄筋位置の実測）	現地調査 二日目
⑪ 塩化物イオンの試験（φ100mmコア、小径コア、ドリル粉末）	後日、試験室で
⑫ 圧縮強度試験（φ100mmコア、小径コア）	試験室で

※構造物により、実施していない調査項目もある。

一方、比較的健全であると見られた旧榊橋でも、一部に-300mV程度と比較的卑な測定結果が得られた。はつり調査の結果では、確かに一部の鉄筋に腐食が見られたが、急速に腐食が進行しているとは考えにくいものであった。また、複数の測定者が自然電位を測定した結果には、測定結果が200mV程度異なった場合もあった。これらについては、現時点では、原因が十分には明確ではなく、課題として残った。

次に、はつり箇所（約1m×1mの範囲）で行った中性化深さの測定結果の一例を、表-4に示す。ここで調査した構造物は、かぶりが比較的大きかったこともあり、中性化がすぐに構造物の劣化に結びついている事例はなかった。しかし、構造物の調査・診断を行う際には、このように限られた調査範囲でも中性化の深さが大きく異なることを考慮しておく必要がある。

なお、これらの調査結果や調査方法の課題は、次節以降に述べる「種々の試験・調査手法に関する検討」や「非破壊試験を活用した構造物の点検・調査・診断技術の検討」などに活用するため、共同研究報告書¹⁰⁾および土木研究所資料¹¹⁾としてとりまとめた。

表-3 自然電位の測定結果

調査箇所	自然電位の測定結果 (mV : vsCSE)	はつり出した鉄筋の腐食状況
旧榊橋	-324 ~ -133	一部に腐食が見られたが、大部分は健全
旧芦川橋橋台	-503 ~ -386	一部に塩害による孔食が見られた
旧暮坪陸橋橋脚	-154 ~ -76	表面にさびが見られるが建設当所からのものと考えられる
旧芦川橋主桁中央	-360 ~ -209	かぶりの浅いフック部分等に部分的に孔食が見られた
旧芦川橋主桁端部	-425 ~ -298	比較的かぶりの浅い鉄筋に腐食が見られた

※自然電位の測定結果は、-350以下の場合“腐食性大”、-350~-250の場合“腐食性やや大”、-250~-150の場合“腐食性軽微”、-150より貴な場合“腐食性なし”と判断される。

表-4 中性化深さの測定結果（一例）

調査箇所	中性化深さ (mm)						代表値
	個々の測定結果						
旧芦川橋橋台	56	11	72	85	94	55	平均：37 最大：94 最小：9
	12	11	9	10	9	64	
	66	49	25	36	20	41	
	20	28	22	12	-	-	

5. 自然電位法・分極抵抗法に関する検討

5.1 検討の目的

コンクリート構造物には様々な劣化原因があるが、その中で特に構造物に与える影響が大きく、かつ対策を要する構造物が多いのは、塩害による劣化である。

塩害による劣化は、構造物中に多量の塩化物イオンが含まれ、それが原因となってコンクリート中の鉄筋が腐食することにより生じる。塩害の初期の段階では鉄筋の腐食がコンクリートの内部で進行するため、構造物は表面上健全に見える。塩害がさらに進行すると、腐食によるコンクリートのひび割れや錆汁などの変状が構造物の表面に現れるようになる。しかし、このような状態になってから塩害を発見し、対策を検討しても、内部の鉄筋の腐食程度が大きくなっており、かつ、多量の塩化物イオンが蓄積しているため、効果的な補修を行うことは困難である。

鉄筋の腐食は、塩害に限らず、コンクリートの中性化が進行した場合や、アルカリ骨材反応などによりかぶりコンクリート部に著しいひび割れが生じた場合にも懸念される。このため、構造物中の鉄筋の腐食状態を、外部から簡易に調査することができる試験・調査方法への需要は高い。

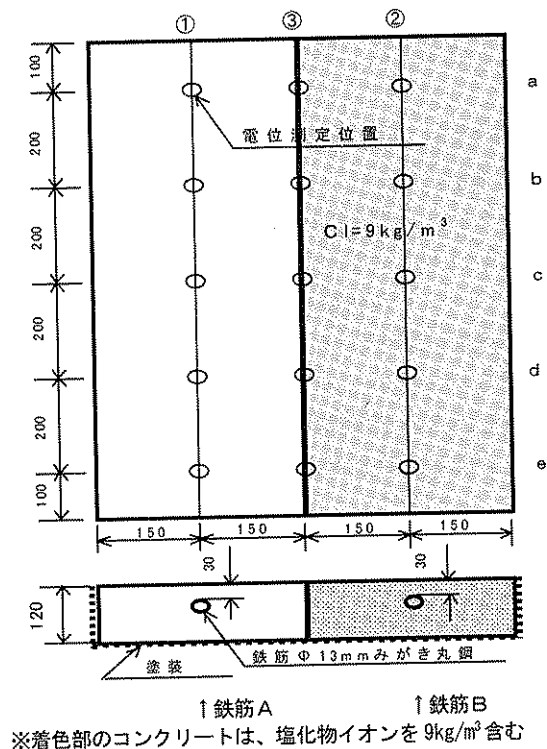


図-4 実験に使用した供試体の形状

そこで、本課題では、鉄筋の腐食を構造物表面から診断する手法として、既往の研究事例が多い自然電位法と分極抵抗法について、実験を行って検討した。

5.2 検討方法

塩害を受けたコンクリート構造物を模擬するため、練混ぜ時に NaCl を混入するなどしたコンクリートを使用して4種類の供試体を作成し、鉄筋の自然電位および分極抵抗、コンクリートの電気抵抗などを測定した。測定には、用いる電極の種類などが異なる複数の装置を用意して、測定者や測定装置の違いが測定結果に与える影響も検討した。

本報では、これらのうち図-4に示すように腐食環境にある鉄筋と腐食しない環境にある鉄筋を平行に配置した供試体での検討例を紹介する。

5.3 複数の鉄筋が存在する場合の自然電位の測定に関する検討結果

鉄筋の自然電位の測定は、測定対象の鉄筋と測定装置を結線して行う(図-5、写真-1)。測定位置は、測定対象の鉄筋の直上とするのが原則である。しかし、鉄筋の直上にない位置で自然電位を測定する場合もある。このような場合の自然電位の測定結果の解釈は必ずしも明らかにされていない。また、

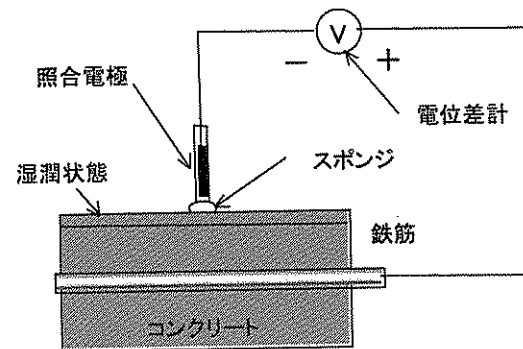


図-5 鉄筋の自然電位の測定方法

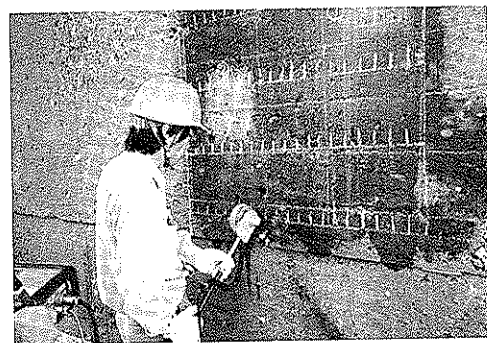


写真-1 実構造物での鉄筋の自然電位測定状況

複数の鉄筋が隣接して存在する場合の影響についても、明確ではない。

そこで、図-4の供試体を用いた測定では、まず、鉄筋Aおよび鉄筋Bの自然電位を、それぞれ測線①～③の3箇所で測定し、測定位置の影響を見た。次に、実構造物中で全ての鉄筋が電氣的に短絡している状態を模擬するため、測定装置と鉄筋A・Bの全てを接続し、測線①～③の3箇所で自然電位の測定を行った。

測定結果を図-6に示す。鉄筋A（非腐食環境）のみに接続してその自然電位を測定した結果は、 $-220 \sim -280\text{mV}$ (vsCSE) となっていて、測定位置によってわずかに差が生じている。一方、鉄筋B（腐食環境）に接続して測定した場合は、 $-420 \sim -480\text{mV}$ (vsCSE) となった。これらの自然電位は、別の供試体で同様な環境下の鉄筋の自然電位を個々に測定した結果とおおむね一致している。ただし、測定位置と鉄筋の位置関係について考えると、鉄筋Aおよび鉄筋Bとも、鉄筋直上で測定した値と鉄筋から離れた位置で測定した値には 60mV 程度の差が生じていて、鉄筋直上で測定した値の方が、他の供試体で測定した値に近くなっている。したがって、自然電位の概略値を得るには、測定対象となる鉄筋から離れた地点で測定しても良いが、より正確な測定結果を得るためには、測定対象となる鉄筋直上で測定することが原則であるといえる。

次に、A鉄筋とB鉄筋を短絡させた場合、B鉄筋の直上の自然電位は短絡によりわずかに貴な方向にシフトし、A鉄筋直上の自然電位は大幅に卑な方向にシフトした。このような電位のシフトが生じた理由は、短絡によりマクロセルが形成され、分極が生じたためであると考えられる。ここで、塩分を含ま

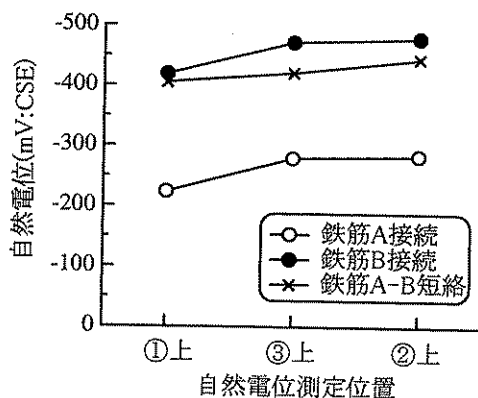


図-6 自然電位の測定結果

ない鉄筋A側の方が分極抵抗が大きかったため、分極による電位の変動が大きかったと考えられる。実構造物では鉄筋は互いに接しており、電氣的に導通のある状態に置かれているものと考えられる。従って、マクロセルの形成状況によっては、カソード側となり腐食しない鉄筋でも、分極の影響により卑な電位が測定される場合があると考えられる。

5.4 その他の検討結果

他の供試体での測定から明らかになったことなども含め、一連の実験から明らかになった結果としては、他に以下のものがある。

- ①コンクリート中の含有塩分量の大小による鉄筋の腐食傾向の差は、自然電位を測定することにより明確に区別することができる。
- ②照合電極を変えても、キャリブレーションと換算を適切に行えば、照合電極の違いによる差はほとんど認められない。
- ③測定面の湿潤状態が異なると、得られる自然電位の値に差が生じる場合がある。今回の実験では、塩分を含まない供試体でこの影響が大きかった。正確な自然電位を得るには、少なくとも30分程度の湿潤時間が必要になると思われる。

これらの成果は、後で紹介する「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」に取り入れた。

なお、実験結果の詳細は、共同研究報告書など¹²⁾としてとりまとめ、学会での発表も行った¹³⁾。

6. 反発度法に関する検討

6.1 検討の目的

コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋を保護するかぶりコンクリートの品質が重要である。しかし、実構造物の点検・調査を行う際に、そのたびコア試料を採取してコンクリートの品質を確認した場合、試料の採取そのものが構造物を傷つけ、耐久性上の弱点を生じさせるおそれがある。

一方、非破壊でかぶりコンクリートの品質（強度）を調査するための調査方法として、リバウンドハンマーを用いたコンクリートの反発度測定（写真-2）がある（以下、反発度法）。反発度法によるコンクリート強度の推定は、種々の要因の影響を受け推定の誤差が大きいという問題がありながらも、実施が容易であることから、強度推定構造物調査の現場でこれまで広く用いられてきた実績がある。また、2001

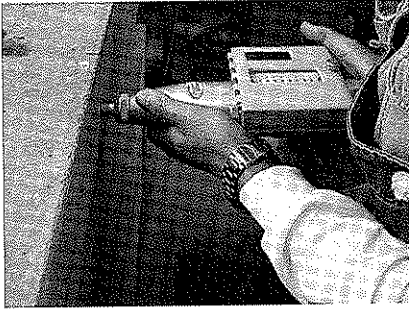


写真-2 コンクリートの反発度測定状況

年4月から、国土交通省が建設する新設構造物の一部を対象に、竣工検査の項目の一つとして取り入れられている¹⁴⁾。

そこで、本課題では、反発度法によるコンクリート品質（強度）推定結果の誤差要因を明確にするため、測定装置の較正・コンクリート表面の含水状態の影響・コンクリートの材齢などの要因について、実験を行って検討した。なお、測定装置は、テストハンマーまたはシュミットハンマーと標記される場合も多く見られるが、本報ではJIS A 1155で用いられている用語のリバウンドハンマーとした。

6.2 検討方法

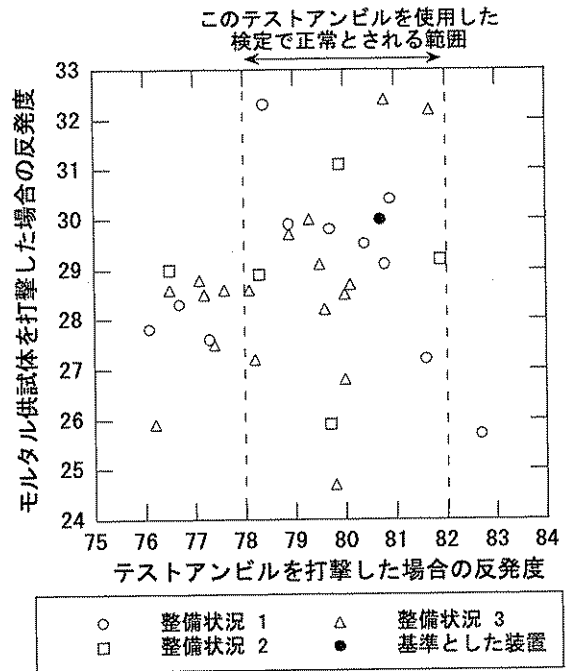
本報では、特に測定装置（リバウンドハンマー）の較正に関して検討した結果を紹介する。

まず、実際に構造物の点検・調査の現場で用いられている測定装置の個体差を調査するため、41機の装置を収集し、装置の較正に用いる検定器（テストアンビル）などを打撃して、測定装置による測定結果の違いを見た。この実験結果は、次節で紹介するが、測定装置の個体差がかなり大きいことがわかった。

そこで、コンクリートと同程度の反発度が得られる新たな検定器（以下、低反発度型アンビル）が必要であると考えた。そこで、測定装置の製造者らに、低反発度型アンビルの試作を依頼し、これを用いてリバウンドハンマーの個体差を較正する方法の有効性を検討した。

6.3 測定装置の個体差に関する実験

反発度の測定に用いるリバウンドハンマーは、使用を繰り返すと、内部の作動部に塵芥が付着したり、潤滑油が劣化したりすることなどの影響から、その性能がわずかながらに変化する。したがって、過度に使用されたリバウンドハンマーでは、正しい反発度を測定することができない¹⁵⁾。そこで、定期的に



※整備状況1は、この実験の直前に点検された記録がある装置、整備状況2は、何らかの点検記録があった装置、整備状況3は、点検記録等が全くない装置である。なお、整備状況1の装置の内、特に信頼できる整備者が整備した装置1機を、基準として他と比較した。

図-7 テストアンビルとモルタル供試体の反発度測定結果の比較

状態を点検し、必要に応じて分解清掃や部品の交換を行うことが必要になる。

しかしながら、測定装置の点検の重要性については、これまで十分に認識されているとはいえない状況であった。そこで、実際に使用されている多数のリバウンドハンマーを収集し、それぞれの装置を用いたときに得られる反発度の比較を行った。様々な状態の装置を用意するため、レディーミクストコンクリート工場からの借用（16機）、レンタル業を営む企業からの賃借（9機）などを行った結果、41機の装置を収集することができた。

収集したリバウンドハンマーを用いて、テストアンビル（5種類）や鋼板、モルタル供試体を打撃し、測定装置による測定結果の違いを見た。このうち、代表的なテストアンビルとモルタル供試体を打撃した結果を比較して図-7に示す。

リバウンドハンマーの点検方法として一般的なのは、テストアンビルを打撃したときに、その反発度が公称反発度（個々のテストアンビルに付与されている値で、適正なリバウンドハンマーを用いてそのテストアンビルを打撃するとこの値が測定されるこ

とを指す) ± 2 の範囲にあることを確認することである。しかし、この測定結果から、以下のことがわかった。

- ①賃借した9機のうち2機は、今回の試験の前に整備・点検されているにもかかわらず、反発度が 80 ± 2 の範囲を外れていた。
- ②上記以外にも、15機が反発度 80 ± 2 の範囲を外れていた。

また、テストアンピルの打撃結果とモルタル供試体の打撃結果を比較すると、次のことがわかった。

- ③テストアンピルを打撃したときに反発度が 80 ± 2 の範囲に入っているリバウンドハンマーでも、モルタル供試体を打撃したときの反発度には、最大で8の開きがある。

これらの結果から、適切な測定結果が得られないリバウンドハンマーが、実建造物の点検・調査などに用いられているおそれがあることが明らかになった。テストアンピルの打撃結果から適切に調整されていると見なされる装置でも、モルタル供試体の測定結果が大きく異なっている場合があるのは、リバウンドハンマーの使用者らが、独自に整備した結果、パネや潤滑油等など内部の状態が購入時と異なっており、反発度80の近辺では、製造直後の装置と同様の結果が得られるが、モルタルを打撃した場合には異なる挙動をしているものと考えた。

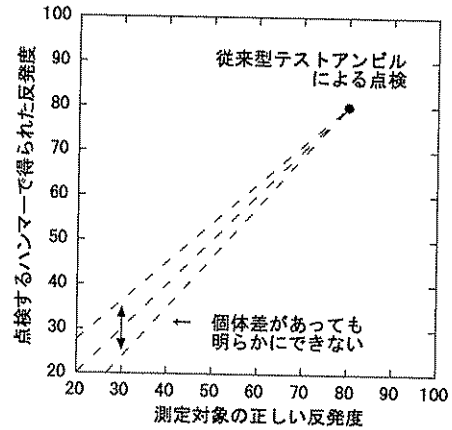
6. 4 低反発度型アンピルに関する実験

前節に示した検討の結果から、リバウンドハンマーの点検には、従来から用いられているテストアンピル(従来型アンピル)に加え、打撃した際にコンクリートとほぼ同等の反発度(30~50程度)が得られる新たな検定器(以下、低反発度型アンピル)を開発し、これを併用することが必要であると考えた(図-8)。

測定装置の製造者らに低反発度型アンピルを提案したところ、8台の試作品の提供を得ることができた。これらと従来型アンピル、コンクリート供試体などを25種類の測定面を用意し、15台のリバウンドハンマーでこれらの反発度を測定して、低反発度型アンピルの有効性を検討した(写真-3)。

本報では、実験結果の詳細は略すが、検討の結果、低反発度型アンピルの反発度を測定した結果とコンクリート面での反発度測定結果の相関関係は、従来型アンピルより優れており、低反発度型アンピルを用いることで測定装置の個体差をよりよく把握することができることがわかった¹⁶⁾。

【従来から行われている点検】



【低反発度型アンピルを併用した点検】

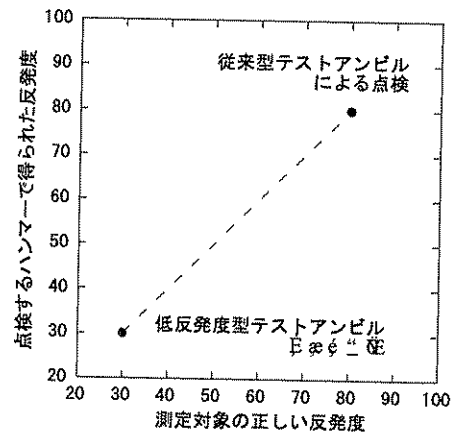
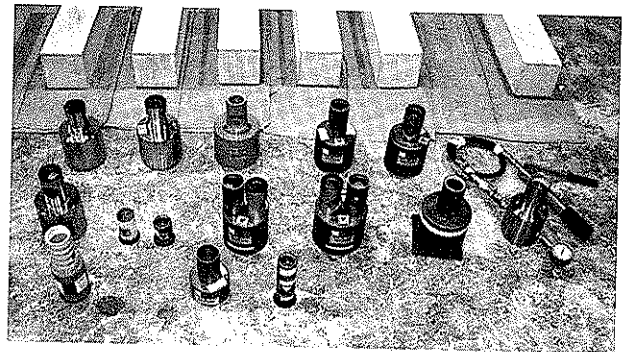


図-8 従来からの点検(上)と低反発度型アンピルを併用した点検(下)のイメージ



※中段の7台および上段右端1台が、低反発度型アンピルである。上段左端から4台は、従来型アンピル。他は携帯型のアンピル(反発度は両者の中間程度)。写真の上部に見えているのは比較に用いたコンクリート供試体の一種である。

写真-3 実験に使用したテストアンピル

6. 5 その他の検討結果

反発度法に関する一連の検討から得られた知見としては、他に次のものがある。

①コンクリートの含水状態が一定であれば、材齢が異なっても、反発度とコンクリート強度の関係は大きくは異なることがわかった。

②既往の強度推定式には、含水状態が大きく異なる供試体の試験結果を元に検討されているという問題点があることを明らかにした。

③①②から、コンクリートの圧縮強度を推定する際に、材齢に応じた一定の係数（材齢係数）を乗ずる方法には問題があることを明らかにした。

④コンクリートの含水状態が一定であれば、配合が異なっても、反発度とコンクリート強度の関係は大きくは異なることがわかった。

これらの実験結果は、共同研究報告書¹⁷⁾としてとりまとめたほか、学会発表等も行った^{18) 19) 20) 21) 22)}。

反発度法に関する一連の検討結果は、2003年5月に制定されたJIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」の作成の際にも活用された。また、先に述べた国土交通省の新設構造物検査を支援すべく資料「テストハンマーによる強度推定調査の6つのポイント」「テストハンマーによる強度推定調査 FAQ集」^{23) 24)}を作成・配布した。これらの資料は、土木研究所ホームページに掲載しているが、2002年2月から2004年の3月までに、あわせて約2万件のアクセスがあるなど、広く活用されている。

7. 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法に関する検討

7.1 検討の目的

先の5.1節でも述べたように、塩害のおそれがある構造物では、塩害による鉄筋の腐食が進行した後には効果的な補修を行うのは困難である。このため、コンクリート中に含まれる塩化物イオンの量を測定して、塩害による鉄筋の腐食が生じる前にコンクリート塗装などの予防的な対策をとることが有効である。

しかし、従来から広く用いられている塩化物イオンの試験方法（JCI-SC4）では、コア試料（φ100mm程度のコアを採取して、これを149μmのふるいを全通するまで粉砕し試料としたもの）の使用が求められており、試料の調整に手間が掛かること、試料採取のために構造物からコア試料を採取する場合、試料の採取そのものが構造物を傷つけ、耐久性上の弱点を生じさせるおそれがあること、といった問題点があった。

そこで、本課題では、試料採取が構造物に与える

影響を小さくし、試料調整の手間を減らすため、コンクリートドリルで削孔した際に生じる粉末（以下、ドリル粉末）を使用して塩化物イオンの試験を行う方法（写真-4）について検討した。

7.2 検討方法

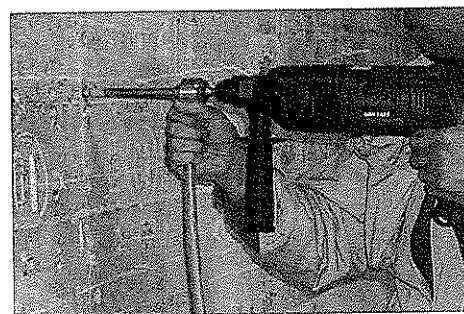
ドリル粉末を塩化物イオン試験の試料とする場合、コア試料を用いる従来の試験方法と比較して、①採取箇所が局所的になること、②（通常は）試料量が少なくなること、③試料の粒度が異なるおそれがあること、などの理由から、試験結果の誤差が大きくなるおそれがある。このため、既往の研究でも、実構造物の同一箇所、ドリル粉末とコア試料を採取して、塩化物イオンの試験を行うなどの検討が行われている。しかし、このような研究手法では、塩化物イオンの試験そのものが有する測定誤差と、試料をドリル粉末とする事による誤差の増大を分離して検討することが困難である。したがって、ドリル粉末を使用した際の長所（試験の簡易化）と短所（試験結果の誤差の増加）を適切に判断することができない。

そこで、本課題では、複数の方法で多数回採取した試料を用いて、硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験を行うなどして、塩化物イオンの試験で避けることができない誤差や、ドリル粉末を用いた試験の適用性について検討した。実験結果の一部を次節以降に示す。

7.3 試験そのものの誤差に関する実験

まず、試料の採取方法に関わらず、塩化物イオンの試験で生じる誤差を検討するため、均質な試料を用いて実験を行った。

この実験では、練混ぜ水に塩化ナトリウムを混入して作成したコンクリート供試体からコアを採取・粉砕し、十分に混合することで、一定の塩化物イオ



※粉塵を回収する機能の付いた中空のビットを使用した

写真-4 ドリル粉末の採取状況

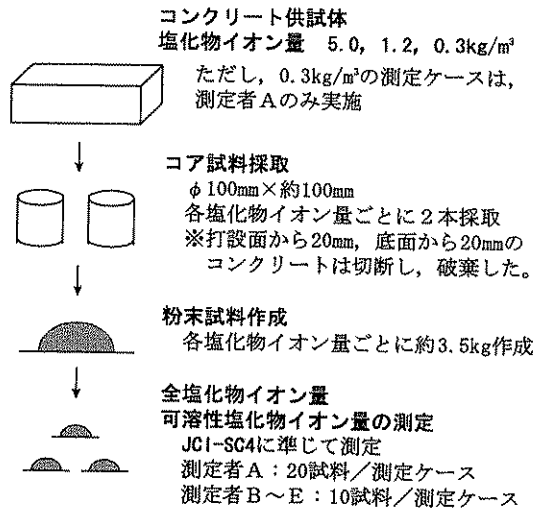


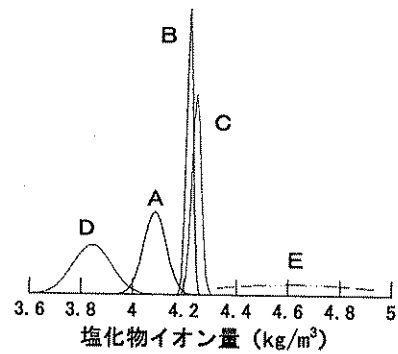
図-9 試験そのものの誤差に関する実験方法

ン量を含むと判断できる多量の試料を得た。次に、この粉末試料の山から約40gの試料を60個分取し、A～Eの5者にJCI-SC4に準じた全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量の測定を依頼した(図-9)。

A～Eの試験結果から、測定者ごとの測定結果の平均値や分散などを算出して検討した。測定結果から作成した確率密度分布の一例を図-10に示す。全塩化物イオン量の測定結果に着目すると、測定結果に個人差が見られ、E、BとC、A、Dの順に測定された塩化物イオン量が大きかった。BおよびCの測定結果とDやEの測定結果は1割程度異なっていた。一方、同一の測定者が複数回測定した場合のばらつきは、測定者が異なる場合と比較すると小さかった。各測定ケースでの変動係数はほとんどの場合で5%以下であり、1%程度の場合もあった。したがって、全塩化物イオン量測定では、塩化物イオンの抽出過程や濃度の定量過程における偶然誤差は小さいが、測定結果には10%程度の個人差があるものと考えられる。

一方、可溶性塩化物イオン量の測定結果に着目すると、測定結果の個人差は、全塩化物イオン量の場合ほど顕著ではなかった。また、測定者による測定結果の大小関係は、全塩化物イオン量の場合と異なっていた。抽出した試料溶液の塩化物イオン濃度を定量する操作は、全塩化物イオンの場合も可溶性塩化物イオンの場合も同じなので、測定結果に個人差が生じた原因は、塩化物イオンの抽出過程にあるものと推測される。

【5.0kg/m³混入、全塩化物イオン量】



【1.2kg/m³混入、可溶性塩化物イオン量】

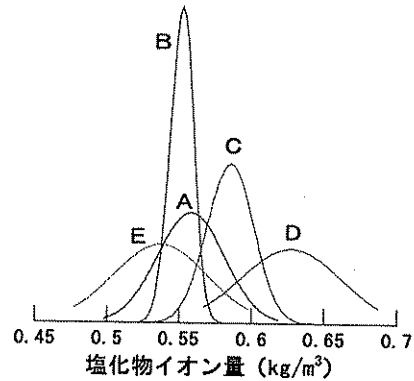


図-10 均一試料の塩化物イオン試験結果から求めた確率密度分布

表-5 ドリル粉末を使用した場合の試験結果

実験 シリーズ	配合時の計画 塩化物イオン量 (kg/m ³)	測定結果		骨材量による補正
		平均値 (kg/m ³)	変動係数 (%)	
A	0.3	0.40	14.4	なし
	1.2	1.09	20.5	
B	5.0	4.06	11.6	
		4.37	12.9	
		3.80	6.9	あり

※いずれのケースも、10回試験を繰返した。

7.4 ドリル粉末を用いることに起因した誤差に関する実験

次に、均質な塩化物イオンを含むように作成したコンクリート供試体から、ドリル粉末を採取し、塩化物イオンの試験を繰り返して、ドリル粉末を試料とした場合の測定結果のばらつきを見た。

ドリル粉末はφ14.5mmのコンクリートドリルを用いて、一試料あたり5～6gを採取し、そのまま試料として用いた。採取時には、供試体表面のレイタンス等の影響を除くため、採取箇所表面からの深さを一定とするなど配慮した。また、一部の試験

ケースでは、土木学会基準案²⁵⁾による骨材量の測定を行い、ここの試料に含まれる骨材成分の多少による塩化物イオンの試験結果の補正を行った。

試験結果の平均値および変動係数を表-5に示す。なお、これらの試験はいずれも、前節の測定者Aが実施したものである。変動係数は、試験ケースによって異なるものの、おおよそ10~20%の範囲にあり、均一な試料を用いた場合よりも大きい。一方、試料に含まれる骨材成分の測定を行うと、試験結果の変動係数がおおよそ半分と小さくなった。

これらの結果から、ドリル粉末を用いた場合、試料の採取量が少なくなり、各試料に含まれる骨材成分の割合が変動することなどのため、塩化物イオンの試験結果がばらつくことがわかった。また、これに対しては、試料に含まれる骨材成分の測定を行って試験結果を補正する方法が有効であることが確認された。しかし、骨材量の測定には、試料を高温で熱するなどの作業が必要となり、試験の簡易さという観点からは、ドリル粉末を使用することのメリットが失われる。そこで、状況に応じた試験方法の使い分けが必要であると考えられる。

7.5 その他の試験結果

前節、前々節で紹介した以外にも、同様な実験をいくつか行って検討した^{26) 27) 28) 29)}。様々な実験の結果を総合的に勘案してとりまとめると、本研究で得られた知見は、以下通りである。

- ①塩化物イオンの測定結果は、測定者により±10%程度の差が生じる。
- ②①の測定者による差は、試料溶液を抽出する際に生じている可能性が高い。
- ③ドリル粉末を用いた場合でも、塩化物イオンの試験結果の平均では、コア試料など従来の試料採取法と同等であった。
- ④ドリル粉末を用いる場合など、試料の採取量を小さくすると、試験結果のばらつきが大きくなる。具体的には、ばらつきを考慮しなくてもいいほど多量の試料を採取し40gの試料を試験した場合、コア試料など100g程度の試料を調整し40gの試料を試験した場合、5~10g程度の試料を採取しそれを試験した場合で、変動係数の平均値はそれぞれ4%、7%、13%程度となった。
- ⑤5~10gのドリル粉末を試料とする場合でも、資料に含まれる骨材量の補正を行うことで、コア試料を用いた試験と同程度の精度が得られた。

8. ひび割れが鉄筋の腐食に与える影響に関する検討

8.1 検討の目的

かぶりコンクリート部にひび割れが生じると、外部から、塩化物イオンや二酸化炭素など、塩害やコンクリートの中性化による劣化の原因となる物質が侵入しやすくなる。また、酸素など、鉄筋の腐食に必要な物質も供給されやすくなる。したがって、耐久性の高い構造物をつくるにはひび割れを防ぐことが望ましい。

しかし、コンクリートは引張に弱いことや、水和の際に収縮を伴うことから、微細な物まで含めるとひび割れの発生を完全に防ぐのは困難である。また、微細なひび割れであれば、かぶりコンクリートの鉄筋保護性能にはほとんど影響しないことも考えられる。

そこで、本課題では、ひび割れの有無が鉄筋の腐食速度に与える影響を実験により検討した。

8.2 検討方法

本検討では、コンクリートの外部から塩分が供給される場合を想定して、供試体を作成し、ひび割れが鉄筋の腐食に与える影響を見た。

この実験に用いた供試体は100×100×400mmの大きさで、内部にかぶりが15mmとなるようにD10鉄筋を1本埋め込んだ。供試体は、水セメント比が異なる3種類を作成した。材齢14日までの養生後、載荷によりこれらの供試体の中央部に0.2mmまたは0.5mmを目標としてひび割れを導入した。供試体の腐食促進試験は、材齢65日から開始した。

供試体の作成後は、「JCI-SC3 塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—乾湿繰返し法—」を参考に、各供試体に対して、塩水(NaCl、3%)浸漬、高温多湿環境での保管、室温での乾燥などを繰返して、鉄筋の腐食を促進させた。促進期間中は、鉄筋の腐食状況を評価する目

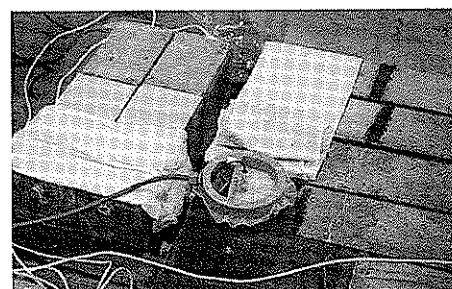


写真-5 ひび割れ供試体の自然電位の測定状況

的で、鉄筋の自然電位を測定した(写真-5)。また、促進試験終了後、供試体を解体し、鉄筋の腐食状況を観察した。

8.3 検討結果

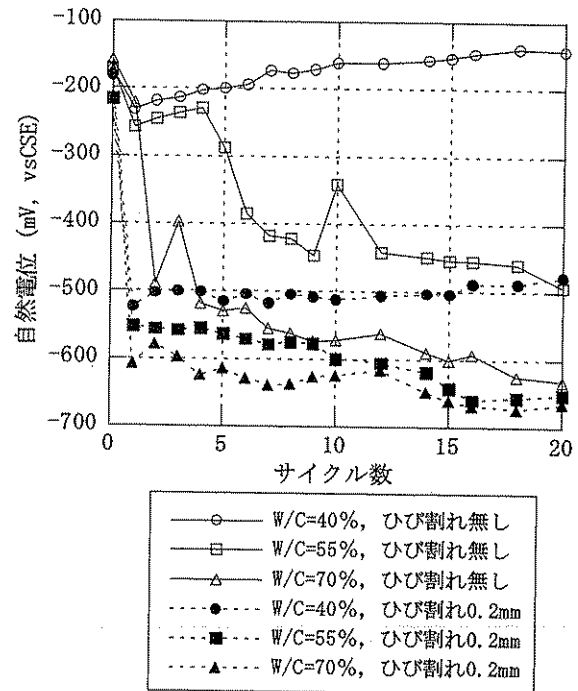
促進試験中の鉄筋の自然電位の測定結果を図-11に示す。ひび割れ無しの供試体の場合、水セメント比によってその傾向が異なり、水セメント比が55%および70%の場合には、促進期間の増加に伴って、自然電位が低下し、鉄筋が腐食環境にあると判定される -350mV (vsCSE) 以下の値となった。これは、塩化物イオンの侵入に伴って、鉄筋が腐食しやすい環境に変化したことを示している。一方、水セメント比が40%の場合には、自然電位の低下は見られなかった。これは、コンクリートの密実性が高く、今回の促進期間中には、鉄筋を腐食させるほどの塩化物イオンが侵入しなかったためと考えられる。

これに対し、供試体中央にひび割れを導入した場合には、コンクリートの品質にかかわらず、1回目の促進サイクルから急激に自然電位が低下した。これは、乾燥した供試体を塩水に浸漬した際にひび割れを通じて容易に塩化物イオンが侵入したためと考えられる。測定された自然電位の値は、いずれの配合でも -350mV (vsCSE) 以下となっていたが、これを更に詳しく見ると、水セメント比が大きいものほど自然電位の値が小さくなる傾向があった。

促進試験後の鉄筋の腐食減少量の測定結果を表-6に示す。水セメント比が40%の場合に着目すると、ひび割れがない供試体では、ほとんど鉄筋が腐食していないが、ひび割れがある場合では、一部に腐食が生じており、ひび割れの有無が鉄筋腐食の発生に影響を与えていた。一方、水セメント比が55%および70%の場合には、ひび割れがない供試体でも、腐食が見られた。しかし、ひび割れがない供試体では腐食箇所が点在しているのに対し、ひび割れを導入した供試体では、いずれの場合でも、ひび割れ位置付近で最も腐食が著しく、ひび割れが鉄筋腐食に影響を与えていることがわかった。なお、本実験の範囲では、ひび割れ幅の大小(0.2mm および 0.5mm)と鉄筋腐食状況の関係は、明確ではなかった。

上記の他にも、供試体作成時にあらかじめ塩化ナトリウムを混入した供試体を作成し、高温多湿環境での保管と室温での乾燥などを繰り返して、鉄筋の腐食を促進させる実験なども行った。これらの結果を総合的に勘案してとりまとめると、本研究で得られた知見は、以下の通りである。

①塩害環境下でひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れが入ると、かぶりコンクリートの鉄筋保護性能が損なわれる。また、ひび割れが無くても、水セメント比が70%程度と大きいと、鉄筋保護性能が低い。このため、ひび割れがない供試体では、水セメント比によって鉄筋の腐食性状(自然電位)が異なるのに対し、ひび割れを有する供試体では、



※ひび割れ無しの供試体は2体用意したが、そのうち1体の試験結果を表示した。

図-11 自然電位測定結果の推移(一部)

表-6 鉄筋の腐食状況

水セメント比 (%)	ひび割れの有無/幅	鉄筋腐食損失質量百分率 (%)
40	無し	0.3
	無し	0.5
	有り/0.2mm	1.2
	有り/0.5mm	1.4
55	無し	1.8
	有り/0.2mm	2.4
	有り/0.5mm	1.8
70	無し	2.1
	無し	1.5
	有り/0.2mm	2.8
	有り/0.5mm	2.3

※水セメント比 40%、ひび割れ無しのケースでは、全く腐食が見られなかった。しかし、試験方法の性質上、若干の質量の減少が見られた。

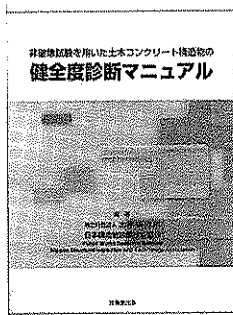
腐食性状に水セメント比による違いがほとんど見られない。

- ②試験ケースによっては、ひび割れを導入した供試体とひび割れのない供試体で、鉄筋の腐食面積率には違いが見られない場合があった。しかし、ひび割れのある供試体では、ひび割れ箇所近傍に腐食が集中し、部分的に著しい腐食が見られることが多かった。すなわち、鉄筋の腐食性状にはひび割れの有無による違いがある。
- ③塩水に浸漬する促進試験の結果では、ひび割れ幅が0.2mmと0.5mmの試験ケースで、腐食性状の違いは認められなかった。

9. 非破壊試験を活用した構造物の点検・調査・診断技術の検討

9.1 検討の目的

4.1節でも述べたように、土木研究所では、「コンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案)」⁹⁾(以下、旧診断マニュアル)などをとりまとめ、従



ISBN4-7655-1658-X C3051

図-12 非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル

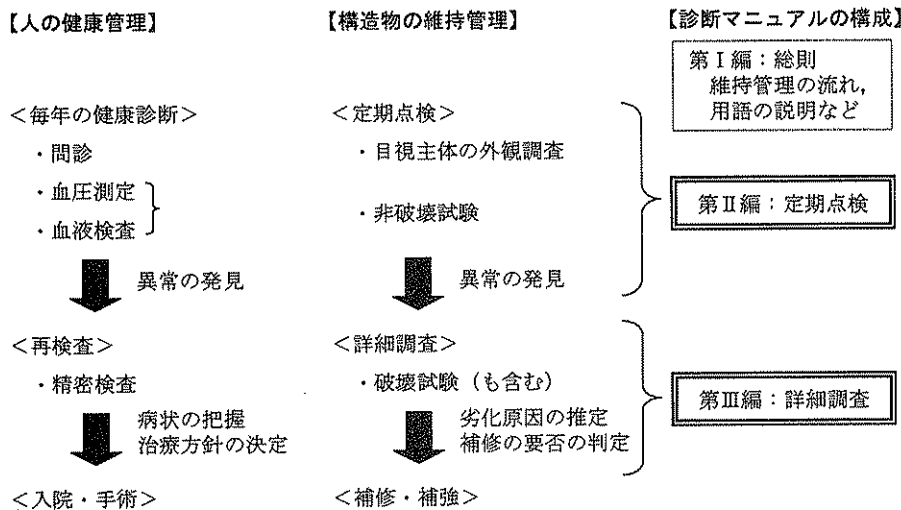


図-13 診断マニュアルの構成

来から行われている調査手法と非破壊試験等を適切に組み合わせて、構造物の点検・調査・診断等を行う方法を提案してきた。しかし、その後も種々の試験・調査方法に関する研究を継続的に行っており、また、学協会等でも様々な研究結果が報告されていることから、新たな知見を取り入れた点検・調査・診断の手引きを作成する必要があるものと考えた。

そこで、改めて日本構造物診断技術協会との共同研究を行い、旧診断マニュアルを改訂した2002年度版の“診断マニュアル”を作成した³⁰⁾。この共同研究報告書は、若干の編集が加えられた後、「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」(以下、診断マニュアル、図-12)として技報堂出版社から出版された³¹⁾。

9.2 診断マニュアルの概要

近年、他の学協会等からもコンクリート構造物を調査・診断するための参考書やマニュアル等が出版されている。こうした中で本診断マニュアルの作成にあたっては、本稿の「まえがき」で記したような研究の目的を明確にし、現場で真に使いやすいマニュアルとすべく、以下の特長を持たせた。

①一般的な調査方法に限定

構造物管理者からの相談で多いのは、まず、何を調査したらいいか、どの方法が良いか、といった質問である。調査項目をむやみに増やしても、それに対応して構造物の維持管理に役立つデータが集まるとは限らず、調査費用だけが增加することとなりかねない。

そこで、本診断マニュアルでは、毎年健康診断を

受診するように構造物の健全度を定期的に簡易に把握することを主目的とした“定期点検”の場面と、定期点検でなんらかの異常が見られた構造物を対象に行う“詳細調査”の場面を想定し、“定番”ともいえる調査項目・調査方法を紹介した図-13。

②非破壊試験を活用

診断マニュアルには、非破壊試験に限ったものではなく、コンクリート構造物の健全度を診断するにあたって必要な調査項目と調査

方法を全般的に紹介している。しかし、点検や調査の目的が果たせる限りは、なるべく簡易で構造物を傷つけずに実施できる調査方法が望ましい。

そこで、調査による構造物への影響を軽減するため、非破壊試験を活用する方法について、記述を充実させた。また、資料編では、限られた試料を用いて種々の試験を行う例を紹介した。

③評価方法や精度、調査の注意点に言及

試験や調査の結果を、構造物の維持管理に反映させるには、これを評価するための基準が不可欠である。そこで、評価方法が確立されていない調査方法についても、これまでの研究成果を元に、現状で妥当と考えられる方法を提案した。また、本報の4～7章で紹介したような検討の結果を活用し、これまで十分な報告のない調査の留意点や調査結果の誤差についても紹介した。

10. 診断カルテや診断結果の活用に関する検討

10.1 検討の目的

構造物の管理者が、構造物の点検・調査・診断などで得られた情報を活用し、構造物の維持管理を効果的・効率的に行うためには、点検・調査の結果を適切に記録し、必要に応じて劣化予測などを行い、将来の維持管理の計画に反映させる必要がある。しかし、維持管理の現場では、建設時の設計図やコンクリートの配合などの基本的な情報すらも、十分に

は残されていない場合も多いのが実情である。

そこで、本課題では、“構造物の劣化実態の調査”や“非破壊試験を活用した構造物の点検・調査・診断技術の検討”での検討を進めて、点検・調査結果を記録する記録フォーマット（診断カルテ）の検討を行った。また、診断カルテへの入力を支援し、かつ複数の点検・調査結果を保管できる維持管理支援ソフトを作成した。

10.2 点検・調査結果の記録フォーマットに関する検討

土木研究所では、表-7のように過去に様々な目的で実構造部の調査を行ったことがある。そこで、これらの調査で共通する調査項目を比較して、記録方法を検討した。検討例を表-8に示す。

次に、構造物の設計図や劣化箇所の写真などの記録方法について検討した。これらのデータをデータベースに格納する際には、試験結果等のテキストデータと同じファイルに保管する方法と、データベース本体とは別個にファイルを作成した上で、そのファイルとデータベースの該当箇所に関連づける方法があると考えられる（図-14）。

一方で、既存の構造物の調査データを見ると、構造物によって情報量が大きく異なることがわかった。例えば、表-7の調査Eでは、調査結果に添付された写真が全景写真1枚のみの場合もあれば、100枚前後の写真集が添付されていた場合もあった。これ

表-7 実構造物調査の実施例

記号	調査名 ()内は 実施年	概 要	特 徴					
			多数の 構造物 を調査	特定の 構造物 を調査	変状全 般を調 査	特定の劣 化原因を 想定	構造物 全体を 調査	構造物 の一部 を調査
A	塩害道路橋梁調査 (1982)	海岸部に建設されたコンクリート橋920橋に対する全国調査	○			○	○	
B	塩害実態調査 (1985)	橋梁、水門他4000件以上の構造物に対するアンケート調査とそのうち76件に対する詳細調査	○			○	○	○
C	アルカリ骨材反応実態調査 (1985)	橋梁、水門他4000件以上の構造物に対するアンケート調査とそのうち92件に対する現地実態調査	○			○	○	○
D	補修事例集 (1988ごろ)	過去に補修が行われた構造物36件における補修工法、補修後の経過等に関する調査	○		○		○	
E	健全度実態調査 (1999)	橋梁、擁壁、カルバート類、水門等約2000件の構造物の目視調査とそのうち152件に対するコア試料調査	○		○		○	○
F	非破壊試験による健全度調査 (2000)	塩害を受け廃棄される橋梁の一部(3橋中の5箇所、1m×1m程度/箇所)を対象に各種非破壊試験および鉄筋のはつり調査を実施		○		○		○

表-8 各調査における調査票の比較

調査項目	調査様式 ^{※1}			備考・考察
	土木学会様式および調査E	調査A	調査B	
コンクリートの設計基準強度	() N/mm ²	() kgf/cm ² ^{※2}	質問が存在しない。	調査Eの際には、kgf/cm ² 単位での回答も目立った。
海岸からの距離	・海上 ・海岸沿い ・海岸から () km	・海上 ・海岸沿い ・海岸線から () m	・0~200m ・200m~500m ・500m~1km ・(以下略)	海岸線からの距離がある程度以上大きい場合には、これを調べて記入する必要がない。このような場合に対応する選択肢を設けるのがよい。
凍結防止剤の使用	・無 ・有 () 年間 () 日/年 程度	質問が存在しない。関連する質問として 日最低気温0℃以下 約 () 日 () 月 () 旬~ () 月 () 旬	・有 ・無	使用無しの場合は年間使用日数が0になるので、選択肢か年間使用日数のいずれかでよい。ただし、調査Eの際には、使用日数は不明との回答も目立った。
構造物形式	自由記入	上部構造については以下の通り。 ^{※3} 形式(1) ・RC ・プレテンPC ・ポステンPC ・その他 () 形式(2) ・単純桁 ・連続桁 ・片持ばり ・その他 () 断面 ・T桁 ・箱桁 ・スラブ ・その他 ()	調査Aと同じ。 ^{※4}	自由記入にすると、同じ構造でも記入者によって回答が異なってくるおそれがある。調査票の作成が困難であるが、調査する構造物の種類を特定しない場合でも、想定される構造形式を選択する記入方法が望ましい。

※1 調査様式を示した箇所で、文頭に“.”がある場合は、列挙した選択肢から選ぶ様式である。また () は、自由記入欄を表す(特定の書式は定められていない)。

※2 主桁、横桁、橋台、橋脚の4種類についてそれぞれ記入する。

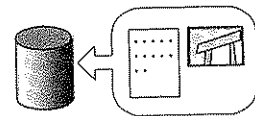
※3 橋台、橋脚は、自由に記入する様式となっている。

※4 構造物の種類により調査票が若干異なり、水門などについては、構造形式に関する質問がない。

は、構造物によってその規模や劣化の程度が様々であり、記録しておくべき情報の量が大きく異なるためである。そこで、試作データベースでは、調査や構造物ごとに写真や図面を格納した写真帳を作成し、テキストデータを格納したデータベース本体とは分離して管理することにした。

ところで、構造物の調査結果には、数多くの写真・図面データが添付されている場合がある。しかし、その全てをデータベースに格納するのはその作業の手間や閲覧性の面から合理的ではない。そこで、既往の調査事例を参考に、一般的な構造物調査の際に記録しておくべき写真・図面データを収録した写真帳の見本を作成した(図-15)。その結果、約500kBの容量で、一つの構造物の調査結果を記録することができることが分かった。

【全部のデータを一つのファイルとする場合】



【写真・図面等のデータを分割する場合】

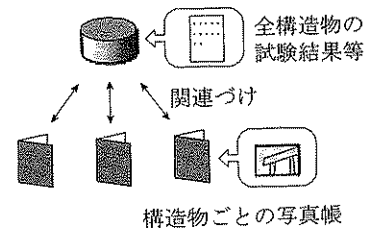


図-14 写真・図面データの整理方法

11. 維持管理計画戦略に関する検討

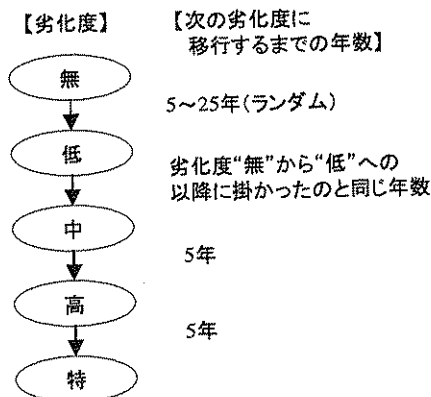
11.1 検討目的

前章や前々章で紹介した診断マニュアルや診断マニュアルを活用するための維持管理支援ソフトを活用して維持管理の計画を立てる手法を示すため、および、維持管理計画の策定時の留意点などを検討するため、経年により劣化するコンクリート構造物群を想定し、ケーススタディを行った。本報では、塩害の影響を受ける架空の構造物群を想定し、維持管理手法の違いによる維持管理費用のかかり方の違いを検討した例を示す。

11.2 検討方法

(1) 想定する構造物群

各構造物は、外部からの塩分の飛来により、図-18のように劣化するものと仮定する。すなわち、塩分がコンクリート中に侵入し、鉄筋が腐食しうる環境となるまでに要する期間は各構造物で異なるが、鉄筋の腐食が始まってからの劣化の速度は各構造物



※劣化度については、表-9参照。

図-18 構造物の劣化速度の仮定

表-9 構造物の劣化度とその状態

劣化度	構造物の状態
特	コンクリート中の鋼材は、腐食しており、かつ腐食の程度も著しいと考えられる状態。
高	コンクリート中の鋼材は、腐食していると考えてまず間違いのない状態。
中	場合によっては、コンクリート中の鋼材の腐食が始まっている可能性もある状態。
低	コンクリート中の鋼材は、腐食していないと考えるのが妥当であるが、劣化因子の浸透等が見られ、今後の劣化の可能性について注意を要する状態。
無	コンクリート中の鋼材は、腐食していないと考えるのが妥当で、かつ今後すぐには劣化が始まることは考えにくい状態。

とも同じで、かつ比較的早期に劣化するものとする。

また、維持管理する構造物群は、橋梁20橋とし、1966年から1985年までの間に毎年1橋ずつ建設されたものとする。表計算ソフトを用いて乱数を作成し、20橋それぞれの劣化速度を定めたところ、20橋は、図-19に示すような推移で劣化するものと計算された。

ここでは、このように仮定した20橋を対象に維持管理を行った場合の、維持管理計画の違いによる費用等の違いを検討する。

(2) 点検及び維持管理費用の仮定

従来からの目視点検では、コンクリート表面に浮きやひび割れ、錆汁などの変状がみられない限り、構造物の塩害の兆候を把握することはできない。そこで、目視点検では、劣化度“高”になるまでは、構造物の劣化度の変化を把握できないものと仮定す

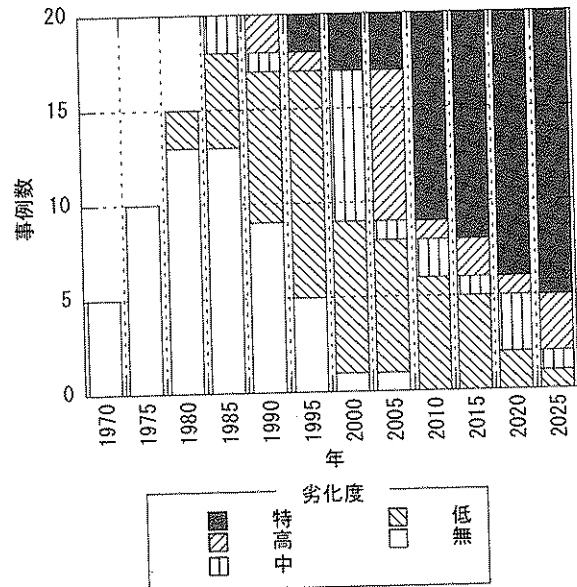


図-19 この検討で想定した構造物の劣化推移

表-10 構造物の劣化度と仮定した維持管理費用

劣化度	維持管理費用 (初期建設費を100とする)
特	補修時に100（電気化学的補修工法を想定）、補修後は保守のため毎年2
高	補修時に60（電気化学的補修工法を想定）、補修後は保守のため毎年2
中	補修時に20（断面修復工法を想定）、補修後は10年ごとに10（表面被覆工法を想定）
低	予防的補修を行う場合は10（表面被覆工法を想定）、その後は10年ごとに10（表面被覆工法を想定）
無	補修を行う必要がない

る。一方、診断マニュアルなどを参考に、目視調査とドリル粉末試料などを用いた塩化物イオンの試験などを併用した定期点検（以下、塩害点検）を実施すると、構造物の劣化度が正確に把握できるものと仮定する。

劣化した構造物の補修費用については、表-10のように仮定する。構造物の点検や補修等にかかる費用は、各構造物が置かれた状況によって大きく異なると考えられるが、ここでは、一定の補修費用がかかるものとする。

(3)維持管理戦略の仮定

維持管理戦略の違いによる維持管理にかかる費用の違いを比較するため、次の5つの維持管理戦略を想定した。

caseA：5年おきに目視点検のみ行う。点検により劣化度“高”以上の構造物が発見された場合、翌年から劣化度の高い順に毎年1橋ずつ補修する。点検時の劣化度が同じ構造物については、竣工年の古いものから補修する。

caseB1：5年おきの目視点検に加え10年おきに塩害点検を行う。点検により劣化度“中”以上の構造物が発見された場合、翌年から劣化度の高い順に毎年1橋ずつ補修する。点検時の劣化度が同じ構造物については、竣工年の古いものから補修する。

caseB2：目視点検と塩害点検を行う。点検により劣化度“中”以上の構造物が発見された場合、劣化予測を行って、最も早期に劣化度“特”になるおそれのあるものから順に毎年1橋ずつ補修する。

caseB3：目視点検と塩害点検を行う。点検により劣化度“中”以上の構造物が発見された場合、劣化予測を行って、最も維持管理費が少なくすむように順序を決め、毎年1橋ずつ補修する。

caseC：目視点検と塩害点検を行う。点検により劣化度“低”以上の構造物が発見された場合、劣化予測を行って、最も早期に劣化度“特”になるおそれのあるものから順に毎年1橋ずつ補修する。

11.3 検討結果

各ケースで想定した維持管理戦略に基づき、維持管理を実施した場合の費用を試算すると、図-20のようになる。

目視点検結果のみを用い、劣化が顕在化してから補修に着手する維持管理戦略(caseA)をとった場合、多くの構造物の劣化が顕在化する2006年以降、急速に維持管理費が増大する試算結果となった。また、構造物の補修が集中するため、劣化度“特”まで劣

化が進行してから補修に着手するまで5年間かかる事例もあった。塩害の場合、劣化が加速度的に進行することから、このように劣化が位置著しい構造物を放置しておく、補修が困難になることも考えられるので、このような維持管理戦略は適当ではない。

塩害点検結果を併用し、劣化度“中”以上のものについて竣工年度順に補修に着手する維持管理戦略(caseB1)をとった場合、caseAよりもやや早期に補修に着手することになる。このため、2003~2009年の期間では、caseAよりも累計の維持管理費用が大きくなっている。しかし、劣化度“中”の段階で補修した構造物は、劣化度“高”となった後で補修した構造物より、その後の維持管理費が少なくすむことから、その後の維持管理費の増大はcaseAよりも抑制される。なお、この維持管理戦略をとった場合も、補修順の関係で劣化度“特”の段階まで劣化してしまう構造物がある。

劣化度“中”以上のものについて早期に劣化する構造物から補修に着手する維持管理戦略(caseB2)をとった場合、全ての構造物を劣化度“高”までの段階で補修することができる。しかし、caseB1よりも維持管理費の総額は大きくなる試算結果となった。これは、補修の順番を待つ間に、劣化度“中”の段階から劣化度“高”の段階に劣化が推移した構造物の数が、結果としてcaseB1よりも多くなったためである。

そこで、このように補修の順番待ちの間の劣化進

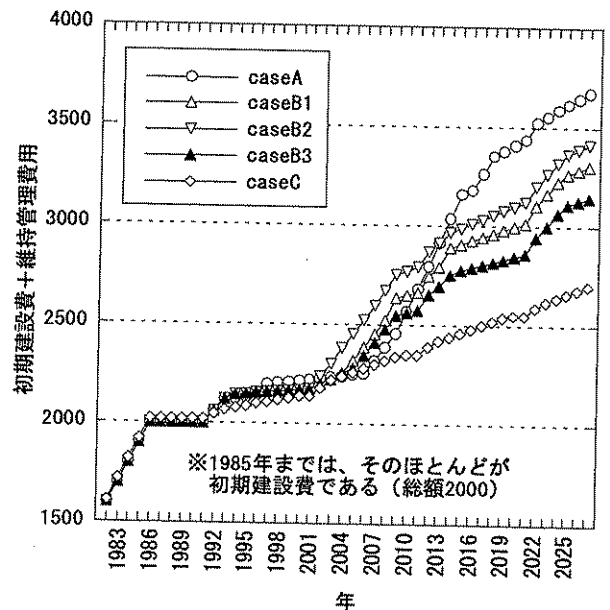


図-20 維持管理戦略と維持管理費用の推定結果

行を考慮し、維持管理費が最小となるような順に補修を行う維持管理戦略 (caseB3) をとった場合、維持管理費は caseB1 と比較して 10%程度小さくなった。

また、劣化度“低”の段階から予防的に対策を行う維持管理戦略 (caseC) をとった場合、全ての構造物に対し、劣化度“低”または“中”の段階で対策をとることができ、維持管理費は、劣化度“中”に達してから補修を検討する caseB1～B3 と比較して、大幅に低下した。

これらの検討結果から次のことが明らかになった。

- ①塩害点検などを行って早期に劣化を発見し、劣化予測を行って対策を行うことが、維持管理費用の低減に有効である。
- ②劣化度の程度が著しくなってから対策を行う維持管理戦略では、構造物の劣化の顕在化が特定の時期に集中した場合に補修が間に合わず、劣化度が高いまま長期間放置される構造物が出るおそれがある。
- ③維持管理費の総額の抑制という観点からは、劣化が著しい構造物から補修するのが必ずしも適当ではない。
- ④補修を待つ間の劣化の推移も考慮して補修計画を立てる必要がある。

12. まとめ

本課題では、コンクリート構造物の維持管理計画を総合的に検討するため、①構造物の劣化実態の調査およびいくつかの実構造物に対する試行的な健全度診断、②鉄筋腐食度、かぶりコンクリートの品質、コンクリート中の塩分量等に関する調査技術の改良、③ひび割れが鉄筋の腐食に与える影響の確認、④非破壊試験等を活用したコンクリート構造物の総合的な健全度診断技術手法のとりまとめ、および活用例の提示、などの研究項目を取り上げ、様々な検討を行ってきた。

その結果、構造物の健全度診断手法については、「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」として上梓するなど、当初計画した以上の成果を得ることができた。また、いくつかの個別の調査技術については、国土交通省の竣工時検査 (テストハンマーを用いた強度推定調査) や維持管理指針 (次期橋梁点検要領、現在作業中) に反映されるなど、有用な成果を得ることができた。

謝辞

旧柵橋に対する健全度診断の実施にあたっては、国土交通省東北地方整備局関東地方整備局常陸河川国道事務所、同日立国道出張所のご協力をいただきました。

旧芦川橋に対する健全度診断の実施にあたっては、国土交通省東北地方整備局秋田河川国道事務所、同本荘国道維持出張所のご協力をいただきました。

旧暮坪陸橋に対する健全度診断の実施にあたっては、国土交通省東北地方整備局酒田河川国道事務所、同鶴岡国道維持出張所のご協力をいただきました。

リバウンドハンマーの性能比較試験を行った際には、全国生コンクリート工業組合連合会から機材貸与についてご協力をいただきました。

この場を借りて、関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 土木コンクリート構造物耐久性検討委員会：「土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言 (解説資料)」、国土交通省のホームページ (<http://www.mlit.go.jp/>) などで公開、2000.3
- 2) 土木研究所：「既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果 -1999年調査結果-」、土木研究所資料、第3854号、2002.3
- 3) 土木研究所：「レディーミクストコンクリートの品質実態調査 - (2)1999年調査結果-」、土木研究所資料、第3838号、2001.11
- 4) 古賀裕久、河野広隆、渡辺博志、田中良樹：「平成11年度実態調査結果に基づく実構造物中のコンクリート品質に関する検討」、セメント・コンクリート論文集、No.55、pp.599-606、2002.2
- 5) 古賀裕久、河野広隆、渡辺博志、田中良樹：「実構造物におけるコンクリートの中性化と塩化物イオンの分布形状に関する検討」、セメント・コンクリート論文集、No.57、pp.301-307、2004.2
- 6) H. Kawano, H. Watanabe, H. Koga: "Nationwide Survey on Soundness of Concrete Structures", 2001 Second International Conference on Engineering Materials, Vol.1, pp.93-100, 2001.7
- 7) 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、pp.58-63、2000.12
- 8) 建設省土木研究所、日本構造物診断技術協会：「コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書 -コンクリート構造物の非破壊検査

- マニュアル」、共同研究報告書、第106号、1994.7
- 9) 建設省土木研究所、日本構造物診断技術協会：「コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書 -コンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案)-」、共同研究報告書、第195号、1998.3
 - 10) 国土交通省土木研究所、日本構造物診断技術協会：「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術の開発に関する共同研究報告書 -実構造物に対する適用結果-」、共同研究報告書、第269号、2001.3
 - 11) 国土交通省土木研究所：「非破壊検査を用いたコンクリート構造物の健全度調査 -旧榊橋・旧芦川橋下部構造調査結果」、土木研究所資料、第3791号、2001.3
 - 12) 土木研究所、日本構造物診断技術協会：「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術の開発に関する共同研究報告書 -自然電位法・分極抵抗法による鉄筋腐食診断-」、共同研究報告書、第294号、2003.11
 - 13) 井川一弘、渡辺博志、渡辺寛：「コンクリート中鋼材の自然電位の測定方法に関する検討」、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.1769-1774、2003.7
 - 14) 古賀裕久、河野広隆：「テストハンマーによるコンクリート強度の推定調査について」、コンクリート工学、Vol.40、No.2、pp.3-7、2002.2
 - 15) 古賀裕久、河野広隆、野永健二、北園英明：「テストハンマーの検定頻度に関する検討」、第56回セメント技術大会講演要旨、pp.100-101、2002.4
 - 16) 古賀裕久、河野広隆、森正嗣、今尾勝治：「テストハンマーの点検方法に関する検討」、コンクリート工学年次論文、Vol.25、No.1、pp.1781-1786、2003.7
 - 17) 土木研究所、日本構造物診断技術協会：「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術の開発に関する共同研究報告書 -反発度法によるコンクリート品質評価-」、共同研究報告書、第287号、2003.3
 - 18) H. Koga, H. Kawano: "New Calibration Method of Rebound Hammer", Structural Faults + Repair - 2003, 2003.7
 - 19) 古賀裕久、河野広隆、福田暁、石井和夫：「テストハンマーの個体差および較正法に関する調査」、コンクリート工学年次論文、Vol.24、No.1、pp.1617-1622、2002.6
 - 20) 古賀裕久、河野広隆：「反発度の算出方法に関する検討」、第56回セメント技術大会講演要旨、pp.102-103、2002.4
 - 21) 古賀裕久、河野広隆、伊藤祐二、川崎克己：「コンクリート強度推定のための反発度測定における乾燥・吸水状態の影響」、土木学会第57回年次学術講演会、V-157、2002.9
 - 22) 高橋功、古賀裕久、河野広隆、峰村富夫：「反発度による強度推定試験に用いるテストアンピルの使用条件に関する実験結果」、土木学会第57回年次学術講演会、V-158、2002.9
 - 23) 国土交通省、独立行政法人土木研究所：「テストハンマーによる強度推定調査の6つのポイント」、<http://pwri.go.jp>、2001.12
 - 24) 独立行政法人土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム：「テストハンマーによる強度推定調査FAQ集」、<http://pwri.go.jp>、2003.1
 - 25) 土木学会：「JSCE-G573-2003(実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法(案)) 付属書 コンクリート中の全塩化物イオン濃度の測定結果の含有割合に及ぼす骨材量の影響の補正方法」、コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向、コンクリート技術シリーズ55、pp.24-27、2003.9
 - 26) 田中秀治、松浦誠司、古賀裕久、河野広隆：「海洋環境下で長年供用された橋梁への簡易塩分量測定の実施例」、土木学会第58回学術講演会概要集、V-074、2003.9
 - 27) 松浦誠司、古賀裕久、田中秀治、河野広隆：「ドリル削孔による塩化物イオン量測定の精度」、土木学会第58回学術講演会概要集、V-075、2003.9
 - 28) 古賀裕久、松浦誠司、河野広隆：「硬化コンクリート中の塩化物イオン量測定の誤差と個人差」、土木学会第58回学術講演会概要集、V-076、2003.9
 - 29) 松浦誠司、古賀裕久、河野広隆：「試験紙タイプの塩分量測定計を用いた硬化コンクリート中の塩化物イオン量測定」、第24回日本道路会議論文集、10003、2003.11
 - 30) 土木研究所、日本構造物診断技術協会：「コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術の開発に関する共同研究報告書 -コンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案)改訂版-」、共同研究報告書、第286号、2003.3
 - 31) 土木研究所、日本構造物診断技術協会：「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」、技報堂出版、2003.10
 - 32) 古賀裕久、河野広隆、渡辺博志：「既存コンクリート構造物の実態調査と調査結果のデータベース化」、コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集、コンクリート技術シリーズNo.46、pp.69-76、2002.12