

コンクリート構造物の塩害データベースの構築とその利用による維持管理の合理化

研究予算：運営交付金，道路

研究期間：平 16～平 18

担当チーム：構造物マネジメント技術チーム

研究担当者：渡辺博志，古賀裕久

要旨：

コンクリート構造物の塩害を念頭に置いて、既往の点検・調査結果を整理し、また、新たに実構造物の調査を行ってデータを蓄積し、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」などで得られる点検結果を、合理的な維持管理に活用するための方法を検討した。その結果、Fick の拡散方程式を用いることで、概ね妥当な将来予測ができるが、その際には、構造物の部位によって塩化物イオンの侵入状況に大きな違いがあることに留意が必要なことなどを明らかにした。また、点検結果を活用するための簡易な評価システムを試作した。

キーワード：コンクリート，維持管理，塩害，橋梁点検

1. 検討の目的

コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、対象構造物の健全度を評価するとともに、これまでに実施された調査事例を有効かつ体系的に活用し、これまでの実績を活かした経済的な維持管理戦略を決定するのが合理的である。

しかしながら、維持管理計画の重要性が認識されるようになり、点検結果を用いた将来予測の手法が確立されてきたのは最近であり、従来は、点検・調査結果を、構造物の現状を把握することのみ用いることが多かった。また、最近までは紙ベースでの資料の収集が一般的であったことなどから、点検・調査により得られたデータを多くの技術者で共有することは容易ではなかった。このような理由から、点検・調査結果を収集したデータベースや、これを用いた維持管理の方法は最も代表的な劣化メカニズムである塩害に関するものですら十分には確立されていないのが実情である。



図-1 塩害による損傷の例

そこで、コンクリートへの外部からの塩分の侵入やこれによる鋼材の腐食による劣化を主な対象とし、既往の調査事例を取りまとめ、構造物の塩害データベースを構築し、これを利用した合理的な維持管理方法を確立することを目指して検討を行った。

具体的には、過去の点検結果や研究期間中に実施した調査結果から塩害を受ける構造物の点検方法について検討した。また、点検結果を用いた劣化予測の精度について検討した。さらに、点検結果のデータベース化や活用方法について検討した。

2. コンクリート構造物の塩害と維持管理の現状

塩害とは、コンクリート構造物の劣化原因の一つで、コンクリート中に大量の塩分（塩化物イオン）が含まれる場合に、鋼材表面の不動態被膜が破壊され、鋼材が急速に腐食するものである。特にかぶりが比較的小さな橋梁上部構造に劣化事例が目立つ。劣化の速度が比較的速く、かつ、劣化が著しく進行した後では完全に補修することが難しいので、コンクリート橋の維持管理上、最も注意が必要な劣化原因の一つである（図-1）。

塩害を引き起こす塩分には、海からの飛来した塩分や凍結防止剤として散布された塩分など外部からもたらされたものと、砂や混和剤など、コンクリートの材料に含まれていた塩分がある。材料に含まれる塩分については、旧建設省の通達「コンクリート中の塩化物総量規制について」などにより、レディーミクストコンクリート中の塩分量が受入れ検査時に測定されるこ

とになったため、1987年以降はその影響は小さくなっている。

一方、外部からもたらされる塩分については、新設橋梁では、構造物が建設される地域や海岸線からの距離を考慮して、最小かぶりを大きくするなどの対策が取られている。しかし、過去に建設されたコンクリート橋には、最新の道路橋示方書の規定よりもかぶりが小さく、塩害が生じるおそれがある橋梁もある。

そこで、塩害を受ける可能性のある既存コンクリート橋を将来にわたって安全に利用するためには、適切な維持管理活動を行い、必要に応じて補修などの対策を早期に講じなければならない。国土交通省では、塩害による劣化を早期に発見するため、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」¹⁾（平成16年3月、以下、塩害特定点検（案））を定め、コンクリート橋への塩分の侵入状況を定期的に点検することとしている。

塩害特定点検（案）に従った点検結果が蓄積されて

くれば、これを活用した効率的な維持管理が可能になるものと期待される。しかし、本研究課題の研究期間中には、塩害特定点検によるデータを十分に入手することはできなかったため、過去の点検・調査結果や研究期間中に更新のため撤去・解体される構造物を調査した結果を用いて検討した。

3. 塩害を受ける構造物の点検方法に関する検討

3.1 過去の点検・調査結果による検討

3.1.1 収集した資料の概要

塩害を受けるおそれのある構造物について、点検・調査結果の経時的な変化を活用した将来予測の可能性を検討するためには、複数の時点における点検・調査結果がある構造物のデータを用いて検討することが有効であると考えられる。

そこで、まず、過去に行われた構造物の点検・調査結果を収集した。収集した資料の一覧を、表-1に示す。

表-1 収集した過去の点検・調査結果

No.	書名	略称	作成年月	塩化物イオン濃度測定結果	
				有無	構造物数
1	コンクリート橋の塩害対策に関する研究－プレストレストコンクリート橋梁の損傷調査－ ²⁾	PC 塩害 83	1983年1月	○	5
2	〇〇橋補修施工記録調査（橋梁ごとに複数有り）	補修記録 83	1983年	○	6
3	コンクリートの初期塩化物量規制値設定のための調査研究 ³⁾	塩害 85	1987年3月	○	76
4	コンクリート橋の塩害に関する実教詳細調査 ⁴⁾	廃橋調査 88	1988年12月	○	2
5	コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究－コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査－ ⁵⁾	塩害 00	2001年3月	○	63
6	塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究（Ⅰ）－プレテンション PC 桁の載荷試験－ ⁶⁾	耐荷力 01A	2001年3月	○	1
7	塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究（Ⅱ）－旧暮坪陸橋の載荷試験－ ⁷⁾	耐荷力 01B	2001年3月	○	1
8	塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究（Ⅲ）－塩害により損傷を受けた PC 鋼材の機械的性質－ ⁸⁾	耐荷力 01C	2001年3月	×	0
9	塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究（Ⅳ）－旧芦川橋の載荷試験－ ⁹⁾	耐荷力 01D	2001年3月	○	1
10	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－ ¹⁰⁾	非破壊 01A	2001年3月	○	2
11	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報告書－実構造物に対する適用結果－ ¹¹⁾	非破壊 01B	2001年3月	○	2
12	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－ ¹²⁾	健全度 99	2002年3月	○	152

表-2 塩化物イオン濃度測定と補修の時期

構造物名	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋
竣工年度	1966 年	1965 年	1964 年	1965 年
調査・補修年	1980 年	1980 年	1980 年	1982 年 6 月
内容	塩分量測定	塩分量測定	塩分量測定	断面修復, 表面被覆
調査・補修年	1981 年	1983~1986 年	1982 年 6 月	1983 年 5 月
内容	断面修復・外ケーブル・鋼板被覆	断面修復, 表面被覆(2 スパシを除く)	断面修復, 表面被覆	断面修復, 表面被覆
調査・補修年	1996 年	1991 年	1987 年 6 月	1984 年 5 月
内容	塩分量測定	塩分量測定	断面修復, 表面被覆	断面修復, 表面被覆
調査・補修年	1997 年	1993 年	1991 年	1987 年 6 月
内容	塩分量測定	断面修復, 表面被覆(2 スパシのみ)	塩分量測定	断面修復, 表面被覆
調査・補修年		1995 年	1994 年 5 月	1991 年 11 月
内容		外ケーブル, CFRP 接着(1,3,4 スパシ)	断面修復	断面修復
調査・補修年		1996~1998 年	1995 年 3 月	1993 年
内容		断面修復, CFRP 接着(5~9 スパシ)	表面被覆, 外ケーブル	塩分量測定
調査・補修年				1994 年 5 月
内容				断面修復
調査・補修年				2000 年
内容				塩分量測定

(表-2 続き)

構造物名	E 橋	F 橋	G 橋
竣工年度	1964 年	1972 年	1965 年
調査・補修年	1980 年	1980 年	1983 年
内容	塩分量測定	塩分量測定	塩分量測定
調査・補修年	1982 年	1987 年 12 月~1991 年 12 月	1996 年
内容	断面修復, 表面被覆	断面修復, 表面被覆	(詳細不明)
調査・補修年	1987 年	1995 年	2002 年
内容	断面修復, 表面被覆	塩分量測定	塩分量測定
調査・補修年	1991 年	1997 年 1 月	
内容	塩分量測定	断面修復, 表面被覆, 電気防食	
調査・補修年	1995 年		
内容	断面修復, 表面被覆		

次に、塩分量の結果が存在した資料、そして報告書等の形では刊行されていないが、土木研究所にて調査を行った結果があったものを整理し、複数年にわたって塩化物イオン濃度の測定結果が存在する構造物を探した。その結果を表-2 に示す。

調査の結果、いずれの構造物でも塩分量調査の後に補修が実施されていた。過去には、特に厳しい塩害環境に存在する構造物やすでに塩害による劣化が生じていた構造物のみが調査の対象となっていたため、そのほとんどが早期に補修を必要としたものと考えられる。

補修が行われると、調査した箇所周辺のコンクリートがはつきり取られたり、表面保護塗装により塩分の供給が遮断されたりする可能性があるため、補修以前のデータを用いて、補修後の構造物の状態を予想することは困難であると考えられる。このため、過去の点検・調査結果を用いた本格的な検証は断念せざるを得な

った(一部、検討した結果は後述の4章に示す)。

3.1.2 資料収集から得られた知見

上述のように、過去の点検・調査結果からその後の塩分の侵入状況を予測することが可能であったかどうか、検証することは難しかった。しかし、この資料収集とそれを用いた検討から、次の知見が得られた。

- ・複数年の調査結果が残っていた構造物でも、同一とみなせる部位を複数回調査した結果は少なかった。また、コア採取位置を特定できない資料が多かった。
- ・過去の調査結果では、近年の調査結果では認められないような多量の塩化物イオンが含まれるとの測定結果があり、データの信頼性に問題があった。
- ・複数の部位で調査が行われた橋梁について、部位による塩化物イオンの侵入状況を比較したところ、侵入状況に顕著な違いがある場合が少なくなかった。以上のことから、複数年にわたる点検結果を活用し

た維持管理を適切に行うためには、(1)試料採取位置を詳細に記録しておくこと、(2)塩化物イオンの試験に関する条件（試料採取方法や、塩化物イオンの抽出・定量方法）を詳細に記録しておくことが、特に重要であることが確認された。

3.2 実構物の調査による検討¹³⁾

3.2.1 調査の概要

飛来塩分などとして供給される塩分の量は、一つのコンクリート橋の範囲であっても、位置によりその量が大きく異なりうる。そこで、16年間塩害環境（日本海沿岸）で供用されたコンクリート橋から多数の試料を採取し、塩化物イオンの試験を行って、調査箇所による侵入量の違いを調べた。

調査した橋梁は、ポストテンション方式3径間PC単純T桁（2主桁）の側道橋で、目視点検ではコンクリート表面に変状が見られず健全と評価される状態で

あったが、本線の道路橋の架替えにともない撤去されたものである（図-2）。調査は、この側道橋の主桁を対象に行った。

塩化物イオンの試験は、φ100mmのコアを採取し、その表面から40mmまでの位置を10mmごとに切断した試料、および表面から70~80mmまでの位置の試料を用いて行った。塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法（JIS A 1154）により、全塩化物イオン量の測定を行った。

別途行った検討^{14),15)}から、この手法による全塩化物イオン量の測定結果には、変動係数にして10%弱のばらつきが避けられないことがわかっている。そこで、本報では、塩化物イオンの侵入がフィックの拡散方程式（式(1)）にしたがうものと仮定して、各試料採取箇所における表面塩化物イオン量と塩化物イオンの見かけの拡散係数を推定し、これらを指標として、調査箇所による塩分侵入状況の違いを検討した。

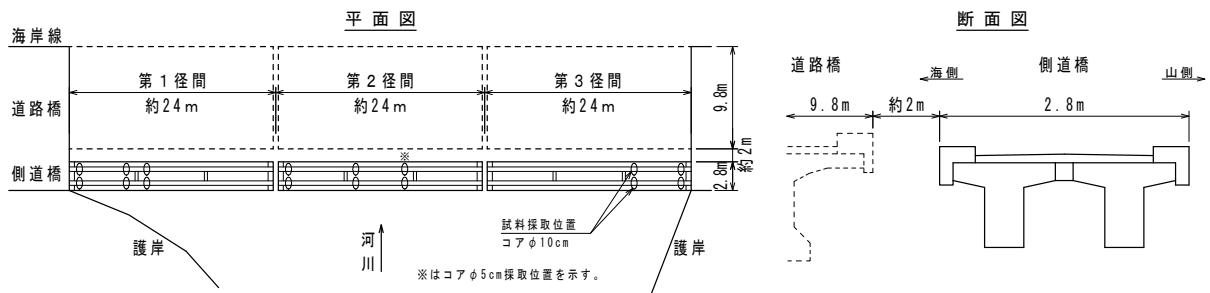
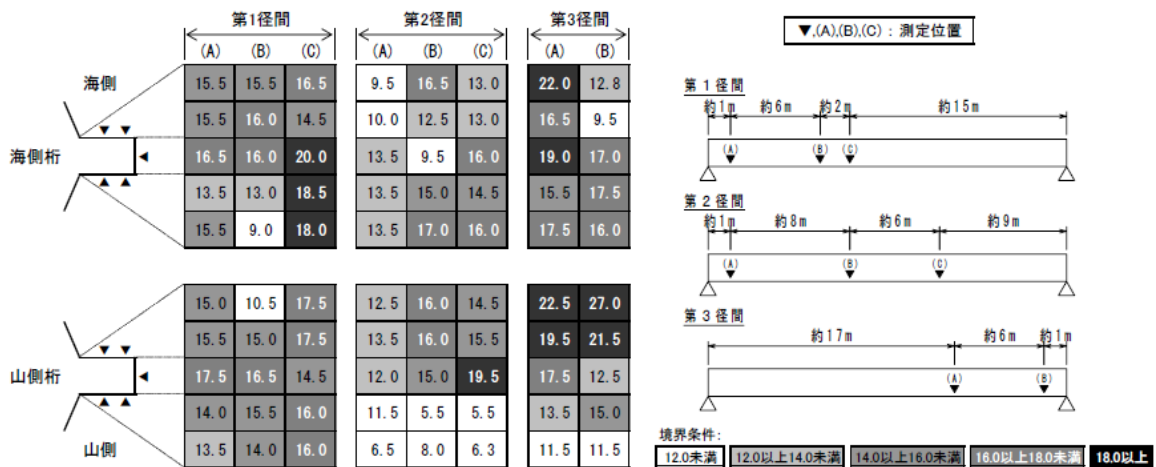


図-2 調査橋梁の概略図



※塩化物イオン量の単位は、コンクリートの単位体積あたりの質量 (kg/m³)

図-3 調査箇所による表面塩化物イオン量の違い

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + C(x, 0) \quad (1)$$

なお、 $C(x, t)$: 深さ $x(\text{cm})$, 時刻 $t(\text{年})$ における塩化物イオン量 (kg/m^3), C_0 : 表面塩化物イオン量 (kg/m^3), D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), $C(x, 0)$: 初期含有塩化物イオン量 (kg/m^3)

表-3 腐食発生時期の推定結果

竣工からの経過年数	最小	平均	最大
	22	62	208
表面塩化物イオン量 (kg/m^3)	15.5	9.5	11.5
見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	0.40	0.19	0.05

3.2.2 調査結果

図-3 に試料採取位置と試験結果から推定した表面塩化物イオン量の分布を示す。調査の結果、この橋梁では、風通しが比較的良好な第2径間では表面塩化物イオン量が小さく、近くに護岸があったために風通しが悪かった第1径間で表面塩化物イオン量が比較的大きかった。一方、山側または海側など特定の面で表面塩分量が多い/少ないという傾向は見られなかった。

また、この橋梁では、試験結果から推定した塩化物イオンの見掛けの拡散係数にも、径間による大小が見られた。見掛けの拡散係数は、風通しがよい第2径間で大きい傾向があった。

調査結果から鉄筋（かぶり 70mm）の腐食が始まる時期を推定すると、試料採取箇所によって竣工後 22年～208年と大きな違いがあった。今回は、構造物の撤去後に実施したので、かなり詳細に塩分の侵入状況を調べることができたが、実際の橋梁の点検では、試料を採取して調査できる位置には限りがある。したがって、何らかの方法で、点検位置を選定して、同一の位置で点検を繰り返すことが重要である。

しかし、この橋梁調査結果では、腐食開始までの時間には、表面塩化物イオン量よりも見掛けの拡散係数の大小が大きく影響を与えていた（表-3）。したがって、この橋梁に関しては、部位による飛来塩分量の違いやコンクリート表面に付着した塩分量を測定しても、腐食が早期に発生する部位を明らかにすることはできないおそれがある。

これらの点を考え合わせると、塩害特定点検（案）に基づく点検を行っても、すべての腐食をその発生前に発見することは困難である。そこで、点検箇所とし

ては、腐食が発生した場合に特に影響が大きい部位（例えば、支間中央付近の下フランジ）を選定し、また、塩化物イオン侵入の将来予測には誤差が避けられないことを考慮して維持管理を行う必要があると考えられる。自然電位法などの調査手法を用いて、腐食のおそれが高い部位を調査するのも効果的と考えられる。

なお、ここで調査した橋梁や、前節で検討した橋梁の調査結果を見ると、耳桁の外側では著しく塩化物イオンの侵入が少ない場合がある。この理由は明確ではないが、雨水により付着した塩化物イオンが洗い流されることなどの影響が挙げられている。したがって、この部位から採取した試料で橋梁全体の状態を代表させることは望ましくない。

4. 点検結果を用いた将来予測に関する検討¹⁶⁾

4.1 検討の概要

すでに述べたように、コンクリート中に外部から侵入した塩分の量や分布については、Fick の拡散方程式を用いて予測できると考えられている。しかし、この予測の妥当性について、実構造物で検証された結果はほとんどない。この理由としては、硬化コンクリート中の塩化物イオン量の試験方法や試験結果に基づく将来予測方法が提案されたのが比較的最近であること、試験に費用がかかることから試験の実施が塩害による損傷が著しい橋梁に限られていたこと、このため調査後に補修がされるなどして新旧の調査結果を比較することができなくなっている場合が多いこと、などが挙げられる（3.1 参照）。

今回、土木研究所で所有する、塩害を受けた橋梁の点検・調査結果を精査した結果、複数の調査年にわたってコンクリート中の塩化物イオン量の試験結果が残っている橋梁は7橋しかなかった。そこで、このうち、比較的多くの情報が残されていた2橋の調査結果について、新旧の調査結果の比較を試みた。また、これら7橋とは別に、塩害を受けたコンクリート橋の撤去（災害復旧のため）に伴い、過去に塩化物イオン量の試験が行われた下部構造の調査を行う機会を得たのでその結果を用いて検討した。

4.2 C橋・E橋調査結果を用いた将来予測精度の検証

C橋、E橋（表-2 参照）は1964年竣工のポストテンション方式PC単純桁橋（T桁、I桁）で、日本海に面する海岸線に位置していた。これらの橋梁では、1980年と1991年に塩化物イオン量の試験が行われている。

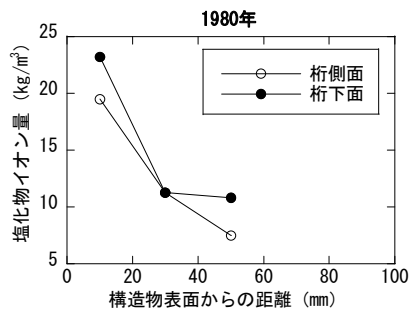


図-4 C橋調査結果

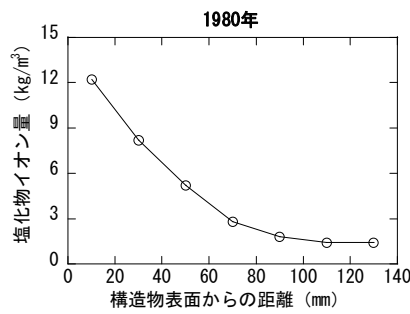


図-5 E橋調査結果

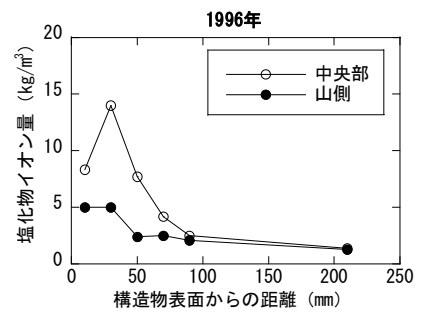


図-6 旧H橋調査結果

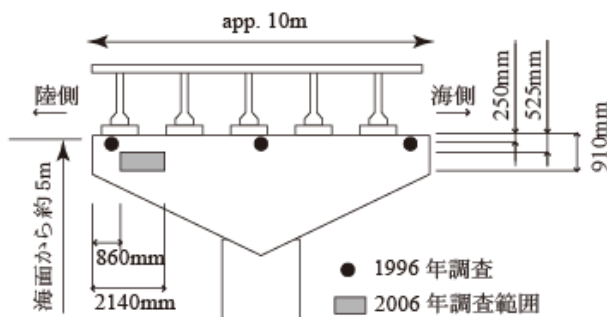
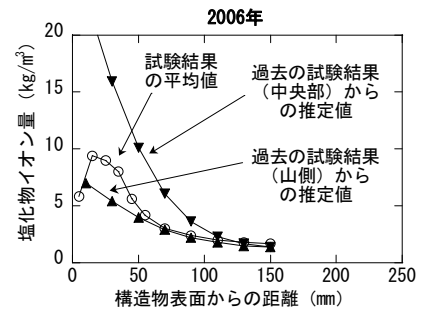
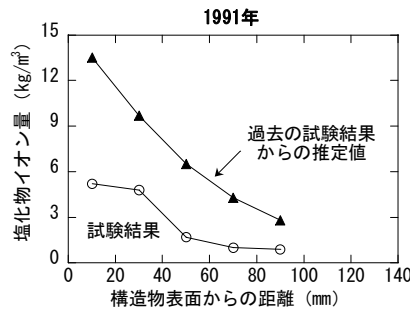
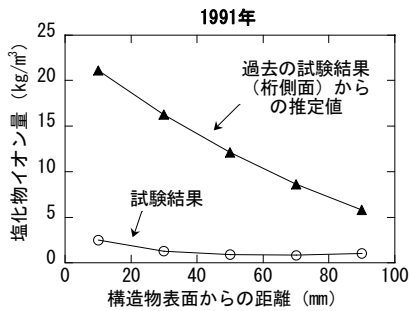


図-7 H橋調査位置

表-4 表面塩化物イオン量及び見掛けの拡散係数の推定結果 (H橋)

推定項目	1996年		2006年
	中央部	山側	1996年調査箇所の中間
表面塩化物イオン量 (kg/m ³)	25.5	6.7	9.5~22
見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	0.45	0.6	0.18~0.6

C橋の試験結果のうち、同一の桁から試料を採取したと見られるデータを図-4に示す。また、E橋の試験結果のうち、同一の桁から試料を採取したと見られるデータを図-5に示す。

C橋の二回の試験で得られた結果には、関係は認められなかった。1991年の試験結果は、1980年の試験結果や試験結果から推定される1991年時点の塩分分布と比較して著しく塩化物イオン量が小さく、補修された箇所を対象としている可能性もある。しかし、現存する資料からは、試料採取位置を特定することはできず、この点を確認することはできなかった。

E橋についても、1980年の試験結果から1991年の状況を予想することは難しい。この理由としては、C橋と同様、補修の影響や、調査位置による塩分進入状況の違いが考えられるが明確ではなかった。

コンクリート橋に侵入する塩化物イオンの将来予測を行う場合、定期的に部材から試料を採取して塩化物イオンの経時変化を追跡することが、その予測精度を向上する上で重要である。しかし、C橋やE橋の例を見ても分かるとおり、過去の調査位置を厳密に特定できない場合には、試験結果を適切に評価することは不可能である。塩化物イオンの測定結果をデータベースとして残し、将来予測に役立てようとする場合は、どの部材(桁)から採取したというだけでなく、正確な採取位置を図面上に記した資料も合わせて保存しなければならないものと考えられる。

4.3 H橋調査結果を用いた将来予測精度の検証

H橋は1975年に架設された橋梁で、太平洋に面する

海岸線に位置していた。上部構造は、塩害のため、複数回にわたる補修・補強を受けていたが、下部構造では特別な補修は実施されておらず、過去の調査結果（1996年ごろと推定）も残されていた。そこで、この橋梁が災害復旧のため撤去される機会に調査を行った（2006年）。調査箇所は、二回の調査ともP3橋脚のはり部である。塩化物イオン量の試験結果を図-6に示す（1996年の海側の調査結果は、本報では省略した）。

なお、2006年の調査箇所は、1996年の調査箇所のなかほどにあたる約1.2m×0.3mの範囲である（図-7）。この2006年の調査では、7本のコアを採取してそれぞれ試験を行ったが、図-6にはその平均値を示した。

1996年の調査では、同一の橋脚のはり部でも、中央部と山側で塩化物イオン量の試験結果に大きな違いがあった。2006年に試験を行った結果は、この二カ所の調査結果から予想される塩化物イオン量の中に位置しており、H橋の調査結果については、過去の調査結果を利用することで、その後の塩化物イオンの侵入状況を推定できたものと評価できる。

なお、個々のコアの試験結果から表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数を算出した結果を表-4に示す。表面塩化物イオン量に関しては、調査時期の違いによる変化は認められなかったが、見掛けの拡散係数は、2006年の調査結果の方が1996年の調査結果と比較すると小さくなっている場合が多く、その平均値では約0.32cm²/年、標準偏差は0.14cm²/年であった。

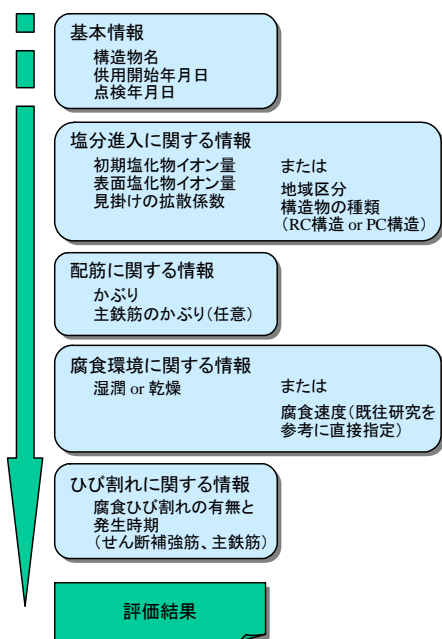


図-8 評価に用いる項目

4.4 将来予測に関する検討結果のまとめ

Fickの拡散方程式を用いた塩化物イオン侵入に関する将来予測結果の信頼性を検討し、以下の知見を得た。

- ・コンクリート中に侵入した塩化物イオンの量は、同一部材でも、位置による差異が大きく、将来予測結果を活用するためには、試料採取位置を正確に記録しておくことが重要であることが、確認された。
- ・調査結果を比較すると、時間の経過と共に見掛けの拡散係数が低下していた。したがって、ある時点での点検結果からFickの拡散方程式を用いた将来予測を行うと、実際よりも安全側の（塩分が多く侵入するとする）予測結果が得られると考えられる。

5. 点検結果を用いた塩害を受けるコンクリート橋の簡易評価システムの開発

前章の検討で整理したように、外部から侵入する塩分の量に関する将来予測の精度は、必ずしも高くない。しかし、塩害を受けるコンクリート橋を点検し、点検結果に基づいて戦略的な維持管理を実施していくためには、何らかの手法で点検結果を客観的に評価する必要がある。そこで、これまでの検討結果や土木学会のコンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹⁷⁾を参考に、塩害特定点検（案）による点検結果を活用する簡易評価システムを開発した。

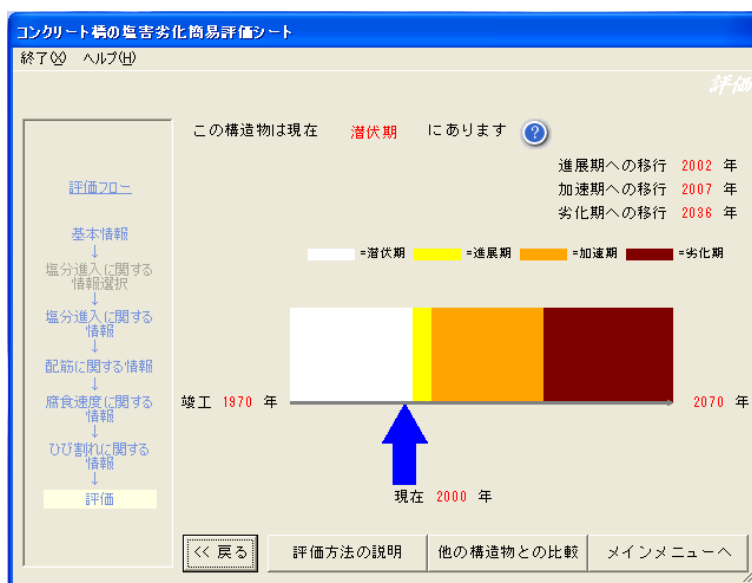


図-9 評価結果の表示例

簡易評価システムによる評価を行う際の入力項目は、図-8の通りである。必ずしもこれらの全てが評価に必要なものではなく、点検結果の有無に応じて入力項目を選択することにした。

評価の結果としては、①構造物が現状で、コンクリート標準示方書に示された四つの劣化進行過程（潜伏期、進展期、加速期、劣化期）のいずれに該当するか判定した結果、②構造物が次の劣化過程に移行する時期を推定した結果を示すこととした（図-9）。

6. その他の検討結果

前章までに紹介した以外に、「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」¹⁸⁾に示された点検・調査を念頭に置いてデータベースシステムを作成した¹⁸⁾。また、塩害に対する補修として断面修復を施した場合のマクロセル腐食の発生について検討した結果を報告した¹⁹⁾。

7. まとめ

コンクリート構造物の塩害を念頭に置いて、既往の点検・調査結果を整理し、また、新たに実構造物の調査を行ってデータを蓄積した。その結果を用いて、「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）」などで得られる点検結果を、合理的な維持管理に活用するための方法を検討した。

実構造物の調査結果によると、塩化物イオンの侵入状況は、橋梁の同一の桁であっても大きな違いがある場合があった。このため、点検結果を蓄積して維持管理の参考とするためには、塩化物イオンの試験を行う際に、その試料採取位置を正確に記録し、同一の箇所 で点検を継続することが重要と考えられる。

また、今回調査した事例では、飛来塩分の多い部位と塩化物イオンの侵入量が多い部位の間には明確な関係が認められなかった。点検時に塩化物イオンの試験を行うことができる数には限りがあるので、塩化物イオンの試験を行ったとしても、すべての腐食をその発生前に発見することは困難であることが考えられる。そこで、腐食が生じた際に影響が大きい部位から選定し、また、塩化物イオンの侵入の将来予測には誤差が避けられないことを考慮して維持管理を行う必要があると考えられる。なお、今回の検討の範囲では、耳桁の外側では塩分の侵入量が他の部位よりも少ない事例が複数認められたので、橋梁を代表する部位として耳桁外側を選定するのは適当ではないと考えられる。

一方、これまでの調査履歴が詳細に残っており、隣

接した位置で複数回の調査を行うことができた場合には、Fickの拡散方程式を用いて概ね妥当な将来予測を行うことができた。そこで、土木学会のコンクリート標準示方書[維持管理編]の記述を参考に、点検結果を活用するための簡易な評価システムを試作した。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）、2004.3
- 2) 建設省土木研究所地質化学部化学研究室：コンクリート橋の塩害対策に関する研究，土木研究所資料，No.1985，1983.1
- 3) 建設省土木研究所地質化学部コンクリート研究室：コンクリートの初期塩化物量規制値設定のための調査研究，土木研究所資料，No.2464，1987.3
- 4) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室：コンクリート橋の塩害に関する実橋詳細調査，土木研究所資料，No.2707，1988.12
- 5) 国土交通省道路局国道課ほか：コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究—コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査—，土木研究所資料，No.3811，2001.3
- 6) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室：塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究（I）—プレテンションPC桁の載荷試験—，土木研究所資料，No.3808，2001.3
- 7) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室，東北地方整備局酒田工事事務所：塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究（II）—旧暮坪陸橋の載荷試験—，土木研究所資料，No.3809，2001.3
- 8) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室：塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究（III）—塩害により損傷を受けたPC鋼材の機械的性質—，土木研究所資料，No.3810，2001.3
- 9) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室，東北地方整備局秋田工事事務所：塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究（II）—旧芦川橋の載荷試験—，土木研究所資料，No.3816，2001.3
- 10) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室：非破壊検査を用いたコンクリート構造物の健全度調査—旧榑橋，旧芦川橋下部構造調査結果—，土木研究所資料，No.3791，2001.3
- 11) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室，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に関する共同研究報告書—実構造物に対す

る適用結果一，共同研究報告書，No.269，2001.3

- 12) 土木研究所構造物マネジメント技術チーム：既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果－1999年調査結果一，土木研究所資料，No.3854，2002.3
- 13) 小松原健、渡辺博志、古賀裕久、中村英佑：塩害を受けたコンクリート構造物の塩化物イオン量の分布状況、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.2051-2056、2006.7
- 14) 渡辺博志、古賀裕久、松浦誠司、小松原健：コンクリート中の塩化物イオン量測定の実誤差に関する検討、土木研究所資料 No.3987、2005.11
- 15) H. Koga, S. Matsuura, H. Watanabe and H. Kawano :
“A Study on Errors in the Measurement of Chloride Ion Concentrations in Hardened Concrete”,
Construction Materials, University of British Columbia, p.247, 2005.8
- 16) 古賀裕久、渡辺博志、中村英佑：塩害を受けるコンクリート橋の維持管理手法に関する検討、土木技術資料、Vol.48、No.11、pp.36-41、2006.11
- 17) 独立行政法人土木研究所、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
- 18) 渡辺博志ほか：コンクリート構造物の点検・調査結果のデータベース化に関する検討－コンクリート構造物の健全度診断システム一、土木研究所資料 No.3948、2004.10
- 19) 北野勇一、渡辺博志、久田真、北山良：補修 RC 梁中の残留塩分に起因するマクロセル腐食に関する暴露試験、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.1787-1792、2006.7