

論文 新潟県沿岸部における橋梁の塩害劣化の実態分析

高橋 毅*1・田中 泰司*2

要旨：本論文では新潟県沿岸部の橋梁を対象とした現地調査を実施し、塩害による劣化度と橋梁の諸元との相関性を得た。また、塩害により鉄筋が腐食している橋梁に対し、橋梁の幅に対する鉄筋の腐食率を算出し、構造形式による塩害劣化進行の違いを考察した。現地調査は、海岸から500m以内に存在する207橋を対象とし、独自に定めた指標により劣化度の評価を行った。その結果、橋梁における塩害劣化は供用年数が多いほど、また海岸からの距離が近いほど進展している傾向を得た。また、エリア別の鉄筋腐食状況を分析したところ、版桁に比べT桁の橋梁で塩害劣化が広い範囲で進展している傾向にあることが明らかとなった。

キーワード：塩害、橋梁、現地調査、構造形式

1. はじめに

新潟県を含む日本海側の地域では約30年前から季節風による多量の飛来塩分¹⁾や、寒冷地域で使用される凍結防止剤に起因する塩害の問題に悩まされてきた。この塩害劣化の問題に対し、現在に至るまで、様々な補修・補強対策が実施されてきたが、その後の経過を含めた橋梁の塩害劣化の実態はほとんど把握されていないのが現状である。現行の耐久性設計は、フィックの拡散方程式を用いて、鉄筋の腐食年数を推定するものである²⁾。この際に用いられる係数(表面塩化物イオン濃度、塩化物イオン拡散係数など)は、全国の飛来塩分量調査結果の近似式から求められている³⁾。この設計法が提案されてから10年が経過した今、今後の耐久設計の信頼性と合理性を確実なものとするためには、塩害の実態を今一度見直し、塩分浸透予測に基づく現行の耐久設計手法の妥当性を確認することが不可欠である。

そこで、本研究では新潟県の沿岸部にある橋梁の現地調査を実施した。まず、衛星写真を用いて新潟県沿岸部にある橋梁の位置情報を把握した。次に現地調査を行い、観測者によって評価の差異が少なくなるよう明確な基準を設けた塩害劣化度を示す評価指標(評価レベル)を独自に設定し、グレーディングを行った。また、調査データを集計・分析し、塩害劣化現象における橋梁の架設環境や構造形式の影響について検討を行った。最後に現行の耐久設計手法と実態調査結果との比較を行い、その妥当性について検討を行った。

2. 調査対象

今回の調査では、飛来塩分による塩害に焦点を当てることとし、沿岸部にある橋梁を調査することとした。調査対象橋梁は新潟県村上市から糸魚川市能生までの、海岸から500m以内に架かっている道路橋及びボックスカ

ルバートの207橋とした(図-1の黄色ピン部)。海岸から500mとしたのは、この距離以上、海岸から離れている橋梁では塩害による補修がこれまでに行われていないことが既往の調査⁴⁾によって明らかになっているからである。

3. 現地調査方法

本研究では、その橋の代表的な劣化度として、主桁及び床版下面の塩害劣化を、独自に設定した評価指標を用いて橋梁のグレーディングを行った。表-1に塩害劣化のグレーディングと評価指標を示す。これは、主桁及び床版下面に1箇所でも劣化を確認した場合に、その劣化に相当するレベルとした。また、図-2に各評価レベルの劣化状況の例を示す。この評価レベルは、ひび割れ・剥離といった目視点検によって明確に確認できるものを指標とすることで、観測者による評価の差異を少なくする目的で定めた。

4. 調査結果

4.1 調査結果の概要

図-3に、調査した橋梁の構造形式ごとの割合を示す。PC橋が76橋(37%)、RC橋が106橋(51%)、鋼橋が25橋(12%)であった。構造種別で分けると、RC橋の版桁構造が最も多く71橋(33%)、次いでPC橋のT桁構造が44橋(21%)であり、この2種類の橋で全体の半分以上を占めた。橋長15m未満の小規模橋梁の割合は64%、橋長15mから50mの中規模橋梁は17%であり、これらで大部分を占めた。図-4に評価レベル別の橋梁数を示す。評価レベル1以上の劣化が生じていた橋梁の割合は全体の66%に達しており、沿岸部では塩害による早期劣化が深刻であることを改めて示す結果となった。一方では34%の橋梁で劣化が認められなかったことから、いくつ

*1 長岡技術科学大学大学院 建設工学専攻 (学生会員)

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系 助教 (正会員)

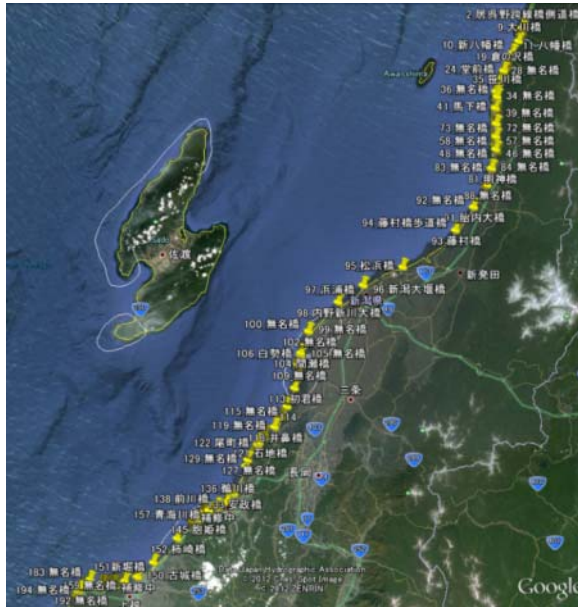


図-1 調査対象橋梁一覧



図-2 各評価レベルの劣化状況の例

表-1 塩害劣化のグレーディングと評価指標

評価レベル A	健全(セバ近傍の軽微な劣化は許容する)。
評価レベル 1	主桁または床版下面に塩害起因のひび割れが発生している。 錆汁が認められる。 補修履歴がある。
評価レベル 2	主桁または床版下面から鉄筋が露出し腐食している。 補修後、再劣化ひび割れが発生している。
評価レベル 3	耐力力の低下が顕著であり、崩落の危険性がある。

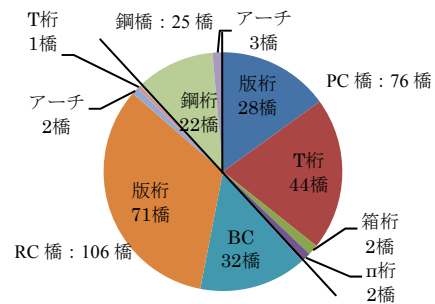


図-3 調査橋梁の構造形式別割合

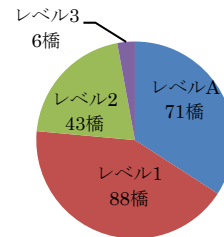


図-4 評価レベル別橋梁割合

かの因子に着目して調査結果を整理することで、劣化の原因または劣化していない理由を分析することとした。

4.2 海岸からの距離の影響

海岸からの距離を 0~100m, 101~300m, 301~500m の 3 つに分け、それぞれの評価レベルの橋梁数を示したものを図-5 に示す。これより、新潟県の沿岸部の橋梁は海岸から 100m 以内にあるものが多いことがわかる。各評価レベルの割合に着目すると、海岸に近いほど劣化が顕在化している橋梁が多く、評価レベル 1 以上の劣化の割合は、海岸から 0~100m で 77%, 101~300m で 50%, 301~500m で 29%であった。このことから、塩害劣化環境の厳しさは海岸からの距離と相関があると考えられる。ただし飛来塩分の状況は海岸付近の岩礁やテトラポットの有無、植生や建造物の有無によっても異なるので、将来的にはこれらの影響も考慮して、より厳密

な分析を進める必要がある。また、道路橋示方書では、新潟県を含む B 区分において、塩害環境の過酷さを海岸から 0~100m, 100~300m, 300~500m の 3 区分に分けて評価しているが、今回の調査結果はその評価方法と概ね整合する結果といえる。

次に、海岸からの距離が小さく、劣化していない橋梁について、健全である理由を検討することにした。表-2 に海岸から 100m 以内にある、供用年数が判明している評価レベル A の橋梁のうち、初期塩害対策(初期塗装、防錆鉄筋使用など)が施されていない橋梁の一覧を示す。表-2 から、海岸近傍で健全な橋梁は F 橋を除いて供用年数が 25 年以下であり、全て版桁構造であることがわかる。すなわち供用年数が比較的少ない橋梁であることと、飛来塩分が付着しにくいと考えられる版桁構造²⁾であることが、健全である主な理由として考えられる。また、F 橋は供用年数が 40 年以上であるにも関わらず健

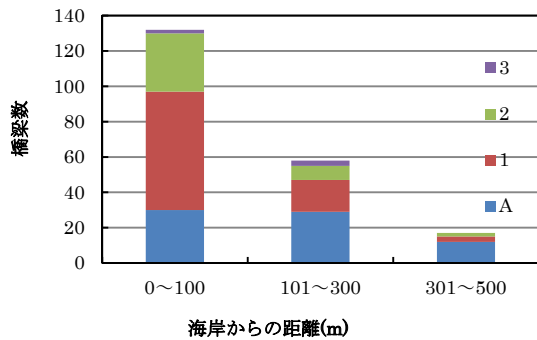


図-5 各距離における評価レベル橋梁数



図-6 F 橋の衛星写真

全であるが、この理由として、図-6 に示すように海と橋梁の間の障害物の存在が挙げられる。F 橋が架かっている川は河川形状が屈曲しており海岸との間に住宅地がある。そのため、海岸からの距離の割に飛来塩分が少なかったため、塩害を生じていないのだと考えられる。また、図-7 に F 橋の床版下面の様子を示す。F 橋は横断方向に傾斜が付けられており、プレテンのブロック間に段差が設けられている。山側に向かうほど部材の配置が高くなっており、飛来塩分が付着しにくい構造であるとされる。また、供用年数が不明な橋でかつ健全な橋梁も、海岸との間に障害物がある場合が多かった。調査した全橋梁を、障害物の有無で分けて劣化度の割合を求めると、海との間に障害物がない橋梁の方が 20%程度、劣化が進んだ橋梁が多い結果となった。以上の検討より、塩害環境レベルは海岸からの距離と高い相関性が見られるものの、障害物の有無や、構造形式の影響も大きく受けることが明らかとなった。

4.3 供用年数－評価レベル関係及び考察

供用年数は、親柱に記載されている竣工年を参考にデータを取得した。供用年数が確認できた橋梁は 90 橋であり、PC 橋が 55 橋、RC 橋が 20 橋、鋼橋が 15 橋であった。

まず、4.1 と同様に、供用年数を 10 年毎に分け、それぞれの評価レベルの橋梁数を示したものを図-8 に示す。

表-2 海岸から 100m で健全な橋梁一覧

橋梁名	海岸からの距離	供用年数	構造形式	構造種別
M 橋	20	23	PC	版桁
N 橋	20	1	PC	版桁
S 橋	30	22	PC	版桁
I 橋	40	14	PC	版桁
R 橋	50	23	PC	版桁
K 橋	60	17	PC	版桁
J 橋	60	6	PC	版桁
MK 橋	60	6	PC	版桁
F 橋	70	41	PC	版桁
O 橋	70	2	PC	版桁
OM 橋	80	11	PC	版桁

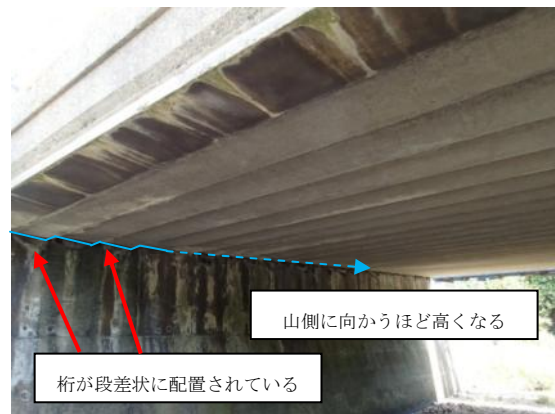


図-7 F 橋の床版下面の様子

これより、供用年数は 21～50 年のものが多いことがわかる。すなわち今回調査を行った橋梁の大半が、高度経済成長期に架けられたものであった。また、供用年数が 1～20 年の範囲の橋梁はほとんどが健全であった。供用年数が 51 年以上の橋梁では健全なものは存在せず、何らかの劣化が進行していることがわかる。なお、評価レベル 2 の中には、塩害に対する補修(例えば、断面修復や表面被覆)を行ったものの、数年で再劣化ひび割れに至った例もいくつか含まれていた。この結果から、新潟県沿岸部では建設後 20～30 年後に塩害劣化が目視で確認されるように見て取れるが、そのような解釈は妥当ではない可能性が高い。なぜなら、現在から約 30 年前を境として塩害に対する設計が変化しているからである⁵⁾。そこで橋梁の建設年代と経年劣化の関係について検討を行うこととした。

先に述べた既往の調査⁴⁾では、新潟県上越地区にある橋梁の補修履歴を整理している。そこで、補修を行った時期を、評価レベル低下時期と仮定し、供用年数－評価

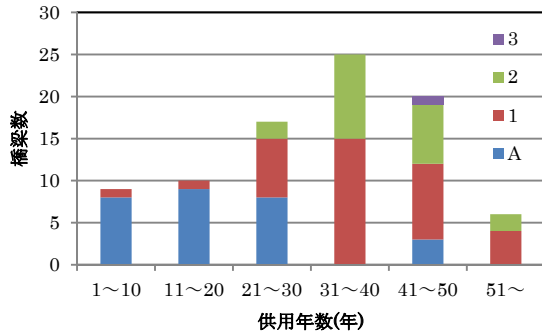


図-8 各年数における評価レベル橋梁数

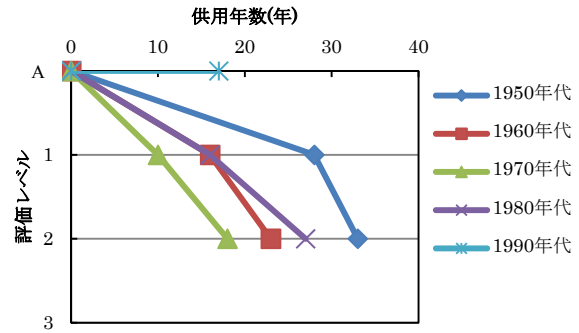


図-9 上越地区における供用年数-評価レベル関係

レベル関係のグラフを作成したものを図-9に示す。50橋のデータを竣工年別に分け、それぞれの年代の橋梁数(50年代:1橋, 60年代:18橋, 70年代:13橋, 80年代:8橋, 90年代:10橋)で平均したものを示している。

これより、80年代までに建設された橋梁の劣化速度は年代によらずほぼ同程度であり、建設後10~20年程度で塩害劣化が顕在化し、補修が施されていたことが明らかとなった。90年代に建設された橋梁は現在に至るまで劣化が生じていない橋梁が多く、それ以前の橋梁と比較して明らかに耐久性が向上している。これは、1984年に橋梁の塩害対策指針が提案され⁵⁾、それ以前と比べてかぶりを大きく確保するようになったことや、構造形式を塩分の付着面積が少なくなるよう考慮するようになったためだと考えられる。このことは、構造形式の違いからも明らかである。図-9で示した80年代以前の橋梁の多くがT桁橋なのに対し、図-8の20年未満の橋梁は板桁橋が多くなっていった。以上より、既往の塩害対策技術の効果をある程度確認することができた。

4.4 現行の耐久設計手法による劣化推定曲線との比較

調査橋梁の供用年数と海岸からの距離を評価レベルごとに色分けしたものと、現行の耐久設計手法を参考にして算出した劣化推定曲線を図-10に示す。青い線は評価レベル1となる供用年数を示し、同様に、黄色い線は評価レベル2となる供用年数を示している。劣化推定曲線は、1983年以前に設計された新潟県沿岸部の橋梁と想定し、実線がプレテンションPC桁(W/C=36%, かぶり25mm)、破線がRC桁(W/C=55%, かぶり35mm)を表している。

塩害劣化は、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4段階に分けることができる。通常、進展期と加速期の境界で、塩害ひび割れが発生すると言われている⁶⁾が安全側の評価となるように、(1)式に示すフィックの拡散方程式の解から得られる鋼材位置における塩化物イオン濃度が1.2kg/m³(鋼材の発錆限界値)となったら、すみやかに腐食ひび割れが発生するものとし、評価レベル1になると

仮定した。JIS(日本工業規格)においてコンクリートの塩化物含有量は、荷降ろし地点で塩化物イオン量として0.3kg/m³以下でなければならないと定められている。このため、初期含有塩化物イオン $C_{(x, 0)}$ を、安全を見て0.3kg/m³とした。(1)式より、各構造形式の鉄筋位置における塩化物イオン濃度が1.2kg/m³に達する時刻 t を求め、これを、進展期から加速期に移行する劣化推定年数とした。また、拡散係数 D_c は普通ポルトランドセメントを用いていると仮定し(2)式より算出した。

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

$$\log_{10} D_c = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2)$$

また、加速期から劣化期の境界で評価レベル2となるものとした。ここでは、鋼材の体積減少率が5%となった時に加速期から劣化期に移行すると仮定した。鋼材の体積減少率は、コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書⁷⁾にて提案されている、腐食ひび割れ発生以降の鋼材腐食速度の予測式((3)式)に準じて計算を行った。(3)式に用いる係数は全て『国土技術政策総合研究所資料 道路橋の計画的な管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)—⁶⁾』から引用した。

$$V_{\text{red}} = \{4ac / (\phi \times \gamma_{FE})\} \times e^{(\alpha/a) \times t} \quad (3)$$

以上の計算を、コンクリート標準示方書[維持管理編]⁸⁾に定められている各距離(飛沫帯、汀線付近、100m~300m, 300m~500m)における表面塩化物イオン濃度を用いて行った。表-3にコンクリート標準示方書に定められている飛来塩分が多い地域での表面における塩化物イオン濃度を示す。

現行の耐久設計手法による劣化推定曲線と現地調査結果を比較すると、ほとんどの橋梁が、推定劣化年数よりも遅く劣化していることがわかる。評価レベル1の橋梁は、すべての橋梁で推定劣化年数よりも遅く劣化しており、評価レベル2の橋梁のほとんどは、推定年数よりも後もしくは同程度の年数で劣化している。これより、現行の耐久設計手法は、かなり安全側の評価を与えることが明らかとなった。

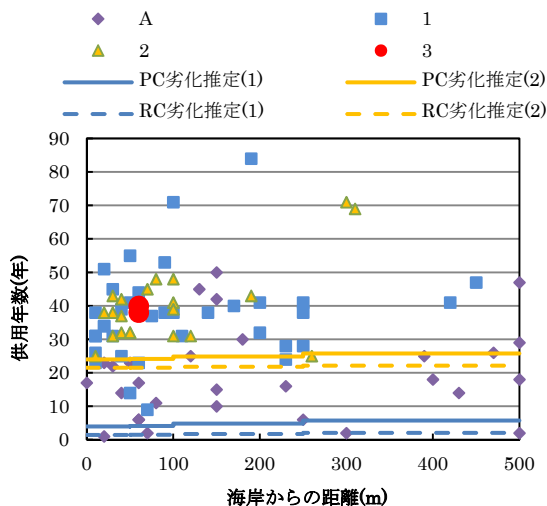


図-10 海岸からの距離－供用年数の関係

表-3 表面塩化物イオン C_0 (kg/m^3)

飛沫帯	海岸からの距離(km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1
13	9	4.5	3	2	1.5

5. 部位ごとの鉄筋腐食状況

図-10までのデータ整理では、橋梁のもっとも劣化が進んでいる箇所での劣化度を評価した。そのため、橋梁全体に渡って鉄筋が腐食しているものも、ごく一部で劣化が生じていた場合も同じ評価レベルになってしまう。そこで、鉄筋が腐食している橋梁のみを対象として、劣化範囲の分析を行うこととした。ここで、橋梁を三つのエリア(海側・中央・山側)に等分割し、それぞれのエリアで腐食の有無を調べた。

5.1 評価方法

まず、鉄筋腐食が目視で認められた橋梁を抽出した。ここで、鉄筋腐食とは、『鉄筋が露出し腐食しているもの』、『主鉄筋・スターラップと思われる鉄筋の錆汁が発生しているもの』、『塩害起因と考えられるひび割れが発生しているもの』の3つと定義し、PC橋(36橋)とRC橋(36橋)を対象とした。次に、図-11に示すように、抽出した橋梁を、海側・中央・山側に三分割し、それぞれのエリアで鉄筋の腐食の有無を調査した。各エリアの鉄筋腐食の有無は、現地調査で撮影した橋梁下面の写真から判定した。

5.2 分析結果と考察

鉄筋腐食が生じていた橋梁の割合を構造形式別に示したものを図-12に示す。対象構造形式は、PC橋でT桁と版桁、RC橋で版桁とボックスカルバートとした。

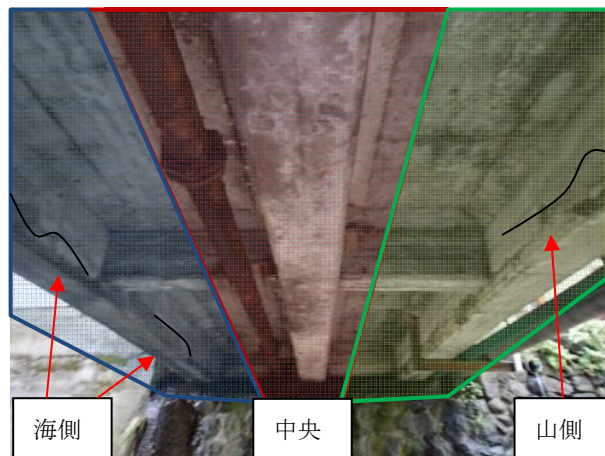


図-11 エリア区分の例

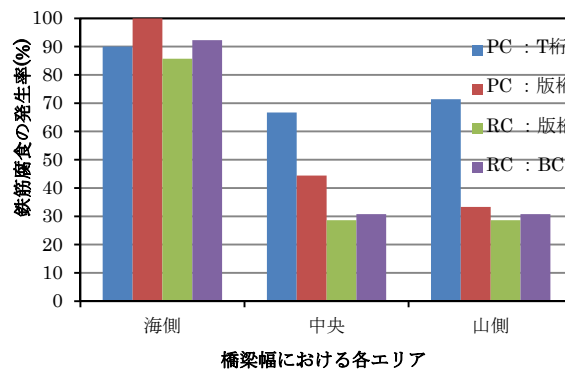


図-12 各エリアにおける鉄筋腐食の発生率

PCT桁構造は、山側の桁まで劣化が進展しているものが多く見られ、版桁構造では、劣化が海側で留まっている橋梁の割合が大きいことがわかる。このことから、同じ評価レベルであってもT桁橋は版桁橋に比べ、構造性能の低下がより深刻になる場合が多いと考えられる。

このように、T桁橋と版桁橋で腐食範囲に明確な違いが表れた理由として、飛来塩分の付着状況の違いが挙げられる。断面形状の違いが塩分付着性状に及ぼす影響を図-13に示す。床版橋のように、下面が平らな場合、海水飛沫を多く受ける部分は海側の端部で最も大きくと考えられる。このような傾向は、戸田によるマルチスペクトル法を用いた床版橋の表面塩分量測定結果においても確認されている⁹⁾。これに対し、T桁橋では海側の桁にぶつかった風が回折し、桁間に飛来塩分の淀みができるので、中桁でも飛来塩分量が大きくなること、中西らの研究によって確認されている¹⁰⁾。このように風の流の影響によって床版橋に比べT桁橋に多く塩害被害が生じていることは経験的に指摘されてきたが、本調査では、鉄筋腐食範囲という指標によってその経験則を立証したといえる。現在のようにかぶりの塩分浸透だけを考える塩害照査体系では、このような事象は考慮しきれないの

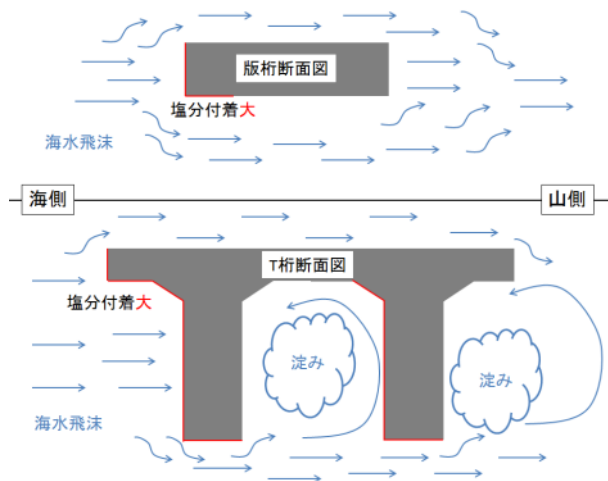


図-13 構造形式の違いによる付着塩分の違い

で、将来的には飛来塩分の大気中の流動や付着特性を考慮した塩害照査手法を構築することによって、かぶりやコンクリート品質だけでなく、橋梁形状も塩害に対する耐久設計項目として取り組むことが可能になると考えられる。

塩害の最大の発生要因は、飛来塩分の付着と浸透であるが、その他にも図-14に示すようなかぶり不足による早期の鉄筋腐食や、飛砂によるコンクリートの摩耗なども認められた。塩害劣化は、海岸からの距離・供用年数・構造形式をはじめ、飛来塩分量や設計や施工による品質のバラツキなどが複雑にからみ合っていると考えられる。そのため、一つ一つの橋梁の諸元に合わせた維持管理が必要となる。今後も、塩害環境下における橋梁の点検データ蓄積を行っていくことが重要であり、海岸からの距離や供用年数、かぶり深さや施工の品質などを総合的に評価した維持補修法の確立が急務である。

6. まとめ

本論文で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 塩害劣化度は供用年数と海岸からの距離との相関性が高く、供用年数が大きくなるほど、または海岸からの距離が短いほど劣化が進行する傾向があることが確認された。
- (2) 建設年代ごとに劣化曲線を求め比較したところ、塩害対策が始まった90年代を境に橋梁の塩害に対する耐久性能は向上していたことが確認された。
- (3) 現行の耐久設計手法を参考にして海岸からの距離と劣化年数を算出し、現地調査結果と比較したところ、現行の耐久設計手法はかなり安全側の評価を与えることがわかった。
- (4) エリア別に鉄筋腐食状況を分析した所、版桁構造に比べT桁構造の橋梁の方が、塩害被害を受ける範囲が大きいことが明らかとなった。



図-14 かぶり不足による鉄筋の早期腐食

謝辞: 現地調査に際しては長岡技術科学大学 山口貴幸氏の多大なるご尽力を頂きました。また、この研究は社団法人北陸建設弘済会のご支援のもと行いました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 加藤丈和, 松山公年: 道路橋の塩害対策に関わる電気防食の追跡調査, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, Vol.30, pp.350-353, 2012.11
- 2) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 3 コンクリート橋編, 2002.3
- 3) 中谷昌一, 玉越隆史, 内田賢一, 廣松新, 池田明寛: 国土技術政策総合研究所資料 コンクリート橋の塩害対策資料集—実態調査に基づくコンクリート橋の塩害対策の検討—, 国土交通省国土技術政策総合研究所, pp.38-108, 2002.11
- 4) 田中泰司, 丸山久一: 新潟県上越地区における塩害被害橋梁のライフサイクルコストの実態調査, コンクリート技術シリーズ, Vol.98, pp.393-400, 2012.7
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 1984.2
- 6) 玉越隆史, 大久保雅憲, 渡辺陽太: 国土技術政策総合研究所資料 道路橋の計画的な管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)—, 国土技術政策総合研究所, pp.24-73, 2009.11
- 7) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998.10
- 8) 土木学会, 【2007年制定】コンクリート標準示方書[維持管理編], 2007.3
- 9) 戸田勝哉: 塩分計測技術, 第30回土木学会新潟会調査研究発表会, 2012.11
- 10) 中西克佳, 加藤真志, 岩崎英治, 松田穰, 鹿毛勇: 2主桁I型断面の腐食予測のための付着塩評価実験, 土木学会第63回年次学術講演会, Vol.1, pp.3-4, 2008.