

確率密度関数を用いたコンクリート構造部材の複合劣化予測手法の検討

Investigation on estimation method of combined deterioration of damage
with concrete structural member by the probability density function

北見工業大学大学院	○学生員	大友 貴史(Takashi Otomo)
北見工業大学	フェロー	大島 俊之(Toshiyuki Oshima)
北見工業大学	正員	三上 修一(Shuichi Mikami)
(株)ドーコン	正員	佐藤 誠(Makoto Sato)
北海道道路技術センター		竹田 俊明(Toshiaki Takeda)

1. まえがき

現在、橋梁の点検評価および維持管理技術を発展させて、橋梁維持管理システム BMS (Bridge Management System) を確立するための必要性が高まると同時に、実務者レベルの調査研究活動も活発になりつつある^{1), 2)}。しかし、BMS を有効なシステムとして確立するためには、二つの大きな課題が存在する。ひとつは、従来の目視による点検のほかに、モニタリング技術などを併用して、定量的な診断結果を確保するための課題である。もうひとつは、点検診断結果に基づいて適確な健全度の評価を実施するとともに、橋梁における将来の健全度を考慮した上での劣化予測をして、ライフサイクルコスト (LCC) の最適化を考慮した有効な維持管理プログラム (マネジメントプログラム) を確立するための課題である。これまで、後者の橋梁維持管理プログラムに関連しては、橋梁の総合的健全度評価を実施するための手法として、重み付き平均法を用いる方法を提案されるとともに、橋梁全体の健全度の指数 (Bridge Health Index) を評価するため、橋梁各部材の資産的価値を評価して、現存する橋梁の残存資産価値と必要補修経費を算出できる手法が提案されている。

本論文では、これまでの研究成果に基づき、BMS を構築発展させるために、部材劣化の材質に着目して、その劣化要因および劣化機構等を含めた劣化予測について検討を行う。さらに、確率密度関数を用いて、その劣化予測の精度について検討する。劣化予測の主な目的としては、橋梁各部材の余寿命を推測し、補修・補強計画のサポートをすること。そして、その劣化予測手法を BMS に採り入れることである。

もとより、橋梁構造各部における劣化予測の評価技術は、現在でも確立されたものが少ない。しかし、橋梁資産の劣化と維持管理経費の増大速度は、これらの研究における進展速度よりも速い。したがって、本論文では、現時点で応用可能なオーソライズされた (文献や示方書など) 劣化予測手法を活用するとともに、研究が進展していない分野については、可能な限り技術情報を収集して、それらを組み合わせる方法により検討した。これらの結果は当面、実際の維持管理点検データによって検討と修正が続けられると同時に、研究の進展によって、精度の高い劣化予測手法に置き換えられていくべきものと考えられる。

2. コンクリート部材の劣化予測の検討³⁾

本章では、コンクリート部材に着目して、その劣化要因および劣化機構等を含めた劣化予測について検討を行う。コンクリートの劣化に影響を及ぼす因子としては種々の要因が考えられる。また、それらの影響因子は複合して部材に作用するため、その劣化機構は複雑である。ここで、橋梁のコンクリート部材劣化に影響を及ぼす 6 項目の因子と、その主な劣化要因および主な劣化指標を表-1 に示す。本論文では、寒冷地である北海道において特に影響が大きいと考えられる塩害と凍害に関する劣化予測について検討する。

表-1 コンクリート劣化に影響を及ぼす因子

影響因子	主な劣化要因	主な劣化指標
塩害	塩化物イオン	塩化物イオン濃度 鋼材腐食量
凍害	凍結融解作用	凍害深さ 鋼材腐食量
アルカリ骨材反応	反応性骨材	膨張量
中性化	二酸化炭素	中性化深さ 鋼材腐食量
床版の疲労	大型車交通量	ひび割れ密度 たわみ
化学的浸食	酸性物質 硫酸イオン	因子の浸透深さ 鋼材腐食量

2.1 塩害の劣化予測^{3), 4)}

塩害とは、コンクリート中の鉄筋の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鉄筋の断面減少などを引き起こしたりすることにより、構造物の性能が低下し、所定の機能を果たすことができなくなる現象である。このような劣化を促進する塩化物イオンは、海水や凍結防止剤のように構造物の外部環境から供給される場合と、コンクリート製造時に材料から供給される場合とがある。

塩害は、コンクリート標準示方書³⁾によって、コンクリート中の鉄筋が腐食開始するまでの潜伏期段階の劣化予測については、塩化物イオン濃度から予測する手法が知られている。しかし、鉄筋腐食後の進展期以降の劣化予測については、あまり研究が進展していない。したがって、本論文では、塩化物イオン濃度から予測する潜伏期段階と、鉄筋腐食速度から鉄筋腐食量を計算する進展

期以降とに劣化予測手法を分けて考える。

鉄筋が腐食開始するまでは、塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度である 1.2kg/m^3 に達するまでの年数を求めるため、式(1)、式(2)より塩化物イオン濃度を計算する。鉄筋が腐食開始した後は、劣化が鉄筋腐食量に依存するため、式(3)より鉄筋の腐食速度 Fr を計算する。そして、鉄筋の腐食速度 Fr を時間積分して、鉄筋腐食量を求める。また、一般に、鉄筋腐食量が 10mg/cm^2 に到達した時点でひび割れが発生するとされているため、ひび割れ発生時点の年数を求めることができる。ここでは、鉄筋の腐食開始より 100 年後を最大鉄筋腐食量と仮定し、鉄筋腐食残存断面率を求め、劣化指標としている。

$$\log D = [4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47] + \log(3.15 \times 10^7) \quad (1)$$

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

$$Fr = \frac{2.4A \times 10^{-8} \times e^{-0.05t - \frac{0.4x^2}{t}}}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

ここに、

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 [$\text{cm}^2/\text{年}$]

W/C : 水セメント比 [%]

x : コンクリート表面からのかぶり厚さ [cm]

t : 経過年数 [年]

$C(x,t)$: 塩化物イオン濃度 [kg/m^3]

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 [kg/m^3]

$C(x,0)$: 初期含有塩化物イオン濃度 [kg/m^3]

Fr : 腐食速度 [$\text{mg/cm}^2/\text{年}$]

A : 水セメント比によって決まる係数

したがって、塩害における劣化の予測を図-1 に示す。図-1 は塩化物イオン濃度を基に算出した鉄筋腐食残存断面率と供用年の関係を示している。また、図中、CASE 1、CASE 2 は海岸線に近い橋梁のコンクリート主桁を想定した劣化予測であるため、コンクリート表面からの鉄筋のかぶり量は 5.0cm 、水セメント比は 50% 、海岸線からの距離を CASE 1 は 100m 、CASE 2 は 2000m として計算した。また、そのほかのパラメータは、適用示方書⁵⁾などに従って、一般的な数値を仮定して計算した。

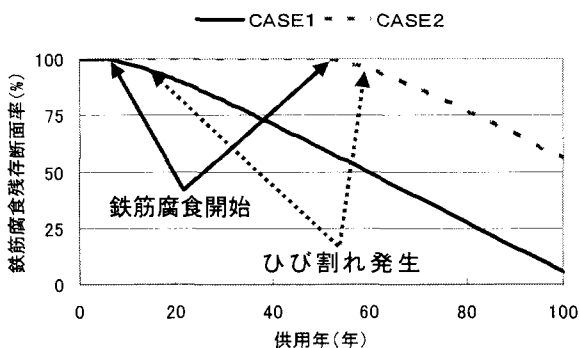


図-1 塩害による劣化予測

2.2 凍害の劣化予測³⁾

凍害とは、コンクリート中の水分が凍結膨張によって発生するものであり、長期間にわたる凍結と融解の繰り返

し作用によってコンクリートが徐々に劣化する現象である。凍害の劣化要因として凍結融解回数が大きく影響する。凍害を受けたコンクリート構造物では、コンクリート表面にスケーリング、微細ひび割れ、ポップアウトなどが発生する。

凍害は、ある劣化状況が次第に蓄積されるような場合、その後の劣化の進行を予測することは可能である。しかし、その状況が極めて偶発的である場合には予測は不可能であり、進行が急速である場合にも、予測は困難となる。このため、凍害の劣化予測はあまり確立されていないのが現状である。そこで本論文では、北見工業大学屋外で長期間 (14 年) 継続的に観測を続けている供試体データ⁶⁾を基に、相対動弾性係数と経過年数と関係を、式(4)によって近似させ、劣化予測を行っている。

凍害における劣化の予測を図-2 に示す。また、図中、CASE 1 は水セメント比 55% 、CASE 2 は水セメント比 45% 、空気量は共に 6% として計算した。なお、北見工業大学のある北見市は、凍結融解回数がおおよそ 120 回/年⁷⁾であるため、凍結融解回数が 120 回/年の場合を想定した劣化予測である。

$$y = a - bt - e^{ct} \quad (4)$$

ここに、 t : 経過年数 [年]

また、CASE 1 : $a = 101, b = 0.529, c = -3.129 \times 10^{-8}$

CASE 2 : $a = 101, b = 0.449, c = -8.784 \times 10^{-9}$

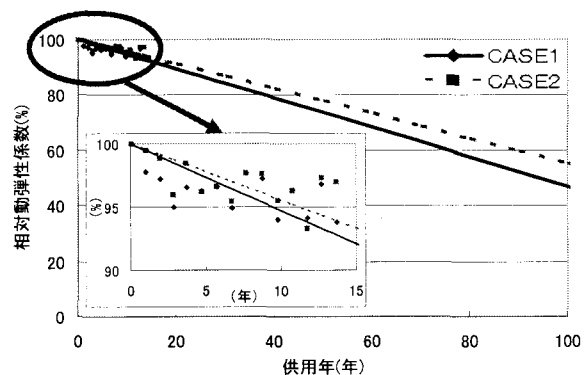


図-2 凍害による劣化予測

3. 確率密度関数を用いた劣化予測の検討⁸⁾

前章では、塩害および凍害における劣化予測についてそれぞれ述べてきた。しかし、実際の橋梁での劣化予測に適用できるかどうかを考えた場合、疑問がある。本研究ではこれまで、北海道に架設された国道橋の点検データと劣化曲線とを比較することによって、その妥当性について検討してきたが、データ数不足の問題やデータのバラつき等の理由により、その妥当性を明らかにすることが困難であった。また、現状の劣化予測では、経年とともにその精度は低下し、誤差 (幅) を持っていることは当然である。そこで本章では、確率密度関数を用いて、各影響因子における劣化予測の精度について検討する。

3.1 塩害^{5), 9)}

塩害の劣化予測をするために用いるパラメータはさまざまあるが、その中でも特に重要なのが海岸線からの距

離である。そこで本節では、海岸線から100mの位置にある橋梁について、塩害劣化予測シミュレーションをすることにした。また、鉄筋腐食量を予測する上で重要なパラメータである鉄筋のかぶり厚さ(30mmから10mm単位で7通り)と水セメント比(30%から5%単位で7通り)の組み合わせについて、49通りにパターン化した。しかし、施工時のその組み合わせの分布についての詳しい統計がないため、道路橋示方書⁵⁾などの文献より、一般的な鉄筋かぶり厚さと水セメント比、および北海道におけるポストテンション方式PC桁、プレテンション方式PC桁、RC桁の3種類の構造形式割合を参考にして、鉄筋のかぶり厚さと水セメント比の平均値を計算した。そして、それぞれを式(5)によって表される正規分布であると仮定し、その組み合わせのサンプル数について計算した結果を表-2に示す。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (\sigma > 0) \quad (5)$$

ここに、

μ : 平均値 σ^2 : 分散 σ : 標準偏差

表-2 かぶり厚さと水セメント比の橋梁サンプル数

	30mm	40mm	50mm	60mm	70mm	80mm	90mm	合計
30%	0.2	1.0	3.3	8.9	13.5	8.1	1.8	36.8
35%	0.7	3.8	12.0	33.1	49.9	29.9	6.7	136.2
40%	1.4	7.3	23.2	63.9	96.4	57.7	12.9	262.8
45%	1.5	7.8	24.7	68.0	102.6	61.5	13.7	279.9
50%	1.0	5.3	16.7	45.9	69.3	41.5	9.2	189.0
55%	0.4	2.2	7.0	19.3	29.1	17.4	3.9	79.4
60%	0.1	0.4	1.4	3.9	5.8	3.5	0.8	15.9
合計	5.5	27.9	88.4	243.1	366.7	219.6	48.9	1000.0

そして、表-2のサンプル数を用いて、塩害劣化シミュレーションをするため、塩害の平均劣化曲線を計算した。そして、その誤差を検討するために、10年毎の平均値、分散、標準偏差を計算し、その結果を表-3に示す。また、表-2を用いて計算した塩害の平均劣化曲線と、1000橋の橋梁について、10年毎に劣化シミュレーションした結果を図-3に示す。図中の点は、鉄筋腐食残存断面率に対する橋梁数を表している。横軸の10年間隔がちょうど橋梁数100橋である。図中より、塩害の劣化曲線は、経年とともに分散、標準偏差が大きくなり、実際の点検データがその正規分布で表された誤差(幅)の範囲内に評価される可能性が高いと考えられる。

表-3 塩害における分散と標準偏差

供用年	平均値	分散	標準偏差
0	100.0	0.0	0.0
10	99.5	1.0	1.0
20	96.8	14.2	3.8
30	91.1	46.2	6.8
40	82.9	80.5	9.0
50	73.3	103.4	10.2
60	63.0	115.9	10.8
70	52.3	122.5	11.1
80	41.4	126.1	11.2
90	30.4	128.0	11.3
100	19.4	129.1	11.4

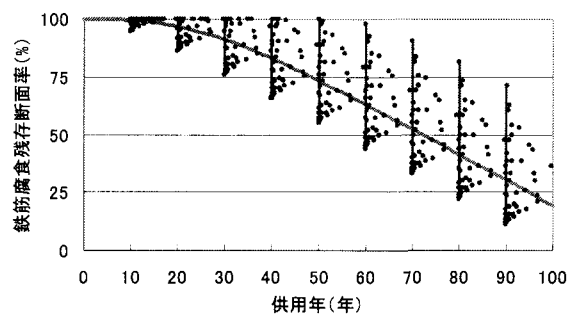


図-3 塩害劣化シミュレーション

3.2 凍害⁷⁾

凍害の劣化予測をするために用いるパラメータには、凍結融解作用、水セメント比、空気量、水の供給の有無などがあるが、その中でも特に重要なのが凍結融解作用である。そこで本節では、寒冷地である北海道に架設されてある橋梁を基に、凍害劣化予測シミュレーションをすることにした。また、ここでの凍結融解サイクルは、日最高気温が0℃以上で融解、日最低気温が-1.0度以下で凍結することを条件にしており、北海道における年間凍結融解回数に対する橋梁数割合を表-4に示す。

表-4 北海道における橋梁の年間凍結融解回数割合

	100回未満	100~120回	120~140回	140回以上
割合(%)	19.6	27.9	36.0	16.5

そして、表-4の橋梁数割合を用いて凍害の平均劣化曲線を計算し、寒冷地にある橋梁の凍害劣化シミュレーションをする。しかし、施工時の水セメント比と空気量に関する詳しい統計がないほか、凍害を引き起こす要因である水の供給の有無は局部的に起こりうる。さらに、施工不良や施工ミス等の人為的な原因が考えられるため、劣化予測にも誤差(幅)があると考えられる。したがって、塩害と同様に、パラメータは正規分布であると仮定して、凍害の劣化予測における10年毎の平均値、分散、標準偏差を計算し、その結果を表-5に示す。凍害の劣化曲線は、経年とともに分散、標準偏差が大きくなる。

表-5 凍害における分散と標準偏差

供用年	平均値	分散	標準偏差
0	100.0	0.0	0.0
10	96.5	0.4	0.6
20	93.1	1.6	1.2
30	89.6	3.5	1.9
40	86.1	6.2	2.5
50	82.6	9.7	3.1
60	79.2	14.0	3.7
70	75.7	19.0	4.4
80	72.2	24.9	5.0
90	68.7	31.5	5.6
100	65.3	38.8	6.2

4. 複合劣化予測の検討¹⁰⁾

実際の橋梁の劣化を考えた場合、単独劣化よりも、むしろ複合的な劣化が生じていると考えられる。複合的な劣化が発生する場合、単独劣化との相関関係としては、

独立的に影響する複合劣化, 相乗的に影響する複合劣化, 因果的に影響する複合劣化が考えられる。本章では, 寒冷地である北海道において特に影響が大きいと考えられる塩害と凍害の複合劣化について検討する。

本研究において, 塩害における劣化予測では, 鉄筋腐食量に注目して「鉄筋腐食残存断面率」を劣化指標としてきた。また, 凍害における劣化予測では, 耐荷力に注目して「相対動弾性係数」を劣化指標としてきた。しかし, これらの異なる二つの劣化指標とした複合劣化について考えた場合, 凍害によるコンクリート表面に微細ひび割れ, スケーリング, ポップアウト等が発生することに着目した。そして, スケーリング等のコンクリート表面の劣化により, 鉄筋のかぶり厚さが減少し, 鉄筋腐食を促進させること効果があると予測できる。

そこで本論文では, 海洋構造物の現地調査結果¹⁴⁾を基に, 剥離深さと経過年数との関係を引用している。このデータでは, 経過年数 20 年でおおよそ 5mm 程度の剥離であることが示されており, 実環境でのデータであることを考慮すると妥当な数値であると考えられる。したがって, このデータを基に得られた剥離速度を凍害による鉄筋のかぶり厚さの減少速度として考え, 塩害の劣化予測式中に組み入れる。その複合予測結果と塩害の劣化曲線との比較を図-4 に示す。図中より, 鉄筋腐食残存断面率が 50% に達するまでの単独劣化と複合劣化との年数差は, おおよそ 3 年程度である。

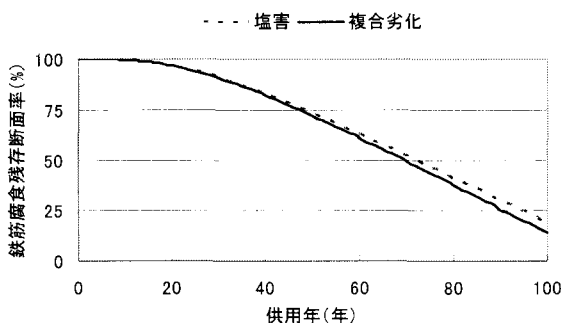


図-4 塩害・凍害複合劣化曲線

5. 結論

本論文では, 橋梁のコンクリート部材における塩害と凍害の単独劣化予測と, その複合劣化予測について検討し, 確率密度関数を用いて, 各影響因子における劣化予測の精度について検討した。その結果を以下に示す。

- ① さまざまな文献や示方書などから技術情報を収集して, 式やデータを組み合わせることにより, 塩害および凍害の単独劣化曲線を求めることができた。
- ② それぞれの単独劣化曲線において, 確率密度関数を用いて分散や標準偏差を求めることにより, 劣化予測の誤差(幅)を表すことができ, 経年に伴う変化の傾向を把握することができた。
- ③ 凍害による剥離深さと経過年数との関係より, 剥離速度を鉄筋のかぶり厚さの減少速度として考えて, 塩害と凍害の複合劣化予測をすることができた。
- ④ ある一定の劣化度に達するまでの, 塩害の単独劣化予測と塩害と凍害の複合劣化予測との年数差は, お

よそ 3 年程度である。したがって, 海岸線付近での橋梁は, 凍害より塩害による劣化が大きいと考えられる。

今後の課題として, これらの検討を基に将来の合理的な橋梁マネジメントを推進するためには, 次のような課題を解決していく必要がある。単独劣化予測については, その劣化予測の精度を高めていくこと, 複合劣化予測については, コンクリートの劣化に影響を及ぼすそのほかの組み合わせに関連する複合劣化予測式を検討し, 点検データとの関連を評価し, 劣化後の健全度評価として活用できるように検討していく必要がある。

謝辞: 本研究を行うにあたり, 以下の方々には有益なアドバイスを貢献をいただきました。ここに名前を掲載させていただき, 感謝の意を表します。

魚本健人教授(東京大学生産技術研究所), 鮎田耕一教授(北見工業大学), 山崎智之氏(北見工業大学), 岡田包儀氏(北見工業大学), 猪狩平三郎氏(北見工業大学)

また, 本研究は平成 15 年度文部科学省科学研究費(代表者: 大島俊之)の補助を受けて行われました。

参考文献

- 1) 西川和廣: 道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.1-10, 1994.10.
- 2) 橋梁と基礎, 特集, 橋を守る技術と人, Vol.35, No.8, 2001.8.
- 3) 土木学会コンクリート委員会: 2001 年度制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 2001.1.
- 4) 関博, 松井邦人, 松島学, 金子雄一, 田畑裕: コンクリート構造の寿命予測に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.77-82, 1990.
- 5) 日本道路協会: 道路示方書・同解説, I 共通編 III コンクリート橋編, 2002.3.
- 6) 鮎田耕一, 桜井宏, 小笠原育穂, 安藤輝夫, 木村伸之: 寒冷地の海域に 5~6 年間暴露したコンクリートの性状, 寒地技術シンポジウム講演論文集, 1992.12.
- 7) 富坂崇, 浜幸雄, 田畑雅幸, 鎌田英治: コンクリートの凍害を対象とした気象環境評価の一提案, 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, pp.279-284, 1993.5.
- 8) 田代嘉宏, 脇本和昌, 大崎絢一: 確率と統計要論, 1979.8.
- 9) 国土交通省土木研究所: PC 橋の塩害対策に関する検討, ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(III), 2001.3.
- 10) 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, 2001.5.
- 11) 堀口敬, 佐伯昇, 遠藤博: 寒冷地における海洋コンクリート構造物の劣化について—第一報—, 寒地技術シンポジウム講演論文集, pp.337-340, 1994.11.