

BMS に用いる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 concrete structural member for BMS(Bridge Management System)

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)
北見工業大学大学院 学生員 丹波 郁恵(Ikue Tamba)
㈱ドーコン 正 員 佐藤 誠(Makoto Sato)

1. はじめに

現在、北海道における国道橋の数は約 3,000 橋で、その過半数は供用開始から 30 年以上経過した橋梁である。さらにこれらの橋梁は、北海道の厳しい環境条件、近年の交通量の増加と大型化などにより、過酷な供用条件にさらされており、老朽化が進行している。このような状況にもかかわらず、橋梁の維持管理に費やされる予算は限られているほか、橋梁の維持管理業務を行うエキスパートもまだまだ不足しているのが現状である。このため、橋梁の余寿命を推測して補修・補強計画のサポートをすることは重要な課題である。

本研究では、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を含めた劣化予測について検討を行う。ここではコンクリート部材に着目した劣化予測の手法について検討し、さらに実際に北海道に架設された橋梁の点検データと比較してその妥当性を検証する。

本論文で、劣化予測をすることの主な目的としては、余寿命を推測し、補修・補強計画のサポートをすることであるため、ここで検討する劣化予測の手法はかなり概括的な判断を用いることとなる。これらの判断の精度の向上は、実際のデータとの比較および予測手法の発展によって実施されていくことは当然である。

2. 影響因子の検討

橋梁のコンクリート部材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。橋梁の架設地点の環境条件および使用条件により、コンクリート部材の劣化に影響する因子として表 1 にその主な劣化要因と劣化指標を示す。

ここでは、寒冷地である北海道において大きな影響因子の 1 つである凍害を含め 6 項目を挙げた。本研究では、北海道におけるコンクリート部材の主要な劣化要因とされる塩害、凍害、アルカリ骨材反応、中性化および床版の疲労に関する劣化予測について検討する。なお、化学的浸食については、その影響する可能性が他の劣化に比べて低いため、今後の検討項目とした。

塩害は、部材表面に付着した塩化物イオンがコンクリート内に浸透することで鉄筋等が腐食し、体積膨張することで、ひび割れや剥離が発生する。その主な原因としては、海岸地域における海水および飛来塩分、積雪寒冷

地における凍結防止剤の散布が考えられる。凍害は、コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによってコンクリート表面からスケール、微細ひび割れ、ポップアウトなどが発生する現象で、凍害の程度は主として凍結融解回数が大きく影響する。アルカリ骨材反応は、骨材中に含まれる反応性シリカ鉱物や炭酸塩岩を有する骨材がコンクリート中のアルカリ性水溶液と反応して、コンクリートに異常膨張やひび割れを発生させる。中性化は、二酸化炭素がセメント水和物と炭酸化反応を起こし、細孔溶液中の pH 値を低下させることで、鉄筋等の腐食が促進され、コンクリートのひび割れや剥離が発生する。床版の疲労は、鉄筋コンクリート床版が大型車交通などの輪荷重の繰り返し作用により床版ひび割れや陥没を発生させる。

表 1 コンクリート部材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

3. 各影響因子の劣化予測 1), 2), 3), 4)

3. 1 塩害 5), 6)

塩害における劣化の予測は、図 1 および図 2 に示す。図 1 は供用年の経過に伴う塩化物イオン濃度の変化、図 2 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 はコンクリート表面からのかぶり 5.0cm、CASE 2 は 9.0cm、水セメント比は共に 50%として計算した。

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

ここに、

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数[cm²/年]

W/C : 水セメント比[%]

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

ここに、

x : コンクリート表面からのかぶり[cm]

t : 経過年数[年]

$C(x,t)$: 塩化物イオン濃度[kg/m³]

Co : 表面における塩化物イオン濃度[kg/m³]

D : 塩化物イオンの拡散係数[cm²/年]

$C(x,0)$: 初期含有塩化物イオン濃度[kg/m³]

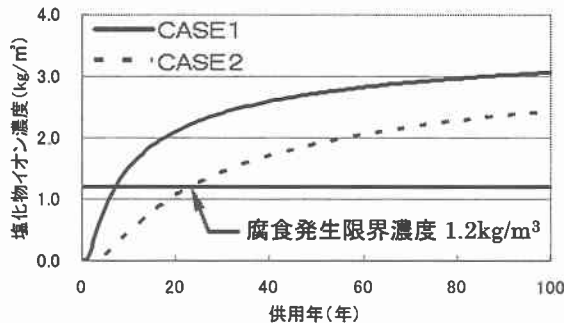


図1 塩化物イオン濃度

塩害の劣化予測は、コンクリート中の鉄筋の腐食が始まるまでを塩化物イオン濃度で予測する潜伏期段階の予測と、鉄筋が腐食し、その腐食量で予測する進展期以降の予測に手法が分けられる。腐食開始までは式(1)、式(2)より塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度である 1.2kg/m³ となるときの年数を求め、腐食発生後は鉄筋の腐食量に劣化が依存するため、式(3)の鋼材の腐食速度 Fr を時間積分して鉄筋腐食量を求めている。ここでは、腐食開始より 100 年後を最大腐食量と仮定し、鉄筋腐食残存断面率を求めている。

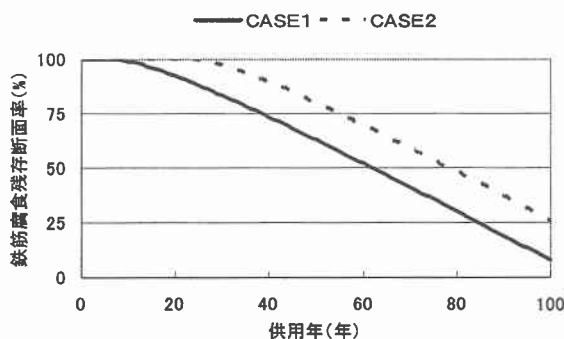


図2 塩害による劣化予測

$$Fr = \frac{k_{ri}^A}{k_{oi}^C} \cdot \frac{C}{A} \cdot \left(k_{Do} \frac{dCo(L,t)}{dx} \right) \quad (3)$$

ここに、

Fr : 腐食速度

k_{ri}^A : 電流密度を錆生成速度に変換する電気化学当量
($=5.55 \times 10^{-4}$ [g/c])

k_{oi}^C : 電流密度を酸素消費速度に変換する電気化学当量
($=8.29 \times 10^{-5}$ [g/c])

C/A : カソードとアノードの面積比
($=10 \times \exp(-0.05 \times T[\text{年}])$ と仮定した。)

$Co(L,t)$: 鉄筋位置での浸透開始からの時間 t における酸素濃度[kg/m³]

Do : 気体状態の酸素の拡散係数[m²/s]

k : 水中に溶ける酸素の割合を示す係数
($=0.03 \times \text{飽和度}/100$)

3. 2 凍害

凍害における劣化の予測は、図3に示す経過年数に伴う相対動弾性率の関係として示す。相対動弾性率は、北見工業大学で長期間(13年)継続的に観測を続けている供試体データ⁷⁾を基に、主要因である凍結融解回数を120回/年とした式(4)および式(5)によって劣化予測を行っている。また、図中、CASE 1は式(4)で表し、水セメント比が55%、CASE 2は式(5)で表し、水セメント比が45%、空気量は共に4%として計算した。

$$y = 101 - 0.374t - e^{-5.913 \times 10^{-8} \times t} \quad (4)$$

$$y = 101 - 0.338t - e^{-4.750 \times 10^{-8} \times t} \quad (5)$$

ここに、 t : 経過年数[年]

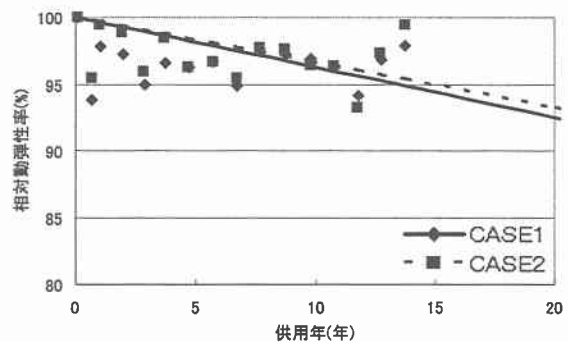


図3 凍害による劣化予測

3. 3 アルカリ骨材反応^{8), 9), 10), 11), 12)}

アルカリ骨材反応における劣化の予測は、図4に示す供用年と100~0を縦軸とした健全度として示す。そして、点検結果や過去の文献等¹³⁾より、おおよそ4次関数に近い曲線になることが予測されることから式(6)を用いた。また、この曲線は、供用開始後100年で健全度が0になる曲線を基本とし、時間 t に促進条件の係数 α を掛けたもので劣化予測を行っている。

$$y = 100 - 0.000001 \alpha t^4 \quad (6)$$

ここに、 t : 経過年数[年]

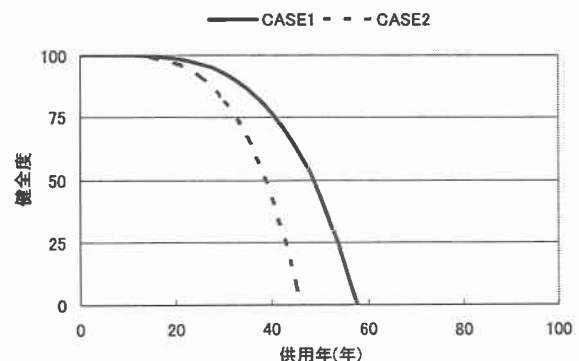


図4 アルカリ骨材反応による劣化予測

アルカリ骨材反応の促進条件の検討項目としては、反応性骨材の混合割合、アルカリ量、単位セメント量、AE剤等の混和材料の使用状況、空気量、温度・湿度、水の供給源について、反応を促進する影響の度合いによりそれぞれを係数値とした。また、図中、CASE1は $\alpha=9.0$ 、CASE2は $\alpha=22.4$ として計算した。

3. 4 中性化

中性化における劣化の予測は、式(7)に示すように中性化深さを、中性化期間の平方根に比例する式として表すことができる。そして、式(8)を用いて中性化残りを求め、式(9)より鉄筋腐食残断面率を計算し、図5に示す。また、図中、CASE1は水セメント比が55%、かぶり x が3.0cm、CASE2は60%、3.5cm、共に乾燥しやすい環境として計算した。

$$y = R(-3.57 + 9.0W/C)\sqrt{t} \quad (7)$$

ここに、

y : 中性化深さ[mm]

W/C : 水セメント比[%]

R : 環境の影響を表す係数 (乾燥しやすい環境 : $R=1.6$)

(乾燥しにくい環境 : $R=1.0$)

t : 中性化期間[年]

$$X = x - y \quad (8)$$

$$Y = 97.77e^{-0.1X} \quad (9)$$

ここに、

X : 中性化残り[mm]

Y : 鉄筋腐食面積率[%]

x : コンクリート表面からのかぶり[cm]

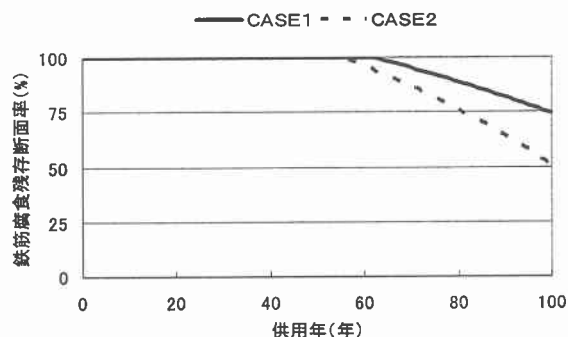


図5 中性化による劣化予測

しかし、この予測方法では、中性化が起きる条件として、水セメント比(W/C) $>55\%$ 、または、かぶり(x) $<3.5\text{cm}$ でかつ乾燥しやすい環境下であることが確認できる。ところが、塩害対策や凍害対策をした場合、 W/C は40~50%、かぶりは5.0cm以上を用いている⁵⁾傾向にあり、理論上、中性化の進行は起こらない。

3. 5 床版の疲労¹⁴⁾

床版の疲労における劣化予測は、輪荷重走行試験機による押し抜きせん断疲労実験から得られたS-N関係式より、式(10)を用いて疲労寿命を計算する。また、供用年の経過に伴う等価破壊回数に対する累積繰返し回数の関係を図6に示す。

$$T_f = N_f / N_{eq} \quad (10)$$

ここに、

N_f : 交通量、輪荷重頻度分布、基本輪荷重、最大輪荷重、衝撃係数、自動車通行位置を考慮した等価破壊回数

N_{eq} : 交通量、輪荷重頻度分布、基本輪荷重、最大輪荷重、衝撃係数、自動車通行位置を等価に換算した年間繰返し回数

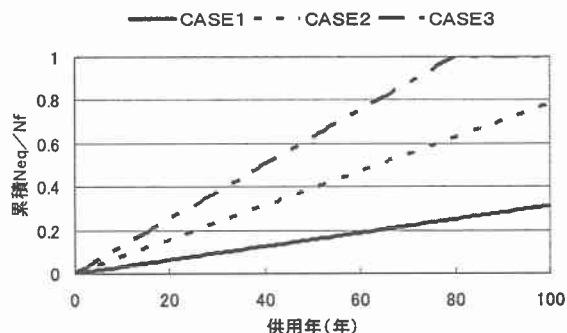


図6 累積 N_{eq}/N_f

4. 複合劣化の検討

ここまでは、単劣化予測について、その劣化要因と因子についてそれぞれ述べてきた。しかし、実際の橋梁の劣化を考えた場合、単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。そこで本研究では、複合劣化の合成法の1手法として、以降に示す方法で塩害、凍害、アルカリ骨材反応、中性化、床版の疲労について、それぞれの関係ごとに劣化予測を検討した。

複合的に劣化が発生する場合、単劣化との相関関係としては、独立的に影響する劣化、相乗的に影響する劣化、因果的に影響する劣化が考えられる。そこで文献³⁾等から各劣化の中で相関の高い組み合わせを選び、北海道で影響が大きい凍害と塩害の複合劣化について検討した。本研究において複合劣化曲線は、それぞれの単劣化曲線を1:1の割合で重ね合わせることにし、健全度として考えることにした。

図7は、凍害と塩害の複合劣化を劣化曲線として表し、それと北海道の国道橋点検結果より得られた躯体のひび割れデータから、双方の劣化の影響が考えられる地域のデータを抽出し、その関係を供用年に対して示したものである。凍害の影響としては、凍結融解の繰返しにより塩化物イオンの移動の促進、塩化物イオン濃度の濃縮、スケーリングやポップアウトによりかぶりが減少することによる腐食因子の促進があり、塩害による影響は、鉄筋腐食によりひび割れが発生することによる水分の進入による凍害の促進があり、これらは相乗的に影響しているものと考えられる。また、図8は凍害と塩害に加え床版の疲労を考慮した複合劣化を劣化曲線として表し、それと北海道の国道橋点検結果より得られた床版のひび割れデータを抽出し、その関係を供用年毎に示したものである。

ここで、図中の健全度とは、旧建設省「橋梁点検要領(案)」¹⁵⁾に基づいて実施された北海道の国道橋点検結果において、それぞれOK~Iの5段階に損傷評価された部材を、100~0に数値化したものである。また、図中の

点検橋梁とは、その抽出したデータで供用年毎の平均値をプロットしたものである。

図7および図8の結果から、躯体のひび割れにおける塩害と凍害の複合劣化、床版のひび割れにおける塩害と凍害および床版の疲労の複合劣化を点検結果との比較により、その妥当性のある程度評価できたといえる。

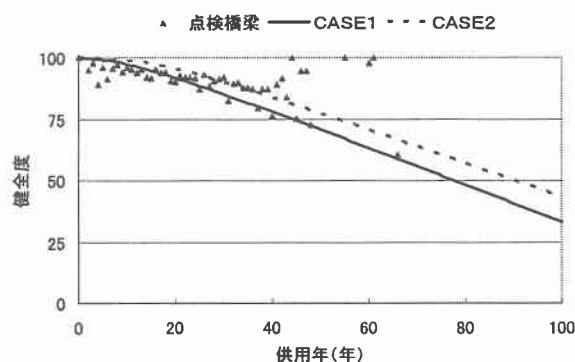


図7 躯体の複合劣化曲線と点検橋梁との比較

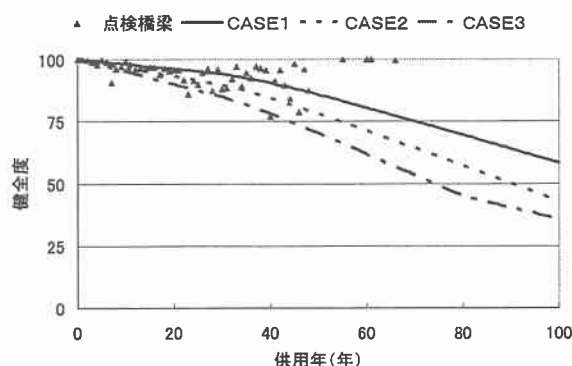


図8 床版の複合劣化曲線と点検橋梁との比較

5. 結論

本研究においては、部材毎の将来における健全度の劣化を複合的な要因も考慮した上で予測し、また、その妥当性の検討も行った。

コンクリート部材に着目した劣化予測を検討するため、コンクリート劣化に影響する5つの因子の複合劣化について検討した。その結果、凍害、塩害および床版の疲労を考慮した複合劣化曲線と点検結果との比較から、ある程度の相関が得られ、劣化曲線の妥当性を検証できた。

今後の課題として、劣化予測の精度を高めていくとともに、複合劣化の予測については、塩害と凍害のように2種の劣化についての組み合わせの検討だけでなく、関連する劣化項目を全て考慮した複合劣化予測式を検討し、点検データとの関連性を評価し、劣化後の健全度評価として活用できるよう検討していく必要がある。そして、BMSに取り込むことにより、余寿命を推測し、補修・補強計画のサポートをすることが可能となる。

謝辞：本研究を行うにあたり、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 助手（北見工業大学）に有益なアドバイスをいただきました。ここに、感謝の意を表します。

また、北見工業大学橋梁工学研究室の樋口匡君、藤川大輔君にデータ解析において協力していただきました。

尚、本研究は平成14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) 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.
- 2) 土木学会コンクリート委員会：2001年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]制定資料，2001.1.
- 3) 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.
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'02[基礎編]，2002.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 岡田清，中野錦一，小野紘一，松村誠：大型コンクリートモデルによるASRひび割れの再現，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.567-572，1987.
- 9) 秀島節治，能町宏，高田誠，西林新蔵：反応性骨材を用いたコンクリートの膨張特性に及ぼす混和剤の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.579-584，1987.
- 10) 鳥居和之，奥田由法，松田康孝，川村満紀：凍結防止剤の影響を受けたASR損傷コンクリート橋脚の調査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.173-178，1998.
- 11) 加藤雅彦，山本親志，銀山功，田代芳文：アルカリ量，スラグ量を変えたコンクリートのAARに関する屋外暴露実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.745-750，1988.
- 12) 西林新蔵，谷村潔，林昭富，今岡伸二：アルカリ骨材反応に及ぼす乾湿繰り返し作用の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.789-792，1988.
- 13) 宮本文穂，串田守可，足立幸郎，松本正人：Bridge Management System (BMS)の開発，土木学会論文集 No.560/VI-34，pp.91-106，1997.
- 14) 松井繁之，小島敬克，島田功，清水誠一，福井降晴，福田収，前田昌俊：RC床版の耐荷力と耐久性，土木学会関西支部昭和60年度講習会テキスト「既存橋梁の耐荷力と耐久性」（委員長 前田幸雄），pp.25-116，1985.7.
- 15) 旧建設省土木研究所：橋梁点検要領(案)，土木研究所資料，第2651号，1998.