

コンクリート構造物の劣化作用マップの作成

新潟大学大学院 学生会員 ○内田真愛 新潟大学 学生会員 土門瑞生
新潟大学 正会員 佐伯竜彦 新潟大学 正会員 齋藤豪

1. はじめに

コンクリートの劣化機構には、中性化、塩害、凍害、アルカリシリカ反応がある。それぞれの劣化機構は降水量や気温、湿度、塩分などの環境作用の影響を受けるため、地域によって劣化進行が異なる。しかし、道路橋示方書では塩害を例にとると全国で3つの劣化区分しかなく、地域ごとの環境作用を考慮したより細かい指標が求められている。既往の研究ではAMeDASなどの気象データを用いてコンクリートの劣化を評価した研究があるものの、数年の実測値に基づいており、モデル化していないため、長期の予測に役立つとは言えない。

そこで本研究では、モデル化した気象条件からコンクリートの維持管理を優先すべき地域を見つけ出し、維持管理を効率的に進めることを目的に研究を行った。これにより、コンクリート構造物の長寿命化に貢献することや、設計へのフィードバックも期待できる。さらに、このような最適な管理や意思決定ができるようGIS（地理情報システム）を用いて、劣化しやすい地域をマッピングした。GISはデータを可視化できるだけでなく、データの関連性や隠された傾向を分かりやすい形で導き出せるため、近年新たなコミュニケーション手段として活用されている。最後にマップの整合性を確かめるため、既存の橋梁の劣化度データを用いて現状分析を行った。

2. マップ作成の概要

2017年～2020年の4年間の気象情報（降水量、気温、湿度）を、新潟県を5キロメッシュに区切り、MSMから取得した。中性化の評価は4年間の日平均気温と日平均湿度を用い、アルカリシリカ反応の評価は日最高気温、凍害と凍結防止剤による塩害の評価については4年間の日最低気温を用いた。

塩害の劣化作用マップでは、本研究室で1道4県の計101地点で2016年11月から2017年4月に行った薄板モルタル供試体を用いた飛来塩分量の暴露試

験の結果の一部を使用した。

3. 劣化作用ごとの評価方法

(1) 中性化

コンクリート構造物の中性化の進行は、ルートt則（式(1)）で表すことができる。本研究では気温、湿度から中性化速度係数Aを求め、かぶりと腐食が発生する中性化深さを考慮して寿命予測を行った。中性化速度係数Aは、式(2)の通り求めた。また、コンクリート標準示方書¹⁾のかぶり規定の変遷をみると表1のようになるので、それぞれについて場合分けを行った。

ここで、中性化は降雨がある場合に抑制される。三橋ら²⁾は、6時間の間に降水がない場合に中性化が進行するとしているため、本研究では6時間で降水量が1mm以下の場合は降水がないとみなし、日降水量が4mm以下の場合に、中性化が進行するとし、かぶりを超えた時点の年数で評価した。

評価区分の基準はコンクリート橋梁の寿命が一般に50年程度とされているため、表2のように健全度の高いIを耐用年数50年以上とし、10年ごとに区分けした。

$$X = A\sqrt{t} \dots (1)$$

ここに、X：中性化深さ(mm)、A：中性化速度係数(mm/√年)、t：時間(年)

$$A = -0.00148H^2 + 0.144H + 0.0351T - 1.9853 \dots (2)$$

ここに、H：湿度、T：気温

表1 かぶり規定の変遷¹⁾

	1931年～ 1976年	1977年	1978年～ 1990年	1991年以 降
かぶり	20 mm	25 mm	35 mm	50 mm

表2 中性化、塩害、凍害の評価区分

健全度	期間(耐用年数)
I(健全)	50年以上
II	40~50年
III	30~40年
IV	0~30年

(2) 塩害

鋼材位置の塩化物イオン濃度は Fick の拡散方程式の解(式(3))を用いて表せる。塩害は飛来塩分量から算出される表面塩化物イオン濃度や水セメント比から算出される拡散係数・腐食発生塩化物イオン濃度を設定し、腐食発生までの期間を耐用年数とした。健全度の区分は中性化と同様に表2を用いた。

$$Cd = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} \dots (3)$$

ここに、Cd: 塩化物イオン濃度 (kg/m³), C0: 表面塩化物イオン濃度 (kg/m³), Dd: 拡散係数 (cm²/年), t: 期間 (年), x: 深さ (mm)

また、凍結防止剤の散布量もコンクリートの塩害に影響を及ぼす。現状では市ごとの大まかな散布量データしかないため、表3の北陸技術事務所³⁾の散布基準に従って、ある一定の気温以下になると、凍結防止剤が散布されたと仮定して計算を行った。

表3 凍結防止剤の散布基準³⁾

種類	気温(°C)	散布量(g/m ³)
塩化ナトリウム	0~-3	20
	-3~-6	30
	-6~	40

(3) 凍害

成田ら⁴⁾の研究を参考に日最低気温を用いて、凍害危険度を求めた。凍害危険度は式(4)により求められる。凍害の評価区分は表4のようにした。

$$V_F = \left[\sum \{ (FT + F \times u) \times t \} + I \right] \times c \dots (4)$$

ここに、VF: 凍害危険値, FT: 外気温上の凍結融解日数, F: 外気温上の凍結したままの日数, u: 日射による融解率, t: 氷点下の温度差による凍害重み係数, I: 凍結日の最低気温を考慮した算出上の補正值, c: 湿潤程度による凍害軽減係数

表4 凍害危険値と健全度の関係

凍害危険値	~800	801 ~ 1100	1101 ~ 1400	1400以上
健全度	I	II	III	IV

① 外気温上の凍結融解日数と凍結日数の算定

凍結融解日数は、最低気温が-1.0°C以下、かつ、最高気温が-0.9°C以上に該当する日数とした。また、凍結日数は、最低気温-0.1°C以下かつ、最高気温が-0.9°Cに該当する日数とした。

② 融解率

融解率は表5より算出した。

表5 日最高気温、日最低気温と融解率の関係

日最高気温(°C) \ 日最低気温(°C)	-10.1~	-5.1~	-1.0~
		-10.0	-5.0
-1.0 ~ -5.0	---	---	68%
-5.1 ~ -10.0	---	42%	65%
-10.1 ~ -15.0	14%	38%	66%
-15.1 ~ -20.0	6%	34%	64%
-20.1 ~ -25.0	---	23%	58%
-25.1 ~	---	7%	20%

③ 凍結温度の重み係数の設定

凍結温度の影響を考慮した凍害重み係数は、2種類のコンクリートのうち、本研究では「良質骨材または AE 剤を使用したコンクリート」について検討した。

④ 凍結日の最低気温を考慮した算出上の補正值

凍結日の最低気温を考慮した算出上の補正值は以下の式(5)の通り求めた。

$$I = 6.5 \times D + 20 \dots (5)$$

ここに、D: 最低気温が-15.1以下の凍結日数

⑤ 湿潤程度による凍害軽減係数の設定

成田らの提案に基づき、地域によって下越や中越付近は200、降雪の多い上越地方は400とした。

(4) アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応によるコンクリートの膨張率は、次の式(6)で表せる。この式は、アルカリシリカ反応に影響を及ぼす降水日数の影響について考慮している。本研究では川端ら⁵⁾の研究を参考に、日降水量が4mmを超えた日とその翌日に膨張が進行するとして膨張率を計算した。評価区分は、表6に示すように膨張率で健全度を評価した。道路橋示方書では0.2mmまでのひび割れを許容しており、この時

の膨張率は 0.4%に相当するとし、健全度IVとした。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty \frac{1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_c}\right)}{1 + \exp\left\{-\frac{(t - \tau_L)}{\tau_c}\right\}} \left(1 + \frac{\phi}{t + \delta}\right) \quad \dots(6)$$

ここに、 ε_t ：時間 t における膨張率， ε_∞ ：最終膨張率， τ_c ， τ_L ， ϕ ， δ ：時間を表す定数（日）

表 6 アルカリシリカ反応の評価区分

健全度	膨張率
I（健全）	0.1%以下
II	0.1～0.2%
III	0.2～0.4%
IV	0.4%以上

4. 橋梁の劣化データの評価方法

作成した劣化作用マップと実構造物の劣化状況との整合性を評価するため、既存の橋梁の劣化程度を用いることにした。本研究では、「全国道路施設点検データベース～損傷マップ～」⁶⁾を使用して評価した。このデータベースは一般に公開されており、全国の橋梁の劣化度を閲覧することが可能である。本研究では新潟県内の健全度IからIVのデータ（約 13,000 橋梁）を使用した。しかし、既存の橋梁は供用年数が異なり、劣化が激しい地域でも供用年数が少ない橋梁では健全度が高く評価されてしまう。そこで、新潟県の橋梁供用年数を次の方法で 30 年に揃えた。全く損傷がなく、健全な状態を 4 点とし、橋梁の劣化が式 (5) に従うと仮定し、橋梁ごとに定めた a から健全度を表 7 のようにランク分けした。色が濃いほど健全度が低いことを示している。

$$y = 4 - ax^2 \quad \dots(5)$$

ここに、y：健全度，x：供用年数

表 7 健全度の区分

健全度	期間
I	健全
II	予防保全段階
III	早期措置段階
IV	緊急措置段階

5. 結果と考察

(1) 中性化

中性化はかぶり 20mm と 25mm は新潟県のほとんどが健全度IVとなったが、かぶり 35mm と 50mm は図 1 のように山沿いと海沿いを除く内陸部が劣化しやすい傾向があった。これは内陸部の気温が高く、湿度が沿岸部より低かったことが要因と考えられる。

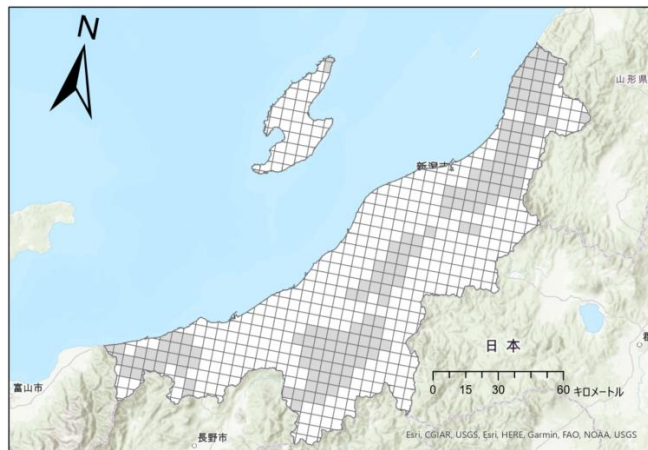


図 1 中性化 かぶり 50mm のマップ

(2) 塩害

塩害の水セメント比 45%、かぶり 50mm の時のマップは図 2 のようになった。凍結防止剤による塩害は沿岸部を除き、内陸の広い地域に分布していることが分かる。また、佐渡市の沿岸部も凍結防止剤による劣化が起きやすいことが分かる。これは冬季の最低気温が北側の地域の方が低いことが要因と考えられる。また、点は飛来塩分による塩害を示しているが、村上市沿岸部や上越で最も塩害が激しかった。しかし、沿岸部でも劣化しにくい箇所があり、風の影響を受けていると考えられる。

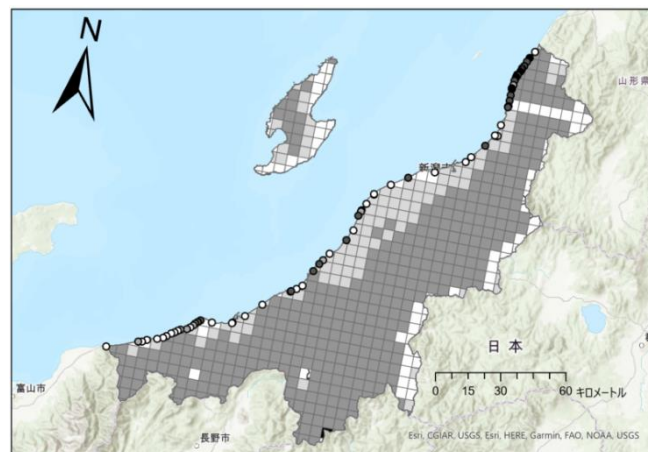


図 2 塩害のマップ(水セメント比 45%、かぶり 50mm)

(3)凍害

凍害は図3のようになった。山間部がある県境が劣化しやすいことが分かる。特に村上市や、魚沼市、長岡市付近が劣化しやすい傾向がある。これは他の地域に比べ日最低気温が低かったことが原因と考えられる。

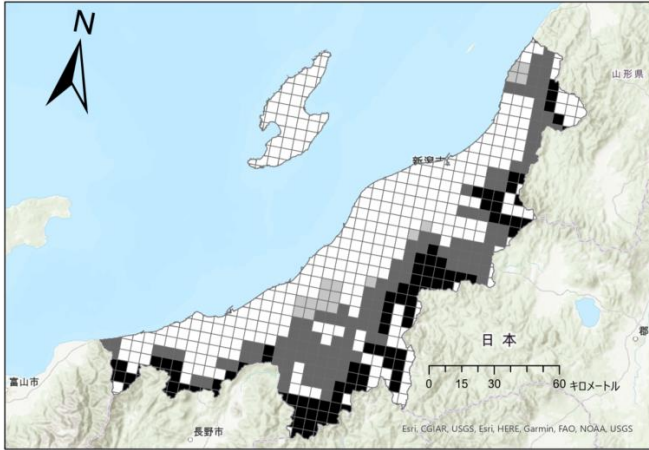


図3 凍害のマップ

(4)アルカリシリカ反応

アルカリシリカ反応は図4のようになった。雨の影響を受け、降水量が多い地域で劣化しやすい傾向があった。

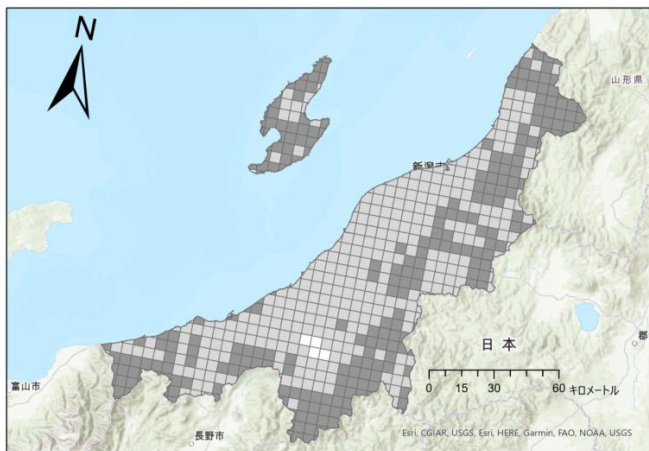


図4 アルカリシリカ反応のマップ

6. 結論

図5は実際の橋梁の劣化、図6は4つの劣化を重ね合わせたマップである。塩害は0.45、ASRは0.3、凍害は0.1、中性化は0.15の重み付けを行った。山間部は劣化していないが、これは山間部に橋梁がないことが原因と考えられる。4つの劣化機構と照らし合わせると、長岡市や村上市付近は劣化度が一致しているが、沿岸部では一致していない地域がある。これは都市部の交通量を考慮していないと考えられるため、今後の検討が必要である。

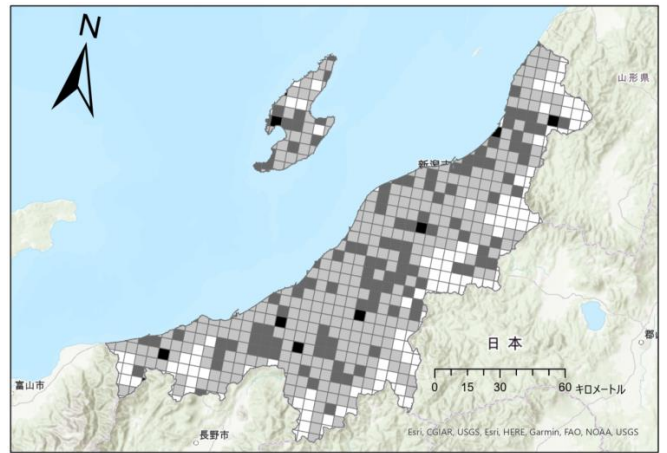


図5 実際の橋梁の劣化マップ

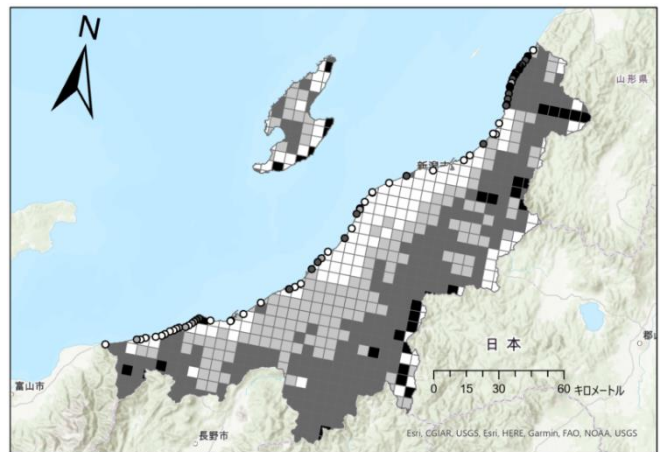


図6 4つの劣化を重ね合わせたマップ

7. 今後の予定

4つの劣化を重ね合わせた時の重みづけをする際の最適化を図る。また、疲労による劣化や複合劣化を考慮に入れる予定である。

8. 参考文献

- 1) 土木学会 2017年 コンクリート標準示方書【設計編】
- 2) 三橋博三：コンクリートの中性化進行速度に及ぼす気象環境条件の影響に関する研究，コンクリート工学論文集，第10巻第1号 1999年1月
- 3) 長谷川崇（北陸技術事務所），凍結防止剤の性能等の取りまとめ調査について
- 4) 成田健：実構造物群の調査結果に基づく凍害損傷リスクマップの作成に関する研究，コンクリート工学論文集，第19巻第1号 2008年1月
- 5) 川端雄一郎：アルカリラッピングしたコンクリートの促進膨張試験に基づく野外暴露コンクリートのASR膨張挙動の予測，セメントコンクリート論文集，2015年 69巻1号 p.496-503
- 6) <https://road-structures-map.mlit.go.jp/Map.aspx>