

RC構造の外観変状による 性能評価の判断指標について

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○水田真紀
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多昭典
(株) ネクスコ・エンジニアリング北海道 道路部 太田哲司

北海道で約40年間供用され、凍害と塩害を受けたコンクリート製壁高欄を対象にした劣化調査を実施した。そして、コンクリートの劣化度を圧縮強度と静弾性係数の比、鉄筋の劣化度を重量減少率とかぶりの比で表し、調査結果を整理した。その結果、表面化した変状によって、コンクリートと鉄筋の劣化進展経路が異なる可能性があり、特にコンクリートの浮きの発生については、他の外観変状（コンクリートの剥落やさび汁等）が生じた部分と比べると、コンクリートの物理特性が異なることがわかった。そして、本研究で示したコンクリートの劣化度を用い、コンクリートの浮き発生により第三者に影響を与える機能上の安全性低下を判断する維持管理指標を示した。

キーワード：凍害、塩害、複合劣化、外観変状、静弾性係数、機能上の安全性

1. はじめに

RC構造物には、複数の要因が組み合わされた複合劣化の環境下に曝されているものが多く存在する。北海道には、凍害と凍結防止剤散布による塩害の複合劣化の影響を受ける構造物が多く、過去のコンクリート製壁高欄（以下、壁高欄）の調査において、調査橋梁の約40%に外観変状が認められている¹⁾。また、塩害との複合劣化により凍害が促進される場合があり、コンクリート標準示方書には、それを考慮した維持管理が必要であることが示されている²⁾。

このように、複合劣化したRC構造物の維持管理については、その方法の確立が望まれているものの、複合劣化を定量的に評価する指標はまだない。そこで本研究では、実際のRC構造物に起こった外観上の劣化パターンに着目し、劣化の進行過程や傾向を把握することにより、凍害と塩害で複合劣化したRC構造物の維持管理指標となるパラメータの抽出を試みた。さらに、変状が表面化する際のコンクリートと鉄筋の劣化度を検討した。

2. 壁高欄の劣化調査

(1) 概要

本研究では、北海道内で約40年間供用され、凍害と塩害の複合的な影響を受けてきた壁高欄を対象とした。本壁高欄は、橋長412mの高架橋の両側に、RC床版と一体で現場打ちされた直壁型のコンクリート製車両用剛性防

護柵である。

実壁高欄の形状寸法と配筋状況を図-1に示す。舗装面より上部を幅2mに切断し、調査に用いた。内部には鉄筋が格子状に配置されており、基本的には縦方向鉄筋（D13；SD295）と横方向鉄筋（D16；SD295）が約200mm間隔で配筋されている。また、縦方向鉄筋は車道反対側で重ね継手されている。

コンクリートの設計基準強度は24N/mm²である。また供用期間中、数回にわたり表面被覆による補修が施されており、車道側はすべての面を表面被覆、車道反対側は表面被覆のみ、表面被覆とFRPメッシュ、補修なしの部分があった。なお、建設時の強度、補修時期や回数についての情報は無い。

本研究では、複合劣化の進行過程や傾向を把握するため、外観上の劣化パターンが異なる9か所を抽出し、劣化調査を実施した。なお、壁高欄の名称は、撤去した年度と年度毎の通し番号である。また、劣化調査に先立ち、横方向鉄筋を主鉄筋に見立てて切り出した梁型試験体（図-1に示す梁1～4）の載荷実験を実施した。よって、今後のコンクリートの劣化調査は各梁について実施することとし、4体の梁から得た結果で1壁高欄の劣化程度を評価することにする。なお、載荷実験結果については、既報告の文献³⁾を参照いただきたい。

(2) 目視および打音検査

車道側と車道反対側の調査結果を図-2に示す。なお、図には梁1～4の位置の目安になるよう、横方向鉄筋のみ示している。また、横方向鉄筋の重ね継手状況と鉄筋径、表面の補修状況に関する情報も付記した。

これより、主な外観上の劣化パターンは、H24-6はコンクリートの剥落、H24-8、H24-12、H25-4はコンクリートの浮き、H25-1はさび汁の発生であり、それら以外は軽微な変状であった。

(3) コンクリートと鉄筋の調査

採取したコア（φ50×100 mm）の圧縮試験から、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数を測定した。なお、コアは目視できる程度のひび割れを避けて、各梁から4本以上を採取した。また、鉄筋については、壁高欄から取り出した横方向鉄筋の重量をJCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準じて腐食生成物を除去した後測定し、重量減少率を得た。重量減少率の算出方法は、以下のとおりである。

$$\text{重量減少率 } W_L (\%) = \frac{(\text{腐食前重量} - \text{除錆後重量})}{\text{腐食前重量}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、腐食前重量は、実測長さにJISの単位質量(kg/m)を乗じることにより求めたが、腐食が確認されなかった鉄筋から算出した単位質量とほぼ一致していた。

3. 複合劣化の傾向

(1) コンクリートの劣化

コンクリートの圧縮強度 f_c と静弾性係数 E_c の関係を図-3に示す。さらに、図-3の結果を主な外観上の劣化パターンによって分類し、図-4に示す。なお、両図のマーカーは共通であり、健全なコンクリートの特性を表す参考値として、コンクリート標準示方書の関係⁴⁾を実線で示した。

図-3、図-4より、ほとんどの結果が示方書の関係の左側に位置していた。これは、健全なコンクリートより、圧縮強度に対して静弾性係数が低いことを意味している。さらに、圧縮強度については、H25-7の一部分を除くすべての結果が設計基準強度24 N/mm²を上回っていた。次に外観上の劣化パターンに着目すると、コンクリートの浮きが生じた壁高欄では、比較的、示方書の関係に近い傾向が見られた。しかし、その他の外観上の劣化パターンが見られた壁高欄では、外観上の劣化パターンの違いが明確に現れず、軽微な変状との区別も曖昧であった。これは、コンクリートの剥落やさび汁が発生した壁高欄は各1体であり、データが十分でなかったために傾向を

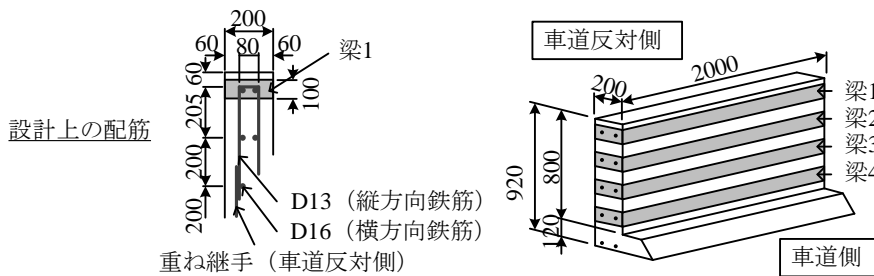


図-1 壁高欄の形状寸法と配筋状況

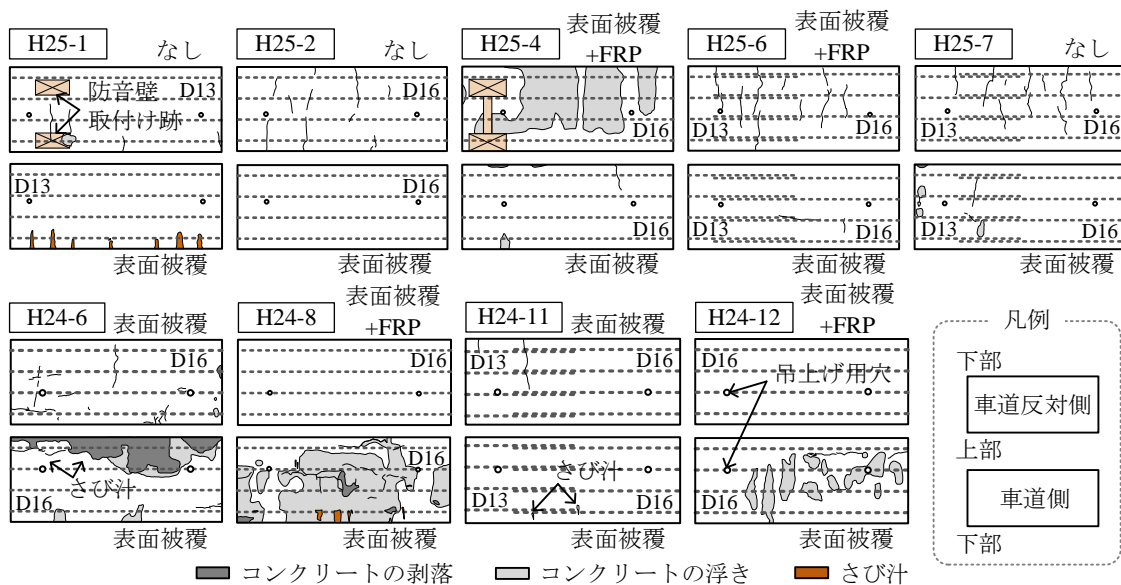


図-2 目視と打音調査結果

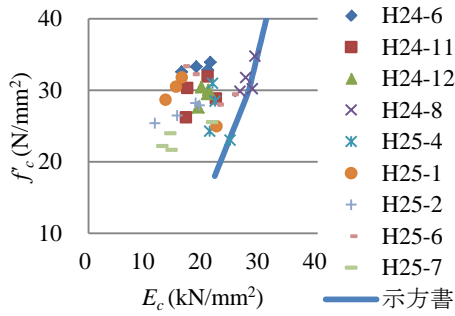


図-3 圧縮強度 f_c と静弾性係数 E_c の関係

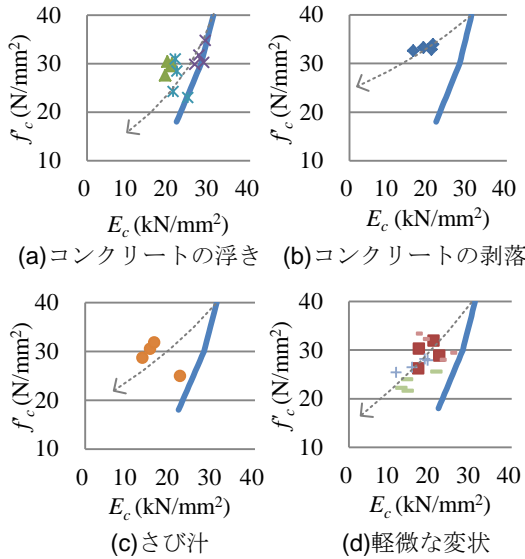


図-4 外観上の劣化パターンによる分類

捉えることが難しかったものと考えられる。

そこで、軽微な変状は、引き続き凍害と塩害を受けることで、コンクリートの浮きや剥落、さび汁の発生といった変状が表面化すると考えた。さらに、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係と外観上の劣化パターンには関連があると考え、以下の仮説を立てた。

「凍害を受け、コンクリートの劣化は、図-4の破線の矢印方向に向かって進展する（ここでは $f_c = 40 \text{ N/mm}^2$ を健全な状態としている）。そして、その矢印の勾配は内的あるいは外的要因に左右される。さらに塩害を受け、凍害と塩害それぞれの影響程度の組合せで、様々な変状が表面化する。」

この仮説に基づけば、図-4の矢印の勾配が凍害によるコンクリートの劣化度となる。しかし、本研究で対象とした壁高欄の初期状態がわからないため、圧縮強度と静弾性係数の比 f_c/E_c をコンクリートの劣化度と定義し、凍害と塩害の複合劣化進行を検討することにした。

(2) 鉄筋の劣化

鉄筋の腐食による重量減少率とコンクリートかぶりには関係があると考えられることから、鉄筋の重量減少率

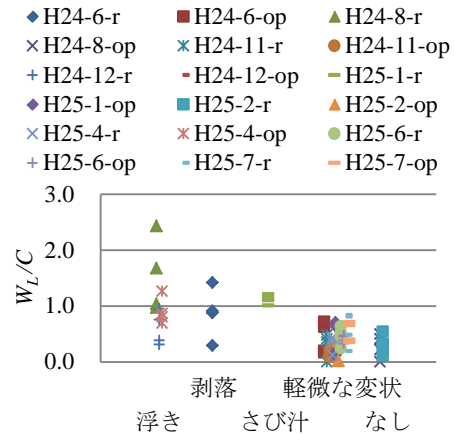


図-5 W_L/C と外観上の劣化パターンの関係

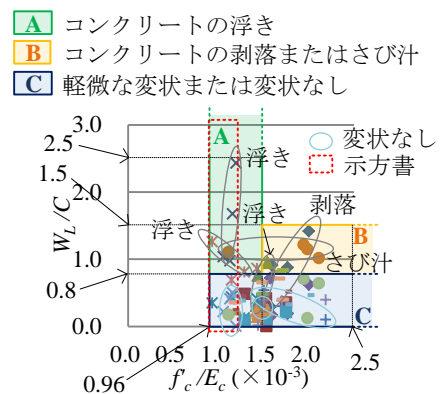


図-6 外観上の劣化パターンで分類した鉄筋とコンクリートの劣化度の関係

W_L をコンクリートかぶり $C(\text{cm})$ で除した値について、主な外観上の劣化パターン毎に整理した(図-5)。なお、壁高欄には同一高さに2本の横方向鉄筋が配置されていることから、ここでは、外観上の劣化パターンを車道側(roadway side : r)と車道反対側(opposite side : op)で区別した。また、コンクリートかぶりは表面から横方向鉄筋中心までの距離とした。

図-5より、 W_L/C 値によって外観上の劣化パターンに違いが生じることがわかる。しかし、H24-6-rとH24-8-rでは、壁高欄内の鉄筋劣化のばらつきが大きかった。これは、複数の劣化パターンが組み合わされた変状であることが影響していると考えられる。以上より、今後の検討で W_L/C 値を鉄筋の劣化度の指標として用いることにする。

(3) 凍害と塩害の複合劣化

鉄筋の劣化度 W_L/C とコンクリートの劣化度 f_c/E_c の関係を外観上の劣化パターンで分類した結果を図-6に示す。外観上の劣化パターンはA)コンクリートの浮き、B)コンクリートの剥落またはさび汁、C)軽微な変状または変状なしの3パターンで分類した。ただし、図中に示すA)の W_L/C 、B)およびC)の f_c/E_c の値は、本研究で対象とした壁

高欄に対応する値である。

縦軸については、重量減少率が高くなるほど W_L/C 値が増し、鉄筋の劣化進行を意味している。図より、 W_L/C 値が高くなると壁高欄側面に何らかの変状が生じ、変状のない壁高欄側面の W_L/C 値は低かった。これは、コンクリートの浮きやさび汁発生は、鉄筋の劣化に起因する変状であるため、当然の結果といえる。

次に、横軸については、本研究で対象とした壁高欄のコンクリートの静弾性係数 E_c の低下が大きく、 f_c/E_c 値は増加する傾向があった。一方、全国の調査結果を基にした示方書式では、コンクリートの圧縮強度 f_c の低下に伴う静弾性係数 E_c の低下は小さく、 f_c が設計基準強度24 N/mm²から実測値の最大35 N/mm² (図-3) で f_c/E_c 値は0.96~1.19であった。さらに、外観上の劣化パターン毎の f_c/E_c 値を見ると、コンクリートの浮きが生じる場合より、コンクリートの剥落やさび汁が発生する場合の方が、 f_c/E_c 値は大きくなった。以上から、コンクリートの劣化進行により f_c と E_c の比が変化し、さらに鉄筋の劣化も進行することで、コンクリートの浮きとは異なる変状が表面化したと予想される。つまり、3.(1)節で立てた仮説は妥当であると考えられる。

4. 機能上の安全性能の評価

(1) 凍害と塩害の複合劣化の進行予測

図-7は、時間 t を考慮し、図-6を3次元化した結果である。ただし、本研究で対象とした実壁高欄の過去の劣化調査結果はないため、 $t=0$ 年と40年を直線で結んだ簡易な図であり、初期欠陥の有無は想定していない。

3次元化は次のように行った。まず、 z 軸を時間 t とし、 $t=40$ 年の劣化の状況として図-6の結果をプロットした。そして、建設時の健全な状態を表す原点は、 $W_L=0\%$ より $W_L/C=0$ 、 $f_c=24$ N/mm² ($f_c=f_{cd}$:設計基準強度)と仮定した示方書式から $f_c/E_c=0.96$ とし、原点と40年経過後の劣化状況を直線で結んだ。さらに、図-6の領域Cは「変状なし」を含む領域であるため、健全な状態と判断し、 $t=0$ の面に投影した。これにより、囲まれた領域は3つに分けられ、「A:コンクリートの浮きが発生する領域」、「B:コンクリートの剥落またはさび汁が発生する領域」、「C:軽微な変状または変状のない領域」となる。

この図は、凍害と塩害による複合劣化を受け、40年後に図-6の外観上の劣化パターンとなる壁高欄の劣化進行経路の集合と考えることができる。つまり、図-7中に示した赤矢印のように、領域Cから領域Aへと複合劣化が進行するとコンクリートの浮きが発生し、領域Cから領域Bへと劣化が進行するとコンクリートの剥落またはさび汁が生じる、という進行経路を合わせた領域を示している。

- A コンクリートの浮き
- B コンクリートの剥落またはさび汁
- C 軽微な変状または変状なし

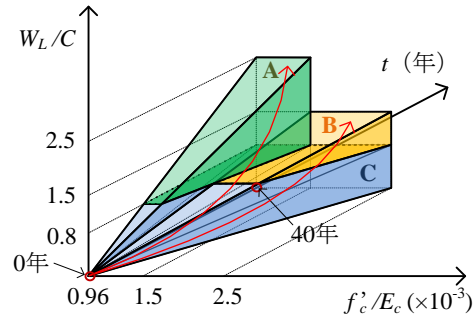


図-7 複合劣化の進行

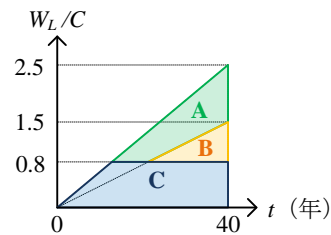


図-8 鉄筋の劣化進行

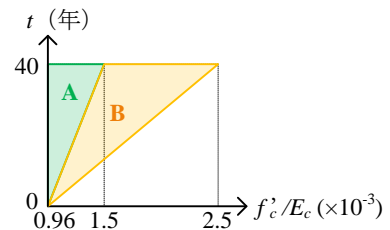


図-9 コンクリートの劣化進行

(2) 機能上の安全性低下の判断指標

以上より、コンクリートの浮きが発生する場合、他の劣化パターンが表面化する場合と比較し、コンクリートの劣化度に違いが見られることがわかった。そこで、コンクリートの浮き発生は第三者への影響が懸念される状況であることから、機能上の安全性低下の判断指標として表す方法を検討した。まず、図-7を用い、鉄筋とコンクリートの劣化度をそれぞれ時間軸との面に投影し、鉄筋の劣化度と時間、コンクリートの劣化度と時間の関係を得た (図-8、図-9)。

鉄筋の劣化進行は図-8のように表され、領域Cと領域Aの境界線は、鉄筋の腐食によりコンクリートの浮きが発生し始める時期を意味している。ただし、図の縦軸は、壁高欄の横方向鉄筋の値を用いているため、より表面近くに配置されている縦方向鉄筋の値に修正する必要がある。本研究で調査した壁高欄のうちH24-8について、縦横すべての鉄筋をはつり出し、劣化調査を行った⁵⁾。この結果、外観上の劣化が著しい車道側では、縦方向鉄筋の重量減少率は横方向鉄筋の2倍程度であった。仮に W_L

を2倍とすると領域AおよびBと領域Cの境界線の W_L/C 値は1.6になり、 $C=5$ とすると変状が表面化するときの重量減少率 W_L は8%となる。しかし、この値はコンクリートの劣化進行も考慮した値であるため、鉄筋の腐食のみ進行する場合には適用することはできない。

次に図-9より、コンクリートの劣化進行は、領域Aと領域Bの2つの領域で表される。ただし、鉄筋の劣化度が図-8の境界線以上に大きくならなければ、コンクリートの浮き、剥落、さび汁の発生は表面化しない。よって、凍害と塩害の複合劣化を受けるRC構造物について、この図を用いてコンクリートの浮きを予測する方法を以下のように提案する。

- ① RC構造物内で外部環境の異なる部分、数か所を選定する。
- ② ①で選定した部分のコンクリートの圧縮強度と静弾性係数を測定する。
- ③ 選定箇所のコンクリートの劣化度 f_c/E_c に明らかな差が生じたら、 f_c/E_c が小さい箇所はコンクリートの浮きが発生する可能性が高いと判断する。

コンクリートの浮きが発生する領域Aは、示方書に示された健全なコンクリートに近い特性を持つコンクリートであるため、コンクリートの物理特性を把握するだけでは複合劣化が進行していることを判断するのは難しい。よって、同じ構造物内でも外部環境が異なる部分のコンクリートの物理特性との差を見ることで、コンクリートの浮きが発生しやすい箇所を判別できると考えられる。例えば、本研究で対象とした壁高欄であれば、水が溜まりやすい箇所と溜まりにくい箇所、海側と山側等、外部環境の違う箇所からデータを得るとよい。

本研究ではコンクリートコアを採取し、圧縮試験を実施することでデータを得たが、定期的に複数箇所からコアを採取する方法は、構造物に損傷を与えるため最適な方法とはいえない。よって今後、非破壊試験や局部破壊を伴う微破壊試験でコンクリートの劣化度を判断できる方法を検討し、RC構造の維持管理方法を提案したい。

5. まとめ

北海道内で約40年間凍害と塩害の複合劣化を受けてきた壁高欄の劣化調査結果を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの劣化度を表す値として f_c/E_c 値、鉄筋の劣化度を表す値として W_L/C 値を提案した。
- (2) W_L/C と f_c/E_c の関係から、劣化によりコンクリートの圧縮強度 f_c と静弾性係数 E_c の比が変化し、さらに塩害を受けることで外観上の劣化パターンが変化する可能性があることを示した。とりわけ、コンクリートの浮きが発生する場合の f_c/E_c 値は、他の劣化パターンの場合と異なる傾向が見られた。
- (3) W_L/C と f_c/E_c の関係に、外観上の劣化パターンと建設からの経過時間を考慮した関係を図化した。これは、凍害と塩害の複合劣化進行経路の集合として捉えることができる。
- (4) 凍害と塩害の複合劣化を受けるRC構造について、コンクリートの浮き発生を予測し、構造としての機能上の安全性低下を判断する方法を提案した。

参考文献

- 1) 水田真紀、野々村佳哲、嶋田久俊、島多昭典：コンクリート製車両防護柵の設計と北海道の劣化事例、コンクリート工学、Vol.52、No.3、pp.263-267、2014.3.
- 2) (公社)土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、p.184、2013.
- 3) 水田真紀、野々村佳哲、嶋田久俊、田口史雄、太田哲司：凍害および塩害の影響を受けたRC梁の劣化度と曲げ耐荷挙動について、第13回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.13、pp.291-298、2013.
- 4) (公社)土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、p.39、2013.
- 5) 水田真紀、野々村佳哲、嶋田久俊、三原慎弘、島多昭典、太田哲司：著しく変状の生じたコンクリート製壁高欄の劣化調査例、第69回年次学術講演会講演概要集、V-263、2014.