

平成25年度

凍害と塩害の複合劣化を受けた RC構造の維持管理方法の検討

(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

本研究では、経時的に劣化するRC構造を合理的に維持管理していく方法の一つとして、リスクマトリクスを用いた維持管理方法について検討した。構造物の要求性能への影響度と材料の劣化度の関係としてリスクマトリクスを作成し、マトリクス中に補修の必要性を判断する指標を示した。そして、凍害と塩害の複合劣化を受けた実RC構造の調査結果をリスクマトリクスに反映させ、提案した維持管理方法の有用性を確認した。

キーワード：維持管理、リスクマトリクス、複合劣化

1. はじめに

2013年制定コンクリート標準示方書・維持管理編¹⁾によると、維持管理は「構造物の供用期間において、構造物の性能を所要の水準以上に保持するための全ての行為」と定義されている。しかし現段階では、材料の劣化、構造物の各性能に及ぼす劣化の影響を定量的に表すことは困難であるため、構造物の維持管理が最適に行われていない可能性がある。

そこで本研究では、RC構造のさらに合理的な維持管理を目指し、経時的に劣化が生じるRC構造に対して、リスクマトリクスを用いて維持管理する方法について検討する。具体的には、劣化したRC構造のリスクマトリクスを導き出し、その中に補修の必要性を判断することのできる指標を示す。そして、実際に凍害と塩害の複合劣化を受けたコンクリート製車両用剛性防護柵（以下、壁高欄）の調査結果^{2), 3)}をリスクマトリクスに反映させ、本維持管理方法の有用性を確認する。

2. リスクマトリクスを用いた維持管理方法

(1) 劣化したRC構造のリスクマトリクス

劣化したRC構造の維持管理方法として、リスクマトリクスを用いた方法について検討する。リスクマトリクスとは、リスクに対する4つの対応「リスクの低減」「リスクの保有」「リスクの回避」「リスクの移転」をマトリクスで表したもので、図-1に示すようにリスクの発生確率とリスク発生の際の影響度で表される。ここで図-1は理想的なリスクポジションを示している。しかし、

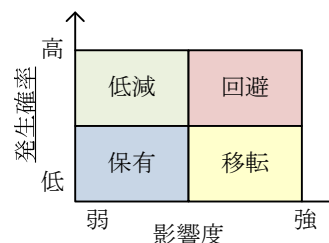


図-1 リスクマトリクス

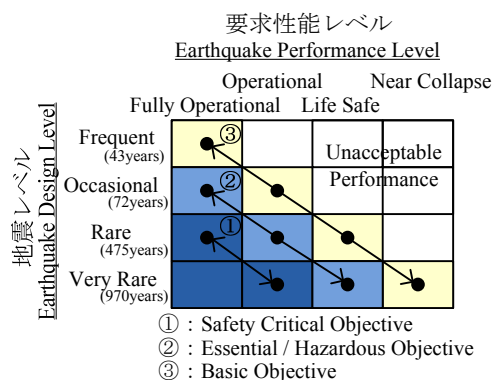


図-2 性能マトリクス^{4), 5)}

本研究のように劣化したRC構造を対象とする場合、劣化が突発的に生じるものではなく、継続性のある現象であるため、劣化を発生確率で表すことはできない。

そこで、米国のカリフォルニア構造技術者協会（SEAOC）から提案されたVision2000の耐震性能に関する性能マトリクス^{4), 5)}を参考にすることにした。図-2に示すように、性能マトリクスは構造物の要求性能のレベルと地震レベルの関係で表され、容易に設計レベルを選択することが可能である。

図-2の耐震性能マトリクスを図-1のリスクマトリクスと比較すると、縦軸の地震レベルをそのまま発生確率と

して考えることができる。また、地震の場合には、発生確率が高いほど地震規模は小さく、発生確率が低いほど巨大地震を想定している。これより、劣化したRC構造の場合には、リスクマトリクスの縦軸を劣化度とし、下方向に劣化度が高くなると考えることにした。さらに、劣化は時間の経過とともに進行する現象であるため、縦軸は時間軸と考えることもできる。したがって、劣化したRC構造のリスクマトリクスは図-3のように導き出すことができた。

(2) 補修の必要性の判断指標

劣化したRC構造のリスクマトリクスは、時間軸を伴うマトリクスであるため、「いつ」「どの段階」で補修等の対策を講じるべきかという判断に活用できる可能性があると考えた。そこで本節では、補修の必要性を判断するための指標について検討する。

まず、左上を原点（供用開始時）とし、時間が経過していく場合を考える。図-3に示す矢印Aは、保有できるリスクの範囲に向かい、経時的に受ける影響は小さい。これに対して、矢印Bは、回避すべきリスクの範囲に向かい、短期間に大きな影響を受ける。つまり、矢印Aは安全側の維持管理目標、矢印Bは許容できない目標となることから、合理的には中間に位置する範囲を維持管理目標として定めればよい。この場合、基本目標は低減あるいは移転の対策を取るべきリスクポジションとなる。劣化度、影響度ともに大きい「移転」のポジションでは、RC構造物の維持管理においては撤去を含む対策を取るべき状態であると考えられる。一方、劣化度はそれほど大きくなく、まだ顕著な影響が見られない「低減」のポジションでは、補修等何らかの対策をすれば、さらに時間が経過してもリスクを保有することができると考えられる。つまり、図-3のリスクマトリクスを活用してRC構造を維持管理するという事は、リスクを低減できる範囲を決定することと同義となる。そして、リスク低減の範囲を決める境界線は、補修の必要性を判断する指標の限界値を表すと考えることができる。

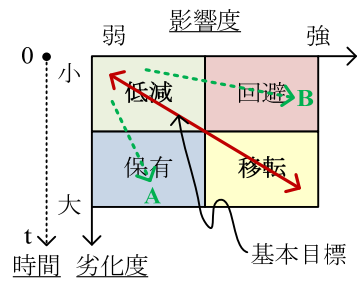


図-3 劣化したRC構造のリスクマトリクス

3. リスクマトリクスを適用した維持管理例

(1) 実RC構造を対象とした調査

a) 実RC構造の概要

本研究では、北海道内で約40年間供用されてきた壁高欄の調査結果を用いる。対象とする壁高欄は、高速道路の床版と一体化して現場で施工されたもので、積雪寒冷地特有の凍害と塩害の複合的な影響を長期にわたって受けてきた。

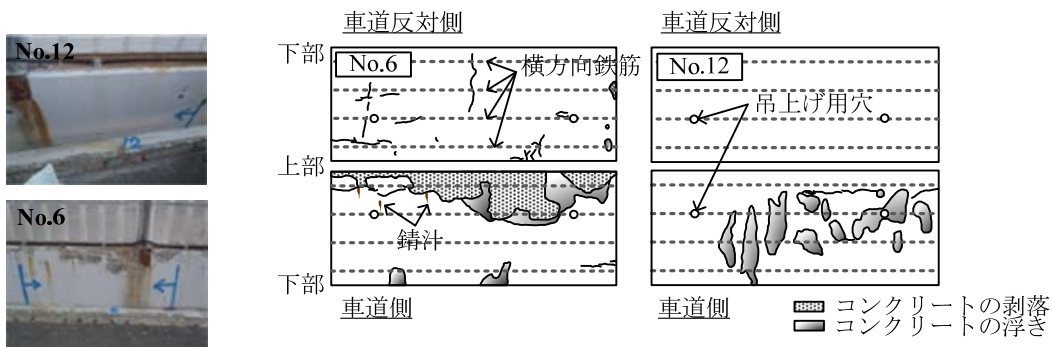
図-4に調査に用いた壁高欄2カ所の外観状況を示す。

(a) 写真は車道側から見た状況、(b)は車道側と車道反対側の変状のトレース図である。なお、壁高欄の両面に表面被覆による補修が施されていたため、たたき調査によってコンクリートの浮きを確認した。各壁高欄の劣化状況は、No.6は著しいコンクリートの剥落（車道側）と複数のひび割れ（車道反対側）、No.12は広範囲なコンクリートの浮き（車道側）と変状なし（車道反対側）であった。

b) 調査内容

RC構造としての性能を把握するための载荷試験による調査と構成材料の劣化状況を把握するための調査、の2種類の調査を実施した。

载荷試験に用いた梁供試体の概要を図-5に示す。図のように、格子状に配置された鉄筋のうち横方向鉄筋を主



(a) 車道側からの外観

(b) 壁高欄の外観変状のトレース図

図-4 壁高欄の外観変状

表-1 調査結果一覧

壁 No.	梁 No.	性能への影響度					材料の劣化度					
		側面	外観変状	耐荷力	変形性能	付着性能	f_c	E_c	W_L	f_u	f_y	δ
6	1	車道	はく落	○	○	▲	32.6	16.3	10.2	441.1	284.0	13.4
	3	車道	はく落	○	▲	▲	33.3	18.8	5.7	495.5	316.2	15.8
	4	反対	ひび割れ	○	▲	▲	33.9	21.3	1.5	519.6	341.4	16.0
12	1	車道	浮き	◎	○	◎	30.4	19.7	4.5	490.4	319.2	—
	3	車道	浮き	◎	△	◎	27.6	19.2	3.9	528.7	346.4	10.5
	4	車道	浮き	◎	△	◎	29.5	20.8	1.6	450.2	349.4	6.1

※レベル表記：◎（優）→○（同等）→△（少し劣る）→▲（劣る）

付着性能のレベル表記（ひび割れ分散性から付着性能を推定したため2段階とした）：◎（優）→▲（劣）

側面：引張側となる面の区別（車道側（車道）と車道反対側（反対））

f_c ：圧縮強度(N/mm²), E_c ：静弾性係数(kN/mm²), W_L ：重量減少率(%), f_u , f_y ：引張および降伏強度(N/mm²), δ ：伸び(%)

JIS G3112： $f_y > 295$, $440 < f_u < 600$, $\delta > 16$ （なお、網掛け部分は範囲外のデータである。）

鉄筋と見なした梁（幅10cm、高さ20cm）を切り出し、曲げ載荷試験を行った。これより、曲げ耐荷力、変形性能を確認し、理論値と実験値を比較することにより、安全性と使用性を評価した。また、付着性能については、載荷試験後のひび割れ発生状況から予測した。なお、理論計算に用いたコンクリートの強度は、設計基準強度 $f_{cd} = 24 \text{ N/mm}^2$ である。

載荷試験後に実施した調査では、コンクリートと横方向鉄筋各々の劣化程度を調べた。まず、採取したコアコンクリート（ $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ ）の圧縮試験から、圧縮強度と静弾性係数を測定した。そして、横方向鉄筋については、腐食生成物を除去して重量減少率（腐食前重量からの減少率）を測定し、引張試験から引張強度と降伏強度を測定した。なお、鉄筋D16はSD30（現在のSD295A）である。

c) 調査結果

載荷試験結果と劣化調査結果を表-1に示す。これらの結果は、劣化したRC構造のリスクマトリクス（図-3）における性能への影響度（横軸）と劣化度（縦軸）にそれぞれ対応している。また、梁(2)は他の梁試験体と載荷条件が異なるため、ここでの結果に含めていない。なお、調査結果に関する詳細については、文献^{2), 3)}を参照されたい。

性能への影響度は、理論値に対する良否で判断し、表下の表記方法に示すように大まかなレベル分けを行った。ただし、付着性能は曲げスパンのひび割れ状況から推定したため、「優」と「劣」の2レベルで判断した。また、外観変状は支点側の面、つまり引張に対して抵抗する面を対象とした。

劣化度は材料毎に判断することとし、コンクリートでは静弾性係数、鉄筋では重量減少率を各材料の劣化度を表す指標とした。これらの指標を用いたのは、今回の調査結果の中では比較的劣化の影響が表れていると判断したためである。

設計上の配筋

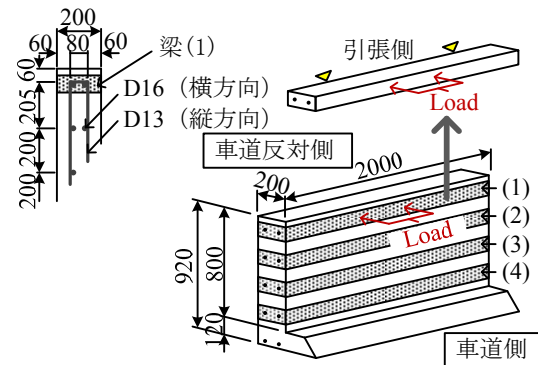


図-5 壁高欄の形状および配筋状況

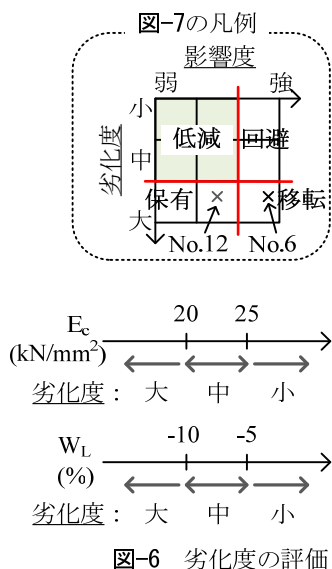
(2) 実RC構造の調査結果の適用

前節で得られた調査結果を、劣化したRC構造のリスクマトリクス上にプロットし、リスク低減の範囲について検討した。なお、ここでは、壁高欄としてではなく、劣化したRC梁構造としての評価を行う。

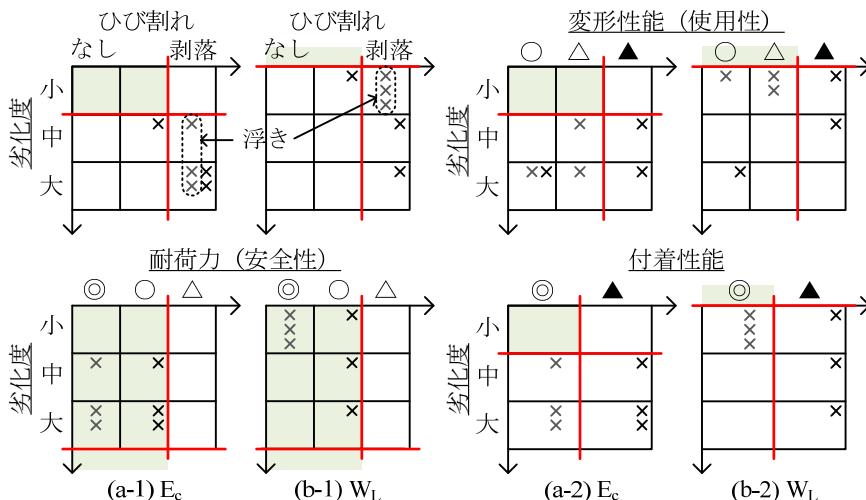
リスクマトリクスは、維持管理の要求性能毎に作成することにした。美観・景観は外観変状、第三者影響度はコンクリートの浮きの有無、安全性は曲げ耐荷力、使用性は変形性能で判断し、付着性能は複数の性能に関わるものとした。ここでは、調査結果の分布する範囲を参考にして、各材料の劣化度を図-6に示す3水準に分類した。そのため、ここでの劣化度大・中・小は一般的な意味を持たない。

各性能に与える影響度と材料毎の劣化度の関係を図-7のようにマトリクスで表示し、マス目内に調査結果をプロットした。さらに、図-7のリスク低減の範囲（網掛け部分）を以下の考えに基づき決定した。

- 横軸（性能に与える影響度）について、理論値と同等の性能を保有しているか否かを区別し、リスク低減と回避の境界線を示した。ただし、外観変



外観変状 (美観・景観, 第三者影響度)



- 状ではコンクリートのひび割れ発生まで、付着性能では「優」判定のみをリスク低減の範囲とした。
- リスク低減と回避の境界線を決定すると、境界線右側の範囲はリスク回避と移転の範囲になる。よって、この範囲にある×マーカーの最小の劣化度をリスク移転の下限と考え、リスク回避と移転の境界線とした。

図-7より、劣化したRC構造のリスクマトリクスを性能毎に、材料毎に示してみると、材料によって性能に与える影響度が異なることが良く表れていた。また、逆の見方をすると、性能によって影響を受ける材料の劣化度が異なる様子も表れていた。

本研究で適用した実RC梁について、リスクマトリクスを用いて維持管理計画を立てる場合、例えば「耐荷力にはあまり問題ないが、コンクリートに浮きがあり、変形性能も低下しつつあるため、第三者被害を与えないような補修が必要である」等の判断をすることができる。

4. まとめ

本研究では、劣化したRC構造の維持管理方法の一つとして、リスクマトリクスを用いた方法を検討した。まず、リスクマトリクスを要求性能への影響度と材料の劣化度の関係として表し、リスク低減の範囲が補修の必要性の判断指標となることを示した。さらに、実際に凍害

と塩害の複合劣化を生じた壁高欄から梁供試体を切り出し、その調査結果をリスクマトリクスに反映させ、本研究で検討した維持管理方法の有用性を確認することができた。

劣化した構造物へのリスクマトリクスの適用について確立された方法はないが、今後、さらなる調査結果の収集と材料の劣化度を定量化する指標の検討を行い、RC構造の合理的な維持管理に貢献したい。

参考文献

- 1) (公社)土木学会：2013年度コンクリート標準示方書（維持管理編），pp.5, 2013.
- 2) 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，アップグレードシンポジウム，(公社)日本材料学会，pp.291-298, 2013.11.
- 3) 水田真紀，野々村佳哲，嶋田久俊，田口史雄，太田哲司：凍害と塩害の複合劣化を受けたRC構造の劣化度評価，JCI 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性評価の体系化シンポジウム，(公社)日本コンクリート工学会，pp.289-296, 2013.11.
- 4) Structural Engineers Association of California (SEAOC)：Vision 2000 - Performance-Based Seismic Engineering of Buildings, Final Report of Vision 2000 Committee, 1995.
- 5) 本城勇介：性能設計概念に基いた設計コードの開発：code PLATFORM ver.1と基礎構造等の設計原則，第53回構造工学シンポジウム特別講演会資料，(公社)土木学会，2007.