

リスクマトリクスを用いた RC構造の維持管理方法に関する検討

水田 真紀¹・野々村佳哲²・嶋田 久俊³・島多 昭典⁴・太田 哲司⁵

¹正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)
E-mail:mizuta-m@ceri.go.jp

²非会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)
E-mail:nonomura@ceri.go.jp

³正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)
E-mail:87113@ceri.go.jp

⁴正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)
E-mail:shimata-a87cf@ceri.go.jp

⁵正会員 (株)ネクスコ・エンジニアリング北海道 道路部 (〒003-0005 札幌市白石区東札幌5条4-3-20)
E-mail:t.ota.sc@e-nexco.co.jp

本研究では、経時的に劣化していくRC構造を合理的に維持管理していくため、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。リスクマトリクスを維持管理で対象となる要求性能への影響度と材料の劣化度の関係で表し、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、北海道内で約40年間凍害と塩害の複合的な影響に曝された実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。

Key Words : maintenance, risk matrix, repair, deterioration, required performance

1. はじめに

2007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、構造物の性能を要求された水準以上に保持するための全ての技術行為」と定義されている。しかし現段階では、材料の劣化、構造物の性能に及ぼす劣化の影響を定量的に評価するのは困難であり、構造物の維持管理が安全かつ経済的に行われていない可能性があると考えられる。

そこで本研究では、合理的な維持管理を目指し、経時的に劣化していくRC構造に対し、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、Vision2000で提案された性能マトリクス^{2), 3)}を参考に、RC構造のリスクマトリクスを維持管理で対象となる種々の要求性能への影響度と材料毎の劣化度の関係で表し、補修の必要性を判断する指標を示す。そして、凍害と塩害の複合劣化が生じたコンクリート製車両用防護柵（以下、壁高欄）の調査結果を反映させ、本維持管理方法の有用性を確認する。

2. 実壁高欄を対象とした調査

(1) 実壁高欄の概要

対象とした壁高欄は、高速道路の床版と一体化して現場で施工されたものであり、北海道内で約40年間供用されてきた。そして、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り受け続けてきた。

調査には、道路面より上部の、幅2mに切断された壁高欄を用いた。図-1に示すとおり、車道側のコンクリートがはく落したもの（No.6）とコンクリートの浮きが生じたもの（No.12）の2箇所である。また、車道反対側については、壁高欄No.6には複数のひび割れが発生していたが、No.12に変状はなかった。

(2) 調査方法

実壁高欄に対して、2種類の調査を実施した。1つは、維持管理の対象となる要求性能の満足度を確認するための実験である。図-2に実壁高欄の形状と配筋状況を示す。ここでは、壁高欄から切り出した梁試験体に曲げ載荷を

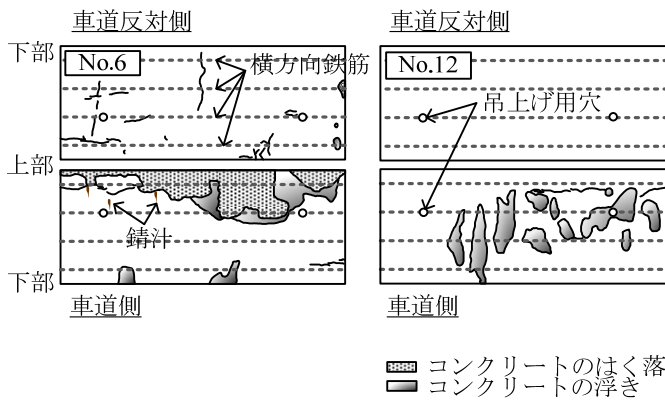


図-1 壁高欄の外観変状

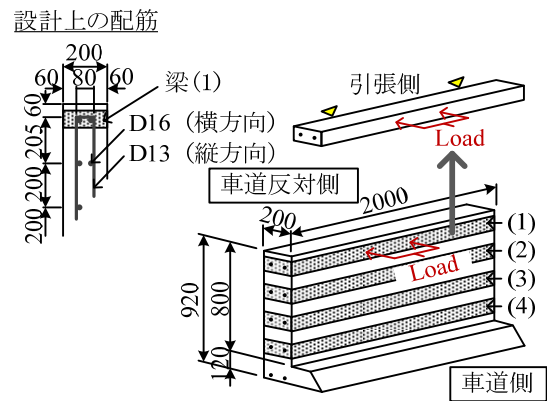


図-2 壁高欄の形状および配筋状況

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 G 3112： $f_y > 295$, $440 < f_u < 600$, $\delta > 16$ （なお、網掛け部分は範囲外のデータである。）

行い、曲げ耐荷力、変形性能、付着性能（曲げスパンのひび割れ分散性から推定）を確認した。なお、荷重方向は車道側と車道反対側の2種類あり、壁高欄No.6の梁(4)のみ図-2と同じ車道側が荷重点、その他の梁は車道反対側が荷重点になるように試験を実施した。

次に2つ目は、構成材料の劣化度の調査であり、荷重実験後の梁から採取したコンクリートと横方向鉄筋を対象とした。そして、コンクリートの圧縮試験から圧縮強度と静弾性係数、腐食生成物を取り除いた鉄筋から重量減少率（腐食前重量からの減少率）、鉄筋の引張試験から降伏強度、引張強度、伸びを測定した。なお、コンクリートの設計基準強度は $f_{cd}=24\text{N/mm}^2$ 、鉄筋はSD30（現在のSD295A）である。

(3) 調査結果

表-1に調査結果一覧を示す。ここで、梁(2)は、吊上げ用穴が横方向鉄筋を貫通し、その他の梁と荷重条件が異なることから表に含めていない。

各要求性能に対する影響度は、理論値に対する良否で判断した。なお、材料の初期データがないことから、大まかな評価を行い、そのレベルを表下に示した。また、

外観変状と鉄筋の劣化度は、曲げ荷重時に引張側（表-1の「側面」）となるコンクリート表面あるいは鉄筋、付着のデータである。調査結果に関する詳細については、文献^{4), 5)}を参照されたい。

3. 維持管理の判断指標となるリスクマトリクス

(1) 性能マトリクスとリスクの関係

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の性能マトリクス^{2), 3)}を参考にし、劣化したRC構造の維持管理方法を検討する。図-3は耐震性能に関するマトリクスであり、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ている。もともと、構造物の所有者と設計者の耐震性能に関する理解の齟齬をなくすために、対話の手段として考え出されたものであり、容易に設計レベルを選択することができる。

劣化していく構造物を維持管理する場合、経時的に低下する性能が要求性能を満足しなくなるリスクを回避する、あるいは軽減・低減する方法を示す方が理解しやすい。そこで、図-3の性能マトリクスをリスクマトリクス

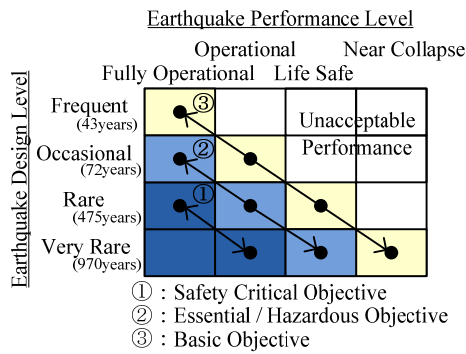


図-3 性能マトリクス^{4), 5)}

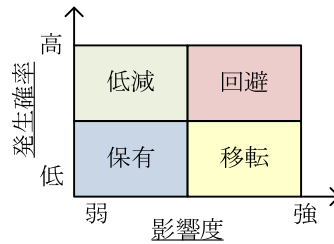


図-4 リスクマトリクス

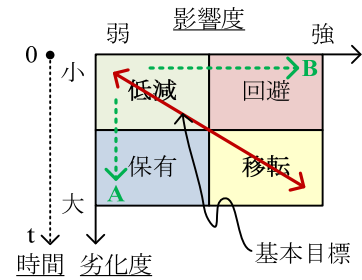


図-5 劣化したRC構造のリスクマトリクス

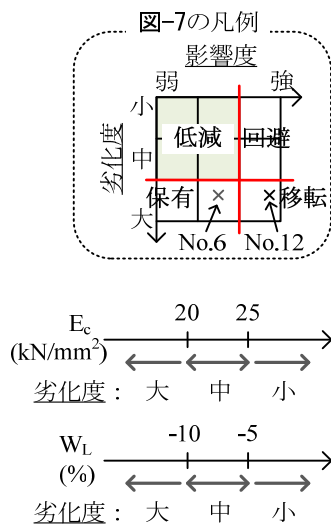


図-6 劣化度の評価

外観変状 (美観・景観, 第三者影響度)

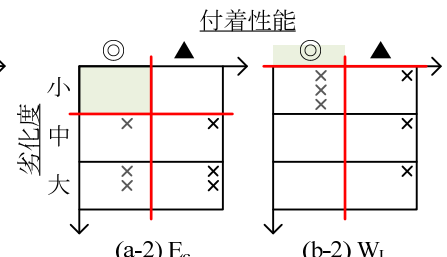
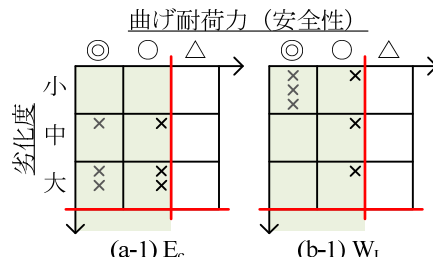
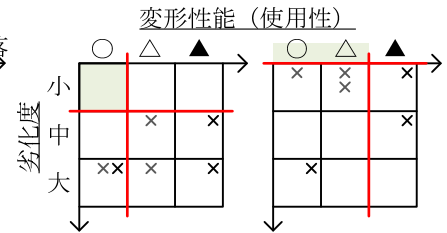
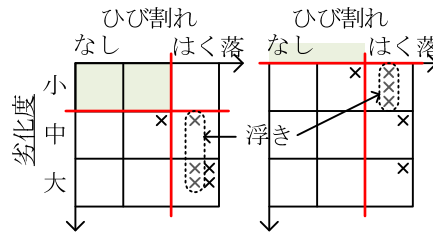


図-7 劣化した実壁高欄のリスクマトリクス

として表せば、縦軸は地震の発生確率、横軸は耐震性能に及ぼす影響度となり、各ポジションのリスクに対する対応は、理想的には図-4に示す4つに分類される。

(2) 劣化したRC構造のリスクマトリクス

構造物の劣化に関わるリスクについて検討する。耐震性能に関する図-4の縦軸が表す発生確率は、低いほど地震規模が大きくなることを想定している。これを劣化現象に置き換えると、劣化度が大きくなることと考えることができる。また、劣化は時間の経過とともに進行するため、時間の経過と捉えることもできる。横軸を維持管理で対象となる要求性能への影響度に置き換えれば、劣化したRC構造のリスクマトリクスは図-5のようになる。

図-5においても、維持管理の基本目標は図-3の「③ Basic Objective」と同様になる。図-5中の点線Aは、保有できるリスクの範囲にあり、経時的に受ける影響が小さい。また、点線Bは、回避すべきリスクの範囲にあり、短期間に大きな影響を受けることになる。つまり、Aは性能マトリクス同様、安全側の維持管理目標となり、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目標に定めれば良い。この場合、基本目

標はリスクマトリクスの中の低減あるいは移転の対策を取るべきポジションとなる。実際には劣化した構造物のリスクを移転することはできないため、このポジションは、撤去を含む対策を講じなければならない状態である。そして、維持管理におけるリスクの低減とは、補修を考える状態にあると考えることができる。つまり、図-5のリスクマトリクスを活用してRC構造を維持管理ということは、リスクを低減できる範囲を決めることと同義となる。さらに、リスク低減の範囲の境界線は、補修の必要性を判断する限界値を表している。

4. リスクマトリクスを適用した維持管理例

2章に示した実壁高欄の調査結果を、3章で示した劣化した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。ここでは、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し、美観・景観、第三者影響度として外観変状、安全性として曲げ耐荷力、使用性として変形性能、複数の要求性能

に影響すると考えられる付着性能について示した。また、縦軸の劣化度は材料毎に表し、コンクリートの劣化は静弾性係数 E_c 、鉄筋の劣化は重量減少率 W_L で表した。なお、劣化度については、今回の実壁高欄の調査結果を参考とした相対的な指標ではあるが、図-6に示す3水準に分類した。

各性能に与える影響度と材料毎の劣化度の関係をマトリクス表示し、図-7に示す。さらに、図-7にはリスク低減の範囲（網掛け部分）も示した。なお、リスク低減の範囲は、以下の考えに基づき決定した。

- ① 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（縦方向の赤線）を示した。ただし、外観変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考えた。
- ② ①により、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あるいは移転の範囲となる。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（撤去も含む対策が必要）の下限と考え、境界線（横方向の赤線）を示した。

図-7より、劣化したRC構造のリスクマトリクスを性能毎、材料毎に表示すると、材料によって性能に与える影響度が異なり、逆に、性能によって影響を受ける材料の劣化度も異なる様子が良く表れていた。例えば、この図を利用すれば、対象としたRC梁について、「安全性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」等の判断をすることができる。

5. まとめ

本研究では、補修の必要性の判断に用いることができる、RC構造のリスクマトリクスについて検討した。そして、実壁高欄の劣化調査結果と曲げ載荷試験結果をもとに、要求性能への影響度と材料の劣化度の関係として劣化したRC構造のリスクマトリクスを表し、材料の劣化度で補修の必要性を判断する方法を示した。

今後は、さらなるデータ収集と材料の劣化をより明瞭に反映する特性についても検討を進め、RC構造の安全性確保と合理的な維持管理に貢献したい。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・維持管理編，pp.5，2007.
- 2) Structural Engineers Association of California (SEAOC) : Vision 2000 – Performance-Based Seismic Engineering of Buildings, Final Report of Vision 2000 Committee, 1995.
- 3) 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，土木学会，2007.
- 4) 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，日本材料学会，2013.11.
- 5) 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・耐久性能評価の体系化シンポジウム，日本コンクリート工学会，2013.11.

(2013.10.21 受付)

STUDY ON MAINTENANCE METHOD OF STRUCTURAL CONCRETE WITH RISK MATRIX

Maki MIZUTA, Yoshinori NONOMURA, Hisatoshi SHIMADA, Akinori SHIMATA and Tetsuji OHTA

In this study, a reasonable maintenance method with a risk matrix was examined for structural concrete in a state of deterioration. The risk matrix is expressed as relation between an influence on a required performance and a material deterioration and it is useful to assess accurately if repair is needed. Results from the detailed investigation of the concrete bridge wall rails deteriorated by combined effects of frost and salt in Hokkaido over forty years were applied to the risk matrix. This proposed method was valid for the maintenance of RC structures.