

論文 リスクを考慮した劣化構造物の維持管理方法の提案

水田 真紀^{*1}・野々村佳哲^{*2}・島多 昭典^{*3}・太田 哲司^{*4}

要旨：本研究では、RC 構造の維持管理において、診断による判定結果と劣化の影響を受けて低下した実際の性能の差をリスクとして捉え、劣化した RC 構造のリスクマトリクスを提案した。リスクマトリクスを、材料の劣化度とそれが性能に与える影響度の関係で表し、補修の必要性を判断するための指標となるリスク低減の範囲をマトリクスの中に示した。さらに、北海道内で約 40 年間凍害と塩害の複合劣化を受けた実 RC 構造の調査結果を、提案したリスクマトリクスに適用した。

キーワード：リスク, リスク低減, リスクマトリクス, 劣化, 性能, 維持管理

1. はじめに

コンクリート標準示方書の維持管理編が 2001 年に制定され、効率良く、効果的な方法で構造物を維持管理していくための研究の必要性が、従前以上に増しているように感じられる。これは、環境への配慮の観点から、持続可能性のある社会の実現に向けた構造物の長寿命化が求められていることもさることながら、高度成長期に建設された構造物の老朽化が多く顕在化し、安全性への信頼が揺らいできていることも背景としてある。

構造物は経時的に劣化していくため、定期的に点検が行われ、その点検結果から現状把握、将来の状態予測、その後の対策へと繋げることによって維持管理は実施される。そして、一連の作業で「いつ(時期)」、「何を(データの種類およびデータの取得箇所・個数)」、「何によって(方法)」、「どのように(データの総合的判断)」評価するかが重要となる。よって、構造物を安全に維持していくためには、精度の高い点検方法および劣化予測手法の確立が不可欠である。同時に、劣化構造物への対策を決定することのできる明確な判断指標・方法も求められている。

そこで本研究では、点検データを総合的に判断し、その後の対策を決定することのできる維持管理方法を提案することを目的とした。具体的には、材料の劣化度とそれが構造物あるいは部材の性能に与える影響度を関連付け、図化することを試みた。ここでは、カリフォルニア構造技術者協会(SEAOC)の Vision 2000 の要求性能マトリクス^{1), 2)}と、(財)日本科学技術連盟の「R-Map 実践研究会」で開発されたリスクアセスメント手法^{3), 4)}の考え方を参考にした。さらに、劣化した実 RC 構造の調査結果を活用し、提案した維持管理方法の有用性について検討した。

2. 実 RC 構造の調査

2.1 調査概要

本研究で提案する維持管理方法の有用性を確認するため、劣化した実 RC 構造の調査結果を用いることとした。対象とした実 RC 構造は、コンクリート製車両用剛性防護柵(以下、壁高欄)である。この壁高欄は、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る劣化環境に曝されてきた。

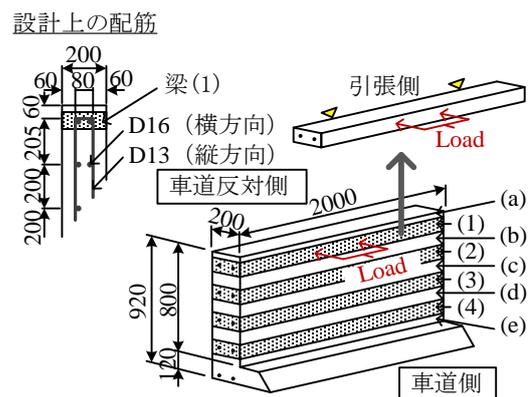


図-1 調査した壁高欄の概要

調査は、図-1 に示すように道路面より上部を幅 2m で切断し、横方向鉄筋を主鉄筋とする梁部材として見なした梁試験体(1)~(4)について実施した。よって本稿では壁高欄ではなく、梁部材として議論を進める。まず、曲げ載荷試験から、曲げ耐荷力、変形、ひび割れ発生状況を確認した。次に、採取したコアコンクリート(φ50×100mm)の圧縮試験から圧縮強度と静弾性係数、はつり出した横方向鉄筋の引張試験から引張および降伏強度と伸び、さらに除錆後の重量を測定した。なお、詳細な調査内容や結果については文献^{5), 6)}をご参照いただきたい。

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所研究員 博(工) (正会員)

*2 (独) 土木研究所 寒地土木研究所研究員 (非会員)

*3 (独) 土木研究所 寒地土木研究所上席研究員 (正会員)

*4 (株) ネクスコ・エンジニアリング北海道 道路部 (正会員)

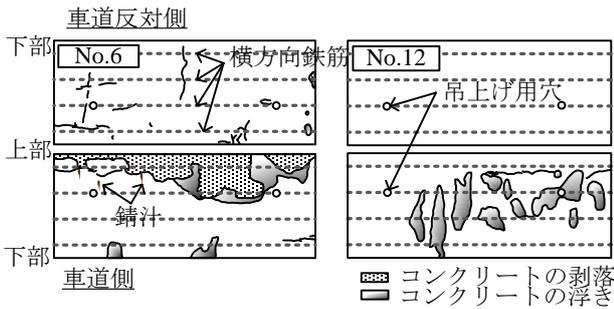


図-2 壁高欄の外観変状

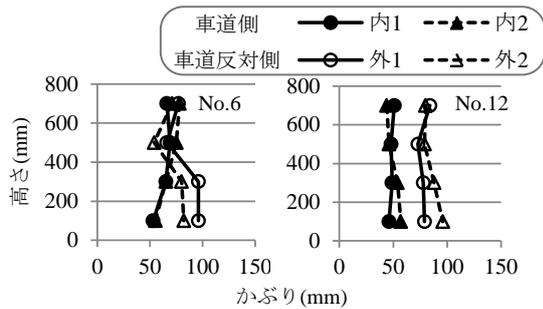


図-3 横方向鉄筋の位置

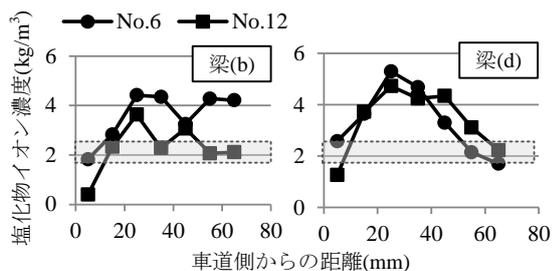


図-4 塩化物イオン浸透性状

2.2 調査結果

(1) 外観変状等

対象とする壁高欄は2カ所、壁高欄 No.6 と No.12 であり、図-2 は目視とたたき調査を行った結果のトレース図である。いずれの壁高欄も、両面が表面被覆により補修されており、壁高欄 No.12 の車道反対側は FRP メッシュで補修されていた。まず、車道側の変状を見ると、壁高欄 No.6 では著しくコンクリートが剥落し、No.12 では広範囲なコンクリートの浮きが観察された。なお、コンクリートの剥落は、凍害によるスケリングに因るものと推察された。また、車道反対側について、壁高欄 No.6 では複数本のひび割れが観察されたが、No.12 に変状は見られなかった。

横方向鉄筋の配置位置を図-3 に示す。なお、かぶりとは表面から鉄筋中心までの距離を表している。このように、車道側と車道反対側で鉄筋の位置に偏りがあった。

(2) コンクリートと鉄筋の劣化状況

梁(b)と(d)のコンクリート(図-1 参照)への塩化物イオン浸透状況を図-4 に示す。なお、網掛け部分は示方書⁷⁾に示された鉄筋の発錆限界である。これより、壁高

表-1 コンクリートの圧縮試験結果

梁 No.	壁高欄 No.6		壁高欄 No.12	
	f'_c	E_c	f'_c	E_c
1	32.6	16.3	30.4	19.7
2	32.5	19.5	30.0	20.9
3	33.3	18.8	27.6	19.2
4	33.9	21.3	29.5	20.8

※ f'_c : 圧縮強度(N/mm²), E_c : 静弾性係数(kN/mm²)

表-2 鉄筋の引張試験結果

No.	f_y	f_u	δ	W_L	判定	
6	1	284.0	441.1	13.4	10.2	A
		284.0	494.5	11.3	4.6	B
	2	329.3	554.9	18.4	2.1	A
		322.3	525.7	18.0	4.3	A
	3	316.2	495.5	15.8	5.7	B
		326.3	548.8	23.7	1.7	A
	4	317.2	485.4	11.8	4.9	A
		341.4	519.6	16.0	1.5	B
12	1	319.2	490.4	---	4.5	C
		346.4	493.5	---	2.0	C
	2	339.4	539.8	10.2	1.8	A
		350.5	575.0	20.2	1.1	A
	3	346.4	528.7	10.5	3.9	A
		339.4	548.8	14.4	1.6	A
	4	349.4	450.2	6.1	1.6	A
		351.5	565.0	18.4	2.0	B

※ f_u, f_y : 引張, 降伏強度(N/mm²), δ : 伸び(%), W_L : 重量減少率(%)

欄の上部と下部、また No.6 と No.12 に大きな差はなく、横方向鉄筋が配置されている車道側表面から 50~60mm の位置では発錆限界以上の塩化物イオンが浸透していた。

コンクリートの圧縮試験結果を表-1 に示す。設計基準強度は $f'_{cd}=24\text{N/mm}^2$ であるが、実際の強度結果は残されていなかった。なお、ここに示す結果は、4 本以上のコアコンクリートから得られた結果の平均値である。

鉄筋の引張試験結果を表-2 に示す。種類は SD30 (現在の SD295A) であり、梁 No.毎に車道側、車道反対側の順に並んでいる。ここで、表中の「判定」とは鉄筋の破断位置であり、JIS Z 2241 にならい、標点間の中央から標点距離の 1/4 以内で破断した場合は A、それを外れた場合は B、標点間の外で破断した場合は C とした。また、JIS に定められた SD295A の機械的性質を満たさなかった結果は網掛けした。なお、重量減少率は以下の式から算出した。

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

ここで、腐食前重量は、鉄筋の長さの測定値に単位質量 (kg/m) を乗ずることにより算出した。

表-3 載荷試験結果

No.	性能への影響度					
	側面	外観変状	耐力	変形	付着	
6	1	車道	剥落	○	○	▲
	3	車道	剥落	○	▲	▲
	4	反対	ひび割れ	○	▲	▲
12	1	車道	浮き	◎	○	◎
	3	車道	浮き	◎	△	◎
	4	車道	浮き	◎	△	◎

※レベル表記（付着性能のみ2レベル判定）：
◎（優）→○（同等）→△（少し劣る）→▲（劣）
側面：車道側（車道）と車道反対側（反対）

(3) 曲げ載荷試験結果

載荷は、せん断スパン a を実際の有効高さ d に合わせて変化させ、せん断スパン有効高さ比 a/d=4.0 となるように実施した。

試験結果を表-3 に示す。なお、梁(2)は壁高欄を吊り上げるための穴が横方向鉄筋を貫通しており、他の梁と載荷条件が異なったため、これ以降の検討では用いないことにした。ここで、外観変状は側面の変状であり、側面は図-1 の引張側にあたる。また、曲げ耐力、変形は理論値と比較することによってレベルを区別し、付着は載荷で曲げスパンに発生したひび割れ状況から優劣を推定した。なお、レベル表記については表下に示す。

3. 劣化度を表す材料特性

3.1 コンクリート

圧縮強度 f_c と静弾性係数 E_c の関係を図-5 に示す。なお、建設当初の圧縮強度が未知のため、コンクリート標準示方書⁷⁾に示されている関係も併記し、参考にすることにした。また、平均値（黒マーカー）とともに、梁(2)を含むすべての実測結果（白マーカー）も示した。

初期データと比較できないため、強度低下の程度はわからないが、すべての圧縮強度が設計基準強度 f_{cd} を上回った。また、示方書式と比べると、圧縮強度に対して静弾性係数が小さい傾向が見られた。以上の結果から、今後の検討では、コンクリートの劣化度を表す特性として静弾性係数を用いることにした。

3.2 鉄筋

重量減少率 W_L と引張および降伏強度 (f_u, f_y) との関係を図-6(a)、伸び δ との関係を図-6(b) に示す。ここで、マーカーの黒は車道側、白は車道反対側である。

図-6(b)からは一義的な関係を見出すことはできなかった。これは、引張試験で鉄筋の破断位置が B や C 判定の場合、標点間外の伸びに影響されたためと考えられる。一方、図-6(a)から、重量減少率と各強度の間には相関が見られた。以上より、今後の検討では、鉄筋の劣化度を表す特性に重量減少率を用いることにした。

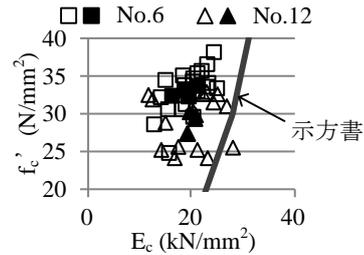


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

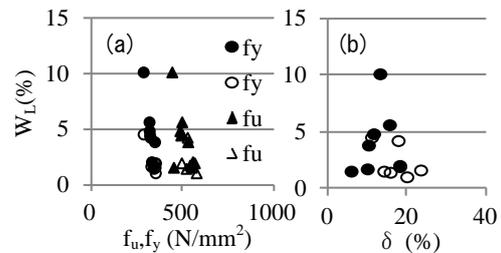


図-6 重量減少率との関係

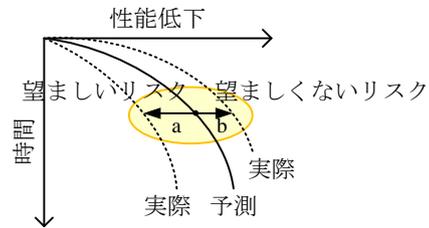


図-7 リスクの概念

4. 劣化した RC 構造の維持管理方法

4.1 劣化とリスク

国際的な安全規格として ISO/IEC ガイド 51⁸⁾ が 1999 年に発行された。人、財産、環境およびその組み合わせを保護するためのあらゆる安全側面に関する規格である。ここでは、受け入れ不可能なリスクから解放されることを安全と定義し、危害の発生確率とその危害の程度の組み合わせをリスクと称している。

RC 構造の維持管理における診断の際、例えば、以下のように様々な不確実性が存在する。

- ① 点検：方法によるばらつき（使用機器、部位、データの質や量等）
- ② 劣化予測：予測モデルによるばらつき
- ③ 評価および判定：総合的判断のばらつき（判断する人の技量等）

このような不確実性によって診断結果にはばらつきが生じる。構造物の性能予測に関しては、コンクリート標準示方書⁹⁾に劣化予測精度の幅として示されている。

本研究では、様々な不確実性を含んだ診断結果と実際の性能には差があり、それをリスクとして捉えることにした。図-7 にリスクの概念を示す。このように、診断による判定結果と実際の性能低下には差があり、実際よ

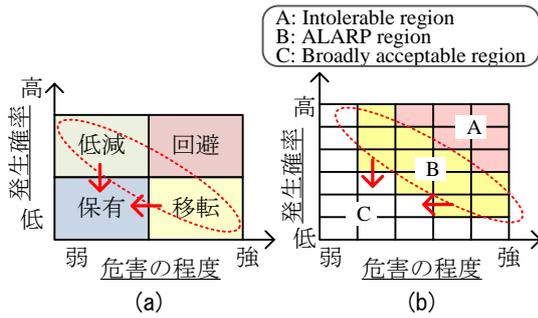


図-8 リスクマトリクス

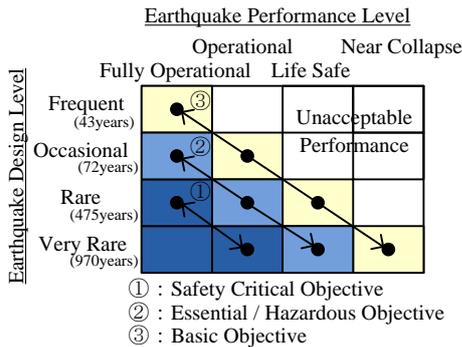


図-9 性能マトリクス

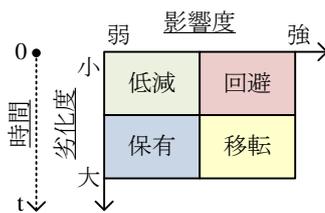


図-10 劣化したRC構造のリスクマトリクス

り性能を低く予測する a は望ましいリスク、実際より高く予測する b は望ましくないリスクと考えることができる。

4.2 劣化した RC 構造のリスクマトリクス

リスクマトリクスは、前節で述べたように危害の発生確率とその危害の程度の組み合わせであり、リスク対策によって 4 つに分類され、理想的には図-8(a)のように表される。また、R-Map 手法^{3), 4)}では 3 つに分類しており（適用の一例、図-8(b)）、図-8(a)のリスク低減および移転の領域は ALARP (as low as reasonably practical; 危険/効用基準あるいはコストを含めて、リスク低減策の実現性を考慮しながらも最小限のリスクまで低減すべき) 領域 B に対応する。いずれのマトリクスでも、矢印の方向にリスクの発生確率を下げるあるいはリスク発生時の影響を小さくすることによって、リスク低減の対策が取られ、そのポジションは同様である。

図-8 の危害の程度は、劣化した RC 構造では性能に与える影響度と置き換えることができる。しかし、劣化において発生確率を定義することは困難である。そこで、

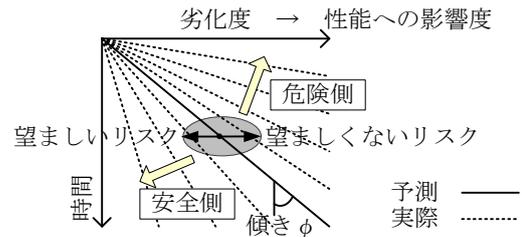


図-11 提案したリスクマトリクスの検証

Vision 2000 の耐震性能に関する性能マトリクス^{1), 2)}を参考にすることにした。図-9 に性能マトリクスを示す。縦軸は地震の発生確率であるとともに、設計で用いる地震規模の大きさを表しており、発生確率が低くなるほど地震規模は大きくなる。これを劣化した RC 構造にあてはめると、縦軸は劣化度となり、下方方向に劣化度が高くなると考えることができる。さらに、劣化は時間の経過とともに進行するため、縦軸は時間軸と考えることもできる。よって、劣化した RC 構造のリスクマトリクスは図-10 のように表すことができる。なお、現段階では、性能への影響度と劣化度を R-Map 手法のように細分化することが難しいため、図-8(a)に示す理想的なリスクマトリクスでリスク対策を表すことにした。

ここで、リスクマトリクスの各ポジションの内容について検証する。図-11 に劣化度と時間の関係を示す。ここでは、簡単のため、両者の間に比例関係が成り立つと仮定した。先に述べたように、予測値と実際の劣化度の差をリスクとして考えると、実際の劣化度が予測値より右上の範囲にある場合、望ましくないリスク（危険側）に対する対策が必要になる。さらに、左下の範囲にある場合には望ましいリスク（安全側）となる。劣化度と時間の関係の傾きφは劣化進行速度を表していることから、結局、予測よりも実際の劣化が早く進行しているのは望ましくなく、予測よりも実際の劣化進行が遅ければ望ましいと判断していることになる。そして、予測値からある幅を持った部分（網掛け部）は、ISO/IEC ガイド 51⁸⁾の定義によれば、許容可能なリスク (Tolerable risk) や受け入れ可能なリスク (Acceptable risk) 領域となる。なお、許容可能なリスクとは、リスクを受け入れることによる利益とリスクを低減することによる費用を合理的に判断する ALARP 領域であり、受け入れ可能なリスクとはさらに小さなリスクである。つまり、劣化度は材料に与える影響の大きさであることから、図-11 と図-10 のリスクポジションは一致している。さらに、劣化により性能が低下することから、図-11 の横軸は性能への影響度に置き換えて考えることもでき、やはり図-10 のリスクポジションと一致する。

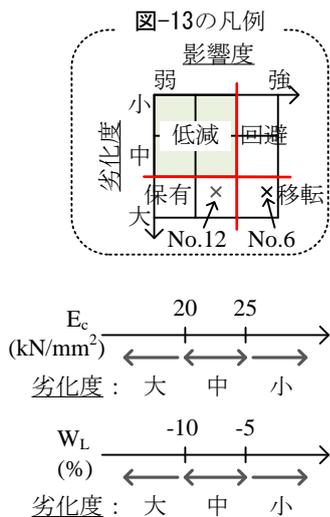


図-12 劣化度の評価

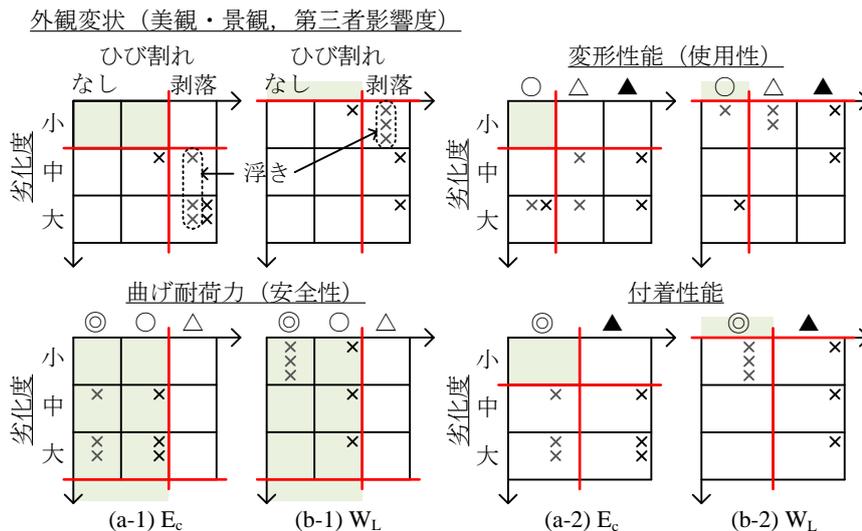


図-13 劣化した実RC構造のリスクマトリクス

4.3 リスク低減対策

図-10 に示した各リスクポジションで取るべき対策について、ISO/IEC ガイド 51⁸⁾に示されている 3 step method を参考にする。ただし、製品を商品化する前の段階での対策として示されている。以下に概要を示す。なお、和訳は文献⁴⁾を参照している。

- Step 1 : Inherently safe design (本質安全設計)
→可能な限りリスクを除去するか軽減する。
- Step 2 : Risk reduction measures (保護手段 (安全防護))
→リスクに対して必要な保護手段を採用する。
- Step 3 : Information for use (使用上の情報)
→リスクの情報を与え、使用上の注意を促す。

これより、Step 1 から 3 へ進むにしたがい、リスクは低減されることから、Step 1 は「回避」、Step 2 は「低減」あるいは「移転」、Step 3 は「保有」のリスクポジションに相当する。そして、劣化した RC 構造の維持管理において、各リスクポジションで取るべき対策は次のように考えることができる。

- 回避：設計で耐久性に関する照査を行う。
- 低減あるいは移転：点検結果を評価、判定し、対策を行う。供用期間の短い「低減」では補修、それ以上に供用されている「移転」では補強や解体・撤去の対策を行う。
- 保有：日常および定期点検によって、リスクがこの領域にあることを確認する。

以上のことから、前節で提案したリスクマトリクスを用いて劣化した RC 構造を維持管理するということは、「低減」あるいは「移転」ポジションを決定することと同義となる。そして、「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を意味すると考えることができる。

4.4 リスクマトリクスへの適用例

ここでは、劣化した実 RC 構造として、3 章に示した壁高欄の調査結果を、提案したリスクマトリクス (図-10) に適用した結果について示す。

材料の劣化度毎、構造の性能毎にマトリクスを作成した。性能は、美観・景観として外観変状 (载荷試験で引張側となる面)、第三者影響度としてコンクリートの浮きの有無、安全性として曲げ耐荷力、使用性として変形性能、複数の性能に関わるものとして付着性能を取り上げた。材料の劣化度は表-1 と表-2、性能に与える影響度は表-3 に既に示している。なお、調査結果の分布範囲を参考にし、材料の劣化度は図-12 に示す 3 水準に分類し、鉄筋の劣化度は重量減少率 W_L を負の記号で表した。よって、本節での劣化度の大・中・小は一般的な意味と異なり、あくまで本調査結果の中で劣化程度が大きいか、小さいかを判断している。

マトリクスのマス目内に調査結果をプロットすると、図-13 の結果が得られた。なお、黒色プロットは壁高欄 No.6、グレー色プロットは壁高欄 No.12 の結果である。調査結果は、材料の劣化とそれがもたらす性能への影響を実験で確認した結果であり、図-13 の関係は、そのままリスクマトリクスに反映させることができる。また、図に示す「低減」のポジション (網掛け部) は、以下の考えに基づき決定した。

- ① 性能に与える影響度 (横軸) について、理論値と同等の性能を保有しているか否かを判定し、「低減」と「回避」の境界線 (赤色縦線) を決定した。なお、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「低減」に含めることにした。
- ② ①で決定された境界線の右側の範囲は「回避」と「移転」の対策が必要な範囲となる。本調査結果が、既

に40年程度供用されたRC構造の結果であることから、「回避」の対策を取る必要があるとは考えにくい。よって、この範囲にあるプロット点の最小の劣化度を「移転」の下限值であると考え、「回避」と「移転」の境界線(赤色横線)を決定した。ただし、境界線が横軸と一致する場合は、「低減」のポジションをマトリクス範囲外まで拡大して表示した。

図-13のように材料の劣化度と性能に与える影響度の関係をマトリクス表示し、材料の劣化度が同程度であっても、性能によって影響度が異なることを明確に示すことができた。また、この関係をリスクマトリクスにあてはめることにより、補修の必要性を判断する指標を示すことができた。

さらに、図-13から、凍害と塩害の複合劣化を受けるRC構造について、次のように考察することができる。ただし、以下に示す材料の劣化度と各性能の関係についての適用範囲は、今回、調査対象とした実壁高覧のコンクリートと鉄筋の劣化度に限定される。

- 安全性について：すべてリスク低減の範囲に含まれる。コンクリート、鉄筋ともに、劣化度が大きく分布しているにも拘らず、同程度の曲げ耐荷力を有していた。このことから、材料の劣化が曲げ耐荷力に及ぼす影響はあまり大きくないと考えられる。
- 使用性および付着性能について：リスク保有と移転の範囲にあり、コンクリート、鉄筋ともに、同程度の劣化度であっても、性能への影響度が大きく異なった。このことから、変形や付着性能に対して、材料の劣化が敏感に影響すると考えられる。また、その影響の傾向は似通っている。
- 外観変状について：コンクリートの剥落と浮きの生じたRC構造では、曲げ耐荷力、変形性能、付着性能において、浮きが生じたRC構造(壁高覧 No.12)の方が優れていた。コンクリートの剥落は凍害に因るものと推察されることから、凍害と塩害の複合劣化を受けるRC構造では、凍害による劣化度の把握が重要であると考えられる。
- リスクマトリクスを用いた維持管理について：図-13から対象とした実RC構造の維持管理計画を立てる場合、例えば「安全性は十分に満足しているが、コンクリートの剥落や浮きが観察され、変形性能が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。

5. まとめ

本研究では、RC構造の維持管理において、診断による判定結果と劣化の影響を受けて低下した実際の性能と

の差をリスクとして捉え、劣化したRC構造のリスクマトリクスを提案した。そして、補修の可否を判断するための指標をマトリクスの中に示した。さらに、凍害と塩害の複合劣化を受けた実RC構造の調査結果を活用し、提案したリスクマトリクスの適用事例を示した。

今後は、調査結果の量、質ともに充実させ、劣化のばらつきを考慮した上で劣化度を決定する方法も示す必要があると考えている。そして、実構造物の補修の可否を一目瞭然に判断できるように、リスクマトリクスの精度を高め、維持管理方法として確立させたい。

参考文献

- 1) Structural Engineers Association of California (SEAOC) : Vision 2000 – Performance-Based Seismic Engineering of Buildings, Final Report of Vision 2000 Committee, 1995
- 2) 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，2007ほか
- 3) (財)日本科学技術連盟「R-Map 実践研究会」編著：製品安全，リスクアセスメントのためのR-Map入門(第1版)，ダウンロード版
- 4) 経済産業省：リスクアセスメント・ハンドブック(実務編)，2011.6
- 5) 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.291-298，2013.11
- 6) 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論文集，pp.289-296，2013.11
- 7) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書設計編，pp.148-151 および pp.39，2012
- 8) ISO/IEC : Safety Aspects – Guidelines for their inclusion in standards (Guide 51)，2012
- 9) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書維持管理編，pp.60，2012