

既存建築物の補修・改修工法選定エキスパートシステムの開発

正会員 ○西山佳寿*1
同 鈴木邦康*2
同 浜 幸雄*3
会員外 森久保良希*4

1.材料施工-13.改修・維持保全

補修、改修、エキスパートシステム、ベイズ理論、マルコフ連鎖

1.はじめに

既存建築物を適切に維持管理するためには、劣化状況を把握し劣化原因を明らかにするための調査・診断と回復目標レベルに応じた最適な補修・改修工法を選定するためのシステムを確立することが必要である。

著者らは既往の研究¹⁾において、補修・改修の実務の実態を把握するためのアンケート及びヒアリング調査を行い、補修・改修工法選定の際には、コストや材料の使用実績、施工性が重視されていること、技術者の判断基準となっているのは個人の経験や過去の実績であることが明らかとなった。そこで、補修・改修工法選定システムを確立するためには、このような個人の「経験」や「実績」を技術者にとって共有化された情報として、データベース化することが必要不可欠であることがわかった。

本研究は、補修・改修計画を立案する第一段階で、経験の乏しい技術者及び建物管理者でも、目視調査の結果をもとに最適な補修・改修工法を選定できるように、専門技術者の「経験」と「実績」をデータベースとして組み込んだエキスパートシステムを構築するための要素技術について検討を行ったものである。

2.実構造物を対象とした工法選定のケーススタディ

補修・改修工法選定システムの枠組みを作る手掛かりとして、実構造物での調査・診断結果をもとに、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説」²⁾(以下、指針と記述)に基づいた補修工法選定のケーススタディを行い、補修工法選定過程の問題点について検討を加えた。ケーススタディを行った建物の概要を表1に、調査・診断結果を表2に示す。調査対象部位は、南西側面の一般外壁と柱である。

補修工法選定のプロセスは指針に従い、劣化度判定、劣化原因の特定及びその強さ、耐力診断の要否判定結果から補修工法を選定した。表3に劣化度、可能性のある劣化原因、劣化原因の強さ、耐力診断の要否および選定された補修工法を示す。同表より、一般外壁では二つの補修工法、柱では三つの補修工法が選定される結果となった。本来であれば、各部位に唯一の補修工法が選定されるべきであるが、指針における劣化原因とその強さなどの判断基準が曖昧であり、特に劣化原因の強さの判断

表1 建物概要

建築物の用途および所在地	公民館 A市
竣工年月	1991年7月31日
建築物の規模	地上2階 1,987.08㎡
構造形式	鉄筋コンクリート造一部鉄骨造

表2 調査診断結果

No	階	どこに 部位 対象	仕上 対象	調査		診断		
				なにが 劣化現象 項目 症状	どれだけ	主な原因	中性化・塩害 の推定	
1	1・2階	一般外壁	塗装+モルタル下地	さび汚れ	10~20m	材料に起因する問題	施工不良に起因する問題	可能性なし 亀裂、錆汁
				幅0.5 ^{mm} 以上のひび割れ	5~10m			
2	1階	柱型	躯体	幅0.3~0.5 ^{mm} 以上のひび割れ	20m以上	施工不良に起因する問題	施工不良に起因する問題	可能性なし 柱の錆汁(かぶり不足)
				鉄筋に沿ったひび割れ・さび汚れ	10~20m			
				幅0.3~0.5 ^{mm} 以上のひび割れ	10~20m			

表3 補修工法選定結果

部位	劣化度	可能性のある劣化原因	劣化原因の強さ	耐力診断の要否	補修工法
一般外壁	軽度	ひび割れ 塩害	大	必要なし	ひび割れ補修工法 塩害抑制工法
			大		
柱	中度	中性化 塩害	大	必要なし	鉄筋腐食補修工法 +中性化抑制工法 ひび割れ補修工法 +中性化抑制工法 鉄筋腐食補修工法 +塩害抑制工法
			中		
			大		

は具体的な数値が示されていないことから判断しにくく、複数の工法が選定される結果となった。また、実際の構造物で生じる劣化は、その原因が単一の場合は少なく、複数の原因による複合劣化の場合が多いことも、劣化原因と程度を特定することが難しくなる理由のひとつと考えられ、このことが実務における補修・改修工法選定の際に、個人の「経験」や「実績」が基準となっている背景とも考えられる。

しかしながら、調査・診断結果から劣化の原因および程度を適切に特定することができれば、自ずと劣化原因に対応した根拠のある補修工法の選定ができる。したがって補修工法を選定する際には劣化原因の推定と劣化の程度を特定することが重要であり、システム化するためには、調査・診断結果から劣化の原因および程度を特定する根拠をもった指標を導入する必要がある。

Development of Expert system on Method of Repair and Renovation for Existent Buildings

NISHIYAMA Kazu et al.

3. エキスパートシステムの概念

エキスパートシステム³⁾とは、専門家の知識と解析ルールをプログラム化し、特定の問題に対する問題解決や意思決定を行うシステムのことであり、図1に示すように、知識ベース（専門家の知識をデータベース化したもの）と推論エンジンから構成されるものである。

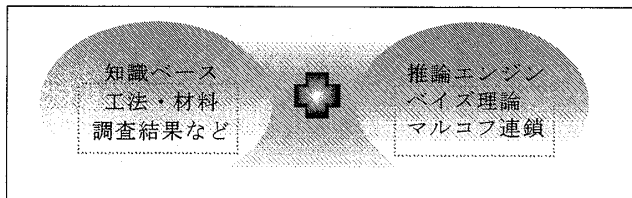


図1 エキスパートシステムの構成

劣化原因の推定や補修工法・材料の選定などに関して、補修・改修業務に卓越した技術者達の間でも確固たる判定基準がなく、各個人の経験や勘が重視されている現状では、その診断結果に個人差がでないとはいきれない。

エキスパートシステムは、このような人間の経験や勘というバラツキを取り除き、判断の標準化を効率的に支援するとともに、補修・改修に対する知識があまりない技術者にも、作業の補助として問題解決を助け、曖昧な判断について助言できるようなサポートシステムである。

一方、エキスパートシステムをつくるためには、膨大な情報を収集・整理し、正確なデータを将来に引き継ぎ、正しい判断を導き出すためにも、データベース化が急務であり、また、推論エンジンのプログラムとなるベイズ理論やマルコフ連鎖といった確率論的手法についての検討を行う必要がある。

4. エキスパートシステム構築のための要素技術の検討

1) ベイズ理論を使った劣化原因の特定

ケーススタディの結果、適切な補修工法を選定するための前提条件として、劣化原因の特定方法の確立が重要であることが確認された。しかし、経験の乏しい技術者や建物管理者にとっては、複雑な複合劣化の原因を特定することは非常に困難なであると考えられる。そこで、劣化原因の特定に統計学の一つの手法として使われている「ベイズ理論」³⁾の使用を試みる。

ベイズ理論とは、今日のコンピューター界において注目を集めている確率論であり、ベイズ理論を応用し、高い確率で適当なデータを探し当てる検索サービスや、スパム(迷惑メール)フィルタをはじめ、コンピューター以外の分野では、医療診断支援システムなどにも使用され数々の成果が報告されている。ベイズ理論は「未来の出来事の発生頻度(事後確率)はその事象の過去に起きた発生頻度(事前確率)を求めることで計算、予測で

きる」とされるもので、集められたデータに基づいて推測を行い、多数の比率の同時推測などが可能とされており、データの数が多ければ多いほどより確実な推測を引き出せる。つまり過去の発生頻度の標本数が増えれば、100%の予測は不可能だとしても、その分予測の確度は高まっていくというものである。ベイズの定理を式(1)に示す。

$$P(X|D) = P(D|X)P(X) / \sum P(D|X)P(X) \quad \dots(1)$$

P(X|D):事後確率 P(D|X):尤度 P(X):事前確率
X:劣化原因 D:劣化症状

ここで、ベイズ理論を用いた劣化原因の推定の例として、屋上防水層の劣化に関する実際の適用例を示す。調査内容は保護防水に関するもので、劣化症状は防水層にふくれが発生している場合について、熱が原因である場合及び雨水・堆雪が原因である場合のそれぞれの事後確率を算出した。原因の推定を行うのに必要な調査結果の情報を表4に、事後確率算出までの過程を表5に示す。

劣化原因推定の結果、原因が熱である場合の確率が雨水・堆雪による場合よりも高く、防水層のふくれの劣化原因は熱によるものである可能性が高いということが示された。このように原因が複数考えられる場合にも、ある程度の調査データがあれば、ベイズ理論により劣化原因の推定が可能である。

表4 原因推定を行うための情報

劣化症状が防水層のふくれの場合の調査結果	
全調査データ数:	95件
防水層のふくれの原因が、熱である場合:	5件、雨水・堆雪の場合:3件
防水層のふくれの原因が、熱以外の場合:	6件、雨水・堆雪以外の場合:8件
全データより、熱が原因となった症状:	8件、雨水・堆雪が原因となった症状:12件

表5 事後確率算出までの過程

防水層のふくれの原因が熱である場合	
事前確率	A1.P(ふくれが発生している場合に、熱が原因である割合)=5/11=45%
P(X)	A0.P(ふくれが発生している場合に、熱が原因でない割合)=6/11=55%
尤度	B1.P(熱が原因である時に、ふくれが発生している割合)=5/8=63%
P(D X)	B0.P(熱が原因でない時に、ふくれが発生している割合)=6/8=75%
事後確率	P(ふくれが発生している場合に、熱が原因である確率)
P(X D)	=(A1*B1)/(A1*B1+A0*B0)=88%
防水層のふくれの原因が雨水・堆雪である場合	
事前確率	A1.P(ふくれが発生している場合に、雨水・堆雪が原因である割合)=3/11=27%
P(X)	A0.P(ふくれが発生している場合に、雨水・堆雪が原因でない割合)=8/11=72%
尤度	B1.P(雨水・堆雪が原因である時に、ふくれが発生している割合)=3/12=25%
P(D X)	B0.P(雨水・堆雪が原因でない時に、ふくれが発生している割合)=8/83=10%
事後確率	P(ふくれが発生している場合に、雨水・堆雪が原因である確率)
P(X D)	=(A1*B1)/(A1*B1+A0*B0)=49%

2) マルコフ連鎖による劣化進行モデル

現状の補修・改修工法・材料の選定では、それぞれの工法・材料の補修効果を適切に評価する方法が確立されておらず、「コスト」が重視されていることから、補修・改修後の劣化予測とライフサイクルコスト（以下、LCCと記述）の算定が課題となる。ここでは、確率論的予測手法のひとつである「マルコフ連鎖」^{5), 6)}の建築物への適用可能性について検討した。

マルコフ連鎖とは、ある状態のものがある遷移率で次の状態に移行する概念であり、この手法を用いた劣化進行モデルでは、簡便な目視調査の結果から、将来の劣化度を経過年数によって確率的に予測することが可能である。また、劣化予測に基づいて維持・補修にかかるLCCの算出を行い、供用期間中で最適な補修工法・補修時期を提案することなどが可能とされている。マルコフ連鎖を用いた劣化進行モデルの基本式を式(2)に示す。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ I \\ II \\ III \\ IV \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

0~V:劣化度
x:遷移率
t:施設の使用年数(年)

遷移率は劣化度の割合が時間と共にどのように変化していくかを表した劣化速度指標であり、経時的に変化しない施設ごとに固有の一定値と考える。遷移率xは調査結果から得られる劣化度分布と施設の使用年数tを代入した式(2)のモデル計算値が最も良く適合するように定め、さらにその遷移率を用いて年数tを将来に設定することで劣化予測が可能となると考えられている。建築物の場合、劣化の原因が様々であり、劣化の原因ごとに遷移率は異なることが予測される。その精度を高めるためにも多くのデータを収集し、劣化原因ごとに遷移率を整理する必要がある。また、各劣化現象の劣化度の分類をはじめ、補修時期、補修方法などを設定した補修シナリオなども必要である。

3) 要素技術使用のための課題

このような確率論的手法を導入することで、今まで補修・改修に関わる技術者の「経験」で判断してきたようなことが、具体的な目にみえる数値で表されることにより、誰が行っても同じ判断が下せるようになる。これらの手法を建築物に適用するにあたり、まだ様々な課題があるが、今後、より精度の高い原因推定、劣化予測及びLCC算定をすることで、最適な工法・材料の選定へと繋げるためにも、建物自体のデータ、点検履歴、補修履歴等のデータの収集・整理が最大の課題となる。要素技術を含めた補修・改修工法選定エキスパートシステムのフローを図2に示す。

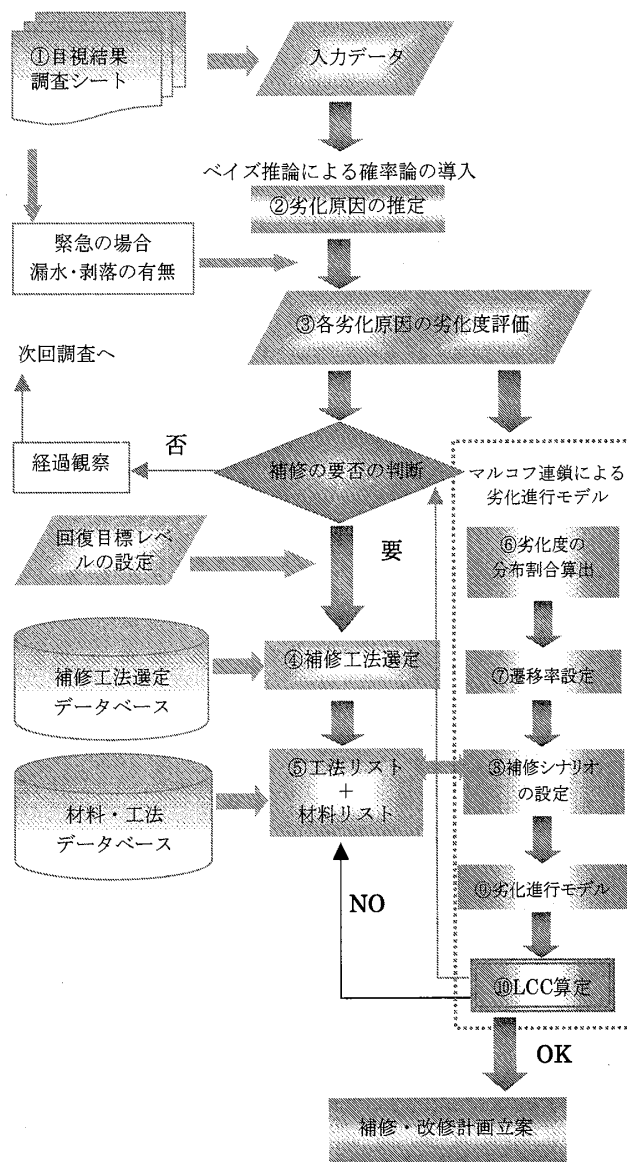


図2 補修・改修工法選定エキスパートシステムのフロー

5. エキスパートシステムのイメージ

目視調査からLCC算定までのエキスパートシステムにおける大まかな流れをつかむため、劣化現象が躯体のひび割れで、劣化原因が凍害によるものと仮定し、図2のエキスパートシステムのフロー中に示されている番号に対応させた入力データおよび出力データのイメージを図3に示す。それぞれの項目は、①目視による調査シート、②ベイズ理論による劣化の原因推定結果 ③指針に基づいた劣化度評価 ④補修工法のデータベースと選定 ⑤工法・材料リスト、⑥劣化度の分布割合の入力、⑦マルコフ連鎖の遷移率の設定、⑧補修・改修シナリオの設定と選択 ⑨マルコフ連鎖による劣化予測シミュレーション、⑩LCC算定である。

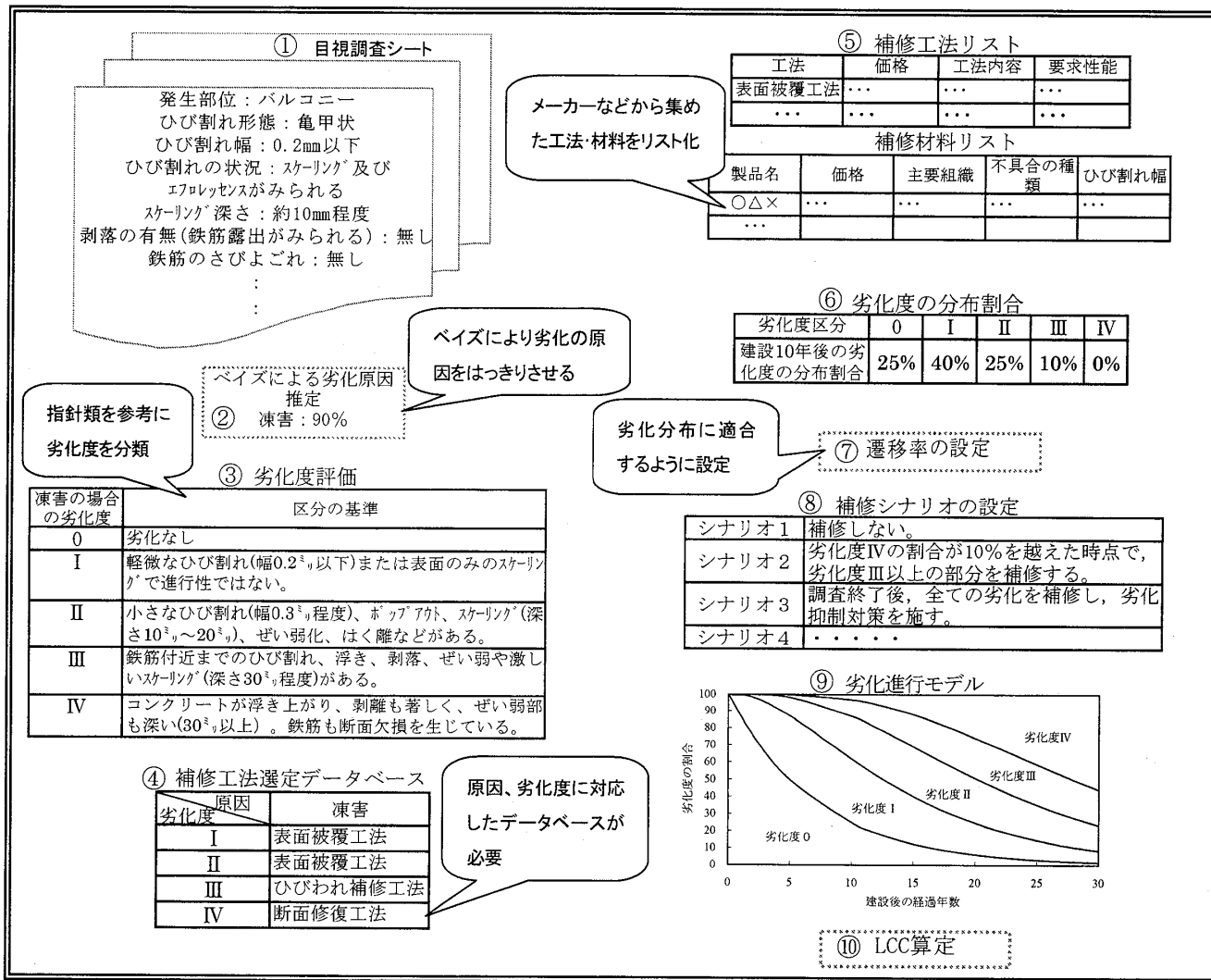


図3 凍害を対象とした場合のイメージ

6. まとめ

本研究では、既存建築物の適切な保全技術を確認するために、専門技術者の「経験」と「実績」を組み込んだ最適な補修工法選定を行うためのシステムの開発を目指して、判断の標準化を効率的に支援するエキスパートシステムとその要素技術についての検討を行った。その結果として、ベイズ理論による的確な劣化の原因推定とマルコフ連鎖による劣化予測をシステムに組み込んだエキスパートシステムを提案した。今後、これらの確率論的手法の精度向上のためには、建物自体のデータ、点検履歴、補修履歴等のデータベースとなるデータの収集と整理を行うことが必要不可欠である。

参考文献

- 1) 西山佳寿、鈴木邦康、浜幸雄：既存建築物の補修・改修工法選定プロセスに関する実態調査、日本建築学会北海道支部研究報告書、No.77,2004
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説、1997
- 3) S.M.ワイス/C.A.クリコフスキ共著：エキスパートシステムの設計、近代科学社、1997.12.
- 4) 小牟禮健一、濱田秀則、横田弘、山路徹：塩害を受ける浅橋上部工のマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測に基づくLCC算定に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.26,No.1,2004
- 5) 川政秀、末岡英二、内藤英晴、濱田秀則：浅橋RC上部工における劣化進行モデルを用いたLCC算定の一例、コンクリート工学年次論文集、Vol.26,No.1,2004

*1 室蘭工業大学大学院

*2 室蘭工業大学・助手・博士(工学)

*3 室蘭工業大学・助教授・博士(工学)

*4 日本データサービス株式会社・主任

Graduate School, Muroran Institute of Technology

Research Assoc., Muroran Institute of Technology, Dr.Eng

Assoc.Prof., Muroran Institute of Technology, Dr.Eng

Nippon Data Service Co.,Ltd.