

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構築

正会員○ 鈴木邦康^{*1} 正会員 森久保良希^{*4}
同 濱 幸雄^{*2} 会員外 西山佳寿^{*5}
同 十河哲也^{*3}

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、劣化状況および劣化原因を把握するための調査・診断と回復目標に応じた補修・改修工法を選定できるシステムを確立することが必要である。また、簡便な目視調査結果に基づいて、最適な補修・改修工法を選定できるシステムが構築されれば、専門的な知識のないマンションや公共施設などの施設管理者にとって補修・改修計画を立案する第一段階において非常に有用である。

著者らは前報¹⁾において、専門技術者の経験や実績をデータベースとして組み込んだ、補修・改修工法選定エキスパートシステムを提案した。このシステムは、ベイズ理論による劣化原因の推定、マルコフ連鎖による劣化予測を行い、建物の供用期間中の維持・補修にかかるLCCを算出し、これが最小となる補修工法や補修時期を提示しようとするものである。図1にエキスパートシステムのフローを示す。

これに引き続き、本報ではより具体的なエキスパートシステム構築の端緒として、鉄筋コンクリート造建築物の躯体、外装仕上げ材を対象に本システムの適用法について検討した。

2. 外観目視調査

2.1 調査ブロックと調査単位の設定

上述のように本エキスパートシステムでは、施設管理者や経験の乏しい技術者を対象としている。したがって、目視による外観調査では簡便な手法が要求される。

まず、調査のしやすさを考え建物を棟別、方位別のブロックに分け、実際の補修は構面単位で行われていることから、外壁は各階の柱・梁に囲まれている部分を調査単位として設定した。また、基礎部分は1階外壁に、パラペットは最上階外壁に含めるものとする。図2に調査ブロックと調査単位の設定方法例を示す。

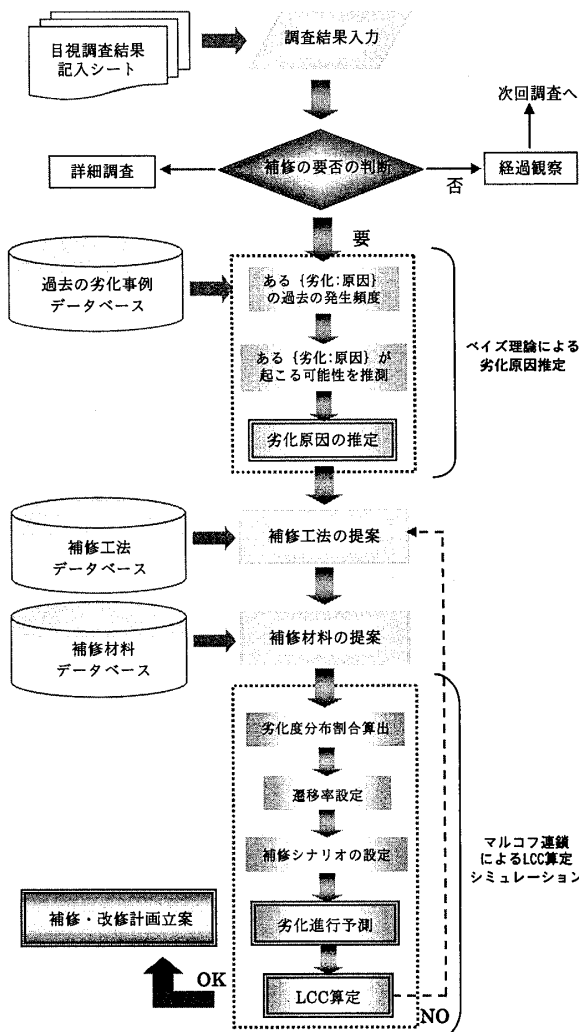


図1 エキスパートシステムのフロー

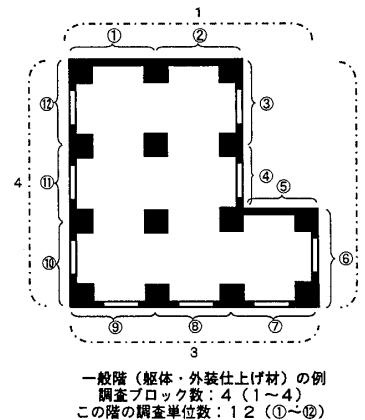


図2 調査ブロックと調査単位

調査建物概要シート									
建築物現況調査 (RC造建築物)									
基礎事項	○○○○○			調査年月日	○○○○○	この種の調査ブロック数		4ブロック	
建物名称				① 2005年9月24日	○○○○○	この種の調査単位数(その他の調査単位は必要に応じて記入)			
竣工年月日	1995年10月			②		① 外壁		56	
建築物の規模	地上2階 〇〇〇m ²			③		② 陸屋根		③ その他()	
構造形式	鉄筋コンクリート造			④		②の内、鉛直部分		④ その他()	
調査時点の経過年数	10年			⑤		のある調査単位		⑤ その他()	
躯体・外装仕上げ材調査シート (調査ブロック番号: 1(南面) 調査シート番号: 1)									
どこに									
なにが									
A: 躯体の劣化 (直上の外装仕上げ材の劣化を伴う)									
B: 外装仕上げ材のみの劣化 (直下の躯体に劣化がない)									
C: シーリング材の劣化									
躯体・外装仕上げ材の劣化									
モルタル層									
仕上げ塗材・タイル層									
共通									
シーリング材の劣化									
調査単位の番号									
調査単位の分類									
鉄筋に沿うひび割れ・はく離									
練汁を伴うひび割れ・はく離									
(免鉄筋・スケールリング・欠損)									
白華を伴うひび割れ・はく離									
左記以外のひび割れ									
はく離									
ひび割れ幅									
0・4mm以上									
0・2mm以上									
0・2mm未満									
W									
WB									
B									
WC									
W									
WCP									
WP									
P									

図3 建物概要シートおよび躯体・外装仕上げ材調査シートの一部

実際の調査時には、建物の立面図に調査単位番号を記入したもの(調査状況記録図)を準備し、これに劣化状況を記録する。

2.2 調査シート

目視調査に用いる建物概要シート、躯体・外装仕上げ材調査シートの一部を記載例とともに図3に示す。はじめに、建物概要シートに必要事項を記載する。次に、ブロック全体を見渡し劣化状況の大略を前述の調査状況記録図に書き込む。そして、その記録図に基づいて調査シートへの記入を行う。調査は調査ブロックの調査単位毎に行い、該当する劣化症状欄に劣化部位を表す記号を記す。

3. ベイズ理論による劣化原因の推定

3.1 劣化事例データベース

ベイズ理論を用いて劣化原因を推定するためには、劣化症状とその原因が明らかとなっている調査・診断結果が必要である。そこで、北海道S市の保全システムに入っている目視による調査診断記録 3511件(躯体・外壁 1402件、屋根 526件、主として外部建具などを含むその他 1585件)を劣化事例データベースとして蓄積した。この調査診断記録の劣化・故障状態や原因の推定欄には、診断者の判断した劣化症状から推定される原因がコメント形式で記入されている。データベースの作成に当たり、劣化症状の項目は調査シートの劣化症状項目と同じく設定した。但し、調査シートではひび割れ幅による分類を行っているが、データベースでは、「ひび割れ」というひとつの劣化症状項目とし

た。これは、調査診断は複数の診断者により行われており、劣化の表現が統一されておらず、ひび割れ幅が記載されていないデータが多いためである。劣化原因の項目は、診断者が判断した原因推定のコメントを参考に設定した。

3.2 劣化原因推定結果

劣化事例データベースに基づいて、躯体・外壁に関する原因推定結果を表1に示す。原因推定の結果、いくつかの劣化症状に対する劣化原因の確率が100%となっているが、これは母数に対して標本数が少なすぎるためであり、不足しているデータを蓄積することで正しい原因推定結果に到達できると考えられる。

表1より、劣化症状の「ひび割れ」に関してみると、推定原因として「コンクリートの乾燥収縮による劣化」が92%、次いで「構造・外力によるひび割れ」が49%、「経年劣化」が43%となっている。したがって、「ひび割れ」の劣化原因は、「コンクリートの乾燥収縮」の確率が最も高いと言える。

このように、ベイズ理論を用いて劣化症状に対する最も可能性の高い劣化原因を確率により数値で表すことができ、各劣化症状の原因を特定する際の判断指標となりうる。より信頼性のある原因推定を実用化させるためには、詳細調査結果も含む様々な調査データを集積し、データベースを拡充させることが必要である。

4. マルコフ連鎖による劣化予測とLCCの算定

4.1 劣化度判定

マルコフ連鎖を用いて劣化予測を行うためには、劣

化の程度を表す劣化度の設定、調査結果としての劣化度の分布割合および遷移率が必要である。そこで、図3に示した調査シートの劣化症状項目について劣化度を表2の劣化度欄に示すように設定した。本システムでは劣化度を0～3の4段階で判定することとした。但し、劣化度は時間の経過とともに進行することを前提とし、初期欠陥や進行性がないと考えられるものは劣化予測の対象からは除外した。劣化予測は、躯体、モルタル、塗材、タイル、シーリングなどに分け、それぞれについて行うことを想定している。各調査単位の劣化度は、その中に見られる劣化度の中で最も大きいものをその調査単位の劣化度とする。劣化度判定結果は、前述の調査状況記録図に記入し、躯体、外装仕上げ別（モルタル、タイル、塗装）、シーリングに分けて各劣化度の調査単位数を集計する。そして、劣化予測を行うために必要な劣化度の分布割合を算出する。

なお、遷移率は調査時点での劣化度の分布割合から逆算して求めることとした。

4.2 補修工法データベース

本来であれば劣化原因をも考慮した補修工法選定が望ましいが、劣化原因が異なっても現在行われている実際の補修方法には大きな違いは見られない。したがって、現段階では一般に用いられている補修工法を劣化症状及び劣化度に対応させ、優先対策案、代替案および耐用限界を設定した。作成した補修工法データベースを表2に示す。

補修工法データベース中の優先対策案は、通常行う補修対策工法である。耐用限界は、劣化度3の割合がある値を超えると、安全面に支障をきたすあるいは施

工が不可能になるなどの観点から、危険（限界）となる判断を行う必要があるとして設定した。但し、設定値は仮の値であり、根拠のある耐用限界の設定については今後の検討課題である。代替案は、劣化度の割合により優先対策案では対応できない場合に行う補修対策工法である。

補修費用は、「建築物のライフサイクルコスト」²⁾などを参考に各補修工法の材工単価を設定し、これに補修面積を乗じて求める。

4.3 補修シナリオ

本システムでは、補修時期と補修レベルを補修シナリオ設定時の変数として取り上げた。補修時期は建物が竣工後、1回目の補修を行う年数であり、以降の再補修サイクルはこの年数に従うものとする。また、1回目の補修は、調査実施の翌年から補修を行わなかった場合に表2に示す耐用限界を超える前年迄、1年きざみで設定する。補修レベルは、劣化度1以上を全て補修、同じく劣化度2以上を、劣化度3のみを補修する場合の3通りを考える。なお、補修後は劣化度0に戻るものとし、補修後の遷移率も補修前のそれと変わらないものとした。補修時期と補修レベルを組み合わせた全補修シナリオについて劣化予測とLCCの算出を行い、LCCが最小となる補修シナリオをエキスパート案として提示する。但し、補修シナリオの中には、途中で耐用限界を超えるものも存在する可能性がある。この様な不適合なシナリオは除外する。

4.4 劣化予測およびLCC算定プログラムと出力結果

劣化予測及びLCC算出にはエクセルを利用した簡便な計算プログラムを作成した。

表1 躯体・外壁に関する劣化症状に対するベイズ理論を用いた原因推定結果

劣化症状の番号	原因推定(上段:劣化原因 / 下段:劣化原因の割合)																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1 鉄筋に均すひび割れ・はく離	0																				
2 さびけを伴うひび割れ・はく離	64	89%	2%		27%		55%	3%	98%					19%	7%	17%	8%	6%	39%		2%
3 剥離・スケーリング・欠損(剥離剥離露出)	31	2%			95%			11%	41%					14%	7%	52%	44%	7%	8%		7%
4 白華を伴うひび割れ・はく離	50	98%	11%					4%	45%					12%		51%	84%		4%	9%	3%
5 ひび割れ	89	92%					38%	4%	43%	1%				2%		27%	22%		4%	49%	3%
6 はく離・スケーリング・欠損(発生数なし)	63	71%	2%						60%					20%		62%	8%	6%	18%		60%
7 豆板(ジャンカ)	0																				
8 ポツポツアウト	1	100%														100%					
9	0																				
10	0																				
11 その他	0																				
12 モルタルのひび割れ(躯体に至る)	103	83%	89%		1%		31%	1%	61%				5%	1%	42%	20%		13%	2%		
13 モルタルのはく離・欠損(躯体の露出)	18	93%							37%						96%	54%					33%
14 モルタルの浮き	28	74%	76%				88%		88%	10%					45%	34%					
15 厚層(下地の露出)	105	20%	2%					22%	84%												
16 剥離・スケーリング・欠損(下地の露出)	105	20%	2%					22%	84%												
17 塗材・タイルのひび割れ	90	91%	19%					52%	28%	68%		1%	1%	31%	6%	29%	16%	19%	38%		21%
18 塗材・タイルのはく離	61	73%	25%					71%	71%	71%				7%	1%	17%	29%	1%		11%	14%
19 塗材・タイルの剥離(剥離材の剥離)	2								75%												
20 白亜化(チョーキング)	15	53%	26%						43%						44%	27%	13%	16%	25%	31%	95%
21 剥離材の剥離(剥離材の剥離)	26	51%							69%						33%	4%			31%		10%
22 その他	128	12%	0%					1%	39%	1%	1%	4%	19%	38%	37%	1%	10%	2%	1%		81%
23 剥離・はく離(真鍮している)	18							28%	89%					34%	20%				24%		
24 はく離	36	1%	5%					8%	97%					10%		9%					
25 被覆材剥離	0																				
26 充填モルタルのひび割れ・浮き・はく離	4	67%							25%							97%					
27 ひび割れ(真鍮していない)	56	2%							88%	10%	76%			24%	2%		1%	2%	11%		
28 しわ・変形・変質等	6								100%					86%							
29 浮きの付着・剥離の浮れ・表面剥離はく離	12	13%							92%							19%					
30	0																				
31 その他	61								98%					9%	18%	8%			2%		

本システムでは表3に示すように、建物の経過年数、各劣化度の調査箇所数、耐用限界、補修金額などを入力することにより、図4および図5に示すようなLCC算定と劣化予測の出力結果を得ることができる。表3および図4、5は、築10年目に調査を行い、供用期間を60年とした場合の例である。図4は不適合なものを除いた全18通りの補修シナリオのLCCを示したものである。また、図5はエキスパート案を採用した場合の劣化予測を示したものである。図4の例では、エキスパート案として表示されている「12年・レベル1」のLCCが最小となり、建築後から12年目に最初の補修を行い、以降12年毎の補修サイクルで劣化度1以上の調査単位をすべて補修することを意味している。

このように本システムでは、補修開始時期と補修レベルを組み合わせたシナリオが設定され、この中でLCCが最小となる最も費用対効果に優れたシナリオをエキスパート案として提示することができる。

4. まとめ

簡便な目視調査の結果をもとに、最適な補修・改修工法を選定する手法として、エキスパートシステムを構築した。本システムは、専門的な知識のない施設管理者などが補修・改修計画を立案する場合に有効であると思われる。

今後は、より実用性のあるシステムの構築を目指し、耐用限界や補修金額の設定および躯体・外壁以外の部分を対象とした場合のシステムについても検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 西山, 鈴木, 浜, 森久保: 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, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.78, 2005.7.
- 2) (財)建築保全センター: 平成17年版 建築物のライフサイクルコスト, 2005.

- *1 室蘭工業大学助手・博士(工学)
- *2 室蘭工業大学助教授・博士(工学)
- *3 北海道立北方建築総合研究所・科長
- *4 日本データサービス(株)・主任
- *5 日崎建設(株)・修士(工学)

表2 劣化度の設定および補修工法データベース

調査分類	劣化症状	劣化度	優先対策案 対策工法	耐用限界	代替案 対策工法	
躯体	a1 鋼汁を伴うひび割れ・剥離	3	補修 埋戻し工法もしくは充填工法	劣化度3が20% (全構面比) 安全支障上境界のためすぐ直す		
	a2 剥離・スカルグ・欠損 (鉄筋露出)	3	補修 埋戻し工法もしくは充填工法	劣化度3が20% (全構面比) 安全支障上境界のためすぐ直す		
	a3 鉄筋に沿うひび割れ	3	補修 埋戻し工法もしくは充填工法	劣化度3が20% (全構面比) 安全支障上境界のためすぐ直す		
	a4 白蟻を伴うひび割れ・剥離	2	補修 樹脂注入もしくは吹付工法			
	a5 0.4mm以上のひび割れ	2	補修 樹脂注入もしくは吹付工法			
	a6 0.2mm以上のひび割れ	2	補修 樹脂注入もしくは吹付工法			
モルタル層	b1 ひび割れ (躯体に至る)	1	補修 Uカットシーリング工法			
	b2 剥離・欠損	3	補修 モルタル充填工法	劣化度3が20% (全構面比) 安全支障上境界のため 代替案で直す	更新 モルタル撤去更新	
	b3 浮き	2	補修 アンカーピンニング工法			
外壁仕上げ	b4 摩耗 (下地の露出)	3	更新 部分ケレン+上塗り工法	劣化度3が20% (全構面比) 施工上境界のため代替案で直す	更新 塗膜撤去+塗替え工法	
	b5 剥離・剥落・欠損	3	更新 部分ケレン+上塗り工法	劣化度3が20% (全構面比) 施工上境界のため代替案で直す	更新 塗膜撤去+塗替え工法	
	b6 ひび割れ (躯体に至る)	2	補修 樹脂注入工法			
	b7 ひび割れ	2	更新 部分ケレン+部分上塗り	劣化度2が20% (全構面比)	更新 塗膜撤去+塗替え工法	
	b8 表面の軽微なひび割れ・剥離・摩耗	1	補修 樹脂注入工法			
	b9 白亜化 (チョーキング)	1				
	タイル層	b5 剥離・剥落・欠損	3	補修 充填工法+タイル強替え	劣化度3が20% (全構面比) 安全支障上境界のため 代替案で直す	更新 全面タイル強替え
		b6 ひび割れ (躯体に至る)	2	補修 樹脂注入工法		
		b7 ひび割れ	2	補修 アンカーピンニング工法		
b8 表面の軽微なひび割れ・剥離・摩耗		1	補修 樹脂注入工法			
シーリング	s1 破断・ひび割れ (貫通している)	3	更新 シーリングの打替え	劣化度3が50% (全構面比) 防水上境界のためすぐ直す		
	s2 剥離	3	更新 シーリングの打替え	劣化度3が50% (全構面比) 防水上境界のためすぐ直す		
	s3 破断材破断	3	更新 シーリングの打替え	劣化度3が50% (全構面比) 防水上境界のためすぐ直す		
	s4 ひび割れ (貫通していない)	2				
	s5 しわ・変形・変色等	2				
	s6 劣化の付着・周囲の汚れ・表面腐蝕の剥離	1				

表3 入力データ

供用期間	経過年数	劣化度区分	調査結果			
			箇所数	劣化度1	劣化度2	劣化度3
60	10	4	56	15	10	2
耐用限界			補修金額			
年数	劣化度	劣化度割合	劣化度1	劣化度2	劣化度3	
21	3	0.200	2,000	6,500	21,500	

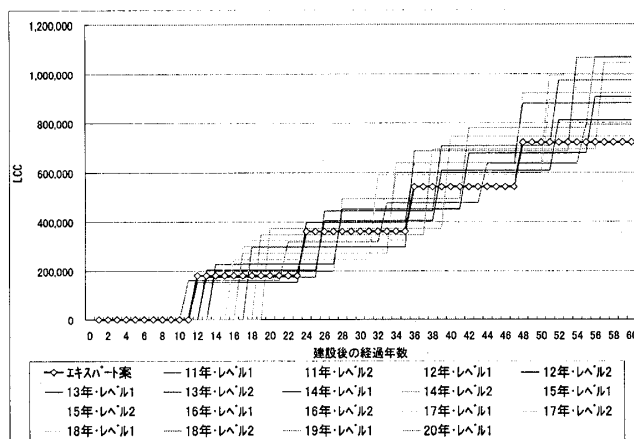


図4 LCC算定出力結果

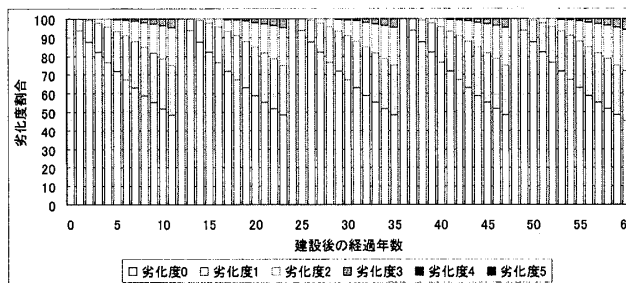


図5 劣化予測出力結果

Research Assoc., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng. Assoc. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng. Hokkaido Northern Regional Building Research Institute. Nippon Data Service Co., Ltd. Hizaki Co., Ltd., M.Eng.