

舗装凍上に関するエキスパートシステム

AN EXPERT SYSTEM FOR PAVEMENT DAMAGES DUE TO FROST HEAVING

(社)日本建設業経営協会 中央技術研究所 ○谷田正人*

By Masato YATSUDA

この報文は、寒冷地建築診断システムのプロトタイプとして、パソコン用AIツールを使用して、設計検討段階における土間・舗装コンクリートの凍上対策エキスパートシステムの構築について報告するものである。

このシステムは構築に際し、知識ベース構築およびデータベース構築にパソコン用簡易ツールを用いているので、知識ベースの修正や追加が容易にできる特徴を有している。地域データの取扱い、対策例の選定に関して曖昧性をもつものは、ファジィ理論を適用して、経験的あるいは主観的対処を可能にした。特に凍上深度を算出する際、計算条件に取り入れにくい条件の処理を行えるのがこのシステムの特徴である。

このシステムを利用することにより、計算精度は高くないが、経済的で且つ、失敗の少ない実用的な対応が可能となる。

【キーワード】設計支援、凍上、エキスパートシステム、データベース、ファジィ

1. はじめに

近年、リゾート開発の活発化に伴い、長野県においても建設投資が増加しているが、寒冷な地域であることから建築凍害や舗装凍上等の対策が強く求められている。

一方、現場技術者の不足から経験の乏しい若年技術者や県外からの土地勘の乏しい技術者が施工にあたることもあり、凍上・凍害等の不測の事態を招くことが少なくない。

この報告では、「工事現場単位で現場技術者が誰でも簡単に操作でき、現場に潜んだ問題発見型の診断システム」を目標に、寒冷地における設計・施工を支援するエキスパートシステムを土間・舗装について構築し、施工例との比較評価を行った。

ここでは、プロトタイプとして長野県を対象とし

ているが、データベースの拡大により、他の地域に拡張することができる。

凍上のメカニズムについて解析を行う場合、土質が持つパラメーター、気象条件、湧水の影響等の様々な要因が含まれており、定量的データとして捉えにくいものも多い。計算条件と自然条件の相違によっては過剰設計であったり、失敗例を残すこともあり、現状に見合う正解を求めるのが難しい。

寒冷地における建築物の凍害対策については、実際には寒冷地業者の経験的“勘”に基づいて処置を講じるケースが多い。このシステムでは、種々のパラメーターを知識ベースとして定量的（デジタル）なものと曖昧（ファジィ）なものに分類し、経験的主観を生かした処理を行う。

エキスパートシステム構築にはパソコンを使用し、システム構築支援ツールには「創玄」¹⁾を、データベース構築にはdBASE III²⁾を用いた。また凍上性診断、対策例選定の中で主観的曖昧性を判断するためにファジィ理論³⁾を用いた。

*北野建設㈱より出向

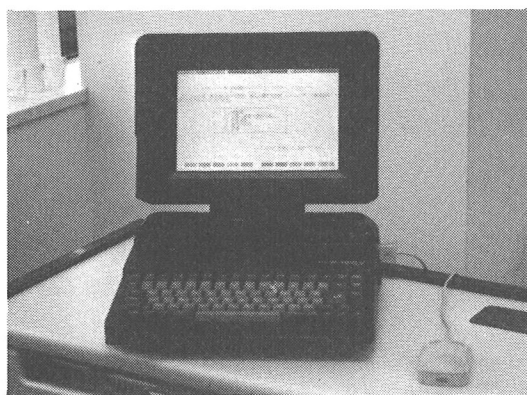
2. システム環境

(1)ハードウェア・システム

現場事務所でも利用できるようにラップトップタイプ（膝掛け型）のパソコンを使用することを想定して開発を行った（写真－1参照）。これは、作業スペースの制約が大きい現場事務所においても十分に対応出来る事と現場導入に際し、非常に安価である事が利点として挙げられる。ハードウェア構成を表－1に示す。

表－1 ハードウェア構成

キーボード	JIS標準配列
マウス	シリアルマウス（2ボタン式）
ディスプレイ	400*640ドット
パソコン	CPU : 16bit メモリサイズ：640KB 外部記憶装置：FD=1MB*2台
プリンタ	日本語シリアルプリンタ



写真－1 システム運用状況

(2)ソフトウェア

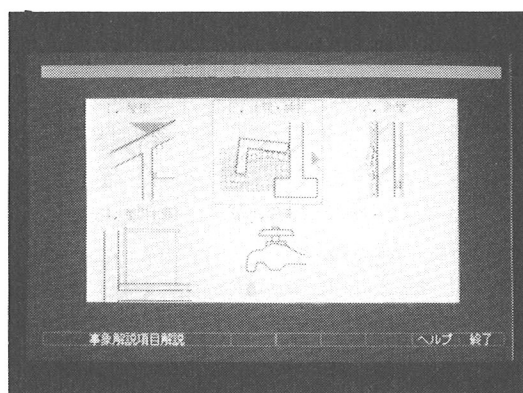
開発に使用したソフトウェアはMS-DOSをはじめパソコンユーザーに比較的広く普及しているものを使用している（表－2参照）。エキスパートシステム構築ツールは編集機能、解説機能、確信度入力機能等を有しており、今回の開発対象において開発用ツールとして機能が十分認められた。

データベース構築ツールを使用することにより、データベースの編集が非常に容易になり、処理速度

の向上につながる。BASICの使用についてはエキスパートシステム構築ツールで処理が苦手な関数値の計算を処理することにより効率化につながる利点有している。また、グラフィックエディタはプレゼンテーションの効果を高めている（写真－2参照）。

表－2 使用ソフト

OS	MS-DOS(Ver3.1)
ES開発ツール	創玄(ルール型システム)
DB構築ツール	dBASEⅢ
グラフィックエディタ	花子
その他	N88BASIC



写真－2 エキスパートシステムグラフィック画面

3. システム概要

ここで報告するエキスパートシステムは図－1に示すように知識獲得部、知識ベース部、推論システム部、ユーザーインターフェース部の4つの構成要素から成り立っており、専門家がユーザーインターフェース部を介して知識ベース部や知識獲得部の編集を行い、編集されたエキスパートシステムをユーザーが使用する仕組みとなっている。知識ベース部は土間診断システムの他に、雪屋根診断システムや外壁診断システム等を増設することにより寒冷地に関する診断システムへと拡張できる。また、この報告では知識獲得部の地域データベースを長野県を対象とし構築しているが、長野県に限らず他県の地域データとアクセスすることにより全国の寒冷地診断システムに拡張することが容易である。

以下に各構成要素およびシステムフローについて述べる。

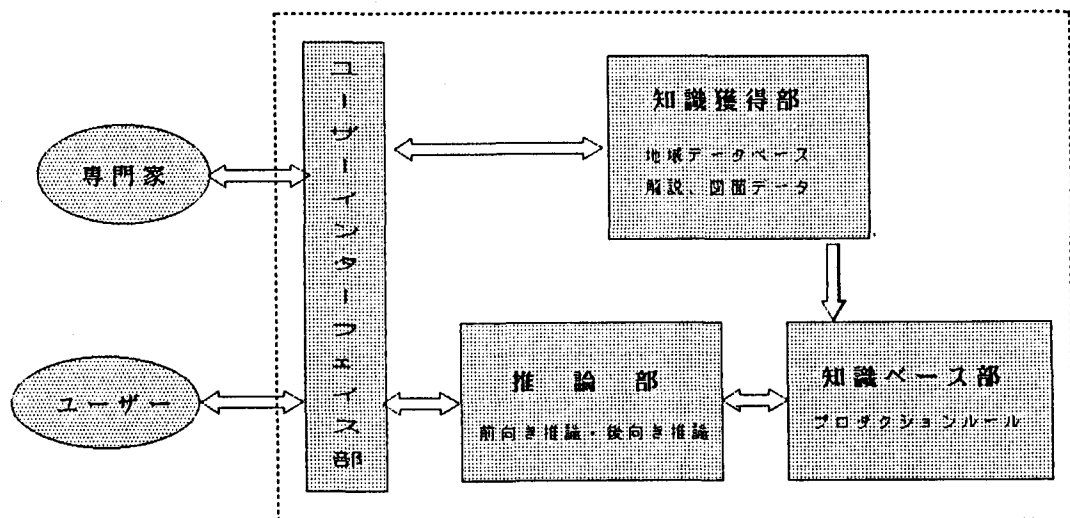


図-1 エキスパートシステム概要図

(1) 知識獲得部

知識獲得部は数値、文書、画像に分類でき、数値は主に市町村別の地域データベースに格納されており、項目の分類については表-3に示す。

表-3 地域データ一覧

分類	データ種別	データ項目	単位
気 象 デ ー タ	温度データ	凍結感度	(Day・℃)
		凍結日数	(Day)
		年平均気温	(℃)
		凍結平均気温	(℃)
	雪データ	累積降雪	(cm)
		最大降雪	(cm)
		最大積雪	(cm)
土 質 デ ー タ		土質の種類	--
		乾燥密度	(g/cm ³)
		含水率	(%)
	熱 常 数	熱伝導率	(cal/cm・sec・℃)
		融解潜熱	(cal/cm・℃)
		熱容量	(cal/cm ³)
経験データ		経験値	(cm)

データベースの登録にはデータベース構築ツールを使用した。気象データは気象庁の過去5年間のデータを基に作成し、土質データは長野県地質図から各市町村の代表的地質を登録した。

文書は問題解説、対策事例の留意点を表しており、エキスパートシステム構築ツールの解説機能を用いた。

画像は市町村図、対策事例図、失敗事例図等の図面を示し、グラフィックエディタにより作成し、被害例、対策例は技術資料⁴⁾、教材⁵⁾を基に作成した。

(2) 知識ベース部

知識獲得部で得られた知識ノウハウをルールとして貯えておく部分で、本システムでは、「もし～ならば～である」という「if～then」形式のプロダクションルールを使用している。

ここで、凍上対策工法の選定ルールの例を示すと

工法対策選定ルール

もし
 凍結深度が深い
 かつ 地下水位が低い
 かつ 置換材料が得にくい

 ならば
 対策例は断熱工法

上記のようなルールに基づいて選定を行っている。

(3)推論システム部

プロダクションルールを基に前向き推論と後向き推論を用いており、前向き推論は主に検討項目選定に、後向き推論は主に対策例選定に用いた。曖昧さの表現は確信度を使用し、その信頼度を0～+1として表した。

(4)ユーザーインターフェース部

エキスパートシステム利用者とシステムとの接点となる部分で、本システムはソフト面ではC言語を基に作られた簡易言語であり、ハード面ではキーボード、マウスを指す。マウスを加えることによりコンピュータに不慣れな人でも十分に利用し易く、エキスパートシステムとの対話が満足に行える手助けを果たしている。本システムでは、数値入力はいちキーボードから、それ以外の入力(事象選択等)は全てマウスを使用することとした(写真-3参照)。

(5)システムフロー

図-2にシステムフローチャートを示す。同図中のハッチ部分の入力は全てマウスを使用し、選択画面はグラフィックエディタを用いて作成した。

図中のフローに従ってユーザーの入力条件からシステムのルールに基づいて推論を行い、凍上性の診断や工法の選定を行っている。診断・選定については4、5章で述べる。

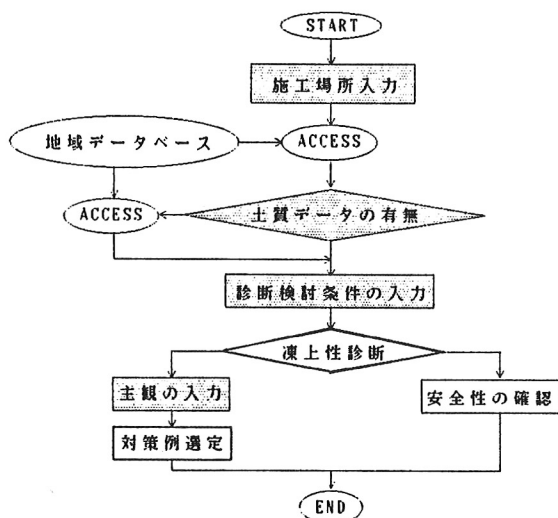


図-2 システムフローチャート

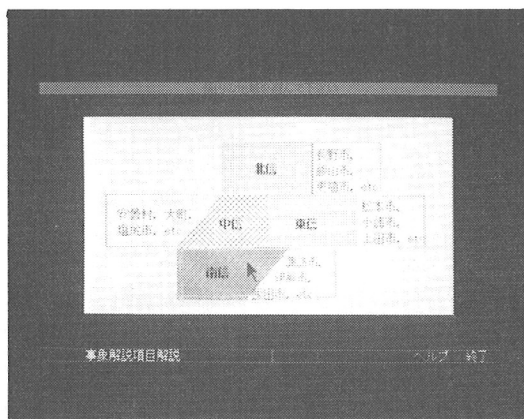


写真-3 市町村選択画面

4. 凍上性診断

冬期の気温が0℃以下になると、地表から土が冷えて行き土中深く迄凍結が進行していく。この時、未凍結土層から凍結層に向かって多量の水が移動し氷となって膨張する。これが凍上の基本機構である。この凍上により建築構造物に被害をもたらす(図-3参照)。

地盤凍上は、主に土質、地中水、温度の3要素に支配されるが、その他に、地下水位、日射量、積雪状況、構造物の重量等も影響を及ぼす。積雪状況においては、その土地の気象条件(積雪状況)の他に、構造物の利用状況(除雪するか否か)の影響も大きい。

今回開発したエキスパートシステムにおける凍上性の診断は、以上の様々な要因を考慮するために、ファジィ理論に基づいて凍上深度を算出して、診断を行っている。

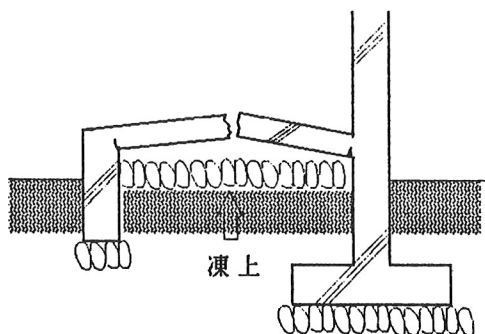


図-3 土間凍上被害例

凍結深度の算出に際し、計算式による算定値、計算式に加味されなかった条件による算定値をそれぞれメンバーシップ関数により定義された集合の演算により、算出を行った。このシステムで考慮したそれぞれの関数を以下に示す。

- ①凍上3要素からALDRICHの式により求める関数
- ②積雪状況を考慮する関数
- ③湧水の危険性を考慮する関数
- ④日射量を考慮する関数
- ⑤構築物の単位重量を考慮する関数

以上の項目に関してメンバーシップ関数を定義して、全体の重心を求める重心法により凍結深度を算出した(図-4参照)。メンバーシップ関数は全て三角形の関数とした。

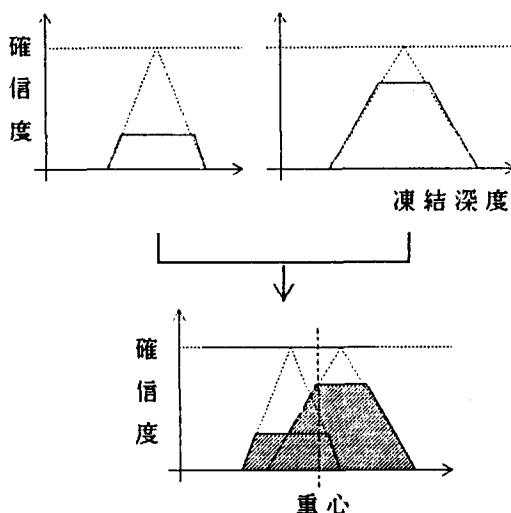


図-4 メンバーシップ関数演算例

表-4 対策例の選定条件

条件 工法	湧 水		凍 結 深 度		地 盤		使 用 頻 度		経 済 性	施 工 性
	ある	ない	浅い	深い	硬い	軟弱	多い	少ない		
置換工法	○	○	○	△	○	○	○	○	ユーザーの 判断による	
断熱工法	○	○	○	○	○	△	△	○		
安定処理(セメント)	△	○	○	○	○	△	△	○		
安定処理(石灰)	△	○	○	○	○	△	△	○		
安定処理(生石灰)	○	○	○	○	○	○	△	○		
遮水工法	○	△	○	△	○	○	○	○		
排水工法	○	△	○	○	○	○	○	○		
絶縁工法	○	○	○	○	○	○	△	○		

(3) 対策例の選定

選定条件と対策工法の関係を表-4に示す。ここでユーザーは選定条件を全て入力するのではなく、入力者の主観によるものと自動処理するものに分かれており、自動処理されたものの中にも曖昧な条件を含むものには確信度が与えられる。凍結深度や地盤の強度はデータベースや算出結果から自動処理を行い、施工性、構築物の使用頻度、経済性等は入力者が判断を行なう。

5. エキスパートシステムの評価

本システムの現場との対応を調査するために、長野県内の18件の現場(15箇所の市町村)について、エキスパートシステムの評価を行った。評価方法は

凍上対策の必要性の有無の確認、エキスパートシステムによる凍上対策例と実際の施工対策例との対応、凍上深度の対応について検討を行った。

検討を行った結果を表-5のエキスパートシステム評価一覧に示す。同表に示すように凍上性診断についてはエキスパートシステムによる評価と実施例がほぼ対応している。物件8の開田村の実施例については、施工後の冬期に凍上被害が報告され、断熱工法により改良工事が行われた。

今回のエキスパートシステム評価に採用した施工例については適切な評価を行っている。

凍上対策工法選定については、エキスパートシステム評価結果・実施例共に置換工法と断熱工法のみであった。これは評価物件に、湧水の危険度の高い

条件や特殊な地盤等の条件が含まれているものが無かった為であることが影響している。いずれにしてもエキスパートシステムによる評価結果と現場での実対応との比較では表-5に示すように凍上の可能性に対する判断は一致するものの、対策工法については8件中4件が対応しているのに止まり、あまり良い対応であるといえない。これは工法選定の知識ベースの中にユーザーの判断に依存するルールが含まれているためである。

エキスパートシステム診断結果では、推論結果より求めた凍上深度から置換深さ、断熱厚を提示しているが、実際の施工現場について凍上深度の確認等に至るまでの追跡調査を行った例が無かったので整合性の確認には至らなかった。

今後は、特殊条件での評価物件を加え、凍上現象の追跡調査を行う必要性がある。

表-5 エキスパートシステム評価一覧

件番	市町村名	凍上性		対 策 例	
		実例	ES	実 例	E S
1	小諸市	○	○	--	--
2	山ノ内村	○	○	--	--
3	白馬村	○	○	--	--
4	東部町	○	○	--	--
5	真田町	○	○	--	--
6	三水村	○	○	--	--
7	上田市	○	○	--	--
8	開田村	○	×	--	断熱
9	川上村	○	○	--	--
10	川上村	×	×	断熱	断熱
11	武石村	○	○	--	--
12	武石村	×	×	置換	断熱
13	軽井沢町	×	×	置換	置換
14	青木村	×	×	断熱	置換
15	佐久市	×	×	置換	断熱
16	立科町	×	×	断熱	断熱
17	茅野市	×	×	断熱	置換
18	南牧村	×	×	置換	置換

但し、○：凍上しない ×：凍上する
ES：エキスパートシステム

6. おわりに

この報告では、パソコン用AIツールを用いて寒冷地に於ける舗装・土間凍上診断システムを構築し、長野県内の施工例と比較して評価を行った。

今回構築したシステムは長野県における土間・舗装の凍上診断システムであるが、他県の寒冷地データを作成することにより、全国規模の診断システムに拡張でき、知識ベース部については、土間・舗装凍上診断の他に、雪屋根診断や外壁診断等の知識ベースを増設することにより寒冷地建物に関する診断システムへと容易に拡張できる。

エキスパートシステム構築に際し、データベースや知識ベースの追加・修正が容易になるような市販ツールを用いた。

凍上診断はファジィ理論を用いることにより、凍上深度の算定の際に、計算条件に加味しづらい曖昧な条件を処理することが可能となった。

施工例との比較により、このシステムを用いた凍上性の診断は実状によく対応していることが分かった。対策例の選定に対しては、実際の施工対策とは必ずしも対応しているとは言えないが、利用者の主観を反映した柔軟性のあるシステムである。

実用化に向けて問題点を挙げると、「実物件における凍上現象の追跡調査の不足」が挙げられるが、これについては、対象現場の協力を求めてシステムの実用性の向上に努める必要がある。

最後に、この度の報告に際し、(社)日本建設業経営協会中央技術研究所常任参与 河野 彰氏にご指導いただきました。ここに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) エー・アイ・ソフト(株)：「創玄」操作マニュアル
- 2) 日本アシュトンテイト(株)：dBASEIII操作マニュアル
- 3) 菅野道夫：ファジィ制御
- 4) 日本建築士事務所協会連合会：
- 5) 実務者のための積雪寒冷地建築技術資料Ⅰ・Ⅱ
- 6) 土質工学会：土の凍結—その制御と応用
- 7) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針
- 8) 日本建築学会北海道支部：寒地建築教材
- 9) 日本道路公団：積雪寒冷地における道路構造・付帯施設設計要領
- 9) 富沢恒雄：長野県地質図
- 10) 日本機械化協会：防雪工学ハンドブック