

I-2 ISM 法と GIS をベースとした対震災緊急交通路整備計画策定支援システムの構築 ISM-GIS Based Decision Support System for Earthquake Emergency Road Network Improvement Planning

木俣 順*

Jun KIMATA*

オマール オスマン**

Omar Osman**

林 良嗣***

Yoshitsugu HAYASHI***

【抄録】 大地震による被災の要因は複雑であり、緊急交通路の安全性の評価には、様々な要因を考慮する必要がある。本研究では、ISM 法と GIS に支援された対震災緊急交通路整備計画策定支援システムを開発した。ISM 法は、問題の解決に主観的評価を用いるため、複雑な緊急交通路の安全性評価に人間の総合判断力を導入することができる。GIS は、非常に強力な空間データベースかつ空間分析ツールであり、緊急交通路の安全性に関わる様々なデータを管理・分析することができる。本論文は、まず本システムの必要性を明らかにし、次にシステムのコンセプトと構成を述べ、最後にケーススタディとして、名古屋市の道路網での計画立案と評価を行った。

【Abstract】 Because earthquake disaster is complex, it is necessary to integrate many factor for evaluation of emergency road network safety in great earthquake. In this study, we develop emergency road improvement planning system supported by ISM and GIS. It is a very attractive feature of ISM that it activates subjective judgments for problem solving. GIS is very powerful spatial analysis tool and database. In this paper, at first, necessity of this computerized system is described. Next, system concept and compartment is cleared. Finally, as case study, we make road improvement plan and evaluate the plan and our system by network analysis.

【キーワード】 ISM 法、GIS、計画支援システム、都市データベース、防災計画、緊急交通路整備

【Keywords】 ISM, GIS, Planning Support System, Urban Information Database, Planning for Prevention of Disaster, Emergency Road Improvement

1 序論

1.1 研究の背景



図1.1 倒壊建造物による道路の閉塞

「いつどこで大地震が発生してもおかしくない」と言われ続けていた我が国であったが、1995年1月に発生した阪神・淡路大震災ではその備えの脆弱さが露呈した。交通分野においても様々な問題が表面化した。震災後、行われた数々の調査・研究は、特殊な需要の増加と極端な供給の減少によって交通に多大な障害が生じ、そのことがさらに被害を大きくしたことを指摘している。

実際、神戸では倒壊した建造物や路上散乱物による道路の閉塞、落橋、路盤の崩壊、沿道建造物の火災等によって道路網が寸断され、自家用車による避難に起因した渋滞と相まって、発災直後の救急救命活動や消火活動など緊急活動の大きな障害となった。消防車は火災現場に辿り着けず、レスキュー隊は生き埋め現場に向かう手段がなく、住民の避難も困難を極め被害の拡

* 中央復建コンサルタンツ(株)第一設計部:大阪市淀川区西宮原 1-8-29 MB31〒532, Tel:(06)393-1104, Fax:(06)393-1147

** カイロ大学工学部:Giza 12211 Egypt, Tel:+20-2-5703749(Ext.2338), Fax:+20-2-5723486

*** ドルトムント大学空間計画研究所:D-44221 Dortmund Germany, Tel:+49-231-755-4111, Fax:+49-231-755-4788

大を防ぐことができなかつた。多くの調査・研究は、スムーズに初期緊急活動が行えたならばより多くの人命を救うことができたであろうと報告している。つまり発災直後の交通の確保が重要であるということである。

このため、緊急活動拠点から市内各所へ、市内各所から広域避難場所等へ確実かつ迅速な到達を可能とする緊急交通路の安全性確保が急務となっており、各都市とも重要な防災施策として取り組み始めている。

1.2 研究の目的

本研究では、大地震時に初期緊急活動を行うのに必要となる通路を緊急交通路と定義し、その最適な整備計画を立案することを最終目的としている。

地震はいつ発生するか分からないため、緊急交通路の整備には時間と費用の制約がある。従って優先度の高い順に整備を行うことになる。しかし、道路網寸断の要因は多様であり、整備の優先順位付けは容易でない。また、その整備内容も道路構造の強化のみならず、幅員の拡大や沿道建造物の強化など多岐にわたる。さらに、その整備の効果はその路線のみの安全性向上でなく、道路網全体の信頼性を向上させるものであり、ネットワークへの効果の波及をも考慮しなければならない。

このように緊急交通路の整備は非常に複雑な計画問題である。その上、近年の都市の巨大化・複雑化は、整備計画策定時に扱わなければならない情報量の飛躍的な増大をもたらし、人的作業限界を超えつつある。そのため計算機を用いた都市の防災情報を網羅した防災情報システムや様々な被害予測・分析システムの導入が一般的になってきた。

しかし、これらのシステムは、情報の収集や被害の予測のためのシステムであり、整備計画策定のため意志決定に基礎的情報を与えるだけで、その上に意志決定支援システムが必要である。そこで本研究は、被害の精緻な予測等は他の研究等に任せるとして、計画策定時の意志決定を支援する計算機システムの開発を目的とする。その手法としてシステムティックな計画支援手法である ISM 法と地理情報システム(GIS)を用いて、i)路線の現安全性の順位付けと重要度の表示により整備順位決定のための材料を提示し、ii)ネットワークへの整備効果分析を含めた計画案の評価機能を備えた対大地震緊急交通路整備計画策定のための計算機による支援システムを構築する。

2 ISM 法と GIS による計画支援

前章で述べた機能を実装するため本システムは、認識の構造図化手法である ISM(Interpretive Structuring Method)法と空間分析ツールである地理情報システム(GIS : Geographical Information System)を計画支援ツールとして採用する。以下に ISM 法と GIS の概略と本システムでの役割を述べる。

2.1 ISM 法による計画支援

地震災害は、地盤破損に端を発する様々な震害よりなる複合災害である。従って、緊急交通路の安全性評価に関しては、これらの個別震害を総合化する必要がある。これには、複雑な情報を計算機によって管理し、人間の総合的判断力の活用によって評価することが望ましい。

ISM 法は、Warfield によって提案された人間の総合判断力を活用する認識の階層構造図化手法である。人間にとって複数の要素間の関係を同時に把握することは困難であるが、2個の要素間の従属関係は容易に把握できることを用い、“要素 i は要素 j に影響を与えるか?”という一対比較によって要素間の関係を階層構造図(図 2.1)に変換するアルゴリズムである。

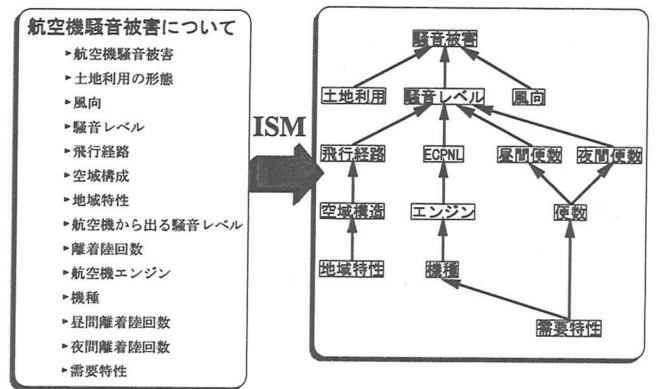


図2.1 ISM 法による階層構造図の例

この一対比較を基本とした ISM 法の適用は、i)主観的な認識や主張の構造化と、ii)計画案や選択肢の比較または順位付けの2つに大別できる。本システムでは、ISM 法のアルゴリズムを計算機に実装し、安全性の規定要因について i)の使用法で ISM 法を適用して整理し、より適切な規定要因の選択を行い、選択された要因によって路線の属性情報を作成した上で、ii)の使用法によって、緊急交通路の安全性順位図を得ている。そして、その主観的評価結果を3群判別関数モデルを用いて数値化している。

情報が可視化(visualization)された ISM 法の階層構造図による表現は、説明力があり、かつ比較・検討時に有用である。また本システムでは、フィードバックの考え方を導入し、階層構造図の検討・プレーンストーミング・一対比較を繰り返すことによって主観を基準とする ISM 法の弱点を補っている。

2.2 GISによる計画支援

ISM 法で判定するための情報は空間的な広がりを持つとともに複合されたものである。その複雑さのため、属性情報の取得・更新・変更・管理は容易ではない。

また、ISM 法による安全性順位付けは1本1本の路線の比較を基準としている。しかし、路線は緊急交通路網の一部であり、「全体」における重要度の低い路線は安全性が低いからといって必ずしも整備を優先する必要はない。すなわち整備優先順位を決定する際には地理的特性や空間的効果をも考慮する必要がある。

そこで本研究では、これらの課題を解決するために地理情報システム (GIS)に注目し、本システムへの導入を図っている。

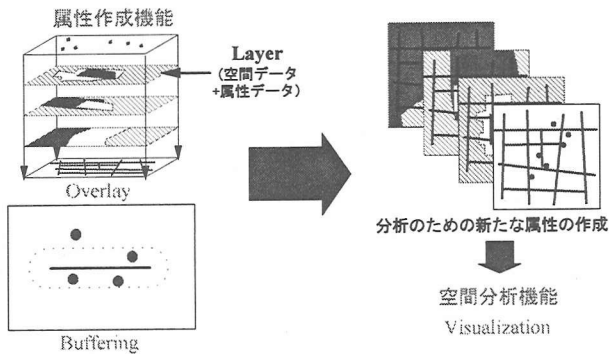


図2.2 GISの基本的な機能

GIS は、空間的なデータ、つまり点(point)・線(arc)・面(polygon)といった2次元のデータと、その属性情報とを同時に取り扱うことができる。様々な都市のデータはタイプごとにレイヤー(Layer)として管理されており、これらのレイヤーと路線のレイヤーを重ね合わせる(Overlay)ことによって属性情報を自動的に付加でき、複雑な空間データの管理・更新を容易に行うことができる。またそれぞれの属性情報の関連づけを行うことができ、各データをそれぞれのデータテーブルで管理しながら、1つのデータベースとして様々な空間的検索や分析が可能となる。

このような空間データベース機能・解析機能を持つ GIS は、近年都市計画をはじめとし各方面で広く用いられている。大規模開発の適地抽出や、ボーリングデータからの地盤解析、地下水汚染の拡散予測など様々な分

野で利用されている。

本システムでは、GISの導入によりISM法で決定された安全性順位の空間的評価を行い整備優先順位を決定する。さらに GIS のネットワーク分析機能を用いることにより、施策のネットワークへの効果を分析する。

また、データの修正・変更を容易にできることから、インタラクティブな計画代替案の分析が可能である。加えて、GISは優れた表現能力を有しており、分析結果のプレゼンテーション及び検討にも有用である。

3 システムの構築

3.1 システムの構成と構築

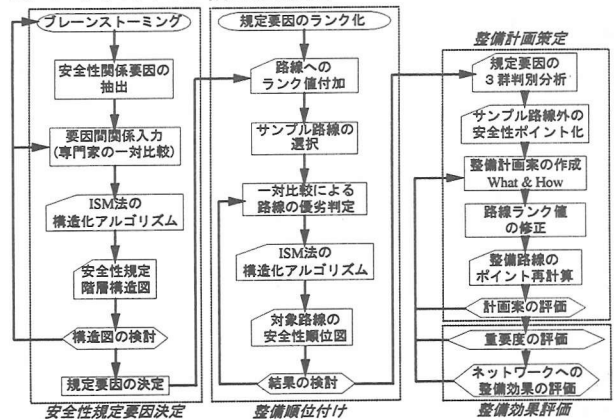


図3.1 本システムのモジュールと処理フロー

本システムは、i)安全性規定要因決定モジュール、ii)安全性順位付けモジュール、iii)整備計画策定モジュール、iv)空間効果評価モジュールの4つのモジュールより構成されている。

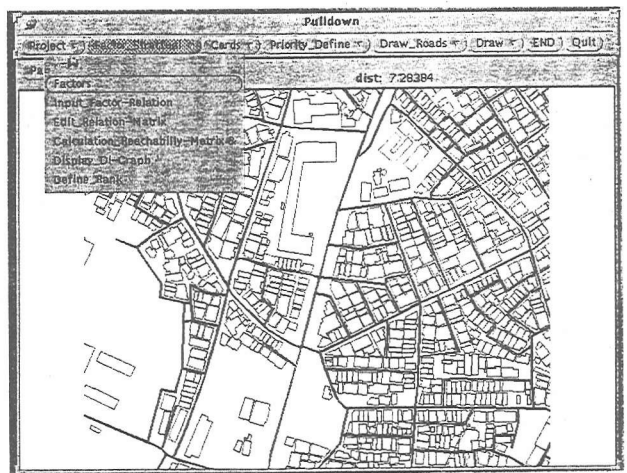


図3.2 グラフィカルなユーザーインターフェイス

i)では ISM 法によって緊急交通路の安全性規定要因を抽出する。ii)では GIS により規定要因の属性情報を路線に付加し、ISM 法によって安全性順位付けを行う。iii)

では安全性及びその他の情報より具体的な整備計画の立案を行う。ix)ではシミュレーションによって整備効果を評価する。

システム全体は、グラフィカルなシステム利用者インターフェースを通じて操作できるように設計されている(図3.2)。システム利用者はメニューをマウスで選択することによりシステムを操作することができる。

3.2 モジュール各部の概説

i)緊急交通路安全性規定要因決定モジュール

このモジュールでは、緊急交通路の安全性に関する複雑で多数の要因の中から一対比較を行いISM法のアルゴリズムによって要因間の従属関係を明らかにし、規定要因を抽出する。得られた階層構造図を検討して一対比較にフィードバックすることによって、よりの確な規定要因の抽出を行う。

ii)路線安全性順位決定モジュール

このモジュールではISM法によって路線の安全性順位付けを行う。まずグラフィックウインドウ上に様々なレイヤーを表示して緊急交通路に他の規定要因の属性情報を付加する。属性情報の付加はGISのオーバーレイ機能を用い緊急交通路のレイヤーとその他のレイヤーの重ね合わせによって作成している。この属性情報をもとに規定要因決定モジュールと同様ISM法のアルゴリズムを用いて“路線iは路線jより安全か”という一対比較を行い、路線の安全性順位付けを行う。

iii)緊急交通路整備計画策定モジュール

整備計画の策定では、整備する路線と整備手法を決定する必要がある。このモジュールでは3群判別関数の係数を用い、整備手法の決定とサンプル路線の評価の緊急交通路網全体への拡張を行う。そして、重要度の情報を重ね合わせることで、整備計画を策定する。

整備計画に基づき修正した属性情報から3群判別関数の係数を再計算する。係数の改善と費用・所要時間等を比較し、計画案の良否を検討し、問題があれば整備計画案の作成にフィードバックする。

ix)緊急交通路整備計画評価モジュール

このモジュールでは策定された整備計画によって整備された緊急交通路網を対象に道路被災シミュレーションと移動シミュレーションを行い、整備効果を評価する。

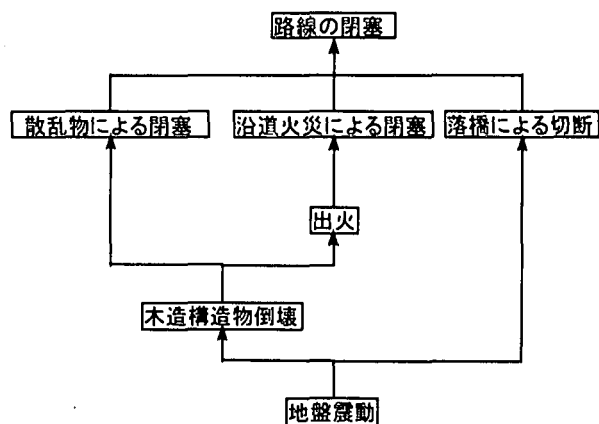


図3.4 道路被災シミュレーション

1.2節で述べているように被災の精緻なシミュレーションを行うことは本システムの目的としておらず、このモジュールでは同じ条件下で各代替案の相対的評価を行うことを目的としている。

まず、道路被災シミュレーションによって地震時の緊急交通路網の閉塞状況を決定する。上図のように道路の閉塞は、i)沿道建造物の倒壊による閉塞、ii)沿道火災による閉塞、iii)落橋による切断によって生じるとする。i)沿道建造物の倒壊による閉塞度は沿道の木造構造物倒壊数と道路幅員によって決定される^{14) 15) 16)}。ii)沿道火災による閉塞度も出火と道路幅員により、iii)落橋による切断は橋梁の有無と地盤の種類により、木造構造物倒壊率は地盤のN値の5mまでの平均値と5mから10mまでの平均値によって決定されると仮定する^{3) 7) 10)}。出火は倒壊木造構造物1軒あたり1%の確率で生じるとする¹¹⁾。この仮説のもとマイクロシミュレーションにより地震時の道路状況を予測し、路線毎の閉塞率を求める。他の予測システムによる精緻な予測結果があるならばそれを用いることも可能である。

次に移動シミュレーションを行い整備効果を評価する。ここでは路線の移動抵抗として自動車と歩行者、それぞれの所要時間をインピーダンスとして用いる。所要時間は路線の閉塞率から求まる残存幅員によって規定されている。交通の発生地と発生量及び集中地と容量を与えることによって到達可能不可能の予測及び到達量・平均到達時間・最大到達時間等の定量的評価が可能である。このシミュレーションを整備前と整備後で行うことにより、相対的な整備効果の評価を行う。

4 システムの運用例

本章では、本システムの運用例として、名古屋市を対象として地震に対する道路の安全性評価と簡易な整備

計画案の策定を行い、さらに避難シミュレーションを行い、整備効果の評価を行う。

4.1 使用したデータ

以下のデータをデジタルまたは変換して作成し、レイヤーとしてGISデータベースに格納した。

表4.1 使用レイヤー

レイヤー	型	ソース	作成方法	属性
道路網	線	道路交通センサス	デジタル	車線数、渋滞時速度、橋梁有無、各種交通量
地盤	面	名古屋地盤図ボ ーリングデータ	ポリノイ分割	調査深度N値、各種地盤指標値
木造家屋	面	500mメッシュ	ジェネレート	木造家屋数
人口	面	500mメッシュ	ジェネレート	人口
広域避難 場所	点	都市計画図	デジタル	面積、一時収容者数
消防署	点	都市計画図	デジタル	ポンプ車数
避難所	点	都市計画図	デジタル	一時収容者数

4.2 安全性規定要因の決定

大地震時の緊急交通路の安全性に関係する要因を地域防災研究者とのブレインストーミングによって抽出する。その結果、16個の要因が抽出された。

この16個の要因間の関係をISM法によって階層構造図化したものが下図である。

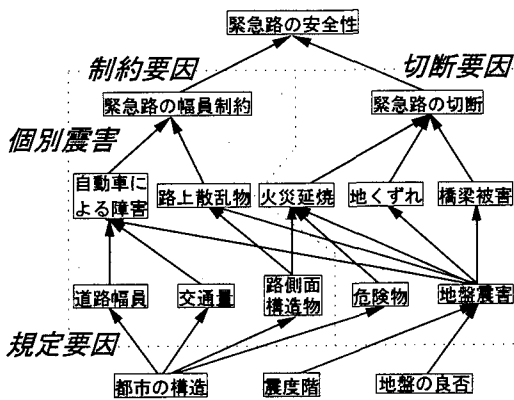


図4.1 安全性規定要因階層構造図

図4.1から緊急交通路の安全性関係要因は、制約要因と切断要因からなることが分かり、さらに個別の震害とそれを規定する要因の階層構造を把握することができる。これらの規定要因の内、GISデータベースを鑑み、「橋梁」、「地盤」、「木造度」、「渋滞時速度」、「道路幅員」の

5つを今回の分析で用いる安全性規定要因とする。

4.3 路線の安全性順位付け

次に路線の安全性の順位付けを行うために、路線へ安全性規定要因についての属性情報を付加する必要がある。GISの重ね合わせ機能を用い、それぞれのレイヤーから属性情報を路線のレイヤーに付加する。このとき一対比較の際の簡便性と3群判別を行うために付加する属性情報を下表のようにランク値化しておく。

表4.2 規定要因のランク値

項目	ランク値	内容
橋梁	1	橋梁なし
	2	橋梁あり
地盤	1	木造倒壊確率5%
	2	木造倒壊確率10%
	3	木造倒壊確率20%
木造度	1	2000棟/km ² 以下
	2	4000棟/km ² 以下
	3	4000棟/km ² 以上
渋滞時速度	1	時速40km以上
	2	時速40km以下
	3	時速30km以下
	4	時速20km以下
	5	時速10km以下
道路幅員	1	21m以上
	2	21m以下
	3	14m以下
	4	7m以下

安全性の順位付けはISM法のアルゴリズムに従い路線間の一対比較によって行うが、名古屋市781路線すべての一対比較を行うことは不可能である。そこでランダムに抽出した24路線(図4.2の太線区間)をISM法で順位付けし、3群判別関数の係数を用いて安全性のレベルを全路線に拡張する。ISM法による順位付けにより、図4.3の安全性順位図を得た。

この24路線を安全性レベル1~7を危険(グループ1)、8~11を中程度安全(グループ2)、12~17を安全(グループ3)の3群に分けたときの3群判別関数の係数が表4.3である。

係数 d_{ij} はグループnとグループmの判別への寄与度である。係数の符号が全て正であることから全ての要

因が安全性に寄与しており、安全性規定要因の選択は適当であったといえる。また係数の大きさから、一対比較の判定者は「危険」か「中程度安全」を判断する際に、まず木造度を考慮し、次に地盤の良否を見ていることがわかる。

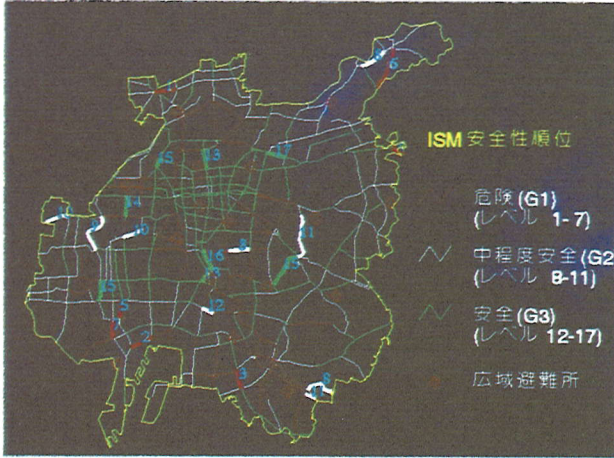


図4. 2 整備路線と安全性レベル

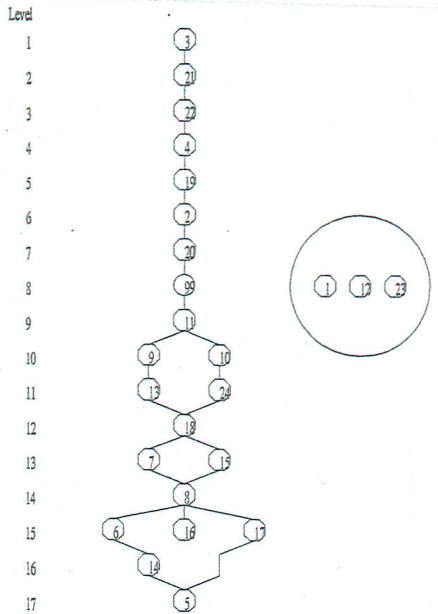


図4. 3 安全性順位図

表4. 3 3群判別関数の係数

属性	$\hat{a}-\hat{d}$	$\hat{a}-\hat{c}$
橋梁	0.42	2.41
地盤	3.82	4.17
木造度	4.52	0.57
渋滞時速度	1.88	1.90
幅員	0.60	3.65
定数項	$\hat{c}-\hat{d}$	$\hat{c}-\hat{c}$
	-26.75	-25.45

この係数 $\hat{a}-\hat{d}$ と $\hat{a}-\hat{c}$ 属性の値の積を路線*i*について足し合わせた Z_{im} の正負によってグループを判別することができる。このことより安全性のレベル分けを全路線に拡張した結果が図4. 2の細線部である。

4. 4 整備計画の立案

まず整備対象路線を抽出する。今回は3群判別関数による評価において「危険」と判別されたものの中から危険な順に 10 路線を整備対象として選択する。



図4. 4 整備対象路線と沿道地区

次に整備の手法を決定する。表4. 3より木造度の改善が最も効果的である。整備対象路線の木造度の評価はどの路線とも最悪(ランク値3 : 4000 棟/km²)である。

表4. 4 整備対象路線の属性情報

路線D	橋梁	地盤	木造度	渋滞速度	道路幅員	Z_{21}	Z_{22}
80	2	3	3	4	4	9.03	15.79
186	2	3	3	4	4	9.03	15.79
199	2	3	3	4	4	9.03	15.79
171	1	3	3	4	4	8.61	13.38
186	1	3	3	4	4	8.61	13.38
79	1	3	3	4	2	7.41	6.08
52	1	3	3	4	1	6.81	2.43
188	1	3	3	3	4	6.73	11.48
104	2	3	3	3	3	6.55	10.24
106	1	3	3	3	3	6.13	7.83
係数	0.42	3.82	4.52	1.88	0.6		

整備対象路線の沿道地区を耐震耐火地区として木造家屋の耐震耐火構造物への立て替え促進などを行い木造度を 2000 棟/km² 未満(ランク値1)まで改善する整備計画を立案したとする。この新たなランク値により再計算すると Z_{21} の欄がすべて負となりこれらの 10 路線は全

て「中程度安全」と評価される。

4.5 整備効果の評価

整備効果を評価するため、整備前と整備完了後の緊急交通路網について地震による道路被災シミュレーションを行い、通常時及び被災時、整備完了後被災時のそれぞれについて移動（広域避難）シミュレーションを行う。

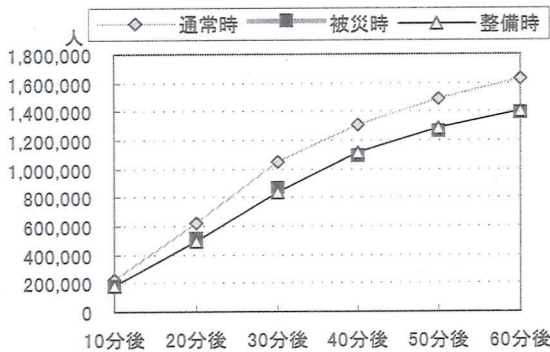


図4.5 避難可能人口の推移

表4.6 評価指標

	通常時	被災時	整備時
避難可能人口(人)	2,931,150	2,21,973	2,225,998
避難可能率(%)	131.5	99.7	99.9
通常期との比較(%)	100	75.8	75.9
平均避難時間(分)	64	8,136	6,940
最長避難時間(分)	205	---	---

その結果、広域避難場所への60分避難可能人数は図4.5のように改善され、表4.6の各評価指標からも緊急交通路網全体として若干の整備効果が確認できる。

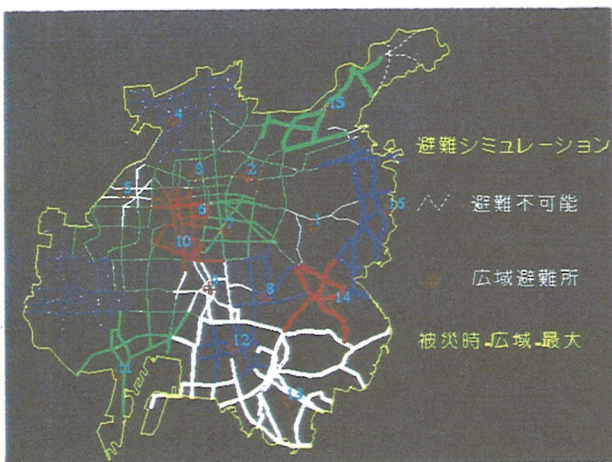


図4.6 整備前被災時避難可能範囲



図4.7 整備完了後被災時避難可能範囲

避難可能範囲の点では被災時(図4.6)と整備完了後被災時(図4.7)を比較すると広域避難場所1の周辺で避難可能範囲がかなり改善されていることが分かる。また、西部地区の避難先が広域避難所4から3に変化しているが、広域避難所10周辺の道路被災状況の改善のため流動が変化したものと思われる。

5 結論

5.1 得られた知見

本研究の成果を以下にまとめる。

- ISM法とGISをベースとして対大地震緊急交通路整備計画策定の計算機による支援システムを構築した
- ISM法は複雑な要因間の関係把握に有用であり、システムティックな情報管理手法であることが明らかになった
- 空間問題である防災計画に関するGISの利用方法の一つを示した。

5.2 今後の課題

本研究では、計画立案の意志決定を支援するためのシステム構築を目的としているため、被害予測の稚拙さなどトータルシステムとしては、まだ課題が多い。ただし、この点に関しては他の予測結果も取り入れられるように設計している。

また、本システムは人間の総合判断力を導入しているため意志決定支援の部分においてもサンプルの取り方によって3群判別関数の係数が変化するなど客観性に乏しい点もあり、主観の客観化も課題のひとつである。さらにサンプリング数およびばらつきと道路網全体への評価の拡大との関係も照査する必要がある。

4章においては、簡略な整備計画を策定し、その整備効果の評価を試みたが、これは路線単体の整備計画の効果評価であり、今後緊急交通路全体の整備計画を策定し、計画案自体の評価及び代替案の作成を行い本システムの計画策定システムとしての有用性を確認する必要がある。特に整備路線がネットワークの中でどのようなウェイトを占めているかを把握するための手法を開発する必要がある。

今後の技術的課題としては、ISM法の対比較時における判定者の負担軽減の検討、整備効果評価モジュールの精緻化が挙げられる。また用いるGISデータベースの精度が評価精度にどのような影響を与えるかを把握する必要もある。

参考文献

- 1) 林 良嗣, 富田安夫, 中川 大ら : 「緊急対応・復旧」分科会報告, 土木計画学研究・講演集 18(1), 1995, pp. 469-473.
- 2) Warfield, J. N : Binary Matrices in System Modeling, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. SMC-3, 1973.
- 3) 木俣 昇 : ISM法に支援された大震時避難路の安全性評価システムに関する基礎的研究, Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol. 28, No. 1, 1985, pp. 31-50.
- 4) 竹村 哲, 木俣 昇, 磯村隆司 : 社会基盤整備計画のためのISM-AHP連動化支援システムの開発, 土木計画学研究・講演集 16(1), 1993.
- 5) 林 良嗣, オマール オスマン, 木俣 順 : ISM法とGISに支援された大地震時の緊急路整備計画策定支援システムの構築, 土木計画学研究・講演集 19(1), 1996, pp. 105-108.
- 6) 木俣 順, オマール オスマン, 林 良嗣 : 大地震時の緊急路整備計画策定支援システムの構築 -ISM法とARC/INFOによる計画支援-, '96日本ARC/INFOユーザ会・日本ERDASユーザ会論文集, 1996, pp. 23-34.
- 7) 木俣 昇, 小間井孝吉 : 橋梁信頼性の経験的評価システムに基礎を置く補修計画のリスク認識に関する研究, 土木学会論文集, No.464/IV-19, 1993, pp. 43-52.
- 8) 名古屋市防災会議 : 名古屋市地域防災計画 ②地震対策災害編, 名古屋市防災会議, 1996.
- 9) 名古屋市防災会議 : 名古屋市地域防災計画 ③附属資料編, 名古屋市防災会議, 1996.
- 10) 名古屋市防災会議(地震対策専門委員会) : 名古屋地盤の地震増幅度および地震危険度, 1979.
- 11) 名古屋市防災会議 : 地震火災の被害想定に関する調査, 名古屋市防災会議, 1976.
- 12) 吉川和広ら : 土木計画学演習, 森北出版, 1985.
- 13) 木下栄蔵 : 意思決定論入門, 啓学出版, 1992
- 14) 家田 仁, 上西周子, 猪股隆行, 鈴木忠徳 : 阪神大震災における「街路閉塞現象」に着目した街路網の機能障害とその影響, 1996.
- 15) 家田 仁, 上西周子, 猪股隆行, 鈴木忠徳 : 阪神大震災における街路機能障害に関する研究-航空写真による概況把握-, 土木計画学研究講演集 18(2), pp.357-360, 1995.
- 16) 塚口博司, 戸谷哲男, 中辻清恵 : 空中写真を用いた震災直後の道路被害状況分析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1996.