

運輸省港湾技術研究所

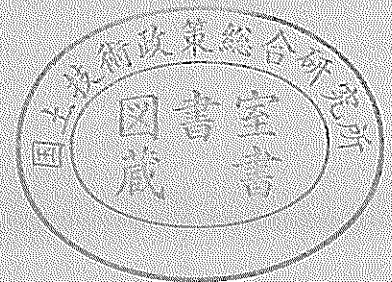
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.39 NO.3 SEPT. 2000

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第39巻 第3号 (Vol. 39, No. 3), 2000年9月 (Sept. 2000)

目 次 (CONTENTS)

1. 東京湾盤洲干潟の短期地形変動特性とそのメカニズムについて
..... 内山雄介 3
(Suspended Sediment and Morphological Response on Banzu Intertidal Sand-flat, Tokyo Bay, Japan
..... Yusuke UCHIYAMA)
2. 都市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み
..... 赤倉康寛・高橋宏直・中本 隆 19
(A Street Blockage Model for Earthquake Damage Estimation at Water Front City
..... Yasuhiro AKAKURA, Hironao TAKAHASHI and Takashi NAKAMOTO)
3. GPSとレーザーレベルを組み合わせた測量システムの開発
..... 白井 一洋・吉江 宗生・横井 博志・剣持 知弘 43
(Survey System Combined GPS and Laser Level
..... Kazuhiro SHIRAI, Muneo YOSHIE, Hiroshi YOKOI and Tomohiro KENMOTI)

都市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み

赤倉 康寛*・高橋 宏直**・中本 隆***

要 旨

本論文は、大規模地震による街路閉塞現象の発生を予測するモデルを構築することを目的としたものである。本論文では、街路閉塞の発生を旧気象庁震度階を基にした地震動強さと街路幅員によりモデル化し、これによる予測結果を既往の研究における兵庫県南部地震での実測状況と比較・検討を行った。さらに、本論文のモデルを用いて東日本のある大都市が大規模な地震や直下型の地震を受けた場合の被害予測を行い、考察を行った。さらに、街路閉塞予測モデルから、瓦礫幅の確率分布モデルを導いた。なお、本論文による街路閉塞予測は、システム研究室で開発中の都市臨海部の地震被害予測を総合的に行う総合地震防災システムの中の被害予測項目の一つである。

キーワード：街路閉塞，震度，街路幅員，地震被害予測，GIS，総合地震防災システム

* 計画設計基準部システム研究室

** 計画設計基準部システム研究室長

*** 前計画設計基準部システム研究室（現国土庁計画調整局総合交通課）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：0468-44-5036 Fax：0468-44-5036 E-mail：akakura@cc.phri.go.jp

A Street Blockage Model for Earthquake Damage Estimation at Water Front City

Yasuhiro AKAKURA*

Hironao TAKAHASHI**

Takashi NAKAMOTO***

Synopsis

The purpose of this paper was to develop the model of street blockages caused by great earthquake. In this paper, the damage of street blockages was estimated by earthquake intensity and street width in the proposed model. The proposed model gave good agreement with the damage that had been surveyed at previous study caused by Hyougoken-Nanbu earthquake. The calculated result of forecasting the condition of street blockage at certain city by a great earthquake and an epicentral earthquake was showed. Furthermore, the probability distribution of width of debris was obtained from the proposed model.

The proposed model is included by the system for estimating earthquake disaster damage at water front city. This system is now being developed by Systems Laboratory using GIS (Geographical Information System).

Key Words: street blockage, Hyougoken-Nanbu earthquake, street width, earthquake intensity, damage estimation, geographical information system

* Systems Laboratory, Planning and Design Standard Division

** Chief of Systems Laboratory, Planning and Design Standard Division

*** Former Systems Laboratory, Planning and Design Standard Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445036 Fax : +81-468-445036 E-mail : akakura@cc.phri.go.jp

目 次

要 旨	19
1. まえがき	23
2. 既往の研究	23
3. 都市臨海部における地震防災について	24
4. 街路閉塞発生の要因分析	25
4.1 街路閉塞発生の要因	25
4.2 神戸市域における地震動強さの分布状況	26
4.3 街路幅員	27
5. 街路閉塞発生予測モデル	27
5.1 モデルの概要	27
5.2 発生予測モデル	27
5.3 発生予測モデルの検討	30
5.4 シミュレーションの実施	33
5.5 シミュレーション結果の検討	34
6. 瓦礫幅確率分布モデル	34
6.1 モデルの概要	34
6.2 街路リンクの瓦礫幅確率分布	34
6.3 建物リンクの瓦礫幅確率分布	37
7. 結論	39
8. あとがき	39
謝辞	39
参考文献	39

1. まえがき

1923年の関東大地震（関東大震災）以降、昭和時代を通し人口100万人を超える過密都市を直撃し、1,000人以上の死者を出した地震は発生しなかった。その間の昭和時代においては、都市へ大きく人口が移動し、生活様式も大きく変化した。一方で、関東大地震以降、1964年の新潟地震、1978年の宮城県沖地震等の被害を踏まえ建築基準法、コンクリート標準示方書、鉄道構造物等設計基準、道路橋示方書等の耐震基準が改訂され構造物の耐震性は向上してきたと考えられる。このように、ハード面ではある程度対応がとられてきたのに対し、ソフト面においては相対的に遅れていたのが従来の地震対策であったと考えられる。

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、現代の大都市を大規模地震が直撃した場合にどのような被害が生じるのかを示したものとと言える。個々の構造物の被害はもちろんのこと、都市総体としての被害は大きいものがあつた。これは、とりもなおさず、大都市を大規模地震が直撃しない間に都市の状態・機能が変わり、ハード面の不備だけでなく、ソフト的な対応が遅れてきたことを示していると考えられる。建築物同士が狭い間隔で立ち並び、狭隘な街路と電信柱が依然として存在する街区において発生した街路閉塞が、消防活動や警察・自衛隊による救援活動の大きな妨げとなつた¹⁾こともこの例であろう。さらに、この街路閉塞は救援物資の運搬、都市機能の復旧の上でも障害となつた²⁾。

このような状況を踏まえ、兵庫県南部地震を契機として、都市全体としてのソフト面で災害対策を考える動きが起きてきている。各地方自治体での地域防災計画の策定・改訂をはじめとし、防災情報システム³⁾、リアルタイム地震防災システムの構築⁴⁾が行われ、学会としても1997年9月に「阪神・淡路大震災に学ぶ一土木計画からのアプローチ」とのシンポジウムが開催されるなど、都市計画の観点における地震防災が強く意識されるようになった。これらの動きは、地震災害を建築物の被害と直結させるハード面の傾向が強かつた、兵庫県南部地震以前とは大きく異なるものであると考えられる。

著者らも都市全体としての災害対策を考慮し、この災害が臨海都市で発生したことを踏まえ、都市としての緊急対応の状況を港湾の被害との関連を踏まえながら考察を行い⁵⁾、さらに、この際の港湾の果たした機能について分析を試みている⁶⁾。その結果を考慮する

と、震災時に港湾の持てる能力を十分に発揮させるためには、各々の港湾施設がどのような被災状態にあるのか、その港湾施設と都心部を結ぶ道路は使用可能であるのか、について、防災計画作成時の検討や地震発生後の確認が必要であると考えられる。以上の状況を踏まえ、システム研究室においては、都市臨海部の諸施設の地震被害を総合的に把握するシステム（以降、総合地震防災システム）を、GIS（地理情報システム）を用いて開発中である。本論文は、総合地震防災システムの一部として構築した街路閉塞現象の発生予測モデルについて述べたものである。さらに、このモデルの予測結果を兵庫県南部地震の被害により比較・検討をした上で、他地域へ適用を試みた。

2. 既往の研究

街路閉塞現象及び震災時の道路交通機能に関する研究は、兵庫県南部地震の被害を踏まえて行われてきている。

家田らは、航空写真を用いて街路閉塞の発生状況を、長田、兵庫、三宮、春日野道、六甲道、魚崎、芦屋の7箇所において厳密に調査し、残存車道幅員を各街路について求めている⁷⁾。さらに、測定されたガレキ幅について、街路幅員の上限効果によるバイアス及び街路リンクの長さによるバイアスの補正処理を行い、建築物の倒壊などによって発生するガレキの発生特性を説明する推定式を示している。加えて、この推定式により街路閉塞確率と兵庫県南部地震による街路の閉塞状況を比較・評価するとともに、街路拡幅を行った場合についても閉塞確率を算定している⁸⁾⁻¹¹⁾。この推定式は、東京市街地へも適用されている¹²⁾、しかし、推定式において、地震動特性を考慮する要因を必要としながらこれを直接の説明要因としては用いていない。

また、家田らは、兵庫県南部地震を経験した消防隊員、警察官、自衛官を対象としてアンケートを実施し、街路閉塞が救助、消火、救援活動に対して及ぼす影響の把握に努めている¹³⁾。さらに、消防隊員の危険度判断と街路閉塞現象の発生とを結びつけている¹³⁾。

塚口らは、航空写真を用いて灘区六甲地区の山麓からハーバーウェイまでの範囲の街路閉塞状況を調査し、震度、木造建物延長率、街路幅員等を要因として数量化Ⅱ類によるモデル化を行い、調査した閉塞状況と比較している¹⁴⁾。本モデルは、震度を含む多くの説明要因からなっており、調査された被害状況に対して車両通行可否の判定で8割近い的中率を示している。また、

この閉塞確率から、街路網の防災性の尺度として到達可能ノード率を提案している¹⁵⁾。さらに、幅員 8m 及び 12m の中街路を 200m, 300m 間隔で整備した場合について閉塞状況の予測をし、防災性の比較を行っている¹⁶⁾。しかし、予測モデルの構築にあたって用いられている街路閉塞の実測データは六甲地区のみであり、建築物の状況、街路構成や震度が大きく異なる地区への適用が可能であるのかどうか疑問が残る。小谷らは、東灘区の比較的広い範囲を対象に、前二者と同じく航空写真により街路閉塞の状況を把握し、これと被災時の車両走行状況、駐車車両台数といったデータと結び付け、街路閉塞が交通流動に及ぼす影響について調べている^{17), 18)}。また、黒田らは街路閉塞現象について、現地調査と航空写真調査を比較し、航空写真による調査の信頼性を評価している¹⁹⁾。しかし、これらの研究では街路閉塞状況を予測するモデルは構築されていない。

木俣ら²⁰⁾は、家田らの研究成果^{11), 9)}に基づき街路閉塞を街路の安全性を規定する一つの要因として、名古屋市域における震災時の路線の安全性を試算している。しかし、モデル自体の再現性の検証はなされていない上、地震動強さが考慮されていない。名古屋市域では兵庫県南部地震ほど大きな地震動は起こり得ないのか、あるいは兵庫県南部地震の規模では不十分なのか、といった観点の検証が必要なはずである。

一方、内田ら²¹⁾は車両感知器データにより震災直後からの道路交通量を把握している。震災直後の交通行動の把握は、加藤ら²²⁾、日野ら²³⁾、小谷・松本²⁴⁾の研究に見られる。OD の把握についても、倉内・飯田²⁵⁾の研究がある。このような研究に見られるように、震災時の物資運搬機能等の街路の機能を発揮させるためには、街路閉塞箇所の把握だけでなく、閉塞状況を踏まえた交通量の把握が必要になってくる。飯田らは、道路交通マネジメントとしてこれらを扱っている²⁶⁾。街路閉塞現象の予測は、このような研究によって、より活かされていくと考えられ、この方向性を示すとおりまとめが国際交通安全学会震災時道路交通マネジメントプロジェクト(委員長:飯田教授)において行われている²⁷⁾。

また、当該区域の地震危険度を表す一つの要因として街路閉塞発生危険性を扱う試みが、建設省²⁸⁾や東京都²⁹⁾で行われている。このような試みは、地域防災計画や市街地再開発計画等において、有効な情報を与えるものになると考えられる。

以上のように、既往の研究においては、今後発生し

得る地震による地震動強さを把握し、これによる街路閉塞状況を予測するモデルを構築するまでには至っていない。よって、本論文では、まず兵庫県南部地震による街路閉塞状況の実測結果を再現するモデルを構築し、これに地震動強さの算定を組み合わせることにより、今後発生し得る大規模地震による街路閉塞の状況を予測した。

なお、本研究における街路閉塞とは、瓦礫や電柱の倒壊による車両通行不能の現象を指し、例えば舗装のひび割れや崖崩れ等の他の現象や、さらには停車車両、渋滞等による通行障害は対象としていないものである。

3. 都市臨海部における地震防災について

本論文による、地震動強さに対応した街路閉塞予測モデルがその一部をなす総合地震防災システムは、以下のような点において、都市臨海部の地震防災上の寄与があるものと考えている。

- ①防災計画、港湾計画の策定・改訂：都市臨海部全域が様々な諸元の地震によって、どのような被害状況に陥るのかを予測することにより、従来の耐震設計の枠を超えた地震防災上の検討を実施することが可能となる。そのような検討は、防災計画や港湾計画における防災拠点、耐震強化岸壁等の施設整備やその活用において、非常に有用なものである。例えば、地震発生時に確保しなければならない緊急輸送路である岸壁や道路について、その中で弱い部分を明らかにすることが出来る。
- ②リアルタイム地震防災(早期地震被害推定システムによる対応)：地震発生後、出来得る限り早い時間に被害状況を把握することは、緊急対応策の決定の上で非常に重要である。都市臨海部の地震被害予測結果は、本論文で構築している街路閉塞予測モデルのように、地震の規模とマグニチュードを特定すれば即座に推定することが出来るものとするにより、現地での状況確認までの情報として、さらに現地での状況確認の優先順位決定において、非常に有用である。

以上のような観点を持った総合地震防災システムを現在開発中であるが³⁰⁾、このシステムの詳細については、ここでは述べない。ただし、その中で本モデルの位置付けについて以下に述べる。

都市臨海部の地震被害を予測するためには、個々の港湾の耐震設計とは別に、上述したとおり臨海部全域

が全体としてどのような状態になるのかを予測する必要がある。その中では、

- ・ 港湾施設の被災状態
- ・ 埋め立て地等における地盤液状化の発生
- ・ 埋め立て地と内陸部とを結ぶ橋梁の損壊状態
- ・ 内陸部の街路閉塞現象の発生

といった項目についての予測が必要になる。本論文においては、このうち最後の街路閉塞現象の発生について予測を行うモデルを作成しており、これによって港湾へのアクセスのうち内陸部での街路閉塞状況の検討を行うことが出来るようになる。その意味で、本モデルは、臨海部の全体的な地震被害予測を行うための一部を構成するものである。

4. 街路閉塞発生の要因分析

4.1 街路閉塞発生の要因

街路閉塞は、周辺の建築物や電柱の地震被害により間接的に発生するものである。したがって、その発生状況を説明する要因としては、

①地震動による被害

- a 家屋等建築物の損壊によるガレキ
- b 家屋等建築物の火災によるガレキ
- c 電信柱等ポール類の損壊

②街路幅員

に大別されると考えられる。具体的には、①については、地震動強さが強くなるとa家屋等の建築物の損壊及びc電信柱等ポール類の損壊が多くなる。これには、建築物やポール類自体が倒壊し街路を占有する場合とともに、建築物の外壁、ガラス、瓦及びポールに付属する看板等の落下、電線の垂れ下がりなどにより通行の障害となる場合がある^{14), 2)}。また、直接の地震被害を受けない場合でも、b火災により建築物が被害を受けガレキが発生し、これが街路閉塞の原因となる場合もある^{17), 18)}。火災の発生は、電気器具の転倒や電源コードの損傷といった原因が挙げられる³¹⁾ことからある程度建築物の損壊と関連づけられると考えられるものの、延焼については、風向、風速、消防活動の状況、隣接建物間の距離等によって説明されるため³¹⁾、建築物の損壊と関連づけることは困難である。以上より、①の地震動による被害のうち、aとcは地震動強さにより説明されるが、bについて考慮する場合には別の説明変数を用いる必要がある。ここで、小谷らの研究^{17), 18)}からの著者の読み取りによれば、街路閉塞の原因は約91%がaであり、b・cはそれぞれ3%・4%程度

にすぎない。また、家田らの研究³¹⁾によれば、ポール類の倒壊が地域によっては24%を占めたことが記されているが、bの火災によるガレキについては言及されていない。したがって、街路閉塞を引き起こす原因としては、主として建築物とポール類の被害を考えればよく、換言すれば街路閉塞の発生は、建築物及びポール類を媒介として地震動強さを説明変数として考えることになる。

一方、②については、街路の幅が広くなればなるほど、沿道からの障害物が発生しても、街路中央部に通行可能部分が残存するようになるため、幅の広い街路ほど車両通行が完全に不可能な状況に陥る確率が低くなるということである。

これらの二大要因を選定したのは、その他に考えられる要因が街路閉塞現象の発生に対してそれほど大きな要因ではないと考えられたためである。例えば、塚口ら^{14), 15)}は街路樹の有無や歩道の有無、さらにはリンクの長さ（リンクとは交差点から交差点までの街路のことで、閉塞状況の測定単位である）との関係を調べているがいずれも街路閉塞現象発生を作用する大きな要因とは判断できない。また、家田ら³¹⁾は、街路幅員が小さい場合では瓦礫幅が過小評価される（本来もっと瓦礫が広がるはずが、街路の反対端によって止まっている）可能性があるとして、この補正を行っているがあまり有意な結果は得られていない。一方、家田³¹⁾⁻¹²⁾ら、塚口ら^{14), 16)}の研究では街路幅員は支配的な要因とされている。また、塚口ら^{14), 16)}は震度も非常に大きな要因であるとしているが、詳細な地震動強さによる検討はなされていない。

また、個々の沿道建築物の被害状況を予測し、これによる瓦礫の発生幅を算定し、街路閉塞現象をモデル化する方法も考えられる。しかし、既往の実測データがそもそも沿道建築物の状況とリンクされたものではないこと、沿道建築物の被害状況ですら非常に高い確率で導けるわけではないこと等を鑑み、沿道建築物の地震動強さを考慮しなかった。

以上のような状況を鑑み、本論文におけるモデルの構築においては、地震動強さと街路幅員の二つのみを取りあげたものである。

以上より、街路閉塞状況の説明変数として、地震動強さと街路幅員を用いることとする。なお、街路閉塞の発生予測モデルの構築及比較・検討のために用いた実測結果は、家田ら³¹⁾、塚口ら¹⁴⁾及び小谷ら¹⁷⁾の研究における11地区である（表-1参照）。

表-1 既往の研究^{1), 14), 17)}による街路閉塞状況実測地域データ

文献番号	家田ら ¹⁾								塚口ら ¹⁴⁾			小谷ら ¹⁷⁾
	六甲道	長田	魚崎	三宮	兵庫	春日野道	芦屋	六甲北	六甲中央	六甲南	東灘	
面積 (千 m^2)	524	742	880	878	794	708	687	631	1,156	1,915	3,092	
家屋総数 (軒) [a]	2,397	3,151	3,236	2,244	3,424	4,583	2,689	2,361	5,324	6,054	9,796	
全壊・焼損家屋数 (軒) [b]	1,157	1,972	1,221	453	1,511	626	813	142	1,699	2,307	4,224	
全壊・焼損軒数比率 [b/a]	0.483	0.626	0.377	0.202	0.441	0.137	0.302	0.060	0.319	0.381	0.431	
震度階の比率	超震度7	65%	55%	10%	50%	20%	0%	5%	0%	10%	30%	
	震度7	30%	40%	75%	40%	60%	45%	35%	0%	45%	40%	
	震度6	5%	5%	15%	5%	20%	45%	60%	40%	30%	30%	
	震度5	0%	0%	0%	5%	0%	10%	0%	60%	15%	0%	
等価震度	7.60	7.50	6.95	7.35	7.00	6.35	6.45	5.40	6.50	7.00	6.80	

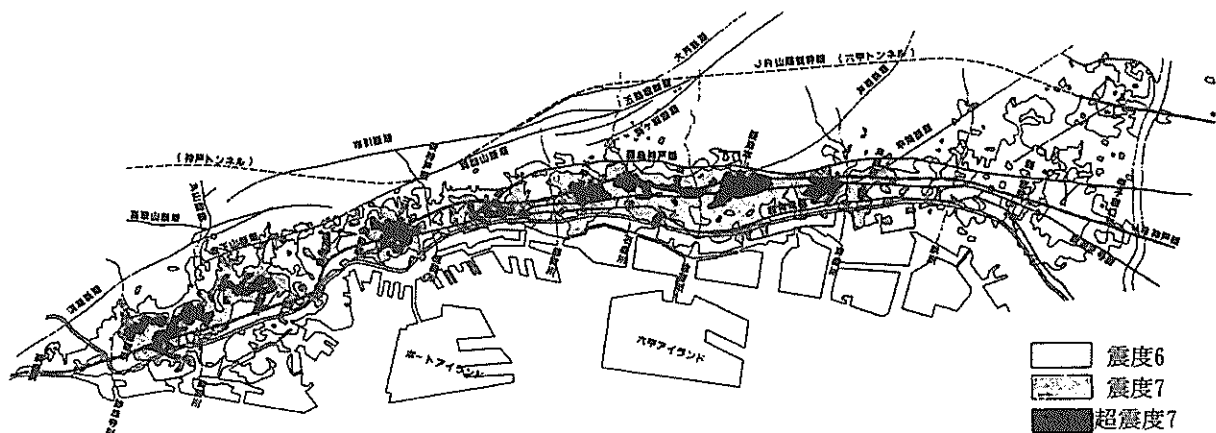


図-1 石川ら³⁴⁾による地震動強さの分布

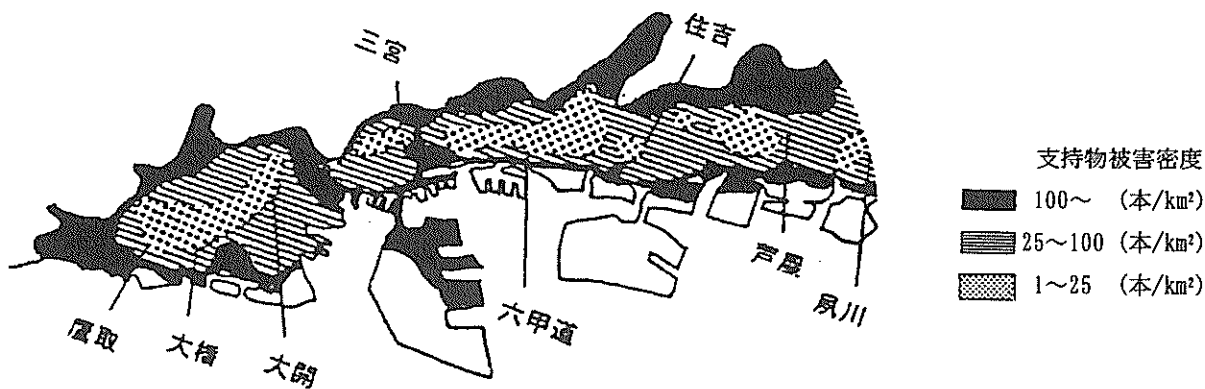


図-2 月岡ら⁴⁰⁾による電信柱の被害分布

4.2 神戸市域における地震動強さの分布状況

一般に、ある地震による地震動強さ分布を用いる場合、強震観測記録から推定する方法が望ましい。しかし、神戸市域の中で特に地震動が強かったいわゆる「震災の帯」において、地盤上に設置されていた強震計はJR 鷹取駅のただ一つ³²⁾であった。また、気象庁発表によるところの震度7地域における構造物の強震記録

も長田駅前高層住宅のものだけ³²⁾であった。さらに、気象庁による震度7の地域も、建築被害を中心とした現地調査の結果であった³³⁾。したがって、観測された強震記録のみから「震災の帯」の詳細な地震動強さの分布状況を推定することは困難であると考えられる。石川らは、旧気象庁震度階の考え方にに基づき木造建築物の倒壊率が30%以上の区域を震度7、その中で特に

木造建築物の倒壊率が50%以上でかつRC建築物の倒壊も目立つ区域を超震度7とし、これらの地震動強さを神戸市域に落としている³⁴⁾(図-1)。これは、強震観測記録では不明確であった神戸市域の地震動強さを明らかにしているものであると言える。その結果、震度7あるいは超震度7が「斑模様」となっていることが明らかになっている。なお、兵庫県南部地震による震度分布を調査した研究^{35) - 39)}は他にも見られるが、震度7の地域の中でさらに地震動の強かった範囲を(超震度7として)取り出した研究は他に見あたらなかった。

また、月岡らは、電柱の折損、倒壊、傾斜の状況を把握し、その被害密度を示している⁴⁰⁾(図-2)。図-1と図-2を比較すると、ちょうど震度7が支持物被害密度25~100本/km²、超震度7が同密度100本/km²以上に対応していることが分かる。つまり、木造建築物の被害に基づく地震動強さは電柱等ポール類の損壊も説明できると考えられるということである。では、この地震動強さが街路閉塞発生の説明変数として適切であることを、既往の研究での実測地域において確認する。まず、この実測地域で石川らの地震動強さ³¹⁾を読み取り、地域内の面積比率で示したのが表-1の震度階の比率である。さらに、この面積比率から石川らの定義³¹⁾によるところの超震度7を便宜上震度8とし、震度5~8の面積比率による重み付けから算定した震度が表-1の等価震度になる。この等価震度を、建築研究所の被害報告⁴¹⁾から算定した全壊・焼損軒数比率と比較した(図-3)。

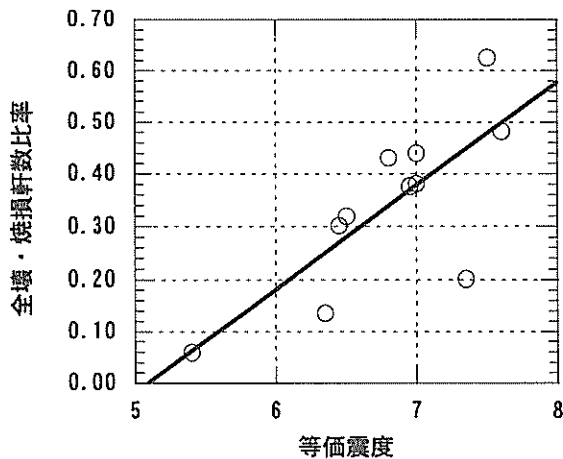


図-3 等価震度と全壊・焼損軒数比率

全壊・焼損軒数比率は建築物の損壊とポール類の損

壊が概ね一致することから建築物の損壊、建築物の火災及びポール類の損壊の3つの街路閉塞発生要因を説明できる数値である。この点を踏まえた上で図-3を見ると、ある程度幅があるものの右上がりの直線形状を示しており、等価震度は倒壊・焼損軒数比率を説明できるものと判断される。なお、図中の回帰直線の相関係数は0.763であった。

4.3 街路幅員

街路幅員と街路閉塞の発生状況との関係については、すでに既往の研究^{1), 9), 12), 14), 20)}において言及されている。さらに、家田らは、その結果から幅員が8m以下の街路については、車両通行との観点からの震災時の信頼性は低いことを明らかにしている¹⁾。本論文においても、街路幅員を街路閉塞状況の説明変数と捉え、モデルの構築を行う。

5. 街路閉塞発生予測モデル

5.1 モデルの概要

街路閉塞発生予測モデルは、街路閉塞状況の2つの説明変数である街路幅員と地震動強さが与えられた場合の街路閉塞状況を予測するものである。

5.2 発生予測モデル

発生予測モデルは、各街路リンクの車両通行可能率を導くものである。ここで、車両通行可能率は、車両が一部でも通行可能である確率と定義する。すなわち、片側のみ通行可能な場合も通行可能として判断される。既往の研究^{1), 14), 17)}における街路閉塞の実測状況の判別としては、両側車両通行可、片側車両通行可、自転車あるいは歩行通行可、通行不可との4つに分類されており、最終的にはこれらを予測できるモデルになることが望ましいとは考えられる。しかし、本論文の目的が(特に2.で示した目標③のリアルタイム地震防災への適用を考えると)簡易なモデルで大略的な被災状況を把握することにあるため、その目的からすると車両通行の可否程度の判別で十分であること、モデルの予測結果の設定を詳細なものにすればするほど精度が低下すると考えられることから、二段階の判別に留めた。ただし、予測結果については、通行可と通行不可の二種類ではなく、通行可の確率を数値で示すこととした。

図-4~図-10は、街路幅員を既往の研究^{1), 14), 17)}に従い7段階(0~4m, 4~6m, 6~8m, 8~10m, 10~12m,

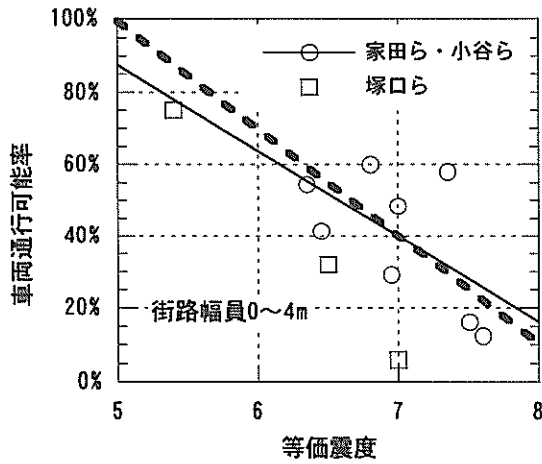


図-4 発生予測モデルと実測値 (幅員 0~4m)

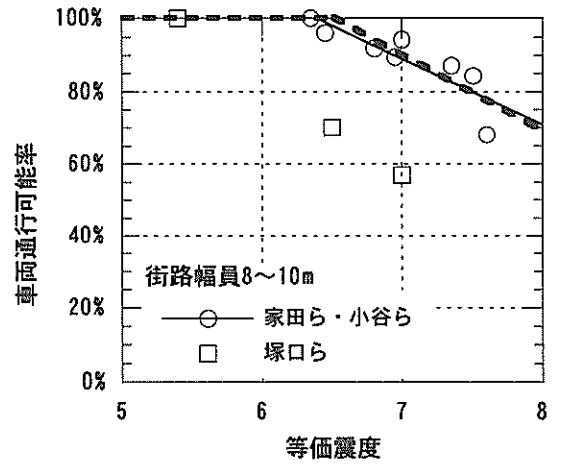


図-7 発生予測モデルと実測値 (幅員 8~10m)

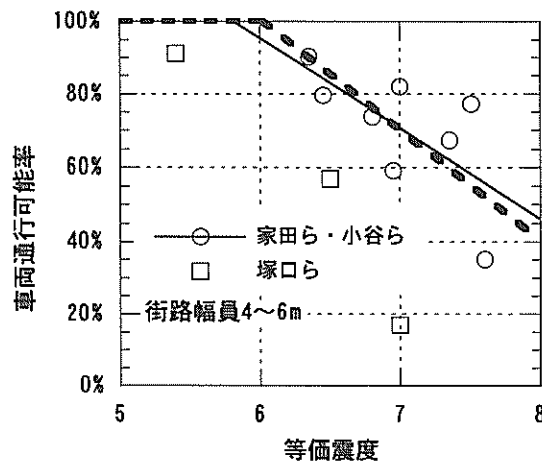


図-5 発生予測モデルと実測値 (幅員 4~6m)

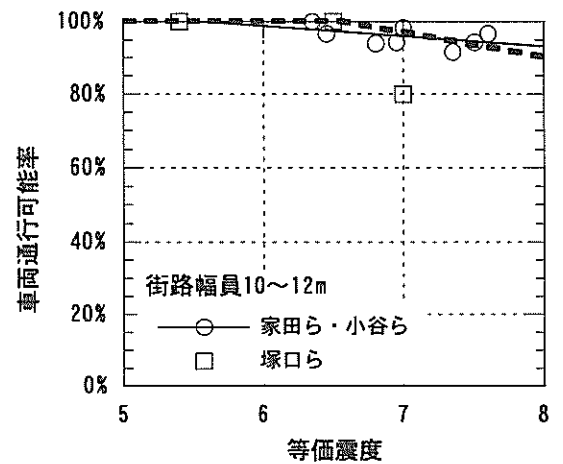


図-8 発生予測モデルと実測値 (幅員 10~12m)

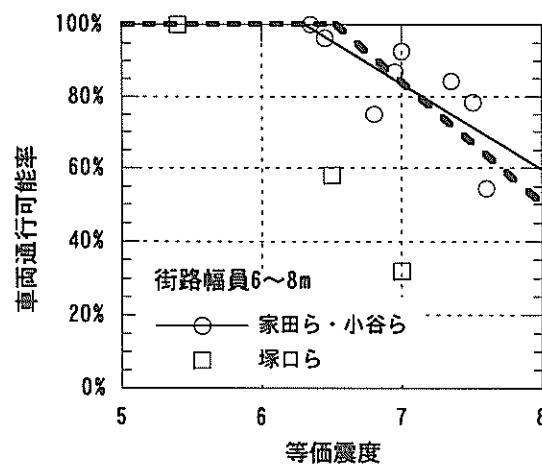


図-6 発生予測モデルと実測値 (幅員 6~8m)

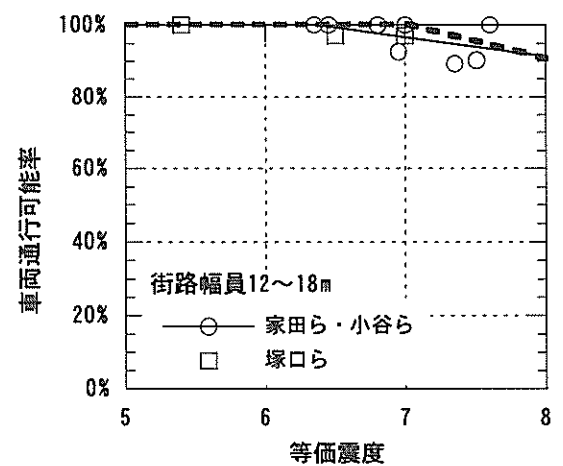


図-9 発生予測モデルと実測値 (幅員 12~18m)

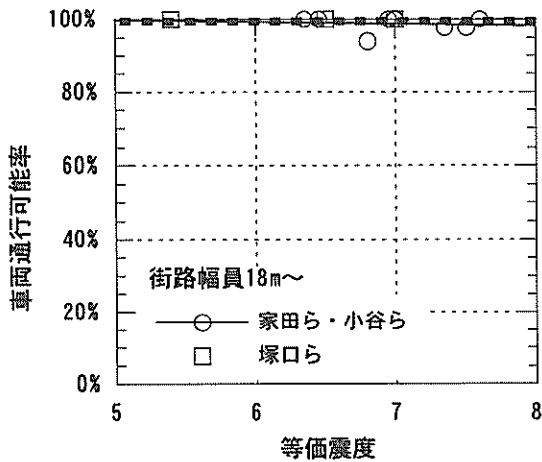


図-10 発生予測モデルと実測値（幅員 18m～）

12～18m, 18m～)に分け、表-1に示した11地域における実測値を等価震度によりプロットしたものである（プロットされた点は、既往の研究での車両通行可能街路リンク数÷全街路リンク数で確率に変換したもの）。さらに、図-4～図-10においては、家田ら¹⁾及び小谷ら¹⁷⁾の実測結果に対し、回帰直線を加えた。これは、図-3において全壊・焼損軒数比率が等価震度により概ね直線回帰されているため、街路閉塞現象の発生も同程度の幅員に対しては、等価震度に対し直線関係が見出されると考えられるためである。

ここで、塚口らの実測結果¹⁴⁾については、幅員0～10mにおいて家田ら¹⁾及び小谷ら¹⁷⁾の実測結果と差が見られる。この原因は次の二つの可能性が考えられる。

- ①塚口らの実測範囲¹⁴⁾において、石川らによる震度判定³⁴⁾と、実際の建築物被害に差があった。
- ②塚口らの実測の判定基準¹⁴⁾が、家田ら¹⁾及び小谷ら¹⁷⁾の判定基準と異なっていた。

これらの考えられる原因のうち、①については、特に家田ら¹⁾及び小谷ら¹⁷⁾の判読結果と乖離のあるJR以南地区の、国道43号以南の広い範囲において、石川らの判定震度³⁴⁾がほぼ震度6であるのに対し、街路閉塞現象が多く生じている。文献³⁹⁾によれば、この範囲は震度6強と読みとれるため、震度7に近い地震動であったと推測される。この震度判定のずれが実測結果とモデルの推定値との差を生じさせた原因の一つであると考えられる。また、②については、家田らの判定地区と塚口らの判定地区が重なっているため、両者の相对比较を行った。その結果、両者で判定結果が示されている315街路リンク中、13%に当たる41街路リンクにおいて家田らが車両通行可能の判定に対し、

塚口らは車両通行不可の判定を行っていた。一方、塚口らが車両通行可と判定している街路リンクにおいて、家田らが車両通行不可としている街路リンクは、12街路リンク（3.8%）であった。この結果からは、写真によって判読事例が示されている塚口らの実測の判定基準¹⁴⁾は、残存幅員を判定基準としている家田ら¹⁾及び概念図で判定基準を示している小谷ら¹⁷⁾より、多少危険側に結果が出る判定基準であると判断される。以上の二つの原因により、家田ら¹⁾及び小谷ら¹⁷⁾のものと差が生じたものと考えられたため、塚口らの判定結果¹⁴⁾は、モデルの構築よりははずすこととする。ただし、モデルの精度の検討においては、他の判定結果と共に使用する。

なお、本論文のモデルの判定基準は、家田らの残存幅員3.0m以上を車両通行可能と判定する考え方¹⁾に、結果として準拠するものである。

本論文においては、家田ら¹⁾及び小谷ら¹⁷⁾の実測結果における回帰直線を参考に、直線を引くことによって街路閉塞発生予測モデルを構築する。この際、回帰直線をそのままモデルに適用する方法も考えられるが、それでは実測結果をうまくモデル化できない点があるため、回帰直線を参考に、以下の判断基準で発生予測モデルの直線を構築する。

- ・等価震度5においては通行可能率100%とする。これは、等価震度5において全壊・焼損軒数比率が0であるため、街路閉塞現象が発生しないと考えられるからである。
- ・モデル直線の傾斜直線部分の傾きは、回帰直線より少し大きくし、モデル直線と回帰直線とが交点を持つようにする。これは、実測結果が100%になる点がある場合に、その影響で回帰直線の傾きが緩やかになってしまう（つまり、実測結果は100%を超えることがないが、直線回帰ではこれを表現できない）ため、この補正のため傾きを少し大きくするものである。そのため、通行可能率100%との交点を等価震度の高くなる方へ動かし、さらに等価震度8との交点を車両通行可能率が小さくなる方へ動かした。
- ・モデル直線の通行可能率100%における折れ曲がり点は、等価震度0.5単位とする。これは、現在の気象庁震度階が、震度5以上においては計測震度0.5単位で震度を設定していることを参考にするものである。
- ・モデル直線の等価震度8との交点は車両通行可能率10%単位になるようにする。これは、モデ

ルの精度を鑑みて便宜上設定したものである。なぜなら、各実測区域をその街路幅員によって7段階に区切っているため、街路リンク数の少ない区域・幅員においてはデータ数が10程度の場合もあると考えられるからである。

以上の考え方による発生予測モデルが図-4~図-10における点線である。本モデルは非常に簡略なものであるが、これらの図によれば、ある程度実測された閉塞状況を再現しているものと考えられる。この発生予測モデルより、震度階と街路幅員から車両通行可能率が求まることになる。

5.3 発生予測モデルの検討

本モデルの精度を検討するために、まず既往の研究^{1), 14), 17)}における実測区域全体で実測結果と予測結果の比較・検討を行う。図-11は、本論文のモデルによる車両通行可能率の推測値と既往の研究^{1), 14), 17)}における車両通行可能率の実測値とを比較したものである。これは、実際には実測区域内において地震動強さが「斑模様」に分布しており、その斑模様と街路構成がどのような関係にあるかによって推測値は変化するはずのところを、区域内の地震動強さを一律に等価震度で設定したものである。図-11によれば、本論文のモデルは実測値をよく表現できていると言える。塚口らの実測結果¹⁴⁾に対して、本論文のモデルによる推測値が実測値より大きく安全側に評価している傾向があるが、この理由は、前述の通り震度判定のずれと判断基準の相違にあると考えられる。なお、実測値と推定値の相関係数は0.850、塚口らの実測結果¹⁴⁾を除いた場合、相関係数は0.925になる。

次に、「斑模様」を出来る限り表現するためにメッシュでの比較・検討を行う。家田ら¹⁾の実測区域のうち、一番超震度7の範囲が広がった六甲道と一番地震動強さが弱かった、つまり等価震度が最低値を示した春日野道を用いることとする。まず、両地域の地震動強さの分布を、一辺の長さが250mの正方形のメッシュに震度5~7あるいは超震度7を割り当てた。この割り当てと石川らによる地震動強さの分布²⁴⁾を比較したのが図-12である。

両地域において、家田らの判定¹⁾のうち、二車両通行可能及び一車両通行可能を“車両通行可能”，自転車通行可能及び車両通行不可を“車両通行不可”，計測不能と論文中で判断が示されていない街路を“判定なし”として分類し、本論文のモデルによる推測結果と比較したのが図-13である。本論文での推測結果

は、車両通行可能率が50%より大きい場合“車両通行可能”，車両通行可能率が50%以下の場合“車両通行不可”とした。

なお、本モデルによる推測に必要な街路幅員の算定においては、精密な街区データが揃っている数値地図2500（CD-ROM版；国土地理院発行）を用い、これに道路中心線を付加し、街路幅員を算定するプログラムを開発した。その算定方法は、まず、道路中心線に沿って街路リンクの midpoint を認識する。次に、街路リンクの midpoint から道路中心線に直角に街区線に突き当たるまで架空の線を引き、その線長を測定する。この際、道路中心線は多くの場合街区線と街区線の中央を通ってはいないため、両方の幅を取りこれを加えることにより求まる（図-14）。

図-13によれば、六甲道については、南端（下方）1/4の区域において本モデルで推定された状況よりも実際の街路は閉塞していたようであるが、それ以外の地域については概ね推測状況は実測状況を良く表現できている。これは、図-12によれば下方1/4の地域は震度7となっているためと考えられるが、街路閉塞の状況からすると超震度7に近かったものと考えられる。また、春日野道については、全体として閉塞している街路の数は推測値と実測値は一致している。しかし、推測値が震度7を割り当てたメッシュの部分のみに存

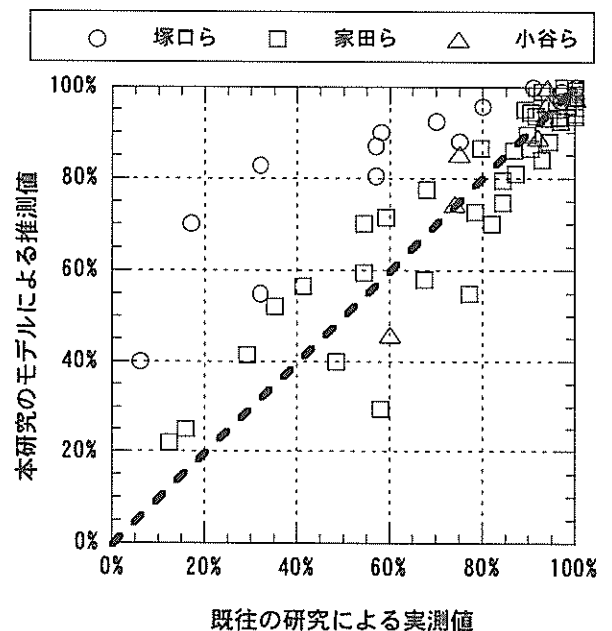
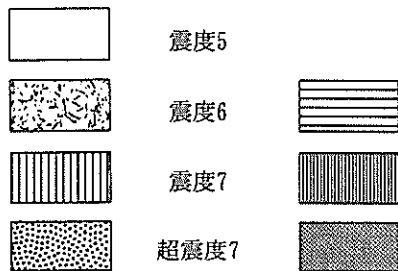
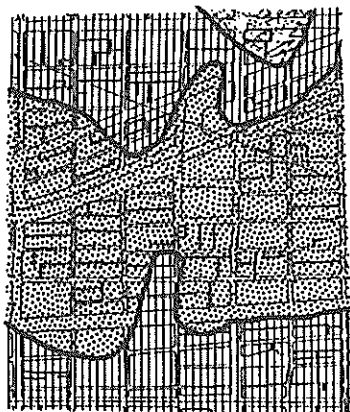


図-11 本論文の発生予測モデルによる車両通行可能率の推測値と既往の研究^{1), 14), 17)}での車両通行可能率の実測値の比較

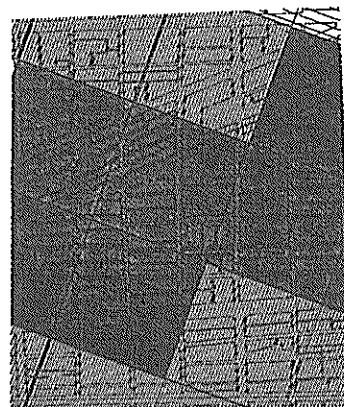
石川らの実測状況

六甲道

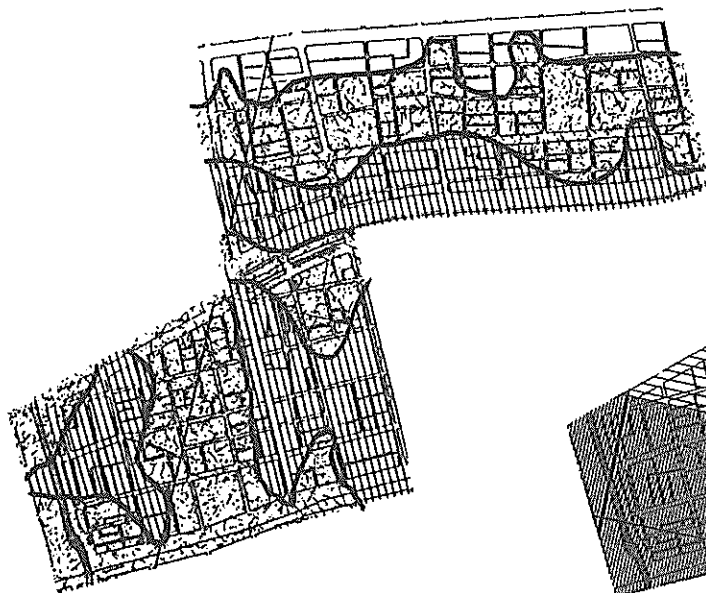


メッシュへの当てはめ

六甲道



春日野道



春日野道

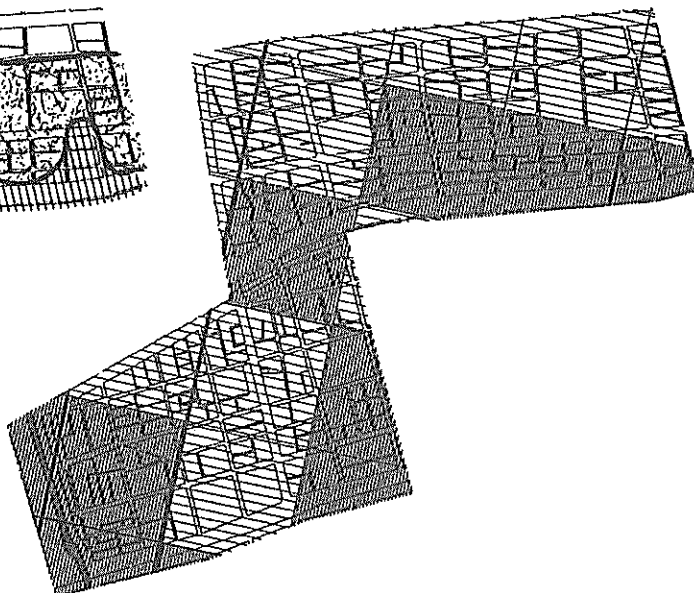


図-12 石川ら³⁰⁾による地震動強さの分布とメッシュへのあてはめ

在しているのに対し、実測結果ではもう少し広い範囲に分散している。この原因は、地震動強さがうまくメッシュに割り振れなかったと共に、個別の構造物等の詳細な要因も絡んでいるものと考えられる。

これらの結果を定量的に把握したのが表-2である。表-2によれば、六甲道での車両通行可否の的中率は、73.4%（車両通行可能 41.5%+車両通行不可能 31.9%）、春日野道の的中率は 86.5%（82.9%+3.6%）であった。これは、塚口らにより構築された震度、木造建物延長

率、街路幅員、街路樹の有無及び歩道の有無の5つの説明要因での精緻な予測モデル³⁴⁾による的中率（=78.8%）と同等の精度である。

また、春日野道では“車両通行可能”がほとんどである状態が表現できているため、非常に精度が高くなっているが、一方、車両通行不可の的中率3.6%が車両通行不可の非的中率7.6%の半分程度であることについては、本モデルが概略的であり、説明変数を出来る限り少なくしたため、前述したように、詳細な説明要因

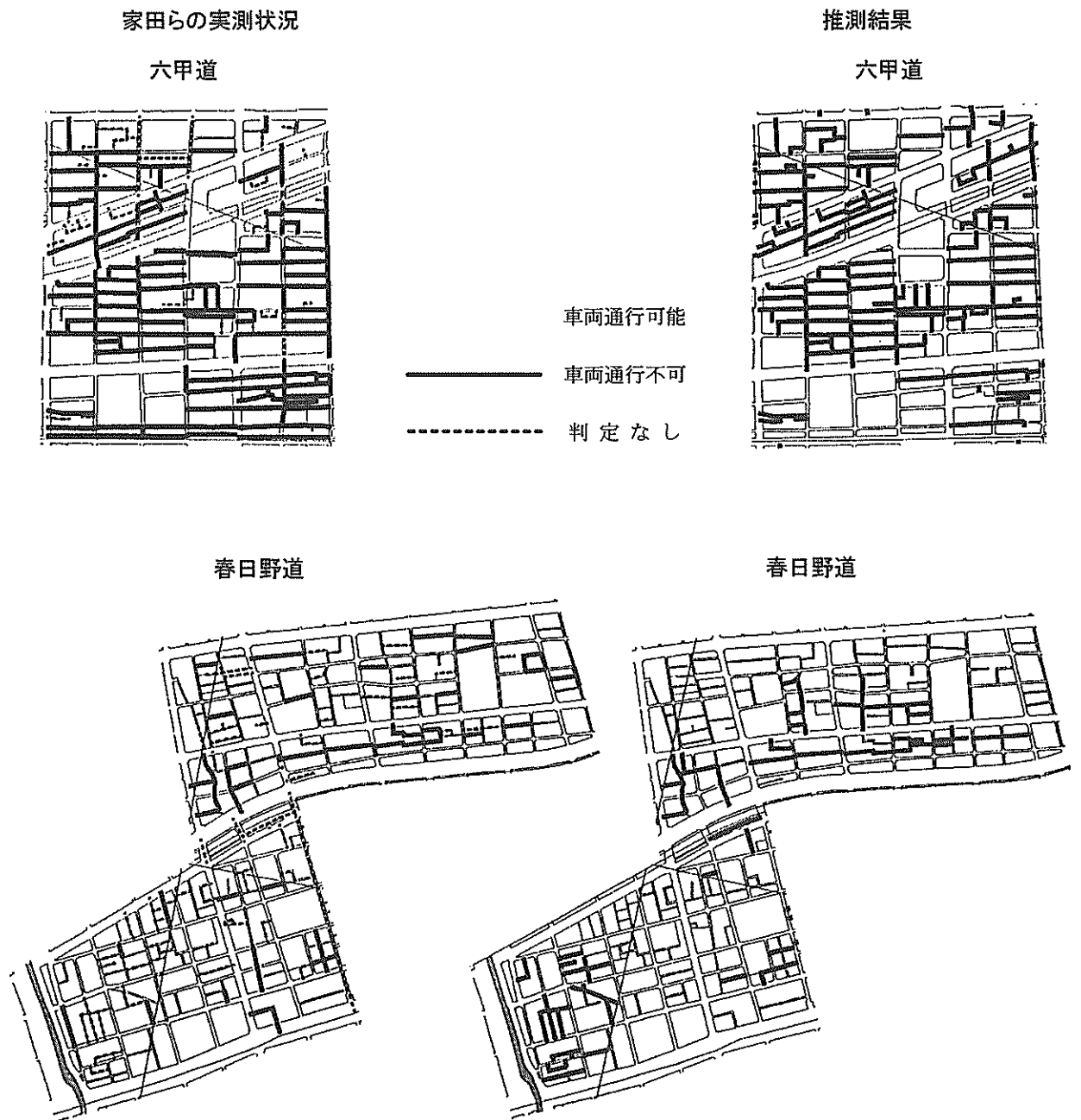


図-13 家田らの実測結果¹⁾と本モデルでの推測結果の対比

を考慮できていないためと考えられる。

以上、街路閉塞発生予測モデルは簡易であるにもかかわらず、モデル構築に用いたデータに対しては十分な精度を保持していることが確認された。

一方、モデルの構築から予測結果の比較・検討に用いたデータは同一データであり、本当の意味でのモデルの検証を行うためには、さらにモデルの精度を向上させるためには、他の地震による街路閉塞現象に対

して本モデルの予測結果を当てはめる必要がある。現時点では、兵庫県南部地震のデータしかなく、このようなモデルの検証、修正は行うことが出来ないが、今後新たな地震被害が発生した場合には対応していく必要があるものである。

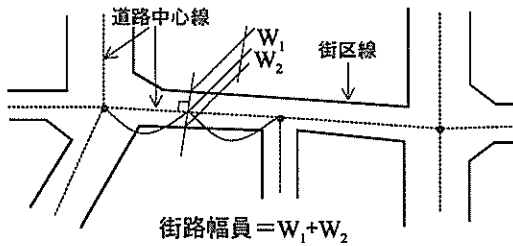


図-14 街路幅員算定方法の模式図

表-2 六甲道及び春日野道での家田らの実測結果^りと本論文のモデルによる推測結果のクロス集計

地区：六甲道		本研究のモデルによる推測結果での判定	
		車両通行可能	車両通行不可
家田らによる実測状況の判定	車両通行可能	160	31
		41.5%	8.0%
	車両通行不可	72	123
		18.7%	31.9%
判定なし	16	46	

地区：春日野道		本研究のモデルによる推測結果での判定	
		車両通行可能	車両通行不可
家田らによる実測状況の判定	車両通行可能	456	34
		82.9%	6.2%
	車両通行不可	40	20
		7.3%	3.6%
判定なし	60	31	

注) 上段はリンク数, 下段は家田らにより判定されたリンク全体に対する割合

5.4 シミュレーションの実施

兵庫県南部地震の被害によって構築された街路閉塞予測モデルを用いて東日本のある大都市においてシミュレーションを実施した。対象とした地震の諸元は、実際に発生したマグニチュードの大きい地震（大規模地震）と、都市直下型の地震（直下型地震）の二つである。両地震の概略は表-3の通りである。なお、地盤種別は、地質調査書刊行の5万分の1地質図幅より、文献42)を参考に洪積層の岩盤である上総層群をⅠ種地盤、相模層群、新規段丘堆積物及び新規ローム層をⅡ種地盤、埋立土及び沖積層をⅢ種地盤とした。

地震動強さの算定は、文献43)における地震カタログデータを、断層面距離も同文献によるプログラムを、距離減衰式は、SHABESTARI・

表-3 想定地震の概要

地震名	発生日	M	h
大規模地震	1923年9月1日	7.9	40
直下型地震	1257年10月9日	7.5	0

注) 断層深さ h の単位は km

YAMAZAKI の以下の式⁴⁴⁾を用いた。

$$I = -0.087 + 1.053M - 0.00256r - 1.89 \log(r) + 0.00496h + c_i \quad (1)$$

ここに、I : 気象庁震度階

M : マグニチュード

r : 断層面距離

h : 震源深さ

c_i : 地域特性及び地盤種別に対する係数

$$c_i = \begin{cases} -0.255 & (\text{Ⅰ種地盤}) \\ +0.144 & (\text{Ⅱ種地盤}) \\ +0.412 & (\text{Ⅲ種地盤}) \end{cases}$$

なお、c_iの区分は、文献45)による地盤種別に対する平均値である（SHABESTARI・YAMAZAKIの論文⁴⁴⁾中では旧地盤種別（1～4種）に対して係数が設定されていたため、2種地盤と3種地盤の平均値をⅡ種地盤の係数とした）。

以上の設定により、地震を指定すれば各メッシュでの地震強さが決定される。大規模地震に対する対象地区での地震動強さは、Ⅱ種地盤で震度6～7、Ⅲ種地盤で震度7となった。これは、武村ら⁴⁶⁾の実被害による調査から導かれた震度7の地域に対象地区がほぼ全域含まれているのに比較し地震動強さが小さく評価されている。この理由は、地震動強さの距離減衰式である式(1)がここ数年の地震データに基づいているのに対し、大規模地震による被害は耐震設計の概念がほとんどなかった時代の建物に対するものであるとの相違があるためと考えられる。したがって、同じ木造建築物の被害率30%であっても、木造建築物の耐震性の上昇により、地震動強さは異なっている。一方、直下型地震による地震動強さはほぼ全域で超震度7であったが、距離減衰により一部のⅡ種地盤で震度7と算定された。なお、対象地区とした南北4.5km、東西6kmの範囲内にはⅠ種地盤は存在しなかった。

図-16、図-17は、大規模地震及び直下型地震による対象地区の車両通行可能状況である。実線で示した街路リンクが、車両通行可能率90%以上の部分であり、震災時にも、街路閉塞現象に対してはほぼ確実に車両通行が見込まれるものである。図-16によれば、対象

地区内の南西端（図の左下部分）においてⅡ種地盤では震度 6、Ⅲ種地盤においては震度 7 となっているため、河川に沿ったⅢ種地盤地域で車両通行可能街路リンクが少なくなっている一方、河川から少し離れたⅡ種地盤丘陵では車両通行可能街路リンクが密集した状態になっている。比べて、図-17 の直下型地震に対する被害予測状況においては、大規模地震に対する予測結果に比較して、車両通行可能街路リンクが大きく減少しており、非常に大きな道路のみが通行可能街路リンクとなっている。

5.5 シミュレーション結果の検討

シミュレーションの結果を、当該都市の防災計画による緊急輸送路と比較する。図-18 は、当該市防災計画において、災害応急対策の実施に必要な物資、資機材、要員等を輸送する緊急車両が通行する道路として指定されている第 1 次及び第 2 次緊急輸送路である。これらの緊急輸送路はそれぞれ以下のように位置付けられている。

- ・第 1 次緊急輸送路：高速道路や幹線道路等の広域ネットワークを構成する重要路線で、輸送の骨格をなす道路
- ・第 2 次緊急輸送路：第 1 次緊急輸送路を補完し、相互に連絡する路線であり、第 1 次緊急輸送路の代替性や多重性を確保する道路

この第 1 次及び第 2 次緊急輸送路の指定（図-18）と、大規模地震による被害予測状況（図-16）を比較すると、第 1 次緊急輸送路は車両通行可能であると判断されるが、第 2 次緊急輸送路は分断されている箇所がかなり見られる。一方、直下型地震に対する被害予測状況（図-17）においては、第 2 次緊急輸送路だけでなく、骨格路線である第 1 次緊急輸送路においても分断されている部分が見られる。このような場合、第 2 次緊急輸送路に加えて、さらに代替経路を指定しなければならないことも想定されるが、その際、その代替経路についても、耐震信頼性の度合いを確認が必要だけでなく、その経路が主要幹線道路等道路網階層構造において近いレベルの道路であることに留意する必要があるだろう。

図-16 及び図-17 は、道路網階層構造の上位に位置する道路について、非常に大きな視点で捉えるため、車両通行可能率 90%以上の配置状況を表示させた。このような形で、大規模地震時の主要幹線道路の信頼性を捉えることができる。緊急物資の輸送計画、緊急時の交通規制計画等に対し非常に有効なものと考えられ

る。

また、本論文のモデルは道路網階層構造の下位に位置する区画道路等まで予測できるものであり、細かい街路の視点での予測にも対応している。図-19 は、直下型地震における、対象地域の一部を取り出し、その街路閉塞に対する車両通行可能率の予測状況を示したものである。鉄道線に平行に走っている国道や主要地方道あるいは駅前広場からの通り等が車両通行可能率 75%以上を示しているが、これらの道路から一步入った住宅地等においては車両通行可能率 50%以下がほとんどとなっている。したがって、直下型地震ほどの大規模な地震を受けた場合、救急・援助・消火活動が街路閉塞により大きな影響を受ける可能性があると言える。

このように、本論文のモデルにより様々な地震による任意の地域での街路閉塞状況を予測することが出来る。これは、様々な面を持つ地震被害の一つを予測するものであり、システム研究室で開発中の都市臨海部の地震被害予測を行う総合地震防災システムの予測項目の一つである。道路にかかる被害予測の項目としては、この他に、橋梁の損壊や地盤の液状化等の予測が必要である。また、実際に道路が使用出来るかどうかについては、物理的に地震に耐えるかどうかの他に、残った道路の通行量を把握し、その交通行動を把握し、さらに規制していくことが必要である。このような点を踏まえて、本論文のモデルを包含する総合地震防災システムを開発していくことを考えている。

6. 瓦礫幅確率分布モデル

6.1 モデルの概要

前章において、街路閉塞現象の発生を予測するモデルを構築した。街路の車両通行可能率を算定する場合には、このモデルをそのまま用いればよい。しかし、その詳細な街路状況をシミュレートしたい場合には、これを瓦礫幅に置き換える必要がある。ここでは、車両通行可能率を瓦礫幅の最大値の確率分布に変換する。したがって、これを用いてシミュレーションを行う場合、瓦礫幅の確定に乱数を用いる必要がある。なお、最大値の算定となるのは、車両通行可能率は瓦礫幅の最大値に対応するからである。

6.2 街路リンクの瓦礫幅確率分布

街路リンクにおける瓦礫幅の最大値の確率分布を求める上で、以下の仮定をおく。

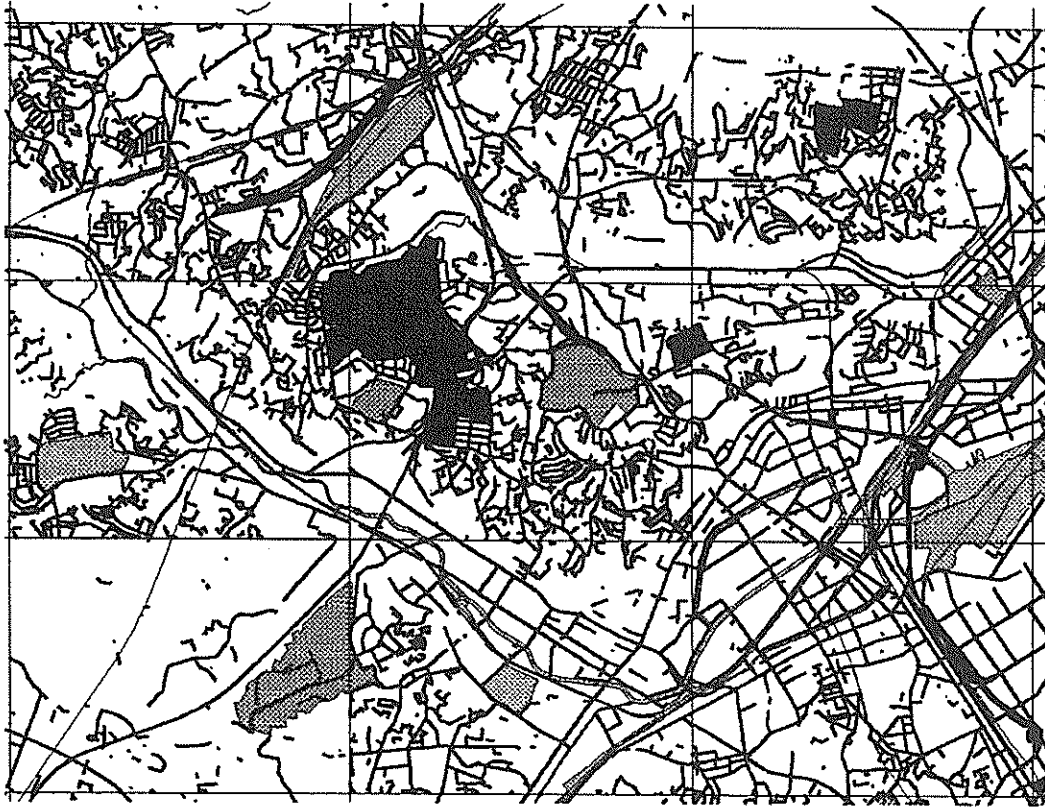


図-16 大規模地震による車両通行可能状況の予測

————— 車両通行可能と予測されるリンク

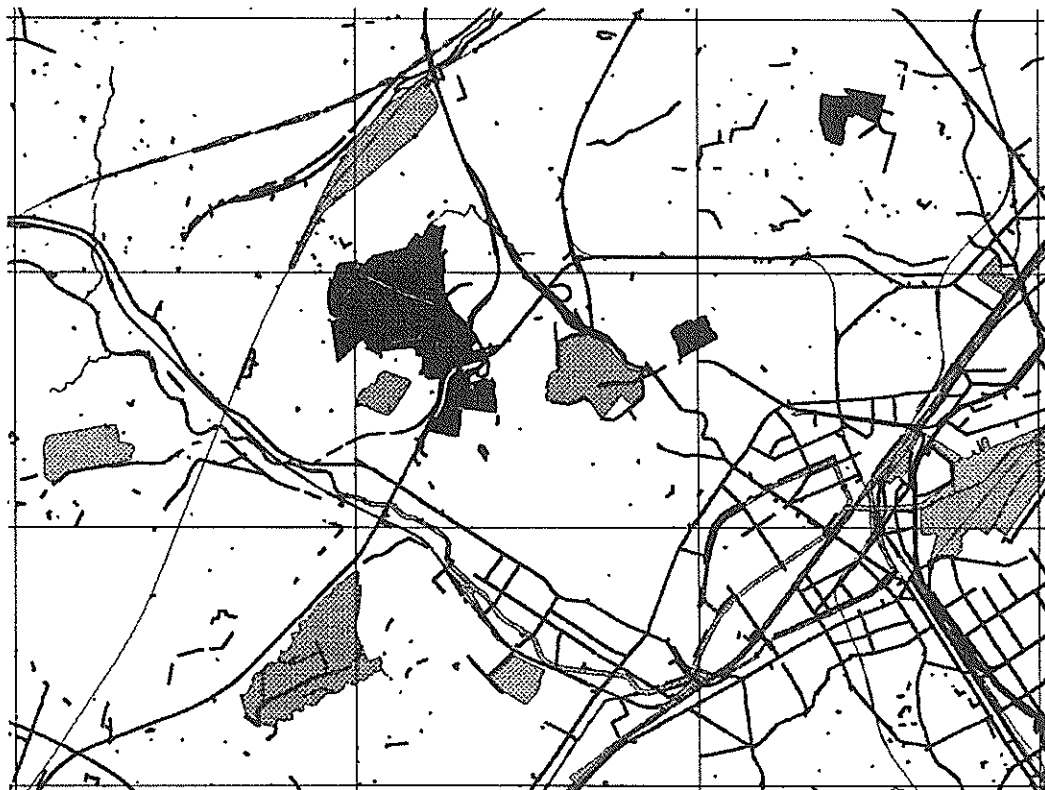


図-17 直下型地震による車両通行可能状況の予測

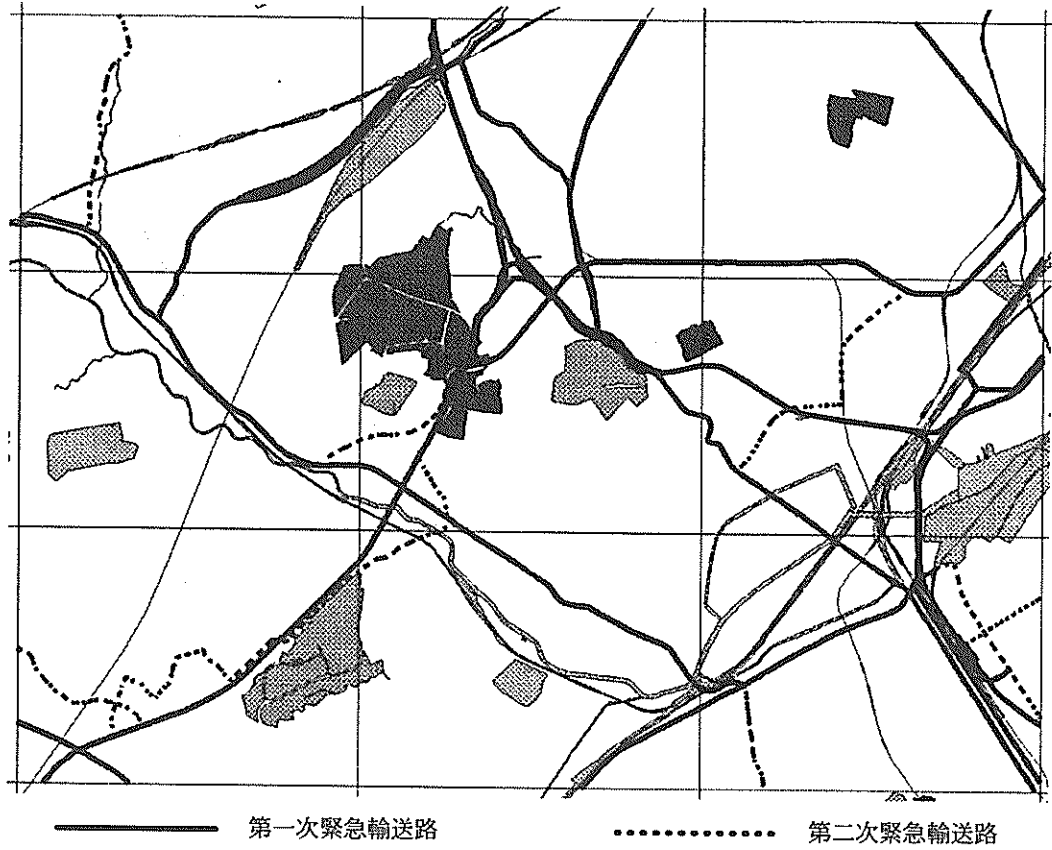


図-18 防災計画における緊急輸送路

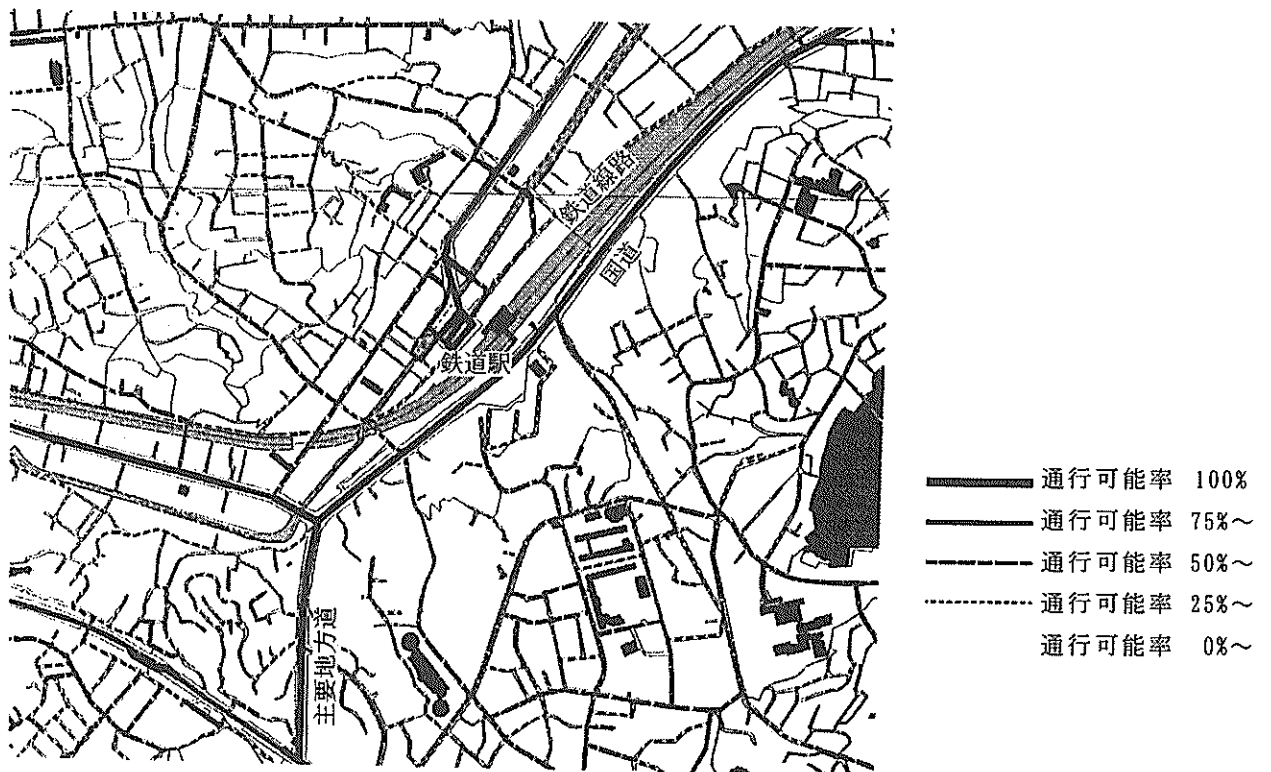


図-19 直下型地震による被害

- ・ 分布形状は、正規分布と仮定する。その結果、瓦礫幅がマイナスの値になった場合には、これを瓦礫幅 0m と読み替えることとする。
- ・ 街路幅員の階級値は、中央値を用いる。つまり、街路幅員 6~8m の場合、7.0m とする。なお、最小の 0~4m の階級については、0m の幅員は考えられないこと、3m が車両通行の最小幅であることから、3m とした。また、最大の 18m~については、便宜上 18m とした（分布形の算定上、影響なし）

これらの仮定の下、以下の方法により瓦礫幅の確率分布を算定した。算定内容は、（階級値-3.0）m における瓦礫幅の累積確率値を、前章における街路閉塞予測モデルの車両通行可能率値に合わせることである。ここで、瓦礫幅の確率分布は沿道建築物、ポール類の損壊によるものであるため、街路幅員には依らず、等価震度のみの関数となる。

- ① 瓦礫幅確率分布の標準偏差を仮定する。
- ② 仮定した標準偏差と、街路幅員階級値および街路閉塞予測モデルにおける車両通行可能率値から、等価震度・街路幅員に応じた瓦礫幅確率分布の平均値を求める。
- ③ 等価震度・街路幅員毎に求めた瓦礫幅確率分布の平均値から、街路幅員に依らない瓦礫幅平均値を算定する（すなわち、②で求めた街路幅員毎の瓦礫幅平均値を、等価震度全体でさらに平均値をとって、これを街路幅員に依らない瓦礫幅確率分布の平均値とする）。
- ④ 瓦礫幅確率分布の平均値（③で算定）・標準偏差（①で仮定）より、等価震度・街路幅員に応じた瓦礫幅累積確率の推定値が算定される。
- ⑤ 各等価震度において、瓦礫幅累積確率の推定値と街路閉塞予測モデルにおける車両通行可能率との相関係数が最大となる標準偏差を、①~④の繰返し計算により算定する。
- ⑥ 算定された標準偏差を基に、等価震度に応じた瓦礫幅確率分布の平均値を求める。

以上の算定においては、論文モデルの累積確率値が 1.00 である部分は除いている。なぜなら、累積確率値 1.00 は分布形を規定できないからである。

また、震度 6 においては、累積確率値が 1.00 でない街路幅員は、最小の 0~4m しかない。このため、最適な標準偏差を求めることは出来ない。ここでは、便宜上、標準偏差を震度 7 の半分とすることとした。

以上の方法により算定された瓦礫幅確率分布は、

表-4 街路リンクの瓦礫幅確率分布

震度	平均値	標準偏差
震度 5	0 m	0 m
震度 6	-0.82 m	1.57 m
震度 7	1.27 m	3.14 m
超震度 7	4.48 m	3.29 m

表-5 街路リンクの片側沿道からの瓦礫幅確率分布

震度	平均値	標準偏差
震度 5	0 m	0 m
震度 6	-0.41 m	1.11 m
震度 7	0.63 m	2.22 m
超震度 7	2.24 m	2.33 m

表-4 のとおりである。

表-4 は、その街路リンク全体の中で、瓦礫幅の最大値の確率分布であり、その値は両側の沿道からの瓦礫幅の合計値である。これを、片側の沿道毎に分ける場合は、両側とも確率分布形状は同じであると考えられるため、表-5 の確率分布となる。

なお、先の仮定の通り、瓦礫幅が 0m 未満の場合は 0m であると読み替える。すなわち、沿道建築物等に被害がないか、被害があっても路面まで瓦礫が全く出ていない状態である。

また、表-4 の瓦礫幅確率分布による震度 7 及び超震度 7 における瓦礫幅累積確率値から算定される車両通行可能率と、前章における街路閉塞モデルの車両通行可能率との相関係数は、それぞれ 0.986 及び 0.976 であった。

6.3 建物リンクの瓦礫幅確率分布

前節では、街路リンクに対応した瓦礫幅の確率分布を求めた。ここでは、さらに沿道建築物の被害状況に適合させる形でのシミュレーションに対応するため、沿道建築物に応じた瓦礫幅の確率分布を求める。

まず、沿道建築物に対応して街路リンクを細分したものを、建物リンクと呼ぶ。この建物リンクと街路リンクの関係の概念図は図-20 である。街路リンクは、一又はそれ以上の建物リンクから成る。

沿道建築物の被害状況に応じて、瓦礫発生を考える場合、この建物リンク毎に瓦礫幅が定まらなければならない。そこで、前節の街路リンクに対する瓦礫幅確率分布を、建物リンクに対する瓦礫幅確率分布に変換する。

まず、街路リンクにおける通行可能率 R_s は、この街路リンクを細分化した建物リンクによる通行可能率

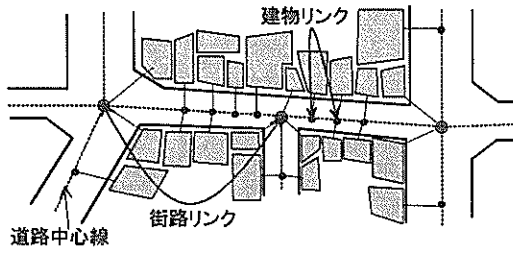


図-20 建物リンクと街路リンクの関係

R の直列システムと見ることが出来る。すなわち、どこか一つでも建物リンクが車両通行不可能であれば、街路リンクは通行不可能となるので、式(2)が成立する。

$$R_s = R^n \quad (2)$$

ここに、 n : 街路リンク当たりの建物リンク数

ここで街路リンクの通行可能率は、当該リンクの等価震度 I 及び街路幅員 w の関数であり、

$$R_s = \Phi\left(\frac{w-3.0-\mu_I}{\sigma_I}\right) \quad (3)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$: 標準正規分布関数

μ_I : 等価震度 I における瓦礫幅平均値

σ_I : 等価震度 I における瓦礫幅標準偏差

式(3)において、街路幅員 w から 3.0 を減じているのは、車両通行幅を 3.0m と考えているためである。

式(2)及び式(3)より、

$$R = \left[\Phi\left(\frac{w-3.0-\mu_I}{\sigma_I}\right) \right]^{1/n} \quad (4)$$

この建物リンク通行可能率に対応した、仮想の街路幅員を w' とすると、式(5)が成立する。

$$\frac{(w'-3.0)-\mu_I}{\sigma_I} = \Phi^{-1}(R) \quad (5)$$

式(5)に式(4)を代入すると、仮想の街路幅員 w' が式(6)の様になる。

$$w' = \Phi^{-1} \left\{ \left[\Phi\left(\frac{w-3.0-\mu_I}{\sigma_I}\right) \right]^{1/n} \right\} \sigma_I + \mu_I + 3.0 \quad (6)$$

この w' と街路幅員 w の関係を示したのが図-21 であ

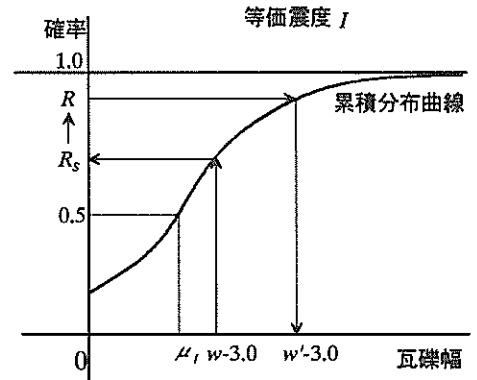


図-21 仮想街路幅員の算定方法

る。まず等価震度 I に対して、街路リンク通行可能率の累積分布曲線が描かれる。この分布曲線を使用して、まず実際の街路幅員 w に対する街路リンク通行可能率 R_s が定まる。次いで、式(3)より建物リンク通行可能率 R が求まる。この R に対応するのが、仮想街路幅員 w' とである (式(6))。

仮想街路幅員 w' は、建物リンクに対応した瓦礫幅確率分布を定めるものである。この街路リンクと建物リンクとの瓦礫幅の確率分布の差が、街路幅員 w と仮想街路幅員 w' との差である。ここで、瓦礫幅の確率分布形状すなわち標準偏差は、等価震度のみの関数であると考え、建物リンクに対応した瓦礫幅の確率分布は、街路リンクに対応した瓦礫幅の確率分布を $(w-w')$ だけ平行移動したものとなる。

以上より、建物リンクの瓦礫幅確率分布は、2. における等価震度に応じた瓦礫幅の確率分布形状のうち、その平均値を $(w-w')$ だけ平行移動させた分布形状となる。その平行移動分 $(w-w')$ は、式(6)に見られるように、街路幅員 w 、等価震度 I (に応じた μ_I 、 σ_I) 及び街路リンク当たりの建物リンク数 n の関数となる。

なお、上記手順に従った建物リンクの瓦礫幅平均値の算定例を、念のため表-6 に示す。

ここでは、街路リンク、建物リンクに対応した瓦礫幅の確率分布を算定した。この確率分布の考え方は、前章の街路閉塞予測モデルと何ら変わりはないため、個々で再度シミュレーションを行うようなことはしない。これらの二つのモデルについては、街路の車両通行可能率に主眼をおくのか、沿道建築物との関係性を重視するのかのどちらを採るのかによって、それぞれのモデルを使用すれば良いものである。

表-6 瓦礫幅平均値の算定例

等価震度 I	8	7	6
街路幅員 w	14.3	6.8	7.5
街路リンク当たりの 建物リンク数 n	4	5	3
街路リンク瓦礫幅平均値 μ_l	4.48	1.27	-0.82
街路リンク瓦礫幅標準偏差 σ_l	3.29	3.14	1.57
標準正規分布値	2.07295	0.80573	3.38854
街路リンク通行可能率 R_s	0.98091	0.78980	0.99965
建物リンク通行可能率 R	0.99519	0.95390	0.99988
仮想標準正規分布値	2.58944	1.68392	3.67872
仮想幅員 w'	16.0	9.6	8.0
建物リンク瓦礫幅平均値	2.78	-1.49	-1.28
建物リンク瓦礫幅標準偏差	3.29	3.14	1.57

7. 結論

本論文は、地震被害予測の一項目として、街路閉塞発生の予測モデルを構築することを目的としたものである。本論文において得られた結論は以下のとおりである。

- ・街路閉塞の状況を、地震動強さと街路幅員を説明変数とした街路閉塞発生予測モデルを開発した。さらに、この予測モデルによる推測値を既往の研究による兵庫県南部地震における実測結果と比較・検討した。ただし、本モデルの精度については、モデルを構築したデータとしか比較・検討ができていないため、今後の検証が必要である。
- ・街路閉塞予測モデルを、東日本のある大都市での想定地震に対してシミュレーションを試み、地震被害予測として有用であることを示した。
- ・街路閉塞予測モデルから、さらに瓦礫幅確率分布モデルを開発し、様々な地震被害のシミュレーションに対応できるようにした。

8. あとがき

これまで述べてきたように、本論文のモデルは地震被害のうち、街路閉塞現象についてのみ取りあげたものである。地震被害は、個別に生じるのではなく、複合的に発生し、その中で被害が大きくなっていくものであることは、兵庫県南部地震において確認されている。この点を踏まえ、システム研究室においては、総合地震防災システムを開発中である。そして、本論文

のモデルはその中の予測項目の一つである。この総合地震防災システムは、GIS 上にて様々な地震被害を予測することを可能とし、都市臨海部全域としての被害状況の事前予測、発生直後の推定、緊急対応時の情報管理等に活用することを考えている。

(2000年5月27日受付)

謝辞

本論文の実施にあたり、河内計画設計基準部長及び福手前計画設計基準部長に全般的な助言をいただきました。ここに記し、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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的障害とその影響, 土木学会論文集, No.576/VI-37, 1997年, pp.69-82
- 2) (社)土木学会 阪神淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神淡路大震災調査報告, 交通施設と農業施設の被害と復旧, 第2章 道路及び道路交通, 1998年, pp.95-198
- 3) (社)土木学会関西支部: 阪神淡路調査研究委員会報告書 大震災に学ぶ, 第II巻, 第8編インフラ施設の被害と復旧への歩み, 1998年
- 4) 長岡誠, 登亨一, 松波聖文, 高橋龍一, 中村武男: 市区町村向: 防災情報システム, 日本無線技報, No.36, 1997年, pp.13-19
- 5) 五代均, 下村敏雄, 渡邊眞二, 面上秀之, 福田知弘, 武田匡男, 中村仁, 島谷剛史, 竹下友伸, 春木利昭: 地震情報システム, 日本無線技報, No.36, 1997年, pp.20-24
- 6) 山崎文雄: リアルタイム地震防災システムの現状と展望, 土木学会論文集, No.577/II-41, 1997年, pp.1-16
- 7) 高橋宏直, 中本隆, 赤倉康寛, 吉村藤謙: 兵庫県南部地震直後における各輸送モードの対応状況に関する分析, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998年, pp.3125-3130
- 8) 高橋宏直, 中本隆, 吉村藤謙: 兵庫県南部地震時の震災直後における海上輸送モードの対応状況に関する分析, 港湾技研資料, 1997年, No.861
- 9) 家田仁, 望月拓郎, 上西周子: 街路閉塞現象による機能的障害と地区の危険度評価法, 阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集, 1997年,

- pp.433-440
- 10) 望月拓郎, 家田仁, 上西周子: 地震に伴う街路閉塞現象の発生予測方法とその危険度評価への応用可能性, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, 1997年, pp.427-430
 - 11) 家田仁, 望月琢郎, 上西周子: 地震時に建築物の倒壊等によって生じる街路閉塞の危険度評価法, IATSS Review, Vol.23, No.3, 1998年, pp.138-145
 - 12) 家田仁, 宇和田和, 望月琢郎, 小川逸作: 街路閉塞の予測及び危険度評価手法の東京市街地への適用, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, 1998年, pp.501-504
 - 13) 宇和田和, 家田仁, 加藤浩徳: 街路の機能的障害の視点からみた地区の防災危険度指標, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, 1998年, pp.497-500
 - 14) 塚口博司, 戸谷哲男, 中辻清恵: 阪神・淡路大震災における道路閉塞状況に関する研究, 阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文, 1997年, pp.377-388
 - 15) 李燕, 塚口博司: 到達可能ノード率による街路網防災性評価について, 阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集, 1997年, pp.407-414
 - 16) 塚口博司, 李燕, 吉野崇, 田中正浩: 防災性を考慮した街路網構成に関する研究, 阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集, 1997年, pp.425-432
 - 17) 小谷通泰, 前野達也, 伊藤美由紀: 震災による地区道路網の閉塞状況に関する分析, 交通工学研究発表会論文報告集, 1996年, pp.101-105
 - 18) 浦中邦彰, 小谷通泰, 前野達也, 伊藤美由紀: 震災による地区道路被害の実態と地区内交通流動に及ぼす影響の分析, 阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集, 1997年, pp.395-400
 - 19) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 萩野啓: 航空写真を用いた道路被災状況の把握に関する一考察, 阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集, 1997年, pp.389-394
 - 20) 木俣順, オマールオスマン, 林良嗣: 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, 土木情報システム論文集, Vol.9, 1997年, pp.9-16
 - 21) 内田敬: 車両感知器データによる震災時道路交通量の特性把握, IATSS Review, Vol.23, No.3, 1998年, pp.166-175
 - 22) 加藤浩徳, 味沢慎吾, 家田仁: 阪神・淡路大震災における地震発生後一週間の被災者・支援者の交通行動に関する調査分析, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1997年, pp.499-504
 - 23) 日野泰雄, 上野精順, 和田実, 見寄権次郎: 震災時における自動車利用ニーズと交通運用の考え方, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1997年, pp.505-512
 - 24) 小谷通泰, 松本誠: 阪神・淡路大震災時におけるマイカー利用の実態報告, IATSS Review, Vol.23, No.3, 1998年, pp.155-165
 - 25) 倉内文孝, 飯田恭敬: 阪神・淡路大震災発生後の時間経過を追ったOD交通量の変化に関する研究, IATSS Review, Vol.23, No.3, 1998年, pp.146-154
 - 26) 飯田恭敬, 倉内文孝, 杉本昌彦: 処理可能最大交通量を考慮した非常時の道路交通マネジメントモデル, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム, 1997年, pp.419-422
 - 27) (財)国際交通安全学会編: 阪神・淡路大震災の実態調査に基づいた震災時の道路交通マネジメントの研究, 1998年
 - 28) 建設省都市局都市防災対策室監修: 都市防災実務ハンドブッカー地震防災編一, ぎょうせい, 1997年
 - 29) 東京都: 地震に関する地域危険度測定調査結果, 1998年
 - 30) 赤倉康寛, 一井康二, 高橋宏直, 井合進: 都市臨海部における地震被害予測のリアルタイム地震防災への適用について, 第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 2000年(掲載予定)
 - 31) 坊池道昭, 上村雄二, 矢野公一, 松井武史, 高井広行: 神戸市における震災火災の出火と延焼状況に関する一考察, 第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1996年, pp.767-774
 - 32) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告 共通編-2, 1998年
 - 33) 気象庁監修: 震度を知るー基礎知識とその活用ー, ぎょうせい, 1996年
 - 34) 石川浩次, 溝口昭二, 小野諭: 神戸市街地における構造物被害と地盤挙動, 第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1996年, pp.187-194
 - 35) 佐藤忠信, 塩見祐二: 震度7の帯内において最大地道を推定することは可能か, 第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1996年, pp.45-52
 - 36) 翠川三郎, 藤本一雄: 墓石の転倒調査から推定し

た兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布，日本建築学会構造系論文報告集，第490号，1996年，pp.111-118

- 37) 藤本一雄，翠川三郎：被害分布から推定した兵庫県南部地震の震度分布とその解釈，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，1997年，pp.97-100
- 38) 高田至郎，北田敬広：震災の帯の被災特性に関する定量的分析，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，1998年，pp.455-458
- 39) 山口直也，山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建築被害率による地震動分布の推定，土木学会論文集，No.612/I-46，1999年，pp.325-336
- 40) 月岡和紀，金徳印，亀田弘行，能島楊呂：1995年阪神大震災における供給系ライフラインの復旧過程，第23回地震工学研究発表会講演概要，1995年，pp.631-634
- 41) 建設省建築研究所：平成七年兵庫県南部地震被害調査報告書，1996年
- 42) 翠川三郎：神奈川の地盤の特徴と地震災害，公開市民講座地盤に関する疑問に答える Part5「地盤と災害」よこはまの地盤と防災対策，1997年，pp.23-36
- 43) 野津厚，上部達生，佐藤幸博，篠澤巧：距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係，港湾技研資料，1997年，No.893
- 44) Khosrow T. SHABESTARI, Fumio YAMAZAKI : Attenuation of JMA Intensity Based on JMA-87-type Accelerometer Records : 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，1997年，pp.153-156
- 45) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編（平成8年12月），1996年
- 46) 武村雅之，諸井孝文，八代和彦：明治以降の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴－震度Ⅶの発生条件－，地震，第2輯，第50巻，1998年，pp.485-505