

GISを活用した地震損害評価システムの構築

DEVELOPMENT OF GIS-AIDED LOSS ESTIMATION SYSTEM FOR EARTHQUAKE HAZARD

小檜山雅之 —*1 水越 薫 —*2
石田 寛 —*3 永田 茂 —*4
金子弘幸 —*5 松本 優 —*6
矢代晴実 —*7 大金義明 —*8

Masayuki KOHIYAMA —*1 Kaoru MIZUKOSHI —*2
Hiroshi ISHIDA —*3 Shigeru NAGATA —*4
Hiroyuki KANEKO —*5 Masaru MATSUMOTO —*6
Harumi YASHIRO —*7 Yoshiaki OGANE —*8

キーワード：
地理情報システム, 地震動, 液状化, 地震火災, 地震被害, 保険

Keywords:
GIS, Earthquake motion, Liquefaction, Earthquake-triggered fire, Earthquake damage, Insurance

A loss estimation system for earthquake hazard capable of evaluating all of Japan was developed. A GIS (Geographic Information System) for personal computers is utilized for this system, which assists in interactive selection of the assumed earthquake and representation of the estimated results on a computer screen. Source parameters of the assumed earthquake can be derived from a database of active faults and historical earthquakes. Earthquake ground motion, liquefaction and earthquake-triggered fire are considered in order to estimate building damage ratios. An insurance company's exposure can quickly be estimated by linking this system to an insurance contract database.

1. はじめに

広域の地震被害評価は膨大な種々のデータベースが必要となり、またその計算量も非常に大きなものとなるが、近年、情報処理関連分野の急速な進歩により、パソコン上でも十分実用的な速度で計算し結果を表示するシステムを構築することが可能となった。著者らは、日本全国を対象として歴史地震の再現や様々な想定地震による建物被害率を評価し、損害保険会社の保険契約データとリンクさせることにより支払保険金額を即座に推定するシステムを開発した。本報告では、地震損害評価手法およびシステム構成について概要を述べる。

2. システム概要

本システムは図1に示すようにパソコン用地理情報システム (GIS) をベースにシミュレーション処理系であるプログラムモジュールとデータベース (DB) から構成される。地震動強さから地震被害までの評価は標準地域メッシュ¹⁾の第3次地域区画 (3次メッシュ) 単位で行い、支払保険金額の評価は市区郡単位で行う。評価の概略フローを図2に示す。

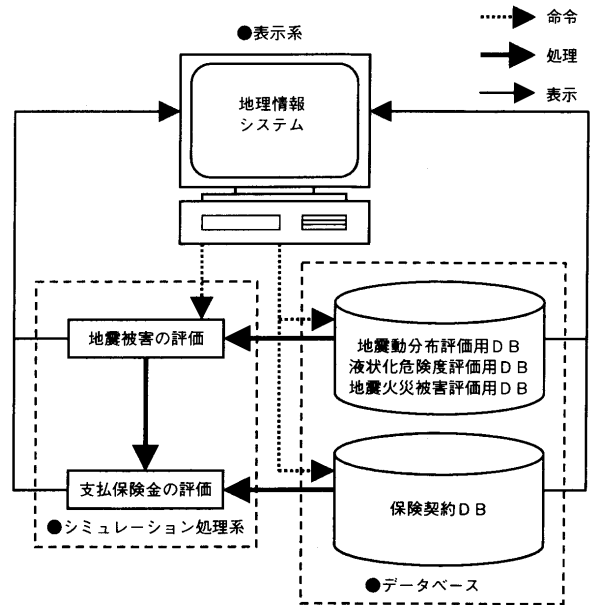


図1 地震損害評価システムの構成

*1 鹿島建設(株)技術研究所先端技術研究部 研究員・工修 (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1)
*2 鹿島建設(株)技術研究所先端技術研究部 グループ長・工博
*3 鹿島建設(株)技術研究所先端技術研究部 主管研究員・工修
*4 鹿島建設(株)技術研究所先端技術研究部 主任研究員・工博
*5 鹿島建設(株)技術研究所企画管理室 研究員・工修
*6 東京海上火災保険(株)リスクマネジメント業務部 火災グループリーダー・工修
*7 東京海上リスクコンサルティング(株)第一事業部 課長・工修
*8 東京海上リスクコンサルティング(株)第一事業部 主任・工修

*1 Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Advanced Technology Department, M. Eng.
*2 Group Manager, Kajima Technical Research Institute, Advanced Technology Department, Dr. Eng.
*3 Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Advanced Technology Department, M. Eng.
*4 Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Advanced Technology Department 1, Dr. Eng.
*5 Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Planning and Administration Office, M. Eng.
*6 Manager, THE TOKIO MARINE AND FIRE INSURANCE CO., LTD., Risk Management Department, Property Risk Group M. Eng.
*7 Manager, THE TOKIO MARINE RISK CONSULTING CO., LTD., Property Division M. Eng.
*8 Assistant Manager, THE TOKIO MARINE RISK CONSULTING CO., LTD., PROPERTY DIVISION M. Eng.

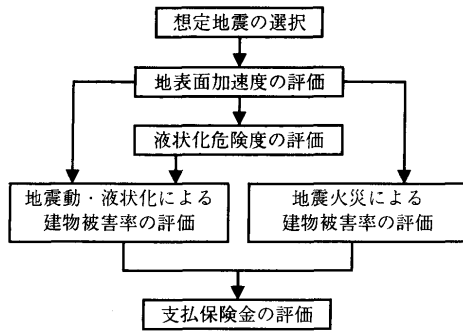


図2 地震損害評価の概略フロー図

3. 地震動分布の評価

本システムでは点震源と面震源の2種類の震源モデルを用いることができ、歴史地震および活断層のデータベースからGISの機能を活用して対話的に想定地震のパラメータを設定することができる。各メッシュ重心位置の基盤面（せん断波速度 600 m/s 以上）の最大加速度 A_b の大きさは以下の距離減衰式²⁾ で与えられる。

$$\log A_b = 0.318M_w - \log X_{eq} - 0.00164X_{eq} + 1.597 \dots (1)$$

ここで M_w : モーメントマグニチュード

X_{eq} : 等価震源距離 (km)

X_{eq} は震源断層の特定が困難な歴史地震などの場合は (2) 式、震源断層の形状が与えられる場合は (3) 式で与えられる。(3) 式については震源からのエネルギー放出分布は一様と仮定し断層面を小領域に分割して計算を行う。

$$X_{eq} = \frac{R}{\sqrt{\ln\left(1 + \left(\frac{R}{X}\right)^2\right)}} \dots (2)$$

$$X_{eq} = \sqrt{n / \sum_{i=1}^n X_i^{-2}} \dots (3)$$

ここで R : マグニチュードから求めた震源域面積³⁾ を持つ円形震源の半径 (km)

X : 震源距離 (km)

n : 断層面の小領域の数

X_i : i 番目の小領域と観測地点との距離 (km)

翠川ら⁴⁾ は 1987 年千葉県東方沖地震 ($M_{JMA} 6.7$) の観測結果をもとに、地盤分類ごとの距離減衰式を求めた。これによる第三紀以前の山地の式は (1) 式に換算⁵⁾ した M_w を代入したものと概ね一致することが確認された。よって第三紀以前の山地の式に対する他の地盤分類の式の比を基盤面最大加速度から地表面最大加速度への増

表1 最大加速度増幅率

地質年代	地形分類	最大加速度増幅率
第三紀以前	山地	1
	丘陵地	1.45
洪積世	丘陵地	1.86
	ローム台地	1.78
	砂礫台地	2.14
沖積世	扇状地	1.74
	三角洲	2.24
	砂州・自然堤防	2.34
	埋め立て地	2.34

幅率とみなし (表 1), 国土数値情報¹⁾ の表層地質・地形分類を用いて各メッシュの増幅率を設定した。地表面最大加速度はこの増幅率を (1) 式で求めた基盤面最大加速度に乗じて求められる。

4. 液状化危険度の評価

三浦ら⁶⁾ は河川周辺の液状化危険度を定性的に予測する手法を提案した。本システムでは三浦らの手法に海岸や湖沼周辺の液状化危険度の評価を追加し、さらに松岡・翠川ら^{7) 8)} の国土数値情報を基にした地形分類法を一部導入して液状化危険度の判定を行う。液状化危険度判定フローを図3に示す。

判定手順はまず国土数値情報の表層地質・地形データをもとに各メッシュの地形分類を行い、三浦ら⁶⁾ の論文を参考に作成した表2に基づき液状化限界加速度 A_c を求める。次に地表面最大加速度 A_{max} と比較し液状化の可能性の有無を判定し、河川および海・湖沼の水涯線からの距離ならびに水位と評価地点の標高差から表3に示した考え方に基づき河川、海・湖沼それぞれに関して液状化危険度を判定する。ここで河川の場合は、国土数値情報の流路位置ファイルで最も近傍の河川の河床標高と評価地点の平均標高との差を標高差とした。表3は河川に関するものは三浦ら⁶⁾ の論文を参考に作成し、海・湖沼に関するものは1995年兵庫県南部地震の被害データ^{9) 10)} をもとに作成した。最後に評価地点の液状化危険度は図3に示す D_R と D_S の2つの危険度を比較し高い方とする。

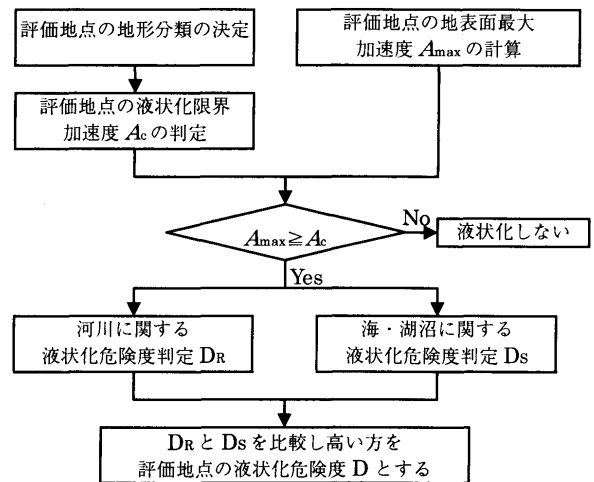


図3 液状化危険度判定フロー図

表2 液状化限界加速度

地形分類	液状化限界加速度 (Gal)
人工地盤	80
自然堤防・旧河道	90
三角洲性低地	100
扇状地性低地	120
扇状地	300

表3 液状化危険度判定の考え方¹⁾

		離岸距離L		
		$L < L_1$	$L_1 \leq L < L_2$	$L_2 \leq L$
標高差H	$H < H_1$	危険度大		
	$H_1 \leq H < H_2$	危険度中		
	$H_2 \leq H$	危険度小		

5. 地震動・液状化による建物被害の評価

地震動・液状化による建物被害は建物構造（木造／非木造）・被害レベル¹¹⁾（全損／半損／一部損）別に建物被害率 R_d により評価する。 R_d はメッシュ内に存在する建物の被害率を表し、木造全損率の場合、（木造全損棟数／木造全棟数）を表す。 R_d は地表面最大加速度 A_{max} の関数 $F_d(A_{max})$ と液状化危険度 D の関数 $\alpha_d(D)$ により次式で与えられるものと仮定した。

$$R_d = \alpha_d(D) F_d(A_{max}) \dots \dots \dots (4)$$

ここで $F_d(A_{max})$ は 1995 年兵庫県南部地震ならびに近年の 5 地震の地震動による建物被害データ^{12) 13) 14)} をもとに求めた建物脆弱性曲線（図 4）であり、上記被害データにおける全壊・半壊・一部損壊はそれぞれ全損・半損・一部損と同等の被害レベルであると仮定した。また $\alpha_d(D)$ は液状化による被害率割増係数であり、兵庫県南部地震の液状化による建物被害データ¹⁰⁾ より求めた。

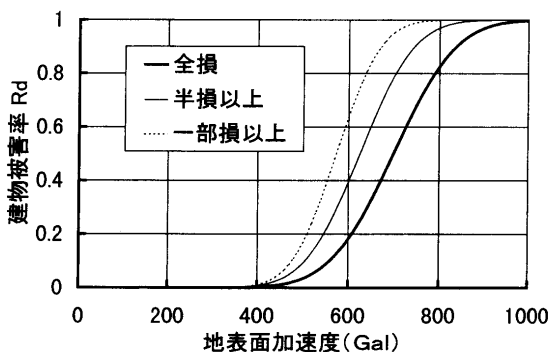


図 4 建物脆弱性曲線（木造建物）

6. 火災による建物被害の評価

従来の焼失率の評価は、出火点を想定後、延焼速度式を評価して逐次的に延焼範囲を求める決定論的な評価モデルであり、今回のような広域の被害推定には不向きであった。そこで本システムでは、ある限界点以上に木造建物が集積する地域では急激に延焼危険性が增大する現象をモデル化することで該当地域の焼失確率をより簡便に推定できる確率論的モデル¹⁵⁾を採用した。

本システムでは火災による建物被害は焼失率 R_F （焼失棟数／全棟数）により評価する。焼失率評価フロー図を図 5 に示す。

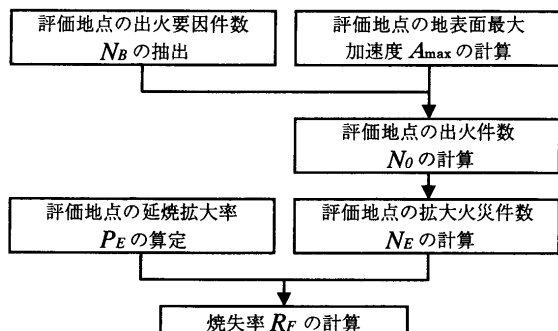


図 5 焼失率評価フロー図

出火件数 N_0 の推定は次式で表される東京消防庁による方法¹⁶⁾を用いる。

$$N_0 = \sum_B P_B(A_{max}) N_B \dots \dots \dots (5)$$

ここで B : 出火要因の種類
 N_B : 出火要因件数
 $P_B(A_{max})$: 出火確率

評価地点における住宅、飲食店等の種々の N_B は国勢調査、事業所統計調査のメッシュ統計データ¹⁷⁾を用いて推計しデータベース化した。 $P_B(A_{max})$ は地表面最大加速度 A_{max} により出火時間帯別の出火確率テーブルで与えられる。

上記の N_0 はほや・小損を含む全出火を対象とするため、広域的な火災被害を評価するために大火に発展する出火件数を算定する必要がある。そこで延焼規模 50 軒以上の出火件数を拡大火災件数 N_E とし、出火件数から拡大出火件数を求める式を兵庫県南部地震の被害データ^{18) 19)} から以下の回帰式により求めた。

$$N_E = \frac{a_3}{1 + e^{a_1 N_0 + a_2}} - a_4$$

ここで a_i : 回帰係数

焼失率 R_F は次式で評価する。

$$R_F = b P_E N_E \dots \dots \dots (7)$$

ここで b : 補正係数

P_E : 延焼拡大率

本手法では焼失率 R_F は拡大火災件数 N_E に比例するものと仮定した。 P_E はメッシュ内の拡大火災件数 1 軒に対する焼失率を表し、金子ら¹⁵⁾の手法により全国のメッシュについて評価を行いデータベース化した。上記手法は木造率等の建物構造比率のデータが不十分な地域でも評価できるように国勢調査、事業所統計調査のメッシュ統計データ¹⁷⁾を用いて延焼危険性に関わる地域特性を指標化し、実際に延焼危険度の評価ができる地域と対比して延焼拡大率を求めるものである。補正係数 b は安全率等を考慮し別途定める係数とする。

7. 支払保険金額の算定

支払保険金額の算定にあたり、まず保険契約データベースが市区郡単位で集計されていることを考慮し 3 次メッシュ単位で求めた各建物被害率について重み付き平均を行い各市区郡の被害率を求める。この被害率を用いて各市区郡ごとに保険契約データベースを参照し契約件数に被害率を乗じて各被害状況に対する被害棟数の評価を行い支払保険金額の算定を行う。

8. 評価事例

図 6～9 に 1995 年兵庫県南部地震の面震源断層モデルを想定地震とした場合の被害評価結果を図示する。出火時間帯は東京消防庁による方法¹⁶⁾では夏または冬の昼または夜を想定しており、ここではより大きな出火件数が予想される冬の日の夜を想定した。また、上記地震による実際の観測値ならびに被害を表す図として、図 10 に地表面最大加速度観測値²⁰⁾（水平成分）、図 11 に液状化率¹⁰⁾（各メッシュ面積に対する噴砂領域の面積の比）、図 12 に町丁目ごとの非堅牢建物全壊率²¹⁾（木造全損率とはほぼ同等とみなせる）、図 13 に神戸市 6 区の焼失率²²⁾を示す。

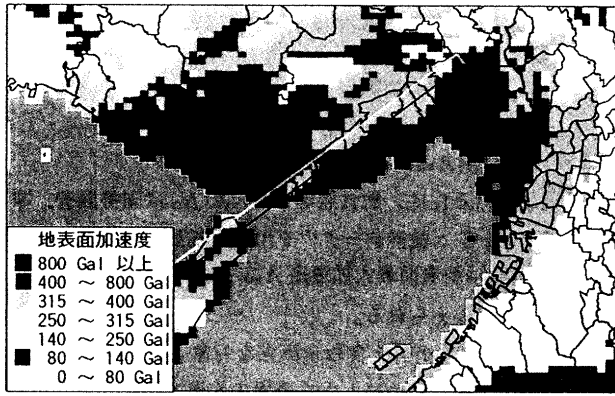


図6 地表面最大加速度の評価結果

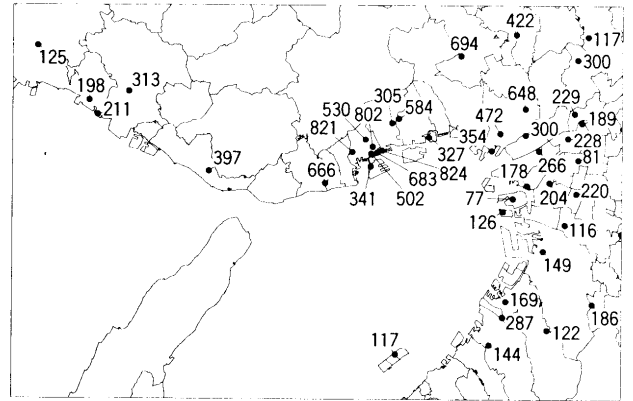


図10 兵庫県南部地震における地表面最大加速度²⁰⁾

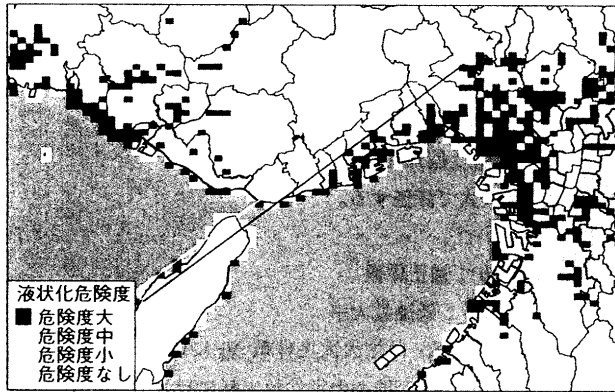


図7 液状化危険度の評価結果

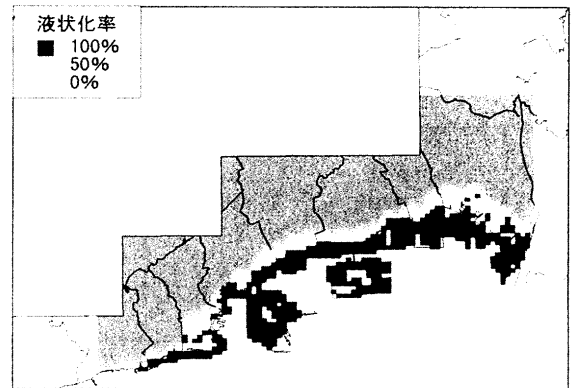


図11 兵庫県南部地震における液状化率^{10) 注2)}

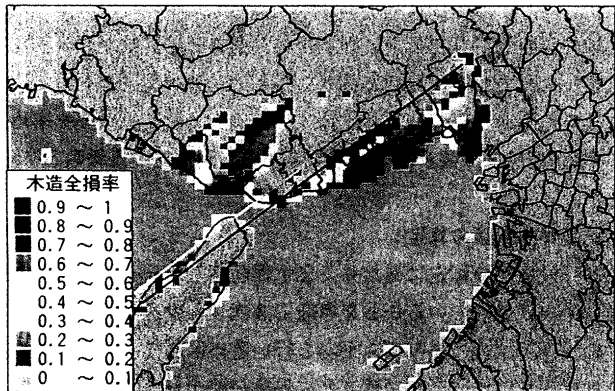


図8 木造建物全損率の評価結果

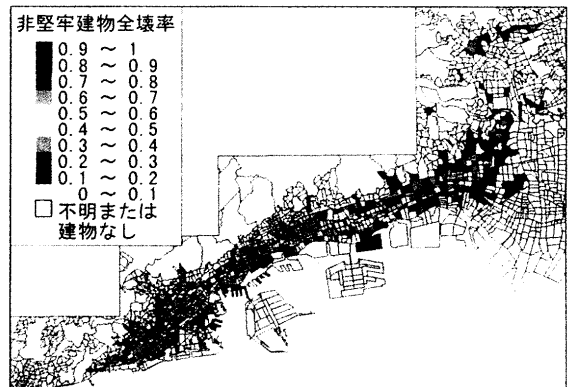


図12 兵庫県南部地震における非堅牢建物全壊率^{21) 注2)}

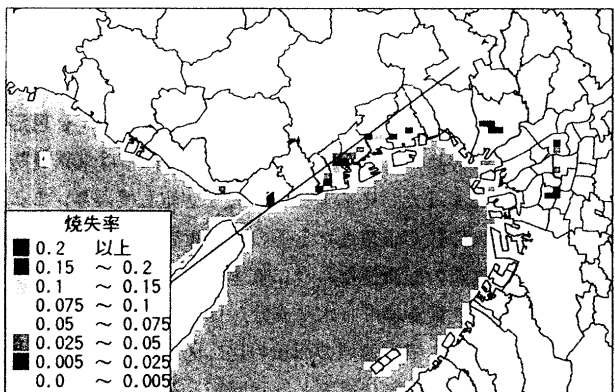


図9 焼失率の評価結果

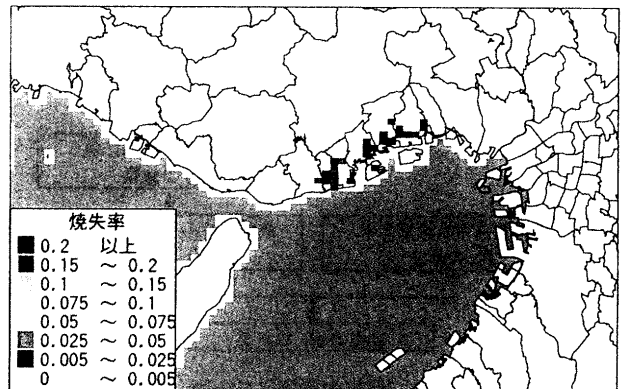


図13 兵庫県南部地震における神戸市6区の焼失率²²⁾

シミュレーション結果と実際の観測値、被害率分布を以下に比較考察する。地表面最大加速度については概ね整合した評価となっている。誤差が生じている地点では原因として3次メッシュの解像度に起因する地盤種別の違いが考えられる。大阪湾岸で過大評価となっている原因としては臨海部に顕著に見られた液状化等による表層地盤の非線形性を考慮していないことが挙げられる。Ohno et al²⁾によれば(1)式は兵庫県南部地震における岩盤上の観測記録によく対応し、洪積層、沖積層上の観測記録は平均的にそれぞれ1.4, 1.8倍となっている。一方、本システムで設定した増幅率はそれぞれ1.78~2.14, 1.74~2.34と大き目である。これは、兵庫県南部地震では非線形効果が比較的大きいのに対し、千葉県東方沖地震ではあまり非線形効果が含まれていないため⁴⁾と考えられる。今後、評価精度を向上させるためには非線形効果を考慮した増幅特性を用いる必要がある。

液状化危険度の評価については、マクロに見た場合、本システムは実際に液状化した地域に比べ液状化発生の危険度がある領域を広めに評価する傾向がある。一方、神戸市周辺のように海岸線部から山側にかけて標高が急変する地域では水位標高差を過大に評価するために海沿いの人工地盤における液状化危険度は逆に低めに評価されており、評価単位の解像度が原因となっている。また、広範囲の埋立地においては離岸距離により液状化危険度が評価されるため同じく過小評価される傾向がある。

木造全損率については臨海部等で過大評価となっている。原因としては表層地盤の非線形性を考慮していないことなど地震動の過大評価が考えられる。また、建物脆弱性曲線の作成に用いた被害データのサンプル数が少ないことによる誤差の影響もあり、今後、広範な被害統計データを補うことで評価精度の向上を目指す必要がある。

焼失率については、実際の地震発生が早朝でありシミュレーションで想定した夜ではないため、飲食店等の出火件数に誤差が含まれる。また、前述した地震動分布の誤差も出火件数に影響を及ぼす。評価事例ではこの誤差がそれほど大きくないものとして、神戸市全体の焼失被害傾向を表すよう補正係数 b を設定した場合の評価結果を示している。今後の課題として延焼に深く関わる気象条件や消防活動といった因子の考慮があげられる。

9. おわりに

本システムは歴史地震や活断層等による地震に対する建物被害を評価し、損害保険会社の支払保険金額の算定をパソコン上で行うことができる。GISの活用により評価結果は地図上にわかりやすい形で表示することが可能である。今後、本システムの被害評価精度を向上させるための課題として、地震動強さの評価における地盤の非線形性の考慮、より多くの被害データに基づく建物脆弱性曲線等の各種パラメータの評価、評価単位の解像度に対する検討、延焼火災被害における気象条件の考慮等が挙げられる。

参考文献

- 1) 建設省国土地理院：数値地図ユーザズガイド、(財)日本地図センター、1992年
- 2) Ohno, S. et al: Intensity of Strong-Motion on Pre-Quaternary Stratum and

Surface Soil Amplifications during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Japan, J.Phys.Earth., Vol.44, pp.623-648, 1996

- 3) Sato, R.: Theoretical Basis on Relationships between Focal Parameters and Earthquake Magnitude, J.Phys.Earth., Vol.27, pp.353-372, 1979
- 4) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp.71-78, 1992.12
- 5) 武村雅之: 日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震, 第2輯, 第43巻, pp.257-265, 1990.6
- 6) 三浦房紀ほか3名: 液状化危険地域の簡易推定法, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1015-1020, 1994年
- 7) 松岡昌志, 翠川三郎, 若松加寿恵: 国土数値情報を利用した広域液状化危険度予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第452号, pp.39-45, 1993.10
- 8) 翠川三郎, 松岡昌志: 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査, 第48巻, 第6号, pp.519-529, 1995年
- 9) 濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿恵: 1995年兵庫県南部地震 液状化, 地盤変位及び地盤条件, (財)地震予知総合研究振興会, 1995年
- 10) (社)日本水道協会: 1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析, 1996年
- 11) (社)日本損害保険協会: 地震保険損害査定指針, 1991年
- 12) 早坂浩ほか5名: 兵庫県南部地震による建物被害の分析 その1 研究概要と建物属性分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1-2, 1996年
- 13) 嘉島嵩志ほか5名: 兵庫県南部地震による建物被害の分析 その2 建物脆弱性曲線, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.3-4, 1996年
- 14) 童華南ほか3名: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2299-2304, 1994年
- 15) 金子弘幸, 佐藤博臣: 地域特性を考慮した都市火災シミュレーションの提案, 日本火災学会平成8年度研究発表会梗概集, pp.80-83, 1996年
- 16) 東京消防庁: 地震時における地域別の総合出火危険予測と対策, 1987年
- 17) 総務庁統計局: 地域メッシュ統計の概要, (財)日本統計協会, 1994年
- 18) 鈴木恵子, 松原美之: 1995年兵庫県南部地震後10日間の出火状況, 消防輯報第49号, 1995年
- 19) 室崎益輝, 神戸大学室崎研究室他: 阪神・淡路大震災時の火災の延焼状況調査報告書, 1995年
- 20) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究会: 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集, 1996年
- 21) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996年
- 22) 金子弘幸, 佐藤博臣: メッシュ解析による出火・延焼拡大に関する考察, 日本火災学会平成9年度研究発表会梗概集, pp.212-215, 1997年

注

注1) 危険度判定の境界値 H_1 , H_2 , L_1 , L_2 は、河川、海・湖沼に対し別々に与える。

注2) 図1 1, 1 2の地図は建設省建築研究所が建設省国土地理院の承認を得て、同院発行の数値地図10000(総合)を複製したCD-ROMデータに基づいて作成したものである。(承認番号 平8総複, 第26号)。

[1998年6月26日原稿受理 1998年11月4日採用決定]