

兵庫県南部地震の実被害に基づく 建物倒壊危険度評価法

田中宏幸¹・村尾 修²・山崎文雄³・若松加寿江³

¹学生員 東京大学大学院工学系研究科修士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

²工修 東京大学生産技術研究所 (〒106-8558 東京都港区六本木 7-22-1)

³正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (同上)

東京都による建物倒壊危険度手法から算出した灘区の危険度と、兵庫県南部地震による実被害を比較した結果、建物棟数密度が大きく危険度に影響していることがわかった。そこで、地域の被災ポテンシャルを表す指標は、地盤条件を含めた建物倒壊の危険率であると考え、信頼性解析に基づく危険度評価式を構築した。これは、建物存在比率と建物および地盤から決定されるマトリクスタイプの危険性ウェイトから求められ、地域特性を含んだ危険度を算定することができる。この評価式を用いて東京都の危険度再評価を行った結果、現行の方法では支配的要因であった建物棟数密度の影響を取り除き、建物強度や地盤を考慮した危険度を測定することができた。

Key Words: Building collapse risk, the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Tokyo, Nada Ward, GIS

1. はじめに

兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）を契機に、国、地方自治体、個人と、あらゆるレベルで地震防災への意識が高まった。この震災以前も多くの自治体によって、地域の地震に対する被害想定が行われてきた¹⁾が、震災以後、大規模かつ多岐にわたった被害を考慮して、被害想定を見直し、あるいは新たに検討する動きが活発である。そのような動きの中で、1998年3月に東京都が発表した「地震に関する地域危険度測定調査報告書（第4回）」^{2)~4)}では、被害想定とは異なったユニークな評価法で建物倒壊、人的、火災、避難の4種類の危険度が評価されている。この調査は、「都市災害に強い都市づくりの指標とする」、「震災対策事業を優先的に実施する地域を選択する際の参考とする」、「地震災害に対する都民の認識を深め、防災意識の高揚に役立てる」ことを目的とし、東京都が東京都震災予防条例に基づいて5年ごとに実施しているものである。

地震発生時の被害を予測するという点において、被害想定も東京都の地域危険度評価も同質のものである。その違いは、算定方法・考え方にあり、被害想定が特定の地震動発生を仮定し、その地震によって生じる具体的な被害量を想定するのに対し、地域危険度評価は、被災ポテンシャルを地域間で比較し、相対的に危険な地域を抽出することを目的としているため、比較的簡単なモデルで算出される。しかし、

地域危険度評価は、東京都独自の方法であり、その物理的解釈については、十分に議論されていない。筆者らは、過去の研究において東京都の建物倒壊危険度算出の方法を神戸市灘区において適用し、灘区における建物倒壊危険度と、兵庫県南部地震の実被害とを比較して、東京都の方法が建物棟数密度というパラメータの影響を大きく受けていることを指摘した⁵⁾。本研究では、この結果を踏まえ、東京都の方法のモデルとしての簡易性を保ちつつ、より実被害を再現する、一般的な建物倒壊危険度評価法を提案することを目的としている。

2. 東京都の建物倒壊危険度評価法

東京都の建物倒壊危険度は、地震動によって建物が壊れたり傾いたりする危険性の度合を、町丁目単位で、5段階で分類したものである。

建物倒壊危険度分類の指標となる建物倒壊危険量は、以下の式で算出される。

$$P_i = \sum_k N_k (1 - W_k \cdot U_k) \quad (k=1 \sim 19: \text{建物分類数}) \quad (1)$$

ここで、 N_k : 建物棟数密度、 W_k : 耐震性能ウェイト、 U_k : 地盤特性ウェイトである。各ウェイトは、それぞれ専門家によって6パターン設定されているが、それらを比較してみると、6つのパターンに大

きな差異が存在しており、ウェイト付けの困難さとそれに起因する曖昧さが覗える。

3. 全壊率を再現する新建物倒壊危険度評価法

(1) 「建物存在比率」と「危険性ウェイト」の導入

これまで筆者らは、東京都の方法で算出した灘区の建物倒壊危険度（図-1）と、建物棟数密度（図-2）の比較から、東京都の建物倒壊危険度が建物棟数密度の影響を大きく受けている一方で、建物棟数密度と実被害の間には、相関関係が見られないことを指摘した⁹⁾。そこで本研究では、建物倒壊危険度を、「実被害の建物全壊率を再現する指標」として評価する。

まず、東京都建物倒壊危険度に関する式(1)において、「 N_k ：建物棟数密度」を「 R_k ：建物存在比率」に置き換える（例：木造建物の存在比率＝町丁目内の木造建物棟数／町丁目内の全建物棟数）。これにより、全壊率に対応した建物倒壊危険度が求められる。

次に、ウェイトの設定を見直す。(1)式に示されるように、東京都の方法では、建物耐震特性と地盤特性がそれぞれ独立のものとして設定されている。しかし、建物分類と地盤分類をそれぞれ行、列としてマトリクス形式でそれぞれの要素における全壊率を計算した結果、地盤による全壊率の影響は一定ではなく、建物耐震特性と地盤特性とのウェイトがそれぞれ独立して設定できないことがわかった。ここで、建物耐震特性は、これまでに構築した建物被害関数⁹⁾に基づいて、構造別・建築年代別に分類し、地盤特性については、灘区的地盤をより正確に表すものとして、著者らの研究グループが過去に行った西宮市や尼崎市の地盤分類^{7),8)}と同様に、ボーリング柱状図と土地条件図^{9),10)}等から、山地、段丘、扇状地、デルタ、埋立地の5つの表層地盤タイプに分類した（図-3）。

本研究では、以上のことを踏まえて、マトリクスタイプの危険性ウェイトを設定する。このウェイト設定によって建物耐震特性と地盤特性との関係を表現することが可能となり、より実際の地震被害に近

い建物倒壊危険度が得られる。

(2) 新建物倒壊危険度評価式

本研究で提案する新建物倒壊危険度評価法では、東京都の方法の「危険量」に対応する指標として「危険率」を下式で定義する。

$$P_i = \sum_k R_k \cdot W_{kl} \quad (2)$$

($k=1-14$ ：建物分類； $l=1$ or 3 or 5 or 7 ：地盤分類)

ここで、 R_k ：建物存在比率、 W_{kl} ：危険性ウェイトである。危険率の高い町丁目から順に、5段階に分類したものが、危険度となる。

この式により、建物倒壊危険度から建物棟数密度の影響を除去し、より地域の建物特性・地盤特性を表現する建物倒壊危険度が算出できる。

4. 汎用危険性ウェイト設定手法

ここでは、一般的な地域において建物倒壊危険度が算定するため、信頼性解析^{11),12)}を用いて危険性ウェイトを設定する手法を構築する。

まず、建物の全壊確率密度関数として、村尾・山崎⁹⁾がこれまでに構築した灘区の被害関数を使用した。

次に、兵庫県南部地震に対する地盤ごとの最大速度生起確率密度分布関数を図-4に示す。ピーク時のPGV指標は山地、段丘、扇状地、デルタの順に高くなっている。また、揺れの分布は山地、扇状地で比較的広範に分布しており、段丘、デルタではピーク値周辺に集中している。

建物の全壊確率密度関数を R 、地形区分ごとの最大速度生起確率密度関数を S として、次式において信頼性解析を用い、全壊の確率 P_f を求めたものが、危険性ウェイトとなる（図-5）。

$$P_f = P\left(\frac{R}{S} < 1\right) \quad (3)$$

このようにして求めた危険性ウェイトを表-1に示

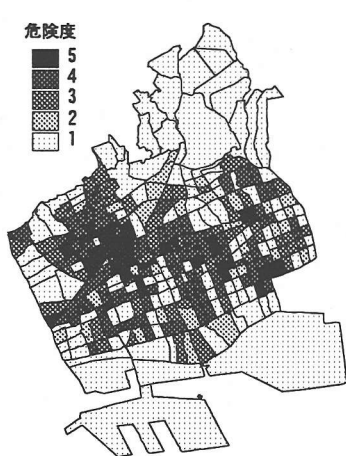


図-1 灘区の建物倒壊危険度（東京都の方法）

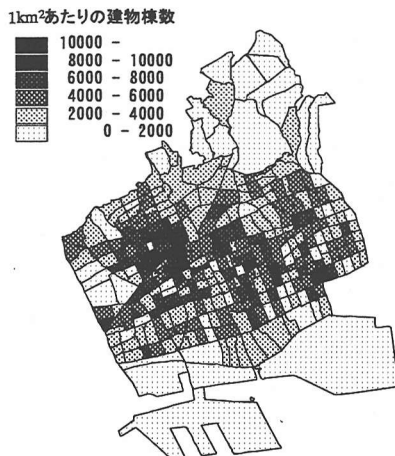


図-2 灘区の建物棟数密度分布

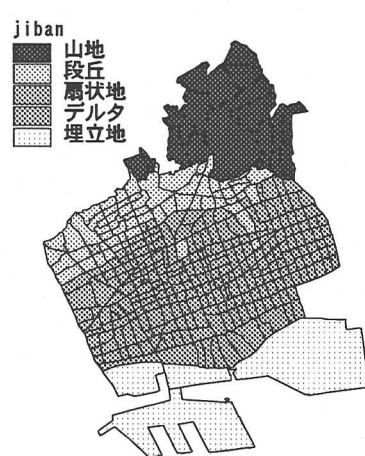


図-3 灘区的地盤分類

す。表-1において、 λ , ζ はそれぞれ、 $\ln(PGV)$ の平均値及び標準偏差である。図-6は、全壊率と表-1の危険性ウェイトを比較したものであるが、危険性ウェイトは全壊率をよく再現している。

5. 新評価法による建物倒壊危険度

(1) 灘区の建物倒壊危険度

以上の方法により算出した灘区の建物倒壊危険度が、図-7である。また、図-8に、村尾・山崎¹³⁾による、兵庫県南部地震による灘区の建物全壊率を示す。危険度算出においては均質化した地震動を仮定しており、地域による地震動のむらを反映している全壊率の分布とは、完全には一致しないが、これらはよく似た分布となっており、全壊率を再現する危険度となっている。

(2) 東京都の建物倒壊危険度算出

東京都においては、実際の地震から最大速度生起確率密度関数を求めることはできないため、基盤地震動レベルの最大速度を30cm/sとして、 λ を大西・山崎・若松¹⁴⁾による地盤増幅度によって設定し、 ζ の値には、Molas and Yamazaki¹⁵⁾による、最大速度の距離減衰式の地域内の変動成分を使用した。このようにして求めた λ と ζ の値を表-2に示す。

以上のデータと3、4節で提案した評価法に基づき、東京23区の新建物倒壊危険度を算出した。その過程で東京都の建物分類方法で集計された建物棟数データを使用したため、木造の1971年以前、1972年以降、鉄骨造の1981年以前、軽量鉄骨造の1981年以前の建物については、東京都の分類と対応する複数の建物分類項目での危険性ウェイトを平均して用いた。図-9に現行の東京都による方法と新評価法に基づく危険度分布の比較を示す。23区内の危険度分布を比較してみると、東京都の方法では危険度の

高い地域が比較的環状に分布しているのに対し、本研究の方法では東部の下町の地域で危険度が高くなっている。これは、この地域の地盤危険性が高く、

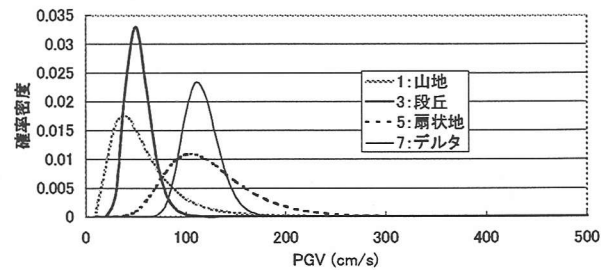


図-4 地盤ごとのPGV生起確率密度分布関数

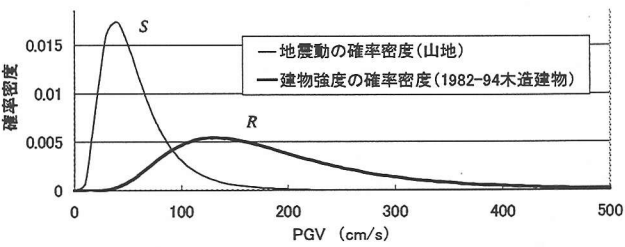


図-5 信頼性解析における被害確率の説明図

表-1 確率密度関数のパラメータと全壊率をほぼ再現するような危険性ウェイト(%)

		λ_s	ζ_s	山地	段丘	扇状地	デルタ
λ_s		-	-	3.90	3.95	4.76	4.74
ζ_s		-	-	0.53	0.24	0.33	0.15
木造	-1951	4.36	0.41	22.5	16.0	78.0	81.7
	1952-61	4.44	0.35	20.3	13.4	74.9	78.1
	1962-71	4.45	0.34	19.9	12.9	74.3	77.5
	1972-81	4.73	0.38	10.1	4.1	52.7	51.0
	1982-94	5.12	0.50	4.6	1.7	27.5	23.1
RC造	-1971	5.12	0.65	7.1	4.4	31.0	28.2
	1972-81	5.33	0.58	3.4	1.3	19.7	16.1
	1982-94	6.01	0.79	1.3	0.6	7.3	5.8
S造	-1971	4.64	0.62	18.2	15.0	57.0	56.2
	1972-81	4.97	0.49	6.8	3.0	36.1	32.4
	1982-94	5.64	0.73	2.7	1.4	13.7	11.3
軽S造	-1971	4.70	0.55	14.8	10.7	54.2	53.1
	1972-81	5.82	0.97	4.1	3.1	15.2	13.6
	1982-94	6.19	1.10	3.1	2.4	10.8	9.7

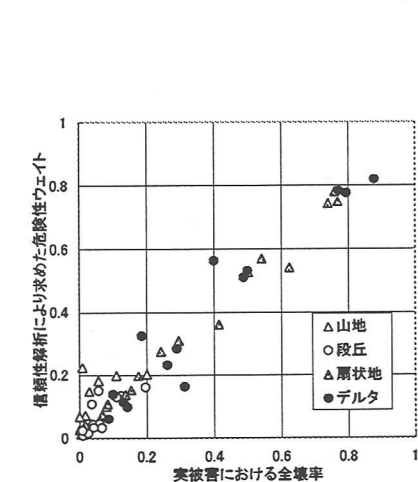


図-6 危険性ウェイトの地盤ごとの再現性の評価

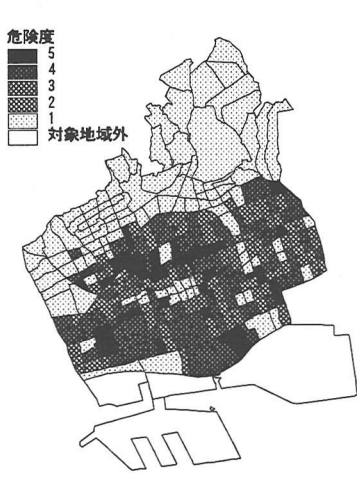


図-7 灘区の新建物倒壊危険度

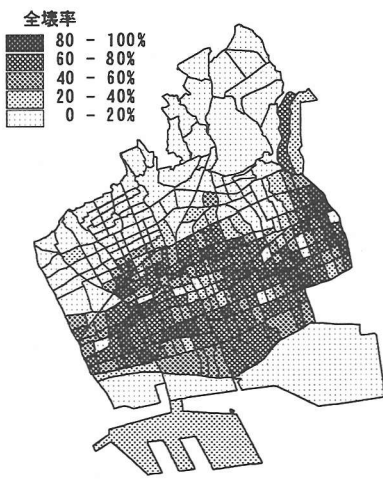


図-8 兵庫県南部地震による灘区の建物全壊率

かつ危険性の高い木造建物が多いためであると考えられる。東京都の建物倒壊危険度では、建物棟数密度が支配的要因であったのに対し、本研究の建物倒壊危険度により、建物強度や地盤の影響が考慮されるようになった。

6. まとめ

本研究では、地域の被災ポテンシャルを表す指標は、その地域での地盤条件を含めた建物倒壊の危険率であると考え、建物倒壊危険度を地震発生時の全壊率に対応する指標として、信頼性解析に基づく評価式を構築した。ここで提案した建物倒壊危険度は、ある地域の建物存在比率と建物および地盤から決定されるマトリクスタイプの危険性ウェイトから求められるもので、灘区の実被害と比較した結果、強い相関が確認された。この評価式を用いて各地域の地域特性を含んだ建物倒壊危険度を算定することができる。

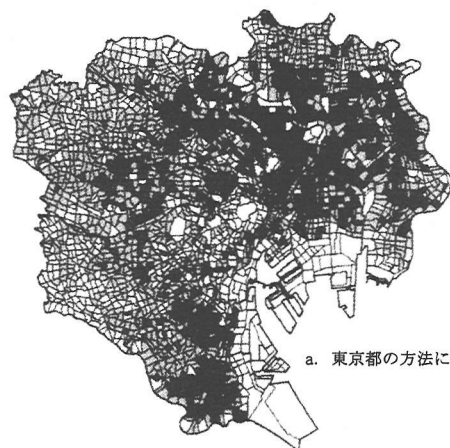
今後の課題として、盛土及び切土地盤、液状化などの地盤変状発生による建物被害の取扱いなどがあげられる。また本研究では東京都の発表した「地震に関する地域危険度測定調査」中の4つの危険度のうち、最も根幹的な建物倒壊危険度について取り上げたが、火災、人的被害、避難など他の3つの危険度手法や、それらの組み合わせについても、検討が必要である。

参考文献

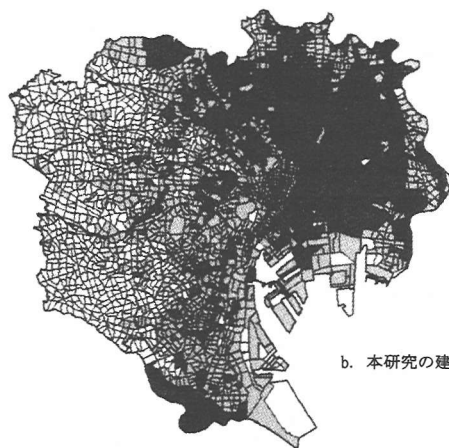
- 1) 損害保険料率算定会：地震被害想定資料集，地震保険調査報告 28，1998.
- 2) 東京都都市計画局：地震に関する地域危険度測定調査報告書（第4回），1998.
- 3) 東京都都市計画局：第4回地震に関する地域危険度測定調査 調査結果活用の手引，1998.
- 4) 東京都：あなたのまちの地域危険度，1998.
- 5) 田中宏幸，村尾修，山崎文雄：東京都の方法による灘区の建物倒壊危険度と実被害との比較，第三回都市直下地震災害シンポジウム論文集，pp.399-402，1998.
- 6) 村尾修・山崎文雄：自治体データに基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，1999年度日本建築学会（中国）学術講演梗概集 F-1，日本建築学会，1999（掲載予定）
- 7) 山口直也，山崎文雄，若松加寿江：兵庫県南部地震における西宮市の建物被害分析，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1237-1240，1997.
- 8) 後藤寛子，山崎文雄，若松加寿江，浅野進一郎：兵庫県南部地震における尼崎市の建物被害分析，第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1233-1236，1997.
- 9) 国土地理院：1/10,000 地震防災土地条件図，1996.
- 10) 国土地理院：1/25,000 土地条件図，1966.
- 11) 星谷勝：確率論手法による構造解析，鹿島出版会，1973.
- 12) 中埜良昭，岡田恒男：信頼性理論による鉄筋コンクリ

表-2 東京都の地盤分類ごとの PGV 地盤増幅度と
生起確率密度関数のパラメータ値

分類番号	国土数値情報の 地形分類	東京都の 地盤分類	最大速度の 地盤増幅度	λ_s	ζ_s
0	山地	なし	1.00	3.40	—
1	丘陵地	山地・丘陵	1.71	3.94	0.10
2	扇状地性低地	沖積面1	1.48	3.79	0.10
3	砂礫台地	台地1	1.62	3.88	0.10
4	火山灰台地	台地2 谷底低地2	2.50	3.88	0.10
5	三角州性低地（砂）	沖積面2	2.39	4.27	0.10
6	三角州性低地（泥）	谷底低地1 沖積面3 沖積面4 沖積面5	2.92	4.47	0.10



a. 東京都の方法による建物倒壊危険度



b. 本研究の建物倒壊危険度

図-9 東京 23 区における建物倒壊危険度の比較

- ート造建築物の耐震安全性に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，406，pp.37-43，1989.
- 13) 村尾修，山崎文雄：構造・建築年を考慮した建物被害データに基づく灘区地震動分布の再推定，日本建築学会構造系論文報告集，523，1999。（掲載予定）
 - 14) 大西淳一，山崎文雄，若松加寿江：気象庁地震記録に基づく地盤増幅度と地形分類との関係，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.909-914，1998.
 - 15) G. L. Molas, F. Yamazaki：Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan, Including Deep Focus Events, Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 5, pp.1343-1358, 1995.