

地域危険度測定調査データに基づく建物倒壊危険量の簡易推定

岩瀬早綾¹⁾、山崎文雄²⁾

1) 千葉大学大学院工学研究科、大学院生

e-mail : s.iwase@chiba-u.jp

2) 千葉大学大学院工学研究科、教授 工博

e-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

要 約

日本では内閣府や自治体で、地震防災対策の1つとして様々な被害予測が行われている。そのうち東京都では、地震による建物倒壊と火災出火・延焼の危険性を評価した地域危険度測定調査が行われ、2013年に第7回調査が公表された。これは地震に脆弱な地域を抽出することで市街地整備や防災意識の向上に役立てられている。しかしこの調査には都独自のデータや算出法が用いられることから、パラメータ変更の際や他地域での同様な危険度算出は容易ではない。そこで本研究では、東京都のデータから建物の震動被害を支配する要因を明らかにするとともに、回帰分析により簡易な推定式を構築して危険量推定を行い、実際の調査との精度比較を行うことで本手法の有用性を検討した。

キーワード： 地震被害想定、地域危険度、建物倒壊、東京都、GIS

1. はじめに

今後起こりうる地震に対し、日本では国や自治体において多様な地震被害想定が行われており、防災施策の立案や市民の防災意識の向上のために利用されている。地震被害想定調査の大きな流れは、図1に示すように、①震源を設定しこの震源モデルによる対象地域の地表面地震動を計算する、②対象地域における地域メッシュ単位の構造物の属性別数量データを準備する、③構造物属性別の被害関数（予測式）を準備する、④これらを用いて地域メッシュ単位の被害量を計算する、というものである。これらのステップのうち、①と③は不確定性の大きいもので、これらの設定・選択の仕方によって結果は大きく異なる。また②は個人情報保護（建物属性）や企業のセキュリティ（電力、通信、都市ガス等）などの観点から、国や自治体ですら正確で詳細な属性別数量データの入手が容易でないことが多い。

これらの要素データを組み合わせて行われる地震被害想定は、その結果に非常に大きな不確定性を含むものとなっているといわざるを得ない。たとえば2011年東日本大震災を例にとれば、中央防災会議は日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震¹⁾に対する被害想定を以前に行っていたが、実際に発生した M_w 9.0のような複数の震源域の連動地震は全く考慮されておらず、被害想定²⁾の第一ステップの震源想定が甘かったことになる。一方、これによる反動のせいか、南海トラフ巨大地震による被害想定²⁾では、「科学的知見から、発生することが否定できない」レベルの巨大地震³⁾に対してまで、被害数量を予測するものとなってしまった。これらはいずれも、地震被害想定が震源モデルの設定に過度に依存した結果といわざるを得ない。したがって、被害想定結果の利用法にもよるが、震源モデルの設定に依存しない被害予測にも意味があるのではないかと著者らは考えている。

東京都では東京都防災会議（総務局）の実施する震源を設定した地震被害想定⁴⁾とともに、都市整備局によって東京都震災条例に基づいた「地震に関する地域危険度測定調査」が5年ごとに実施されている。

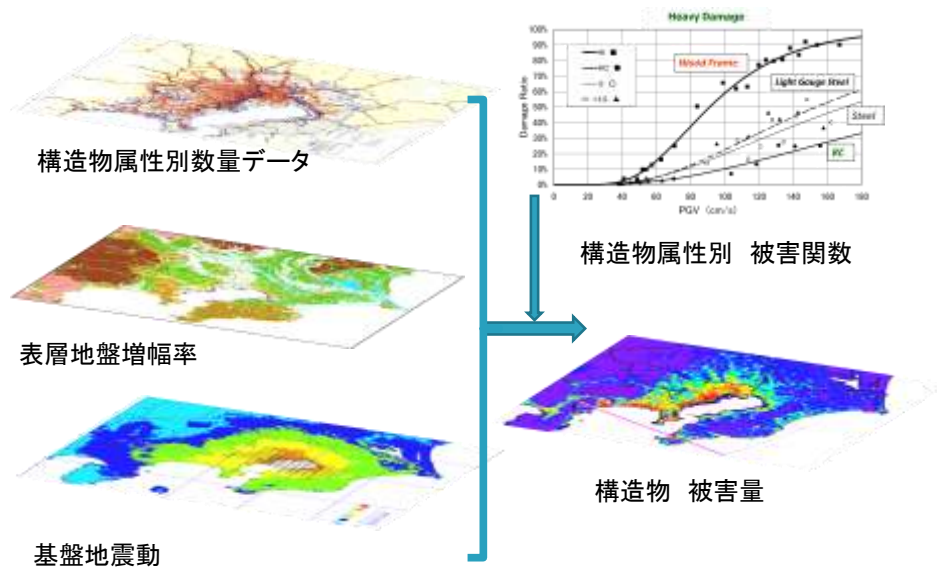


図1 地震被害予測の流れ

2013年に公表された第7回調査報告⁵⁾では、建物倒壊と火災出火・延焼の2つの危険度に加えて、地域の「災害時活動困難度」を考慮したこれらの危険度が、東京都全域の町丁目単位で提示されている。このうち「建物倒壊危険度」は、工学的基盤に一樣に最大速度30cm/sの地震動を設定し、これによる建物の震動および液状化による全壊率を相対的に評価するものである。被害想定との最大の違いは、地域危険度では震源をとくに設定しておらず、地震はどこでも起こり得るということを前提にしている点である。これにより、地震に対し相対的に脆弱な地区を抽出し、市街地整備の優先付けのための基礎データを提示するとともに、市民防災意識の向上のための資料として利用することを目的としている。現状では、このような震源を設定しない被害予測を実施しているのは東京都に限られているが、被害想定を補う役割も期待されるのではないかと考えている。

しかし東京都の地域危険度調査では、都独自の建物データや算出法が用いられているため、都市整備などによるデータ変更が必要な場合や、市街地性状の近い他の地域においての同様な危険度調査の実施は容易ではない。そこで本研究では、東京都の地域危険度調査データに基づき、建物倒壊危険度に影響の大きい要因を分析し、回帰分析による簡易な予測式を構築する。また、実際の調査結果と比較して、その精度と有効性を確かめる。この予測式によって、地域の建物被害を低減する方策が明らかとなり、市街地整備を行った際の効果の予測が容易となることが期待される。

2. 東京都による建物倒壊危険度の評価法

東京都の地震による地域危険度調査は、1975年に第一回調査（区部）を行って以来の歴史があり、5年ごとに調査結果を公表してきている。1993年公表の第3回調査までは、被害想定と同様の地域メッシュ単位での調査であったが、1998年公表の第4回調査より、住民に結果をより分かりやすくするために、測定・表示を町丁目単位で行うようになり、現在に至っている。以前は、避難や人的被害の危険度も推計していたこともあったが、2008年公表の第6回調査より、建物倒壊危険度と火災危険度の2つの指標と、それらを組み合わせた「総合危険度」を推計している。

建物倒壊危険度の推計手法は、被害想定との違いを出すために、専門家の判断による建物構造・年代種別による「危険性ウェイト」を設定し、それらの集計で行ったこともあったが、第5回調査以降はほぼ現在の方法で行われている。すなわち、工学的基盤に最大速度(PGV)が30cm/sの地震動入力を仮定し、これに地形分類に基づく最大速度の地盤増幅率⁶⁾を乗じ、地表面最大速度を町丁目で決定する。すなわち、都全域で地盤種別ごとに一定の地表面PGVが設定されている。地盤分類と地盤増幅率に関しては、東京ガスの超高密度地震計ネットワークSUPREME⁷⁾の記録なども参考に、図2に示すように逐次改良されてきた^{8),9)}。

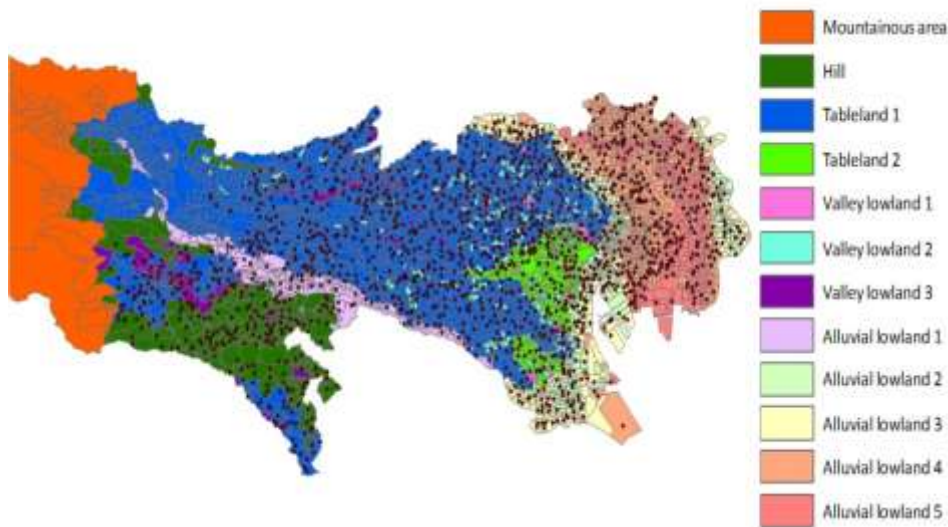


図2 東京都地域危険度に用いられている地盤分類と SUPREME 地震計位置⁸⁾

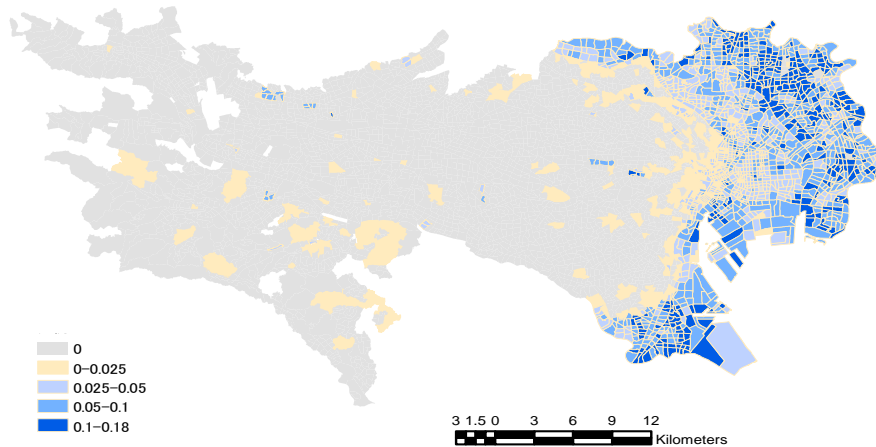


図3 東京都地域危険度に用いられている町丁目ごとの液状化面積率⁵⁾

建物被害推定は、1995年兵庫県南部地震における神戸市灘区における被害データの統計解析に基づく全壊に対する建物被害関数¹⁰⁾が基本的に使用されてきた。すなわち、町丁目*i*の地盤種別を*l*とすると、この町丁目に存在する建物構造・年代種別*k*の建物の全壊率 P_f^k は、以下で表される。

$$P_f^k(PGV_l) = \Phi((\ln PGV_l - \lambda_k) / \zeta_k) \quad (1)$$

ここで Φ は標準正規分布の確率分布関数、 λ_k と ζ_k は対数正規分布の2つのパラメータ（対数平均、対数標準偏差）である。また、 PGV_l は30cm/sにこの地盤種別の増幅率を乗じたものである。

この町丁目*i*に構造・年代種別*k*の建物が n_{ki} 棟存在するとすれば、ここにおける全壊棟数 N_i は次式で計算できる。

$$N_i = \sum_{k=1}^m n_{ki} \cdot P_f^k(PGV_l) \quad (2)$$

これは、震動による建物の全壊棟数を計算するものであるが、図3に示すような町丁目ごとの液状化面積率 ($r_{Liq} = 0 - 0.18$) がさらに考慮される。すなわち、町丁目内で建物が一様に分布し、液状化程度も均一と仮定して、液状化範囲 (r_{Liq}) では建物構造・年代別に支持杭の有無の割合で全壊率が規定され⁵⁾、非液状化範囲 ($1.0 - r_{Liq}$) では(2)式により被害が算定され、両者の合計が町丁目の被害棟数となる。このほか、多摩地区の大規模造成地の盛土と見なされる範囲に対し、1.2倍の地震動増率を考慮しているが、

地盤が良い地域であるため、最終的な危険度に与える影響は小さい。

東京都では、町丁目における全壊棟数 N_i をその町丁目の面積 a_i で割ったものを「建物倒壊危険量」 y_i と呼んでいる。

$$y_i = N_i / a_i \quad (3)$$

建物被害関数としては、構造・建築年代によって表1に示す14分類されたものを用いている。このうち、「その他」に関しては、最も耐震性の低い1970年以前の木造と同じ被害関数を設定しているため、以下の計算では1970年以前の木造に合算している。なお木造に関しては、新耐震基準になってから既に30年以上経過しており、実際、2007年新潟県中越沖地震による柏崎市の被害データからは、新耐震の中でも建築年代により被害率に差があることが示された¹¹⁾。したがって第7回調査より、木造に関しては、新耐震のものは10年ごとに3区分された。なお、この新耐震木造を3区分した被害関数は、内閣府の南海トラフ巨大地震²⁾および首都直下地震¹²⁾の被害想定でも採用されている。

建物倒壊危険量を5段階に区分したものが、「建物倒壊危険度」と呼ばれる最終的な相対評価である。

表1 東京都地域危険度における建物の構造・年代分類とそのパラメータ

構造種別	建築年代	λ_k	ζ_k	構造種別	建築年代	λ_k	ζ_k			
1	木造	-1970	4.45	0.342	8	RC	-1970	5.12	0.646	
		1971-1980	4.73	0.378			9	1971-1980	5.33	0.575
		1981-1990	5.12	0.496			10	1981-	6.00	0.789
		1991-2000	5.68	0.496	11	S	-1970	4.64	0.619	
2001-	6.13	0.496	12	1971-1980	4.97		0.490			
6	軽量S	-1980	5.82	0.972	13		1981-	5.64	0.731	
		1981-	6.19	1.101	14	その他	4.45	0.342		

3. 建物倒壊危険量の回帰分析による推定

本研究では、建物倒壊危険量の算出が、使用される建物データが変化した際や、他地域に対しても容易に適用できるように、回帰分析に基づく簡易推定を試みる。東京都内の市街化区域5,133町丁目を対象地域とし、東京都都市整備局より提供された、構造・建築年別の建物数、地盤増幅率、町丁目面積等の基礎データを用いて、重回帰分析により回帰式の構築を行う。回帰分析には目的変数を建物倒壊危険量(棟/ha)、説明変数には各町丁目における面積(ha)当たりの各構造・年代種別13個の建物密度(棟/ha)と地盤増幅率および液状化面積率(無次元量)を(4)式のように選択した。

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i \quad (m = 15) \quad (4)$$

ここで、 x_i は計15個の説明変数、 a_0 は回帰式の切片、 a_i は各説明変数に対する回帰係数である。

この15変数で回帰を行ったところ、いくつかの建物変数の係数に負の値が現れたが、建物密度の減少により倒壊危険量が増加することは現象として変である。負の係数となった原因は、項目間で高い影響を与え合う場合に起こる多重共線性の影響によるものと考えられる。また、液状化面積率と地盤増幅率の間でも多重共線性が見られた。液状化の発生は地盤の軟弱さに依存することから、増幅率が高い地域では液状化発生面積率も高くなるのが原因といえる。これらを解消するにあたって、危険量への影響が低い変数を外し、適切な回帰モデルの再構築を行った。その際の変数選択には赤池情報量規準¹³⁾の(5)式を用いた。

$$AIC = n \left(\ln \left(2\pi \frac{Se}{n} \right) + 1 \right) + 2(p + 2) \quad (5)$$

ここで、 n : データ数、 p : 説明変数の数、 Se : 残差平方和である。最終的に回帰に取り入れる変数とその係数を表2に示す。選択された8変数から成る回帰式によって危険量を算出し、横軸に建物全壊棟数密

度、縦軸に本手法による推定値と正解値（以下、東京都の公表した危険量を正解値と標記する）との比を計算し、両者の対応を図4に示す。この図より、正解値が小さい範囲においてばらつきが大きいものの、相関係数は0.897と高い値が得られ、危険量の比が概ね1.0に収束することから、回帰分析による推定の有効性が確認できた。しかし危険量の低い町丁目では、誤差が非常に大きいこと、および正解値が大きくなるにつれて危険量比が過小に推移する問題が指摘される。したがって回帰に用いた説明変数を詳細に分析することで、精度に影響を及ぼす要因を考察する必要がある。

表2 変数選択後の回帰分析結果

	説明変数	係数		説明変数	係数
1	木造-70,その他	0.28	6	S 71-80	0.47
2	木造 71-80	0.17	7	S 81-	0.08
3	木造 81-90	0.05	8	地盤増幅率	2.98
4	木造 01-	0.04		切片	-5.862
5	S -70	0.86			

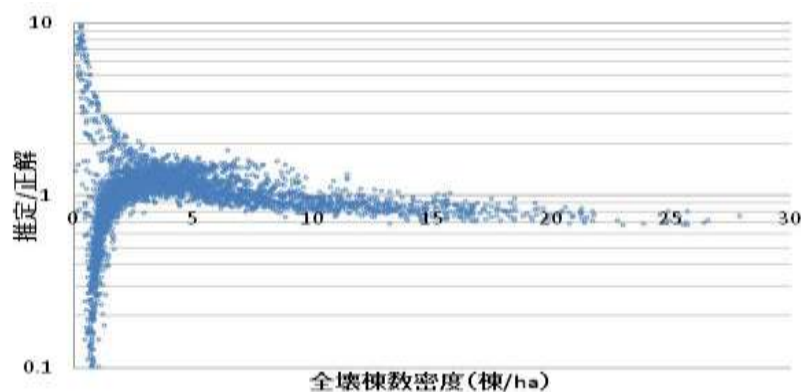


図4 正解と本手法の建物倒壊危険量の関係

4. 推定精度向上に向けた検討

4.1 建物特性

東京都の市街化区域内での構造・築年代別の建物棟数割合は、図5に示す通りである。木造建物が全体棟数の7割を占めていることから、推定式内においても木造が最も影響が大きいと考えられたが、前章の回帰結果に示す係数の値の通り、危険量への影響が高いのは木造およびS(鉄骨)造の棟数密度であることが明らかとなった。これは、構造区分の全壊率の高さに依存するものと考えられる。これらの影響が推定誤差の原因である可能性を考え、ばらつきの大きい地域での建物データを吟味したが、棟数密度に目立った特徴は見受けられなかった。したがって推定精度に建物特性が与える影響は小さいと考えられた。

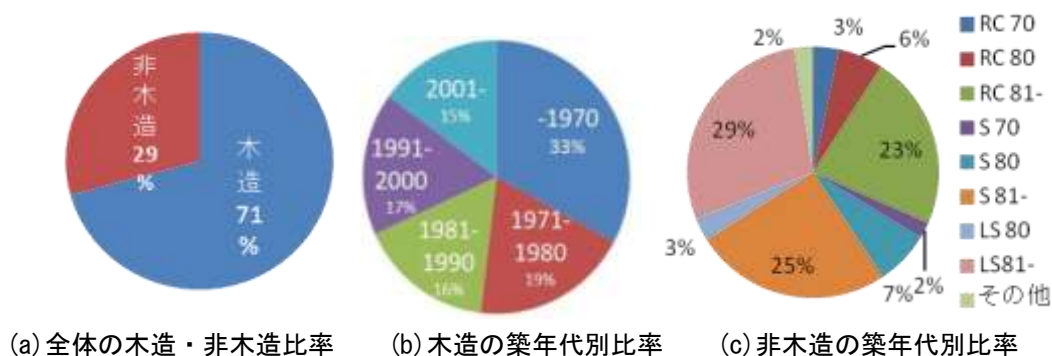


図5 東京都の建物分類別の棟数比率

4.2 地盤特性

地震発生時の地表面での揺れの大きさは、主として地盤の軟弱さによって決まり、地域危険度調査では地盤増幅率によって表層地盤の影響を定めている。回帰式に組み込まれている変数のうち地盤増幅率は12段階の無次元量で表され、町丁目ごとに1つの値を与えている。増幅率は揺れの大きさを支配するので、建物被害に大きく関係する。そこで増幅率ごとの危険量の推移を図6に示したところ、危険量のばらつきが増幅率によるものであることが明確となった。また、正解危険量の低い地域での過小・過大の傾向も、増幅率の大小によって2分されていることも分かる。この増幅率の大小によって地域を2つに分け、それぞれの回帰を行うことでより精度の高い推定式が得られることが期待される。

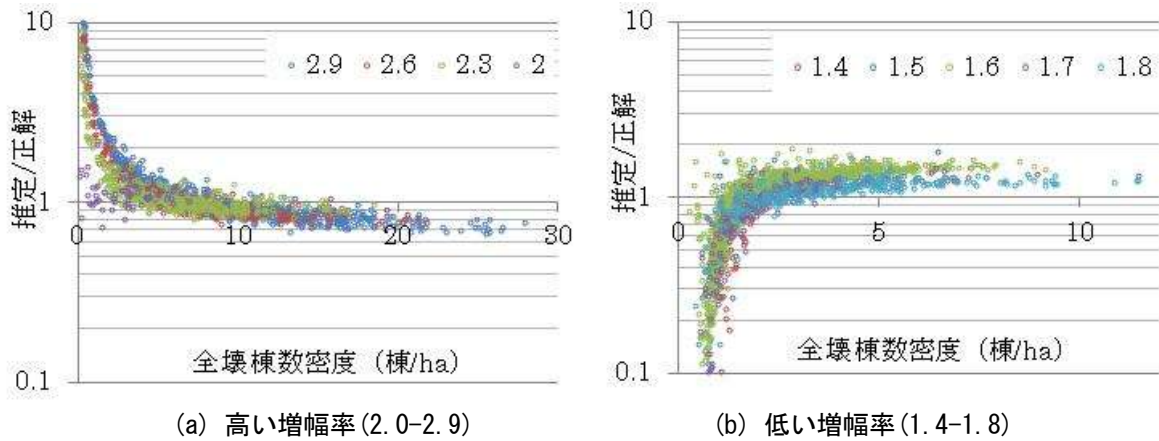


図6 地盤増幅率ごとに示す建物倒壊危険量

5. 地盤増幅率別の推定

都全体を地盤増幅率が 2.0-2.9 の地域(1,557 町丁目)と、1.0-1.8 の地域(3,576 町丁目)に 2 分し、各地域において前述の手順にならい推定を行う。高い増幅率を持つ地域を(A)、低い地域を(B)として、回帰分析によって得られた説明変数と回帰係数をそれぞれ表3に示す。また、推定危険量を正解と比較した(図7)。両地域においても依然、正解危険量の低い地域でのばらつきは大きい。都法危険量が増加するにつれて危険量比は1に収束していき、過小傾向が解消される結果となった。また、相関係数も高い増幅率で 0.981、低い増幅率でも 0.979 と高い値を示したため、精度の高い推定が行えたといえる。さらに、危険量の過大・過小の推移が増幅率別で顕著な傾向を示していることから、建物被害関数を固定した場合、建物倒壊危険量は地盤増幅率(すなわち地表面 PGV)に最も依存することが分かった。収束前の過小・過大の広がりについて、例えば 2.9 の地域を見ると、立ち上がりの部分で正解危険量が低いにも関わらず推定が過大評価されている。該当町丁目を調べたところ、地盤は軟弱であるが建物数が非常に少ない町丁目であることが分かった。一方、立ち上がり部で過小評価される地域の特徴としても建物数が少ないことが挙げられ、回帰式内の切片が負であることが影響し、過小推定が行われたと考えられる。

表3 地盤増幅率で2地域に区分した回帰分析結果

	説明変数	(A)	(B)		説明変数	(A)	(B)		説明変数	(A)	(B)
1	木造-70,その他	0.424	0.202	6	RC-70	0.193	0.041	11	S81-	0.121	0.021
2	木造 71-80	0.399	0.086	7	RC71-80	0.032	0.039	12	LS-80	-	0.034
3	木造 81-90	0.129	0.035	8	RC81-	0.013	0.017	13	地盤増幅率	3.478	1.463
4	木造 91-00	0.004	0.010	9	S-70	0.478	0.245	切片		-9.23	-9.23
5	木造 01-	0.001	0.003	10	S71-80	0.215	0.075				

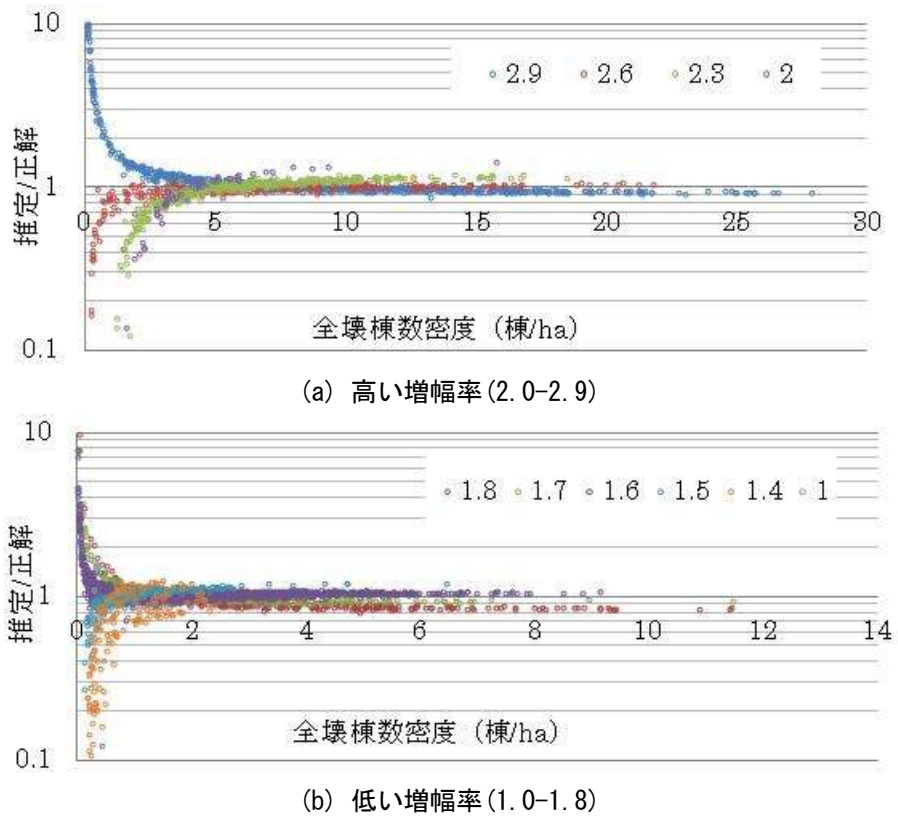


図7 地盤増幅率で2地域に区分した場合の正解と本手法での建物危険量の比

6. 危険度ランクによる評価

防災を目的とし、実際に住民に対して啓発を行う際には、危険量のような数値では相対的な危険性が分かりにくい。地域危険度調査では、危険量の高い順から町丁目に順位をつけ、その順位で5段階のランク付けがなされており、これにより自分の住む町が相対的にどの程度の危険性の順位なのかを意識づけることができる。本手法で推定した危険量も都の方法に従い、ランク付けを行うことで大枠での精度を評価した。増幅率の地域分けでのそれぞれの推定結果をまとめ、ランクによって色分類したものを図8(左)に示す。推定誤差の大きくなる地域は、危険度の最も低いランク1の町丁目にとどまっていることがわかる。さらにランクが上がるにつればらつきが収束していることから、危険度の高い地域の推定には十分な有効性があるといえる。

次に、図8(右)に示したランクごとのエラーマトリックスでは、危険度ランクの低い順に精度が高く、ランク5の地域でも83.3%と十分高い結果が得られた。ランクが低いほど精度が高いのは、低いランクに該当する町丁目数が多いことによる。全体としてのランクの総合精度では、92.7%と高い値を得た。

正解と本手法による危険度ランクの分布を図9に示す。両者を比較すると、ランクが大きく変動している地区はほとんどないことが伺える。また、ランク分布の傾向として、23区内において、木造住宅の密集する墨田区や江東区などのいわゆる下町に高い危険度の町丁目が集中し、反対に大きなビルの多い都心では、低い危険度であることが分かる。図10(左)は正解の建物倒壊危険量(全壊棟数)において占める構造種別の寄与率を示しており、木造建造物の年代の古い順に全壊数が大きくなっている。一方、図10(右)は本研究の推定法で求めた倒壊危険量における構造種別構成比を危険度ランク別に示している。危険度ランクの高い町丁目では、古い木造建物が大きな割合を占めており、よって全壊棟数密度が高くなったと考えられる。以上の検討より、本手法によって地盤増幅率と建物棟数密度で面積当たりの全壊建物数(建物倒壊危険量)をほぼ表現できたといえる。

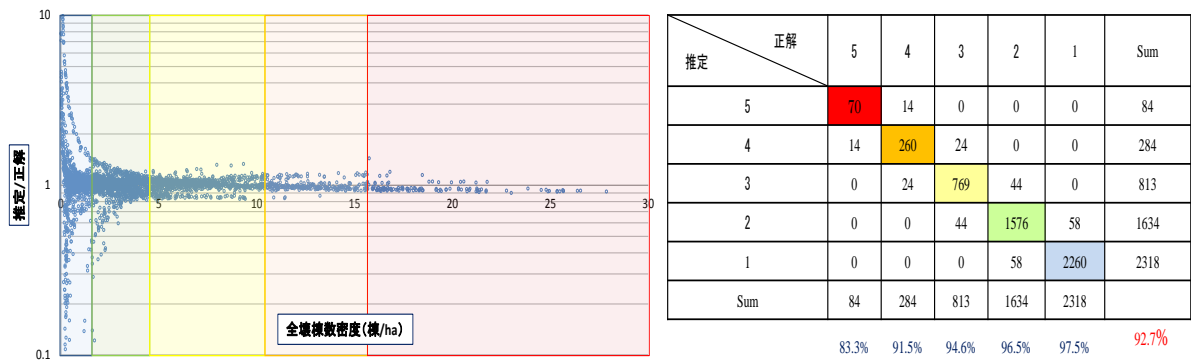
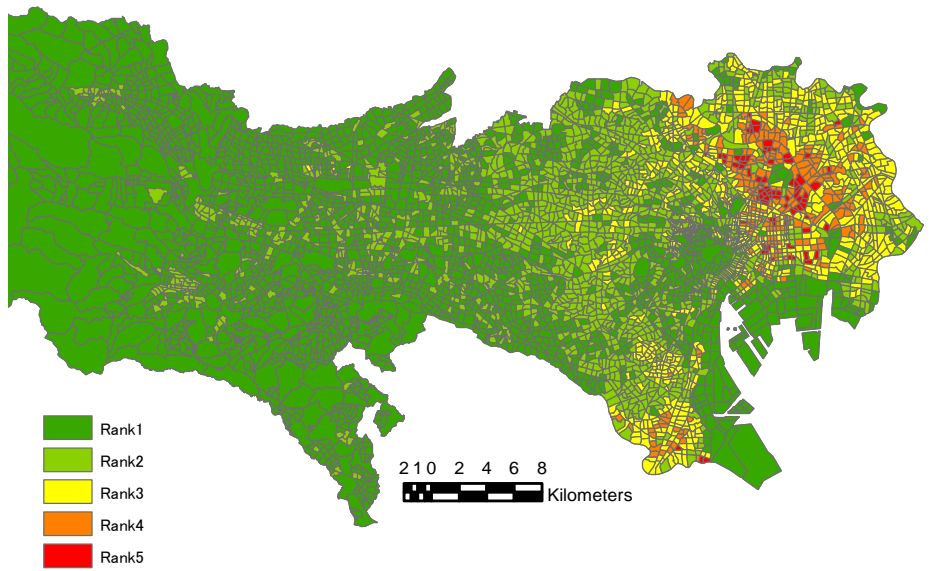
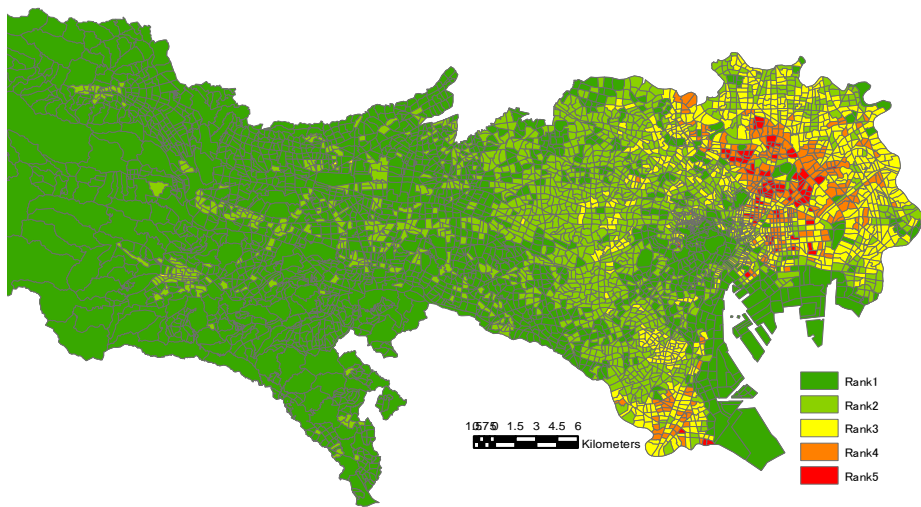


図8 推定結果のランク(左)とランク別のエラーマトリックス(右)



(a) 東京都の計算法



(b) 本手法の推定法

図9 建物倒壊危険度ランクの分布

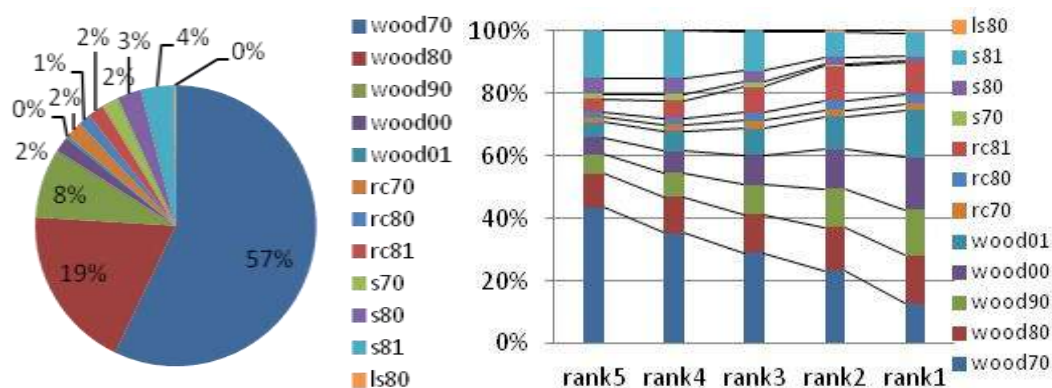


図10 正解危険量（全壊数）における建物種別の寄与率（左）と危険度ランク別の建物棟数の構成比（右）

8. まとめ

本研究では、東京都地域危険度調査のデータをもとに、町丁目を単位として簡易的な建物倒壊危険量を推定する方法を検討した。その結果、地震における面積当たりの全壊建物数（倒壊危険量）は、古い年代の建物密度と地盤増幅率が支配的であることが明らかとなり、回帰分析によって高い精度の推定が可能であることが示された。東京都全域を一括の回帰で推定した場合、危険量が高くなるにつれ過小推定の傾向が現れたが、地盤増幅率の値で町丁目を2グループに分け、各々で推定を行うことでこの傾向を解消することができた。建物被害関数を固定した場合、全壊率は地震動強さすなわち地盤増幅率の影響のみ受ける。また、面積当たりの全壊数は、建物種別ごとの棟数密度に支配される。したがって、地盤増幅率と建物棟数密度を与えれば、同じ被害関数に対する倒壊危険量を簡単に推定できるといえる。

危険度を5段階ランクで評価した結果からは、危険度ランクの高い地域では高い精度が得られ、建物倒壊の危険性のある地域抽出には十分な有用性が見込まれる。例えば、古い建物を建て替えると仮定した際に、これによってどの程度、リスクを低減できるかの予測などに役立てられる。したがって、膨大な量の計算に時間を費やさなくとも、市街地整備において取るべき施策の提示や、地震被害軽減策の立案に役立つものと期待している。

謝辞

本研究で使用した東京都地域危険度建物データ及び地盤データは、東京都都市整備局より提供して頂きました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中央防災会議 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会，日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震の被害想定について，2006。
http://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/pdf/houkokusiryou1.pdf
- 2) 中央防災会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告），2012。 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/20120829_higai.pdf
- 3) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告），2012。 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/1st_report.pdf
- 4) 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定（平成24年4月18日公表），2012。
<http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>
- 5) 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査報告書(第7回)，2013。
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm

- 6) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, 626/I-48, 1999, pp. 79-91.
- 7) 清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用: 土木学会論文集, No. 738/I-64, 2003, pp. 283-296.
- 8) 丸山喜久, 山崎文雄, 近年の地震観測記録に基づく東京都地盤分類ごとの増幅特性の評価: 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, Paper No. 288, 2006, pp. 1258-1261.
- 9) 丸山喜久, 伏岡里志, 山崎文雄: 東京都地域危険度測定調査における地盤増幅率の再評価, 地域安全学会論文集, No. 16, 2012, pp. 21-29.
- 10) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 2000, pp.189-196.
- 11) 長尾拓真, 山崎文雄: 2007年新潟県中越沖地震における柏崎市の建物被害分析, 地域安全学会論文集, No. 15, 2011, pp. 249-254.
- 12) 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ: 首都直下地震の被害想定と対策について (最終報告), 2012. http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_report.pdf
- 13) 坂本慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎: 情報量統計学, 共立出版株式会社, 1983.

Simplified Estimation Method for Building Damage due to Earthquakes

IWASE Saaya¹⁾, YAMAZAKI Fumio²⁾

1) Graduate Student, Department of Urban Environment Systems, Chiba University

2) Professor, Department of Urban Environment Systems, Chiba University

ABSTRACT

Tokyo Metropolitan Government (TMG) conducts a community-based seismic risk assessment for all the city-blocks of Tokyo Metropolis every five years. The 7th seismic risk assessment survey was carried out for two kinds of risk due to earthquakes: building damage due to strong shaking, and fire outbreak and spread. A bedrock motion with the peak ground velocity 30 cm/s was assumed uniformly for all the study areas and site amplification was considered based on topography and subsurface soil type. Building damage was evaluated using empirical vulnerability functions. In this paper, a statistical analysis was conducted for the result of the building damage assessment by the TMG. In the multiple regression analysis, the number of severely damaged buildings per unit area was considered as the dependent variable and several explanation variables were employed, such as the number of buildings for each structural type and construction period, the soil amplification factor. The regression analysis was conducted for all the 5,133 city-blocks of Tokyo Metropolis and an accurate prediction equation was derived.

Keywords: Earthquake damage estimation, Building damage, Seismic risk