

東京都地域危険度調査データに基づく 建物倒壊危険量の回帰分析

岩瀬早綾¹・山崎文雄²

¹非会員 千葉大学工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: x0t0259@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学大学院 工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

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

5年ごとに実施されている東京都地域危険度調査の第7回報告書が2013年9月に公表された。この調査で報告される危険度等の算出は都の独自データや方法が用いられているため、他の自治体で同様の危険度を出すことが難しい。そこで他地域での危険量算出の簡便化を目的として、地震における建物倒壊危険量と建物特性や地盤特性との相関分析を行い、この危険量を簡易的に推定する方法を検討した。その結果、町丁目別単位面積あたりの建物密度及び地盤特性を用いた危険量推定が有効であることが示された。さらに、液状化面積率を考慮した危険量に対しても相関分析を行い、より精度の高い推定法の検証を行った。

Key Words : *building collapse risk, earthquake damage estimation, building damage, Tokyo, GIS*

1. はじめに

わが国では地震が起きた際の防災体制の整備や住民への啓発のために、国や地方自治体において地震被害想定調査が行われている。東京都でも被害想定が実施されており、これはある特定の震源における地震の発生を仮定し、推定された地震動によって生じる被害を予測したものである。一方、東京都が実施している「地震に関する地域危険度測定調査」(第7回)^{1),2)}は被害想定とは異なり、特定の地震を想定せず、工学基盤に一樣な地震動を与えた際に生じる被害程度を測定したものである。発表された地域危険度測定調査報告に示される建物倒壊危険度は、地震動によって建物が全壊する割合を建物特性や地盤状況から評価し、単位面積当たりの被害数を危険量として、度合によって5段階に分類したものである。相対的に危険度を評価することで、地震に脆弱な地域を抽出し、市街地整備のための基礎データとして利用されている。しかしこの調査では都独自のデータや算出法が用いられているため、他地域での同様なデータ収集や危険度推定は容易でない。そこ

で本研究では東京都の建物棟数や地盤特性データを用いて、簡易的に建物の倒壊危険量を推定する手法の構築を試みる。

2. 東京都における建物倒壊危険度

東京都は東京都震災対策条例に基づき、地震に対する地域危険度調査を実施しているが、その一つに揺れによる建物倒壊危険度がある。これは工学的基盤に30kineの地震動を与えた場合に、各町丁目の単位面積当たりの建物全壊棟数を危険量として、この度合により5段階評価したものである。東京都の算出法により求められた建物倒壊危険量(図1)の高い地域は、木造密度の高い地域(図2)と地盤の軟弱さを示す増幅率の高い地域(図3)とが重なる範囲とほぼ一致する。このことから、建物倒壊(厳密には全壊)と木造建物密度及び地盤増幅度は密接な関係を持つことが伺える。ゆえに建物倒壊危険量を推定するにあたって、とくに木造建物密度と地盤状況を考慮するべきであると考えられる。

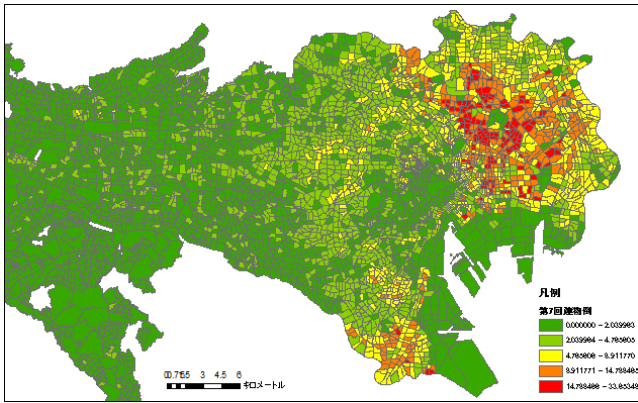


図1 建物倒壊危険量

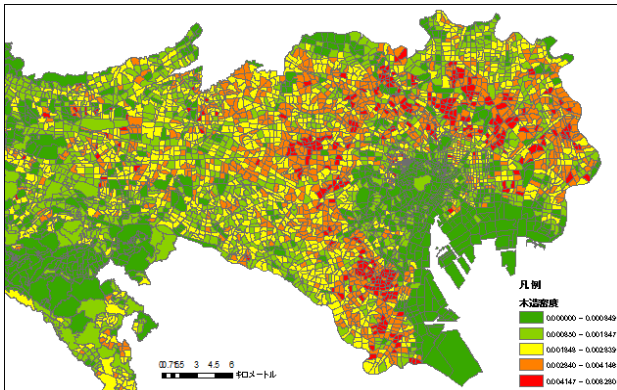


図2 木造建物密度

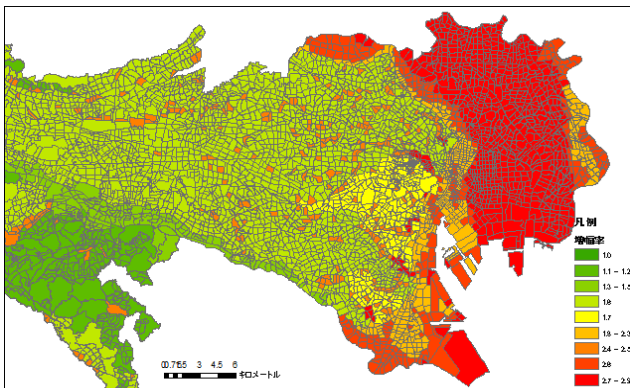


図3 地盤増幅率

3. 使用データと対象地域

本研究では調査単位を町丁目としており、第7回調査と前回の第6回調査では市町村名称の変更等があるため、最新の第7回調査データを用いた。危険量推定のもととなる地盤分類と地盤増幅率のデータ及び建物データは、東京都都市整備局より提供されたものを使用し、その属性には構造建築年別の建物数、液状化面積率、町丁目面積等のデータが含まれている。また詳細なデータが得られた東京都内の市街化区域の5133町丁目を対象地域とした。

4. 建物倒壊危険量の推定

以下では東京都の建物データ及び地盤特性データから、建物倒壊危険量を推定する手順を示す。

(1) 東京都の地盤特性と建物特性

東京都における地盤増幅率は「地表面の最大速度／工学基盤の最大速度」で表され、第7回調査では³⁾、地形や地質によって1.0～2.9の10分類である。図4に示す建物倒壊危険量と地盤増幅率の関係より、増幅率が高くなるほど危険量が増加することが明らかであるため、地盤増幅率を危険量推定式の説明変数の1つとして使用した。

建物データでは、東京都の建物区分が26分類されており、建物構造は木造、RC構造、S構造、軽量S構造、その他の5項目に分類され、構造の中でさらに建築年代によって最大5年代別に区分される。この5年代区分は、おもに耐震基準等の地震と建物に関わる法改正年代に沿った分類がなされており、各年代で揺れに対する脆弱性の差異が見られることから、年代区分を考慮することでより有効な推定値が得られるものと考えられる。

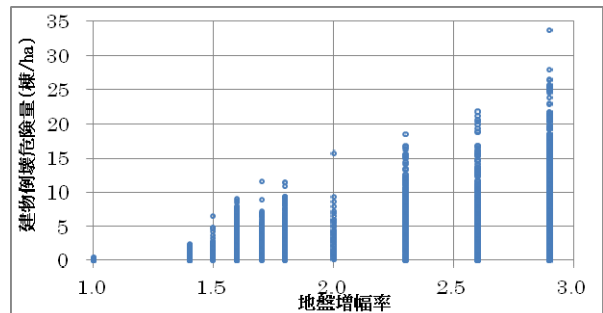


図4 建物倒壊危険量と地盤増幅率の関係

(2) 建物倒壊危険量の簡易推定法の構築

現在の東京都の倒壊危険量の推定手法は、村尾らの提案する手法⁴⁾のうち、建物強度のばらつき、すなわち建物被害関数だけを確率的に捉え、地震動は増幅率の基づいて確定的に与えている。また、第7回調査では、新耐震設計法の施行から30年を経過したことに鑑みて、長尾・山崎の検討結果⁵⁾に基づいて、木造建物に関しては1981年以降のものを10年ごとに区分した。

本検討では、この建物倒壊危険量の算定手法において、何が支配的な要因かをあきらかにし、かつ簡易な手法を模索することにした。回帰分析を用いて得られる回帰式に実データを入力することで推定値を算出する。回帰分析に用いる従属変数には、町丁目における各種別の建物密度と地盤増幅率を選択し

た。このうち木造建物については年代別に5区分、非木造建物については1区分にまとめて推定を行う。非木造建物を構造別に区分しない理由は、建物構造別の被害関数⁴⁾から、非木造建物の全壊率は木造のものとは比べると小さく、非木造建物を区別することの影響は少ないと考えられたからである。また東京都での全建物のうち約70%を木造建物が占めることから、これについても詳細に検討する必要があると考えた。

ここでは建物倒壊危険量を目的変数として重回帰分析を行った。求める回帰式は次のように表せる。

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (n = 8 : \text{建物・地盤分類}) \quad (1)$$

ここで、 a_0 ：回帰式の切片、 a_i ：各変数の回帰係数である。また各変数については表1の通りである。

表1 各変数の項目

説明変数	分類	
x_1	木造建物密度(棟/ha)	1970年以前
x_2		1971~1980年
x_3		1981~1990年
x_4		1991~2000年
x_5		2001年以降
x_7	非木造密度(棟/ha)	
x_8	地盤増幅率(無次元量)	

また建物密度の単位面積は各町丁目あたりの面積をhaで評価した。以上のパラメータを用いて分析を行い、得られた回帰係数を表2の(A)に示す。1981年以降の木造建物密度の係数が低い、決定係数 R^2 は0.878となり精度の高い回帰式が得られた。しかし、この結果が示す1981~2000年の木造建物密度の増加により倒壊危険量が減少する現象は考えにくい。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。

そこで、1981年以降の木造建物密度を1変数に集約することで多重共線性を解消できると考え、5要素の説明変数で同様に分析を行った。この結果から(B)の回帰係数が得られた。この式の相関係数も0.877とほぼ同値であったためあてはまり程度の良さは変わらない結果となった。しかし、一つにまとめた1981年以降の木造建物密度の項目の係数が負になるため、多重共線性が解消されていないことが分かる。そこで各項目間で単回帰分析を行ったところ、

1981年以降の木造建物密度と倒壊倒壊危険量の間の相関が低かったことから、この項目を外しても危険量への影響は少ないと考えられた。そこで1981年以降の木造建物密度の項目を除外した回帰式を求めた(C)。ここでは負の係数のない結果が得られた。前回帰式と同様に決定係数は0.877と推定精度の高さは維持されたため、この(C)を最終的な推定式として、各データ値を用いて推定危険量を算出した。また表2について、各回帰係数は表1で示す変数とそれぞれ対応する。

表2 推定式における回帰結果

		回帰式			
		(A)	(B)	(C)	
切片	a_0	-6.548	-6.574	-6.625	
回帰係数	a_1	0.357	0.357	0.357	
	a_2	0.180	0.174	0.162	
	a_3	a_6	-0.014	-0.007	-
	a_4		-0.048		
	a_5		0.042		
		a_7	0.027	0.027	0.027
		a_8	3.556	3.579	3.591
	決定係数	R^2	0.878	0.877	0.877

図5は東京都の建物倒壊危険量と推定式(C)から算出した危険量の関係を示したものである。決定係数は0.877と高いが、実際の危険量よりも推定量が小さくなるものと、逆に推定量が大きくなるものとの2つの傾向が表れた。これは、回帰式における影響の大きい地盤増幅率によるものと考えられる。建物密度と地盤増幅率から危険量を推定する方法は、決定係数の高さなどから有効性を確認することができるものの、地盤特性と建物倒壊危険量の関係についてさらなる検討が必要であるといえる。

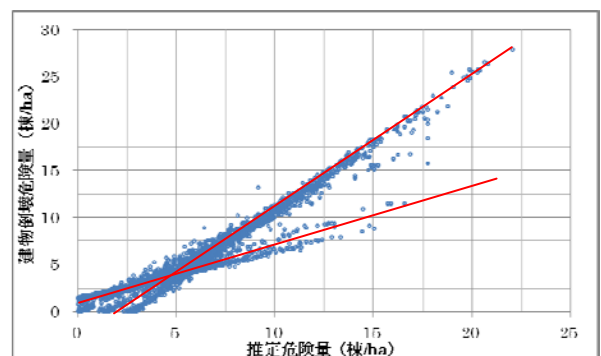


図5 倒壊危険量と推定危険量の関係

5. 液状化を考慮した危険量推定の検証

建物危険量は傾向に2分化傾向が見られるものの、

建物密度と地盤増幅率から、ある程度高い精度で推定できることが示された。しかし、地震が発生した際には地盤の液状化が起こることが懸念され、東京都の危険度評価においてもこの影響が考慮されている。そこで東京都の建物データに含まれている液状化面積データを回帰分析の項目に加えた検討を行うことにした。

液状化を考慮するにあたり、新たな要素に「液状化面積/町丁目面積」を液状化面積率として表し、説明変数に取り入れた。この液状化面積は、各町丁目で実際に液状化が起こると想定される面積を東京都の測定調査での結果から算出したものである。この面積率を(1)式の説明変数に加え、新たな5変数(表3)を用いて得られた回帰係数を表4の(D)に示す。

表3 液状化を考慮した各変数

説明変数	
x_1	1970年以前の木造建物密度
x_2	1971～1980年の木造建物密度
x_3	非木造建物密度
x_4	地盤増幅率
x_5	液状化面積率

単位は、 $x_1 \sim x_3$ は棟/ha、 $x_4 \sim x_5$ は無次元量である。この回帰式(D)の決定係数 R^2 は0.877となり、液状化の影響を考慮する前の(C)と推定精度に変化は見られない。これに各データを入力して得られた推定値と危険量で相関を取った結果(図6)も同様に、液状化の影響を考慮しない場合とほぼ変わらないことが示された。さらに回帰式内では、液状化面積率にかかる係数が負となる結果を得た。この原因として、地盤特性を表す地盤増幅率と液状化面積率の間で互いに影響を及ぼしあっていることが考えられるため、両者の関係(図7)を見た。すると地盤増幅率の大きさによって液状化面積率の値の違いが顕著に表れた。

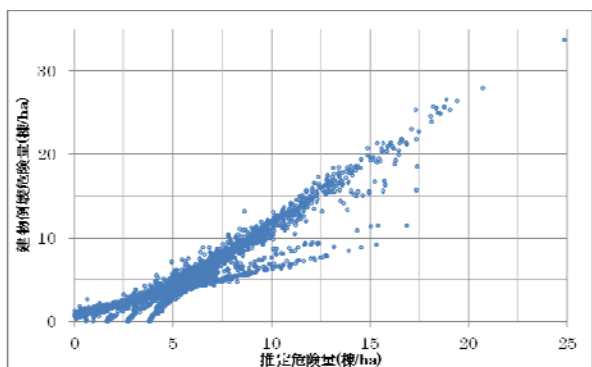


図6 倒壊危険量と液状化を考慮した推定危険量の関係

そこで互いの影響を除外するため、液状化面積率が0の地域とそうでない地域に分けて推定を行うこととした。液状化面積率の存在しない地域と存在しない地域ではそれぞれ3350町丁目、1783町丁目となった。より精度の高い推定値の算出のため、液状化面積のない地域と、液状化面積が存在する地域にデータを分離して、2地域ごとに回帰分析を行った。液状化を含む地域、含まない地域をそれぞれ表4(E)、(F)に示す。

表4 液状化を考慮した推定式における回帰結果

		回帰式			
		(D)	(E)	(F)	(G)
切片	a_0	-6.798	-9.791	-9.551	-2.678
回帰係数	a_1	0.356	0.417	0.420	0.211
	a_2	0.163	0.428	0.419	0.101
	a_3	0.027	0.094	0.095	0.025
	a_4	3.704	4.003	3.8111	1.775
	a_5	-1.702	-3.576	—	—
決定係数	R^2	0.877	0.945	0.944	0.968

液状化面積の有無により地域分けを行った場合でも、液状化面積を含む地域(E)での液状化面積率の係数が負となる結果が得られた。さらに負の値が大きくなった理由として、(図7)で示される通り、液状化面積を含む地域では地盤増幅率が高くなる傾向にあることから、液状化面積率を加えることによって両者間で影響を及ぼしあったものと考えられる。そこで同地域においても、液状化面積率を説明変数から除外して再度回帰を行い、得られた結果を表4(F)に示す。(E)、(F)間での決定係数の変化は見られないため、液状化面積を含む地域にて液状化面積率を除いても、問題ないことがわかる。

さらに、液状化面積を含まない地域(G)でも推定を行った。決定係数は(E)で0.944、(G)で0.968と非常に高い値を示し、液状化面積の有無でデータを区分して別々に回帰を行うことは、大いに有効であるといえる。

また、推定危険量/倒壊危険量を r と表し、この比の値と危険量の関係を図8に示す。図8(a)、(b)の両者とも実危険量の低い地域でばらつきが見られるものの、危険量が増加するにつれてほぼ1.0に収束している。さらにこの図を危険量の5段階ごとに色分けしたところ、値のばらつきは低い危険度の範囲内で収まっており、危険度の高い地域での建物倒壊を評価するには十分な推定結果が得られたと考える。

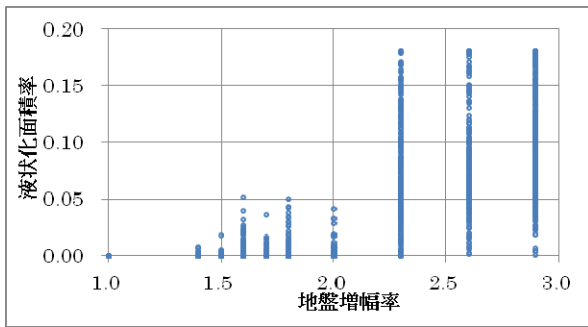
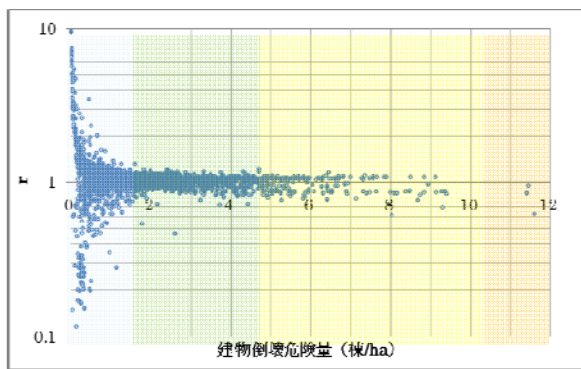
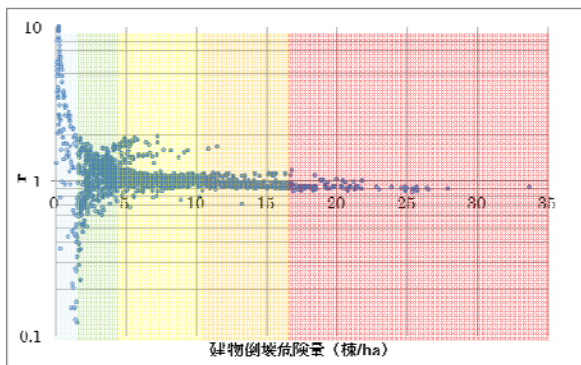


図7 液状化面積率と地盤増幅率の関係



(a) 液状化面積を含まない地域



(b) 液状化面積を含む地域

危険度 1: 2: 3: 4: 5:

図8 建物倒壊危険量と推定値の関係

6. 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提案した。その結果、地震における建物倒壊危険量は、町丁目面積を単位とした建物密度と地盤増幅率から高い精度での推定が可能であることがわかった。推定式の精度の向上のため回帰分析を行い、危険量に影響を及ぼさない項目を除外した結果、建築年の古い木造建物、非木造建物、地盤増幅率から最終的な精度の高い推定式を求めること

ができた。さらに、得られた推定式から倒壊危険量の予測値を算出し、正解との比較を行った結果、実測値と予測値の間には高い相関が得られたものの、多少ばらつきが見られたため更なる検討を行った。

推定回帰式を見ると、地盤増幅率が高い係数をもつことから地盤特性についての検討が必要であると考えた。そこで建物データから町丁目ごとに液状化面積率を算出し、推定式の要素に加えて再検討を行った。その結果、液状化面積の存在しない地域での液状化面積率の項目のない推定式の適用が最も良い相関を得られた。液状化面積の存在する地域においても、液状化面積率と地盤増幅度も間に高い相関性（多重共線性）が見られたため、液状化面積は説明変数には加えず、同じ推定式をこのデータに対しても適用した。

本検討では、東京都の実施している地域危険度調査の危険量を簡単なデータ解析で近似的に推定できないか検討した。その結果、地盤増幅度と古い建築年代の木造建物密度が支配的であることが示された。このような手法は、被害予測式や地盤増幅度などを変更した場合の結果の予測に有効と考えられる。また、危険量に支配的な要因を見出すことで、安全なまちづくりにおいて取るべき施策を明らかにすることができると考えている。

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) 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.
- 2) 東京都都市整備局：あなたのまちの地域危険度, 2013.
- 3) 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, pp. 21-29, 2012.3
- 4) 村尾修, 田中宏幸, 山崎文雄, 若松加寿江：兵庫県南部地震の被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第527号, pp.197-204, 2000.
- 4) 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, pp.189-196, 2000.
- 5) 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, pp. 249-254, 2011.

(2013.11.20受付)