

# 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

## NEW METHOD FOR BUILDING COLLAPSE RISK ASSESSMENT BASED ON DAMAGE DATA DUE TO THE 1995 HYOGOKEN-NANBU EARTHQUAKE

村尾 修\*, 田中宏幸\*\*, 山崎文雄\*\*\*, 若松加寿江\*\*\*\*  
Osamu MURAO, Hiroyuki TANAKA, Fumio YAMAZAKI and Kazue WAKAMATSU

Tokyo Metropolitan Government recently published "The Earthquake Area Vulnerability Assessment of Tokyo". It shows relatively dangerous zones in Tokyo. In this paper the method for building collapse risk used in this report was applied to the Nada Ward in Kobe City using building inventory before the 1995 Kobe Earthquake. The obtained "building collapse risk" was compared with the actual damage of the ward due to the earthquake and a revised method to evaluate "building collapse risk" was proposed. The new building collapse risk corresponds to the ratio of building collapse and it reflects the characteristics of buildings and grounds.

**Keywords:** building collapse risk, the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, building damage, Tokyo, Nada Ward, GIS

建物倒壊危険度, 兵庫県南部地震, 建物被害, 東京都, 灘区, 地理情報システム

### 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り, 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気運が高まっている。各自治体で行われている地震被害想定には様々な手法が存在する<sup>1)</sup>が, それらの多くは, ある地震の発生を仮定した上で地震動を推定し, 経験的な被害関数などから地震発生時の被害を予測するものである。東京都でも被害想定を実施しているが, 本研究で取り上げた「東京都地域危険度測定調査」(第4回)<sup>2)-4)</sup>は, これまでの被害想定とは違った角度から, 都内の地震に対する危険度を算定したものである。これは東京都が東京都震災予防条例に基づき, 5年ごとに実施している調査であり, その目的は, 「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」などである。地震が発生することを仮定して被害を予測するという点では, 被害想定も地域危険度評価も同じ性質のものであるが, 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ことを目的としているのに対し, 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という点で, その算定方法・考え方に違いがある。このため危険度の算出過程において, 特定の地震は考慮されておら

ず, 対象地域全体で震源位置に依らない地震動が仮定されており, 複雑な解析を必要とする被害想定に比べ, 比較的簡単な算定式と町丁目単位での地盤や建物のデータ等を用いて決定される。東京都による現行の手法は, 東京都の特性に合わせて分類された地盤や建物について, 専門家の判断に基づく危険性ウェイトが設定されており, 危険度を被害率ではなく被害総量という意味でとらえている。

本研究の目的は, 東京都地域危険度の中の建物倒壊危険度評価方法を検討し, モデルとしての簡易性を保ちつつ, より一般的な建物倒壊危険度評価法を提案することにある。そのために, ここでは東京都による手法を神戸市灘区に適用し, その結果求められた建物倒壊危険度と兵庫県南部地震により実際に発生した建物被害を比較する。さらに確率論的な概念も取り入れ, 地盤や構造物の地震に対する危険性ウェイトの設定方法を具体的に定義し, 新建物倒壊危険度の評価手法を提案する。

### 2. 東京都の建物倒壊危険度

東京都により発表された「建物倒壊危険度」<sup>2)-4)</sup>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割合を, 建物, 地盤などの面から評価し, 他地域と比較した相対的な危険の割合を単位面積当たりの被害総量という観点から5段階に分類したものである。建物倒壊危険度決定までの過程を図1に示す。

分類項目は表1の通りである。建物については, 構造別, 年代別,

\*東京大学生産技術研究所 助手・博士(工学)

\*\*東京大学大学院工学系研究科 大学院生

\*\*\*東京大学生産技術研究所 助教授・工博

\*\*\*\*東京大学生産技術研究所 研究員・工博

Research Assoc., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, M. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Engineering, University of Tokyo.

Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

Research Fellow, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

階数により20に分類し、「その他」を除く19分類に対して耐震性能を評価し、ウェイトとして算定式に反映させている。また建物倒壊に最も影響すると考えられている基礎地盤については、地震被害の発生しやすさの観点から地形・地質によって10種類に分類している。さらに地盤による影響を補完するために、液状化の可能性、大規模造成地、埋立地、急傾斜地の有無についても考慮されている。各ウェイトは6人の専門家により、0と1の間で危険なものほど0に近くなるよう6パターン設定されている。これらを基に、あるパターン  $n$  における建物ごとの倒壊危険量  $Q_{kn}$  は次のように算定される。

$$Q_{kn} = D_k (1 - W_{kn} \cdot U_{kn}) \quad (k=1-19: \text{建物分類}) \quad (1)$$

ここでパターン  $n$  ( $n=1-6$ ) における各パラメータは、それぞれ  $Q_{kn}$ : 建物ごとの倒壊危険量 (棟数/単位面積),  $D_k$ : 建物棟数密度 (棟数/単位面積),  $W_{kn}$ : 耐震性能ウェイト (無次元量),  $U_{kn}$ : 地盤特性ウェイト (無次元量) である。地盤特性ウェイト  $U_{kn}$  は次式により算定される。

$$U_{kn} = u_{1n} \cdot u_{2n} \cdot u_{3n} \cdot u_{4n} \cdot u_{5n} \quad (2)$$

パターン  $n$  におけるウェイトの各要素は、 $u_{1n}$ : 基礎地盤,  $u_{2n}$ : 液状化,  $u_{3n}$ : 大規模造成地,  $u_{4n}$ : 埋立地,  $u_{5n}$ : 急傾斜地である。

上記の建物ごとの倒壊危険量  $Q_{kn}$  を次式のように合算したものが、パターン  $n$  における町丁目の建物倒壊危険量  $Q_{in}$  となる。

$$Q_{in} = \sum_{k=1}^m Q_{kn} \quad (m=19: \text{建物分類数}) \quad (3)$$

(1), (2) 式により算出した6種のパターン ( $n=1-6$ ) ごとの建物倒壊危険量  $Q_{in}$  を標準偏差の3倍で除して規準化し、平均したものが最終的な建物倒壊危険量  $Q_i$  (無次元量) となる (以下、この  $Q_i$  を建物倒壊危険量と呼ぶこととする)。そして建物倒壊危険度  $Q$  は、 $Q_i$  を大きいものから順に5段階に割り当てたものである。

各ウェイトの設定基準<sup>2)</sup>は、過去の地震被害事例および耐震基準改正の時期等が考慮されているが、それぞれの専門家のウェイトを比較してみると、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が窺える。東京都の建物倒壊危険度は、被害率ではなく被害総量という意味でとらえているため、建物棟数密度が建物倒壊危険量算定に最も影響を与えており、区部 (平均建物棟数密度 3,460 棟/km<sup>2</sup>) の建物倒壊危険度が多摩地区 (平均建物棟数密度 830 棟/km<sup>2</sup>) と比較して圧倒的に高くなっている。本研究では東京都の方法とは別の観点から、一棟一棟の建物の特性とそれが立地している地盤に起因する建物倒壊危険度について検討する。

### 3. 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

#### (1) 灘区の建物特性と地盤特性

東京都の方法を用いて、灘区の353町丁目についてそれぞれの地盤特性と建物を分類した。ただし北部山麓部は図中省略している。

建物の分類にあたっては、兵庫県南部地震の直後に行った神戸市による建物被害調査データ<sup>5)</sup>を使用した。灘区における木造、RC造、S造、軽量S造の割合は、それぞれ74.6%、12.7%、7.0%、4.2%となっており、木造建物の比率が全体の3/4を占めている。木造建物の中では、住宅、店舗併用住宅の割合がそれぞれ92.7%、7.3%で、圧倒的に住宅の割合が高い。各町丁目の面積は、町丁目ごとの統計資料が入手できなかったため、GISの機能を用いて算出した。以上の結果得られた建物棟数密度分布を図2に示す。

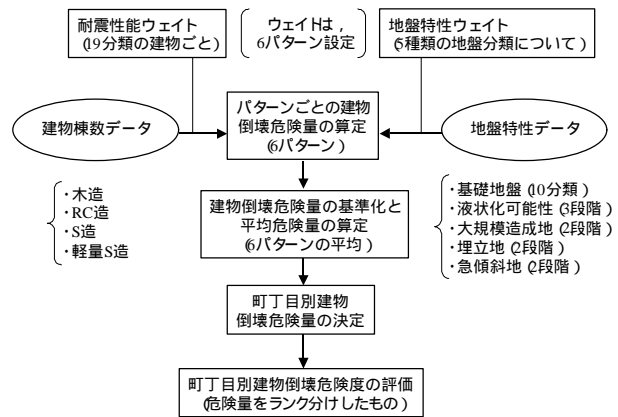


図1 東京都の建物倒壊危険度決定までのフロー

表1 東京都の建物倒壊危険度評価における建物・基礎地盤分類項目

| 分類番号 | 構造  | 種類              | 分類番号     | 基礎地盤分類   | 地形・地質の特徴 |                        |                      |
|------|-----|-----------------|----------|----------|----------|------------------------|----------------------|
| 1    | 木造  | 住宅              | 昭和45年以前  | 1        | 山地・丘陵    | 山地及び丘陵地                |                      |
| 2    |     |                 | 昭和46年以降  |          |          |                        |                      |
| 3    |     | 店舗・併用住宅         | 昭和45年以前  | 2        | 台地1      | 河成礫層の上に関東ローム層をのせる台地    |                      |
| 4    |     |                 | 昭和46年以降  |          |          |                        |                      |
| 5    | RC造 | 1~3F            | 昭和45年以前  | 3        | 台地2      | 海成粘土・砂層の上に関東ローム層をのせる台地 |                      |
| 6    |     |                 | 昭和46~55年 |          |          |                        |                      |
| 7    |     | 4~7F            | 昭和56年以降  | 4        | 谷底低地1    | 軟弱な堆積層の厚さが10m程度未満      |                      |
| 8    |     |                 | 昭和45年以前  |          |          |                        |                      |
| 9    |     | 8F以上            | 昭和46~55年 | 5        | 谷底低地2    | 軟弱な堆積層の厚さが10m程度未満      |                      |
| 10   |     |                 | 昭和56年以降  |          |          |                        |                      |
| 11   |     | 1~5F            | 6F以上     | 昭和45年以前  | 7        | 沖積面1                   | 軟弱な堆積層の厚さが10m程度未満    |
| 12   |     |                 |          | 昭和46~55年 |          |                        |                      |
| 13   |     | S造              | 6F以上     | 昭和56年以降  | 8        | 沖積面3                   | 軟弱な堆積層の厚さが10m以上25m未満 |
| 14   |     |                 |          | 昭和55年以前  |          |                        |                      |
| 15   | 軽S造 |                 | 昭和56年以降  | 9        | 沖積面4     | 軟弱な堆積層の厚さが25m以上40m未満   |                      |
| 16   |     |                 | 昭和55年以前  |          |          |                        |                      |
| 17   | その他 | (石造, ブロック造, 土蔵) |          | 10       | 沖積面5     | 軟弱な堆積層の厚さが40m以上        |                      |
| 18   |     |                 |          |          |          |                        |                      |
| 19   |     |                 |          |          |          |                        |                      |
| 20   |     |                 |          |          |          |                        |                      |

地盤に関しては東京都と灘区とは本質的に異なる。そのため地盤を分類するにあたり、山地、台地、沖積面などの微地形分類は土地条件図等<sup>6)-8)</sup>により判断し、また軟弱な堆積層の厚さは、神戸の地盤のボーリング柱状図<sup>9)</sup>に基づき、砂・礫層ではN値10以下、粘土層ではN値4以下の地層を軟弱層とみなして算定した。

図3、図4に灘区の地盤特性分類の例を示す。東京都の方法では基礎地盤が10種類に分類されているが、「灘区には谷底低地の項目に当てはまる町丁目がない」、「東京都には『軟弱な堆積層が10mを超える沖積面』が存在するのに対し、灘区の大部分の地域では軟弱地盤が10m以下であり、町丁目単位で見えた場合、軟弱な堆積層が10m以上という項目(沖積面3, 4, 5)に当てはまる地域がない」などの理由により、5種類の分類となった。その中で六甲山町、摩耶山町等、「山地・丘陵」と分類された山麓地区を省略したものを図3に示す。液状化可能性については、兵庫県南部地震によって実際に液状化が発生した地区<sup>8)</sup>を液状化可能性大として判定した。それ以外の地区では大規模な液状化は起こらなかったため、全て液状化可能性なしと判定した。大規模造成地の分類(図4)においては、「人工地形」が町丁目の50%を占めるか否かで判定した。埋立地、急傾斜地についても土地条件図<sup>6), 7)</sup>により分類したが、急傾斜地の分類は、「極急斜面」の存在の有無で判定した。また埋立地は灘区において液状化可能性のある地区と合致した。

#### (2) 灘区の建物倒壊危険度

(1)のように建物・地盤を分類集計し、東京都の算定式に適用した結果、灘区内の各町丁目における建物倒壊危険量が算出された。灘

区の建物倒壊危険量は平均的に見て東京都の建物倒壊危険量よりもう少し高い程度であった。算出された建物倒壊危険量を5段階にランク分けした建物倒壊危険度を図5に示す。比率割当は、実被害と容易に比較できるように全壊率の20%間隔に分類される町丁目の数に合わせた。例えば、全壊率80-100%の町丁目数と建物倒壊危険度5の町丁目数が同数となっている。

建物倒壊危険度の分布は非常に疎らなものになっており、建物倒壊危険度1の町丁目と建物倒壊危険度5の町丁目隣り合っている個所が随所に見られる。また、図中北西部(王子公園駅東側一帯)に建物倒壊危険度5の地域が多く集中しているが、これは建物棟数密度の高い地域(図2)と一致する。液状化可能性の高い臨海部の埋立地域では建物倒壊危険度が1となっているが、これは当該地域の建物がその広さに比べて少ないためである。建物倒壊危険度1の町丁目は、その他に北部の丘陵地帯にも広がっている。

### (3) 兵庫県南部地震による灘区の被害概要と地震動の推定

灘区では、兵庫県南部地震によって死者933人、火災総数22件が発生した<sup>10)</sup>。またこれまでにやってきた分析<sup>5)</sup>によれば、全焼建物が474棟、全壊建物が13,196棟、半壊建物が6,053棟、その他の建物が11,257棟であった。特に、過半数の木造建物が全壊しており、全木造建物の74%が全半壊の判定を受けている。また木造建物は灘区における全建物の75%を占めているため、木造建物の被害率は、灘区全体の被害率に多大な影響を与えている。

過去に建物被害から推定した灘区の最大速度(PGV)分布<sup>11)、12)</sup>を図6に示す。この分布は、翠川・藤本<sup>13)</sup>が墓石の転倒から推定した最大速度分布とも類似しているものである。兵庫県南部地震において震度7の帯<sup>14)</sup>と呼ばれている阪急電鉄神戸線とJR線に挟まれた地域で、一様に地震動が大きくなっているのが確認できる。また町丁目単位でまとめた建物の全壊率分布<sup>5)</sup>(図7)から、震度7の帯に沿って、被害が顕著に表れていることがわかる。全壊率20%以上の町丁目のほとんどは、阪急電鉄神戸線以南に集まっており、同線の北側では、ほとんど被害がなかった。

### (4) 建物倒壊危険度と実被害との比較

ここでは、(2)で得た東京都の方法による灘区の建物倒壊危険度と兵庫県南部地震による実被害とを比較する。図5と図7を比較すると、実被害が大きかった震度7の帯内でも建物倒壊危険度の小さい地域が多数存在し、また北西部(王子公園駅東側一帯)には実被害が少ないにもかかわらず建物倒壊危険度の大きい地域がある。

東京都の方法による建物倒壊危険度は第3回調査<sup>15)</sup>と同様に被害総量を見積もったものと考えられるため、そのような観点から、建物倒壊危険量と実被害の比較を数行的に行ったものを図8に示す。縦軸には建物倒壊危険量、横軸は建物倒壊危険量に対応した値として、全壊および全半壊建物棟数密度(町丁目内の建物被害棟数/町丁目の面積)をとっている。またPGVの大きさに応じて図中のシンボルを区別して示している。全体的に見て全壊建物( $R^2=0.292$ )よ

1km<sup>2</sup>あたりの建物棟数

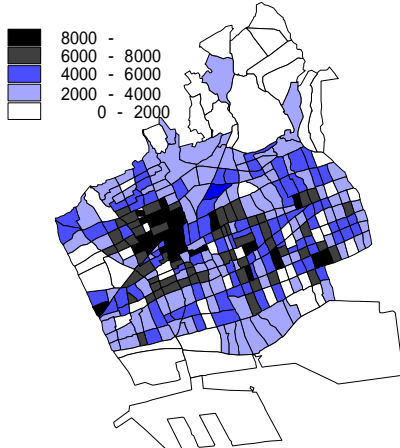


図2 灘区の建物棟数密度分布

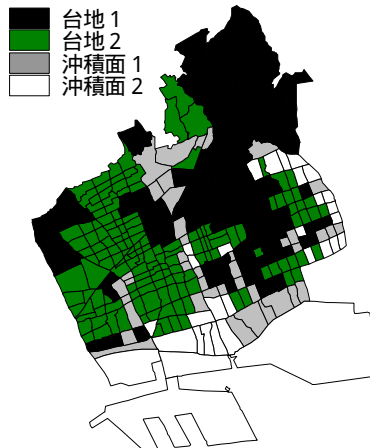


図3 灘区の基礎地盤分類

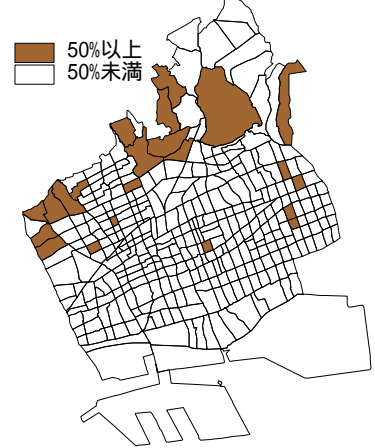


図4 灘区の大規模造成地占有率

建物倒壊危険度

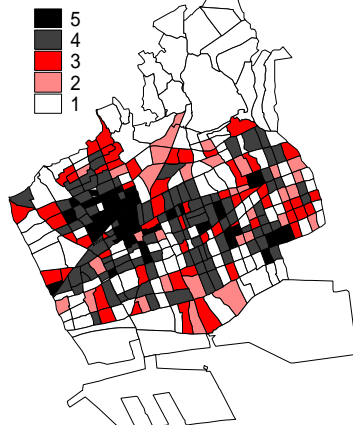


図5 灘区の建物倒壊危険度

PGV (cm/s)

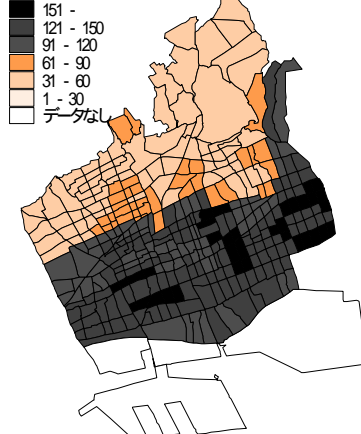


図6 灘区の町丁目単位の推定 PGV

全壊率

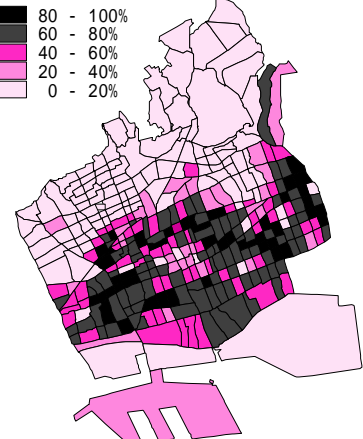


図7 灘区の建物全壊率

りも全半壊建物 ( $R^2=0.765$ )の方が相関が高くなっていることがわかる。全壊建物との関係を見ると、PGVの弱いものほど分布の傾きが急になっている。つまり小さな被害に対して大きな建物倒壊危険量が見積もられていることであり、同じ建物倒壊危険量でもPGVが大きい方が実被害は大きかったということを示している。

兵庫県南部地震の際には、建物倒壊により多くの死者が発生し、それらは火災など2次災害の原因にもなっていた。被災ポテンシャルとしての建物倒壊危険度は、全壊率に対応するものであることが望ましいと考えられる。ここで、図9に、全壊率と建物倒壊危険量との比較を示す。ここでもPGVについてシンボルを変えて示している。これを見る限り、全壊率と建物倒壊危険量との間に明確な相関は見られない。しかしPGVの大きさに応じて分布の特徴が見られる。これは推定された地震動<sup>12)</sup>が、建物被害率に基づいているため、PGVと全壊率の相関が強くなっているためである。

一方、図8、図9と同様の図を用いて、基礎地盤に関する分布の相関も調べてみたが、関係性が認められなかった。

(2)で建物倒壊危険度5の集中している地域が、建物棟数密度の高い地域と類似していることを述べた。建物倒壊危険量と基礎地盤の間に明確な相関がないことから、建物倒壊危険量が建物棟数密度を主因として決定されていることがわかる。これは建物棟数密度と建物倒壊危険量とを比較した図10からも明らかである。前節において、東京都の建物倒壊危険度算定における建物密度の影響を指摘したが、灘区においては更に顕著であると思われる。その理由として、台地1,2、沖積面1,2で設定された地盤特性ウェイトには大差がなく、式(1)における建物棟数密度 $D_k$ の寄与度が著しく高くなってしまっ

たことが考えられる。そのため、図11に示したように建物棟数密度と実際の全壊率の間には、相関が見られない。したがって全壊率に対応する指標として建物倒壊危険度を考えるとき、建物棟数密度の影響を取り除く必要がある。ある町丁目において全壊率が高いということは、地震動入力を一定と考えた場合、その町丁目内の地盤条件を含めた建物の倒壊可能性が高いということである。行政が震災対策事業によって改善すべき地域を選択する場合に、全壊率に対応した指標を用いることが出来ればより有効であると思われる。次節では、以上のことを踏まえた評価法として、東京都の建物倒壊危険度評価法の簡易性を保ちながらも、建物棟数密度の影響を取り除き、確率論的な概念に基づくウェイト設定を用いた、より実被害に適合する評価法を提案する。

#### 4. 実被害データに基づく新建物倒壊危険度評価法の提案

##### (1) 建物存在率とマトリクスタイプのウェイト設定

ここでは、危険度を実被害における全壊率に対応するものとして評価する。建物特性と地盤特性に関する実被害データに基づくウェイトを設定する、の2点について検討し、新建物倒壊危険度評価法について提案する。

まず、東京都建物倒壊危険度に関する式(1)において、「 $D_k$ : 建物棟数密度」を「 $N_k$ : 建物存在比率」とする(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)式のように、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

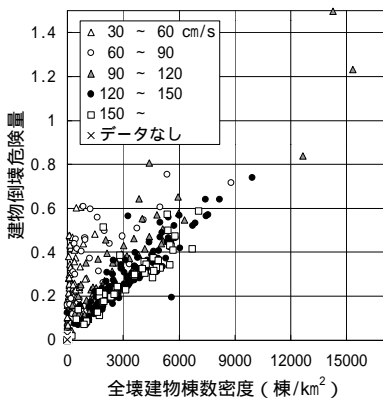


図8 全壊・全半壊建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較

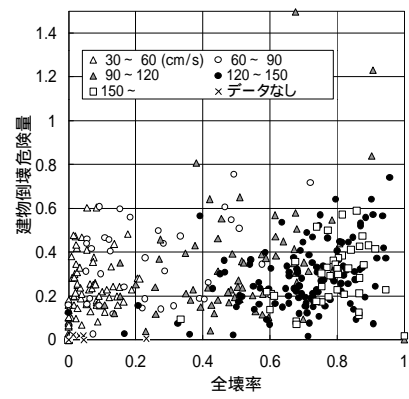
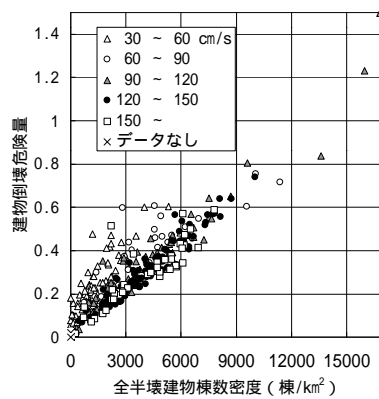


図9 全壊率と建物倒壊危険量の比較

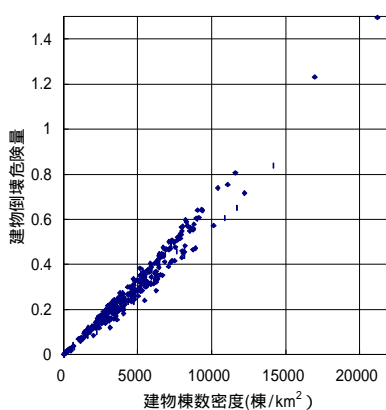


図10 建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較

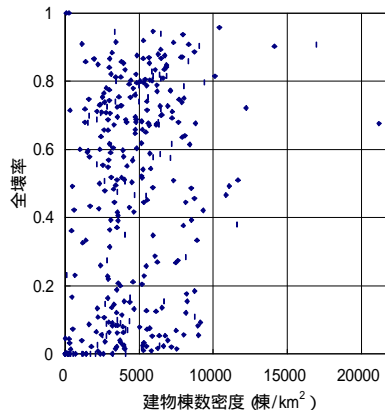


図11 建物棟数密度と全壊率の比較

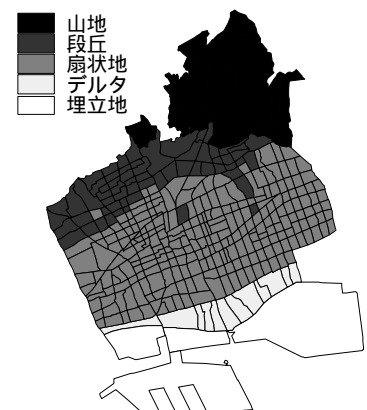


図12 灘区の地盤分類

るが、まずは、その有効性について検討する。

建物耐震特性は、これまでに構築した建物被害関数<sup>16)</sup>に基づき、構造・建築年代から分類している。また地盤分類については、灘区の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<sup>17), 18)</sup>と同様に、土地条件図<sup>6), 7)</sup>ボーリング柱状図<sup>9)</sup>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12)。ただし、臨海部の埋立地4町丁目に関しては大規模な液状化が発生し、それらが建物被害に大きな影響を与えているため、対象地域から外してある。

表2は、各地盤・建物の分類項目ごとの建物全壊率と規準化数値を示したものである。規準化数値とは、1982-94年に建造されたRC造建物の全壊率を1.0として、各項目で、被害を受ける確率の比率がどれ位かということを表している。建物分類項目ごとに地盤項目を比較すると、それぞれ規準化数値の変動が大きく、地盤による全壊率の影響は一定ではない。これは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を示している。

したがって、ここでは表2の全壊率をマトリクスタイプの地震危険性ウェイトとして取り扱う。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。なお、ここで設定した危険性ウェイトは兵庫県南部地震の経験に基づいており、この地震による地震動分布や阪神地域の建物特性の影響を含んでいる。

(2) 新建物倒壊危険度

新たな指標は表2の全壊率を危険性ウェイトとして扱っており、

表2 分類項目ごとの建物全壊率(%)と規準化数値

| 分類  |         |    | 山地   |       | 段丘   |       | 扇状地  |       | デルタ  |       |
|-----|---------|----|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|     | 年代      | 番号 | 全壊率  | 規準化数値 | 全壊率  | 規準化数値 | 全壊率  | 規準化数値 | 全壊率  | 規準化数値 |
| 木造  | -1951   | 1  | 0.9  | 1.9   | 19.6 | 19.7  | 76.0 | 11.2  | 87.8 | 10.1  |
|     | 1952-61 | 2  | 20.1 | 40.7  | 12.5 | 12.5  | 76.9 | 11.3  | 77.1 | 8.9   |
|     | 1962-71 | 3  | 11.0 | 22.4  | 11.1 | 11.1  | 74.0 | 10.9  | 79.4 | 9.1   |
|     | 1972-81 | 4  | 8.0  | 16.2  | 4.1  | 4.1   | 50.2 | 7.4   | 48.9 | 5.6   |
|     | 1982-94 | 5  | 3.8  | 7.6   | 0.8  | 0.8   | 24.2 | 3.6   | 26.2 | 3.0   |
| RC造 | -1971   | 6  | 1.7  | 3.5   | 6.0  | 6.0   | 29.5 | 4.3   | 29.0 | 3.3   |
|     | 1972-81 | 7  | 2.6  | 5.3   | 1.2  | 1.2   | 17.5 | 2.6   | 31.3 | 3.6   |
|     | 1982-94 | 8  | 0.5  | 1.0   | 1.0  | 1.0   | 6.8  | 1.0   | 8.7  | 1.0   |
| S造  | -1971   | 9  | 5.7  | 11.6  | 5.7  | 5.7   | 54.2 | 8.0   | 40.0 | 4.6   |
|     | 1972-81 | 10 | 0.0  | 0.0   | 6.7  | 6.7   | 41.5 | 6.1   | 18.6 | 2.1   |
|     | 1982-94 | 11 | 0.0  | 0.0   | 2.6  | 2.6   | 13.7 | 2.0   | 13.1 | 1.5   |
| 軽S造 | -1971   | 12 | 2.9  | 5.9   | 3.7  | 3.7   | 62.5 | 9.2   | 50.0 | 5.7   |
|     | 1972-81 | 13 | 1.7  | 3.4   | 4.3  | 4.3   | 15.4 | 2.3   | 10.0 | 1.1   |
|     | 1982-94 | 14 | 1.2  | 2.5   | 0.9  | 0.9   | 8.4  | 1.2   | 14.3 | 1.6   |

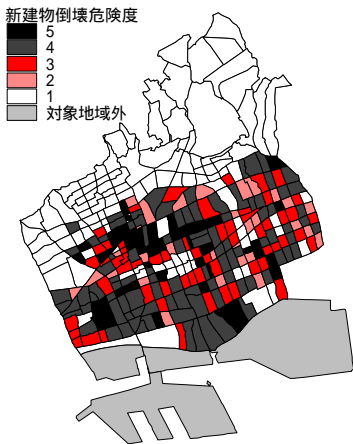


図13 灘区の新建物倒壊危険度

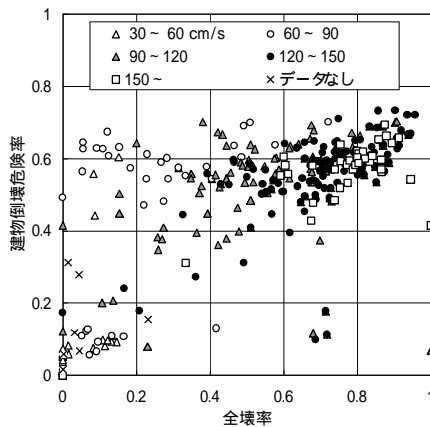


図14 全壊率と建物倒壊危険率との比較

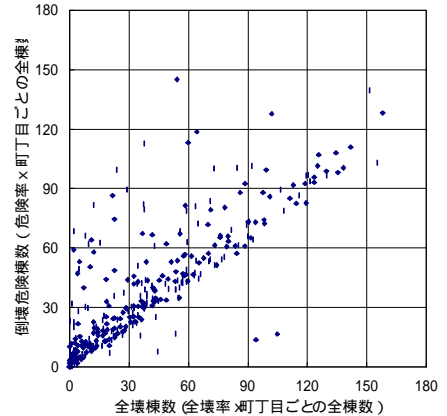


図15 全壊棟数と新建物危険棟数との比較

東京都の用いた「危険量」よりも「危険率」の方が名称として適切であると考え、下記のように建物ごとの倒壊危険率  $P_k$  を定義する。

$$P_k = N_k \cdot W_{ki} \quad (k=1-14: \text{建物分類}, i=1-4: \text{地盤分類}) \quad (4)$$

ここで、 $P_k$  : 建物ごとの倒壊危険率(%)、 $N_k$  : 建物存在比率(%),  $W_{ki}$  : 危険性ウェイト(%)である。

このようにして各町丁目内の地盤・建物に応じた建物ごとの倒壊危険率  $P_k$  が求まり、それら全種の建物ごとの倒壊危険率を次式によって合算したものが各町丁目における建物倒壊危険率  $P_i$  となる。

$$P_i = \sum_{k=1}^m P_k \quad (m=14: \text{建物分類数}) \quad (5)$$

新建物倒壊危険度  $P$  は、(5)式により求められた町丁目ごとの新建物倒壊危険率  $P_i$  を大きいものから順に5段階に割り当てられたものである。算出された灘区の建物倒壊危険率を前節(2)の比率割当に従ってランク分けし、新建物倒壊危険度として表したものが図13である。東京都の方法による建物倒壊危険度(図5)と比較してみると、危険度の高い地域が比較的南側へ移動した。

(3) 新建物倒壊危険度と実被害との比較

新しく算出された町丁目ごとの建物倒壊危険率と全壊率の関係を、PGVの大きさによってシンボルを区分し、図14に示す。PGVの比較的小さかった町丁目では、全壊率よりも建物倒壊危険率が高く評価されていることが読み取れる。危険性ウェイトは灘区全域での全壊率を基に設定されているため、必ずしも各町丁目ごとに建物倒壊危険率と全壊率が一致するとは言えないが、図9と比べ相関が高くなったことがわかる。全壊率と建物倒壊危険率に大きな差が生じた地域を調べてみた結果、その原因として、「町丁目内の棟数が極めて少ない(1-4棟)」、「建物棟数密度が高く、古い木造建物で占められている地域であるため、算出された建物倒壊危険率は高くなったが、兵庫県南部地震の際には、震災の帯から外れたため実被害が小さかった」ことなどが考えられる。

建物の絶対棟数が少ない地域における建物倒壊危険率と全壊率のずれを補正するため、町丁目内の全建物棟数をかけたもの、すなわち町丁目ごとの全壊棟数と倒壊危険棟数の関係を図15に示す。この図においては、図14に比べ、より強い相関が窺える。

以上のことから、ここで算出された建物倒壊危険率は、地域の被災ポテンシャルを表す上で、有効な指標であると思われる。

## 5. 汎用ウェイトの設定手法

### (1) 実被害に基づく確率密度関数

ここでは、灘区以外の一般的な地域においても建物倒壊危険率および新建物倒壊危険度が算定できるよう、信頼性解析<sup>(9), (20)</sup>を用いた危険性ウェイトを設定する。信頼性解析には、建物強度確率密度関数  $R$  と地盤ごとの最大速度の生起確率密度関数  $S$  が必要である。以下に、確率密度関数の求め方についてまとめる。

建物強度確率分布を対数正規分布と仮定し、対数正規確率紙上で横軸に町丁目単位の PGV、縦軸に全壊率をプロットし、回帰直線を引く。この回帰直線の傾きを  $a$ 、切片を  $b$  とすれば、建物強度確率密度関数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}zx} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - I}{z}\right)^2\right] \quad (0 < x < \infty) \quad (6)$$

が得られる。ただし、 $I = b/a$ 、 $z = 1/a$  であり、それぞれ  $\ln x$  の平均値及び標準偏差となっている。

ここでは、 $I_r$ 、 $z_r$  の値としてこれまでに構築した灘区の被害関数の値<sup>(6)</sup>を使用した。図 16 に全壊に対応する建物強度の確率密度関数を示す。1971 年以前の木造建物の確率密度分布には大きな差は見ら

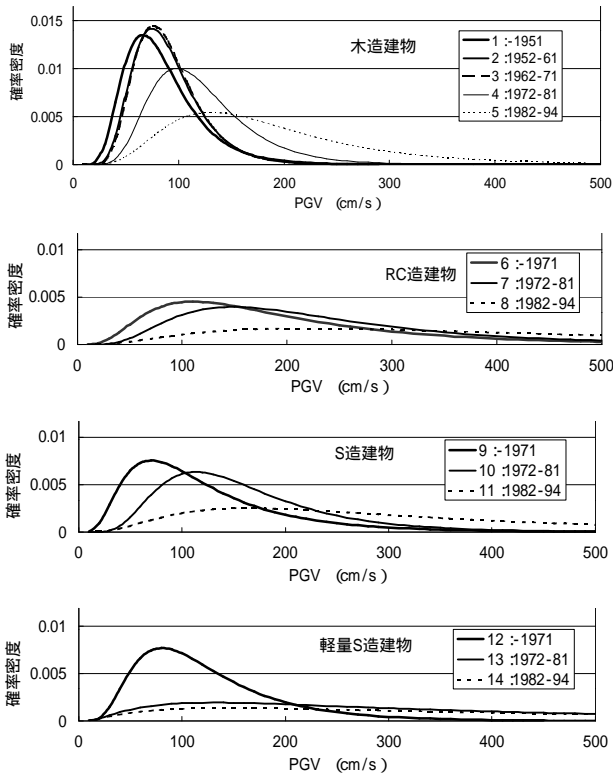


図 16 建物強度の確率密度関数（全壊に対応）

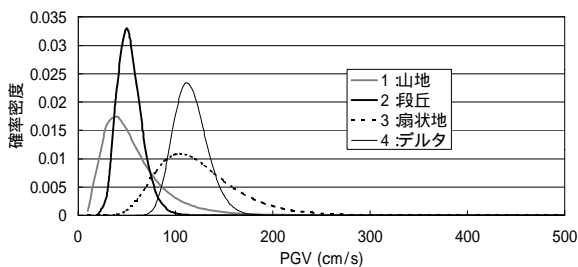


図 17 地盤ごとの PGV 生起確率密度分布関数

れないが、基本的にどの構造でも新しいものほど、高い地震動にピークがあり、耐震性が強くなることを表している。また、新しいものほど分散が大きく、平らな分布形を呈している。同様に求めて兵庫県南部地震に対する地盤ごとの PGV 生起確率密度分布関数を図 17 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。各分類のパラメータの値を表 3 に一覧する。山地、扇状地では  $z_s$  の値がそれぞれ 0.53, 0.33 と大きくなっており、広範に分布している。段丘・デルタの  $z_s$  はそれぞれ 0.24, 0.15 で、山地や扇状地に比べると分布範囲は狭くなっている。

### (2) 信頼性解析による汎用ウェイト設定手法

建物強度の確率密度関数を  $R$ 、地形区分ごとの PGV 生起確率密度関数を  $S$  と置くと、全壊の確率  $P_f$  は、次の式で表される。

$$P_f = P\left(\frac{R}{S} < 1\right) \quad (7)$$

ここで、 $Z = R/S$  と置くと、上式より、

$$P_f = \int_0^1 f_z(z) dz \quad (8)$$

となる。ところで、 $R$ 、 $S$  は正規対数分布を仮定しており（図 18）、その自然対数はその平均値をそれぞれ  $I_r$ 、 $I_s$ 、標準偏差を  $z_r$ 、 $z_s$  とすれば、 $\ln Z = \ln R - \ln S$  より、 $\ln Z$  も正規分布となる。ここで  $R$  と  $S$  が無相関と仮定すれば、 $\ln Z$  の平均値及び標準偏差はそれぞれ、 $I_z = I_r - I_s$ 、 $z_z = \sqrt{z_r^2 + z_s^2}$  で与えられる。よって、

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}z_z} \int_0^1 \frac{1}{z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - I_z}{z_z}\right)^2} dz \quad (9)$$

$y = \frac{\ln z - I_z}{z_z}$  と置換すると、

表 3 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 (%)

|     |         | r  |      |      |      | s    |      |      |      |
|-----|---------|----|------|------|------|------|------|------|------|
|     |         | 1  | 2    | 3    | 4    | 1    | 2    | 3    | 4    |
|     |         | -  | -    | -    | -    | 1    | 2    | 3    | 4    |
|     | s       | -  | -    | -    | -    | 3.90 | 3.95 | 4.76 | 4.74 |
|     | s       | -  | -    | -    | -    | 0.53 | 0.24 | 0.33 | 0.15 |
| 木造  | -1951   | 1  | 4.36 | 0.41 | 24.6 | 19.5 | 77.9 | 80.8 |      |
|     | 1952-61 | 2  | 4.44 | 0.35 | 19.8 | 12.6 | 74.8 | 78.3 |      |
|     | 1962-71 | 3  | 4.45 | 0.34 | 19.1 | 11.6 | 74.6 | 78.2 |      |
|     | 1972-81 | 4  | 4.73 | 0.38 | 10.1 | 4.1  | 52.7 | 51.0 |      |
|     | 1982-94 | 5  | 5.12 | 0.50 | 4.6  | 1.7  | 27.5 | 23.1 |      |
| RC造 | -1971   | 6  | 5.12 | 0.65 | 7.1  | 4.4  | 31.0 | 28.2 |      |
|     | 1972-81 | 7  | 5.33 | 0.58 | 3.4  | 1.3  | 19.7 | 16.1 |      |
|     | 1982-94 | 8  | 6.01 | 0.79 | 1.3  | 0.6  | 7.3  | 5.8  |      |
| S造  | -1971   | 9  | 4.64 | 0.62 | 18.2 | 15.0 | 57.0 | 56.2 |      |
|     | 1972-81 | 10 | 4.97 | 0.49 | 6.8  | 3.0  | 36.1 | 32.4 |      |
|     | 1982-94 | 11 | 5.64 | 0.73 | 2.7  | 1.4  | 13.7 | 11.3 |      |
| 軽S造 | -1971   | 12 | 4.70 | 0.55 | 14.8 | 10.7 | 54.2 | 53.1 |      |
|     | 1972-81 | 13 | 5.82 | 0.97 | 4.1  | 3.1  | 15.2 | 13.6 |      |
|     | 1982-94 | 14 | 6.19 | 1.10 | 3.1  | 2.4  | 10.8 | 9.7  |      |

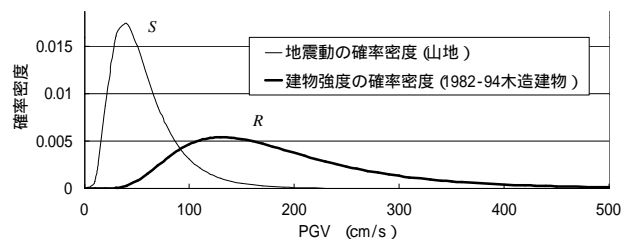


図 18 信頼性解析における被害確率の説明図

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^{\frac{I_z}{z_c}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy = 1 - \Phi\left(\frac{I_z}{z_c}\right) \quad (10)$$

となり、あるRとSに対する破壊確率が決定される。ここで、 $(I_z/z_c)$ は標準正規確率分布関数である。

これを各地盤(S)・建物分類(R)の組み合わせごとに算出した危険性ウェイトを表3に示す。図19のように表2の全壊率と比較したところ、高い相関( $R^2=0.94$ )が得られ、この方法による全壊率の再現性が確認された。ここで使用した建物強度の確率密度関数は、他の地域においても適用できると考えられることから、地域の地盤特性によるPGV分布確率密度関数を用いることで、地域特性に応じた危険性ウェイトが設定できる。

(3) 汎用ウェイト設定手法を用いた新建物倒壊危険度評価法

以上のことと(4)式、(5)式から、改めて次のような新建物倒壊危険度評価法を提案する。

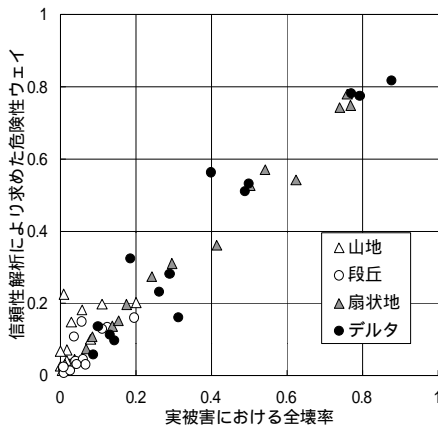


図19 危険性ウェイトの地盤ごとの再現性の評価

表4 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

| 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 | s    | s    |
|-------------|----------|------------|------|------|
| 山地          | なし       | 1.00       | 3.40 | -    |
| 丘陵地         | 山地・丘陵    | 1.71       | 3.94 | 0.10 |
| 扇状地性低地      | 沖積面1     | 1.48       | 3.79 | 0.10 |
| 砂礫台地        | 台地1      | 1.62       | 3.88 | 0.10 |
| 火山灰台地       | 台地2      | 2.50       | 3.88 | 0.10 |
|             | 谷底低地2    |            |      |      |
| 三角州性低地(砂)   | 沖積面2     | 2.39       | 4.27 | 0.10 |
| 三角州性低地(泥)   | 谷底低地1    | 2.92       | 4.47 | 0.10 |
|             | 沖積面3     |            |      |      |
|             | 沖積面4     |            |      |      |
|             | 沖積面5     |            |      |      |
|             | 沖積面5     |            |      |      |

表5 本研究のウェイトを東京都に適用した場合の汎用危険性ウェイト(%)

|     |   | 丘陵地               | 扇状地性低地  | 砂礫台地                            | 火山灰台地                            | 三角州性低地(砂)                           | 三角州性低地(泥)                           |
|-----|---|-------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|     |   | 木造                | -1951: 16.0<br>1952-61: 8.6<br>1962-71: 7.6<br>1972-81: 2.2<br>1982-94: 1.0 | 9.1<br>3.9<br>3.3<br>0.8<br>0.4 | 13.1<br>6.5<br>5.7<br>1.5<br>0.7 | 46.0<br>36.9<br>35.6<br>14.6<br>5.6 | 41.9<br>32.4<br>31.0<br>12.1<br>4.7 |
| RC造 | -1971: 3.5<br>1972-81: 0.9<br>1982-94: 0.5  | 2.1<br>0.4<br>0.3 | 2.9<br>0.7<br>0.4   | 10.9<br>4.2<br>1.7              | 9.7<br>3.5<br>1.5                | 16.0<br>7.1<br>2.7                  |                                     |
| S造  | -1971: 13.2<br>1972-81: 1.9<br>1982-94: 1.0 | 8.8<br>0.9<br>0.6 | 11.4<br>1.5<br>0.9  | 30.3<br>9.5<br>3.6              | 27.9<br>8.0<br>3.2               | 39.5<br>15.8<br>5.7                 |                                     |
| 軽S造 | -1971: 8.8<br>1972-81: 2.7<br>1982-94: 2.1  | 5.3<br>1.9<br>1.5 | 7.3<br>2.4<br>1.9   | 24.9<br>6.2<br>4.5              | 22.4<br>5.7<br>4.2               | 34.5<br>8.4<br>6.1                  |                                     |

建物倒壊危険率  $P_i$  を、次式で定義する。

$$P_i = k(N_k \cdot W_{kl}) \quad (k: \text{建物分類}; l: \text{地盤分類}) \quad (11)$$

ここで、 $P_i$ : 建物倒壊危険率、 $N_k$ : 建物存在比率、 $W_{kl}$ : 危険性ウェイトで、 $P_i$ は、地域の被災ポテンシャルを相対的に表す指標である。危険性ウェイトは、建物・地盤分類のマトリクス形式で定義される。

地盤分類は地域的な特性に応じて自由に設定することができる。但し、PGV生起確率分布が算出できる分類を用いる必要がある。

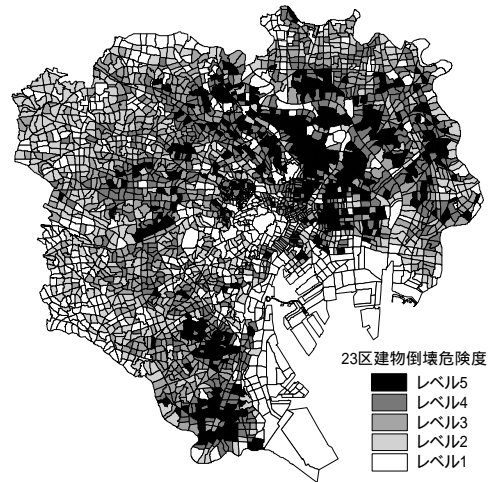
危険性ウェイト( $W_{kl}$ )は、信頼性解析による手法で決定する。建物の全壊確率分布と地盤ごとのPGV生起確率分布を用いることにより、地域特性に応じたウェイト設定が可能である。

で算出された建物倒壊危険率  $P_i$  を大きいものから順にランク付けし、新建物倒壊危険度  $P$  とする。ランク分けの比率割当については、東京都の方法のように危険度5に分類される町丁目を少なくしてもよいし、20%ずつに分類してもよい。地域の大きさに応じた比率割当が可能である。

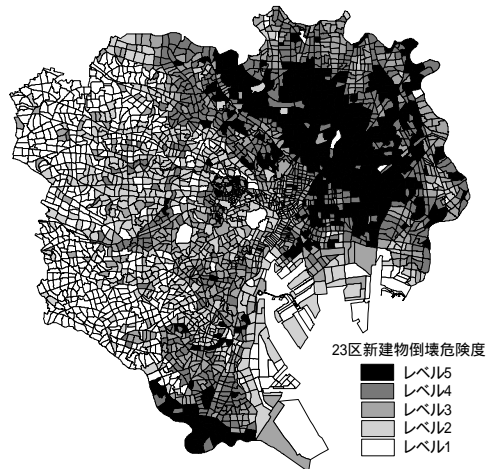
このように、地盤の分類に自由度を残したことにより、一般的な地域で新建物倒壊危険度の算出が可能な評価法となっている。

6. 新建物倒壊危険度評価法による東京都の危険度

ここでは、本研究で提案した評価法を東京都に適用し、評価する。まず危険性ウェイトを設定する際に必要な地盤ごとのPGVの生



23区建物倒壊危険度  
レベル5  
レベル4  
レベル3  
レベル2  
レベル1



23区新建物倒壊危険度  
レベル5  
レベル4  
レベル3  
レベル2  
レベル1

図20 東京23区における建物倒壊危険度の比較

起確率密度分布については、大西ら<sup>21)</sup>による地盤増幅度を用いて決定する。また国土数値情報の山地における PGV 生起確率密度分布のパラメータとして、東京都直下地震被害想定<sup>22), 23)</sup>における基盤地震動レベルの最大速度を 30cm/s とした時の  $I_s=3.40$  を用いて建物倒壊危険率と新建物倒壊危険度を求めた。(別のパターンとして兵庫県南部地震時の灘区山地における  $I_s=3.90$  の場合でも新建物倒壊危険度を算定したが、結果はそれほど違わなかった。) 最大速度の  $z_s$  としては、Molas and Yamazaki<sup>24)</sup>による、最大速度の距離減衰回帰式の地域内の変動成分を使用した。これらの数値を表 4 に示す。前節で使用した建物分類項目における建物強度確率密度関数のパラメータをそれぞれ  $I_r$ ,  $z_r$  とし、地盤における PGV 生起確率密度関数のパラメータをそれぞれ  $I_s$ ,  $z_s$  とすると、(10)式より危険性ウェイトが求められる(表 5)。

以上のデータと 5 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 20 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。

東京都の方法は単位面積当たりの被害総量を表しているのと同時に、3(4)で記したように地盤条件に比べて、建物全体としての棟数密度が支配的要因であるため、建物倒壊危険度の高い地域が環状に分布している。一方、本研究の方法では、地盤の危険性ウェイトが高く、倒壊可能性の高い木造建物の多い地域(東部下町)で新建物倒壊危険度が高くなっている。これは本研究の評価法により、建物強度や地盤の影響がより一層考慮されるようになったためである。本研究で提案された新建物倒壊危険度は、東京都の簡易的な方法を継承する一方で、指標としては異なった意味を持っている。これは、地域の被災ポテンシャルを表す指標が実際の地震による建物全壊率に相当するものであると考えている点にある。

## 7. まとめ

本研究では、東京都の建物倒壊危険度の手法を神戸市灘区に適用して、兵庫県南部地震による建物被害との比較を行った。その結果、建物棟数密度が大きく建物倒壊危険率に影響していることがわかった。次に、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、建物倒壊の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。ここで提案した新建物倒壊危険度は、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新建物倒壊危険度を算定することができる。最後にここで提案した評価式を用いて東京都の新建物倒壊危険度を評価した。その結果、東京都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、建物強度や地盤の影響を考慮した新建物倒壊危険度を評価することができた。ただし、今後この評価法を用いる際には、ここで設定した危険性ウェイトが兵庫県南部地震の経験に基づいており、この地震による地震動分布や阪神地域の建物特性の影響を含んでいることを考慮する必要がある。

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。

本研究においては、兵庫県南部地震後に神戸市が調査した建物被害データ、東京都都市計画局の GIS データおよび危険度調査データを利用させていただいた。記して謝意を表する次第である。

## 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) 村尾修，山崎文雄：兵庫県南部地震における灘区の建物被害分析，第 24 回地震工学研究発表会論文集，pp.1261-1264，1997.7.
- 6) 国土地理院：1/10,000 地震防災土地条件図，1996.
- 7) 国土地理院：1/25,000 土地条件図，1966.
- 8) 濱田政則，磯山龍二，若松加寿江：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.
- 9) 神戸市企画局総合調査課：神戸の地盤，1980.
- 10) 神戸市：神戸市統計要覧 1996，1996.
- 11) Murao, O., and Yamazaki, F.: Development of Fragility Curves for Buildings based on Damage Data due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake, Proceedings of Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA 99), pp.259-269, 1999.2.
- 12) 村尾修，山崎文雄：兵庫県南部地震の被害分析 その 10 建築年代を考慮した木造建物被害に基づく灘区の地震動分布，生産研究，Vol. 51, No. 2, pp.17-20, 1999.2.
- 13) 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，pp.111-118，1996.12.
- 14) 気象庁：平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震調査報告 災害時自然現象報告書，気象庁技術報告，第 119 号，1997.
- 15) 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 3 回)，1993.
- 16) 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.
- 17) 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.1237-1240，1997.7.
- 18) 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，土木学会，1997.7.
- 19) 星谷勝：確率論手法による構造解析，鹿島出版会，1973.
- 20) 中埜良昭，岡田恒男：信頼性理論による鉄筋コンクリ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，第 406，pp.37-43，1989.12.
- 21) 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.909-914，1998.11.
- 22) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書，1997.
- 23) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書(被害想定手法編)，1997.
- 24) 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. 10.