

想定地震による名古屋市の木造家屋の被害予測

PREDICTION FOR THE DAMAGE OF WOODEN BUILDINGS
IN NAGOYA DURING THE PREDICTED EARTHQUAKE

市原松平*・山田公夫**

By Matsuhei ICHIHARA and Kimio YAMADA

1. ま え が き

わが国の東海沿岸には近い将来マグニチュード8.0程度の大規模な地震の発生の可能性があるといわれている。そのため、この想定地震によって被害を受けると予想される地域に対して、各種の建造物の被害程度をあらかじめ予測しておくことができれば、都市の防災計画や災害時の復旧対策等の立案に役立つ。また、被害予測によって被害危険度の高い地区が明確になれば、既存の建造物の耐震性の強化や新設の建造物に対してきめの細かい耐震設計を行うなど、震害予測に関する研究は工学上益するところが大きい。

地震時の木造家屋の被害に関する研究は古くから行われており、河角¹⁾や表ら²⁾によって木造家屋の倒壊率と沖積層厚の関係が示されている。また、物部³⁾は統計的にみれば木造家屋の耐震度は正規分布していると考え、家屋の倒壊率と震度⁴⁾の関係を示している。この物部の示した関係に基づき、小林ら⁵⁾や宮野⁶⁾は木造家屋の倒壊率から地震動の強さを工学的に評価することを試みている。さらに、望月ら⁷⁾は木造家屋の倒壊率には地形が明白に寄与していることを示している。これらの研究はいずれも木造家屋の被害予測が直接の目的ではない。

これに対して、木造家屋の被害予測を試みている研究は少ない。たとえば望月⁷⁾は木造家屋の耐震性能の実態調査と質点系弾塑性応答から家屋の被害率の推定を試みたり、また地盤構成のみと被害率との関係の定量化を試みている。一方、飯田ら⁸⁾は上述の物部の関係を用いて名古屋市内の木造家屋の被害想定を行っている。

これらの研究はいずれも木造家屋の被害予測と予測のための要因の選択を考えるうえで有益な示唆を与えているが、将来の地震に対してより扱いやすく合理的な被害

予測モデルを提案するまでには至っていないと考えられる。すなわち、地震時の木造家屋の被害は地震動の強さはもとより、地盤の種類や良否、地形条件、家屋の耐震度や密集度など多くの要因が複雑に交錯しており、これらの要因をできる限り考慮した予測モデルを開発することが必要である。

この研究は地震時に木造家屋の被害に影響を及ぼすと考えられる上述の要因の中から、過去の地震による被害資料の調査や地震動の強さなどに基づいて、分析可能ないくつかの要因を選び、数量化理論I類を用いて被害分析を行った。そして、木造家屋の被害予測のための定量的な予測モデルを提案し、そのモデルを用いて想定地震に対して木造家屋の被害予測を試みたものである。数量化理論I類の適用にあたって、要因の選択は次の点を考慮した。① 数多く考えられる要因の中で、特に被害に与える影響が大きいと考えられ、これまでの研究でしばしば指摘されているもの。② 分析に用いる要因間の関連が極度に強くないこと、③ 分析ならびに予測対象地区で共通に取り上げることができる要因であること。

木造家屋の被害程度を表わす尺度は、家屋の全壊率(全壊戸数/総戸数)、半壊率(半壊戸数/総戸数)、ならびに全被害率(全壊戸数×1.0+半壊戸数×0.5を総戸数で除したもの)の3つのケースを考え、それぞれについて被害分析を行った。

後述するように、著者らが用いた要因ならびに分析に必要な被害資料等が得られたものは関東地震時の東京市に対するものだけであった。そのため、この研究では被害分析は東京市を例にした。また、被害予測は将来発生が予想される東海地震を考えて名古屋市を対象にした。さらに、この研究では被害の分布を地域ごとに評価するために、東京および名古屋を1km×1kmのメッシュに分割した。

* 正会員 工博 和歌山工業高等専門学校 校長

** 正会員 工修 中部工業大学講師 工学部土木工学科

2. 過去の地震による木造家屋の被害

1891年の濃尾地震(M=8.4)は内陸型地震ではわが国最大の地震で、この地震による被害は岐阜県美濃地方と愛知県尾張地方で甚大であった¹⁰⁾。特に根尾谷で生じた断層線周辺と軟弱な沖積層が堆積した濃尾平野における町村では家屋の全壊率が80%以上のところがあった。当時の名古屋市は市域の大部分が洪積台地に位置していたため、住家の全壊率は3%、半壊率は4%であった。

1923年の関東地震(M=7.9)は東京を中心に大被害を与えた。著者らは松沢¹¹⁾が調査した関東地震による東京市内の町名町の木造家屋の被害戸数と当時の東京市各区町別の戸数統計¹²⁾を使用して家屋の全壊率と半壊率を町名別に求めた。この全壊率と半壊率の算定にあたって非住家は除いた。この理由は文献12)は現住戸数で与えられているためである。全壊率の分布を当時の東京15区全図を用いて示したものが図-1である。図中の1区画は1km×1kmである。半壊率に対しても同様の図を作成したが紙面の都合でここでは示していない。図-1からわかるように木造家屋の全壊の被害は河川沿いの沖積層が発達している沖積低地ならびに洪積台地が河川で侵食された河谷低地で大きい。これに対して山の手の地盤の良いところで被害は小であった。

1944年には紀伊半島沖に震央をもつ東南海地震(M=8.0)が発生した。この地震による名古屋市の住家の全壊率は0.5%、半壊率は2.5%であった¹³⁾。表ら³⁾が

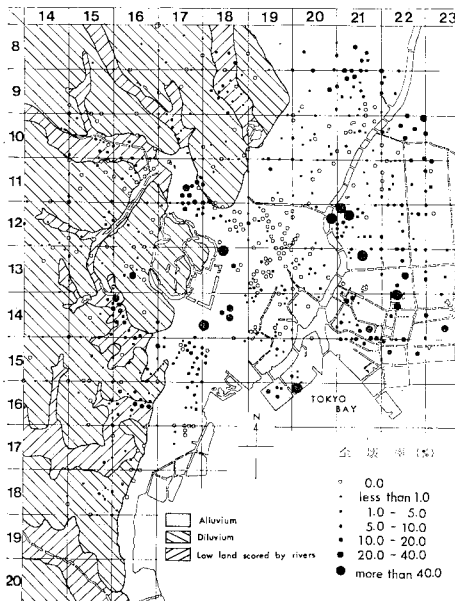


図-1 関東地震による東京市の木造家屋の全壊率の分布

調査した名古屋市の区別の住家被害率(全壊数+0.5×半壊数を総戸数で除したもの)によれば、臨海部の沖積層が厚く堆積している南区、港区で被害率はそれぞれ14.6%、12.8%であったのに対して、他の区ではほとんど1%以下であった。

現在、名古屋市の地盤・地形に関する資料はかなり整備されており、著者らは木造家屋の被害予測のために、まず最初に東南海地震時の名古屋市の木造家屋の被害分析を試みることにした。しかしながら、分析のために必要な市内の町名別の詳細な被害戸数や総戸数に関する資料がみあたらなかったため、この地震による定量的な被害分析を行うまでには至らなかった。

日本海側では1948年に福井地震(M=7.3)が発生した。この地震は福井平野の直下で発生し、沖積層上に建てられた木造家屋が甚大な被害を受けた¹⁴⁾。さらに1964年には新潟地震(M=7.5)に見舞われ、新潟市はゆるい飽和砂層の液状化のために大きな被害を受けた¹⁵⁾。

このほか、1968年の十勝沖地震¹⁶⁾(M=7.9)の際、青森県や北海道南部では軟弱地盤上の家屋の被害が大きかった。また、宮城県沖地震¹⁷⁾(1978, M=7.4)によって、仙台市の木造建物は大きな被害を受けたが、この被害は市の東部の沖積地帯あるいは傾斜地の宅造地区に集中した。後者の被害は地震による震動が直接の原因というよりも、むしろ地震によって引き起こされた斜面崩壊が原因となった二次的な被害といえる。これと同様の被害は伊豆半島沖地震(1974, M=6.9)や伊豆大島近海地震(1978, M=7.0)においてもみられた¹⁸⁾。

いずれの地震においても木造家屋の定量的な被害予測のために、地区別の詳細な被害戸数、総戸数ならびに地形・地盤状況が明白になっていることが必要であるが、これらの条件を十分に満足させるものは関東地震時の東京市の被害のみである。それゆえ、著者らはこの地震による東京市の被害を分析対象にした。したがって、直下型地震によって生じた断層に沿う木造家屋の被害や近時行われている宅地造成地における地震による斜面崩壊によって生じた二次的な木造家屋の被害はこの研究には含まれない。

3. 地震時における木造家屋の被害分析

著者らは地震時の木造家屋の被害分析を行うにあたり、1.で述べた3つの事項を考慮し、次の7つの要因を選んだ。① 水平震度、これは地震動の強さを表わす指標であり、[被害の分析には不可欠の要因である。② 表層の地盤種別、③ 表層付近のN値、④ 沖積層厚、⑤ 表層付近の土の種類、これら②~⑤までの要因は地盤構成と土の強さを考えている。⑥ 地形、この要因は

表一1 数量化理論I類による分析に用いた要因とそのカテゴリ

ITEM CATEGORY	1. SEISMIC COEFFICIENT (K)
1	$K \leq 0.125$
2	$0.125 < K \leq 0.175$
3	$0.175 < K \leq 0.225$
4	$0.225 < K$

ITEM CATEGORY	2. GEOLOGICAL CONSTITUTION OF THE GROUND
1	ALLUVIUM
2	ALLUVIUM AND DILUVIUM
3	ALLUVIUM, DILUVIUM AND LOW LAND
4	DILUVIUM AND LOW LAND
5	DILUVIUM

ITEM CATEGORY	3. MEAN VALUES OF H TO DEPTH OF 5 METERS
1	$N \leq 5$
2	$5 < N$

ITEM CATEGORY	4. THICKNESS OF ALLUVIUM, H (m)
1	$H \leq 10$
2	$10 < H \leq 20$
3	$20 < H$

ITEM CATEGORY	5. TYPE OF SOIL
1	SAND
2	CLAY AND SILT
3	CLAY AND GRAV

ITEM CATEGORY	6. TOPOGRAPHY
1	RECLAIMED LAND ALONG THE RIVER
2	RECLAIMED LAND
3	RIVER SIDE AREA
4	OTHER AREAS

ITEM CATEGORY	7. TOTAL NUMBER OF WOODEN HOUSES IN A MESH
1	$N \leq 5000$
2	$5000 < N \leq 10000$
3	$10000 < N$

被害の発生場所が河川周辺、埋立地であるか否かを示すもので、河川周辺や埋立地はそれ以外の場所と比べて、地盤の強度低下のほか液状化発生の原因が含まれていると考えるためである。⑦ 1メッシュ (1 km×1 km) 当たりの家屋数、これは家屋の密集度を表わすものである。

これらの要因は前報¹⁹⁾に示した要因と⑦を除けば同じである。⑦については前報では1メッシュ当たりの水道管の布設延長を用いている。なお、これ以外にも被害に影響すると考えられる要因として家屋の耐震度がある。耐震度を表わす指標として、家屋の固有周期あるいは建てられてからの経過年数による老朽度などが考えられるが、いずれも関東地震当時の家屋に対して適切な資料がないため、この要因は考慮できなかった。

上述したように、この分析に用いた要因は定量的な要因と定性的な要因とが混在している。そのために、著者らは数量化理論I類²⁰⁾を用いて被害分析を試みた。この分析のために各要因は表一1に示すように2~5つのカテゴリに分けた。なお、これらのカテゴリ区分は⑦はもちろんであるが、③のN値において前報¹⁹⁾と異なる。

上述の7つの要因は旧東京市の各メッシュに対して、関東地震時の震度分布²¹⁾、東京の地盤資料²²⁾、東京市の戸数統計¹²⁾を用いて調べたのち、表一1のカテゴリに従って要因ごとにそれぞれ分類した。分析に用いた旧東京市のメッシュの総数は91区画である。表一1には水平震度をkで示している。

(1) 木造家屋の全壊率ならびに半壊率の算出

被害分析のために、2. で述べた町名単位の被害戸数(全壊戸数、半壊戸数)ならびに総戸数を1 km×1 kmに分割した旧東京市の各メッシュに対して、それぞれ算定し直す必要があった。図一1には町名単位の被害分布

と上述のメッシュが示されている。この場合、1つの町が2つ以上のメッシュにまたがる時はそれぞれのメッシュに占める町の面積に応じて全壊、半壊ならびに総戸数を比例配分した。

(2) 数量化理論I類の概略

数量化理論I類²⁰⁾は目的変数(分析対象となる変数)が数量で与えられている場合の方法である。この研究における目的変数は旧東京市の各メッシュの木造家屋の全壊率 P_1 、半壊率 P_2 、ならびに全被害率 P_3 の3つである。一般に木造家屋の全壊率や半壊率は0から数10%まで広範囲にわたるため、ここでは目的変数の数量は対数で表わした。そのため、家屋の被害のないメッシュでは全壊率、半壊率あるいは全被害率を 1.0×10^{-2} (%)と置いて分析を行った。この理由は東京市の大半のメッシュにおいて家屋数は1万戸以下であり、1万戸当たり1戸の被害ならば無被害とみなし得ると考えたためである。

あるメッシュmの推定全壊率 \bar{P}_{1m} (推定半壊率の場合は \bar{P}_{2m} 、推定全被害率の場合には \bar{P}_{3m} とおく)は次式で表わされる。

$$\log_{10} \bar{P}_{1m} = \bar{Y}_m = \sum_i \sum_j \delta_{m(ij)} \cdot x_{ij} \dots \dots \dots (1)$$

ここでiは要因を、jは各要因のカテゴリを表わす。上式で $\delta_{m(ij)}$ はあるメッシュmにおいて要因iがカテゴリjに反応する場合は1、反応しない場合は0の値をとる関数である。また、 x_{ij} は要因iのカテゴリjに与えられるカテゴリスコアである。

あるメッシュmで実測全壊率を P_{1m} とし、 $\log_{10} P_{1m} = Y_m$ とおくと、式(1)の x_{ij} は東京の全メッシュに対して、 \bar{Y}_m と Y_m の差の平方和が最小、すなわち両者の相関が最大となるように決定される。半壊率と全被害率に対しても同様の分析を行うことによって、それぞれの場合の x_{ij} が求められる。このようにして得られた3つのケースに対するカテゴリスコア x_{ij} をそれぞれ用いることによって、地震時における木造家屋の全壊率、半壊率ならびに全被害率の予測値を算定することができる。

(3) 分析に用いた要因のカテゴリの説明

数量で与えられる要因のカテゴリの分け方はいく通りかが考えられる。著者らはそれらの要因に対してカテゴリ区分を変え、全壊率、半壊率および全被害率の3つの場合のそれぞれに対して一元配置の分散分析を行った。この3つのケースとも被害予測に際して、共通なカテゴリ区分をもつことが望ましいから、これを念頭において、分析結果よりF値¹⁹⁾が大きくなるよう、かつ扱いやすい区分になるようにカテゴリを区分した。

その結果、震度と沖積層厚のカテゴリ区分は前報¹⁹⁾に示したものと同じに、*N* 値は2つに区分された。また1メッシュ当たりの家屋数は表一1の要因7のように3つに区分された。なお、表層の地盤種別、土の種類および地形のような定性的要因のカテゴリ区分は前報と同じである。

(4) 数量化理論I類による分析結果

数量化理論I類のような多変量解析では、あらかじめ分析に用いる要因間の関連の強さを検討しておくことが必要である。そのため著者らは上述の7要因に対して、2つの要因間のクロス集計をすべての組合せについて行い、それぞれの場合のクラマーのコンティンジェンシー係数を求めた。その結果、震度と地盤種別ならびに震度と沖積層厚に対するこの係数は他の要因間のそれよりも相対的に大きい値を示した。したがって、前報¹⁹⁾のように地盤種別あるいは沖積層厚を除いた場合の分析も行ったが、7つの要因すべてを用いた方がより説明しやすいモデルとなったため、この研究では7つの要因を用いた。以下に全壊率、半壊率ならびに全被害率をそれぞれ目的変数とした場合の結果を述べる。

a) 全壊率を目的変数とした場合

表一2に全壊率に対する分析結果を示す。表中のカテゴリースコア、スコアダイアグラムおよびレンジの意味についてはすでに前報¹⁹⁾に示した。この分析により、全壊率に最も大きく影響する要因はレンジの値が最

表一2 数量化理論I類による全壊率の分析結果

Item	Category	Category score	Score diagram	Range
Seismic coefficient (k)	$k \leq 0.125$	-0.1124		0.5762 (3)
	$0.125 < k \leq 0.175$	-0.0616		
	$0.175 < k \leq 0.225$	0.1415		
	$0.225 < k$	0.4638		
Geological constitution of the ground	Alluvium	0.0977		0.6714 (2)
	Alluvium and Diluvium	0.2635		
	Alluvium, Diluvium and Low land	0.3854		
	Diluvium and Low land	-0.1792		
Diluvium	Diluvium	-0.2860		0.0434 (7)
		0.0162		
Mean values of N to depth of 5 meters	$N \leq 5$	-0.0272		0.8340 (1)
	$5 < N$	-0.0272		
	$10 < N \leq 20$	-0.1831		
	$20 < N$	0.6509		
Type of soil	Sand	-0.2024		0.3223 (5)
	Clay and Silt	0.1199		
	Clay and Sand	-0.0303		
Topography	Reclaimed land along the River	-0.1560		0.4892 (4)
	Reclaimed land	0.0516		
	River site area	0.3111		
	Other areas	-0.1781		
Total number of wooden houses in a mesh, M	$M \leq 5000$	0.0242		0.1166 (6)
	$5000 < M \leq 10000$	0.0245		
	$10000 < M$	-0.0921		

Multiple correlation coefficient = 0.7352
 Average score = -0.1695
 Each number in parentheses indicates rank.

表一3 数量化理論I類による半壊率の分析結果

Item	Category	Category score	Score diagram	Range
Seismic coefficient (k)	$k \leq 0.125$	-0.0592		0.7721 (3)
	$0.125 < k \leq 0.175$	-0.1155		
	$0.175 < k \leq 0.225$	0.0406		
	$0.225 < k$	0.6566		
Geological constitution of the ground	Alluvium	-0.3132		0.7996 (2)
	Alluvium and Diluvium	0.4652		
	Alluvium, Diluvium and Low land	0.4864		
	Diluvium and Low land	0.3394		
Diluvium	Diluvium	0.0531		0.0804 (7)
		-0.0309		
Mean values of N to depth of 5 meters	$N \leq 5$	-0.0309		0.9536 (1)
	$5 < N$	0.0504		
	$10 < N \leq 20$	-0.2549		
	$20 < N$	0.6987		
Type of soil	Sand	0.1079		0.4632 (5)
	Clay and Silt	-0.1742		
	Clay and Sand	0.2890		
Topography	Reclaimed land along the River	0.0748		0.5785 (4)
	Reclaimed land	-0.3011		
	River site area	0.2774		
	Other areas	-0.1146		
Total number of wooden houses in a mesh, M	$M \leq 5000$	0.0136		0.1698 (6)
	$5000 < M \leq 10000$	-0.0722		
	$10000 < M$	0.0976		

Multiple correlation coefficient = 0.6859
 Average score = -0.2308
 Each number in parentheses indicates rank.

も大きい沖積層厚であることがわかる。次いで、レンジの値の大きい地盤種別、震度、地形の順に被害に影響を及ぼしている。一方、1メッシュ当たりの家屋数や表層付近の*N* 値は他の要因と比べて、レンジの値が小さく全壊率にはそれほど影響を与えていないこともわかる。

沖積層の厚さが20mをこえる場所では20m未満の場所と比べて、急激に全壊率が高くなる傾向がみられる。表層地盤の違いによる全壊率の大きさは沖積層のみで占められているところよりも、沖積層と洪積層あるいはこれらと河谷低地で構成されているところの方が大きく、洪積層のみのところは小さい。震度はその値が大きくなるに従って全壊率は高くなる。また、地形では河川周辺地区での全壊率が他の地区よりも大きい。なお、分析の精度を示す重相関係数は0.735であった。

b) 半壊率を目的変数とした場合

表一3に半壊率に対する分析結果を示す。この表のレンジの値からわかるように、半壊率に与える要因の強さの順序は全壊率の場合とまったく同じであるが、沖積層厚はその厚さが増すにつれて被害が大きくなる傾向が全壊率の場合よりも一層顕著に現われている。ここで特筆すべきことは、被害に対する影響度が2番目に大きい地盤種別において、全壊率の結果とは異なり、沖積層の方が洪積層よりも半壊率を下げる傾向があることを示すことである。このことは地震時に沖積地盤上にある木造家屋は全壊の被害の方が半壊の被害よりも卓越しており、一方洪積地盤上の家屋は逆に半

表-4 数量化理論Ⅰ類による全被害率の分析結果

Item	Category	Category score	Score diagram				Range
			-0.4	0.0	0.4	0.8	
Seismic coefficient (k)	$k \leq 0.125$	-0.1150	----- ----- ----- -----				0.6463 (2)
	$0.125 < k \leq 0.175$	-0.0701	----- ----- ----- -----				
	$0.175 < k \leq 0.225$	0.1328	----- ----- ----- -----				
Geological constitution of the ground	$0.225 < k$	0.5313	----- ----- ----- -----				0.6055 (3)
	Alluvium	0.0700	----- ----- ----- -----				
	Alluvium and Diluvium	0.2150	----- ----- ----- -----				
	Alluvium, Diluvium and Low land	0.3051	----- ----- ----- -----				
Mean values of N to depth of 5 meters	$N \leq 5$	-0.0134	----- ----- ----- -----				0.0091 (7)
	$5 < N$	-0.0225	----- ----- ----- -----				
Thickness of alluvium, H (m)	$H \leq 10$	-0.1812	----- ----- ----- -----				0.7814 (1)
	$10 < H \leq 20$	-0.0549	----- ----- ----- -----				
	$20 < H$	0.6092	----- ----- ----- -----				
Type of soil	Sand	-0.1670	----- ----- ----- -----				0.2693 (5)
	Clay and Silt	0.1023	----- ----- ----- -----				
	Clay and Sand	-0.0334	----- ----- ----- -----				
Topography	Reclaimed land along the River	-0.1253	----- ----- ----- -----				0.4463 (4)
	Reclaimed land	-0.0499	----- ----- ----- -----				
	River side area	0.2983	----- ----- ----- -----				
	Other areas	-0.1482	----- ----- ----- -----				
Total number of wooden houses in a mesh, M	$M \leq 5000$	0.0451	----- ----- ----- -----				0.1400 (6)
	$5000 < M \leq 10000$	0.0014	----- ----- ----- -----				
	$10000 < M$	-0.0949	----- ----- ----- -----				

Multiple correlation coefficient = 0.7745
 Average score = 0.0480
 Each number in parentheses indicates rank.

壊の被害の方が全壊の被害よりも卓越していることを示すものと考えられる。同様の傾向が地形の埋立地のカテゴリーにおいてもみられる。この分析の重相関係数は0.686である。

c) 全被害率を目的変数とした場合

全被害率は1.0、半壊を0.5として求めた家屋の倒壊率を表わすもので、表らをはじめとしていく人かの研究者がこの方法で地震時の家屋の被害程度を定義している。著者らはこの全被害率の分析だけでは被害予測に際して、全壊と半壊の戸数を明確に区別できないと考えたため、上述のように全壊率、半壊率に対する分析も行って、後述のようにこれらと全被害率の場合の予測結果の比較を試みている。

全被害率を目的変数とした場合の分析結果は表-4に示す。全被害率に与える要因の強さの順序は上述の2つの場合と比べて、2番目が震度、3番目が地盤種別となって、この両要因が入れかわるだけでそれ以外の要因の順序は変わらない。また、この分析における各要因のスコアダイヤグラムよりわかるように、カテゴリースコアの分布は全壊率の結果とほぼ同じ傾向を示しており、各要因のカテゴリーが被害に与える影響は全壊率の場合と同様の解釈ができる。この分析の重相関係数は0.775であり、3つの分析のうちで最も高い値を示した。

以上述べたように地震時における木造家屋の被害に対して、沖積層の厚さが最も大きく影響しており、次いで地盤種別、あるいは震度の順になっている。沖積層の厚さが木造家屋の被害と密接に関係していることは、これ

までの研究においてしばしば指摘されていたことで、この研究でその影響の強さが一層明確にされたといえる。

著者らが前報¹⁹⁾で示した地震時の水道管の被害では震度が被害に最も大きく影響しており、地盤種別や沖積層厚の影響はこの研究における場合よりも小さかった。また土の種類やN値はこの研究でも前報でも直接的にそれほど影響は示していない。このようなことから、地震時に構造物の被害に影響する要因は被害の対象とするものによって要因の強さが変わってくるが、いずれにしても地震の強さを表わす震度の影響は見逃すことができないと考えられる。

4. 名古屋市の木造家屋の被害予測

表-2~4に示してある各要因のカテゴリースコアを用いることによって、式(1)よりメッシュ別全壊率、半壊率および全被害率の予測値がそれぞれ得られる。したがって、被害予測のためには被害分析に用いた要因と同じ要因を図-2に示す名古屋市のすべてのメッシュ(1km×1km)について調べることが必要であった。なお、名古屋市のメッシュの総数は約370であった。

(1) 被害予測に必要な要因の決定

東海地震を想定した場合の名古屋市の推定水平震度 k は前報¹⁹⁾に示したように、名古屋市の各メッシュの地盤の地震応答解析より得られた地表最大加速度 α_{max} と地盤の固有振動数 f を用いて、次式から各メッシュごとに決めた²³⁾。

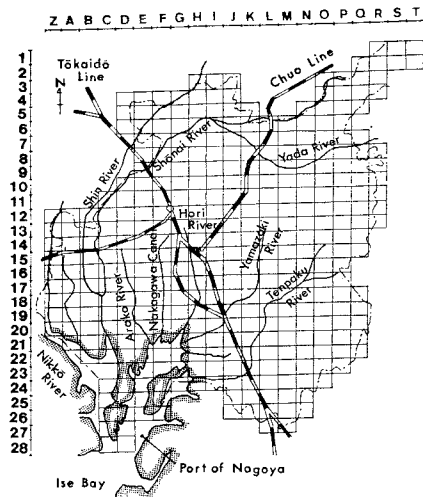


図-2 被害予測の対象にした名古屋市

沖積層では $k=0.0144(\alpha_{max}/f)^{0.497}\dots\dots(2)$

洪積層では $k=0.0290(\alpha_{max}/f)^{0.277}\dots\dots(3)$

震度以外の地盤等に関する要因については名古屋市
の地盤・地形に関する資料^{24),25)}を詳細に調べ、各メッ
シュごとに表-1の各要因の 카테고리に従って分類し
た。また、名古屋市のメッシュ別の木造家屋数は飯田ら
が家屋台帳をもとに集計したデータを用いた⁹⁾。

(2) 全壊、半壊ならびに全被害戸数

a) 推定全壊戸数

図-3に東海地震時に予想される木造家屋の全壊戸数
をメッシュ別に示す。図中、*印を
付したメッシュは木造家屋がない地
区である。この図と図-2からわか
るように、市の西部や南部ならびに
庄内川、新川をはじめとする河川周
辺地区で、おおむね1メッシュ当
たりの全壊戸数は20~50戸で、中
には100戸以上の被害が予想される
メッシュもある。これらの地区は軟
弱な沖積層でおおわれており、南西
に向かって沖積層が厚く堆積してい
る。これに対して、市の中央部や東
部の地盤の良好な地区で予想される
全壊戸数は1メッシュ当たり5戸以
下である。臨海部で全壊戸数が少な
い理由は、この地区は工業地帯のた
め木造家屋が1メッシュ当たり20
戸以下と少ないためである。名古屋
市全体で予想される全壊戸数は約
3500戸であり、市の総戸数に対す
る推定全壊率は0.7%程度である。

b) 推定半壊戸数

各メッシュ別の推定半壊戸数を示
したものが図-4である。図-3と
図-4を比較すると、各メッシュの
半壊戸数は全般的にみて全壊戸数
を上回っている。特に市の中央部と東
部ではほとんどのメッシュで半壊戸
数の方が全壊戸数よりも多く、前述
の分析で示されたように洪積層では
全壊よりも半壊の被害の方が卓越し
ているといえる。半壊戸数は全メ
ッシュの約20%のメッシュで20戸
以上を示し、市の南部の軟弱な沖積
層が堆積している地区や河川沿いの
地区では50戸以上に達するメッ

シュが多くみられる。名古屋市全体で予想される半壊戸数
は約5600戸であり、市の総戸数(532400戸)に対す
る推定半壊率は約1%である。

c) 全壊、半壊を合わせた推定全被害戸数

各メッシュの推定全被害戸数は上述の2つの場合と同
様に市の南部、西部および河川周辺地区で他の地区より
も相対的に大きな値を示した。図-5に各メッシュの推
定全被害戸数を示す。名古屋市全体の推定全被害戸数は
約6300戸で、市の総戸数に対する推定全被害率は約
1.2%である。

この予測結果と上述の推定全壊ならびに推定半壊戸数

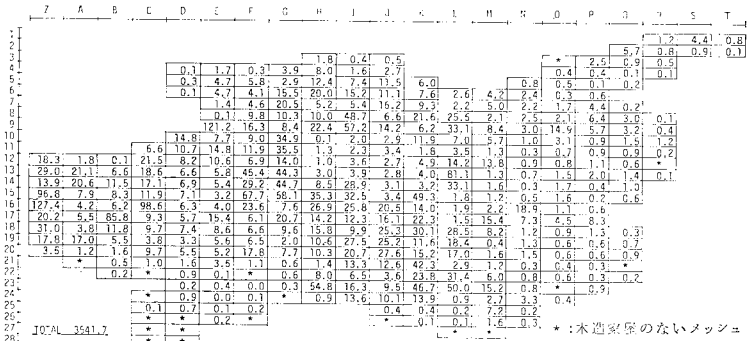


図-3 名古屋市の各メッシュにおける木造家屋の推定全壊戸数(東海地震想定時)

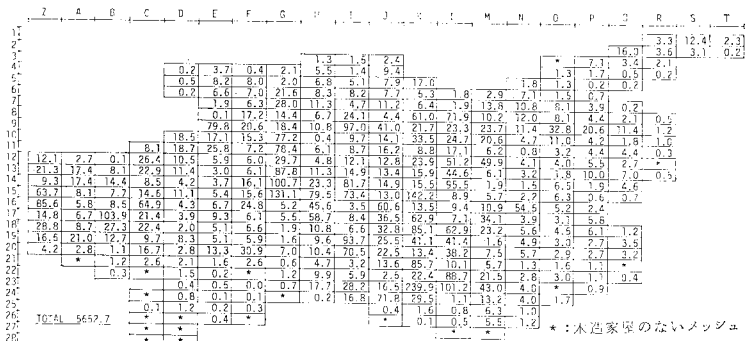


図-4 名古屋市の各メッシュにおける木造家屋の推定半壊戸数(東海地震想定時)

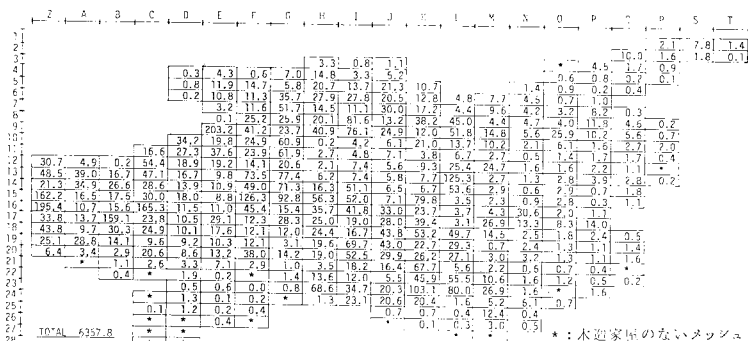


図-5 名古屋市の各メッシュにおける木造家屋の推定全被害戸数(東海地震想定時)

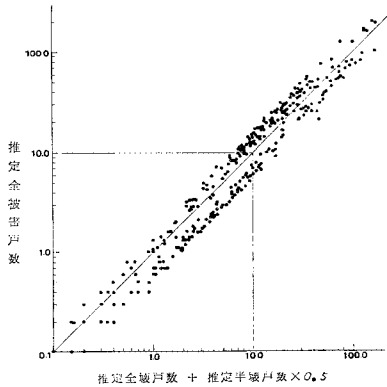


図-6 全壊戸数+半壊戸数×0.5 で求めた推定被害戸数と推定全被害戸数との比較(名古屋市)

をそれぞれ別々に求めた予測結果とを比較するために示したものが図-6である。図-6の横軸はあるメッシュの推定全壊戸数+そのメッシュの推定半壊戸数×0.5を示し、縦軸は同じメッシュの推定全被害戸数を示す。この図からわかるように両予測値は45°線付近に散布しており、良い相関関係がみられる。すなわち、著者らの研究では、従来の木造家屋の被害率の定義に基づく予測値と大きくそれることなく、全壊戸数と半壊戸数とに分けてそれぞれ明確な値でこれらを表わすことができたことを示す。

(3) 物部式による倒壊率と推定全被害率の比較

物部は木造家屋の耐震度の分布は正規分布をしていると考え、1つの地震における家屋の倒壊率 Y と震度 k の関係を次式で示した²⁶⁾。

$$Y(\%) = \frac{100}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^k \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{k-k_0}{\sigma}\right)^2\right] dk \quad (4)$$

ここで k_0 は震度 k の平均値で家屋の50%を倒壊させる震度である。また σ は標準偏差で木造家屋の耐震度のばらつきの程度を表す。物部は関東地震時の墓石の転倒から求めた合震度と木造家屋の倒壊率の関係を示し³⁾、関東地震時の k_0 は0.45~0.50、 σ は0.07~0.1であると推定している。式(4)を用いれば、地震時の木造家屋の倒壊率は震度の大きさからのみ推定できる。物部による倒壊率は著者らの全被害率に相当する。

いま東海地震による名古屋市の木造家屋の被害を著者らの方法で求めた結果と物部式で求めたそれとを比較してみる。[物部は合震度 K を使用しているので、これを著者らの水平震度に換算しなければならない。そのために次式を用いた。

$$K = \frac{k_h}{1-k_v} \quad (5)$$

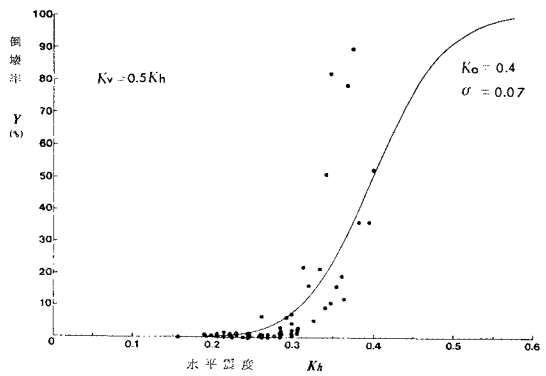


図-7 物部による水平震度と木造家屋の倒壊率の関係 ($k_v=0.5k_h$)

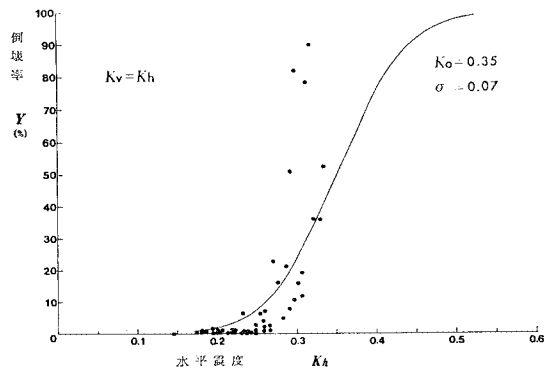


図-8 物部による水平震度と木造家屋の倒壊率の関係 ($k_v=k_h$)

ここに、 k_h が水平震度、 k_v が鉛直震度である。 k_h と k_v の関係が不明なため、次の2つの場合を仮定して K を k_h に換算した。① $k_v=1/2 \cdot k_h$ 、② $k_v=k_h$ 。

前者の仮定で換算した関東地震時に物部が示した倒壊率を k_h に対して●印で示したものが図-7、後者の仮定によるものが図-8である。それぞれの図に示す実線は前者では $k_0=0.4$ 、 $\sigma=0.07$ 、後者では $k_0=0.35$ 、 $\sigma=0.07$ として式(4)に基づいて描かれている。両図を比較して明白なように、図-8で見積った方が被害が大である。両図でそれぞれ名古屋市の各メッシュの倒壊率を求め、市全体の被害戸数を算定すると、前者では約230戸、後者では約1950戸となり、著者らの求めた結果の約6300戸よりもはるかに少ない。

なお、著者らの方法による名古屋市各メッシュの全被害率を横軸に、図-8の実線に基づいた名古屋市各メッシュの全被害率を縦軸に示したものが図-9に示されている。これからも各メッシュで物部式による値が著者らの方法によるものよりもほとんど小さいことが明白である。この理由として次の2つが考えられる。1つは著者らの方法では震度以外にもいくつかの要因を考えている

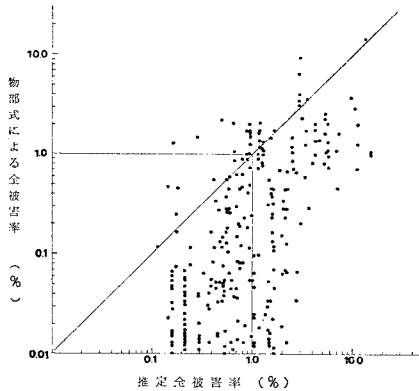


図-9 著者らの推定全被害率と物部式による全被害率の比較(名古屋市)

こと。他の1つは墓石の転倒から求めた合震度は基地では、墓石のすぐ下の地盤が局部的に悪いという理由のために大きく見積られがちである²⁷⁾ことである。

なお、飯田ら⁹⁾は東海地震を想定して名古屋市の地震基盤に70 galの加速度を入力し、重複反射による地表での増幅率を求めて地表最大加速度を推定し、上述の物部式より名古屋市のメッシュ別の木造家屋の全壊率を求めた。その際、現在の家屋は関東地震当時の家屋より耐震性が向上しているから、物部の示した震度に対する倒壊率の値を単純に0.75倍して全壊率を求めている。飯田らによれば、名古屋市内で予想される全壊戸数は約1500戸、半壊戸数は約2600戸で、市の総戸数に対する全被害率は0.53%である。この値は著者らの詳細なる地盤等の検討に基づく全被害率1.2%と比べると、家屋の耐震度の差による被害を補正しなくともまだ小さい。

現在の木造家屋の固有周期は関東地震当時の木造家屋の固有周期よりも短くなっており、そのため木造家屋の強度は増加しているといわれている²⁸⁾がこれを定量的に裏付けするだけの十分なデータが現時点ではみあたらないので、適切な被害戸数の補正はできない。したがって、本研究では木造家屋の耐震度を考慮した被害戸数の補正を行っていない。

(4) 被害の危険度分布

木造家屋の被害の危険度を示すために、名古屋市の各メッシュで得られた木造家屋の推定全被害率を市全体の推定全被害率(1.19%)で除し、被害率の比 R_d を各メッシュで求めた。この R_d の大きさで被害の危険度を、被害が小さいIから被害が大きくなって大きいVまでの5段階に分け図-10に示した。危険度のランク付けをした R_d の値の範囲は以下のようであり、これは前報¹⁹⁾と同じである。

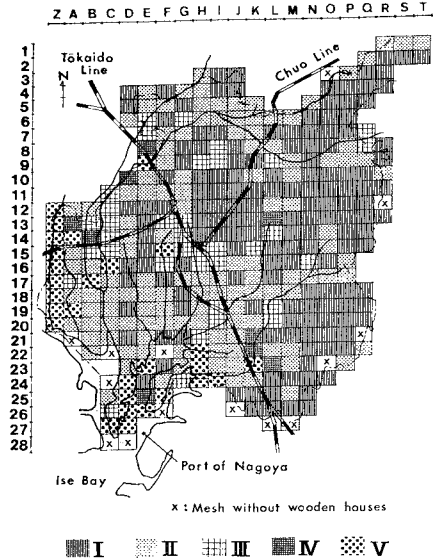


図-10 東海地震を想定した場合の名古屋市の木造家屋の危険度分布

- 危険度I : 被害は小さい ($R_d < 0.5$ のメッシュ)
- 危険度II : 被害は平均的である ($0.5 \leq R_d < 1.5$ のメッシュ)
- 危険度III : 被害はやや大きい ($1.5 \leq R_d < 2.5$ のメッシュ)
- 危険度IV : 被害は大きい ($2.5 \leq R_d < 3.5$ のメッシュ)
- 危険度V : 被害は非常に大きい ($R_d \geq 3.5$ のメッシュ)

図-10より危険度が大きいIVまたはVと判定された地区は全メッシュのおよそ11%のメッシュで、これらの地区は軟弱な沖積層が厚く堆積した市の西部や南部の河川沿いあるいは臨海部に多い。また、平均的な被害を示す危険度IIの地区は河川沿いに多く全メッシュの約36%を示している。一方、市の中央部や東部の地盤が良好な台地では危険度Iとなり、全メッシュの約43%がこのランクに分類される。この木造家屋の被害の危険度分布は水道管の被害の危険度分布²⁹⁾とほぼ同じ傾向を示している。

5. 結 語

地震時における木造家屋の定量的な被害予測のために、関東地震時の東京市の木造家屋の被害を数量化理論I類によって分析し、定量的な被害予測モデルを3つ提案した。これらの予測モデルを用いて、想定される東海地震に対する名古屋市の各メッシュで予想される木造家屋の全壊、半壊ならびに全被害戸数を算出した。また著

者らが推定した名古屋市の各メッシュの全被害率を物部式から得られた結果と比較した。この研究で得られた結果を要約すれば次のようである。

(1) 木造家屋の全壊率の分析に用いた要因を全壊率に与える影響度の大きい要因から列举すると、①沖積層厚、②表層の地盤種別、③震度、④地形、⑤土の種類、⑥家屋の密集度、⑦ N 値、の順になる。特に沖積層厚が20mをこえると全壊率は急に高くなる傾向を示した。また、沖積層のみの場所よりも沖積層と洪積層、あるいはこれらと河谷低地で構成されている場所で全壊率が大きくなるという結果になった。

(2) 半壊率に対する分析の結果、半壊率に与える要因の影響度の大きさの順序は全壊率の場合と同じになった。この分析で特筆すべきことは、洪積地盤の方が沖積地盤よりも半壊率が大きくなる傾向がみられたことである。このことは地震時に沖積地盤上の木造家屋は全壊の被害の方が半壊の被害よりも卓越しており、一方、洪積地盤上の家屋は半壊の被害の方が全壊の被害よりも卓越していることを示すものと考えられる。

(3) 全被害率に対する分析の結果、要因の影響度の順序は上述の2つの場合と比べて震度と地盤種別の両要因の順序が入れかわるだけで他の要因の順序は同じである。いずれの分析においても沖積層厚が地震時の木造家屋の被害に最も影響することが示された。このことは従来の研究でしばしば指摘されていたことであり、この研究でその影響の強さが一層明確にされたといえる。

(4) 被害分析から得られた予測モデルを用いて、東海地震を想定した場合の名古屋市の木造家屋の被害戸数を推定すると、被害は市の南部や西部の沖積層が厚く堆積した地区で大きく、市の中央部や東部の洪積地盤上では小さいという結果が得られた。市全体の推定全壊戸数は約3500戸、推定半壊戸数は約5600戸となり、市の総戸数に対する推定全壊率ならびに半壊率はそれぞれ0.7%、1.0%となった。

(5) この研究では従来の木造家屋の被害率の定義に基づく予測値と大きくそれることなく、全壊戸数と半壊戸数とに分けてそれぞれ明確な値で全壊、半壊戸数を表わすことができた。

(6) 物部式による木造家屋の倒壊率(全被害率)を著者らの方法によるそれを東海地震を想定した場合の名古屋市の各メッシュと比較した。その結果、著者らの方法による値の方が大きな値を示した。このことは地震時の木造家屋の被害は震度のみではなく、上述した他のいくつかの要因によっても影響されることを示唆するものであり、著者らの方法はより合理的な被害率の算定を与えてくれる。

ここで提案した被害予測モデルは関東地震当時の木造

家屋に対するものであり、現在の木造家屋は当時のものより耐震性が増しているといわれているが両時点における木造家屋の耐震度の差を定量的に裏付けするだけ十分な資料は現在みあたらない。そのため、現時点ではこれらのモデルに依存せざるを得ないと考える。

この研究の計算は中部工業大学情報処理センターのFACOM-M160ADと名古屋大学大型計算機センターのFACOM-M200によった。

参考文献

- 河角 廣：東京、大阪両都市の震害分布と地盤、資源データブック第6号災害編その2、経済安定本部資源調査会、pp. 19~26, 1952.
- 表俊一郎・宮村繁三：横浜市並びに名古屋市の震害分布と地盤の関係、建築雑誌、66巻、No. 773, pp. 17~22, 1951.
- 物部長穂：震災予防調査会報告第100号丁、pp. 7~17, 1926.
- 小林啓美・長橋純男：木造建築物地震被害率による地震動の強さの評価、日本建築学会論文報告集、第163号、pp. 19~28, 1969.
- 宮野道雄：墓石・木造建物被害等による震度に関する若干の検討、土木学会論文報告集、No. 139, pp. 33~42, 1982.
- 望月利男・宮野道雄・松田磐久：1923年関東地震における木造家屋の被害の検討、日本建築学会論文報告集、No. 270, pp. 81~90, 1978.
- 望月利男：東京都区内における木造家屋の震害予測のための実態調査と地震応答計算について、日本建築学会論文報告集、No. 230, pp. 73~83, 1975.
- 望月利男・宮野道男：東京における安政江戸地震と関東大地震の被害についての一考察、日本建築学会論文報告集、No. 256, pp. 47~55, 1977.
- 飯田汲事・正木和明・谷口仁士・多賀直恒・富樫 豊：名古屋市における地域別地震被害想定に関する調査研究、名古屋市防災会議地震対策専門委員会報告、1981.
- 名古屋市防災会議地震対策専門委員会編：濃尾地震文獻目録、1978.
- 松沢武雄：震災予防調査会報告第100号甲、pp. 232~260, 1925.
- 東京市役所：東京市各区町別戸数及人口、1920.
- 飯田汲事：昭和19年12月7日の東南海地震の震害と震度分布、愛知県防災会議報告書、1977.
- 北陸震災調査特別委員会：昭和23年福井地震震災調査報告、建築部門、1951.
- 土木学会新潟震災調査委員会：昭和39年新潟地震震害調査報告、1966.
- 1968年十勝沖地震調査委員会：1968年十勝沖地震調査報告、1968.
- 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告、1980.
- 守屋喜久夫：地震災害の防止と対策、鹿島出版会、1980.
- 市原松平・山田公夫：地震時における名古屋市の水道管の相対的危険度、土木学会論文報告集、No. 316, pp. 51~63, 1981.
- 林知己夫・村山孝喜：市場調査の計画と実際、日刊工業新聞社、pp. 177~225, 1977.
- 今村明恒：震災予防調査会報告第100号甲、pp. 21~66, 1926.
- 東京都土木技術研究所編：東京都の地盤(Ⅰ)、技報堂、1977.
- Ichihara, M. and K. Yamada: Application of Micro-

- zonation for the Damage of Water Pipelines, Third International Earthquake Microzonation Conference Proceedings, Vol. 3, pp. 1665~1676, 1982.
- 24) 建築学会東海支部・土質工学会中部支部・名古屋地盤調査研究会編著：名古屋地盤図，コロナ社，1969.
- 25) 建設省中部地方建設局中部技術事務所：濃尾平野の地盤資料，1978.
- 26) 物部長徳：土木耐震学，理工図書，1952.
- 27) 中村左衛門太郎：震災予防調査会報告第100号甲，pp. 67~140, 1925.
- 28) 鏡味洋史：木造建築物の被害と地震動の最大加速度との関係，川崎市の震災予防に関する調査研究報告書，川崎市防災会議地震専門部会，pp. 97~102, 1975.
- (1983.3.28・受付)
-