

1995年兵庫県南部地震時の神戸市灘区・東灘区内で発生した瓦礫と建物間距離の関係に関する分析

An Analysis of Relation between Distance of Buildings and Rubble Outflow by Collapsed Building in Nada and Higashi-Nada Wards, Kobe City after the 1995 South Hyogo Prefecture Earthquake

阪田 知彦¹, 寺木 彰浩²

Tomohiko SAKATA¹ and Akihiro TERAHI²

¹ 国土交通省国土技術政策総合研究所総合技術政策研究センター建設経済研究室

Construction Economics Division, Research Center for Land and Construction Management, National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

² 独立行政法人建築研究所企画部

Department of Research Planning and Management, Building Research Institute

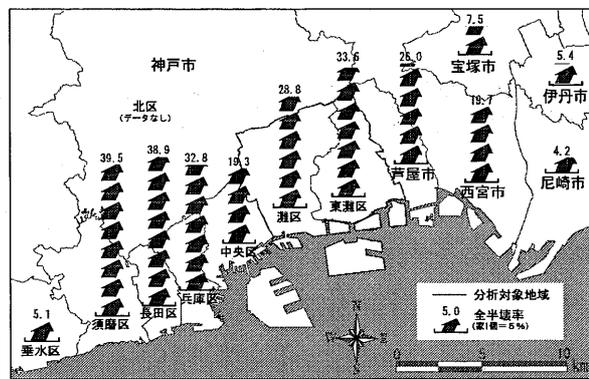
This research is demonstrative analysis of rubble outflow situation in Nada and Higashi-Nada Wards, Kobe City at the 1995 South Hyogo Prefecture Earthquake, as part of the development of the forecast technology of the road blockage by building collapse in high density urban area at an earthquake. This paper deals with the analysis result of relations between rubble outflow by the building collapse and distance of buildings. To this end, first, we arranged the data used for the analysis. Next, we analyzed relations between rubble outflow and buildings. Last, we considered the pattern of rubble outflow and distance of buildings.

Key Words : Rubble Outflow by Collapsed Building, Distance of Buildings, Nada and Higashi-Nada Wards, Kobe City, the 1995 South Hyogo Prefecture Earthquake

1. はじめに

本研究は、密集市街地における地震時の建物倒壊による道路閉塞の予測技術の開発の一環として実施した、1995年兵庫県南部地震時の神戸市灘区・東灘区における瓦礫流出状況の実証分析に関するものである。本稿では、建物倒壊による瓦礫と、建物間の距離との関係に着目した分析結果を報告する。

兵庫県南部地震での建物被害の多くは火災と倒壊によるものである。図1は、旧建設省建築研究所¹⁾が公表した地域別の全壊率であるが、神戸市域ではかなりの建物が全壊したことがわかる。建物の倒壊は、直接的な人的被害の要因になるばかりでなく、建物倒壊によって発生する瓦礫が道路に流出し、道路閉塞を引き起こすことがある。建物の倒壊による道路閉塞は、避難や救援救護活動、被災地や避難所への救援物資の緊急輸送などのための経路障害を引き起こし、被害拡大の大きな要因となることが指摘されている。また、建物倒壊により発生した瓦礫の撤去は、多くの人的資源や費用が必要であり、効率的な対策を打たなければ、復旧復興の遅れにつながる大きな問題である。したがって、大地震時に建物の倒壊によって発生する瓦礫によって街のどこで道路閉塞が起ころやすいかを予測する技術や、また瓦礫撤去の効率的な戦略を支援する技術が必要である。こうした観点より、様々な取り組み（技術開発）がなされている⁽¹⁾。建物からの瓦礫発生モデル化へのアプローチは、大きく分けて2つあると考えられる。1つは、振動実験などにより得られる建物の倒壊と瓦礫流出の関係についての実験結果に基づき、建物の部材レベルの詳細なモデル化による現象の再現があげられる。しかし、実際には、こうした



※文献1に掲載の地域別全壊率データを元に著者作成

図1 分析対象地域と建物全壊率

実験結果やモデル化の例は未だ蓄積が少なく、計算機上での現象の再現においても、建物の部材レベルのモデル化は現実的には困難である。もう1つは、過去の地震時の実証分析より建物の被災状況ごとの瓦礫発生パターンの発生確率を得ることにより、確率的に瓦礫発生を再現する方法である。こうした観点からの研究も散見されるが、多くは単体の建物についてのみ扱っており、複数の倒壊建物による瓦礫発生についてのモデル化は管見では見られない。そこで、著者らは複数の建物の倒壊による瓦礫発生モデルを考える上で、建物間の最小距離（以下、隣棟距離）に着目し、隣棟距離の要素を加味したモデル化が出来無いかという仮定のもと、まずは隣棟距離と建物の被災状況と瓦礫発生との3つの要素間関係についての分析を行う必要があると考えた。

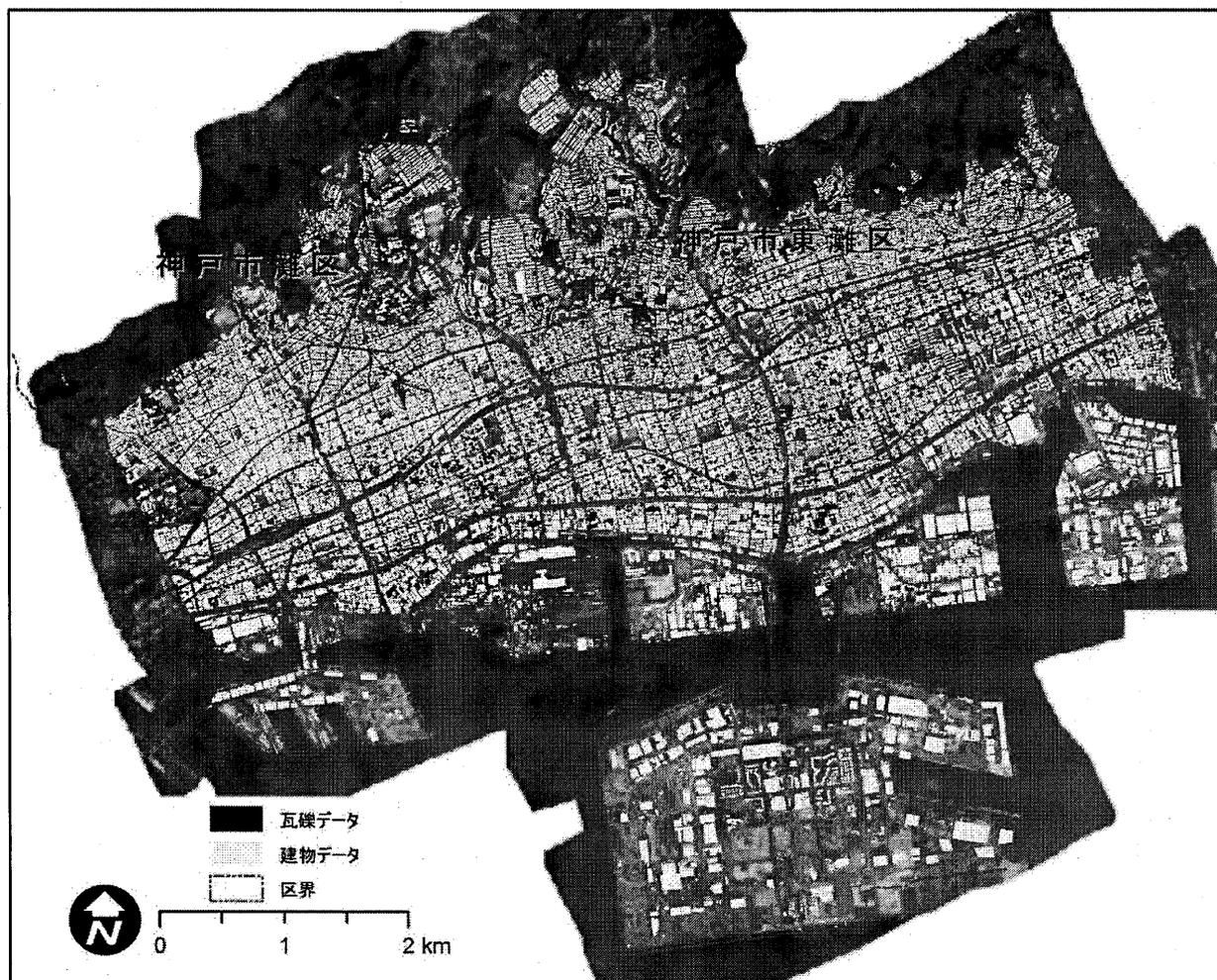


図2 分析に使用した瓦礫データの全景

表1 瓦礫データの概要

地域	瓦礫図形数	瓦礫図形と関連づけられた被災程度別建物数						合計	建物数
		全壊	半壊	一部損壊	無被害	焼損	未調査・属性無		
灘区	869	959	29	18	27	1	70	1,104	30,828
東灘区	1,300	1,458	57	12	19	4	83	1,633	40,926
全体	2,169	2,417	86	30	46	5	153	2,737	71,754

しかし、こうした建物と瓦礫の関係に着目した詳細な分析においては、

- ・建物倒壊によってどこでどのような形状の瓦礫が発生したかを面的にとらえたデータの不在
- ・瓦礫データと建物の形状や被災度などとの関係の把握が困難

が課題であった(詳しくは、2章で整理する)。

そこで本稿では、兵庫県南部地震時の神戸市灘区・東灘区内を対象として作成された瓦礫データと建物1棟単位で整備された被災状況データを元に、隣棟距離と建物の被災状況と瓦礫発生との3つの要素間に関する実証分析を行うことにした。

以下ではまず、分析に用いたデータについて整理を行い、次に分析結果を、最後にまとめと今後の課題を述べることにする。

2. 方法

ここでは、分析のために作成・使用した瓦礫データと建物データについて整理する。

(1) 瓦礫データ

前述のように、今回の分析において必要な、建物倒壊によってどこでどのような形状の瓦礫が発生したかを面的にとらえたデータは管見では存在しない。

兵庫県南部地震時に、公費(国負担1/2)で瓦礫撤去が行われた際の工事記録が作成されたが、この資料のみでは市街地全体の面的な把握が困難であり、その記録自体も公文書の保存年限との関係で破棄されたものが多い。また、碓井ら²⁾によれば、神戸市長田区では、地理情報システム(GIS)を活用した瓦礫撤去の管理を行ったと報告されているが、瓦礫の位置を管理するにとどまり、個々の瓦礫の形状までは管理されていない。

これ以外にも、兵庫県南部地震時の瓦礫に関する記録

や資料は存在する可能性もあるが、現在では時間的経過もあり、面的な把握に耐えるだけの資料が集まる可能性が極めて低い。

これに対し、独立行政法人建築研究所では2002年に、神戸市灘区および東灘区（約63km²）を対象とした地域について、発災直後に撮影された空中写真を元にした瓦礫形状データ化を実施している³⁾。今回の分析ではこの瓦礫データを用いることにした。

作成手順の概要は、以下の通りである。

- ・航空測量会社が発災直後に撮影した空中写真を基に、平面地図と同等に正射投影したデジタルオルソフォト（地上分解能約40cm程度）を作成
- ・目視判読で瓦礫流出範囲を特定し、GIS上で瓦礫図形（ポリゴン）を図化

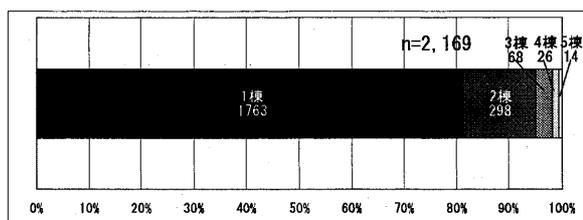


図3 発生源の建物棟数別に見た瓦礫図形数

- ・瓦礫図形と後述する建物被災データを重ね合わせ、発生源となったと考えられる建物との関連づけ（発生源となった建物IDを個々の瓦礫図形に属性として付与した）

こうして作成された瓦礫データの全景を図2に示す。

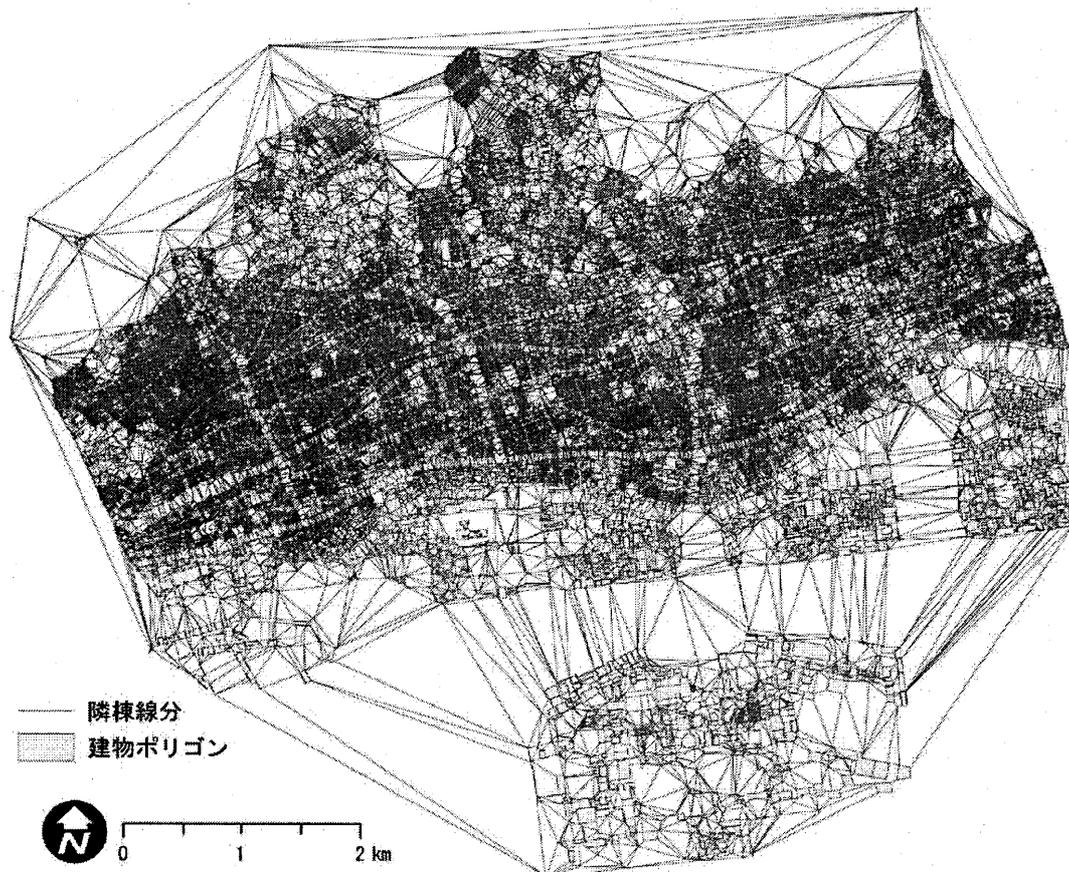


図4 生成した隣棟線分

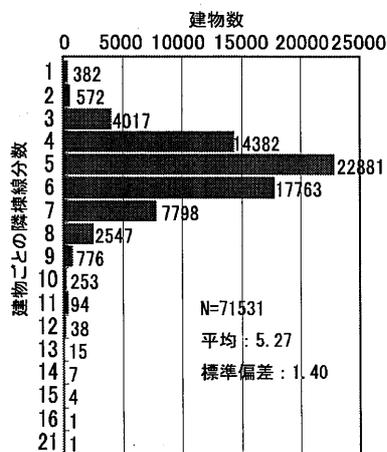


図5 建物ごとの隣棟線分数

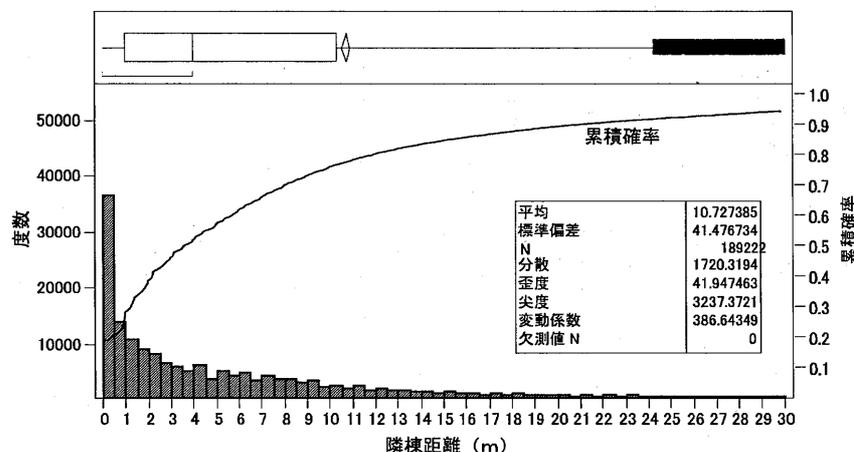


図6 隣棟距離のヒストグラムと基本統計量

この領域では、2,169個の瓦礫図形がデータ化された⁽²⁾。

図3は、瓦礫の発生源となった建物棟数別の瓦礫図形数についての集計である。2,169個の瓦礫図形のうち、約81%の瓦礫図形は単体の建物から発生したものである。一方、複数の建物によって発生した瓦礫図形も19%と、無視できないほどある。後者の発生した要因は厳密には特定できないが、いわゆる「連鎖倒壊」や「群倒壊」と言われる事象に当たると考えられる。

(2) 建物データと隣棟距離の計測

建物の被災状況については、日本建築学会・日本都市計画学会・兵庫県による被災状況調査結果を元に、旧建設省建築研究所によってデータ化されたものを使用した(以下、これを建物被災データ、とする)⁽³⁾。この建物被災データには、被災状況、堅牢/非堅牢区分⁽⁴⁾、建物用途⁽⁵⁾が属性として記録されている。これらの被災状況と瓦礫データの概要を示したのが、表1である。

次に、建物間の距離の計測を行った。基本となる考え方は、杉原⁽⁴⁾の一般図形に対するボロノイ分割アルゴリズムにより隣り合う建物を定義し、この建物間の最短線分を生成する(以下、隣棟線分とする)という方法である。今回は、旧建設省(後に国土交通省)総合技術開発プロジェクト「先端技術を活用した国土管理技術の開発」の一環で上記の方法を市販GIS上に実装した地区区分ツール⁽⁵⁾を使用し、隣棟線分の作図を行った。

具体的な作業手順としては、まず上記の被災状況データより、灘区・東灘区内に存在する建物(71,754個)を抽出した。次に、各々の建物の外形線を元に上述の地区区分ツールを用いて隣棟線分を生成した(図4)。使用したツールの実装上の制約より隣棟線分の生成がされなかった建物223個⁽⁶⁾を除く、71,531個の建物に対し、189,222本の隣棟線分が生成された。

図5は、建物ごとの隣棟線分数を示したものである。平均で1棟あたり5.2本程度の隣棟線分が生成されており、青木⁽⁶⁾による既往の知見(東京都内での検証において、隣接建物数はおおよそ6棟程度)とも大きく変わらない結果である。上記の隣棟線分が生成されなかった場合以外にも、隣棟線分が1ないし2の建物が見受けられる⁽⁷⁾。ただし、建物数全体から見て少数のため、今回はこれらの隣棟線分も含めて分析を行うことにした。

次に、図6は隣棟線分の長さのヒストグラムと基本統計量を示したものである。0~0.5mの隣棟線分が最も多く(36,160本:隣棟線分総数に対して19.1%)、このうち距離が0mのものが31,862本含まれており、如何に建物

が密集した地域であるかを裏付けるデータである。また、この隣棟線分の中には、区界や海域をまたぐ実際には隣棟と呼べないほどの長い線分や、幅員道路をまたぐ線分もあるが、全数に比べて小さく、全体の傾向に大きな影響を与えないと判断し、今回はこうした線分も特に区分せず分析を行うことにした。

さらに各隣棟線分には、2つの建物IDと隣棟距離を属性として付与した。これにより、瓦礫発生のパターンと被災状況を属性として持つ建物のペアと隣棟距離をデータベース化出来たことになる。

3. 分析

本節では2章で述べたデータを用いて、隣棟距離と建物の被災状況と瓦礫発生の3つの要素間の関係に着目した分析を行う。まず、隣棟線分と瓦礫発生パターンの類型化を行い、次にこの類型ごとに隣棟距離との関係を分析する。

(1) 隣棟線分と瓦礫発生パターンの類型化

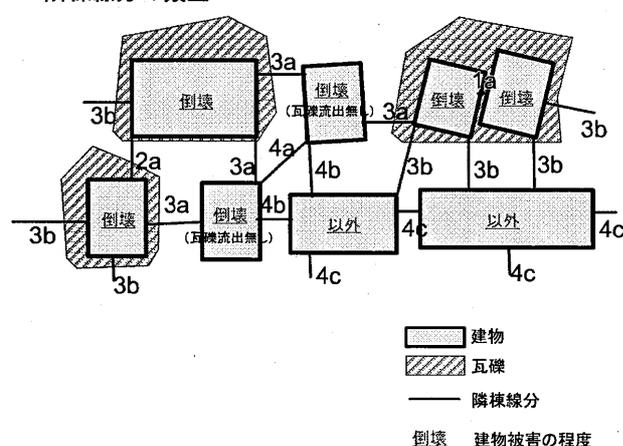
まず、図7に示すような瓦礫流出のパターンと建物被災状況(ここでは建物の被災状況を、全壊と半壊をまとめて「倒壊」、一部損傷以降をまとめて「以外」と表記している)との関係を元に隣棟線分の類型化を行った。類型ごとの基本統計量を表2に示す。これらは、冒頭で述べたように、確率的に瓦礫発生を再現する際に、別途得ることが可能な建物の被害状況ごとの瓦礫発生パターンと隣棟線分の関係を明らかにし、かつそのうち複数の建物が発生源となる確率について明らかにしようとするものである。

まず、隣棟線分の総数189,222本のうち、瓦礫の発生した建物間の隣棟線分(類型1aから3cまで)は12,790本(6.8%)である。そのうち、複数の建物によって瓦礫が発生した場合が1aから1cである(512本)。隣棟線分の総数189,222本に対しては、0.3%程度と極めて小さい割合である。また、瓦礫が流出した隣棟線分の類型である1aから3cまでの隣棟線分数の合計12,790本を母数として考えても、4%程度と小さい割合である。

一方、建物被害の程度から「倒壊」に着目すると、「倒壊」-「倒壊」および「倒壊」-「以外」という組み合わせの隣棟線分数(80,068本)に対しての割合は、0.6%となり、これも極めて小さい割合である。

したがって、建物の被害状況と隣棟関係から見れば、

■瓦礫流出パターンと建物被害状況との関係による隣棟線分の類型



■類型ごとの隣棟線分数

類型	瓦礫流出	被災状況	件数	割合(%)
1a	同じ瓦礫内	倒壊-倒壊	427	0.23
1b		倒壊-以外	62	0.03
1c		以外-以外	23	0.01
2a	違う瓦礫同士	倒壊-倒壊	856	0.45
2b		倒壊-以外	135	0.07
2c		以外-以外	16	0.01
3a	どちらか一方が瓦礫流出	倒壊-倒壊	5,878	3.11
3b		倒壊-以外	4,834	2.55
3c		以外-以外	559	0.30
4a	瓦礫流出無し	倒壊-倒壊	26,511	14.01
4b		倒壊-以外	41,365	21.86
4c		以外-以外	108,556	57.37
			189,222	100.00

図7 瓦礫流出と被災状況による隣棟線分の類型化

表2 隣棟線分の類型ごとの基本統計量

類型	最小距離	最大距離	平均距離	距離合計	標準偏差	分散
1a	0.00	9.23	0.45	190.79	1.01	1.01
1b	0.00	5.04	0.52	31.96	1.15	1.32
1c	0.00	7.12	1.09	25.15	1.96	3.85
2a	0.00	56.44	5.56	4762.85	6.73	45.31
2b	0.00	58.94	7.46	1007.70	9.88	97.59
2c	0.00	15.34	4.38	70.11	4.33	18.72
3a	0.00	109.12	5.74	33748.22	8.07	65.05
3b	0.00	758.42	9.22	44570.06	19.47	379.25
3c	0.00	454.17	10.51	5875.24	27.91	778.85
4a	0.00	186.61	4.20	111244.75	7.81	61.02
4b	0.00	1023.90	8.32	343950.77	18.04	325.29
4c	0.00	5463.32	13.67	1484379.57	53.02	2811.44

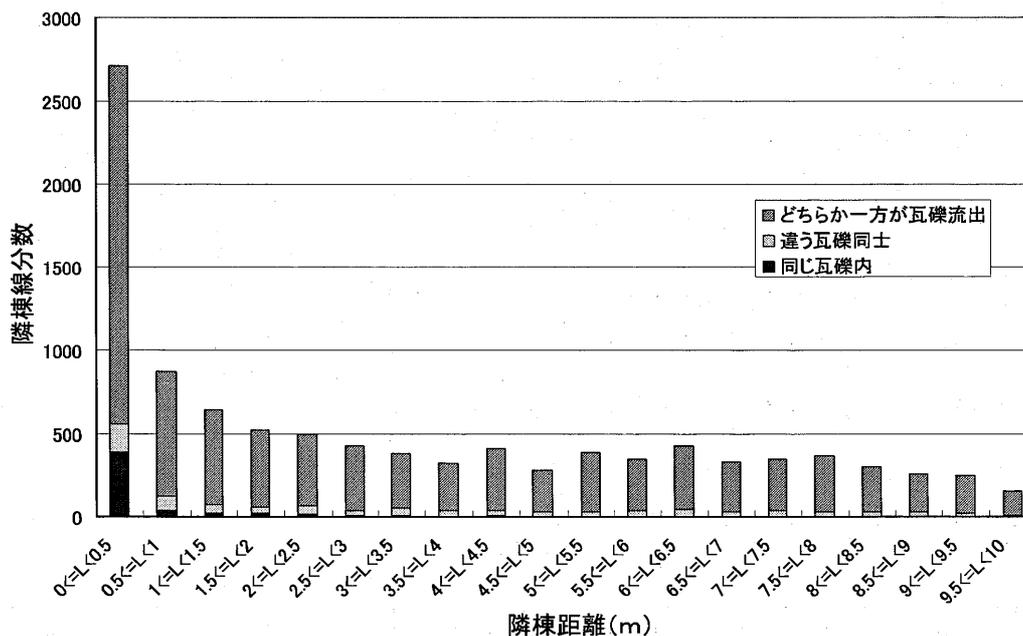


図8 瓦礫流出パターン別隣棟線分数のヒストグラム

複数の建物によって瓦礫が発生するという現象の確率は、大きくないことが解る。

また表2より、「同じ瓦礫内」の類型1aから1cまでの最大距離と平均距離は、他の類型に比べて小さいことがわかる。これは、サンプル数が少数のため、断定は出来ないが、複数の建物を発生源とする瓦礫が発生しやすい隣棟距離の傾向の1つとして捉えることができる。

(2) 類型ごとの隣棟距離の関係

ここでは、(1)と見方を変えて、建物間の隣棟線分(距離)が与えられた場合、その隣棟距離ごとの瓦礫発生パターン(単体の建物が発生源なのか、複数の建物が発生源なのか)についての傾向を得ようとするものである。

そこで、瓦礫発生の種類別に隣棟距離による隣棟線分数のヒストグラムを作成した。図8は隣棟線分全体の平均値(10.72m)を手がかりに、隣棟距離10m未満のサンプル(サンプル数:10,251件)を抽出し、瓦礫の発生パターンのうち、「同じ瓦礫内」「違う瓦礫同士」「どちらか一方の建物が瓦礫流出」の3区分についてプロットしたものである。

これより、複数の建物が発生源となる「同じ瓦礫内」のサンプルにおける隣棟距離が0.5m未満の比率が大きいがわかる。これは、建物が接するように建っている場合に、複数の建物による瓦礫が発生する確率を示しており、有益な知見であるといえるが、同じ隣棟線分の

サンプルから見ても大きな値ではないことが解る。

4. まとめ

以上、兵庫県南部地震時の神戸市灘区・東灘区内を対象として、瓦礫と隣棟距離に着目した類型ごとの傾向を見てきた。それぞれの分析より得られた知見としては、

- 対象地域では、約2割の瓦礫は複数の建物の倒壊によるものであり、被害としては無視できない程度あること
- 建物間の隣接関係からみると、瓦礫の発生確率は小さく、特に複数の建物による瓦礫の発生確率は極めて小さいこと
- 隣棟距離と瓦礫発生との関係を見ると、隣棟距離が0.5m未満で、複数の建物による瓦礫発生割合が0.5m以上の隣棟距離のサンプルに比べて若干高くなる傾向が確認出来たこと。特にこの傾向は、複数の建物による瓦礫発生モデル化に際して、有益な知見であると考えられる。

などがあげられる。こうした知見は、これまでの直感的・経験的に認識されていた知見を数値的に裏付けるものであり、こうした視点からの類似の分析事例はこれまでに無く、新規性の高い有益な知見が得られた。

今回の分析により隣棟距離に着目した瓦礫発生傾向

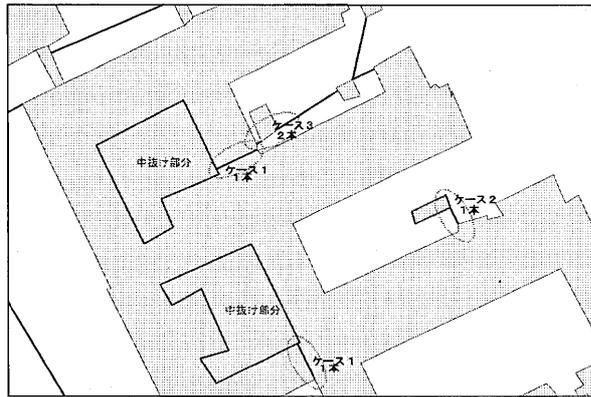


図9 隣棟線分数が1および2になる事例

を実証的に把握できたことは、これまでの被害確率に着目した瓦礫発生モデルに対して、建物の配置・形状などを元にした瓦礫発生モデルの開発への足がかりを得られたといえる。

今後の課題としては、隣棟距離に基づく瓦礫発生モデルの構築のために、さらにサンプルや地域を増やし、同様の分析結果を蓄積することがあげられる。また、瓦礫発生モデル以外の展開として、隣棟距離に着目した地域の脆弱性を示す指標の開発なども考えられる。これらの課題については、機会を改めたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、石井儀光氏（国土交通省国土技術政策総合研究所都市研究部都市計画研究室主任研究官）より有益な助言を得た。また、審査の過程において匿名の査読者の方より有益な指摘をいただいた。記して謝意を表す。なお本研究は、文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの「建物倒壊および道路閉塞のシミュレーション技術の開発」（担当機関：独立行政法人建築研究所）の平成14年度および平成18年度委託費で行った研究のうち、著者担当分を取りまとめたものである。

補注

- (1) 例えば、文献7に道路閉塞予測技術のレビューがなされている。
- (2) 直感的には被害に比べて少ないという印象をもつ読者もいると思われるが、空中写真判読による方法では、建物外形線を大幅にはみ出すように流出した瓦礫を識別するのが限界であり、例えば全壊被害でも低層部分のみが崩落したケースは空中写真からの判読は困難である。
- (3) 建物被災データの作成経緯の詳細は、文献8を参照されたい。
- (4) 地形図図式の判読に基づく。
- (5) 都市計画基礎調査結果の建物現況用途図（紙媒体）から読み込んで付与したもの。
- (6) 隣棟線分数が0の建物が発生源となっている瓦礫図形が13サンプルあった（全て単体の建物からの瓦礫）が、当該建物と同様に以降の分析では対象外となっている。
- (7) 隣棟線分数が1ないし2であるケースとして、例えば図9のケース1（建物の中抜け部分の図形）やケース2（コの字型、L字型の建物の凹部分にある建物）の様な建物配置であることが多い。特に、中抜け部分は建物の外形線であり、今回の分析では建物ポリゴンとして扱っている⁹⁾。瓦礫が内側に発生するなど通常の建物ポリゴンと分けて考えるべきであるという立場があり、詳細な分析や結果をふまえたモデル作成に際し、取り扱いに関する議論を要する。しかし、数が少なく分析の対象としても、しなくても、今回の分析に対する影響が極め

て小さいため、定義を優先し建物ポリゴンとして取り扱うこととした。

参考文献

- 1) 建設省建築研究所（1995）平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書，建設省建築研究所。
- 2) 碓井照子・亀田弘行・角本繁（1995）阪神・淡路大震災の復興過程における瓦礫撤去状況調査からみた神戸市長田区における防災GIS導入効果の分析，地理情報システム学会講演論文集，vol. 4, p. 39-42, 地理情報システム学会。
- 3) 阪田知彦・石井儀光・寺木彰浩（2003）大規模地震による瓦礫流出状況のオルソフォトを用いた判読における問題点について，地理情報システム学会研究発表大会論文集，Vol. 12, pp459-464, 地理情報システム学会。
- 4) 杉原厚吉（1998）FORTRAN 計算幾何プログラミング，岩波書店。
- 5) 国土交通省（2003）国土交通省総合技術開発プロジェクト『先端技術を活用した国土管理技術の開発』総合報告書，国土交通省。
- 6) 青木義次（1979）建築安全計画手法に関する研究，東京工業大学学位論文。
- 7) 寺木彰浩・阪田知彦（2003）建物倒壊および道路閉塞のシミュレーション技術の開発，大都市大震災軽減化特別プロジェクト「被害者救助等の災害対応戦略の最適化1. 震災総合シミュレーションシステムの開発」平成14年度報告書，pp323-348, 文部科学省研究開発局。
- 8) 建設省建築研究所（1996）平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，建設省建築研究所。
- 9) 寺木彰浩・岩田司（2003）デジタルマッピングデータから建築物ポリゴンを作成する際の問題点，都市計画論文集，No. 38-3, pp397-402, 日本都市計画学会。

（原稿受付 2007.5.28）

（登載決定 2007.9.15）