

# 瓦礫流出の方向を考慮した道路閉塞シミュレーションの検討

## A Study about Simulation for Road Blockage considering Directions of Rubble Flow

○阪田 知彦<sup>1</sup>, 寺木 彰浩<sup>2</sup>  
Tomohiko SAKATA<sup>1</sup> and Akihiro TERAKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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, Transport and Tourism.

<sup>2</sup> 千葉工業大学工学部建築都市環境学科, 独立行政法人建築研究所住宅・都市研究グループ

Department of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology.

Department of Housing and Urban Planning, Building Research Institute.

The road blockade in densely area generated in case of great earthquake is a phenomenon influencing refuge, emergency lifesaving, and fire fighting. This study is related with a technical development for simulation of the road blockade by building collapse based on spatial data. In this study, a rubble outflow model with directions of rubble flow area as one of the elemental models that composed the simulation was newly developed and mounted on the road blockade simulator.

**Keywords :** Simulation for Road Blockage, Directions of Rubble Flow, Densely Area

### 1. はじめに

本発表は、市街地での道路閉塞状況のシミュレーションに関する研究のうち、建物倒壊による瓦礫流出モデルの改良とその試行的実装についての報告である。

大地震発生時の密集市街地では、多くの建物や塀柵が倒壊や火災によって発生した瓦礫によって道路が塞がれ、避難や救援・救護などに支障を来すことが経験的に知られている。

本研究では「瓦礫によって道路が塞がる現象」＝「道路閉塞」を引き起こす様々な要因のうち、建物倒壊によって発生する瓦礫による道路閉塞に着目し、建物や道路に関する空間データを元にしたシミュレーションについて検討している。シミュレーションの基本的な考え方（モデル）は、市川ら<sup>1)</sup>、阪田・寺木<sup>2)</sup>などの既往研究と同様に、建物倒壊による瓦礫流出モデルと瓦礫流出による道路閉塞状況の判定モデルに大別できる。

これら既往研究では、仮想的に倒壊建物の周囲にバッファ（瓦礫流出距離を一定としたもの）を生成することによる瓦礫流出モデル（図 1）を採用している（これを区別するために、本稿では全方位瓦礫流出モデルとする）。建物外形に対してのバッファを用いるということは、建物の周囲に等確率に瓦礫が発生することを仮定していることであり、防災性能評価上は安全側になると考えられる。一方で、全方位瓦礫流出モデルは瓦礫流出範囲を過大に見積もっており、リアリティを欠く方法であるという批判的な意見もある。兵庫県南部地震時に実際発生した瓦礫の流出状況（図 2）を見ると、建物の周囲に等確率で瓦礫が発生するということは希であり、瓦礫流出には方向によって建物からの流出距離が異なるということがわかる。

こうした背景より筆者らは、方向により瓦礫流出距離を変化させることが可能な瓦礫流出モデル（以降、これを有方向瓦礫流出モデルとする）について検討している。

瓦礫流出の方向を考慮するには、様々な要素についての検討が必要であるが、まずは個々の建物データからどのように有方向の瓦礫流出を生成できるかという課題に取り組んだ。

以降、検討の途中経過として、有方向瓦礫流出モデルの概要、GIS（地理情報システム）などに依存しない条件下での試行的実装、まとめと今後の課題について報告する。

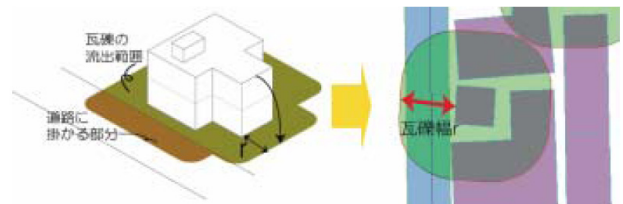


図 1 全方位瓦礫流出モデル



図 2 兵庫県南部地震時の瓦礫流出の状況<sup>(1)</sup>

## 2. 有方向瓦礫流出モデル

### (1) 基本的な考え方

前述の通り、現実の建物の倒壊による瓦礫流出は、全ての方向に対して等確率ではなく、方向によってその流出距離が異なる。そこで、有方向の瓦礫流出をどのようにモデル化するかについて検討を行った<sup>(2)</sup>。

まず、全方位瓦礫流出モデルで用いているバッファの基本に立ち返って考えることにした。一般的にバッファは、半径  $r$ [m]の円を図形の外周上を走査させてできる図形のことである。そのため理論的には、この走査させる図形（ここでは、基準図形と呼ぶことにする）を円ではなく、方向によってその長さ（円の場合は半径にあたる）を変化させ、この基準図形を建物の外形線上で走査させれば、方向によって距離の異なる領域を生成できる（図3）。これまでに、適切な基準図形を生成する方法について検討をしたが、実装上の問題などから現時点では実用に至っていない。

その他、図4に示すようなスタディを行ったが、その方法においても実装上の問題から実用には至っていない。

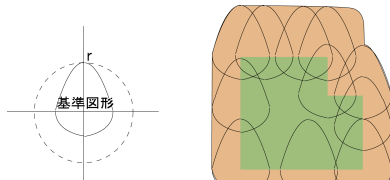


図3 方向によって距離が異なる領域の生成イメージ

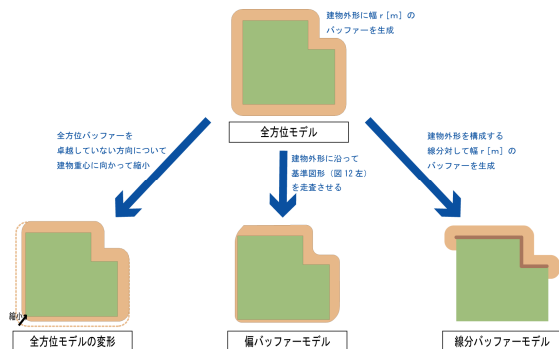


図4 有方向瓦礫流出モデルのスタディ（イメージ）

### (2) 実装の実現性を考慮した有方向瓦礫流出モデルの開発

前述のスタディを受け、有方向瓦礫流出モデルのシミュレーションへの実装の実現性を考慮し、その要素である方向を考慮した瓦礫流出範囲の生成方法について検討した。

結果、単純な幾何演算の組合せによる方向により流出距離を可変させることが可能な瓦礫流出範囲の生成方法（偏方位バッファ生成アルゴリズムと呼称する：図5）を開発した。基本的な流れは以下の通りである。

- ① 建物ごとに建物瓦礫方向を設定し、この瓦礫方向に対して従来の全方位バッファの時のように瓦礫生成幅  $r$  [m] を設定（これを最大距離ベクトルとする）する。
- ② 建物を構成する各線分（すなわち各壁面線）の中点に法線ベクトルを設定する。
- ③ 最大距離ベクトルを法線に射影する。また、パラメータで与えられた最小オフセット距離比を最大オフセット距離にかけて、最小オフセット値<sup>(3)</sup>を求め、この値以下の箇所については、この最小オフセット値を設定する。
- ④③で得られたオフセット値を各線分に設定する。

⑤④で設定したオフセット値で線分のオフセット処理を行う。

⑥ オフセットさせた各線分を結ぶ線分を生成する<sup>(4)</sup>。

⑦⑥で得られた線分と各オフセット処理を行った線分で、ポリゴン化する。これを偏方位バッファとする。

以上のアルゴリズムを開発したことにより、比較的単純な幾何演算に基づく有方向瓦礫流出モデルの実装への目処が立った。

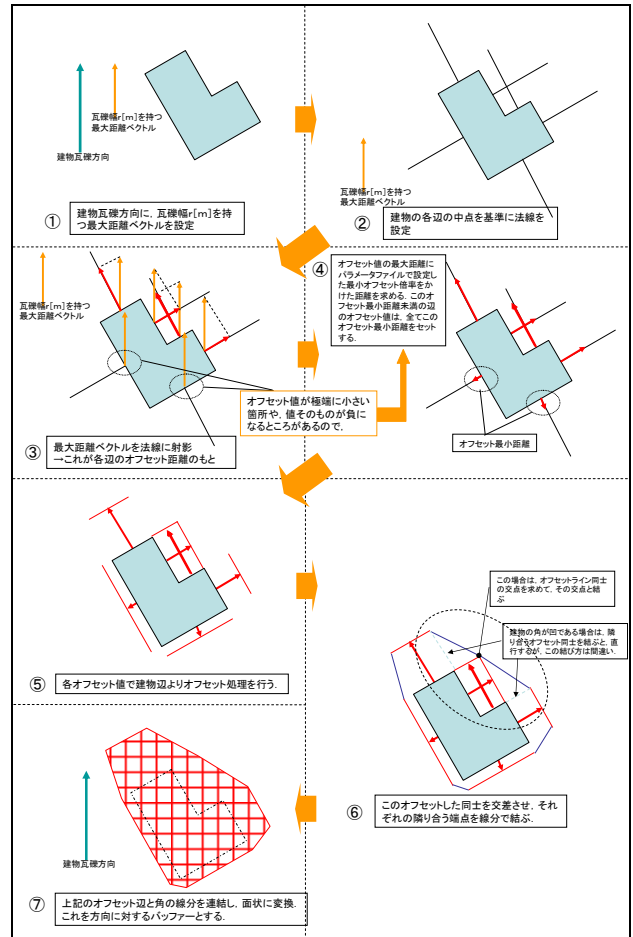


図5 偏方位バッファ生成アルゴリズム

## 3. 有方向瓦礫流出モデルの試行的実装

### (1) 基本方針

前章での検討を受けて、有方向瓦礫流出モデルを実装した道路閉塞プログラム（エンジン）を作成した（rd\_simu.exe）。このエンジンは、実行速度を最優先に考え、GISに依存しないプログラムとした<sup>(5)</sup>。

このエンジンを核とした一連の計算をするに当たり、建物ごとに瓦礫流出方向を入力パラメータとして与えるなどの必要が生じる。

現時点では、地震動に対して一意に瓦礫流出方向パラメータを定めることは理論的に極めて難しいことから、試行的にモンテカルロシミュレーションによって、建物ごとに瓦礫流出方向を確率的に求めるアプローチを取ることとした。

### (2) 確率的に建物ごとの瓦礫流出方向を求めるプログラムの試作

ここでは、今回の試行的実装のために作成したプログラム（Prepost.exe）の作成成果について整理する。

Prepost.exe は次の機能を有している (図 6) .

ア. コントロール機能

シミュレーション試行回数, 各試行結果の格納フォルダーの指定, その他必要となるパラメータの設定, 試行回数分のデータ生成 (コピー), などを行う機能.

イ. 方向パラメータ算出機能

有方向瓦礫流出モデルにおいて必要となる各建物の瓦礫流出方向パラメータ (地震動方向と角度ごとの瓦礫方向確率より, 瓦礫流出方向の期待値を算出し, 乱数により建物ごとに瓦礫流出方向を付与) を求める機能.

ウ. 計算結果集計機能

試行回数ごとに出力される道路ネットワークに付与された閉塞状況の結果を集計する機能.

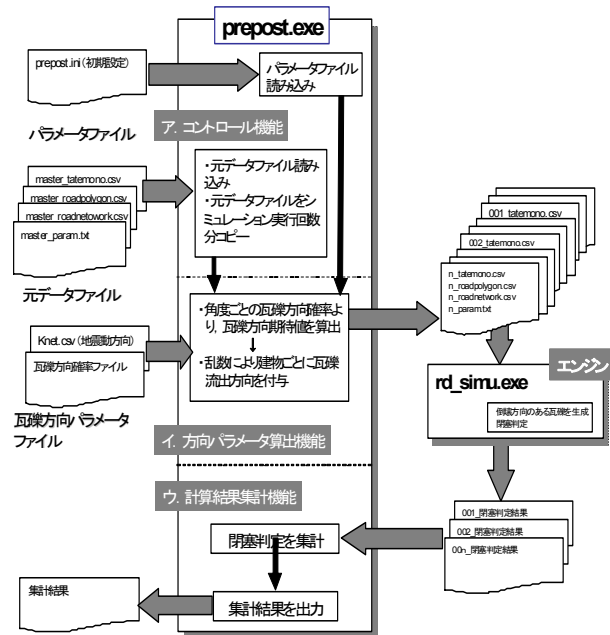


図 6 Prepost.exe の処理フロー

(3) 適用例

以上のエンジンとプログラム群を統合し, 試行的に瓦礫流出の方向を考慮した道路閉塞シミュレーションプログラムを作成した (図 7) .

このシミュレーションプログラムを元に, 川崎市街地の建物・道路ポリゴン・道路ネットワークデータ (領域としては 3km×4km, この領域内に建物は約 3 万棟ある) を用い, 以下の条件による 100 回のシミュレーションを行った.

- 建物の倒壊状況: 防災科学技術研究所川崎ラボラトリーが開発した地震動に対する応答スペクトル解析による建物の倒壊状況推定プログラムによって推定された結果 (ダメージグレード) を元にした. 倒壊は, ダメージグレードが 4 と 5 の建物を対象とした.
- 地震動パラメータファイル: k-net から取得した震源などの情報と地震動の卓越方向が設定されたファイル. 今回は, 北東方向に卓越した地震動を想定した.
- 建物倒壊方向確率テーブル: 兵庫県南部地震時の瓦礫流出状況のデータ (図 2) から瓦礫流出距離が最大となる方向の割合を分析し, 暫定的に作成した. なお, 今回用いた地震動方向から瓦礫流出方向パラメータを推定する部分についての理論的な整合性は十分ではないため, 継続的な検討が必要である.

シミュレーション結果は, 道路ネットワークデータに対して確率 (閉塞回数/試行回数) で付与される. 道路リンクごとの閉塞確率を図 8 に示す.

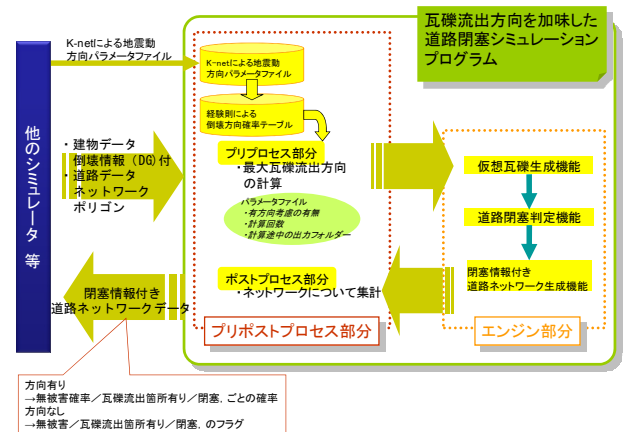


図 7 試作した道路閉塞シミュレーションプログラム (計算・データの流れのイメージ)



図 8 川崎市街地データに対する適用例

4. まとめと今後の課題

本報告では, 瓦礫流出方向を考慮した瓦礫流出モデルの改良とその試行的な実装について, 途中経過を報告した. 成果としては, 比較的単純な幾何演算に基づく有方向瓦礫流出モデルの実装への目処がたった.

今後の課題としては, 前述のように瓦礫流出方向という要素を考慮するには, この他にも様々な技術的要素の検討が必要である. 特に今回の試行的実装における地震動方向から瓦礫流出方向を推定する箇所については, 理論的側面からの精査・検討を行う必要がある.

## 謝辞

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16年度及び18年度委託費で行った研究の成果に、その後の検討成果を加え、筆者らの責任において取りまとめたものである。

## 注釈

- (1) 神戸市灘区・東灘区を対象に、兵庫県南部地震発災後に空撮された垂直写真を元に、独立行政法人建築研究所で瓦礫流出範囲と発生源の建物についてデータ化したもの。その作成経緯などについては阪田・寺木<sup>3)4)</sup>を参照されたい。
- (2) 低層階のみが倒壊し、瓦礫がすべて建築面内に収まるような倒壊もあるが、本研究ではこうした事象は瓦礫流出としては扱わないこととした。
- (3) このオフセット処理において、オフセット値が極端に小さい箇所は、幾何演算の過程において正しく処理が出来ない場合（丸め誤差の関係で、元の線分とオフセットラインが完全に並行にならず交差してしまうといった不具合）があることが明らかになった。現象としては、これまでの瓦礫データを用いた実証分析においても、建物内に瓦礫の領域が入り込んでいる場合や、建物から外側に対して微細な瓦礫が出ている例が見られる。ただし、これらを予測する場合には、過大にならない程度になるべく安全側の評価を行うことが望ましいと考え、今回の有方向瓦礫流出モデルでは、最大瓦礫流出距離に対する比率をパラメータとして最小流出距離を定め、ある一定値以下については、この距離を以ってオフセット処理を行うことにした。
- (4) 通常、バッファーでは、角は円弧で表現されるが、偏方位バッファーでは曲線を構成する半径（距離）が均一ではないため、円弧の代わりにベジエ曲線などの高次曲線を用いる必要がある。今回の実装に際しては、この高次曲線を生成する幾何演算が実装上容易ではなかったため、線分で代用することにした。
- (5) 市川ら<sup>1)</sup>や阪田・寺木<sup>2)</sup>などでは、市販のGISをベースとした道路閉塞シミュレーションシステムを構築しているが、今回は計算過程を逐次観察する必要がないため、GUIのないWin32 Console Applicationで構成した。使用言語はMicrosoft Visual C++ 6.0を用いた。

## 参考文献

- 1) 市川総子, 阪田知彦, 吉川徹 (2004) 建物倒壊および道路閉塞のモデル化による避難経路の危険度を考慮した避難地への到達可能性に関する研究, GIS—理論と応用, Vol.12/No.1, pp47-56.
- 2) 阪田知彦, 寺木彰浩 (2004) リンク内部の道路閉塞状況の予測を目的とした建物倒壊による道路閉塞シミュレーションシステムの開発, 地理情報システム学会講演論文集, 13, pp175-180.
- 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講演論文集, 12, pp459-464.
- 4) 阪田知彦, 寺木彰浩 (2007) 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, 地域安全学会論文集, 9, pp305-310.