

地震時の棟別閉塞確率に基づく街路閉塞確率について*

The Street Blockage Probability Based on the Collapse Probability of the Building in the Earthquake*

江橋英治**、高柳百合子***

By Eiji EBASHI**,Yuriko TAKAYANAGI***

1 はじめに

国土技術政策総合研究所では、平成7年度の兵庫県南部地震の経験から、地震時における地区レベルの総合的な安全性を確保することの重要性に鑑み、平成10年度から14年度までの研究期間で「まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発」を実施している。この中では、地区レベルの安全性評価の一環として、地区道路の地震時の通行可能性を推計することが必要とされている。

これまでの研究において、西岡ら¹⁾は、道路幅員毎に閉塞確率を一定として地区評価を行い、塚口ら²⁾は閉塞の要因分析を行い、堀ら³⁾は幅員等による閉塞確率に基づく定量評価手法を提案している。さらに、地震時の道路の閉塞要因は大部分が複数（又は単独）の家屋崩壊で起こっている²⁾が、家田ら⁴⁾は街路閉塞を瓦礫発生との関係で分析し、新階ら⁵⁾は建物倒壊確率と街路幅員毎の閉塞モデルにより地区評価を試みている。

地区の安全性評価及び施策の検討・効果把握にあたって、街路閉塞モデルは個別の建物建替等の状況と対応している必要があるが、家田らのモデル⁴⁾においては個別建物との関係づけがされておらず、新階らのモデル⁵⁾では建物倒壊と道路閉塞との関係を道路幅員毎に模式的モデルでなされているため、きめ細かな施策との対応はできない。

このため、本研究では、複数建物の崩壊による道路閉塞も含め個別建物の崩壊との関連付けができることを示し、個別建物の改善や除却、区画街路の拡

*キーワード 防災計画,交通計画評価

**正員,国土交通省国土技術政策総合研究所都市施設研究室(〒305-0802 つくば市立原1番地 0298-64-3949, E-mail ebashi-e8810@nilim.go.jp)

***正員,国総研都市施設研究室

幅等の効果を的確に反映できる街路閉塞モデルの形式を提案し、既存研究成果をもとにそのモデル化を行ったものである。

2 建築物の倒壊と街路閉塞

以下において、複数建物による閉塞確率が、1棟のみの崩壊による閉塞確率と概ね同形の式で記述できることを、個別建物が異なる場合でも個別建物の倒壊に原因を帰着させることで成り立つことを示すとともに、同一建物である等の単純な場合の定式化から係数設定が常識的な範囲で可能であることを示す。このことによって、複数建物による街路閉塞についても、個別建物倒壊型モデルで表現できることを明らかにする。

(1) 建物が異なる場合の一般論

帰納的な考え方によって定式化可能性を示す。

(a) 1棟倒壊による街路閉塞

複数建物による閉塞を考慮しないとして、1つの街路リンクにnの建物があった場合、i番目の建物の単独崩壊による閉塞確率を P_{1i} とすれば、1棟のみでの街路の閉塞確率 F_1 は式(1)の通りである。

$$F_1 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{1i}) \quad (1)$$

(b) 複数棟(k棟)倒壊による閉塞確率

k個のまとまりまでで閉塞する確率 F_k は、k-1棟以下の倒壊で閉塞していないという条件で番号jからj+k-1までのk個で閉塞する確率を P_{kj} と書けば、以下のように書ける。

$$F_k = 1 - (1 - F_{k-1}) \prod_{j=1}^{n-k+1} (1 - P_{kj}) \quad (2)$$

ここで、 $1 - P_{kj} = \prod_{i=j}^{j+k-1} (1 - P_{ki})$ となる P_{ki} を

定義することが可能である。この意味は複数棟による倒壊についても、その構成棟のいずれかに原因を分担させるという考え方が可能ということである。

さらに、 n 棟の建物が存在するリンクに関し、

$$1 - P_i = \prod_{k=1}^n \prod_{j=\max(1, i-k+1)}^{\min(n-k+1, i)} (1 - P_{kji})$$

とおけば、このリンクでの閉塞確率 F は、

$$F = F_n = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (3)$$

と表現でき、複数建物の場合であっても、 P_{kji} の定義により 1 棟のみでの閉塞の場合と同一の定式化が可能である。なお、ここでは P_{kji} の具体的設定手法は示していないが、 P_{1i} との相関を持って設定すれば P_i と P_1 の相関性は高くなる筈である。この場合、地区内建築の類似性を仮定すれば P_i に関し周辺状況ではなく、棟別情報が支配的となり、これによる設定が可能になると考えられる。

(2) 同一建物の連坦状態モデルでの検討

単独崩壊でなく、複数倒壊による街路閉塞ストーリーとしては、対面、斜めペアなどの倒壊により街路の両側から瓦礫が押し出される、隣の同時倒壊により瓦礫長が 1 棟の場合より伸びる、といった状況が基本と考えられる。このことから、複数棟といっても隣接対面の 4 棟を単位で検討すれば、閉塞確率の大部分を考慮できると考えられる。

また、複数倒壊が発生する要因としては 各々独立、地震波が集中しやすい地形地質条件などでのまとまった崩壊、凭れ掛けなどの連鎖的な倒壊、が考えられるが、ここでは全ての建物の倒壊確率が同一であり、各々の倒壊は独立であり、家は各々体面して整然と建っていると仮定する。

(a) 1 棟倒壊による閉塞確率

1 棟での閉塞確率を P_1 とした場合は

$$F_1 = 1 - (1 - P_1)^n$$

となる。この閉塞状態になる P_1 は 建物が倒壊し、

瓦礫が道路側に出て、その瓦礫長が「街路幅員—必要幅員」(以下 w とする。)を超えた場合と想定でき、これらを備えた建物からの瓦礫長分布確率関数を $g(x)$ とすれば、1 棟のみによる閉塞確率 P_1 は、

$$P_1 = \int_w^{\infty} g(x) dx$$

と書ける。(小型車、大型車、歩行者で各々必要幅員が異なり、使い分けての検討が必要なためこのような表現を用いた。)

(b) 対面 2 棟倒壊による街路閉塞

道路幅員が広く、1 棟の流出瓦礫幅では閉塞が起こりにくい場合、対面 2 棟による閉塞及び以下に示す 3 棟閉塞が閉塞の基本パターンになると考えられる。対面 2 棟倒壊の場合、それぞれの瓦礫長の合計が「街路幅員—必要幅員」を超えた場合閉塞状態になるので、同様の瓦礫長分布確率関数 $g(x)$ を用いて、対面 2 棟の (1 棟のみの場合を含まない) 閉塞確率 P_2 は、

$$P_2 = \int_0^w g(x) \left\{ \int_{w-x}^w g(y) dy \right\} dx$$

と書け、対面 2 棟までの街路閉塞確率 F_2 は、

$$F_2 = 1 - (1 - F_1)(1 - P_2)^{n/2}$$

となり、 $(1 - P_2)^{1/2} = 1 - P_{22}$ と置けば、

$$F_2 = 1 - \{(1 - P_1)(1 - P_{22})\}^n$$

となる。

ここで、模式的に単純化して、 $P_2 = b^2$ とかける様な b を考える ($b = \text{SQRT}(\int_0^w g(x) \left\{ \int_{w-x}^w g(y) dy \right\} dx)$)。この b は一棟が道路の半分程度まで瓦礫を発生させる倒壊確率の代表値といえる。以下の検討は積分の形で整理することは困難なので、この b を用いる。

(c) 斜め 2 棟倒壊 (対面 2 棟倒壊の一般化)

ここでは隣及び向いの 4 棟セットで検討する。対面 2 棟倒壊については変形パターンとして斜めの 2 棟の倒壊で閉塞するパターンが考えられる。このパターンとしては、街路の半分程度まで瓦礫を発生させる倒壊建物 (概ね確率 b に相当すると考えられる。)を■、非倒壊建物を□とし、左右方向に水平に街路が存在するとして、 $\begin{smallmatrix} \blacksquare & \blacksquare \\ \blacksquare & \blacksquare \end{smallmatrix}$ 、 $\begin{smallmatrix} \blacksquare & \blacksquare \\ \blacksquare & \blacksquare \end{smallmatrix}$ 、 $\begin{smallmatrix} \blacksquare & \blacksquare \\ \blacksquare & \blacksquare \end{smallmatrix}$ 、 $\begin{smallmatrix} \blacksquare & \blacksquare \\ \blacksquare & \blacksquare \end{smallmatrix}$ 、 $\begin{smallmatrix} \blacksquare & \blacksquare \\ \blacksquare & \blacksquare \end{smallmatrix}$ 、 $\begin{smallmatrix} \blacksquare & \blacksquare \\ \blacksquare & \blacksquare \end{smallmatrix}$ のいずれかのパターンになった場合閉塞が起こるとする。

これらパターンに関し、左側の列($i-1$ 列)まで非閉塞であったものが、右側の列(i 列)でも閉塞しない確率 Q_i を状態の遷移として定式化して求めると、

$$Q_i = (1-b)Q_{i-1} + b(1-b)^3Q_{i-2}$$

という隣接 3 項漸化式となる。但し、初項は $Q_0=1$ 、 $Q_1=1-b^2$ である。

$Q_i = A*Q_{i-1} + B*Q_{i-2}$ の形の隣接 3 項漸化式の解については、特性方程式より、

$$Q_i = \{1 / ((A^2 + 4B)^{0.5})\}$$

[(((A²+4B)^{0.5}+A)/2)ⁱ)(Q₁+((A²+4B)^{0.5}-A)/2*Q₀) - ((-1)ⁱ*(((A²+4B)^{0.5}-A)/2)ⁱ)*(Q₁-((A²+4B)^{0.5}+A)/2*Q₀)] と求められ、この式において、[]中の前項が等比級数的な減衰項、後項は偶数番目と奇数番目で正負の変わる変動項である。

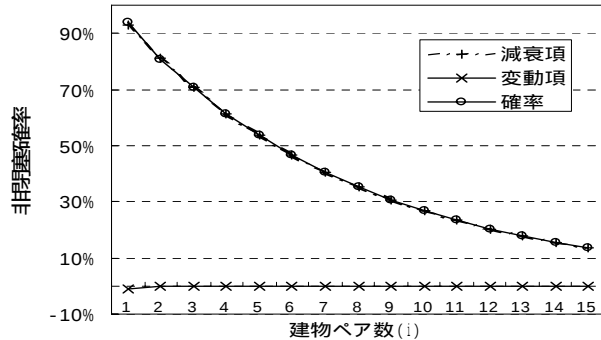


図-1 斜め2棟倒壊による非閉塞確率 (建物倒壊確率b=25%の場合)

図-1に1例を示すが、このうち変動項は極端に小さく、数値上はモデルとしては減衰項のみを用いても差異は僅少であり、これで定式化で実用上十分である。(図上は減衰項と確率は一致している。)

$$Q_i = \{ (Q_1 + ((A^2 + 4B)^{0.5} - A) / 2 * Q_0) / ((A^2 + 4B)^{0.5}) \} * ((A^2 + 4B)^{0.5} + A) / 2)^i$$

これを i 棟の家屋ペアに定式化の形で均等に割り振れば (i 乗根すれば)、対面 2 棟も含めた 4 棟までの対面型の P { 2-4 } は、

$$1 - P\{2-4\} = ((A^2 + 4B)^{0.5} + A) / 2 \times \left[\frac{(Q_1 + ((A^2 + 4B)^{0.5} - A) / 2 * Q_0)^{1/i}}{((A^2 + 4B)^{0.5})} \right]$$

となる。ここで (1/i) 乗の項は 1 に近い数で i の増加に伴い 1 に漸近する。この項の存在は隣家が片側しかない道路端の角の家の効果と解釈でき、その考え方に従えば角の 4 軒に乘せるべき数ではある。

ここで、近似的にこの項を 1 と考えれば、対面型の 4 棟を一括で勘案した閉塞確率も、対面 2 棟の場合と同じ定式化、

$$1 - P\{2-4\} = ((A + (A^2 + 4B)^{0.5}) / 2)^{1/2}$$

ができることになる。

(d) 4 棟セットまでの倒壊による閉塞確率

隣接による瓦礫長延長効果の場合として、4 等全てが閉塞した場合(■)のみ閉塞とした場合も同様な定式化で、

$$Q_i = (1 - b'^2) Q_{i-1} + (1 - b'^2) b'^2 Q_{i-2}$$

Q₀=1, Q₁=1 という隣接 3 項漸化式を得る。

このほかにも 4 棟セットまでの閉塞パターンイメ

ージは想定しうるが、同様に状態の遷移として定式化でき、隣接 3 項漸化式になると考えられる。従って、同様に定式化でき、角の家の効果を考えなければ、無理なく棟別閉塞という形に結び付けられる。

(3) 複数棟倒壊も含めたモデル化可能性

以上の検討によって、4 棟までの複数倒壊は単純モデルの場合、角地の家の効果を考えなければ無理なく棟別閉塞に結び付けられることが判る。また、5 棟以上についても角の家等の効果を考えなければ容易に定式化できることも、(1) で検討した式の形から想定できる。

角地の効果については、街路閉塞は複数倒壊での閉塞であっても単独若しくは対面 2 棟の倒壊のみでも閉塞されるという場合が多いと考えられる、街路に面する家屋数がある程度あれば効果は薄まる、

係数設定が困難 (3 参照)、という 3 点から近似的な実用モデルとしては考慮しなくて良いとした。

なお、同一家屋モデルと現実市街地の差異であるが、都市計画規制等に伴う家並みの類似性などから、全ての建物が乱雑に連坦している状態は例外的であり、(1) で一般論としても成立しうるモデルであるということが示せているので、家並みの差異を許容した実用モデルとして適用することは可能と考え、以下のモデルを組み立てた。

3 棟別閉塞の実用モデルの提案

建物倒壊による街路閉塞は、建物倒壊、倒壊に伴う街路への瓦礫発生、流出瓦礫による閉塞の 3 つの段階に区分できる。街路閉塞を建物レベルまで含めて検討するためには、この 3 つの段階のモデルを用意する必要がある。ここでは、参考文献に示す既存の研究を利用して実用モデル化を組み立てた。

(1) 建物倒壊モデル

建物の倒壊に関しては、1995 年の兵庫県南部地震に関して、いくつかの研究報告がなされている。地区の防災評価に用いるという観点では、取得可能なデータと倒壊率の関係をj用いることが必要である。この点に関し、村尾らの研究⁶⁾は構造別、建築年代別に地震動指標 (PGV) と全壊 (震災復興都市づく

り特別委員会の調査に基づくもの等)の関係についても関数形として示されており、これを用いることとした。

(2) 瓦礫発生モデル

瓦礫発生に関しては、新階らの研究⁵⁾において、建物倒壊と道路への瓦礫流出との関係は、建蔽率との関係で近似的に相関できるという結果が示されており、これを用いることとした。

但し、この建物倒壊は神戸市長田区、東灘区、灘区の航空写真による判読であり、これは(1)の全壊よりは狭い範囲であると考えられる。これは地区評価の点では、ある程度危険側に結果が出るという偏りであるので、モデルとしては許容できるとした。

(3) 瓦礫流出モデル

道路側への瓦礫の流出幅に関して定量的な分析がなされているものとしては、家田らの研究⁴⁾がある。ここでは航空写真から瓦礫幅の測定を行い、建築属性等との関係を分析しているが、建物倒壊や発生建物との関係付けはなされていない。このことは、1棟の倒壊での瓦礫のみならず、複数棟の倒壊も含めた瓦礫流出状況を測定していると考えられ、この分析結果に基づいて、2の棟別閉塞考え方に対応した瓦礫幅を求めることが可能である。

この研究においては、リンク長によるバイアス効果を、瓦礫長の基準化による方法{当てはめ計算により $\theta(l) = \exp(0.0061 \cdot l)$ を導出}で取り除き、その後の基準化瓦礫幅 y_0 と累積分布関数 F との関係が $F = 1 - b \cdot \exp(-y_0/a)$ で表されると仮定して、 a 、 b を建築属性等の指標と対応させ導出している。

式の形より、 b は道路への瓦礫流出確率、 a は平均基準化瓦礫長に相当するが、 b の説明指標に街路の建物数等が入っていないこと及び導出課程から、このままでは個別の建物及びリンクには適用できない。しかし瓦礫長は実測値に基づくものであるから、瓦礫長分布関数部分のみ($\exp(-y_0/a)$ 部分)は適用可能である。このため、この部分を基準化補正の後1棟単位で適用した。

4. まとめ(研究成果の活用について)

以上に示した考え方に基づき、震災時の地区行動

性評価の基礎となる街路閉塞モデルを組み立てた。なお、評価は地区の区画道路ネットワーク全体について、各リンクの閉塞確率を求め、各地点からの外周道路等の目的地への到達確率・到達距離などをモンテカルロシミュレーションと最短経路検索を組み合わせで計算し、評価するものとなっている。

今回の全体研究の枠組みでは、震災対応のまちづくりについて、行き止まり路地の通行可能化、区画道路や路地の拡幅(全体ができなくても一部分のみの拡幅も考慮)、建築物の更新・改善・除却、セットバックによる通路や広場の確保等のきめ細かい地区レベルの改善を主要な対象として考えている。

この街路閉塞モデルは、街路と建築物(敷地との関係を含む)の性能まで遡れるモデルであり、このような施策の評価にも対応でき、改善施策の提案にまで活用できるものである。

参考文献

- 1) 西岡誠治,新井田浩:地震防災の観点から見た市街地の災害危険度判定手法の開発,阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集,pp.83-90,1997
- 2) 塚口博司,戸塚哲男,中辻清恵:阪神・淡路大震災における道路閉塞状況に関する研究,阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集,pp377-388,1997
- 3) 堀健一,石田東生:震災時の連結信頼性からみた住区内街路網構成の評価,阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集,pp415-424,1997
- 4) 家田仁,望月拓郎,上西周子:街路閉塞現象による機能障害と地区の危険度評価法,阪神・淡路大震災土木計画学調査研究論文集,pp433-440,1997
- 5) 新階寛恭,家田仁,長瀬龍彦,篠恭彦,近藤慶太:都市内地区施設等の震災時における防災効果のマクロな評価手法,土木計画学研究論文集,Vol18,pp691-697,2001
- 6) 村尾修,山崎文雄:震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した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,第555号,pp185-192,2002