

地震災害の統合的被害予測手法の開発に向けた検討

樋本圭佑*・向坊恭介**・山田真澄*

* 京都大学次世代開拓研究ユニット

** 立命館大学大学院理工学研究科

要 旨

本研究では、地震災害の統合的予測手法開発の端緒として、地震動推定、建物の損壊被害推定、ならびに火災延焼による焼失被害推定の各モデルの入出力条件を整理し、これらの一体的な運用手続きについて検討を加えた。また、本手続きに基づき、花折断層系を震源とする地震が発生した場合の京都市中心市街地が受ける被害の推定を行った。

キーワード：地震災害，地震動，建物損壊，火災延焼，Google Earth

1. はじめに

地震災害は、地盤崩壊、建物やライフラインの損壊、火災延焼などといった性質の異なる様々な現象が輻輳する複合災害である。これら個別の現象に着目した研究は、被害の発生メカニズムを明らかにし、その軽減策を講じる上で重要である。一方で、複合災害である地震災害に対して総合的な観点から対策を講じるには、被害の全体像を把握することが欠かせない。しかし、こうした包括的な被害推定を目的とした手法の提案例は必ずしも多くない（防災科学技術研究所 2006；FEMA 2009）。

そこで本研究では、地震災害の統合的被害想定手法を開発することを最終的な目標とする。ただし、

モデル化の対象となる現象は多岐に渡ることから、可能な限り既に開発され、実績のあるモデルを活用することで、効率的な開発を目指すこととする。ここではその端緒として、地震動、建物損壊、ならびに火災延焼の既存各モデルの入出力条件を整理し、これらの一体的な運用を可能とした。また、本手続きに基づく統合シミュレーションを行い、北白川活動セグメントを震源とする地震が発生した場合の京都市中心市街地が受ける被害の推定を行った。

2. 地震動-建物損壊-火災延焼の統合シミュレーション

本統合シミュレーションの流れをFig.1に示す。地

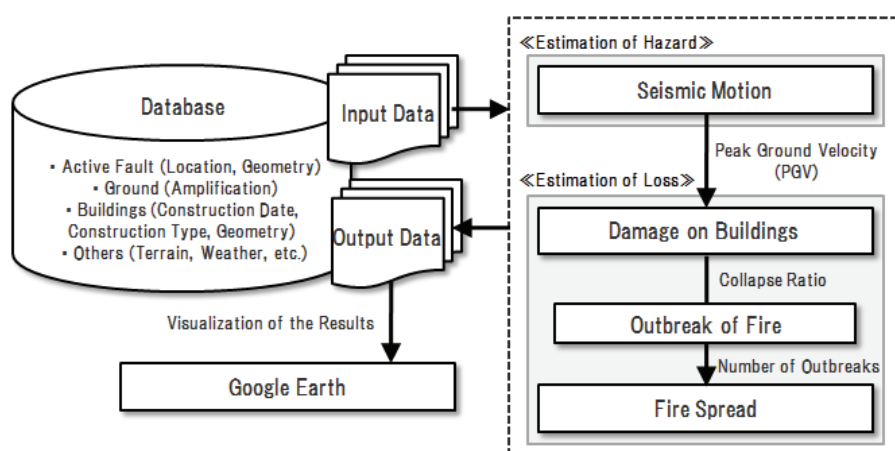


Fig.1 Flow of the integrated simulation considering seismic motion, structural damage on buildings and fire spread.

震動、建物損壊、火災延焼の各モデルは、この順番で直列に繋がっており、単方向の入出力データのやり取りがなされる。ただし、建物損壊モデルと火災延焼モデルの間には、出火モデルが介在しており、建物損壊モデルの出力データを火災延焼モデルの入力データとして変換する。以上の統合シミュレーションに利用する入力条件および計算の出力結果は、モデル間で共通の空間座標もしくは建物IDにより管理する。また、俯瞰的に各被害の状況を把握できるようにするため、Google Earthの3次元地図上に計算結果を表示することとした。個々のモデルの概要は以下ようになる。

2.1 地震動モデル

地震動による外力を決めるにあたっては、距離減衰式と表層地盤の速度増幅率を用いて地震動を推定する。藤原ら（2002）が用いた手法と同様、まず距離減衰式によって工学的基盤面での最大速度（PGV）を評価した後、表層地盤による最大速度の増幅率を乗じることによって地表での最大速度を計算する。

震源の特定には、活断層データベース（産業技術総合研究所）を利用することとし、断層位置を特定した上で断層最短距離を算出する。工学的基盤（S波速度400m/s 相当層）での最大速度の距離減衰式には、司・翠川（1999）による提案式を採用した。さらに、地表での最大速度を求めるために、500mメッシュ単位の表層地盤増幅率（久保ら 2003）を乗じて表層地盤の影響を考慮した。ここで算出された地表面の最大速度は、市街地の被害推定を行う建物損壊モデルへと受け渡される。

2.2 建物損壊モデル

建物損壊モデルには、兵庫県南部地震の被災調査

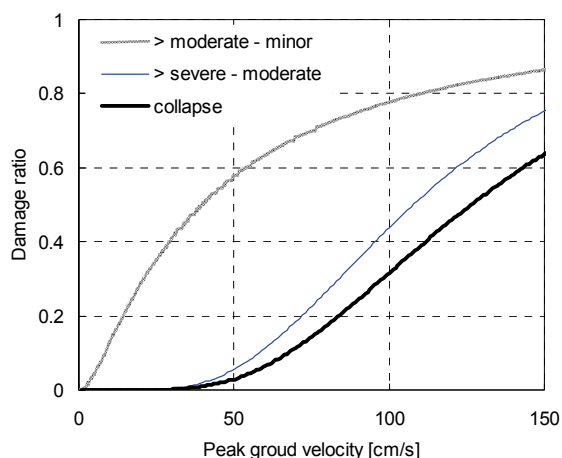


Fig.2 Fragility curve for timber buildings constructed before 1974.

結果と推定された地震動強さをもとに構築された建物被害率曲線を用いることとする。被害率は、地表面の最大速度 V （PGV）に対して次式のように定式化される（林・宮腰 1998）。

$$p(V) = \Phi \left\{ \frac{\ln(V) - \lambda}{\zeta} \right\} \quad (1)$$

ここで、 Φ は標準正規分布関数、 λ および ζ はそれぞれ被害率の平均と標準偏差である。

被害率曲線は、倒壊、大破～中波以上、中波～小破以上などの被災度区分ごとに算出される。Fig.2にケーススタディで用いた被害率曲線を示す。

2.3 地震出火モデル

地震直後の出火は、建物の倒壊率に相関があることが過去の事例から知られている。そこで、Fig.3に示す兵庫県南部地震での調査記録（日本建築学会 1998）から求めた以下の回帰式を利用することで、計算対象地域内の出火件数を求める。

$$p_{outbreak} = 0.0044 p_{collapse}^{0.6422} \quad (R^2 = 0.76) \quad (2)$$

ここで、 $p_{outbreak}$ は対象地域内の出火率、 $p_{collapse}$ は同倒壊率である。ただし、出火点の位置は対象地域内でランダムに割り振ることとした。

2.4 火災延焼モデル

出火後の市街地火災延焼については、現象の物理的知見に基づき構築された延焼モデルを利用して計算を行う（樋本・田中 2006）。火災延焼モデルの概要をFig.4に示す。本モデルでは、都市火災を複数の建

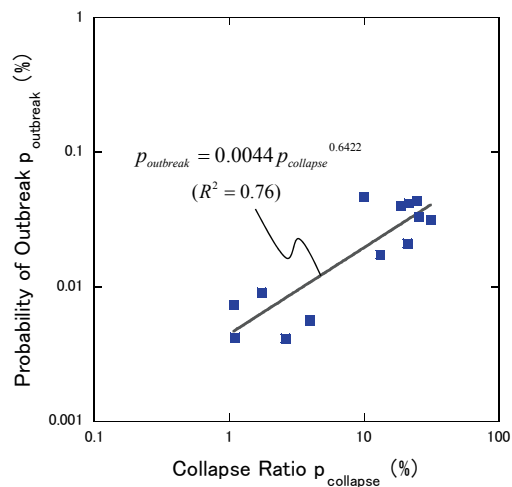


Fig.3 Outbreaks of fire observed in Hyogo-ken Nanbu Earthquake 1995.

物火災の集合と捉え、他の建物火災の影響下における個々の建物火災の燃焼性状を予測することで、市街地全体の火災性状予測を行う。

まず、建物内部の火災性状を予測するにあたっては、建物を構成する各室空間を検査体積とみなし、検査体積ごとに定式化される火災性状の支配方程式を連立して解くことで時々刻々の予測を行う。この場合、任意の検査体積における質量、熱エネルギー、ならびに化学種の質量分率の各保存式は次のように表すことができる。

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i) = \dot{m}_{F,i} - \sum_j (\dot{m}_{ij} - \dot{m}_{ji}) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(c_p \rho_i T_i V_i) = (\dot{Q}_{B,i} + c_p \dot{m}_{F,i} T_p) - \left\{ \sum \dot{Q}_{L,i} + \sum_j (c_p \dot{m}_{ij} T_i - c_p \dot{m}_{ji} T_j) \right\} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i Y_{X,i}) = \dot{\Gamma}_{X,i} - \sum_j (\dot{m}_{ij} Y_{X,i} - \dot{m}_{ji} Y_{X,j}) \quad (5)$$

また、気体の状態方程式は次のように表わされる。

$$\rho T \cong 353 \quad (6)$$

ここで、 c_p は比熱、 ρ は密度、 T は温度、 T_p は可燃物の熱分解温度、 V は体積、 Y は化学種の質量分率、 $\dot{m}_F$ は可燃物の熱分解に基づく可燃性ガスの生成速度、 $\dot{m}$ は開口流量、 $\dot{Q}_B$ は発熱速度、 $\sum \dot{Q}_L$ は開口部や壁などを経由した失熱速度の和、 $\dot{\Gamma}$ は化学種の生成速度を表している。また、添え字の ij および ji は検査体積間の気流の方向、 O は酸素、 F は可燃性ガスを示している。上式(3)~(6)を連立して解くことで、建物内部の気体温度、密度、化学種の質量分率の時系列変化を計算する。

一方、燃焼状態にある建物から周辺の建物への火災拡大は、次のいずれかの要因、もしくはこれらの要因が複合して作用することによってもたらされる

ものとする：1)火災室内の高温ガスや開口噴出火炎といった熱源からの輻射熱伝達；2)市街地風によって火災建物の風下側に形成される熱気流からの対流熱伝達；3)市街地風によって飛散する火の粉。この結果、以下の要件が満たされた場合に、火災建物からの熱的影響を受けた建物内部の可燃物の着火、すなわち延焼が起こるものとみなす：1)開口を経由して入射する熱流束が可燃物の着火限界値を超えた場合；2)木質系の外装材温度が木材の着火限界温度を超えた場合；3)十分な熱エネルギーを有する火の粉が可燃物上に落下した場合。

3. 京都市を対象としたケーススタディ

以上の手続きに基づき、京都市の中心市街地を対象とした地震動—建物損壊—火災延焼の統合シミュレーションを行った。ただし、対象としたのは、中心商業施設が集まるJR東海道線以北の市街地である。本検討では、京都市東部を南北方向に縦断する北白川活動セグメントを震源とした地震を想定した。建物損壊および火災延焼の計算に使用した建物データは、都市計画図を基に作成されており、各建物の高さは航空測量の測定結果が与えられている。なお、火災延焼性状に顕著な影響を及ぼす風速については、本検討では考慮せず、無風を仮定した。

まず、距離減衰式を用いた地震動モデルによるPGVの推定結果をFig.5に示す。地盤条件の違いを受けて、PGVが100cm/sを超える領域が京都駅の周辺に確認できる。また、これ以外にも、市街地の広い範囲に渡って大きなPGV値が出力される結果となった。

次に、建物被害率曲線にPGV値を入力することで得られた倒壊建物の分布状況をFig.6に示す。建物倒壊は中心市街地の全域に渡ってはいるものの、PGV値が低く算出されていた対象市域北西部（右京区）の被害は相対的に小さくなっている。建物倒壊率（全建物種別）は対象とした市街地全域で約20%となったが、なかでも、京都駅周辺の地域（下京区、南区）

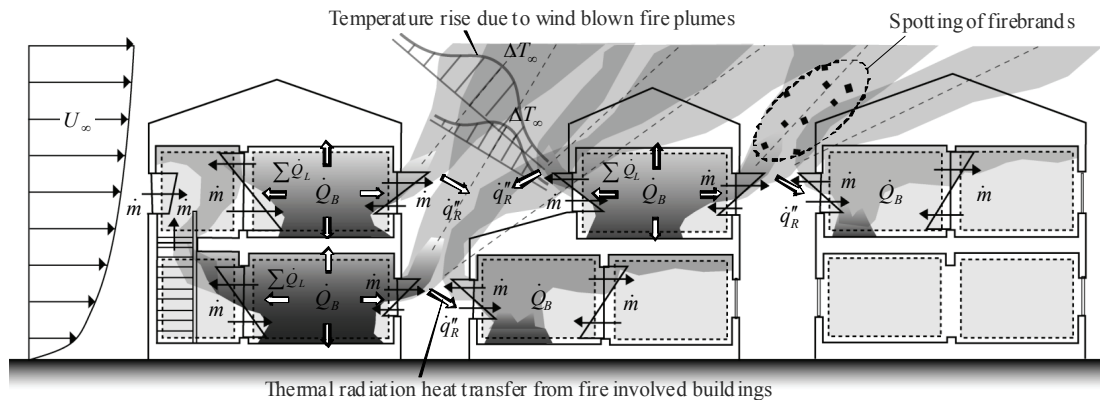


Fig.4 Schematic of the urban fire spread model.

の建物倒壊率は高く、双方とも30%を超える結果となった。

建物損壊の推定結果を踏まえた出火件数は京都市全体で188件、そのうち延焼火災へと発展した火災は37件となった。各出火点から発生した火災について、地震発生から6時間後、および12時間後における延焼状況の推定結果を示したものが、それぞれFig.7とFig.8である。出火から時間が経ち、燃え止まった地域がある一方で、依然として延焼の継続している地域も見られる。PGV値と建物倒壊率、もしくは建物倒壊率と出火率の間に相関が見られることは、モデルの仮定上、当然と言える。ただし、火災による焼失範囲については、建物間の隣接状況などといった周辺の市街地状況に延焼性が大きく依存するため、必ずしもPGV値や建物倒壊率が大きく推定された地域と一致する結果とはならなかった。

4. おわりに

本稿では、地震動、建物損壊、火災延焼の既存モ

デルを組み合わせた、京都市中心市街地の地震被害想定を行った。今後は、今回検討を加えた現象だけでなく、ライフライン被害や社会経済的被害など、より多面的な分析が可能な手法へと発展させていく。また、個々の推定モデルの高度化を図ると同時に、特性の異なるモデル間の整合性、ならびにこのことが推定結果に及ぼす影響について分析を加えていく必要がある。

参考文献

- 久保智弘・久田嘉章・柴山明寛・大井昌弘・石田瑞穂・藤原広行・中山圭子（2003）：全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化および面的な早期地震動推定への適用，地震2，56，pp.21-37.
産業技術総合研究所：活断層データベース (<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>)
司宏俊・翠川三郎（1999）：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文報告集，No.523，pp.63-70.
日本建築学会（1998）：阪神淡路大震災調査報告 建

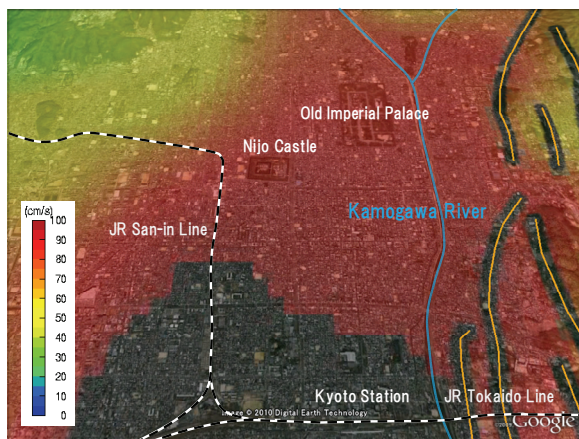


Fig.5 Estimated PGV
(the area with the PGV over 100cm/s is not contoured).

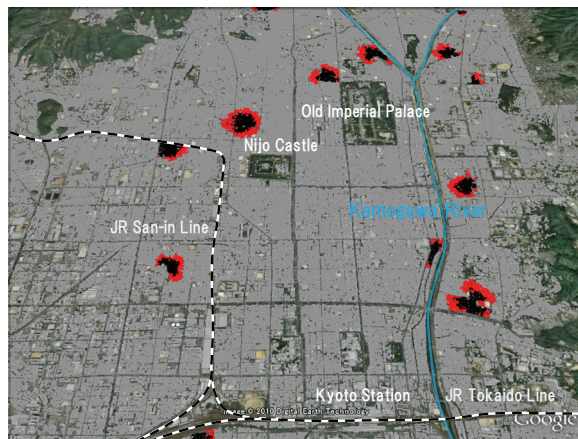


Fig.7 Estimated burnt out area (6hrs after the outbreak).

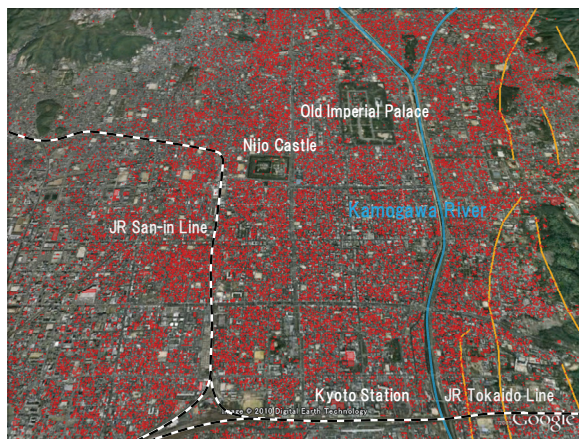


Fig.6 Estimated Collapse of buildings.



Fig.8 Estimated burnt out area (12hrs after the outbreak).

- 築偏6, 丸善, 517pp.
- 林康裕・宮腰淳一 (1998) : 兵庫県南部地震における被害率曲線, 災害部門PD, 地震動の特性と建築物の被害, pp.15-20.
- 樋本圭佑・田中孝義 (2006) : 都市火災の物理的延焼性状予測モデルの開発, 日本建築学会環境系論文集, No.607, pp.15-22.
- 藤原広行・河合伸一・青井真・石井透・早川譲・功刀卓・神野達夫・森川信之・小林京子・原温子 (2002) : 確率論的地震動予測地図作成手法の検討と試作例, 防災科学技術研究所研究資料, No.236, 187pp.
- 防災科学技術研究所 (2006) : 震災統合シミュレーションシステムの開発, 文科省大大特プロジェクト総括報告書, 52pp.
- FEMA (2009): Multi-hazard Loss Estimation Methodology - HAZUS MH MR4 Earthquake Technical Manual, 712pp.

Towards the Development of an Integrated Loss Estimation Method for Earthquake Disasters

Keisuke HIMOTO*, Kyosuke MUKAIBO** and Masumi YAMADA*

* Pioneering Research Unit for Next Generation, Kyoto University

** Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

Synopsis

A preliminary study for integrated loss estimation of earthquake disasters was conducted by applying existing models of spatial distribution of seismic motion, structural damage of buildings, and building-to-building fire spread, sequentially over the target urban area. The procedure was tested by estimating the loss brought to the city of Kyoto due to the earthquake originated from the shift of Hanaore fault. The results were displayed over a 3D map provided by Google Earth enabling comprehensive analysis of the estimation.

Keywords: Earthquake Disasters, Seismic Motion, Collapse of Buildings, Fire Spread, Google Earth