

地震による建物倒壊に伴う人的被害の発生機構解明並びに評価手法の提案 A New Causality Model for Evaluating the Probability of Human Damage from Injury to Death Associated with Building Collapse

岡田成幸・○中嶋唯貴
Shigeyuki OKADA, ○Tadayoshi NAKASHIMA

In this paper, we discuss the method of estimating human casualties in damaged buildings by tremendous seismic ground motions. In order to handle human casualties quantitatively in modeling, we introduce the Injury Severity Score (abbreviated to ISS), which is devised to classify accidental patients with multiple trauma. Using the 1995 Kobe earthquake data we compiled the statistical database related on damage to wooden frame buildings scaled by the Damage Index and human casualties ranked by severity according to the ISS through the GIS technology in matching a map of Kobe with lot numbers. By applying the Bayesian approach into the database we successfully functionalized the stochastic relation between the damage index of building and the ISS for each of casualties trapped in the building collapsed.

1. はじめに

想定地震に対する被害評価は防災対策の数的根拠を与えるものであり、また 2006 年に改正された地震防災対策特別措置法において地方自治体は減災の数値目標を定めることが要請され、中でも人的被害については信頼性及び精度においてより高度なものが要求されている。しかし内閣府において例示された人的被害評価式（2012 年）は、基となるデータの信頼性のなさ・因果関係を無視した相関性のみを非科学的評価法等々により減災効果の論じられない無用の式である¹⁾。本研究は地震動及び津波に伴う人的被害の高度評価を目的として開始したものである。今回は、地震動による建物被害とそれに伴う人的被害について論じる。

2. 人的被害評価式

2.1 評価指標 ISS について

筆者らは人的被害を災害医療分野で用いられている外傷重症度指標（Injury Severity Score、略して ISS）で負傷程度を表現することを提案している。数尺度の意味は、ISS=0（無傷）、1~8（軽症~中等症）、9~15（重症）、16~24（重篤）、25~40（瀕死）、41~75（死亡相当）であり、また ISS と年齢別死亡率との関係が実証されている。筆者らは被害建物の状態を損傷度（Damage Index）で別途評価し、その状況下で居住者の ISS の発症確率分布を評価することを人的被害評価の目標に置いている。自治体が行っている通常の人的被害想

定は死者と負傷者の 2 区分の発生数を求めるだけに留まっているが、ISS 分布を知ることにより、救助に至るまでの余命時間判定・被災後の医療行為・医療施設の必要内容推定を可能にする。また諸々の対策の死傷低減への効果が ISS で詳細評価できるなど、その結果の活用レベルは格段に上位を目指している。

評価は基本的に建物棟単位であり個人世帯毎に情報提供が可能（方法 1：個別計算）となるが、行政レベルで地域単位での集計結果が必要な場合は、建物棟単位結果を総和することで求められる他に、より計算を簡略化した方法として地域内の建物耐震性能及び居住者属性情報を震度曝露情報で与える手法も提案している（方法 2：地域計算）。

2.2 基本式

人的被害発生シナリオは以下を想定する。地域がある地震動（ I ：震度・GPV 等の強震動指標）で襲われたときのその地域内に存在する木造建物が損傷度（ Δx ：Damage Index）を受けるときの可能性 $P(I, \Delta x)$ は損傷度関数で推定できる。その建物内の居住者数（または分布）が $Mf(I)$ で与えられたとしよう。損傷度 Δx で被災した建物は内部空間が瓦礫で逸失する危険空間と安全空間に峻別され、居住者が危険空間内に居る確率は内部空間損失率（ W 値）で記載できる。このシナリオに基づくと建物内居住者の ISS が θ の発症確率分布 $M_{ISS}(\theta)$ は下式となる。

$$M_{ISS}(\theta) = \kappa_{\Delta x} \cdot f''_{\Delta x}(\theta) \dots (1)$$

ここに、 $\kappa_{\Delta x}$ は木造損傷度 Δx の時の危険空間内にいる居住者人口[人]であり、死傷対象者数を意味する。棟単位で計算する方法1の時は

$$\kappa_{\Delta x} = Mf(I) \cdot P(I, \Delta x) \cdot W_{\Delta x} \dots (2)$$

損傷度別の建物内部空間損失関数(W 関数) $W_{\Delta x}$ は当研究室の別報告²⁾を参照されたい。また、 $f''_{\Delta x}(\theta)$ は建物損傷度が Δx である時の建物内居住者のISSが θ の値をとる確率である。人的重症度 θ の推定に際し、住宅の倒壊による負傷発生という限られた症例を詳細にデータベース化している観測例は極めて少ない。よって本研究では、観測値に加え有識者の先験的主観確率の採用も許容されているベイズの方法を採用し、将来更新を考慮する。ここで、建物損傷度 (Damage Index) が Δx のときの建物内滞在者の人的重症度が θ である基礎確率変数の分布 $f''_{\Delta x}(\theta)$ はベイズ推定の事後確率分布 $f''_{\lambda}(\lambda)$ を用いて、以下で与えられる。

$$f''_{\Delta x}(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f''_{\Delta x}(\lambda)}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(\theta)-\lambda}{\xi}\right)^2\right] d\lambda \dots (3)$$

一般に、ベイズ推定の事後確率分布 $f''(\theta | \varepsilon)$ (本稿では $f''_{\Delta x}(\theta)$ と記載) は以下となる。

$$f''(\theta | \varepsilon) = k \cdot L(\varepsilon | \theta) f'(\theta) \dots (4)$$

ここに、 $L(\varepsilon | \theta)$ は平均 μ 、標準偏差 ξ の尤度であり、観測データ ε (本研究では兵庫県南部地震の東灘区の D-Level と ISS の調査データ $n = 65$ 例) に対数正規分布 LOGNORM(λ, σ) を当てはめ、 $\mu = \lambda$ 、 $\xi^2 = n \cdot \sigma$ で与えられる。 $f'(\theta)$ は λ の事前分布であり、正規分布 $N(\mu', \sigma')$ を仮定する。また、 $f''(\theta | \varepsilon)$ は事後分布であり、本研究では式(3)中の λ の事後分布 $f''_{\lambda}(\lambda)$ を与え、以下の正規分布 $N(\mu'', \sigma'')$ で与えられる。

$$f''_{\lambda}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma''^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda-\mu''}{\sigma''}\right)^2\right] \dots (5)$$

$$\mu'' = \frac{\mu(\sigma')^2 + \mu'(\xi^2/n)}{(\sigma')^2 + (\xi^2/n)}, \sigma'' = \sqrt{\frac{(\sigma')^2(\xi^2/n)}{(\sigma')^2 + (\xi^2/n)}}$$

地域を単位とする方法2の場合は、その地域における存在確率で式を構成することになる。式(2)はその地域のハザード I の [min, max] 範囲及び損傷度 Δx の存在範囲 (但し、D4 以上) で集計する必要があるため下式となる。

$$\kappa_{\Delta x} = \sum_{I=0.5}^{1.0} \sum_{\Delta x=D4}^{D5} Mf(I) \cdot P(I, \Delta x) \cdot W_{\Delta x} \dots (2)'$$

方法2では $Mf(I)$ について地域内の震度暴露人口 (但し木造建物内限定) を考慮することになる。さらに、損傷度関数も地域内の存在確率を年代別耐

震評点確率で表現することになる。式(3)~(5)は方法1と2で共通である。

3. 評価例

高知県南国市を例に、地震動は内閣府が公表しているレベル2クラスの南海トラフ巨大地震のうち陸側に震源を想定した最大地震動を考える。

紙幅の関係から方法1に基づく建物個別計算の推定例のみを図1に示す。個人情報保護の観点より世帯特定できないように街路を削除し一部に限定 (青色住宅) して示す。図中右側の頻度分布が、計算された負傷程度 ISS の発症確率であり、世帯毎に求めることができる。耐震評点が特定できているのは耐震改修を行った A 邸で、改修後の評点が 1.33 である。他の住宅は建築年のみが既知であり、年代による耐震評点確率分布を与え、その建物の損傷度発生確率が個別情報として計算される (図3)。これに基づき ISS 発症確率 (図2下段) が計算されている。さらに、ISS と年齢との関係より、その住宅における居住者の年齢別一人当たり死亡率が図4のように計算できる。

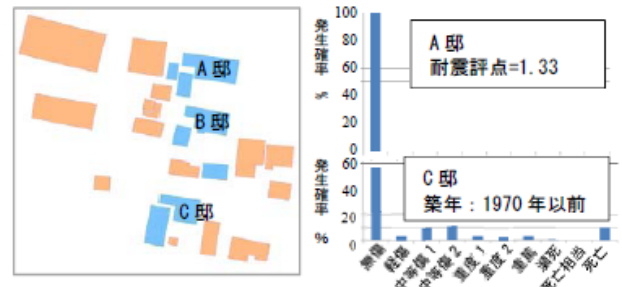


図1 街区評価例(震度=6.6) 図2 推定された ISS 発症確率

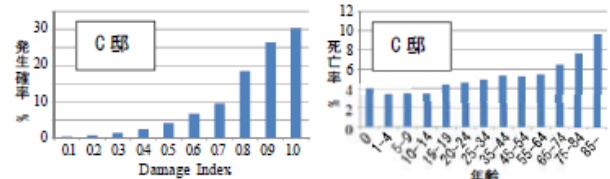


図3 損傷度(D.I.)発生確率 図4 年齢別死亡確率

A 邸が負傷発生確率 0 に対し、築年の古い C 邸では負傷者発生は 43% であり、仮に夫婦 40 代前半・子供 6 歳の 3 人家族の場合、家族内で死者が発生する確率は 14% という数値が算出される。

文献

- 岡田・中嶋：地震時建物倒壊に伴う人的損傷確率推定手法の提案 (その 1), 日本建築学会大会 (関西), 2014.
- 飯田・岡田・中嶋：地震時人的被害推定高度化のための建物内部空間被災度関数の再構築, 日本建築学会大会 (関東), 2015.

