

建築物の長期的耐震修復性能評価に用いるライフサイクル地震動強さ

Life Cycle Input Ground Motion Intensities for the Seismic Loss Estimation of the Building through its Lifetime

高橋典之¹, 塩原等², 中埜良昭¹

Noriyuki TAKAHASHI¹, Hitoshi SHIOHARA² and Yoshiaki NAKANO³

¹ 東京大学生産技術研究所, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

² 東京大学工学部建築学科, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

SUMMARY: Life cycle input ground motions scenario for the seismic loss estimation of the building through its lifetime is developed. In this paper, the plotting position formula and continuous functions are adopted to facilitate the setting of an arbitrary life cycle input ground motions scenario. The validity of the proposed method is discussed by means of the cumulative annual exceedance probability through its lifetime toward the historical data. However the dispersion due to the difference of the historical earthquake database is recognized, it is revealed that the cumulative annual exceedance probability through its lifetime toward the historical data is almost stable.

1 はじめに

建築物の耐震設計に性能設計の考え方を導入するにあたり、安全性のほか、使用性および修復性の担保が期待されるようになってきた。なかでも修復性能の担保は、地震で建物に生じた損傷の修復しやすさを修復費用に換算することで性能を評価する手法が開発されることにより可能となるため、これまで幾つかの修復費用評価手法が検討されてきた^{例えば[1]}。特に、建物の供用期間を通じた耐震修復費用評価（ライフサイクルコスト評価）においては、確率論的な手法によるハザードカーブとフラジリティカーブとの関係から一年あたりの地震損失額の期待値を計算し、これをもとにライフサイクルコスト（LCC）を算出する方法が検討されており、単純に供用期間年数を考慮する方法のほか、耐久劣化の影響および修復作業の影響を考慮する方法、割引率を考慮する方法、ハザード解析における非定常更新過程を考慮する方法など、様々な影響因子を仮定したLCC算出方法の検討が進められている（Fig.1）。

一方、筆者らは、ユーザーの意思により補修の要否判断がなされ、補修されない場合、損傷が累積されることを考慮する、建築物のライフサイクル耐震修復性能評価手法を開発している^[2]。補修の要否判断とそれに伴う損傷の累積を耐震修復性能評価に含めるためには、地震で建築物に生じる損傷がユーザーの補修要否判断に委ねられる程度の規模の地震、すなわち、供用期間中に発生が予

想される中小地震を含むレベルの異なる地震動を対象とした地震発生シナリオが必要となる。本研究では、これをライフサイクル地震動と呼ぶこととする。

ライフサイクル地震動の作成手法には、確率過程に巨大地震の平均発生間隔を考慮する非定常更新過程を用いる方法があり、比較的精度の高いライフサイクル地震動の推定が期待されるが、非定常過程に用いるパラメータを各断層ごとに計算する必要があるため^[3]、ライフサイクル地震動の作成は大変煩雑となる。そこで本研究では、耐震修復性能設計において目的に応じたライフサイクル地震動シナリオを容易に作成することができるように、確率過程に簡便な定常更新過程のみを仮定したライフサイクル地震動の作成法について検討した。

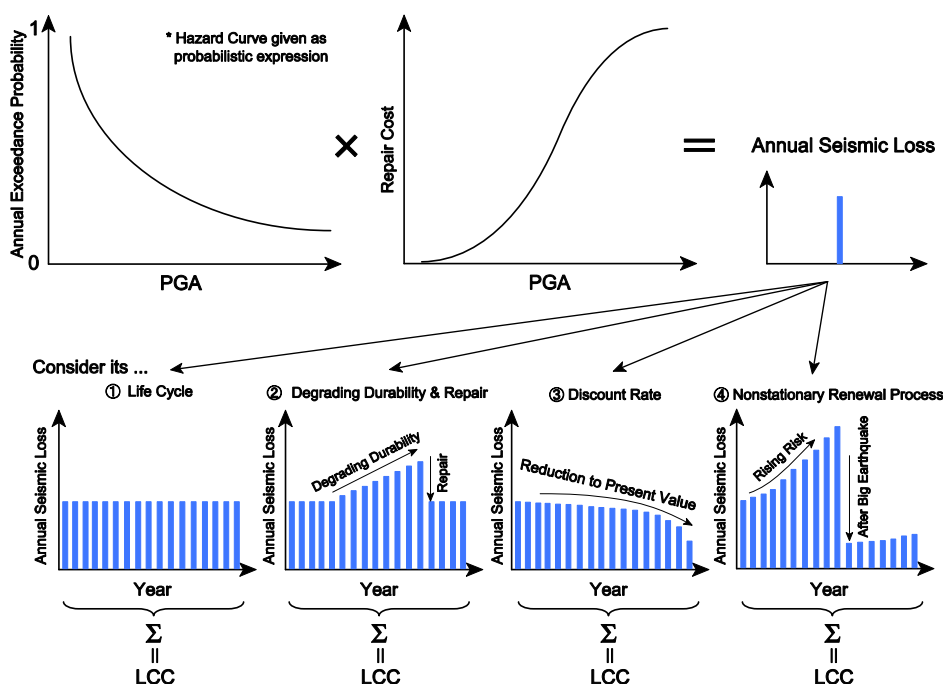


Fig.1 The typical concept of evaluating the life cycle cost

2 年最大速度の非超過度数

日本周辺で発生した地震動について、679～1884年のデータは理科年表^[4]および日本被害地震総覧^[5]に基づき、1885～1925年のデータは宇津リスト^[6]に基づき、1926年以降のデータは気象庁震源データ^[7]に基づいて集めた。東京都文京区本郷における第I種地盤を想定し、地震基盤に対する金井の距離減衰式^[8]および翠川・松岡の地盤増幅率に関する表層地盤の速度増幅度算定式^[9]を用いて、地表面最大速度を推定した。ここで、地震基盤においては、鳴らの指摘^[10]に従いS波速度 V_S を $V_S=3000[\text{m/sec}]$ とし、翠川・松岡の速度増幅度算定式

$$\log ARV = 1.98 - 0.71 \log AVS \pm 0.15 \quad (1)$$

(ただし、 $100 < AVS < 1500$)

において、地表から地震基盤までの平均S波速度 AVS を地震基盤のS波速度の半分の $1500[\text{m/sec}]$ と仮定して求めた速度増幅度 ARV に対する、地表から工学的基盤までの平均S波速度 AVS を $400[\text{m/sec}]$ として求めた速度増幅度 ARV の比を、地震基盤から工学的基盤までの速度増幅度とした。ここでは、地表面として第I種地盤を想定しているため、工学的基盤から地表面までの速度増幅度は1.0と仮定した。以上より算定された東京第I種地盤地表面最大速度の時刻歴はFig.2のようになる。Fig.2より、仮に建物の供用期間を50年としたとき、1901年からの50年と、1951年からの50年とでは、発生した年最大地震動の大きさが異なっていることが読み取れる。このような大きさと頻度が異なる地震動の発生シナリオを、設計時に簡便に設定する方法を次に示す。

3 プロットングポジション公式を用いた年非超過度数の組合せ推定手法

極値分布の作成手法にならぬ、地表面最大速度の年非超過度数をHazenのプロットングポジション公式^[11]により求める。プロットングポジション公式は一般に、

$$F(x) = 1 - \frac{i - \alpha}{N + 1 - 2\alpha} \quad (2)$$

と表される。ここに、 N : 観測値総数 (観測年数), i : 観測値を降順に並べたときの順番, x : i 番目の観測値, $F(x)$: 年非超過度数, α : 定数でHazen法の場合 $\alpha=0.5$ である。ここで、地震の発生が定常更新過程であるポアソン過程に従うものとする、

$$P(i) = 1 - \exp[-(1 - F(x)) \cdot T] \quad (3)$$

なる関係を満たす。ここに、 $P(i)$: 降順 i 番目の観測値の T

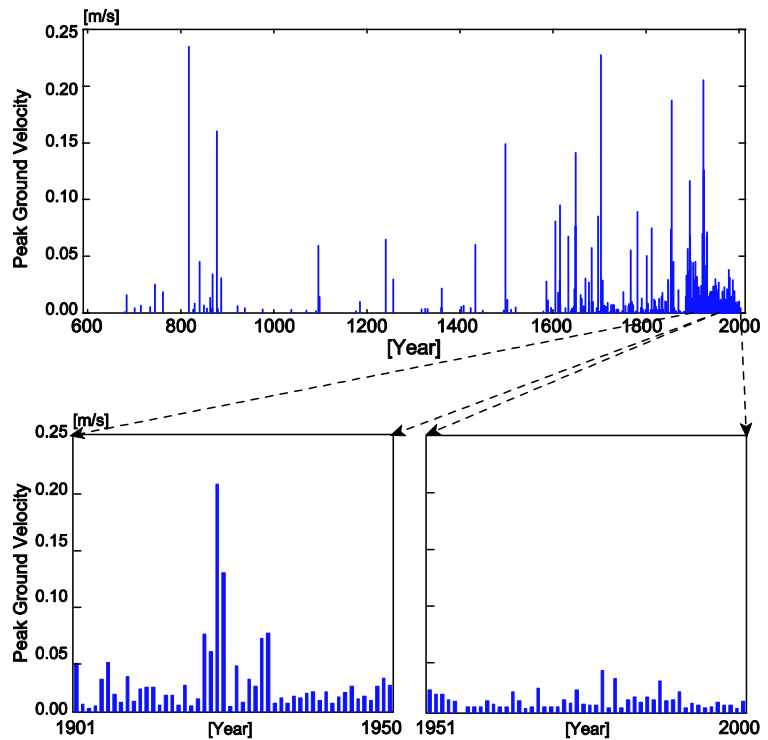


Fig.2 Estimation of the peak ground velocities history of Tokyo (hard soil area)

年超過確率である。(2)式と(3)式を用いると α が、

$$\alpha = \frac{(N + 1) \ln(1 - P(i)) + iT}{2 \ln(1 - P(i)) + T} \quad (4)$$

と計算され、この α を(2)式に代入したプロットングポジション公式によって、「降順 i 番目の観測値の T 年超過確率が $100P(i)\%$ となる地震動を含む N 個の地震動年非超過度数群」を得ることが出来る。例えば、(4)式において $i=1$, $P(1)=P_0$ とすると、「 T 年超過確率が $100P_0\%$ となる地震動を最大地震動とする N 個の地震動年非超過度数群」を得ることになる。

4 供用期間を通じた年非超過度数平均値の推移

前章で示した(2)式から得られる各観測値の年非超過度数を観測期間を通じて積算した値を観測年数 N で除すと、

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(x) = 0.5 \quad (5)$$

となり、パラメータ α に依存しなくなる。ライフサイクル地震動を作成することは、供用期間を通じた複数の地震動の年非超過度数の組合せを得ることと置換される。(5)式が定常的に成立するのであれば、供用期間を通じた複数の地震動の年非超過度数の組合せが満たすべき条件は、供用期間を通じた年非超過度数の平均値が0.5になることであり、すなわち、(4)式を用いてライフサイクル地震動に含まれる最大地震(あるいは特定地震)の大きさを任意に設定しても、(5)式を満たしていればライフサイクル地震動として妥当であると示すことになる。

そこで、2章で算出した東京第I種地盤地表面最大速度について、比較的データ欠落年の少ない1604年～2003年の400年間、および、毎年のデータが欠落なく記録されている1884年～2003年の120年間を対象に、連続する T 年 ($T=30$ 年, $T=50$ 年, $T=100$ 年) を選択し、供用期間を通じた年非超過度数平均値の推移を Fig.3 に示した。

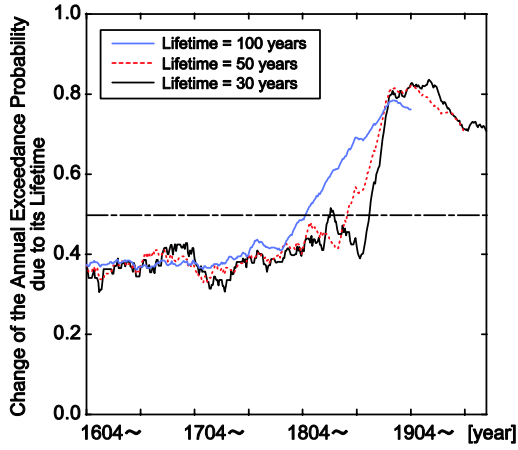


Fig.3(a) Change of the annual exceedance probability due to building lifetime period toward the historical data in 400 years

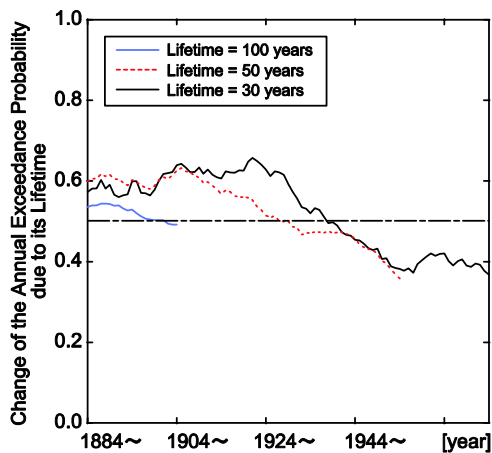


Fig.3(b) Change of the annual exceedance probability due to building lifetime period toward the historical data in 120 years

過去 400 年のデータから算出された年非超過度数平均値の推移は、1885 年の宇津リスト^[6]のデータに切り替えてから 1923 年の関東地震前までの期間 (Fig.2 において 1855 年の安政江戸地震以降 1923 年の関東地震までの中地震が頻発している期間) が含まれると増加し、気象庁震源データ^[7]に切り替えて以降現在に向かって徐々に低下している。対象期間に応じた年非超過度数の分散が大きく ($T=30$ 年のとき 0.030, $T=50$ 年のとき 0.028, $T=100$ 年のとき 0.020), (5)式の定常的な成立を条件とするライフサイクル地震動シナリオの生成の妥当性は示すことができない (Fig.3(a))。一方、過去 120 年のデータから算出された年非超過度数平均値の推移については、地震記録の欠落年が無く、中小地震がデータに含まれているため、対象期間に応じた年非超過度数平均値の分散が小さく ($T=30$ 年のとき 0.009, $T=50$ 年のとき 0.006, $T=100$ 年のとき 0.004), (5)式の成立を条件とするライフサイクル地震動シナリオの生成の妥当性が確認できる (Fig.3(b))。

5 連続関数を用いた年非超過度数の推定手法

3章で示したライフサイクル地震動は、プロットインゴジション公式を利用した離散関数で定義されている。現状では、動的解析を離散関数で設定した地震動の発生数 (N 回) だけ繰り返した結果から供用期間を通じた耐震修復性を評価することとなる。一方、近年、構造物の最大応答変位と入力エネルギーの等価速度との関係について、構造物の復元力特性などの条件別に様々な式が提案されており^[12]、入力エネルギーの等価速度による構造物の応答予測に関して適用条件および応答予測精度が検証され、入力エネルギーの等価速度と一般的な入力地震動強さ (PGV など) との関係が明らかになれば、入力地震動強さから工学的応答パラメータを数学的に算定することが可能になる。このとき、ライフサイクル地震動が離散関数ではなく数学的に積分可能な連続関数で表現されれば、動的解析を N 回繰り返さずに解析結果を算出することができる可能性がある。そこで、微積分可能な連続関数で年非超過度数を推定するライフサイクル地震動の作成法について検討する。まず、供用期間 N 年の時間区分 t を用いて、非超過度数 $F(x_t)$ が、

$$F(x_t) = \left(1 + \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{c_0 \exp[c_1 t]}\right)}{N} \right) \equiv f(t) \quad (6)$$

と表されるものとする。ここで、 c_0, c_1 : 係数である。ただし、時間区分 t が 1 年であるとし (供用期間中に発生する地震動の数が N 個となるようにし)、 N 年超過確率が p_0 となる地震動を最大地震動とする場合、係数 c_0, c_1 はそれぞれ 1 となる。ここで、上下限を有する極値分布に従う地震ハザード曲線^[13]が適用されたとすると、入力地震動強さ x_t は、

$$x_t = \frac{w}{u \cdot \exp\left[\frac{\ln(-\ln(f(t)))}{k}\right] + 1} \equiv g(f(t)) \quad (7)$$

と表される。ここで、 w : 上下限を有する極値分布のパラメータ (東京第 I 種地盤の場合 15), u : 上下限を有する極値分布のパラメータ (東京第 I 種地盤の場合 53.69), k : 上下限を有する極値分布のパラメータ (東京第 I 種地盤の場合 1.37)。工学的応答パラメータ EDP が入力地震動強さ x_t の関数として、

$$EDP \equiv q(x_t) \quad (8)$$

と表されるものとする。ライフサイクル地震動に対して算定される工学的応答パラメータの積分形式が、

$$\int EDP = \int q(x_t) dx_t \quad (9)$$

と表現できる。このとき、(9)式は、

$$\int q(x_i) dx_i = \int q(x_i) \frac{dx_i}{dt} dt = \int q(x_i) \frac{dg(f(t)) df(t)}{df(t) dt} dt \quad (10)$$

と書き換えられる。ここで、

$$\frac{dg(f(t))}{df(t)} = \frac{u \cdot w \cdot \{-\ln(f(t))\}^{\frac{1}{k}-1}}{f(t) \cdot k \cdot \left(1 + u \cdot \{-\ln(f(t))\}^{\frac{1}{k}}\right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{df(t)}{dt} = -\frac{c_1}{N} \quad (12)$$

であるから、EDP を表す(8)式が積分可能な連続関数であることが示された。このとき、連続関数によるライフサイクル地震動の年非超過度数の平均値は、

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 + \frac{\ln\left(\frac{1-p_0}{e^{i-1}}\right)}{N}\right) = 0.5 + \frac{1}{2N} + \frac{\ln(1-p_0)}{N} \quad (13)$$

と計算される。(5)式と(13)式より、プロットングポジション公式によるライフサイクル地震動の年非超過度数平均値と連続関数による年非超過度数平均値の差 *ERR* は、

$$ERR = \frac{1}{2N} + \frac{\ln(1-p_0)}{N} \quad (14)$$

と表される。 p_0 が 39.3% の時は $ERR=0$ となり、プロットングポジション公式による場合と連続関数による場合が同じになる。ここで、供用期間年数 N が小さいほど ERR が全体に及ぼす影響は相対的に大きくなるが、建物の供用期間を短く見積もって 30 年と仮定しても、0.5 に対して(14)式で算出される ERR は 1桁小さいオーダーであることが分かる。

6 ライフサイクル地震動強さ時刻歴の作成例

3章および5章で示した手法に、上下限を有する極値分布によるハザードカーブ^[13]を適用し、50年超過確率10%の地震動が最大となるように地震動の大きさに任意の条件を設定したライフサイクル地震動作成例をFig.4中の(a)およびFig.4中の(b)に示す。

7 まとめ

ライフサイクル地震動の作成にあたり、確率過程に定常過程を仮定し、プロットングポジション公式および連続関数を用いた年非超過度数の組合せについて、地震カタログを用いて比較検討した。過去120年分の地震カタログに対して任意に選択される供用期間 T ($T \leq 120$) の年非超過度数の平均値が概ね定常的に0.5程度になることを確認した。

註

本論文は、日本地震工学会大会梗概集2004に発表した梗概に加筆修正したものである。

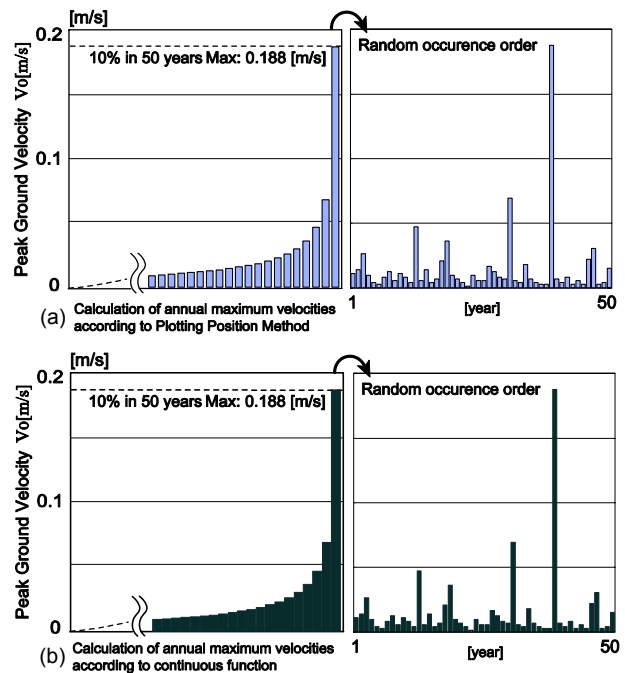


Fig.4 Example of the time history of life cycle input ground motion intensities in Tokyo (hard soil area)

参考文献

- [1] Takahashi, Y., Kiureghian, A. D. and Ang, A. H-S. : Decision Making in Seismic Risk Management of a Building Based on Life-Cycle Cost, Structural Engineers World Congress 2002, Yokohama, Japan, Paper No. T10-2-3, 2002.
- [2] 高橋典之, 塩原等, 小谷俊介: 鉄筋コンクリート建物の補修シナリオを考慮したライフサイクル耐震修復経費, 2002年度日本建築学会関東支部研究報告集I, pp.351-354, 2003. 3.
- [3] 地震調査研究推進本部・地震調査委員会: 長期的な地震発生確率の評価手法について, 2001.6.
- [4] 国立天文台: 理科年表, 丸善(株), 2004.
- [5] 宇佐美龍夫: 新編・日本被害地震総覧, 東京大学出版会, 1996.
- [6] 宇津徳治: 日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表: 1885年~1980年, 地震研究所彙報, No. 60, pp.639-642, 1985.
- [7] 気象庁: 気象庁震源データ, 気象業務支援センター, 1996.
- [8] Kanai, K., Hirano, K. and Yoshizawa, S.: Observation of Strong Earthquake Motion in Matsushiro Area, Part 1., Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol. 44, pp.1269-1296, 1966.
- [9] 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度に見られる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 442, pp. 71-78, 1992.12.
- [10] 嶋悦三ら: 東京の基盤構造 第1回第2回夢の島爆破実験による地下深部探査, 地震研究所彙報, No. 51, pp. 1-11, 1976.
- [11] Hazen, A. : Flood Flows, A Study of Frequencies and Magnitudes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1930.
- [12] 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999. 11.
- [13] 壇一男, 神田順: 上下限を有する極値分布を用いた地震危険度解析, 日本建築学会構造系論文集, 第363号, pp.50-56, 1986. 5.