

I-732

本震—余震系列のモデル化手法とその適用例

鹿島建設 正員 砂坂善雄

Stanford Univ. Anne S.Kiremidjian

1. まえがき

一般に大地震(本震)は、多くの余震を伴う。本震は、一連の本震—余震系列の中で最大のエネルギーを放出し、構造物に対する大部分の被害をもたらす。しかしながら、余震もかなりの被害をもたらすことが知られている^{1), 2)}。特に、本震による崩壊はまぬがれたものの何らかの耐力の低下がある構造物にとって、余震は非常に重要である。このことは、構造物の耐震設計において余震の影響を考慮すべきだということを意味するわけではない。しかし、被災後特に重要な病院、消防署、ライフライン施設等の安全性評価においては、本震のみならず余震も考慮するべきであると考えられる。本研究では、余震を考慮した構造物の安全性を評価するのに必要な本震—余震系列のモデル化方法を提案し、その適用例を示す。

2. 本震—余震系列のモデル化手法

本震は、広く行われているようにポアソン過程でモデル化することができる。このモデルでは、地震の発生間隔 t は、互いに独立で、その分布は次式で表されるような指数分布となる。式中 ν は平均発生率である。

$$f_T(t) = \nu \exp(-\nu t) \quad (1)$$

本震の頻度分布は、次式のようなGutenberg-Richterの関数から求める。

$$N(M) = \alpha \exp(-\beta M) \quad (2)$$

ここに、 $N(M)$ はマグニチュードが M より大きい地震の数、 α 、 β は定数である。本震のマグニチュードが m の確率密度関数 $f_M(m)$ は、(2) 式より導かれる。すなわち、

$$f_M(m) = \frac{\beta \exp(-\beta m)}{\exp(-\beta M_{min}) - \exp(-\beta M_{max})} \quad (3)$$

ここに、 M_{min} は解析で考慮する最小マグニチュード、 M_{max} は対象地域の最大マグニチュードである。

ある本震に付随して発生する余震の数は時間とともに減少する。比較的大きな余震が発生する時間は、本震の発生間隔に比べて十分短く、本震の発生に有意な影響は与えないと考えられる。従って、本震—余震系列に対する構造物の安全性を評価するためには、余震についてはマグニチュードの分布のみが必要となる。Gutenberg-Richterの関係式(2)が、余震のマグニチュードの分布にも適用できると仮定する³⁾。あるマグニチュード c 以上の余震の数 $N_s(c)$ は次式で表される。式中 α_s 、 β_s は、余震に対する定数である。

$$N_s(c) = \alpha_s \exp(-\beta_s c) \quad (4)$$

ここで、余震の発生数及び β 値は本震のマグニチュードに依存すると仮定する。すなわち、次のような関係式を地震データより求めるものとする。

$$\ln[N_s(c)] = a + b M_0, \quad \ln[\beta_s] = d - e M_0 \quad (5), (6)$$

ここに、 a 、 b 、 d 、 e は地震データから求まる定数、 M_0 は本震のマグニチュードである。

式(4)と(5)より α_s を決定し、これと(6)より求まる β_s を式(2)に用いることにより、マグニチュード M 以上の余震の発生数は、本震のマグニチュード M_0 をパラメータとして次式で表される。

$$N_s(M) = \exp(a + b M_0 + (c - M) \beta_s), \quad \beta_s = \exp(d - e M_0) \quad (7)$$

また余震のマグニチュードの分布は、式(3)において $M_{max} = M_0$ において、本震と同様に表すことができる。

以上より、式(1)、(3)を用いて本震の発生間隔とマグニチュードをシミュレートすることができる。また、式(7)より余震の数を求め、本震と同様に余震のマグニチュードをシミュレートすることができる。

3. 北カリフォルニアにおける本震—余震系列の発生モデル

米国北カリフォルニアのEureka付近のUnited States Geological Survey(USGS)の地震データを用いて、本

震-余震系列の発生モデルを作成した例を示す。

1940年から1992年までに、北緯39.5°から42°、西経125°から128°の間に起こったマグニチュード3以上の地震は1519個あった。

Veneziano and Van Dyck⁴⁾が提案した地震層別手法(Earthquake Clustering)を用いてこれらの地震を本震とその余震群に層別した。その結果、全地震の48%が本震、52%が余震に層別された。

本震のデータに基づいて、マグニチュード5以上の本震の発生時間間隔 t 及びマグニチュード m の確率密度関数の定数は、 $\nu=0.84/\text{year}$ 、 $\beta=1.4$ と求まった(図-1参照)。

1519の地震の中に、マグニチュードが5以上の本震と10個以上の余震からなるクラスターが11存在する。これらのクラスターのデータから、マグニチュード3以上の余震の数 $N_a(3)$ と本震のマグニチュードの関係及び b 値と本震のマグニチュードの関係を求めた。結果を図-2、3に示す。これらの関係の回帰分析より次式を得た。

$$\log(N_a(3)) = -0.28 + 0.29M_0$$

$$\log(b) = 0.12 - 0.059M_0$$

従って、2. で示した方法により次式を得る。

$$N_s(M) = \exp(-0.64 + 0.67M_0 + (3-M)\beta_s)$$

$$\beta_s = \exp(1.11 - 0.136M_0)$$

上式より求まる $N_s(M)$ と M の関係を図-4に示す。

4. あとがき

本震-余震系列のモデル化法とその適用例を示した。余震を考慮した構造物の安全性評価は、このようにしてシミュレートされたある期間内の本震-余震系列に対して、累積損傷度を求めることによって可能となる。

参考文献 1) Priestley, M.J.N.(1988): The Whittier Narrows, California earthquake of October 1, 1987 - damage to the I-5/I-605 separator, Earthq. Spectra, Vol.4, No.2, 389-405. 2) EQE Engineering(1990): The July 16, 1990 Philippines earthquake, a quick look report. 3) Utsu, T.(1961): A statistical study on the occurrence of aftershocks, Geophys. Magazine, Vol.30, No.1, 521-616.

4) Veneziano, D. and J. Van Dyke(1984): Statistical discrimination of aftershocks and their contribution to seismic hazard, Consulting Report to Dames & Moore, Golden, Colorado.

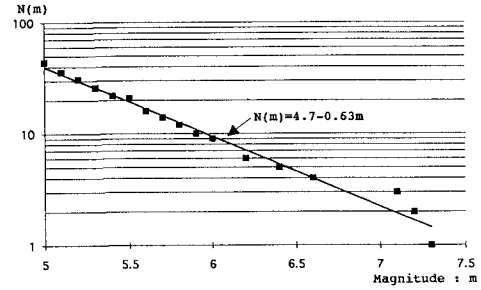


図-1 米国北カリフォルニアのEureka付近で発生した本震(1940-1992、 $M \geq 5$)のGutenberg-Richterの関係

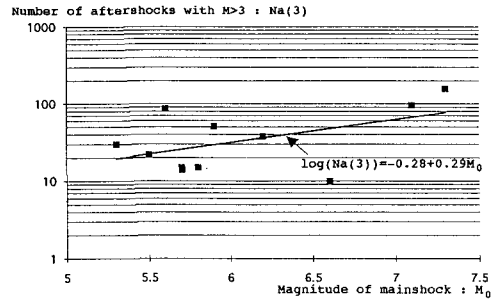


図-2 マグニチュード3以上の余震の数 $N_a(3)$ と本震のマグニチュードの関係

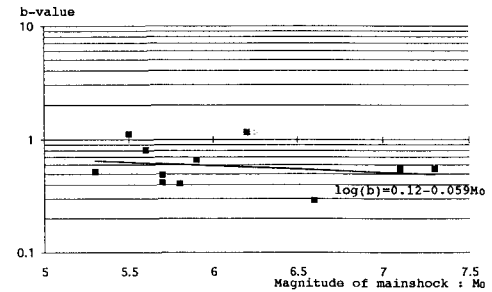


図-3 余震群の b 値と本震のマグニチュードの関係

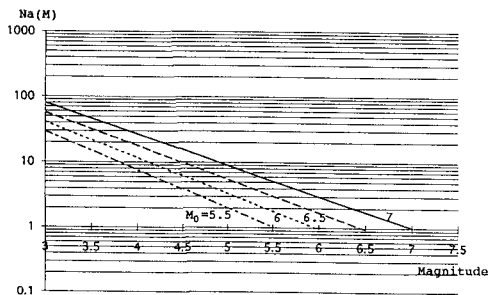


図-4 本震のマグニチュードをパラメータとした余震のGutenberg-Richterの関係