地震災害対策の最適計画 (II)

名古屋大学理学部地球科学教室 杉山公造・島津康男

(昭和46年1月20日受理)

Strategy for Minimization of Loss Due to Earthquake Disaster (II)

Kozo SUGIYAMA and Yasuo SHIMAZU

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Nagoya University

(Received January 20, 1971)

As a continuation of the recent paper by the present authors [SHIMAZU *et al.* (1970)], a Monte Carlo simulation of construction planning of buildings is developed by generating a time series of earthquake occurrence.

(1) Economic merit of forecast of earthquakes.

When the destructive force larger than the critical level I_c is predicted, the accuracy of forecast is defined by the following two types of probabilities: P_1 (forecast of occurrence is true) and P_2 (forecast of non-occurrence is true). It is shown that the economic merit is more sensitively dependent upon I_c than P_1 and P_2 .

(2) Common characteristics of optimum initial strength of buildings for earthquake and meteorological disasters.

It is concluded that the former is not economically profitable in any case than the latter.

(3) Risk (damage plus cost) per year.

The result of calculation is shown in Fig. 9 for seven points in Japanese Islands.

(4) Strategy of reconstruction planning of hypothetical area is considered under various constraints of budget, initial strength and selection of order of reconstructing areas.

§1. はじめに

最近、筆者らは簡単なモデル（建物の建設・破壊モデル）に基づき、地震災害をモンテカルロ法によりシミュレートし、経済的観点から建物の最適設計強度（または最適対策強度）を考察し、強度の半減期や建設コストの違いによる最適値の変動、半壊を考慮した場合の効果、事前対策の効果等を論じた【島津他（1970）】。そのとき用いたモデルと結果を簡単に記すと次のようであった。

ある地域の建物の平均耐震強度 S は

$$S = S_0 \exp(-t/L) \quad (1)$$

に従う。 S_0 は設計強度、 L は強度減少の半減期、 t は建設時からの年数である。地震の強さ

には便宜上、マグニチュード M を用いる。地震の時系列は、経験法則

$$\log N = a - bM \quad (2)$$

により M の発生確率を求め、一様乱数を発生させながらつくる。 $S < M$ ならば破壊が起り、建設コストを C 、破壊までの寿命を Δt とすると、

$$R = C/\Delta t \quad (3)$$

により損失率が求まる。 C は S_0 の関数で

$$C = \alpha(S_0 - 4)^\beta \quad (4)$$

とする。破壊を何度もくりかえし、 R の平均すなわち平均損失率 $\bar{R}$ を最小とする S_0 を求める。それが最適設計強度である。

以上のようなシミュレーションにより、次のような結果が得られた。

① 建物の強度の半減期 L や (4) 式の β を大きくすると、最適設計強度は大きい側へずれる。 $\beta = 2$ 、 $L = 30 \sim 180$ 年の時、最適設計強度は $7.5 \sim 8.5$ である。

② L が大きい程、平均損失率 $\bar{R}$ が小となり有利。ただし、(4) 式を $C = \alpha(S_0 - 4)^\beta \cdot L$ とすると L が小さい程有利となる。

③ 半壊効果 ($S < xS_0 (x < 1)$) になつたら $S \rightarrow yS (y < 1)$) を考慮すると、最適値は大きい側へずれる。

④ 補修効果 ($S < zS_0 (z < 1)$) になつたら $S \rightarrow S_0$ に戻す。補修費は 50% 割高とする) を入れても $\bar{R}$ が大となり、有利にはならない。

その後の発展として、次の4つの問題について、上記とはほぼ同じモデルにより考察を行なった。

- ① 予報を利用して事前に補修を行なった場合の効果と適中率との関係。
- ② 他の災害と比較した場合、地震災害における最適設計強度はどのような特徴を持つか。
- ③ 日本列島各地の平均損失率 (一種の災害ポテンシャル) の推定。
- ④ 大きな広がりを持つた地域に建物を建設する場合、どのような年次計画をたてたらよいのか。

今回用いたモデルは、前述のものとはほぼ同じであるが、重大な変更が一つある。それは (2) 式の破壊力として、震度を用いたことである (a, b の値が異なる)。前回は便宜上、マグニチュードを用いたが、それは単に変換ルーチンを入れるか入れないかだけで、結果に定性的な差異はないと考えたからであるが、大きな差異があることが §3 で示される。

§2. 予報効果

予報を利用して事前対策（補修）を行なうとき、どれだけその効果（平均損失率 $\bar{R}$ の減少）がみられるであろうか。

Fig. 1 に予報の形式を示す。これは気象災害の方でよく用いられる簡単な予報形式である。ある規準の震度 I_0 よりも大きな地震が起こる (A) と予報して、実際に起る確率を P_1 、起こらない (no A) と予報して、実際に起らない確率を P_2 とする。起ると予報の出た時は必ず補修し $S \rightarrow S_0$ にする。その時要する費用 C_r は

$$C_r = \alpha \{(S_0 - 4)^\beta - (S - 4)^\beta\} \cdot \gamma \quad (5)$$

とする。ここで γ は補修単価である。 $P_3 = 1 - P_2$ は誤つて A と予報する確率であるが、実況 A よりも no A の方がずっと多いから、補修頻度とも考えられる（精度がよくなり、 I_0 がずっと小さくなると少し無理があるが）。補修は新築より割高で、かつ、補修頻度に比例すると考えて、(5) 式の補修単価 γ は

$$\gamma = m + nP_3 \quad (6)$$

とする。 $m = 1$, $n = 5$, $\log N = a - bI$ の a , b には 2.15, 0.8, $L = 25$ 年として、モンテカルロ法により、数値実験を行なつた。予報を利用せず、全く補修をしない場合の平均均損失率を $\bar{R}_0$ 、予報を利用し補修をする場の平均損失率を $\bar{R}_f$ とすると、対策の効果 B は

$$B = (\bar{R}_0 - \bar{R}_f) / \bar{R}_0 \times 100 \quad (7)$$

により表わされる。

Fig. 2 は P_3 と $\bar{R}_f$ との関係を示している。誤つて A という予報を出す確率 P_3 が 0~0.1 の時、 $\bar{R}_f$ は最小となる。補修のし損よりも、すぐあとに地震が起つても壊れない効果の方が大きいからであろう。Fig. 3, 4 はそれぞれ P_1 , I_0 による B の変動を示している。当然ながら、 $S_0 < I_0$ の建物は $B < 0$ となり、予報を利用する意味がない。また、 P_1 が大きい程、 I_0 が小さい程、 B は大となるが、 I_0 による変化の方が顕著である。建物がすべて団地群のような等しい設計強度を持つ集団であれば、Fig. 3, 4 により予報の効

forecast fact	A	no A
A	P_1	$1 - P_1$
no A	$1 - P_2$	P_2
	repair	do not repair

Fig. 1. Forecast matrix.

Fig. 2. $\bar{R}_f$ - P_3 - S_0 relation for $\alpha = 2$ and $L = 25$.

Fig. 3. B - P_1 - S_0 relation for $\alpha = 2$, $L = 25$ and $I_e = 6.5$.

Fig. 4. B - I_c - S relation for $P_1 = 0.9$ and $P_2 = 0.9$.

Fig. 5. Distribution of buildings as a function of S_0 .

果を知ることができる。

次に, S_0 について家の分布 $N(S_0)$ が与えられたとすると, B は (7) 式にかわつて

$$B = \frac{\sum_{S_0} N(\bar{R}_0 - \bar{R}_f)}{\sum_{S_0} N\bar{R}_0} \times 100 \quad (8)$$

によりあらわされる。各 P_1 , I_e について B を求めたものを Fig. 6 に示す。 $\alpha = 1, 2$ とし N が Fig. 5 のような正規分布と一様分布について示されている。

但し, I_e より小さな S_2 の建物については $B = 0$ と

した。正規分布, 一様分布の二例を考えておけば, 他の常識的な分布による結果はこれらから推定されよう。

ところで以上の考察では, 予報に要する費用を考慮していない。従つて, 求められた予報による効果 B は, 経済的にみて許容される (ひきあう) 予報のための投資の上限を示しているとみることもできる。

Fig. 6. B - P_1 - I_c relation when (A) N is normal and $\alpha = 2$ and (B) N is uniform and $\alpha = 2$.

§3. 地震災害における最適設計強度の特徴

自然災害はどのようにして発生するのであろうか。その原因としてまず第一に考えられるのは、地震・大風・大雨など自然の変動に伴う破壊力の出現である。これを誘因と呼ぶ。しかし、砂漠の真中で地震が起つたり、大雨が降つたりしても災害にはならない。破壊力の出現する場所に、人間にとって価値ある何んらかの被害をうける対象が存在することが必要である。しかも、対象の持つ抵抗力が破壊力より大きければ、災害は発生しないから、災害の発生には、“対象の破壊力に対する抵抗力の無さ”というものも原因になっているはずである。これを素因と呼ぶ。このように自然災害は、誘因・対象・素因の三つの要素が重なって、はじめて発生する【高橋 (1968)】。この自然災害の要素に、もう一つ拡大要因というものを考えることがあるが、これは、地震に伴う都市火災のように、二次的な災害の拡大を重視したもので、大きくは素因の一部である。ここでは拡大要因は考えない。

§1, 2 のモデルでは、地震が誘因であり、建物が対象であり、建物の強度が素因である。自然災害をこのような三つの要素の重なりとみると、各災害はよく似た形式を持ち、§1, 2 で用いたモデルと論理は、災害の誘因・時系列・対象・素因を変えてみれば、そのまま他のいくつかの災害（暴風による災害、大雨による災害）にも適用できる。

被害対象の相異は、建設コストの式 (4) 式の α と β に関係するが、 α は最適設計強度の推定には無関係である。 β については大体 2 とみてよい (建設コストが風圧に比例するとすれば、暴風の場合、 $\beta = 2$ であり、高橋 (1957a) によれば、大雨の場合 $\beta = 1.5$ である)。誘因・時系列は破壊力 F の出現頻度についての経験法則

$$\log N = a - bF \quad (9)$$

の a, b に関係する (高橋 (1954) によれば、暴風については日最大風速の出現頻度が、また大雨については日雨量の出現頻度が (9) のような対数分布に従がうとみてよいとされている)。ここで F は標準化した破壊力であり、各災害の破壊力 X を

$$F = ((F_{\max} - F_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})) \cdot X \quad (10)$$

により変換して求める。 $X_{\max}$ は最大の破壊力であり、 $X_{\min}$ は被害が出始める破壊力の大きさである。 $F_{\max}, F_{\min}$ はそれぞれ $X_{\max}, X_{\min}$ に対応する標準化された破壊力であり、適当に選ばばよい (ここでは $F_{\max} = 9, F_{\min} = 5$ とした)。

1 ステップに一つの破壊力が出現するとすれば、 a は単位時間当りのステップ数に関係し、 b は破壊力 F の規模別出現確率に関係する。Fig. 7 に b と強度半減期 (LIFE) について最適設計強度を示すが、LIFE はステップ数で示されており、 $F_{\max}$ と $F_{\min}$ の間の破壊力の年間出現回数と年で表わされた強度半減期との積である。図中の点と数字は b と LIFE の座標値に対応する最適設計強度を示しており、大まかなコンターが引かれている。(9) 式の a 、 b は災害により、また、地域により差異があるが、それにより最適値がどれだけずれるかが Fig. 7 により知られる。

最適設計強度はいろいろなファクターにより変動するが、そのセンスについてまとめてみると次のようになる。

- ① $C = \alpha(S_0 - 4)^\beta$ で $\beta \rightarrow$ 大のとき、(最適値) $\rightarrow$ 小。

Fig. 7. Optimum initial strength as a function of B and LIFE (product of the numbers of occurrence of destructive forces for a year and designed half life of buildings).

Table 1. Distributions of occurrence of each destructive forces.

Destructive Force	Point	b	Number (1/y)	Period
Earthquake Intensity	Hachinohe	0.76	<1.0	1937—64
	Tokyo	0.64		1921—64
	Wakayama	0.82		1921—64
	Miyazaki	0.47		1925—64
Wind Velocity (10 Min. Mean)	Kagoshima	0.56	39.2	1925—54
	Akita	0.66	27.4	1925—54
	Nagano	0.51	12.8	1925—54
Precipitation (Daily)	Kagoshima	0.52	24.2	1900—45
	Hiroshima	0.52	13.6	1900—45
	Sapporo	0.33	2.9	1900—45

- ② (半減期 L) → 大のとき, (最適値) → 大.
 ③ (破壊力の年間出現回数) → 大のとき, (最適値) → 大.
 ④ $\log N = a - bF$ で b → 大のとき, (最適値) → 小.
 ⑤ 半壊効果, 補修効果を考慮すると (最適値) → 大.

地震・暴風・大雨の破壊力について, (9) 式の b の値, 年間出現回数 ($F_{\max}$ と $F_{\min}$ の間のもの), 統計期間が Table 1 に示されている (資料は勝又 (1965), 高橋 (1957b) による). これをみると, 地震にくらべて, 暴風・大雨の年間出現回数がずっと大きい. 従つて, 建物の強度半減期が同じであつても, 暴風・大雨の場合の最適設計強度は Fig. 7 の右の方にあり, 地震の場合は左の方にあることになる. 暴風や大雨による災害について, 経済的強度は, 建物の強度半減期を 30 年とすると, 暴風の場合には平均年最大風速の 1.7 倍, 大雨の場合には平均年最大日降水量の 3.2 倍であると高橋 (1957) により報告されている. 地震災害の場合は, 半減期が 30 年のとき, 年間出現回数を 1 としても, $LIFE = 30$ であり, $F_{\min}$ のコンターより左の方に経済的な強度がきてしまう. だから, 地震災害においては, 最適設計強度より大きな破壊力が出現する可能性が大きく安全性を欠くわけで, 安全性と経済性が両立しないという特徴がある. 地震の破壊力としてマグニチュードではなく震度を用いると結果に定性的な差異が出ると §1 で述べたのはこのことであり, §1 の前報告の結果の①と異なり, どんな対策も経済的にはひきあわないという結論になる. もつとも半減期を 500 年位にすれば, 最適値は $F_{\max}$ より大きくなり, 安全性と経済性が両立しやすくなるが, 建物の半減期は社会的要因とも関連し, むやみに大きくもできないであろう. 結局, 地震のくりかえしの期間が, われわれの社会生活のタイム・スケールに比べて長いということが, 経済的強度を小さくしているといえる.

§4. 日本列島各地の平均損失率の推定

災害対策を行なうためには、地震の予知ができることが望ましいが、この地震の予知にも二

Fig. 8. Numbers of large earthquakes ($M \geq 5$) occurred during 679-1964 in Japanese Islands (N31-N46 for latitude and E129-E146 for longitude).

Fig. 9. Expected risk by earthquake disaster at several points in Japanese Islands.

種類ある。よくいわれる気象学的予知（例えば明日地震が起きるかどうかを予知する）と気候学的予知（例えば、ここ 100 年間に何個地震が起きるかを予知する）である。現在行なわれている地震予知計画は気象学的な予知を目指していると思われるが、気象学的な予知が十分行なわれない場合や、常日頃の対策、また長期的な都市計画などのためには気候学的な予知が価値を持つてくる。マグニチュードの頻度分布を示すグーテンベルグ・リヒターの式はこの気候学的予知式であり、日本列島全体について $\log N = 6.72 - 1.03 M$ の式が得られている。しかし、大地震の空間的分布を知るためには、これでは不十分である。そのために、日本列島を細分し、微小地震をつかい、各地域でグーテンベルグ・リヒターの式を求めることが行なわれており、これは予知のための有力な手段の一つとなっている。しかし、現在まででは統計期間が短く、長期的な気候学的予知のために十分な段階にはまだなっていない。そこで次のようなことを考えてみた。

日本列島に発生した大地震の統計が河角らにより行なわれている（理

科年表). Fig. 8 にそれを示す. これ以上の大地震の統計は現在のところ得られないわけであるから, その意味では, これは大地震についての最良の気候学的予知をあらわすものと考えられる. しかし将来もこのまま続くかどうか分布の信頼性を調べる必要がある.

筆者らは, すでに Fig. 8 の大地震の分布について, 林理論第 I 類 (多変量解析の一手法) を用いて地震発生の要因分析を行なっている [杉山他 (1970)]. 日本列島を緯度・経度により細分し, 地震に関係のありそそうな要因群を各区画で level 表示し, 大地震の分布を最も良く表現するように各要因の weight を決めた. その際に得られる重相関係数は, 要因群には long range のものが多いので, 分布の信頼性を示しているとみることができよう. 得られた重相関係数は

㊸ 0.83 679-1964 年 $M \geq 7$

㊹ 0.81 679-1964 年 $M \geq 5$

㊺ 0.50 1961-1968 年 4 月 $M \geq 4$

であつた. 従つて, 先程の分布は 0.8 くらいの信頼性があると考えることができる. 十分とはいえないが, 0.8 であることを念頭に置き, Fig. 8 の分布に従い地震を発生させ, 震度に変換し (河角の式による), 日本列島各地の平均損失率 $\bar{R}$ を S_0 について計算すると Fig. 9 のようになる. どの曲線も S_0 について単調増加を示しており, 対策が経済的にひきあわない形になつている. これは §3 で論じたところと一致している. また, Fig. 9 は一種の災害ポテンシャルを示していると考えることができよう.

§5. 広域建設年次計画

地震災害の恐さは, 一次的な建造物の破壊にあるのではなく, それにともなう火災や経済低滞など二次的・三次的な災害の拡大にある. それは, 市街化が稠密に連続的に広がり, コンビナートと住宅地が隣接し, 交通網は乱雑に入り乱れているといった現在の都市の構造に問題があることを示している.

将来, 都市は現在のメトロポリスからメガロポリスに移行するといわれている [黒川 (1969)]. このメガロポリスの特質は, メトロポリスのように市街化が均質に連続的に広がるのとは異なり, いわばすき間だらけの都市化現象になる点にあるといわれる. このす

Fig. 10. Illustration of block configuration for construction of buildings.

き間の存在は、離散的に存在する“町”相互間の通信・交通ネットワークの整備・高速化を必要とするが、都市構造の耐震性を強化するであろう。

Fig. 10 のように、一辺 200 km の正方形の地域を考え、その中を 100 コの一辺 20 km の正方形のブロックに細分し、各ブロックに“町”を構成する建築群（以後微小都市と呼ぶ）を建設する計画を考える。微小都市の平均耐震強度を越える地震が発生すると、微小都市は破壊されるとしたとき、予算規模・設計強度・建設順序等により完成率がどうかかわるかをみる。

Fig. 10 の一辺 600 km の正方形内にランダムに $\log N = 6.37 - 0.803 M$ に従い地震を発生させ（正方形外のものはほとんど影響がないと考えた）、河角の式により震度に変換する。

Fig. 11. Percentage of constructed buildings for $L = 30$. Budget of construction in case B is two times as in case A.

ある予算規模 ($S_0 = 9$ で毎年ブロックずつ建設) の時、各 S_0 についての完成率を Fig. 11(A) に示す。同じ予算規模であるから、 $S_0 \rightarrow$ 小的时候（建設ブロック数 $N \rightarrow$ 大となっている。強度の半減期 L はすべて 30 年である。 S_0 が小でも建設ブロック数の多い方が完成率がよいことがわかる。また、この予算規模では、約 20 年ぐらいに完成率は頭打ちになる。

Fig. 11(B) に (A) の二倍の予算規模の時の完成率を示す。やはり S_0 が小の方が完成率が良く、 $S_0 = 9$ を除いて完成率はほぼ 1 となる。従って、これより大きな予算規模ならば、計画は短期間のうちに完成する。

次に、設計強度とともに半減期も長くなる場合についてみると Fig. 12 のようになる。 $S_0 = 9, 8, 7, 6$ に従い半減期を 65, 45, 30, 20 年とした。30 年を過ぎると完成率

に逆転が生じ、 S_0 が大のもののほど完成率も大きい。

以上の各例はすべて、100 ブロックに端から順に建設を行なつたものである。建設場所の選択を全くランダムに行なつたらどうなるであろうか。Fig. 13 に端から順に建設した場合 (実線) と、全くランダムに建設場所を選択した場合 (点線) とを示す。建設ブロック数は年間5コ、半減期は30年である。半減期30年を過ぎるまではランダム建設の方が有利であることがわかる。その後にはどちらも頭打ちになり、大差はなくなる。

§3, 4, 5 の結論として、拡大要因を考えないならば、地震災害に対する対策は経済的にひきあわないといえる。従つて、地震災害の本質は、被害をうける対象そのものの耐震強度が弱いということよりも、拡大要因となるそれら対象の組み合わせ方 (都市構造) の方にあるといえよう。災害科学は、§5 で述べたメガロポ

リスのような (現在の都市またはそれ以上の有機的機能を持ち、しかも離散的な微小都市群からなる都市のような) 拡大要因の少ない都市構造を研究する必要がある。このように災害科学は都市計画に関係し、しかも具体的な都市計画に進むには、自然科学・社会科学の総合的視点が必要とされる。

前報でも述べたが、地震災害に限らず災害科学は社会科学と関連すべきだとの趣旨が、この報告の前提であることを再度くりかえしておく。

Fig. 12. Percentage of constructed buildings when L is dependent upon S_0 .

Fig. 13. Percentage of constructed buildings when a random selection of construction blocks is performed.

この研究には、京都大学大型計算機センターを利用して計算を行なった(課題番号 4001 LC 018).

文 献

- 勝又 護, 1966, 地震の規模別頻度の地域性について (II), 地震, **19**, 1~10.
黒川紀章, 1969, ホモ・モーベンス, 中央公論社.
島津康男・杉山公造・平賀一紘, 1970, 地震災害の最適計画, 地震, **23**, 134~141.
杉山公造・浦部達夫・島津康男, 1970, 地震発生の要因分析, 地震, **23**, 166~169.
高橋浩一郎, 1954, 日本の風水害について, 予報研究ノート, **6**, 312~340.
高橋浩一郎, 1957a, 災害に関するオペレーションズ・リサーチ, 研究時報, **9**, 1, 1~34.
高橋浩一郎, 1957b, モンテカルロ法による風水害対策の研究について, 天気, **4**, 2, 14~18.
高橋浩一郎, 1968, 気象災害論, 地人書館.
東京天文台, 1970, 理科年表.