

間接被害を考慮した公共施設の最適耐震設計法に関する基礎的研究

京都大学 工学部 正員 山田善一
 京都大学 工学部 正員 家村浩和
 神戸市 交通局 正員 新家晴義

1. まえがき

1978年6月に発生した宮城県沖地震は、都市の耐震安全性に関して種々の問題を投げかけた。たとえば、都市生活者にとって、地震動による建造物の破損・崩壊に基づく直接被害はもちろん、ライフライン系を含めた公共施設の機能障害による間接被害も非常に甚大であり、生活の安全を大いに脅かすものであった。

現行の耐震設計法によると、建造物は主に力学的観点からのみ設計されている。しかしながら、ばく大な投資を伴う都市内公共施設の耐震設計を、長期的な立場から実施するためには、Fig. 1に示すプロセスを経るのが合理的であろう。すなわち、地震発生時に予想される地域全体の直接・間接被害の程度より、公共施設に要求される耐震性を逆=規定する必要があるものと考えられる。

本研究では、まず間接被害を考慮する基礎的段階として、公共施設の初期建設費および地震動による直接的な物的被害さらには、機能障害から波及する社会的損失との総和の期待値に着目した最適耐震設計法を検討した。次に地震時における避難・救護上の拠点となる複数個の重要公共施設を考え、¹⁾これらの非破壊確率の期待値を算出し、公共施設群を地震防災システムと考えた時の信頼性解析を行った。

2. 総コストを考慮した公共施設の最適耐震設計

2.1 総コストの評価関数

間接被害を考慮した公共施設の最適設計震度を決定するための評価関数として、耐震設計のための費用 $A_1 \alpha^2$ を含む初期建設コスト C_i と、施設の耐用年間における地震による直接・間接被害 C_f の期待値との和すなわち総コスト C_t と耐震性を考慮しない場合の建設コスト A_0 で除した次式を考える。

$$C_t/A_0 = C_i/A_0 + E[C_f/A_0] \dots (1)$$

ここで、 $C_i = A_0 + A_1 \alpha^2 \dots (2)$
 なお、耐震設計のためのコスト $A_1 \alpha^2$ は、必要部材断面積が地震外力に比例するものとして、設計震度 α の自乗に比例するものとした。また総損失コスト C_f は、直接的・物的被害コスト L_p と間接的・社会的被害コスト L_s との和として、

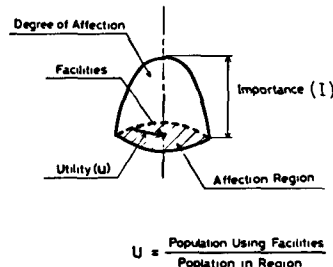


Fig. 2 Degree of Social Loss Due to Collapse of Public Facilities

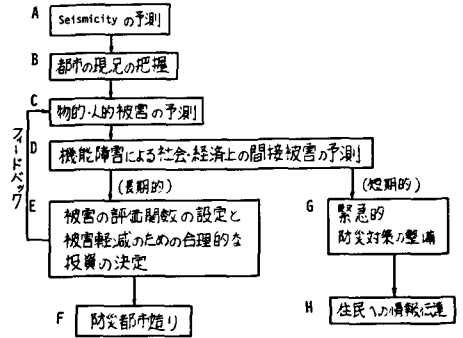


Fig. 1 Process of Aseismic Design and Planning of Urban Regions

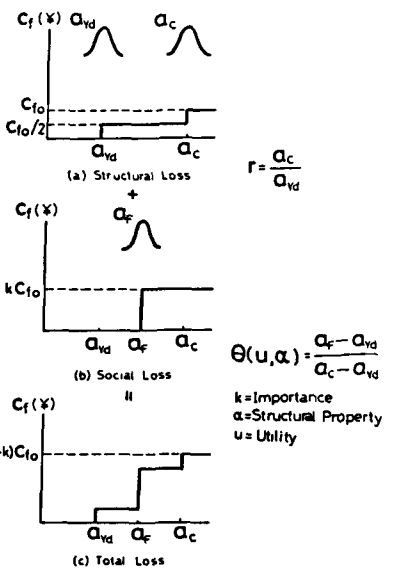


Fig. 3 Schematical Illustration of Total Loss Due to Seismic Effects

次式より得られるものとした。

$$C_f = L_p + L_s \quad \text{----- (3)}$$

$$L_p = \begin{cases} 0 & (a \leq a_{yd}) \\ C_f/2 & (a_{yd} < a \leq a_c) \\ C_f & (a > a_c) \end{cases} \quad \text{----- (4)}$$

$$L_s = K C_f \quad \text{----- (5)}$$

$$\theta(u, \alpha) = (a_f - a_{yd}) / (a_c - a_{yd}) \quad (0 \leq \theta \leq 1) \quad \text{--- (6)}$$

$$r = a_c / a_{yd}$$

ただし、 a_{yd} , a_f , a_c はFig.3に示したように、それぞれ構造物の弾性限界、機能障害発生点、崩壊点に対応する加速度レベルを表示する。なおこれらの値が確定値である場合と、確率変数である場合とによって解析を行った。また C_f は構造物が崩壊した場合の物的被害コストであり、弾性限界と崩壊点の間にある場合の被害コストはその1/2であると考えた。さらに間接的・社会的損失コスト L_s の評価は非常に複雑・困難であるが、本研究では C_f との比を示すパラメータ K を導入した。 K の値はFig.2に示した概念図より、次のように理解される。 U を公共施設の利用率、 I をその重要度とすると、社会的損失の影響範囲は公共施設を中心とする半径 U の円であり、損失コストのパラメータ K は、高さ I の立体の体積であるとして表現される。さらに施設の機能障害発生点 a_f を、構造的な、利用率 U の関数 $\theta(u, \alpha)$ で表現した。また a_c と a_{yd} の比を r とした。

今、1年あたりの地震加速度の最大値の確率密度関数 $p(\alpha)$ が既知であるとすると、総損失コスト C_f の期待値は、次式より得られる。

$$E[C_f(A_0)] = \int_0^{T \cdot \alpha_0} \left(\frac{L_p}{A_0} + \frac{L_s}{A_0} \right) p(\alpha) e^{-\delta t} d\alpha dt \quad \text{----- (7)}$$

ただし、 δ は経済状態がインフレーションであるとした場合の金銭価値の1年あたりの低減率を表わす。²⁾

ス.ス 数値計算例

前節での総コストの評価式(1)~(7)を用いて数値計算を行ない、公共施設強度のばらつきや、間接被害の大きさや、最適設計震度に及ぼす影響について検討した。

数値計算にあたっては、地震加速度の最大値の確率密度関数 $p(\alpha)$ を次の方法より決定した。まず地震動のマグニチュード m の確率密度関数 $f_H(m)$ として、次式を採用する。³⁾(Fig.4参照)

$$f_H(m) = \frac{1 - e^{-\beta(m - M_0)}}{1 - e^{-\beta(M_1 - M_0)}} \quad \text{----- (8)}$$

ただし、 M_1 , M_0 はそれぞれ考慮すべき最大・最小のマグニチュードである。本研究では、過去10年(1965~1974)に日本付近で発生した浅発地震をシミュレートし、 $M_1=7.9$, $M_0=5.0$ とし $\beta=2.0$ とした。次に最大加速度の attenuation law としては、マグニチュード m と震央距離 Δ の関数として、次式を採用した。⁴⁾

$$a = b_1 e^{b_2 m} \Delta^{-b_3} \quad \text{----- (9)}$$

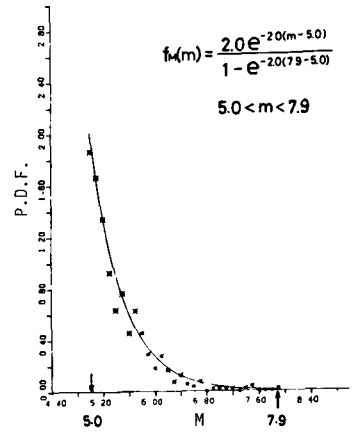


Fig.4 Probability Density Function of Magnitude

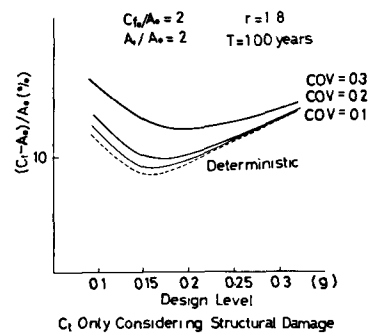


Fig.5 Total Cost without Social Loss

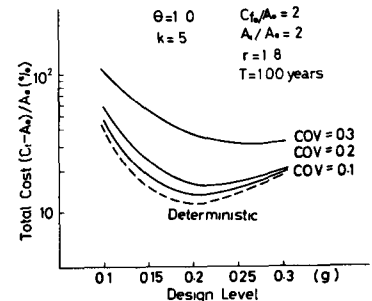


Fig.6 Total Cost with Social Loss ($\theta=1.0, K=5$)

本研究では、 b_1, b_2, b_3 の値として、日本の平均的地盤にちたるとする、 $18.4, 0.675, 0.8$ を採用した。地震動の年平均発生率 λ が既知であれば、式(8)、(9)より $P(a)$ が決定できる。

Fig. 5には、間接被害 L_s を全く考慮しない場合の総コスト比を、耐震設計加速度レベルを横軸に示した。縦軸の値は、耐震設計コストおよび地震動による損失コストの総和と耐震設計を全く考慮しない建設コストとの比である。パラメーターとしては、 $C_f/A_0=2, A_1/A_0=4, r=1.8$ を考えるときにも、公共施設の耐用年数を100年と仮定した。また施設の強度 A_{yk} A_c が確定値である場合と、正規分布形を有しとの変動係数が0.1, 0.2, 0.3である場合とについて計算を実施した。設計レベルが低い範囲においては、強度が確定値である場合よりも確率変数である場合の方が、また変動係数の大きい場合の方が、かなり大きな総コスト値を示している。これは、この範囲において地震破壊による損失コストの期待値にかなりの差が存在するためである。設計レベルが上がると、破壊確率の絶対値およびその差は小さくなる。その結果、総コストはほとんど耐震設計用コストに占められ、構造物強度のバラツキによる差も小さくなる。総コストが最低となるいわゆる最適耐震設計震度は、当然のことながら、地震による損失コストの大きい方が、高いレベルとなる。

Fig. 6では、Fig. 5と同一の強度を有する公共施設について、直接被害 L_d のみならず間接被害 L_s が構造物の崩壊量 A_c より生じ ($\theta=1.0$)、その値は C_f の5倍 ($K=5$) であると仮定した場合の計算結果を示した。間接被害による損失コスト L_s を考慮したため、Fig. 5の結果よりも総コストがかなり大きくなっている。またこれとともに、最適設計震度もFig. 5では $0.15 \sim 0.20g$ の範囲であったのに対して、Fig. 6では $0.20 \sim 0.25g$ の範囲へと増大して来ている。

Fig. 7では、Fig. 6と同一の計算例について、間接被害 L_s が構造物の弾性限界 A_{yk} と崩壊量 A_c との間より発生する場合 ($\theta=0.5$) を取り扱ったが、総コスト・最適設計震度ともFig. 6の場合とほとんど差は見られない。したがって本研究での計算例の範囲では、機能障害発生率のレベルの影響はさほど大きくないと言える。

Fig. 8では、Fig. 6と全く同一の計算例について、間接被害 L_s の値が C_f の10倍 ($K=10$) であると仮定した場合を取り扱った。総コスト・最適設計震度ともかなり増大しているが、施設強度の変動係数の大きい場合には ($COV=0.3$)、総コストがやや単調減少している。するわけこのようなケースでは、設計震度を上げることにより総コストを減少させることは出来るが、その効果は非常に緩慢であることに留意する必要がある。

3. 公共施設群の地震危険度の評価

3.1 公共施設群モデル

地震災害発生時における避難・救援上の拠点となる重要公共施設群を1つの地震防災システムと考え、この信頼性解析を行った。大都市圏に存在する重要施設群およびそれをとりまく震源域を、Fig. 9に示すように比較的簡便にモデル化した。まず震源は震源域に一様分布しているものと仮定し、式(8)、(9)を用いて個々の公共施設の強度レベル a_i (g) を越える確率を算出した。次に防災システムの何割がどの程度の確率で同時に破壊するかを

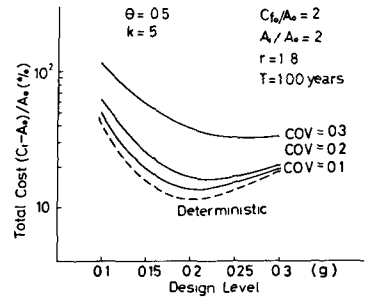


Fig. 7 Total Cost with Social Loss ($\theta=0.5, K=5$)

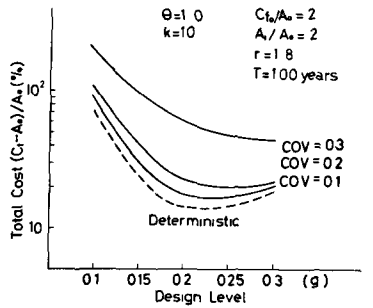
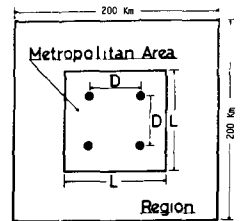
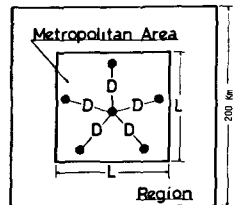


Fig. 8 Total Cost with High Social Loss ($\theta=1.0, K=10$)



Model 1 (4 Sites)
($D=50km, L=100km$)



Model 2 (6 Sites)
($D=50km, L=110km$)

Fig. 9 Model of Metropolitan Area and Seismic Region

などの数値計算を行った。

3.2 数値計算例

Fig.10には、モデル1に示した公共施設群の平均強度 a_0 が0.15gで、確率値である場合や正規分布に従う確率変数である場合を取り扱った。横軸には、同時に a_0 を超える地災数を取った。その数が1の場合は少なくとも1施設で、4の場合は全施設で a_0 を超える確率を示す。実線は1年間、1英鎖線は50年間の期待値である。地災数が増加するとともに、超過確率は急激に減少している。また施設強度のばらつきが大きいほど、超過確率は大きい。

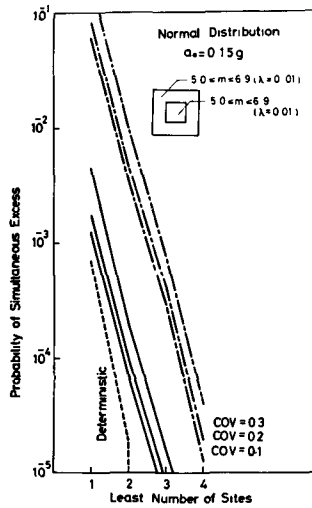


Fig.10 Probability of Simultaneous Excess of a_0 . (Model 1)

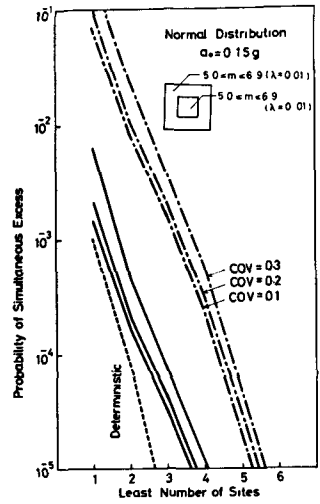


Fig.11 Probability of Simultaneous Excess of a_0 . (Model 2)

Fig.11には、モデル2に関する計算例を示した。公共施設数が増えるとも、同一数の施設を同時に超過する確率は増大するが、全施設を超過する確率は減少する。これらの施設群の数や空間的配置についても最適計画が必要である。

Fig.12では、横軸に施設の強度レベルを取り、縦軸には少なくとも1施設で超過する確率を示した。強度レベルを増大させると、確率強度の場合は超過確率は急激に減少するが、強度のばらつきが大きい場合には、減少率がさほど顕著でない。こうした場合には、耐震設計のための投資の内容をより慎重に検討すべきであると考えられる。

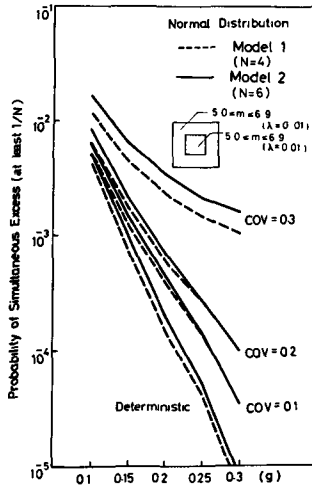


Fig.12 Probability of Simultaneous Excess of a_0 against Design Level

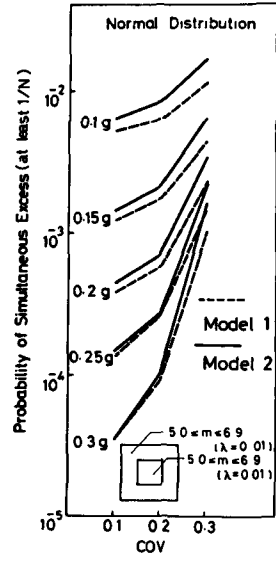


Fig.13 Probability of Simultaneous Excess of a_0 against COV of Strength of Structures

Fig.13では、施設強度の変動係数を横軸にとって、超過確率の増大割合をプロットした。ここで、設計強度が大きい場合ほど、変動係数による差が大きいことに注目すべきであろう。

4. おとがき 本研究の前半で取り扱った総コストによる公共施設の最適耐震設計法では、間接被害の推定法に検討すべき問題点が数多く残されているものの、現行耐震設計法における重要度係数のより厳密な議論のための基礎資料を提供するものと期待される。また後半での防災システムの地震危険度の解析から、防災拠点としての公共施設の質や量あるいは空間的配置といった基礎的情報を得ることが可能であると考えられる。

参考文献 1)太田・鏡味;地震時避難場所の配置計画の検討(1)-内題の定式化の試み-,地震,第32巻,第号,pp.25-40,06.54. 2)R.V.Whitman and C.A.Cornell; Design, Seismic Risk and Engineering Decisions, Chapt.9, Elsevier, 1976, pp. 369-382. 3)C.A.Cornell and H.A. Muz; Seismic Risk Analysis of Boston, J. of the Structural Div. ASCE, 101(ST10), 1975, pp. 2297-2493. 4)L.Eskola et al, Spectra ..., Soc. Min. delug. Seismica 1968.