

京都大学 正員 家村浩和

京都大学 正員 山田善一

中部電力 正員 西野健三

1. よえがき

著者らは、すでに間接被害を考慮した単一建造物の最適耐震設計法を提案したが、本報告では、この手法をライフライン系の最適設計に応用する場合の問題点について検討した。具体例として、上水道ネットワークシステムを取り上げ、各リンクについて建設費用関数、損失費用関数を定め、その総和(総コスト)を最適設計の評価関数とした。つぎに、ネットワークシステムにおける供給-需要地間の疎通確率と各リンクの非破壊確率との関係を検討し、疎通確率を制約条件とした場合の、総費用の最少化を実施し、各リンクの最適設計震度を決定した。すなわち、水供給の重要度を疎通確率で規定し、この制約条件を満たしつつ総費用が最少となるネットワークシステムの耐震設計法を提案した。なお数値計算例では、Dracupらにより示されたロスアンジェルスの上水道システム²⁾を採り上げた。

2. 疎通確率を制約条件とした最適耐震設計

上水道システムをモデル化すれば、リンクとノードからなる要素が考えられる。耐用年数 T 年間に予期される最大震度 y_n により、このリンク部分の破壊確率は、設計レベルを y_n^0

(修正メルカリ震度)とすれば、次式で与えられる。

$$F(y) = \begin{cases} 0 & (y > y_n^0) \\ \left(\frac{y - y_n^0}{y_n^1 - y_n^0}\right)^n & (y_n^0 < y < y_n^1) \\ 1.0 & (y < y_n^0) \end{cases}$$

$$P_{F_n}(y_n^0) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \int_0^\infty F_{A_n}(y) \frac{dP_{F_{ij}}(y)}{dy} dy \quad (n=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

n : リンクの総数

ここに、

$$F_{A_n}(y) = \begin{cases} 0 & (y \leq y_n^0) \\ \left(\frac{y - y_n^0}{y_n^1 - y_n^0}\right)^{n_k} & (y_n^0 < y < y_n^1) \\ 1 & (y_n^1 \leq y) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $P_{F_{ij}}(y)$ は、 T 年における震度の最大値 y の確率分布である。

y_n は震源 f_{ij} に関するものであり、 f_{ij} は互いに独立であるとする。

た、 $F_{A_n}(y)$ はFig.1に示したように最大震度 y によりリンクが破壊する確率を与える。式(1)より、供給地 A_i と需要地 B_j の間のルートの信頼性は、 A_i-B_j 間のいずれかのルートが一度も不通過になることが生じない確率 R_{ij} として与えられる。

$$R_{ij} = R_{ij}(P_{F_1}, P_{F_2}, \dots, P_{F_n}) \quad (3)$$

この R_{ij} は A_i-B_j 間のネットワークの形状によって定まり、中でも各リンクが直列あるいは並列に連結されている場合には、比較的容易に求まる。ただし、 P_{F_n} は互いに独立であるとする。次に、このシステムの総費用を定める。まず、リンク n の建設費用関数 $C_n(y_n^0)$ は次式で与えられる。

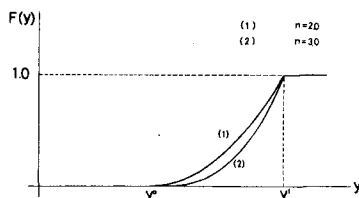
$$C_{Fn}(y_n^0) = L_n C_n H_n(g_n) G_n(y_n^0) \quad (4)$$

ここに

$$H_n(g_n) = \left(\frac{g_n}{L_n W}\right)^{d_n} \quad (0 < d_n < 1) \quad (5) \quad G_n(y_n^0) = \frac{G_{1n}}{G_{2n} - y_n^0} + G_{3n} \quad (6)$$

ただし、 L_n , C_n , g_n , W は、それぞれ、リンク長、単価、流量サイズ、単位流量サイズを示す。また、 G_{1n} , G_{2n} , G_{3n} は y_n^0 の変化による建設費用増減の倍率を表わす定数であり、それぞれ、18, 12.2, 0.607とした。次に被害が出た場合、その修復費用として、損失費用関数を次式で与えられるとする。

$$C_{Dn}(y_n^0, y) = \begin{cases} 0 & (y \leq y_n^0) \\ \phi_n(g_n) \{ \exp[d_n(y - y_n^0)] - 1 \} & (y_n^0 < y < 12) \\ \phi_n(g_n) \{ \exp[d_n(12 - y_n^0)] - 1 \} & (y \geq 12) \end{cases} \quad (7)$$

Fig.1 破壊確率 $F_{A_n}(y)$

$$\phi_k(g_k) = L_k C_k H_k(g_k) \quad (8)$$

ただし、 α_k はこれれやすさを示す定数である。これより損失費用の期待値は次式で与えられる。

$$E_k[C_k(y_k^*)] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \int_0^T \int_0^{\infty} C_{kij}(y_k^*, y) e^{-\alpha_k y} \frac{dP_{kij}(y)}{dy} dy dt \quad (9)$$

ここで、 $P_A(y) = P[Y < y]$ (10) なら、数値計算にあたっては、地震のマグニチュードの累積分布関数 $F_d(m)$ より $P_{kij}(y)$, $R_{kij}(y)$ を誘導した。また μ はシステム価値の1年あたりの低減率を表わす³⁾。式(4), (9)より総費用 C_T は次式となる。

$$C_T = \sum_{k=1}^K (C_{Tk} + E_k[C_{Dk}]) \quad (11)$$

結局、最適化としては、式(3)で与えられる y_j 間の信頼性 R_{ij} を、ある一定の値 R_{ij}^0 以上にする制約条件と式(11)より次のようになる。

$$C_T \rightarrow \text{minimum} \quad (12) \quad R_{ij} \geq R_{ij}^0 \quad (13)$$

3. 計算例およびその結果

Fig.2はLos Angeles 上水道システムのモデル図である。このモデルにおいて式(12), (13)を用い、最適設計レベル y_k^* の決定を試みた。まずTable1は制約条件(13)がない場合の結果である。

ここで、 y_k^* ($k=1, 2, 7, 8$) が多少大きい

のは、San Fernand Fault の影響と考えられる。また、 R_{11} の値には、二重ルートの信頼性の高さが表われている。次に、Table2は $R_{ij}^0 = 90\%$ なる制約条件を加えた場合であり、 R_{11} に関するリンクの y_k^* ($k=1, 2, 7, 8$) がTable1の値より大きくなっている。Fig.3は各制約条件の場合の y_k^* と P_{Fk} の値をまとめたものであり、Table3は制約条件別の総費用 C_T の比較である。ここに示したとおり、経済面だけを考慮した最適設計は、信頼性の欠如を生じさせることにもなる場合がある。また、ここで提案した手法は各ルートの信頼性、経済性両面からの評価に役立つと考えられる。

参考文献

1) 山田, 家村, 新家; 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, 第15回地震工学研究発表会講演概要, 1979.

2) John A. Dracup, C. Martin Duke, Stephen E. Jacobsen; Optimization of Water Resource Systems Incorporating Earthquake Risk, 1976

3) C. Lomnitz, E. Rosenblueth; Seismic Risk and Engineering Decisions, Elsevier, 1976

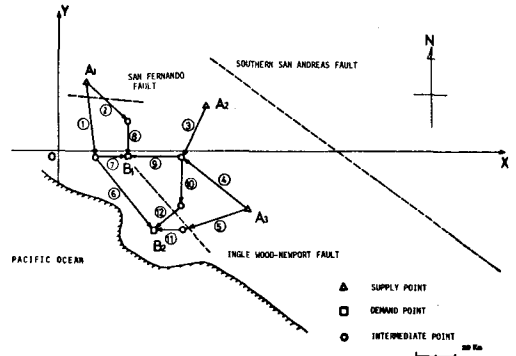


Fig.2 Los Angeles Water Supply System Model

Table 1 Optimal Solution y_k^* and Optimal Cost C_T

Link No.	y_k^*	$P_{Fk}(\%)$	$Q_k (m^3/day)$
1	7.1	21.77	8.0×10^4
2	7.3	23.44	8.0×10^4
3	6.3	11.92	16.0×10^4
4	6.1	10.11	6.0×10^4
5	6.3	11.63	6.0×10^4
6	6.2	11.85	4.0×10^4
7	6.7	16.36	4.0×10^4
8	7.1	21.92	8.0×10^4
9	6.7	15.63	12.0×10^4
10	6.4	13.32	10.0×10^4
11	6.4	12.29	6.0×10^4
12	6.5	12.67	10.0×10^4

Fig.3 制約条件別 y_k^* , P_{Fk} の比較

制約条件	y_k^*	$P_{Fk}(\%)$
$R_{11}^0 = 90\%$		
$R_{32}^0 = 90\%$		
$R_{11}^0 = R_{21}^0 = R_{31}^0 = R_{12}^0 = R_{22}^0 = R_{32}^0 = 90\%$		

Table 2 Optimal Solution y_k^* and Optimal Cost C_T ($R_{ij} \geq R_{ij}^0$)

Link No.	y_k^*	$P_{Fk}(\%)$	A-B _i	R _{ij} (%)
1	7.4	18.15	1-1	90.00
2	7.5	20.70	2-1	74.28
7	7.2	11.77	3-1	75.80
8	7.3	19.20	1-2	72.15
			2-2	66.68
			3-2	77.51

$$C_T = 1.948 \times 10^{11} \text{ [¥]}$$

A-B _i	R _{ij} (%)
1-1	86.09
2-1	74.28
3-1	75.80
1-2	68.95
2-2	66.68
3-2	77.51

$$C_T = 1.942 \times 10^{11} \text{ [¥]}$$

Table 3 制約条件別 C_T の比較

C_T [¥]
R_{11}^0 を 90% とした場合 : 1.948×10^{11}
R_{21}^0 を 90% とした場合 : 2.023×10^{11}
R_{31}^0 を 90% とした場合 : 1.990×10^{11}
R_{12}^0 を 90% とした場合 : 2.023×10^{11}
R_{22}^0 を 90% とした場合 : 2.099×10^{11}
R_{32}^0 を 90% とした場合 : 1.967×10^{11}
制約なしの場合 : $C_T = 1.942 \times 10^{11}$ [¥]