

地震災害時におけるライフライン系の 供給機能と最適設計に関する研究

京都大学 正員 山田善一

京都大学 正員 家村若和

中部電力 正員 西野健三

1. まえがき ライフライン系は都市における日常、経済、社会活動を支える極めて公共性の高い都市供給施設である。ことに、都市の耐災性が重要視されている今日において、地震災害時におけるその安全性の検討は、早急に対処すべき問題である。

本研究では、このライフライン系に着目し、地震災害時における施設群の物的被害のみならず、その社会、経済的被害の原因となる供給機能の低下をも考慮した最適耐震設計を試みた。なお、ライフライン系の一例として、上水道システムを取り上げた。

2. 供給機能を考慮した最適耐震設計 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 により、このリンク部分の水の通過が不可能になる確率は、設計レベル y_R (修正メルカリ震度)とすれば、次式で与えられる。

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

$$P_{FR}(y_R) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \int_0^{y_R} F_{ik}(y) \frac{dR_{ik}(y)}{dy} dy \quad \begin{matrix} (k=1, 2, \dots, n) \\ R_k: \text{リンクの総数} \end{matrix} \quad (1)$$

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

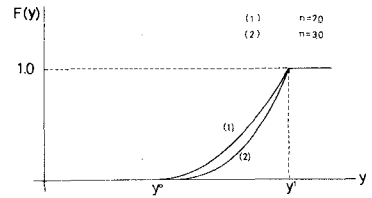


Fig. 1 破壊確率 $F_{ik}(y)$

ただし、 $P_{FR}(y)$ は、 T 年間に於ける震度の最大値 y の確率分布である。これは震源 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。また、 $F_{ik}(y)$ 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にならない確率 R_{ij} として与えられる。

$$R_{ij} = R_{ij}(R_1, R_2, \dots, R_k) \quad (3)$$

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、 R_{ik} 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 k の建設費用関数 $C_k(y_R)$ は次式で与えられる。

$$C_k(y_R) = L_k C_k H_k(g_k) G_k(y_R) \quad (4)$$

$$\text{ここに} \quad H_k(g_k) = \left(\frac{g_k}{L_k W}\right)^{d_k} \quad (0 < d_k < 1) \quad (5) \quad G_k(y_R) = \frac{G_{1k}}{G_{2k} - y_R} + G_{3k} \quad (6)$$

ただし、 L_k 、 C_k 、 g_k 、 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_{1k} 、 G_{2k} 、 G_{3k} は y_R 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。

$$C_{Dk}(y_k^*, y) = \begin{cases} 0 & (y \leq y_k^*) \\ \Phi_k(y_k^*) \{ \exp[d_k(y - y_k^*)] - 1 \} & (y_k^* \leq y \leq 12) \\ \Phi_k(y_k^*) \{ \exp[d_k(12 - y_k^*)] - 1 \} & (y \geq 12) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $\Phi_k(y_k^*) = L_k C_k H_k(y_k^*)$ (8)、ただし、 Φ_k はこわ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。

$$E_k[C_{Dk}(y_k^*)] = \sum_{i=1}^{n_{M_i}} \int_0^{\infty} C_{Dk}(y_k^*, y) E \left[\frac{d\mu(y)}{dy} \right] dy \quad (9)$$

ここで、 $P_k(y) = P[Y < y]$ (10)、なお、数値計算にあたり、これは、地震のマグニチュードの累積分布関数 $F_m(y)$ より $P_k(y)$ 、 $d\mu(y)$ を誘導した。また、 μ は信頼性値の1年あたりの低減率を表わす。式(4)、(9)より総費用 C_T は次式となる。

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

結局、最適化としては、式(3)で与えられる R_{ij} 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Table 1は制約条件(13)がない場合の結果である。ここで、 y_k^* ($k=1, 2, 7, 8$)が少々大きいのは、San Fernando Faultの影響と考えられる。また、 R_k 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、Table 2は、 $R_{ij}^0 = 90\%$ なる制約条件を加えた場合であり、 R_{ij} に關するリンクの y_k^* ($k=1, 2, 7, 8$)がTable 1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_k の値をまとめたものであり、Table 3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) C. Lomnitz, E. Rosenblueth: Seismic Risk and Engineering Decisions, Elsevier, 1976, 2) John A. Hucup, C. Martin Duke, Stephen E. Jacobson: Optimization of Water Resource Systems Incorporating Earthquake Risk, 1976.

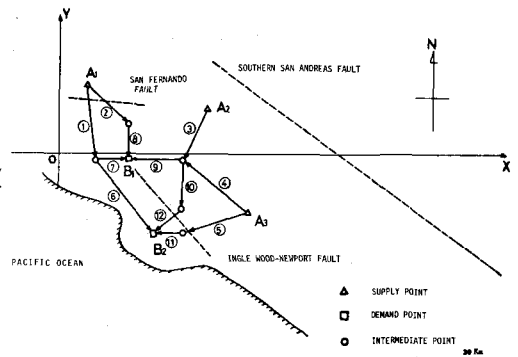


Fig.2 Los Angeles Water Supply System Model

Table 1 Optimal Solution y_k^* and Optimal Cost C_T

Link No.	y_k^*	$P_k(\%)$	$Q_k (m^3/sec)$
1	7.1	23.77	9.0×10^6
2	7.3	23.34	9.0×10^6
3	6.3	11.97	16.0×10^6
4	6.1	16.11	6.0×10^6
5	6.3	11.63	9.0×10^6
6	6.7	11.11	4.0×10^6
7	6.7	16.36	4.0×10^6
8	7.1	21.92	8.0×10^6
9	6.7	15.63	12.0×10^6
10	6.4	13.36	10.0×10^6
11	6.4	12.24	6.0×10^6
12	6.5	17.67	10.0×10^6

A-B _j	$R_{ij}(\%)$
1-1	36.09
2-1	74.20
3-1	75.80
1-2	87.95
2-2	86.88
3-2	77.51

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

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

Link No.	y_k^*	$P_k(\%)$	A-B _j	$R_{ij}(\%)$
1	7.4	18.15	1-1	90.00
2	7.5	20.09	2-1	74.20
3	7.2	11.77	3-1	75.80
4	7.3	19.70	1-2	72.15
			2-2	86.88
			3-2	77.51

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

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 : $C_T = 1.942 \times 10^{11}$ [¥]

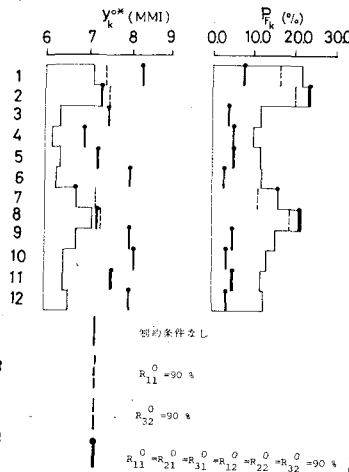


Fig.3 制約条件別 y_k^* , P_k の比較