

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。

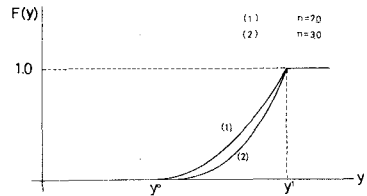
2. 供給機能を考慮した最適耐震設計 上水道システムをモデル化すれば、リンクとノードからなる要素が考えられる。耐用年数T年間に予期される最大震度 y により、このリンク部分の水の通過が不可能になる確率は、設計レベル y_R (修正メルカリ震度)とすれば、次式で与えられる。

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

$$P_{FR}(y_R^0) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \int_0^{y_R^0} F_{iR}(y) \frac{dR_{ij}(y)}{dy} dy \quad (R=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

R : リンクの総数

$$F_{iR}(y) = \begin{cases} 0 & (y < y_{Ri}^0) \\ \left(\frac{y - y_{Ri}^0}{y_{Ri}^0 - y_{Ri}^0}\right)^{n_{Ri}} & (y_{Ri}^0 \leq y < y_{Ri}^0) \\ 1 & (y \geq y_{Ri}^0) \end{cases} \quad (2)$$



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、 $F_{iR}(y)$ 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。

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

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、 R_{FR} 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、リンク長 d_R の建設費用関数 $C_R(y_R^0)$ は次式で与えられる。

$$C_{FR}(y_R^0) = L_R C_R H_R(z_R) G_R(y_R^0) \quad (4)$$

$$H_R(z_R) = \left(\frac{z_R}{L_R W}\right)^{d_R} \quad (0 < d_R < 1) \quad (5) \quad G_R(y_R^0) = \frac{G_{1R}}{G_{2R} - y_R^0} + G_{3R} \quad (6)$$

ただし、 L_R 、 C_R 、 z_R 、 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_{1R} 、 G_{2R} 、 G_{3R} は y_R^0 の変化による建設費用増減の倍率を表す定数であり、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。

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

ここに、 $\Phi_k(y_k^*) = L_k C_k H_k(y_k^*)$ (8)、 λ_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。

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

ここで、 $P_k(y) = P\{Y < y\}$ (10)、 μ は、数値計算にあ
る、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 $P_k(y)$, $dP_k(y)$ を誘導した。また、 μ は信頼価値の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上水道システムのも
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)がなりの場合の結果
である。ここで、 y_k^* ($k=1, 2, 7, 8$)が多少大きいのは、San Fernando Fault
の影響と考えられる。また、 R_{ij} 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} に関するリンクの 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. Dracup,
C. Martin Duke, Stephen E. Jacobsen: Optimization
of Water Resource Systems Incorporating
Earthquake Risk, 1976.

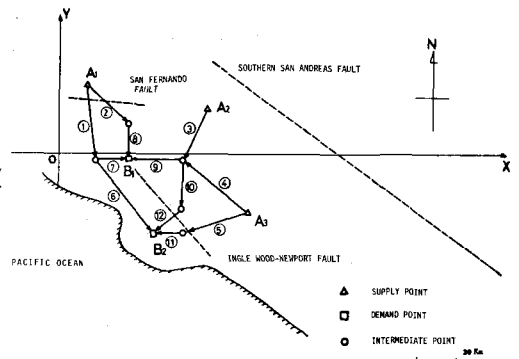


Fig.2 Los Angeles Water Supply System Model

Table 1 Optimal Solution y_k^* and Optimal Cost C_T

| Link No. | y_k^* | P_k (%) | Q_k (million) |
|----------|---------|-----------|--------------------|
| 1 | 7.1 | 27.77 | 9.0×10^6 |
| 2 | 7.3 | 23.34 | 8.0×10^6 |
| 3 | 6.3 | 11.97 | 66.0×10^6 |
| 4 | 6.1 | 16.41 | 6.0×10^6 |
| 5 | 6.3 | 11.63 | 6.0×10^6 |
| 6 | 6.2 | 11.11 | 4.0×10^6 |
| 7 | 6.2 | 16.36 | 4.0×10^6 |
| 8 | 7.1 | 24.92 | 8.0×10^6 |
| 9 | 6.7 | 15.63 | 12.0×10^6 |
| 10 | 6.4 | 13.37 | 10.0×10^6 |
| 11 | 6.4 | 12.29 | 6.0×10^6 |
| 12 | 6.5 | 17.67 | 10.0×10^6 |

| A-B _i | R_{ij} (%) |
|------------------|--------------|
| 1-1 | 36.09 |
| 2-1 | 74.20 |
| 3-1 | 75.80 |
| 1-2 | 27.95 |
| 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 _i | 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 | 19.20 | 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

| R_{ij}^0 | 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 | $C_T = 1.942 \times 10^{11}$ [¥] |

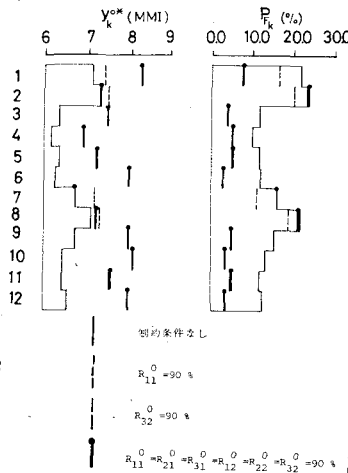


Fig.3 制約条件別 y_k^* , P_k の比較