ライフラインの耐震性に影響する因子

東京大学地震研究所　伯野元彦
間組　斉藤嘉則

1 はじめに

大地震が発生すると，土木構造物は被害を受け，電気，水道，電話，ガスなどのライフライン施設は，その機能を停止する。現在のように人口が集中し，空間的にも過密状態にある大都市に於いて，ライフライン施設の機能が停止すると，市民生活は麻痺状態に陥り，停電，断水，通信不能などによる社会的影響には非常に重大且つ深刻なものがある。

ところが，都市機能の中枢となるライフライン施設の重要性が認識されながらも，ダム，橋梁などの大規模構造物に比べ，ライフラインの施設の耐震性に関する研究は，大幅に遅れをとっているのが現状である。

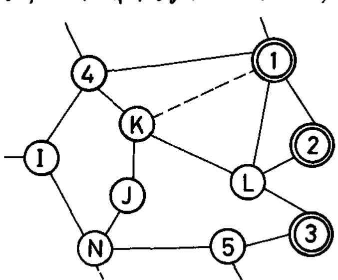
ライフラインは，各要素が連結したシステムとして機能するため，全体の耐震性を向上させるためには，各要素の耐震性を増強するだけでは無駄も多く不充分である。実際，システムとして機能するため，地震時には，個々の構造の被害は軽度であっても，機能的には，停止等の大被害となる場合が多い。

従ってライフラインの機能の耐震性を向上させるには，全体をシステムとして捉え，最適且つ，合理的形態になるよう工夫し，その上で各要素の耐震性を考慮することが重要である。そのため，本研究では，ライフラインを電力，鉄道，電話等の施設ごとにモデル化し，そのモデルの各要素の地震時破壊確率を色々に変えては，システムの機能停止の確率を求め，その結果を重回帰分析して，機能停止には，どのような因子が効くのかを調べた。

2. 機能停止確率の計算

実際のライフライン・システムは，直列・並列の複合から格子状など複雑に入り組んでおり，解析的に求めるのはなかなか困難である。そこで解析手法として，結合マトリックスを用いる手法を展開する。結合マトリックスによる信頼性解析は，川上・田村（参考「地中埋設管システムの地震時の機能の安全性の評価方法に関する研究」）も開発しており，以下の解析手順の①～③までの考え方は同じである。

しかし，実際のガス・水道といったライフライン・システムは，殆どが多入力→多出力である。ここでは，多入力の場合も適用できるよう独自に開発したモンテカルロ法による信頼性解析手法を示す。



図−1　多入力のネットワークシステム

図−1のように，1・2・3と入力地点が多数ある場合の節点 I の信頼性を求める解析手法は以下のようになる。

①節点K・L間の破壊確率を $P_{k\cdot l}$ で与える。

②乱数 $Rx_{k\cdot l}$ を発生させ

$$g_{k\cdot l} = \begin{cases} 0 & \text{破壊} \quad (Rx_{k\cdot l} \leqq P_{k\cdot l} \text{ のとき}) \\ 1 & \text{安全} \quad (Rx_{k\cdot l} > P_{k\cdot l} \text{ のとき}) \end{cases}$$

を求め，K・L間の結合マトリックス $Q = [g_{k\cdot l}]$ を求める。ただし，K・L間が直接連結していない場合，

$P_{k\cdot l} = 1.0$ とする。　ただし，$g_{k,k} = 1.0$ （$k = 1, \cdots, N$）　とする。

③入力節点では，$a1_i = 1$ とし，他は0とおいた入力マトリックス $A1^{(1)} = [a1_i]$（1行N列）を考える。

④ $A2^{(1)} = [a2_i^{(1)}] = Q \cdot A1^{(1)}$

の計算により

$$a2_i^{(1)} = \sum_{j=1}^{n} g_{i,j} \cdot a1_j$$

を求める。 $a2_i^{(1)}$ は，節点Iと入力節点との1節点を通過しての連絡性を示し，

$$a2_i^{(1)} = \begin{cases} \geq 1 & (\text{入力節点と連絡}) \\ 0 & (\text{入力節点とは不連絡}) \end{cases}$$

となる。

⑤ $A2^{(1)}$ を $A1^{(2)}$ におきかえて，(1−12)の計算を同様にして，$N-1$ 回繰り返し，$A2^{(N-1)}$ を求める。これにより，節点Iと，入力節点との連絡性が求められる。

$$a2_i^{(N-1)} = \begin{cases} \geq 1 & (\text{入力節点と連絡}) \\ 0 & (\text{入力節点とは不連絡}) \end{cases}$$

これは，連絡経路の長短にかかわらず，節点Iと入力節点のどれかとの連絡性を示している。

⑥①〜⑤をM回繰り返し・カウント用マトリックス $T=[t_i]$ を考え，1回ごとに $a2^{(N-1)} \geq 1$ のとき，t_i に1回カウントさせる。

⑦最終カウント数 t_i がM回の繰り返しの中で，節点Iが，入力節点と連絡した回数を示し，

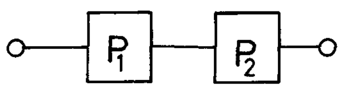
$$R_i = t_i / M$$

により，節点Iの信頼性が求められる。

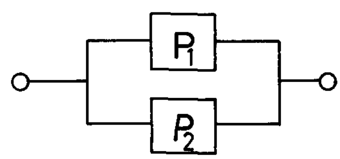
3. 各種ライフラインモデルのトポロジカルな特徴と信頼性解析

一概にライフラインと言っても，水道・電力・電話・道路など，それぞれがトポロジカルに異ったシステムとしての特徴を持っている。

ここでは過去の震災例を参考にして，破壊の生じやすい部分で破壊要因としてピックアップし，各ライフライン施設をトポロジカルに同質な単純モデル変換して，その特徴を捉えてみることにした。



図−2　2要素直列

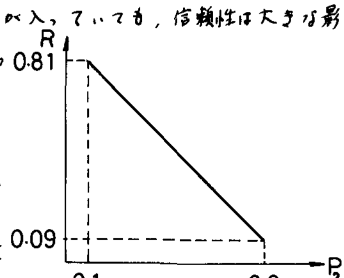


図−3　2要素並列

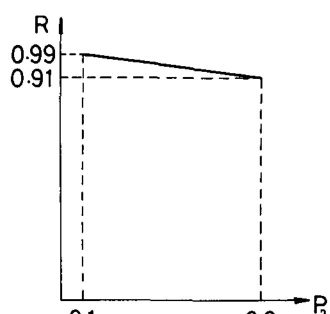
例えば，最も単純なモデルとして，2要素直列（図−2）と2要素並列（図−3）を比べてみよう。$P_1 = 0.1$，$P_2 = 0.9$ として，P_2 を0.1から0.9まで変化させてみる。

そうすると図−4，図−5のようになり，これは直列と並列システムの特徴をよく表わしている。すなわち，並列システムは，一方の破壊確率Pが小さければ，他方に破壊確率の大きなものが入っていても，信頼性は大きな影響は受けない。しかし直列システムの場合，破壊確率の大きなものが入ると，全体の信頼性は著しく低下する。

したがって直列システムの場合，信頼性を向上させるには，破壊確率の最大のものをより小さくすれば，全体の信頼性は向上する。実際A：P_1 を0.05小さくする場合と，B：P_2 を0.05小さくする場合を比べると，



図−4　2要素直列



図−5　2要素並列

A:　$R = (1-(0.1-0.05)) \cdot (1-0.90) = 0.095$

B:　$R = (1-0.1) \cdot (1-(0.90-0.05)) = 0.135$

のように，最大のものを小さくしたほうが信頼性はより向上する。

同様に並列システムの場合，A：P_1 を0.05小さくする場合と，B：P_2 を0.05小さくする場合を比べてみると

$$A:\quad R = 1 - (0.1 - 0.05)\cdot 0.90 = 0.955$$

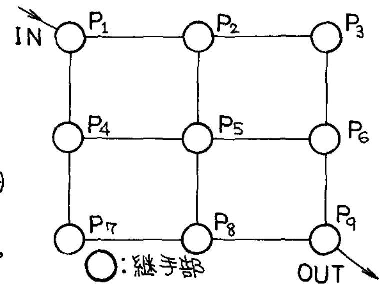
$$B:\quad R = 1 - 0.1\cdot(0.90 - 0.05) = 0.915$$

であるから，直列システムとは逆により安全なものを強化した方が良いことになる。

これを土木構造物のシステムにあてはめてみると，直列システムで，危険な盛土と非常に安全なトンネルがあって，どちらかを強化しようという場合，盛土を強化した方が全体の信頼性が向上するし，並列システムならトンネルを更に強化した方が良いことになる。

しかし実際は，各構造物によって，信頼性向上とそのための強化費用の関係は異なるため，このようには簡単ではない。

以上は極端な例ではあるが，直列システムと並列システムというトポロジカルな違いによるシステムの信頼性の相違を示した。



図−6 水道・ガスモデル

3−1 分析方法について

分析は，水道や鉄道など各モデルに関し，1組ごとに破壊確率を変えた100個のケースについて，それぞれの組の破壊確率の平均値や最大値などと信頼性との相関関係や，重回帰分析による重相関関係を求めて比較してみる。信頼性は，既に述べた結合マトリックス法により求める。

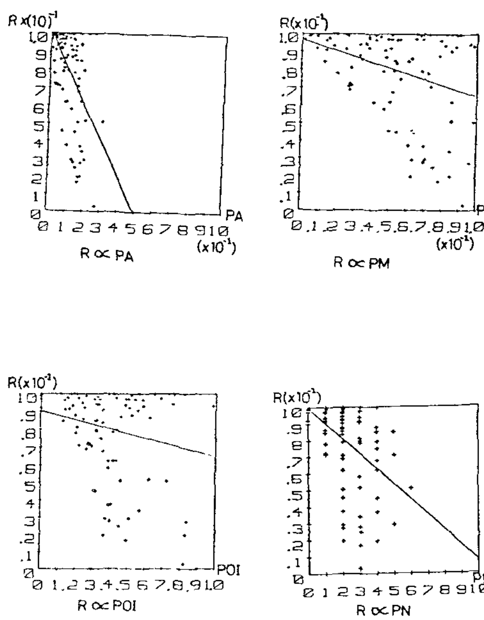
破壊確率は，過去の震災例や構造物の破壊程度等から適当に定め，乱数を用いてその破壊確率を平均値にもつようにばらつかせた。したがって各組の破壊確率の平均値は，以下の図を見れば明らかなように，ばらつきが少ないのが特徴となる。

以下各モデルごとに，100組の信頼性を求め，それぞれの組のPA，PM，P01，PNとの相関係数や，重相関係数を求めて分析する。以下で用いる記号は

P_i ：各要素の破壊確率
R ：入出力節点間の信頼性
PA ：各組ごとの破壊確率の平均値
PM ：　〃　の最大値
P01 ：　〃　の0.1以上の平均値
PN ：　〃　の0.1以上の個数
ZA ：RとPAの相関係数
ZM ：RとPM　〃
Z01 ：RとP01　〃
ZN ：RとPN　〃

表−1 要素破壊確率と系のそれとの相関

	$\bar{R}$	MCC	ZA	ZM	Z01	ZN
ガス・水道	0.80	0.57	−0.54	−0.36	−0.24	−0.46
電力	0.69	0.87	−0.87	−0.65	−0.48	−0.74
電力(十並列)	0.79	0.75	−0.73	−0.63	−0.43	−0.62
電話	0.48	0.95	−0.89	−0.93	−0.86	−0.71
鉄道	0.73	0.81	−0.81	−0.74	−0.67	−0.71



図−7 ガス・水道モデルの相関図

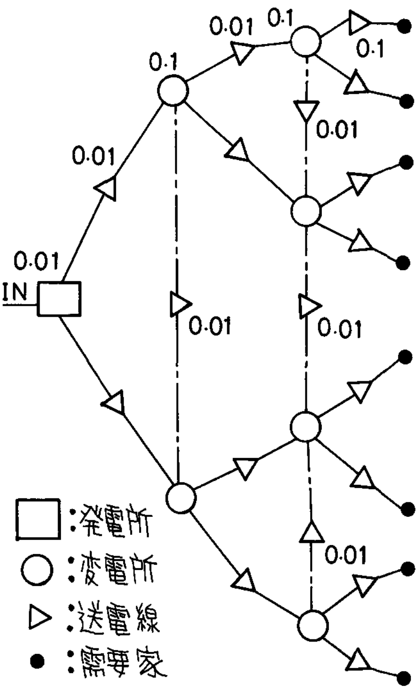
MCC：RとPA，PM，P01，PN との重相関係数
＊　：信頼性Rの観測値
＋　：重回帰分析による推測値
｜　：観測値と推測値の差
を示す。

3-2　水道・ガスモデル

過去の被害例を見ると，ガス・水道の被害の大部分が，管径の小さい供給管の継ぎ手部分に集中している。そこで，供給管ネットワークを図−6のような分岐点に破壊要素を与えたモデルに変換する。

破壊確率の平均値λを0.1として破壊確率をばらつかせて与え，ZA，ZM，Z01，ZN，MCC を求めてみると表-1のようになる。相関図は図−7に示す。

図−7をみると，相関や重相関が低く，平均値との相関係数ZAも−0.538と小さい。このように，各要因との相関が低いというのはシステムの信頼性が，特に破壊されやすい要素などの影響を受けにくいことを示し，信頼性の高さをあらわすものではないだろうか。



図−8　電力モデル

3-3　電力モデル

電力ネットワークは，モデル化すると図−8に示すように直列システムが基本となっている。破壊確率の平均値λは，発電所では0.01と低く，変電所では0.1と図−8のように重みを変化させる。

PA，PM，P01，PN とRとの相関を見ると，表−1のようにZAが−0.87，MCCが0.87と強い相関が出ている。またZMも−0.65と相関が出ている。従って直列システムが基本となる場合，全体の信頼性は，PAやPMに左右されやすく不安定なため，破壊されやすい要因を増強することが重要となる。

図−8の各変電所間をライン接続して，並列的要素を加えると，表−1のように信頼性の平均値は0.1上がる。また各相関を調べると，やや弱くなる。つまりより並列的にすると，PAやPMの影響が小さくなるため，どこかにP_iの大きいものがあっても各需要家の信頼性が安定してくることを示している。

4. 考察

以上より各モデルが直列的になる程，各要因との相関が強くなり，並列的になる程相関が弱くなる。そこで，システムのトポロジカルな特徴を捉える指標として，各相関係数を考えることができる。

すなわち，具体的に言えば，重相関係数が小さくなる程，トポロジカルに並列的で信頼性も安定する。また重相関係数が大きくなる程，トポロジカルに直列的になり信頼性が不安定になる。

従って実際のライフラインシステムの信頼性を向上させたい時は，トポロジカルに同質なモデルに変換して，この手法によりそのシステムの特徴を捉えて，もし直列的なら信頼性が不安定であるから，危険要素を増強するか，並列的要素を加えることが可能かを検討すればよい。

こうしてライフラインシステムの信頼性を高める場合，どこを強化すればより有効かがわかれば，最適設計への一つの手がかりとなるのではなかろうか。