

(47) 障害波及考慮したライフライン設計への考察

東京大学 工学部 (学) 佐藤尚次
東京大学 地震研究所 (正) 佐野元彦

I. はじめに

従来のライフライン地震工学は、1978年宮城県沖地震のような震度Ⅶ程度の比較的軽微な地震が、東京・大阪等の既成の大都市——即ち、解析の対象となるインフラストラクチャーがほぼ整備されているような都市に生起することを想定し、その場合の地震危険度の推定・被害予測・復旧過程対策・等を考えることが中心となる課題であった。このことは、「大地震時には人命の保護が第一で、都市生活機能は副次的な問題であること」、「都市の規模が大いほど、そうした生活施設への依存度合いが高いこと」等の理由から自然の成り行きであった。しかしながら、視点を改めて「震度Ⅶ以上の大地震に伴う被害・災害に対してライフラインの機能障害がどのように影響するか」や、「将来、都市の開発・再開に際して基幹施設を計画・設計すると主として、耐震上留意すべきこと」を考えていくことは、現実に地震への対応策を策定していく上で求むべき無駄なことではなく、寧ろ有意義であると思われる。本論はこのような視点から行なった二、三の考察を報告するものである。

II. 末端の需要者への影響

この節から順次、ライフラインの機能障害の及ぼす波及効果の種々相について考察する。はじめに、末端の需要者に対して、主として生活機能上の障害として現われる影響を表1に示す。これはライフライン地震工学で考えている最も基本的な影響表であるが、ただ地震の被害規模が大い場合は、各種のシステムの機能の障害状態が長時間に渡って併存する可能性がある。そのとき、例えば冷温水の不足によって予備電源が使えなくなる等の二次的な障害が派生してくることが考えられる。こうした障害には種々の派生要因・派生過程が考えられるが、ここでは特に、「代替システムへのバックアップの欠如」という理由づけをして、起り得る障害とその観点から考察した。それが表2である。地震以外の原因によって、都市に大規模な停電（ニューヨーク中など）、断水（福岡市など）、電話の不通（神戸市など）等が起った事例は間々あるが、地震時の被害の特質はこれらのことが同時に発生することであり、表2は個々の機能障害の影響の重なり合わせで表現しきれない面を示した、いわば非線形現象であるといえる。

III. 各種ライフラインシステム相互の影響関係

表1に各システムの機能障害が、他のシステムに及ぼすと考えられる影響を示した。表を見ると、電気の、他システムへの影響が大いのがわかる。また、操業の可否に対する十分な情報がないと、電力にせよ水にせよ操業がままないのであるから、電話をはじめとする情報伝達媒体も重要であると

↓	電力	水道	ガス	電話	放送	道路交通
一般家庭	光源不足	飲料水不足 風呂・水洗便所 使用不能 ↓ 不衛生 (二次的)	熱源不足	家族知人の 安否不明 ↓ 不安	情報不足 ↓ 不安	避難困難 怪火・火災 困難 新聞不來
銀行等 金融業	計算機 のライン システム 使用困難	業務条件 悪化	熱源不足 (業務条件 悪化)	オンライン システム停止 取引困難	情報不足 ↓ 取引の判断 困難	(業務条件 悪化)
工場	操業 のための 困難	操業 のための 困難	熱源不安 ・ 操業困難	操業の 可否不明	操業の 可否不明	材料・製品の 搬入・搬出 困難 労働力不足
病院	治療・ 手術の 困難	治療・ 手術の 困難	消毒等 困難	内臓の 救急活動 困難	内臓の 救急活動 困難	怪火人の 搬送 困難
飲食店等	光源不足 ↓ 夜間営業 困難	営業不能	営業不能	仕入品の 運送 困難	市場の 情報不足	材料搬入 困難
商店	光源不足	飲料水 不足	熱源不足	取引困難	市場の 情報不足	商品搬入 困難
学校	光源不足 一部動力 の不足も	研究活動 や経済 困難	熱源不足	通電等に 関する 情報不足	通電等に 関する 情報不足	登下校 (通勤) 困難

表1 末端需要者への影響

考えられる。この意味で、宮城県沖地震の際の電力システムの早期復旧は、好ましい事態であつたと云える。並に、他システムの機能障害のありを最も多く受けるのは道路交通である。(道路交通を"ライフライン"の代表としてよいからかは疑問もあるが、次第では重要な意味をもつ)

一般に、各種のライフラインシステムは相互に機能上の連関をもちながら稼動しており、地震時の機能障害は伝播すると考えられる。しかも、この障害はネットワークの中の節点施設に現れ、エシたる構造上の破壊がなくとも所要の機能を果たさなくなる恐れがある。例えば、停電時には水道システムにおける節点施設である浄水場や給水場は機能しなくなる。(そのため都内の殆どが停電、配水場は二回線受電を行なっている。)この問題に対し、図1のモデルを考え、考察を始めることにした。

節点位置も共有する二つのシステムA, Bがあり、各々のシステムが果たす機能は、互いに次のレベルで関連しうるものとする。

- ① 兼立 例えば、ある節点Bが供給されない(その入力節点とつながっていない)と主でもその節点はAの節点として働く。並に同様。
- ② AがBに 上述べた水と電力の関係のように、ある節点B(電力)が供給されないとそれはA(水)の節点としての機能を果たさなくなる。即ちAを受け、ても、それは他の節点に向けて出す(供給する)ことができない。しかし並は成り立たず、Bの節点としての機能はAの有無とは無関係。

- ③ 相互依存 ②で述べた依存関係が、今度はA, B相互の間で成り立つものとする。

この各々のレベルに対して信頼性解析を試みる。

①の独立の場合に對しては、S-P法等の様に確立されている手法を用いて計算ができる。両システム

α, βの信頼性を一律に0.9として試算した結果を表4の(1)に示す。表中 R_{ij} $i=A, B$, $1 \leq j \leq 6$ は、iシステムにおいてj番目の節点が入力節点とつながっている確率を表す。②の一方的な依存関係の場合については、先づBシステムについて①と同様の解析をし、その結果をAシステムの解析の中に節点の信頼性としてとり入れてやれば、後は同様に議論ができる。これが表4の(2)になる。とこで、③の場合には少々事情が異なる

↓	電力↓	水道↓	ガス↓	電話↓	放送↓	道路交通↓
(電力代替) 自家発電←		冷却水不足	特になし	修理 依頼不可	特になし	特になし
(水道代替) タンク車での 給水←	特になし		特になし	供給源の 伝達困難	供給源の 伝達困難	供給困難
(ガス代替) 国形燃焼 ポンプ等←	燃焼不足 の復合を 増す	特になし		特になし	特になし	物質流通 困難
(電話代替) 無線など←	電源不足	特になし	特になし		通話の 復合を増す	
(放送代替) ロコ 回電版 広報等←	活動 時間制限	需量増大	特になし	情報 伝達度の 拡大		伝報 活動不能
(道路交通代替) ←	パーセントリッパが困難になるので小地区毎に地震後の生活を営まねばならない各システム間の機能障害は物資・情報の需を大きくし、需荷を増大する。					

表2 システム代替物の影響

影響 振動等	電力↓	水道↓	ガス↓	電話↓	放送↓	道路交通↓
電力←		工業用水の不足による火力発電所の稼働停止(二次的)	特になし	情報の伝達・収集の困難 ↓ 検査の可否不明	情報不足 ↓ 検査の可否不明	(復旧の遅れ)
水道←	取水・浄水ポンプ・配水各施設の稼働停止		特になし	情報不足(復旧の遅れ)	情報不足(復旧の遅れ)	(復旧の遅れ)
ガス←	ガス化プラント前中圧配管各施設の稼働停止	原料の不足によるガス化プラント稼働の停止		情報の伝達・収集の困難 ↓ 検査の可否不明	情報不足 ↓ 検査の可否不明	(復旧の遅れ)
電話←	予備電源 使用一層増小	特になし	特になし		通話経路の拡大	(復旧の遅れ)
放送←	back up困難	映像不能(困難)	映像不能(困難)	取材の困難 (情報不足)		取材の困難 (情報不足)
道路交通←	信号停止 ↓ コントロール不能	復旧工事に伴う交通量規制(二次的)	復旧工事に伴う交通量規制(二次的)	コントロール側の困難	情報不足 ↓ 困り発生	

表3 各種ライフラインシステム間の相互連関

てくる。もしP法を用いた場合で考えると、Aシステムで例えは
 節点bの信頼性を考えるなら、節点1とbの間の経路のルートはいく
 つかの直列要素に分解して、その各々のルートとしての信頼性を考え
 ることが基本になってくるが、ここで1→2→3→bというルートと
 して考えてみると、Aの2と3の節点を結びリンクが壊れていない
 (つながっている)という事実と、節点2がAの節点として機能する
 という事実とは独立ではないから、ルートAの信頼性の表現は非常に複
 雑になってしまい、この方法での解析は事実上不可能である。そこで、
 ここで仮定を生産してリンクの破壊を数値的にシミュレーションす

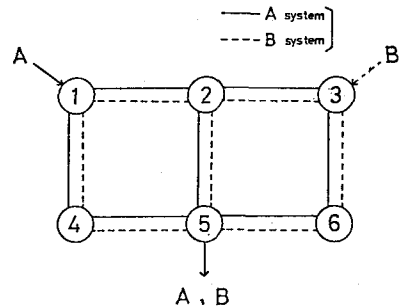


図1 節点を共有する二つのシステム

る方法をとることにした。シミュレートされたリンク
 の状態をもとにA, B両方の節点連結マトリクスを作り
 り、節点機能を評価する。その結果をフィードバック
 してマトリクスを作り直し、再び節点機能を評価する。
 この過程を繰返すことにより、機能評価を収束させた。

	R _{A2}	R _{A3}	R _{A4}	R _{A5}	R _{A6}	R _{B1}	R _{B2}	R _{B5}	R _{B6}
(1)	.979	.960	.979	.976	.956	.960	.979	.959	.976
(2)	.935	.905	.947	.929	.906	.960	.979	.959	.976
(3)	.923	.910	.911	.924	.875	.910	.923	.895	.924

表4 節点機能の障害度別の信頼性解析結果

その解析結果を表4の(3)に示す。また節点機能信頼度の評価の有無が
 結果にどのような影響を及ぼすかを見るため、図2にリンクの信頼性
 (一律)を横軸にとり、Aシステムで節点5がλが節点とつながる確
 率を示した。この結果は、解析値と3で余り差が大きい。この事
 情は明らかではないが、λが節点が一つしかなく、その機能信頼度の影
 響が結果に強く関係してくることに注意が必要と思われる。

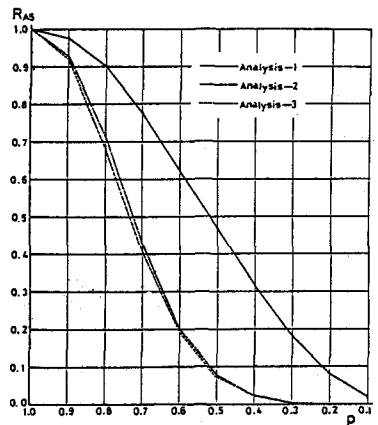


図2 リンクの信頼性と節点の信頼性

IV. 二次災害への影響波及と二次災害緩和システムについて

大地震時に最も大きな被害をもたらすのは、火災・水害・パニックと
 いった二次災害である。徐々に都市の不燃化が進められてはいるものの、
 やはり地震火災はとりわけ恐ろしい脅威である。そこでライフラインの
 機能障害がこれら二次災害の発生・拡大に及ぼす影響を表5に示した。

都の防災会議をはじめとし
 て地震火災のシミュレーシ
 ョンは至るところで行われ
 ているが、その結果に重
 要な影響を及ぼすものと
 し、風向・風速等の自然条
 件や建ぺい率・耐火建築率
 等の延焼要因と並んで消火
 力運用条件があり、表から
 明らかなようにライフライ
 ンの機能障害は直接間接に
 消火活動のマイナス要因を
 形作る。これらのことか
 ら、ライフラインは、地震
 の前後における生活供給機

→	出火条件	延焼条件	パニック
電力	例えば、玄関灯火のないこ とは、大分初期消火の妨げ になる	——	(1次) 夜間照明なし→不安感 (2次) 街灯消→避難不自由 (3次) 生活条件の悪化
水道	初期消火の 消防水利に影響	電 器 ・消化栓の使用可・不可は 消防水利条件の過半を占める	(1次) 消化活動困難に伴う不安 (2次) 生活条件の悪化(重傷) [特に飲料水の供給は最も重要項目 だけにこの対策は万が一を要する]
ガス	出火条件として作用。 寧ろ無供給が好ましい。	——	(3次) 生活条件の悪化
電話	——	火災発生の通報の遅れ	(2次) 断線・転落等で不通 (3次) 連絡とれないことで被害地 外に不安
放送	——	パニックによる消化活動 阻害等に間接的に作用	(1~3次) 情報不足→不安・パニックの被害 [放送あったとしてもしでん大断時 なんかに過ぎないから身近な方 を信頼する傾向あり]、といわれる。
道路交通	交通の混乱で、衝突した 車から出火の危険あり	・消化活動阻害 ・消防車が所定の走行速度 を確保できない恐れあり	・団体の状況・信号停止等で 内部にパニックの危険性。 ・応急対策の遅れ起こしパニック 増大の危険性。

表5 二次災害に及ぼす影響

能α他ト、地震直後の二次災害緩和機能にも有していると考えらる。それゆゑ、都市のライフラインシステムの一部は、大地震時にあつてもその機能を維持することが望ましい。

ライフラインを設計する際、「壊れ難い」と「直し易い」とが要求されることが多い。地中埋設管は一般に低コストで作られるため、壊れ難く作るのには限界があり、直し易く作ることでそれをカバーすることになるが、この二つの要求は決して整合的ではなく、寧ろ二律背反的であるともいえる。例えば、壊れ難くするためには「深く作る」「重構造にする」等が有効で、対して直し易くするためには「浅く作る」「簡便な構造にする」ときが有効である。これをαとを同時に満足するような設計は困難であつて、それゆゑは二つの設計方針をそれぞれ別々に満足するような、二段階の設計方針を考えていくことが合理的であると思われ。こうして考へ方は、現実には電力αネットワーク施設等がある程度用いられてはいるが、この方針を更に徹底し、例えば直し易い破壊モードをもつ構造物を造る等のことを、将来有意義なテーマとして考へられていくことも良いであろう。ここでは、以下、上に述べた「壊れ難い」「高い信頼性をもつ」システムα可能性を考へてみたい。

高い信頼性をもつライフライン構造物は、必然的にコストも高くなるので、多重ループ等の冗長方式はとりたてて、個々の直列要素（ノードからノードと節点の直列結合で表わされる構造物）の信頼性が重要になってくる。この構造物をもつ直列要素を図3に模式化して示す。構造物に於てS軸をとると、地震による構造物α破壊はS軸上で非常な期待値λ(s)をもつポワソン過程と考へられる。λは地震強度α大工、各S付近の地盤条件、管α構造物・材質等から求まる確率変量である。このとき、構造物全体(0 ≤ s ≤ l)の

$$R = \exp\left[-\int_0^l \lambda(s) ds\right]$$

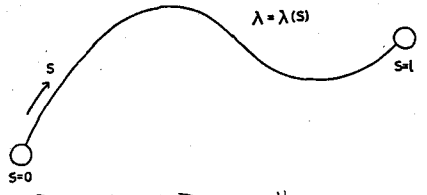


図3 直列要素のモデル

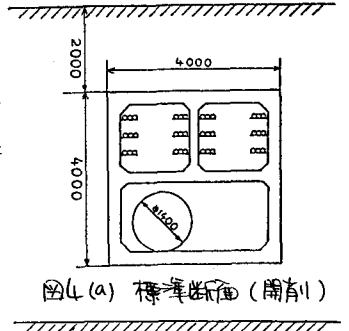


図4(a) 標準断面（開削）

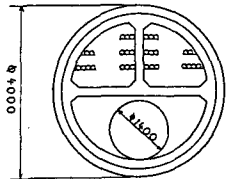


図4(b) 標準断面（シールド）

信頼性Rは、 $R = \exp\left[-\int_0^l \lambda(s) ds\right]$ で与えられる。今、λが十分大工αとし、 $\lambda = \int_0^l \lambda(s) ds$ が大数の法則が当てはまるものと仮定して、λの確率密度分布の第一近似が正規分布 $f_X(x) = N(m_X, \sigma_X^2)$ であるものとする。このときλの真分布が、 $g_X(x) = f_X(x) \cdot p(x)$ (但し、 $p(x)$ は $x \leq 0$ で0、 $x > 0$ で1のより大きい大工α変動しない補正函数)と表わされるものとする、Rは近似的に対数正規分布し、その期待値は、 $E[R] = \exp\left[-m_X + \frac{1}{2}\sigma_X^2\right] \cdot \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left[-\frac{1}{2}\left\{\frac{x - (m_X + \sigma_X^2)}{\sigma_X}\right\}^2\right] p(x) dx \dots \dots \ast$ となる。このE[R]を低減する要素は、λからlやm_Xの大工αが挙げられるが、それらと同様にσ_X寄与も小さい。しかしσ_Xは、地盤条件のS軸上αばらつき、λの地震指定の不確か工等が強く反映され、人為的な制御が困難である。これからいえることは「長延長線状構造物」を「地盤に直接接触せしめて作る」とが信頼性を高めようとする立場からは不合理であるということである。従つて、この二次災害緩和の役割りを負うシステムは、二重管、乃至は共同溝として作られるべきである。この結論を踏まえて、本・電力・電話システムを設置し、大地震時の消火用水、各種システムの電力バックアップ、応急対策用α連絡媒体等に供し得るような共同溝を考へ、図4(a)、(b)のような標準断面を定めコスト試算をしてみた。都区内α面積のある、計画幅員18m以上の道路・幹線延長約640km (ほぼ2kmメッシュの密度程度に相当)の地下に図の共同溝を敷設するものとすると、トンネル部だけで工費約1兆5千億円(55年12月現在)にのぼり、利息だけでも莫大な額になる。従つて地震対策上α目的だけでこうしたプロジェクトを遂行するのは不可能であるが、これはあくまでも上限であつて、都市基幹施設整備計画の中で、こうしたことがより適正なレベルで考へられるのは意義があると思われ。