UDC 699.841.059:628.1.033:621.311:665.727

ライフラインの地震防災—考え方と現状報告

A Review of Seismic Risk Analysis and Earthquake Countermesure Policy of Lifeline Systems.

片 山 恒 雄*・磯 山 龍 二*
Tsuneo KATAYAMA and Ryôji ISOYAMA

電力・都市ガス・水道・通信・道路網等，いわゆるライフライン施設の耐震・防災問題が近年注目されつつある．本文では，これらの施設の耐震・防災の概念，研究の現状を述べるとともに，問題点，今後の課題等を指摘した．

1. まえがき

ライフライン，都市供給施設，あるいは単に供給施設と呼ばれる施設群は，その名のとおり都市生活者にとってはなくてはならない生命線である．ライフラインとは，電力，都市ガス，上水道等の供給施設，および道路，鉄道等の輸送施設，電信・電話等の総称であるが，一般的に定義するとすれば以下のようになろう．

1）広い範囲にわたって，線的あるいは面的に構築される．

2）多数，多種類の構造物からなり，しかもこれらの構造物が有機的につながって1つのシステムを成す．

3）一般住民の生活に直接的かつ深くかかわっている．

1923年関東地震以降のいわゆる被害地震を見ると，ライフライン施設は，必ずといってよいほど被害を受け機能の低下をきたしている．しかも，最近の地震ほどライフライン施設の被害が目立つようになってきている．これは，他の構造物の耐震性が著しく向上されたのに対して，埋設管を代表とするライフライン施設要素の耐震化が遅れたためもあろうが，おもに都市化が急激におし進められた結果，都市生活のライフライン(特に供給施設)に頼る割合が飛躍的に増大してきたためであると思われる．

供給施設をはじめとするライフラインの耐震問題が大きくクローズアップされたのは，1971年のサンフェルナンド地震以降といってもよく，ライフラインの地震工学研究はたかだか10年程度の歴史しか持たない[1]．当初は，供給施設では大部分を占める地下埋設管の地震時挙動解明に重点がおかれ，関東，福井，新潟地震等における被害データの見直し，実験・観測等による研究，解析的な研究が行われたが，最近では，ライフラインを1つのシステムとしてとらえて，その地震時機能を評価し，全体システム，あるいは各要素に適切な耐震レベルを設定してやろうとする試みも行われている．前者をハードな研究とすれば，後者はいわばソフトな研究といえよう．本文では，ライフライン，特に供給施設に注目して，耐震・防災の考え方の流れといったものを述べるとともに，筆者らなりの判断を加えつつ，過去の研究を整理して系統的な位置づけを行い，研究の現状，問題点，今後の課題等を明らかにしてみたい．したがって，関連のある全ての研究を網羅しているわけではないことをおことわりしておく．

* 東京大学生産技術研究所　第5部

2. ライフラインの耐震・防災の考え方

図1にライフラインの耐震・防災の考え方の流れを示す．いうまでもなく，最も基本になるのはライフラインを構成する各種構造物の耐震性である．ガス，上水道等の供給施設では，その大部分を地下埋設管が占めており，埋設管の地震時挙動解明は，ライフラインの耐震研究の主要な目標の1つであった．しかし，先にも述べたように様々な調査・研究が行われ，この問題もしだいに解明されつつある．これらの成果については本文ではほとんど触れないが，文献2)，3)に詳しい現況報告がある．

埋設管等に関する研究の成果は，直接に耐震設計基準等に取り入れられ，個々の構造物の耐震性向上に生かされる．これが図1の①→②の流れである．しかし，ライフラインのシステム的性格を考えると個々の構造物（システム要素）を独立に考えるだけでは不十分であり，また，ライフラインの巨大さを考えれば経済的にも合理性にかける．そこで図1の①→③→②の流れ，すなわち，システムとしての地震時の機能を評価した上で個々の構成要素に適切な耐震レベルを設定しようという考え方がでてくる．たとえば，ある構造物の設計水平震度を0.2にするか0.3にするかは地震時における全体システムの機能を考慮して，その構造物のシステム内における重要性に則して決定されるべきである．この方法は，いわば，長期的な展望に立った，システムの耐震性向上，耐震設計の流れといえる．

1.で述べたように，ライフラインが他の構造物と大き

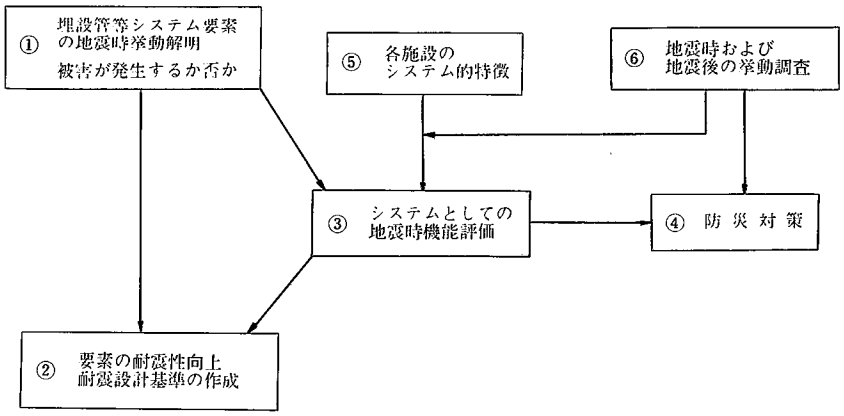


図1　ライフラインの耐震防災の概念

く異なる点は，都市，地域あるいは地方といった広い範囲に対して住民の生活と密接に係わっている点である．しかし，ライフラインをいかに耐震的に造ろうとも，ある程度以上の地震では一部要素の被害，機能の低下は避けられない．また，すでに存在している施設の耐震性向上はすぐには不可能である．したがって，地震発生に備えて，1日でも早い復旧が行えるよう，事前に応急対策，復旧計画等の防災対策を立てておくことがぜひとも必要である．図1の①→③→④の流れである．より具体的には，想定された地震に対して被害の予測，影響の予測（地震時機能の評価），適切な防災対策の立案となる．

ライフラインの耐震問題を考える上でもう一つ重要なことは，地震の発生，要素の被害の発生，機能の低下という一連の流れが確率に支配されるという点である．ほとんどの場合，いつ，どこで，どのくらいの地震が発生するかは過去の資料に基づいた確率分布の形でしか示されない．また，線的，面的に巨大な規模を持ち，しかも埋設管等土に関係した構造物が大部分を占めるライフラインでは，どこで，どれくらいの被害が発生するかも，様々な要因に支配された確率的表現に頼らざるをえない．その結果起こる機能の低下も当然ながら確率量となる．たとえば，今後の100年間を考えた時，供給域内のある地域が，地震により供給停止が起こる確率は p である，などとなる．

3. 耐震・防災に関する意志決定の方法

これまで述べてきた考え方は，いわば，地震危険度に基づいたライフラインの耐震・防災に関する意志決定の方法としてとらえることができるが，本節ではより具体的にこの方法を述べ，個々の問題について研究の現状を見てゆく．

まず，図1の①→③の流れの典型例として，また以下の議論の1つのひな型として，Whitman, Hein[4] による方法論を紹介しよう．この考え方が全ての方法に共通してあてはまるわけではないが，本質的な流れはどの方法も同じである．ある T 年間を考えた時，ライフラインの機能低下状態が DS_i である確率 P_{DS_i} は，

$$P_{DS_i}=\sum_j P_{I_j}\left(\sum_k P_{DS_i/EF_k}\cdot P_{EF_k/I_j}\right) \qquad (1)$$

で与えられ，ここに，

P_{DS_i}：システムを全体として見た時の機能低下状態（すなわち被害度）が DS_i である確率．

P_{I_j}：T 年間で震度階で I_j の地震動の襲来する確率．

P_{EF_k/I_j}：震度階で I_j の地震動が襲来した時システムの被害状態が EF_k である確率．

P_{DS_i/EF_k}：EF_k の被害が起こった時システムの機能低下状態が DS_i である確率．

である．表1（a）～（d）は Whitman, Hein がボストン市の水道システムを対象とした解析に用いた種々の確率を例として示したものである．表1（d）の P_{DS_i/EF_k} の求め方は後に述べるが，表1（c）の P_{EF_k/I_j} の評価では，軟弱地盤の破壊確率がすなわち埋設管の破壊確率であるとしている．システムの機能低下状態（DS_i）は，Negligible～Catastrophic の5段階で表されているが，これらの詳しい定義は文献4）を参照されたい．最終的なシステムの機能低下状態は，表1（a）に示すように各 DS_i に対する年確率として与えられる．式（1）は，図2に示すような tree を考えるとわかりやすい．

ライフラインの設計，改善等の意志決定を行う場合，P_{DS_i} を，たとえば金額で表される損失で表現した方が便利である．各 DS_i に対する損失を L_i とすると，損失の期待値 EL は

$$EL=\sum_i P_{DS_i}\cdot L_i \qquad (2)$$

となり，耐震設計あるいはシステムの改善は，EL をある許容値以下にするように行われる．すなわち，確率 $P_{EF/I}$，$P_{DS/EF}$ を改善すればよいことになる．$P_{EF/I}$ の減

表1　式(1)に現れる確率量の具体例(Whitman, Hein[4]による)

(a)　P_{DS_i}

Damage State for System	Annual Probability
Negligible	0.0019
Minor	0.00028
Moderate	0.00015
Major	0.000014
Catastrophic	0.000006

(b)　P_{I_j}

Modified Mercalli Intensity	Annual Probability (events/year)
VI	0.002
VII	0.0003
VIII	0.00003
IX	0.000005

(c)　P_{EF_k/I_j}

Percentage of Poor Soil Sites Failing	Modified Mercalli Intensity			
	VI	VII	VIII	IX
0%	0.9	0.3	0	0
5%	0.1	0.5	0.1	0
10%	0	0.2	0.3	0
25%	0	0	0.5	0.2
Essentially all	0	0	0.1	0.8

(d)　P_{DS_i/EF_k}

Damage State for System	Percentage of Poor Soil Sites Failing				
	0%	5%	10%	25%	all
Negligible	1.0	0	0	0	0
Minor	0	0.7	0.4	0	0
Moderate	0	0.3	0.5	0.6	0
Major	0	0	0.1	0.4	0.2
Catastrophic	0	0	0	0	0.8

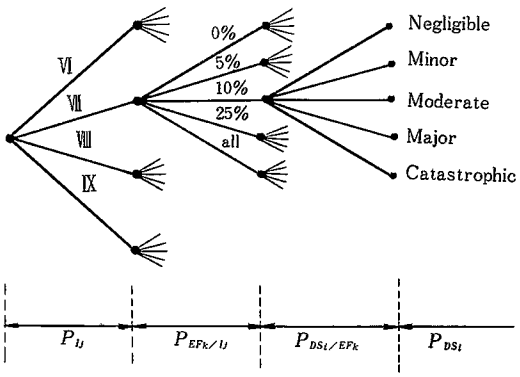


図2　式(1)の tree による表現

少は，たとえば埋設管の耐震化を進めるなどのハードな面からの改善により達成され，$P_{DS/EF}$ の改善は，水道ならば，浄水場，配水池の増設，連絡管の布設等，システム的見地からのソフトな耐震化により達成される．

2.および本節で述べた考え方の概略の流れ図を図3に示す．この流れの中で，式(1)による評価や表1に例示した種々の確率をいかに決定するかが問題である．以下に項目ごとに順を追って説明するが，本文で紹介するおもな研究について，その全体の流れを表2に示しておく．

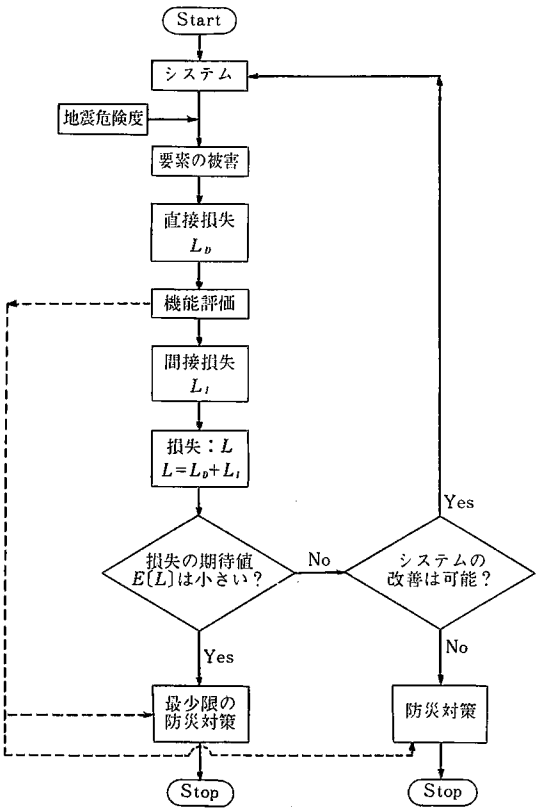


図3　ライフラインの耐震・防災に関する意志決定のフロー

3.1　要素の破壊

ここでは，おもに埋設管を対象として要素の破壊規準あるいは破壊確率の与え方を示す．式(1)の $P_{EF/I}$ の評価に相当するものである．

たとえば，地震による埋設管被害の主要な原因として次の5つを考えることができよう[5]．

1) 地震波動の伝播
2) 断層の動き
3) 地盤の液状化
4) 地すべり
5) 他の構造物との相互作用

さらに，これらの要因を誘発し，管の破壊を決定づけるものとして，地震動の強さ，地盤，管種・管径・継手の種類等の構造的要因がある．各要素の破壊確率を与えるためには，その地点において，先にあげた5つの内どれが主要な原因となる可能性が高いかを判断し，さらに地震動の強さ，地盤，管の構造などから管の破壊を決定する．Shinozuka 等[5]は，このような方法により各要素ごとに式(1)の $P_{EF/I}$，つまり Damage Probability Matrix を求めている（表1(c)と同じ型であるが，表1(c)はシステム全体に対して与えられたものである)．5つの原因の内，(1)の地震波動による破壊確率の与え方を以下に示す．

表2　本文で取りあげた主な研究の方法

	Whitman Hein	Panoussis Taleb-Agha	Shinozuka ほか	田村・川上	Kiremidjian	Shibata Tsuchiya
対象	上水道（埋設管）	道路	上水道（埋設管）	上水道（埋設管）	上水道（地上施設）	電力施設
地震危険度	全システムに同一の地震力がかかる．1点を対象とした地震危険度．	システムに対する地震危険度．	システムに対する地震危険度．	ある地震を想定．	各要素ごとに1点を対象とした地震危険度．	ある地震を想定．（震度分布を仮定）
要素破壊	地盤の破壊＝埋設管の破壊．システム全体で1つの Damage Probability Matrix．	ある加速度を越える確率．	解析的に埋設管ひずみを評価．各要素ごとに Damage Probability Matrix．	過去の埋設管被害資料に基づいて地盤により修正．	ある加速度を越える確率．	震度と破壊確率の間に適当な関係を仮定．
機能評価	技術者の判断．4段階でシステム全体の機能を評価．	システムの信頼性．システムを SSSP に変換．注目点の供給停止確率．	システムの信頼性．システムを SSSP に変換．注目点の供給停止確率．	システムの信頼性．シミュレーションにより供給点と需要点ペアの連結確率を同時に評価．	システムの信頼性．直列システム．注目点の供給停止確率．	システムの信頼性．システムを SSSP に変換．注目点の供給停止確率．
参考文献	（4）	（12），（13）	（5），（16），（17）	（19）	（22）	（14）

埋設管の地震時ひずみ ε_S は，地盤のひずみ ε_0（自由表面のひずみ）を用いて

$$\varepsilon_S(m,d_S)=\beta\varepsilon_0(m,d_S) \qquad (3)$$

と表される．ここで β は定数，m，d_S は各々マグニチュード，震央距離である．また，地震時の地盤ひずみに関しては次の関係がある[6]．

$$\varepsilon_0=\frac{S_V(m,d_S)}{C} \qquad (4)$$

ここで，$S_V(m,d_S)$ は地表面の運動速度，C は地震波動の伝播速度である．m，d_S は後の説明の都合上つけたもので，Damage Probability Matrix を求める際には直接必要はない．なぜならば Damage Probability Matrix は，m と d_S の結果として表れる震度階ごとに確率をふり分けるのであるから，むしろ ε_S（I），S_V（I）とする方がよいかもしれない．

さて，ある埋設管の破壊確率は，たとえば以下のように求められる[5]．式（4）の伝播速度 C は3種類に分けた地盤の各々で適当にばらつくものとする．また S_V にも各震度階によってばらつきを与える．管のひずみ ε_S が C と S_V のばらつきから与えられる平均値 μ_S，標準偏差 σ_S を持つ正規確率変数であると仮定すると，図4に示すように，破壊のレベルに応じた破壊確率を与えることができる．つまり，地盤条件と β が規定された各要素ごとに，表1（c）のような Damage Probability Matrix が計算される（ただし，表1（c）の 0%～essentially all は Minor～Moderate となる）．

上述の方法は，各震度階ごとに管のひずみがあるレベルを越える確率，すなわち超過確率を求めているのであるが，後に述べる機能の評価，システムとしての地震危険度解析では，もう少し厳密な定式化が必要である．これを以下に示す．

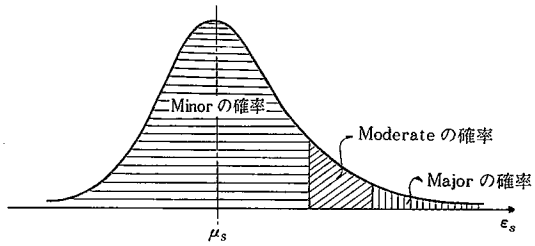


図4　ε_S の確率密度関数と各レベルの破壊確率の与え方（Shinozuka ほかによる[5]）

ある地震が起こった時，埋設管のひずみが破壊ひずみ ε_l よりも大きくなる確率，すなわち，埋設管要素 i の破壊確率は次式で与えられる．

$$P_i[\text{pipe fail}\,|m,d_S]=P_i[\varepsilon_l\leqq\beta\varepsilon_0(m,d_S)|m,d_S] \qquad (5)$$

速度振幅 S_V と m，d_S の関係として，たとえば，b_1，b_2，b_3 を定数として

$$S_V(m,d_S)=b_1e^{b_2m}d_S^{-b_3} \qquad (6)$$

を用いるとすれば，式（4）を介して式（5）は

$$P_i[\text{pipe fail}\,|m,d_S]=P_i[\varepsilon_l\leqq\beta\frac{b_1}{C}e^{b_2m}d_S^{-b_3}|m,d_S] \qquad (7)$$

となる．式（7）により，埋設管の破壊をもとにしたシステムの地震危険度解析（後述）が可能となる．

以上は解析的に破壊確率を与える方法といえようが，その途中には多くの仮定と判断が関与しており，それらの妥当性に疑問のある場合も少なくない．そこで過去の地震による被害データを整理して，これに基づいて埋設管被害を予測する方法が考えられる．

図5にサンフェルナンド地震による水道鋳鉄管の被害率と推定最大加速度との関係を示す[7]．Oppenheim等[8]は次の経験式でこれらの関係を表した．

$$\log R_f = 3.65 + 6.39 \log A \qquad (8)$$

ここで R_f は1 km 当たりの被害個数，A は最大加速度（g）である．ただし，この式はかなりのばらつきがあることに注意しなければならない．式（8）は加速度との関係であるが，土岐[9]は関東地震の水道管被害を調査した結果，埋設管被害率と速度振幅の間に高い相関があることを示した．これは式（4）からも予想されることであるが，速度振幅推定に際して，推定最大加速度を各地盤の固有振動数で割って求めているため，本質的には地盤の影響を考慮したことになろう．

地盤条件，管種，管径等の影響は，個別に式（8）のような回帰式を作成してやるか，あるいは多変量解析を行う[10]ことも考えられるが，現在のところ資料不足のため，これらの要因について詳細に調査された被害データ[7),11]を参考にして係数を修正していくほかないであろう．

式（8）のような形で被害率が与えられれば，管の破壊がポアソン過程に従うものとして，管長 L の管要素の破壊確率を求めることができる．埋設管被害率（個所/km)をポアソン過程の平均発生率とすれば，管長 L の間で1個所以上の被害が起こる確率 $P_f(L)$ は，

$$P_f(L) = 1 - e^{-R_f \cdot L} \qquad (9)$$

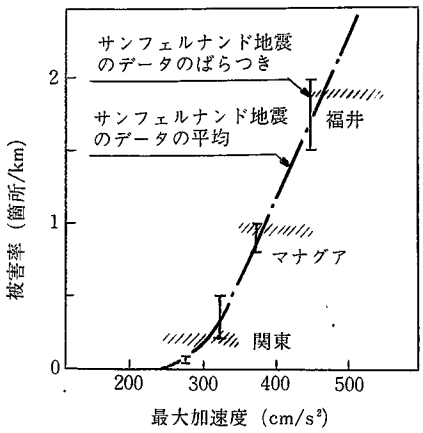


図5　地震動最大加速度と埋設管被害率(水道鋳鉄管)の関係

となる．ただし，L の区間で R_f は変わらないものと仮定されている．

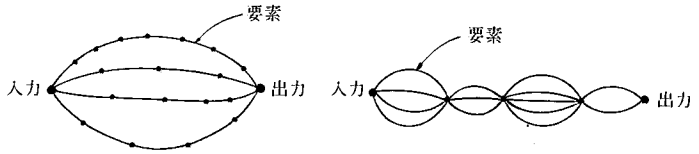
3.2　機能の評価

図1を見てもわかるように，ライフラインの耐震・防災の考え方の中で機能評価は中心的な位置を占める．特に応急対策，復旧計画等の防災対策を立てるためには，現実的できめの細かい地震後のシステム機能評価が不可欠である．たとえば，応急給水に必要な人員・車両等の確保のために，地震後に供給不可能な人口，地域および供給停止の期間等をある程度見当をつけておく必要がある．機能評価に関する研究は，近年米国を中心に盛んに行われるようになったが，上述のような現実的できめの細かいという段階には達していないのが現状である．以下に代表的な機能評価法を示す．

本節の最初に示した Whitman 等の方法[4]は，専門技術者に意見を聞いて機能を評価するという主観的方法である．具体的には表1（c）の Damage Probability Matrix に基づいて被害をシミュレートし（軟弱地盤では一様に被害が起こると仮定)，多数の被害パターンの一つ一つにおけるシステムの機能低下レベルを水道技術者に判断させ，全体システムについて表1（d）に示すようなシステム機能の確率マトリックスを求めた．この機能の評価法は，非常に現実的であり，大局的には正しい結果を与えるものと思われる．水道のような複雑なライフラインでは現場技術者の判断が一見精密と思われる理論よりもはるかにすぐれていることが十分ありえる．しかし，この方法は大局的には正しくても，きめの細かさという点では欠点を持つ．また，東京都の水道，ガスのような巨大なシステムへの応用は困難と思われる．

組織的に機能を評価できるという点では，システムの信頼性理論に基づいた考え方がすぐれている．Panoussis[12]，Taleb-Agha[13]は，複雑なネットワークが，図6に示すような簡単で等価な SSP あるいは PSS に変換されることを利用した．しかも，種々な入出力条件（ある入力点からある出力点，全ての入力点から任意の出力点など）に関して，1入力1出力の SSSP(Super SSP) あるいは SPSS(Super PSS) が見出されることも示した[13]．複雑なネットワークが図6に示すような簡単なシステムに変換されれば，解析的にシステムの信頼性を評価することが可能で，後に述べるシステムとしての地震危険度解析が可能となる．Shibata[14),15]，Shinozuka[16),17]，Ang[18]等も同様の手法で機能を評価した．

田村・川上[19]による研究はシステムの信頼性を求めるという点で上述のものと同様であるが，モンテカルロ・シミュレーションにより効率よく信頼性が求められることを示した．具体的には，ある想定地震に対して3.1で述べたような手法を用いてシステム上に被害をシミュレートし，新しいシステム（被害を受けた要素は除外され



(a) SSP
(series system in parallel)

(b) PSS
(parallel system in series)

図6　SSP と PSS

る）に対して，グラフ理論に基づきネットワークの連結性を求める．この操作を多数回操り返すことにより，すべての需要点・供給点ペアの連結確率を同時に求めることができる．想定地震が1つにしぼれない場合は，この操作を複数回繰り返せばよい．

上述の2つの手法は，いずれもシステムの信頼性を求めている．しかし，現実の大部分のライフラインの地震時機能は点と点のつながりだけで決まるものではない．たとえば，ある需要点に水が供給されるか否かは，供給点との連結性のほかに，需要と供給のバランス，自然流下の水道ならば高低差などによっても影響される[20]．すなわち，ネットワークを SSP に変換して信頼性を求める際に，各ライフラインシステム独自の制約条件を付けることによって，現実的にはありえないリンクを除外することが必要である．たとえば，水道ならば圧力，需要供給のバランス，輸送ネットワークならば，混雑度，所要時間等を制約条件として用いることが考えられる．このような方法ではないが，内容物の流れを考慮した機能評価の例として田村・川上[21]，柴田・土屋[14]の研究がある．

これまで述べてきた機能評価法は全て地震直後の機能を評価しているにすぎない．しかし，ライフラインの役割・重要性を考えると地震後どのようにその機能が回復してゆくかも重要である．したがって，復旧過程をも考慮した，時々刻々の機能評価法が必要である．しかし，このような研究は Oppenheim 等の研究[8]に一部取り入れられているにすぎず，今後の残された大きな課題の1つである．

3.3　地震危険度

本節の最初に述べた方法，すなわち式（1）では，ライフラインのサービス地域の全てにわたって地震の強さは同一であるとしている．したがって，通常の1地点を対象とした地震危険度解析がそのまま使えることになる．比較的小規模なライフラインならばこれで十分と思われるが，電力施設や東京を中心とした都市ガス施設などのようにライフラインの規模が大きくなると，1つの地震でも各要素の受ける地震力が異なり，しかもその時のシステムとしての評価が必要となる．

この場合には式（1）のように地震危険度だけを独立に考えることはできなくなり，要素の被害，機能の評価を同時に地震危険度解析に組み込むことになる．

まず，通常の地震危険度解析を長大なライフラインに適用した時，その意味するところを考えてみよう．

California State Water Project はカリフォルニア州を南北につらぬく，約900 km の水路からなっている．この水路と平行して，サン・アンドレアス，サン・ガブリエル等の断層が走っており，実際には1点の地震危険度で代表させることはとてもできない．Kiremidjian[22]はこの導水路を直列システムと見なし（実際には導水路自体ではなくポンプ場等の地上施設を対象としている），通常の地震危険度解析から求まる値（T 年でその地点の最大加速度がある値を越える確率＝要素の破壊確率）を各要素に対して独立して用い，直列システムの信頼性を求めている．各要素の破壊確率は，T 年間を考えた値であり，各要素で同時に経験されるわけではないのであるから，システムの破壊確率の上限，すなわち，信頼性でいえば下限を求めていることになる[22]．したがって1つの地震でのシステムの破壊確率を評価した上で，システムとしての地震危険度解析の手法が必要となる．両者の評価の違いを簡単なシミュレーション例として表3に示す．これは，3要素からなる直列システムを考え，10回のシミュレーションを行ったものであり，①システムとして信頼性を求めたものと，②要素の信頼性に基づいてシステムの信頼性を評価したものとを比較したものであり，両者の違いがわかろう（②では要素の被害を独立と考えているからである）．

①のシステムとしての地震危険度解析，すなわち1つの地震においてシステムとしての信頼性を求めた後，地震の発生を考慮した方法は，Panoussis[12]，Taleb-Agha[13]によって開発されている．まず，複雑なネットワークを3.2で述べたような SSSP または SPSS に変換する．この変換によりシステムの信頼性の定式化が可能となる．

ある地震でのシステムの破壊確率を $P_f[\text{system}|EQS]$ とする．EQS は，ある1つの地震発生領域（たとえば断層系）に，解析で対象とすべき規模の地震が1回発生する事象を表している．つまり，$EQS\equiv(m,d_s)$ とする．簡単のために，たとえば SSSP が並列システムとなったとしよう．すると，システムの破壊確率は，要素の破壊確率，式（7）あるいは式（9）を用いて，

表3　シミュレーション例によるシヌテム信頼性計算法の概念

シミュレーション番号	システム	システムの状態
1	○—×—○——○——○	fail
2	○——○—×—○—×—○	fail
3	○——○——○——○	safe
4	○—×—○——○—×—○	fail
5	○——○——○—×—○	fail
6	○——○——○——○	safe
7	○——○—×—○——○	fail
8	○—×—○—×—○—×—○	fail
9	○——○—×—○——○	fail
10	○——○—×—○—×—○	fail
要素の信頼性 →	$\frac{7}{10}$　$\frac{5}{10}$　$\frac{5}{10}$	↓
	システムの信頼性 ②$R'=\frac{7}{10}\times\frac{5}{10}\times\frac{5}{10}=0.175$	システムの信頼性 ①$R=\frac{2}{10}=0.2$

×はその要素に被害が起こったことを示す.

$$P_f[\text{system}\,|\,EQS]=\prod_j P_j[\text{pipe fail}\,|\,EQS] \tag{10}$$

となる* いま対象地域に，地震発生領域が NS 個あるとして，i 番目の領域の平均発生率を ν_i とすると，

$$P_f[\text{system}\,|\,EQ]=\sum_{i=1}^{NS}P_f[\text{system}\,|\,EQS_i]\frac{\nu_i}{\nu_t} \tag{11}$$

ただし，$\nu_t=\sum_{j=1}^{NS}\nu_j$

となる．さらに地震の発生をポアソン過程とすれば，

$$P_f[\text{system}]=1-\exp(-\nu_t P_f[\text{system}\,|\,EQ])$$

$$\simeq\nu_t P_f[\text{system}\,|\,EQ] \tag{12}$$

なる関係が得られる．式 (10)，(11)を用いると上式は，

$$P_f[\text{system}]=\sum_{i=1}^{NS}\left(\prod_j P_j[\text{pipe fail}\,|\,EQS_i]\right)\nu_i \tag{13}$$

となる．なお，文献 13) では，式(10) に相当する SSP または PSS の信頼性を求める際，式 (7) を変形して得られる巧妙な方法を用いることによって，より簡単に式 (13) が計算されることを示している．

Shinozuka[16),17)]，Ang[18)] 等も同様な手法でシステムの地震危険度解析を行ったが，Ang は，ライフラインが断層を横切り，しかも断層の位置，方向などが不確定な場合にも適用できる方法を示している．

ライフラインの要素の破壊や機能評価に関する研究の大部分は，上述のような平均的な地震危険度に基づいている．しかし，我国の地震事情を考えてみると，あるライフラインに被害を与えるような地震の位置，規模がある程度特定される場合も少なくない．東海沖地震のように，時期までもある程度予測されることもある．このような場合には，長期的な展望に立った（すなわち平均的地震危険度に基づいた）耐震性の検討や耐震設計のほかに，特定の地震を想定した防災対策の立案も必要である．また，地震を特定することにより解析の自由度をあげ，より詳細，またはより効率のよい被害の予測，機能の評価が可能となる[14),19)]．

3.4　意志決定

これまで述べてきた要素の被害，機能の評価，地震危険度解析の一連の流れで，たとえば，T 年間にシステムの機能がある状態になる確率が求められる．それでは，この確率をいかに意志決定に反映させたらよいであろうか．これには，先にも述べた，式 (2) で表される金額に換算された損失の期待値を用いることが考えられる(図3)．しかし，ライフラインが社会的にも重要な意味を持っていることから，構造物被害等の直接的な損失ばかりでなく，供給停止による社会的なインパクト等，間接的な影響をも考慮せねばならない．Oppenheim 等[8)] はピッツバーグ市の水道施設に対して，供給停止期間・人口と被害の大きさの間に適当な関係を定めることにより，間接的な影響をも考慮したリスク・アナリシスを行い，水道施設耐震化の意志決定の資料を得ようとした．

4.　防災対策の現状

ライフラインの地震後の応急対策，復旧計画等の防災対策の重要性については，筆者らも繰返し指摘してきたが[20),23)]，現在のところ防災対策に関する系統的な研究はほとんどないといってもよい．わずかに，ライフラインを含めた，地震災害の波及効果について調べた基礎的な研究[24)]，水道における応急給水の可能性について調べたもの[25)]などが見られるのみである．量的な基盤に立ってこれらの防災対策を立案しようとすれば，地震後のシステムの機能評価が不可欠となるが，前節で見たとおり，まだ多くの問題点が残されている．したがって，現在，筆者らが知りうる限りの現実の防災対策を見ても，大部分が防災対策の大枠を定めるものか，あるいは，技術者の経験をもとにしたものかである．

水道維持管理指針[26)] は，給水人口 25 万人程度の中都市が地震に襲われ，給水機能が麻痺した場合を想定し，応急・復旧対策として必要な手順・項目を示している．復旧の方法のほかにも平時の体制，相互援助体制等を細かく指示しているが，どの程度の被害を見込んだらよい

* この式の展開には注意を要する．詳しくは，システム信頼性の教科書あるいは文献 (12, 13) を参照されたい．

のか，また，資材・人員の量などにはまったく触れていない．

地震を想定して，配水システムの大改造をした例として，新潟市の上水道があげられる[27]．衆知のように，新潟市の上水道は，1964年新潟地震により現状復旧さえ不可能なほどの大打撃を受けた．応急復旧の完了した後に開始された恒久復旧では，

1）耐震工法を遵守する．

2）配水調整や水量測定がわかりやすいものとする．

3）維持管理，災害復旧がやりやすいものとする．

を基本的な思想として配水管組織が設計された．

約370万件の給水件数をかかえる東京都上水道の防災対策は，埋設管の被害予測に基づいて，断水人口の減少してゆく様子を推定し，必要な資材・人員等を概算している[28),29)]．この方法は確定的であるものの，2.で述べた流れと一致している．この試算に用いられた各種の仮定条件の当否は文献28)，29）からだけでは明らかでないが，まだ多くの問題点が残されているものと思われる．

5. あとがき

筆者らは，1978年宮城県沖地震による供給施設の被害および復旧過程を詳細に調査してきたが[23]，その過程で従来のライフライン耐震研究の大部分が，多くの場合現実ばなれしていることに気が付いた．現実の電力，都市ガス，上水道等のライフラインは，各々独自のシステム的特性を持つばかりでなく，地震時には，復旧の方法と関連して独特の挙動を示す[20]．たとえば，電力施設の地震時機能の評価ではシステム信頼性の考え方が適用可能と思われるが，都市ガス，上水道施設ではネットワークの連結性以外の条件の影響が大きく，システム信頼性の考え方だけでは実際的な機能評価法とは言えない．また，水道とガスについても，おもにその内容物の違いから地震後の復旧過程はまったく異なる．したがって，図1の⑤，⑥に示すように各ライフラインの特性，地震時および地震後の挙動を十分に把握し，それを機能評価，防災対策にいかに反映させてゆくかが，今後の大きな課題であろう．

(1980年2月28日受理)

参考文献

1) C. Martin Duke and R. B. Matthiesen, Earthquakes, Lifelines and ASCE, Civil Engineering-ASCE, Dec., 1973

2) Leon Ru-Liang Wang and Michael J. O'Rouke, Overview of Buried Pipelines under Seismic Loading, Journal of the Technical Councils, ASCE, Vol. 104, No. TC 1, Proc. Paper 14164, Nov., 1978

3) T. Ariman and G. E. Muleski, A Review of the Response of Buried Pipelines under Seismic Excitations, Lifeline Earthquake Engineering-Buried Pipelines, Seismic Risk, and Instrumentation, ASME, June, 1979

4) Robert V. Whitman and Klaus H. Hein, Damage Probability for Water Distribution System, Proceedings of ASCE TCLEE Speciality Conference on Lifeline Earthquake Engineering, August, 1977

5) M. Shinozuka, S. Takada and H. Ishikawa, Some Aspects of Seismic Risk Analysis of Underground Lifeline Systems, Paper No. 78-WA/PVP-6, Journal of Pressure Vessel Technology, Transaction of the ASME.

6) たとえば，土木学会編，地震応答解析と実例，PP. 413-420

7) 久保慶三郎，片山恒雄，佐藤暢彦，地下埋設管震害の定量的解析，第4回日本地震工学シンポジウム，1975年11月

8) B. E. Gerard, M. Patelunas, J. E. Niece and I. J. Oppenheim, Mesuring Earthquake Performance of Urban Water Systems, Proceedings of ASCE TC LEE Speciality Conference on Lifeline Earthquake Engineering, August, 1977

9) 土岐憲三，水道管路の震害予測，京都大学防災研究所年報，第22号，B-2，昭和54年4月

10) Tsuneo Katayama, Effect of Ground Conditions on Seismic Damage to Buried Pipelines, Proceedings of U. S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, Nov., 1976

11) 磯山龍二，増井由春，片山恒雄，宮城県沖地震による埋設管の被害，第15回地震工学研究発表会,土木学会，1977年7月

12) George Panoussis, Seismic Reliability of Lifeline Networks, SDDA-Report No. 15, M. I. T., Dept. of Civil Eng. Research Report R74-57, Sept., 1974

13) Ghiath Taleb-Agha, Seismic Risk Analysis of Networks, SDDA-Report No. 22, M. I. T., Dept. of Civil Eng. Report R75-43, Nov., 1975

14) Heki Shibata and Masahiko Tsuchiya, Seismic Reliability Analysis of Lifeline Systems〔1〕, Seisan-Kenkyu, Vol. 30, No. 7, July, 1978

15) Heki Shibata and Masahiko Tsuchiya, Seismic Reliability Analysis of Lifeline Systems〔2〕, Seisan-Kenkyu, Vol. 31, No. 2, Feb., 1979

16) M. Shinozuka and T. Koike, Seismic Risk of Underground Lifeline Systems Resulting from Fault Movement, Proceedings of the 2nd U. S. National Conference on Earthquake Engineering, August, 1979

17) M. Shinozuka, S. Takada and H. Kawakami, Risk Analysis of Underground Lifeline Network Systems, Technical Report, No. CU-3, Dept. of Civil Eng., Columbia University, August, 1977

18) J. Mohammadi and A. H-S. Ang., Seismic Safety

Analysis of Lifeline Systems, Lifeline Earthquake Engineering-Buried Pipelines, Seismic Risk, and Instrumentation, ASME, June, 1979
19) 田村重四郎，川上英二，ライフラインのネットワークシステムの耐震性の一評価方法について，生産研究，30巻，7号，1978年7月
20) 片山恒雄，磯山龍二，ライフラインの地震防災，季刊カラム，No.76, 1980年4月
21) 川上英二，田村重四郎，上水道管網システムの機能上の耐震性の評価，土木学会第34回年次講演会，昭和54年10月
22) A.S. Kiremidjian, Seismic Risk and Reliability of the California State Water Project, Lifeline Earthquake Engineering-Buried Pipelines, Seismic Risk, and Instrumentation, ASME, June, 1979
23) 片山恒雄，増井由春他，1978年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧，
—— 都市ガス施設，生産研究，31巻，2号，1978年2月
—— 上水道施設，生産研究，31巻，4号，6号，1978年4月，6月
—— 電力施設，生産研究，31巻，6号，1978年6月
—— 下水道施設，生産研究，31巻，7号，1978年7月
24) 伊藤篤志，大都市大震災における被害の波及構造の分析，東京大学工学部土木工学科論文集録，別冊第5巻 1979
25) 武内猛，震災時の飲料水対策(試案)，水道協会雑誌，第491号，昭和50年8月
26) 日本水道協会，水道維持管理指針(昭和45年)
27) 小出崇，安食裕夫，新潟地震による配水管組織の改良復旧と配水コントロール計画，水道協会雑誌，第392号，昭和42年5月
28) 東京都水道局，東京都水道局震災対策—予防計画及び応急対策—(昭和53～57年度)，昭和54年3月
29) 野津幹男，東京都における震災対策，水道協会雑誌，第542号，昭和54年11月

東京大学生産技術研究所報告刊行案内

第28巻　第6号（和文）

西　尾　茂　文

Leidenfrost 系における固液接触過程に関する基礎的研究

本研究報告は，液体がその飽和温度よりかなり高温に加熱されている物体と隣接して存在する場合に生ずる液体の相変化に関する研究の第1報であり，液体・高温物体がそれぞれ単一液滴・高温固体面として存在する Leidenfrost 系の伝熱問題を本現象の1例として検討している．

第1章は序論であり，液体・高温物体間の伝熱現象の中心問題が固液接触に関する問題であることを指摘するとともに，問題の概念的整理と具体的問題提起がなされている．

第2章では，液滴と高温固体面との間に発生する固液接触に対し，高速度撮影を主体として現象論的検討を加え，常温固体面上で生ずる固液接触に比較し，濡れ速度の減少などの点で5つのタイプの障害が生じていることが示されている．

第3章では，高温固体面上で生ずる固液接触に対する障害と平均伝熱特性との関係が固液接触サイクルを媒介として Leidenfrost 点を例に論じられ，固液接触の周期性が Leidenfrost 点を境に変化すること，さらに，この変化の仕方から Leidenfrost 温度が非接触型・過熱限界型・核沸騰先行型の3つに分けられることが示されている．

第4章では，Leidenfrost 温度が固体面の熱慣性や熱容量の減少につれある漸近値に近づくことが実験的に示され，固体面の熱的性格の影響が実験的に示されている．また，固液接触時に生ずる接触面温度降下量が固液急接触から過渡核沸騰へ至る間の非定常熱伝導を考えることにより計算でき，このモデルと漸近 Leidenfrost 温度の整理式とにより Leidenfrost 温度を予測する方法が示され，実験結果とよく一致することが示されている．

第5章には，以上の結果をまとめた結論が述べられている．　（1980年3月発行）