

ライフライン系における地震防災システムの基本構造に関する考察

能島暢呂・亀田弘行

FUNDAMENTAL STRUCTURE OF EARTHQUAKE DISASTER COUNTERMEASURES IN LIFELINE SYSTEMS

By Nobuoto NOJIMA and Hiroyuki KAMEDA

Synopsis

Earthquake disaster countermeasures in lifeline systems have been analyzed under a notion that comprehensive operability of urban lifelines is requisite to urban earthquake disaster prevention. In this study, those countermeasures are classified into four categories: 1) improvement of structural resistance of system components, 2) network optimization and path rerouting, 3) system automation, and 4) disaster preventive operation by man-power. On this basis the present state of earthquake disaster countermeasures established by lifeline industries has been investigated, specifically, for water supply, city gas supply, electric power supply, telephone & telecommunication service, road traffic, and urban railway systems. Though diverse objectives and composition of individual systems prescribe available measures in each lifeline system, common structure in earthquake disaster countermeasures is definitely recognized. Earthquake-induced interactions among individual lifeline systems are also discussed, through which promotion of their closer communication and cooperation is emphasized.

1. 緒 論

近年の都市における人口集中, 社会資本の集積, 土地利用の高度化にともない, ライフライン機能の重要性はますます高まりつつある。1971年サンフェルナンド地震や1978年宮城県沖地震でライフライン機能障害が注目されたように, ライフライン地震災害は資産の損失にとどまらず, 社会的に及ぼす影響がきわめて大きい。そのためライフライン機能に重度に依存する都市において, ライフライン防災促進が急務として認識され, 多くの研究がなされてきた。

しかしこれまでに実際に整備されてきたライフライン地震防災対策は, 異なるシステム間では個別に扱われる傾向にあり, 比較して論じられることは少なかった。また個々のライフラインにおける対策は, 時間と経費の制約のためなかなか実現されないハード的対策をソフト的対策で補完するというように, ハード・ソフトの2面から捉えられてきた。しかし現実の対応は必ずしもこのように二元的にとらえきれものではない。例えばソフト的側面での対応にはハード的設備の装備が裏付けられていないと無いと成り立たないし, 全ての局面における通じて一貫した水準が保たれていないと, 地震時に効果が発揮されないものである。従来はこのようなライフライン地震防災対策のシステム間の関連や, 対策間の関連は余り問題にされることがなかったが, 都市地震防災の総合的な発展を図るには, このような対策の比較や対策の流れを明確に把握しておくことが重要と考えられる。

筆者らはこれまで、都市地震防災問題に関わる研究領域の分析¹⁾や、都市震害被害要因分析・波及分析²⁾を行ってきた。本研究では、それらの成果と上記の問題を踏まえ、ライフライン地震災害の低域を都市地震防災における総合的技術課題として捉え、各システムの地震防災対策を別々に考えるのではなく共通の視点から論じるものである。ネットワークという類似した構成からなるライフラインの地震防災対策の現状を同一のベースで比較・整理し、共通の概念を理解すると同時に個々のシステムにおける対策を規定する要因を探り、ライフライン地震防災の基本構造を考察する。以下にその手順を記す。

2. では分析に先だち、各ライフラインのシステムとしての役割と構成要素ごとの機能を整理するとともに、ネットワークの構成について考察を行う。また各ライフラインごとにネットワークのシステム特性とフロー特性を論じる。さらにライフライン施設に共通する特性と地震災害の被害要因に関連づけて論じる。

3. ではライフライン系の地震防災対策を横並びで分析する。まず分類の視点として「ハードとソフト」の考えではなく、物理的被害軽減対策、ネットワーク形態面からの対応、システム・オートメーション、人間の対応・作業の4項目を挙げる。次に各ライフラインにおける地震防災対策の現状を、上記の4項目に従って分析し、その基本構造を明らかにする。最後にリスク分析の概念からライフライン系の地震防災対策の問題点を抽出する。

4. では異なるライフライン間での地震時相互関連に着目し、今後の課題を検討する。

2. ライフライン系の特徴と地震被害要因

2.1 都市機能におけるライフライン系の役割

ライフライン施設は、都市機能を支えるために整備・集積されてきた社会資本である都市基盤施設の主要な一部であり、用排水、エネルギー供給、情報通信、交通を担うためにネットワーク状の構成をなす施設の総称である。ライフライン機能を簡単に分類し、主な用途を整理すると以下ようになる³⁾。

上水道	炊事、洗濯、風呂、洗面、水洗便所、医療、消防、冷却
工業用水	冷却、製品処理、温度調整
下水道	家庭污水・工業排水・雨水の処理
電力供給	照明、各種電源、動力、空調、熱源、通信、鉄道き電
都市ガス供給	調理、給湯、空調、熱源、産業用熱源
情報通信	電話、ファクシミリ、テレックス、データ通信、系統管理、オンライン
道路交通	通勤、通学、旅行、業務、物資輸送
鉄道交通	

都市機能にとってライフライン機能はまさに中枢的な存在であり、日常生活、サービス活動、生産活動、経済活動など全ての都市活動はライフライン機能に重度に依存しているといえる。すなわち、現代都市の利便性・快適性・保健性・安全性・合理性は、上のような多くのライフライン施設が互いに連携しあいながらそれぞれの役割を果たすことによって維持されているといえることができる。ただし本研究において以下では下水道処理については扱わないこととする。

またライフライン施設も都市の拡大にしたがってますます発展してきている。わが国におけるライフライン施設の利用の経過は次のようである⁴⁾。

生活用水需要	1983年対1975年比	1.21 (年平均増加率 2.4%)
工業用水需要	1983年対1975年比	0.86 (同 - 1.8%)
電気使用量	1985年対1960年比	6.03 (同 7.5%)
都市ガス販売高	1985年対1960年比	7.83 (同 8.6%)

電話サービスの加入者数	1985 年対 1970 年比	3.00 (	同	7.5%)
四輪自動車保有台数 (乗用, トラック, バス)	1985 年対 1961 年比	22.09 (	同	13.5%)
旅客輸送 (人, キロ) (国鉄及び民鉄)	1985 年対 1965 年比	1.29 (	同	1.3%)

工業用水については、回収水の利用が伸びたため使用量は減少しているが、他は概してめざましい伸びを示している。ちなみに、人口は 1985 年対 1960 年比 1.30 倍（年平均増加率 1.0%）である。比較年度が違うので単純には判断できないが、この資料からわが国ではライフライン系への依存度が高まってきている様子がうかがえる。

2.2 ネットワークの構成

ここではライフライン系を、ノードとリンクという従来の 2 つの概念に加えて、「サポーティング・システム」に注目し、供給システム、情報通信システム、交通システムのネットワークの機能を整理しておくこととする。

(1) ノード

需要、供給、中継などの機能を持つ節点と、機能を特に持たないが分岐、合流のための節点がある。

供給システム	……製造, 中継, 貯蔵, 変換, ポンプ, 制御, 調整, 消費, 合流, 分流
情報通信システム	……交換, 端末, 伝送装置, データ保存, データ入出力
交通システム	……ターミナル, 系統連絡, 分岐, 合流, 乗降

(2) リンク

ノード間を接続し、「内容物」を輸送・伝達する役割を持つ。

供給システム	……輸送, 圧送, 配給
情報通信システム	……伝送
交通システム	……輸送, 通行, 運行

(3) サポーティング・システム

ライフライン機能の運転をハード・ソフトの両面において支える施設、設備、機能、人間の行動、物資などを総称するものとする。各ライフラインが独自に整備しているものもあるが、他システムとの関連において後に 4. で論じるシステム間の相互連関の問題が生ずる場合がある。

[運転系]	……動力, 照明
[制御系]	……監視, 計測, 調整
[情報伝達系]	……システム運転状況, 操作指令, 被害状況, 復旧指令
[マン・パワー系]	……オペレーター (判断, 操作) 復旧人員 (維持管理, 復旧活動, 点検)
[物資系]	……構造要素のストック, 燃料, 重機, 原料物資輸送

ライフラインの大きな特徴は、上に示したような機能を持つ多種多様な構成要素が、階層構造をなして全体のシステムを築いていることである。供給システムにおいては、伝達される物の流れは供給ノードから上位の施設、下位の施設を経て需要ノードに達する。また情報通信、交通システムにおいては、起点から上位の施設を経由し、終点に至る。

一般的に、要素構造物はその階層的 position が上位の物ほど要素数が少なく、施設一つが担当するサービス区域は広いものとなる。伝送経路は上位にあるほど大量の物を運ぶ必要があるため、大口径・大容量のリンクが使用される。また電力・上水道・ガス供給システムの幹線では、輸送によるエネルギー損失を低減するため圧力や電圧が高くなっている。

これに対して、階層的 position が下位の施設ほど要素構造物の数は多くなり、一つの施設が担当するサービ

ス範囲は小さくなる。また、下位の伝送経路では、高い圧力や大きな容量をあまり必要としないことや、コスト面での配慮などから、小口径・小容量のリンクが用いられる。

具体例として、首都圏の都市ガス供給網の延長距離をみると、高圧管（長距離輸送幹線）が 460 km，中圧 A 管（中距離輸送幹線）が 1460 km，中圧 B 管（地区輸送管網）が 3190 km，低圧管（供給導管網）が 34370 km となっている。

ライフライン地震防災では、地震時信頼性を評価する目的で、ライフラインをノード・リンクよりなるネットワークとして捉え、システム工学的視点から、グラフ理論、確率論、集合論を応用した解析的手法、あるいはそれらをモンテカルロ・シミュレーションと結合した手法などにより、ノード間の連結性解析を行う方法論が多数提案されてきた⁵⁾⁻⁹⁾。これらは、ネットワークのトポロジカルな性質の解明をもとにして、需給節点間の連結性を議論する研究である。さらにこれまで、被災したネットワークにおける、ライフラインが輸送・伝達すべき内容物の性質、例えば漏水下での損失水頭などを考慮に入れ、より現実的にライフライン機能の充足率を評価する研究が行われている^{7), 10), 11)}。

2.3 各ライフライン系のシステム特性とフロー特性

ライフラインシステムが持っている様々な特性を、フロー種類と方向性、それに伴う性質として、伝達経路とその設置位置、伝達速度、貯蔵機能の有無、代替サービス手段、緊急時の機能・特性、二次災害危険要因について各ライフラインごとにまとめたものを Table 1 に示す。

上水道、都市ガス供給システムは水・ガスというフローの性質により伝達経路は管路となる。流体の圧送を行うため輸送速度は遅い。また都市の方々に分布する貯水池やガスホルダーなどの貯蔵施設・中継施設による供給調整が可能である。上水道は市町村を中心とする自治体が事業者であり、規模は他と比較して小さい。緊急時には消火、生命維持など幅広い範囲で不可欠となり、断水を可能な限り回避することが防災上の重要課題となる。

ガス供給は、大都市においては数県をサービスエリアとするガス会社が事業体となる一方、中小都市では自治体がガス供給を行っている場合もある。ガス漏れは火災・爆発などの波及的災害の原因となるため、二次災害防止対策が重視されている。また緊急時にガス供給を遮断すると復旧にきわめて長時間を要する。

電力供給システムでは、電線を伝達経路として使用し電気は瞬時に伝達される。電力供給を行っているのは全国で 10 社でシステム規模は大きい。サービス調整のための貯蔵機能はなく、また電源の脱落や需要の急減などにより需給のバランスが崩れると、系統事故が発生して被害地域以外にも影響が広がるおそれがある。

通信は、電気的手段を用いて行われているため伝達は瞬時になされ、伝達手段はケーブル・光通信ケーブル・電波など多様である。発信・着信は任意に発生し、交換機を介して連絡される。システム規模の面では、市内通信、市外通信から国際通信まで幅広い。

道路交通システムも方向性は定まっておらず OD は様々である。規模は市街地の一般道路、都市高速道路、全国 4400 km 余りに及ぶ高速道路まで多岐にわたり、階層的構造をなしている。一般道では交通信号による制御がなされる一方、高速道では緊急時にアクセス・コントロールがなされる。また多くの埋設管は原則として公共道路の下に埋設する事とされているうえ、配電線・通信線も架空線・埋設ケーブルとして道路沿いに設置されており、街路はライフラインの非幹線施設の保管機能をも果たしているといえることができる。

鉄道交通においては、車両が専用軌道を走行する形態となっている。他と著しく異なるのは、人命・物資の大量輸送を担っているという点、及び定時性の維持が重要である点である。また、一日数十万人が利用するような大ターミナル駅での列車の遅れは、利用客の過集中や混乱を引き起こすおそれがある。

このようにライフラインのシステム特性には、それぞれに特徴的な側面が存在する。これらの特性と地震防災対策の関わりについては、後に 3.4 で議論する。

Table 1. Distinctive Features of Each Lifeline System

	flow	size	drift of flow and network component	flow speed	storage	location of links	alternative measures	emergency function	dangerous factor	emergency considerations
water supply	potable industrial	municipal prefectural	one way (reservoir, aqueduct, filtration plant, main and local distr. pipes, service reservoir, feed-water pipe)	slow	storage dam, reservoir, water tank	abovegd. (arterial)	water wagon, fireplug	fire-fighting, medical care, coolant	water leak, inundation, water pollution	priority-based supply for emergent use
city gas supply	gas	municipal ~several prefectural	one way (gas plant, gas holder, governor, high-, middle-, and low-pressure gas pipe)	slow	gas holder, gas governor	undergd. of street (peripheral)		heat source	fire, explosion, poisoning.	careful inspection after blocking
electric power supply	electricity	several prefectural	one way (power plant, substation, transmission & distr. line)	fast	none	abovegd. (arterial)	power generating car	power source, illumination, heat source	elec. leak, voltage drop	priority-based supply
telephone and telecommunication	signal	local ~ toll ~ inter-national	two way (telephone, tel. wires & cables, switchboard, tel. office, repeater, radio relay)	fast	none	undergd. street & overhead wires (peripheral)	temporary circuit using radio channel and portable tel	disaster information		excessive requirement in emergency
road traffic	vehicles pedestrian	street ~ expressway	two way (street traffic signal, tunnel, bridge, elevated highway, expressway, interchange)	slow	none	elevated, abovegd.		emergency transp., evacuation route, repair activities	traffic accident	access control, debris removal speed reduction
urban railways	railway vehicles	streetcar ~	two way (station, junction, CTC, CSC, railroad track, heavy power feeder, light power supply)	slow	none	elevated, abovegd., undergd.		emergency transp., evacuation route	train accident	

2.4 ライフライン共通の特徴の整理と地震被害要因

個々の建築物・土木構造物の耐震性評価や地震対策を考える場合、一つの構造物は単体として扱われるためいわば点的な考え方が主となり、物理的被害発生の有無、人命の安全性、地震後に構造物が安全に使用を継続できるか、といったことが主たる問題となる。一方ライフライン施設は、それぞれのシステムは構成要素や機能の面からみると異なるものであるが、ネットワークによって都市内に面的に広範囲にわたって分布する形態をとることと、システムとして一定の機能保持が必要であるという使命のため、ライフライン地震災害特有の共通の問題が生ずる。ライフライン地震防災においては、要素構造物の耐震強化、被害発生数・位置の予測から、ノード間の連結性能の解析、システム機能性能の評価、復旧戦略の策定、復旧予測に至るまで様々な努力がなされてきているが、ここでは問題を再整理するため、ライフライン施設に共通する特徴をシステムの側面・物理的側面・機能的側面に分類し、地震災害要因と関係づけて論じることとする。

(1) システム的側面

(a) 広域ネットワークを構成すること

物理的被害の発生数・発生位置には、様々な規模の地震によって無限のパターンがあるし、その影響波及の様相もさらに多くの場合が考えられる。つまりライフラインのような広域的で巨大なシステムでは、地震被害の不確定要素が非常に多い。また現代における都市活動の広域化に伴い、軟弱地盤などの地盤条件の悪い地域を避けた理想的なシステム設計は事実上不可能である。規模が大

きいと、場合によっては被害を免れた地域からのサービスが可能になるという利点もある一方、どこかに被害が生ずる可能性が高くなる。

(b) ネットワークの階層的構造

ライフラインは、リンクにおいては幹線・支線、ノードにおいてはセンター・中継所・末端というように階層構造をなしたネットワークにより構成されている。階層的にランクが上位にある要素の被害ほど、システム全体の機能に与える影響が大きく、被害発生地点より下位に相当する部分でサービスがストップし、その影響が物理的被害の無かった所にまで波及する。また系統制御や情報通信などの中枢機能の喪失は、システム全体のダウンにつながる。被害予測は実際には階層的に上位の要素に対してのみ行われることが多い。一方、下位にある要素は要素数が膨大であるため十分な耐震的配慮が行き届かないし、維持管理及びシステム制御も困難となる。過去の震害例をみてもこの部分に被害が多発する傾向がある。

(2) 物理的側面

(a) 要素構造物が多様であること

2.2 でふれたように、ライフラインは大まかに分けるとノード、リンク、サポーティング・システムからなっており、それぞれが多くの種類の構成要素からなっている。埋設管だけをとってみても、管の材質・管径、あるいは継手の種類など構造的な多様性に加え、破断、屈曲、座屈、抜け出し、緩みなど複数の破壊モードが存在し、被害関連要因は非常に複雑多岐に及ぶ。構造物の耐震性は今日ではかなり改善され、また過去の震害経験からそれぞれのシステムにおける弱点が明らかにされつつあるものの、精度の良い被害予測は難しい。

(b) 要素構造物が多数あること

都市全域にくまなく張り巡らされたライフライン・ネットワークの構成要素は膨大な数に及ぶ。このような傾向は、階層的に下位のレベルにある要素になるほど顕著である。そのため、耐震化を施したり設備の更新を行うには限界があり、ある程度の被害は避けられない。また緊急時における被害の全貌の把握は非常に困難である。

(c) 埋設管・埋設ケーブルが多く使用されていること

埋設管は地盤ひずみや液状化、地盤変状の影響を強く受ける。地中構造物の動的挙動は従来の一連の研究により明らかにされつつある（例えば文献12）などが、液状化や地盤変状に関しては定量的に正確な予測が困難である。また、被害発見が困難であることや被害箇所の修理には道路開削・埋め戻し作業が必要なことから、一般的に復旧にかなりの時間を要することになり、場合によっては被害の影響が数年にわたって認められることがある¹³⁾。

(d) ほぼ整備が完了した施設であること

長期にわたって整備されてきたライフライン施設には、古い設計基準・施工法に基づくものや、腐食・老朽化によって強度の劣化した構造要素も残存する。しかし、現行の耐震基準を満たすために全面的な耐震改修・補強もしくは設備更新を行うには、膨大なコストがかかる。

(3) 機能的側面

(a) サービスの品質低下

ライフライン地震災害の特徴として、ノード間連結性喪失やサービス遮断・制限による機能停止のほか、サービスの品質低下が挙げられる。各ライフラインが保持すべき機能の品質を以下に列举する。

上水道	………水圧、水質
ガス供給	………ガス圧、安全性
電力供給	………電圧、周波数、安全性
情報通信	………容量、連絡の迅速性、情報信号にノイズが無いこと
道路交通	………通行速度、安全性
鉄道交通	………運行速度、定時性、安全性

これらのライフライン機能の現実的な地震時信頼性評価のためには、特定の物理的被害パターンに対するネットワーク連結性解析に加え、各フローの特性を考慮した流量解析・潮流解析を必要とする。

(b) 緊急時の重要性が大きいこと

ライフライン機能は、被災時には平常時よりも機能が低下するにもかかわらず、消火活動や救急活動、被害情報の伝達、災害報道、復旧活動など、緊急対応を行うためにはその必要性はさらに高いものになる。行政・医療・報道機関等の重要施設に対して優先的なサービスを行うことや、発生位置が予測できない火災の消火用水を確保する、というように状況に応じた体制をとる必要がある。

(c) 二次災害の危険

ライフラインは水やガスなど何らかの形の物を運ぶ施設であるから、ライフラインの地震災害には、物理的被害・機能的被害に次いで人命を脅かすような二次災害が発生する危険性がある。ガス漏れによる火災・爆発や、道路上の障害物、鉄道軌道の損傷による事故などである。

(d) 時間依存型の被害の様相

被災後の対応が被害の時系列的・空間の様相を左右する。時間的にみると被害の様相は、地震発生後の緊急対応、短期的応急処置、長期的復旧に応じた独特の挙動を示す。しかも復旧対応においては、完全復旧までの時間の最短化、重要施設への優先サービスの重視、あるいは全復旧過程を通じての総被害の最小化、など複数の判断基準のもとでの意思決定が必要である。また時々刻々と変化する状況の把握および行動基準のマニュアル化は難しい。

(e) ライフライン・システム間の相互連関

ライフライン系はそれぞれが独立に機能するのではなく、相互に依存した統合システムとしてはじめて都市機能維持という使命を果たしうるものである。このためライフラインの地震被害では、地震発生から復旧に至る過程で、被害相互波及や復旧障害など様々な相互連関が生じる。これについては4.で論じることとする。

以上、ライフラインに共通するシステム特性と地震災害の関連をみてきたが、これらの問題には、明らかに解決不可能なものも含まれる。解決可能な問題の中から、都市地震防災の見地に基づいて工学的な課題を見いだして行く必要がある。

3. ライフライン系の地震防災対策の分析

3.1 分析の視点

ライフライン系の地震被害波及の構造を大まかにみると、①ネットワークの構成要素が地震動・地盤振動・地盤変状によって物理的損傷を受ける、②施設・経路の被害に起因する機能障害がシステムのネットワーク性によって波及する、③ガス漏れ、浸水、漏電などの危険要因を伴う二次災害が発生する、④復旧作業に時間を要し、機能障害が長期化して都市機能の低下に発展する、となる。

これらの被害を総合的に軽減することが、ライフラインの地震防災の目的となる。①～④の被害と対応させてその目的を分類すると、①構造物被害の最小化、②サービス支障地域の最小化、③二次災害の防止、④復旧作業の合理化・迅速化となる。

本研究では、このようにあらゆる目的を含むライフラインの地震防災対策を、(a) 物理的被害軽減対策 (b) ネットワークの形態面からの対策 (c) システムの自動化 (システム・オートメーション) (d) 人間の作業・判断の4つの項目に分類し、これらを共通の視点として地震防災物策について考察を行う。この4つを選んだ理由は、それぞれの目的とするところや、必要なコスト、整備に要する期間、取りかかるべき時期などが顕著に異なるからである。

また地震の発生前後の様々な局面で対応が必要なことからライフライン事業者の地震防災対策を、事前

策、緊急対応、復旧作業という共通の時間軸上でみる。事前策とは地震発生前に地震を想定してあらかじめ策定しておく対策である。緊急対応は、地震発生直後に当面の危険回避やシステムの維持のため被害の様相に応じてとられる対策であり、地震発生後数秒～数時間の間で行われる。復旧作業は、ライフライン系の機能を平常時のレベルまで安全かつ迅速に回復させるため復旧段階にとられる対策であり、その期間は数日～数カ月に及ぶ。

本研究ではライフライン事業者が策定・実行している具体的な地震対策を以上の視点に基づいて (a)～(d) の 4 項目に分類し、文献 14)、15) やライフライン事業者が発行するパンフレットなどを参考にいくつかの事業者について整理を行った。整理の方法としては縦軸に 4 つの地震対策を、横軸に時間軸をとりマトリクスを作成した。本研究でまとめたのは、供給システムとして上水道事業者、都市ガス事業者、電力事業者を、情報・通信システムとして電話・通信事業者、交通システムとして道路事業者と鉄道事業者の計 6 事業者の地震防災対策である。個々の詳しい分析については文献 16) を参照されたい。

3.2 ライフライン地震防災のシステム間における共通点

ここではライフラインシステムの各特性と地震防災対策について総合的に捉えるために 3.1 の (a)～(d) の視点から分析し、共通の要因を探る。Table 2 は各システムに対して作成したマトリクスの共通要因をまとめたものである。以下に (a)～(d) のそれぞれについてみて行くこととする。

(a) 物理的被害軽減対策

事前策としては、①埋設管や継手などの要素構造物に強度の高い材質を使用したり、変位吸収能力を高める設計や応力集中を避ける工夫を施して耐力を向上させる、②屋内機器・屋外施設の転倒を防止するための耐震安定化や建屋の不燃化を促進する、③施設を支持する基礎地盤や伝送経路周辺の地盤に各種の地盤改良工法を適用し、軟弱地盤での支持力低下や液状化発生を防止する、④既存構造物の点検を行って所定の耐震水準が満足されているかチェックして必要ならば補強または更新を行う、などの対策がある。

また緊急対応・復旧作業には、巡回点検作業、被害構造物の応急復旧、危険防止措置、設備本復旧がある。

(b) ネットワーク形態面からの対策

ネットワーク形態面からの対策は、ある程度の構造物被害が生じたという状況下でもネットワークを制御することによって、可能な限りサービス機能を維持するとともに、安全かつ迅速な緊急対応・復旧作業を行うことを目的としている。物理的被害軽減対策をネットワークの「点と線」の強化とすればこの対策は「面」の制御による対策といえる。この対策には、信頼性の高いシステム設計を行うというハード的側面があると同時に、系統復旧やバルブ制御を的確に行うソフト面での対応が不可欠となる。被害構造物が復旧されて行くに従い、アクティブ・ネットワークは平常時の形態に復帰する。この種類の対策として、多ルート化、バックアップ、ブロック化があるがこれについては後に 3.3 で詳しく述べることとする。

(c) システムの自動的な対応 (システム・オートメーション)

様々な危険が急迫し、かつ非常に混乱した状況が予想される被災直後の局面では、人間の判断・操作を介する事なく制御が行えるシステムが有効となる。またシステム運転状況の異常察知が震後対応の重要な判断材料となる。このような理由から、システム・オートメーションによる対応が整備されている。コンピュータ・システムやテレメータで平常時にはシステムの運転の管理・制御を行い、地震時にはその情報に基づいて、系統制御やサービス遮断などの対応を自動的に行うものである。

ネットワークが巨大で埋設管が多く含まれるライフラインでは、被害発生位置の確認が容易ではない。そのためライフライン事業体が独自に地震観測網を整備して被害緊急予測の一助としている場合もある。

(d) 人間の対応・作業

災害対策基本法の定める指定公共機関・指定行政機関に該当するライフライン事業体はそれぞれ地域防災計画・防災業務計画を作成し、災害時にとるべき措置を定め、防災体制の整備に努めることになってい

Table 2. Earthquake Disaster Countermeasures of Lifeline Systems

	advance preparation		emergency operation	recovery works
	strengthening of components	material of pipes, rigidity, ductility, expansion joint, stability of bldg. & eq.		
upgrading seismic performance of components	improvement of ground condition	liquefaction-proof method, drain, bearing pipe, improvement of soft gd. route optimization.	secondary disaster prevention. patrol, debris removal. provisional restoration. installing temporary components.	patrol. inspection of facilities. repair of damaged equipment. repair & renewal of damaged components.
	management & maintenance	inspection & diagnosis, reinforcement & retrofit, renewal.		
	pluralizing flow pattern	multi-links, looping, system interconnection.		
improvement of network organization	backup equipment	independent power plant, coolant, storage cell, standby wireless, exclusive telephone line.	starting backup equipment	network normalization
	subdivision of network	zonal blocks	emergency zonal blocking	
	system control	automatic system control	automatic blocking, automatic stopping, signal.	
implementing system automation	information system	telecontrol system service observation, telemeter, monitor, seismic observation.	damage detection & identification, detection of abnormal condition, seismic intensity distribution.	removing control
	restoration strategy for imaginary disaster supporting system to optimize restoration, operation manual, database system for recovery works, stock of materials, simulation & training, inter-assistance plan among industries.		emergency planning, collecting worker & materials, collecting damage information, maintaining emergency service, selective blocking, path rerouting, secondary disaster prevention, service moratorium, decompression, information publicity, off limit to dangerous zone, warning to user, demand control.	
operation by man-power				restoration strategy for actual disaster, collecting restoration information, restoration order with various criteria, priority on important facilities, degree of damage, hierarchical rank in total network, directing restoration party.

る。該当しない場合にもこれに準じた防災計画が作成されている。

ここでは人間の対応・作業は、人間の意思決定・判断によって行われる緊急対応・復旧作業、及びこれを支援するための事前策を含めた体制のことを指す。

事前策としては、被害予測や最適復旧過程の分析に基づいた、想定地震に対する復旧人員配置・資機材備蓄・事業体間の援助体制などを含む復旧戦略の策定、支援システムの整備、被害想定訓練などがある。

緊急時には地震情報・被害情報をもとに、多重化・バックアップ・ブロック化などのシステム形態を活かした系統切り替えや供給遮断が行われる。また危険防止・被害軽減のため、利用者へ被害情報を提供して注意を喚起するとともに利用自粛を呼びかけて被害軽減を図る。

復旧作業としては、復旧作業に必要な人員・資機材を準備し、予め作成した想定復旧戦略と現実の被害を照らし合わせながら手段の決定、復旧班への指示を行って被害状況に応じた的確なシステム修正作業を図る。復旧作業の順位決定は、重要施設の優先サービスや被害の程度、被害地点の階層的な位置など、様々な判断基準のもとに策定される必要がある。

次に各ライフライン事業者における地震対策が、地震前、地震後の様々な局面においてどの様に関係してくるかをライフラインの地震対策の共通の流れとして表した (Fig. 1)。

地震の発生直後、システムを稼働させるのに必要な電力が失われた場合、自家発電機などのバックアップ機能が自動的に作動する。また地震観測システムによって地震動強度分布を把握し、供給監視システムによって被害状況を推定する。サービス異常が顕著であったり二次災害危険性のためにサービス継続が困

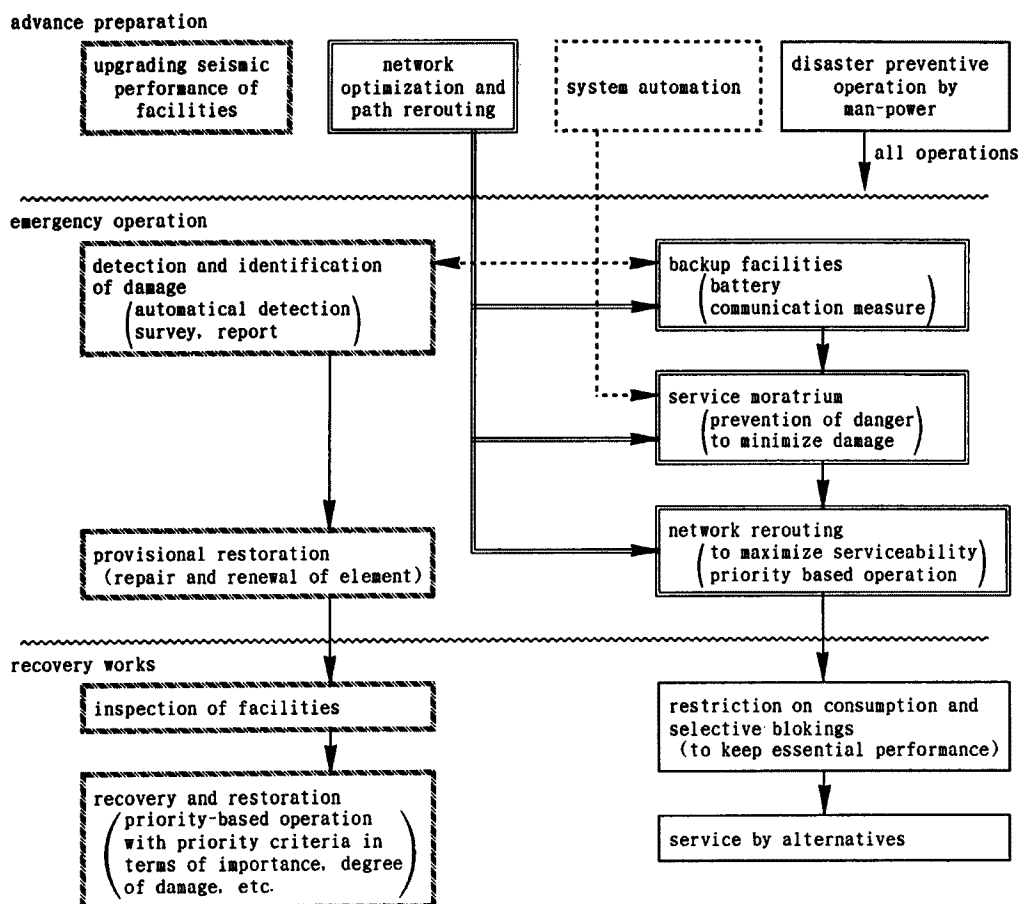


Fig. 1. A Common Structure in Earthquake Disaster Countermeasures of Lifeline Systems.

難な場合、サービス遮断が行われる。これらは物理的被害の発生後まもなく起こる被害の波及を最小にしようとするものである。

次の段階としてネットワーク形態を活かした系統制御を施し、サービスが停止した地域へのサービス再開を図る。また被害構造物の応急復旧を行い、サービス可能地域を最大化し、重要施設への優先サービスを図る。

地震対策の最後の段階では、システム全体にわたるサービス機能回復のため本格的に復旧作業を行い、平常時のシステムに徐々に近づけて行く。この間、生命維持や復旧作業など最優先されるべき防災行動に対しては、代替手段によるサービスを続けていく。

このような作業を円滑に進めるには、適切なネットワークの形成、システム・オートメーションによる種々の情報提供、災害対策のためのマニュアル作りと訓練など、全ての地震防災が大きくかかわっている。このように、個々の対策は独立なものではなくあらゆる局面で結び付いている。スムーズな対応を行うには、それぞれの水準の向上とともに、整合性のとれた総合的な対策になっている必要がある。以上のような共通の流れがライフライン系の地震防災対策にみられる。

3.3 地震防災対策としてのネットワーク形態

ライフラインシステムにおける地震防災対策の顕著な特徴の一つは、システムのネットワークの形態を制御して系統復旧を行うことである。

信頼性工学の分野では、システムの冗長性は能動型 (active type) と待機型 (standby type) に分けて考えられている¹⁷⁾。前者においてはシステムを構成する全ての構造要素が荷重を負担しているのに対し、後者の冗長要素は平常時には働かずシステムの一部の要素が破壊したときに切り替えられて機能するものである。能動型冗長システムでは要素の破壊は他の要素への負担増を意味するが、このことはライフライン・ネットワークにおける容量オーバーに類似している。両者を図で示すと Fig. 2 のようになる。いずれにしても、システム的に最弱リンクである直列システムになんらかの冗長要素を加えてタイセット (tie-set) を増加し、システム信頼性を向上させるものである。すなわち fail-safe の概念に基づき、一部の被害がシステムとしての機能破壊に結び付かないようにすることを目的としている。

ここでは 2.2 で分類したネットワークのリンク、ノード、サポーティング・システムにおけるネットワーク形態面からの地震防災対策を、能動型冗長システム、待機型冗長システム、サブシステム分割の概念によりシステム論的に整理した結果を Table 3 に示す。

リンク機能の面から冗長性を高める方法には、多重化、ループ化、ルート分散、系統間連絡などがあり、実際の地震防災対策の中ではこれらが複合的に適用されている。ここではそれらを総称してリンク機能の多ルート化と呼ぶこととする。すなわち伝送経路を複数化することにより、ある経路のリンクやノードが被害を受けても別の経路が安全な場合にはネットワークの連結性が保たれるようにする対策である。

多重化は、ノード間を連結する経路を複数化することによって、システム信頼性を向上することを目的としている。リンクを複数化する場合と、ネットワーク内に非常用のリンクを設置しておき緊急時に迂回ルートとして使用する場合がある (Fig. 3(a))。

ループ化は、サービス経路をループ状にしておくことで結果的に 2 方向からのサービスが可能となるようにしておき、経路が被害を受けてももう一方からの経路を用いてサービスを続ける方法である (Fig. 3(b))。ループ化とここで呼ぶ方法の具体的な形態はライフラインシステムによって様々である。

ルート分散は、複数のリンクを集中的に設置するのではなくできるだけ分散させて設置することにより、

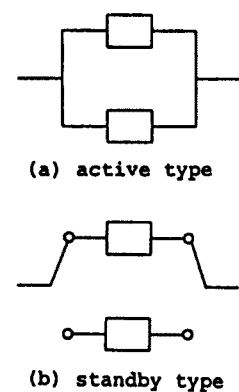


Fig. 2. Redundant System.

Table 3. Network Design and Implementation for Earthquake Disaster Countermeasures

	node	link	supporting system
redundancy (active type)	dispersion of supply nodes pluralizing supply nodes	pluralizing flow pattern: multi-links looping dispersion of links system interconnection	dispersion of central control device double installing of electricity
redundancy (standby type)	alternative measures for service: water wagon, power generating car, portable wireless installation, etc.	spare links	back-ups: independent power plant storage cell standby wireless walkie-talkie coolant
subdivision of network		zonal blocks	

危険を分散して経路の全滅を回避するものである Fig. 3 (a)。

系統間連絡とは、隣接している系統間を連結し、機能障害時に他系統からのサービスが受けられるようにしておく方法である (Fig. 3 (c))。

冗長性を高めるために加えられたこれらのリンクを平常時から使っている場合は能動型冗長システムであり、緊急時のみ使用するように設置されている場合は待機型冗長システムということになる。以上の方法を組み合わせた、多ルート化の例を Fig. 3 (d) に示す。

ノード機能の面から冗長性を高める手段として、一つのサービス区域を担当するノードを複数化し分散して配置し、平常時はそれぞれ分担してサービスを行うが、非常時には互いに援助し合い災害時の危険性を分散する方法がとられている。

バックアップは、主としてサポーター・システムの安全性を対象とするものであり、被害を受けた施設に代わって緊急時に機能を補えるような施設を配置・連結しておく体制の事である。中枢機能を分散したり、受電系統を

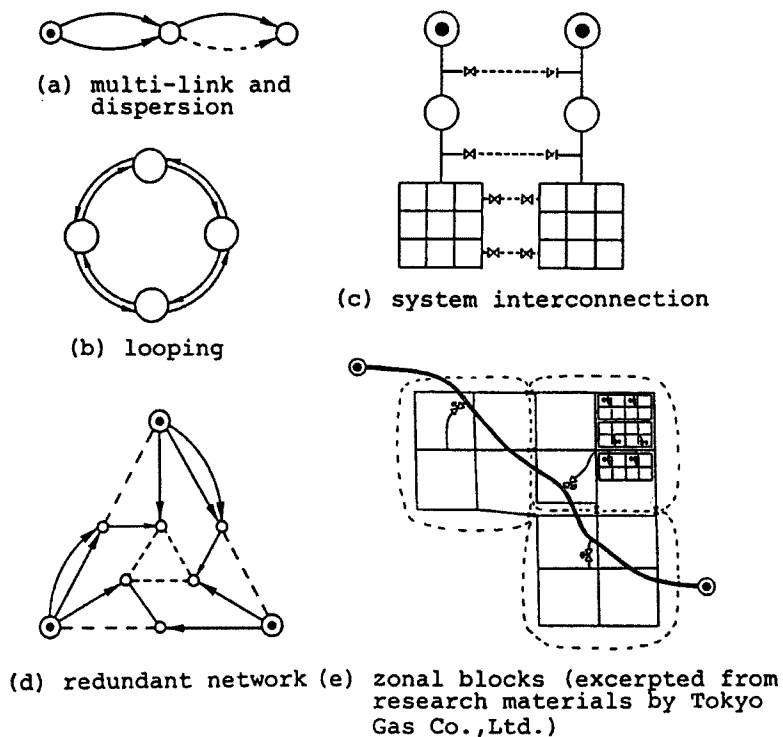


Fig. 3. Network Design for Lifeline Systems.

2回線設ける方法は能動型冗長システムである。また、自家発電機や蓄電池による電源バックアップや、非常用の通信手段を無線方式などで用意しておく対策は待機型冗長システムである。

ブロック化は、ネットワークをあらかじめいくつかの供給ブロックに分割できるようにしておく対策であり、上水道やガスなど供給網が特殊な形態となっているシステムでとられている。緊急時には被害の程度に準じてバルブの閉鎖等を行い、供給網をいくつかのサブシステムに分割して機能障害区域を極限化し、緊急復旧計画の策定・実施を合理化するとともに、二次災害を防止するものである。ブロック化された供給網は、平常時にはシステム管理の単位として利用される。Fig. 3(e)に都市ガス導管網のブロック化の概念図を示した。

上水道システムにおける給水車など代替手段を用いたサービスの継続は、システムの機能障害時にシステムの機能そのものを補う対策である。これまでに述べた方法とはかなり趣は違うが、システム全体に対する待機型の冗長システムと解釈できる。代替サービスは自動車を用いて行われるため、道路交通システムに依存している。

次にライフラインの大きな特徴であるネットワークの階層構造と地震対策との関連について調べるため、ネットワーク内でそれぞれの階層にある要素が耐震化のためにどのような対策をとっているかをまとめた(Table 4)。

上位の施設については、重要性が高いことや要素数が比較的少ないことから、地震時構造物の物理的被害を抑える対策を中心とした一系統の強化がなされている。さらに信頼性を向上させるためにネットワーク面からの対応が付加されているものもある。これに対し下位の施設については、対象となる要素の多さやシステムとしての維持管理の困難さから、被害時における連結性の確保のためのネットワーク面からの対策が中心となっていることがわかる。システム間で重点の置き方は異なるが、だいたいこのような傾向が共通して認められる。

3.4 ライフライン地震防災のシステム間における相違点

Table 1 でまとめた各ライフライン系の特性とライフライン事業者の地震対策との関連及び各システ

Table 4. Hierarchical Ranking and Earthquake Disaster Countermeasures

		components	strengthening	dispersion	multi-links	looping	system inter-connection	zonal block
water supply	node	filtration plant pumping equipment	○ ○					
	link	aqueduct transmission main distr. pipes local distr. pipes	○ ○		○	○	○ ○ ○	large small
city gas supply	node	gas plant governor station	○ ○					
	link	high-pressure pipe main middle-pressure local middle-pressure low-pressure pipe	○ ○	○	○ ○	○	○ ○	large small
electric power supply	node	power plant substation	○ ○	○				
	link	transmission line distribution line service wire	○	○	○ ○	○ ○ ○	○	
tel. service	node	switching machine	○	○		○		
	link	toll line local cable lead wire			○ ○ ○	○	○	

ム固有の問題について考察する。Table 5 はライフラインのシステム特性と地震防災対策との対応をみたものである。

電力、情報通信システムはシステム規模が大きいいため、地震時において被害を受ける区域は全体からみるとごく一部である。また電気信号を扱うシステムのためフローの迂回速度が速い。この利点を活かし、広範囲での系統切り替えなどを行って、無被害区域の施設を利用した相互援助によるサービスの継続が有効になる。これに対し上水道システムは一つの系統の規模が小さいため、隣接系統の接続によって多ルート化がなされている (Fig. 3(c)参照)。

上水道と都市ガスは、伝達物が流体であるため、システム内のフローの貯蔵機能を持たせることが可能であり、ブロック化された供給網に対する供給拠点として貯蔵施設を利用した対策が有効になる。また上水道では自然流下が可能な場合は、地震時に停電になっても残存する水による供給が行える。

都市ガスや鉄道交通などでは物理的被害が二次災害につながる可能性が高いため、感震供給遮断装置や ATS などのシステム・オートメーションによるサービス停止機能が整備されている。特に都市ガスシステムにおいては、二次災害防止策に力がいれられ、閉栓してから開栓まで綿密なテストを行うことによってガス漏れを防止するとともに利用者に注意を呼びかける。電力システムでは自動給電装置が導入されており、平常時のシステム管理を行い、緊急時には系統事故防止のための保護リレーシステムが起動する。

緊急時の重要性が高いシステムはサービス途絶による影響が大きく、サービス再開の迅速性が要求されるため二重三重の安全対策が施されるとともに、利用制限や優先サービスを通じて緊急時にも最低限の要求には対処できるようにされているのがわかる。情報通信システムでは地上の通信施設のダウンに備え、衛星通信を利用した機能維持が計画されている。

3.5 リスク分析の概念からみたライフライン系の地震防災対策の問題点

Table 5. Earthquake Disaster Countermeasures Characterized by System Features

	total system scale	flow	priority in emergency	secondery disaster prevention
water supply	small system inter- connection	slow, storable zonal block supply	selective blocking demand control water wagon	blocking
city gas supply		slow, storable zonal block supply		decompression automatic blocking patrol careful inspection compression test warning to user
electric power supply	large large-scale rerouting	fast, unstorable large-scale rerouting	selective switching demand control pwr generating car	protection relay automatic supply control
telephone and telecommu- nication	large large-scale rerouting	fast, unstorable large-scale rerouting	selective blocking of non-emergency call dial regulation setellite radio communication extra circuit making	
road traffic			access controll no passing	no passing speed reduction damage inspection patrol
urban railway				CTC (Centralized Train Control) ATS (Automatic Train Stopper)

これまで整理したライフラインシステムにおける地震対策の問題点について、主にリスク分析の観点から考察する。

リスク分析の分野におけるリスク評価体系を Fig. 4 に示す¹⁸⁾。地震防災対策では、想定された様々なレベルの地震 (risk determination) に対して、ある程度の被害が起こることを許容し (risk acceptance)、残りの部分に対してリスクを回避 (risk aversion) するというリスク判断 (risk evaluation) がなされるものと解釈できる。

地震の発生それ自体は制御不能リスク (uncontrollable risk) であるが、地震対策を施すという意味ではライフライン事業体を行動主体 (action-taking agent) とする制御可能リスク (controllable risk) である。

ここまでにみてきたライフライン地震防災は、ある程度の物理的被害を許容するが (acceptable)、機

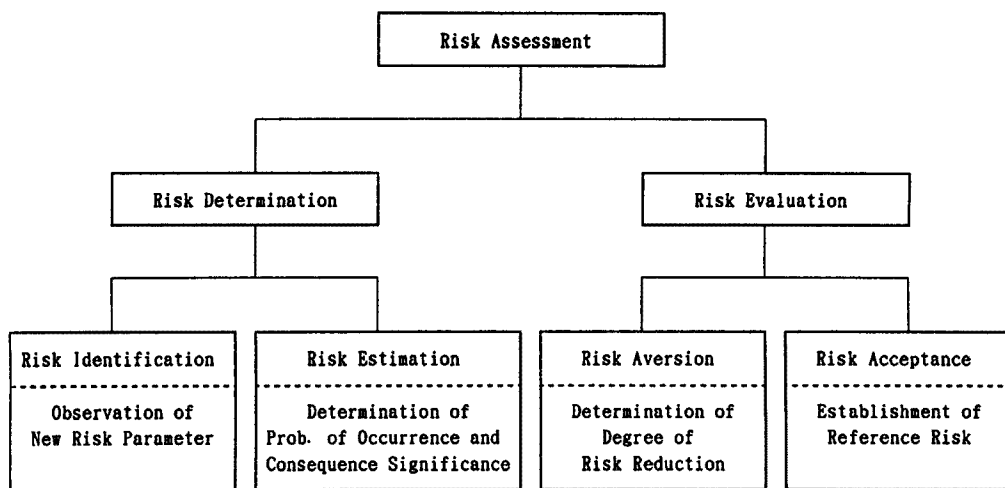


Fig. 4. System of Risk Assessment.

能全滅は許容せず (unacceptable) 「最低限」の機能は維持するという考えに基づくと考えられる。リスク分析に時系列的な概念を持ち込むのは必ずしも適当ではないかもしれないが、復旧過程において「最低限」のレベルが徐々にアップすると考えられる。すなわち、一日の機能停止は許容できるが一週間は許容できないといった側面である。施設の重要度によっては、一瞬の機能停止も許されない。ライフライン地震災害では、システム・オートメーションや人間の対応・作業などによる震後対応が大きな役割を果たすため、地震という「自然系リスク」の他に、「人間系リスク」、「人工系リスク」が複雑に絡んでくるのが特徴的である。

以下では主として文献 19) によるリスク分析の観点から、3.2 で分析した 4 種の対策について問題点を挙げる。

(1) 物理的被害軽減対策

ライフラインにおける構造物被害の発生には、2.4 でみたように多くの要因が影響を及ぼす。すなわち被害事情 (hazard) と被害客体 (loss-suffering agent) がともに不確定要素を多く含むためリスク決定それ自体が困難である。また膨大な要素構造物を持つシステムの全面的強化は望めない。しかしこの対策が被害軽減のための最も直接的・積極的な事前策 (pre-loss control) であることを認識し、長期的な展望に基づいて敷設替えや既存施設の強化、地盤対策を行っていくことが必要である。経済的な観点からみると、この対策を施すには優先順位の決定が重要である。システムが階層構造をなすネットワークでは、個々の要素の構造重要度、確率重要度、クリティカリティ重要度などを与える重要度解析²⁰⁾が有効に用いられる。

(2) ネットワーク形態面からの対応

ネットワークの多ルート化は、耐震化が余り行き届かないネットワーク下層部の要素群への対処の一方方法であるほか、優先サービスを行うために必要な手段がある。しかしこの対策は根本的な解決法ではなく、あくまでも物理的強化策を補完する一時的な事後策 (post-loss control) のための設備対応であることを忘れてはならない。つまり物理的被害が発生したのち時々刻々と変化する被災後の状況における unacceptable risk を回避するのが第一の目的であるという認識が大切である。

また多ルート化には長所のみならず短所もある。確かに冗長要素を加えることは、緊急対応における選択幅が増すことになり防災上は好ましい。しかし極端な場合、並列リンクの破壊の相関が 1 の場合は信頼性は全く向上しない。また冗長要素を加えることはそれだけ建設コストがかかるし、ネットワークが複雑になり、システムの維持管理の困難さが増し対応が複雑化するといった短所もある。緊急時に適当な判断・操作があってこそ冗長システムが有効になるのであるから平常時の管理を行いやすく、しかも適切な対処ができるシステムを整備しておく必要である。

水道・ガスなどのブロック化において、サービス遮断が適切に行われなかった場合には、サービス可能地域を狭めることになるため、新たな「人工系リスク」を生むおそれがある。最適な制御を行うためには、あらゆる状況に対処できるブロック群にしておくことと、被害情報に基づいて的確な判断・操作を行うことが要求される。

(3) システム・オートメーション

システム・オートメーションは、平常時の運用管理、地震時の情報提供、システムの自動制御など複数の目的に用いられ、経済効率の面からも好ましいといえる。またバックアップ電源は停電時には必須のものであるため、判断を持たずに自動的に起動するシステムであることが望ましい。しかし感震自動遮断システムなどにおいては、観測点の少ない地震観測網の場合、地震動強度の局所的なばらつきが原因で的確に作動するとは限らない所に問題がある。危険を伴う二次災害の発生を完全に防ぐこと、すなわち人的リスク (personal risk) を回避することだけが目的であればサービスを 100% 自動遮断すれば達成されるが、機能維持という目的は達成されない。つまり物的リスク (property risk) や都市機能維持者としての責任リスク (liability risk) は回避できないことになる。

(4) 人間の作業・対応

地震は今までに人類が何度も経験してきた自然災害であるから「経験リスク」であるが、ここ数十年の間に急激な変貌を遂げてきた現代都市にとって将来の地震は、「想定リスク」に近いものがあり、しかもライフライン地震災害の様相は、地震規模によって多種多様であり、現実的に被害は未知数といってよい。

ライフライン災害における復旧作業は、発生した被害に柔軟に対処できるものでなければならない。復旧戦略や訓練は想定した地震を対象として策定・実施されるが、上記の理由によりマニュアル化が難しい。また資機材のストックも想定される地震に対して用意されるが、コストがかかるので限られたものになる。様々なレベルの地震に対するきめ細かい復旧対策の策定が必要となるうえに、優先サービスをはじめとする多くの判断基準を組み込んだものでなければならない。

緊急対応、復旧作業は全ての対策を効果的に活かせるかどうかの鍵を握る重要な事後対応 (post-loss control) である。不確定要素の多い地震災害においては、情報の質と量はリスクの制御可能性を左右する。つまり複雑な被害様相のもとでは、的確な情報が得られないと後に続く被害波及は制御不能リスクになり、復旧作業の遅延を招くおそれがある。

現実の地震防災対策の現場の立場からすると、種々ある対策の中での優先順位決定や力点の配分は、限られた予算、限られた期間におけるトレード・オフの関係にある。システムの信頼性向上の効果と投資効果を調べ、リスク・マネジメントの方法論を参考にして防災対策を最適化してゆく必要がある。工学的側面・経済的側面・人的側面などあらゆる観点から地震防災対策のあり方を検討しておくことが重要であるとともに、平常時のシステム運営との関わりも十分考慮しておく必要があろう。

4. ライフラインにおける地震時相互連関

4.1 ライフラインのシステム・リンクと地震時相互連関

都市のライフラインは人体の動脈・静脈・神経に例えられるように、各施設が各々独自に機能しているのではなく、全体が統合されたシステムとして都市活動を支えるものである。すなわちそれぞれの機能を担うライフラインを都市システム全体におけるサブシステムとして捉えると、サブシステム同士は「システム・リンク」によって連結されており、相互の機能を補完・支援しながら、トータルシステム（＝「都市ネットワーク」と呼ぶ）の機能を保持しているものと考えられる。2.4では、ライフラインの地震被害要因を、ライフラインの物理的・機能的側面やシステム的特性に関係づけて整理した。4.では特に、震害の物理的被害～機能的被害～復旧の各局面においてみられる、ライフラインシステム間の相互連関に注目し、具体的な被害の様相を整理するとともに、この問題を上述の「システムリンク」と「都市ネットワーク」という視点から論じる。

ライフラインの地震時相互連関は、①システム間の相互依存体系の破壊による被害波及、②システム間の相互影響性に起因する被害波及、の2点に要約される。ここで相互影響とは、システム間に発生する物理的被害波及や復旧支障、代替システムへの影響等を総称するものである。

Table 6は、相互依存性と相互影響性に起因する被害の具体的な様相をまとめたものである。相互依存体系の破壊が及ぼす被害波及の面では、上水道・電力・情報通信システムのサービス停止による影響が特に大きく、都市機能の停止に直結するおそれが大きいことがわかる。また交通システムの機能マヒは、復旧活動の際の機動力喪失という影響を及ぼす点に特徴がある。相互影響の面では、地中埋設管破壊箇所への復旧の際に、道路交通システムが交通規制などの影響を受けるほか、埋設管復旧作業の錯綜、復旧用資機材の競合等の問題が生ずる事がわかる。

4.2 都市ネットワークの耐震化

3.でみたライフライン地震防災の現状、あるいは4.1の被害の相互連関に関する考察から、都市地震防災の総合的発展のためには、都市全体という巨大システムにおける被害最小化、復旧最適化を図る必要があるといえる。このためには、「都市ネットワーク」をいかに堅固でかつ回復しやすいシステムにするかということが重要であり、サブシステムとしての個々のライフラインの強化と同時に「システム・リンク」の強化が要求されるわけである。

複数のライフラインの地震防災問題を対象としている研究では、和泉ら²¹⁾が、ガス・電力・上水道システムの被震時機能低下と回復過程を表現するシステムダイナミクスモデルを構築し、被害予測モデルとあわせて総合評価を行っている。ライフライン同士の直接の連関は考慮されていないが、都市の供給システムの復旧過程を同時にシミュレーションし、都市機能の回復を総合的に評価するものである。また星谷らは、FSM (Fuzzy Structural Modeling) を用いたライフライン機能の定性的な相互連鎖モデル²²⁾をもとに、ネットワークのシステム特性や復旧戦略に加えて、システム間の相互連関を反映した復旧予測・機能評価法を提案した²³⁾。これらの研究は、ライフライン地震防災を現実的かつ総合的に扱っているという意味において、先駆的な研究といえる。

さきのTable 6は、実際の震害報告など参考にとともに、あらゆる可能性を考えて作成したものであるが、この他にも被害として陽に認識されない連関も深いと考えられる。またそのようにマイナスの意味の連関ではなく、積極的な意味で平常時・緊急時・復旧時の連携を強化することも不可欠であると考えられる。このような見地に基づいて、本研究では「システム・リンク」が現実にはどのような要素から構成されているかについて検討した。「システム・リンク」は、システム間のなんらかの連関によって生じるものであるから、ノードやリンクよりもむしろ2.2での分類によるサポーティング・システムと関連

Table 6. Features of Interactions among Lifeline Systems in Earthquake Disaster

influenced influence	electric power supply	city supply	water supply	sewage disposal	waste & garbage disposal	transportation		telephone	computer communication
						road traffic	urban railway		
electric power supply	* ☐ excessive use as alternatives	☐ malfunction of plant, gas holder, pressure device	☐ malfunction of filtration plant & pumping engine	☐ malfunction of disposal plant & pumping engine	☐ malfunction of disposal plant	☐ traffic signal disorder	☐ loss of power malfunction of block signal	☐ malfunction of tel. office	☐ malfunction of online service ☐ loss of data
city supply	☐ excessive use as alternatives	* ☐ recovery work complication ☐ scramble for machinery	☐ recovery work complication ☐ scramble for machinery	☐ recovery work complication ☐ scramble for machinery	☐ malfunction of disposal plant	☐ no passing by cut-and-cover	☐ no illumination		
water supply		☐ recovery work complication ☐ scramble for machinery ☐ lack of coolant	* ☐ recovery work complication ☐ scramble for machinery	☐ recovery work complication ☐ scramble for machinery		☐ no passing by cut-and-cover ☒ flooding		☐ lack of coolant for switchboard	☐ lack of coolant for computer
sewage disposal	☒ inundation to underground pipes and cables	☐ recovery work complication ☐ scramble for machinery		*		☐ no passing by cut-and-cover ☒ flooding		☒ inundation to underground cables ☒ no insulation	
waste disposal					*	☒ accumulation of waste on road			
road traffic	☐ battery car unavailable	☐ water wagon unavailable			☐ no transp. of waste & garbage	* ☐ excessive use as alternatives	☐ excessive use as alternatives	☐ excessive use due to jam	
urban railway	☐ delay on recovery works (collecting worker & operator, recovery materials, and machinery, transportation of restoration party) ☐ no commute, no transportation of materials and fuel					☐ excessive use as alternatives	*	☐ excessive use due to delay	
telephone	☐ malfunction of centralized control system ☐ no communication for recovery works					☐ no passing owing to cut-and-cover		*	☐ tel. circuit unavailable
computer communication	(collecting worker & operator, directing restoration party, answering damage report from user, publicity to user, communicating with government office)								*

functional disaster propagation due to inter-dependence ○
 physical disaster propagation
 recovery hindrance
 influence on alternative system □

が深い。

平時時……システム相互の依存体系

(この面での「システム・リンク」を守るためには、依存しているシステム機能に対するバックアップを備えておく必要がある)

緊急時……地震情報や被害情報の共有・交換

(地震動強度分布の共有、物理的被害発生位置の明示、サービス支障地域の明示)

ライフライン施設への優先サービス

復旧時……復旧計画や復旧活動における事業者間の調整・協力

復旧人員・資機材の事業者間における調整・応援

復旧活動用情報の共有・交換(復旧情報・道路交通情報・火災情報)

「都市ネットワーク」の耐震化を図るには、以上のようにあらゆる局面においてライフライン事業者間の連携を強化し、地震時に相互に及ぼす悪影響を除去するとともに、全体としての復旧活動の最適化を目指す必要がある。

5. 結 論

本研究は、ライフライン地震防災を都市地震防災上の総合的課題として捉え、各ライフラインにおける地震防災対策を共通の視点から論じることによって、その基本構造を明らかにし、今後の課題を探るために行ったものである。本研究から得られた成果を以下にまとめる。

(1) ライフライン系の構成を、ノード、リンクという従来の概念にサポーティング・システムを加えて整理し、それぞれの果たす役割をまとめた。サポーティング・システムはライフライン運用を支える施設・体制であり、ライフラインにおける構造物被害発生後の被害波及の動向を左右する要因を多く含んでいる(2.2)。

(2) 各ライフライン系に特有のシステム特性とフロー特性をまとめ、地震防災対策との関わりをみるための資料とした(2.3)。また反対にライフライン系に共通する特徴を、システムの側面・物理的側面・機能的側面に分類して列挙し、地震災害の発生・波及に関わる種々の要因と関係づけて論じた(2.4)。

(3) 各ライフライン事業者における地震防災対策の現状を、以下の共通の視点に基づいて調べた(3.1～3.4)。

(a) 地震防災対策を、物理的被害軽減対策、ネットワーク形態面からの対応、システム・オートメーション、人間の対応・作業に分類し、それぞれの目的とするところを明確にした。特にネットワーク形態面からの対応についてはシステム論的な観点から基本的な概念を抽出した。

(b) 事前策、緊急対応、復旧作業という時間軸上で上記の4つの対策がどのような対応がなされているかを整理した。

(4) (3)の結果、各ライフライン間の地震防災対策に共通の流れを把握することができた。上記の4つの対策は、地震前後のあらゆる局面で密接な結び付きがあるため、整合性のとれた対策が重要であることがわかった(3.2)。対策の中から特にネットワーク形態面における対策に焦点を絞り、システム信頼性工学の視点から分析を行った(3.3)。またライフライン地震防災対策を、個々のシステム特性・フロー特性と関連づけて論じた。それぞれのシステム特有の問題が地震防災対策を規定し、特徴づけている(3.4)。

(5) 以上の成果をふまえ、ライフライン地震防災における問題点をリスク分析の概念を参考にして考察した(3.5)。

(6) ライフライン地震災害にみられる種々のシステム相互連関をシステムの相互依存性と相互影響性に大別し、被害の様相をまとめた(4.1)。またライフラインを包含した「都市ネットワーク」の耐震化を

図る方策を見いだして行くため、システム間での相互依存の問題や事業者間の連携体制を含めた「システム・リンク」の概念を提案した(4.2)。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、京都大学大学院生 吉川徹志氏の全面的な協力を得た。ここに記して深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Kameda, H., Iwai, S., Kitahara, A., and Nojima, N.: Urban Earthquake Hazards Reduction -Problem Areas and Needs for Multi-Disciplinary Research-, Proc. of US-Asia Conference on Engineering for Mitigating Natural Hazards Damage, Bangkok, Thailand, Dec., 1987, pp. D9-1 ~ D9-12.
- 2) 能島暢呂・亀田弘行・岩井哲・北原昭男: 都市震害のシステム分析モデルに関する基礎的研究, 都市耐震センター研究報告別冊第1号, 1988.
- 3) 尾島俊雄 JES プロジェクトルーム編: 日本のインフラストラクチャー, 日刊工業新聞社, 1983, pp. 1-107.
- 4) (財) 矢野恒太郎記念会編 矢野一郎監修: 日本国勢図会, 1987.
- 5) Shibata, H. and Tsuchiya, M.: Fundamental concept of aseismic design of earthquake resistant lifeline systems and industrial facilities, ASCE, The Current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, 1977, pp. 354-367.
- 6) Taleb-Agha, G.: Seismic Risk Analysis of Networks, SDDA Report No.22, MIT, Dept. of Civil Eng., R 75-43., 1975.
- 7) 田村重四郎・川上英二: モンテカルロ法による地中埋設管システムの耐震性の評価方法, 土木学会論文報告集, 第311号, 1981, pp. 37-48.
- 8) 川上英二: 少数種類の構造物からなるライフラインシステムの耐震性の評価, 土木学会論文報告集, 第312号, 1981, pp. 1-13.
- 9) 川上英二: 単純なライフラインネットワークの被害率と供給率の関係について, 土木学会論文集, 第344号/I-1, 1984, pp. 341-349.
- 10) 篠塚正宣・小池武: 埋設ライフラインシステムの機能性能に関する地震危険度解析, 土木学会論文報告集, 第311号, 1981, pp. 25-35.
- 11) Kameda, H., Goto, H., and Kasuga, T.: System reliability and service ability of water supply pipelines under seismic environment, Proc. of 8th WCEE, San Francisco Vol. VII, 1984, pp. 491-498.
- 12) 岡本舜三: 耐震工学, オーム社, 1974.
- 13) Kameda, H., Sugito, M., and Kanda, H.: Long-term effects of earthquake damage on water supply pipelines, Proc. of 9th WCEE, Tokyo, Vol. VII, 1988, pp. 5-10.
- 14) 土木学会関西支部: 都市防災シンポジウム講演集, 1987, pp. 153-200.
- 15) (財) 震災予防協会: 地震工学振興会ニュース, No. 93, 94, 95, 101, 特集: 企業の地震対策, 1987. 3, 1987. 5, 1987. 5, 1988.
- 16) 吉川徹志: ライフライン系における防災システムの基本構造の分析, 京都大学工学部卒業論文, 1989.

- 17) Ang, A. H-S and Tang, W.H.: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. II-Decision, Risk, and Reliability, John Wiley & Sons, Inc., 1975, pp.471 - 485.
- 18) 土木学会：構造工学シリーズ 2，構造物のライフタイムリスク，1988，pp. 15 - 25.
- 19) 岡田憲夫：災害のリスク分析的見方，土木学会 土と防災セミナーテキスト，1985，pp. 61 - 78.
- 20) 井上威恭：FTA 安全工学 第 2 章，日刊工業新聞社，1979，pp. 69 - 118.
- 21) 和泉正哲・野村季晶・牧瀬研二：ガス・電力・上水道システムの震害復旧シミュレーション，第 6 回日本地震工学シンポジウム，1982，pp. 2025 - 2032.
- 22) 星谷勝・大野春雄・山本欣弥：あいまい理論によるライフライン機能の震災影響波及の構造化，土木学会論文集，第 344 号 / I-1，1984，pp. 323 - 331.
- 23) 星谷勝・大野春雄：震害時ライフラインの相互影響を考慮した復旧過程の機能評価法，土木学会論文集，第 386 号 / I-8，1987，pp. 387 - 396.