

研究展望

ライフライン地震工学における研究体系と今後の展開

RESEARCH FIELDS AND FUTURE PROGRESS ON LIFELINE EARTHQUAKE ENGINEERING

高田至郎

Shiro TAKADA

フェロー会員 神戸大学工学部 教授
(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)

Key Words : lifelines, seismic risk management, seismic design, disaster mitigation, restoration, system reliability

1. 序

地震工学の一分野としてのライフライン地震工学は学術研究は勿論のこと、関連実務の分野においても多大の貢献を果たしてきている。ライフラインは膨大なネットワークを構成しており、近代都市活動に重要なサービス機能を果たしていると言う点で他の工学分野と異なる点が多々見受けられる。世界的にみてもライフライン地震工学については最近の約20数年間に長足の進歩が見られた^{1)~6)}。それは都市への人口集中と都市機能の高度化ともなっており、ライフラインへの依存性が極めておおきくなったためである。一方、地下空間の利用にもなっており道路・鉄道施設も含め、供給ライフライン施設が地下に建設されることも多くなっており、直接に地震動や地盤の動きに影響を受けやすい。また、多くのライフラインはそのシステムのなかに供給源・送配ライン・貯蔵施設を内包しており、わずか一箇所の被災でもシステム全体に多大の影響をあたえることは明白であり、最近の地震災害でも知られるように2次災害の波及を防止する上でもライフラインは重要である^{7)~11)}。なお、道路・鉄道も重要な交通ライフラインであり、ライフライン研究の対象に含まれるが、本稿では、おもに供給・処理および通信ライフライン系に限定して述べることにする。

これまでのライフライン地震災害の経験から判断して、災害要因として、強震動・地盤の永久変形・液状化とそれに伴う側方流動、などが支配的であることが知られている。従来ライフライン地震工学に関して数多くの研究がなされ、その学問としての体系化も進んでいる。現状のライフライン研究は、地震災害とその分析、ライフライン要素施設の地震時挙動の理論

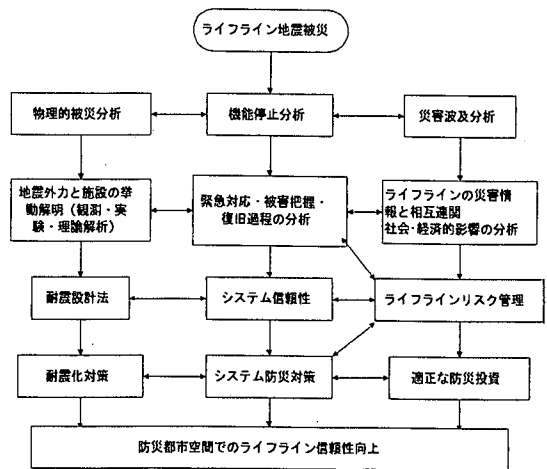


図-1.1 ライフライン地震工学研究の体系

的・実験的解明、耐震設計手法の新たな展開、ネットワークの信頼性とシステム地震防災、そして災害波及分析、に体系化して論ずることができよう (図-1.1 参照)。とくに、下記の特定課題については今後の研究展開が期待される。・ライフライン要素施設と被災要因の関連、・ライフラインのシステムとしての危険度評価、・ライフラインに関わる観測と実験による複雑な現象の解明、・低頻度直下型地震に対する地中構造物の耐震設計法の確立、・緊急対応・復旧戦略を含むライフラインの地震防災対策、・ライフライン機能停止に伴う社会的・経済的影響の評価、などである。本稿ではライフライン研究の現状を述べるとともに上記の課題について概述する。

2. ライフライン地震災害とその分析(阪神・淡路大地震を例として)¹²⁾

(1) 被災の概要

1995年1月17日5時46分にマグニチュード7.2の地震が兵庫県南部地域を中心に襲い、最大被害レベルの気象庁震度階7が神戸市南部・淡路島北部・西宮・宝塚市の一部地域にひろがった。6,394人の死者・43,772人の負傷者・488,222件の家屋被害・300,000人以上の避難者、そして258件の火災が発生する大惨事となった。高速道路の倒壊や鉄道施設の破壊は交通輸送の混乱を引き起こすところとなった。また、電力の供給停止は2,000,000戸に、水道は1,300,000戸、ガスは800,000戸以上に影響を及ぼした。

水道システム：膨大な施設被害と機能停止が発生した。消火用水は勿論のこと、病院や避難所への緊急飲料水も不足をきたした。水道施設自体の物理的被害によって水供給が停止した場合もあるが、電気や水の供給停止によって処理場やポンプ場が機能しなかったために水供給を停止せざるを得ないケースも生じた。神戸市では4貯水池で被害が生じ、送水管で数箇所、配水管で約1,700箇所、屋外給水管で約10,000箇所、屋内給水管で約40,000箇所の被害が報告されている。おもな被害モードは、・継手部での離脱と漏洩、・地盤の永久変位による管路の座屈と変形、管体の亀裂、である。主要管路の最弱点部位は継手部であり、給水管では建物との取り付け部であった。いずれも可撓性の不足によるものである。神戸市水道局が所属している神戸市第二庁舎の6階部分が破損したために復旧のための図面類を取り出すことができず、緊急対応に混乱が生じた。しかし、地震対策として作動中であった貯水池の緊急遮断弁システムは21の内18が機能を発揮して40,000トンの水が確保され緊急飲料水として使用された。

下水道システム：5～8mの深さに埋設されていた下水道主要管路の被害は少なかった。83,900mの幹線管路の内、67,100mが部分的に被害を受けたが残りは無被害であった。約10%存在していた陶管は著しく被災した。約20%の塩化ビニル管は比較的被害は少なかった。残り70%のコンクリート管の被災モードは以下のものである。・マンホールとパイプの取付部、・液状化によるマンホールの浮上、・パイプへの土砂の流入、・管体の損傷、屋内下水管の破損。また、東灘処理場の著しい被災は河川への汚水放流などの課題が発生した。

ガスシステム：86万戸のガス供給が停止された。おもな被害は2,600箇所にわたる低圧ガス導管のねじ継手鋼管であった。それらの復旧作業は困難を極め、約3

ヶ月を要した。補修にあたっては約70%が耐震継手に取り替えられた。供給管路では建物との取り付け部で、とくに地盤の軟弱な地域で顕著な被害がみられた。

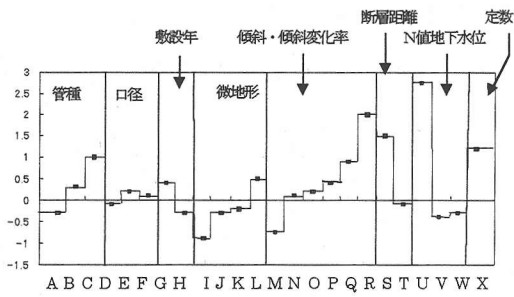
電力システム：兵庫県から京都府にかけての広い範囲にわたって285万kWの電力不足が発生した。660の配電ラインが被災したが、架空と地中における被害割合は同程度であった。原子力と水力発電施設には被害が見られなかったが、沿岸地域の軟弱地盤地域に位置していた火力発電施設には、10施設の微細な被害が発生した。震度階7の地域にあった29の変電所の内、14が被災したが、いずれも1965年以前に建設された施設であった。

通信システム：被災地域にある約144万回線のうち、28万回線がケーブルの切断や施設の破損のために不通となった。不通の原因の詳細は、・建物付近の地盤沈下に伴うケーブルの切断、・長スパンの橋梁に添架されたケーブルの変形、・電話局建物の破損と屋内機器類の損傷、・建物屋上の通信アンテナのねじれ損壊、などであった。

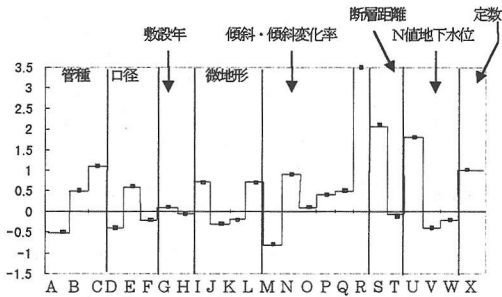
ライフライン地震工学の視点から、阪神・淡路大地震におけるライフライン施設損害と機能損害の教訓は以下のようにまとめられる。・ライフラインの地上施設の被害は厳しい地震動によるものである、・ライフライン地中施設の被害はおもに液状化と永久地盤変位によるものである、・ライフライン施設の弱点部は継手部、建物との取り付け部そして膨大なシステムの下位に位置する非耐震的施設である、・地中深部に埋設されている施設は地震動や地盤変位の影響をうけにくく被害は少ない、・震度階5あるいは6に対して設計されていた施設の耐震基準はその機能維持レベルを配慮して見直す必要がある、・地震直後の緊急対応策を再検討する必要がある、・地震危険度の高い地域のライフラインに対してはループ化、ブロック化、バックアップシステムなどのリダンダンシーを配慮することが地震防災対策上不可欠である。

(2) 被災要因の分析

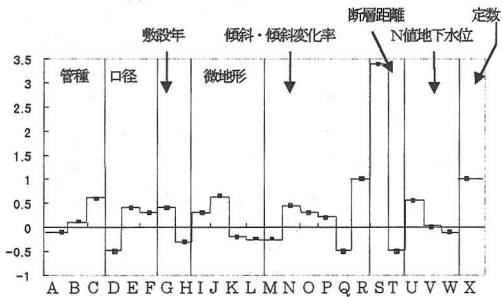
おもに神戸市水道配水管路を対象としてGIS被害分析を実施した結果について紹介する。数量化理論I類を用いた多変量解析によって、水道配水管の被害に与えた要因分析を実施した¹³⁾。各属性の離散化に当たっては精度良い結果を与えるように十分な注意が必要とされる。アイテムとカテゴリーについては、とくに地形と地質については相関が強いと考えられるので、並列的に扱うのではなく、地形・地質のクロス集計を分析して微地形分類として4種類のカテゴリー



(a) 継手被害カテゴリ



(b) 管体被害カテゴリ



(c) 属具被害カテゴリ

X軸の項目		
A…DIP	I…硬質地盤	Q…緩傾斜急変化
B…CIP	J…段丘地盤	R…急傾斜急変化
C…その他	K…沖積地盤	S…近傍
D…小口径	L…沿岸軟弱地盤	T…非近傍
E…中口径	M…平地無変化	U… $N < 10$ 、高水位
F…大口径	N…平地緩変化	V… $N \geq 10$ 、高水位
G…古い	O…緩傾斜無変化	W… $N < 10$ 、低推移
H…新しい	P…緩傾斜緩変化	X…定数項目

図-2.1 水道配水管路被災の要因分析

を作成している。継手、管体、属具(消火栓やバルブ)それぞれの被害分析に対して得られたカテゴリー数量の分布を図-2.1(a)~(c)に示している。各被害の分析に対しては重相関係数が0.7以上であり良好な分析結果といえる。継手被害の要因として、 N 値、地下水位、地形傾斜、微地形分類、断層距離が挙げられる。また管体被害の要因として、管種の影響がきわめて顕著である。すなわちDICP(ダクタイル鋳鉄管)以外

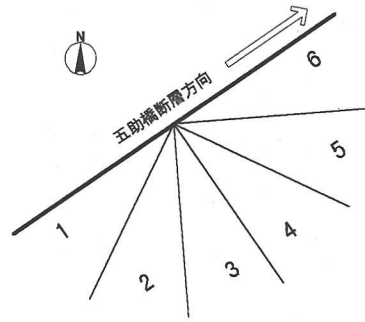
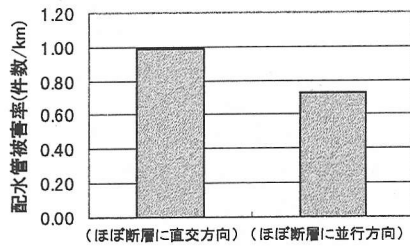
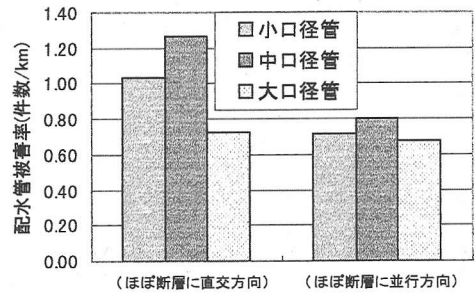


図-2.2 五助橋断層



(ほぼ断層に直交方向) (ほぼ断層に並行方向)

(a) 配水管全体の被害率



(ほぼ断層に直交方向) (ほぼ断層に並行方向)

(b) 口径別配水管被害率

図-2.3 管路被災のディレクティブティ

では管体被害を受けやすいことが知られる。また、属具被害については管路属性(口径、管種、敷設年代)はあまり顕著ではなく、地盤の影響が強いと考えられる。上記の分析には地震動情報を要因として加えていないが、相対的な管路被災リスクを知る上で有用である。

(3) 管路被災のディレクティブティ

本項では管路被災の方向性について論じる¹⁴⁾。六甲断層系に属する五助橋断層を対象とし、灘区・東灘区における配水管データを使用した。対象断層の五助橋断層は東西方向からおよそ40度北に傾いている。図-2.2に示すように、五助橋断層を基軸にとったとき、その軸からの角度を30度ごとに6つの方位に分割す

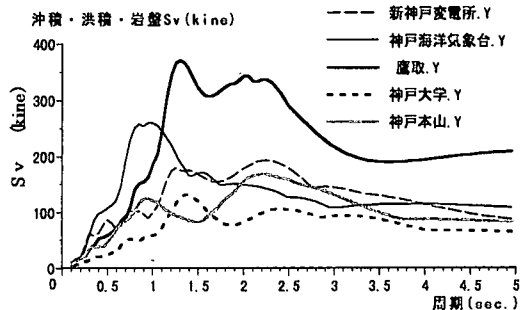
る。その上で、灘区・東灘区における配水管データの位置X座標、Y座標をもとに断層からの角度を決定した。具体的に図の方位特性3および4に属する配水管は断層に対して垂直方向に近い方向をなしており、方位特性1および6に属する配水管は断層に対して並行方向に近い管路であるといえる。

口径、管種を問わずすべての配水管について分析したところ、断層走行方向に直交する方位特性3の配水管の敷設では総延長152.05kmで150箇所 of 漏水で0.99 (箇所/km) となり、断層走行方向では総延長228.83kmで166箇所 of 漏水で0.73 (箇所/km) となり前者では後者の1.4倍ほど高い値が得られた。図-2.3(a), (b)には全配水管・口径別にみた被災のディレクティビティを示している。いずれも断層直交方向で被害率が高くなることが知られる。とくに小口径管や非耐震管路に対してこの傾向が強いことも知られた。

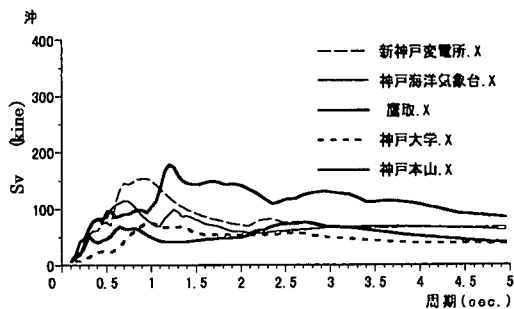
なお、本分析においては地震動による配水管被害を検討する目的で、液状化地域の配水管路網については分析の対象から除外している。一方、阪神・淡路大地震時に得られた強震記録を断層直交方向と断層走行方向に座標変換に行って、速度応答スペクトルを求めた結果を図-2.4(a), (b)に示している。直交方向では平行方向に比較して全体的に1.5倍程度の高い値となっている。断層近傍の幹線管路設計に関してはディレクティビティの影響を配慮することも必要である。

(4) 地震動と管路被害率¹⁵⁾

地震動と管路被害率の関係を求めるために、神戸市内を250mメッシュに分割して各メッシュ内での配水鋳鉄管路被害率を算出した。ついで、各メッシュの地震動を推定するために、得られている強震記録を基に形状関数を用いた補間を実施した。得られた強震記録は神戸市内では十数点しかないため、各観測位置を頂点とする多角形のネットワークを構成し、各頂点の最大地震動が与えられた際の多角形内部における任意地表面の地震動と推定する手法を採用した。すなわち得られている各強震記録をその地点の地盤増幅特性を考慮して工学的基盤面まで戻し、工学的基盤面上で形状関数によって任意地点の地震動を計算し、増幅特性を考慮して再び地表面上に戻して地震動を推定している¹⁶⁾。各メッシュ内の鋳鉄配水管被害率と地震動速度の関係を示したのが図-2.5である。地震動加速度との関係についても検討したが、速度の方が良い相関が得られている。20kine程度から被害率が高くなるが、80kine以上では被害率の上昇が鈍化する傾向となっている。



(a) 断層走行に直交する速度応答スペクトル



(b) 断層走行に並行する速度応答スペクトル

図-2.4 断層との位置関係を考慮した速度応答スペクトル

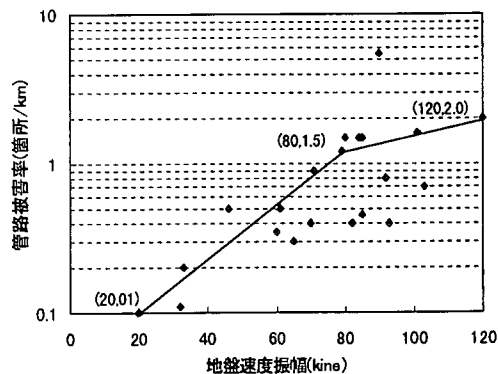


図-2.5 兵庫県南部地震時における鋳鉄配水管被害率と地盤速度振幅の関係¹⁵⁾

(5) 地盤永久ひずみと管路被害率¹⁷⁾

兵庫県南部地震において、埋立地であるポートアイランドと断層地形である会下山地域における地盤の永久変位より、表層における地盤ひずみの推定を行い配水管被害との関係について分析を行った。

ポートアイランドの永久変位としては、濱田、磯山、若松により作成されたポートアイランドにおける表層地盤の永久変位ベクトル図を使用する。一方、会下山断層周辺地域においては著者らが地震前後の航

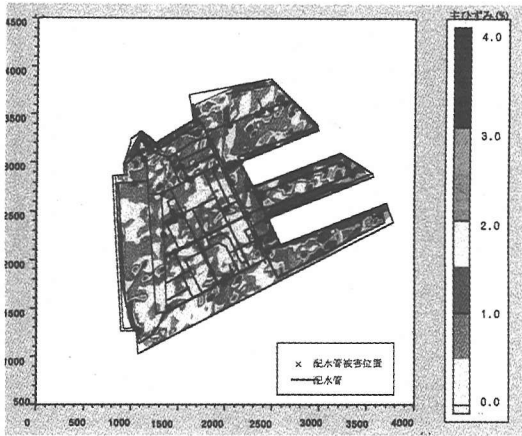


図-2.6 ポートアイランドにおける地盤主ひずみと配水管被害位置

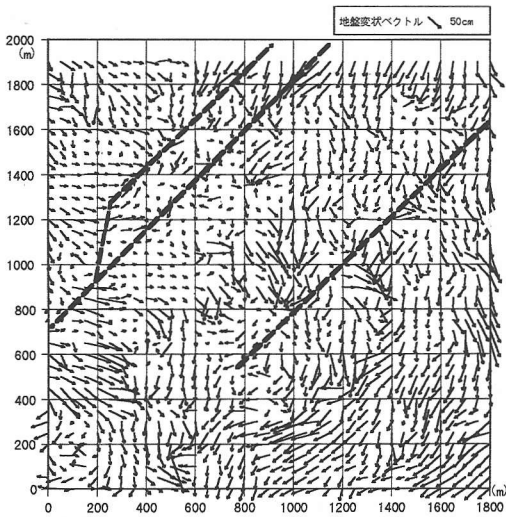


図-2.7 会下山断層付近の主ひずみと配水管被害位置

空写真測量より50mメッシュごとの地盤変位図を作成し、主ひずみを算出した。

ポートアイランドにおける推定した地盤の主ひずみと配水管被害位置を重ねたものを図-2.6に示す。本図よりポードでは岸壁を中心としてほぼ全域に亘り0.5%以上のひずみを生じていることがわかる。とくに岸壁においてはその崩壊の影響も含めて大きな地盤ひずみの発生がみられる。

一方、会下山断層付近における永久変位ベクトルを図-2.7に示す。配水管被害位置の分布は長田断層と会下山断層に挟まれた地域および会下山断層の南側において非常に多く分布していることも知られている。地盤の主ひずみが大きな地域もまた、これらの断層周辺部において顕著にみられ、地盤の主ひずみが他の地域に比べて大きな地域において配水管被害が顕著であるのがわかる。ポートアイランドでは地盤の液

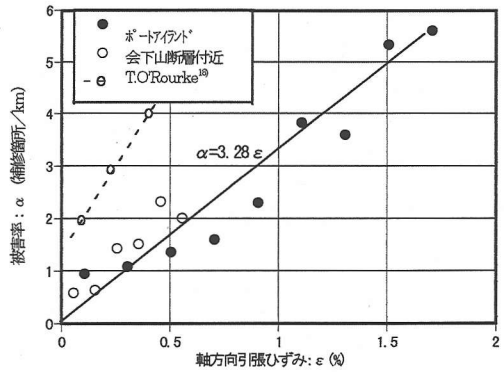


図-2.8 管軸方向引張ひずみと配水管被害率との関連

状化に伴う側方流動によって護岸周辺が海側に変位することによって生じた主ひずみは引張側であるが、会下山断層周辺地域においては地表面の傾斜の影響や地質の不均一さなどの影響により、圧縮側・引張側の両方の主ひずみが分布している。

次に、ポートアイランドと会下山断層付近における管路軸方向引張ひずみと配水管被害率との関係を図-2.8に示す。両者の関係はおおむね正の相関があることが図から読みとることができる。ポートアイランドにおいては液状化に伴う側方流動や不等沈下によって生じた地盤ひずみであり、会下山においては断層地形による傾斜や地質の不均質あるいは断層運動によって生じた地盤ひずみである。しかし、同程度の地盤ひずみに対しては同程度の管路被害率となっていることは注目に値する。両者におけるデータを統合して、管路に沿う地盤引張ひずみ(ϵ)と管路被害率(α)の関係を求めると $\alpha=3.28\epsilon$ となる。ただし、被害モードについては継手被害および管体被害を考慮している。

なお、米国ノースリッジ地震(1994年)の際の水道铸铁管の被災データを元にO'Rourkeらは地盤ひずみと管路被害率を求めている¹⁸⁾。その関係は図-2.8中に示しているが、本解析結果と比較すると同程度の地盤ひずみに対して高い管路被害率となっている。

(6) 復旧過程分析

過去の日本の被害地震では、ライフラインの機能停止期間は電力・通信ではせいぜい半日、水道で1週間、ガスでは1ヶ月程度であった¹⁹⁾が、阪神・淡路大地震では電力1週間、通信2週間、水道13週間、ガス10週間を要することとなった。ライフライン機能停止に関する要因は、道路・鉄道の機能障害、倒壊家屋のガレキ、他ライフラインとの相互影響、緊急対応・復旧体制の不備などが挙げられる。復旧の空間的・時間的プロセスを十分に分析して今後の復旧戦略の確定

表-2.1 各市の水道機能被害

	神戸市	明石市	芦屋市	伊丹市	川西市	宝塚市	西宮市
断水戸(数戸)	690,000	78,000	33,400	66,000	7,000	50,000	154,100
罹災率(断水戸数・給水戸数)	1.000	0.711	1	1	0.14	0.676	0.941
累積断水戸数(戸・日)	11238,030	443,000	798,820	307,400	16,100	408,780	3,979,478
断水解消所用日数(日)	91	15	65	17	9	39	71
平均断水解消所要日数(日)	17.29	5.68	23.92	4.66	2.3	8.17	25.82

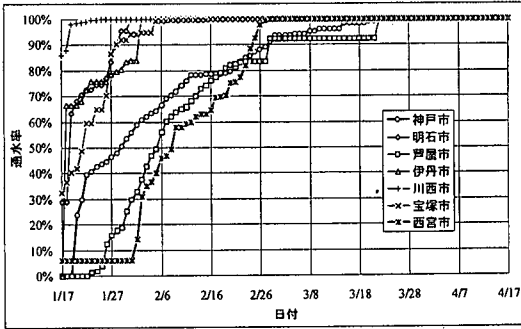


図-2.9 各市の水道復旧曲線

に役立てる必要がある。表-2.1に各市の水道機能停止被害を示す。また、図-2.9に各市の水道復旧曲線を示す²⁰⁾。ここで、平均断水解消所要日数(日)という指標を上げた。これは被災地域の累積断水戸数(戸・日)を断水戸数(戸)で除したものであり、断水地域において断水を解消するのににかかった日数を表し、この数値が小さいほどその地域に与えた機能的影響は小さいと考えられる。これによると断水解消所要日数でもっとも長かった神戸市の平均断水解消所要日数は芦屋市や西宮市のそれと比べて小さいことが分かる。図-2.9を見ても神戸市の復旧曲線は立ち上がりの早い曲線を描いており、断水率の面積が最小となる復旧が理想とされる。

3. ライフライン施設地震時挙動に関する解析技術と実験・観測

(1) 概要

ライフラインシステムには建屋ビルディング・地上あるいは地下タンク、トンネルなど種々の要素施設を含んでいるが、ライフラインを特徴づける施設は地中管路である。管路挙動の解明やその耐震設計はライフライン工学の発展の歴史でもある。ここでは地中管路に的を絞って述べる。

1970年代以降、多くのライフライン地震災害を経験しながら地中管路挙動に関して、実験と解析分野における技術が進歩してきた。これらの技術はその目的に応じて、・地中管路の地震時挙動の解明、・管体材料

や継手の開発、・耐震設計基準の検討、・実験や観測と理論計算の比較などに分類される^{21)~28)}。

理論解析技術：地中管路の応答を計算する手法は伝達マトリックス法・有限要素法・境界要素法・波動法・剛性法などに分類される。地中管路周辺の地盤の取り扱いには応答に敏感であるため、その決定には十分な配慮が必要とされ、実験的に求める手法や有限要素法によって地盤と管路の相互作用を配慮する手法などがある。一般的には管路の慣性力や減衰力を無視して、地震入力のみを動的に取り扱う疑似静的解析が採用される。直管・曲管・T字管を非弾性床の上のはり、または質量一ばねの多質点系として2次元または3次元的に取り扱うのが通常であるが、最近では液状化流動変位や断層変位に伴って管路の大変形問題を解析する必要が生じて、管路をシェルとして取り扱うケースも増えている。地震入力は上述の液状化流動変位や断層変位の他に、地震動・地盤沈下・亀裂などが配慮される。地盤外力としての流動変位や断層変位の推定は重要な課題であるが、解析精度に見合う値として評価するまでには至っていない。

これらの解析の結果は地中管路は地上の構造物とは異なり、慣性力や減衰力の影響は少なく、連続管路・継手管路のいかに拘わらず、その挙動は周辺地盤の相対変位(ひずみ)挙動に支配されることが知られている。また、液状化による過剰間隙水圧や流動・沈下が管路挙動に与える影響はとくに顕著で、精度よい解析手法の確立が望まれている。

実験・観測的手法：地震時の地中管路・周辺地盤の挙動の観測がいくつかの研究機関で実施されている^{29)~31)}。高密度アレー観測などの結果は波動伝播による周辺地盤の動的な地盤ひずみが管路挙動に直接に影響していることを明らかにしている。また、地盤特性が急変する付近や液状化を伴う場合には管路変形が増大することも知られている。地盤特性の複雑な地点での観測を通じて地盤応答の変化が著しい場合に管体ひずみ応答や継手変位応答が大きくなることが分かっている。液状化に関する室内実験は1g場のみならず最近では遠心力場での管路と地盤の相互作用が実験的に検証されている³²⁾。それらの結果によると、不完全液状化の状態では管路応答が最大となり、完全液状化の状態では浮力が作用した後、地盤沈下によって管路ひずみが大きくなることが知られている。他の幾つかの室内実験によると地盤と管路の間に滑りが生じる場合には上載圧よりも管路の粗度によって摩擦力の大きさが左右される³²⁾。また、管路-地盤系の復元力特性については周波数依存性が少なく慣性力と減衰力の影響も大きくはない。一般的に直管部では軸ひずみが卓越するが、曲管部では曲げひずみが卓

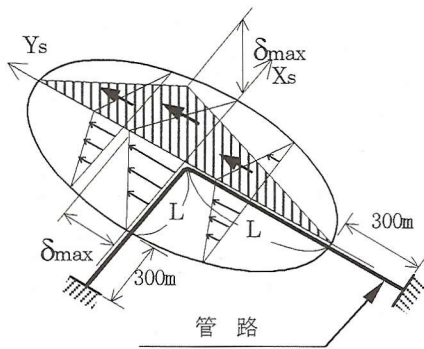
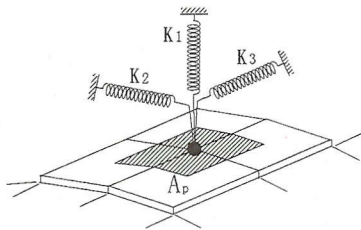
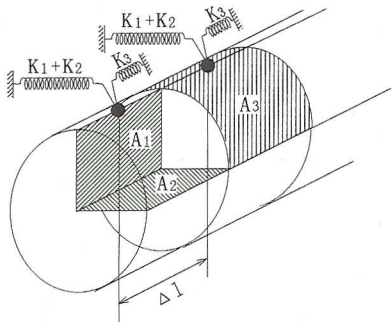


図-3.1 側方流動と管路モデル



(a) Model-1 (すべての節点にはばね)



(b) Model-2 (頂部および底部にのみばね)

図-3.2 管路-地盤モデルの概念図

越することも知られている。

(2) 側方流動を受ける地中管路のハイブリッド解析

液状化による側方流動変位を受ける管路は材料的・幾何的非線形挙動をすることになり、ビーム解析ではその挙動追跡に限界がある。一方、シェル要素で管路すべてをモデル化することは膨大な計算時間を要することになる。そこで、大変形を生じる近傍をシェル要素でその他の部分をビーム要素で近似する手法をここではハイブリッド解析と呼んでいる。ハイブリッド手法による解析例を以下に紹介する³³⁾。

液状化に伴う地盤の側方流動として、図-3.1に示すように半径 L の円内で液状化が生じ、地盤変位の大きさがこの円内で三角形分布する場合を考慮する。円の中心部で側方流動は最大値 δ_{max} をとるもの

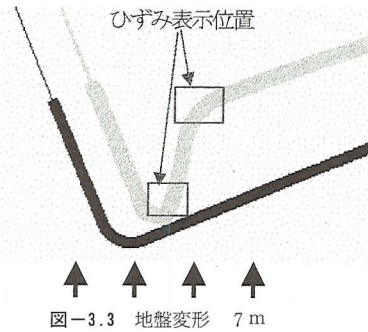
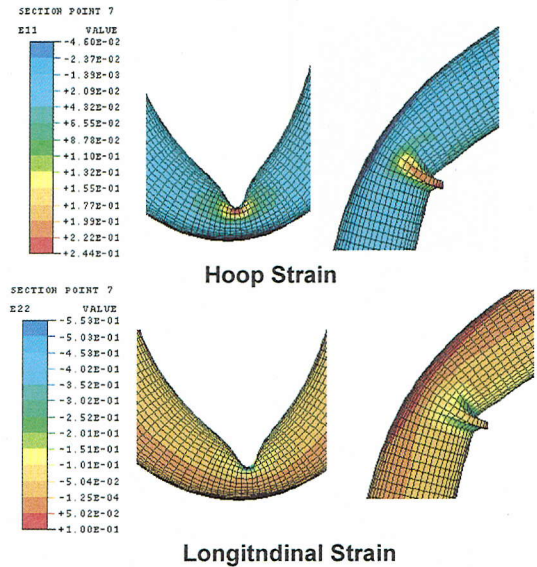
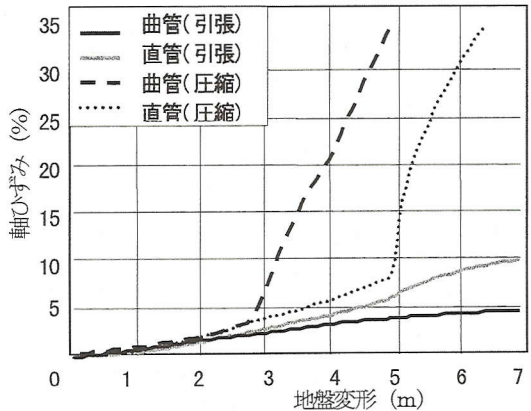


図-3.3 地盤変形 7 m



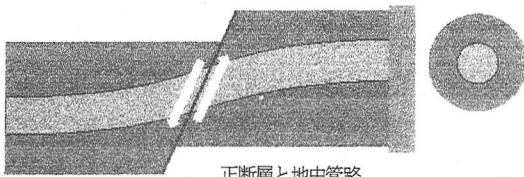
(a) 管体の局所ひずみ分布



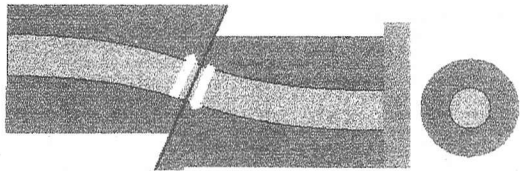
(b) 管体軸方向局所ひずみの特性

図-3.4 管体ひずみの特性

とする。埋設管として90°曲管を含む配管系を選び、最大地盤変位の位置が曲管位置と一致し、流動方向が一方の直線配管と45°で交わる場合を解析している。かかる流動入力最大の管路変形を与えることが知られている。最大地盤変位として $\delta_{max} = 7$ m を想定した。なお、液状化流域の半径は $L = 200$ m とし、液状



正断層と地中管路



逆断層と地中管路
解析モデル

図-3.5 断層と地中管路

化地盤変位が生じない領域として液状化領域の外側にさらに半径300mの領域を考慮している。

側方流動によって管路に加えられる力はバイリニアの特性を持つ非線形バネでモデル化している。このときのバネ要素の与え方として以下の二つの与え方を試みた。

- 1) (Model-1: 全節点ばねモデル) ハイブリッドモデルのシェル要素の全節点にばね要素を付加する。
- 2) (Model-2: 管頂, 管底節点ばねモデル) ハイブリッドモデルのシェル要素部分の管頂と管底の節点にのみばね要素を付加するモデル。

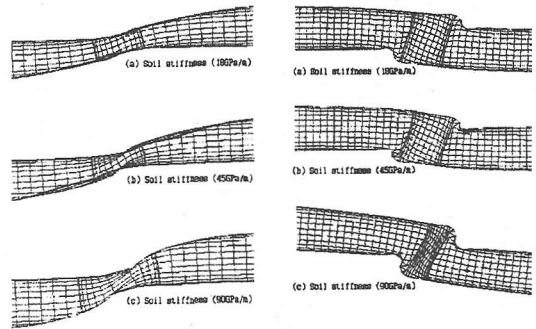
上記, 2種類のモデルの概念図を図-3.2に示す。ここで, 管頂, 管底ばねモデルにおいて管底側のばねは図の煩雑さを避けるために省略している。

図-3.3に Model-2 の管頂, 管底ばねモデルによる最大地盤変位 7 m における変形状態を示す。曲管の内曲げ変形モードを呈している。直管部にも変形が生じるが, 最大ひずみは曲管部の腹側で生じる軸方向ひずみである。直管部と曲管部に生じる管軸方向のひずみを図-3.4(a)(b)に示している。

なお, Model-1 と Model-2 の結果は一致し, 側方流動を扱う場合に管頂, 管底のみにばね要素を限定して付加することに妥当性が認められる。さらに計算時間は Model-2 では約25%削減できることが明らかとなった。

(3) 断層変位を受ける地中管路のシェル解析³⁴⁾

図-3.5に示すように地中管路が断層変位を受ける場合も材料的幾何的非線形の問題となる。図-3.5に示す正断層および逆断層運動を受ける管路挙動を ABAQUS プログラムを用いてパラメータを解析



正断層 逆断層
管変形に与える地盤硬さの影響

図-3.6 管路変形状態

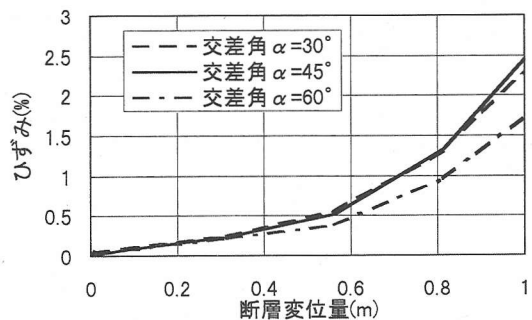


図-3.7 断層変位量とひずみの関係

した結果について紹介する。呼び径 $\phi 750\text{mm}$, $t=19\text{mm}$ ($D/t=40$)の管路を標準として解析し, 単位長さあたりの地盤ばね 4.7kgf/cm^2 のバイリニア型地盤反力標準値として用いた。管路と断層面の交角, 地盤ばね, 管厚の影響について検討している。図-3.6には0.5m変位の正断層運動を受ける場合の管路変形状態を示しているが, 逆断層の場合には局部屈曲が発生する。以下のパラメータ解析では逆断層の場合を対象としている。

a) 断層交差角(α), 管路と断層面との交角(β)の影響

図-3.7に断層との交差角(α)の影響を示している。 α が 45° で最大ひずみとなる。また管路と断層面との交角(β)の影響はほとんどないことが知られた。

b) 地盤ばねの影響

N 値から地盤反力係数($E_0=28N$)を推定し, E_0 より単位長さあたりの地盤ばねを算出している。 N 値をパラメータとした際の管体ひずみと断層変位の関係を図-3.8に示している。管体許容ひずみを3%とした場合には通常地盤で1m程度, 固い地盤では0.4m程度の許容断層変位量となる。

c) 管厚 D/t の影響

D/t の影響と地盤硬さの影響を考慮した結果を

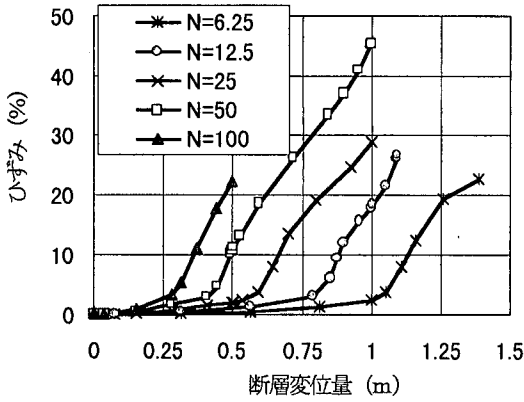


図-3.8 断層変位量とひずみの関係

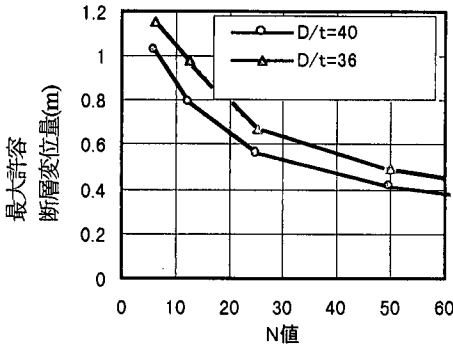


図-3.9 D/tと許容断層変位量

図-3.9に示している。D/t値40から36に増厚することによって許容断層変位量は約10%増加がすることが知られる。また、管体の許容ひずみを3%とした場合、埋戻し土の剛性を $N = 5$ 程度、厚肉管 $D/t = 36$ を用いることによって許容断層変位量を1m以上とすることが可能となる。

4. 地中管路の耐震設計^{35)~37)}

(1) 概要

地中管路の挙動は周辺地盤の相対変形に左右されることが分かっているため、耐震設計では応答変位法の考え方が採用されている。すなわち地盤と管路の動的相互作用を考慮することなく、まず地盤の変形を独立に算出して、その変形を地盤ばねを介して管路に入力して管路応答を計算するものである。しかし大規模ライフラインや重要施設では動的解析によってその安全性を照査している。入力地盤変形を求めるには速度スペクトルから変位振幅を、波長と伝播速度は基本的に周辺地盤のS波速度から求められる。変位振幅を求める際には波動の伝播を下方から地表面に向かって上昇する波動を仮定しているが、応答計算の波動は地表面に沿って伝播する表面波動的な波動を仮定して

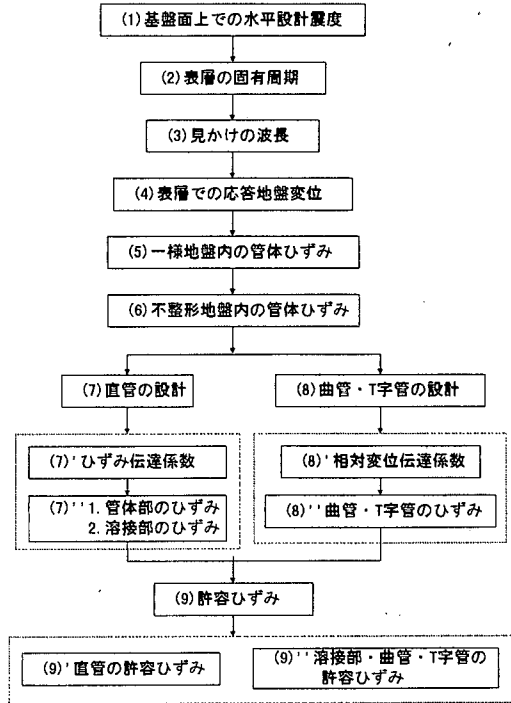
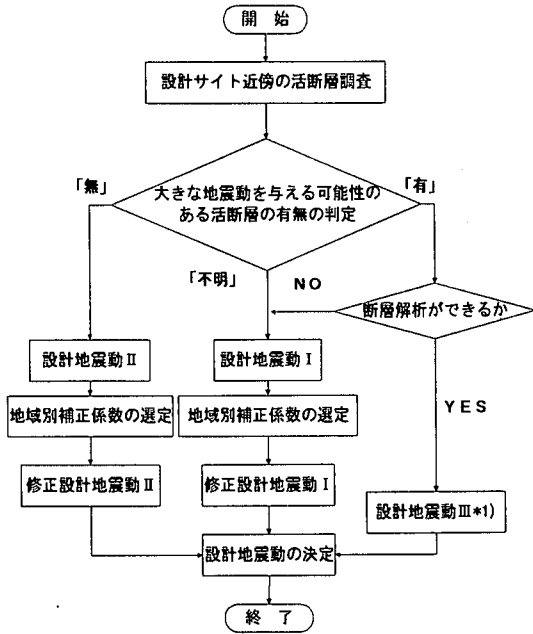


図-4.1 ガス導管耐震設計指針の設計フロー³⁷⁾

いるので物理的には矛盾が生じるが、設計上の仮定とみなしてかかる手法で計算しても大過はない。阪神・淡路大地震以前より、石油パイプライン指針(1974)、水道施設耐震工法および指針(1979)、ガス導管耐震設計指針(1981)などの地中管路の耐震設計指針が存在したが、阪神・淡路大地震の教訓を受けていずれも改訂されている。改訂指針では高レベル地震動と管路の非線形応答が考慮されることとなった。図-4.1にはガス導管耐震設計指針の設計フローを示している。水道施設耐震工法指針(1997)・ガス導管耐震設計指針(1999)では、いずれも2つのレベルでの速度応答スペクトルが導入されている。レベル1は施設の供用期間内に1~2度来襲する程度の地震で、レベル2は供用期間内に発生する確率は低いが高強度の高い地震で、スペクトル強度で後者は前者の5~8倍程度である。水道施設耐震工法指針における設計速度スペクトルでは、レベル2は最大70~100kineの幅を持たせている。設計者の判断によって要求される性能が満足されれば、この範囲で地震動スペクトルを規定しても良いという性能設計の概念を取り入れたスペクトルとなっている。

(2) 活断層と設計スペクトル

阪神・淡路大地震以降は活断層の存在を配慮して、地震防災対策や耐震設計が行われるようになっていく。従前の過去の地震発生を統計的に処理して地震危



*1) 設計地震動IIIが修正設計地震動IIより小さい場合は、修正設計地震動IIをその設計地震動として用いる。

図-4.2 設計地震動設定フロー³⁷⁾

險度を推定する考え方から活断層ありきとして決定論的な地震危険度評価が大勢を占めている。ここでは、ガス導管耐震設計指針改訂(案)³⁷⁾で検討されている活断層と設計スペクトルの関連について紹介する。図-4.2は設計地震動(スペクトル)設定のフローを示している。設計地震動Iは内陸型地震を設定したものであり、工学的地震基盤面での応答速度で示している。具体的には兵庫県南部地震時の震源域(活断層から10km以内)の8地点で観測された水平2成分16波の観測波を元に速度応答スペクトルを求め、90%非超過確率を持って設計スペクトルとしている(図-4.3)。設計地震動IIは海溝型地震を想定したものである。これは設計地震動の下限値を保証するもので、内陸型の地震 $M=6.5$ 、活断層からの距離10kmの速度応答スペクトルを包絡するように与えられている。ガス指針で地域別補正係数1.0とした場合は図-4.3中に示す値となる。図-4.2のフローでも知られるように、設計ガス導管近傍に活断層がない場合は、この最低保障の設計地震動IIを用いることとなる。次に設計地震動IIIは設計地震動を算出するための震源パラメータおよび地盤物性情報が整備されており、震源の断層をモデル化し、解析的に地震動を計算できる場合を想定している。設計地震動IIIを算出することは現状の断層解析技術では必ずしも容易ではない。破壊パターンやアスペリティの評価、断層のモデル化に関して今後の研究成果が待たれる³⁷⁾。

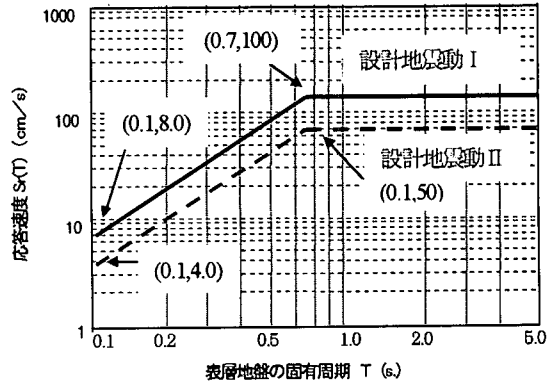
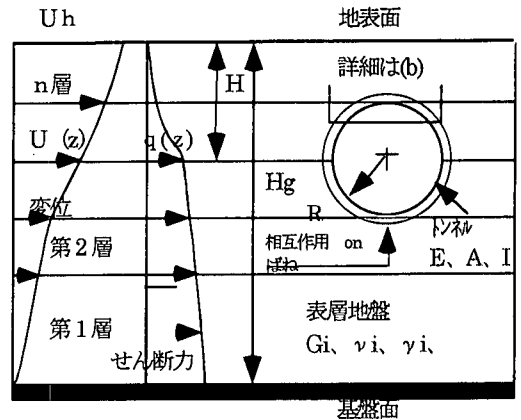
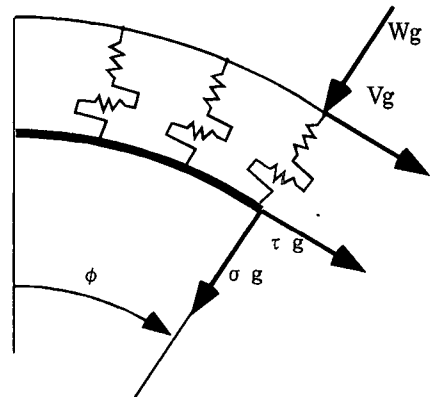


図-4.3 ガス導管耐震設計指針における速度応答スペクトル³⁷⁾



(a) トンネル-地盤系



(b) トンネルのモデル化と作用力
図-4.4 トンネル-地盤系モデル

(3) 応答変位法をベースとしたシールドトンネルの弾塑性設計と妥当性の検証³⁸⁾

現行のシールドトンネルの横断方向の耐震設計法はいずれも弾性床土リングの弾性解に基づいている。しかし、レベル2設計地震動に対してはトンネル材料

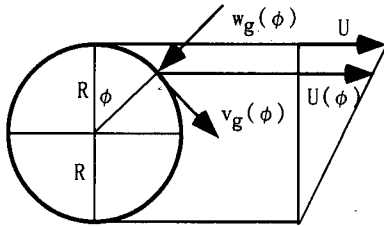


図-4.5 トンネル横断面と地盤変化分布

は非線形領域となることは明らかであり、応答変位法適用の妥当性検証とともに非線形挙動を配慮した設計法が要求される。図-4.4に解析モデルを示している。

サブストラクチャ法概念より地盤とシールドトンネルとの相互作用ばねを用いて地盤内シールドをモデル化すると共にトンネル本体に直接にせん断応力を作用させている。上記の相互作用ばねは志波ら³⁹⁾により誘導されている。図-4.5に示すように地盤のトンネル深さ方向の変位分布が直線であると仮定すれば入力変位および応力が算出できる。

まず、トンネルと地盤の間にすべりが発生していない場合、トンネルの半径方向変位 w と接線方向変位 v は以下ようになる。

$$w = 2v = -CU/2$$

$$C = \frac{4GR^3(1-\nu)}{6EI(3-4\nu) + GR^3(3-2\nu)} \quad (4.1)$$

ここに EI , ν , G , R はトンネルの曲げ剛度、ポアソン比、せん断剛性、半径である。

C はトンネル変位釣合に関する連立方程式を解くことによって得られている。上記変位に対応して高次モードの影響 β を考慮したトンネル断面力が算出される。

一方すべりが生じた場合は、せん断力を伝達しないと見なすと以下の式が得られる。

$$w = 2v = -C^*U/2 \quad (4.2)$$

$$C^* = \frac{GR^3(11-12\nu)}{18EI(3-4\nu) + 12GR^3(1-\nu)} \quad (4.3)$$

トンネル断面内の鉛直軸から 22.5° の節点（最大せん断力発生位置）のせん断応力が限界応力を超過するとトンネル全周にすべりが発生すると仮定すれば、すべり発生に関する以下の判定基準が生まれる。

$$GU(1+3C-6\nu C) \geq 2.828R(3-4\nu) \quad (4.4)$$

これらの基準はトンネル最大せん断応力と直応力は同じ位置に生じることはないのでモーラークーロン基準によってチェックする必要がある。

上記の条件を配慮してシールドトンネルの非線形

設計法が構築される。図-4.6に示すように4ステップに分割し、地震入力増分に応じてトンネルの挙動を判断し、それに対応した手法により断面力を算出する。各ステップ内における相互作用ばね特性は変化しないとし、相互作用ばねとトンネル物性は全ステップの応力状態に基づいて各ステップの初期段階で変更・導入される。ステップ2～4はすべり発生、コンクリートと鉄筋の降伏およびコンクリートの破壊の各段階に対応している。クラックと鉄筋降伏後の曲げ剛性(EI_2 , EI_3)はステップ3およびステップ4で使用される。また、クラックと鉄筋降伏と破壊を生じる曲げモーメントは M_c , M_y , M_f で表す。

かかる応答変位法に基づく手法の妥当性を検証するために、2次元FEMを用いて非線形解析を行った。地盤の降伏条件はモーラークーロンを用い、トンネルの非線形性をトリ・リニアとし、相互作用の表現にはジョイント要素を用いている。結果を表-4.1に示している。

括弧内の値は2次元FEMによる結果である。本文の応答変位法による非線形解析結果は2次元FEMと良く一致していることがわかる。

5. ネットワークシステムの信頼性と地震防災対策

(1) 概要^{40)~43)}

ライフラインに関わる別の視点はライフラインネットワークシステムがピラミッド構造を構成している点にある。ピラミッドの上部に位置する施設は比較的耐震的であるが、下部の膨大な量の施設は、経済的な制約もあってすべてを耐震的にするには困難である。下部の要素には非耐震的な弱体管路や処理施設があり、地震時にはきわめて脆弱な施設である。しかし、これらの下部施設の破壊はシステム全体の機能を麻痺させる可能性が高い。ライフラインシステムの信頼性を把握し、地震防災対策を進める上で、上述のライフラインシステムの特に対して十分な配慮が必要とされる。個々の要素のハード的な耐震性確保は基本的に重要であるが、それに加えて、ネットワークの連結性や機能サービス性確保などのソフト地震防災は重要である。ライフライン地震工学に関わる多くの研究がこの20数年間になされ、それらの成果は現実のライフラインシステムの地震防災にも生かされている。現状でのライフラインの地震防災は以下のように要約される。

- ・ライフライン要素構造物の耐震化：耐震設計基準や耐震化施行の採用によってシステム内の個々の要素の耐震化をはかる。

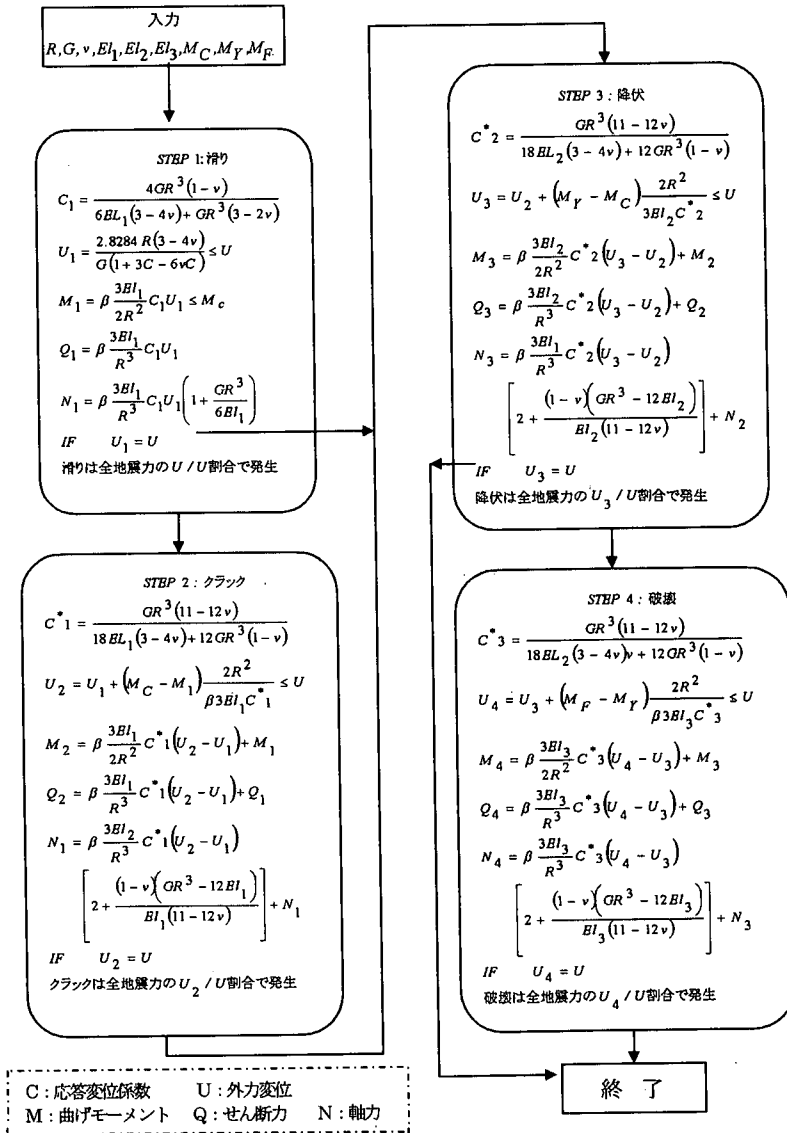


図-4.6 応答変位法によるシールドトンネルの弾塑性設計フロー

表-4.1 2次覆工がない場合の応答変位法とFEMの比較

入力データ		R=1.0	EI=1137	EI=173.1	EB=28.4	G=866	
		L=0.49	M _c =1.513	M _y =3.355	M _f =4.323	U=0.0477	
ステップ 1	C ₁	0.2				C ₂ *	0.519
	U ₁	0.003356				U ₃	0.013938
	M ₁	1.487				M ₃	3.355
	N ₁	3.350				N ₃	8.197
	Q ₁	2.973				Q ₃	6.710
	滑り荷重 (%)	7(6)				降伏荷重 (%)	29(30)
ステップ 2	C ₁ *	0.167				C ₃ *	0.76
	U ₂	0.003429				U ₄	0.037388
	M ₂	1.513				M ₄	4.3425(4.3425)
	N ₂	3.398				N ₄	15.785(14.18)
	Q ₂	3.027				Q ₄	8.685(9.056)
	クラック荷重 (%)	7(8)				破壊荷重 (%)	78(77)

単位は tonf-m

- ・ネットワークの信頼性の向上：システムの冗長化・バックアップシステムの構築・下位の被災ネットワークを全体システムから切り離すブロック化、などによってネットワークの機能信頼性が向上される（表-5.1参照）。
- ・システムのコントロール：被害の拡大、波及を防ぐために、地震動があるレベルを越えたり、機能容量がオーバーフローする場合にシステム機能を遮断する措置がとられる。例えば貯水池やガスホルダーの緊急遮断弁、列車の速度制御などが挙げられる。
- ・緊急対応の体制強化：緊急対応に当たっては、広域に拡がるシステムに対応した人員や機械の召集・

表-5.1 ライフラインシステム防災対策

ライフラインシステム	水	ガス	電力	通信
ループシステム	・水源の連絡 ・配水管の連絡	・高圧管のループ化	・送電ラインのループ化	・広域での多ルート化 ・市街地での2重化 ・顧客の多重帰属化 ・電話局の分散配置
ブロックシステム	・屋外給水 ・ブロック供水	・ブロック化	-	-
バックアップシステム	・他の水源確保 ・貯水	・ガス貯蔵	・送電システムの系統切り替え	・移動通信局 ・衛星システム

割り当て・派遣さらに兵站部門が大切で、これらの準備は重要なライフライン地震防災対策となる。上記の地震対策は実際には並列して用いられ、ライフラインシステムの特성에依りて採用される。これらの地震対策を講じることによってライフラインの脆弱性を最小限に押さえることが重要であるが、それは制限ある防災投資の中で実行されることになる。上記の防災対策は下記の要因を配慮しながら、適切な組み合わせが選択される。・地震荷重下でのシステムの機能低下危険度、・脆弱性を最小化するためのコスト、・地震防災投資に伴う利益、かかる論点から、すべてのライフラインシステムの機能をいかなる地震に対しても十分な安全性、信頼性を与えることは必ずしも得策ではない。あるレベルの地震荷重に対して、ライフラインシステムに要求される性能さえ満足していれば、その他の性能の機能低下を許すことによって有効な防災投資をはかることが可能となる。このことはライフラインシステム機能にリスクを許容することを意味する。ライフラインサービスが低下した際の経済的・社会的影響を十分に配慮して許容リスクが決定されなければならない。

(2) 水供給システムに対する地震リスク評価と防災投資^(4)~54)

施設の耐震設計、耐震補強などの事前対策を行うことが求められるが、ライフラインシステムには非耐震的な施設が多数存在することや地震発生頻度が極めて低いことなどからすべての施設を耐震的にすることは必ずしも有効な対策となり得ない。そこで、危険事象を不確定性として捉えリスクを科学的に管理するリスクマネジメント手法が発展してきている。基本的にはそれらリスクの持つ不確定性を現在の確定的費用に置き換えることで、合理的に処理しようとする手法である。ライフラインシステムを含む社会基盤施設

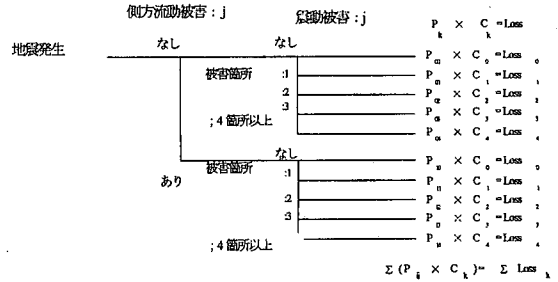


図-5.1 事象樹木モデル

設をその総合的な枠組みの中でリスクを評価し、低頻度巨大災害に対する防災投資の費用対効果を定量的に分析、検討することでそれらの地震防災対策の説得力を高めることができる⁴⁵⁾。

ここでは水供給システムにおける配水管ネットワークに着目し、地震リスク評価を行う。兵庫県南部地震における神戸市水道局の実被害データをもとに実証的な数値に基づき分析を進めることとする。水供給システムが抱える地震リスクは物理的な被害による損失と、水供給の公共性を考慮して供給停止による需要体の損失とを考慮する。そこで、機能的経済損失として上水道システムにおける被災住民の生活支障度を、また工業用水システムにおける受水企業の生産活動における影響度を、そして水道局における料金体系の損失を対象とする⁵⁴⁾。

(1)物理的経済損失：費用対効果の高い防災投資策を検討するには当該地域の地震リスクを評価する必要がある。そこで従来、地震リスクの処理法として検討されてきた地震リスク分析法を用いて神戸地域の地震リスク評価を行う。地震リスク分析法とは事象樹木解析と同様である。図-5.1に本項で用いた事象樹木モデルを示す。任意の地震動強さを事象樹木における発端事象として、任意の地震動強さによる条件付き期待損失を求める。地震動強さにはPGA(最大地盤加速度)を用いた。今回、誘因事象としては管路被害の特徴から地盤の側方流動による被害と地震動そのものによる被害の2つを考慮している。また、経済的損失に関する資料整理から管路被害の損失は口径に依存していることが知られている。したがって、管路条件は大口径($\phi \geq 350\text{mm}$)、中口径($200\text{mm} \leq \phi < 350\text{mm}$)、小口径($\phi < 200\text{mm}$)の3つに分類し、地盤条件は硬質地盤、段丘型地盤、沖積地盤、軟弱地盤の4つに分類した。管路被害の発生確率はポアソン過程に、液状化被害の発生は液状化被害が顕著に見られた町単位でのPGAから対数正規分布に従うものとした。以上の条件から地盤条件、管路条件ごとの条件付き期待損失(ロス関数)が求められる。それに神戸地域における地震ハザード曲線から地震動の発生確率を重

表-5.2 配水管路の地震リスクマトリックス

	年間地震リスク [円/km]		
	小口径	中口径	大口径
硬質地盤	190	254	0
段丘型地盤	2,386	2,626	5,041
沖積地盤	1,801	1,863	2,456
軟弱地盤	2,097	2,298	5,823

表-5.3 年間地震リスク

年間地震リスク [千円]				
構造的リスク		機能的リスク		
上水道	工業用水	住民支障度	企業影響度	水道局損失
8,284	284	2,597	21,064	410

表-5.4 対策案の50年間地震リスクおよび便益効果

対策	年間地震リスク [千円]					合計 [千円]	便益 [千円]
	構造的リスク		機能的リスク				
	上水道	工業用水	住民支障度	企業影響度	水道局損失		
対策案0 現状	406,412	14,051	127,457	595,010	13,994	1,156,924	0
対策案1 上水道管路の耐震化	219,691	14,051	50,927	595,010	9,716	889,395	267,530
対策案2 工業用水管路の耐震化	406,412	1,199	127,457	17,547	8,799	561,414	595,510
対策案3 工業用水管路の冗長性増加	406,412	22,391	127,457	103,390	9,794	669,445	487,479
対策案4 大規模貯水槽の設備工事	406,412	14,051	64,823	595,010	13,994	1,094,291	62,634

表-5.5 耐用年数を50年とした資本コストの感度分析

対策案	投資前50年 間地震リスク [千円]	資本回収 係数	投資前 年額原価 [千円]	初期投資額 [千円]	投資後50年 間地震リスク [千円]	年金原価 係数	導入によるコス トの現在価値 [千円]	投資後 年額原価 [千円]	差額 [千円]
耐用年数: 50年 資本コスト: 1.5%									
対策案1	1,156,924	0.02857	33,055	39,180,000	889,395	34.9997	40,069,395	1,144,850	1,111,795
対策案2	1,156,924	0.02857	33,055	7,750,000	561,414	34.9997	8,311,414	237,471	204,416
対策案3	1,156,924	0.02857	33,055	1,170,000	669,445	34.9997	1,839,445	52,556	19,501
対策案4	1,156,924	0.02857	33,055	1,400,000	1,094,291	34.9997	2,494,291	71,266	38,211
耐用年数: 50年 資本コスト: 5%									
対策案1	1,156,924	0.05478	63,373	39,180,000	889,395	18.2559	40,069,395	2,194,871	2,131,498
対策案2	1,156,924	0.05478	63,373	7,750,000	561,414	18.2559	8,311,414	455,272	391,900
対策案3	1,156,924	0.05478	63,373	1,170,000	669,445	18.2559	1,839,445	100,759	37,386
対策案4	1,156,924	0.05478	63,373	1,400,000	1,094,291	18.2559	2,494,291	136,629	73,257

みとした加重平均をとることにより比較的小さな地震動から非常に希な地震動まで考慮した地震リスクが算出される。表-5.2に配水管路地震リスクマトリックスを示す。このマトリックスにより当該地域の地震リスクを簡便に算出することが可能となる。

(2)機能的経済損失：機能的経済損失は供給が停止する期間に伴いその影響度が変化するため、供給停止日数から機能的損失を評価する。したがって、被害箇所数を期待値として求め復旧速度から停止日数を算出する。被災住民の支障度は住民が入手した水量と本来要求していた水量の比を取ることによって支障度と定義する。そして、代替手段により過剰に要した金額、支障度、給水人口の積から被災住民の生活支障による経済的損失を評価する。工業用水受水企業については供給各工区における配水管路ネットワークをモデル化し、供給停止日数を算出する。ここで寄与率、業種補正量、業種特性値という指標を定義する。寄与率とは生産活動での水供給への依存を考慮して、固定費に占める工業用水契約金額の割合で表現する。業種補正量

は固定費に表れない水供給への依存を考慮して、電気・ガス・水道の供給ライフラインそれぞれに依存している割合を表現する。業種特性値は水供給とは関係なく操業再開から通常の生産活動に戻るまでの期間を表現する。これらの指標を各業種ごとに求め、1日平均売上高、供給停止日数との積を取り工業用水受水企業の生産活動における影響を評価する。さらに、水道局における料金体系の損失はそれぞれの供給停止日数より算出する。表-5.3に以上より算出された年間地震リスクを示す。

(3)防災投資分析：リスクを低減させる対策代替案を5つ提案し、費用対効果を検討する。現状案は対策案0とする。上水道管路の耐震化を500mメッシュに対して行うものを対策案1とする。それに対して工業用水管路すべてに対して耐震化を行うものを対策案2とする。次に、工業用水管路の冗長性を増すため、2ルート化を行うものを対策案3とする。最後に大規模貯水槽を整備し、応急給水量の増加をはかるものを対策案4とする。また、これら耐震化施設の耐用期間

は長期に及ぶことから年額原価法という手法を用いて投資分析する。耐用年数を50年とした地震リスク及び便益効果、さらに資本コストの感度分析を表-5.4、表-5.5に示す。便益効果からは対策案2が最も効果の高い対策案であるが、初期投資額を考慮して投資分析をした結果、対策案2はそれほど費用対効果の高い対策案ではないといえる。今回検討した対策案の中で最も費用対効果の高い対策案は工業用水管路の冗長対策であるが、初期投資が非常に大きいことと地震の発生頻度が極めて低いことなどから資本の回収が困難であることが知られた。したがって、今後リスクの処理手段としてリスクファイナンスを取り込んでいくことも必要であると考えられる。

6. ライフライン地震工学に関わる今後の課題

最近の20数年間に進歩してきたライフライン地震工学はライフライン施設の耐震化手法の確立に多大の精力がそそがれてきた。しかし、先述のようにソフト地震防災や緊急対応・復旧・復興戦略の確立にさらなる研究分野が展開されなければならない。勿論、システムを構成する個々の要素施設が十分に耐震的になればソフト対応策の検討は必要ないはずであり、施設耐震化が至上命令であることに違いはない。将来における研究課題を下記にリストアップする^{12), 19)}。

(1) リアルタイム地震動モニタリングシステム

ライフラインの敷設されている全域に地震計を設置し、あるレベル以上の地震動をキャッチすれば、システムの一部または全体を2次災害の波及を防止できるように自動的に遮断できる目的で設けられるものもある。これまで、ガス・水道・鉄道のライフラインシステムでガスの漏洩や列車の転覆を防ぐために実用化されている。さらに地震計の配置の仕方によっては、地震発生と波動が当該地に到達するまでの時間差を利用して2次災害の発生を防止できるような目的を持つモニタリングシステムも現存しており、CUBE (Caltech and USGS Broadcast of Earthquake)¹²⁾ やUrEDAS (Urgent Earthquake Disaster Alarm System)⁵⁹⁾ などがある。地震計の配置法・計測地震動と処理法・地震動の補間・地震動と被災の相関性などの課題が十分に解決されていく必要がある。

(2) ライフライン・ヘルスマニタリングシステム

システムのライフライン地震防災は平常時においても有用なことが望ましい。ライフラインシステムの一部に日常的なトラブルが発生した場合に、それをキャッチし、対応策をとれるような仕組みは、地震時

時間	【数分】	【1分】	【5~10分】	【1時間】	【~半日】	【3日~10日】	完了
(分)	0.1	1.0	10.0	100	1000	10000	
地震発生	早期警報システム	地震計情報モニタリング	気象庁発表震度階	被害把握	システム制御	緊急修繕	復旧作業

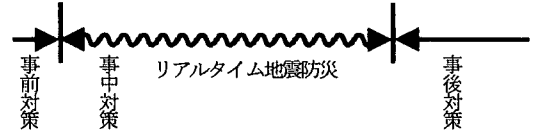


図-6.1 リアルタイム地震防災の概念図

においても活用される。日常的なライフラインシステムの健全度を監視するシステム地震防災対策として活用していくことが望まれる。電力における継電リレーシステムや通信ケーブル内に封じ込められたガス圧を遠隔監視するシステム、さらには水道やガスの流圧や流量をコントロールするシステムは地震時にも有用である¹⁹⁾。将来的にはライフライン要素施設の変形や応力を自動計測するセンサーの開発、異常フローをアラームするシステムなど先端技術を駆使しながら、スマートライフラインシステムの構築が望まれる。

(3) 災害情報システム

地震時にはライフラインシステムに物理的あるいは機能的損傷が生じるが、それらは適切な方法でできるだけ早く回復をはからなければならない。しかし、大都市域では異なるライフラインが同じ道路下に埋設されることも多く、互いの損傷と回復作業の間には強い相関が存在する。すなわち、ライフラインの相互連関を配慮する必要がある。したがってライフラインの災害情報システムを確立して緊急対応と復旧に関わる機関に知らしめる必要がある。かかる災害情報システムが確立されると互いのライフライン事業者間で災害把握と復旧作業に関して連携がなされ、早期に調和のとれた回復プランが作成されることになる。災害情報システムの確立のためにはコンピュータを駆使してリアルタイムデータを収集し、その分析と結果の伝達を計る必要がある。さらに詳細には地震直後に責任あるライフライン事業者が災害現場でデータをインプットして、災害情報システムの指令センターに伝達し、それが各ライフライン事業者知らされるシステムの構築が必要である。時々刻々に入力される災害と復旧のリアルタイムデータを各ライフライン事業者が知ることによって適切な復旧計画を時々刻々に変更することが可能である。このようなコンピュー

タシステムではモバイルGIS（地理情報システム）やGPSが有効である。しかし、このようなデータの集中化を地震時に可能にするためには災害情報システムを構成するハードの耐震安全性の確保が重要である。

（４） GIS（地理情報システム）の応用

GISは種々のデータを収集し解析するコンピュータシステムである。GISの特徴は膨大なデータを視覚的に取り扱い、異なる種類のデータを重ね合わせて分析するところにある。GISによって以下のようなことが可能となる。・ライフラインの被災と復旧に関するデータを柔軟に処理する。・高い精度を持って被災・復旧状況のデータを視覚的に表示する。・同時並行して行われる復旧作業の状況を相互に分析する。

復旧作業をライフライン相互に関連づけながら確立できる機能は復旧戦略策定に有用である。1994年ノースリッジ地震の折にはGISを用いて効率良い復旧作業が行われた。GISを用いての被災や復旧に関するシミュレーションが試行的に実施されつつあり、今後ライフライン地震工学に果たす役割はますます大きくなっていくであろう。

（５） リスクマネジメント手法によるライフライン地震防災

ライフライン地震防災に関しては、多くの不確定要因を考慮しつつ、社会・経済的な影響も配慮して、限られた時間内に実施する必要がある。地震防災対策は下記の項目を考慮して策定される。

・直接および間接の危険度の軽減、・地震防災投資の費用便益効果、・地震時のライフラインの信頼性向上、効果的に上述の項目を配慮して、ライフライン防災投資を進めていくためには、防災計画の策定・評価・選択にリスク管理手法を用いるのが良い。リスク管理手法については、これまでにいくつかの基本的な研究がなされている。管路の補修コスト、緊急飲料水の供給コスト、日常生活における不便コスト、消火水の不足による損失そして生産力低下に伴うコストなどを配慮して水道システムのリスクマネジメントを実施している研究もある⁵¹⁾。また、全体の損失を最小化する目的で、管路の耐震取り替えをリスクマネジメントの視点から論じる手法も提案されている⁵²⁾。阪神・淡路大震災以降ではライフライン管路の復興計画を策定するのにロスに関わる不確定要因を配慮しながら、防災投資額を決定に最小ロスを目的関数とする手法も提案されている⁵³⁾。今後は、リスク管理手法をライフライン地震防災の戦略決定に応用していくことか望まれる。

（６） ライフラインのリノベーションと地震対策

ソフト対応の重要性が阪神・淡路大地震以降に多く指摘されているが、何よりも施設耐震化への投資が重要である。共同溝や大容量送水管、液状化対策などが進められているが、コストパフォーマンスを日常の施設利用と関連して配慮していく必要がある。多重化・冗長性は各都市インフラの目指す所である。防災街づくりにシステムネットワークの概念を取り入れる必要があるが、防災投資との関わりで困難なことも多い。神戸市の山側を走る送水トンネルとは別に海側を走る大口径送水管を作る計画は大事業であるが震災復興のシンボル事業として実現段階にある。関西全域を覆う大阪ガスや関西電力の機能が停止した折に、地域をおおう巨大システムの欠陥が指摘されて、自律分散型のシステムの構築の必要性が議論された。しかし、現状のシステムを根本的に変更することは容易ではない。ガス・電力ではきめ細かいブロック化供給システムに作り替えることで、自律分散システムの概念を取り入れようとしている。一方、現在は高齢社会となり、循環型の社会へと変化しつつあり、価値観も多様化している。従来の都市インフラは道路・鉄道も含めて将来需要を予測して、それを満足するような都市インフラ建造を進めてきたが、社会の価値観の変化は地域のニーズやきめ細かいインフラのサービスを要求している。いわば事業者・行政によって進められてきたインフラ整備は一段落して、多様な社会の変化に対応できにくい硬直したインフラとなっている可能性も高い⁵⁶⁾。今後は地域ニーズに対応できるフレキシブルなインフラ整備への転換の必要性が感じられる。阪神・淡路大震災では、ライフスポットという概念が新たに生まれた。都市全体をおおうネットワーク状のインフラは必ず地震の際には被災する。したがって、そこへ行けば必ず水や電力や情報や食料が手に入るようなスポットを街のあちこちに作るという構想である。防災拠点とも云えるが、地域の住民が状況に応じたニーズを満足することができるようなスポットを街づくりの一環として進めることの大切さが改めて認識される場所である。基幹の都市インフラの整備が一巡した現在、地域へのエネルギー供給や水供給処理ができるよう地域コモンインフラを整備していくことも重要であろう。必ずしも行政による管理ではなく、地域で管理できるインフラであっても良い。多様な都市インフラの構築に向けて知恵を結集する段階にきている。

参考文献

- 1) Duke, C. M. and Moran, D. F. : Guidelines for evaluation of lifeline earthquake engineering, Proceedings of the

- U. S. National Conference on Earthquake Engineering, pp. 367~376, 1975.
- 2) NSF・SPS: 日米科学協力セミナー, ライフライン系に重点をおいた地震工学研究講演論文集, 1976. 11.
 - 3) Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE), ASCE: The current State of Knowledge of Lifeline Earthquake Engineering, 1977. 8.
 - 4) Task Force on Lifeline Earthquake Engineering (TFLEE), ASME: Lifeline Earthquake Engineering-Buried Pipelines, Seismic Risk and Instrumentation, 1979. 6.
 - 5) 建設省土木研究所: US-JAPAN Workshop on Seismic Behavior of Buried Pipelines and Telecommunications System, 1984. 12.
 - 6) Hou, Z. and Talada, S.: Proceedings of China-Japan Symposium on Lifeline Earthquake Engineering, Seismic Behavior and Risk Analysis of Buried Pipeline, China, 1990. 11.
 - 7) 震災予防協会: インフラストラクチャ報告, No.100(5), 1976.
 - 8) 土木学会: 1964年新潟地震調査報告, 1996.
 - 9) 日本水道協会東北支部: 1978年宮城県沖地震による水道被害, 1979.
 - 10) 日本ガス協会: 1978年宮城県沖地震とガスシステム, 1979.
 - 11) 能代市: 1989年日本海中部地震~将来への教訓~, 1984.
 - 12) 都市と環境に関する研究会(SPI): 地震と都市ライフライン, Part3, 京都大学学術出版会, 1998.
 - 13) 高田至郎, 前田俊宏, 松本文浩, 棚橋隆司: GISによる地震時配水管路被害危険度予測, 土木学会年次学術講演会, 1997.
 - 14) 高田至郎, 北田敬広: 兵庫県南部地震時における水道管路被害と方位特性, 建設工学研究所論文報告集, 40-B, pp. 59~67, 1998.
 - 15) 水道技術センター: 地中管路の地震被害想定に関する研究, 1998.
 - 16) 高田至郎, 高谷富世, 小川安雄, 福井真二: モニタリングシステムにおける地震動補間法と精度の検証, 構造工学論文集, Vol. 40A, pp. 1151~1160, 1994.
 - 17) 高田至郎, 李騰雁, 福田克己, 棚橋隆司: 埋地地または断層地形周辺における地盤永久変形による地中管路の被害特性, 構造工学論文集, Vol.44A, pp. 1629~1636, 1998.
 - 18) O'Rourke, T. D., Toprak, S. and Sano, Y.: "Los Angeles Water Pipeline System Response to the 1999 Northridge Earthquake", Proceedings from the 6th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-96-0012, pp. 11~16, 1996.
 - 19) 高田至郎: ライフライン地震工学, 共立出版, pp. 186, 1991.
 - 9.
 - 20) 日本水道協会工務部: 兵庫県南部地震による水道施設の被害状況等調査について(その2), 水道協会雑誌, 第62巻, 第4号, 39号, pp. 131~158, 1996. 4.
 - 21) 桜井彰雄・高橋忠ら: 長大構造物の地震応答解析法の提案, 第3回日本地震工学シンポジウム, pp. 429~436, 1970.
 - 22) Tamura, C.: Design of Underground Structures by Considering Ground Displacement during Earthquake, Proc. of US-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline System, Tokyo, Japan, pp. 417-433, 1976.
 - 23) Kiyomiya, O. and Minami, K.: Evaluation of Stresses on Submarine Pipelines in Liquefied Seabed, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, pp. VII-91~96, 1994.
 - 24) Takada, S. and Tsubakimoto, T.: Earthquake Response Simulations of T-Shaped Portion In Ductile-iron Pipelines and Development of Earthquake Resistant Hot Branch Sleeve, The 4th National Congress on Pressure Vessel and Piping Technology, Portland, Oregon, pp. 357~364, 1983.
 - 25) Koike, T.: Structural Strains of the Buried Pipeline under Seismic Risk, Proc. of the Tri-lateral Seminar-Workshop on Lifeline Earthquakes Engineering, Taipei, Taiwan, pp. 281~295, 1985.
 - 26) Iwamoto, T. and Yamamura, Y.: Observations and Analysis at the Bend and Tee Portions of Buried Ductile-Iron Pipelines During Earthquakes, Seismic Performance of Pipelines and Storage Tanks, Proc. of the 1985 Pressure Vessels and Piping Conference, pp. 69~79, 1985.
 - 27) Takada, S. and Tanabe, K.: Three Dimensional Seismic Response Analysis of Buried Continuous or Jointed Pipelines, Seismic Performance of Pipelines and Storage Tanks, Proc. of the 1985 Pressure Vessels and Piping Conference, pp. 35~42, 1985.
 - 28) Nishio, N.: Dynamic Strain in Buried Pipelines due to Soil Liquefaction, Earthquake Behavior of Buried Pipelines, Storage, Telecommunication and Transportation Facilities, Present at The 1989, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Honolulu, Hawaii, pp. 83~88.
 - 29) 東京大学生産技術研究所片山研究室: 東京大学生産技術研究所千葉実験所における地震動の3次元アレー観測, 強震動アレー観測記録データベース推進委員会/作業部会報告書, 1991.
 - 30) 荘司雄一, 神山真, 朝田秋江: リアルタイム・オンライン・アレー地震観測システムSmall-Titanの構築とその記録の

- 一例, 第25回地震工学研究発表会, pp. 41~44, 1999. 7.
- 31) 茂木秀則, 川上英二: 高密度アレーにおける最大加速度比の統計解析, 第25回地震工学研究発表会, pp. 41~44, 1999. 7.
- 32) 日本ガス協会: ガス導管液状化対策調査, 平成10年度成果報告書, ガス導管液状化対策調査研究特別委員会資料, 1999. 3.
- 33) Takada, S., Ogawa, Y., Yoshizaki, K., Kitano, T. and Kuwajima, T.: "A large scale deformation analysis technique for buried pipes exposed to lateral displacement due to liquefaction", Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, pp. 1~9, 1989. 9.
- 34) 高田至郎: 断層近傍における管路の耐震設計法に関する研究, (財) 災害科学研究所報告, 1999. 3.
- 35) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針・解説, 1979版および1997版.
- 36) (社) 日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針, 1982.
- 37) (社) 日本ガス協会: 高圧ガス導管耐震設計指針 (改訂版) 第1次案, 1999. 7.
- 38) Takada, S. and Abdel-Aziz, M.: "Simple Mathematical Formulae in Estimating the Transversal Forces in Shield Tunnels Considering Inelasticity of the Tunnel-Ground System", Memoirs of the Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Vol. 16, 1998. 3.
- 39) Shiba, Y. and Okamoto, S.: "A Proposal of Practical Earthquake Response Analysis Method of Cylindrical Tunnels in Soft Ground", Proceedings of the 4th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, Los Angeles, pp. 19~33, 1991. 8.
- 40) Kameda, H. and Takada, S.: Seismic Vulnerability of Urban Lifeline Systems, UNDP, 1991.
- 41) Taleb-Agha, G.: Seismic Risk Analysis of Network, Seismic Design Decision Analysis, Report No.15, MIT, 1974.
- 42) Feigenbaum, E. A.: The Art of Artificial Intelligence, Themes and Case Studies of Knowledge Engineering, in IJCAI5, pp. 1014~1029, 1977.
- 43) 建設省土木研究所: ライフライン施設の耐震性評価に関する基礎調査報告書, 1982. 3.
- 44) 水本雅晴: フィジィ理論とその応用, サイエンス社, 1987. 4.
- 45) 嘉嶋崇志: アンケート調査による兵庫県南部地震の被災特性分析とライフライン被害の経済的損失に関する研究, 神戸大学大学院修士論文, pp. 73~101, 1997. 2.
- 46) Williams, C. A. Jr. and Heins, R. H.: Risk Management and Insurance 6th-ed, McGraw-Hill Book Company, p. 8, 1989.
- 47) 日本工業用水協会: 工業用水施設の耐震性強化及び緊急時対応に関する検討報告書, (社) 日本工業用水協会, pp. 13~19, 1996. 6.
- 48) 長崎純男, 川崎順子: 震災地の断水に伴う生活支障度の定量評価一その1 1995年兵庫県南部地震による神戸市での生活支障の実態一, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 127~128, 1997. 9.
- 49) 川崎順子, 長崎純男: 震災地の断水に伴う生活支障度の定量評価一その2 断水による生活支障度定量評価法の提案と支障度算定の試み一, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 129~130, 1997. 9.
- 50) 日本工業用水協会工務部: 阪神・淡路大震災による水道施設の被害状況等調査について (その2), 水道協会雑誌 第65巻 第4号, (社) 日本水道協会, pp. 131~158, 1996. 4.
- 51) 関西水道事業研究会・耐震計画分科会: 市民の視点にたった水道地震被害予測及び震災時用連絡管整備に関する一考察 (関西水道事業研究会耐震計画分科会報告書), 関西水道事業研究会, pp. 1~102, 1996. 3.
- 52) 篠塚研究所: Seismic Risk Management方法論及び適用例, (株) 篠塚研究所, pp. 1~15, 1995. 8.
- 53) 水谷守, 中村孝明, 下野正人, 亀村勝美: 確率論的アプローチによる地震リスクマネージメント (SRM) の提案, 土木学会第5回年次学術講演会講演概要集, I-B369, 1996.
- 54) 嘉嶋崇志, 田中良英, 高田至郎: 水供給システムに対する地震リスクマネージメント, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, I-B416, 1997.
- 55) 中村豊: 早期地震検知警報システム「ユレダス」, 地震ジャーナル, 地震予知総合研究振興会, No.14, pp. 34~39, 1992.
- 56) 青山俊介: 循環型社会形成に向けての都市代謝体系の構成~地域コモン施設の組み込み/建物と都市代謝施設の統合化~, 日本学術会議, 第1回生活環境設計シンポジウム講演論文集, pp. 41~46, 1998. 7.

(1999.11.18受付)