



地震とライフライン被害

清野純史*

Earthquake and lifeline damage

Junji Kiyono*

Abstract

Lifelines such as electric power and communication systems, gas supply system, water and wastewater systems, highways and railways are important utilities and transportation systems for recent urban cities. The focus of this report is on the past earthquake damage to lifeline, the characteristics of lifeline damage and the issues associated with the disaster mitigation. Outlines of the active fault-induced damage, seismic ground motion, damage to infrastructures were described. Although the steady progress has been made to develop the disaster mitigation program for lifelines, new strategies for coping with catastrophic losses should be developed. The necessity of lifeline risk management is also mentioned in this report.

1. はじめに

主に第四紀地質時代以降に繰り返し活動を続けている地震断層の変位の蓄積を地表に残すことによって、地表以深の断層の存在を示している活断層は、その活動の結果として生じる地盤の永久変位と、断層から発せられる地震波による地盤震動によって、人間社会に様々な被害を及ぼす。ライフラインの地震被害もその一つであり、都市化が進めば進むほどその被害は甚大なものとなり得る。ライフラインとは、狭義には我々の生活に欠かせない電気・ガス・上下水道・通信などの公益事業から、広義には鉄道・道路・航空などの輸送システムに至るまで、その物理的被害や機能被害が重大な生活支障の原因となったり、最悪の場合には生命の危険をも生ぜしめるような基幹施設であり、線的・面的な広がりを有するネットワークでサービスを提供することが大きな特徴の一つである。そのため、時間的・空間的な波及が無視できず、ネットワークを構成しているが故の、この時空間的な被害の波及効果が、特に近年の大都市におけるライフライン災害の特徴となっている。

ここでは、冒頭で述べた意味での活断層による地震に特化せず、広く過去の歴史地震一般によるライフライン被害の歴史とその特徴、およびライフライン地震防災の今後の展望と課題について述べる。

2. 過去地震によるライフライン被害

ライフライン被害は都市型災害の特徴であるがゆえ、1923年関東地震以降の中・大都市を襲った被害地震を中心に振り返ることとする。

(1) 1923年（大正12年）関東地震

1923年（大正12年）の関東地震（M7.8）は、東京・横浜を中心に主に大火によって14万人を越える死者・行方不明者を出す未曾有の大災害となった。交通・電気・ガス・水道などのライフラインは完全に麻痺した。電柱25,442本、機関車・客車2,400両（破損を含む）、市電393両、給水栓155,103カ所が焼失し、変電所・発電所の焼失・倒壊や41,387箇所での漏水が記録されている。ただし、東京では5日後に給水、電気は6日後に送電が始まり、電話も1

* 京都大学工学研究科

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

週間後に開通した（官公庁史料編纂会，1996）。鉄道に関しては、東海道本線根府川駅に進入してきた下り列車が激震に遭い、列車ごと海側に転覆して100名以上の死者・行方不明者を出している（久保田，2000）。この地震では、東海道本線の根府川～真鶴間の双龍橋梁や茅ヶ崎～平塚間の馬入川橋梁も壊滅的な被害を受けている。当時は電気やガスはそれほど多目的に使われていたわけではなく、上水も井戸を利用していた所も多く、また被災した鉄道・道路に代わって船を物資輸送に活用したこともあり、近年の都市直下地震によるライフライン被害とは本質的に異なる被害形態であったものと思われる。

(2) 1948年（昭和23年）福井地震

その後、1927年（昭和2年）の北丹後地震（M7.3）、1930年（昭和5年）の北伊豆地震（M7.3）、津波被害の大きかった1933年（昭和8年）の三陸地震（M8.1）、戦時中の1943年（昭和18年）の鳥取地震（M7.2）、1944年（昭和19年）の東南海地震（M7.9）、1945年（昭和20年）の三河地震（M6.9）、戦後の1946年（昭和21年）の南海地震（M8.0）が続いた。1948年（昭和23年）の福井地震（M7.1）では、福井・石川両県を中心に死者38,895人、全半壊家屋33,520棟、焼失家屋3,851棟を出す大災害となった。上水道では地震発生とともに福井平野にある取水・浄水・送水・配水・給水各施設に甚大な被害が発生し、断水が生じた。管路では継ぎ手部や栓・弁の取り付け部に被害が集中した。下水道施設は被災した市町村には整備されてなかった。道路では、橋梁破壊や路盤沈下・軟化、切土面や盛土の崩壊が生じたが、多大な交通支障を与えたものは橋梁被害であり、家屋の倒壊と同じ範囲に集中していた。被害橋梁は鉄道の27橋梁を含め237橋梁に及んだ。電力被害は、発電は火力がなかったため山間部の水力発電に限られたが、発電施設や送電線被害は軽微であった。また、主に平野部に位置する変電施設や配電線（支柱のほとんどは木柱）は地震の揺れのみならず火災によっても大きな被害を受けた。鉄道では大築堤の崩壊や九頭竜川橋梁の落橋が生じ、後者は仮復旧までも2ヶ月強の月日を費やした（北陸震災調査特別委員会，1950）。この地震は周知のように気象庁震度階改訂（震度VIIの導入）の契機となった地震である。

(3) 1964年（昭和39年）新潟地震

1964年（昭和39年）の新潟地震（M7.5）では、新潟・秋田・山形県を中心に死者・行方不明者38人、家屋全壊1,087戸、家屋半壊7,456戸、道路損壊918箇所、橋梁損壊40箇所に及ぶ被害が生じた。電力施設に関しては、被害を受けた地域は主に東北電力の供給区域であり、特に新潟県内の送電線や変電所、配電線路の被害が大きかった。新潟火

力発電所では復水器冷却水路、取水路や排水管路に大きな被害が生じ、停止期間は一ヶ月にも及んだ。鉄塔の傾斜も多数生じている。震源に最も近接した都市であることもさることながら、新潟市の地盤が砂質地盤であり、この特異性が被害を拡大させた。水道施設は、取水所、浄水所の配水管以外の施設被害は軽微であったが、地下埋設物である水道管は、継ぎ手の抜けなどにより、全延長470kmのうちの約68%が全て取り替えなければならない状態であった。下水道は、ポンプ場や管渠が大被害を受け、マンホールの浮き上がりも方々に見られた。新潟にはガス事業者が28業者あったが北陸瓦斯以外はガス製造設備をもたない簡易事業者であったため、北陸瓦斯以外は軽微な被害で済んだ。工場設備は液化化や地盤変状による陥没、傾斜、浸水被害が生じ、ガスホルダーの大部分が使用不可能となった。供給導管設備は信濃川沿いの地域が特に大きな被害を受け埋設本枝管の折損、継ぎ手の抜け出し、地盤沈下による配管勾配の狂い、折損部分からの浸水など多岐に渡る被害が生じてその機能を完全に失った。復旧は地震発生後半年となった。道路被害では左岸側の4径間、右岸側の1径間の計5径間が落橋した昭和の大橋をはじめ、震源地からの距離が小さいほど被害率が大きくまた被害程度も高くなっているが、地盤の良否の影響も顕著に現れている。道路被害も、路面の大きな亀裂、陥没、隆起など旧新潟市内を中心として広範囲にわたっている。復旧に際しては国県市道の改修工事、上下水道、ガス、電力地下埋設物の復旧工事が並行して行われたため、それぞれの工事間の調整の問題も生じた。鉄道被害も甚大で、不通区間19線、115ヵ所、軌道・トンネル・橋梁を含む施設関係被害は3,400件にも及んだ。新潟駅構内では跨線橋が線路上に落下、また、信濃川橋梁の橋脚が大きく傾く被害も生じており、約1ヶ月の日数を持って応急復旧が完了した（土木学会新潟震災調査委員会，1966）。

ちなみに、この地震の翌年の1965年にニュージーランドで開催された第3回世界地震工学会議で新潟地震についての報告がなされている。液化化被害についての関心が高まっている中、報告の中にはliquefactionと言う言葉は見当たらないが、この報告に対する質問事項においては、被害の原因がliquefactionであること、コンパクションパイルを使えば被害は避けられたはずと言うコメントが掲載されている。

(4) 1968年（昭和43年）十勝沖地震

1968年（昭和43年）の十勝沖地震（M7.9）では、津波被害が顕著であった1952年（昭和27年）の十勝沖地震と同様、北海道南部、東北地方を中心に、死者52人、負傷者330人、全壊家屋673棟、半壊家屋3,004棟の被害が生じた。上下水

道、工業用水道の施設被害は主として埋設管類に集中し、特に函館・室蘭・苫小牧・岩見沢などの市内配水管系のうち軟弱地盤地帯に敷設された本枝管に被害が集中した。通信では本州～北海道間の通信が途絶、中継伝送路の多ルート化への教訓となった。電話、電気とも2日で復旧、水道は10日、ガスは20日で復旧している。鉄道では、室蘭、函館本線を含む多数の線区の施設に被害が生じ、50駅区間で列車が運行不能になった。鉄道盛土に多くの被害が出ている。道路被害としては、軟弱地盤の盛土法面の崩落、路肩の亀裂・沈下による舗装路面の変状、切土法面からの落石などの被害が生じている。道路橋には致命的な被害は生じていない(1968年十勝沖地震調査委員会, 1969; Suzuki et al., 1971)。

(5) 1978年(昭和53年)宮城県沖地震

1978年(昭和53年)の宮城県沖地震(M7.4)では、宮城県を中心に死者28人、負傷者約1万人、また電気・ガス・水道・道路などライフライン系に大きな被害が生じ、市民生活に多大な障害を与えた。この地震は、国内ではいわゆる都市型災害を引き起こした嘯矢としての地震、またその後のライフラインの耐震設計の考え方に大きなインパクトを与えた地震として位置づけられる。ちなみに米国では、ライフライン施設の重要性が認識され、耐震設計の推進に弾みをつけた地震は1971年のサンフェルナンド地震(M6.4)であろう。電力に関しては、地震直後の東北電力管内で681,600戸が停電したが2日後には全面復旧している。特に変電設備の被害が大きかった。配電設備の被害の多くは軟弱地盤地域で発生している。ガスは、ガス導管などの供給設備に多数の損傷(3,500件)が生じたため、約3日間供給停止を余儀なくされ、供給停止需要家数は約151,000件に及んだ。この地震では仙台市ガス局の有水式ガスホルダーが倒壊・炎上している。復旧に半年を要した新潟地震の経験を基にガス供給エリアのブロック化など迅速な対応が取られたため、約1ヵ月後に全面供給を開始した。上水道設備は、仙台市を中心に主に管路の破損によって市内7,000戸以上が断水したが、数日程度でほとんどが回復した。下水施設では排水処理場やポンプ場に部分的な被害が生じている。通信施設では、橋梁添架のパイプや地下埋設のケーブルの切断が生じたため、これ以降所外設備の強化が行われている。施設に甚大な被害がなくとも、地震後の輻輳によって機能障害に陥ることが新たな問題として浮かび上がってきた。道路交通施設では路面の陥没・沈下、橋梁破損などが生じ、また仙台市内では停電による信号器不作動により大渋滞が発生した。鉄道施設には大小あらゆる被害が発生しており、無筋コンクリート橋脚の被害や橋梁支承部の被害、高架橋中間梁のせん断破壊なども生

じている(1978年宮城県沖地震調査委員会編, 1980)。

(6) 1983年(昭和58年)日本海中部地震

1982年(昭和57年)の浦河沖地震(M7.1)に続く1983年(昭和58年)の日本海中部地震(M7.7)では、秋田県を中心に死者104人(うち津波被害は100人)、負傷者163人(同104)、建物全壊934棟、半壊2,115棟の被害が生じ、またライフライン施設も大きな被害を受けた。ライフライン被害は主に液状化やそれに伴う地盤変状によって生じたものである。特に上下水道の埋設管やマンホールの被害は広い地域にわたって生じ、電力施設では地盤変状の認められた地域で電柱の倒壊や折損、傾斜や沈下の被害が多発し、ガス施設では一部地域でガスの漏洩が多発、ガスの送出が停止された地域もあった。道路では、やはり液状化や地盤変状に伴う路面亀裂や盛土被害崩壊、鉄道では、特に震源地に近い奥羽本線(秋田以北)や五能線で盛土や橋梁、軌道・停車場などに多数の被害が生じた。盛土では、沢や谷の横断部、切盛境界部、超軟弱地盤や旧河道上で被害が多かった(1983年日本海中部地震調査委員会編, 1986; 北羽新報社, 1983)。

(7) 1995年(平成7年)兵庫県南部地震

御岳崩れを起こした1984年(昭和59年)の長野県西部地震(M6.8)、道路被害の大きかった1987年(昭和62年)の千葉県東方沖地震(M6.7)、寒冷地であるがゆえ地盤の凍結による埋設管被害発見の困難さを露呈した(鏡味, 1993)1993年(平成5年)の釧路沖地震(M7.8)(写真1)、甚大な津波被害、及び鉄道では電車線鉄柱の折損被害等が生じた1994年(平成5年)の北海道南西沖地震(M6.8)、1994年の北海道東方沖地震、三陸はるか沖地震と続き、1995年(平成7年)には活断層の活動による、いわゆる都市直下型の兵庫県南部地震(M7.3)が起こった。

この兵庫県南部地震は、6千人を越える死者、4万人を越える負傷者、住家の全壊約11万棟、半壊約14万7千棟(地震予知総合研究振興会, 1998)に及ぶとともに、電気・ガス・水道・通信施設が壊滅的な被害を受け、また道路高架橋や新幹線高架橋の倒壊・落橋など、ありとあらゆるタイプの被害が生じた。これまでのライフライン事業者は、地震のたびに経験を積み上げ、その後の地震に対する準備や対応を策定して対処してきたが、兵庫県南部地震では、事業者単体で対処するには人的資源も物的資源もあまりに不足しすぎていたため、これまでに経験した被害規模の単なる外挿では済まず、復旧は遅れに遅れた。

上水道は、給・配水管被害を含むあらゆる水道施設が被災し、兵庫県・大阪府を中心に約123万戸が断水したが、1ヵ月半後には漏水箇所の仮補修や仮設配管により仮復旧



写真1 マンホールの浮き上がり（1993年釧路沖地震）



写真2 震動・火災などによる電柱の損壊（1995年兵庫県南部地震）

が終了している。下水道施設は、家庭排水設備から処理場・ポンプ場、管渠に至るまで大きな被害を被った。神戸の東灘処理場では処理機能が完全に停止（4ヵ月後に機能回復）し、神戸市内の下水管渠施設（汚水・雨水）の敷設延長の2%弱が被災した。電力は、地震直後には送電設備・配電設備の被害により関西電力管内の需要の1/4に当たる約260万戸が停電したが、約一週間後には応急送電により停電はほぼ解消した。家屋倒壊や火災による電柱や引込み線被害も多数発生した（写真2）。ガスは、大阪ガス管内で約86万戸の供給が停止したが、3ヵ月後までにはほぼ供給を再開した。通信施設は、一部の設備被害とともに約30万回線が一時的に不通となる被害を受けた。これ以降、全国利用型伝言ダイヤルが開発され、また衛星利用が拡大されている。鉄道においては、列車の脱線、高架橋の損壊、軌道変状、盛土の崩壊のみならず、停車場設備や電気設備、そして車両基地に至るまで大きな被害を受けた。山陽新幹線で8箇所、在来線および新交通システムで24箇所の計32箇所では橋梁の落橋（写真3）が発生している。道路では、阪神地区の大動脈である国道や高速道路が落橋等で寸断（写真3、写真4）されるとともに、家屋の倒壊で生活道路が機能しない状態になるなど、消火・避難・救援・復旧・生活物資輸送などあらゆる面に多大な負の影響を与え



写真3 山陽新幹線高架橋の落橋（1995年兵庫県南部地震）



写真4 阪神高速高架橋の倒壊（1995年兵庫県南部地震）

た（関西ライフライン研究会，2004；官公庁史料編纂会，1996）。

(8) 2000年（平成12年）鳥取県西部地震

兵庫県南部地震以降，強震ネットワークや多数の震度観測点が整備された後の地震である1997年（平成9年）の鹿児島県北西部地震，周回道路の被害（写真5）で孤立集落を生んだ2000年（平成12年）の神津島近海地震（最大でM6.5）に続き，同じく2000年（平成12年）には鳥取県西部地震（M6.7）が起こった。

活断層は事前には指摘されておらず（理科年表，2003），地方の中都市である米子，境港市を中心に被害が広がった。鳥取県における断水被害総数は最終的に5,744戸であり，近隣県を合わせると6,801戸に断水が生じた（写真6）。下水道の被害としては，主に管渠の破損とマンホールの隆起などの10数件が報告されている。ガス漏れは43件発生したが，ほとんどが灯内管であり，本支管の被害は数箇所程度であった。電力については，地震直後に停電したがすぐに復旧した。鳥取，岡山，鳥根など合わせて17,403戸が被害を受けた。電話については，溝口町内の一部不通を含め，



写真5 がけ崩れによる神津島周回道路の被害（2000年神津島近海地震）



写真6 承水路に架かる水管橋の被害状況（2000年鳥取県西部地震）

鳥取県内で134回線が被害を受けた。また，安否を確認する電話が殺到して輻輳したが，災害用伝言ダイヤルを設けるなどして対応した。運用開始後30分で約3,200件の利用があるなど，これまでの災害で最高の利用数を記録した。道路橋については構造物そのものの被害は少なく，ほとんどが橋台付近での地盤の変状による段差の発生であった。山間部では地震動による土砂災害，法面崩壊，落石等の影響による被害が見られた（Kiyono et al., 2007）。

(9) 2004年（平成16年）新潟県中越地震

三原駅付近で山陽新幹線高架橋ラーメンの中間梁が被害を受けた2001年（平成13年）の芸予地震（M6.7），東北新幹線の石鳥谷付近の高架橋がせん断破壊を起こした2003年（平成15年）の宮城県沖の地震（M7.0），2003年（平成15年）の宮城県北部地震（M6.2），また，同じく2003年の十勝沖地震（M8.0）では，道路橋や新幹線を含む鉄道に被害が出ており，また石巻線前地谷駅構内，根室本線音別駅構内で車両の脱線が生じている（関西ライフライン研究会，2004）。

2004年（平成16年）の新潟県中越地震（M6.8）では，死者68人（含む関連死），重軽傷者4,795人に及ぶ人的被害と，全壊3,175棟を含む120,837棟の住家被害が生じた（新潟県，2007[1]）。また，電気・ガス・水道・通信などあらゆるライフライン被害が生じた（土木学会，2005）。特に，新幹線の歴史上初の脱線事故やこれまで顕著な地震被害の生じていなかった山岳トンネルの被害，中山間地帯の道路被害により孤立集落が発生したのも特徴である。高速道路でも震源近傍に位置する関越自動車道の盛土・切土等の土工部や橋梁・トンネル被害などにより，車両を残して避難する事態も生じた（清野ら，2007）。上水道は35市町村13万戸が断水状態になった。また斜面崩壊などの地盤災害による送水ルートの遮断も発生した。管路被害率は，長岡市で0.266件/km（288件/1084.4km），小千谷市で0.266件/km（102件/328.5km）であった。下水道は26市町村で，マンホールの浮き上がりなど1,453箇所，管渠破損や路面異常5,889箇所の被害が発生した。寒冷地特有の消雪パイプや流雪溝の被害も多数生じている。電力では，地震直後に約28万戸に供給被害が生じた。また，送電設備（鉄塔）の一部が斜面崩壊の影響などで倒壊や傾斜の被害を受けている。配電設備や，電柱や電線など8,373件の被害が報告されている。ガスは，5つの公営事業者を含む6事業者が地震の揺れ（SI値など）を参考に新潟県内の約56,800戸への供給を停止した。被害は低圧のねじ継ぎ手鋼管の破損が多かった。通信は，6箇所の中継伝送路の切断と57箇所の交換ビルでの停電が生じたが，山古志など一部の村落を除き，多ルート化などの対策により被害は最小限に留まった

(土木学会, 2007). 鉄道では, 乗客151人を乗せた上越新幹線下り列車「とき325号」が200km/hを超えるスピードで走行中に妙見トンネルの出口付近で地震に遭遇, ユレダスの作動によりトンネルを出てから警報を受け, 直ちに送電が停止されたのとはほぼ前後して運転士が非常用ブレーキを作動させたとも言われているが, とにかく脱線して停止した(写真7). また, 浦佐~長岡間の5つのトンネルや, 只見線や信越線などの在来線も大きな被害を受けた(関西ライフライン研究会, 2004).

(10) 2007年(平成19年)能登半島地震

2007年(平成19年)の能登半島地震(M6.9)では, 被害は限定的だが死者が1人, 重傷者が29人, 軽症者が268人の人的被害が生じ, また, 全壊476棟, 半壊620棟, 一部損壊4,963棟の住家被害が発生した. 上水道は主に管路の被害(写真8)であり, 輪島市では281世帯において断水が発生した. 電力は地震発生直後, 一時的に石川県で約11万戸, 富山県で約5万戸の停電が発生したが, 翌日には復旧した. 道路は各地で土砂崩れや陥没が発生した. 鉄道はJR七尾線でやのと鉄道でレールの浮き上がりやずれが生

じた(Nishida, et al., 2007).

(11) 2007年(平成19年)新潟県中越沖地震

2007年(平成19年)の新潟県中越沖地震(M6.8)では, 新潟県で死者15人, 重軽傷者2,315人, 建物全壊1,319棟, 大規模半壊857棟, 半壊4,764棟, 一部損壊34,659の被害が生じ(新潟県, 2007[2]), また原子力発電所周辺施設の被害も発生した. 特にガス・上下水道管路には, 液状化による側方流動や斜面・法面被害による地盤変状(写真9), 砂地盤や緩斜面, 異地質境界面などに多くの被害が発生した. 上水道は, 送水管や大口径管路に多くの被害が見られ, 柏崎の配水管路被害率は0.65件/kmにのぼった. 柏崎市ガス水道局の供給エリアではガスの供給が停止された. 復旧対象戸数約3万戸のうち復旧に時間を要する約3千戸を除いた需要家への供給は約1ヵ月後に完了したが, 復旧工事は液状化や水道管被害によるガス管への浸入水(写真10)により困難を極めた. 電力製造としての原子力施設では, 原子炉主要部分以外の構造部分への耐震化への配慮や, 沈下や流動などの地盤変状への対応などが課題となった(土



写真7 脱線した上越新幹線(2004年新潟県中越地震)



写真9 水道管が敷設されている道路の被害(2007年新潟県中越沖地震)



写真8 水管橋の破損(2000年能登半島地震)



写真10 ガス管の水抜き作業(2007年新潟県中越沖地震)

木学会, 2007).

以上、関東地震以降の主な被害地震によるライフライン被害についてその概略を述べた。表1はこれら被害の概要を簡潔にまとめたものである。ただし、特に地中管路施設を中心とした被害に関しては、ライフライン地震工学の諸体系を含め成書(例えば、高田, 1991)を参考にさせていただきたい。

3. ライフラインの物理的・機能的被害の特徴

地震によってライフラインに物理的被害が生じる原因は2通りある。一つは震動や波動の伝播、すなわち地震による揺れによって直接的、間接的に被害を被るもの、もう一方は主に地盤の永久変位によって被害が生じるものである。地震動の大振幅や波動伝播による局所的な変位の変化(ひずみの増大)や曲率の増大がライフライン系に被害を与えるものが前者であり、地すべりや斜面・法面崩壊、液状化による側方流動と永久変位、断層変位や地震に起因する地盤沈下によるライフライン系の被害が後者に相当する。機能的被害は、物理被害によってその系が受ける機能支障であり、定量的には例えば上水道の管路被害による給水量の減少や、影響を受ける需要家数やその分布で判断される。機能的被害は、通常の構造物であれば一般的に物理被害が復旧すれば解消されるものと考えられるが、ライフライン系はネットワークを構成しているため時空間的な波及を考慮せねばならず、また相互依存性も強いので、例えば水道の物理被害がなくても電気の供給が滞れば、ポンプが動かせず水道が使えない、などの状況がしばしば生じる(図1; Kiyono, 1995, 2006)。このような相互連関は、(1)システム間の物理的な波及被害、(2)システム間の機能的な波及被害、(3)復旧段階におけるシステム間での相互作用、(4)システム間代替性によるバックアップ機能、(5)エンドユーザーにおける相互影響、などさらに様々な形態によって包括的に分類されている(能島, 1996)。

地震の揺れによる被害については、拠点施設(単体構造物)や面的な拡がりを持つ埋設管は、共に最大加速度や最大速度、震度などの特性値との対応で示される場合が多い。図2は1995年兵庫県南部地震の際の神戸市垂水区の道路被害密度(箇所/km)と計測震度値をそれぞれ縦軸と横軸にとって表したものである(原田ら, 1998)。この図は生データを示すものであるが、このような被害データを基に、被害程度ごとの損傷確率のような統計処理を施すことによって、各ライフライン施設に対して様々なフラジリティ曲線が提案されている。これを用いれば、想定地震、あるいは想定断層に対して概略どの程度の物理被害や機能被害が生じるかが推定できる。

地盤の永久変位によって生じるライフライン被害が最も顕著に現れるのが、地盤の液状化や斜面崩壊によるものである。特に液状化は比較的緩やかな粒形のそろった飽和砂地盤で主に生じ、せん断強度が低下した地盤が基盤の傾斜

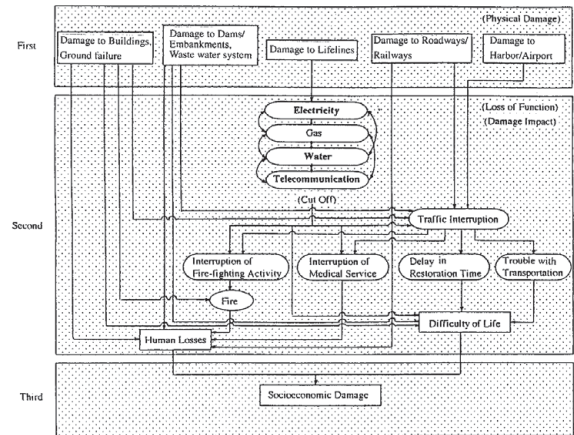


図1 地震被害の相互連関と波及

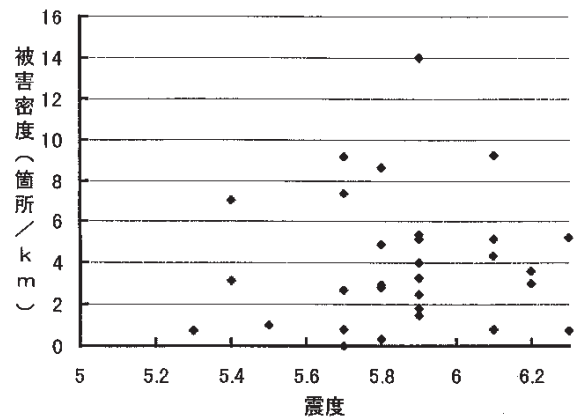


図2 道路の被害関数の例(1995年兵庫県南部地震の神戸市垂水区)



写真11 液状化による埋立地の側方流動(1995年兵庫県南部地震)

表1 主要地震におけるライフライン被害の概要

	電気	ガス	上・下水道	通信	鉄道	道路	備考
1923年(大12) 関東地震	電柱、変電所・発電所の焼失多数。地中電線路も被害。6日後送電開始。	管路被害も多く生じたが、まだ多目的には利用されていなかった。	給水栓の焼失、多数の漏水。5日後に送水開始。被害率0.199箇所/km	電柱焼失多数。通信管路も被害。1週間後に開通。	機関車・客車多数焼失。根府川駅列車転覆、橋梁破壊。	各地で交通遮断。救援物資輸送は、船舶が使われた。	基盤施設整備状況は現在とは異なる
1948年(昭23) 福井地震	平野部に位置する変電施設や配電線が震動と火災で被災		取水・浄水・送水・配水・給水各施設に被害。消火活動に影響。		大築堤の崩壊や九頭竜川橋梁の落橋	橋梁被害により多大な交通支障が発生。	濃尾・関東地震に次ぐ大災害。震度VIIの導入の契機
1964年(昭39) 新潟地震	県内の送電線や変電所、配電線路の被害。鉄塔の傾斜や火力発電所被害	北陸瓦斯の製造供給設備に被害。埋設本枝管は折損、継手抜出の被害。	水道埋設管継手の抜けなど多数発生。下水道ポンプ場や管渠が大被害。	地下管路の通信ケーブルなど、地価設備が大きな損傷を受けた。	被害甚大。新潟駅構内で跨線橋落下、信濃川橋梁の橋脚大きく傾く。	道路亀裂陥没隆起・橋梁損壊多数。昭和大橋の落橋など液状化被害拡大。	液状化現象が目され始める。
1968年(昭43) 十勝沖地震	発電所被害は軽微。変電所・送電・配電線路に被害。	ガスは20日で復旧（電話、電気とも2日で復旧、水道は10日）	上下水道、工業用水道の施設被害は主として埋設管類に集中	本州～北海道間の通信が途絶。中継伝送路多ルート化への教訓となる。	多数の線区の施設に被害。鉄道盛土に多くの被害。	軟弱地盤の盛土法面崩落、舗装路面の変状、切土法面からの落石多数。	沖合いの地震によるも、広範囲にわたる被害発生
1978年(昭53) 宮城県沖地震	東北電力管内で681,600戸が停電したが2日後に全面復旧	導管等の供給設備に多数の損傷。供給停止は約151,000件。	管路の破損によって仙台市内で7,000戸以上断水。	橋梁添架のパイプや地下埋設のケーブルの切断が発生。	無筋コンクリート橋脚、橋梁支承、高架橋中間梁せん断破壊。	路面の陥没・沈下、橋梁破損。仙台市内で信号器不動作。	都市型災害を引き起こした嚆矢としての地震
1983年(昭58) 日本海中部地震	電柱の倒壊や折損、傾斜や沈下の被害。	主に液状化に伴う地盤変状によってガス導管に被害。	埋設管やマンホールの被害が広範囲で発生。	地盤変状による電柱、管路、マンホール等に大きな被害。	液状化や地盤変状に伴う路面亀裂や盛土被害崩壊。	沢や谷の横断部、切盛境界部、超軟弱地盤や旧河道上で被害	液状化や地盤変状による被害が多発
1995年(平7) 兵庫県南部地震	関西電力管内約260万戸が停電。約一週間後に応急送電により停電はほぼ解消。	大阪ガス管内約86万戸の供給が停止したが、3ヵ月後にはほぼガス供給を再開	あらゆる施設が被災。約123万戸が断水。1ヵ月半後に仮復旧。下水処理機能も麻痺。	約30万回線が一時的に不通。これ以降、全国利用型伝言ダイヤルが開設。	全ての鉄道施設で大被害。山陽新幹線で8箇所、在来線等で24箇所の橋梁が落橋。	国道や高速道路が落橋等で寸断。家屋の倒壊で生活道路閉塞により、機能麻痺。	都市直下地震によりライフラインは壊滅的な被害
2000年(平12) 鳥取県西部地震	地震直後に17,403戸が停電したがすぐに復旧。	ガス漏れは灯内管主体に43件発生。	6,801戸で断水。下水道管渠の破損とマンホール隆起が発生。	鳥取県内で134回線が被害。安否確認電話殺到で輻輳が発生。	JR伯備線の線路が土砂崩壊によって寸断。	山間部で土砂災害、法面崩壊、落石等の影響による被害発生	1Gを越える大きな加速度を記録する地震計が増えてくる。
2004年(平16) 新潟県中越地震	地震直後に約28万戸に供給被害。送電設備（鉄塔）の傾斜、配電設備や電柱・電線被害も多発。	新潟県内の約56,800戸への供給を停止。被害は低圧のねじ継ぎ手銅管の破損が多かった。	上水道は35市町村13万戸が断水状態。送水ルートへの遮断も発生。下水道管渠被害多数発生。	中継伝送路切断等が生じたが、多ルート化対策により被害が最小限に食い止める。	新幹線の歴史上初の地震による脱線事故やトンネル被害が発生。在来線も大きな被害。	中山間地帯の道路被害により孤立した地域が発生。関越自動車道も土工部や橋梁に被害発生。	孤立集落の発生など中山間地特有の被害。新幹線の脱線事故。
2007年(平19) 能登半島地震	一時的に石川県で約11万戸、富山県で約5万戸が停電。	マイコンメーターが作動、回復に関する問い合わせが殺到。	上水道は主に管路被害。輪島市では281世帯において断水。	輻輳のため、かかりにくい状態が継続	JR七尾線でやのと鉄道でレールの浮上がりやずれが発生。	道路は各地で土砂崩れや陥没が発生	被害は限定的
2007年(平19) 新潟県中越沖地震	3万戸以上停電。支持物被害は液状化が関連。原子力発電所周辺施設の被害が発生。	柏崎市ガス水道局エリアで3万戸で供給停止。約1ヵ月後に復旧完了。	送水管や大口径管路に多くの被害。水道被害がガス管への浸入水に影響を与えた。	地中埋設管路、マンホールやダクトなどの通信設備に被害。	JR青海川駅で大規模な斜面崩壊発生のため不通。	地盤災害の影響で道路の亀裂や陥没。流動が多数発生。	液状化による側方流動や斜面・法面被害による地盤変状

などの理由で側方に流動する(写真11)ことにより、護岸や擁壁を移動・傾斜させたり、地中に埋設された水道やガスの管路が変形して損傷を受けたり、見かけの比重が軽い地中工作物(マンホールや地下タンクなど)が浮き上がることにより管路取り付け部に被害が生じる。また、地震動がトリガーとなって発生する地すべりや斜面崩壊(写真12)は、鉄道や道路のみならず、地中埋設管に甚大な被害を及ぼす。過去の地震による地盤の永久変位量と管路破壊の発生密度(箇所/km)の経験的な関係を導出(O'Rourke, et al., 1991)したり、あるいは過去の地震断層と地すべりの発生統計から、地すべりが発生する可能性のある(断層からの)距離とマグニチュードの関係式(Applied Technical Council, 1985)も提案されている。道路橋の橋台部分と道路の取り付け部の地盤の沈下は、震源地近傍では程度の差こそあれ必ずと言っていい程生じる(写真13)。また、地下構造物の損壊によって地表面に沈下が生じ、基盤施設に支障を与えるケースもある(写真14)。

断層面を挟んだ相対的な地盤のずれにより、線的・面的な広がりを持つライフライン系に被害が生じる場合も多

い。写真15は、1997年イラン・ガエン地震の断層の横ずれにより、道路が数メートル横にずれている様子を示している。ずれの成分であるstrikeとdipの組合せ如何によっては構造被害のモードも異なってくる。また、同じdip成分でも例えば正断層タイプの断層面を貫通する埋設管の被害は引張型の被害であり、逆断層タイプの被害は圧縮型となる場合が多い。



写真14 地下鉄大開駅崩壊による道路の沈下(1995年兵庫県南部地震)



写真12 斜面崩壊で流された上越線の軌道(2004年新潟県中越地震)



写真15 断層変位による道路の横ずれ(1997年イラン・ガエン地震)



写真13 橋梁取り付け部の地盤の沈下(2004年新潟県中越地震)



写真16 断層変位による道路橋の落橋(1999年台湾集集地震)

近年の地震では、1999年の台湾集集地震における各種ライフライン被害が断層運動によるものの典型であろう。写真16は道路橋の真下を横切る断層の鉛直変位によって写真手前の2スパンが落橋している様子、写真17はやはりダム軸線を横切る断層の鉛直変位によって約10mのオフセットが生じたもの、写真18は送電線の背後を通る断層のずれによって送電線鉄塔が傾いてしまった例である。

昨今、性能設計の概念を取り入れたレベル2地震や断層変位への対応も検討されている。ただし、活断層が動いたときの断層変位や液状化時の地盤の永久変位量がある程度予想できたとしても、それが大変形であればある程、例えば埋設管において変形を吸収する継ぎ手や変形に強い材質の利用などによって対応できる範囲には限界がある。

4. ライフラインの社会的・経済被害と地震リスクマネジメント

都市の社会基盤としてのライフラインは、我々の生活に欠くことのできない飲料水の供給やエネルギー供給、人



写真17 断層変位によるダムの破壊 (1999年台湾集集地震)



写真18 断層変位による送電線鉄塔の傾斜 (1999年台湾集集地震)

員・物資輸送、雨水・汚水処理、情報伝達やコミュニケーションの役割を担っており、また、それぞれの系が多重化、階層化している場合が多く、かつ相互依存性も大きいため、一度被害を受けるとその社会的な影響は計り知れない。そのため、3. で述べた有事の際の物理被害や機能被害を最小限に抑えるべく、ライフライン施設の耐震化を図ったり、ネットワークに冗長性を付加したりして、ハード的な事前対策を推進するとともに、それでも防げないリスクに対しては、事前に保険などによってリスク移転を行った。事後における物理・機能両面の迅速な応急復旧対応、波及被害の防止のための対策を講じなければならない。そこには、地震シナリオの策定、物理被害や機能被害の推定、波及被害の推定、耐震補強や復旧順序の優先順位付け、費用対効果などを勘案した地震リスクマネジメントの導入が必須となる。

ライフラインの地震リスクマネジメントの中の一項目であるリスク評価は、地震による直接的・間接的損失 (Loss) を算定するもので、その算定にはハザードとしての地震動の設定が不可欠である。シナリオとしての活断層による地震動を想定するにしろ、歴史地震を基にした確率的な見地からの地震動を想定するにしろ、その年超過確率にバルナラビリティ関数を乗ずることによってロスを算出する。ただし、主に阪神淡路大震災以降の近年の地震によるライフライン被害は、物理被害などの直接被害もさることながら、ライフラインシステム被害のインパクトによる間接被害の比重が大きなウエイトを占めてきている。例えば電力システムにおける発電所の被害は、その物理的被害を復旧するためのコストなどの直接的損失のみならず、電力停止による事業者の営業損失、応急復旧に向けた点検費用、代替供給のための燃料コスト、被害が波及した関連企業の営業損失、停電に伴ってエンドユーザーが被る損失等の間接的損失に至るまで多方面に多大な影響を及ぼすことになる。2007年新潟県中越沖地震における東京電力の影響被害としては、土木・建物関連設備被害の復旧費用としての250億円に対して、点検および関連補修費用1,220億円、火力燃料費・購入電力量の増分費用として4,400億円と見積もられている (東京電力, 2007)。

このような地震リスクを的確にマネジメントするためには、活断層に関する正確な情報 (確実な情報のみならず不確実性の情報も) の収集、ライフライン施設やネットワークに関する詳細なフラジリティ関数の設定、その被害率や被害確率を損失 (Loss) と結びつける正確なバルナラビリティ (Vulnerability) 関数の構築、それらから算出されるリスクとその不確実性の把握、そのリスクがライフライン事業者として受け入れられるかどうかの判断、受け入れられない場合にはそのリスク対処や移転の方法、従来のリ

スクコントロールとしての耐震補強・補修やリスクファイナンスとしての地震保険の他の、また別のリスク移転の方法 (Cat BondsやRisk Mutual Poolなど: Chen et al., 2003) の模索などを推進しなければならない。

5. まとめ

人・物・金・情報が高度に集約された都市のライフラインが一たび地震に見舞われると、都市機能が長期間麻痺することにより、被災地の人々の日常生活から被災地を取り巻く地域、大都市中枢で発生すれば一国の社会・経済活動に甚大な影響を及ぼすことは、ライフラインの被災の歴史を見れば明らかである。本報の内容をまとめると次のようになる。

- (1) 近年の地震の歴史はライフライン被害の歴史でもある。ライフラインはこれらの地震の度に脆弱な面を露呈してきたが、その地震で得た経験や教訓を次の地震の対応に活かしてきた。一方、大都市直下の活断層による1995年の兵庫県南部地震のように、一ライフライン事業者の人的・物的資源による対応能力をはるかに越えるような被害が生じる地震発生の危険性に、我々は常に直面していることを忘れてはならない。
- (2) ライフラインの物理被害は、地震動の揺れや波動伝播による慣性力や局所的なひずみによるものと、地すべりや斜面・法面崩壊、液状化による側方流動と永久変位、断層変位や地震に起因する地盤沈下など主に地盤の永久変位によって生じるものがある。このような地震被害を軽減すべく、昨今、様々なライフラインの設計においても性能設計の概念を取り入れたレベル2地震や断層変位への対応も検討されている。
- (3) ライフラインの物理被害や機能被害を最小限に抑えるためには、地震シナリオの策定、物理被害や機能被害の推定、波及被害の推定、耐震補強や復旧順序の優先順位付けに留まらず、費用対効果や地震保険、リスクの移転方法などを勘案した包括的な地震リスクマネジメントの導入が必須となる。

文 献

- Applied Technical Council. 1985. Earthquake Damage Evaluation Data for California, ATC-13, Redwood City, CA.
- Chen, Wai-Fah and Scawthorn, C., 2003, Earthquake Engineering Handbook, 32 Insurance and Financial Risk Transfer, CRC Press, pp.32_1-32_34.
- 土木学会新潟震災調査委員会編, 1966, 昭和39年新潟地震震害調査報告, (社)土木学会.
- 1968年十勝沖地震調査委員会, 1969, 1968年十勝沖地震調査報告.
- 土木学会, 2005, 平成16年新潟県中越地震土木学会(第1次)・地盤工学会合同調査団調査速報 (Ver.1.0, 2005年1月1日), <http://www.jsce.or.jp>.
- 土木学会, 2007, 2007年新潟県中越沖地震災害調査報告会報告 (2007.8.28), <http://www.jsce.or.jp>.
- 原田満吉・三浦房紀・清野純史・中村勝彦, 1998, 地震による道路被害関数の提案, 土木学会中国支部第50回研究発表会.
- 北陸震災調査特別委員会編, 1950, 昭和23年福井地震震害調査報告, I 土木部門, 北陸地震々震害調査報告出版委員会.
- 北羽新報社, 1983, 日本海中部地震M7.7真昼の恐怖-直撃地, 能代・山本の記録-.
- 鏡味洋史, 1993, 1993年釧路沖地震による被害の調査研究, 文部省科学研究費突発災害研究調査成果報告書.
- 官公庁史料編纂会, 1996, 日本災害史録, 日本文献編纂会.
- 地震予知総合研究振興会, 1998, Seismo, Vol.2, No.1.
- 関西ライフライン研究会, 2004, ライフラインの総合防災力の検証シンポジウム, 研究会報告-鉄道-, pp.33-41.
- Kiyono, J., 1995. Seismic Damage Estimation to Lifeline Systems in Turkey, Papers for a Seminar on Earthquake Disaster Prevention Researches, Ministry of Public Works and Settlement, Turkey, pp.21-41.
- Kiyono, J., 2006, Immediate Damage Estimation of Road Bridges in Turkey just after an Earthquake, Journal of the Institute of Social Safety Science, No.8, pp.41-49.
- Kiyono, J., Fujiwara, T., Harada, M., Hashimoto, T, Ishii, K., Isoyama, R., Konagai, K., Miyajima, M., Murakami, H., Nakamura, S., Nozaki, T., and Taji, Y., 2007, Reconnaissance report on the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, Doboku Gakkai Ronbunshuu A, Vol.63, No.2, pp.374-385.
- 清野純史, 土岐憲三, チャールズ・スコートン, 藤井俊介, 2007, 高速道路走行中の自動車に対する地震対策について, 地域安全学会論文集, No.9, pp.321-330.
- 国立天文台, 2003, 理科年表, 丸善出版.
- 久保田博, 2000, 鉄道重大事故の歴史, グランプリ出版.
- 新潟県, 2007, 平成19年7月16日に発生した新潟県中越沖地震による被災状況について (第212報), 新潟県災害対策本部.
- 新潟県, 2007, 平成16年新潟県中越地震による被災状況について (第172報), 新潟県中越地震災害対策本部.
- 1978年宮城県沖地震調査委員会編, 1980, 1978年宮城県沖地震調査報告書, (社)土木学会東北支部.
- 1983年日本海中部地震調査委員会編, 1980, 1983年日本海中部地震被害調査報告書, (社)土質工学会東北支部.
- Nishida, S., Scawthorn, C., Kiyono, J., and Tsutsumiuchi, T., 2007, Noto Peninsula (Japan) Earthquake of March 25, 2007, EERI Special Earthquake Report.
- 能島暢呂・亀田弘行, 1996, 阪神・淡路大震災-防災研究への取り組み-, 第4章土木施設の被害, 京都大学防災研究所, pp.360-369.
- O'Rourke, T. and Jeon, S. 1991. Factors Affecting the Earthquake Damage of Water Distribution Systems, Proc. Of the Fifth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, pp.379-388.
- Suzuki, Z.(Editor), 1971, General Report on the Tokachi-oki Earthquake of 1968, Keigaku Publishing Co.Ltd., 754p.
- 高田至郎, 1991, ライフライン地震工学, 共立出版株式会社, 251p.
- 東京電力ホームページ, 2007, 新潟県中越沖地震による収支影

響, <http://www.tepco.co.jp>

(2008年1月18日受付)

(2008年3月17日受理)

キーワード

ライフライン, 活断層, 社会基盤施設, 減災, 地震被害, 地震リスクマネジメント

Key words : lifeline, active fault, infrastructure, disaster mitigation, earthquake damage, earthquake risk management