隣接ライフラインの地震時同時被害に関する確率論的評価モデル

Probabilistic Assessment Model for Coincidence of Earthquake Damage to Collocated Lifelines

能島暢呂

Nobuoto NOJIMA¹

1岐阜大学工学部社会基盤工学科

Department of Civil Engineering, Gifu University

Earthquake damages to collocated lifeline facilities within a certain distance cause physical damage spread as well as conflict in repair works. In order to avoid such negative effects, this study aims to develop a probabilistic model to evaluate the potential risk of coincidence of damage to different lifeline facilities. First, occurrence rates of coincidence of damage to two different systems are derived assuming the uniform, independent and random occurrence of damage. Next, the basic model is extended to deal with non-uniform occurrence of damage depending on the spatial distribution of earthquake ground intensities and that of vulnerability of lifeline facilities. Examples for the Tokyo metropolitan area are shown to demonstrate the applicability of the proposed model.

Keywords: lifelines, coincidence of earthquake damage, physical damage spread, conflict in repair works, probablistic model, occurrence rate

1. はじめに

現代社会における社会経済活動や市民生活は,エネル ギー供給系(電気・ガス),水供給処理系(上下水道), 運輸交通系(道路・鉄道),情報通信系(固定電話・移 動体電話)などのライフライン機能に支えられている. これらのネットワークシステムは膨大な施設群から構成 されるため地震被害の根絶は難しく,結果的に生じるラ イフライン途絶は,ライフライン機能に複合的に依存す る社会機能に多大な影響を及ぼしてきた.

ライフライン地震災害は、各システム単独の問題とし ても重大ではあるが、重層的に重なり合った総合体とし て見た場合、付随して新たな問題が生じる.ライフライ ン施設の多くが道路の地下埋設施設や沿道施設として設 置されていることや、ライフライン機能そのものが相互 依存的関係にあることから発生するのが、地震時ライフ ライン相互連関と総称される問題である.その構造解明 のため、これまで、過去の事例分析や専門家の意見収集 に基づいて相互連関の影響波及を記述するモデルが提案 された例はいくつかある¹⁾⁻³⁾.しかしながら、定量的・総 合的な検討まで踏み込んだ研究は少ないのが現状である.

その一因は、ライフライン相互連関の多面性にあると 考えられる。ライフライン相互連関は、地震発生後の時 間スケールにおいて、「物理的被害波及」「機能的被害 波及」「復旧支障」の順でとらえられ、定量的モデルを 構築するには、各側面に適したアプローチが必要である. 「機能的被害波及」は、機能的な相互依存体系の破壊 によって生じる事象であり、遠方まで容易に到達したり、 複雑な依存関係を介して社会全体に影響が及ぶこともあ り、その意味で空間制約をあまり受けない.停電の影響 波及はその典型例といえる.この種の問題を扱うには、 各システムのバックアップ機能やネットワーク接続形態 を考慮した「マクロスケール」での検討により、影響の 顕在化と被害波及を分析する必要がある.

一方,「物理的被害波及」および「復旧支障」は,隣 接するライフライン施設間で生じる局所的事象であり, その意味で空間制約を強く受ける.「物理的被害波及」 は、あるシステムに生じた被害の影響が周辺に物理的に 波及し,近接する別システムの被害要因となることであ る.「復旧支障」としては,近接した被害箇所の復旧を 行う場合に,作業錯綜のため計画通りに作業を進められ ないことが挙げられる.これらは隣接施設に発生する同 時被害発生という問題であるから,その近接性に応じた 「ミクロスケール」で事象をモデル化するとともに,同 時被害発生の可能性やその分布,さらには全域における 同時被害の総量について,定量的に把握しておくことが 重要となる.

本研究ではこれらのうち,局所的事象としての被害波 及と復旧支障の問題に焦点を絞り,隣接ライフライン施 設の同時被害発生に関する確率論的評価モデルを構築す ることを目的とする.

以下, **2**. では2つのライフラインシステムを対象として, 同時被害発生に関する確率論的評価モデルを示す. 被害率が各システムでそれぞれ一様であると仮定した基

183

礎的なモデルによって、同時被害発生の基本的特性とそれに関与する要因について分析する.3. では、地震動強度、地盤条件、施設の脆弱性などの要因により被害率が空間的に変動する現実的状況を想定し、非定常ポアソン過程を導入して2. で示すモデルを拡張する.4. および5. では首都圏を対象とした適用例を示し、同時被害発生に関する考察を行う.

2. 一様な被害発生率を持つ2システムの同時被 害発生率

(1) モデル化と定式化

ライフラインの同時被害発生の要因としては、各シス テム上のランダム被害が重複して生じる「偶発的同時被 害」と、複数ライフラインが地震時に一体となって挙動 して被災する「共通モード被害」に大別できる⁽¹⁾、本研 究では前者の「偶発的同時被害」を考察対象とする.

対象地域内にある2つのライフライン(システム1,シ ステム2)について考える.これらのシステムは面的な広 がりを持つが、単純化のため図1に示すように一次元に伸 長した線上構造物としてモデル化する.被害は各システ ムの全長にわたって一様・独立・ランダムに発生するも のと仮定し、被害発生率(=単位長さあたりの平均被害 箇所数、以下では被害率と省略することもある)をそれ ぞれv1,v2で表す.また両システムは十分に近接して敷 設されており、被害位置はシステムに沿った共通の一次 元座標で表せるものとする.この前提条件では、システ ム間での被害発生は互いに独立となり、いずれかの被害 の発生率はv1+v2 で与えられる.





図1 2システムの同時被害に関するモデル

a) 微小距離の近傍における同時被害

|~∆

52742 V2

図1(a)に示すように、微小距離の近傍 / 以内(両側に 1/2ずつ)で両システムの同時被害が発生する単位長さあ たりの割合(同時被害発生率)は、

$$v_1(1-e^{-v_2l}) \approx v_1v_2l$$
 $\delta \delta v_1 t v_2(1-e^{-v_1l}) \approx v_1v_2l$ [1]

のように求められる. つまり, 2つのシステムの同時被害 発生率は, 各システムの被害発生率と同時被害発生を規 定する範囲(微小距離の近傍 1)の積であることから, 2システムの相乗効果が顕在化するといえる. 大規模災害 では_{V,V}, ともに高い値となり, 被害量が増えて物理的影 響波及の機会が増すとともに、復旧量が増えて復旧支障 の機会が増すことから、ライフライン相互連関の問題は 深刻化する.式[1]はそのことを数理的に示している.

以上より,長さ *L* における両システムの同時被害発生数 *k* は, $v_1v_2 IL$ をパラメータとするポアソン分布に従い,その確率関数は次式で表される.

$$P(k) = \frac{(\nu_1 \nu_2 lL)^k e^{-\nu_1 \nu_2 lL}}{k!}$$
[2]

期付值:
$$\mu_k = v_1 v_2 lL$$
, 保华偏左· $\sigma_k = \sqrt{v_1 v_2 lL}$

b) セグメント化された区間内での同時被害

#0/±

上記では、同時被害発生を規定するための範囲を「微小距離の近傍 1 以内」とした.しかし実際の被災現場では、ある程度の離間距離があったとしても、物理的被害波及や復旧支障といったライフライン相互連関が生じうる.そこで図1(b)に示すように、全長 L が長さ 1 の N 個のセグメントに分割されたシステムを考える(*I=L/N*).被害発生が一様・独立・ランダムであることから、各セグメントにおける両システムの同時被害発生確率は次式で求められる.

$$p_{s} = (1 - e^{-\nu_{1} l})(1 - e^{-\nu_{2} l})$$
[3]

すなわち,各セグメントにおける2つのシステム同時被害 発生確率は,各システムの被害発生確率の積であり,微 小距離の近傍を仮定した上記とは形式的には異なるもの の,2システムの相乗効果が顕在化するという点では共通 している.

全長Lを構成するN個のセグメントについて考えると, 各セグメントにおいて「同時被害が発生する/しない」 の事象の列は,発生確率が式[3]で表される psで試行回数 N回のベルヌーイ試行列を構成する.従って全長 L=N1 のうち同時被害が発生しているセグメント数 Ns は psを パラメータとする二項分布に従い,その確率関数は次式 で表される.

$$\mathbf{P}(N_{s}) = {\binom{N}{N_{s}}} p_{s}^{N_{s}} (1 - p_{s})^{N - N_{s}}$$
[4]

期待值: $\mu_{N_s} = N \cdot p_s$,標準偏差: $\sigma_{N_s} = \sqrt{N(1 - p_s)p_s}$

(2) 同時被害発生の特性に関する考察

全長 L=100 とした場合のモデル計算例を示し、同時被 害発生の特性に関する考察を行う.ここでは被害率 v_1 , $v_2 を表1 のように変化させる.基本ケース(a)では <math>v_1 = v_2$ = 0.1 とし、全長で両システムそれぞれ平均 10 箇所の被 害が発生することを想定した.ケース(b)では両システム とも被害率を基本ケースの 5 分の 1、ケース(c)では 5 倍、 ケース(d)ではシステム 1 で基本ケースの 5 倍、システム 2 で 5 分の 1 とした.

a)ポアソン分布

まず微小距離の近傍を *l*=1 として, *l*以内における同時 被害発生数 *k* が従うポアソン分布の確率関数を図 2 に比 較する.期待値と標準偏差は表 1 に示したとおりである. 被害率の相乗効果が直接的に結果に現れており,基本ケ ース(a)と比べると,ケース(b)では同時被害数は少なく, ケース(c)では多くなっている.またv₁v₂ が等しいケース (a)と(d)はまったく同じ結果となる.

| ケース | <i>v</i> ₁ | <i>V</i> ₂ | 期待値 _{V1} V2 ^{IL} | 標準偏差 √v₁v₂/L |
|-----|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------|
| (a) | 0.1 | 0.1 | 1 | 1 |
| (b) | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.2 |
| (c) | 0.5 | 0.5 | 25 | 5 |
| (d) | 0.5 | 0.02 | 1 | 1 |

表1 2システムの被害率の設定

b) 二項分布

セグメント数を N=1~50 として, セグメント内での同 時被害発生数の確率関数を求めた結果を図 3 に示す. 横 軸に全長 L を分割するセグメント数 N, 縦軸に同時被害 が発生しているセグメント数 Nsをとり,シンボルの大き さで二項分布の確率関数の値を表している.

基本ケース(a)では、セグメント数 N が小さい場合、ほ とんどのセグメントで同時被害が発生する. セグメント 長 Iが十分に長く、各セグメント内での同時被害発生確 率がほぼ 1 となるためである. N を増加させると同時被 害のセグメント数 N_s も増加するが、分布のばらつきも大 きくなる. セグメント長 Iが短くなり同時被害が発生し ないセグメントが現れるためである. N_s の期待値 μ_{N_c} は

N=8 で最大で約4となり, N_sの分布は減少傾向に転じる. ケース(b)では, N_sの分布は下方に大きくシフトしている. 双方の被害率が低く,それらの相乗効果で同時被害 発生がきわめて稀な事象になるためである.分布のばら つきは相対的に大きくなっている.期待値 μ_v,はセグメ

ント数 N=2 で最大約 0.8 となった. 逆にケース(c)では, N_s の分布は上方に大きくシフトしている. 双方の被害率 が高く,それらの相乗効果で同時被害がより発生しやす くなるためである. セグメント数 N が小さい範囲ではほ ぼすべてのセグメントで同時被害が発生している. 期待 値 μ_{N_c} の最大値は N=40 で約 20 となった.

ケース(d)は、両システムの被害率の積を基本ケース(a) と同じに保ちつつ両者に差を持たせたケースである. Ns の分布は基本ケースよりかなり下方にシフトしている. 期待値の最大値は、セグメント数 N=12 の場合で約 1.8 と なった.システムの被害率の積のみに依存したポアソン 分布とは異なり、二項分布では被害率の大小関係も関与 することがわかる.

なお, セグメント数 N を十分に大きくとってセグメン ト長 I を微小長さとすれば,

 $\mu_{N_{c}} \approx N \cdot v_{1} l \cdot v_{2} l = v_{1} v_{2} l L$ ^[5]

となり、ポアソン分布に基づく期待値に μ_k に漸近する. ただし、極端な条件設定として、 $N \to \infty$ すなわち $l \to 0$ とすると、 $\mu_{N_s} \to 0$ となり、同時被害発生を問題視しな いとする立場に立つことになる.

c)同時被害発生の可能性が高くなる条件

ケース(a)と(d)のように、両システムの被害率の積が一 定 ($v_1v_2 = C$)という条件のもとで、 $v_1 \ge v_2$ の違いが結果 に与える影響についてを考察する.まず積を $v_1v_2 = 0.01$ に保って v_1 を変化させた場合の同時被害発生数 N_Sの期待 値 μ_{N_S} の最大値を図 4(a)に示す.積一定のもとでの和 v_1+v_2 は、 $v_1 = v_2 = \sqrt{C}$ のときに最小値 $2\sqrt{C}$ をとるので、 図 4(b)のように v_1+v_2 を横軸にとると単調減少となり、 ケース(a)に相当する $v_1 = v_2 = 0.1$ の場合に最大値をとる. これより、被害率の格差が小さいほど同時被害発生の可 能性が高くなることがわかる.

さらに、 $v_1 = v_2 = v$ の場合、同時被害発生セグメント 数の期待値は式[3][4]より、

$$\mu_{N_{s}} = L \left(1 - e^{-\nu l} \right)^{2} / l$$
 [6]

となる. これが最大値をとるのは、数値計算により、 vl = vL/N = 1.256が満たされる場合であることが導かれ る. この場合のセグメント数は $N^* = 0.796vL$, すなわち, 全長 L にわたっての各システムの平均被害数の 0.796 倍 となる. 同時被害発生数 N_s の期待値の最大値は、

 $\mu_{N_{\rm s}\,\rm max} = N^* (1 - e^{-1.256})^2 = 0.512 N^* = 0.408 \nu L \quad [7]$

で与えられ,その時のセグメント数 №の 0.512 倍,シス テムの平均被害箇所数の 0.408 倍となる.上記 b)で示し たケース(a)~(c)の結果は,このことを裏付けている.

3. 空間的に変動する被害発生率を持つ2システ ムの同時被害発生率

2. では、2つのライフラインの被害発生率v₁、v₂を全 長にわたってそれぞれ一様と仮定した.しかしながら、 ライフライン・ネットワークは広域に広がっているため、 地震動強度、地盤条件、施設の脆弱性などの空間的分布 に従って被害発生率は変動する.いま、地震動強度(震 度、最大加速度、最大速度など)、地盤条件(表層地盤 種別,液状化危険度など)、施設の脆弱性(管種・管径な







ど)が,位置 x の関数としてそれぞれ I(x), S(x), V(x) で 表されるものとする.一般的に用いられる埋設管被害予 測式の形式を踏襲した場合,被害率は,基準となる管 種・管径に対する標準被害率関数R(・)を用いて,

$$\nu_1(x) = R_1(I(x), S(x)) \cdot V_1(x)$$
[8]

$$v_2(x) = R_2(I(x), S(x)) \cdot V_2(x)$$
 [9]

と書くことができる. 添字1,2は,それぞれシテム1,シ ステム2に関する項であることを示す.ここで,両システ ムの埋設位置が近接していることを前提としているので, 局所的には,地震動強度*I(x)*および地盤条件*S(x)*は両シ ステムで共通要因と見なすとしている.一方,標準被害 率*R(*・)およびシステムの脆弱性*V(x)*については各システ ム固有の変動要因であり,被害発生率の相違を特徴付け るものとする.

以上の考察から、図5に示すように、被害発生率v₁とv₂ は空間的に変動するのみならず、上記の共通要因に起因 する空間的相関を有する.つまり、揺れの大きい場所あ るいは地盤条件の悪い場所では、システム1、システム2 ともに被害発生率が高くなるので、広域的な広がりの中 においては、両者の被害発生率の間に、空間的な正の相 関性があることは明らかである.しかしこのような状況 においても、被害発生という事象の独立性を仮定するこ とができる⁽¹⁾.以下ではその考え方を示す.

図5に示した被害発生率v₁(x) およびv₂(x) の空間的変動 において,それぞれが区分的に一様と見なせる範囲にお いては,各区分おける被害発生の一様性・独立性・ラン ダム性を仮定することができる(なお,ここでいう「区 分」は,被害発生率の変動に応じて適宜定められるもの であり,前述の「セグメント」とは無関係であることに 注意されたい).ここで,2つのシステムにおける共通要 因とした*I*(x),*S*(x)は,あくまで個別の被害発生率を定量 的に規定する要因である.つまりこのこと自体は,確率 統計的な独立性(すなわちシステム1の被害発生という条 件がシステム2の被害発生確率を変化させず、同様に、シ ステム2の被害発生という条件がシステム1の被害発生確 率を変化させないこと)を否定するものではない.つま り、被害発生率 $v_1(x) \ge v_2(x)$ に共変関係があったとし ても、被害発生という事象の独立性の仮定が損なわれる ことはない.

5.0

以上の考察に基づいて、図5に示すように、被害発生 率 v₁(x)と v₂(x) およびセグメント長 *1*の積として、空 間的に変動する同時被害発生率 v₁(x)v₂(x)*1*を考えれば、 被害発生率の相関性についてはこの同時被害発生率とい うパラメータに織り込み済みであり、そこに非定常ポア ソン過程を導入すれば、前述の評価方法を区分的に適用 することができる.既に述べたとおり、同時被害発生に は 2 システムの被害発生率の相乗効果が現れるため、大 規模災害で特に深刻な事態となるばかりでなく、同時被 害が発生しやすい場所とそうでない場所のコントラスト がより一層明確になり、同時被害が集中する可能性が高 くなる.

なお,セグメント化されたシステムを対象とする場合 には,上記と同様の考察により,各セグメントにおける 同時被害発生確率は,次式で求められる.

$$p_{s}(x) = \left\{1 - e^{-\nu_{1}(x)l}\right\} \left\{1 - e^{-\nu_{2}(x)l}\right\}$$
[10]

4. 千葉県における上下水道管路網の同時被害発 生に関するケーススタディ

(1) 上下水道管路網の被害想定の概要

上下水道システムは地域の水循環系として水供給処理 機能を担い,「動脈ー静脈系」に例えられるように一体 的に機能するものである.従って,両システムの相互連 関には特徴的な様相がある.例えば,物理的被害波及と しては,配水管と下水管の同時被害発生の周辺で,下水



ムの被害率と同時被害発生率(概念図)



図6 東京湾北部地震による千葉県内の震度と液状化危険度の推定分布

が上水に混入するといった独特な影響波及が考えられる. また復旧支障としては,作業錯綜ばかりではなく,下水 道の未復旧地域で上水道の復旧優先度が下げられたり, 上水道が通水済みの場合でも水使用が制限されるなどの 影響が考えられる.こうした事情を鑑みて,本研究では, ライフライン施設の地震時同時被害発生に関する確率論 的モデルの適用例として,上水道システムと下水道シス テムを対象としたケーススタディを示す.

本研究では、平成19年度に行われた千葉県地震被害想 定⁴⁾で整備された上下水道の施設分布データ(管路延長 など)と想定被害データ(被害率、被害箇所数など)の 提供を受けた、千葉県の被害想定においては、56市町村 (36市17町3村;千葉市の6行政区を含めて61市区町村) よりなる千葉県全域(面積約5,157km²)を対象として、 約250mメッシュ単位(総数80,315)の評価がなされてい る.ここでは東京湾北部地震(マグニチュード7.3)に関 する想定被害データを用いることとした、その震度分布 と液状化危険度分布を図6に示す、また、上水道の配水管 延長(総延長約23,600km)と、下水道の管路延長(約 14,400km)の分布をそれぞれ図7(a)と図8(a)に示す、普 及率は上水道で約93%、下水道で約64%である。

東京湾北部地震における千葉県全域での上水道配水管 被害率の分布を図7(b)に示す.被害率の最大値は4.94(箇 所/km)である.上水道配水管被害箇所数の分布を図7(c) に示す.被害率が高くかつ布設延長が長い東京湾臨海部 地域に集中している.ただし埋立地では布設延長が短い ため被害箇所数はやや少なくなっている.被害箇所の総 数は約8,135箇所,メッシュあたりの最大被害箇所数は約 60(箇所/メッシュ)と推定されている.

下水道管の被害には、管本体や継手部の損傷だけでな く、ある程度の管路延長にわたる管路のたるみや蛇行が ある.このため下水道管の被害を表す指標としては、被 害箇所数ではなく被害延長距離(km)が用いられることが 多く、被害率(%)は、被害延長距離(km)を管路延長距離 (km)で除した割合を表す.千葉県では、国土交通省「大 規模地震による下水道被害想定検討委員会」⁵⁾に示され た下水道管の被害予測手法が採用されている.東京湾北 部地震における千葉県全域での下水道管被害率(%)の分布 を図8(b)に示す.東京湾臨海部などで被害率が高く、最 大0.16%となっている.被害延長は428.8km と推定されてい る. このように上下水道では被害の定義が異なるが、本研 究では同時被害評価モデルを適用するため、被害率およ び被害箇所数の換算を行った。その手続きを以下に示す. 「大規模地震による下水道被害想定検討委員会」⁵⁾では、 兵庫県南部地震の下水道被害について、スパン数で報告 されている市町村単位の被害集計結果を、「1スパン=平 均被害延長25m」として被害延長に換算した上で、平成7 年度下水道統計の管路敷設延長で除し、下水道被害率(%) を試算している。本研究ではこの手順を逆に適用して、 等価被害スパン長(1スパンと見なす被害延長)を L_s = 25mとして、メッシュごとの下水道被害延長を「被害ス パン数」に換算するとともに、これをメッシュごとの管 路敷設延長で除することで「被害率(被害スパン数/km)」 を求めることとした。被害率(スパン/km) および被害スパ ン数の分布を図9(a) と図9(b)に示す。

(2) 上水道配水管と下水道管の同時被害発生数の評価

東京湾北部地震による千葉県での上下水道の同時被害 発生数について評価する.同時被害発生数の検討対象は, 上下水道ともに管路が敷設されている計41,444メッシュ である.なお,敷設延長距離 L については,同一メッシ ュにおいても上水道と下水道で異なるため,ここではメ ッシュごとに敷設延長距離の短い方の値を用いた.

セグメント長1の設定に関しては、ライフライン事業 者(上水道,ガス)の訪問調査を実施して、専門的見地 から意見を伺った.その結果、埋設施設の復旧作業にお ける重機の作業錯綜や、ガス管への差水(ガス導管の被 害箇所に水が入り込むこと.ポンプ等による排水を必要 とするため復旧の妨げとなる)等の問題に関しては、影 響範囲が近傍に限られることから、セグメント長1を短 くとり、「ごく近傍での同時被害」として扱う必要があ ることがわかった.

一方,地区ごと(あるいは一定の距離区間ごと)に復 旧計画を立てるような場合には,被害調査や復旧作業を 独占的に実施することになるため,被害箇所の離間距離 が長くても復旧調整が必要となる.従って,セグメント 長1をある程度長くとり,「一定の範囲内での同時被 害」として扱う必要があることがわかった.汚水流出な ど影響が広範囲に及ぶような場合についても同様である. 以上を踏まえて本研究では,セグメント長1を10,25

50, 100, 250, 500, 1000mの7通りに変化させて比較した. まず「ごく近傍での同時被害」の評価例として、セグメ



ント長を *l*=25mとした場合の同時被害発生数 *Ns*の分布を 図10(a)に示す.相対的に同時被害発生数の多いメッシュ は、東京湾臨海部の一部に見られるものの、各メッシュ における同時被害発生数の絶対値はかなり小さい.1メッ シュあたりの同時被害発生数の最大値は0.54セグメント と低い値であり、千葉県全体での同時被害発生数の総数 は約280セグメントとなった.

次に,「一定の範囲内での同時被害」の評価例として,

セグメント長を *l*=100, 250, 1000mとした同時被害発生数 *N_s*の分布を図10(b)-(d) に示す.同時被害発生数の多い メッシュは, *l*=25mのケースと比較すると,東京湾臨海 部を中心にかなりの広がりを見せている.1メッシュあ たりの同時被害発生数の最大値は,上記の順に1.73セグ メント,2.85セグメント,2.95セグメントとなった.また 千葉県全体での同時被害発生数の総数は,上記の順に983 セグメント,1926 セグメント,3059セグメントとなった.



比較のため、下水道の被害率に関わる等価被害スパン 長 Ls を5, 10, 25, 50, 100, 250mの6通りに変化させ、7通り のセグメント長1との組み合わせで、計7×6=42 通りの 検討を行った.図11は全パターンにおける千葉県全体で の上下水道の同時被害発生数を図示したものである.同 じセグメント長であっても、スパン長 L_sを短くすると、 被害スパン数が増え、見かけ上の下水道の被害率が高ま るため、同時被害発生数も増加する、図11より、セグメ ント長を長くとるほど同時被害発生数は多くなる傾向に あるが、L=5mおよび10mにおいては I=500m で同時被害 発生数が最大となり、Ls=1000mでは減少している.両シ ステムの被害率が非常に高い場合、ある程度のセグメン ト長において、全てのセグメントで同時被害となる.こ の場合、さらにセグメント長を長く取ると、セグメント の数が減少するため、同時被害発生数もそれに伴い減少 することがその理由である.

以上のように得られた上下水道の同時被害発生数の数 値そのものには、パラメータの設定による任意性がある. また全体的に小さな値が広く分布した形となっているた め、同時被害の発生位置の特定は難しい.しかしながら 「ごく近傍での同時被害」の検討結果からは、所与の条 件下で相互に復旧調整等が必要となる箇所の概数やその 分布を把握することができる.また、下水道被害が生じ て排水が不能となり、下水道の流下機能が回復するまで は、上水道の復旧・通水が制限されるような事態につい ても、おおよその検討が可能となろう.



図 11 セグメント長 l とスパン長 Ls と同時被害発生数

5. 東京都におけるライフラインの同時被害発生 に関する仮想的なケーススタディ

前述のように,同時被害発生率には複数システムの被 害率の相乗効果が表れる.逆にいえば,各システムの被 害率が小さければ,同時被害発生の危険性は大幅に抑制 されることが期待される.

例えば、東京都水道局(東京23区と武蔵野市・昭島



市・羽村市・奥多摩町・檜原村の3市1町1村を除く25市 町に給水)の管路の脆弱性はかなり低い.平成17年度 「水道統計(施設・業務編)」⁷⁾に基づいて配水管の脆弱性 指数^{6).(2)} V_{pd} を試算すると,全国平均では0.80であるのに 対し,東京都では0.28と非常に低い.一方,武蔵野市で は0.52,昭島市では0.31,羽村市では0.58と,全国平均を 下回るものの,東京都と比較すると相対的に高い値とな っている.そこで,東京都に武蔵野市・昭島市・羽村市 の計4事業体を加えた地域を対象として,全く同一の(脆 弱性のかなり低い)ネットワークがもう一つ布設されて





(a) *l* =25m



図16 立川断層帯地震による同時被害発生数

図 17 関東平野北西縁断層帯地震による同時被害発生数

いる仮想的状況を設定した.

本研究では、「上水道ネットワークの広域復旧シミュ レータ(簡易版)」⁸⁾を用いて、地震動分布、管路情報、 地盤情報をもとに、選択した地震による上水道配水管の 被害箇所数を基準地域メッシュ(3次メッシュ)単位で算 出した.まず図12に上水道配水管の管路延長の分布を示 す.想定地震としては、立川断層帯地震(マグニチュー ド7.4)と関東平野北西縁断層帯地震(マグニチュード 8.0)を取りあげた.それぞれの地表面最大速度の予測分 布を図13に示す.上水道配水管被害率の分布を図14に示 す.臨海部や羽村市・武蔵野市において周辺メッシュよ り被害率が高くなっているのは、液状化危険度や管の脆 弱性の違いによるものと考えられる.上水道配水管被害 箇所数の分布を図15に示す.総被害箇所数は、立川断層 帯地震で約1,658箇所,関東平野北西縁断層帯地震で約 1,927箇所となった.

前述のように、同一の上水道システムが2つ布設されて いるという仮定のもとで、同時被害発生数を評価する. 両システムの被害率は等しく($v=v_1=v_2$)、延長距離 L も等 しいと置く. 「ごく近傍での同時被害」の評価例として、 セグメント長を l=25mとした場合と、「一定の範囲内で の同時被害」の評価例として、l=250mとした場合につい て、同時被害発生数 Nsの分布を示す.

図16に立川断層帯地震による同時被害発生数の分布を 示す.図16(a)の l=25mでは、メッシュあたりの最大同時 被害発生数が約0.15箇所、全域での総数はわずか約6箇所 となった.また図16(b)の l=250mではそれぞれ約1.4箇所、 約57箇所となった.次に図17に関東平野北西縁断層帯地 震の結果を示す.図17(a)の l=25mでは、メッシュあたり の最大同時被害発生数が約0.58箇所、全域での総数はわ ずか約9箇所となった.図17(b)の l=250mではそれぞれ約 4.5箇所、約81箇所となった. 地震動分布などの評価方法や前提条件が異なるため, 単純な比較はできないが,4.に示した例に比べると同 時被害発生数は明らかに少ない.また図16および図17で は、東京都と比較して管路が相対的に脆弱な武蔵野市・ 昭島市・羽村市において、やや同時被害発生数が多くな る傾向が見られる.この結果は、複数のシステムの物理 的被害軽減対策を促進し、管路の脆弱性を改善して被害 率を低減すれば、相乗効果によって同時被害をかなり軽 減できることを示唆するものである.

6. 結語

本研究で得られた成果を以下に列挙する.

- 1) ライフラインの地震時相互連関のうち、物理的被害波及や復旧支障の原因となる隣接ライフライン施設の同時被害発生の問題に焦点を絞り、確率論的評価モデルを提案した.このモデルを用いた数値シミュレーションにより、任意の条件のもとで同時被害発生を定量的に把握することが可能となった.復旧段階における作業調整や広域連携措置に関して、災害対策本部レベルでの戦略的対応、および、被害現場レベルでの戦術的対応のための基礎資料を得ることができる.
- 2) 2 システムの同時被害発生率は、各システムの被害発 生率と同時被害発生を規定する長さの積で求められる ことを示し、大規模災害で特に深刻化する傾向を数理 的に示した.またモデル計算例により、被害率の積一 定という条件のもとでは、被害率の格差が小さいほど 同時被害の可能性が高くなること等を明らかにした.
- 3) 個々のシステムの被害率が空間的に変動する場合のモデルを提示し、被害率への影響要因の一部(地震動強度および地盤条件)の空間的相関性のため、同時被害

発生率の高低の空間的なコントラストが一層明確になり,同時被害が集中する可能性が高いことを指摘した.

- 4) 千葉県を対象として、上下水道の「ごく近傍での同時 被害」および「一定の範囲内での同時被害」に関する 評価を行った.推定値そのものにはパラメータ設定に よる任意性があるものの、所与の条件下で相互に復旧 調整等が必要となる箇所数やその分布、さらには、下 水道の排水不能による上水道の復旧・通水制限といっ た事態について、おおよその把握が可能となった.
- 5) 比較のため、管路の脆弱性が低い東京都の上水道シス テムを対象として、同一システムがもう一つ布設され た仮想的状況での同時被害発生数を評価した.その数 値はきわめて小さいものであり、複数システムの被害 率の低減効果にもまた相乗効果があることを示した.

補注

- (1)「共通モード被害」の例としては、橋梁添架管の落橋や盛土の大規模崩壊などによる埋設管損傷が挙げられる.こうした場合、各システムの被害事象の間の独立性を仮定できないため、3.で拡張した非定常モデルも適用できない.つまり、共通モードの加害事象 E_cの発生確率 P(E_c)と、それが原因でシステム1およびシステム2が被災する事象 D₁および D₂の同時確率分布 P(D₁,D₂|E_c)という形で、状況に応じて個別のモデルが必要であるため、今後の検討課題とした.
- (2)「脆弱性指数」⁹とは、管路の脆弱性を定量的に規定する管 種・管径係数を、管種・管径別の布設延長距離を用いてシ ステム全体で加重平均化した指数である.大きな値である ほど地震に対して脆弱で、被害が生じやすいことを意味す る.

謝辞

本研究を実施するにあたって,文部科学省「首都直下地震防 災・減災プロジェクト(2007~2011年度)③広域的危機管理・ 減災体制の構築に関する研究(3)相互に連関したライフライン の復旧最適化に関する研究」の補助を得た.千葉県からは千葉 県地震被害想定の上下水道施設分布データと想定被害データの 提供を受け,千葉大学 山崎文雄教授にはその便宜を図っていた だいた.またケーススタディの実施にあたっては,袴田健太氏 (東海旅客鉄道(株),研究当時,岐阜大学大学院生)の協力を 得た.記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 能島暢呂・亀田弘行:地震時のシステム間相互連関を考慮 したライフライン系のリスク評価法,土木学会論文集, No.507/I-30, 1995.1, pp.231-241.
- 2) 文部科学省研究開発局地震・防災研究課防災科学技術推進 室,独立行政法人防災科学技術研究所川崎ラボラトリー,国 土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室:重要イ ンフラ間の被害波及軽減のための調査報告書,2007.3.
- 3) 後藤洋三・鈴木猛康・末冨岩雄・小路泰広・鶴田舞・片岡 正次郎・鈴木光:重要インフラ間の被害波及軽減のための 調査,土木学会地震工学論文集,2007.8, pp.1344-1354.
- 千葉県総務部消防地震防災課:千葉県の地震被害想定調査 結果について,2008.6. http://www.pref.chiba.lg.jp/syozoku/a_bousai/jishin/higaisouteike kka.html#1
- 5) 国土交通省都市・地域整備局下水道部下水道企画課:「管路施設の被害予測手法について」,第1回大規模地震による下水道被害想定検討委員会資料,2005.12.
- 6) 能島暢呂: 脆弱性指数を用いたライフライン網の地震時脆弱性評価 ~上水道配水管網への適用~,地域安全学会論文集 No.10, 2008.11, pp.137-146.
- 7) (社)日本水道協会:平成 17 年度水道統計(施設・業務 編),第 88-1 号, 2007.
- 8) 山本欣弥・永田茂・景山耕平:上水道システムの広域復旧 戦略シミュレータ(簡易版)の開発,第58回全国水道研究 発表会,2007.5.

(原稿受付 2009.5.30) (登載決定 2009.7.25)