

広域ライフラインを対象とした地震被害復旧シミュレーション手法

LE QUANG DUC¹・能島 暢呂²・加藤 宏紀³

¹ 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: v3121034@edu.gifu-u.ac.jp

² 正会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: nojima@gifu-u.ac.jp

³ 正会員 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: kato_hir@gifu-u.ac.jp

広域ライフラインを対象として、被災リンクの復旧所要時間を明示的に取り扱った地震被害・復旧シミュレーション手法を提案した。まずリンク構成要素ごとの被害率と復旧所要時間に基づいて、リンク被害発生を条件とする条件付復旧所要時間を定式化した。さらに、これを期待値としてばらつきを考慮してリンク復旧所要時間をシミュレートする方法を提案した。大崎広域水道事業と仙南・仙塩広域水道事業を対象として、ネットワークのモデル化と東日本大震災の被災事例に基づくパラメータ設定を行い、モンテカルロ・シミュレーションによる送水信頼性解析と復旧過程のケーススタディを行った。その結果、実際の被災状況を平均的に捉えるとともに、同じ条件下で起こりうる多様なパターンを示すことができた。

Key Words: large-scale lifeline system, seismic damage, restoration process, Monte Carlo simulation

1. 本研究の目的と概要

ライフラインシステムにおいて階層的に上位に位置する要素構造物は、地震時の被害確率は小さいものの、ひとたび被害が生じると復旧に長期間を要する場合が多い。特に広域ネットワークを構成するライフライン（広域ライフラインと呼ぶ）では、被害箇所が少数であっても、それらの影響が広域に波及して深刻な事態に陥る恐れがある。例えば東日本大震災においては、宮城県企業局の広域送水システム¹⁾の大口送水管に被害が発生し²⁾、受水市町村への送水が途絶して、断水長期化の一因となった³⁾。

こうした広域ライフラインは全国に存在し、将来の地震に備えてネットワーク信頼性向上を図ることが大きな課題となっている。そのための基本的検討として、地震時ネットワーク機能・復旧評価のためのシミュレーションが重要な役割を果たす。これに関連しては、これまでに数多くの研究が行われ、成果が蓄積されている⁴⁾¹²⁾。

しかし広域ライフラインの実際の地震被災事例は多くないため、階層的に上位に位置する要素構造物を対象とした被害関数、補正係数、復旧所要日数などについて、

実績に基づいて統計的モデルを構築した例や、その適用事例、さらにはその妥当性を検証した事例などが見られないのが現状である。

また復旧予測においては、予測された被害箇所数と復旧人員・資機材に基づいて復旧率を設定して、復旧シミュレーションが行われることが多い¹⁰⁾。しかし広域ライフラインにおいては、構成要素が被災した場合の復旧所要時間の固有性や多様性を反映して、被害パターンごとに復旧シミュレーションを行うことが望ましい。

以上を踏まえて本研究では、リンクの被害シミュレーションと復旧シミュレーションとを一体として捉え、被害発生を条件とする復旧所要時間の期待値を定式化するとともに、種々の不確定要因に伴う復旧所要時間のばらつきを考慮することが可能な、簡便なシミュレーション手法を提案する。ただしシミュレーション実行のためのパラメータ設定については、東日本大震災における実績値を流用する形をとり、それらに関する予測モデルを構築するものではない。

以下、2.では、広域ライフラインのリンクを対象とした被害シミュレーションと復旧シミュレーション手法に

ついて説明する。復旧所要時間については、被害発生を条件とした条件付復旧所要時間の期待値を定式化し、さらに、ばらつきを考慮したシミュレーション手法を提案する。3.では、ケーススタディの対象とする宮城県企業局の大崎広域水道事業と仙南・仙塩広域水道事業の概要と東日本大震災における被害状況について説明する。また、送水ネットワークをモデル化して、被害率と復旧所要時間に関するパラメータを設定する。4.では、広域ネットワークの被害・復旧シミュレーションのケーススタディを示す。まずリンク被害シミュレーションを行って連結性に基づく送水信頼性解析を行う。さらに2種類の復旧戦略¹⁰⁾を適用した復旧シミュレーションを行って、需要ノードの復旧期間およびシステム全体での復旧曲線を算出し、実際の復旧過程を比較して考察を行う。

2. ネットワーク構成リンクの被害・復旧シミュレーション手法

本研究では、リンクの被害シミュレーションと復旧シミュレーションとを一連の流れとして捉え、被害発生を条件とする復旧所要時間の期待値を定式化するとともに、種々の不確定要因に伴う復旧所要時間のばらつきを考慮することが可能な、簡便なシミュレーション手法を提案する。

(1) リンクの被害シミュレーション手法

あるリンクを構成する管路 ($i=1, \dots, N$) の被害率を R_{mi} [箇所/km]、管路長を l_i [km]とする。この管路の平均被害箇所数は $R_{mi}l_i$ [箇所] となる。被害が一樣ランダムに発生すると仮定すると、このリンクにおいて被害箇所数 X が x 箇所となる確率はポアソン分布に従い、次式で与えられる。

$$P(X=x) = \frac{\left(\sum_{i=1}^N R_{mi}l_i\right)^x}{x!} e^{-\sum_{i=1}^N R_{mi}l_i} \quad (1)$$

このリンクにおける被害発生を事象 D で表すと、その確率は、少なくとも1箇所の被害が発生する確率として、次式で与えられる。

$$P(D) = P(X \geq 1) = 1 - P(X=0) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^N R_{mi}l_i} \quad (2)$$

式(2)の確率に基づいてモンテカルロ・シミュレーションを実施する。

(2) リンクの条件付復旧所要時間

管路が被害を受けた場合の復旧所要時間は、管路ごとに異なると考えられる。例えば小口径管では工事規模が小さく、被害箇所1箇所あたりの復旧所要時間は短い一方、大口径管では工事規模が大きく復旧所要時間が長いと考えられる。そこで復旧所要時間については、管路ごとに T_{Ri} として与え、これに基づいてリンク全体の復旧所要時間を評価することとする。

リンクの復旧所要時間を確率変数 T で表すと、その期待値は、管路の平均被害箇所数と復旧所要時間の積和として、次式で求められる。

$$E[T] = \sum_{i=1}^N R_{mi}l_i T_{Ri} \quad (3)$$

ただし式(3)は、リンク被害の有無の可能性をも包含した期待値となっているため、被害シミュレーションと組み合わせた復旧シミュレーションには適さない。そこで、リンク被害の有無で条件付けした条件付期待値を導入すると、式(3)は次式のように書き替えられる。

$$\begin{aligned} E[T] &= E[T|D]P(D) + E[T|\bar{D}]P(\bar{D}) \\ &= E[T|D] \left(1 - e^{-\sum_{i=1}^N R_{mi}l_i}\right) + E[T|\bar{D}] e^{-\sum_{i=1}^N R_{mi}l_i} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)の右辺第二項は0となるから、リンク被害が発生したという条件のもとでの復旧所要時間の条件付期待値は、次式で求められる。

$$E[T|D] = \frac{E[T]}{P(D)} = \sum_{i=1}^N R_{mi}l_i T_{Ri} \left/ \left(1 - e^{-\sum_{i=1}^N R_{mi}l_i}\right)\right. \quad (5)$$

式(5)において、 $R_{mi}l_i$ が十分に小さい場合は、 T_{Ri} を $R_{mi}l_i$ で加重平均した形に近似される。

$$E[T|D] \approx \sum_{i=1}^N R_{mi}l_i T_{Ri} \left/ \sum_{i=1}^N R_{mi}l_i \right. \quad (6)$$

逆に、 $R_{mi}l_i$ が十分に大きい場合は式(5)の分母は1に収束し、 T_{Ri} を $R_{mi}l_i$ で加重和した形に近似され、式(3)に一致する。

$$E[T|D] \approx \sum_{i=1}^N R_{mi}l_i T_{Ri} \quad (7)$$

(3) リンクの復旧所要時間のシミュレーション手法

実際のリンク復旧所要時間は、式(5)で与えられる条件付復旧時間の周りにばらつくことになる。しかしリンクを構成する多数の管路の被災パターンは無数に存在す

ることから、復旧所要時間の確率分布形状を特定することは、現実的には不可能である。そこで本研究では近似的扱いとして、Rosenblueth¹³⁾の“Two-point estimation”の方法を参考にして、平均値周辺の2点を“Rosenblueth points”として代表させ、シミュレーション試行することとする。この方法では、確率分布の1次・2次モーメントに関連する期待値・標準偏差に加えて、3次モーメントに関連する歪度まで考慮して確率分布を適合させることができることから、復旧時間のばらつきを考慮したシミュレーションを簡便に行う方法として採用するものである。

以下、この Two-point estimation の概要について説明する。ここでは復旧所要時間を確率変数 Y で表し、次の確率密度関数(PDF)を仮定する¹³⁾。

$$P_Y(y) = p_1\delta(y-y_1) + p_2\delta(y-y_2) \quad (8)$$

ここに δ はデルタ関数であり、式(8)は y_1, y_2 でそれぞれ p_1, p_2 の値をとるPDFである。元の分布の平均値 μ と標準偏差 σ を用いて正規化変換

$$\xi_i = \frac{|y_i - \mu|}{\sigma} \quad (i=1,2) \quad (9)$$

を行うと、確率関数としての要件および1次、2次、3次モーメントまでの適合条件は、次式で表される¹³⁾。

$$\begin{cases} p_1 + p_2 = 1 \\ p_1\xi_1 - p_2\xi_2 = 0 \\ p_1\xi_1^2 + p_2\xi_2^2 = 1 \\ p_1\xi_1^3 - p_2\xi_2^3 = \nu \end{cases} \quad (10)$$

ここに ν は歪度である。このように4本の連立方程式が得られるので、4個の未知変数は次式のように解くことができる¹³⁾。

$$\begin{cases} \xi_1 = \nu/2 + \sqrt{1 + (\nu/2)^2} \\ \xi_2 = \xi_1 - \nu \\ p_1 = \xi_2 / (\xi_1 + \xi_2) \\ p_2 = 1 - p_1 \end{cases} \quad (11)$$

以上により、

$$y_i = \mu + \xi_i\sigma \quad (i=1,2) \quad (12)$$

のそれぞれに対して確率 p_i ($i=1,2$)を割り当てることによって、式(8)のPDFの1～3次モーメントを、元の分布のそれらと適合させ、従って平均値 μ 、標準偏差 σ 、歪度 ν を一致させることができる。

復旧所要時間の確率分布の平均 μ 、標準偏差 σ 、歪度 ν が与えられると、式(11)、(12)を算出して式(8)のPDFを設定し、これに基づいて復旧シミュレーションを簡易的に行うことができる。前述のように、一般に μ, σ, ν を厳密に設定することは困難と考えられるため、実際のデータ

の特徴を踏まえて、外生的に与えるのが現実的と考えられる。

(4) Two-point estimation による確率分布の近似の例

ここでは復旧所要時間の確率分布が仮定された場合の確率分布の近似例を示す。簡単な例として、復旧所要時間 Y が被害箇所数 X に比例的な場合を取り上げる。被害が発生したという条件付の被害発生数 $X|$ は、次式の条件付ポアソン分布に従う。

$$P(X=x | x \geq 1) = \frac{e^{-\mu}\mu^x}{x!} \Big/ (1 - e^{-\mu}) \quad (13)$$

この確率分布のモーメント母関数は、 t を実数として、

$$\begin{aligned} M_X(t) &= E(e^{tx}) = \sum_{k=0}^{\infty} e^{tx} P(X=k) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} e^{tx} P(X=k | X \geq 1) = \frac{e^{-\mu}(e^{\mu e^t} - 1)}{1 - e^{-\mu}} \end{aligned} \quad (14)$$

で与えられ、1～3次モーメントは次式で得られる。

$$m_1 = E[X] = \left. \frac{dM_X(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\mu}{1 - e^{-\mu}} \quad (15)$$

$$m_2 = E[X^2] = \left. \frac{d^2 M_X(t)}{dt^2} \right|_{t=0} = \frac{\mu^2 + \mu}{1 - e^{-\mu}} \quad (16)$$

$$m_3 = E[X^3] = \left. \frac{d^3 M_X(t)}{dt^3} \right|_{t=0} = \frac{\mu^3 + 3\mu^2 + \mu}{1 - e^{-\mu}} \quad (17)$$

平均値は式(15)で与えられ、これは式(5)と等価であることが示される。標準偏差と歪度は以上を用いて次式で求められる。

$$\sigma = \sqrt{m_2 - m_1^2} \quad (18)$$

$$\nu = \frac{m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^3}{(m_2 - m_1^2)^{3/2}} \quad (19)$$

これらに基づいて式(8)のPDFを設定すればよい。

式(13)において μ を変化させた場合の2点のRosenblueth pointsと被害箇所数の条件付期待値を図-1に示す。また2点のRosenblueth pointsに与える確率値を図-2に示す。条件付期待値を挟んだ2点に対して、正の歪を持つように確率が与えられていることがわかる。また条件付期待値は、 μ が0に近くなるとは1に、 μ が大きくなると μ にそれぞれ収束することがわかる。

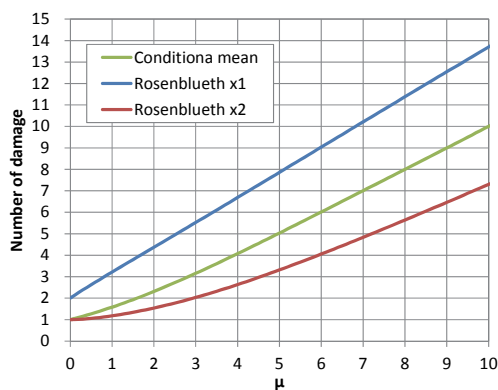


図-1 Rosenblueth points と条件付平均値

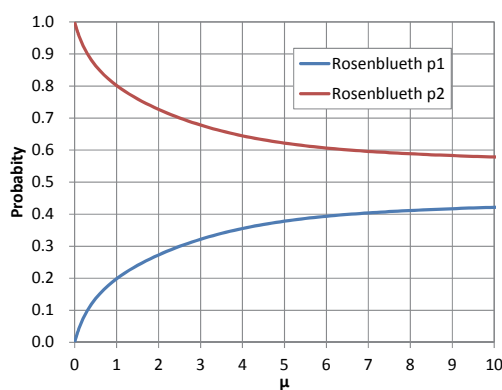


図-2 Rosenblueth points に与える確率

3. 広域水道システムの被害・復旧事例に基づくシミュレーション・パラメータ設定

(1) 広域水道システムの概要

宮城県企業局では、大崎地方を中心とする地域を対象とした「大崎広域水道」と、仙南及び仙塩地区を対象とした「仙南・仙塩広域水道」において用水供給事業を行っている。大崎広域水道では、漆沢ダムを水源とする麓山浄水場及び南川ダムを水源とする中峰浄水場から大崎市、松島町など10市町村に対し、一日最大120,000 m³の水道用水が供給されている¹⁾。仙南・仙塩広域水道では、セヶ宿ダムを水源とする南部山浄水場から仙南地区（低区系、9市町）及び仙塩地区（高区系、8市町）の計17市町に対して、一日最大553,300 m³の水道用水が供給されている¹⁾。

「平成23年(2011年)東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書」²⁾および「平成23年(2011年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書」³⁾に基づき、各広域水道における管路延長の合計と管種別（5区分：鋳鉄管[CIP]、ダクタイル鋳鉄管[DIP]、鋼管[SP]、塩化ビニル管[VP]、その他）の内訳を示す（表-1

の管路延長の欄を参照）。大崎広域水道では、導・送水管路延長が131.6kmで、管種別にみるとDIP[その他]の延長が107.8 km（全体の82%）、SP[溶接]が23.8 km（同18%）である³⁾。仙南・仙塩広域水道では、導・送水管路延長が201.3 kmで、管種別にみるとDIP[耐震]の延長が56.0 km（同28%）、DIP[その他]の延長が92.5 km（同46%）、SP[溶接]が52.8 km（同26%）である³⁾。なお、管路本体における被害形態は「継手漏水」「管体破損」「可とう管漏水」「その他」の4区分であるが、いずれの広域水道においても区別せずに同一のものとして扱う。

(2) 送水ネットワークのモデル化

図-3に示すように、両システムの送水ネットワークをノードとリンクでモデル化した。ノードの属性は3種とし、供給ノード（Source Node：S）、需要ノード（Demand Node：D）、分岐ノード（Branch Node：B）とした。需要ノードは各市町村の受水地点であり、その規模については市区町村単位の受水量ベースで定めた。大崎広域水道では「大崎広域水道用水に関する覚書」¹⁴⁾の平成21年度需給水量の値を用い、仙南・仙塩広域水道では受水市町村における県水・自己水源比⁵⁾を用いた。

表-1 口径・管種・被害形態別の被害状況

（文献²⁾に基づいて作成）

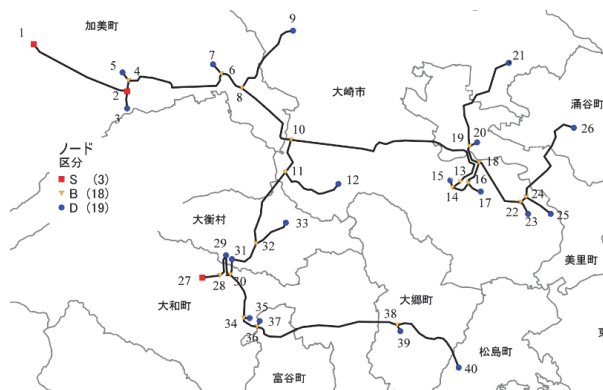
(a) 大崎広域水道

管種	CIP	DIP	SP	VP	その他	計(件)
管路本体 口径(mm)						
Φ75以下						0
Φ100～Φ150						0
Φ200～Φ250		3				3
Φ300～Φ450		2				2
Φ500～Φ900		12				12
Φ1000以上						0
管路本体 計(件)	0	17	0	0	0	17
管路本体 管路延長(km)	0	107.8	23.8	0	0	131.6
管路本体 被害率(件/km)	-	0.16	0.00	-	-	0.13
管路本体 被害形態						
継手漏水		13				13
管体破損						0
可とう管漏水						0
その他		4				4
付属施設 被害形態						
空気弁		7	1			8
排水弁			1			1
付属施設 計(件)	0	7	2	0	0	9

(b) 仙南・仙塩広域水道

管種	CIP	DIP	SP	VP	その他	計(件)
管路本体 口径(mm)						
Φ75以下						0
Φ100～Φ150						0
Φ200～Φ250		1				1
Φ300～Φ450		4				4
Φ500～Φ900		1	1			2
Φ1000以上			3			3
管路本体 計(件)	0	6	4	0	0	10
管路本体 管路延長(km)	0	148.5	52.8	0	0	201.3
管路本体 被害率(件/km)	-	0.04	0.08	-	-	0.05
管路本体 被害形態						
継手漏水		6				6
管体破損						0
可とう管漏水			4			4
その他						0

市町村内に複数の需要ノードが存在する場合は、便宜的に等配分した。送水ネットワークの口径分布については、水源に近い上流側に大口径管を配分し、分岐して末端に近づくほど小口径となるように仮定した。



(a) 大崎広域水道



(b) 仙南・仙塩広域水道

図-3 送水ネットワークのモデル化

表-2 口径別の管路延長、被害率と復旧所要日数の設定値

(a) 大崎広域水道

管種	管路延長(km)	被害率(件/km)	復旧所要日数(日)
管路本体 口径(mm)			
Φ75以下	0	-	0.25
Φ100～Φ150	2.1	0.00	0.50
Φ200～Φ250	12.5	0.24	1.00
Φ300～Φ450	47.2	0.04	3.00
Φ500～Φ900	69.8	0.17	5.00
Φ1000以上	0	-	10.00

(b) 仙南・仙塩広域水道

管種	管路延長(km)	被害率(件/km)	復旧所要日数(日)
管路本体 口径(mm)			
Φ75以下	0	-	0.25
Φ100～Φ150	0	-	0.50
Φ200～Φ250	5.8	0.17	1.00
Φ300～Φ450	23.6	0.17	3.00
Φ500～Φ900	69.8	0.03	5.00
Φ1000以上	102.3	0.03	10.00

(3) 東日本大震災における管路被害と復旧状況

2011 年東日本大震災の発生に伴い、両システムで導・送水管の被害が管路本体および付属施設に計 36 件発生した²⁾。このうち管路本体については、表-1 に示すように大崎広域水道で 17 件、仙南・仙塩広域水道で 10 件発生した。管種別に内訳をみると、前者が DIP 17 件、後者が DIP 6 件と SP[溶接] 4 件であった。最大φ2400mm の SP[溶接]管も被災した。このほか付属施設については、大崎広域水道で 9 件（空気弁 8 件、排水弁 1 件）の被害が発生したが、本研究では管路本体の被害のみを対象とする。

文献²⁾によると、東北地方太平洋沖地震（本震）発生後の初動体制として、事務所や職員などの被害状況の確認、水運用の確認、施設パトロールが実施された。浄水施設では地震による被害はあったものの、浄水機能を確保できたことから、管路復旧の進捗状況にあわせて、各受水施設への送水が再開されている。

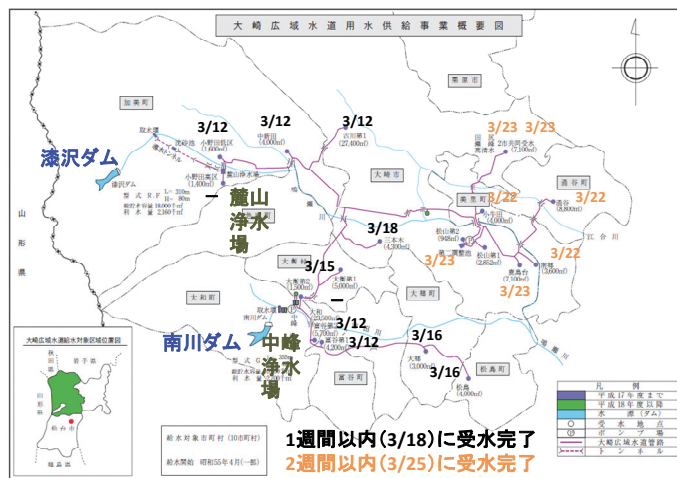
管路被害の復旧による各受水地点の受水完了日⁴⁾を図-4 に示す。大崎広域水道では、本震から 1 週間（3 月 18 日）以内に一部の市町村（大崎市、美里町、涌谷町）を除いて復旧し、2 週間（3 月 25 日）以内に受水が完了した。一方、仙南・仙塩広域水道では、本震から 1 週間までの段階では、水源付近の低区系管路の復旧にとどまっている。2 週間以内に、低区系管路で山元町を除いて復旧したものの、高区系管路では仙台市以北の市町が未復旧のままである。送水ネットワークの末端部分で受水完了するのに 3 週間（4 月 1 日）を要した。

仙南・仙塩広域水道の方が被害箇所数は少ないものの、大崎広域水道に比べて復旧に時間を要した。この理由として、南部山浄水場付近でφ2400mm、φ1000mm の SP[溶接] 送水管の被害があり、復旧に約 10 日間を要したことが考えられる。一方、大崎広域水道では、2 箇所の浄水場（麓山浄水場・中峰浄水場）からの 2 系統で同時に復旧が進められたことが、早期復旧につながったと推察される。

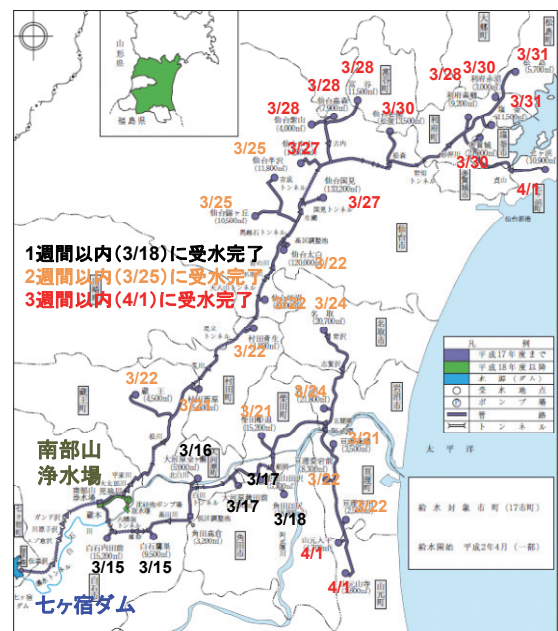
(4) シミュレーションに用いる各パラメータの設定

文献²⁾においては、導・送水管の口径・管種・被害形態別の被害件数および管路の被害率が、両システム全体の値として記載されている。そこで、大崎広域水道と仙南・仙塩広域水道における口径別の管路延長の比率を、水道用水の供給規模から、「φ100～φ150」が 100 : 0%、「φ200～φ250」が 68.3 : 31.7%、「φ300～φ450」が 66.7 : 33.3%、「φ500～φ900」が 50 : 50%、「φ1000 以上」が 0 : 100%となるように配分した（表-2）。

口径別の被害率（管路 1km あたりの平均被害箇所数）については、実際の被害件数を上記で設定した管路



(a) 大崎広域水道



(b) 仙南・仙塩広域水道

図4 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（本震）における広域水道からの各市町の受水状況
(用水供給事業概要図²⁾に受水完了日⁴⁾を加筆)

延長で除して求めた。本研究では復旧シミュレーションも行うため、この口径別被害率を用いることとし、管種類の被害率については用いないものとする。

口径別の復旧所要日数（管路被害1箇所あたりの復旧に必要な日数）は、両システムの導・送水管の被害一覧²⁾、水道施設の被害プロット図²⁾と各広域水道からの各市町村の受水状況（図4）を重ねあわせた結果に基づいて設定した。具体的には「φ1000以上」では、復旧所要日数を10日と仮定した。「φ500～φ900」では、「φ1000以上」における復旧所要日数の半分と設定した。その他の口径についても同様である（表2）。

4. 広域ネットワークシステムの機能的被害・復旧シミュレーションのケーススタディ

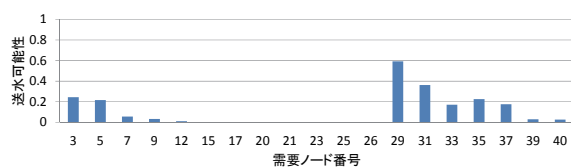
ここでは、2で説明したリンクの被害・復旧シミュレーション手法を用いて、広域ネットワークシステムの機能的被害・復旧シミュレーションのケーススタディを示す。3で説明した二つの広域水道事業を例にとり、東日本大震災における被災データに基づいて設定した被害率パラメータおよび復旧所要日数パラメータを用いて、送水信頼性解析と復旧シミュレーションを行う。

(1) 被害シミュレーションによる送水信頼性解析

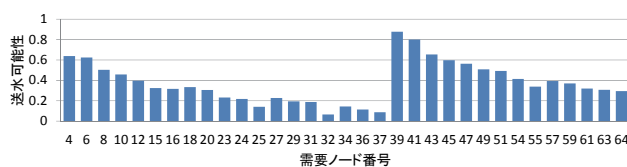
3で設定した管路被害率を用いて、式(1)より各リンクの被害確率を求め、モンテカルロ・シミュレーション

(MCS)により、リンク被害パターンを生成する。シミュレーションの試行回数を1万回とする。それぞれのリンク被害パターンに対して、供給ノード（浄水場）から各需要ノード（各給水地点）へのノード間の連結性評価を行う。複数の供給ノードが存在する場合には、いずれかの供給ノードから送水ができれば機能が満たされるものとする。各需要ノードへの送水信頼度は、供給ノードとの連結回数をシミュレーション回数で除すことで算出される。

図5に結果を示す。横軸は図3に示したノード番号であり、基本的に上流側から付番しているが、大崎広域水道では浄水場が2カ所あるためNo.29以下が別系統であり、仙南・仙塩広域水道では分岐があるためNo.38以下が別系統である。このほかにも分岐のため若干不規則になっているところがある。いずれも冗長性に乏しいネットワーク形態のため、基本的に上流側ほど送水信頼性が高く、送水距離が長い下流側ほど送水信頼性は低下している。全体的に大崎広域水道の方が仙南・仙塩広域水道よりも送水信頼性が低くなっているのは、被災実績にあわせた被害率設定のためである。実際には全域で送水が途絶したが、このシミュレーションにより、同等の平均被害率のもとでの多様な被災パターンの可能性と、その条件下での平均的な送水信頼度を示すものである。

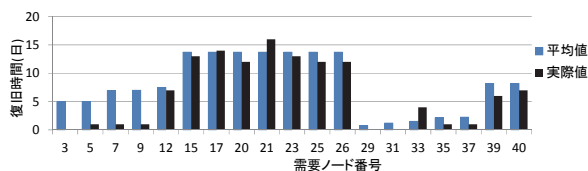


(a) 大崎広域水道

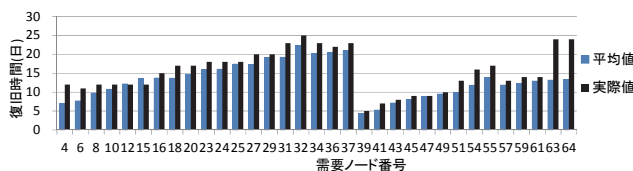


(b) 仙南・仙塩広域水道

図-5 需要ノードへの送水可能性

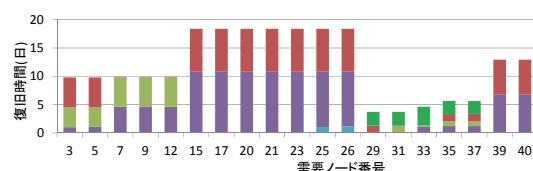


(a) 大崎広域水道

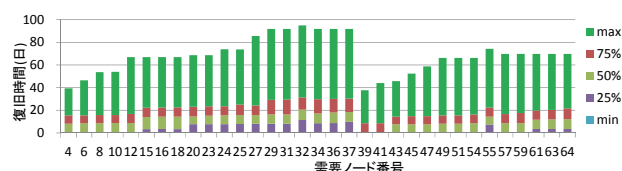


(b) 仙南・仙塩広域水道

図-6 需要ノードの平均復旧所要時間と実測値の関係



(a) 大崎広域水道



(b) 仙南・仙塩広域水道

図-7 需要ノードへの復旧所要時間の四分位数

(2) 復旧シミュレーションのための復旧戦略

本研究では、星谷ら¹⁰⁾が水道ネットワークシステムの地震被害復旧戦略として提案した「順次復旧」と「同時復旧」を参考にして復旧戦略を定めた。

「順次復旧」は供給ノードに最も近い上流側から下流側に向かって被災リンクの復旧を進めるものである¹⁰⁾。ある需要ノードが機能的に復旧する（通水が完了する）までの所要時間は、供給ノードからのルートに含まれる被災リンクの復旧所要時間の総和として求められる。

一方、「同時復旧」はすべての被災リンクの復旧を同時に開始するものである¹⁰⁾。ある需要ノードの機能的復旧までの所要時間は、供給ノードからのルートに含まれる被災リンクの所要時間の最大値として求められる。

両者のいずれにおいても、供給ノードから需要ノードに至るルートが複数ある場合は、時間距離に基づく最短ルートを選定する。また、復旧率の算定においては、復旧された各需要ノードの受水量の累積値を全需要ノードの総受水量で除して求めることとする。

(3) 各需要ノードの復旧所要時間

両システムに対してそれぞれ順次復旧と同時復旧を適用し、試行回数 1 万回の復旧シミュレーションを行った。具体的には、式(2)に基づくリンク被害シミュレーションにおいて被害を受けたリンクに対して、まず式(5)の

復旧所要時間期待値を与えた。ここでは 2.(4)で述べた近似が成り立つ場合を考え、式(15)、(18)、(19)を求めて式(11)、(12)の諸量で規定される式(8)の PDF に基づいて、復旧所要時間をシミュレートした。

その結果を用いて、順次復旧と同時復旧を適用して復旧過程をシミュレートした。その結果を実際の断水解消過程⁹⁾と比較したところ、大崎広域水道については同時復旧、仙南・仙塩広域水道については順次復旧がよく適合することがわかった。そこで本稿ではその結果を示す。

各需要ノードへの復旧所要時間の平均値と実測値の関係を図-6 に示す。供給ノードからの送水距離が長いほど、復旧時間が長期化していることがわかる。大崎広域水道の供給ノード付近の一部でやや過大評価、仙南・仙塩広域水道の末端の一部でやや過小評価の傾向を示し、改善の余地はあるものの、概ね良好な推定となっていることがわかる。参考までに、1 万パターンでの復旧曲線における各需要ノードの復旧所要時間の四分位数の結果を図-7 に示す。復旧所要時間のレンジはかなり広く、シミュレーションによって多様な復旧過程の試行結果が得られていることがわかる。

(4) 送水機能の復旧過程の比較

1 万パターンのすべての復旧曲線を用いて、各時間断面で最小値、25%値、中央値、75%値、最大値を算出し、

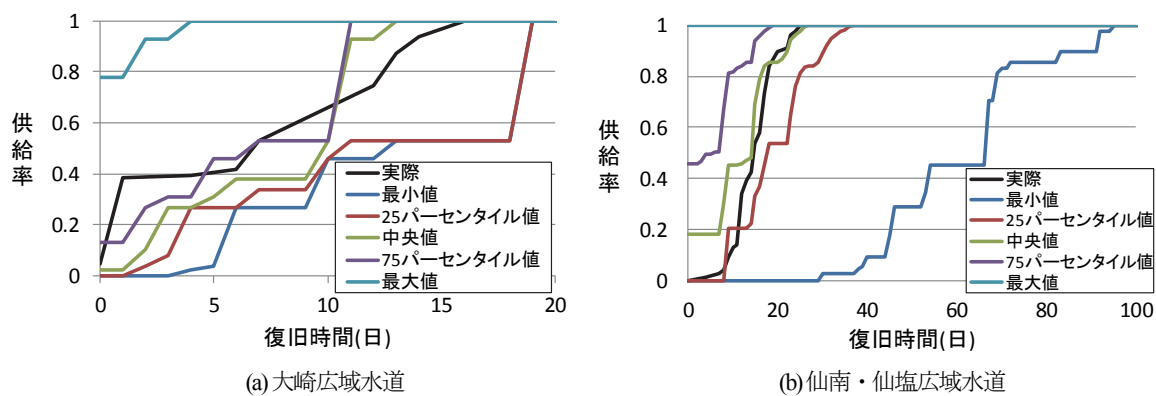


図-8 代表値として算出した5種類の復旧過程と実際の復旧過程の比較

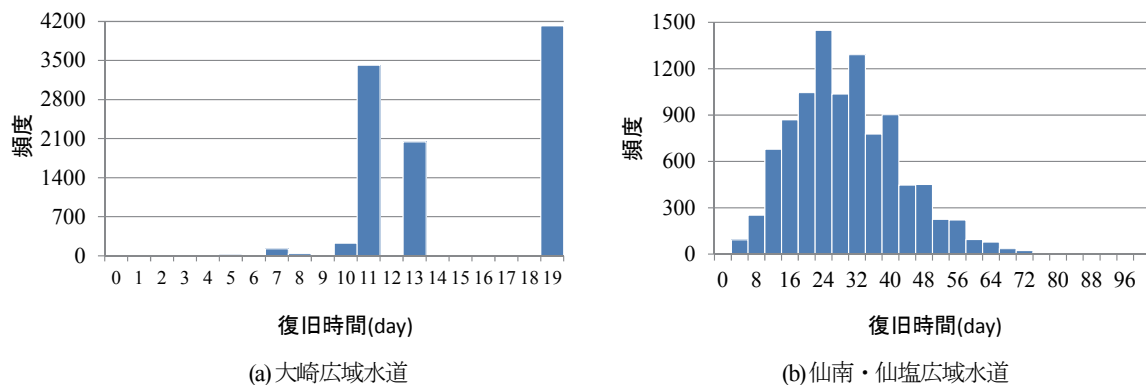


図-9 ネットワーク全体の復旧完了時間の分布

これらを5本の復旧曲線としたものを、実際の復旧曲線とともに図-8に示す。大崎広域水道における実際の復旧曲線は、中央値とやや乖離している部分が認められるものの、絶対値としての差は小さい。仙塩・仙塩広域水道における実際の復旧曲線は、ごく初期段階を除いて中央値とかなり近くなっている。シミュレーションによる復旧曲線の幅はかなり広いが、推定結果は良好であるといえる。

最後に、1万パターンの復旧曲線における復旧完了時間のヒストグラムを図-9に示す。同時復旧を適用した大崎広域水道では、復旧完了時間の多様性は低く、おおむね1～3週間程度となっている。一方、順次復旧を適用した仙南・仙塩広域水道ではばらつきは大きく、1～10週間程度となっている。

5. おわりに

本研究では、広域ライフラインを対象として、被災リンクの復旧所要時間を明示的に取り扱った地震被害・復旧シミュレーション手法を提案し、その適用例を示した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) リンク構成要素ごとの被害率と復旧所要時間に基づいて、リンク被害発生を条件とする条件付復旧所要

時間を定式化した。リンク被害率の大小に応じて、リンク要素の復旧所要時間の加重および加重平均で近似される条件付復旧所要時間を、単一の式で表現した。

- 2) Rosenblueth¹³⁾の“Two-point estimation”の方法を応用して、ばらつきを持つリンク復旧所要時間のシミュレーションを手法を提案した。ばらつきの分布が定義できない場合でも、1～3次モーメントを外生的に与えれば、2点で代表させたシミュレーションが簡便に実行可能である。
- 3) 大崎広域水道事業と仙南・仙塩広域水道事業を対象例として取り上げ、提案手法のケーススタディを行った。東日本大震災における被害状況²⁵⁾に基づいて、被害率と復旧所要時間に関するパラメータを設定した。
- 4) 被害・復旧シミュレーションを行い、需要ノードの復旧期間およびシステム全体での復旧曲線を算出し、実際の復旧過程と比較したところ、実際の被災状況を平均的に捉えるとともに、同じ条件下で起こりうる多様なパターンを示すことができた。

本研究で示したケーススタディは、シミュレーション手法の簡単な適用事例として例示したものである。実際の評価を行うには、地震動強度をパラメータとする被害率関数や、管種・口径別の補正係数および復旧所要日数、

地震動分布、システム形態や被災状況に適応した復旧戦略などを適切に設定することが必要となる。この点については、さらに情報を収集して今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 宮城県企業局：宮城県企業局 HP，
<http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/16.html> (2016年2月2日アクセス)
- 2) 厚生労働省健康局水道課，(社)日本水道協会：平成 23 年(2011 年)東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書，2011.9.
- 3) (社)日本水道協会：平成 23 年(2011 年)東日本大震災における管本体と管路附属設備の被害調査報告書，2012.9，
http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/houkokusyo_21.html (2016年1月13日アクセス)
- 4) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書，2013.3.
- 5) 鉾田泰子，岡本祐：東北地方太平洋沖地震における断水長期化要因の解明，地域安全学会論文集，No.17，pp.83-91，2012.7.
- 6) 篠塚正宣，小池武：埋設ライフラインシステムの連結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，1981.7，pp.13-24.
- 7) 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，1981.7，pp.25-35.
- 8) 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，1981.7，pp.37-48.
- 9) 磯山龍二，片山恒雄：大規模水道システムの地震時信頼度評価法，土木学会論文報告集，第321号，1982.5，pp.37-48.
- 10) 星谷勝，宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文報告集，第331号，1983.3，pp.45-54.
- 11) 能島暢呂，亀田弘行：幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム，土木学会論文集，No.450/1-20，1992.7，pp.171-180.
- 12) Takada, S. and Hassani, N.: Lifeline Earthquake Engineering -Lessons from 1995 Kobe and 2011 East Japan earthquakes-, Farhangshensi Press, Tehran, Iran, April 2015.
- 13) Rosenblueth, E.: Two-point estimates in probabilities, Applied Mathematical Modelling, Vol.5, Issue 5, pp.329-335, October 1981.
- 14) 宮城県：宮城県HP，大崎広域水道用水の供給に関する覚書，
<http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/11582.pdf> (2016年1月18日閲覧)

SIMULATION METHOD FOR SEISMIC DAMAGE AND RESTORATION OF LARGE-SCALE LIFELINE NETWORK

LE QUANG DUC, Nobuoto NOJIMA and Hiroki KATO

A simulation method for damage and restoration process of large-scale lifeline network has been proposed incorporating time required for restoration of damaged links explicitly. First, restoration time conditioned by the occurrence of link damage is formulated on the basis of damage rate and restoration time given for each link component. Restoration time of a link is then simulated taking account of associated uncertainty. Illustrative examples are shown for Osaki and Sennan-Senen water transmission networks in Miyagi Prefecture that were severely damaged in the Great East Japan Earthquake Disaster, 2011. The results of reliability analysis and simulated restoration processes are in good agreement with the actual damage and restoration process. Moreover, potential restoration patterns under the similar condition are demonstrated.