

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

能島暢呂*・亀田弘行**

ライフライン機能の復旧プロセスを数理モデルによって表現し、平均復旧時間の最短化を目的とする震後復旧戦略を提案した。まずライフライン・ネットワークを上位・下位の2層に分離し、上位管路網についてはツリー構造を用いて、ネットワーク連結性の早期回復を効率よく完了する手続きを示した。また下位管路網については、復旧作業効率化のための最適ブロック化方策を示した。

Keywords: lifeline systems, earthquake disaster, restoration strategy

1. 序論

地震災害時における供給系のライフライン機能のサービス中断は、社会・経済活動や居住生活に致命的な打撃を与える可能性がある。著者らは、ライフライン地震災害の防止・軽減策を、(1)構成施設の力学的強度の増加による物理的被害の未然防止、(2)冗長性・バックアップ設備などを活用したサービス継続措置、(3)緊急シャットダウン等のシステム・オートメーションによる危険防止・被害波及防止、(4)効率的な復旧による早期正常化、に大別した¹⁾。高度に集積した施設に一樣に高い耐震性を与え、全面的に強化することは、経済的制約等のため実現が困難である。従って、(1)でカバーできない部分では、発生した被害に対して(2)～(4)の対策によって対処する必要がある。

このうちの(4)の基本的考え方は、地震後、限られた資源を効率的に運用して、被害への対処を迅速に行い、累積する被害の影響を最小限に抑えるものである。つまり、復旧作業の展開方法によって復旧プロセスに大きな違いが生じるという点に、復旧戦略を議論する重要性がある。復旧戦略に関しては、グラフ理論、システム・ダイナミクス、動的計画法などのシステム手法が有効に用いられ、復旧優先順位の設定や資機材・人員の最適配分、復旧過程予測などに関する研究が精力的に行われてきた(文献2)-12)など)。

復旧戦略に関するこれまでの研究は、複数の復旧方針の試行によって得られた結果の比較から、復旧方針の優劣を比較するものが多かった。本研究は、そのような模索をできる限り排除するため、評価基準を明示的に定式化して数理計画法やグラフ理論を援用することにより、

所定の被害状況に対する最適な復旧作業の順序を求めることを主眼とするものである。

ところで、水・ガスなどの供給系ライフライン・ネットワークは、少数の供給源から極めて多数の需要家にサービスを提供するため、階層構造を持つネットワークとなっている。幹線供給網(送・配水管やガス高・中圧管)と末端供給網(給水管やガス低圧管)を比較すると、ネットワーク形態、カバーするエリア、管路延長、管径、管材質、構造的強度など、あらゆる点で性質を異にする。従って、両者の被害形態や復旧戦略は、かなり異なったものとなる。

このような観点から、本研究ではネットワークを上層・下層の2段階に区別して、各階層ランクのネットワークの被害形態および災害対応に適合した戦略を別個に検討することとした。この基本方針は、ガス供給システムの復旧プロセスを詳細にモデル化した Isoyama et al. による研究⁵⁾において提示されているが、最適化過程の数理的扱いにおいて、本研究は明らかに異なるものである。

まず階層的に上位に位置する幹線網においては、下位施設に比べて被害は少ないと考えられる。この部分では、被害発生後の孤立節点の早期解消、つまり需給節点の連結性の早期回復が課題となる。本研究ではネットワークのツリー構造を用い、冗長性・階層性を考慮して、ネットワークの全てのノードを効率よく連結させることのできる復旧順序に関する考察を行う。

次に、上位施設の復旧完了後に、システム全体の機能の正常化へ向けて行われる、下位の末端供給網の本復旧を扱う。ここでは、面的に広がる管路網に多数の被害が分布するケースが多いため、ブロック分割による被害ブロックの局限、無被害ブロックにおけるサービス継続、および被害地域におけるサービス遮断・復旧作業・サービス再開という一連の作業が主たる災害対応となる。本研究では簡単のため、ブロックごとに要素群を一括し、ブロック内の全被害要素が修理完了した時点でそのブロッ

*正会員 工修 京都大学防災研究所助手 都市施設耐震システム研究センター(〒611宇治市五ヶ庄)

**正会員 工博 京都大学防災研究所教授 都市施設耐震システム研究センター

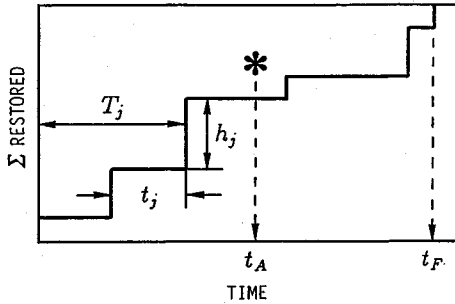


Fig.1 Formulation of restoration curve

クが復旧すると仮定し、被災ネットワークのブロック分割方法の最適化に関する考察を行う。

以上の2つの復旧最適化問題について、本研究ではまず2.で両問題共通の数理モデルによって復旧プロセスを表現し、定式化を行う。次いで、3.と4.において、それぞれ上位・下位の管路網の復旧戦略を扱う。なお本研究においては、復旧作業に関わる種々の制約条件(システム固有の作業特性や、フロー特性など)を考慮せず、供給系のライフラインを単純化したシステムを対象とした。

2. 復旧過程の評価基準と定式化

ライフライン系の震後復旧過程を表現する方法としては、復旧率の時間的推移を記述した復旧曲線が一般に用いられ、横軸を地震発生後の経過時間、縦軸を復旧率とする場合が多い。縦軸の復旧率の指標としては、主として(1)被害要素修理率、(2)需給節点連結率、(3)サービス充足率が挙げられ、また、復旧過程の最適性の評価基準としては、(1)平均復旧時間(未復旧率の累積値)、(2)復旧完了時間、などが挙げられる。

以下、本研究で用いる諸量の関係を Fig.1 に示し、復旧最適化問題の定式化を行う。まず本研究では、復旧率の尺度として、復旧したノード v_j (またはブロック B_j) の需要家数 h_j の累積値を採用する。また各ノード(ブロック)の復旧が終了した地震発生後経過時間を T_j とする。さらに最適性を議論するための評価基準として、平均復旧時間 t_A を採用する。これは復旧曲線の上部の面積、つまり未復旧率の累積値に対応する指標であり、全サービス域における需要家の不便の総和を表すもので、復旧プロセスの評価基準としては、第一義的な指標と考えてよい。これらの定義によって、復旧の最適化は t_A の最小化となり、 h_j を重みとする重み付き遅延時間 and の形として次式で表される。

$$t_A = \frac{\sum_j (h_j \cdot T_j)}{\sum_j h_j} \rightarrow \min \dots \dots \dots (1)$$

参考のため同図には、復旧完了時間 t_F も示した。

さらに各ノード v_j (ブロック B_j) の復旧が1つずつ順番になされる場合には、その復旧順序を $\sigma(j)$ 、復旧所要時間を t_j とすると、

$$T_j = \sum_{\sigma(k) \leq \sigma(j)} t_k \dots \dots \dots (2)$$

となる。3.では、 $t_A \rightarrow \min$ をみたく順序 $\sigma(j)$ を求めるスケジューリング問題を扱う。また4.では、ブロック分割の境界の定め方によって各ブロックの h_j , t_j が変化することに着目し、所定のブロック分割数で $t_A \rightarrow \min$ となる分割方法を探る手法を扱う。

3. ツリー構造を用いた上位管路網の復旧戦略

(1) 概説

ライフライン・ネットワークのノード集合を V 、リンク集合を E とし、グラフ構造を有向グラフ $G = (V, E)$ で表現する。簡単のため $v_1 \in V$ のみを供給ノード、それ以外を需要ノードとする。またノードは破壊せず、リンクのみに破壊が生じるものとする。

ライフライン系は通常冗長ネットワークとなっているため、震後復旧の第一段階では破壊リンクのすべてを修理しなくても、 V を張る有向木 T を取り出してリンク $e_j \in T$ の中で破壊している要素を修理すればネットワークの連結性を回復することが可能である。ここで木 (tree) T とは、 E の部分集合でタイセットを含まず、(ノード数 - 1)本の要素からなるリンク集合のことをいう。また有向木 (directed tree) とは、全てのノードがあるノード r から到達可能であるような根 (root) r を有する木のことである¹³⁾。被災ネットワークの連結性回復は、ツリー構造の連結なグラフ $G_T = (V, T)$ を完成すること、ネットワークの形態のうえでは同じ意味を持つ。

ところで連結な有向グラフの有向木の総数は、並列リンクおよび有向閉路を含まない場合、各ノード v_i の負の線度 (上流側に接続するリンク数) を δ_i^- とすると $\prod_{\delta_i^- \geq 1}$

となることから、ツリー構造を決定するには膨大な数の木の中から1つの構造を選択する必要がある。本研究ではまず、全需要ノードを供給ノードに効率よく連結させるツリー構造を3.(2)において検討する。さらに、そのツリー構造に含まれる被災要素を復旧の対象とし、平均復旧時間 t_A の最短化を実現する最適復旧順序の決定方法に関する考察を行う。なお3.では全ノードの連結を復旧完了とよび、ネットワークの被害リンクの復旧がすべて完了した状態をさすものではない。

(2) ネットワーク連結性回復のためのツリー構造

a) 最小木 (Minimum Spanning Tree)¹³⁾

グラフ $G = (V, E)$ の各リンク $e_k = (v_i, v_j)$ に重み $w(k) = w(v_i, v_j)$ が与えられているとき、 G の木の中で、

重みの総和 $\sum_{e_k \in T} w(k)$ が最小であるような木 T を G の最小木という。本研究においては、リンク e_k の修理の所要時間 t_k を重みとする。従って、最小木は連結性復旧完了までの時間 $t_F = \sum_{e_k \in T} t_k$ が最小となる木を意味し、最短時間で孤立ノードを解消できるリンク集合を抽出することに対応する。

b) 最短距離木 (Shortest Path Tree) ¹³⁾⁻¹⁵⁾

最短距離木 T とは、基準ノード v_1 を根とし、かつ T にそってのパス P_{1i} が v_1 から v_i への最短パスであるような木である。本研究の場合、最短距離木はあらゆるノード v_i について、 $\sum_{e_k \in P_{1i}} t_k$ がすべて最小となる木となる。つまり、供給ノード v_1 と連結していない特定の需要ノード v_i が、最短時間で v_1 に連結される可能性を持つ木である。最短経路探索には Floyd のアルゴリズム ^{13),15)} を用いた。

c) 直交表を用いたランダムな木

制約なしにランダムに発生した木を用いて最小木および最短距離木との比較検討を行う。木を任意に選ぶ方法として、実験計画法における要因配置法を応用した直交表 ¹⁶⁾ を用いて、多くの場合を適度に網羅し、かつ必要最低限度の数の木を選出する方法をとる。

最小木や最短距離木の利用は、文献 2), 5) でも試みられているが、これらのツリー構造に含まれる被害リンクの復旧順序の最適性については正確に論じられていない。本研究では以下、この点について重点的に考察する。

(3) 最適復旧戦略の前提条件

2. の定式化における表記に従って、式 (1) を満たす被災要素復旧順序を求める方法を示す。ここで、3.(2) によってネットワークのツリー構造が得られ、復旧の対象となる有向木が得られているので、リンク e_j はノード v_j と 1 対 1 に対応づけられるため、被災リンク e_j より上流側のリンクの被害がすべて修理されている場合、 e_j が修理されると同時に v_j の復旧となる。そこで、記号 t_j および $\sigma(j)$ を、リンク e_j とノード v_j の復旧所要時間および復旧順序を表すものとして、区別せずに用いる。

また復旧作業の条件として、以下の 2 点を仮定する。

- a) 復旧資材・人員 (以下では復旧資源という) は一定量であり、かつ遊休しない。
- b) 破壊要素の復旧所要時間は、投入される復旧資源に比例して短縮される。つまり復旧効率の飽和効果は無い。

以上の仮定のもとでは、被害要素を 1 要素ずつ復旧した方が、多数の作業を分担して並行して進めるよりも有利であることが導かれるので、式 (2) が成立するものとする。実際には 1 つの被害箇所全資源を投入することではなく、復旧資源の空間的・時間的配分過程が問題となる。これに関しては、動的計画法を用いた資源配分の研究がなされている ^{6),10)}。

(4) ツリー構造ネットワークの最適復旧戦略

ここでは、3.(3) の前提条件のもとで、3.(2) の各手法でツリー構造化されたネットワークを対象とし、式 (1) の t_A を最小化する最適復旧戦略を求める。

a) 最大勾配法 (Maximum Slope Method)

式 (1)(2) の最適化の簡便な近似解法として、グリーディー算法による最大勾配法がある。復旧途上で、復旧曲線の勾配にあたる復旧効率 $\gamma_j = h_j/t_j$ が大きいものを優先する基準である。いま l 個のノードが供給ノードと連結されているとし、その集合を S 、また S から一本の被害リンクを経由して到達可能なノードの集合を $H(S)$ と表す。 $(l+1)$ 番目に連結すべきノード v_{next} は、次式で表される。

$$v_{next} = \sigma^-(l+1) = \{v \mid \max_{v_j \in H(S)} \gamma_j\} \dots \dots \dots (3)$$

この手続きでの各ステップでは、ネットワークの下流側、すなわち $(l+2)$ 番目以降の作業効率を考慮できない。

b) Horn のアルゴリズム ¹⁷⁾

Horn は数理計画法の組み合わせ最適化の分野において、最大勾配法の難点を解決した最適化アルゴリズムを提案している ¹⁷⁾。本研究では、このアルゴリズムをツリー型のライフライン・ネットワークの地震被害における復旧順序決定法に応用する。

順序決定のルールは基本的には式 (3) によるが、各リンクの復旧効率として、ネットワークの階層性を加味して改善した指標 γ_j^* を用いるのがこのアルゴリズムの要点である。より効率良く復旧できるリンクが下流側に存在しているリンクについては $\gamma_j^* > \gamma_j$ となる。 γ_j から γ_j^* への変換手順の詳細は文献 15),17) に譲ることとし、Fig.2 のようなツリー型ネットワークを用いた例を示す。簡単のため、 h_j は各ノードに均等に 1 とした。24 本のリンクのうち 18 本が破壊しており、それぞれの修理に必要な時間がリンク上に数字で示されている。

最大勾配法と Horn のアルゴリズムを用いた場合の復旧順序を比較する。ノード番号と順序決定の基準値 γ_j および γ_j^* を復旧優先順に並べた結果を Table 1 に示す。ノード v_2 に着目すると、下流側に効率よく復旧できる作業 (v_3, v_4, v_{10} の連結) があるために基準値が増している ($\gamma_2 = 1/5 = 0.20 \rightarrow \gamma_2^* = 4/6 = 0.67$)。復旧順序はこのようなノードを優先する方向にシフトすることがわかる。

復旧順が定まると、復旧曲線は Fig.3 のような結果になる。中盤での復旧効率に大きく差がでていたため、最終的には平均復旧時間に 5.17 の違いが生じている。

さらに、同一のネットワークで被害率を 0.2, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 に変化させ、かつ各被害率において被害リンクの t_j をランダムに与えて 25 の被災パターンをつくり、平均復旧時間を比較したものが Fig.4 である。横軸は復旧完了時間 t_F 、縦軸は平均復旧時間 t_A で、○が Horn の

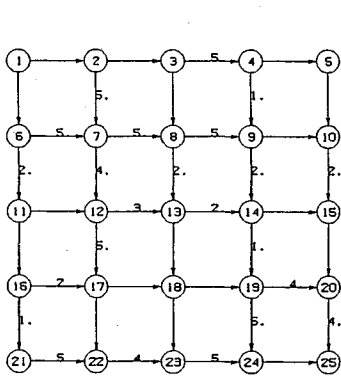
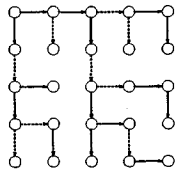
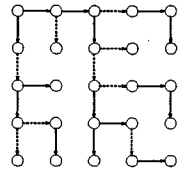


Fig. 5 Model of network (numbers on links denote time for repair t_j)



(a) Minimum spanning tree



(b) Shortest path tree

Fig. 6 Tree structures

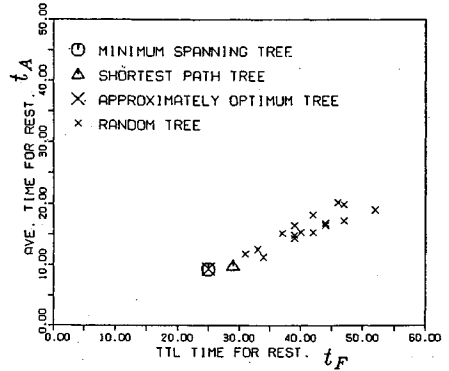


Fig. 7 Average time for restoration t_A by use of various tree structures

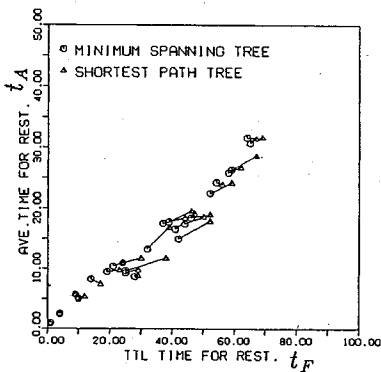


Fig. 8 Average time for restoration t_A (25 cases)

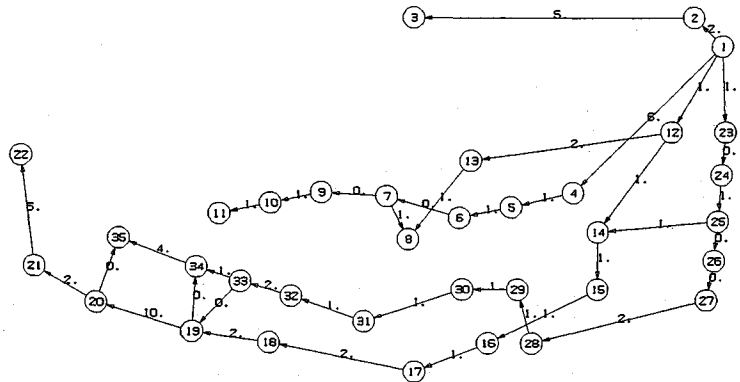


Fig. 9 Model of water distribution trunk line (numbers on links denote time for repair t_j)

Table 2 Comparison of average time for restoration t_A

	case A		case B	
	minimum spanning tree	shortest path tree	minimum spanning tree	shortest path tree
Horn's algorithm	5.64	5.92	16.38	17.04
maximum slope method	6.94	7.31	18.04	18.67

に重要な役割を果たす要素から順に修理する、などの方法で対処する必要がある(文献 3, 4, 5)など。

(6) 適用例

Fig. 9 は、ある市における一つの配水区の配水幹線網のモデルである ($\phi 600 - 1500mm$)。取水場から配水場(ノード 1)へ送水された水は、ここから直接、もしくは中継配水場(ノード 8, 19)を経由して需要ノードへ配水される。

ここでは、 $\phi 500mm$ 以上の枝管の分岐点を需要ノード

とした。リンク上の数値は、地盤種別・リンク延長等を考慮して算出した、相対的な被害数を示し、これを復旧所要時間として用いた。各ノードにおける需要家数については、次の 2 ケースを考えた。

- ケース A …… 供給区域内の広域避難所に住民が集中した場合(ノード 12, 17, 24, 27, 29, 34)
- ケース B …… 供給区域内の収容避難所へ住民が分散した場合(ノード 1 を除く全ノード)

広域避難所は、大地震時の延焼火災の際の大規模避難に

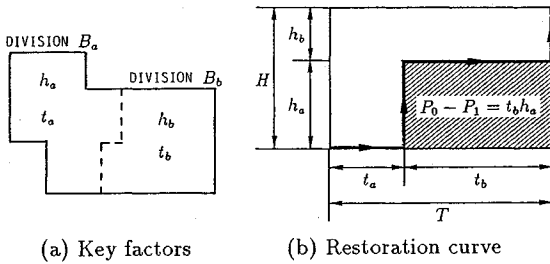


Fig.10 Schematic model of division of service area into two

Table 3 Comparison of total penalties (See Fig.10)

	total penalties
no division	$P_0 = (t_a + t_b)(h_a + h_b) = T \cdot H$
2 divisions	$P_1 = t_a h_a + (t_a + t_b) h_b$
difference	$P_0 - P_1 = t_b h_a > 0$

note : $0 < \alpha = \frac{h_b/t_b}{h_a/t_a} \leq 1$

適する場所で、数万人～数十万人の収容能力を持つ。また収容避難所は、応急的に給食を行えるような建築物で、収容人数は100人～1000人程度である。

Table 2に、両ケースの需要家分布に対する復旧結果を示す。いずれのケースも、最小木で復旧対象リンクを選出し、Hornのアルゴリズムで復旧順序を決定した場合に、平均復旧時間を最小化する復旧計画を策定することができるという結果になった。

4. 下位管路網の最適ブロック化方策

(1) 概説

供給施設の中で需要家に最も近い部分に位置する末端の供給管路網は、延長が極度に長距離であり、また小口径管が多用されるため、十分な力学的強度を付与することが困難である。そのためこれまでの震害では、地震時被害が末端の管路網に集中する傾向が顕著に現れている。

従って、復旧作業の進め方も上位の管路網のそれとは異なった形態となり、1.でもふれたように、広範囲のサービス区域を細分割することにより、被害地域を限定して影響波及を防止し、かつ復旧作業を効率化することが行われる。この部分では、復旧作業はブロックごとに集中的に進められ、各ブロック内の被害修理がすべて完了すると当ブロックへの供給が再開されて、ブロックの復旧とみなされる。このような事情を考慮して、4.ではブロック分割の決定法について考察する。

小林¹⁸⁾は、ライフライン地震防災対策の事前策としてのブロック化に注目し、各ブロックの被害量の期待値が均等化されるような分割において、エリア全体の被害量期待値が最小化される可能性を示唆した。

本研究では、事後対策としてのネットワーク・ブロック分割に着目し、特定の被害状態に対して式(1)を満足する最適ブロック分割法についての考察を行う。ここでは、3.(3)の前提条件を適用し、1つの復旧班が1ブロックずつ復旧を進め、全ブロックを巡回する(順次復旧)ものとする。またさらに、次の前提条件を加える。

- a) サービスの対象となる地域においてブロック分割可能な境界線があらかじめ与えられており、この境界線によって区別されている区画を最小区画 b_j とする。復旧のためのブロック B は、この最小区画のいくつかを統合して形成されるものとする。
- b) 最小区画 b_j 内の需要家数 h_j と、復旧に要する時間 t_j が与えられている。
- c) 上位施設の被害修理は完了しているものとする。従ってブロック間における復旧作業の先行関係がなく、どのブロックからでも復旧することが可能である。

(2) ブロック化方策の有効性

被害区域をブロック分割する場合、可能な限り細分割して復旧作業を進めると、平均復旧時間をより短縮できることを以下に示す。いま、Fig.10に示すように、2つのブロック B_a と B_b に分割可能な被災地域があり、それぞれの需要家数と、復旧に必要な時間が同図のように既知であり、 $h_a/t_a > h_b/t_b$ と仮定する。分割をせず一括して復旧を進めた場合と、2分割して復旧効率が良いブロック B_a から順次復旧を行った場合の総ペナルティー $P(= \text{平均復旧時間} \times \text{全需要家数} = t_a \cdot \sum h_j)$ を比較するとTable 3のようになる。表から、分割をおこなった方が平均復旧時間が短縮されることがわかる。分割を繰り返すことによって平均復旧時間をさらに短縮できるので、分割数は多いほど望ましいことになる。

ところが分割数をあまり増やすと、各ブロックにおいて供給遮断・供給再開の独立化を実現できなくなる。つまり、ブロック・バルブが設置されていなかったり、あったとしても地震時にバルブを適切に操作できない可能性が生じるので、現実には分割数は制限される。そこで、限られた分割数で平均復旧時間を可能な限り短縮するブロック化方策が必要となる。4.(3)ではこの点に関して検討する。

ここで、ブロック分割の実例を挙げておく。Fig.11(a)-(e)は、1978年宮城県沖地震における仙台¹⁹⁾、塩釜¹⁹⁾、および1983年日本海中部地震における能代²⁰⁾の各市のガス管路網のブロック分割において、各ブロックごとの被害率=被害件数/需要家数を小さい順に、即ち復旧効率の良い順に並べたもの(上段)と、被害件数と需要家数

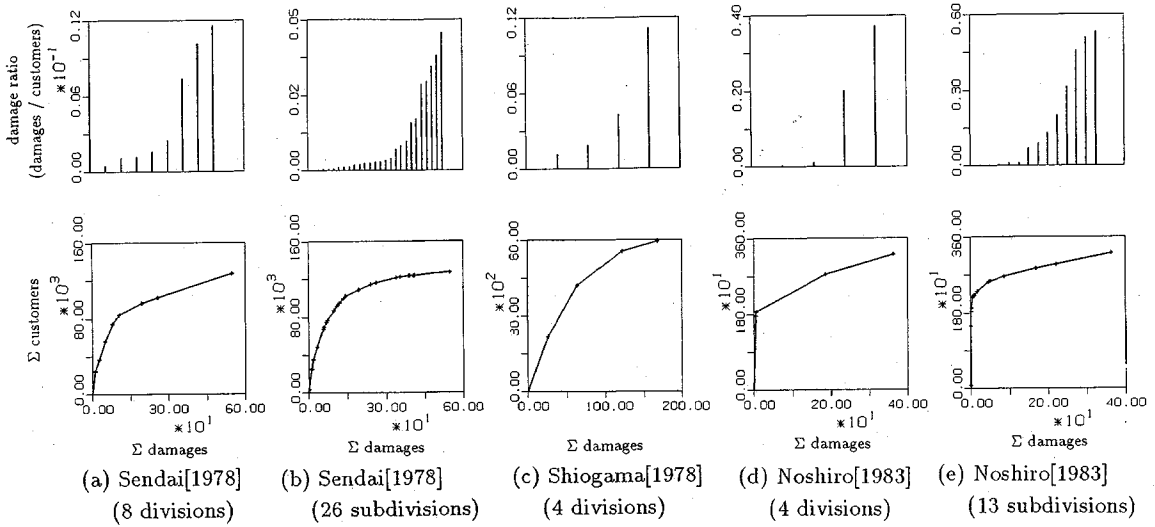


Fig.11 Division of gas distribution and service mains in 1978 Miyagiken-oki Earthquake and 1983 Nihonkai-chubu Earthquake (Damage ratio in each division [upper row] and cumulative form of damages vs. customers [lower row])

を上段と同じ順に累積値をとってプロットしたもの(下段)を示すものである。仙台、塩釜、能代の各市では、道路・鉄道・河川などの地勢的条件に基づいて、それぞれ8,4,4分割のブロック化が行われたが、仙台市と能代市では被害分布を勘案し、復旧効率化のためにさらに第2次ブロック化(セクター分割)が行われたので、それらの双方を示した。ブロックを細分化するほど、またブロック間において、被害率の格差が大きくなるように分割できるほど、累積被害件数 vs. 累積需要家数の曲線が、より上に凸の形状となり、復旧の効率化が図られることがわかる。

(3) 最適ブロック化のための定式化

Fig.10 と Table 3 においてブロック B_a とブロック B_b の境界を任意に定めることができる場合、平均復旧時間 t_a を最小化する分割方法を最適ブロック分割とする。 $t_a + t_b = T$, $h_a + h_b = H$, $P_0 = T \cdot H$ はいずれも一定であるから、 P_1 を最小化するためには、 $P_0 - P_1$ を最大化すればよい。

$$Y = P_0 - P_1 = t_b h_a \rightarrow \max \dots\dots\dots (4)$$

この式から、最適化の1つの条件は、 $h_a/t_a \gg h_b/t_b$, つまり分割すべき2ブロック間の復旧効率の格差が大となることであることがわかる。ところが、 h_a を増加すると必然的に t_a も増加し、 t_b が減少するので、バランスする最適点を探索する必要がある。そこで、

$$\alpha = \frac{h_b/t_b}{h_a/t_a} = \frac{t_a h_b}{t_b h_a} = \text{const}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \dots\dots\dots (5)$$

という条件を追加した場合に、どのような分割を行えば Y が最大化されるかを検討する。このとき、 $h_a = \frac{t_a H}{\alpha T + (1-\alpha)t_a}$ となり、 h_a は t_a の双曲線関数 ($0 \leq t_a \leq T$) となる。よって、

$$Y(t_a) = \frac{(T - t_a)t_a H}{\alpha T + (1-\alpha)t_a} \rightarrow \max \dots\dots\dots (6)$$

簡単な計算から、 $t_a : t_b = \sqrt{\alpha} : 1$ かつ $h_a : h_b = 1 : \sqrt{\alpha}$ のとき $Y \rightarrow \max$, すなわち、 $t_a h_a = t_b h_b$ のとき $P_1 \rightarrow \min$ となることが示される。

逆に、 $t_a h_a = t_b h_b$ という条件を付加した場合、 $Y = t_b h_a = \frac{H}{T}(t_a - T)^2$, ゆえに、 $h_a/t_a \rightarrow \infty$, $h_b/t_b \rightarrow 0$ の場合に $Y \rightarrow \max$ となる。

以上を総合すると、被災ネットワークの2ブロック分割においては、両ブロックにおいて

- [条件1] 復旧効率 h_j/t_j の格差を大きくする
 - [条件2] 復旧所要時間 × 需要家数 $t_j h_j$ を均等化する
- を満足すれば平均復旧時間を最小化することができる。3ブロック以上の分割が行われる場合にも、[条件1] と [条件2] と同様の条件を満足すれば最適ブロック化方策となる。

Fig.12 (a)-(c) は、 $\alpha = 1, 1/2, 1/3$ の場合の被害率分布を示し、Fig.12(d) に、累積被害件数・累積需要家数

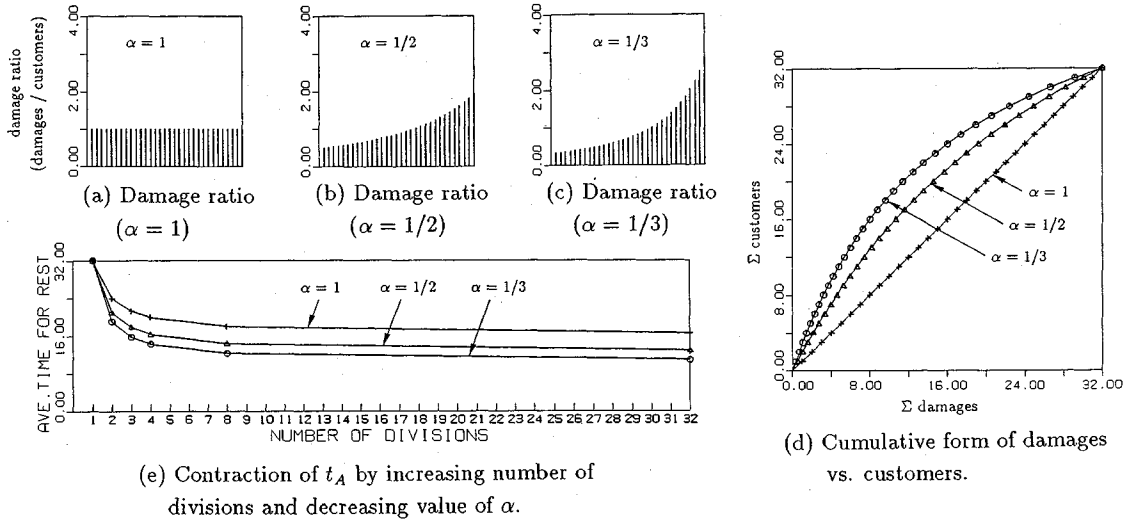


Fig.12 Effect of network division

の曲線を示す。上記のブロック分割法に従った場合のブロック分割数に対応する平均復旧時間を Fig.12(e) に示す。 α が小さく、ブロック分割数が多いほど、平均復旧時間が短縮されている。ただし、分割数が多くなるに従い、ブロック化の効果が徐々に低下することがわかる。

(4) 適用例

最適ブロック分割の手法を適用した例題を以下に示す。その手順は、まず各最小区画の復旧効率 h_j/t_j を求め、大きい順に並べかえる。これにより、分割境界をどこにとっても h/t の格差を常に最大に保つておくことができ、[条件 1] が満たされる。次に [条件 2] が満たされるように分割境界を定め、最小区画をグループ化して 1つのブロックとすれば、厳密ではないが最適解に近いブロック分割となる。

Fig.13(a) のような 16 の最小区画からなる地域を対象とする。各最小区画 b_j における需要家数 h_j と、復旧に必要な時間 t_j および復旧効率が Fig.13(b)-(d) のように与えられている。

ここでは、2ブロック化の場合を詳しく示す。Fig.14(a)-(c) はそれぞれ、 α 、 $t_a h_a$ と $t_b h_b$ 、および平均復旧時間 t_A である。横軸は区画番号を復旧効率の順番に並べたものであり、効率が一番良い区画 16 から横軸の特定の区画までをブロック B_a 、その他をブロック B_b とすることを示す。この場合、16 から 1 までの 8 区画がブロック B_a 、9 から 6 までがブロック B_b とすると、 $h_a t_a \approx h_b t_b$ となり、平均復旧時間が最短化されることがわかる。

2, 3, 4, 6, 8 ブロックに分割できる場合の最適分割の結果を、Fig.15(a)-(e) に示す。 n ブロックの分割では、Fig.14(c) の境界線を $(n-1)$ 本とする。効率が良い順

に復旧を行った場合の、ブロック分割数と平均復旧時間の関係を、Fig.16 の \circ で示す。最適分割では、隣接しない最小区画が同一ブロックに属するケースが生じている。そこで、同一ブロック内で最小区画が隔離しないという条件を満足するように、Fig.15(a)-(e) の最適ブロック分割および復旧効率 Fig.13(d) を判断材料として、手作業でブロックを再構成した例を Fig.15(f)-(j) に示す。この場合の分割数と平均復旧時間の関係を Fig.16 の $+$ で示す。最適分割に比べて平均復旧時間がやや増加するが、かなり良好な結果が得られている。

以上、4. で提案した最適ブロック分割は、ブロック毎の $t_j h_j$ の一様化、 h_j/t_j の差別化を図るものである。これまでの震害ではブロック化の基準として、「被害のひどい地域」と「被害の軽い地域」を分離するような方策が経験的に採用されてきた。本研究では単純化したモデルを用いることにより、このような経験的な判断基準の根拠を明示するとともに、より厳密な基準を提示することができたと考えている。

現実には、ブロック分割における制約条件はきわめて多い。例えば、最小区画相互の分断可能性・結合可能性、および構成されるブロックの独立化可能性を考慮する必要があり、それぞれ、結合リンク、ブロックバルブ、上位施設からの注入点の存在が必須となる。実際のシステムでのブロック化では、これらの点に十分に注意する必要がある。

5. 結語

本論文では、ライフライン・ネットワークの震後復旧過程の最適化に関する基礎的手法の検討を行い、復旧戦

1	2	3	4	10.0	15.0	20.0	25.0	1.0	3.0	3.0	1.0	10.0	5.0	6.7	25.0
5	6	7	8	20.0	25.0	30.0	35.0	3.0	5.0	5.0	3.0	6.7	6.0	6.0	11.7
9	10	11	12	30.0	35.0	40.0	45.0	3.0	5.0	5.0	3.0	10.0	7.0	8.0	15.0
13	14	15	16	40.0	45.0	50.0	55.0	1.0	3.0	3.0	1.0	40.0	15.0	16.7	55.0

(a) Division No. (b) Number of customers h_j ; (c) Time for restoration t_j ; (d) Efficiency of restoration h_j/t_j ;

Fig.13 Model of service area and minimum divisions

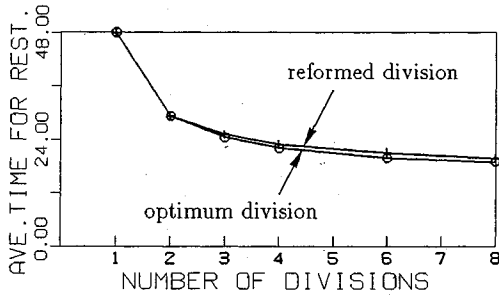


Fig.16 Contraction of t_A by network division

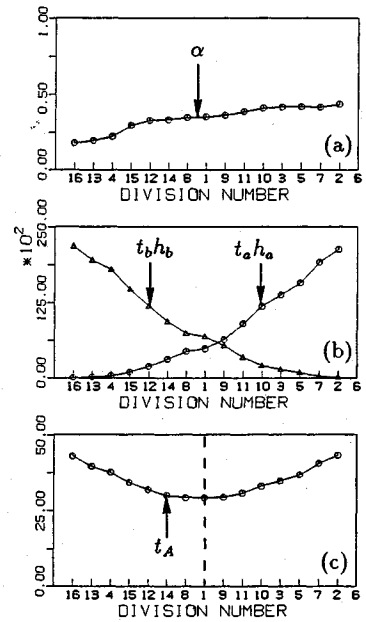


Fig.14 Criteria for division

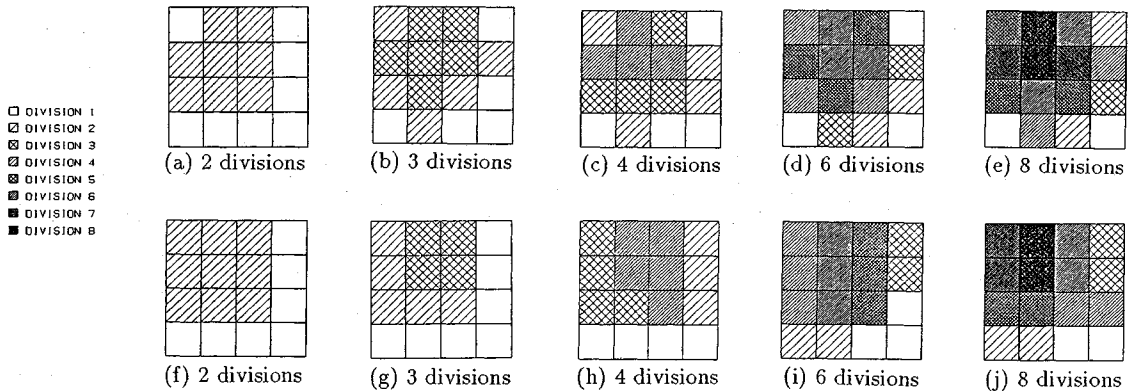


Fig.15 Optimum division (a)-(e) and reformed division (f)-(j)

略策定に有効に用いられると考えられる方法論を提示した。以下に本研究から得られた成果をまとめる。

- (1) ライフライン・ネットワーク・システムの震後復旧過程を表現する復旧曲線の数理モデルを示し、平均復旧時間の最短路をもつて最適とする復旧戦略のための定式化を行った。
- (2) 幹線供給網を対象とし、被害ネットワークの連結性早期回復を目的とする復旧戦略として、最小木、最短距離木、および近似的最適木の3つのツリー構造を用いる方法を提案した。比較的簡便に求めることができる最小木が、上記3構造のうち最も有用なツリー構造となる可能性が高いことがわかった。
- (3) 数理計画法のスケジューリング問題の一解法である、Hornのアルゴリズムを応用して、ツリー構造

を持つネットワークに含まれる被災要素の最適復旧順序を求める方法を提案した。

- (4) 末端の供給管網の復旧作業において、ブロック分割を実施することの有効性を示すとともに、需要家全体の平均復旧時間を最短路化する最適ブロック化方策に関する考察を行った。分割境界を定める際に、分割された各ブロックの復旧効率の格差が大きくなり、かつ復旧所要時間×需要家数が均等になるような分割が最適であることを示した。

なお本研究は、平成2年度文部省科学研究費補助金、総合研究A 課題番号 02302060 および奨励研究(特別研究員) 課題番号 02952168 の援助を受けて行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 能島暢呂・亀田弘行：ライフラインにおける地震防災システムの基本構造に関する考察，京都大学防災研究所年報，第32号B-2，pp.89-109，1989年4月。
- 2) 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，pp.45-54，1983年3月。
- 3) Kameda, H., Goto, H., and Kasuga, T.: System reliability and serviceability of water supply pipelines under seismic environment, Proc. of the 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, pp.491-498, Jul., 1984.
- 4) 東川直正・家村浩和・山田善一・伊津野和行：知識ベースに基づくライフライン網の復旧支援パソコンシステムの開発，第20回地震工学研究発表会講演概要集，pp.537-540，1989年7月。
- 5) Isoyama, R., Iwata, T. and Watanabe, T.: Optimization of post-earthquake restoration of city gas systems, Proc. of the Trilateral Seminar-Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, pp.3-17, Nov., 1985.
- 6) 関谷富彦・佐藤忠信・土岐憲三：震災ライフラインの復旧過程の最適化，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第1部，pp.1078-1079，1989年10月。
- 7) 平山克己・野田茂・小笠原貴之：中圧管ガス管路網の震後復旧作業における資源配分，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第1部，pp.440-441，1990年9月。
- 8) Ando, T., Noda, S., and Hamada, M.: Practical strategies for post-earthquake restoration of electric power systems, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VII, pp.159-164, Aug., 1988.
- 9) 野田茂・小川理宏：震後の機能特性を考慮した電気通信システムの復旧シミュレーション，第20回地震工学研究発表会講演概要集，pp.545-548，1989年7月。
- 10) 高田至郎・高谷富也・森岡利明：ライフラインネットワークの震後復旧支援システムについて，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.2，pp.2151-2156，1990年12月。
- 11) 山田善一・家村浩和・野田茂・伊津野和行：道路交通網の最適な震後復旧過程の評価，土木学会論文集，第368号I-5，pp.355-362，1986年4月。
- 12) 山田善一・野田茂・五十嵐晃：震後の道路交通の実用的な復旧予測シミュレーション，土木学会論文集，第392号I-9，pp.385-394，1988年4月。
- 13) 伊理正夫他：演習グラフ理論—基礎と応用—，コロナ社，1983年。
- 14) R.G. バサッカー・T.L. サーティー著，矢野健太郎・伊理正夫訳：グラフ理論とネットワーク/基礎と応用，培風館，1970年。
- 15) Mandl, C.: Applied Network Optimization, Academic Press, 1979.
- 16) 依田浩：実験計画法入門，朝倉書店，pp.69-100，1973年。
- 17) Horn, W.A.: Single-machine job sequencing with treelike precedence ordering and linear delay penalties, SIAM, J. Appl. Math., Vol.23, No.2, pp.189-202, Sep., 1972.
- 18) 小林正美：地震に対する都市ライフラインシステムのブロック化に関する基礎的研究—ガス，水道供給管路網のブロック化—，都市計画，別冊，昭和57年度第17回日本都市計画学会学術研究発表会論文集，pp.547-552，1982年11月。
- 19) 片山恒雄・増井由春・磯山龍二・基内郎：1978年宮城県沖地震による都市供給施設の被害と復旧—都市ガス施設—，生産研究31巻2号，pp.90-112，1979年2月。
- 20) 能代市：1983年5月26日 日本海中部地震 能代市の災害記録，1984年12月。

(1991年8月19日受付)

ON ALGORITHM FOR OPTIMUM POST-EARTHQUAKE RESTORATION OF HIERARCHICALLY SEPARATED LIFELINE NETWORKS

Nobuoto NOJIMA and Hiroyuki KAMEDA

Rapid recovery from earthquake damage is an important issue in lifeline earthquake engineering. This study presents effective procedures to optimize post-earthquake restoration processes of lifeline network systems. In this study, cumulative number of customers connected to supply nodes is used to indicate condition of recovery, and mean time for restoration of overall customers is adopted as a criterion of optimality. First, in order to make all demand nodes connected to supply nodes, the tree structure that covers all the nodes is identified from trunk lines among the original network. Recovery sequencing of damaged components included in the spanning tree is then determined by use of technique of operations research. Next, an easy method to determine optimal division plan of peripheral pipelines is proposed on the basis of the effectivity of restoration of each division. By use of this method, average time for restoration can be minimized with a given number of divisions.