

代替機能を考慮した自然災害時における道路網復旧優先順位設定方法に関する基礎的研究*

Study on Priority Level of Restoration in Road Network Based on Possibility of Using Roundabout after Natural Disaster

堀井 雅史**

Masafumi HORII

1. はじめに

台風、積雪などの自然災害は、道路交通に多大な被害をもたらす。それによる交通障害は、その地域の社会・経済活動に極めて長期的に広範囲な被害を与える。したがって、自然災害時に孤立地域を早期に解消し、救急活動や緊急援助物資輸送を可能にする代替路線の確保は必要不可欠である。このためには、被災した道路網のどの路線を緊急に復旧させればネットワーク全体の連結性、代替機能が維持できるかの道路網復旧システムの確立が急務となる。この代替機能の維持は、特に災害時において考慮しなければならない重要な評価項目であると考えられる。

このような背景の中、近年台風、積雪などの災害時における道路網評価を扱った研究例は増加しており、信頼性^{1),2),3)}、代替性^{4),5)}、交流圏域⁶⁾など様々な角度から検討が試みられ、有用な結果が得られている。しかしながら、道路網復旧計画あるいは復旧過程まで明示的に取り扱った研究例はあまり多くないようである^{7),8)}。また、実際の道路網復旧計画を策定する場合、意志決定者にとっては、より簡便な復旧優先順位設定方法の提供が重要であると考えられる。

著者は、計量地理学で用いられている「迂回度」指標を用いて、自然災害時における旅行時間の増加割合を表現し、道路網の代替機能を簡便に評価できる方法を示している⁹⁾。この研究では、迂回度指標の

基本的特性、あるいは災害時にどの程度代替機能が低下しているかについての結果のみであり、各々の被災リンク復旧による代替機能の回復の度合いについては言及していない。したがって、復旧優先順位を設定する道路網復旧計画に適用するにはさらに検討する余地を残している。

そこで本研究は上記の迂回度を用いて、代替機能に着目した自然災害時における道路網復旧優先順位の設定方法について検討を試みたものである。そしてこの方法を、実際の台風、積雪などの自然災害による通行規制に適用し、災害による交通障害を最小限にとどめ、地域間交通を確保するための実用的復旧システムの確立を目指す。

2. 復旧優先順位の設定方法

(1) 評価指標

道路網は、ある区間がなんらかの原因で遮断された場合、当初の時間と比較して、なるべく少ない時間的増分で迂回することが可能であるという代替機能を有している。したがって、災害時の道路網復旧計画においては、この機能を十分考慮したものでなければならない。

この代替機能、あるいはリンクを1つ削除したときのネットワーク特性についてはいくつかの研究がなされており、たとえば岡田・田中¹⁰⁾は経路構成重要度指数を用いて代替不能度からみた経路構成上の重要度を評価している。戸松・西井・津島¹¹⁾は、代替性と補完性から構成される密接関連性係数によってネットワークを評価し、街路整備によるネットワーク形成への影響を評価している。また堀井・武山・福田⁴⁾は大震災後の道路網に対して代替機能性指標と位置的重要度によって震災後の復旧優先順位に

*キーワード: 迂回度, 防災計画, 交通網評価, 代替機能

**正会員 工博 日本大学工学部土木工学科

(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

Tel.& Fax 0249-56-8711)

ついて検討を試みている。さらに南・高野・佐藤⁹⁾は経路代替性指数を用いて、冬期閉鎖区間が発生した場合と計画中的高規格道路が整備された場合の経路代替性がどのように変化するかを評価している。

代替機能の評価尺度としては、被災区間が発生した場合に

①なるべく少ない迂回時間の増加割合で目的地へ到達できる。

②代替経路が複数存在する。

などが考えられる。南らの研究⁹⁾では、この両者を考慮した経路代替性指数を提案している。しかしながら、この②については、代替経路を抽出する場合、重複区間を許すか否か、もし許すとする何区間までに限るか、あるいは制限しないかなど検討しなければならない問題が存在している。この代替経路数は重要な要素ではあるが、評価モデルの簡略化という観点から、本研究における代替機能の評価尺度としては、①を採用する。すなわち、被災区間が発生した場合に、どの程度の迂回時間の増加割合で目的地に到達できるかを示す評価指標を選定した。

本研究で用いる代替機能評価指標は、計量地理学で用いられている迂回度¹²⁾であり、ネットワーク内の任意の点の地位についての測度である。この指標は、次式によって算出できる。

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [d_{ij} - e_{ij}]^2 \quad (1)$$

ここで C_i は都市 i の迂回度を示し、 e_{ij} は都市 i, j 間の望ましいネットワークでの距離であり、また d_{ij} は都市 i, j 間の実際の距離である。 n は都市数を示す。したがって迂回度とは、各都市間の望ましいネットワーク上の距離と実際の距離との隔たりの大きさを示すことになる。(1)式は距離の差のみが対象であり、もとの距離に対してどの程度増加しているのかを表現できない。そこで(1)式を修正して

$$C_i^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [(d_{ij} - e_{ij})/e_{ij}]^2 \quad (2)$$

のように望ましいネットワークでの距離で基準化して、迂回距離の増加割合を表せる指標を提案する。

これを基準化迂回度と呼ぶことにする。なお、岡田らの経路構成重要度指数¹⁰⁾は、この基準化迂回度と同様な考え方で算出されるが、指標の定義の仕方により2乗していない点、および分母の基準化してい

る距離が本研究でいえば実際の距離 d_{ij} になっている点で異なる。

ここで、望ましいネットワークを何にするかが問題となるが、災害復旧時には早急に平常時の道路ネットワークに戻ることが先決と考えると、平常時の道路ネットワークと考えるのが妥当である。そこで、災害後における被災区間の優先順位定式化に当たっては、災害時の道路ネットワークに対して、被災区間を1つずつ復旧させたときの平常時道路ネットワークとの隔たりを示す迂回度が定義できればよい。いま被災区間 m を復旧させたときの都市 i, j 間の最短距離を $d_{ij}^{(m)}$ とすれば、被災区間を1つだけ復旧させたときの基準化迂回度は次式で示される。

$$C_i^{*(m)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [(d_{ij}^{(m)} - e_{ij})/e_{ij}]^2 \quad (3)$$

これを復旧基準化迂回度と呼ぶことにする。この復旧基準化迂回度は、対象とする都市において、被災時には長時間の迂回を強いられていたのが、各被災区間を復旧させることによって、時間的にどの程度代替機能が回復するかの度合いを示していると考えられる。したがって、この結果は復旧優先順位を設定する際に、有用な情報を提供できると考えられる。なお、この復旧基準化迂回度を用いて各被災区間の代替機能回復について言及している点が本研究の特徴である。

(2) 復旧優先順位定式化

本研究での復旧優先順位の定式化は、連結性の確保、代替機能の確保の2段階に分けて行う。代替機能は(1)での定義によると、連結していることが条件であるため、まさに連結性の指標である。しかしながら、迂回できるのと、全く迂回できないのとは根本的に異なるので、本研究においては敢えて、①迂回できるか、②どの程度の迂回時間増分で目的地へ行けるかの2段階で評価を試みることにする。この設定プロセスを図-1に示す。

(a) 連結性の確保

まず、連結性確保の観点からの順位設定を行う。前述の基準化迂回度(ここでは実時間基準化迂回度と呼ぶことにする⁹⁾)を用いて、被災リンクによって孤立する都市が発生するか否かの検討を行う。も

し、孤立都市があればこの実時間基準化迂回度は算出できない。そこで、この都市に接続する被災リンクのうちで、復旧基準化迂回度が最小なものの復旧優先順位を1位とし、まず復旧させる。

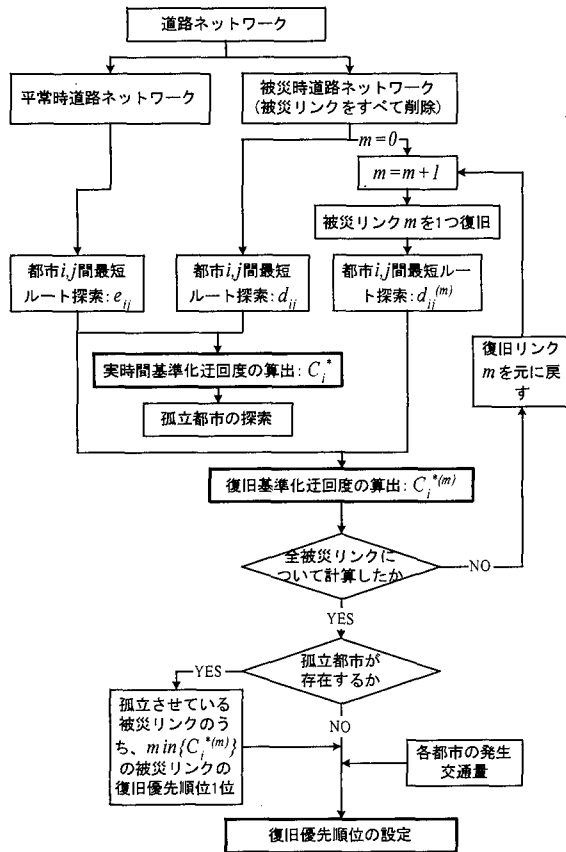


図-1 復旧優先順位設定プロセス

(b) 代替機能の確保

つぎに、残りの被災リンクに対しての順位付けを行う。復旧優先順位の評価指標は上記の復旧基準化迂回度の単純平均値、あるいは各都市の発生交通量による加重平均値が考えられる。それぞれの算出式は次式のとおりである。

$$C^{*(m)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i^{*(m)} \quad (4)$$

$$C^{*(m)} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n C_i^{*(m)} G_i \quad (5)$$

ここで、 T は総交通量、 G_i は都市 i の発生交通量を示す。この値が小さいほど、対象都市全体に対して災害時の道路ネットワーク状態から平常時道路ネットワークへ、より近づくことを示し、その被災リンク

の復旧効果は大きいといえる。したがって、指標値の小さな順に復旧優先順位を設定すればよい。

このために、対象とする道路網に対して、最短経路探索法を用いて各都市間の最短距離を算出する。つぎに実際に被災している道路区間をすべて削除し、被災区間を1つずつ復旧させたときの最短経路を探索して値を求め、復旧基準化迂回度を算出する。さらに復旧させた被災リンクを元に戻し、同様の計算をすべての被災リンクについて繰り返す。なお、最短経路探索は時間距離で行っている。

本研究での評価方法では被災後のネットワークにおいて、1つの被災リンクを復旧させた場合の代替機能の回復度合いを基準としている。実際には、複数の被災リンクを同時に復旧することになり、その機能回復は相乗効果が発生すると考えられる。しかしながら、同時に復旧させる被災リンクを複数設定するとその組み合わせは膨大なものとなり、簡便な評価方法とはいえなくなる可能性が生じる。したがって、本研究では個々の被災リンクの純粋な復旧効果を第1の評価基準とし、これによって優先順位の高いリンクの復旧作業にまず着手する。同時に作業のしやすい付近の他の被災リンクを復旧させるなどの便宜措置を講ずる。このようにすると、代替機能を考慮した現実的な復旧プロセスが実現されるものとする。

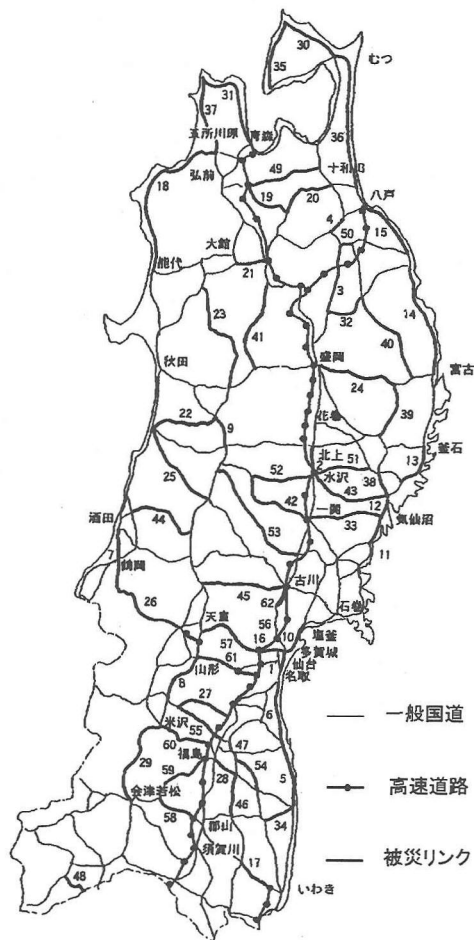
3. 自然災害時の道路網復旧優先順位の設定例

(1) 対象道路網および自然災害データ

本設定方法を東北地方の自然災害時の道路網復旧過程に適用する。

対象道路網は東北地方の国道、東北自動車道、常磐自動車道とし、ノード数220で一般国道306リンク、高速道路49リンクの合計355リンクから構成されている(図-2)。対象都市は昭和60年3月現在において人口5万人以上の33都市とした。道路交通に関するデータは、平成2年度の道路交通センサス^{13),14)}より抽出した。

また自然災害データは、東北地方で昭和60年から平成元年の5年間に発生した自然災害による道路の通行規制に関する資料¹⁵⁾を用いて、この中の全面通行止め150件とした。これを対象道路網に当ては



(図中の数字は被災リンク番号)

図-2 対象道路網と被災リンク

めると 62 の被災リンクとなる(図-2 に併記)。図-3 に全面通行止めデータの内訳を示す。

これによると、まず規制原因では土砂崩落による全面通行止めが最も多く、ついで路面冠水、積雪・雪崩となっている。県別では山形県が最も多く、岩手県、青森県の順である。両者の関係では、青森県においては土砂崩落による全面通行止めの件数が多く、岩手県では路面冠水による全面通行止めが多くなっている。また宮城県においては路面冠水による全面通行止めが多い。秋田県では土砂崩落によるものが、山形県においては積雪・雪崩による全面通行止めが多く発生している。福島県では豪雨による事前通行止めがほとんど全面通行止めであり、最も多くなっている。

なお、ここで設定している 62 の被災リンクは過

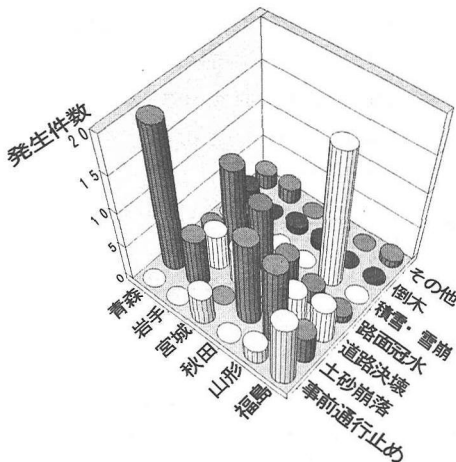


図-3 県別通行規制原因ごとの全面通行止め発生件数

去 5 年間に東北地方で発生した自然災害による通行規制データであるから同時に発生することはない。しかしながら、内訳を見ると、全体の約 60%が複数回規制されていること、5 年間に 10 回以上規制されているリンクが複数存在することを勘案すると、自然災害による被害を受けやすいリンク群であると考えられる。したがって、このような状況は再現される可能性が高いものと考え、今回の被災リンク設定とした。この結果は、今後発生するであろう東北地方の自然災害に対する事前の道路防災計画策定への情報提供と位置づけられよう。

(2) 復旧基準化迂回度の特徴

ここでは、自然災害による通行規制が発生した場合に、各被災区間を復旧させると東北地方の各都市間の代替機能がどの程度回復するかについて前述の復旧基準化迂回度を用いて検討を行った。

まず被災リンクをすべて削除した場合の実時間基準化迂回度を算出した。図-4 にその結果を示す。ここで、気仙沼市は周辺のリンクがすべて被災リンクとなっており、実時間基準化迂回度が無限大となる。このことは今回のような災害が発生すると孤立することを意味しており、連結性が確保できないことになる。したがって、これらの被災リンクの復旧優先順位は高くなる。これについては後述する。

つぎに復旧基準化迂回度は 33 都市について 62 の被災リンクごとに算出される。ここではその特徴を示すために、図-4 において実時間基準化迂回度が

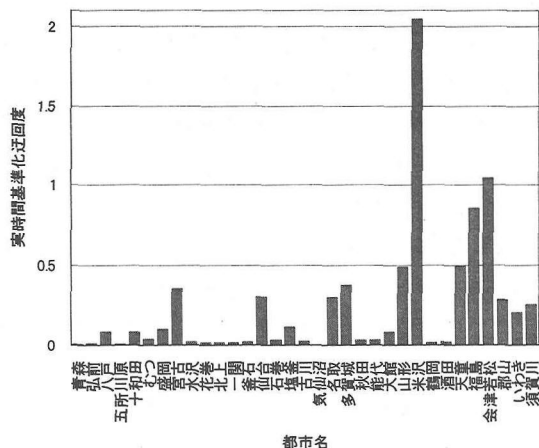


図-4 実時間標準化迂回度

最も大きい米沢市についての結果を図-5 に示す。図中で、左側から被災リンク 1 を復旧させたときの復旧標準化迂回度、以下被災リンク 2 を復旧させたときの復旧標準化迂回度と続く。この図から、どの被災リンクを復旧させたときに平常時の道路ネットワークとの隔たりが減少するかが検討できる。すなわち、どの被災リンクの復旧効果が大きいかを把握できることになる。

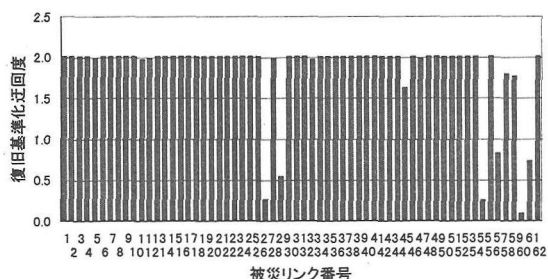


図-5 各被災リンクについての復旧標準化迂回度 (米沢市)

被災リンクをすべて削除したときの米沢市の実時間標準化迂回度は、2.05 であるので、ほとんどの被災リンクでは復旧標準化迂回度が変化しない。しかしながら、被災リンク 27、29、55、60 を復旧させることによって米沢市の復旧標準化迂回度は大幅に低下することがわかる。したがって、米沢市の実時間標準化迂回度を大きくしているのはごく限られた被災リンクであるといえる。

図-6 には同様に会津若松市の復旧標準化迂回度の計算結果を示す。米沢市と同様にごく少数の被災リンクを復旧させることによって通行規制時の道路

ネットワークと平常時のネットワークとの隔たりを減少させることが可能となる。

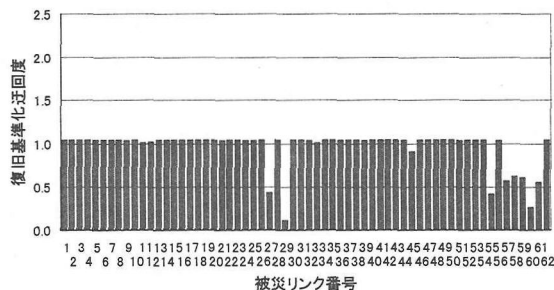


図-6 各被災リンクについての復旧標準化迂回度 (会津若松市)

図-7 は、米沢市、会津若松市において復旧効果の高い被災リンク 60 に関する各都市別の復旧標準化迂回度を示したものである。この図と図-4 とを比較することによって、当該被災リンクの復旧が、どの都市への代替機能回復へ貢献できるかがわかる。換言すると、各被災リンクの復旧による効果がどの程度の範囲まで及ぶかについて明確に知ることができる。

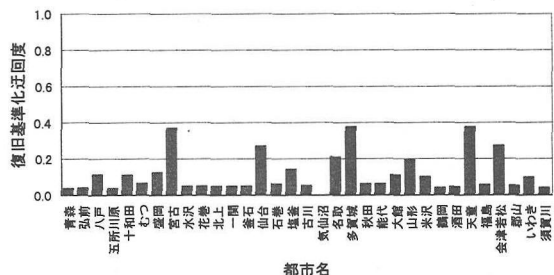


図-7 被災リンク60に関する各都市別復旧標準化迂回度

このように復旧標準化迂回度の結果より、災害時に各都市においてどの被災リンクを早急に復旧させればその他の都市との代替機能を回復させることができるかの検討が可能となる。また、視点を変えれば、各被災リンクの復旧がどの程度の範囲まで影響を及ぼしているかについても把握できる。

(3) 被災リンクの復旧優先順位の設定

つぎに復旧標準化迂回度を用いて、対象道路ネットワーク全体における連結性、代替機能確保の点から被災リンクの復旧優先順位設定について検討を行った。

(a) 連結性の確保

まず気仙沼は前述のとおり、周辺の道路がすべて

被災リンクとなっているため、連結性が確保できない。したがって、孤立地点解消の観点からこの都市にアクセスする被災リンクの復旧優先順位を上位にする。具体的には、3つの被災リンク 11、12、33の復旧基準化迂回度はそれぞれ 0.178、0.481、0.140であるので、まず値の最も小さな被災リンク 33の復旧優先順位を第1位とし、復旧させる。

なお、1本のみの復旧では、交通量がこのリンクに集中してしまい、連結性が確保できなくなる恐れがある。これに対処するためには、災害後の交通流変動を考慮した評価システムの構築が必要となる。また代替経路を何本まで確保するかという問題とも関連してくる。これらを考慮することは当然演算時間の増加につながるので、本研究では簡便な手法の提供という観点に立ち、まず少なくとも1本の迂回路を確保し、その後代替機能回復の大きな順に復旧優先順位付けを行うものとし、ここでは1本のみとした。これらについては、今後検討する必要がある。

(b)代替機能の確保

つぎに残りの 61の被災リンクの復旧優先順位を決定する。評価指標は、対象都市全体の公平性あるいはシビルミニマムの立場を重視すれば復旧基準化迂回度の単純平均値を採用すればよい。効率性、あるいは都市間の結びつきの強さを評価結果に反映さ

重平均値を用いればよい。

図-8は、復旧基準化迂回度の単純平均値と加重平均値との関係を示す。これによると、ほぼ 45°の直線上に乗っているが、発生交通量で重みをつけると復旧優先順位が低下するリンクと上昇するリンクが見られる。前者は、発生交通量が大きい都市での復旧基準化迂回度が大きいと考えられ、後者はその逆であるといえる。どちらの指標を採用するかは、道路管理者が決定すれば良いと考える。どちらの指標を採用しても、対象都市全体の代替機能をより向上させる被災リンクの復旧が可能であると考えられる。

4.まとめ

本研究は、自然災害時における道路網の復旧優先順位の設定方法として迂回度を用いて検討を行ったものである。以下に得られた成果を示す。

- 1)復旧基準化迂回度を用いることにより、自然災害による個々の被災リンクの復旧が、対象とする各都市に対してどの程度代替機能を向上させるかについて明確に示した。
- 2)連結性が確保できない際にどの被災リンクから復旧させるべきかを考える場合、復旧基準化迂回度を用いれば、連結性を確保しつつ、最も復旧効果の高い優先順位の設定が可能であることを示した。
- 3)復旧優先順位の評価指標に復旧基準化迂回度の平均値を用いることによって、対象都市全体の代替機能を向上させる復旧優先順位の設定が可能となった。

今回は自然災害による道路の通行規制データとして、5年間のデータを用いて検討を行った。対象とした被災リンクは今後も東北地方において発生する可能性を有しているものと考えられる。したがって、新たに自然災害による道路の通行規制が実施された場合には、今回の分析結果が、ある程度の事前情報を提供できるものと考えられる。

また、構成ネットワークの規模については、災害の種類によると考えられる。たとえば台風による風水害や豪雪時には広範囲での道路災害が発生する恐れがある。このような場合は、都市間交流を確保する上でも今回対象とした東北地方の道路によってネ

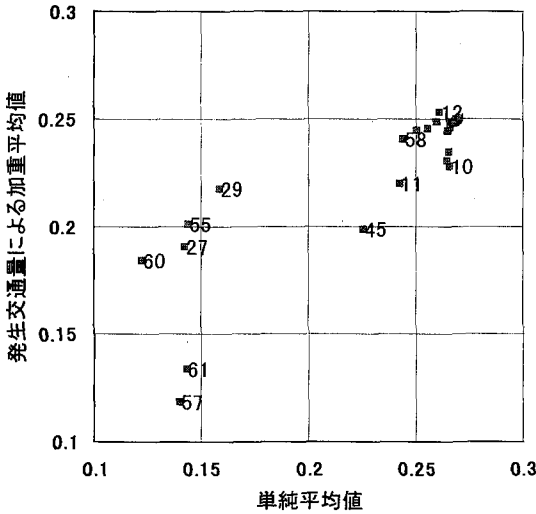


図-8 復旧基準化迂回度の平均値
(図中の数字は被災リンク番号を示す)

せる場合には、各都市の発生交通量を重みとする加

ットワークを構成する必要がある。また、局地的な災害においては、より狭い範囲、たとえば県レベルあるいは市レベルのネットワークを構成し、これに対する迂回度指標の算出および復旧優先順位の設定の手順を踏めばよい。ただし、市町村道まで含むとなるとこれに対するデータが必要となってくる。道路交通データが収集できれば、本研究で示した復旧優先順位設定方法が適用可能である。

いずれの場合でも、個々の災害に対する計算と復旧優先順位の検討が必要になる。これによって実際の災害復旧において重要な情報を提供できるものと考えられる。

今後の課題としては、OD 交通量を復旧基準化迂回度の算出に積極的に導入した検討結果についての考察が重要である。さらに今回は全面通行止めを対象として評価を試みたが、その他の通行規制の取り扱いかた、あるいは規制内容を指標にどう表現していくかについても課題である。

本設定方法は自然災害後の道路網の復旧優先順位を意志決定者に簡便な方法で提供できることを重点に検討を行ってきたが、災害時には迂回行動など、交通流が変動することも考慮しなければならない。また、代替経路数を複数設定した場合の検討も必要である。これらについては今後検討して行く予定である。

最後に資料を提供していただいた関係機関の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高山純一:異常気象時における道路網の連結性能評価法, 土木計画学研究・講演集, No.12, pp.559 ~ 565, 1989.
- 2) 若林拓史, 亀田弘行:ロマ・ブリエタ地震後のサンフランシスコ湾岸地域の道路網運用の効果分析と災害時の道路網計画, 都市計画論文集, No.30, pp.91 ~ 96, 1995.
- 3) 朝倉康夫, 柏谷増男, 為広哲也:災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル, 土木計画学研究・論文集 12, pp.475 ~ 484, 1995.
- 4) 堀井雅史, 武山泰, 福田正:大震災後の道路ネットワーク復旧システムに関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.15(1), pp.767 ~ 774, 1992.
- 5) 南正昭, 高野伸栄, 佐藤馨一:道路網における代替ルートの整備水準の一評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.530/N-30, pp.67 ~ 77, 1996.
- 6) 嶋田喜昭, 加藤哲男, 本多義明:自然災害を考慮した道路網評価に関する基礎的考察, 都市計画論文集, No.30, pp.97 ~ 102, 1995.
- 7) 小林正美:サービスネットワークシステムの修復計画支援システムの開発に関する研究, 第 22 回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.577 ~ 582, 1987.
- 8) 米谷英剛・梶秀樹:ネットワークの最大流にもとづく震災後の道路復旧プログラム評価モデルの開発, 第 23 回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.463 ~ 468, 1988.
- 9) 堀井雅史:迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法, 都市計画論文集, 31 巻, pp.769 ~ 774, 1996.
- 10) 岡田憲夫, 田中成尚:ネットワーク特性を考慮した機能水準の計量指標化に関する研究, 土木学会論文集, 第 389 号, pp.65 ~ 74, 1988.
- 11) 戸松稔, 西井和夫, 津島康弘:密接関連性に着目した街路整備によるネットワーク形成に関する定量的評価分析, 土木学会論文集, NO.494/N-24, pp.87 ~ 95, 1994.
- 12) 奥野隆史:計量地理学の基礎, 大明堂, 1977.
- 13) 東北地方建設局:平成 2 年度全国道路交通情勢調査一般交通量調査報告書, 1991.
- 14) 東北地方建設局:平成 2 年度全国道路交通情勢調査東北地方 OD 調査集計表, 1991.
- 15) 東北地方建設局:道路規制状況(昭和 60 ~ 平成元年).

代替機能を考慮した自然災害時における道路網復旧優先順位設定方法に関する基礎的研究

堀井 雅史

本研究では計量地理学で用いられている迂回度を用いて、代替機能に着目した自然災害時におけ

る道路網復旧優先順位の設定方法について検討を試み、災害による交通障害を最小限にとどめるための復旧システムの確立を目的としたものである。その結果、復旧基準化迂回度を用いることにより、自然災害による個々の被災リンクの復旧が、対象とする各都市に対して、どの程度代替機能を向上させるかについて明確に示した。また、復旧優先順位の評価指標に復旧基準化迂回度の平均値を用いることによって、対象都市全体の代替機能を向上させうる復旧優先順位の設定が可能となった。

Study on Priority Level of Restoration in Road Network Based on Possibility of Using Roundabout after Natural Disaster

Masafumi HORII

Paralyzation of traffic after natural disaster causes confusion in civic life. Therefore, it is necessary to establish the functional restoration system of road networks after the natural disaster. In this paper, the author proposed the practical method on priority level of restoration system of the road network after the natural disaster taking the possibility of using roundabout into consideration. Furthermore, we applied this system to data on road traffic closure in the Tohoku District and examined the efficiency of the system.
