

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

Study on Resdoration System of Road Network after Earthquake Disaster

堀井 雅史*・武山 泰**・福田 正***

By Masafumi HORII, Yasushi TAKEYAMA and Tadashi FUKUDA

In case of a devastating earthquake, palalyzation of traffic causes cofusion in civic activities. Therefore, it is important to establish a functinal restoration system of road network after earthquake disaster. In this paper, we proposed the restoration system of the road network after earthquake damage taking the network characteristics of traffic into consideration. Furthermore, we applied this system to the Miyagiken-oki Earthquake and examined the efficiency of the system.

1. はじめに

ライフラインの耐震性あるいは信頼性については多くの研究がなされ、その復旧過程についていくつかの研究例がみられる^{1) 2)}。しかしながら、道路ネットワークに関する震災後の復旧過程についての研究例は少なく^{3) 4)}、また実際の復旧過程との対比について論じているものは見られない。そこで本研究は、ネットワーク理論を用いて、大震災後の道路ネットワーク復旧システムの確立を目指すものである。このために、当該リンクが地震によって通行止めになった場合に交通混雑による損失時間を考慮した旅行時間がどの程度増加するかを示す代替機能性指標

およびネットワーク内の各リンクの位置的重要度に関する指標を作成し、これによって震災後の道路ネットワーク復旧過程の定式化を試みた。これらの指標を用いることにより、単に点あるいは線の復旧過程にとどまらずネットワーク全体からみた最適な復旧システムを確立できると考えられる。さらに過去の復旧過程の資料をもとに、実際の復旧過程の特徴並びに合理的な復旧システムについて検討を行った。

2. 地震復旧過程の定式化

大震災後の道路ネットワークの復旧過程において要求される機能は、一般に連結性→確実性→大量性→安全性のように変化する⁵⁾。すなわち、まず孤立地点の解消に務め、ついである程度の旅行時間で確実に目的地に到達できるように道路を確保し、さらに大量に交通を処理できるようにし、最後に通常と同様な安全性が確保されるように復旧を行う。したがって道路ネットワークの大震災後の復旧過程の定

キーワード:地震復旧過程、道路網評価、ネットワーク理論
* 正会員 工博 日本大学講師 工学部土木工学科 (〒963 郡山市田村町徳定字中河原1)
** 正会員 工博 東北大学助手 工学部土木工学科
***正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

式化は以上に示した機能を十分考慮した優先順位の与え方が必要である。

(1) 評価指標

本研究で用いる評価手法は著者らが行った研究⁶⁾をさらに改良したものである。すなわち前の研究では道路ネットワークの有する代替機能を迂回路の交通処理能力および迂回することによる旅行時間の増加割合で評価しようとしたが、両者は互いに独立ではないため両者を結合し、交通混雑による損失時間を考慮した時間的代替機能性と今回新たにネットワーク上の位置的重要度を加えた指標によって大震災後の復旧過程の定式化を試みた。

まず、代替機能性指標について検討する。地震によってリンクが通行止めになった場合、道路ネットワークは他のリンクを使用することによって迂回をし、目的値に到達できるネットワーク特性を有している。したがって、当該リンクが地震で通行不能となった場合、いかに短い旅行時間で迂回できるかがネットワーク特性の一つの評価尺度となる。その際、当該リンクの交通量が多く、迂回路の交通容量が小さければ当然混雑度は大きくなり、その分迂回時間が増大することも考慮しなければならない。そこでこの代替機能、特に時間的代替機能性を評価できる指標を提案する。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、有用な結果が得られているが⁹⁾ ¹⁰⁾ ¹¹⁾、本研究では交通混雑を考慮したflow-dependentな流れとして代替機能性を算出しているところに特徴がある。

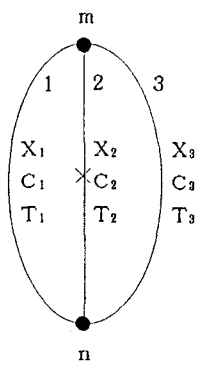


図-1 仮想ネットワーク

いま、図-1に示すような2つのノードm、n間に3本のリンク1、2、3があるネットワークを考える。ここで

- X_i : リンク i の交通量
- C_i : リンク i の交通容量
- T_i : リンク i の旅行時間

を示している。

もしリンク2が地震で通行不能となった場合、運転者は迂回することを考え、最短の経路を選択するであろう。最短経路がリンク1の場合、リンク2の交通量 X_2 はリンク1に流入するので、リンク2の迂回路であるリンク1の交通量は X_1 から $X_1 + X_2$ に増加する。いまリンク1のリンクパフォーマンス関数が図-2のように線形式で与えられたとすると、交通量が X_1 から $X_1 + X_2$ に増加することによって単位距離当たりの旅行時間は t_1 から t_2 に増加し、この差 Δt は迂回路の混雑度が増加することによる損失

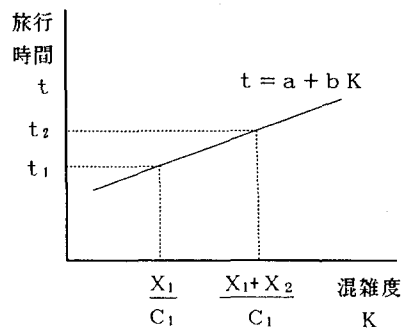


図-2 リンクパフォーマンス関数
時間である。この Δt は、リンク1のリンクパフォーマンス関数の傾きを b_1 とすると

$$\Delta t = b_1 * (X_2 / C_1) \quad \dots \quad (1)$$

で与えられる。

したがってリンク2に対しての時間的代替機能性指標は、(2)式で表される。

$$\begin{aligned} TH_2 &= T_2 / (T_1 + \Delta t * L_1) \\ &= T_2 / (T_1 + b_1 * (X_2 / C_1) * L_1) \end{aligned} \quad \dots \quad (2)$$

ここで L_1 はリンク1の区間長を示す。

この指標は0から1までの値を取り、値が小さくなるほど迂回時間が増大し、1に近いほど迂回時間は増加しないことを示し、当初の旅行時間で目的値に到達できることを示す。この点においては、前述の復旧過程に要求される確実性を代替機能面から評価できると考えられる(実際にはそのリンクよりも迂回路の方が旅行時間が短い場合があるが、この場合は1とおく)。

以上の指標は、時間的確実性の観点から評価を行うおうとするものであるが、道路ネットワークの持つ

代替機能を発揮するためにネットワーク内の各リンクが位置的にどの程度重要度を有しているかを評価できる指標の作成を行った。これは、あるリンクの最短経路探索の際、経路として採用された場合に回数を1として記憶しておく。これをすべてリンクについて行い、回数を累加して行けばこの利用回数、すなわち位置的重要度が大きいリンクほど、各リンクの最短経路に採用される可能性が高いことがわかり、ネットワーク内での重要な位置を占めていると判断される。リンクkの位置的重要度指標 IP_k は、各リンクの最短迂回路のみに関するパス行列を P_{ik} とすると

$$IP_k = \sum_{i=1}^N P_{ik} \quad \dots \quad (3)$$

により定式化できる。

ここで

$P_{ik} = 1$: リンクiが通行不能となった場合の最短迂回路にリンクkが含まれる場合
 $= 0$: その他の場合

である。この指標によれば災害復旧活動のための資材運搬路線確保に関する有用な情報を提供できると考えられる。

(2) 復旧過程の定式化

復旧過程の定式化については、上記で得られるネットワーク指標を基に設定する。図-3のようなネットワークに対して地震により×で示すリンクが通行不能になったとする。この時の被災リンクの復旧優先順位は以下のようにして決定する。

- 1) 被災前のネットワークの全リンクについて時間的代替機能性指標、位置的重要度指標を計算する。
- 2) 上記の2つの指標に関してネットワーク全体の合計値を算出する。この値が平常時ネットワークの時間的代替機能性と潜在的位的重要度を示す。

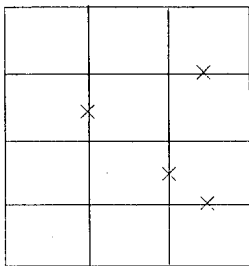


図-3 被災ネットワークの種類に応じた規制

- 3) 被災リンクを被災状況に合わせて規制を行う。本研究では地震による交通規制として、①通行止め、②片側通行規制、③大型車規制、④徐行の4種類とし、こ

を加えることとした。

4) このネットワークに対して2指標を計算し、1)との差が地震によって受けた被害量となる。

5) 復旧リンクの優先順位の与え方として

a) 連結性の確保からの優先順位

4)の分析の中で当該リンクが切断された場合の迂回路が存在しないリンクがあれば、これらの迂回路となる被災リンクの優先順位は第一位となる。

b) 确实性の確保からの優先順位

優先順位第一位の被災リンクを復旧させた後、残りの被災リンクを1つずつ復旧させたときのネットワーク全体の時間的代替機能性が最も向上するリンクから復旧させる。

とする。

a)については、震災後は交通が異常事態に陥っているため、交通マヒが発生しやすく、この場合はこれらのリンクの連結性が著しく低下すると考えられるためである。b)については、連結性がある程度確保されると、ある範囲内の旅行時間で確実に目的地に到達できるような道路ネットワークの復旧が要求されるため、ネットワーク全体の時間的代替機能

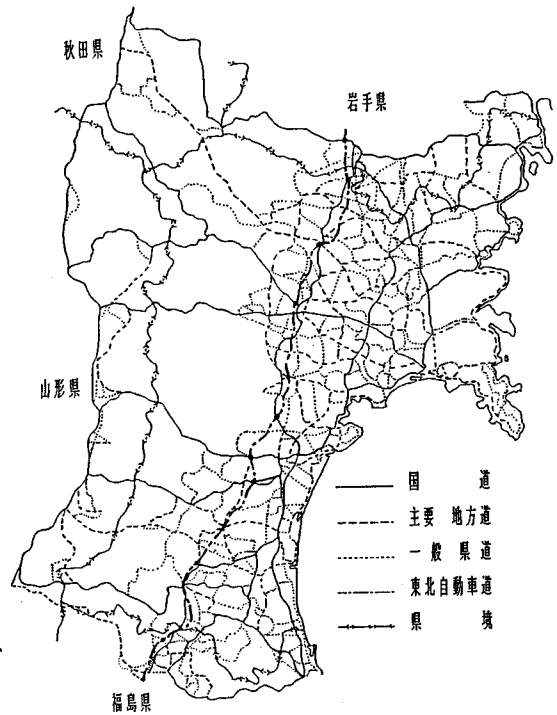


図-4 対象道路ネットワーク

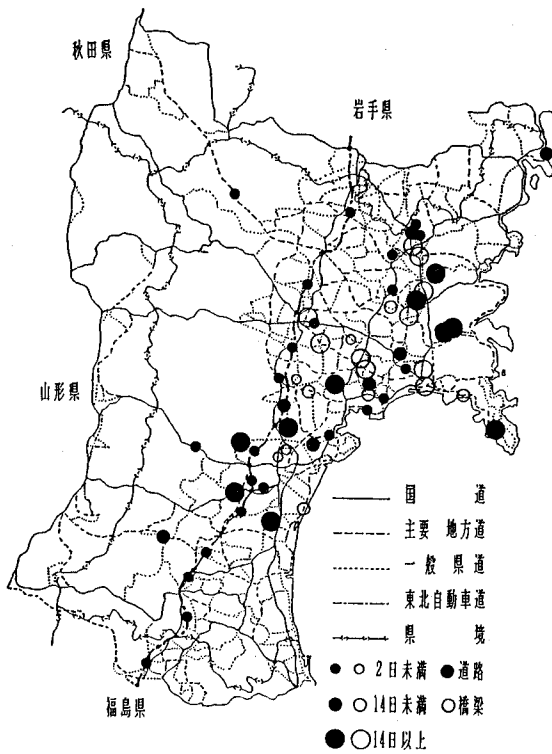


図-5 通行規制箇所の分布

性能が最も向上するリンクから優先的に復旧させることによって確実性の確保が可能になると考えられる。

6) 実際のネットワークの復旧過程と比較して有効性を検討する。

3. 宮城県沖地震への適用

本復旧システムを宮城県沖地震時の道路復旧過程に適用し、その妥当性について検討を行った。対象道路ネットワークは宮城県の一般県道以上とし、一部隣県の道路を含むノード数397、リンク数697のネットワークを構成した(図-4)。道路・交通条件については昭和55年度道路交通センサスのデータ¹²⁾を使用し、道路・橋梁の交通規制状況については土木学会東北支部¹³⁾、建設省東北地方建設局¹⁴⁾、宮城県¹⁵⁾¹⁶⁾および仙台市¹⁷⁾の地震報告書より対象ネットワークについて整理した。なお、データの制約上対象道路は無向ネットワークとして扱っている。

図-5には対象ネットワークの道路と橋梁についての当時の通行規制状況について示す。なお宮城県

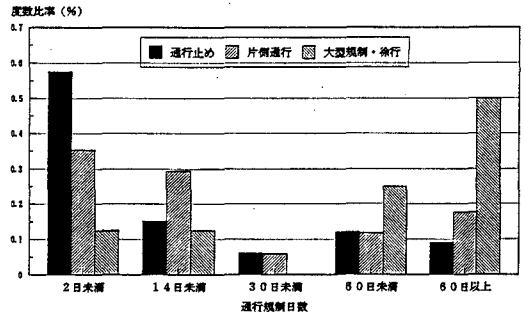


図-6 規制内容別交通規制日数

内の実際の被災箇所は道路・橋梁を合わせて2, 383箇所にのぼるが、本研究で取り扱う被災リンクは何らかの通行規制を伴い、対象ネットワーク内に位置する58箇所とした。これによると通行規制を伴う被害は県北部と仙台市周辺部に多くみられ、地震発生から2日程度で半数近くが復旧されているのがわかる。種類別にみると橋梁については工事の難易度からか復旧時間が長い橋梁の割合が大きい。図-6は規制内容別にみた通行規制日数の変化を示す。通行止めについては早期に解消された区間が多いが、片側通行規制、大型車規制・徐行規制については1か月以上の区間がかなり存在する。

次にリンクパフォーマンス関数の設定を行った。今回はリンクをいくつかのグループに分類し、回帰分析による設定を試みた。グループ分けについてはいくつか考えられるが、道路管理者別に分類を行い、種々の関数形を設定して、分析を行った。その結果、どの分析においても重相関係数が高くなかったため、本研究においては線形式による結果を用いることとした。表-1にその結果をまとめて示す。重相関係数は低いが、F検定、t検定の結果からいずれのモデルも統計的には有意である。このグループ分けに

表-1 リンクパフォーマンス関数
($t = a + bK$)

	a	b	重相関係数
直轄国道	0.8187 (2.496)	1.0517 (3.858)	0.335 (14.89)
一般国道	1.5622 (17.63)	0.3399 (3.321)	0.323 (11.04)
主要道	1.7247 (28.02)	0.2542 (4.122)	0.254 (16.99)
県道	1.7014 (42.87)	0.0912 (2.903)	0.173 (8.424)
東北自動車道	0.4209 (3.156)	1.1572 (2.307)	0.632 (5.296)

下段はt値, F値を示す。

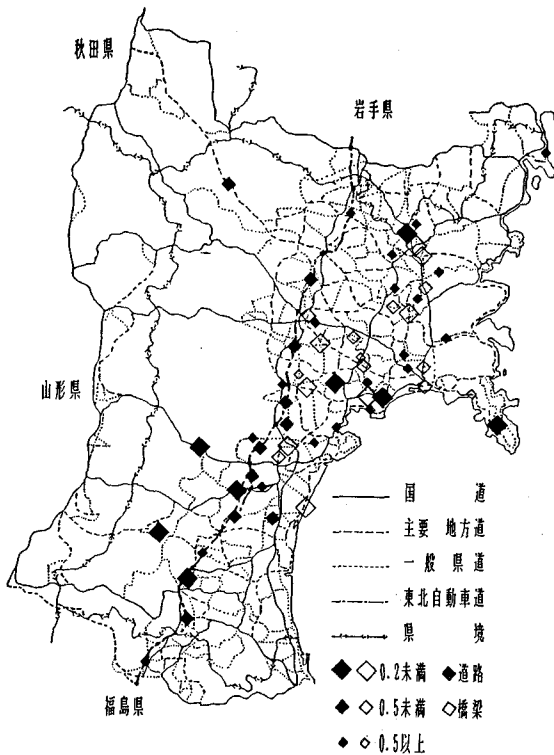


図-7 代替機能性指標の分布

については沿道状況等さらに検討の余地を残している。

次に料金抵抗の設定を行った。時間評価値は昭和56年の資料¹⁸⁾を用いて、昭和54年の東北自動車道の料金をもとに算出した。なお、時間評価値は車種ごとに異なるため、昭和55年道路交通センサス¹²⁾の東北自動車道の車種別交通量を重みとする加重平均値を用いて料金抵抗の設定を行った。

(1) 代替機能性評価指標の算出

ここでは前述の時間的代替機能性指標の算出を行う。まず、平常時において、交通混雑による損失時間を考慮しない場合と考慮した場合についての分析を行った。図-4の対象ネットワークに対して両者に関する各リンクの代替機能性指標を算出した。この指標の特徴は2の(1)のところでも述べているが、当該リンクの迂回時間が長い、リンク長が短い、あるいは交通量が多い(交通混雑による損失時間を考慮した場合)ほど小さな値をとることである。対象ネットワーク内の全リンクの代替機能性指標の平均値は、損失時間を考慮しない場合、すなわち迂回による交通混雑の増大を考慮しない場合が0.445、考慮した場合は0.398となり、損失時間

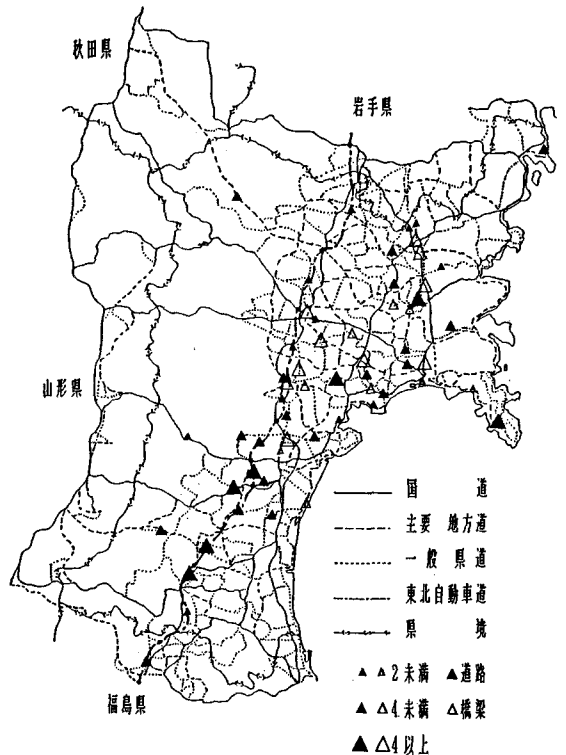


図-8 位置的重要度指標の分布

によって時間的代替機能性が低下していることがわかる。また、両者の値より対象ネットワークは平常時においても代替機能性はあまり高くない。宮城県沖地震の通行規制リンクについての代替機能性指標の分布を示したのが図-7である。

次に被災リンクをその規制内容に合わせて対象ネットワークを修正した。地震による被害は交通容量の減少として扱い、具体的には①通行止め：0%②片側規制：50%③大型車規制・徐行規制：80%にそれぞれ交通容量を減少させ、代替機能性指標の算出を行った。代替機能性が平常時に比べて低下したリンクは全697リンクのうち115リンクのほり、ネットワーク全体の平均値は0.380と平常時に比較して減少している。したがって本指標を用いることにより、地震による代替機能の低下をある程度評価できると考えられる。

(2) 位置的重要度指標の算出

次に位置的重要度指標の算出を行った。計算は(1)と同時にを行い、平常時と震災時の位置的重要度を算出した。図-8は被災リンクに関する位置的重要度の結果を示す。これによると被災リンクの中

にも他のリンクの最短迂回路として多く利用されるものが存在し、これらの通行規制によってネットワーク内の他のリンクに影響を及ぼすことが考えられる。そこで被災リンクを通行規制に合わせて交通容量を減少させ、同様に計算を行ったところ、平常時に比べて位置的重要度が減少したリンクが54リンクとなり、逆に増加したものが152リンクとなった。位置的重要度が減少しているリンクは、ネットワーク内の各リンクの本来有している重要度の高さが被災リンクの規制により阻害されていることを示しており、また増加しているリンクは震災後の位置的重要度が増しているリンクといえる。したがって、これらの情報は復旧優先順位の与え方に影響を及ぼすことはもちろん震災後の復旧物資輸送のためのルート選定においても有用な情報を与えると考えられる。なお、ネットワーク全体の平均値でみると、平常時が3.3、震災後が3.6となった。この差は震災により平均迂回数がこの程度増加していると考えられることもできる。

(3) 復旧過程

ここでは実際の復旧順位と本研究で示した2つの指標との関係、さらには総合的な復旧優先順位の与え方について検討を行う。

まず連結性の確保の観点からの分析を行う。対象ネットワークに対して被災リンクを規制内容別に交通容量を修正して代替機能性指標の算出を行ったところ、迂回路の存在しないリンクが1リンクあった。そこで、そのリンクの迂回路となる被災リンクに第一位の優先順位を与えた。そしてこのリンクをまず復旧させた。

次に確実性確保の点から代替機能性のネットワーク全体の特性値の算出を行う。この場合、2の(2)の復旧過程の定式化で述べているとおり、被災リン

クを1つずつネットワークに復旧させたときの代替機能性指標の算出を行い、全リンクの単純平均値と位置的重要度を重みとする加重平均値を考えた。これは同じ代替機能を有するリンクであっても位置的重要度が高い、言い替えれば他のリンクにとっても重要な位置にあるリンクほど代替機能からみた重要性は高いと考えたためである。なお、3の(1)の代替機能性指標との違いは、(1)が当該リンクを切断させたときの代替機能性を示すのに対してここでは当該リンクを復旧させたときの代替機能性の向上を示すことである。言い替えれば、(1)が各リンク単独の特性値に対し(3)はネットワーク全体の特性値であると考えられる。

表-2は実際の復旧順序と各リンクの交通特性から見た順位とのケンドールの順位相関係数を示したものである。これによると、まず全体では、交通量、交通容量との順位相関係数が比較的高い。すなわち実際の復旧は交通量あるいは交通容量の大きなリンクより地震復旧を行っていることが考えられる。これは、2.で述べた震災後の道路に要求される機能の大量性のある程度重視していると考えられる。交通の主要幹線より復旧を行うという方針は正しいが、ネットワークの代替機能の観点からは各リンクの代替機能性指標との順位相関係数からもわかるとおり、代替機能の高いリンクより復旧を行っていると言わざるを得ない。

種類別にみると道路に関してはその傾向がさらに強くなり、大量性を重視した復旧過程と考えられる。橋梁に関しては、交通量、交通容量と相関が低く、道路とは逆に平均代替機能性指標、位置的重要度加重平均代替機能性指標と正の相関がある。このことは、橋梁はボトルネックとなりやすく、ひとたび通行止めになると孤立する地域が発生するため、代替

表-2 通行規制リンクの復旧順位との順位相関係数

	交通量	交通容量	旅行時間	代替機能性 指 標	位 置 的 重 要 度	平均代替機 能性指標	位置的重要度 加重平均代替 機能性指標	総合優先順位
全 体	0.312***	0.400***	-0.237**	-0.149	-0.294**	-0.006	-0.002	0.369***
道 路	0.477***	0.492***	-0.084	0.088	-0.253*	-0.154	-0.231	0.260*
橋 梁	-0.042	0.026	-0.365	-0.371*	-0.252	0.402**	0.509**	0.618***
通行止め	0.158	0.200	-0.230	-0.292	-0.200	-0.210	0.062	0.210
片側規制	0.445**	0.625***	0.057	0.159	-0.211	-0.115	-0.410**	0.313
その他	0.407	0.491	-0.515	-0.240	-0.590	0.072	-0.102	0.407
順位付け	降 順	降 順	昇 順	昇 順	降 順	降 順	降 順	

* 10 %で有意 ** 5 %で有意 *** 1 %で有意

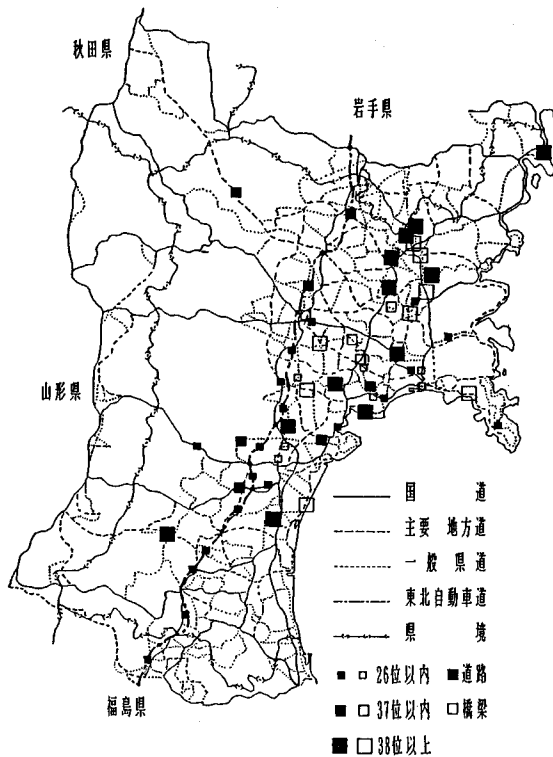


図-9 総合復旧優先順位

機能を考慮して復旧に務めていることが考えられる。

規制内容別にみると通行止めは各要因とあまり相関が高くなく、片側規制、その他は道路の場合と同様な傾向が見られた。

そこで代替機能と大量性確保の両者の観点から震災後の復旧優先順位の設定を試みた。すなわち、ネットワーク全体の代替機能性が高くなり、交通量の多いリンクほど優先順位が高いと考えるのである。このことは前述のとおり、主要幹線の優先順位が高いのは効率性の点から1つの方針として合理的であり、また本研究で示した代替機能性を考慮するのもネットワーク全体からみた確実性向上の観点で妥当であると考えられるからである。このために本研究では交通量、位置的重要度加重平均代替機能性指標の両者を標準化し、両者の加重和をもって総合的優先順位決定指標とした。すなわち復旧過程で道路に要求される確実性と大量性を同時に取り込んだ優先順位を与えることになる。重み係数はどちらの機能を重視するかによって変化し、初期段階では確実性を、その後大量性確保を重視するように重みをつけるなど考えられるが、ここでは重みがすでに得られ

ているものとし、両者とも等しく1として算出した。その総合優先順位(図-9)と復旧順位の順位相関係数を表-2に合わせて示す。これによると全体的に相関が高く、実際の復旧は大量性の確保と代替機能の向上をある程度考慮して実施されていると考えられる。そして本研究で示して優先順位を持って復旧過程を定式化すれば効率的な地震復旧が可能となると考えられる。

4. まとめ

本研究は、当該リンクが地震によって通行止めになった場合に交通混雑による損失時間を考慮した旅行時間がどの程度増加するかを示す代替機能性指標およびネットワーク内の各リンクの位置的重要度に関する指標を作成し、これによって震災後の道路ネットワーク復旧過程の定式化を試み、実際の復旧過程と比較検討したものである。

以下に得られた結果を要約して示す。

1) 交通混雑による損失時間を考慮した代替機能性指標と位置的重要度の指標を提案し、交通混雑によってネットワーク全体の代替機能が低下することを明らかにし、さらにこれらによって地震によるネットワーク機能の低下と各リンクが有する潜在的重要度がある程度評価できることを示した。

2) 宮城県沖地震後の実際復旧過程の特徴を交通特性との比較によって示し、全体的には各リンクの交通量・交通容量の大きさの順位と似ており、橋梁に関しては代替機能をある程度考慮していることがわかった。

3) 代替機能と大量性の確保の両者を考慮した総合優先順位の与え方を示し、合理的復旧過程の定式化を行った。

今後の課題として、本研究で示した道路ネットワークの復旧システムは復旧工事に係わる難易度や投入可能な労働力についてはいっさい考慮せず、ネットワーク機能の合理的な評価から優先順位を与えたものである。したがって、これらの要因を加味したシステムの構築が、実際に現場に適用する場合には必要となる。

また、大震災後は全点間の連結性、確実性を確保する事が第一義であり、またOD交通量は通常と異なるであろうという推測のもとから、OD交通量を

考慮せずに各リンクの復旧システムの構築を行ったが、OD交通量が得られれば、これを本システムに組み込むことによって、主要都市あるいは拠点間ルート最適な復旧システムの確立にも適用できると考えられる。これらについては今後の課題としたい。

最後に本研究において資料収集にご協力頂いた東北地方建設局、宮城県土木部、仙台市建設局の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 星谷勝・小池精一・宮崎正敏：上水道埋設管システムの震災復旧過程の予測，土木学会論文報告集，322号，pp. 25～35，1982.
- 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，331号，p. 45～54，1983.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 小林茂敏・浅井桶太郎・古賀泰之・佐々木康・川島一彦・長谷川金二：道路施設の震災復旧技術，土木技術資料，28-12，pp. 22～28，1986.
- 6) 堀井雅史・福田正：東北地方における道路網の積雪による交通障害予測に関する研究，第3回日本雪工学シンポジウム論文集，pp. 175～180，1987.
- 7) Masafumi Horii: Study on the Functional Evaluation Method of Intercity Road Network in Snowy Areas, Journal of the College of Engineering of Nihon University, Series A, Vol. 32, 1991.
- 8) 清水浩志郎・木村一裕：道路網評価に関する一考察，第41回土木学会年次学術講演会概要集，pp. 7～8，1986.
- 9) 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.
- 10) 池田道政：道路ネットワーク構築手法に関する一提案，交通工学，Vol. 25, No. 4, 1990, pp. 9～16.
- 11) 南正昭：都市間道路ネットワークの代替性評価に関する研究，土木計画学研究・講演集，NO. 14(1)，1991.
- 12) 東北地方建設局：昭和55年道路交通センサス一般交通量調査報告書，1981.
- 13) 土木学会東北支部：1978年宮城県沖地震調査報告書，1980.
- 14) 東北地方建設局：1978年宮城県沖地震災害報告書，1979.
- 15) 宮城県土木部：1978年6月宮城県沖地震による橋梁震害調査報告書，1978.
- 16) 宮城県：'78宮城県沖地震災害の概況－応急措置と復興事業，1978.
- 17) 仙台市建設局：'78宮城県沖地震 I. 災害の記録，1979.
- 18) 交通工学研究会：交通工学ハンドブック，1984.