

震災時における道路交通システムの連結性能の評価法

榎 谷 有 三*

Evaluation Methods of System Connectivity of Road Network During Seismic Disaster

Yuzo MASUYA

要 旨

本研究は、道路交通システムがシステムの面的に機能的であるための必要条件としての連結性能の面から、特にネットワークシステムがどの程度のサブネットワークに分離されるか（どの程度の孤立地域を発生させるか）という面から、道路交通システムの耐震性評価法を考察した。

1. ま え が き

道路、上下水道、ガス、電力などのライフラインネットワークシステムは、地震によってシステムの一部分が損壊するとネットワーク全体の機能が麻痺し、市民生活から産業活動に至るまで広範囲の分野で大きな影響を与える。特に、道路交通システムは震災後における救援、復旧等の諸活動のための重要な機能を担っており、震災後における交通機能の低下は各種の活動を円滑に進める上でも、また速やかな社会秩序の回復を図る上でも大きな影響を及ぼす。したがって、震災後の道路交通システムの挙動をシステムの機能低下の面から分析し検討することは防災対策上重要な課題のひとつである。

道路交通システムがシステムの面的に機能的であるかどうかは、必要条件としての連結性能および十分条件としての機能性能とそれぞれの面から考えなければならないが、¹⁾本研究においては前者の連結性能の面から、特にネットワークシステムがどの程度のサブネットワークに分離されるか（どの程度の孤立地域を発生させるか）という面からシステムの評価法を考察する。そして、このような震災後における孤立地域（交通途絶地域）の発生という面からのシステムの評価は、前述のよう

に消防車、救急車あるいは災害復旧車などの各車の円滑な活動を図る上でも、また火災などの二次災害を防ぐ上でも重要である。さらに、このようなシステムの評価は、道路密度が疎な道路網を形成する地方広域生活圏において特に重要な問題として考えられることから、本研究においては昭和57年の浦河沖地震によって多大の被害を受けた静内地方生活圏の道路網を対象に考察する。²⁾

2. 道路交通システムの連結性能

道路交通システムがシステムの面的に機能的であるための必要条件である連結性能とは、一般に各OD間（地域間）に一本以上の走行可能なルートが存在するか、いわゆるOD間の連結性が満足されているかどうかを考えることである。従来、この連結性能に関しては上下水道、ガスなどのシステムを始め道路交通システムにおいても種々の研究が行われてきた。^{3)~6)}しかしながら、これら多くの研究はある2点間の連結性を求める解法に意が注がれており、前述の各リンクの損壊に伴ってネットワークがどの程度のサブネットワーク（部分ネットワーク）に分離されるか、いわゆる孤立地域の発生という点については必ずしも十分な研究が行われていない。ある2点間が非連結となることは、取りもなおさず損壊したリンクの集合が両点間において多くのカットが発生するためでもあ

* 助教授 土木工学科

り、逆に他のリンクとの組合せでカットを発生させやすいリンクを対象に何んらかの対策を施したときに両点間の信頼度も高まるという事でもある。上下水道、ガスなどの単種流に対しては、供給点と需要点間ですべてのカットを列挙して連結性を求める解法も考察されてきたが、⁷⁾ OD交通のように多種流の場合は対象とする地点間も数多くすべてのカットを列挙することは莫大な計算を必要とする。そこで、本研究においては距離行列から最短距離行列を作成して、最短距離行列を基に各リンクの損壊が他の損壊したリンクとの組合せでカットを発生させるかどうかを求めるとともに、ネットワークの分離度を求めて道路交通システムの連結性能の評価法を考察した。その結果、対象とする道路網においては震災に伴ってどの程度の孤立地域を発生させるかを求めることができるとともに、分離されにくいネットワーク（グラフ理論においてはネットワークの不死身さ（invulnerability）⁸⁾）であるためにはいずれのリンクを対象に早急に復旧対策を施すべきか、あるいは地震時の交通機能信頼度を高めるためにはいずれのリンクを対象に耐震性を考慮した改良を行うべきかを考えることができる。

3. 震災時の連結性能の評価法

震災に伴う道路交通システムの被害は、道路の亀裂・投差、橋梁構造物の損壊、あるいは交通信号機の損壊などの道路施設の物理的損傷によって各リンクが損壊するという形で発生し、これに従属して交通途絶地域あるいは交通混雑・渋滞の発生などシステムの機能低下というシステムの損傷をもたらす。すなわち、道路交通システムのようなネットワークシステムは構造物の震害という点の被害から線の被害、ひいては面の被害を受ける。したがって、連結性能の評価法を考える場合には、地震の規模、地盤条件、構造物の強度などを考慮して各道路施設の被害確率を被害程度関数として求めておく必要があるが、本研究においては各施設の被害が具体的には各リンクの損壊（走行不可能）させると仮定する。このように、震災時の各道路施設の被害は不確実性の高い要素によって重要な影響を受けるので、震災時の連結性能の評価法は確率的に考えなければならない。そこで、地震が発生したとき、長さ l のリンク i が安全である確率 P_i を式(1)で求めて、この式(1)で算定される確率をもとに道路網の連結性能を定量的に求

める評価法を考える。

$$P_i = \exp(-\nu l) \quad (1)$$

ここで

ν ：単位距離当たりの被害箇所数の平均値

なお、式(1)は各道路施設の破壊が独立であるポアソン過程であると仮定している。

定量的に信頼性を求める手法には厳密解、近似解などの種々のものが考察されているが、本研究においては計算に要する時間の点からみて、また実際のシステム解析にも容易なモンテカルロシミュレーション（近似解法）を用いて、ある地震による各リンクの P_i が与えられたときの連結性能を評価する方法を考察する。評価法のおもな手順は次の通りである。

(1) 各道路施設の破壊は具体的には当該リンクを走行不可能にするとし、各リンクが走行可能いわる安全である確率を式(1)で求める。

(2) (1)で求められた安全確率を用いて各リンクのシミュレーションを行い、震災後の走行可能なリンクからなる道路網構成を求める。

(3) (2)で得られた震災後の道路網構成を用いて道路網の連結性能の評価を行う。このとき、連結評価要因としては各OD交通間の連結確率とともに、道路網の分離度も考える。なお、評価要因の算定については4.で述べる。

(4) ここでは、各道路施設の被害を確率現象として考えているため、モンテカルロシミュレーションを多数回繰り返す。

(5) (4)で行ったシミュレーションにより求まる震災時の各OD交通間の連結確率及び道路網の分離度の期待値を求めて、地震に伴う道路交通システムの評価を行う。また、連結性能の低下に伴う各種の問題を検討するための種々の分析を行う。

4. 連結評価要因の算定手法

道路交通システムの連結性能を表す評価要因としては、前述のように各OD間の連結確率及び道路網の分離度を考えているが、本研究においてはこれら二つの要因をいずれも距離行列から求められる最短距離行列を基礎に算定する。すなわち、各シミュレーションごとに得られ道路網構成（破壊していないリンクからなる）に対する距離を求め、さらにこの距離行列から各種の最短経路探索手法を用いて最短距離行列を求める。そして、最短距離行列から各OD間に走行可能なルートが存在するかどうか（存在しないときには ∞ の値を

取る)を求めて各OD間の連結確率を求める。

次に、道路網の分離度(連結ネットワークが二つ以上の分離部分に分離された非連結ネットワークの数)の算定手順は以下となる。

(1) 各シミュレーションごとに得られる道路網構成の距離行列から最短距離行列を求める。

(2) あるノードを中心に、当該ノードから到達可能なノード(最短距離行列において ∞ 以下の値を取るノード)の集合と到達不可能なノード(最短距離行列において ∞ の値を得るノード)の集合にノードの集合を分割する。

(3) 手順(2)において、到達不可能なノードがないときには、これ以上ネットワークが分離されないで計算を終了する。到達不可能なノードがあるときには、到達可能なノードの集合が他のノードと分離されてひとつの交通途絶地域(孤立地域)を形成することとなるので、手順(4)へ。

(4) 到達不可能なノードがあるときには、到達可能なノードと不可能なノード間で震災に伴い破壊されたリンクの集合を求める。そして、この破壊されたリンクの集合がカットを形成して道路網を分離して孤立地域を発生させる。

(5) 手順(2)における到達不可能なノードだけを対象に、これらのノードのうちのあるひとつのノードを指定して手順(2)~(4)と同様に手順(1)の最短距離行列を用いて、到達不可能なノードをさらに到達可能と不可能なノードに分離する。

(6) すべてのノードが到達可能なノード集合に含まれるまで手順(2)~(5)を繰り返す。

このような手順を通して、対象とする道路網が震災に伴って分離される数(孤立地域が発生する数)及び各リンクが孤立地域を発生させるカットにどの程度の頻度で含まれるかを求めることができる。そして、破壊されたリンクがカットを構成する頻度を求めることによって連結性能の信頼度を高めるために早急に復旧対策を施すべき、あるいは耐震性を考慮した道路に改良すべきリンクを考えることができる。

ここでは、図-1に示す10ノードモデルを例として分離度の算定を行う。なお、図-1の道路網の各リンクの距離は表-1に示す距離行列(表-1の右上半分)として与えている。また、表-1の左下半分には図-1の道路網の最短距離行列を与えている。いま、対象とする道路網が図-2に示す8本のリンク(図-1の破線のリンク)が損壊したとすると、図-1の実線のリンク(7本のリンク)からなる道路網構成においては、表-2

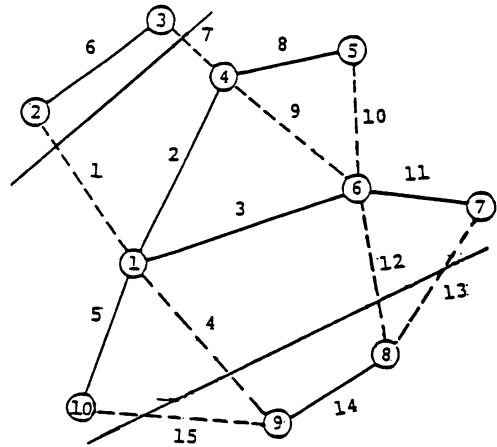


図-1 10ノードモデル

表-1 各リンクの距離と各ノード間の最短距離 (km)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		∞	∞	6	9	6	17	∞	∞	4
2	∞		5	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
3	∞	5		∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
4	6	∞	∞		3	12	23	∞	∞	10
5	9	∞	∞	3		15	26	∞	∞	13
6	6	∞	∞	12	15		11	∞	∞	10
7	17	∞	∞	2	26	11		∞	∞	21
8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞		5	∞
9	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	5		∞
10	4	∞	∞	10	13	10	21	∞	∞	

表-2 図-1のリンク(破線)が損壊したときの最短距離 (km)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		3	∞	6	∞	∞	∞	∞	∞	∞
2	3		5	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
3	8	5		3	∞	∞	∞	∞	∞	∞
4	6	8	3		3	6	∞	∞	∞	∞
5	9	11	6	3		5	∞	∞	∞	∞
6	6	9	9	6	5		11	5	∞	∞
7	17	20	20	17	16	11		8	∞	∞
8	11	14	14	11	10	5	8		5	∞
9	6	9	14	12	15	10	13	5		7
10	4	7	12	10	13	10	20	12	7	

に示す最短距離行列を得る。そして、手順(2)以降を行うと、まず表-2の最短距離行列においてノード1から到達可能なノードとしてノード4, 5, 6, 7, 10を求めることができる。さらに、ノード2から到達可能なノードとしてノード3, ノード8からとしてノード9をそれぞれ求めることができる。したがって、図-1の損壊した道路網においては、最短距離行列から容易に3つの地域に分離されることが求められる。また、手順(4)を通してカットを形成するリンクとしてリンク1と7, リンク4, 12, 13, 15をも求めることができる。

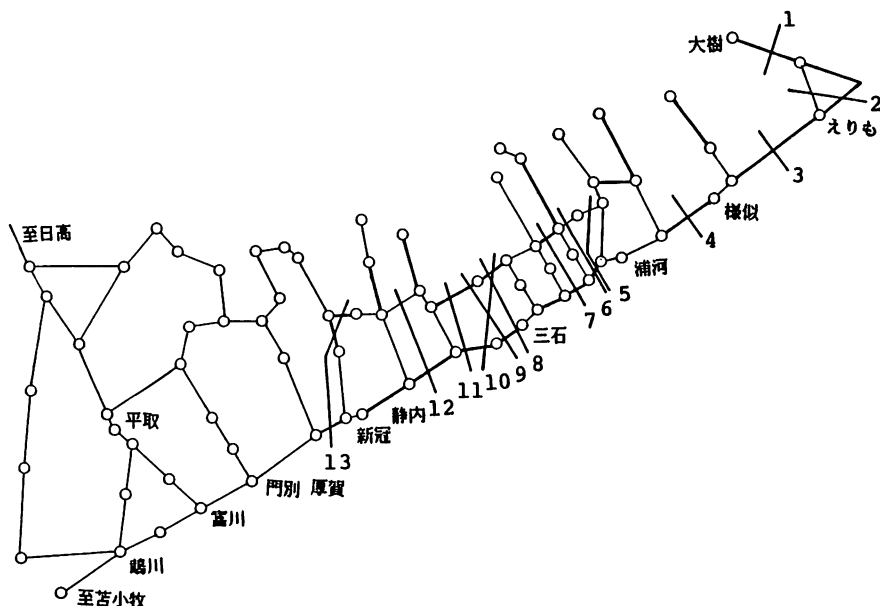


図-2 静内地方生活圏道路網とカット

5. 計 算 例

本研究においては、実際の道路交通システムの例として図-2の静内地方生活圏の道路網を対象に震災時における道路網の連結性能について考察する。この地域は昭和56年の台風12号、昭和57年の浦河沖地震などにより各地で道路の被害を被り、消防車、救急車、災害復旧車などの緊急車の交通確保が困難を窮めた。また、災害後長期にわたり交通確保がスムーズに行われず社会活動に多大の影響を与え、地域交通の安定性の向上を図る整備が必要とされている地域でもある。⁹⁾ 図-2はリンク97本、ノード81個からなる道路網である。各リンクの被害箇所数の平均値 ν は、浦河沖地震のデータより0.3箇所/kmを基準に路線や

整備度を考慮して設定した。¹⁰⁾

1000回のシミュレーションを行ったときの主要町村間の連結確率及び道路網の分離度の頻度分布を求めると表-3(右上半分)、図-3(実線)となる。図-3の頻度分布の平均値を求めると、当地域は震災に伴って81個のノードが約20箇所程度の地域に分断させることが窺える。次に、このような地域の分断を引き起すリンクを求めるため、各リンクがカットに含まれる頻度を求めたところ、図-2の太線で示す21本のリンクが単独あるいは他のリンクとの組合せで400回以上カットを発生させている。図-3、表-4には発生頻度の高い主なカットの発生状況を示した。前述のように破壊されたリンクがカットを構成する頻度が高いリンクは、当該リンクの早急な復旧対策等に

表-3 主要町村間の連結確率 ($\times 10^{-3}$)

	えりも	樺 似	浦 河	三 石	静 内	新冠	厚 賀	門 別	富 川	鷗 川	苫小牧	平 取	日 高	大 樹
えりも		169	39	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61
樺 似	669		199	14	2	1	0	0	0	0	0	0	0	11
浦 河	387	576		40	10	2	1	0	0	0	0	0	0	2
三 石	103	149	216		53	26	7	3	1	1	1	1	1	0
静 内	64	96	142	491		398	140	66	42	42	42	40	27	0
新冠	39	61	92	349	657		303	148	100	100	100	92	70	0
厚 賀	24	42	72	254	483	629		503	342	342	342	312	233	0
門 別	21	36	59	206	378	474	746		656	656	652	610	423	0
富 川	18	29	47	147	285	359	571	729		1000	1000	901	650	0
鷗 川	18	29	47	147	285	359	571	729	1000		1000	901	650	0
苫小牧	18	29	47	147	285	359	571	729	1000	1000		901	650	0
平 取	17	28	46	143	272	343	543	893	906	906	906		592	0
日 高	11	18	29	101	187	235	376	466	652	652	652	595		0
大 樹	328	328	142	46	28	16	9	0	9	9	9	0	5	

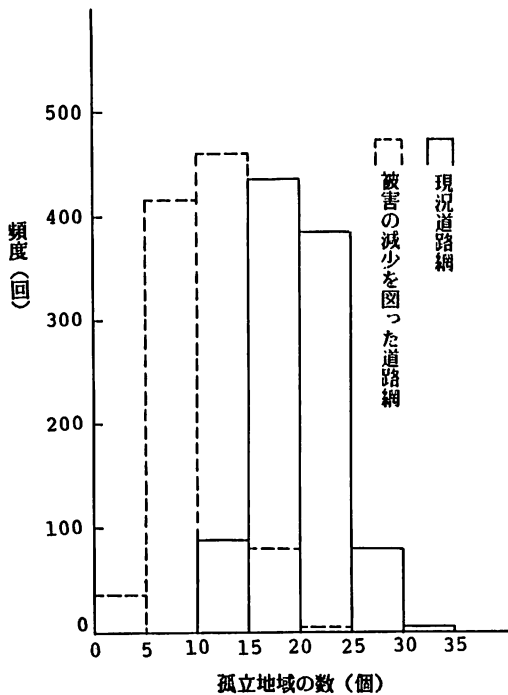


図-3 1000回のシミュレーションを行ったときの孤立地域が発生する頻度分布

よって連結性能の信頼度を高めることから、図-2の太線の各リンクの ν を $1/2 \sim 1/3$ にして計算を行なう。そうすると、表-3の下左半分の主要町村間の連結確率、表-4の各カットの発生頻度、さらには図-3の孤立地域の発生頻度分布(破線)からもカットに含まれる頻度が高いリンクを対象に復旧対策等を行うと信頼度が高まることが窺える。

復旧対象とするリンクの選定によっては連結信頼度も高まることを示した。しかしながら、ここで対象とした道路網は低密度ならびに線状的な道路網構成をしていることから代替性も乏しく、また主要道路が被害を受けやすい海岸線に沿っていることから、各種の災害に伴って多くの孤立地域に分断されやすい。そして、このような線状の道路網の場合は多くのリンクを対象に復旧対策を施さなければならないこと。さらには、耐震性を図るべき多くの道路が改良困難な海岸線に沿っていることなどから、今後当地域を耐震性の道路交通システムとするためには、代替機能をも兼ね備った道路を早急に整備促進すべきと思われる。

表-4 図-2における主なカットの発生頻度

カット	現況道路網	被害減少道路網
1	5 2 6	1 4 9
2	7 0 5	2 0 5
3	7 1 6	2 1 0
4	6 2 4	2 3 8
5	3 0 6	1 0 5
6	3 1 0	1 0 2
7	4 7 6	1 6 4
8	3 2 9	5 8
9	4 6 2	7 9
10	3 6 1	7 0
11	4 9 9	9 6
12	3 5 9	1 1 0
13	3 8 0	5 8

6. あ と が き

以上、本研究においては道路網の分離度を通して震災に伴う孤立地域の発生及び連結信頼度を高めるためにはいずれのリンクを対象に早急に復旧対策等を施すべきについて考察した。そして、道路網の分離度及び各リンクがカットに含まれる頻度などは最短距離行列を基に容易に算定できることを示した。今後は、孤立地域の発生と病院・消防車などの緊急施設の配置状況などについても考察を進めて行く予定である。さらに、各地域間の連結信頼度がある程度確保されたとき、平常時に比べて震災時において各地域間ほどの程度の距離的あるいは時間的抵抗を克服しなければならないかについて、いわゆる地域間の時間信頼性についても考察を進めて行く。

最後に、本研究を進めるに当たり御指導いただいた室蘭工業大学斉藤和夫教授、ならびに資料提供など種々御配慮いただいた北海道開発局道路計画課林延泰氏に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 梶谷有三：震災時における道路網の機能性能の評価法，交通工学，第19巻5号，1984
- 2) 梶谷有三・斉藤和夫・林 延泰：震災時における道路交通システムの連結性能について－静内地方生活圏を例として－，第16回日本道路会議論文集（特定課題），1985
- 3) 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
- 4) 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) 小林正美：道路交通網の地震時信頼度争析に関する研究，第16回日本都市計画学会論文集，1981
- 6) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法，土木学会論文報告集，第327号，1982
- 7) 井上紘一・稲垣敏之：大規模システムの信頼性解析へのグラフ理論の応用，システムと制御，第20巻12号，1976
- 8) 服部嘉雄・小沢孝夫：グラフ理論，昭晃堂，1978
- 9) 北海道開発局室蘭開発建設部：静内地方生活圏地域交通網計画調査報告書，1985
- 10) 北海道開発局室蘭開発建設部：静内地方生活圏道路網計画調査報告書，1984

(昭和60年12月2日受理)