

IV—22 道路交通システムの連結性能に関する耐震性評価

苫小牧工業高等専門学校 正員 榎 谷 有 三

1. まえがき

道路、上下水道、ガス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まで広範囲の分野で大きな影響を与える。道路交通システムの場合は、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いる所から、特に震災後における連結性能の低下は消防車、救急車あるいは災害復旧車などの各車の円滑な活動を妨げるとともに二次災害をも大きくさせる原因ともなる。したがって、震災後の道路交通システムの挙動を分析し検討することは防災上重要であると考えられる。そしてこの時、各地域間（各OD間）の連結性に注目した耐震性の評価法を確立するばかりではなく、所要の機能上の耐震性を保持するように、システムを構成する各道路施設を耐震設計しておく必要がある。そこで、本研究では各OD間の非連結確率が距離の性質を持っていることを利用して、クラスター分析から孤立しやすい地域を求めるとともに、早急に復旧対策を施すべきあるいは耐震性を図るべき問題箇所の道路区間（リンク）を的確に把握する方法について考察した。

2. 従来の研究

道路交通システムがシステムの機能性であるための必要条件としての連結性能は、一般に各OD間（地域間）に1本以上の走行可能なルートが存在するか、いわゆる各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。しかしながら、これらの多くの研究は Inclusion-Exclusion法、ブール代数法、反復分割法あるいはモンテカルロ・シミュレーション法などのように主にある2点間の連結確率を求める解法に意が注がれていた。各OD間の連結確率を求めることは、各OD間の疎通能力を把握する上では有用であるが、システム全体から見た重要リンクの抽出、いわゆるいずれのリンクを対象に早急に復旧対策を施すべきかなどについてはかならずしも検討することはできない。これらの点に対処するため、各リンクの破壊確率を変えたとき各地域間の連結確率がどのように変化するかを分析する感度分析を通して考察する方法、あるいは多次元尺度構成法、数量化理論等によってシステムの構造を視覚化する方法も考えられている。しかし、前者の方法は対象とするリンクの本数の増大とともに計算は困難を伴ってくる。また、後者の方法は各地域間の相対的な位置関係を把握する上では有用であるが、具体的にあるリンクの復旧対策を施したときシステムの信頼度がどの程度回復するかについてまでは言及できない。そこで、本研究においては前述のクラスター分析を通して、ある連結確率を考えたとき対象とするシステムにおいてはどの程度の孤立地域を発生させるかを把握するとともに、いずれのリンクを対象に復旧対策等を施せばどの程度システムの信頼度が回復するかについて考察した。

3. 連結性能の耐震性評価法

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 が安全である確率を 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交通システムの連結性能を定量的に求める評価法を考える。なお、式(1)は各道路施設の破壊は独立であるポアソン過程であると仮定している。

$$P_i = \exp(-\nu l) \cdots \cdots \cdots (1) \quad \text{ここで、}\nu: \text{単位距離当りの被害箇所数の平均値}$$

定量的に信頼性を求める手法には、前述のように厳密解、近似解などの各種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

シミュレーション（近似解）を用いて、ある地震による各リンクの P_i が与えられてときの連結性能を評価する方法を考察する。評価法の主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ゆ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間の連結確率と道路網の分離度を考える。

（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間の連結確率および道路網の分離度の期待値を求めて、地震時における道路交通システムの評価を行う。

（６）（５）で求められた各OD間の連結確率を用いて、連結性能の低下に伴う各種の問題を検討するためクラスター分析を行う。

連結評価要因としての道路網の分離度は、震災に伴って対象とする道路ネットワーク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）を考えるものである。そして、分離度は、一般に連結ネットワークが二つ以上の分離部分に分離されたときの非連結ネットワークの数として求められる。なお、この分離度を求めるときには、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についても合せて求めることができるので、この破壊したリンクがカットに含まれる頻度からシステム全体から見たいわゆる重要リンクの抽出を考えることができる。各OD間の連結確率および道路網の分離度は、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容易に算定することができ、そのアルゴリズムについては文献（１）で述べている。

４．クラスター分析による耐震性評価

多くのサンプル（個体、要素）の中に類似性を求めて、比較的少数のグループ（パターン、クラスター（集落））にまとめるための単純な統計的手法としてクラスター分析がある。この分析手法は、サンプル間に相互の親密度（あるいは類似度）を定義し、親密なもの同士（似た者同士）を集める手法でもある。本研究においては、このクラスター分析を通して震災時における連結性能の耐震性評価を試みる。クラスター分析といっても数多くの手法が開発されていることから、クラスター分析を行う場合には、まずサンプル間の類似度あるいは距離をどのように定義するか、またこの分析手法には組み合わせ論的な側面があることからどのような計算アルゴリズムを用いるかなどについて考える必要がある。

そこで、ここではまず距離の定義について考える。クラスター分析に用いられるサンプル間の距離としては、ユークリッド距離、マハラノビスの汎距離などが考えられるが、本研究においては次に述べる各OD間の非連結確率が距離の性質を持つことから、分析にあたっての距離の定義としては各OD間の非連結確率を用いる。いま、あるOD間 ij の連結確率を p_{ij} とすると、その ij 間の非連結確率 r_{ij} は式（２）で求めることができ、この値は ij 間に非破壊であるルート（経路）がひとつも存在しない確率でもある。そして、この非連結確率 r_{ij} はすべての ij 間に対して次の４つの性質を持つことから、 r_{ij} は距離としての性質を持っていることが証明されている。²⁾ここで、式（４）はノードでの破壊はないものとしている。

$$r_{ij} = 1 - p_{ij} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$0 \leq r_{ij} \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$r_{ij} = r_{ji} \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

$$r_{ii} = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$r_{ij} \leq r_{ik} + r_{jk} \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

次に、クラスター分析の算法には階層的手法と非階層的手法とがあるが、ここでは連結性能の低下に伴う各種の問題を検討するためにも容易な前者の階層的手法を用いる。この階層的手法には、クラスター同士を融合して逐次大きいクラスターを構成していく過程と、結果を図-3に示すような樹形図（デンドログラム）として表現する過程とがある。そして、クラスター同士を融合してゆく過程においては、クラスター間の距離を計算しなければならない。この距離を求める方法には、最短距離法、最長距離法あるいは重心法など種々の方法が考えられているが、本研究では対象とするシステムを把握するうえでも容易な最短距離法を用いこととする。

- 以上のことを取りまとめると、クラスター分析によって樹形図を得るまでの過程は次のようになる。
- (1) 3. の手順 (5) で求められた各OD間の連結確率を用いて、式 (2) より各OD間の非連結確率を求める。
 - (2) (1) で求められた非連結確率を各OD間の距離とする。
 - (3) クラスター間の距離を最短距離法を用いて計算し、逐次クラスター同士を融合してゆく。
 - (4) クラスター同士が融合してゆく過程を樹形図として取りまとめる。

そして、クラスター分析によって樹形図が求められることによって、次のような事を把握することができる。①震災に伴う孤立地域の発生状況を視覚的に把握することができる。②クラスター化された孤立地域間の距離も把握されることから、クラスター間の連結確率についても把握できる。③クラスター間の連結確率をどの程度まで許容するかによって孤立地域の発生状況も異なってくるが、この事も樹形図の縦軸がクラスター間の距離を表すことから容易に把握することができる。④さらに、樹形図を用いてシステム全体の連結信頼度を高めるためにはいずれのリンクから早急に復旧対策を施すべきか、あるいはいずれのリンクを対象に耐震性を図るべきかなどについても的確に把握することができる。

5. 計算例

簡単な適用例を通して、クラスター分析による連結性能の耐震性評価法について考える。図-1の道路網（図中の数字はリンク番号）を与えて行う。3. で述べた手順のように、実際には各リンクの距離を考慮して式 (1) から安全である確率を求めなければならないが、ここではネットワーク構成から見たリンクの重要度を考えるため各リンクの安全である確率を一律に 0.5として計算を進める。

100回のシミュレーションを行い各OD間の連結確率を求め、さらに式 (2) から各OD間の非連結確率（距離）を求めた結果が表-1の左上半分である。

このとき、道路網の分離度は3.24となり、また孤立地域の発生分布状況は図-2（実線）となった。表-1（左上半分）の各OD間の非連結確率を距離とし、さらにクラスター間の距離を最短距離法で求めて逐次クラスター同

表-1 各OD間の非連結確率（距離）

	(×10 ⁻²)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		43	54	25	45	22	43	31	24	33
2	16		46	51	63	54	67	58	56	63
3	32	31		45	61	53	68	61	62	68
4	19	27	20		36	24	48	41	40	52
5	26	34	29	12		33	58	50	58	65
6	15	27	28	13	21		34	23	37	51
7	26	37	40	27	35	16		32	53	63
8	25	34	39	29	36	18	21		33	54
9	20	34	44	33	39	28	38	26		37
10	19	35	48	36	41	33	43	35	12	

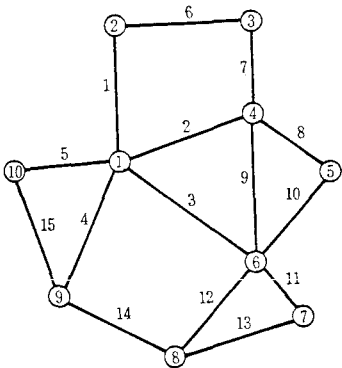


図-1 対象道路網

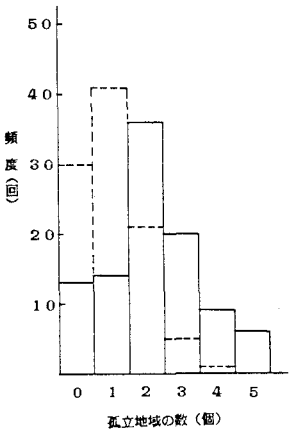


図-2 100回のシミュレーションを行ったときの孤立地域の発生

士を融合して得られた樹形図が図-3である。この樹形図より、震災に伴う連結性能から見た各OD間あるいはクラスター間の位置関係が理解できる。そして、各クラスター間の距離が少なくとも 40×10^{-2} 以下(連結確率で言うと 60×10^{-2} 以上)あるいは 30×10^{-2} 以下とするためには、対象とする道路網においてはどのような孤立地域が発生し、またいずれのリンクを対象に復旧対策等を施せばよいかなどについても把握することができる。たとえば、図-3の縦軸の 40×10^{-2} の所で横に切断(図-3の破線)すると、ノード1,6,8,4,9,7,5,10の地域とノード2、ノード3のそれぞれ3つの地域に分断される。また、 30×10^{-2} の所で切断したときには、ノード1,6,8,4,9とノード7、ノード5、ノード10、ノード2、ノード3の6個の地域に分断されることが図-3から理解できる。したがって、各クラスター間の距離を 30×10^{-2} 以下とするためには、これら6個のクラスター間を結ぶリンクを対象に何んらかの対策を施さなければならない。6個のクラスター間を結ぶリンクとしては、リンク1,5,6,7,8,10,11,13,15の9本のリンクが考えられるが、ここではリンク1,7,8,11,15の5本のリンクを対象に耐震性を施すとする。この事は、グラフ理論で言うところの、 n 個のノードを連結するためには少なくとも $(n-1)$ 本のリンクが必要であるということである。そして、これら5本のリンクの安全確率を0.75とすると、各OD間の非連結確率は表-1(右下半分)となる。さらに、このときの樹形図を作成すると図-4となる。なお、このときの

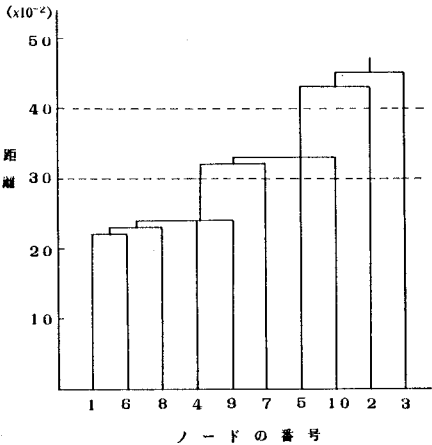


図-3 各リンクの安全確率を一律に0.5としたときの樹形図

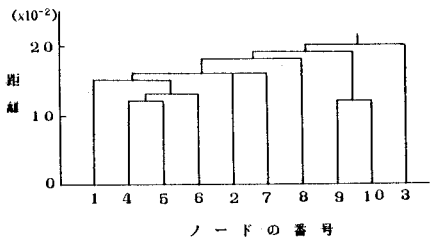


図-4 リンク1,7,8,11,15の安全確率を0.75としたときの樹形図

分離度は2.12であり、孤立地域の発生状況は図-2(破線)に示した。図-4の結果からも明らかなように、図-3の樹形図を利用して耐震性を施すべきリンクを選定すると、容易にシステム全体の連結信頼度を高める重要リンクの抽出を行うことができる。表-3には、100回のシミュレーションを行ったときの、各リンクがノードを排他的な2つの集合に切断するカットに含まれる頻度を示したが、この結果からも耐震性を施した先の5本のリンクの重要性が窺える。

6. あとがき

以上、本研究においてはクラスター分析を通して震災に伴う連結性能の耐震性評価を試みた。その結果、クラスター分析によって対象地域がどのような地域に分断されるか、あるいは連結信頼度を高めるためにはいずれのリンクを対象に復旧対策等を施すべきかなどについて把握することができた。今後は、さらに平常時に比べて震災時においては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、いわゆる各地域間の時間信頼性について考察を進めて行く。

リンク	一律に 0.5 としたとき	被害減少を 図ったとき
1	43	16
2	25	19
3	22	15
4	24	20
5	33	19
6	46	31
7	45	20
8	36	12
9	24	13
10	33	21
11	34	16
12	23	18
13	32	21
14	33	26
15	37	12

表-3 各リンクがカットに含まれる頻度

- (1) 棚谷・斉藤・林：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
- (2) 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