

道路交通システムの連結性能に関する耐震性評価法

Evaluation Methods of System Connectivity
of Road Network During Seismic Disaster

榎 谷 有 三*・齊 藤 和 夫**

By Yuzo MASUYA and Kazuo SAITO

The malfunction of the road network system produces bad effects on daily livelihood and industrial activities for a long time after the earthquake. This paper proposes the evaluation methods of the connectivity which reflects the functional serviceability of the road network system. First a method is described to calculate the number of the separate parts of the road network which indicates the number of the isolated regions resulting from failures of the road subjected to the earthquake. Secondly, a method to visualize the structure of the function of this system using the cluster analysis is proposed. Lastly, applying these methods, the seismic performance of road network system is evaluated for a 10-node network model.

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対策上

においても重要な課題のひとつである。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の耐震性評価法を考察するため、まず最短距離行列を基に道路網の分離度(震災に伴って発生する孤立地域の数)を求めるとともに、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、分離されにくい道路網(グラフ理論においてはネットワークの不死身さ(invulnerability))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

* 正会員 工博 苫小牧工業高等専門学校助教授
土木工学科(〒059-12 苫小牧市錦岡4 4 3)

**正会員 工博 室蘭工業大学工学部助教授
土木工学科(〒050 室蘭市水元町2 7 - 1)

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などを考えることができる。次に、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を試みた。その結果、各OD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、この事もクラスター分析によって容易に把握することができる。また、いずれのリンクを対象に復旧対策等を施せばシステムの交通機能信頼度を高めることができるかについても考えることができる。

2. 従来の研究

道路交通システムがシステムの的に機能的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^{1)・2)}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、震災に伴ってネットワーク（道路網）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カットを発生させるためである。したがって、2点間の連結性の信頼度が小さくなるということは両点間において多くのカットが発生するためでもあり、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らかの対策を施したときには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のすべてのタイセットあるいは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、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、この最短距離行列を基に道路網の分離度を求める。

次に、震災に伴う孤立地域の発生状況を視覚的に

把握する方法としては、ノード間の連結確率をクロス表とみなして数量化理論第III類を用いた方法³⁾、ノード間の非連結確率が距離の性質を持つことを利用して多次元尺度構成法を適用した方法²⁾などがある。しかしながら、これらの方法は各地域間の空間的な位置関係を把握する上では有用であるが、前述のように各OD間の許容とする連結確率によって孤立地域の発生状況がどのように異なるか、あるいはあるリンクの復旧対策を施したときシステムの信頼度をどの程度まで回復させることができるかなどについては把握することができない。そこで、本研究ではクラスター分析を通してこれらの問題に対処する方法を考察した。

3. 連結性能の耐震性評価法⁴⁾

震災時における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ぬ。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基に道路網の連結性能を定量的に求める評価法を考える。なお、式(1)は各道路施設の損壊は独立であるポアソン過程であると仮定している。

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

ここで、 ν ；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、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・シミュレーション（近似解）を用いて、ある地震における各リンクの 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。評価法の主な手順は次の通りである。

(1)各道路施設の損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、走行可能なリンクからなる震災後のひとつの道路網パターンを求める。

(3)(2)で得られた道路網パターンに対して道路網の分離度を求めるとともに、走行不可能なリンクの

組合せでカットを発生させるかどうかを求める。

(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)で行った多数回のシミュレーションから、震災時における各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)連結性能の低下に伴う各種の問題を検討するため、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とともに、各OD間の連結確率を用いてクラスター分析を行う。

4. 道路網の分離度の算定手法

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間の連結確率および道路網の分離度の期待値を考えているが、本研究においてはこれら二つの要因いずれも距離行列から求められる最短距離行列を基に算定する。まず、各OD間の連結確率は各シミュレーションごとに得られる道路網パターンに対して距離行列を求め、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。そうすると、走行可能なルートが存在するOD間は、最短距離行列の要素として ∞ 以下の値を取ることから、多数回のシミュレーションにおいて ∞ 以下の値を取る回数とシミュレーションの回数との比によって連結確率が求められる。

道路網の分離度は、前述のように震災に伴って対象とする地域がどの程度の孤立地域に分断されるかを表すものであるが、グラフ理論において分離度とは、一般に連結ネットワークが二つ以上の分離部分に分断された非連結ネットワークの数と定義されている。⁵⁾ 道路網の分離度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パターンに対して距離行列を求め、さらにこ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 ∞ の値を取るノード)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ので計算を終了する。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断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)へ行く。

(4)到達可能なノードと不可能なノード間のリンクのうち、震災に伴い損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ことから、これらノード間において損壊したリンクの集合を求める。

(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(1)の最短距離行列を用いて手順(2)~(4)を行う。

(6)順次到達不可能なノード集合を到達可能と不可能なノードに分割して、手順(3)の到達不可能なノードがなくなるまで手順(2)~(5)を繰り返す。そうすると、道路網の分離度は手順(2)~(5)の過程で求められた到達可能なノード集合の数として、すなわち孤立地域の数として求められる。

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)およ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ているかなどを求めることができる。そして、損壊したリンクがカットを形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等を施すべき、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。

5. クラスター分析による耐震性評価^{6), 7)}

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)を定義して、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孤立地域の発生状況を視覚的に把握することを試みる。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合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 ${}_sP_{ij}$ とすると、そのij間の非連結確率 ${}_fP_{ij}$ 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 ${}_fP_{ij}$ 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、非連結確率を距離として考えることができる。²⁾ここで、式(4)はノードでの破壊はないものとしている。

$${}_fP_{ij} = 1 - {}_sP_{ij} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$0 \leq {}_fP_{ij} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$${}_fP_{ij} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$${}_fP_{ij} = {}_fP_{ji} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$${}_fP_{ij} \leq {}_fP_{ik} + {}_fP_{kj} \quad \dots\dots\dots (6)$$

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-4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、ここ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ることとする。

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)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)クラスター同士を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非連結確率から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することができる。

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、損壊されたリンクがカットを形成する頻度を求めると同様に、樹形図を用い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についても把握することができる。

6. 計算例

簡単な適用例を通して、震災時における道路網の連結性能の評価法について考察する。図-1の道路網(図中の数字はリンク番号)および表-1の各リンクの距離(右上半分)を与えて行く。なお、表-

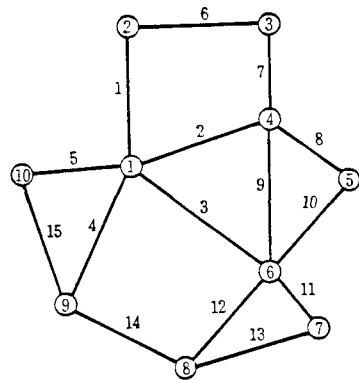


図-1 対象道路網とリンク番号

表-1 各リンクの距離(Km)と各OD間の最短距離(km)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1			3	∞	6	∞	6	∞	∞	6	4
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		2	5	∞	∞	∞
7	8	11	11	8	7	2		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	18	12	7		∞

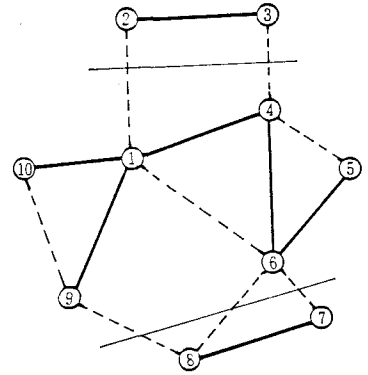


図-2 震災に伴うある損壊した道路網パターン

1の左下半分には図-1の道路網の各OD間の最短距離を与えている。ここでは、まず4. で述べた道路網の分離度の算定について行う。いま、図-1に示す道路網においては8本のリンク(図-2に示す破線のリンク)が損壊したとすると、図-2の実線のリンクからなる道路網パタンの距離行列の各要素は表-2(右上半分)となり、各ノード間の最短距離行列の要素は表-2(左下半分)となる。そして、4. の手順(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, 9, 10、到達不可能なノードとして2, 3, 7, 8をもとめることができる。そうすると、ノード1から到達不可能なノードがあることから、ノード1から到達可能なノードの集合であるノード1, 4, 5, 6, 9, 10からなるひとつの孤立地域を求めることができる。さらに、ノード1から到達不可能なノード集合であるノード2, 3, 7, 8を対象に同様に行くと、ノード2から到達可能なノードとしてノード3、ノード7からしてノード8をそれぞれ求めることができる。したがって、図-2の損壊した道路網においては3つの孤立地域に分断されていることが表-2の最短距離行列から容易に求められる。また、手順(4)を通して、損壊した8本のリンクのうちリンク1と7、リンク11, 12と14がそれぞれカットを形成していることも求められる。

図-1の道路網を対象に100回のシミュレーションを行い、孤立地域の発生状況を求めた結果が図-3(実線)である。このとき、道路網の分離度の期待値は3.24であった。図-3の横軸の孤立地域1は

表-2 図-2の道路網パターンに対するリンク距離(Km)と各OD間の最短距離(Km)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		∞	∞	6	∞	∞	∞	∞	6	4
2	∞		5	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
3	∞	5		∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
4	6	∞	∞		∞	6	∞	∞	∞	∞
5	17	∞	∞	11		5	∞	∞	∞	∞
6	12	∞	∞	6	5		∞	∞	∞	∞
7	∞	∞	∞	∞	∞	∞		8	∞	∞
8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	8		∞	∞
9	6	∞	∞	12	23	18	∞	∞		∞
10	4	∞	∞	10	21	16	∞	∞	10	

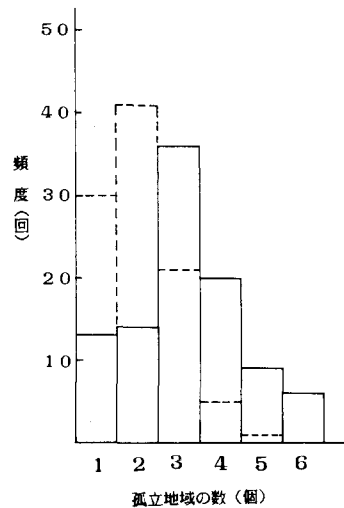


図-3 100回のシミュレーションを行ったときの孤立地域の発生状況

、対象道路網が分断されなかった場合(連結ネットワーク)を示す。なお、この計算例においては各リ

表-4 各OD間の非連結確率（距離）

		($\times 10^{-2}$)									
	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		

表-3 各リンクがカットに含まれる頻度

リンク	一律に 0.5 : 被害減少を としたとき	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

リンクの安全である確率 P_i を各リンクの距離あるいは被害箇所数などによらず一律に 0.5 として計算を進めている。各リンクが孤立地域を発生させるカットに含まれる頻度を求めた結果が表-3 である。この結果から、リンク 1、6、7 などのリンクの損壊がこれらのリンクの組合せあるいは他のリンクとの組合せでカットを形成して孤立地域を発生させている事が窺える。次に、各OD間の連結確率を求め、さらに式(2)から各OD間の非連結確率を求めた結果が表-4 (右上半分) である。そして、この非連結確率を距離として、クラスター間の距離を最短距離法で求めて、逐次クラスター同士を融合して得られた樹形図が図-4 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

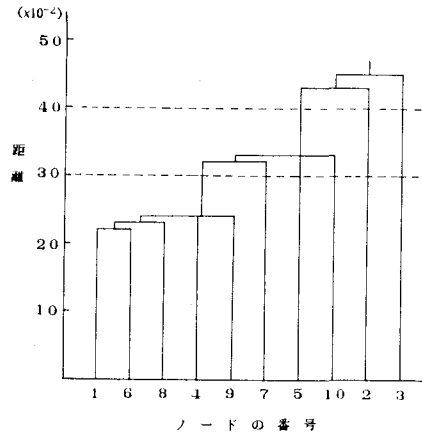


図-4 各リンクの安全確率を一律に 0.5としたときの樹形図

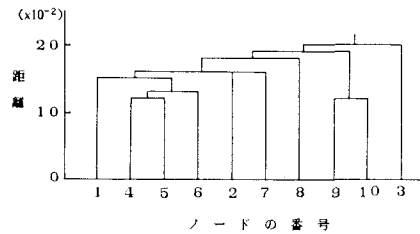


図-5 リンク1,7,8,11,15の安全確率を0.75としたときの樹形図

間の距離を少なくとも 40×10^{-2} 以下 (連結確率で言う 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、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把握することができる。たとえば、図-4の縦軸の 40×10^{-2} の所で横に切断 (図-4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つの地域で分断される。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つの地域に分断されることが図-4から理解できる。したがって、たとえば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つ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こととなる。6つのクラスター間を結ぶリンクとしては9本のリンクが考えら

れるが、ここでは表-3に示すカットに含まれる頻度を考慮してリンク1、7、8、11、15の5本のリンクを対象に何んらかの対策を施すとする。この事は、グラフ理論で言うところの、 n 個のノードを有するネットワークを連結に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もある。そして、いまこれら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-4（左下半分）となる。さらに、このときの樹形図を作成すると図-5となる。そして、このときの孤立地域の発生状況は図-3（破線）であり、また分離度の期待値は2.12であった。図-5の結果からも明らかのように、図-4の樹形図および表-4の各リンクがカットに含まれる頻度から何んらかの対策を施すべきリンクを選定すると、容易にシステム全体の交通機能信頼度を高めるためのリンクを抽出することができる。

7. あとがき

以上、本研究は震災に対する道路交通システムのシステムの連結性能の評価法について考察した。本研究をまとめると以下となる。

(1)システムの連結性能を表す評価要因として道路網の分離度を上げ、震災に伴って対象とする地域においてはどの程度の孤立地域（交通途絶地域）を発生させるかを求めた。

(2)道路網の分離度を最短距離行列を基に算定できる手法を考察したので、震災時のように多数回のシミュレーションを繰り返さなければならない場合でも容易に分離度の期待値を求めることができる。

(3)各OD間の非連結確率が距離の性質を持つことを利用して、震災に伴う孤立地域の発生状況を視覚的に把握する方法をクラスター分析を通して考察した。

(4)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、このような事もクラスター分析から得られる樹形図を通して容易に把握することができた。

(5)最短距離行列を基に算定できる各リンクが孤立地域を発生させるカットに含まれる頻度、およびクラスター分析から得られる樹形図は交通機能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図るべきリンクを適確に把握することができた。

今後はさらに、復旧対策あるいは耐震性等を図るべきリンクの選定にあたっては、単にシステムの連結性能の面からだけでなく、震災に伴って各OD間は平常時に比べてどの程度時間的、距離的抵抗を克服しなければならないか、いわゆる各OD間の時間信頼性の面からについても考察を進めて行く。また、孤立地域の発生状況と病院、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行って行く。

参考文献

- 1)小林正美：道路交通網の地震時信頼度解析に関する研究、都市計画別冊、昭和56年度学術研究発表会論文集、第16号、1981
- 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
- 3)山田善一・野田 茂：地震時のライフライン系の信頼度と供給機能の解析、日本建築学会論文報告集、第342号、1984
- 4)榎谷有三：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
- 5)服部嘉雄・小沢孝夫：グラフ理論、昭晃堂、1978
- 6)奥野忠一他：統多変量解析法、日科技連、1971
- 7)田中 豊・脇本和昌：多変量統計解析法、現代数
学社、1983