

到達可能ノード率による街路網防災性評価について

Evaluating Disaster Prevention Ability of Local Road Network Using the Rate of Reachable Notes

李 燕* 塚口博司**

Yan LI, Hiroshi TSUKAGUCHI

ABSTRACT In this paper, we provide the Rate of Reachable Notes (RRN) as an index to evaluate a local area road network's disaster prevention ability. RRN is defined as the rate of reachable node number in the whole network's node number. Using the data of road condition read from air photos taken after the earthquake, we first analyze the main reasons that have effects on the road network's RRN, and then use the RRN to compare some alternative plans for the improvement of the road network's disaster prevention ability.

1. はじめに

阪神・淡路大震災において、道路をはじめとして、鉄道、港湾、空港といった交通基盤施設は大きな被害を受けた。特に、市街地における一般街路が寸断され、緊急車両がスムーズにアクセスできないエリアが広範囲にわたって発生し、震災直後の人命救助活動を大きく妨げた。このため、交通網の防災性向上の緊急性が再認識され、これまでの研究で注目が少なかった地区レベルの街路網の防災性についても多くの調査・研究が報告されている。その中、家田ら¹⁾は三宮等の4地区において調査を行い、幅員別にみた道路の被害状況には地区によってかなり差があり、幅員8m以上の道路では自動車が通行不能になることが少ない区域と、より被害が大きい地域があったことを示している。塚口ら^{2) 3)}は灘区六甲地区における道路の閉塞状況を空中写真から判読し、その閉塞の要因を分析した上、幅員12m以上の道路はほぼ自動車の通行が可能であったが、8m以下では

通行ができない場合が多かったことを明らかにした。さらに、震度、幅員、沿道の木造家屋延長率、歩道の有無などの要因を変数として、震災時街路の通行可否を判別するモデルを作成した。小谷ら⁴⁾は東灘区東部地域において調査・分析を行い、同様な結果を得ている。徳永ら⁵⁾は長田区の国道2号線沿道の区域を取り上げ、幅員8m以上であれば、自動車が通行可能であったと報告している。また、萩野・黒田・竹林⁶⁾は現地調査と空中写真の両方から道路の被災状況の分析を行い、空中写真判読による道路被災調査の信頼性を調べた。

阪神・淡路大震災における交通問題をネットワークの視点から捉えた研究も、いくつか発表されている。飯田・宇野ら⁷⁾は、道路網容量およびゾーン間交通の迂回率を用いて、震災後広域道路ネットワークの機能低下について分析を行った。また、青木・石田・大野⁸⁾は街路幅員と閉塞状況を調査し、避難行動を想定した街路網の安全性をシミュレーションの方法で考察した。

従来、災害時を含む非常時における道路網の連結性およびサービス水準に関しては、信頼性の概念がある^{9) ~ 19)}。信頼性とは、所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率のことを指している。この指標は両ノード間の評価が重点であり、それに計算時間の問題もあって、これまでは、広域や都市幹線レベルにおける重要区間についての評価を想定した研究が多かった。阪神・淡路大震災の交通

キーワード：防災計画、街路網計画

* 正員、工博、福山コンサルタント本社調査部

(住所：北九州市小倉北区片野新町1-11-4

Tel: 093-931-3101 Fax: 093-932-1282)

**正員、工博、立命館大学理工学部

(住所：滋賀県草津市野路東1-1

Tel: 0775-61-2735 Fax: 0775-61-2667)

システム問題を対象として、信頼性の概念を用いた研究として、若林²⁰⁾がある。この研究は、震災における交通システムの問題点を議論した上で、広域道路網の連結信頼性を計算し、信頼性を向上する観点から重要な区間を確率重要度で評価する方法を示している。

街路網レベルの防災性を考える場合、被災地以外の地域からすべてのノードへの緊急車両による到達可能性（あるいは連結性）が重要になってくる。本研究は、信頼性の考え方を踏まえ、地区レベルの街路網の防災性に関する1つの評価指標として、到達可能ノード率の指標を提案する。さらに、激震を受けた神戸市灘区の一部の市街地を対象とし、到達可能ノード率の指標を用いた街路網の評価・計画方法を検討する。

2. 到達可能ノード率の定義および計算方法

(1) 街路網の範囲

本研究は、大規模な災害が発生した後、緊急車両が人々の住居に直接アクセスすることを想定し、都市幹線道路で囲まれた地区における、幅員4m以上の街路で構成された街路網を対象とする。

(2) リンクの閉塞確率

本研究でのリンクの閉塞確率とは、災害時において、リンクの状況を通行可能と通行不能の2レベルで捉え、通行不能の状況が発生する確率のことを指す。ここでの通行不能とは、街路（リンク）そのものの損傷および沿道の構造物の倒壊に起因する自動車での通行不能に限る。本研究では、リンクの閉塞確率が与えられたとし、3章で示すように、同じ属性のリンクを母集団とし、その中に今回の地震で通行不能となったリンクの割合を当該属性のリンクの閉塞確率とする。

(3) 閉塞エリア

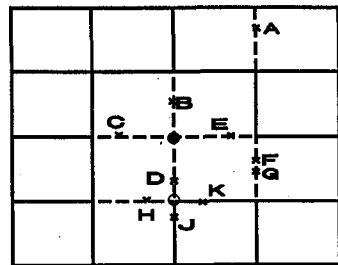
閉塞エリアとは、街路網の中で、緊急車両が到達できないエリアのことをいう。このため、本文で述べる閉塞エリア（あるいは到達不能ノード）は、特記しない限り、交通手段は車両であることを意味する。緊急車両の出動地点は被災地以外の地域とする。

また、物理的な閉塞と渋滞などによって事実上到達不可能の2種類の閉塞が考えられるが、本研究では、物理的な閉塞を対象とする。

前述のように、今回の大震災においても幅員12m～16m以上の道路はほとんど通行可能であったことが明らかにされており、幹線道路で構成された道路網は被災地との物理的な連結性が保たれていたと考えられるから、作業上は、対象エリアを囲む都市幹線道路の任意点から各エリアへの物理的連結性でそのエリアが閉塞しているか否かを判断することにした。

(4) 閉塞エリアと到達不能ノードの関係

ネットワークの視点から見れば、あるリンクの両端にあるノードが到達可能であれば、1カ所の家屋倒壊や路面損傷などによるリンクの通行不能は、閉塞エリアは形成しない。なぜなら、緊急車両が到達可能ノードを通じて、救援・救助が必要とする倒壊地点に到達することには影響がないからである。例えば、図1におけるA点が壊れている場合、両端のノードが到達可能であるので、リンクは通行不能であるが、その沿道へのアクセスは可能である。一方、ノードが到達不能であれば、ノードからノードの到達不能の理由となる倒壊（損傷）地点までのエリアは閉塞エリアになる。例えば、●を中心とするB、C、D、Eまでのエリアと○を中心とするD、H、J、Kのエリアである。



点線：通行不能リンク 実線：通行可能リンク
×：倒壊や損傷地点

図1 閉塞エリアと到達不能ノードの関係

このように、到達不能ノードは単なるその交差点が到達不能を表しているだけでなく、そのノードを

中心とするエリアが到達不能であることを表しているのである。当然ながら、倒壊や損傷の地点のリンク上における位置によって、そのエリアの範囲は変わる（例えば●と○の閉塞範囲の違い）。また、両端のノードが到達可能であっても、そのリンク上、1カ所以上の倒壊や損傷がある場合はその間が閉塞になる（例えばFとGの間）。しかし、これは1つ1つのノードを見た場合である。街路網全体の到達不能ノードで見れば、閉塞エリアの面積の誤差は打ち消すこともあると考えられる。また、地区レベルの街路網におけるリンクの長さは短いので、1つのリンクの通行不能は1カ所の倒壊や損傷によるものとして考えても差し支えないと思われる。

(5) 到達可能ノード率の定義および計算方法

本研究での到達可能ノード率とは街路網における自動車に到達可能ノード数がノード総数に占める割合とする。前述のように、ノードは単なる交差点ではなく、交差点を中心とするエリアであることから、ここで提案するノードの到達可能率は街路網全体の防災性に関する総合的な指標であると考えられる。

到達可能ノード率の計算方法は次で示すモンテカルロ直接サンプリング法²¹⁾を提案する。リンク閉塞確率 l_a ($0 \leq l_a \leq 1.0$, $a \in A$) は与件とする。

ただし、 A は街路網を構成するリンクの集合である。到達可能ノード率は次の方法で計算する。

- 1) 直接サンプリングの実行回数 $m = 0$ とする。
- 2) $m = m + 1$ とする。
- 3) すべてのリンクに対して、一様乱数 r_a

($0 \leq r_a \leq 1.0$) を発生させ、与えられたリンクの閉塞確率 l_a との比較によって、リンク a の通行可否を決める。ここで、 $0 \leq r_a \leq l_a$ の場合はリンク a を通行不可とし、 $l_a < r_a \leq 1.0$ の場合は通行可能とする。

- 3) 幹線道路の任意ノードから到達できるノードの個数を計算し、到達可能ノード率 $t_m = n_m / N$ を計算する。ただし、 N は幹線道路上のノードを除くネットワークにおけるノードの総数である。

- 4) m 回までの到達可能ノード率 $T_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i$ を

計算する。

- 5) 収束条件 $\frac{1}{T_{m-1}} |T_m - T_{m-1}| \leq \varepsilon$ を満足すれば、計

算を終了し、そうでなければ、2)へ戻る。ここで、 ε は収束判定値で、本研究では0.001とする。

3. 対象街路網の閉塞要因分析

(1) 対象街路網及びノードの閉塞状況

本研究の対象地区としては、今回の地震で震度7の被害を受けた神戸市灘区東部の山手幹線、將軍通り、国道2号線、主要地方道山麓線の4本の都市幹線道路で囲まれた市街地を設定した（東西約1300m、南北約600m）。このエリアにおける幅員4m以上の街路のすべてを取り上げて街路網を構成した（図2）。街路の閉塞状況は車両が通行可能と通行不可

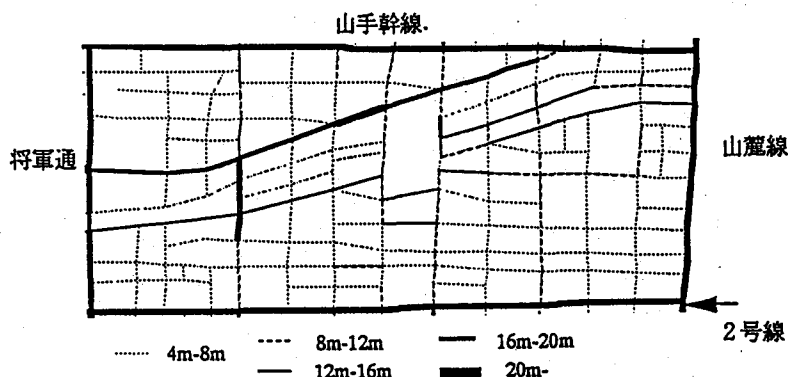


図2 対象街路網

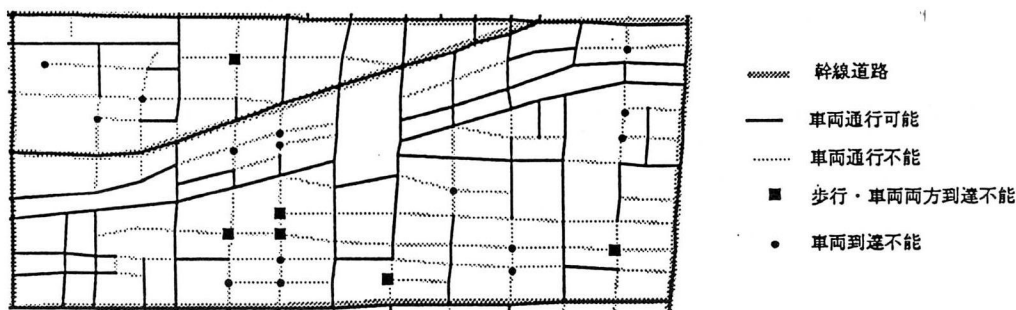


図3 対象街路網の閉塞状況

能の2レベルに分け、1995年1月18日にアジア航測によって撮影された空中写真から判読した²⁾。対象街路網及びそのリンクの被災状況、そしてノードの閉塞状況は図3に示すとおりである。上で述べた都市幹線道路上のノードを除く合計116個のノードの内、20個のノードが幹線道路から自動車で到達不能なノードであり、到達可能ノード率が82.7%であった。

(2) ノードの閉塞要因分析

ノードが到達不能になった直接的な原因は結合しているリンクのすべてが建物の倒壊等によって通行不能になったことであるが、このような状況が街路網構成によって影響されるか否かを分析することも必要である。ノードの到達可否に関係があると思われる指標として、次に示す3つの視点から計11個の指標を考える。

1) ノードに起終点をもつリンクの特徴

- 指標1 リンク数
- 指標2 最長リンクのリンク長
- 指標3 最短リンクのリンク長
- 指標4 リンク長の総和
- 指標5 リンク長の平均
- 指標6 リンクの最大幅員
- 指標7 リンクの最小幅員
- 指標8 幅員の総和

2) ノードに起終点をもつリンクの土地利用の特徴

- 指標9 リンク木造家屋延長率の平均値

3) ノードと幹線道路との位置関係

表1 到達可能ノードと不能ノードの差の検定

指標	t値	境界値(5%)
1 リンク数	1.082	2.06
2 最長リンク	0.961	2.017
3 最短リンク	-0.51	2.064
4 リンク総長	1.061	2.045
5 リンク長平均	0.338	2.04
6 最大幅員	6.636	1.981
7 最小幅員	3.422	1.984
8 幅員総和	5.609	1.989
9 木造家屋延長率	-2.713	2.035
10 幹線経路距離	-0.003	2.056
11 幹線直線距離	0.319	2.048

指標10 ノードから幹線道路までの経路距離

指標11 ノードから幹線道路までの直線距離

対象街路網のノード(幹線道路上のノードを除く)を到達可能ノードと到達不能ノードとの2グループに分け、上述の指標それぞれについて、両グループの平均に差があるか否かをt検定によって調べた。それぞれのt値およびその有意性を表1に示す。

同表から分かるように、ノードに起終点をもつリンクの特徴に関する指標のうち、幅員に関する3つの指標すべて(指標6～8)および木造家屋延長率の指標(指標9)において両グループの間に統計的に有意な差がある。これに対して、リンク数や長さに関する指標(1～5)および幹線道路との距離を示す指標(10、11)は有意でないという結果が得られた。

理論的には、結合リンクの数(指標1)が多け

表2 幅員に関する指標のランク別ノード数

最大幅員	到達可能	不能	不能率	最小幅員	到達可能	不能	不能率	幅員総和	到達可能	不能	不能率
4-6m	11	4	26.7%	4-6m	67	19	22.1%	0-8m	0	1	100%
6-8m	27	11	28.9%	6-8m	22	2	8.3%	8-16m	9	1	10%
8-10m	12	5	29.4%	8-10m	4	0	0%	16-24m	30	14	41.2%
10-12m	8	1	11.1%	10-12m	2	0	0%	24-32m	21	5	19.2%
12-16m	22	0	0%	12-16m	3	0	0%	32m-	38	0	0%
16m-	18	0	0%	16m-	0	0	0%	合計	98	21	17.6%
合計	98	21	17.6%	合計	98	21	17.6%				

表4 リンク数の木造家屋延長率と閉塞状況のクロス表

木造家屋率%	4m-6m未満		6m-8m未満		8m-10m未満		10m-12m未満		12m以上		幅員合計	
	閉塞率	内訳	閉塞率	内訳	閉塞率	内訳	閉塞率	内訳	閉塞率	内訳	閉塞率	内訳
0-20	0.750	3/4	0.111	1/9	0.429	3/7	0.000	0/6	0.000	0/11	0.189	7/37
20-40	0.435	10/23	0.500	10/20	0.300	3/10	0.167	1/6	0.000	0/7	0.364	24/66
40-60	0.665	19/29	0.800	16/20	0.500	2/4	0.600	3/5	0.000	0/6	0.625	40/64
60-80	0.773	17/22	0.700	7/10	-	0/0	0.000	0/2	0.000	0/11	0.533	24/45
80-100	0.667	6/9	0.571	4/7	-	0/0	0.000	0/2	0.000	0/1	0.526	10/19
木造合計	0.632	55/87	0.576	38/66	0.381	8/21	0.190	4/21	0.000	0/36	0.455	105/231

れば多いほど閉塞しにくい、対象街路網のほとんどのノードの結合リンク数が4になっており、結合リンク数に極端な差がないことが、ノードの到達可否に影響がないと判定された理由であると思われる。リンク長に関する指標が有意でないことも同様の理由であると考えられる。

表2は両グループ間において統計的に有意な差があると判定された最大幅員、最小幅員、幅員総和のそれぞれの指標について、幅員ランク別の到達可能ノード数と到達不能ノード数を求めたものである。これより、次のことが分かる。

- 1) 最大幅員の指標を見てみると、当然のことながら最大幅員ランクが大きくなるほど閉塞しにくくなる。最大幅員が12m以上であればすべてのノードが到達可能ノードであった。言い換えれば、幹線道路から幅員12m以上の街路でつながっている地域は閉塞しにくいということが言える。
- 2) 最小幅員の指標を見てみると、最小幅員が4～6mのノードは閉塞する割合がかなり高くなる。しかし、最小幅員が6～8mになれば閉塞率が小さくなり、幅員8m以上の街路で構成されたノードは閉塞しにくいことが言える。

表3 木造家屋延長率別内訳

木造家屋延長率	到達可能	到達不能	到達不能率
0-20%	13(13.27%)	0(0%)	0%
20-40%	33(33.67%)	4(19.05%)	10.8%
40-60%	33(33.67%)	9(42.86%)	21.4%
60-80%	17(17.35%)	6(28.57%)	26.1%
80-100%	2(2.04%)	2(9.52%)	50%
合計	98(100%)	21(100%)	17.6%

- 3) 幅員総和の指標を見てみると、幅員総和が32m以上であればほぼ閉塞しないと言える。

表3は、2種類のノードの木造家屋延長率別の内訳を示している。到達不能ノードの80%強（網かけ文字部分の合計）が木造家屋延長率40%以上を占めたノードであることが分かる。木造家屋延長率の各レベルごとに到達不能率（到達不能ノード数／ノード数合計）を見てみると、木造家屋延長率が高いほど閉塞しやすい傾向があることが分かる。

以上の分析から、ノードの到達可否状況はノードに結合するリンクの幅員構成および沿道の木造家屋延長率によって影響されることが分かる。

(3) リンクの閉塞確率

表4は研究対象地区におけるリンクの木造家屋延長率と閉塞状況のクロス表である。幅員の合計欄を見れば、木造家屋延長率の増加につれて閉塞率も増加する傾向が明らかである。幅員ランク別で見ると、次の特徴がまとめられる。

a) 幅員4m-6mのリンクを見ると、木造家屋率に関わらず全体的に高い閉塞率を有しており、木造家屋率が0-40%の場合の平均閉塞確率が48.1%となっており、木造家屋率が40%以上の場合には平均閉塞確率が70.0%となっている。

6m-8mのリンクの場合も、木造家屋率の増加につれて、閉塞率が高くなる傾向が見られるが、木造家屋率を0-40%と40-100%の2ランクに分けてみると、閉塞確率の平均値はそれぞれ37.9%と73.0%となっている。

b) 幅員8m-10mと10m-12mの2ランクの街路は、木造家屋延長率と閉塞率の相関関係には明らかな相関関係は見えない。平均値で見れば、8m-10mランクの閉塞確率は38.1%、10m-12mランクのそれは19.0%となっている。

c) 幅員12m以上のリンクは、木造家屋延長率に関わらず、閉塞率はすべて0.0となっている。

以上の3点を総合すると、リンクの閉塞確率が、幅員、沿道の木造家屋率とは大まかに表5の関係がまとめられる。幅員8m以下のリンクの閉塞確率は主に沿道の木造家屋延長率に左右される。木造家屋延長率が40%以下の場合には閉塞確率が幅員4m-

6mのリンクと幅員6m-8mのリンクそれぞれ48.1%と37.9%で、木造家屋延長率が40%以上の場合には両ランクほぼ同じで、平均して71.1%の割合で閉塞している。それには道路の幅員が8m以下の場合、沿道の建物が倒れていれば、瓦礫などで4mの道路も8m未満の道路でも同じく閉塞するという理由が挙げられよう。一方、8m-10m、10m-12mの2ランクについては、沿道の木造家屋延長率と閉塞率には明らかな相関関係は見えないことには、サンプル数が少ないことも理由であろうが、幅員が広いので、片側の家屋が倒れても車の通行には影響が少ないからであると考えられる。

表5 閉塞確率と木造家屋延長率、幅員との関係

木造家屋率	4m-6m	6m-8m	8m-10m	10m-12m	12m以上
0-40%	0.481	0.379	0.381	0.190	0.000
40-100%	0.701				

表5に基づいてリンクの閉塞確率を与え、本章で示した計算方法で対象街路網の到達可能ノード率を再現してみた。その結果、到達可能ノード率は83.1%で、現状の82.2%に比べてかなり良い再現率を得られたので、次章では、表5を用いて対象道路網の計画・評価を行う。

4. 到達可能ノード率による防災性計画・評価

本章では、対象街路網の防災性を向上するため、街路幅員と木造家屋率を向上させることを前

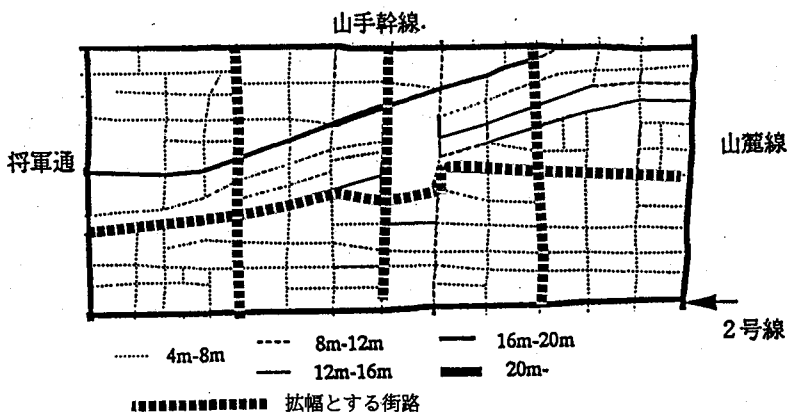


図4 中街路の位置

提とし、街路網計画のいくつかの代替案を作成し、到達可能ノード率の指標を用いて、各代替案の防災性について比較を行う。

街路幅員については、図4のように300m間隔で防災性の高い街路（中街路）を作ること考える。ここで、300mを間隔として代替案を考えるのは、著者らの対象街路網に対してシミュレーションを行った結果、この間隔が到達可能性からみて最も良い効率があるからである²²⁾。中街路の幅員は現在の街路からの拡張を考えて、1)最低8m、2)最低10m、3)最低12mの3つのシナリオを設定する。幅員8m以上の街路の閉塞確率は沿道の木造家屋率との関係が薄いことから、これらの街路の沿道の木造家屋率には特に制限を設けない。それ以外の街路に対して、幅員8m未満の場合を対象として、木造家屋率を1)現状保持、2)40%以上の場合をそれ以下に改良する、の2つのケースを考える。このように、代替案は表6で示すように、7ケースになる。なお、各ケースにおけるリンクの閉塞確率は、改善後のリンクの幅員および木造家屋率によって、表5の関係に基づいて与える。

表6 対象街路網の計画案

ケース名	中街路の幅員	幅員8m以下の 街路沿道の木 造家屋率	到達可能 ノード率
A	8m以上	現状	85.65%
B	10m以上	現状	94.35%
C	12m以上	現状	95.09%
D	現状	40%以下	98.23%
E	8m以上	40%以下	98.69%
F	10m以上	40%以下	98.73%
G	12m以上	40%以下	98.78%

この7つのケースそれぞれに対して、ノードの到達可能ノード率の計算結果も表6で示している。

計算結果からみれば、中街路の幅員を8m以上にするだけでは、到達可能ノード率向上の効果はあまり期待できない（ケースA）。それに対して、中街路の幅員が10m以上になると（ケースB、C）、到達可能ノード率が95%前後に達することができる。中街路を12m以上とする場合はそのリンクの閉塞確率は0.0としており、それ以上低い閉塞確率はないので、中街路の拡張による到達可

能ノード率の向上は95%が限度であることも分かる。

一方、8m未満の細街路沿道の木造家屋率を向上させる4つのケース（ケースD、E、F、G）はほぼ同じく、すべて98%以上の高い到達可能ノード率になっている。したがって、8m未満の細街路沿道の木造家屋率を40%以下の場合、中街路とされる街路の拡張は必要としないという結果になっている。

5. おわりに

本研究は、信頼性の考え方を踏まえ、地区レベルの街路網の防災性に関する1つの評価指標として、到達可能ノード率の指標を提案した。さらに、激震を受けた神戸市灘区の一部の市街地を対象とし、地区の骨格となる中街路の建設や細街路沿道の構造物の堅牢化などを考えた計画案を設定し、その到達可能ノード率の指標を用いた街路網の評価・計画方法を試み、震災時に閉塞しにくい街路網のための整備方向を示した。

本研究で提案した到達可能ノード率というのは、車両で到達可能なノードがノード総数に占める割合であるとして定義しているが、その理論づけ、さらに実際の計画上の意義も今後検討する余地があると思われる。また、この指標の計算の際に、与件とされる街路（リンク）の閉塞確率の与え方についても研究する必要があるであろう。

本研究の遂行にあたり、福山コンサルタント山本洋一氏に有益なご意見をいただいた。感謝の意を記す。

参考文献

- 1) 家田仁・上西周子・猪股隆行・鈴木忠徳：阪神大震災における街路機能障害に関する研究、土木計画学研究・講演集、No.18、1995。
- 2) 塚口博司・戸田哲男・中辻清恵：阪神・淡路大震災における道路の被害状況と発災直後の自動車流動状況、土木計画学研究・講演集、No.18、1995。
- 3) 塚口博司・戸田哲男・中辻清恵：阪神・淡路大

- 震災における道路閉塞状況に関する研究、IATSS Review、1996。
- 4) 小谷通泰・前野達也・伊藤美由紀：震災による地区道路網の閉塞状況に関する分析、交通工学研究発表会論文集、1996。
- 5) 徳永幸久・武政攻・細見隆：被害状況に関する基礎的分析、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、1996。
- 6) 萩野啓・黒田勝彦・竹林幹雄：航空写真を用いた道路被災状況の分析、土木学会第51回学術講演会講演概要集(4)、pp. 42-43、1996。
- 7) 飯田恭敬・宇野伸広・牛場高志：阪神・淡路大震災時の道路網機能低下に関する一考察、土木計画学研究・講演集、No. 19(2)、pp. 343-346、1996。
- 8) 青木英輔・石田東生・大野栄治：震災時の街路閉塞による避難迂回からみた街路網の安全性、土木計画学研究・講演集、No. 19(2)、1996。
- 9) 小林正美：道路網・ネットワークシステムの信頼性解析法に関する研究、都市計画別冊、No. 15、pp. 385-390、1980。
- 10) 岡田憲夫・若林拓史・多々納裕一：レビュー研究、社会基盤整備の計画・管理のためのリスク分析のアプローチ、水利用と道路利用問題を対象として、土木学会論文集、No. 464/IV-19、pp. 33-42、1993。
- 11) 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、No. 327、pp. 1-12、1982。
- 12) 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、Vol. 19、No. 5、pp. 3-17、1984。
- 13) 若林拓史：道路網の信頼性解析に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1989年12月。
- 14) 飯田恭敬・若林拓史：ODパターンと道路網パターンの相違による道路網信頼性のマクロ的考察、交通工学、Vol. 23、No. 3、pp. 9-19、1988。
- 15) 枝村俊郎・森津秀夫・土井元治・中川勝一郎：交通ネットワークにおける対災害信頼性の最適配分、第3回土木計画学研究発表会講演集、pp. 391-403、1980。
- 16) 高山純一：異常気象時における道路網の連結性評価法、土木計画学研究・講演集12、pp. 559-565、1989。
- 17) 木俣昇・石橋聡：地震時緊急路網のシステム信頼性評価に関する基礎的研究、土木計画学研究・論文集6、pp. 145-152、1988。
- 18) 朝倉朝夫・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、No. 12、pp. 475-484、1995。
- 19) Fenves, S.J. & Law, K.H. (1979): Expected Flow in a Transportation Network, Proceedings of the 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
- 20) 若林拓史：阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価、土木計画学研究・論文集、No. 13、1996。
- 21) 若林拓史・飯田恭敬・福島博：道路網の信頼性解析に対するモンテカルロ法の適用、土木計画学研究・講演集、pp. 259-266、No. 11、1988。
- 22) 李燕・塚口博司：土木計画学研究・講演集、No. 19(2)、1996。