

永久保存



I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3589号



土木研究所資料

道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究
(その1)ネットワーク耐震性指標の提案とその計算方法の開発

平成10年9月

建設省土木研究所
耐震技術研究センター防災技術課



Copyright © (1998) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究

(その1) ネットワーク耐震性指標の提案とその計算方法の開発

防災技術課 課 長 杉田秀樹

主任研究員 野崎智文

要 旨

大規模地震が発生した場合、地震発生直後の救急・救援活動、緊急輸送活動を支える道路ネットワークの機能は非常に重要であり、ネットワーク全体としての耐震性を確保する必要がある。本研究においては、道路ネットワークの各区間の被災リスクを考慮し、ネットワーク全体としての耐震性、各道路区間の耐震性に関する重要度を定量的に評価する手法を提案するとともに、いくつかのモデルネットワークに対してその手法を適用し、妥当性を確認した。

キーワード：道路ネットワーク、耐震性、交通推計、リスク評価

目 次

1. 序 論	1
2. 道路ネットワーク耐震性の概念	4
2.1 基本概念	4
2.2 指標計算の流れ	5
3. 指標の計算方法	7
3.1 指標の計算方法	7
3.1.1 ネットワーク耐震性	7
3.1.2 区間重要性	9
3.2 防災活動の決定	10
3.2.1 防災拠点連絡マトリックスおよび発生集中量	10
3.2.2 防災拠点選択	12
3.3 バックグラウンド交通の影響を受けたリンク走行時間の決定	15
4. モデルケーススタディー	17
4.1 ケース設定	17
4.1.1 モデルネットワークの設定	17
4.1.2 防災活動交通 OD の算定	19
4.1.3 バックグラウンド交通に基づくリンク走行速度の設定方法	22
4.1.4 防災活動の単位効果量関数の設定	23
4.1.5 リンクカットのパターン（被災パターン）	23
4.1.6 区間重要性の試算方法	26
4.2 試算結果	27
4.2.1 ネットワーク耐震性	27
4.2.2 区間重要性	34
5. 結 論	37
付 表	39

1. 序 論

道路施設や沿道・占用施設が地震によって被災した場合、当該道路区間における道路交通が制限され、あるいは通行が不可能となる。地震直後にあっては、救急、消火といった一刻を争う対策活動が必要となるが、道路の被害がこれらの活動に与える影響は深刻である。兵庫県南部地震においては、道路施設の被害や交通渋滞によってこのような活動が制限された（写真 1）。これを教訓として、現在各地方公共団体等において、地震後に発生する緊急輸送を円滑かつ確実に実施するための緊急輸送道路ネットワーク計画が策定されており、その耐震性を高めることが要請されている。



写真 1 地震直後の交通渋滞状況

さて一般的に道路の耐震性を論ずる場合、橋梁、盛土など、道路の区間における施設の被害の耐震性を高めることを中心に論じられてきたが、そもそも道路とは、ネットワークとして出発点から到着点までの連結が確保されて初めてその機能を果たしたといえる。たとえばネットワーク中のある区間に存在する橋梁の耐震性を高めたとしても、同じ区間あるいは出発点から到着点までの間の他の区間に存在する他の橋梁が被災し、通行不能になった場合、そのルートでは目的の交通は到達できなくなる。最悪の場合は出発点自体に他のルートがなく孤立してしまうか、たとえ他のルートが残っていたとしても、迂回のために長い時間を要し、必要な防災活動が不可能となってしまうことがありうる。地震直後の緊急活動は前述の救急・消火活動のように短時間のうちに実施されなければならないものがほとんどであり、道路被害の影響は大きい。

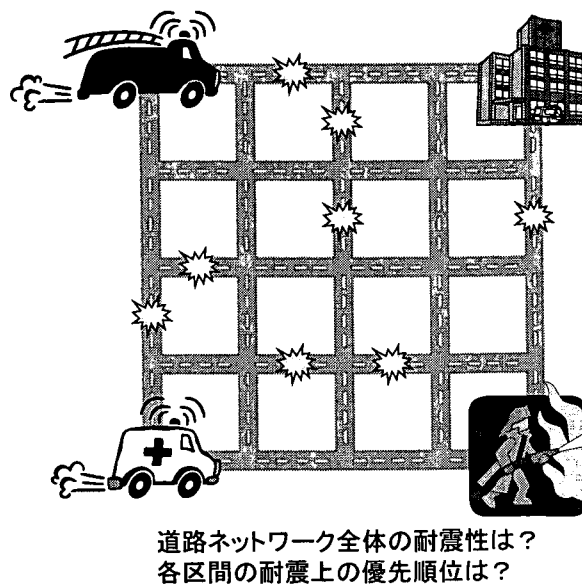


図 1.1 道路ネットワーク・システムとしての耐震性を考える必要性

このような観点に立つて、道路計画者が地震防災対策に配慮しながら道路のネットワーク／ルートを計画したり道路施設の耐震補強戦略を計画する場合には、対象とするエリア全体としての社会経済的影響を目的関数として計画を進めなければならないが、実際の計画においては、道路のネットワーク性は種級区分などに基づいた定性的な論議の域を出ないか、あるいは定量的なデータを用いることがあっても、平常時のネットワーク状態における交通量・混雑度などの値に限られている。また補強対策についても、ネットワーク全体としての視点よりは、もっぱら道路区間を構成する施設等の耐震設計法に重点が置かれている。

学術的な面では、たとえばネットワークの信頼性については、道路のみならず他のライフラインに関しても研究がなされているところではあるが²³⁾、道路ネットワークの場合、需要交通のルート選択問題、交通需要量そのものの予測困難性といった特徴は、物理法則で表現しやすい他のライフライン・ネットワークに対して、道路ネットワークの耐震性を検討する際の障壁となる。道路ネットワークの耐震性については、交通推計手法、ネットワーク解析に基づいた研究がすすめられており⁴⁾⁵⁾⁶⁾、道路ネットワークの耐震性に関する定量的な評価が重視されつつある。ただし現在のところ、これらの手法は理論的なアプローチが中心であり、実際のネットワークへの適用にあたっては、手法に含まれる関数形、パラメーターの計測・同定方法を検討しなければならない場合がある。

一方、橋梁、土構造物等の道路施設の耐震補強にあたって、道路のネットワーク性を確保することは実用面でも指摘されており⁷⁾、海外ではその具体的なイメージが震前対策のマニュアルに取り入れられつつある例もある。たとえばアメリカ合衆国連邦道路庁(Federal Highway Administration: FHWA)による道路橋の耐震補強マニュアル⁸⁾では、ネットワーク中の複数の橋梁の耐震性確保に際して、互

いの影響を考慮すべきことが明確に述べられている。このように道路を個々の区間、施設のみで捉えるのではなく、ネットワークシステムとして捉えて地震後の機能を論じることは、今後さらに重要となってくると言えよう。

本研究においては、地震が発生し、道路の複数の区間で被害が発生した場合のネットワーク全体としての耐震性を評価する指標（道路ネットワーク耐震性指標、*Seismic Performance: SP*）を提案する。また、その考えを発展させて、被災した区間のネットワークにおける重要性を評価する指標（区間重要性指標、*Link Importance: LI*）についても検討した。その際、既存の交通推計手法を応用することにより、複雑な理論に基づく多数のパラメーターを要求することを避けた。さらに三種類のモデル・ネットワークを設定し、これらについてネットワーク耐震性指標、区間重要性指標を計算し、その結果を常識的あるいは直感的な観点から吟味し、その妥当性および問題点を確認した。

2. 道路ネットワーク耐震性の概念

2.1 基本概念

道路ネットワーク耐震性および道路区間重要性の活用イメージを図 2.1 に示す。まず対象エリア内において、平常時の道路ネットワークと、震災後に道路の各区間が被災した状態のネットワークが与えられているとする。ここで被災後のネットワークは、地域の地震被害想定、補強計画などに基づいた区間のリスクから別途得られているものとする。このネットワークデータに、人口、防災拠点位置などのデータを組み合わせて、ネットワーク耐震性指標(SP)および区間重要性指標(LI)が求められる。

まず、ネットワーク耐震性指標は、対象となる道路ネットワークの与えられた被災パターンに対して一つ決定される。この指標は、ネットワーク内の各区間の地震に対する脆弱性・耐震性をネットワーク全体に対して総合的に定量化したものであり、ネットワークの形態や防災拠点の配置によっても変化する。一方区間重要性は、被災後のネットワークにおける被災区間一つ一つに対して計算され、被災した区間が被災を免れた場合の（すなわちその区間を耐震補強することの）効果を定量化したものといえる。計画者は、ネットワーク耐震性指標を参考にしながら道路のネットワーク形態や耐震補強パターンを検討し、場合によっては拠点立地のパターンについても吟味する。その後、区間重要性指標を参考にしながら脆弱な区間の耐震補強の優先順位などについて意思決定を行う。

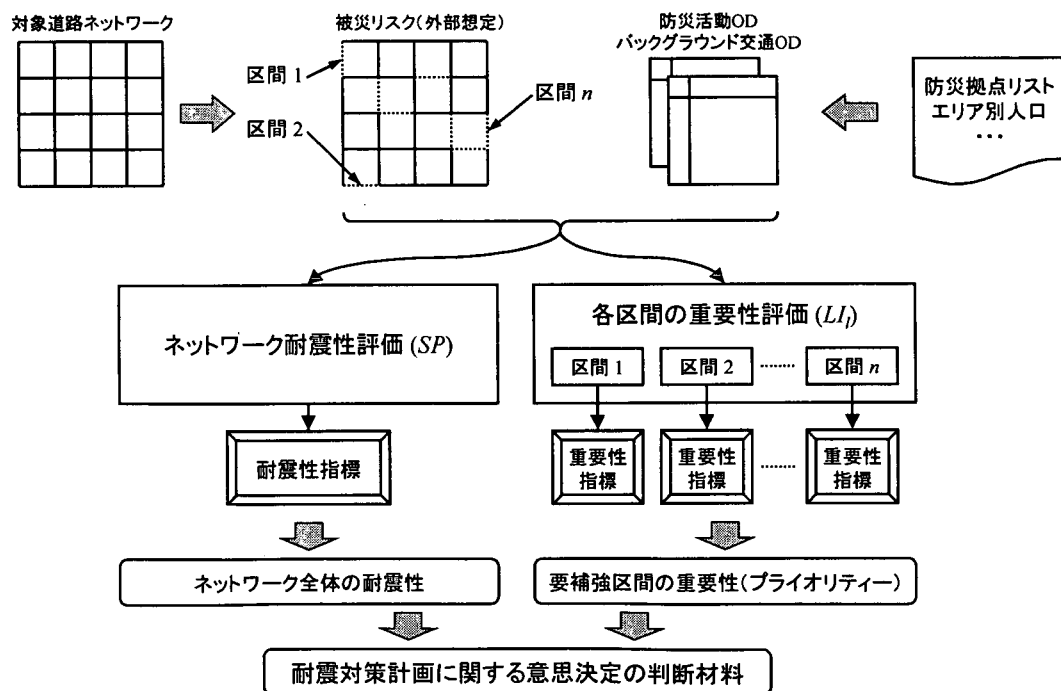


図 2.1 道路ネットワーク耐震性評価の活用イメージ

もちろんこれらの指標の計算過程にはいくつかのモデルが仮定されており、定量化された指標を絶対として機械的に計画を進めるわけではないが、第4章でも述べるようにこれらの手法はこれまで定性的あるいは経験的に述べられている結論と一致しており、現実の複雑なネットワークに対しても冷静な判断材料を与えるものと期待される。

2.2 指標計算の流れ

指標計算の流れを図 2.2 に示す。まず被災後のネットワークと防災拠点配置、人口等のデータに基づいて、当該被災パターンにおけるネットワーク耐震性指標 SP が計算される。この指標は、ネットワークを利用する救急、消火といった防災活動交通に関してその活動が達成できたかどうかという効果の量を集計することによって得られる。この効果量は、後述するように着目する防災活動交通の旅行時間によって変化する値であり、旅行時間が長くなるほど活動目的の達成度が低くなるという考え方に基づいて算出される。

次にその被災パターンにおいて、被災しているある区間（リンク） l が被災しなかったものとして、上と同じ OD を用いてネットワーク耐震性指標 SP_l を計算し、その差を取ることで区間重要性指標 LI_l とする。いいかえれば、区間重要性とは、被災ネットワーク中の被災区間を一つ改善したことによる全体の耐震性の差であり、当該被災リンクの復活によるネットワーク耐震性の感度を表わしたものである。

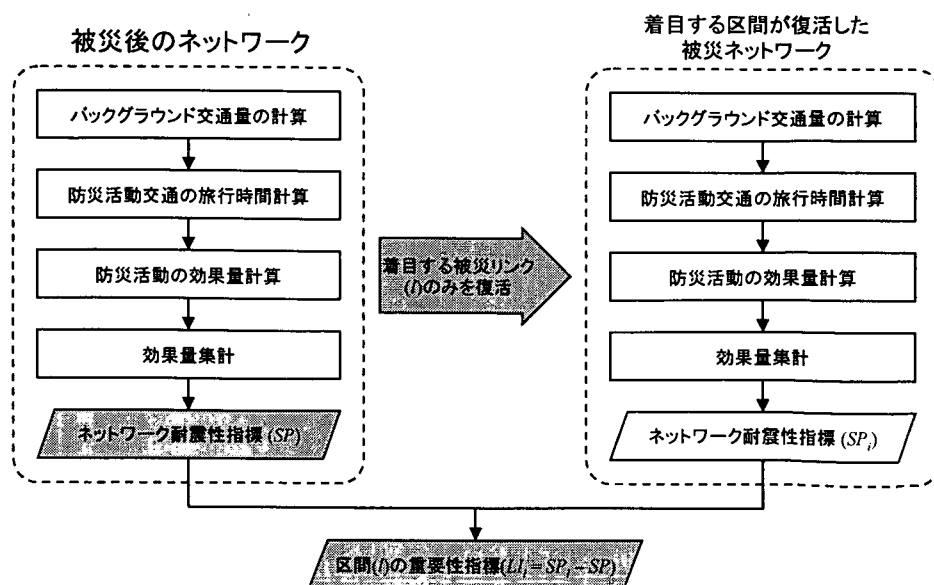


図 2.2 指標計算の流れ

ただし SP 、 LI_i は救急、消火といった防災活動目的ごとに求められるため、実際はあるネットワークの被災パターンに対して防災活動目的の種類の数だけ指標が得られる。またこれらの指標は、防災活動が出発地から目的地までに要する旅行時間に基づいて計算されるが、その旅行時間は、避難、見舞いといった防災活動とは直接関係がない交通（バックグラウンド交通）の影響によって変化する。したがって本研究におけるネットワーク耐震性指標、区間重要性指標は、道路ネットワークの形状および被災パターンの影響のみならず、地震発生直後の渋滞等による影響も加味したものである。

以上のことを念頭に置き、次章において指標の導出方法およびこれに必要な各種の処理について説明する。それらは①ネットワーク耐震性指標およびこれに基づく区間重要性指標の導出方法、②耐震性指標導出に必要な防災活動の所用時間の計算方法であり、②はさらに防災活動そのものの同定方法と防災活動に影響を与えるバックグラウンド交通の考え方からなる。

3. 指標の計算方法

3.1 指標の計算方法

3.1.1 ネットワーク耐震性

ある対象エリアにおいて、道路ネットワークの各リンクの被災パターンと、そのパターンにおける各リンクの走行時間（すなわちリンク・インピーダンス） $t_{L=l}$ が定まっているとする。防災活動交通が発生あるいは集中するノード（セントロイド）を i, j とし i から j へ到達するルートを r で表わすと、このルート上の旅行時間 $t_{R=r}$ は、ルート上のリンク走行時間の総和を取ることによって得られる（図 3.1）。

$$t_{R=r} = \sum_{l \in r} t_{L=l} \quad (3.1)$$

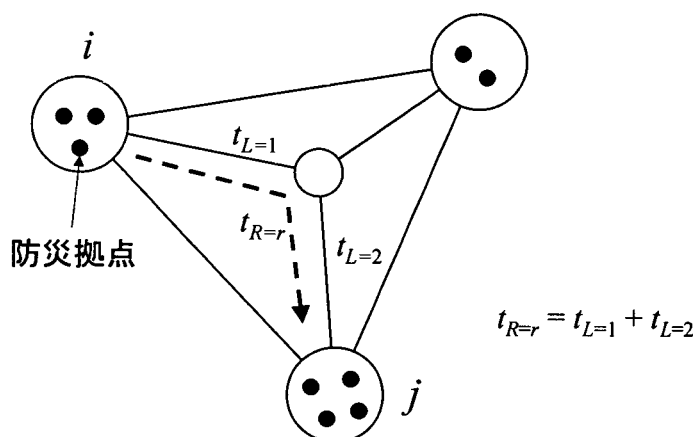


図 3.1 リンク走行時間とルート旅行時間

さて、防災活動の発ゾーンから着ゾーンへの所用時間すなわちルートの旅行時間は、ルートごとに一つ定まり防災活動の種類によらないが、防災活動の種類によっては、その時間では活動の効果がなない場合や活動の効果が低減することがある。たとえば救急活動の場合、患者の輸送に要する時間が長すぎると患者の生命のリスクが高くなるのがその例である。同様のことは消火、応急対策資材や緊急物資の輸送活動についてもいえる。この効果を定量的に表わすため、ここで「防災活動効果量」という考えを導入する。まず、ある防災活動目的 k について、ルート旅行時間（あるいは OD 間旅行時間）に対して単位防災活動効果量 $E^k(t)$ を図 3.2 のように定義する。この $E^k(t)$ は、あるルートを利用する防災活動交通一台あたりの効果量を表わすための単位量である。目的 k の活動は、その輸送の所用時間すなわち旅行時間 t が $0 \sim t_0$ の間にある場合は目的が満足され ($E^k(t) = 1$)、それを超えて $t_{\max}$ になるまでは効果が低減する。また旅行時間がそれ以上になると、防災活動の目的は満足されなくなる ($E^k(t) =$

0)。この単位効果量は、防災活動の種類 k によって異なる形をとり、より緊急性の高い活動に対しては t_0 、 $t_{\max}$ は小さな値をとる。この単位効果量は、朝倉らによって「稼働・停止関数」として導入されているものと類似しているが、ここでは稼働と停止の中間状態を考えている。

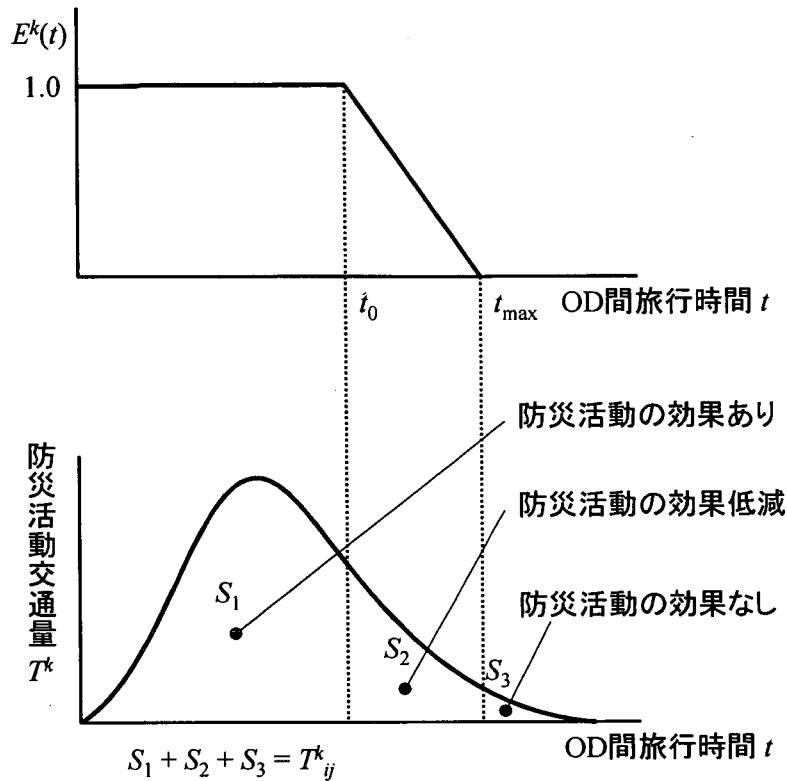


図 3.2 防災活動効果量の考え方

一方、ネットワーク中には、防災活動 k に対応する防災拠点、被災地が複数存在し、その間の防災活動交通は拠点・被災地間のルートによって異なる旅行時間を持つ。これは旅行時間 t に関する交通量の頻度分布 $T^k(t)$ として表わされ、たとえば図 3.2 の下ようになる。したがって、ネットワーク全体に対する目的 k の防災活動効果量の総量 E_{TOT}^k は、図 3.2 の上の単位効果量と下の頻度分布を乗じて合計することによって得られる。

$$E_{TOT}^k = \int_0^{\infty} E^k(t) T^k(t) dt \quad (3.2)$$

この目的別総防災活動効果量は、ネットワーク中の着目する防災活動の満足度を表わしたものと見え、道路ネットワーク耐震性指標として用いることができる。ただし、任意の規模の交通量、ネットワークについて指標を一般化するため、指標 SP^k としては、 E_{TOT}^k を目的 k の総交通量 T_{TOT}^k で除して、無次元化したものと定義する。

$$SP^k = \frac{E_{TOT}^k}{T_{TOT}^k} = \frac{\int_0^\infty E^k(t_r) T^k(t_r) dt_r}{\int_0^\infty T^k(t_r) dt_r} \quad (3.3)$$

すなわち SP^k は 0~1 の範囲の値をとる。実際の計算では、各 OD ペア（出発ゾーン i 、到着ゾーン j ）に対応するルートごとに防災活動交通の交通量 $T_{ij(R=r)}^k$ とそのルート上の旅行時間 $t_{ij(R=r)}$ が計算され、それらを乗じたものに、各旅行時間に対応する単位効果量の計算値を乗じて総和を取ることで指標を計算する。

$$SP^k = \frac{\sum_i \sum_j \sum_r E^k(t_{ij(R=r)}) T_{ij(R=r)}^k}{\sum_i \sum_j T_{ij}^k} \quad (3.4)$$

ただし、OD 間の旅行時間 t_{ij} がユーザー均衡の仮定に基づいて算出されているならば、発ゾーン i と着ゾーン j 持つ異なるルート上で t_{ij} は等しくなるため、式(3.4)は次式のように簡略化される。

$$SP^k = \frac{\sum_i \sum_j E^k(t_{ij}) T_{ij}^k}{\sum_i \sum_j T_{ij}^k} \quad (3.5)$$

3.1.2 区間重要性

区間重要性の定義には様々なものが考えられるが、ここでは、被災後のネットワークにおける被災区間について重要性を考えることとし、被災後のネットワーク状態における耐震性と、その状態から着目する被災区間を復活させたネットワークの耐震性を比較することによって、重要性を定量評価する（図 3.3）。

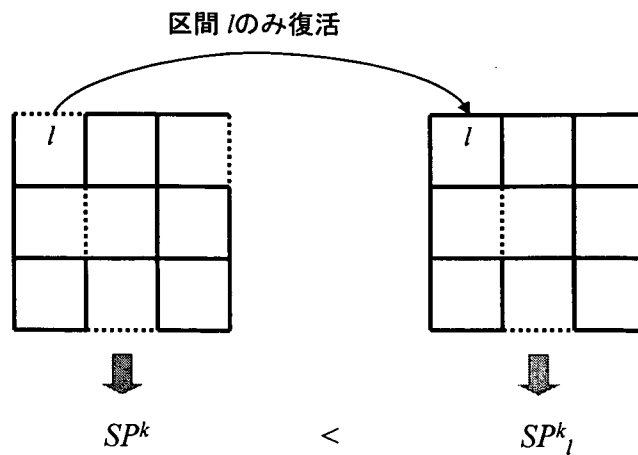


図 3.3 区間重要性の算法

すなわち与えられた被災パターンの、目的 k に関するネットワーク耐震性を SP^k 、その状態から区間 l のみを復活させたネットワークの耐震性を SP_l^k とすると、区間 l の防災活動目的 k に関する重要性 LI_l^k は式(3.6)で得られる。

$$LI_l^k = SP_l^k - SP^k \quad (3.6)$$

3.2 防災活動の決定

3.2.1 防災拠点連絡マトリックスおよび発生集中量

ネットワーク耐震性指標は、被災ネットワークにおける防災活動交通の発ゾーンから着ゾーン間の交通量と旅行時間に基づき計算されることを示した。すなわち指標計算のためには、発ゾーンから着ゾーンへ向かう各防災活動の交通量 T_{ij}^* が確定しており、またその交通のゾーン間旅行時間 t_{ij} が特定されている必要がある。このうち後者のリンク走行時間については 3.3 で述べることにし、本節および次節においては防災活動交通量 T_{ij}^* の設定方法および配分方法について述べる。

一般的な交通推計は、①各ゾーンにおける発生集中量の推計、②ゾーン間の交通量分配（OD 分配）そして③OD 交通量のネットワーク上への配分といった手続きで行われる。交通機関として、自動車、鉄道といった複数の交通機関がある場合には交通機関分担が考慮されることもあるが、本研究においては自動車交通を対象とすることとし、算定は①～③のみを考慮することとする。このうち本項では発生集中量について考える。

震災時の防災活動は、病院、消防署などの活動拠点や港湾等の交通結節点を中心として展開されることが想定され、これらの施設は各地方公共団体の地域防災計画において防災拠点として組み入れられている。そこで本研究の方法では、これらの防災拠点および防災活動の需要が発生する被災地を地震直後に連結する必要があると考え、それらの間の連結必要性を決定する。その方法は、防災計画における拠点および被災地を縦、横の要素にとり、連絡が必要な要素に●印を付すというものであり、ここではこの表を「拠点間連絡マトリックス」と呼ぶことにする。拠点間連絡マトリックスの例を次ページ表 3.1 に示す。

この拠点間連絡マトリックスは、様々な防災活動目的において連絡が必要な拠点を定性的に示したものである。実際にはこれらの拠点が対象エリアの各ゾーンに複数配置され、それらの間の定量的な交通量が計算される。たとえば救急活動の場合、対象となる拠点は病院などであり、これと連絡されるべき被災地との交通需要量よりゾーン間交通量が算定される。

この交通需要量の推計にはいろいろな方法が考えられ、たとえば救急活動一つをとっても①被災地の人口から割り出された死傷者数、②拠点となる病院における受け入れ可能者数、③救急活動への動員が可能な車両数などが考えられる。平常時の均衡状態に近い場合では、病院等の拠点となる施設の

表3.1 拠点間連絡マトリックスの例

		域外	行政（一般）					行政（部）	指定行政機関			指定公共機関		交通関係機関	医療機関				救急・救命			広域物流拠点					避難地・被災地	その他						
		1 域外	2 都道府県庁	3 市役所（政令指定市）	4 業務核都市	5 地区行政センター	6 市町村役場	7 上下水道局	8 交通局	9 建設省（局・事務所）	10 運輸省（局・事務所）	11 その他庁舎	12 道路公団（局・部・事務所）	13 都市高速（局・部・事務所）	14 ライフライン	15 鉄道関係	16 バス会社	17 県立・市立病院	18 総合病院	19 保健所・支所	20 血液センター	21 警察署	22 消防署	23 自衛隊	24 広域物流拠点	25 ヘリポート	26 港湾漁港	27 駅前広場	28 その他物流拠点	29 SA、PA	30 広域避難地	31 被災地	32 放送局	
域外	1 域外	●	●	●																														
行政（一般）	2 都道府県庁		●	●			●																			●	●	●	●	●			●	
	3 市役所（政令指定市）			●		●	●																		●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	4 業務核都市				●																				●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	5 地区行政センター					●																			●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	6 市町村役場						●																		●	●	●	●	●	●	●	●	●	
行政（部門）	7 上下水道局																																●	
	8 交通局																																●	
指定行政機関	9 建設省（局・事務所）																																●	
	10 運輸省（局・事務所）																																●	
	11 その他庁舎																																●	
指定公共機関	12 道路公団（局・部・事務所）																																●	
	13 都市高速（局・部・事務所）																																●	
	14 ライフライン																																●	
交通関係機関	15 鉄道関係																																●	
	16 バス会社																																●	
医療機関	17 県立・市立病院																	●	●	●	●		●			●	●	●	●	●	●	●	●	
	18 総合病院																		●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	
	19 保健所・支所																		●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	
	20 血液センター																				●	●	●	●			●	●	●	●	●	●	●	
救急・救命	21 警察署																					●	●	●	●							●	●	
	22 消防署																					●	●	●	●							●	●	
	23 自衛隊																						●	●	●	●							●	●
広域物流拠点	24 広域物流拠点																									●	●	●	●	●	●	●	●	●
	25 ヘリポート																										●	●	●	●	●	●	●	●
	26 港湾漁港																											●	●	●	●	●	●	
	27 駅前広場																												●	●	●	●	●	
	28 その他物流拠点																													●	●	●	●	
避難地・被災地	29 SA、PA																														●	●	●	
	30 広域避難地																															●	●	
その他	31 被災地																																●	●
	32 放送局																																	●

原単位が指標となりうるが、緊急時で大量の需要が発生するような場合には、供給側の原単位よりも、ネックとなる車両数が全体を規定する指標となるかもしれない。後述するケーススタディーでは、救急活動目的に関して、被災地の人口から割り出した死傷者数等を原単位として同定している。

$$G_{DP}^k = g_{DP}^k N_{Pi} \quad (3.7)$$

ここで、 G_{DP}^k はゾーン i の防災活動交通需要発生量、 g_{DP}^k は人口一人あたり防災活動（救急活動）需要発生率、 N_{Pi} はゾーン i の人口を表わす。この考えは、多数の負傷者が発生するような場合でも、防災活動の供給は需要を必ず満足するというものである。いずれにせよ本項までの段階で、地域の全セントロイドにおける、各防災活動に関する発生集中量が求まることになる。

3.2.2 防災拠点選択

(1) OD 分配方法

防災活動の発生集中量が定められた後は、これを OD 上に配分し、さらにその交通量をネットワーク上に配分することになる。一般に各ゾーンでの発生集中量が大きく、ゾーン間で極端な偏りなく OD 交通量が分配されると考えられる場合には、現在の OD パターンを用いた成長率法やグラビティー・モデルが用いられる。しかしながら防災活動の場合、周囲の避難や見舞い等の交通に比べて交通量自体はそれほど小さくなく、かつそれらは直近のゾーン間に集中すると考えられるため、以下のような考え方をとることとした。

まず防災活動の発着地点としては、拠点および被災地が考えられるが、このうち拠点相互の交通については交通量が小さいと考え、ここでは組み入れない。また被災地相互の交通についてはむしろ後述するバックグラウンド交通が主体と考えられるため、防災活動として算入しない。残りの拠点～被災地間の交通については以下のように考える。

ある被災地と防災拠点間の間のゾーン選択では、被災地ゾーン i から最も近い二つまでのゾーン j_1 、 j_2 を対象とし、ゾーン i からの防災活動発生量 G_{DP}^k を、ゾーン j_1 、 j_2 に分配する。二つのゾーン間の交通量の分配率は、グラビティー・モデルによって計算された仮想交通量に基づく分配率によって分配する（図 3.4）。

$$T_{DP}^k{}_{ij_1} = G_{DP}^k \frac{\hat{T}_{DP}^k{}_{ij_1}}{\hat{T}_{DP}^k{}_{ij_1} + \hat{T}_{DP}^k{}_{ij_2}}, \quad T_{DP}^k{}_{ij_2} = G_{DP}^k \frac{\hat{T}_{DP}^k{}_{ij_2}}{\hat{T}_{DP}^k{}_{ij_1} + \hat{T}_{DP}^k{}_{ij_2}} \quad (3.8 \text{ a-d})$$

$$\hat{T}_{DP}^k{}_{ij_1} = (N_B^k{}_{j_1})^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma, \quad \hat{T}_{DP}^k{}_{ij_2} = (N_B^k{}_{j_2})^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma$$

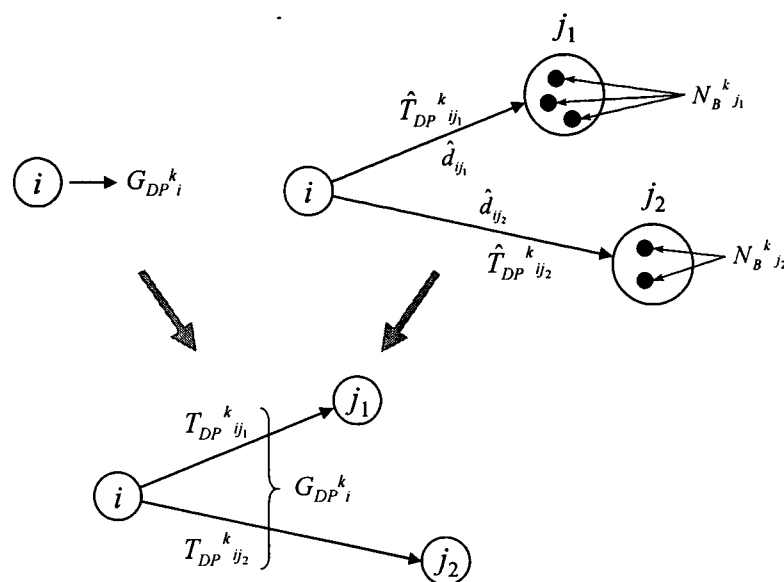


図 3.4 防災拠点選択の考え方

式(3.8)中、 $N_B^k_j$ はゾーン j における目的 k の防災拠点の数、 $\hat{d}_{ij}$ はゾーン ij 間で定義される仮想距離で、その設定方法については後述する。すなわちこの考え方では、グラビティーモデルによって得られた防災に関する仮想交通量 $\hat{T}_{DP^k_{ij}}$ によってコントロール・トータルとしての防災活動発生量 $G_{DP^k_i}$ を案分している。なお被災地ゾーン i は発生ゾーンではなく集中ゾーンであってもよく、その場合のコントロール・トータル値は発生量 $G_{DP^k_i}$ ではなく集中量 $A_{DP^k_i}$ となる。

(2) 拠点選択パターン

防災活動交通の防災拠点選択（あるいは拠点からの被災地選択）にあたっては、「被災地ゾーンから最も近い二つのゾーン」としたが、この「最も近い」という考え方によって、拠点選択に以下のようなヴァリエーションが考えられる。

- ① 平常時のネットワーク状態で考えるか、被災時のネットワーク状態で考えるか。
- ② ゾーン間の距離を参考とするか、旅行時間を参考とするか。

特に①の方は、被災時の拠点選択方針を平常時から変更するかしないかということに対応する。ここでは、平常時のルート距離が最小である拠点を被災時にも選択するパターン（行き先固定）と、被災時のネットワーク状態における旅行時間が最小である拠点を選択するパターン（行き先変動）の二つを想定する（図 3.5、表 3.2）。したがって先のグラビティー・モデルにおける仮想距離 $\hat{d}_{ij}$ は、行き先固定の場合は平常時のネットワークに基づくルート間距離、行き先変動の場合には被災時のネットワークに基づく旅行時間となる。以上の手続きにより、防災活動交通の OD マトリックスが得られる。

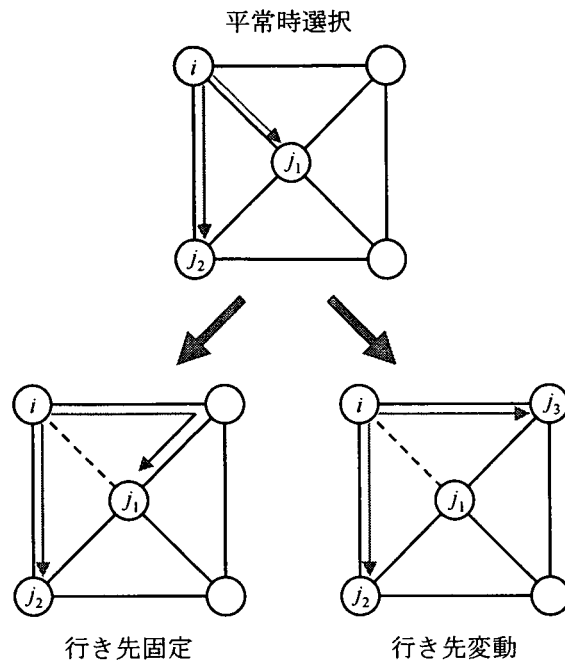


図 3.5 防災拠点選択のパターンの概念

表 3.2 防災拠点選択のパターン

選択パターン	拠点選択時の判断基準	条件等
行き先固定	平常時ネットワークにおける距離	- 目的ゾーンは平常時と同じ。 - ユーザーに対して被災状況、混雑状況等の情報が与えられていない状態
行き先変動	被災時ネットワークにおける時間（バックグラウンド交通の影響を考慮）	- 目的ゾーンは被災パターンによって変化。 - ユーザーに対して被災状況、混雑状況等の情報が与えられている状態。

防災活動の OD マトリックスが得られた後は、各ゾーン間のルートのうち旅行時間が最短となるルートに交通量を配分する。以上の流れをまとめたものを図 3.6 に示す。

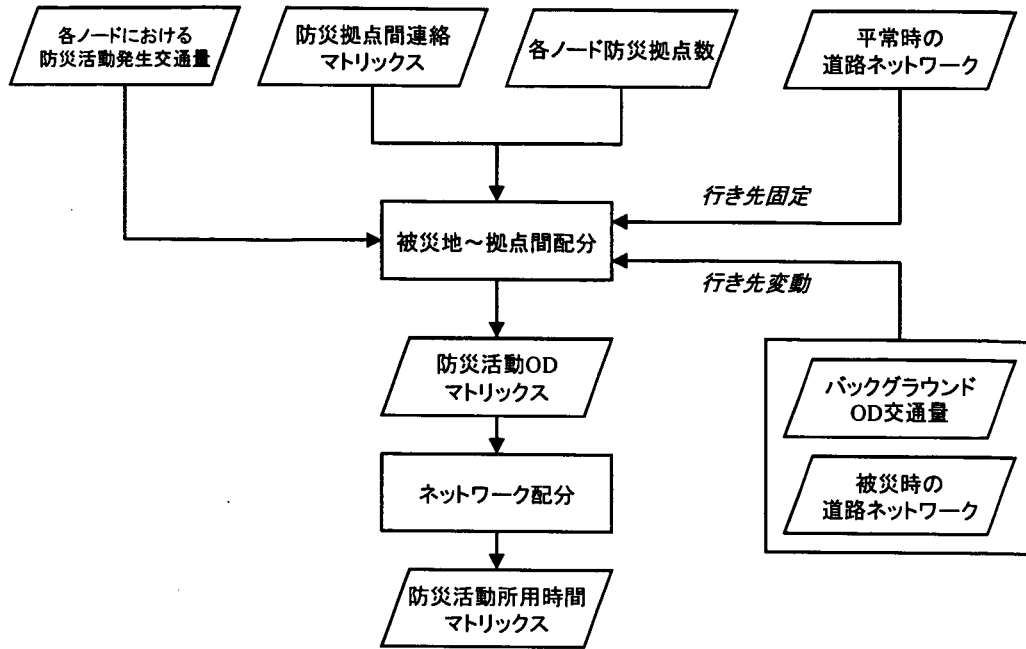


図 3.6 防災活動交通 OD の算定方法

3.3 バックグラウンド交通の影響を受けたリンク走行時間の決定

3.2 節の冒頭で述べたように、防災活動交通の配分に先立って、各リンクの走行時間を求めておく必要がある。被災時の最短ルートを抽出するために、たとえばセンサスの旅行速度などの固定値を与える方法がとられることがあるが、本研究では、被災時のネットワーク状態における交通状況を反映する、より妥当な方法を検討した。

(1) バックグラウンド OD

バックグラウンド交通についても、防災活動交通と同じく自動車交通を想定し、通常の交通推計の手順を応用する。ただし個別のゾーンについて計算した発生集中量をそのまま用いるのではなく、エリア全体の総交通発生量をコントロール・トータルとし、ゾーン間の交通量配分率をグラビティー・モデルより導かれる仮想交通量によって分配する。エリアの総交通量を T_{BK} とし、バックグラウンド交通の仮想交通量 $\hat{T}_{BKij}$ を介してこれを各ゾーン間に分配する方法は式(3.9)のとおりである。

$$\begin{aligned} \hat{T}_{DP}^k \hat{y}_i &= (N_{Pi})^\alpha (N_{Pj})^\beta (d_{ij})^\gamma \\ T_{BKij} &= T_{BK} \frac{\hat{T}_{BKij}}{\hat{T}_{BKij} + \hat{T}_{BKij}} \end{aligned} \quad (3.9a, b)$$

ここで、 N_{Pi} はゾーン i の人口、 d_{ij} はゾーン ij 間の最短距離である。この手順により、バックグラウンド交通の OD マトリックスが得られる。その後この OD 交通をネットワーク上に配分し、この時得られたリンク走行時間を防災活動の配分（行き先変動の場合）で利用する。

(2) バックグラウンド交通 OD のネットワーク上への配分

バックグラウンド交通の OD 交通量をネットワーク上に配分し、その影響を受けたリンク走行時間を算出する。方法としては、バックグラウンド交通を一括配分法によりネットワーク上に配分し、その配分結果におけるリンク走行時間をリンクごとに設定した QV 式より求め、これを固定値として防災活動交通の走行時間に適用する。すなわちここでは、防災活動交通はバックグラウンド交通に比べて量が少なく、走行時間に対して影響を与えないと仮定していることになる。バックグラウンド交通の配分方法は、多段階配分や収束法による均衡配分のほか動的配分を適用してもよい。今回の試算においては、自由走行速度に基づく一回の配分でリンク交通量を計算し、その交通量からリンク走行速度を算出した。この手続きによってネットワーク上の防災活動の走行時間が計算可能となる。バックグラウンド交通に関する以上の手続きをまとめたのが図 3.7 である。

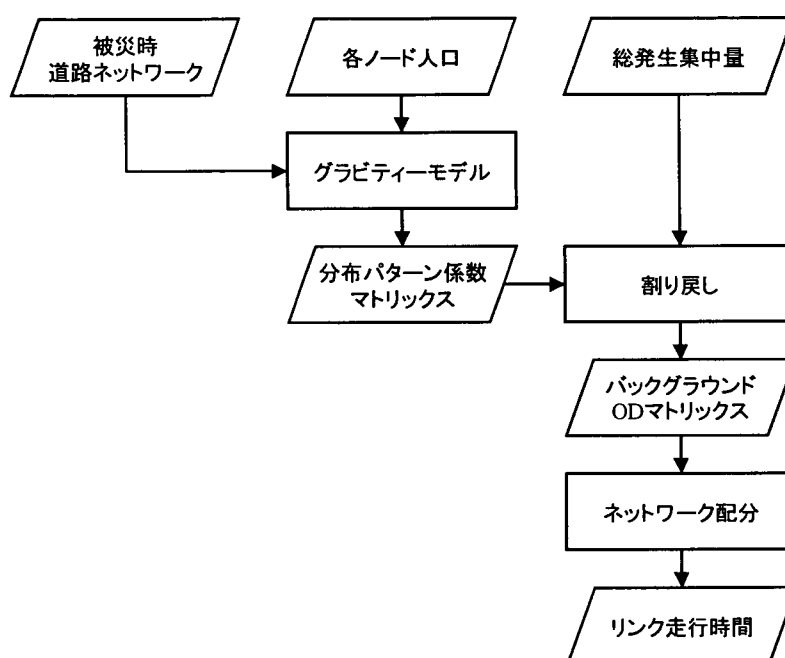


図 3.7 バックグラウンド交通に基づくリンク走行時間の算定

4. モデルケーススタディー

4.1 ケース設定

提案した指標の妥当性を確認するため、簡単なモデルケースを用いて手法の計算を行った。ネットワーク形態としては放射環状型、ラダー型、格子型の3種類を設定し、これに対してネットワーク中の遮断する区間のパターンを変化させた（例えば、放射区間のみ遮断、環状区間のみ遮断、放射区間・環状区間を混在させて遮断）。これに対して、防災拠点がネットワークの中心部に集中しているパターン（拠点集中）、ネットワーク全体に均等に分散しているパターン（拠点分散）の二つのパターンを設定したほか、被災地から目的地としての防災拠点ゾーンの選択方法にも二つのパターン（行先固定、行先変動）を想定した。これらのネットワーク形態、被災パターン、拠点配置、拠点選択パターンを組み合わせ、全部で552ケースについてネットワーク耐震性を計算した（表4.1）。各ネットワークの形態や、パターン設定の内容については、本節で詳しく説明する。今回の試算は、ネットワークの耐震性や区間の重要性に関して、常識的な結論と指標の傾向が一致することを確認するものであり、その結果、より複雑な現実の道路網に対して本手法を適用する場合の有効性に対する必要条件と考えようというものである。

表 4.1 モデルケース設定

リンクカット区間		拠点集中		拠点分散		計
		行先固定	行先変動	行先固定	行先変動	
放射環状型	放射区間	69	69	69	69	276
	環状区間	14	14	14	14	56
	混在	14	14	14	14	56
	混在	41	41	41	41	164
ラダー型	東西区間	58	58	58	58	232
	南北区間	16	16	16	16	64
	南北区間	6	6	6	6	24
	混在	36	36	36	36	144
格子型	中心部含み	11	11	11	11	44
	中心部含み	3	3	3	3	12
	外縁部のみ	1	1	1	1	4
	混在	7	7	7	7	28
計		138	138	138	138	552

4.1.1 モデルネットワークの設定

(1) ネットワーク形態と総道路延長

モデルケースのネットワークは、①放射環状型、②ラダー型、③格子型の3種類で、各々図4.1のような形態である。各ネットワークの全てのノードが人口、防災拠点をもち、バックグラウンド交通のセントロイドとであるとともに、防災活動交通に関する被災ゾーン、防災拠点ゾーンに相当する。

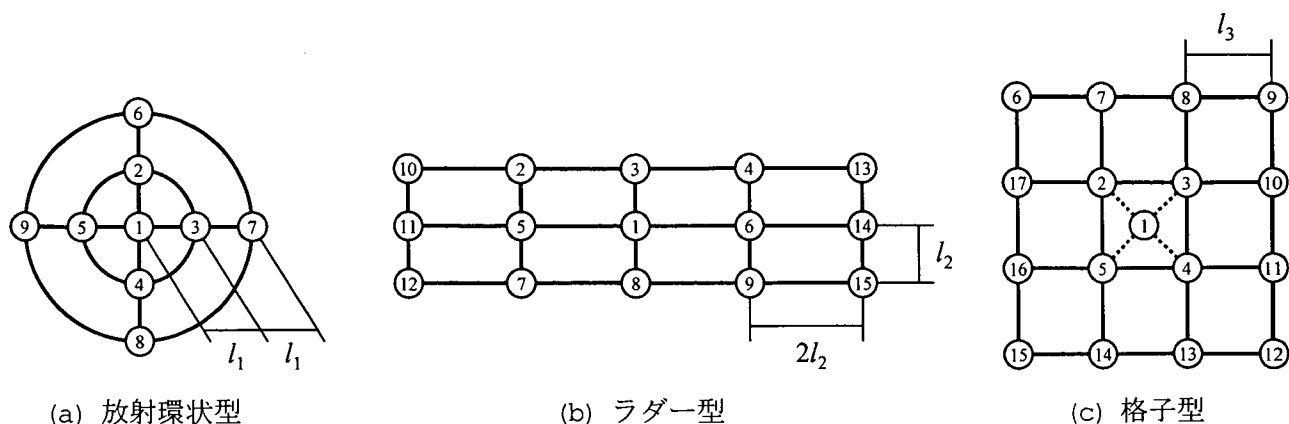


図 4.1 モデルネットワークの形態

ここで各々の道路ネットワークの総道路延長を等しくすることとし、次式のように設定した。

$$\begin{aligned} (8 + 6\pi)l_1 &= 34l_2 = 24l_3 \\ l_2 &= 0.79l_1, \quad l_3 = 1.12l_1 \end{aligned} \quad (4.1a, b, c)$$

また l_1 については、平均的な市町村間距離（可住地面積あたりの換算値）をもとに 6km と設定した⁹⁾。したがって、 $l_1 = 6\text{km}$ 、 $l_2 = 4.7\text{km}$ 、 $l_3 = 6.7\text{km}$ となる。これらの値より、モデルネットワークの総道路延長は三つのモデルとも等しく、約 161km となる。

平均的な地方生活圏の姿として、以下のように考えた。

- ・一つの地方生活圏中心都市を有する。
- ・上記のほか、1～2つの二次生活圏中心都市を有する。
- ・圏域面積 1967.7km² (可住地面積 648km²)
- ・市町村数 15～16 (概ね 3市 10町 3村)
- ・1市町村あたり面積 123km² (可住地面積 39km²)
- ・平均市町村間距離 11.1km (可住地面積換算 6.2km)
- †1 全国の地方生活圏平均値
- †2 市町村の形状を正方形とした場合

(2) カバーエリア

モデルネットワークがカバーする面積は、三つのモデルについて同一と考えた。これは、全てのモデルで面積あたり道路延長を統一したうえで、ネットワーク耐震性を比較するためである。まず、三つのモデルネットワークのカバーエリアを図 4.2 のように考える。

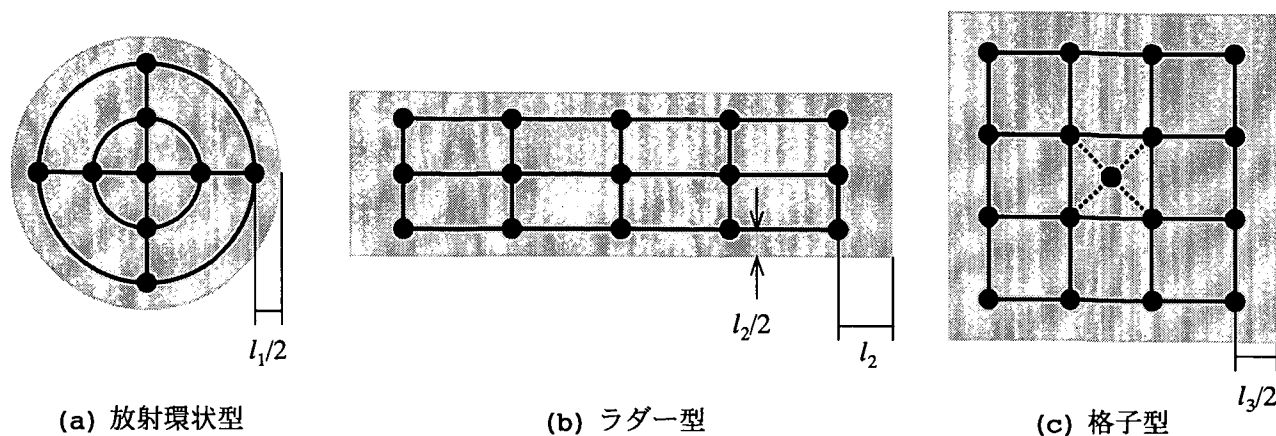


図 4.2 総エリア面積の考え方

これに基づいて各モデルのカバーエリアの面積を計算すると各々の以下のような値となる。

$$\begin{aligned}
 \text{モデル1 (放射環状型)} \quad S_1 &= (2.5l_1)^2 \pi = 706 \\
 \text{モデル2 (ラダー型)} \quad S_2 &= (10l_2) \cdot (3l_2) = 674 \\
 \text{モデル3 (格子型)} \quad S_3 &= (4l_3)^2 = 718
 \end{aligned}
 \tag{4.2a, b, c}$$

先に述べたように、全モデルで面積を統一するために、ここではモデル 1 の面積 706km² で統一することとした。この値は、モデル 2、3 の値と大きく異なっていない。

4.1.2 防災活動交通 OD の算定

(1) 人口分布

式(3.5)に示したように、防災活動交通発生量の算定のためには、各ゾーンの人口と原単位が必要となる。まず各モデルの人口分布について説明する。三つのモデルともカバーエリアの面積は等しく、人口密度も等しいとすればエリア内の総人口 N_p は同一となる。ここでモデル地域の人口密度を、東京都を除く関東地域の平均値として 1,488.4 人/km² と設定し、総人口を $1,488.4 \times 706 = 1,050,810$ 人とする。また、ネットワーク中の各ゾーンにおける人口はすべて等しいと設定する。三つのモデル・ネットワークはいずれも①都心 1 ゾーン、②都心を除く中心部ゾーン、③外縁あるいは郊外ゾーンの 3 種類に分けることが可能であり、各ゾーンの人口を示したのが表 4.2 である。ラダー型、格子型の場合は人口、人口密度ともすべてのゾーンで等しくなるが、放射環状型の場合は各ゾーンの面積が異なることから、人口密度は外縁部ほど小さくなる。

表 4.2 各ゾーンの人口分布

(a) 放射環状型

ゾーン	ゾーン番号	人口分布	実人口 (人)	ゾーン面積 (km^2)	人口密度 (人/ km^2)	防災活動 (trips)
都心ゾーン	1	$N_p/9$	116757	28.3	4126	887
内環状沿線ゾーン	2, 3, 4, 5	$N_p/9$	116757	56.5	2066	887
外環状沿線ゾーン	6, 7, 8, 9	$N_p/9$	116757	113.0	1033	887

(b) ラダー型

ゾーン	ゾーン番号	人口分布	実人口 (人)	ゾーン面積 (km^2)	人口密度 (人/ km^2)	防災活動 (trips)
都心ゾーン	1	$N_p/15$	70054	44.1	1589	532
中心部ゾーン	3, 5, 6, 8	$N_p/15$	70054	44.1	1589	532
郊外部ゾーン	2, 4, 7, 9, 10~15	$N_p/15$	70054	44.1	1589	532

(c) 格子型

ゾーン	ゾーン番号	人口分布	実人口 (人)	ゾーン面積 (km^2)	人口密度 (人/ km^2)	防災活動 (trips)
都心ゾーン	1	$N_p/17$	61812	44.9	1377	470
中心部ゾーン	2, 3, 4, 5	$N_p/17$	61812	44.9	1377	470
郊外部ゾーン	6~17	$N_p/17$	61812	44.9	1377	470

なお防災活動交通発生原単位については、阪神淡路大震災における死傷者等の統計に基づいて設定する。同地震による兵庫県内の死者、行方不明者、負傷者の合計数は 41,181 人であり、県内総人口に占める割合は 0.76%であった¹⁰⁾。この率を原単位とし、死傷者等の数だけ防災活動交通トリップが発生すると考える。

(2) 防災拠点分布

防災活動交通発生量算定のためには、各ゾーンの防災拠点数 N_B^k も必要である。ここで試算にあたっては、防災拠点の分布として集中型と分散型の二種類を想定した。集中型は、都心とその周りの中心部のゾーンにのみ防災拠点が存在し、郊外には拠点が存在しないパターンである。一方分散型は、防災拠点がエリア内にもれなく存在するとした。双方において、都心からの距離が離れるにしたがって、1 ゾーンあたりの防災拠点数は減少する（図 4.3、表 4.3）。

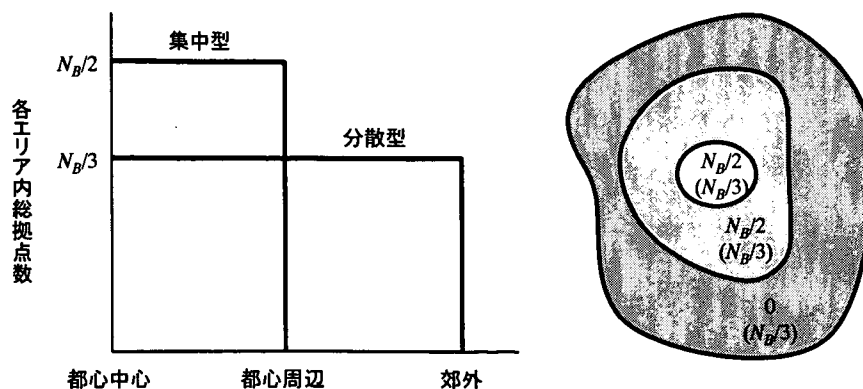


図 4.3 防災拠点分布の考え方

表 4.3 各ゾーンの防災拠点分布

(a) 放射環状型

ゾーン	ゾーン番号	拠点分布		1ゾーンあたり拠点数	
		集中型	分散型	集中型	分散型
都心ゾーン	1	$N_B/2$	$N_B/3$	$N_B/2$	$N_B/3$
内環状沿線ゾーン	2, 3, 4, 5	$N_B/2$	$N_B/3$	$N_B/8$	$N_B/12$
外環状沿線ゾーン	6, 7, 8, 9	—	$N_B/3$	—	$N_B/12$

(b) ラダー型

ゾーン	ゾーン番号	拠点分布		1ゾーンあたり拠点数	
		集中型	分散型	集中型	分散型
都心ゾーン	1	$N_B/2$	$N_B/3$	$N_B/2$	$N_B/3$
中心部ゾーン	3, 5, 6, 8	$N_B/2$	$N_B/3$	$N_B/8$	$N_B/12$
郊外部ゾーン	2, 4, 7, 9, 10~15	—	$N_B/3$	—	$N_B/30$

(c) 格子型

ゾーン	ゾーン番号	拠点分布		1ゾーンあたり拠点数	
		集中型	分散型	集中型	分散型
都心ゾーン	1	$N_B/2$	$N_B/3$	$N_B/2$	$N_B/3$
中心部ゾーン	2, 3, 4, 5	$N_B/2$	$N_B/3$	$N_B/8$	$N_B/12$
郊外部ゾーン	6~17	—	$N_B/3$	—	$N_B/36$

(3) 推計式の決定

ここで各ゾーンの人口および防災拠点数を N_{Pi} 、 N_{Bi} 、人口分配率、拠点分配率を p_i 、 b_i とし、防災活動発生原単位を v とすると、式 (3.7)、(3.8) は次のように変形できる。

$$\begin{aligned}
G_{DPi} &= vN_{Pi} = vp_i N_p \\
\hat{T}_{DP}^{k_{ij_1}} &= (b_{j_1} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma, \quad \hat{T}_{DP}^{k_{ij_2}} = (b_{j_2} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma \\
T_{DP}^{k_{ij_1}} &= vp_i N_p \frac{(b_{j_1} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma}{(b_{j_1} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma + (b_{j_2} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma} = vp_i N_p \frac{(b_{j_1})^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma}{(b_{j_1})^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma + (b_{j_2})^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma} \\
T_{DP}^{k_{ij_2}} &= vp_i N_p \frac{(b_{j_2} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma}{(b_{j_1} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma + (b_{j_2} N_B^k)^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma} = vp_i N_p \frac{(b_{j_2})^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma}{(b_{j_1})^\beta (\hat{d}_{ij_1})^\gamma + (b_{j_2})^\beta (\hat{d}_{ij_2})^\gamma}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

したがって、防災活動交通量を算定する際に防災拠点の絶対数は必ずしも必要ではなく、各ゾーンの拠点分配率のみが与えられていればよいことがわかる。さらにこの交通量を用いてネットワーク耐震性指標 SP^k を求める際には、式(4.3)において分母分子にこの交通量項があるため N_p が約され、人口分配率 p_i のみが与えられればよいことになる。原単位 v については、本試算の場合に全域において一定としているのでこれも約されるが、一般にはこの値はゾーンごとに異なることもあり、その場合には省略できない。

グラビティー・モデルのパラメーター β 、 γ については、昭和 60 年センサス OD 表に基づいて同定した。

$$\beta = 0.7808, \gamma = -1.2225 \tag{4.4}$$

以上の設定により、防災活動交通の OD マトリックスが計算可能となる。

4.1.3 バックグラウンド交通に基づくリンク走行速度の設定方法

(1) バックグラウンド交通 OD の算定

バックグラウンド交通 OD は、式(3.9)に示したように、対象エリア全体のバックグラウンド・トリップ数を、グラビティー・モデルに基づく仮想交通量によって分配する。まずエリア全体のトリップ数は、関東地方建設局管内の発生集中交通量原単位に基づいて設定する。

関東地方生活圏内トリップ原単位	471 (trips/km ²)	(東京都除き、B ゾーン内々除き)
モデルケースの面積	706.5km ²	
モデルケースの発生集中交通量	332,762 (trips)	

この総発生集中量を、グラビティー・モデルに基づく仮想交通量によって各ゾーン間に分配する。グラビティーモデルのパラメーターは、式(4.4)と同じく、昭和 60 年センサス OD 表を用いて設定した。

$$\alpha = 0.3255, \beta = 0.7808, \gamma = -1.2225 \tag{4.5}$$

(2) ネットワーク上への配分およびリンク走行速度の設定

3.3 節に述べたように、バックグラウンド交通 OD をネットワーク上に配分するにあたっては、各リンクごとに設定した QV 式をに基づいて配分し、リンク走行速度の算出を行う。モデルケースのネ

ネットワークについては、想定したエリアの性質や人口規模等を勘案し、全ての区間で都市部の主要幹線を想定し、4車線と設定した。またこれに基づき、各リンクの QV 式を図 4.4 のように設定した。ここで V_d は設計速度、 C は設計交通容量であり、3 種 2 球 4 車線の道路を想定し、 $V_d = 60\text{km/h}$ 、 $C = 36,000\text{veh/day}$ とした。

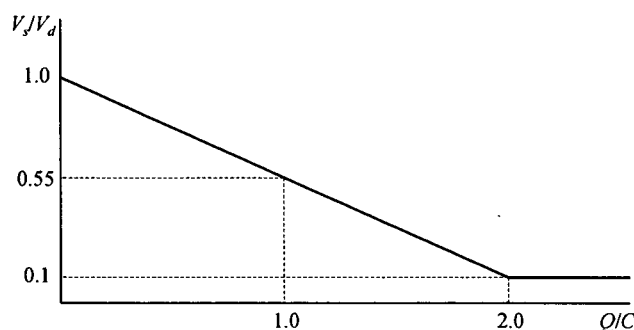


図 4.4 モデルネットワークの QV 式

4.1.4 防災活動の単位効果量関数の設定

3.1 節で導入した防災活動の単位効果量関数 $E^*(t)$ については、図 4.5 に示す形状とした。これは具体的な統計に基づいたものではないが、地震直後の負傷等によって生命の危機にさらされた人々を対象とした救急活動を想定している。

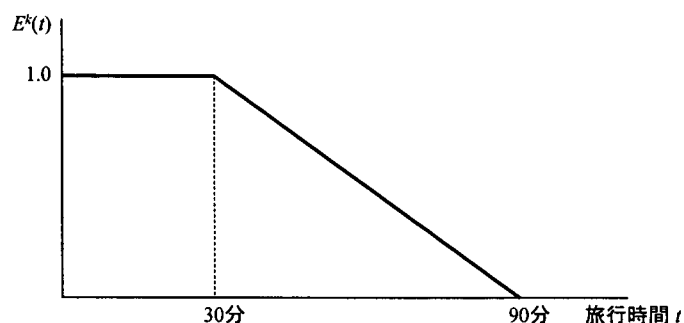


図 4.5 防災活動の単位効果量関数の設定

4.1.5 リンクカットのパターン（被災パターン）

放射環状、ラダー、格子の各タイプのリンク数はそれぞれ異なるが、被災パターンとして各リンクのうち 25% のリンクが被災し、通行不能になるとする。この比率はケース設定において任意であるが、ここでは朝倉らの研究⁴⁾における、頑強性が中程度のリンクに強い外力が生じた場合の信頼度を参考とした。

(1) 放射環状型

放射環状型のネットワークの場合、外側／内側の放射部／環状部の組み合わせにより、4 種類のリンクが存在する。全リンク数 16 本のうち 25%に相当する 4 本が被災するとすればその組み合わせ数は ${}_{16}C_4 = 1820$ とおりとなるが、ネットワーク形状が対称なため、組み合わせパターンは表 4.4 のように 69 とおりで表わせる。

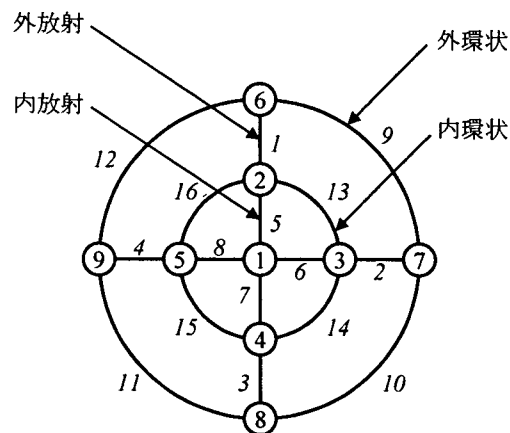


図 4.6 放射環状型モデルネットワーク

表 4.4 放射環状型のリンクカットパターン

カット パターン	リンクカット本数				組み合 わせ数
	放射方向		環状方向		
	外放射	内放射	外環状	内環状	
放射カット	4	0			1
	3	1			3
	2	2			6
	1	3			3
	0	4			1
	計				14
環状カット			4	0	1
			3	1	3
			2	2	6
			1	3	3
			0	4	1
	計				14
混在型	3		1		2
	2		2		7
	1		3		2
	3			1	2
	2			2	6
	1			3	2
		3	1		2
		2	2		6
		1	3		2
		3		1	2
		2		2	7
		1		3	1
	計				41
合計					69

(2) ラダー型

ラダー型のリンク数は 22 でありその 25% は 5.5 である。ここでは 6 本のリンクをカットすることとしたが、22 本のリンク中 6 本のリンクの組み合わせ数は対称性を考慮したとしても相当な数になるため、ここではリンクカットの影響を概ね表現できる表 4.5 の 58 ケースを検討することとした。

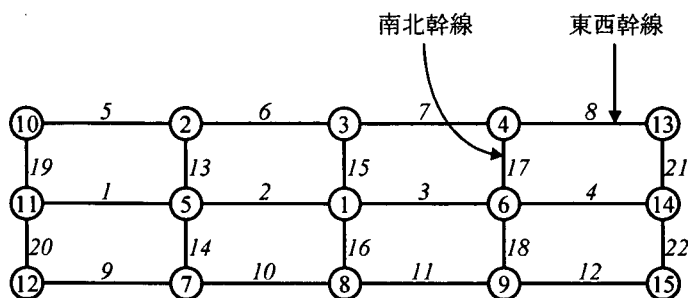


図 4.7 ラダー型モデルネットワーク

表 4.5 ラダー型のリンクカットパターン

カット パターン	リンクカット本数						組み合わせ 数
	東西幹線			南北幹線			
	中	上	下	中心	中間	外	
東西カット	4	2					4
	4	1	1				8
	2	4					4
	計						16
南北カット				2	2	2	2
				2		4	1
				2	4		1
	計						6
混在型	4			2			2
		2		2			2
	2	2		2			32
	計						36
合計							58

(3) 格子型

格子型のリンク数は 24 であり、25%に相当するのは 6 リンクとなる。ここでは被災リンクがある程度集中して発生することとし、以下のような条件を設定した。

①いずれか一格子の区画の周囲4リンクが被災する。

②被災 6 リンクのうち残り 2 リンクは上記の区画に接続するリンクとする。

また都心地域を表現するために、中心部にセントロイドを一つ設定し、このノードと周囲の4つのノードをダミーリンク（リンク・インピーダンスがゼロ）で接続した。中心ゾーン1の周囲のリンク（1、2、3、4）がカットされた場合には、ダミーリンクもカットされることとした。

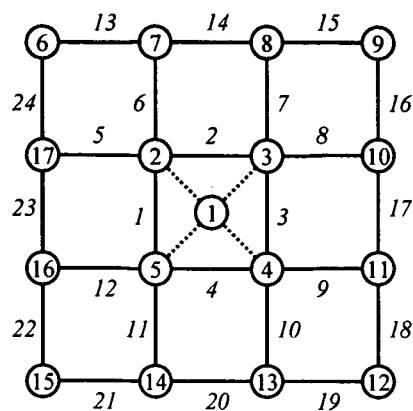


図 4.8 格子型モデルネットワーク

表 4.6 格子型のリンクカットパターン

カットパターン	組み合わせ数	備 考
都心カット	3	
外縁部カット	1	中心部リンクをまったく含まない
混在型	7	中心部リンクの一部を含む
合計	11	

4.1.6 区間重要性の試算方法

区間重要性は、モデルケース 1 の放射環状型について試算した。まず被災パターンとして、4 つのリンクが被災するカットパターンを 6 種類設定し、各パターン 4 リンクのうち 1 リンクを対象として、（復活させて）区間重要性を計算した（表 4.7、図 4.9）。ここでたとえばカットパターン 1（外放射＋内環状）の場合、区間重要性の対象リンクとして外放射と内放射の二種類があり、6 パターン×2 リンク＝12 パターンを設定し、各々について、防災拠点選択パターンの固定／変動、防災拠点分布の集中／分散のバリエーションのケースについて区間重要性を計算した。したがって区間重要性指標の計算ケースは、12 パターン×2 パターン×2 パターン＝48 ケースとなる。

表 4.7 区間重要性試算のパターン設定

	カット区間数			
	外放射	内放射	外環状	内環状
カットパターン 1（外放射＋内放射）	2	2		
カットパターン 2（外環状＋内環状）			2	2
カットパターン 3（外放射＋外環状）	2		2	
カットパターン 4（内放射＋内環状）		2		2
カットパターン 5（外放射＋内環状）	2			2
カットパターン 6（内放射＋外環状）		2	2	

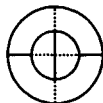
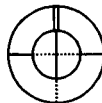
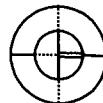
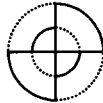
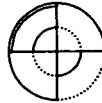
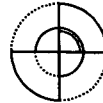
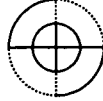
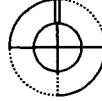
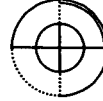
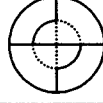
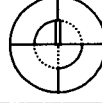
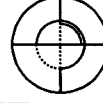
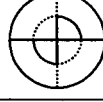
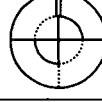
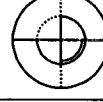
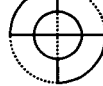
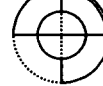
リンクカットパターン			対象(補強)リンク			
1	外放射2リンク 内放射2リンク		外放射補強		内放射補強	
2	外環状2リンク 内環状2リンク		外環状補強		内環状補強	
3	外放射2リンク 外環状2リンク		外放射補強		外環状補強	
4	内放射2リンク 内環状2リンク		内放射補強		内環状補強	
5	外放射2リンク 内環状2リンク		外放射補強		内環状補強	
6	内放射2リンク 外環状2リンク		内放射補強		外環状補強	

図 4.9 区間重要性の試算パターン

4.2 試算結果

4.2.1 ネットワーク耐震性

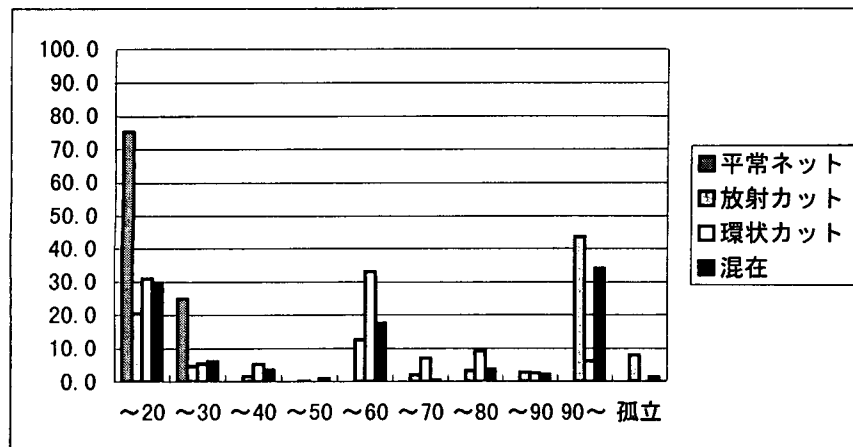
4.1 の設定に基づいて、各パターンについてネットワーク耐震性指標を計算した。なお各モデルネットワークのカットパターンには複数のパターン数が含まれ、各パターンごとに指標が計算されるが、ここでは各カットパターンのカテゴリーごとに指標の平均値を計算した。たとえば放射環状型の場合、放射カットは 14 パターン、環状カットは 14 パターンそして混在型は 41 パターンからなるが、各カテゴリー内で指標の平均値を計算し、指標としては放射カット、環状カット、混在型の 3 種類に集約する。またこれに区間被災がない平常時のパターンも加えた。考察に先立って、まずそれらの指標の一覧を表 4.8 に示す。

表 4.8 ネットワーク耐震性の試算結果

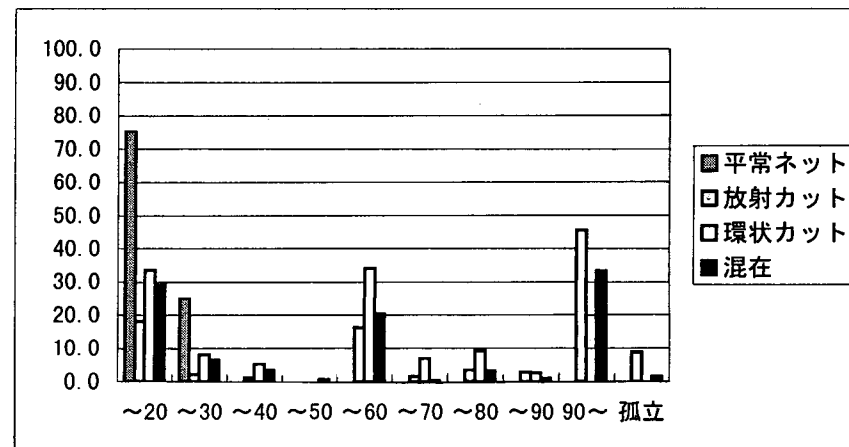
		行き先固定		行き先変動	
		拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
放射環状型	平常ネット	1.000	1.000	1.000	1.000
	放射カット	0.352	0.310	0.609	0.900
	環状カット	0.647	0.705	0.855	0.952
	混在	0.501	0.506	0.697	0.888
ラダー型	平常ネット	0.998	1.000	0.998	1.000
	東西カット	0.581	0.813	0.686	0.958
	南北カット	0.447	0.466	0.605	0.890
	混在	0.524	0.747	0.681	0.913
格子型	平常ネット	1.000	1.000	1.000	1.000
	中心部カット	0.233	0.681	0.664	0.925
	外縁部カット	0.824	0.790	0.823	0.824
	混在	0.757	0.815	0.808	0.922

これらの値は、各ケースごとに防災活動交通の旅行時間を集計し、その分布と単位効果量を乗じて計算したものであることは3章で説明した。図 4.10～4.12 に、放射環状型、ラダー型、格子型に関する、旅行時間別防災活動交通の頻度分布を示す。まず、平常時の状態では各ケースとも 30 分以内にほぼ全ての OD が含まれている。拠点集中パターンと拠点分散パターンを比較すると、全体として拠点分散型の方が左にシフトしている（特に図 4.11 及び 4.12）。これは、拠点分散型の方が、全体として拠点に到達する時間が短いことを示している。拠点配置の効果は、ラダー型で最も強く現れ、次いで格子型でも明確にわかるが、放射環状型では顕著には現れない。一方、拠点選択のパターンについて、行き先固定パターンと行き先変動パターンを比較した場合は、行き先変動パターンの方が僅かに分布が左にシフトしているが、先の拠点配置ほど顕著には効果が現れていない。

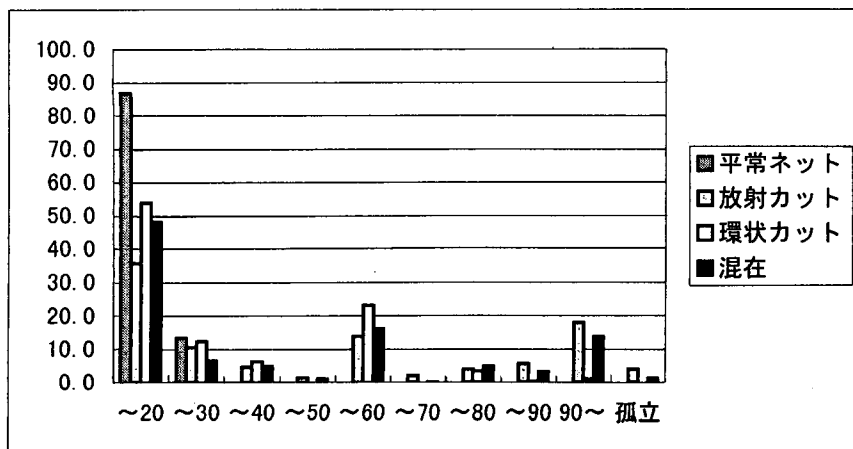
(a) 行き先固定・拠点集中



(b) 行き先固定・拠点分散



(c) 行き先変動・拠点集中



(d) 行き先変動・拠点分散

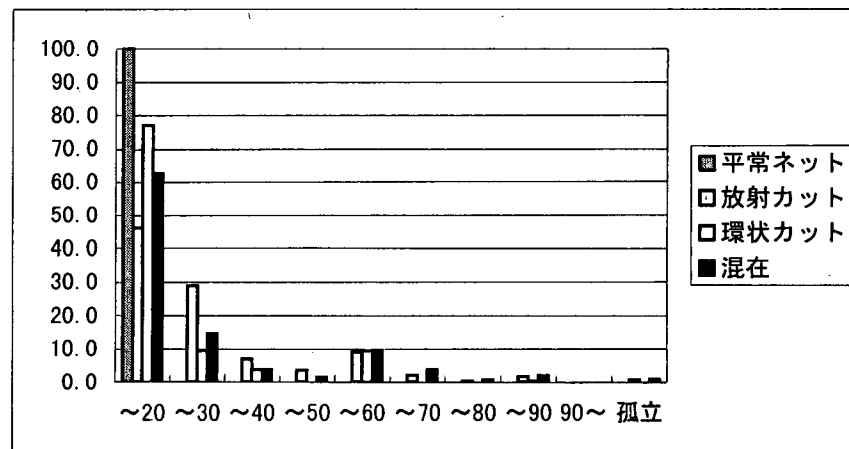
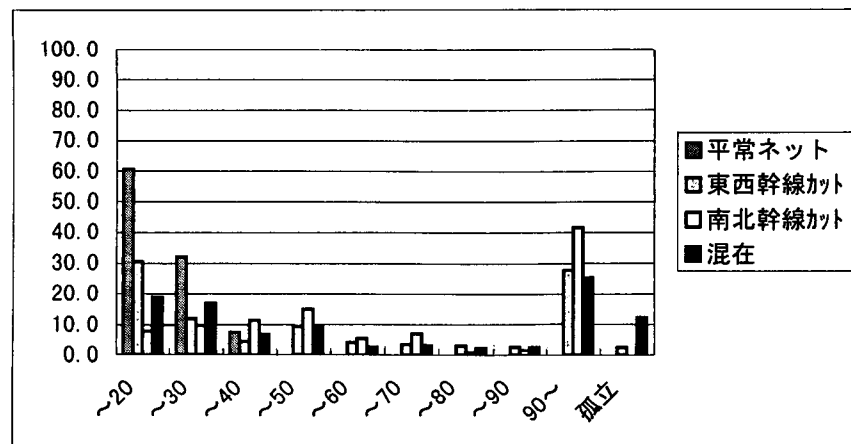


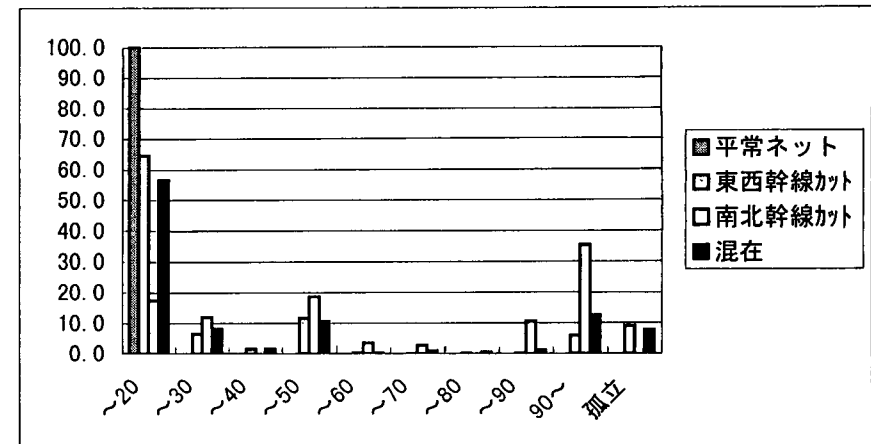
図 4.10 防災活動交通の旅行時間別頻度分布—放射環状型ネットワーク

(横軸はゾーン間旅行時間：分)

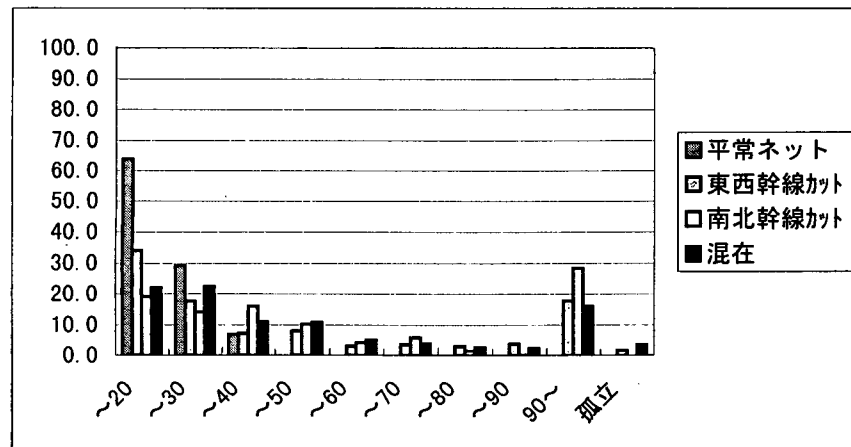
(a) 行き先固定・拠点集中



(b) 行き先固定・拠点分散



(c) 行き先変動・拠点集中



(d) 行き先変動・拠点分散

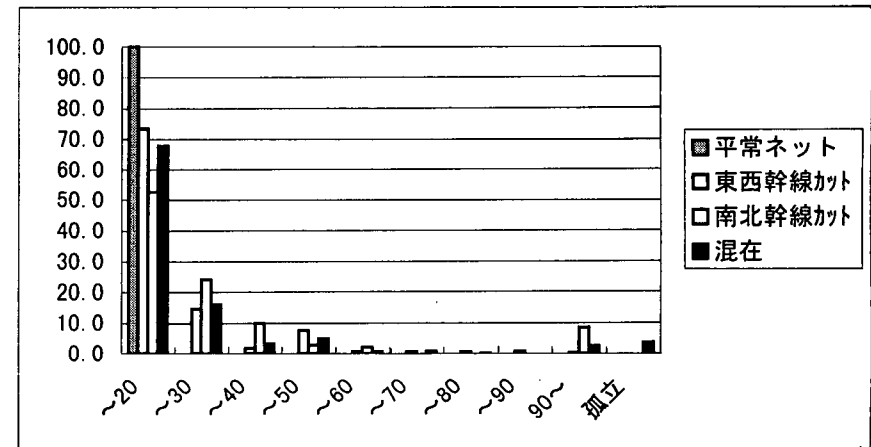
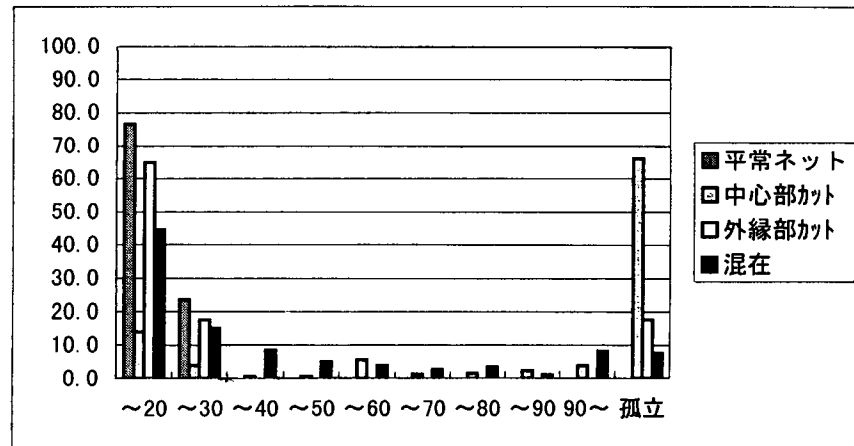
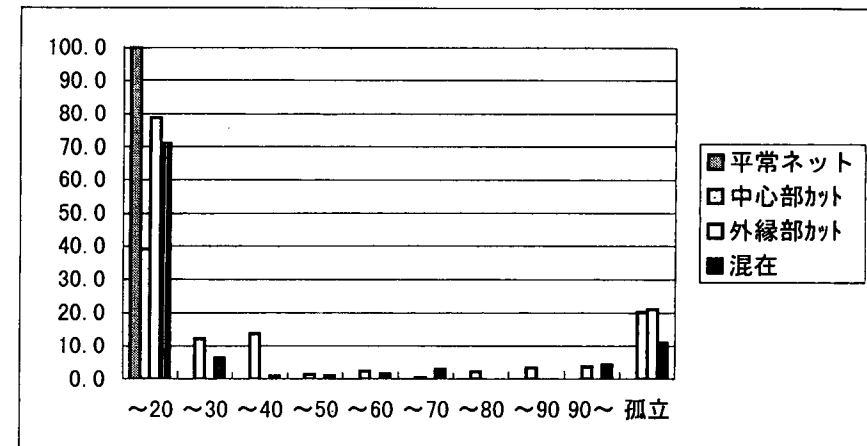


図 4.11 防災活動交通の旅行時間別頻度分布—ラダー型ネットワーク
(横軸はゾーン間旅行時間：分)

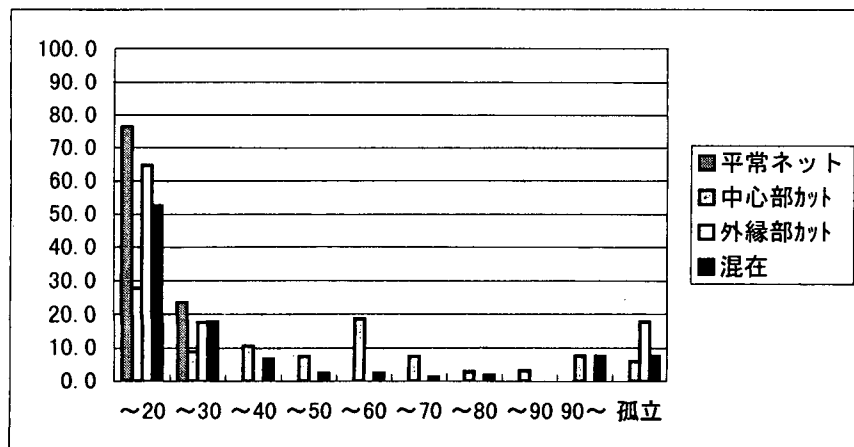
(a) 行き先固定・拠点集中



(b) 行き先固定・拠点分散



(c) 行き先変動・拠点集中



(d) 行き先変動・拠点分散

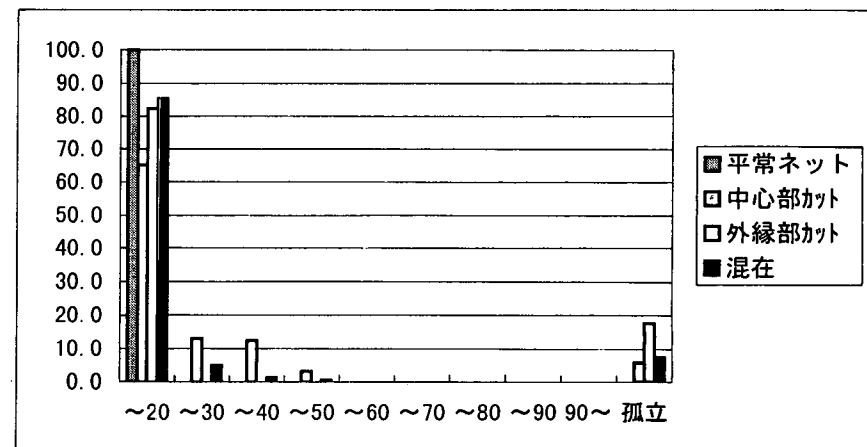


図 4.12 防災活動交通の旅行時間別頻度分布—格子型ネットワーク
(横軸はゾーン間旅行時間：分)

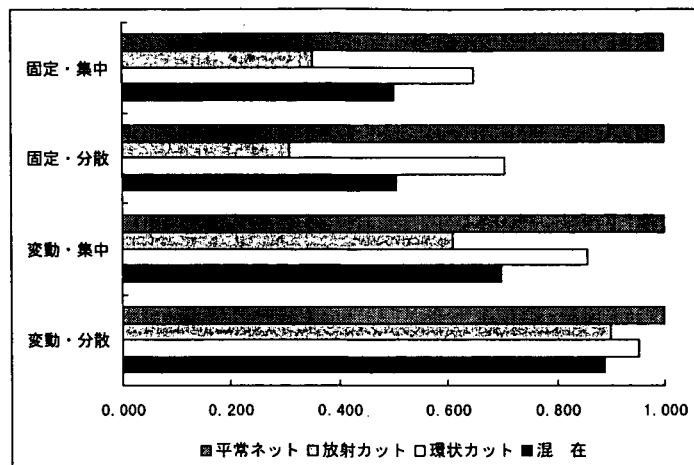


図 4.13 放射環状型ネットワークの耐震性指標

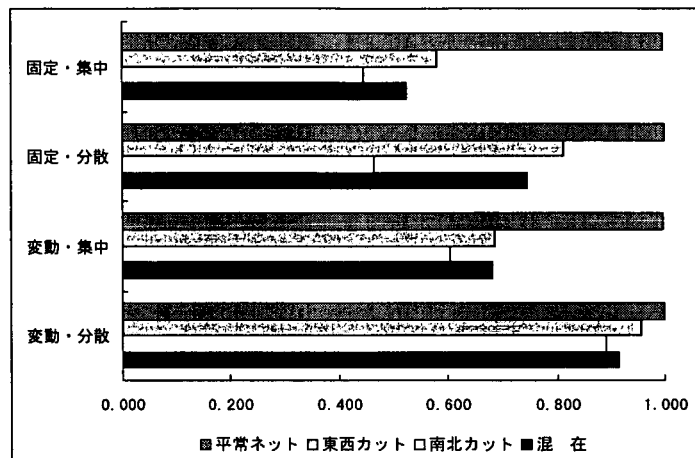


図 4.14 ラダー型ネットワークの耐震性指標

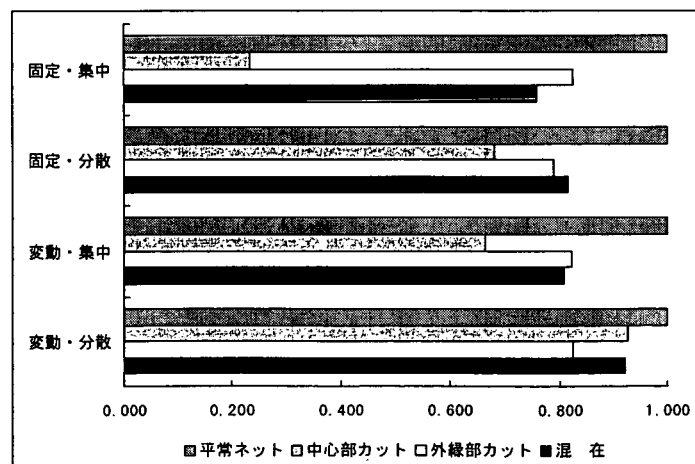


図 4.15 格子型ネットワークの耐震性指標

図 4.10～4.12 のような旅行時間別頻度分布のみでも、被災後のネットワークが防災活動に提供できる機能を表わすことは可能であるが、これに単位効果量関数をかけて集計したネットワーク耐震性指標は、一つの値でより簡潔にこのことを表示できる。表 4.8 のネットワーク耐震性指標の計算結果を図 4.13～4.15 に示す。これらの指標では、先の頻度分布で表わされた結果がより分かりやすい形で示されている。まず、平常時の耐震性指標は全てのケースについてほぼ 1.0 の値となっており、平常時には防災活動が満足されていることがわかる。次に、拠点配置の影響は、たとえば図 4.13 の「変動・集中」と「変動・分散」を比較するなどにより判読できるが、集中パターンの方が分散パターンより指標が小さい。一方、拠点選択のパターンの比較については、いずれのケースについても、行き先固定パターンの方が変動パターンより指標が小さく、耐震性が低いことがわかる。

各ネットワークのカット区間に注目すると、放射環状型の場合は放射路線をカットした場合の耐震性の低下が顕著である。また、ラダー型については、南北路線すなわち横断方向の路線が遮断された場合の耐震性の低下が大きい。格子型の場合はケース数が少ないが、中心部を含むエリアをカットした場合の耐震性が低くなっている。

ネットワーク耐震性指標 SP に関する以上の結果は以下のように要約される。

- ① 今回の簡単なモデルネットワークでは、放射環状型、ラダー型、格子型の三つの形態の間で耐震性の大きな違いは見られなかった。
- ② 放射環状型の場合、放射路線が遮断された場合に耐震性の低下が大きい。このことは、特に周辺部で放射路線が被災した場合の迂回距離が長くなることから、直感的な結論と一致する。
- ③ ラダー型の場合は、細長いエリアの縦断方向にある東西幹線が遮断された場合よりも、横断方向にある南北幹線が遮断された場合の方が耐震性の低下が大きい。これは一見矛盾するようであるが、今回のネットワーク形態においては南北リンクの長さが東西リンクの長さより短くなり、防災活動交通の拠点選択にあたって、南北リンクにより多くの交通が流れようとするため、南北リンクの遮断による耐震性低下が大きくなったものと考えられる。
- ④ 格子型については、遮断される区間と耐震性指標との間に一定した関係は見出せないが、これはケース数が少ないことに起因すると考えられる。
- ⑤ エリア内での防災拠点分布の違いの耐震性に与える影響としては、拠点が中心部に集中している方が耐震性が低く、エリア全体に均等に分散している方が耐震性が高い。これは直感的な予想と一致する。
- ⑥ 被災時に防災活動が目的の防災拠点を選択する際に、平常時のネットワークに基づいて行動するよりも、被災時のネットワーク状況に基づいた方がネットワークの耐震性が高い（すなわち防災活動の目的がより多く達成される）。これは地震直後の道路施設被害をより迅速に検知・推定し、緊急活動に生かすのが有効であることを表わしており、直感的結論と一致する。

上記の結果より、今回の試算に用いた簡単なネットワークでは、ネットワーク形態と耐震性との明確な関係は得られなかったが、防災拠点の分布及び防災拠点選択の方法の違いによる耐震性の差は明確に現れた。この二つの条件については、ネットワーク構造そのものの条件ではないが、それらの結果は直感的な結論と一致するため、本研究で提案したネットワーク耐震性指標を実際の道路網に適用することで、道路網システム全体の耐震性を評価することが可能であると考えられる。なお、各ネットワークの遮断区間の種類と耐震性の低下については、次項の区間重要性で詳しく論じる。

4.2.2 区間重要性

区間重要性の試算にあたっては、4.1.6 に述べたように、放射環状型のネットワークに対して 6 つのカットパターンを設定した。個々の区間の重要性指標を示す前に、まず各パターンに関するネットワーク耐震性指標を図 4.16 に示す。

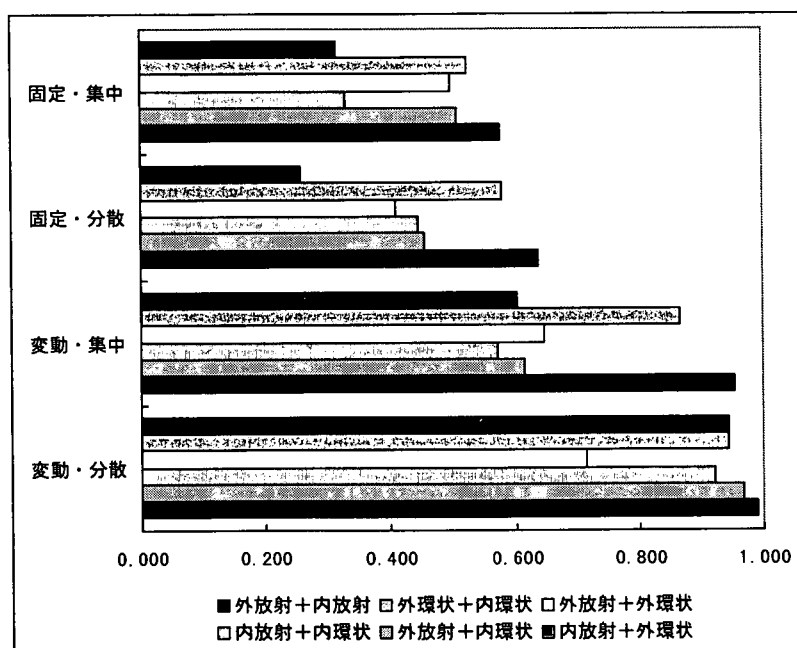


図 4.16 各カットパターンにおけるネットワーク耐震性

全体として、外側と内側の放射路線がセットで遮断された場合の耐震性の低下が大きく、これらの区間重要性が高いことが予想される。その他には、遮断される区間に関する統一的な特徴は現れていない。一方、拠点選択のパターンについては、行き先固定の方が耐震性の低下が大きいため、逆にこのパターンにおける区間重要性は高くなることが予想される。

被災パターンは対称形なので、カットされるのは 4 区間であるが、そのうち 2 区間ずつが同等とな

る（外放射 2 本、内放射 2 本のパターンでは 2 本の外放射は同等）。これらの区間を一つずつ復活させて区間重要性指標 LI を計算した結果を表 4.9 に示す。

表 4.9 区間重要性の試算結果

		行先固定		行先変動	
		拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
外放射＋内放射	外放射	9.79	12.01	18.95	4.64
	内放射	28.77	26.32	3.78	4.05
外環状＋内環状	外環状	0.62	0.62	0.55	0.00
	内環状	0.00	0.00	0.23	0.00
外放射＋外環状	外放射	11.97	13.53	11.89	16.18
	外環状	28.42	32.94	17.50	13.92
内放射＋内環状	内放射	13.33	9.67	20.00	4.44
	内環状	22.14	19.34	19.57	4.44
外放射＋内環状	外放射	6.82	12.55	18.17	1.05
	内環状	7.64	5.54	2.88	1.09
内放射＋外環状	内放射	1.40	0.39	0.97	1.05
	外環状	14.74	8.69	4.02	1.05
区間別平均	放射平均	12.01	12.41	12.29	5.24
	環状平均	12.26	11.19	7.46	3.42
	外側平均	12.06	13.39	11.85	6.14
	内側平均	12.22	10.21	7.91	2.51
	全体平均	12.14	11.80	9.88	4.33

これらのケースの SP から推測されたように、全体として放射区間の重要性が環状区間に比べて高くなっている。特に外放射と内放射が同時に遮断されるケースでは、内放射の耐震性が高くなっており（28.77、26.32）、この区間の重要性が高い。これと同程度の重要性を示すのが、外側の放射区間と環状区間が同時に被災した場合の環状区間で、これは内部の被災地に比べて拠点ゾーンの選択肢が少なく、距離が長い環状区間を利用せざるを得ない状況で、その環状区間が遮断されることが原因であろう。ちなみに、これら区間重要性が大きいケースでも、拠点選択を被災状況に応じて変更する行き先変動パターンでは指標が大きく減少している（特定の区間の重要性が高くない）ことから、被災時の状況を防災活動交通のユーザーが的確に把握することの有効性が示されている。外側の区間と内側の区間の比較では一般に外側の区間の重要性が高いが、これはある区間が遮断された場合に代替路が少なく迂回距離が長くなるためである。全体としては拠点が分散している方が中心部に集中しているよりも区間重要性が小さい。

以上の結果を要約すると以下のとおりである。

- ① 放射環状型道路網において、放射区間のみの重要性と環状区間のみの重要性を比較すると、前者の方が高い。近傍の拠点到直結する放射区間に対しては防災活動交通の需要も大きいため、この結論は妥当である。
- ② 都心周辺部の、特に環状区間の重要性が高い。すなわち、地域の道路網を放射環状型で整備する

場合に、都心周辺部にある長距離の環状区間の耐震性を向上させる必要がある。

- ③ 防災活動交通の目的拠点の選択にあたって、被災時のネットワーク状況に応じて柔軟な判断が行えるなら、路線の重要度を緩和することができる。逆に固定的な判断に基づいた場合には、被災時にも特定の路線に頼らざるを得ず、その区間の重要度が高くなる。これは直感的な結論と一致する。
- ④ 防災拠点の分布については、拠点を分散して配置した方が、特定路線に対する付加が小さくなる。当然の結果であるが、区間重要性指標 LI はこれを支持している。

上記に要約された結果から、簡単なネットワーク設定に基づいた区間重要性の試算結果は常識と一致するものであり、またそれを定量的に評価可能だと考えられる。

5. 結 論

本研究においては、道路の耐震性を、道路ネットワーク全体を一つのシステムとして包括的に評価する指標を提案した。またその際に、高度で抽象的な理論ではなく、一般的な手法と簡潔なモデルで指標を算出可能なように配慮した。提案された手法をモデルネットワークについて計算したところ、ネットワーク耐震性指標、区間重要性指標とも、簡単なネットワーク形態・拠点配置等から導かれる常識的な予想と一致するものであった。この結果は指標の妥当性の必要条件でしかないが、少なくとも簡単なモデル設定で常識的な結論を定量的に評価することが可能な手法が提案されたことになる。今後は、以下の見地から、手法の高度化・検証・応用を図ってゆく予定である。

- ① 今回のものより詳細なモデルネットワークに基づく、一方通行規制、交差点進入規制、防災活動交通専用レーンの設定など、地震発生時の交通規制の有効性やその程度の検討。
- ② 防災活動交通の拠点選択にあたって、直近 2 ゾーン間のグラビティーモデルによる配分のほか、直近 n ゾーン間の配分、拠点施設の容量を考慮した配分、拠点容量がオーバーフローした場合の拠点の「はしご」など、より実情に近い選択方法の適用。
- ③ ネットワークの被災パターンを決定するための、区間リスクの算定方法の開発。
- ④ 実際の防災活動交通における単位効果量関数の具体的な設定方法の検討。
- ⑤ 実際の地域における道路網、拠点配置等を用いた耐震性指標、区間重要性指標の試算。

参考文献

- 1) 建設省防災業務計画, 建設省編, 1998年3月
- 2) 千葉利晃・西崎耕造・浅埜正人, 「入力変動を考慮したネットワークの機能評価法による配水管の重要度評価」, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 1997年7月, pp1297
- 3) 朱牟田善治・当麻純一・石田勝彦, 「費用便益分析による変電設備の耐震補強計画」, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 1997年7月, pp1309
- 4) 朝倉康夫・粕谷増男・藤原健一郎, 「道路網の機能的階層性と災害時の時間信頼性との関連」, 土木計画学研究・講演集No.19(2), 1996年11月, pp275
- 5) 能島暢呂, 「ネットワーク信頼性解析に基づく道路網の地震防災戦略について」, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 1997年7月, pp1293
- 6) 中川大・伊藤雅・若山真樹, 「シミュレーションを用いた震災時の緊急物資輸送計画に関する研究」, 土木計画学研究・講演集No.19(1), 1996年11月, pp41
- 7) (社)日本道路橋会: 道路震災対策便覧(震前対策編), 1988年3月
- 8) U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration: *Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges*, May 1995
- 9) 地方生活圏要覧(平成5年度版), 建設省建設経済局事業調整官監修
- 10) 新時代を迎える地震対策—地震に強い道づくりへの提言—, 建設省道路局道路防災対策室監修

付 表

付表 1.1 防災活動交通の旅行時間別頻度分布（放射環状型）

行き先固定

時間(分)	拠点集中				拠点分散			
	平常ネット	放射カット	環状カット	混在	平常ネット	放射カット	環状カット	混在
～20	75.2	20.5	31.0	29.7	75.2	18.1	33.5	29.0
～30	24.8	4.8	5.3	6.1	24.8	2.1	8.1	6.5
～40	0.0	1.6	5.3	3.7	0.0	1.1	5.3	3.5
～50	0.0	0.2	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.7
～60	0.0	12.7	33.1	17.5	0.0	16.3	34.0	20.4
～70	0.0	2.0	7.1	0.5	0.0	1.6	7.1	0.5
～80	0.0	3.4	9.3	3.9	0.0	3.5	9.3	3.3
～90	0.0	3.0	2.7	2.2	0.0	2.8	2.7	1.1
90～	0.0	43.8	6.2	34.1	0.0	45.6	0.0	33.3
孤立	0.0	8.0	0.0	1.4	0.0	8.9	0.0	1.7
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

行き先変動

時間(分)	拠点集中				拠点分散			
	平常ネット	放射カット	環状カット	混在	平常ネット	放射カット	環状カット	混在
～20	86.7	35.8	53.8	48.0	100.0	46.1	77.0	62.6
～30	13.3	10.6	12.2	6.5	0.0	29.0	9.5	14.6
～40	0.0	4.7	6.3	4.8	0.0	7.0	3.9	3.9
～50	0.0	1.5	0.0	1.2	0.0	3.7	0.0	1.7
～60	0.0	13.9	23.0	16.2	0.0	9.0	9.4	9.6
～70	0.0	2.1	0.0	0.2	0.0	2.2	0.0	3.9
～80	0.0	3.9	3.4	4.8	0.0	0.5	0.0	0.7
～90	0.0	5.6	0.3	3.1	0.0	1.7	0.3	2.1
90～	0.0	18.0	1.1	13.7	0.0	0.0	0.0	0.0
孤立	0.0	4.0	0.0	1.4	0.0	0.8	0.0	0.8
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

付表 1.2 防災活動交通の旅行時間別頻度分布（ラダー型）

行き先固定

時間(分)	拠点集中				拠点分散			
	平常ネット	東西幹線カット	南北幹線カット	混在	平常ネット	東西幹線カット	南北幹線カット	混在
～20	60.5	30.4	7.7	18.8	100.0	64.6	17.4	56.5
～30	32.1	12.0	9.6	16.8	0.0	6.4	11.9	8.1
～40	7.4	4.4	11.3	6.7	0.0	1.6	0.0	1.7
～50	0.0	9.3	14.9	9.2	0.0	11.5	18.7	10.6
～60	0.0	4.2	5.3	2.7	0.0	0.4	3.4	0.4
～70	0.0	3.5	6.9	3.2	0.0	0.1	2.7	0.9
～80	0.0	3.1	0.9	2.4	0.0	0.1	0.0	0.5
～90	0.0	2.7	1.6	2.6	0.0	0.2	10.5	1.1
90～	0.0	27.8	41.8	25.2	0.0	6.0	35.5	12.5
孤立	0.0	2.5	0.0	12.3	0.0	9.1	0.0	7.8
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

行き先変動

時間(分)	拠点集中				拠点分散			
	平常ネット	東西幹線カット	南北幹線カット	混在	平常ネット	東西幹線カット	南北幹線カット	混在
～20	63.9	34.1	19.1	22.1	100.0	73.3	52.7	67.8
～30	29.1	17.6	14.2	22.4	0.0	14.6	24.2	16.1
～40	7.0	7.3	16.0	11.0	0.0	1.7	9.8	3.2
～50	0.0	8.1	10.3	10.8	0.0	7.5	2.8	4.9
～60	0.0	3.0	4.2	5.1	0.0	0.7	2.1	0.7
～70	0.0	3.6	6.0	3.9	0.0	0.7	0.0	0.9
～80	0.0	3.1	1.5	2.7	0.0	0.6	0.0	0.2
～90	0.0	3.7	0.2	2.4	0.0	0.7	0.0	0.0
90～	0.0	17.7	28.5	16.0	0.0	0.2	8.5	2.5
孤立	0.0	1.7	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	3.7
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

付表 1.3 防災活動交通の旅行時間別頻度分布（格子型）

行き先固定

時間(分)	拠点集中				拠点分散			
	平常ネット	中心部カット	外縁部カット	混在	平常ネット	中心部カット	外縁部カット	混在
～20	76.5	14.1	64.7	44.5	100.0	39.2	79.0	71.1
～30	23.5	3.9	17.6	15.2	0.0	12.4	0.0	6.4
～40	0.0	0.6	0.0	8.5	0.0	13.8	0.0	0.9
～50	0.0	0.7	0.0	5.1	0.0	1.4	0.0	1.2
～60	0.0	5.6	0.0	3.9	0.0	2.7	0.0	1.8
～70	0.0	1.2	0.0	2.7	0.0	0.5	0.0	3.2
～80	0.0	1.6	0.0	3.4	0.0	2.3	0.0	0.0
～90	0.0	2.3	0.0	1.1	0.0	3.5	0.0	0.0
90～	0.0	3.8	0.0	8.2	0.0	3.9	0.0	4.4
孤立	0.0	66.1	17.6	7.6	0.0	20.2	21.0	11.1
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

行き先変動

時間(分)	拠点集中				拠点分散			
	平常ネット	中心部カット	外縁部カット	混在	平常ネット	中心部カット	外縁部カット	混在
～20	76.5	27.9	64.7	52.5	100.0	65.1	82.4	85.4
～30	23.5	9.0	17.6	17.8	0.0	13.2	0.0	5.1
～40	0.0	10.6	0.0	6.6	0.0	12.5	0.0	1.4
～50	0.0	7.4	0.0	2.4	0.0	3.2	0.0	0.5
～60	0.0	18.6	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0
～70	0.0	7.4	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
～80	0.0	2.8	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
～90	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90～	0.0	7.6	0.0	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0
孤立	0.0	5.9	17.6	7.6	0.0	5.9	17.6	7.6
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

付表2.1 防災活動効果量計算結果（放射環状型）

ネット・パターン	総OD量		2565		防災活動効果量				防災活動達成率			
	行先固定		行先変動		行先固定		行先変動		行先固定		行先変動	
	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
0	2565	2565	2565	2565	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1	1425	1136	1425	2565	55.6	44.3	55.6	100.0	55.6	44.3	55.6	100.0
2	823	792	2259	2280	32.1	30.9	88.1	88.9	88.1	88.9	88.1	88.9
3	645	662	1618	2294	25.1	25.8	63.1	89.4	63.1	89.4	63.1	89.4
4	636	660	1664	2127	24.8	25.7	64.9	82.9	64.9	82.9	64.9	82.9
5	568	617	1371	2041	22.1	24.1	53.5	79.6	53.5	79.6	53.5	79.6
6	898	706	1557	2461	35.0	27.5	60.7	95.9	60.7	95.9	60.7	95.9
7	800	648	1540	2424	31.2	25.3	60.0	94.5	60.0	94.5	60.0	94.5
8	844	771	1595	2474	32.9	30.1	62.2	96.5	62.2	96.5	62.2	96.5
9	860	705	1533	2354	33.5	27.5	59.8	91.8	59.8	91.8	59.8	91.8
10	1078	957	1543	2411	42.0	37.3	60.2	94.0	60.2	94.0	60.2	94.0
11	828	766	1410	2304	32.3	29.9	55.0	89.8	55.0	89.8	55.0	89.8
12	994	809	1415	2188	38.8	31.5	55.2	85.3	55.2	85.3	55.2	85.3
13	1249	1099	1501	2239	48.7	42.8	58.5	87.3	58.5	87.3	58.5	87.3
14	994	809	1423	2159	38.8	31.5	55.5	84.2	55.5	84.2	55.5	84.2
15	2502	2501	2526	2526	97.5	97.5	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5
16	1215	1519	1530	2222	47.4	59.2	59.6	86.6	59.6	86.6	59.6	86.6
17	1409	1636	1935	2365	54.9	63.8	75.4	92.2	75.4	92.2	75.4	92.2
18	1349	1575	1908	2341	52.6	61.4	74.4	91.3	74.4	91.3	74.4	91.3
19	1415	1641	1928	2355	55.2	64.0	75.2	91.8	75.2	91.8	75.2	91.8
20	1606	1754	2209	2413	62.6	68.4	86.1	94.1	86.1	94.1	86.1	94.1
21	1731	1882	2236	2498	67.5	73.4	87.2	97.4	87.2	97.4	87.2	97.4
22	1476	1623	2287	2456	57.5	63.3	89.2	95.8	89.2	95.8	89.2	95.8
23	1671	1820	2226	2497	65.1	71.0	86.8	97.3	86.8	97.3	86.8	97.3
24	1354	1498	2244	2423	52.8	58.4	87.5	94.5	87.5	94.5	87.5	94.5
25	1604	1753	2302	2465	62.5	68.3	89.7	96.1	89.7	96.1	89.7	96.1
26	1928	1999	2454	2546	75.2	77.9	95.7	99.3	95.7	99.3	95.7	99.3
27	1928	1999	2451	2546	75.2	77.9	95.6	99.3	95.6	99.3	95.6	99.3
28	2053	2127	2464	2546	80.0	82.9	96.1	99.3	96.1	99.3	96.1	99.3
29	1985	1876	2089	2188	77.4	73.1	81.4	85.3	81.4	85.3	81.4	85.3
30	2251	2179	2275	2275	87.8	85.0	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7
31	1471	1284	1810	1991	57.3	50.1	70.6	77.6	70.6	77.6	70.6	77.6
32	1275	1050	1656	1840	49.7	40.9	64.6	71.7	64.6	71.7	64.6	71.7
33	1617	1401	1662	2196	63.0	54.6	64.8	85.6	64.8	85.6	64.8	85.6
34	1627	1442	1810	1994	63.4	56.2	70.6	77.7	70.6	77.7	70.6	77.7
35	1778	1598	1823	2099	69.3	62.3	71.1	81.8	71.1	81.8	71.1	81.8
36	1609	1393	1641	1840	62.7	54.3	64.0	71.7	64.0	71.7	64.0	71.7
37	1979	1835	1995	2565	77.2	71.5	77.8	100.0	77.8	100.0	77.8	100.0
38	1350	1093	1524	1708	52.6	42.6	59.4	66.6	59.4	66.6	59.4	66.6
39	1350	1093	1524	1817	52.6	42.6	59.4	70.8	59.4	70.8	59.4	70.8
40	1228	1346	1702	2337	47.9	52.5	66.4	91.1	66.4	91.1	66.4	91.1
41	1181	1282	1761	2423	46.0	50.0	68.7	94.5	68.7	94.5	68.7	94.5
42	976	908	1401	2328	38.1	35.4	54.6	90.8	54.6	90.8	54.6	90.8
43	1320	1178	1584	2496	51.5	45.9	61.8	97.3	61.8	97.3	61.8	97.3
44	1379	1310	1888	2433	53.8	51.1	73.6	94.9	73.6	94.9	73.6	94.9
45	1162	1079	1434	2274	45.3	42.1	55.9	88.7	55.9	88.7	55.9	88.7
46	976	908	1330	2232	38.1	35.4	51.9	87.0	51.9	87.0	51.9	87.0
47	838	766	1320	2189	32.7	29.9	51.5	85.3	51.5	85.3	51.5	85.3
48	1156	951	1485	2286	45.1	37.1	57.9	89.1	57.9	89.1	57.9	89.1
49	1132	951	1417	2178	44.1	37.1	55.2	84.9	55.2	84.9	55.2	84.9
50	1783	1839	2452	2548	69.5	71.7	95.6	99.3	95.6	99.3	95.6	99.3
51	1783	1839	2440	2537	69.5	71.7	95.1	98.9	95.1	98.9	95.1	98.9
52	1285	1401	2241	2413	50.1	54.6	87.4	94.1	87.4	94.1	87.4	94.1

付表2.1 防災活動効果量計算結果（放射環状型）

総OD量		2565							
ネット・パターン	防災活動効果量				防災活動達成率				
	行先固定		行先変動		行先固定		行先変動		
	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	
53	1324	1406	2318	2539	51.6	54.8	90.4	99.0	
54	1324	1406	2313	2528	51.6	54.8	90.2	98.6	
55	1518	1652	2451	2551	59.2	64.4	95.6	99.5	
56	1501	1646	2465	2565	58.5	64.2	96.1	100.0	
57	1493	1636	2448	2538	58.2	63.8	95.4	98.9	
58	768	968	1799	2306	29.9	37.7	70.1	89.9	
59	785	973	1793	2314	30.6	37.9	69.9	90.2	
60	1345	1458	1556	2103	52.4	56.8	60.7	82.0	
61	924	1222	1496	2365	36.0	47.6	58.3	92.2	
62	848	1145	1478	2376	33.1	44.6	57.6	92.6	
63	1073	1145	1805	2233	41.8	44.6	70.4	87.1	
64	1196	1348	1593	2244	46.6	52.6	62.1	87.5	
65	904	1155	1471	2268	35.2	45.0	57.3	88.4	
66	1023	1022	1793	2394	39.9	39.8	69.9	93.3	
67	873	1096	1680	2240	34.0	42.7	65.5	87.3	
68	681	973	1262	2294	26.5	37.9	49.2	89.4	
69	668	960	1294	2298	26.0	37.4	50.4	89.6	

付表2.2 防災活動効果量計算結果（ラダー型）

ネット・パターン	総OD量		2565		防災活動効果量				防災活動達成率			
	行先固定		行先変動		行先固定		行先変動		行先固定		行先変動	
	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
0	2561	2565	2561	2565	99.8	100.0	99.8	100.0				
1	1343	2270	1707	2505	52.4	88.5	66.5	97.7				
2	1299	2275	1641	2513	50.6	88.7	64.0	98.0				
3	1453	2375	1615	2563	56.6	92.6	63.0	99.9				
4	1299	2275	1641	2513	50.6	88.7	64.0	98.0				
5	1897	2420	1994	2565	74.0	94.3	77.7	100.0				
6	1593	1636	1678	2380	62.1	63.8	65.4	92.8				
7	1448	1682	1782	2516	56.5	65.6	69.5	98.1				
8	1576	1766	1680	2201	61.4	68.8	65.5	85.8				
9	1329	1816	1650	2398	51.8	70.8	64.3	93.5				
10	1886	2455	2322	2565	73.5	95.7	90.5	100.0				
11	1264	1595	1645	2383	49.3	62.2	64.1	92.9				
12	1228	1621	1539	2147	47.9	63.2	60.0	83.7				
13	1658	2293	1744	2508	64.6	89.4	68.0	97.8				
14	1557	2285	1883	2529	60.7	89.1	73.4	98.6				
15	1619	2304	1726	2552	63.1	89.8	67.3	99.5				
16	1388	2252	1892	2499	54.1	87.8	73.8	97.4				
17	524	974	734	1787	20.4	38.0	28.6	69.7				
18	1366	1279	1941	2495	53.3	49.9	75.7	97.3				
19	1726	1362	2221	2476	67.3	53.1	86.6	96.5				
20	778	1151	1515	2378	30.3	44.9	59.1	92.7				
21	1271	1379	1467	2292	49.6	53.8	57.2	89.4				
22	1209	1033	1431	2271	47.1	40.3	55.8	88.5				
23	1613	2094	2304	2394	62.9	81.6	89.8	93.3				
24	1658	2184	2248	2394	64.6	85.1	87.6	93.3				
25	1789	2042	2292	2393	69.7	79.6	89.4	93.3				
26	2076	2100	2288	2394	80.9	81.9	89.2	93.3				
27	1631	2055	1853	2220	63.6	80.1	72.2	86.5				
28	1048	1761	1317	2319	40.9	68.7	51.3	90.4				
29	1531	1864	1878	2163	59.7	72.7	73.2	84.3				
30	1176	1925	1834	2223	45.8	75.0	71.5	86.7				
31	1994	2084	2241	2394	77.7	81.2	87.4	93.3				
32	1061	1800	1560	2343	41.4	70.2	60.8	91.3				
33	1624	2002	1668	2380	63.3	78.1	65.0	92.8				
34	1137	1896	1687	2535	44.3	73.9	65.8	98.8				
35	1451	2036	1702	2345	56.6	79.4	66.4	91.4				
36	909	1678	1295	2236	35.4	65.4	50.5	87.2				
37	1087	1683	1569	2127	42.4	65.6	61.2	82.9				
38	1025	1822	1574	2197	40.0	71.0	61.4	85.7				
39	1236	1868	1691	2427	48.2	72.8	65.9	94.6				
40	1092	1771	1482	2326	42.6	69.0	57.8	90.7				
41	1304	1860	1613	2408	50.8	72.5	62.9	93.9				
42	1156	1896	1601	2445	45.1	73.9	62.4	95.3				
43	1571	2077	1768	2381	61.2	81.0	68.9	92.8				
44	1253	1940	1734	2503	48.8	75.6	67.6	97.6				
45	1380	1838	1881	2267	53.8	71.7	73.3	88.4				
46	1586	2073	2299	2394	61.8	80.8	89.6	93.3				
47	1292	1953	1726	2545	50.4	76.1	67.3	99.2				
48	1185	1918	1557	2465	46.2	74.8	60.7	96.1				
49	1163	1900	1341	2458	45.3	74.1	52.3	95.8				
50	1087	1843	1571	2552	42.4	71.9	61.2	99.5				
51	1483	2006	1559	2248	57.8	78.2	60.8	87.6				
52	1156	1820	1681	2223	45.1	71.0	65.5	86.7				

付表2.2 防災活動効果量計算結果（ラダー型）

総OD量 2565

ネット・パターン	防災活動効果量				防災活動達成率			
	行先固定		行先変動		行先固定		行先変動	
	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
53	1045	1709	1452	2160	40.7	66.6	56.6	84.2
54	1236	1968	1815	2201	48.2	76.7	70.8	85.8
55	1202	1894	1573	2486	46.9	73.8	61.3	96.9
56	1104	1820	1579	2222	43.0	71.0	61.6	86.6
57	1439	1809	1540	2202	56.1	70.5	60.0	85.8
58	1565	2023	2134	2394	61.0	78.9	83.2	93.3

付表2.3 防災活動効果量計算結果（格子型）

総OD量		2567							
ネット・パターン	防災活動効果量				防災活動達成率				
	行先固定		行先変動		行先固定		行先変動		
	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	
0	2567	2567	2567	2567	100.0	100.0	100.0	100.0	
1	619	1779	1606	2388	24.1	69.3	62.6	93.0	
2	591	1729	1727	2360	23.0	67.4	67.3	91.9	
3	588	1739	1784	2377	22.9	67.7	69.5	92.6	
4	2114	2027	2114	2114	82.4	79.0	82.4	82.4	
5	2169	2143	2202	2265	84.5	83.5	85.8	88.2	
6	1989	2169	2362	2416	77.5	84.5	92.0	94.1	
7	1975	2072	2207	2265	76.9	80.7	86.0	88.2	
8	1319	1938	1415	2533	51.4	75.5	55.1	98.7	
9	2125	2231	2216	2413	82.8	86.9	86.3	94.0	
10	1828	2017	1855	2412	71.2	78.6	72.3	94.0	
11	2188	2088	2259	2265	85.2	81.3	88.0	88.2	

付表 3 区間重要性の試算結果

	被災時(防災活動の効果量)				補強路線	補強時(防災活動の効果量)(台)				補強時(効果量の増分)(台)				補強時(延長当たり効果量の増分)(台/km)			
	行先固定		行先変動			行先固定		行先変動		行先固定		行先変動		行先固定		行先変動	
	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散		拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
外放射＋内放射	800	648	1540	2424	外放射	1051	956	2026	2543	251	308	486	119	41.8	51.3	81.0	19.8
					内放射	1538	1323	1637	2528	738	675	97	104	123.0	112.5	16.2	17.3
内環状＋外環状	1604	1753	2302	2465	外環状	1620	1769	2316	2465	16	16	14	0	0.8	0.8	0.7	0.0
					内環状	1604	1753	2308	2465	0	0	6	0	0.0	0.0	0.7	0.0
外放射＋外環状	1275	1050	1656	1840	外環状	1582	1397	1961	2255	307	347	305	415	16.2	18.3	16.1	21.8
					外放射	2004	1895	2105	2197	729	845	449	357	121.5	140.8	74.8	59.5
内環状＋内放射	848	1145	1478	2376	内環状	1190	1393	1991	2490	342	248	513	114	38.0	27.6	57.0	12.7
					内放射	1416	1641	1980	2490	568	496	502	114	94.7	82.7	83.7	19.0
外放射＋内環状	1320	1178	1584	2496	外放射	1495	1500	2050	2523	175	322	466	27	29.2	53.7	77.7	4.5
					内環状	1516	1320	1658	2524	196	142	74	28	21.8	15.8	8.2	3.1
内放射＋外環状	1493	1636	2448	2538	外環状	1529	1646	2473	2565	36	10	25	27	1.9	0.5	1.3	1.4
					内放射	1871	1859	2551	2565	378	223	103	27	42.0	24.8	11.4	3.0

	被災時(防災活動の達成率)(%)				補強路線	補強時(防災活動の達成率)(%)				補強時(達成率の増分)(%)				補強時(延長当たり効果量の増分)(%)			
	行先固定		行先変動			行先固定		行先変動		行先固定		行先変動		行先固定		行先変動	
	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散		拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散	拠点集中	拠点分散
外放射＋内放射	31.2	25.3	60.0	94.5	外放射	41.0	37.3	79.0	99.1	9.8	12.0	18.9	4.6	1.6	2.0	3.2	0.8
					内放射	60.0	51.6	63.8	98.6	28.8	26.3	3.8	4.1	4.8	4.4	0.6	0.7
内環状＋外環状	62.5	68.3	89.7	96.1	外環状	63.2	69.0	90.3	96.1	0.6	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
					内環状	62.5	68.3	90.0	96.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
外放射＋外環状	49.7	40.9	64.6	71.7	外環状	61.7	54.5	76.5	87.9	12.0	13.5	11.9	16.2	0.6	0.7	0.6	0.9
					外放射	78.1	73.9	82.1	85.7	28.4	32.9	17.5	13.9	4.7	5.5	2.9	2.3
内環状＋内放射	33.1	44.6	57.6	92.6	内環状	46.4	54.3	77.6	97.1	13.3	9.7	20.0	4.4	1.5	1.1	2.2	0.5
					内放射	55.2	64.0	77.2	97.1	22.1	19.3	19.6	4.4	3.7	3.2	3.3	0.7
外放射＋内環状	51.5	45.9	61.8	97.3	外放射	58.3	58.5	79.9	98.4	6.8	12.6	18.2	1.1	1.1	2.1	3.0	0.2
					内環状	59.1	51.5	64.6	98.4	7.6	5.5	2.9	1.1	0.8	0.6	0.3	0.1
内放射＋外環状	58.2	63.8	95.4	98.9	外環状	59.6	64.2	96.4	100.0	1.4	0.4	1.0	1.1	0.1	0.0	0.1	0.1
					内放射	72.9	72.5	99.5	100.0	14.7	8.7	4.0	1.1	1.6	1.0	0.4	0.1