

道路ネットワーク耐震性評価手法の提案

杉田秀樹¹・野崎智文²

¹正会員 工博 建設省土木研究所耐震技術研究センター 防災技術課長 (〒305-0820 茨城県つくば市旭1番)

²正会員 工修 建設省土木研究所耐震技術研究センター 防災技術課 主任研究員 (同上)

大規模地震が発生した直後には、救急・消防・非難等防災目的の様々な交通活動が大量に発生する。この一方で、これら交通活動に必要な道路交通基盤が必ずしも被害のない万全の状態であるとは限らない。このため建設省では、地方公共団体等と協力しながら地域の緊急輸送道路ネットワークを策定し、個々の道路施設のみならず、ネットワークとしての耐震安全性の向上を図ることとしている。

本文は、地震により被災した道路ネットワークの防災活動交通に対する機能提供度合を“ネットワーク耐震性指標”として評価する手法を提案する。本手法を適用することで、地域で想定する被災パターンに応じて、道路ネットワークとしての耐震安全性と道路区間の重要性を定量的に分析できる。

Key Words: Highway Network, Network Analysis, Seismic Safety, Earthquake Disaster

1. はじめに

これまで道路施設の地震対策は、橋梁等道路構造物の適切な設計・施工や沿道・占用施設の管理など、主として“点の視点”に基づいて実施されてきた。しかしながら道路は、交通需要が発生するゾーンから到着するゾーンまでが適切に連結されて始めて機能を発揮したと言えるのであり、道路区間単位での耐震性確保が必ずしも道路ネットワークとしての機能確保の十分条件足り得ない。これは、切迫した状況下で迅速に行われるべき防災活動交通では、特に留意すべき点である。

ネットワーク信頼性解析に関しては、電力・ガス・水道等のライフライン施設を対象として同種の目的で研究が進められているが、交通容量と需要量の関係で処理量が変化する特殊性や、交通需要そのものの予測困難性といった特徴は、ライフラインネットワークに比較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。

一方、橋梁・土構造物等道路施設の耐震補強に際して、道路のネットワーク性を考慮することは実務面から指摘されており、米国においては道路施設の震前対策マニュアルに具体的な方法が盛り込まれつつある。本文は、上記の背景を踏まえて、道路ネットワークの耐震性を評価するための実用的な手法を提案するものである。本手法を適用することで、地域で想定する被災パターンに応じて、道路ネットワークとしての耐震性及び被災した道路区間の重要性を定量的に分析できる。

2. 耐震性評価の流れ

ある地域の道路ネットワークにおいて、防災活動交通を確保するために、複数箇所の耐震対策を計画することを想定する。この場合、①地震直後の防災活動交通に対して道路ネットワークとしてどの程度のサービスを提供できるか、②ネットワーク内の複数箇所における重要度や事業優先順位をどのように考えるか、の2点を明確にする必要がある。本検討では、上記①に対してネットワーク耐震性指標 (Seismic Performance: SP) を、また、②に対して区間重要性指標 (Link Importance: LI) を評価する手法を開発した。

本検討で開発した2つの手法を、耐震対策に活用するイメージを示すと図1の通りである。道路ネットワーク全体の耐震性を表現するネットワーク耐震性指標は、様々な補強パターンの効果を比較する場合だけでなく、防災拠点等の適切な施設配置計画を策定する場合にも有用である。また区間重要性指標は、道路区間の被災がネットワーク耐震性指標の低下に与える度合を表現するものであり、耐震補強の優先順位を検討する場合に、防災活動を支援する視点からの参考資料となる。

本手法の流れを示すと図2の通りである。ネットワーク耐震性指標 SP は、被災後のネットワーク全体に対して一つ得られる。この指標は、①被害想定に基づく各リンクの被災パターン、②地域防災計画等で設定された防災拠点間の交通需要、③防災拠点と被災地域間の交通需要、に基づいて評価されるが、防災活動交通のために必要な旅行時間の増加によって防災活動の効果 (防災活動効果量) が低下するといった概念を導入した。

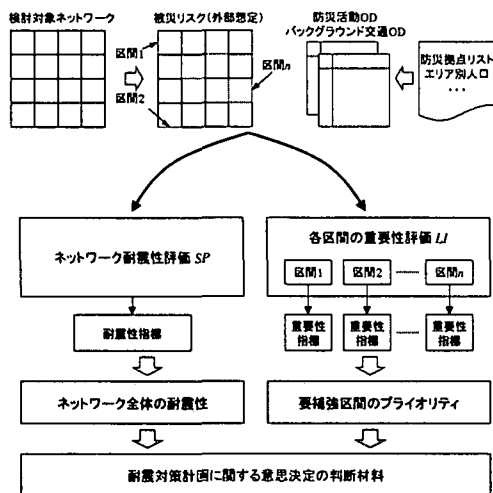


図1 耐震対策への活用イメージ

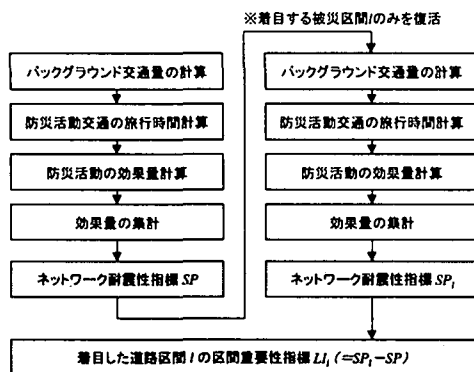


図2 耐震性評価の流れ

また、旅行時間の評価に際して、防災活動とは直接関係のないバックグラウンド交通量の影響を考慮した。

3. 耐震性評価指標

3.1 ネットワーク耐震性指標 SP

防災活動の考え方を示すと図3の通りである。救急・消防・避難等防災活動の目的を k で表わし、ネットワーク上の発生集中交通を生じるノード（セントロイド） i から j に向かう目的 k の OD 交通分布 T_{ij}^k が与えられているとする。この交通が利用する i から j へのルートは複数存在し得るが、このうち任意の一つを r とし、ルート r 上の交通量を T_{ijr}^k 、所要時間を t_r とする。ただしこれらの量は、地震直後に道路ネットワークが被災した状態で把握されているものとする。ここで、目的 k の交通が時間 t_0 以内に到着すれば所要の目的を達成でき、 t_{max} 以上の時間を要した場合には目的を達成できないと考え、単位防災活動効果量 $E^k(t)$ を定義する。この $E^k(t)$

$$E_{ij}^k = \sum_r E^k(t_r) T_{ijr}^k \dots\dots\dots (1)$$

$$SP^k = \frac{\sum_i \sum_j E_{ij}^k}{T} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_r E^k(t_r) T_{ijr}^k}{\sum_i \sum_j \sum_r T_{ijr}^k} \dots\dots\dots (2)$$

を用いれば、ノード i から j に向かう目的 k の防災活動

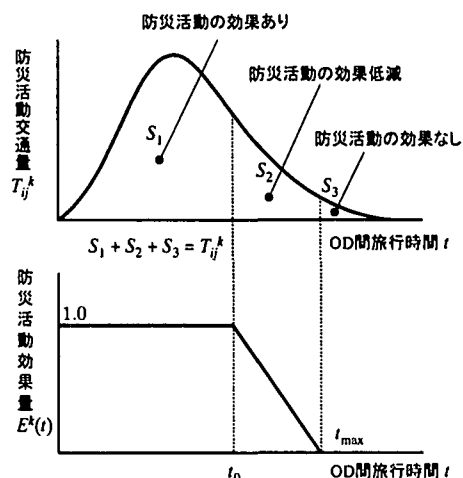


図3 防災活動交通量と防災活動効果量

交通の効果量 E_{ij}^k は式(1)により与えられる。

この E_{ij}^k をすべての OD ペアに対して加算し、さらにこれをネットワーク中の総交通量 T を用いて無次元化したものを、活動目的 k に対するネットワーク耐震性指標 SP^k として定義する。

SP^k は 0~1 の値をとり、すべての防災活動交通トリップが目標時間 t_0 以内に完了すれば SP^k は 1 となる。一方、旅行時間が t_0 を超えるトリップが増加するに従って、 SP^k は 1 よりも小さくなる。すなわち、ネットワーク耐震性指標 SP^k は、検討対象エリアにおいて防災活動交通の目的が達成される程度を表現する指標と言える。

3.2 区間重要性指標 LI

防災活動目的 k に対する道路区間 l の重要性 LI_l^k は、被災後のネットワーク耐震性指標 SP^k と、道路区間 l のみを復活させた場合のネットワーク耐震性指標 SP_l^k を比較することにより得られる。

$$LI_l^k = SP_l^k - SP^k \dots\dots\dots (3)$$

すなわち、区間重要性 LI_l^k は、想定された被災パターンの下で、ネットワーク耐震性に対する道路区間 l の感度を表現する指標であると言える。

4. 防災活動交通の想定

防災活動交通 T_{ij}^k を算定するためには、防災活動の目的に応じた OD マトリクス、及び、ネットワーク上への交通量配分が必要となる。まず、防災活動交通によって連絡が必要な防災拠点を表した防災拠点間連絡マトリクスを表1のように準備する。図中の●印は、連絡が必要な防災拠点ペアを表している。これは、被災地及び各防災拠点の間で、地震発生後に防災活動に関する交通需要が発生すると考えられる組合せを選んだものである。

防災拠点間連絡マトリクスと防災拠点間の防災活動交通量は、本来、地震発生後の状況を想定した未知量である。地域特性や地震規模により変化すると考えられる

表1 防災拠点間連絡マトリクスの例

			医療機関				救急・救命			避難地被災地	
			17	18	19	20	21	22	23	30	31
			県立・市立病院	総合病院	保健所・支庁	血液センター	警察署	消防署	自衛隊	広域避難地	被災地
医療機関	17	県立・市立病院	●	●	●		●		●	●	
	18	総合病院		●	●		●		●	●	
	19	保健所・支庁			●		●		●	●	
	20	血液センター									
救急救命	21	警察署								●	
	22	消防署								●	
	23	自衛隊								●	
避難地被災地	30	広域被災地								●	
	31	被災地									

防災活動交通の特性を地震前に想定する手法については、阪神淡路大震災の経験等を踏まえて、別途検討が必要である。本検討においては、便宜上、解析対象エリアを分割した各ゾーンの防災拠点数と平常時ネットワークにおけるゾーン間距離に基づいたグラビティーモデルを利用して、防災活動交通のODマトリクスを作成した。

$$(T_{ij1}^k, T_{ij2}^k) = T_i^k \frac{(T_{ij1}^k, T_{ij2}^k)}{T_{ij1}^k + T_{ij2}^k} \dots \dots \dots (4)$$

$$T_{ij}^k = (N_{ij}^k)^{\beta} (d_{ij})^{\gamma}$$

ここに、 N_{ij}^k はゾーン*j*における目的*k*の防災拠点数、 d_{ij} はゾーン*ij*間の抽象距離、 T_i^k はゾーン*i*から発生する目的*k*の交通量、 T_{ij}^k はゾーン*i*から*j*の実交通需要、 β 及び γ はパラメータである。式(4)において、ゾーン*i*から発生する防災活動は、ゾーン*i*に最も近いふたつのゾーン*j₁*及び*j₂*を選択するものとし、これらふたつのゾーンへの交通量 (T_{ij1}^k , T_{ij2}^k) を、各ゾーンの防災拠点数に基づくグラビティーモデルによって配分している。

また防災拠点ゾーンの選択については、①行き先固定型、②行き先変動型の2種類を想定した。行き先固定型では、防災活動交通は平常時のネットワーク上の距離に基づいて到達拠点を選擇する。また行き先変動型では、与えられた被災ネットワーク上での旅行時間に基づいて到着拠点の選擇を行う。前者の場合、 d_{ij} として平常時のネットワークにおける最短距離経路上の距離を用い、後者の場合は d_{ij} として被災後のネットワークにおける最短距離経路上の旅行時間を用いて計算を行う。

5. 簡単なモデルケースによる試算

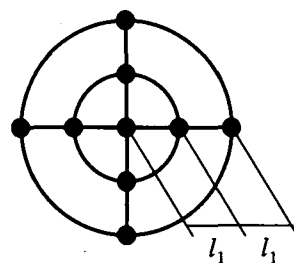
5. 1 道路ネットワークと防災活動交通需要

本検討で提案した耐震性評価手法の妥当性を確認するため、図4に示すような簡単な放射環状型の道路ネットワークを設定して試算を行った。モデルネットワークを規定する l_1 は、平均的な地方生活圏の圏域面積、市町村数に基づいた市町村間距離（可住地面積換算）より

6.0km と設定した。また、交通量と速度の関係はすべてのリンクで同一とした。

防災活動交通の目的は救急活動の一種類のみとし、死傷者等の率を用いてゾーンあたり142トリップ発生

すると想定した。ここに、図4 モデルネットワーク人口密度は東京都を除く関東全域の平均値、死傷者等の率は阪神淡路大震災による兵庫県内の死者・行方不明者・負傷者の対人口比率を用いた。救急活動に関する単位防災活動効果量の関数形は、 t_0 を60分、 t_{max} を90分と想定した。また、防災活動交通の配分に用いる防災拠点数については、①拠点が中心部付近に多く存在する拠点集中型、②拠点がネットワーク全体に均等に存在する拠点分散型の2種類を想定した。



5. 2 試算ケース

ネットワーク耐震性指標を比較するための試算は、①道路区間の被災パターン（被災区間はいずれも4区間で共通）、②防災活動交通の拠点選擇パターン（行き先固定又は行き先変動）、③防災拠点の分布パターン（拠点集中型又は拠点分散型）を変化させて、表2に示す組み合わせについて行った。

また、区間重要性指標を比較するための試算は、モデルネットワーク上で被災区間の部位を内環状部、内放射部、外環状部、外放射部の2種類に変化させて、表3に示す組み合わせについて行った。

5. 3 ネットワーク耐震性指標の比較

防災活動交通の所要時間が、道路区間の被災パターンによってどのように変化するかを図5に示す。図5(a)は拠点選擇が行き先固定型で拠点分布が集中型の場合、

表2 ネットワーク耐震性指標SPの試算ケース

拠点分布パターン	拠点集中型		拠点分散型		計
	行き先固定型	行き先変動型	行き先固定型	行き先変動型	
放射部のみ被災	14	14	14	14	56
環状部のみ被災	14	14	14	14	56
放射部と環状部が被災	41	41	41	41	164

表3 区間重要性指標LIの試算ケース

被災部位の組み合わせ	被災箇所数			
	外放射部	内放射部	外環状部	内環状部
外放射部＋内放射部	2	2		
外環状部＋内環状部			2	2
外放射部＋外環状部	2		2	
内放射部＋内環状部		2		2
外放射部＋内環状部	2			2
内放射部＋外環状部		2	2	

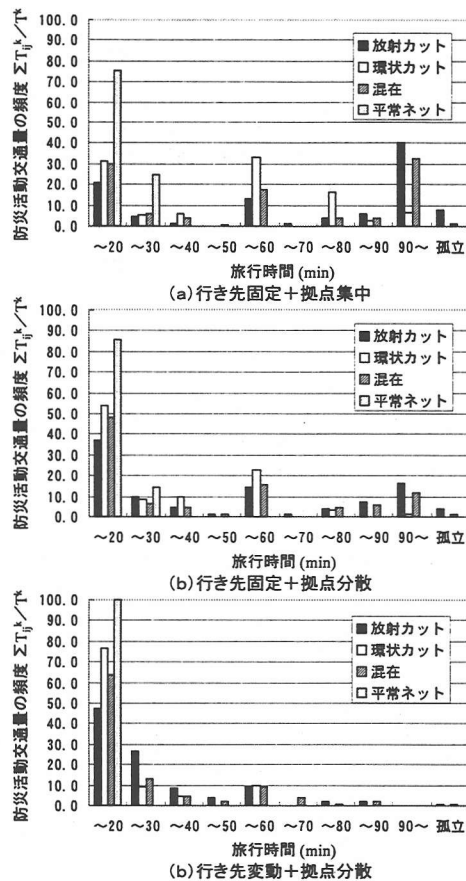


図5 被災パターンによる防災活動交通の所要時間

(b)は拠点選択が行き先固定型で拠点分布が分散型の場合、また、(c)は拠点選択が行き先変動型で拠点分布が分散型の場合に対応している。これらを比較すると、拠点選択パターンは行き先固定型よりも行き先変動型の方が、また、拠点分布パターンは集中型よりも分散型の方が防災活動交通の所要時間が短いことがわかる。

ネットワーク耐震性指標 SP の計算結果を図6に示す。これによれば、拠点分布は集中型よりも分散型の方が、また、拠点選択パターンは固定型よりも集中型の方が SP が大きく、ネットワーク耐震上有利であると判断できる。また、被災パターンによる SP の変化に着目すると、環状部よりも放射部が被災した場合の方が概ね SP が小さく、ネットワーク耐震性に与える影響が大きい。

5. 4 区間重要性指標の比較

区間重要性指標 LI の計算結果を表4に示す。区間重要性指標は、それぞれ被災部位の組み合わせパターンにおいて、4区間の被災区間のうち1区間を復活させた場合のネットワーク耐震性指標 SP の変化を示すものである。これによれば、想定する被災パターンによって、同一部位であっても区間重要性指標は変化する。たとえば、同じ外放射部の道路区間であっても、外環状部が被災している場合には11.54、内環状部が被災している場合には5.15（行き先固定型で拠点集中型の場合）となる。表中には被災部位ごとの区間重要性指標の平均値を併せ

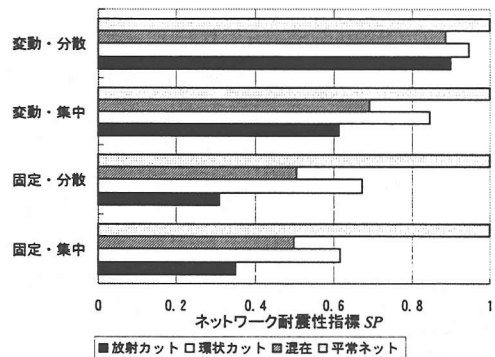


図6 ネットワーク耐震性指標 SP の変化

表4 区間重要性評価指標 LI の変化

		行き先固定型		行き先変動型	
		拠点集中型	拠点分散型	拠点集中型	拠点分散型
外放射部 + 内放射部	外放射部	9.24	11.27	18.44	4.60
	内放射部	28.50	25.96	3.47	3.90
外環状部 + 内環状部	外環状部	0.62	0.62	0.47	0.00
	内環状部	0.00	0.00	0.00	0.00
外放射部 + 外環状部	外放射部	11.54	13.14	11.27	16.61
	外環状部	27.49	31.97	17.50	14.35
内放射部 + 内環状部	内放射部	12.87	9.90	20.08	4.68
	内環状部	19.81	17.00	19.26	4.68
外放射部 + 内環状部	外放射部	5.15	11.23	18.01	2.07
	内環状部	7.10	4.99	2.88	1.09
内放射部 + 外環状部	内放射部	0.31	0.31	0.55	1.05
	外環状部	14.70	8.11	3.86	1.05
被災部位別平均	放射部平均	11.27	11.97	11.97	5.48
	環状部平均	11.62	10.45	7.33	3.53
	外側部平均	11.46	12.72	11.59	6.45
	内側部平均	11.43	9.69	7.71	2.57

て示しているが、これによれば定性的な傾向として、放射部は環状部に比較して重要性が高いこと、また、外側部は内側部に比較して重要性が高いことがわかる。

6. まとめ

本文では、防災活動交通に対する道路ネットワークのサービス程度を表現するネットワーク耐震性指標 SP と、道路ネットワーク上の道路区間の重要性を表現する区間重要度指標 LI を提案した。本手法は、道路施設等の補強優先度の設定など道路管理者の地震防災対策に際して、ひとつの客観的な判断材料を与えるものである。

今後、防災活動交通量、防災活動効果量関数、バックグラウンド交通特性等の想定手法を検討して本手法の高度化を図る。また本手法を応用して、震前対策としての耐震補強と震後対策としての交通規制を適切に組合せた合理的な道路ネットワーク管理手法についても検討を進める。

7. 参考文献

建設省土木研究所：道路ネットワーク耐震性評価手法に関する研究(No.1)(No.2)、土木研究所資料第3589号、第3621号、1998.9、1999.1