

複数リンクの途絶を考慮した 都市鉄道ネットワークの脆弱性評価

中川 拓朗¹・金子雄一郎²・横山 茂樹³・井上 真志⁴

¹学生会員 日本大学大学院理工学研究科博士前期課程土木工学専攻
(〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14)
E-mail:csta16014@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14)
E-mail:kaneko@civil.cst.nihon-u.ac.jp

³非会員 社会システム株式会社 (〒150-0013 渋谷区恵比寿1-20-22 三富ビル6階)
E-mail:s_yokoyama@crp.co.jp

⁴非会員 社会システム株式会社 (〒150-0013 渋谷区恵比寿1-20-22 三富ビル6階)
E-mail:inoue@crp.co.jp

本研究は都市鉄道ネットワークを対象に、複数のリンクが途絶した場合の脆弱性を評価する手法を考案し、首都直下地震の発生を想定した評価を行ったものである。具体的には、内閣府の首都直下地震モデル検討会が公表している震度分布データ（全 14 ケース）を基に、一定震度以上の地域に含まれる高架橋及び橋梁を含むリンクが途絶した場合の脆弱性指標値を算出した。その結果、都心部直下を震源とするケースや周辺部を震源とするケースで指標値が高い、すなわち途絶した場合の利用者行動への影響が大きいことが示された。また、多数のリンク途絶によって目的地へ移動不可能な OD 交通量の割合を算出した結果、全体的に途絶リンクの周辺ゾーンでは移動不可能な割合が高いものの、代替経路が存在する場合にはその割合は低下する傾向が示された。

Key Words : urban transportation, link disruption, vulnerability, capital earthquake

1. はじめに

(1) 背景と目的

大規模地震等の災害が発生した場合、交通の機能低下を可能な限り抑制することは、国民生活の安全上きわめて重要な課題である。なかでも鉄道は、都市の社会経済活動を支える重要な基盤施設であり、一旦長期にわたり運行が停止となった場合、多方面へ甚大な影響を及ぼす。特に東京圏の場合、圏域全体で 30%、東京区部では 48% と高いことに加え¹⁾、政府の地震調査研究推進本部の主要活断層の評価結果によると、今後 30 年以内に 70% 程度の確率で M7 クラスの巨大地震の発生が想定されており、震災対策の立案が喫緊の課題となっている。

一方、鉄道網の広域性や稠密性を考慮すると、防災や減災に係る施策は、効率的かつ効果的に実施されることが望ましい。そのための基礎的情報として、震災によって特定のリンク（駅間）が途絶した場合のアクセシビリティへの影響を評価することは、一定の意義を有するものと考えられる。具体的には、平時より鉄道ネットワークにおける脆弱性なリンクを把握できれば、国や鉄道事

業者が対策を検討する上で、有益な情報となるものと考えられる。このような社会基盤施設の脆弱性については、例えば 2013 年 12 月に公布された国土強靱化基本法の前文において、防災及び減災に係る施策の優先順位を定め、これを的確に実施していくためにも必要であるとの指摘がなされている。

これまで著者らは、都市鉄道を対象にネットワーク機能の脆弱性を評価する指標を検討し、これを実ネットワークレベルで計算する手法を開発してきたが^{2,3)}、途絶させるリンクは、路線単位もしくは駅間単位としていた。これは、東京圏において頻発する人身事故や信号トラブル、土砂災害などの半日から数日程度の局所的な輸送障害を対象としていたためであるが、大規模地震の場合、1995 年 1 月に発生した阪神・淡路大震災の例を見ても明らかのように、複数のリンクが同時に一定期間途絶する可能性が高い。

そこで本研究では、大規模地震の発生によって複数のリンクが途絶する場合を考慮した都市鉄道ネットワークの脆弱性の評価手法を検討するとともに、東京圏を対象に評価を行うことを目的とする。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

交通ネットワークの脆弱性を評価した研究は、これまで国内外で行われており、これらは中山⁴⁾によってレビューされている。脆弱性とは、一般に「もろさ」を表わす用語であるが、交通ネットワークを対象とした場合、特定のリンクもしくはノードに欠損等が発生した場合、深刻なアクセシビリティの低下を引き起こすネットワークの機能上の「弱さ」を示している (Taylor⁵⁾)。阪神・淡路大震災によって、交通ネットワークが構造上の壊滅的な被害を受けるとともに、機能上でも甚大な影響があったことから、脆弱性が注目されることとなった⁴⁾。

脆弱性の評価にあたっては、適切な評価指標を設定すること、大規模なネットワークを対象に効率的に評価を行うことが重要である。このうち評価指標については、OD (起終点) 間の一般化費用と交通量を乗じた値の変化分を用いる手法 (Taylor⁵⁾, Jenelius⁶⁾, Chen⁷⁾ など) や、OD 間を接続する非重複経路数 (2 地点間のリンクを共有しない経路数) を指標として用いる手法 (Kurauchi⁸⁾, 原田⁹⁾ など) が提案されているが、これらは道路ネットワークを対象としたものである。

一方、鉄道ネットワークについて金子^{2,3)}は、鉄道は道路と比較して路線密度 (単位面積当たりの路線延長) が低く代替経路数が限られること、路線毎に需要特性が異なる点に着目し、OD 間の一般化費用の増分もしくはこれを交通量で重み付けした値を用いることを提案し、東京圏の鉄道ネットワークを対象に評価を行っている。また、Rodriguez-Nunez¹⁰⁾は、異常時と平常時の平均移動時間の差分をトリップ数で重み付けした指標を提案し、マドリードの鉄道ネットワークを対象に評価を行っており、Cats¹¹⁾は、ストックホルムの公共交通ネットワークを対象に、特定のリンクの途絶による列車の容量低下を評価対象としている。

また、脆弱性の評価にあたっては、途絶させるリンクを効率的に設定することが重要な課題である。例えば道路ネットワークの場合、一般にリンク数が膨大となるため、既往研究では途絶させるリンクを限定する場合が多い (Janelius⁶⁾, 原田⁹⁾ など)。また、Chen¹²⁾は、あらかじめ影響範囲 (論文では impact area と呼称) を設定し、その範囲内のリンクを途絶させることで、計算時間の短縮化を図っている。

一方、複数のリンクを途絶させる場合、その組み合わせは膨大な数になることから、適切な絞り込みが必要である。この点について本研究では、後述するとおり、内閣府が公表している首都直下地震の想定震度分布において、一定震度以上の地域に含まれるリンクのうち、特定の構造物を含むものを抽出し、これらが途絶した場合の脆弱性指標値を算出することとする。

2. 大規模震災時における都市鉄道ネットワークの途絶事例と近年の対策

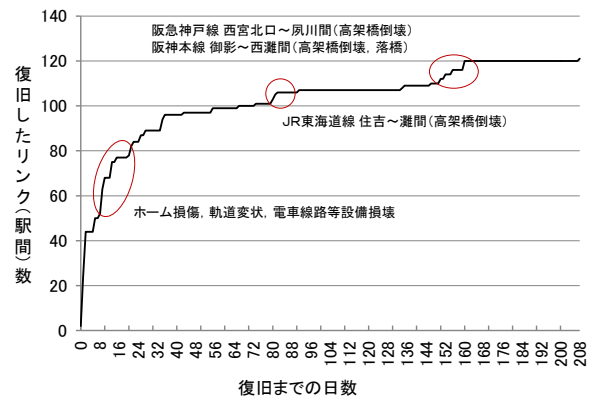
(1) 阪神・淡路大震災時における鉄道の被災状況¹³⁾

1995 年 1 月 17 日未明に発生した阪神・淡路大震災は戦後最大の都市直下型地震であり、鉄道、道路、港湾等の交通基盤施設にも甚大な被害が生じた。このうち鉄道については、阪神間を結ぶ JR 東海道線 (神戸線)、阪急電鉄神戸線、阪神電鉄本線の主要路線において、高架橋の倒壊や架道橋等の落下、駐車場の崩壊、盛土の沈下、土留擁壁の崩壊など様々な被害が発生している。

図-1 は、上述の鉄道ネットワークをリンク (駅間) に区分し、各々のリンクの復旧過程を示したものである。これより全体の 1/3 程度のリンク (約 40 リンク) では損傷の程度が軽微であったことから、1 日から数日で復旧しているが、ホーム損傷、軌道変状が発生したリンクでは、復旧まで最大 20 日程度を要していることがわかる。さらに、高架橋倒壊や落橋が発生したリンクでは、復旧まで約 80 日~160 日と長期間を要している。

また、図-2a 及び図-2b は、震災発生 2 ヶ月後及び 4 ヶ月後の途絶リンク (不通となっているリンク) を示したものである。これより 2 ヶ月後の段階で、阪急神戸線の 4 リンク、JR 神戸線の 2 リンク、阪神本線の 4 リンクが、それぞれ高架橋倒壊や落橋、桁落下などにより不通となっており、さらに 4 ヶ月後の段階でも、阪急神戸線の 2 リンク、阪神本線の 1 リンクで不通の状態が続いている。

このように大規模地震が発生した場合、鉄道構造物の被害状況によって復旧までの日数が大きく異なることがわかる。特に、高架橋や橋梁などの構造物を有するリンクでは、途絶による影響が長期に及ぶリスクが高いと言える。



出典：文献 14), 15) より作成

図-1 阪神・淡路大震災時における復旧リンク数の推移



図-2a 阪神淡路大震災によって途絶したリンク
(発災 2 ヶ月後)



図-2b 阪神淡路大震災によって途絶したリンク
(発災 4 ヶ月後)

(2) 都市鉄道における大規模地震対策

鉄道における大規模地震対策については、阪神・淡路大震災によって高架橋の倒壊などの甚大な被害が発生したことを踏まえ、1998年12月に鉄道土木構造物の耐震基準が強化されている。具体的には、想定地震を従来の海洋型地震に直下型地震を加え、耐震性能を中規模程度（震度5程度）では「構造物を損傷させない」とし、大規模地震（震度6強～7程度）では「早期に機能回復させるため、構造物の被害を軽微な損傷に留める」としている。また、阪神・淡路大震災以前に建設された土木構造物については、高架橋の柱に鋼板を巻くなどの耐震補強対策が、各鉄道事業者において実施されている。

これらの一連の対策を踏まえると、震災時に鉄道構造物が致命的な損傷を受けるという可能性は必ずしも高くないものと考えられる。しかし、東日本大震災発生時の対応を見ても明らかなように、大規模地震の場合、構造物の被災状況を把握するための点検・診断に一定の時間を要するほか、仮に損傷が生じた場合、復旧までには相応の時間が必要となる。

また、本研究で対象とする東京圏については、2016年

4月に交通政策審議会陸上分科会鉄道部会より答申された「東京圏における今後の都市鉄道のあり方」において指摘されているように、今後の耐震補強対策として、構造物が倒壊しないもの大きく変形する「曲げ破壊先行型」への対応の促進が課題となっている。

このように鉄道ネットワーク上で高架橋や橋梁などの構造物を有するリンクは、一定の途絶のリスクを有していると考えられることから、本研究における脆弱性評価の対象として取り上げることとする。

3. 複数リンクの途絶を考慮した脆弱性評価手法

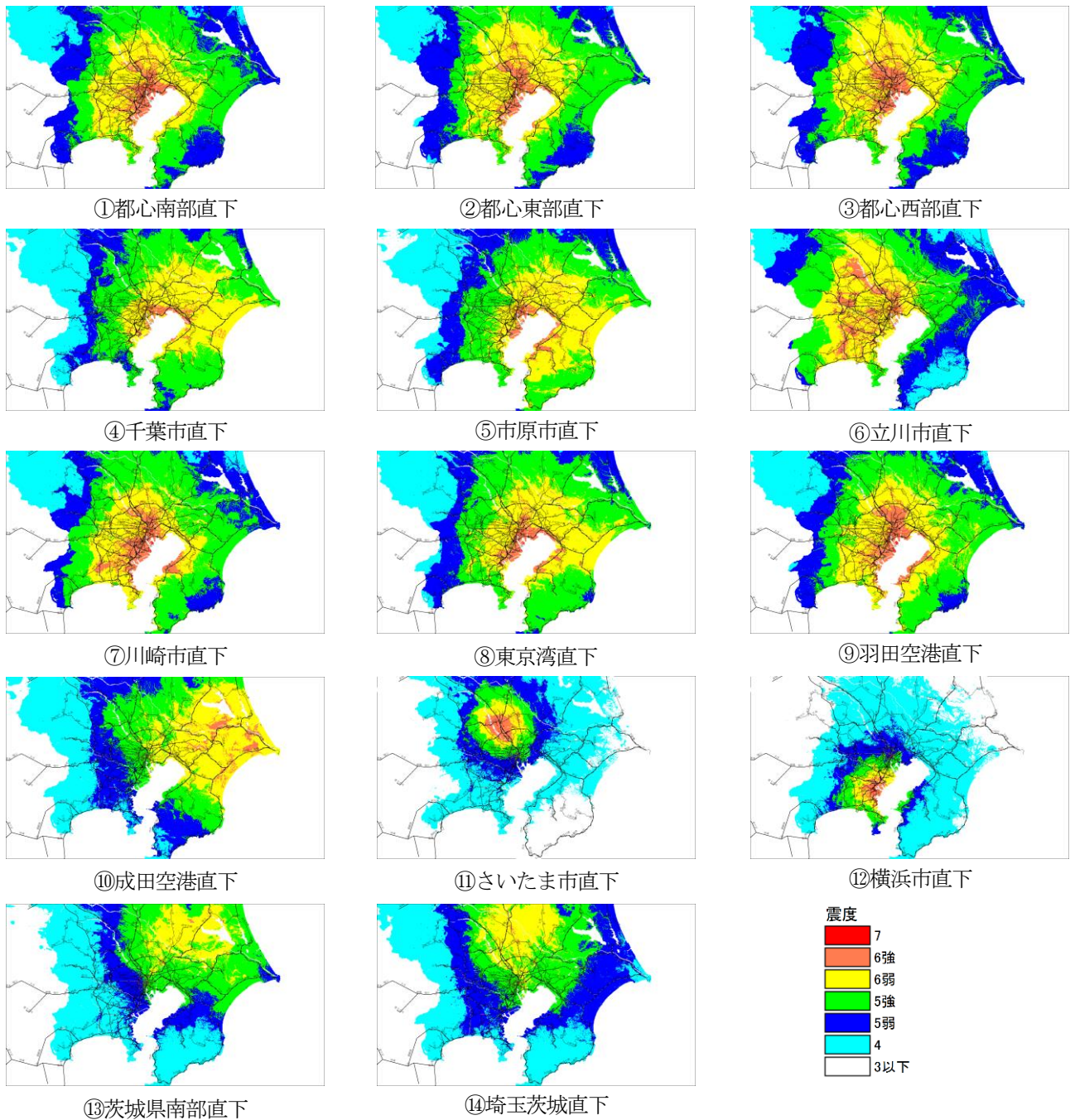
(1) 評価の基本的考え方

本研究では2章における検討を踏まえ、東京圏の鉄道ネットワークを対象に、高架橋及び橋梁を含むリンクが途絶した場合を想定した脆弱性評価を行う。具体的には、首都直下地震の想定震度分布で一定震度以上の地域に含まれるリンクのうち、高架橋及び橋梁を含むものを抽出し、これらの複数のリンクが途絶した場合の脆弱性指標値を算出する。

一般にネットワーク上の複数リンクを途絶させる場合、その組み合わせは膨大な数となる。この点について、2011年3月に発生した東日本大震災を契機に、内閣府の首都直下地震モデル検討会が、最新の科学的知見に基づく巨大地震モデルを用いた震度分布（250mメッシュ単位）を公表している。そこで、本研究では途絶リンクの抽出するために、これらの震度分布情報を活用することとする。

この震度分布と鉄道網を重ねて表示したものが図-3である。全14ケースのうち①から⑫は、地震発生場所の想定が難しく、都区部及び首都地域の中核都市等の直下に想定される震度分布であり、⑬と⑭は、地震の発生が想定されている震度分布である。

本研究では、以上の震度分布に基づき、震度6強以上の地域における高架橋・橋梁を含むリンクが途絶する場合を想定して、脆弱性の評価を行う。震度6強以上とした理由としては、上述した交通政策審議会の答申において、震災対策の対象を震度6強以上としていることが挙げられる。なお、個別の高架橋及び橋梁の状態や耐震性能に関する情報は一般に公開されていないことから、震災時における被災状況を想定することは困難であるため、本研究では被災するリスクは一様と仮定する。



注：震度分布データは内閣府「首都直下地震モデル検討会」によるデータを使用した。

図-3 首都直下地震の想定震度分布（全 14 ケース）

(2) 脆弱性の評価手法

鉄道ネットワーク上の特定のリンクが途絶した場合、利用者が他の経路へ迂回することで、一般化費用は増大する。本研究では脆弱性の評価指標として、著者らの既往研究³⁾を参考に、OD間の一般化費用をOD交通量で重み付けしたものの合計値の変化分を用いることとする。この指標の位置づけとして、路線途絶時のアクセシビリティ低下という機能面に加えて需要面を考慮した評価を行うものである。指標値を V とすると、式(1)

のように表わされる。

$$V = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{with} \cdot Q_{ij} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{without} \cdot Q_{ij} \quad (1)$$

ここで、 GC_{ij} ：ゾーン ij 間の一般化費用、 Q_{ij} ：ゾーン ij 間(OD間)の交通量である。特定のリンクを途絶させた場合(災害時)を *with*、途絶させない場合(平常時)を *without* と表記している。指標値が高いほど、当該リンクの途絶による影響が大きいことを表している。

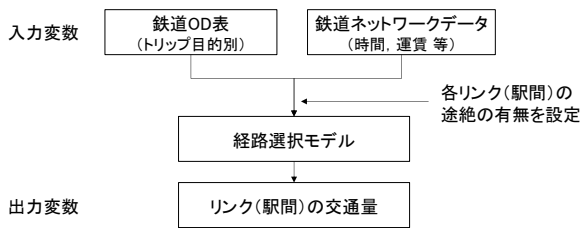


図-4 脆弱性評価のための交通需要分析の手順

一方で、首都直下地震の想定震度分布(図-3 参照)を見ると、ケースによっては震度 6 強以上の地域が広範囲にわたっており、ゾーン間で利用可能な経路がすべて途絶する場合も生じうる。そのような場合、移動を中止することも想定されることから、本研究では上述した 2 つの脆弱性指標に加えて、ゾーン間毎に移動不可能な OD 交通量を求め、当該ゾーン間の全 OD 交通量に対する割合を算出する。

以上の指標値を計測するためには、特定のリンクを途絶させた場合の交通需要の変化を分析する必要がある。この交通需要分析手法の手順を図-4 に示す。このうち経路選択モデルについては、先行研究(金子ら²³⁾と同様に構造化プロビットモデルを用いる。これは、対象とする東京圏の鉄道ネットワークは稠密性が高く、経路の重複が多数見られることから、経路重複による間接効用関数中の誤差項の相関を明示的に考慮することが有効なためである。その詳細は文献 2) に記載していることから、ここでは概略のみ示すこととする。

式(1)で示した脆弱性指標を算出するための OD 間の一般化費用については経路毎で異なる値を持つことから、代表値の算出が必要となる。この一般化費用の代表値の算出に関し、プロビットモデルで推定された確定項のパラメータを援用して各経路の効用を計算し、近似的にログサム値を算出する^{註1)}。ログサム値は式(3)のように求めることができる。

$$GC_{ij} = \frac{1}{\theta_c} \ln \sum_{r=1}^n \exp(V_{ij,r}) \quad (2)$$

ここで、 GC_{ij} : ゾーン i から j への一般化費用、 θ_c : 費用のパラメータ、 $V_{ij,r}$: ゾーン i から j への r 番目の経路の効用関数の確定項である。確定項 $V_{ij,r}$ については、式(4)で求めることができる。

$$V_{ij,r} = \theta_c C_{ij,r} + \theta_1 T_{1,ij,r} + \theta_2 T_{2,ij,r} + \theta_3 T_{3,ij,r} + \theta_4 Cong_{ij,r} \quad (3)$$

ここで、 $C_{ij,r}$: 経路の総費用 [円]、 $T_{1,ij,r}$ 駅アクセス・イグレス時間、 $T_{2,ij,r}$: 乗車時間 [分]、 $T_{3,ij,r}$: 乗換時間 (待

表-1 経路選択モデルのパラメータ推定結果

	通勤	通学	私事	業務
費用 (円)	-0.0019 (-2.99)	-0.0109 (-5.59)	-0.0112 (-4.94)	-0.0023 (-2.85)
乗車時間 (分)	-0.0802 (-9.78)	-0.1220 (-6.48)	-0.2297 (-4.06)	-0.1074 (-7.53)
乗換待ち時間 (分)	-0.1753 (-12.7)	-0.2080 (-9.39)	-0.3009 (-5.68)	-0.1910 (-9.54)
駅アクセス・イグレス利便性	0.5410 (13.0)	0.4039 (11.2)	0.6568 (6.08)	0.5094 (9.99)
混雑指標	-0.0112 (-4.17)	-0.0078 (-1.57)	—	—
分散パラメータ	0.0264 (2.62)	0.1470 (2.88)	0.3581 (1.84)	0.0484 (2.14)
尤度比	0.343	0.276	0.356	0.291
サンプル数	1,441	1,122	1,099	1,263

注: () 内は t 値

ち時間を含む) [分]、 $Cong_{ij,r}$: 経路の混雑指標^{註2)}、 θ_c : 費用のパラメータ、 θ_k : 各変数のパラメータである。

(3) 評価対象地域と使用するデータ

評価対象地域については、東京駅から概ね 80km 圏内とし、ゾーン数は 2,910 である。各ゾーンの中心からは、国土交通省の「大都市交通センサス」の実績に基づき、最低 1 駅以上のアクセスリンクが設定されている。仮にゾーン中心から最寄り駅が 2 箇所あり、いずれの路線も途絶した場合、目的地へ到達することは不可能である。これらの割合をゾーン毎に把握する。

分析に用いるデータについて、OD 交通量は国勢調査や東京都市圏パーソントリップ調査等を基に作成した日単位(平成 17 年時点)のものを用いており、鉄道ネットワークは平成 17 年度のデータを基本に、以降の開業した路線を追加して構成している^{註3)}

式(1)の間接効用関数を構成する各変数のパラメータについては、国土交通省が実施した「平成 17 年大都市交通センサス」のトリップデータを用いて推定する。その結果を表-1 に示す。

(4) 各リンクにおける高架橋・橋梁の有無

対象の鉄道ネットワークを構成するリンクにおける高架橋及び橋梁の有無について、Google Earth の航空写真及びストリートビュー機能を用いて把握する。その結果は図-5 に示すとおりであり、震源が都心直下のケース(①都心南部、②都心東部、③都心西部)及び周辺部のケース(⑥立川市直下、⑦川崎市直下、⑨羽田空港直下)において、高架橋及び橋梁を有するリンク数が多いことがわかる。

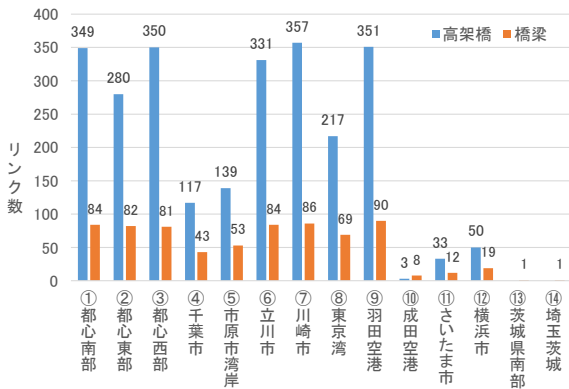


図-5 各ケースの高架橋・橋梁を有するリンク数

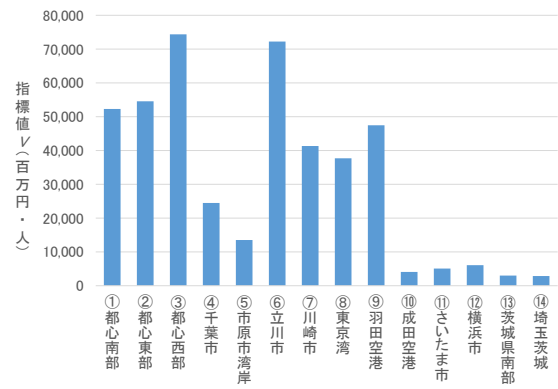


図-6 各ケースの脆弱性指標値

4. 脆弱性の評価結果

(1) 脆弱性指標値の算出

まず、震度分布ケースごとに脆弱性指標値 V を算出した結果を図-6 に示す。なお、上述したゾーン間で移動不可能な OD 交通量の値は 0 であることから、当該 OD ペアについては、指標値の算出には含めないこととした。これより、ケース間で脆弱性指標値が大きく異なっているが、特に震源が都心直下のケース（①都心南部、②都心東部、③都心西部）や周辺部直下のケース（⑥立川市直下、⑦川崎市直下、⑧東京湾直下、⑨羽田空港直下）において指標値が高くなっており、リンク途絶による利用者行動への影響が大きいことがわかる。これに対して、その他のケースでは、途絶による影響は限定的である。

ここで、脆弱性指標値 V と途絶させたリンク数の関係を示したものを図-7 に示す。これより、指標値が高いのは概して途絶リンク数が多いケースであるものの、①都心南部直下、③都心西部直下、⑥立川市直下、⑦川崎市直下、⑨羽田空港直下の各ケースでは、途絶リンク数がほぼ同水準にも関わらず、指標値に比較的大きな差異がみられる。特に③都心西部直下、⑥立川市直下の値が高いが、前者は震度 6 強以上のエリアが都心部をほぼカバーしていること、後者は広域にわたっていることがそれぞれ関係しているものと考えられる。

(2) ゾーン間の移動不可能な交通量の算出

次に、震度分布ケースごとに移動不可能な交通量の割合を算出した結果を図-8 に、ゾーンごとの移動不可能な割合を算出した結果を図-9 にそれぞれ示す。

まず、図-8 より、①都心南部直下、⑥立川市直下、⑦川崎市直下、⑨羽田空港直下の各ケースで移動不可能な割合が 20% 超と、他のケースより大きくなっている。これらのケースについては、図-3 で示したとおり、震度 6 強以上のエリアが広範にわたっていることが影響して

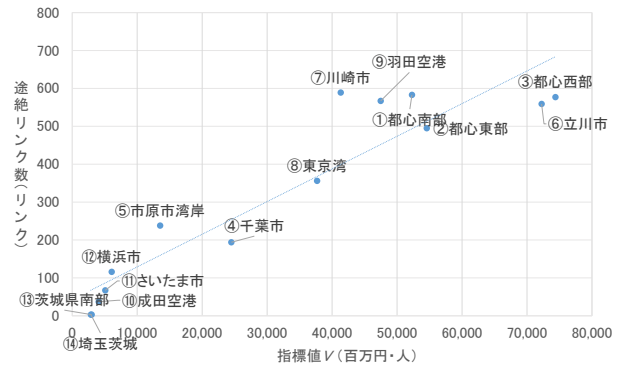


図-7 脆弱性指標値と途絶リンク数との関係

いるものと考えられる。また、全体的な傾向として、途絶リンク（図中の青線）周辺ゾーンでは移動不可能な割合が高く、特に鉄道ネットワークの密度が相対的に低い郊外部においては、途絶するリンクが少数であっても、割合が高くなる傾向がみられる。一方で、東京都心部では移動不可能な割合が低いのはネットワークを構成するリンクの多くが地下鉄であるためである。

なお、全 14 ケースについて、発生確率を同一と仮定した場合の移動不可能な割合の平均を算出した結果を図-9（右下）に示す。これより、埼玉県南部、川崎市、横浜市などの周辺部において、移動不可能な割合が高い傾向がみられる。

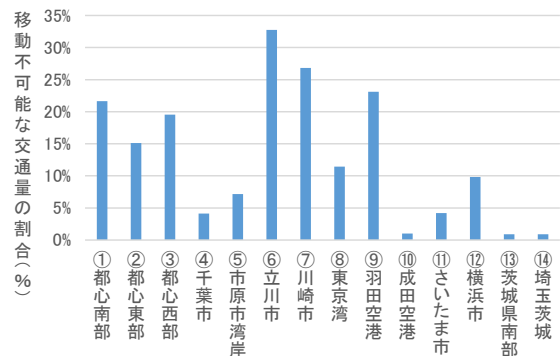


図-8 各ケースの移動不可能な交通量の割合

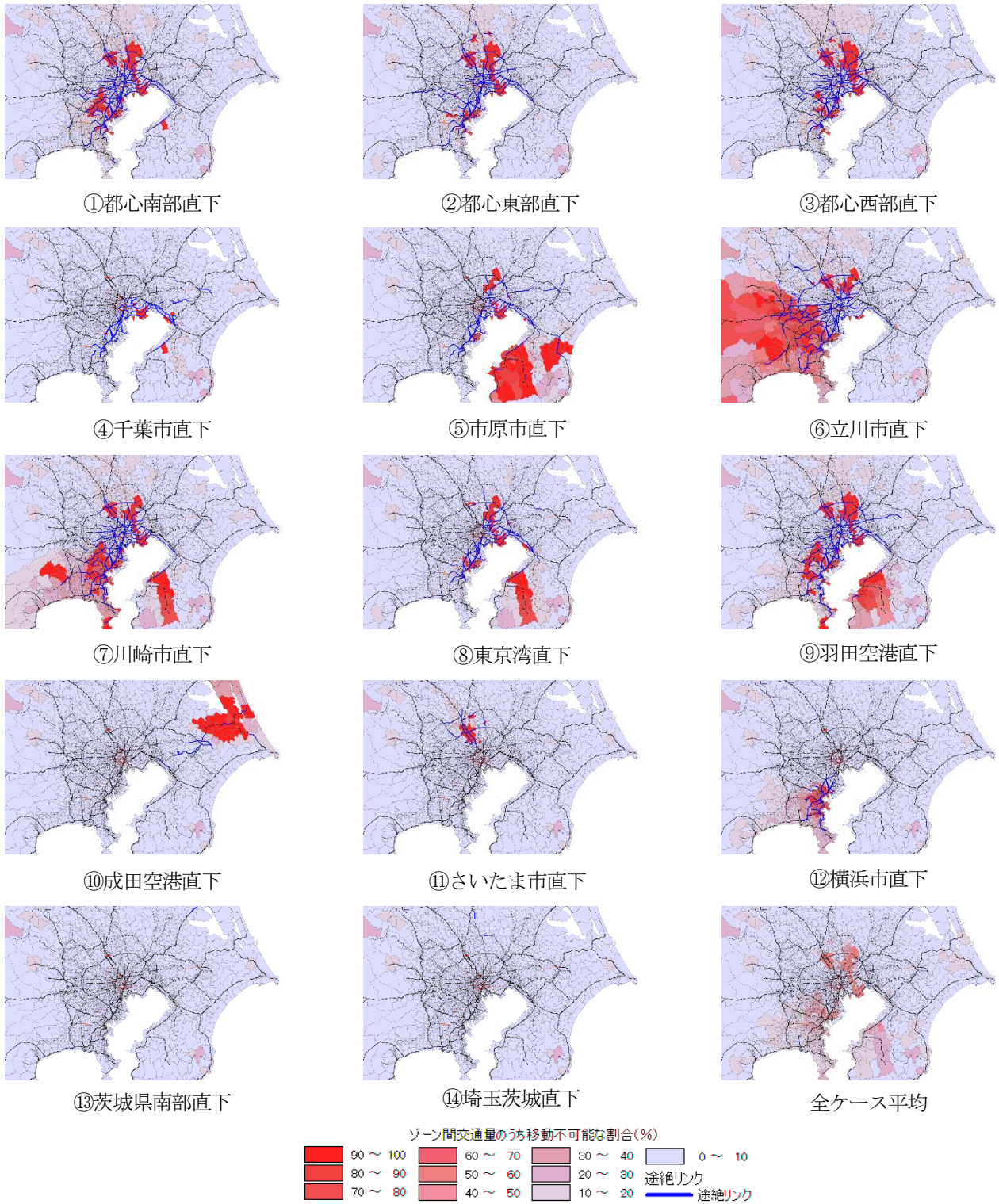


図-9 各ケースのゾーン間の移動不可能な交通量の割合

5. おわりに

本研究では、都市鉄道ネットワークを対象に、複数のリンクが途絶した場合の脆弱性を評価する手法を考案し、首都直下地震の発生が想定されている東京圏へ適用した。脆弱性を表わす指標としては、リンクの途絶によ

って生じる一般化費用の増分を需要で重み付けした値と、ゾーン間での移動不可能な交通量の割合の2つを選定し、地震の規模については、内閣府が公表している14ケースの震度分布を用いた。その結果、震度分布ケースごとに、複数のリンク途絶によるネットワークの脆弱度を定量的に把握することが可能となった。具体的には、

都心直下を震源とする地震のみならず、周辺部である立川市や川崎市を震源とするケースでも指標値が高い、すなわち途絶した場合の影響が大きいことが示された。

また、複数のリンク途絶によって目的地へ移動不可能な OD 交通量の割合を算出した結果、全体的に途絶リンクの周辺ゾーンでは移動不可能な割合が高いものの、代替経路が存在する場合にはその割合は低下する傾向が示された。

以上の結果の活用方策について、例えば本研究における試算で脆弱度が高くなった震度分布ケースについては、各鉄道事業者が把握している高架橋及び橋梁の状態や耐震性能と照合させることで、震災時における点検や復旧作業を優先させるリンクを抽出することや、本文中でも述べた「曲げ破壊先行型」の耐震対策を今後重点的に進めていくリンクを選定する際の参照とすることなどが考えられる。

今後の課題としては、リンクの途絶による代替路線の容量制約を考慮することが重要である。また、リンクだけではなく、駅に代表されるノードの脆弱性評価も重要であり、これらの分析を踏まえた、首都直下地震発生時における都市鉄道の耐災害性のための防災・減災対策の検討が挙げられる。

付記

本研究の一部は、科学研究費助成事業基盤研究 C (課題番号 15K06258) の支援を受けて実施したものである。

補注

- 1) ログサム値は経路選択モデルにロジットモデルを用いた場合の最大効用の期待値であることから、理論的整合性の観点からは、構造化プロビットモデルを基に最大効用の期待値を算出することが望ましい。ただし、期待値の計算に一定の時間を要することから、多くのケースの計算を行うためには、効率的なアルゴリズムの開発が必要である。この点については、今後の課題としたい。
- 2) 経路の混雑指標は、式(A1)のようにリンク別の混雑率を基に定義される。

$$Cong_{ij,r} = \sum_{l \in L_{ij,r}} z_l^2 \cdot T_{2,ij,r,l} \quad (A1)$$

ここで、 z_l : 駅間リンク l の混雑率、 $T_{2,ij,r,l}$: 駅間リンク l の所要時間 [分] である。また、混雑率 z_l は、式(A2)のように求められる。

$$z_l = \frac{\sum_{ij} \sum_r q_{ij,r,l}}{cap_l} \quad (A2)$$

ここで、 $q_{ij,r,l}$: ゾーン i から j の r 番目の経路の駅間リンク l の交通量、 cap_l は駅間リンク l の容量(輸送力)である。

- 3) OD交通量は以下のように算定している。まず、通勤・通学目的については、平成17年国勢調査による市区町村間OD表を基本に、平成10年東京都市圏パーソントリップ調査(以下、PT調査と表記)における計画基本ゾーン間OD交通量の比率

を用いて、ゾーン間交通量を作成した。なお、さらに細かいゾーンに分解する段階では、通勤目的の出発側: 就業人口、通勤目的到着側: 従業人口、通学目的の出発側: 就学人口、通勤目的到着側: 従学人口の比を用いた。次に、この全交通手段を含むゾーン間OD表を基に、平成10年PT調査データによって推定された交通機関分担モデルを用いて、鉄道利用OD表を作成した。一方で、私事・業務目的については、まず、平成10年PT調査による計画基本ゾーン間OD交通量を現況OD表とした上で、平成10年から平成17年の人口成長を現在パターン法(フレータ法)で反映させることにより、現況OD交通量を推計した。なお、さらに細かいゾーンに分解する段階では、私事目的: 昼間人口、業務目的: 従業人口の比を用いた。次に、この全交通手段を含むゾーン間OD表ベースに、平成10年PT調査データにより推定された交通機関分担モデルを用いて鉄道利用OD表を作成した。

参考文献

- 1) 東京都市圏交通計画協議会: パーソントリップ調査からみた東京都市圏の都市交通に関する課題と対応の方向性, 2012.
- 2) 金子雄一郎, 栗原 彰, 井上真志: 都市鉄道ネットワークの脆弱性評価—東京都市圏を対象とした検討—, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, 第17号, pp.65-71, 2013.
- 3) 金子雄一郎, 相沢圭俊, 横山茂樹, 井上真志: 東京圏の鉄道ネットワークの脆弱性に関するリンク別評価, 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, 第18号, pp.171-177, 2014.
- 4) 中山晶一郎: ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.2, pp.147-166, 2011.
- 5) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C., D'Este, G.M.: Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks, Networks and Spatial Economics, Vol.6, pp.267-291, 2006.
- 6) Jenelius, E., Petersen, T., Mattsson, L.G.: Importance and exposure in road network vulnerability analysis, Transportation Research Part A, Vol.40, pp.537-560, 2006.
- 7) Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., Lee, M.: Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks, Networks and Spatial Economics, Vol.7, pp.241-256, 2007.
- 8) Kurauchi, F., Uno, N., Sumalee, A., Seto Y.: Network evaluation based on connectivity vulnerability. In: Proceeding of 18th International Symposium on Transportation and Traffic Theory 2009, pp. 637-649, 2009.
- 9) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義: リダンダンシーを考慮したアクセシビリティに基づく道路ネットワークの脆弱性評価, 土木学会論文集 D3, Vol.70, No.1, 76-87, 2014
- 10) Rodriguez-Nunez Juan, E. and Garcia-Palomares, C.: Measuring the vulnerability of public transport networks, Journal of Transport Geography, Vol.35, pp.50-63, 2014.
- 11) Cats, O. and Jenelius, E.: Planning for the unexpected: The value of reserve capacity for public transport network robustness, Transportation Research Part A, Vol.81, pp.47-61, 2015.
- 12) Chen, B. Y., Lam, W.H.K., Sumalee, A., Li, Q., Li, Z.-C.: Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty, Transportation Research Part A, Vol.46, pp.501-516, 2012.
- 13) 栗原 彰, 金子雄一郎: 大規模地震発生時における都市鉄道事業の継続性に関する一考察, 第18回鉄道技術・政策連合

- シンポジウム (J-RAIL2011) 講演論文集, pp.43-46, 2011.
- 14) 運輸省鉄道局監修・阪神淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会編:よみがえる鉄路—阪神・淡路大震災鉄道復興の記録, 山海堂, 1996.
- 15) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災

調査報告 10 交通施設と農業施設の被害と復旧, 土木学会, 1998.

(2016. 7. 31 受付)

VULNERABILITY ASSESSMENT OF URBAN RAILWAY NETWORKS IN
CONSIDERATION OF THE DISRUPTION OF MULTIPLE LINKS

Takuro NAKAGAWA, Yuichiro KANEKO, Shigeki YOKOYAMA and Masashi INOUE