

東京圏の鉄道ネットワークを対象とした脆弱性評価

金子 雄一郎¹・栗原 彰²・井上 真志³

¹正会員 日本大学准教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

E-mail: kaneko@civil.cst.nihon-u.ac.jp

² 福島県南会津建設事務所 (元日本大学大学院理工学研究科修士課程土木工学専攻)

³正会員 社会システム株式会社 (〒153-0043 東京都目黒区東山1-5-4 中目黒ビジネスセンタービル2F)

E-mail: inoue@crp.co.jp

本研究は、東京圏の鉄道路線を対象に、ネットワークの代替性を考慮して脆弱性の評価を行うものである。具体的には、まず、脆弱性を表わす指標として、1) 対象地域におけるOD間一般化費用の合計の変化分と、2) OD間一般化費用をOD交通量で重み付けした値の合計の変化分の2つを設定し、これらの指標を鉄道経路選択モデルを用いて計測する手法を考案した。次に、この手法を用いて、ネットワークを構成する主要路線(計26路線)を1路線ずつ途絶させた場合の指標値を計測し、結果を比較考察するとともに、脆弱性への影響要因を分析した。そして最後に、脆弱性を軽減する対応策について検討した。

Key Words : vulnerability evaluation, urban railway, Tokyo metropolitan area

1. はじめに

わが国の鉄道ネットワークは、これまで三大都市圏を中心に発達してきており、都市活動を営む上で欠かすことのできない重要な社会基盤となっている。特に東京圏における鉄道の分担率は、圏域全体で30%、東京区部では48%と高く¹⁾、通勤・通学、業務、私事などあらゆる場面での移動を支えている。

それ故、運転事故や自然災害などが発生した場合、目的地までの移動時間の増大はもとより、通勤・通学や帰宅等の移動が困難となる事態が生じるなど、利用者には不便を生じさせる。これらの事象は、発生確率は必ずしも高くないものの、発生した際には影響は大きいことから、平常時よりネットワークの脆弱性を把握し、対応策を検討しておくことが重要である。

そこで本研究では、東京圏の鉄道ネットワークを対象に、脆弱性の評価を行うことを目的とする。具体的には、まず、都市鉄道を対象とした脆弱性の評価指標を検討し、鉄道経路選択モデルを用いて計測する手法を構築する。経路選択モデルを用いる理由は、東京圏の稠密なネットワークの代替性を考慮するためである。次に、構築した手法を用いて、ネットワークを構成する路線群の中から、1路線ずつ途絶させた場合の交通需要の変化を分析し、それを基に指標値を計測する。さらに、脆弱性への影響要因を分析し、脆弱性を軽減する対応策を検討する。

なお、自然災害が発生した場合、複数の路線が運休となる場合もあるが、本研究では、まずは1路線毎の評価

を行うことを主眼とし、複数路線の取扱いについては、今後の課題としたい。

2. 都市鉄道を対象とした脆弱性評価指標の検討

(1) 脆弱性の定義

一般に脆弱性とは「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(例えば、Taylorら²⁾。1995年に発生した阪神淡路大震災により、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、この脆弱性が注目されることとなった(例えば、中山³⁾。脆弱性の概念は、事象の発生確率の大小に関わらず何らかの対策が必要となるとの観点から、従来の信頼性指標とは異なり、確率論の俎上には載せないのが一般的である。

(2) 既往研究の整理

これまで交通ネットワークを対象に脆弱性を評価した研究は多く行われている。このうちTaylorら²⁾及びJeneliusら⁴⁾はOD間の一般化費用とOD交通量を乗じた値の変化分を脆弱性指標として、Kurauchiら⁵⁾は各ODペアを接続する代替経路数の変化分を脆弱性指標として用いている。また、Chenら⁶⁾は複数の選択枝の最大効用

の期待値の貨幣換算値であるログサム値 (logsum value) の変化分を指標に用いる方法を提案している。

これらの既往研究は主に道路ネットワークを対象としたものであり、都市鉄道を対象とした研究は筆者の知る限り存在しない。一般に鉄道ネットワークは道路ネットワークと比較して密度が低く、代替経路数も限られることから、本研究では脆弱性指標として、OD間の一般化費用の変化分を用いることとする。この際、後述するOD間の代表一般化費用の算定にあたっては、ログサム値を用いる。また、路線毎に需要特性が異なる点を考慮し、評価指標にOD交通量も用いることとする。

(3) 脆弱性評価指標の検討

a) 鉄道経路選択モデルの検討

(2)で述べた通り、本研究では脆弱性の評価指標として、1)対象地域におけるOD間の一般化費用の合計値の変化分と、2)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の2つを用いる。各指標の位置づけとして、1)については、路線途絶時のアクセシビリティ低下という機能面の評価を、2)については、これに加えて需要面を考慮した評価を行うものである。

上述の指標を計測するためには、特定路線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。そのため、鉄道経路選択モデルについて、本研究で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である。

そこで本研究では、経路選択モデルに Yai et al.⁷⁾らが提案した構造化プロビットモデルを用いることとする。間接効用関数を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} U_{ij,r} &= V_{ij,r} + \varepsilon_{ij,r} \\ &= \theta_c C_{ij,r} + \sum_{k \neq C} \theta_k X_{k,ij,r} + \varepsilon_{ij,r} \\ &= \theta_c C_{ij,r} + \theta_1 T_{1,ij,r} + \theta_2 T_{2,ij,r} + \theta_3 T_{3,ij,r} \\ &\quad + \theta_4 Cong_{ij,r} + \varepsilon_{ij,r} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $U_{ij,r}$: ゾーン*i* から *j* への *r* 番目の経路の効用関数、 $C_{ij,r}$: 経路の総費用 [円]、 $T_{1,ij,r}$: 駅アクセス・イグレス利便性 (ログサム変数)、 $T_{2,ij,r}$: 乗車時間 [分]、 $T_{3,ij,r}$: 乗換時間 (待ち時間を含む) [分]、 $Cong_{ij,r}$: 経路の混雑指標^{注1)}、 θ_c : 費用のパラメータ、 θ_k : 各変数のパラメータである。

b) 評価指標の検討

脆弱性指標として用いるOD間の一般化費用は、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。上述した通り、本研究では経路選択モデルに構造化

プロビットモデルを用いているが、一般化費用の算出に際しては、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、便宜的にログサム値を算出することとする。ログサム値は式(2)のように求めることができる。

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

また、OD間の一般化費用をOD交通量 Q_{ij} で重み付けしたものは、式(3)のように表わされる。

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij} \cdot Q_{ij} \quad (3)$$

ここで、特定の路線を途絶させた場合を *with*、途絶させない場合 (平常時) を *without* とすると、2つの脆弱性指標 V_1 、 V_2 は式(4)、(5)のように表わされる。

(OD間の一般化費用 : V_1)

$$V_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{with} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{without} \quad (4)$$

(OD間の一般化費用をOD交通量で重み付け : V_2)

$$V_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{with} \cdot Q_{ij} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{without} \cdot Q_{ij} \quad (5)$$

これらの指標 V_1 、 V_2 が高い値になるほど、当該路線の途絶による影響が大きい、すなわち、脆弱性が高いことを表わしている。なお、本研究では、これらの指標をトリップ目的毎 (通勤・通学・私事・業務・帰宅) に算出し、その合計値を用いることとする。

ここで、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、国土交通省の「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。

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。

3. 東京圏の鉄道ネットワークを対象とした評価

(1) 評価方法

本研究では、図-1 に示した東京圏の鉄道ネットワークを対象に、2 章で検討した指標を用いて脆弱性評価を行う。具体的には、JR 東日本及び大手民鉄の主要路線を対象に、1 路線ずつ途絶させた場合の指標値を計測する。ここで、路線全体を途絶対象とした理由として、鉄道の場合、事故や自然災害が発生した際には、全線にわたり運転見合わせになることが多いことが挙げられる。評価対象路線の概要及び途絶させる区間を表-2 に示す。途絶させる路線は、JR 東日本の 16 路線、大手民鉄の 10 路線の計 26 路線である。

評価にあたって、鉄道ネットワークと OD 交通量は、平成 17 年時点のデータを用いる^{注2)}。なお、路線途絶時の OD 交通量については、今回は平常時のものを用いることとする。今後、大規模な災害発生時の評価を行う場合、OD 交通量の適切な修正が必要である。

対象地域のゾーン数は 2,910 であり、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 駅以上アクセスリンクが設定されている。仮に 1 駅しかアクセスリンクが設定されていないゾーンについて、当該駅を含む路線が途絶した場合には、ゾーン中心から最短距離にある駅にアクセスさせる処理を行うこととする^{注3)}。

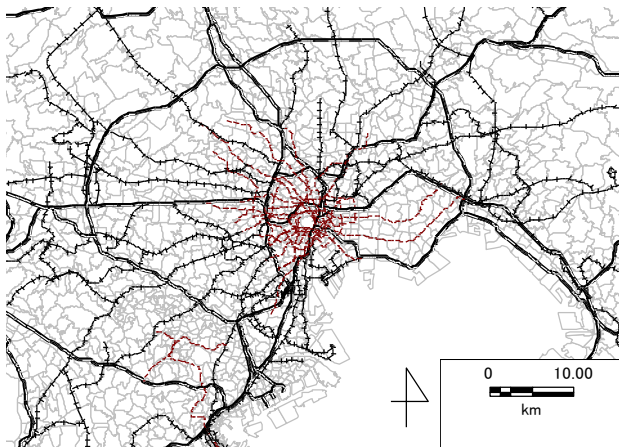


図-1 東京圏の鉄道ネットワーク（一部）

(2) 評価結果

a) 脆弱性指標の計測

表-2 に示した各路線を 1 本ずつ途絶させた場合の脆弱性指標 V_1 と V_2 を計測した結果を、図-2、図-3 に示す。これより、いずれの評価結果も、路線間でばらつきが大きいことが分かる。個別に見ていくと、まず、一般化費用のみである指標 V_1 については、小田急小田原線、JR

表-2 評価対象路線の概要

鉄道事業者	路線名	途絶させる区間	区間長 (km)	輸送人員 (千人)注1
JR東日本	東海道線	東京～小田原	83.9	4,087
	横須賀線	東京～久里浜	73.3	189
	山手線	全区間	37.2	3,789
	中央線	東京～高尾	53.1	3,219
	東北線注2	上野～宇都宮	105.9	3,877
	高崎線	上野～高崎	80.8	396
	京浜東北線	大宮～大船	81.2	n/a
	常磐線(快速)	上野～土浦	66.0	1,161
	常磐線(各駅)	綾瀬～取手	29.7	n/a
	総武線(快速)	東京～千葉	39.2	1,754
	総武線(各駅)	三鷹～千葉	60.2	1,166
	南武線	川崎～立川	35.5	729
	武蔵野線	府中本町～西船橋	71.9	848
	横浜線	東神奈川～八王子	42.6	820
	埼京線	大宮～大崎	36.6	n/a
	東武鉄道	京葉線	東京～蘇我	43.0
伊勢崎線		浅草～久喜	47.7	867
東上線		池袋～小川町	64.1	914
西武鉄道	池袋線	池袋～飯能	43.7	887
	新宿線	西武新宿～本川越	47.5	883
京成電鉄	本線	京成上野～成田空港	69.3	595
京王電鉄	京王線	新宿～京王八王子	37.9	1,363
小田急電鉄	小田原線	新宿～小田原	82.5	1,576
東急電鉄	東横線注3	渋谷～元町・中華街	28.3	1,133
	田園都市線	渋谷～中央林間	31.5	1,190
京急電鉄	京急本線	泉岳寺～浦賀	56.7	1,140

注1: 各路線の輸送人員は「平成22年度都市交通年報」記載区間の値。

注2: 東北線の輸送人員は尾久支線・埼京線も含む。

注3: 東横線には、みなとみらい線の区間も含む。

高崎線、東武東上線、JR 京浜東北線、常磐線(快速)が高い結果となった。これらの路線の多くは、区間長が 80km 前後と比較的長く、路線密度も必ずしも高くすることが、脆弱性が高くなった要因として考えられる。

一方、JR 京葉線、常磐線(各駅)、横須賀線は低い結果となった。これらの路線については、京葉線には総武線、常磐線(各駅)には常磐線(快速)、横須賀線には東海道線という並行路線が存在することが、脆弱性が低くなった要因として考えられる。

次に、一般化費用を OD 交通量で重み付けした指標 V_2 については、指標 V_1 が高かった小田急小田原線、東武東上線、JR 京浜東北線に加え、JR 中央線、東海道線、東急田園都市線など、比較的輸送人員が多い路線(表-2 参照)で高い結果となった。これらの路線は、途絶によるアクセシビリティ低下の影響を受ける利用者が多いことを示している。

以上の指標 V_1 と V_2 との関係を示したのが図-4 である。このうち、 V_1 、 V_2 の 2 つの指標とも平均値以上の路線(図中の第 1 象限)は、機能及び需要の両面で脆弱性が高いことを示している。すなわち、途絶によって多数の利用者のアクセシビリティが低下することから、途絶リスクを軽減するための対策の検討が重要である。

一方、2 つの指標とも平均値未満の路線(図中の第 3 象限)は、機能及び需要の両面で脆弱性が相対的に低いことを示している。

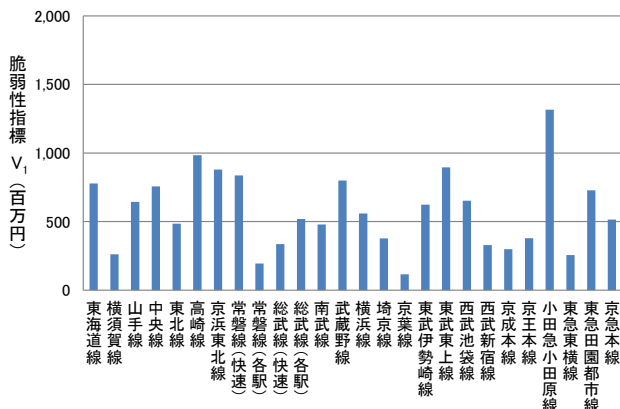


図-2 各路線の脆弱性評価結果 (指標 V_1)

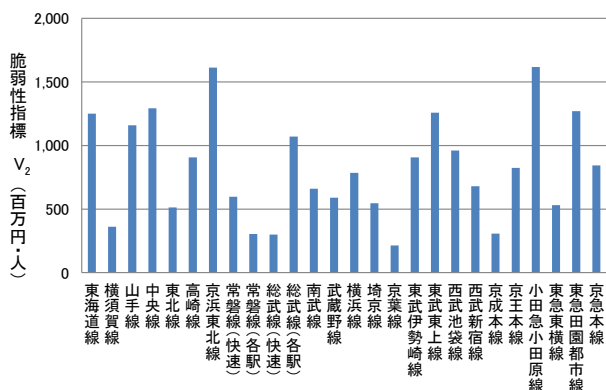


図-3 各路線の脆弱性評価結果 (指標 V_2)

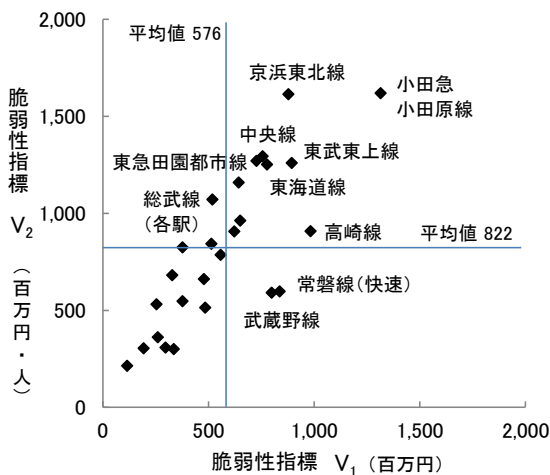


図-4 脆弱性指標 V_1 と V_2 の関係

b) 路線毎の脆弱性への影響要因

a)で示された各路線の脆弱性への影響要因を分析するため、指標 V_1 を対象にログサム値の内訳の変化を見る。具体的には、間接効用関数 (式(1)) を構成する各変数の寄与率 (全体の増減を 100 としたときの各構成要素の増減分を百分率 (%) で表した指標) を算定する。その結果を表-3、表-4に示す。

これより JR 各線では、乗車時間及び乗換時間 (待ち

表-3 ログサム値の各変数の寄与率 (JR 線)

	費用	乗車時間	乗換時間 (待ち時間 含む)	アクセス 利便性	イグレス 利便性	混雑指標
東海道線	-2.5%	52.0%	38.1%	3.2%	2.8%	6.4%
横須賀線	4.7%	59.0%	13.7%	6.6%	5.6%	10.4%
山手線	15.5%	16.8%	60.2%	6.4%	9.6%	-8.5%
中央線	7.0%	44.1%	62.1%	2.0%	2.5%	-17.7%
東北線	-11.3%	44.3%	61.9%	6.6%	8.4%	-9.9%
高崎線	1.5%	34.1%	50.6%	11.5%	8.3%	-6.1%
京浜東北線	16.3%	-4.6%	81.9%	7.4%	8.4%	-9.4%
常磐線(快速)	-0.5%	35.2%	56.0%	7.8%	4.0%	-2.5%
常磐線(各駅)	29.0%	6.9%	62.3%	5.1%	5.8%	-9.0%
総武線(快速)	1.5%	74.8%	19.2%	-2.5%	-1.1%	8.2%
総武線(各駅)	24.8%	2.0%	72.0%	5.0%	8.4%	-12.2%
南武線	8.5%	44.7%	9.5%	15.2%	15.4%	6.7%
武蔵野線	12.8%	62.8%	9.3%	5.9%	5.7%	3.5%
横浜線	10.3%	39.5%	38.4%	9.4%	9.0%	-6.6%
埼京線	2.0%	77.6%	-19.7%	7.9%	7.8%	24.5%
京葉線	-6.8%	154.0%	-193.7%	41.4%	52.8%	52.3%

表-4 ログサム値の各変数の寄与率 (大手民鉄線)

	費用	乗車時間	乗換時間 (待ち時間 含む)	アクセス 利便性	イグレス 利便性	混雑指標
東武伊勢崎線	10.2%	17.9%	20.9%	24.0%	18.8%	8.3%
東武東上線	5.6%	23.1%	40.3%	13.7%	12.7%	4.7%
西武池袋線	5.4%	25.7%	29.4%	16.8%	14.1%	8.5%
西武新宿線	12.7%	1.4%	21.5%	26.8%	23.5%	14.1%
京成本線	22.8%	31.1%	-1.7%	23.8%	17.7%	6.3%
京王線	10.2%	12.4%	2.6%	32.8%	28.6%	13.4%
小田急小田原線	13.9%	25.3%	27.4%	15.8%	15.3%	2.2%
東急東横線	14.6%	14.7%	-31.7%	43.8%	49.3%	9.3%
東急田園都市線	12.3%	31.0%	12.5%	18.7%	18.0%	7.4%
京急本線	8.0%	26.4%	7.3%	24.0%	28.9%	5.4%

時間を含む) の寄与率が全体的に高い傾向が見られる。これは、JR 各線の途絶によって代替経路を利用する場合の不便のうち、乗車時間や乗換時間の増加が占める割合が高いことを示している。つまり、平常時に同一の目的地に向かう場合、JR 線を利用した方が、より短時間で到達可能なことを示唆している。

なお、JR 京葉線、南武線、高崎線では、アクセス・イグレス利便性の寄与率も高いが、これは鉄道の路線密度が相対的に低く、各ゾーンから代替路線の駅までのアクセス距離が長いことが関係しているものと考えられる。

一方、大手民鉄線の多くは、アクセス・イグレス利便性の寄与率が高い傾向が見られる。これは、大手民鉄各線が途絶した場合、代替路線の駅までのアクセス・イグレスに時間を要することを示している。

c) 代替路線の混雑への影響

b)における脆弱性評価の結果は、主に代替路線を利用した場合の時間や費用の変化に基づくものであったが、実際には、車両内混雑への影響も把握しておく必要がある。そこでここでは、特定の路線を途絶させた場合の代替路線の混雑率を推計する。混雑率は駅間の交通量を交通容量 (輸送力) で除した指標であり (補注 1)の式(A2)を参照)、例えば 250%では、「電車が揺れるたびに、体が斜めになって身動きできない。手も動かせない」状態、すなわち、これ以上輸送することが困難な状態を表わしていると言える。

表-5 に、各路線を途絶させた場合に混雑率が 250%以上となる代替路線とその区間数を算出した結果を示す。これより、脆弱性の高い路線を中心に、混雑率が 250%以上となる路線数や区間数が多いことが分かる。これらの路線は容量超過の状態であることから、実際には利用者は乗車困難であり、駅構内においても利用者が集中することによって、安全性の確保が困難となる可能性が指摘される。

表-5 代替路線の混雑への影響

途絶対象路線	混雑率250%以上となる主な路線
東海道線	横須賀線(7)、相模線(9)、湘南モノレール(3)
横須賀線	東海道線(2)、江ノ島電鉄(2)、湘南モノレール(1)
山手線	京浜東北線(4)、中央線(1)
中央線	南武線(3)、八高線(3)、京王線(4)、西武拝島線(5)、多摩川線(3)
東北線	京浜東北線(1)、埼京線(8)、東武伊勢崎線(1)、埼玉新都市交通(3)
高崎線	埼京線(6)、八高線(4)、川越線(1)、埼玉新都市交通(12)
J 京浜東北線	東海道線(1)、横須賀線(1)、山手線(4)、埼京線(3)、湘南新宿ライン(3)、京浜急行線(6)、東京メトロ南北線(2)
R 常磐線(快速)	常磐線(緩行)(7)、関東鉄道竜ヶ崎線(1)
東 常磐線(緩行)	京成金町線(2)
日 総武線(快速)	総武線(緩行)(4)、京葉線(2)
本 総武線(緩行)	中央線(7)、総武線(快速)(1)、京成本線(1)
南武線	八高線(2)
武蔵野線	八高線(1)
横浜線	相模線(7)、横浜市営地下鉄(2)
埼京線	山手線(1)
京葉線	総武線(緩行)(2)、外房線(1)、東京メトロ東西線(4)
東武伊勢崎線	武蔵野線(1)、つくばエクスプレス(2)
東武東上線	埼京線(2)、川越線(5)、八高線(6)、湘南新宿ライン(3)、東武越生線(2)、西武池袋線(1)
西武池袋線	中央線(1)、八高線(4)、西武新宿線(11)、狭山線(1)、拝島線(1)、多摩湖線(3)
大手 西武新宿線	中央線(12)、八高線(1)
民 京成本線	なし
鉄 京王線	中央線(11)、南武線(2)、小田急小田原線(4)、西武多摩川線(3)
小田急小田原線	横浜線(2)、相模線(12)、京王線(1)、京王相模原線(2)、東急田園都市線(7)
東急東横線	横須賀線(2)、京浜東北線(1)、東急目黒線(2)、横浜市営地下鉄(1)
東急田園都市線	横浜線(5)、南武線(2)、小田急小田原線(3)、東急東横線(6)、世田谷線(6)、横浜市営地下鉄(7)
京急本線	横須賀線(7)、京浜東北線(5)

注：()内の数値は250%以上となる駅間数

(3) 対応策の検討

以上の結果を踏まえ、脆弱性を軽減する対応策について、若干の検討を行う。具体的には、(2)で求めた項目別の寄与率を基に検討を行う。

このうち乗車時間について、これを短縮させることは実際上困難であるため、当該路線を早期に運転再開させることが重要となる。本研究では各路線について、ほぼ全線で途絶された場合の検討を行ったが、鉄道事業者によっては、折り返し施設のある区間において部分的に運転を再開するケースも見られる。

ここでは一例として、最も脆弱性の高かった小田急小田原線について、新宿～経堂間(8.0km)、新宿～新百合ヶ丘間(21.5km)、新宿～相模大野間(31.3km)の3つの区間で部分的な運転再開を行った場合の脆弱性指標 V_1 、 V_2 を計測した。その結果を図-5 に示す。これより、新宿～新百合ヶ丘など中距離以上の区間を再開させることで、脆弱性が軽減されることが確認された。

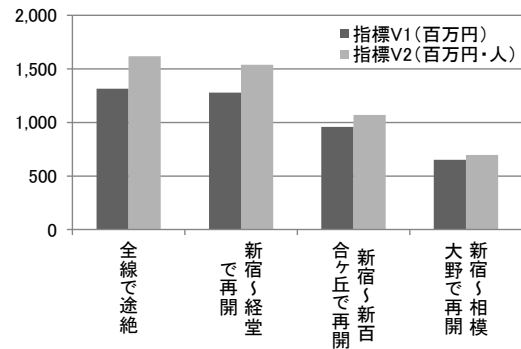


図-5 部分的な運転再開による脆弱性指標値の変化

4. おわりに

本研究は、東京圏の鉄道ネットワークを構成する主要路線の脆弱性を評価した。主な成果は次の通りである。第一に、鉄道経路選択モデルを用いることで、ネットワークの代替性を考慮した脆弱性の評価を可能としたこと、第二に、構築した手法を用いて東京圏の26路線の脆弱性を定量的に示したこと、第三に、路線毎の脆弱性の影響要因を明らかにし、脆弱性を軽減する対策を検討することが挙げられる。

本研究はまだ緒に就いた段階であるが、成果の活用として、例えば、鉄道事業者においては、運転事故等の短時間の運休の場合、利用者への影響度を把握することができるとともに、折り返し運転の実施による利用者への負担軽減度合いを把握できると考えられる。また、大規模災害への対策としては、本研究における脆弱性の高い路線とは、途絶した場合のアクセシビリティの低下が大きい路線であることから、そのリスクを軽減するための対策の検討が重要である。具体的には、土木構造物や駅舎、沿線施設の耐震強化などが挙げられる。

最後に今後の課題として、代替路線の混雑率の変化や駅での混雑状況を含めた総合的な評価を行うこと、複数の路線を途絶させた場合の評価や地域別での評価を行うこと、代替手段としての路線バスの活用方法の検討などが挙げられる。

謝辞

本研究を進める上で、東京大学大学院の加藤浩徳氏、社会システム株式会社の早崎詩生氏からは、多くの有益なコメントを頂戴しました。記して謝意を表します。

補注

1) 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。

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

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 の交通容量 (輸送力) である。

- 2) 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って、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。
- 3) ゾーン中心から鉄道駅までの距離が 1.5km 以内の場合には、徒歩によるアクセスと見なし、時速 4km として所要時間を設定した。一方、ゾーン中心から駅までの距離が 1.5km

を超える場合には、通常の交通需要分析と同様にバスによるアクセスと仮定し、出発地からバス停までのアクセス時間を一律 7 分とした上で、バスの時速を 12km として算出したバス乗車時間と合計して所要時間を設定した。

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial probit with structured covariance for route choice behavior, *Transportation Research Part B*, Vol.31, pp.195-207, 1997.