

首都圏鉄道路線を対象としたシステムリスク解析に基づく復旧過程とボトルネックの把握

○前田欣昌¹⁾・服部尚道²⁾・静間俊郎³⁾・吉川弘道⁴⁾

- 1) 非会員 東急建設（株），東京都渋谷区渋谷1-16-14, maeda.yoshimasa@tokyu-cnst.co.jp
2) 非会員 東急建設（株），東京都渋谷区渋谷1-16-14, hattori.hisamichi@tokyu-cnst.co.jp
3) 非会員 （株）篠塚研究所，東京都新宿区西新宿 4-5-1, shizuma@shinozukaken.co.jp
4) 会 員 東京都市大学 総合研究所，東京都世田谷区等々力 8-15-1, hyoshika@tcu.ac.jp

1. はじめに

大地震により列車が運休となる場合、ユーザーは利用路線がいつ復旧するのかを知りたく、一方でオーナーは復旧期間を説明する責務と事業継続計画（以下、BCP）¹⁾の観点から乗客数の回復を把握したいものと考えられる。本稿は、3路線からなる鉄道路線を首都圏40km四方に仮想配置し、マグニチュード8クラスの関東大地震の発生を想定したシステムリスク解析を実施した。具体的には、路線システムの復旧期間期待値（Recovery time expectancy；以下、RTE）や復旧曲線（Recovery curve），ボトルネック指標（Bottleneck Index；以下、B.I.）を、文献2)に示す手法で求めた。

2. 検討モデル

検討モデルは、図1に示すように郊外と都市中心部を結ぶ3路線からなるシステムであり、放射状路線として内陸部のA線と海沿いのB線、環状で川沿いのC線とした。図中の丸数字は高架橋構造の主要駅を表し、川沿いのC線の高架橋は軟弱地盤上に、それ以外の高架橋は普通地盤上にあるものとした。本稿では地震時に高架橋構造の主要駅が損傷するものと仮定し、シナリオ地震としてマグニチュード8クラスの関東大地震³⁾発生時の対象路線のシステムリスクを解析する。な

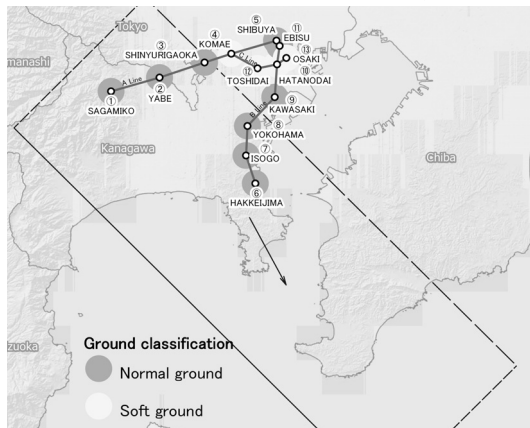


図1 解析対象路線

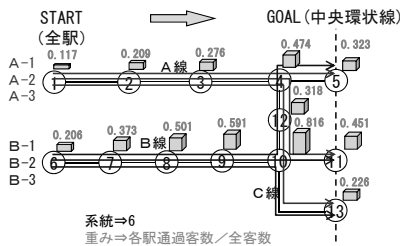


図2 対象路線のラダーシステムと影響度

お、図1に示す実線および破線に囲まれた領域は関東大地震の断層面を示している。システムモデルとしては、郊外駅（No.5, 11, 13以外）をスタート地点とし、仕事場がある都市中央部（No.5, 11, 13）をゴール地点とする鉄道路線の上り線とした。

対象路線は図2に示す6つの主系統（A1～A3,B1～B3）のラダーシステムで表わされる。これら6主系統は、途中駅からの乗客を考慮すると、30系統の直列システム（輸送経路）に分解することができる。図2に示す棒グラフは、この30系統の乗客比率を駅ごとに集計し、各駅の影響度として示したものである。

3. 解析対象施設の脆弱性の評価

解析対象施設の高架橋は、鉄道設計基準の変遷を参考に3種類を設定した。TYPE I は設計年代が古いせん断破壊型、TYPE II は設計震度が低い曲げ破壊型、TYPE III は現行の設計基準⁴⁾を満足する高架橋である。表1～表3に示す高架橋の損傷形態に応じた弾性応答加速度、基準加速度および復旧期間や、基準化基盤応答スペクトルおよび地盤増幅率の詳細は、文献5)を参照されたい。

表1 高架橋TYPE I の脆弱性

損傷形態	弾性応答 加速度 $a_g(\text{gal})$	復旧期間 (日)	基準化基盤応答 スペクトル S	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
				増幅率 λ	基盤加速度 $a_g/S/2(\text{gal})$	増幅率 λ	基盤加速度 $a_g/S/2(\text{gal})$
無被害	0	0	1.825	1.4	0	1.6	0
大破	472	60	1.825	1.4	185	1.6	162

表2 高架橋TYPE II の脆弱性

損傷形態	弾性応答 加速度 $a_g(\text{gal})$	復旧期間 (日)	基準化基盤応答 スペクトル S	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
				増幅率 λ	基盤加速度 $a_g/S/2(\text{gal})$	増幅率 λ	基盤加速度 $a_g/S/2(\text{gal})$
無被害	0	0	1.825	1.4	0	1.6	0
小破	720	3	1.825	1.4	282	1.6	247
中破	1188	10	1.825	1.4	465	1.6	407
大破	1800	60	1.825	1.4	705	1.6	616

表3 高架橋TYPE III の脆弱性

損傷形態	弾性応答 加速度 $a_g(\text{gal})$	復旧期間 (日)	基準化基盤応答 スペクトル S	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
				増幅率 λ	基盤加速度 $a_g/S/2(\text{gal})$	増幅率 λ	基盤加速度 $a_g/S/2(\text{gal})$
無被害	0	0	1.825	1.4	0	1.6	0
小破	1296	3	1.825	1.4	507	1.6	444
中破	2088	10	1.825	1.4	817	1.6	715
大破	3060	60	1.825	1.4	1198	1.6	1048

表4 解析ケース

駅No.	主要駅・高架橋	地盤種別	Case 1	Case 2	Case 3
1	相模湖	普通(G3)	Type II	Type II	Type II
2	矢部	普通(G3)	Type II	Type II	Type II
3	新百合ヶ丘	普通(G3)	Type II	Type II	Type II
4	狛江	軟弱(G5)	Type II	Type II	Type II
5	渋谷	普通(G3)	Type II	Type II	Type II
6	八景島	普通(G3)	Type I	Type III	Type III
7	磯子	普通(G3)	Type I	Type III	Type III
8	横浜	普通(G3)	Type I	Type III	Type III
9	川崎	普通(G3)	Type I	Type III	Type I
10	旗の台	軟弱(G5)	Type I	Type III	Type III
11	恵比寿	普通(G3)	Type I	Type III	Type III
12	都市大	軟弱(G5)	Type III	Type III	Type III
13	大崎	軟弱(G5)	Type III	Type III	Type III

4. システムリスク解析結果

解析は3ケースとし、各解析ケースと高架橋種類との関係を表4に示す。Case1は無補強の場合であり、A線にTYPE II を、B線にTYPE I を、C線の高架橋にTYPE IIIを配置している。また、Case2はTYPE I のNo.6～11を補強した場合、Case3はNo.9以外のTYPE I を補強した場合で補強途中をイメージしている。

図3は、各解析ケースの復旧曲線を示したものである。各ケースとも、直列システムの系統数に等しい30段階で復旧している。Case1は地震発生後10～20日の間に約2割復旧し、その後49～60日の間で残り8割が復旧している。RTEは復旧が遅れる8割の部分に影響を受け47.65日であった。Case2は、復旧曲線が大きく左にシフトし、補強により復旧期間が大幅に短縮されたことが解るとともに、RTEは8.44日に改善された。

Case3は、多くの高架橋の補強が実施されているが、一箇所の未補強の高架橋により、残り6割の復旧が47日頃と遅れており、RTEは改善されず33.16日であった。

図4は、GIS（地理情報システム）を用いて、各駅の高架橋の復旧期間（期待値）を棒グラフで表示したものである。このように、GISを使用すると、各駅の復旧期間が視覚的にわかりやすく表現できる。

表5は、被災した各出発駅から各到着駅までの復旧期間（期待値）を、出発地点にNo.2とNo.8を例として示したものである。出発地点は同じでも、到着地点ごとに復旧期間が異なることがわかる。このように、本モデルでは各出発駅から各到着駅までの復旧期間を説明することが可能で、いつ頃通常の列車運行に戻るかを知りたいユーザーの要望に応えることができる。

各駅の影響度、脆弱性（復旧期間の期待値）、B.I.の結果を表6に示す。Case2において同一耐力の普通地盤上のNo.3と軟弱地盤上のNo.4を比較すると、震源地から遠いNo.4の脆弱性が大きくなっていることが解る。これは、地盤増幅の影響によるものと考えられる。このように、地盤種別ごとの地盤増幅特性を解析モデルに取り入れることにより、広範に敷設された構造物の脆弱性を適切に評価ができる。B.I.は、影響度と脆弱性の積で表される。Case1では、B線の駅のB.I.値が全般的に大きく、中でもNo.10が最大のボトルネックといえる。これは、No.10は影響度と脆弱性がともに

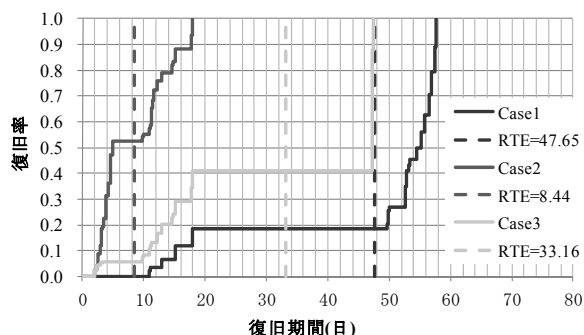


図3 復旧曲線の比較

大きいためである。また、Case2ではTYPE IIを補強していることから、際立ったボトルネックが見られない。最もボトルネックとなるのはNo.4になり、補強によりボトルネック箇所が変化していることがわかる。さらに、Case3ではNo.9のみB.I.値が大きく、この施設がボトルネックとなりシステム全体に影響を及ぼしていることがわかる。B.I.を図5のようにGISで表示すると、各ケースのB.I.を良く理解できる。

表5 各駅からGOAL駅までの復旧期間

出発駅No.	到着駅No.	Case1	Case2	Case3
		復旧期間(日)	復旧期間(日)	復旧期間(日)
2	5	15.1	15.1	15.1
	11	52.7	14.7	14.7
	13	49.9	14.7	14.7
8	5	55.3	11.3	47.4
	11	55.8	3.1	47.2
	13	55.3	3.4	47.2

表6 ボトルネック指標

Case1				Case2				Case3			
駅No.	影響度	脆弱性	B.I.	駅No.	影響度	脆弱性	B.I.	駅No.	影響度	脆弱性	B.I.
10	0.816	49.66	40.53	4	0.474	13.16	6.23	9	0.591	47.32	27.89
9	0.591	47.22	27.89	3	0.276	11.18	3.08	7	0.474	13.16	6.23
8	0.501	49.51	24.82	2	0.209	13.46	2.81	3	0.276	11.18	3.08
11	0.451	45.01	20.31	5	0.323	8.61	2.78	2	0.209	13.46	2.81
7	0.373	50.78	18.96	10	0.816	3.02	2.46	5	0.323	8.61	2.78
6	0.206	51.56	10.63	1	0.117	16.54	1.93	10	0.816	3.02	2.46
4	0.474	13.16	6.23	8	0.501	2.96	1.49	1	0.117	16.54	1.93
3	0.276	11.18	3.08	9	0.591	2.30	1.36	8	0.501	2.96	1.49
2	0.209	13.46	2.81	7	0.373	3.44	1.28	6	0.206	3.78	0.78
5	0.323	8.61	2.78	12	0.318	3.30	1.05	12	0.318	3.30	1.05
1	0.117	16.54	1.93	11	0.451	1.83	0.83	11	0.451	1.83	0.83
12	0.318	3.30	1.05	6	0.206	3.78	0.78	6	0.206	3.78	0.78
13	0.226	2.85	0.64	13	0.226	2.85	0.64	13	0.226	2.85	0.64

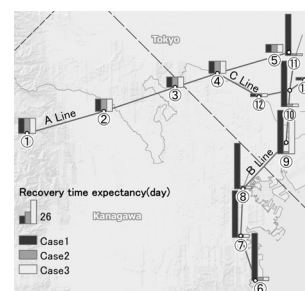


図4 復旧期間の比較

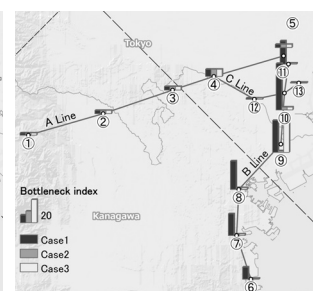


図5 B.I.の比較

5. まとめ

本稿では、首都圏に敷設された40km四方の鉄道路線システムを対象に、シナリオ地震に対する施設の脆弱性を解析し、各解析ケースにおける路線の復旧過程およびボトルネック箇所を定量的に評価した。これにより、ユーザーが知りたいと考えられる鉄道路線が被災した場合の乗車駅から目標駅までの復旧期間を示すことができる。また、施設の補強を進めても、一部の施設が脆弱な場合は路線システム全体の復旧が遅れることから、ボトルネック箇所の把握の重要性を確認した。このように、評価結果はオーナーのBCPの策定や防災対策の立案に有用であると考えられる。

参考文献

- 1) 内閣府：中央省庁業務継続ガイドライン第一版，2007
- 2) 静間・前田・服部・奥村・吉川：首都圏鉄道路線の地震時システムリスク解析（その1）－考え方と基礎理論－，第回年次学術講演会講演概要集，I-602，pp.1203-1204，2009
- 3) 佐藤編著、阿部・岡田・島崎・鈴木共著：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック 鹿島出版会1989年発行
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準（耐震設計），1999.10
- 5) 前田・服部・奥村・静間・吉川：首都圏鉄道路線の地震時システムリスク解析（その1）－仮想路線の地震後復旧シミュレーション－，第回年次学術講演会講演概要集，I-603，pp.1205-1206，2009