# 都市内鉄道の地震時システムリスク解析と

# システム強化策の定量評価

東京都市大学	学生会員	○髙橋優輔
東京都市大学	フェロー会員	吉川弘道

## 1 はじめに

大都市の鉄道路線は複雑に入り組んだ線状施設と なっている。そのため、地震などの災害により一箇 所でも寸断されると、機能全体が停止することがあ る。一方で、その路線の複雑さからこれまで地震が 路線網に与える被害リスクの定量化を行うことは非 常に重要であり、これまでも様々な着目点において 研究・解析がなされ、比較検討が行われている。

本研究は、地震時システム解析の一つとして、路 線網の組み合わせによるリスク値の定量評価を行い、 路線網における冗長性の考察を行う。システムリス ク解析の流れを以下の図1に示す。



図1 解析の流れ

## 2 システムモデルの概要

多くの線状施設は、単純なモデルを組み合わせた モデルとして考えることができ、かつ一方向での導 通性解析が重要である。このため、地震時システム リスクを考察するために、図2に示すような、単純 な3つの基本モデルにて考察することが重要である。

すなわち、以下の3段階で考えるものである。





(a) 直並列混合モデル



## (a) 基本直列モデル

各構造物を一つの路線で繋いだシステムモデルで ある。このモデルでは、いずれか一つの構造物が損 傷すると、そのモデル全体における路線としての機 能が停止してしまう。

#### (b) 直列・並列混合モデル

前述の直列モデルに平行路線を追加して、機能を 強化させたシステムモデルである。いずれか片方の 路線において損傷が発生した場合でも、もう片方の 路線がその機能を補完するため機能全体に冗長性を 持たせることが可能となる。

## (c) ラダーモデル

平行路線に両線をつなぐ接続路線を挿入したもの である。このモデルでは中間に接続路線が入ること

キーワード:地震時システムリスク解析、直列モデル、直列・並列混合モデル、ラダーモデル、冗長性 連絡先:〒241-0816 神奈川県横浜市旭区笹野台 3-56-7 髙橋優輔 TEL.070-5013-8878 E-mail: fukuen105@hotmail.co.jp で路線の損傷に応じた旅客の輸送経路を確保できる ことが可能になるため、より冗長性を高められる。

当然のことながら、基本直列モデル⇒直列・並列 混合モデル⇒ラダーモデルの順番にて、線状システ ムが強化され、地震リスクは低減する。ここで大切 なことは、上記の順番にて費用も多く必要とするこ とであり、リスクの低減(冗長性の増大)を定量的 に考えることが重要である。

# 3 都市内鉄道への適用

## (1)対象路線

解析の対象路線として渋谷〜横浜間を走行する鉄 道各線及びJR南武線を選定した。それぞれの路線を 図3に示す。ここでは、渋谷駅を始点、横浜駅を終 点として考え、一方向での旅客輸送(機能維持)を 考えるものである。

渋谷~横浜間を結ぶメインルートとして、東急東 横線、JR 湘南新宿ライン及び山手線と東海道線(京 浜東北線を含む)を乗り継ぐ3路線が存在する。また、 東急東横線、湘南新宿ラインと東海道線を縦に結ぶ 経路として JR 南武線が走行している。



図3 路線図

## (2)解析条件

上記(1)の鉄道路線において、図4に示す5つのル ートを設定し、解析パターンを4種類設定した。対 象路線のモデルを図5に、各ルートの概要を以下の 表1に、解析パターンを表2に示す。

次に、地震時における被災対象として、盛土・橋 梁・軌道・電車線などのコンポーネント、およびコ ンポーネントを構成するユニットを定義する。本解 析では、ユニットは最大で148箇所とした。コンポ ーネントは合計 17箇所とし、それぞれにおいて耐力 中央値及び機能停止日数を設定した。各コンポーネ ントの耐力中央値及び機能停止日数を以下の表3及 び表4に示す。各コンポーネントのPGV及び機能停 止日数は、吉川・高澤らの論文(2011)及び佐藤の論文 (2013)に用いられているものを一部引用した。

また、各パターンにおける、ルートの利用者割合 を表5に示す。利用者割合は各鉄道会社より発表さ れている一日平均利用者数及び各駅の一日平均乗降 客数を元に算出した。

解析に用いる地震動は 1703,1923 関東地震(M8.0) とし、同シナリオ地震における、ルート数の違いに よるリスク値の変動を確認する。解析に用いるシナ リオ地震及びリスク値の諸元を以下の**表 6** に示す。

なお、構造物の応答標準偏差を全ての構造物で 0.33、応答の標準偏差を 0.50 とし、応答は全て独立 とした。



表1 5ルートの概要

ルート(1)	<b>東急東横線</b> (渋谷-東横線武蔵小杉-横浜)
ルート2	JR山手•東海道線(渋谷-大崎-品川-川崎-横浜)
ய டி	東急東横線−JR南武線−東海道線
12-13	(渋谷-東横線武蔵小杉-川崎-横浜)
	湘南新宿ライン
N-r4	(渋谷−大崎−横須賀線武蔵小杉−横浜)
	東急東横線−JR横須賀線
ルートら	(渋谷-東横線武蔵小杉…横須賀線武蔵小杉-横浜)

表2 解析パターン

パターンNo.	解析ルート
P1(直列)	モート
P2(並列)	<b>ルート①・ルート②</b>
P3(ラダーA)	<b>ルート①・ルート②・ルート③</b>
P4(ラダーB)	1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 -

	一般構造物						
	平地	切土	盛土	高架橋	架道橋	橋梁	トンネル
分類	Α	В	С	D	Е	F	G
無被害	-	0	0	0	0	0	0
中破	-	79.69	26.56	37.19	37.19	58.44	95.62
大破	-	-		85.00	85.00	106.25	148.75
崩壊	-	106.25	63.75	106.25	106.25	159.37	191.24
		電車線				軌道	
	地上·高架	駅構内	地下		地上	トンネル内	高架
分類	Н	I	J	分類	L	М	N
無被害	0	0	0	無被害	0	0	0
大破	58.44	37.19	79.69	大破	37.19	79.69	58.44
崩壊	85.00	53.12	116.87	崩壊	53.12	116.87	85.00
	優	亭車場構造物	勿	その他			
	高架	地下	地上	踏切設備			
分類	0	P	Q	K			
無被害	0	0	0	0			
中破	37.19	95.62	21.25	_			
大破	85.00	148.75	42.50	37.19			
崩壊	106.25	191.24	53.12	53.12			

表3 各コンポーネントの PGV

表4 各コンポーネントの最大機能停止日数

				一般構造物			
	平地	切土	盛土	高架橋	架道橋	橋梁	トンネル
分類	Α	В	С	D	Е	F	G
無被害	-	0	0	0	0	0	0
中破	-	3	3	3	3	3	4
大破	_	-	1	30	30	30	35
崩壊	-	60	45	110	110	110	150
		電車線				軌道	
	地上·高架	駅構内	地下		地上	トンネル内	高架
分類	Н	Ι	J	分類	Ц	М	N
無被害	0	0	0	無被害	0	0	0
大破	10	10	10	大破	10	10	10
崩壊	30	30	30	崩壊	30	30	30
	停	亭車場構造物	勿	その他			
	高架	地下	地上	踏切設備			
分類	0	Р	Q	К			
無被害	0	0	0	0			
中破	3	4	1	_			
大破	30	35	7	10			
崩壊	110	150	30	30			

表5 各パターンにおける利用者比率

	P1	P2	P3	P4
<b>ルート</b> ①	1.000	0.472	0.433	0.300
<b>ルート②</b>	I	0.528	0.485	0.385
ルート3			0.082	0.057
ルート④	I	I		0.178
ルート(5)			-	0.080

	表 6	シナリ	リオ地	震の	諸元
--	-----	-----	-----	----	----

	1/03,1923 関東地	<b>丧</b>		
ᄴᄛᅷᅮ	マグニチュード	8.0		
地辰祖儿	年間発生確率	0.001		
地震リスク学会	機能停止日数期待値	80.204		
地長リヘリ祖儿	年超過確率	0.111		

なお、コンポーネントの耐力中央値は地表面にお ける最大速度(PGV)とし、解析の際は各ユニットに おける地盤増幅率によりその値を除した工学的基盤 面の最大速度(PBV)を使用し、距離減衰式は安中式 (速度)を用いた。

また、表層地盤増幅率は地震ハザードステーション「J-SHIS」にて用いられている、速度に対応した 値を参考に、構造物ごとに設定した。

なお解析にあたり、旅客の流動は渋谷→横浜の方 向のみとした。

## (3) 解析結果

解析により得られた、各パターンにおける地震イ ベントリスク曲線を以下の図6に示す。また、年間 機能停止日数期待値を以下の表7に示す。



図6 地震イベントリスク曲線

表	7.	パター	-ン毎の	機能停⊥	上日数其	朋待値

·*///	年間	475年再現期間
ハダーノ	停止日数期待值[日]	停止日数期待値[日]
P1	1.79	69.0
P2	1.28	53.2
P3	1.30	54.1
P4	1.27	52.5

次に、解析より得られた D 曲線を以下の図 7 に示 す。D 曲線は復旧曲線のうち、停止日数ごとの復旧 率を示したものである。



図7 復旧曲線(D曲線)

次に、施設の弱点を求める指標となるボトルネッ ク指標を表7に示す。代表として、P1及びP4のパ ターンにおける上位10カ所のボトルネック指標を以 下の表8に示す。

表8 ボトルネック指標

(a) F	21
-------	----

32 60

30, 30

26.03

26.03

24.98

22.16

20.52

20.45

20.38

20 23

P1		P4
高架橋(大倉山~菊名) 高架橋被害	51.49	渋谷駅 地上駅構造被害
綱島駅 高架駅構造被害	50.62	高架橋(大倉山〜菊名) 高架橋被害
高架橋(大倉山〜菊名)A 高架橋被害	49.46	横浜駅 駅構内架線被害
元住吉駅 高架駅構造被害	47.80	横浜駅 地上軌道被害
高架橋(武蔵小杉~元住吉)B 高架橋被害	47.56	横浜駅 地上駅構造被害
高架橋(元住吉~日吉)A 高架橋被害	47.22	横浜駅 地下駅構造被害
武蔵小杉駅 高架駅構造被害	46.97	武蔵小杉駅 高架駅構造被害
高架橋(新丸子~武蔵小杉) 高架橋被害	46.80	高架橋(新丸子~武蔵小杉) 高架橋被害
新丸子駅 高架駅構造被害	46.64	新丸子駅 高架駅構造被害
多摩川駅 高架駅構造被害	43.99	鶴見川橋梁(東海道線) 橋梁被害

## 4 考察

渋谷~横浜間の鉄道路線に対し、地震時システム リスク解析を適用した。解析により得られた結果に 対する考察を以下に記す。

- ・地震リスク曲線より、複数路線が存在する P2、P3、 P4 は直列である P1 より機能停止日数が短縮され ているが、この3パターン内ではわずかな差が見 られるものの、機能停止日数期待値に大きな差が 見られない。
- ・年間機能停止日数及び475年再現期間機能停止日 数機能停止より、2 路線解析である P2 のパターン は3路線解析のP3より機能停止日数が小さくなっ ている。この結果より、ラダーモデルが必ずしも 機能停止日数を短縮するモデルになるとは言えな いことがわかる。
- ・D曲線より、迂回路線が存在する P2~P4 は P1 よ りも同機能停止日数における復旧率が高い。
- ・また、P2~P4の復旧率には大きな差が見られない が、設定路線が多い P4 は復旧率が一番高い。P2 と P3 を比較すると、45 日~110 日では P2 の復旧 率が高いが、それ以外ではP3の復旧率が高いこと がわかる。

- ·P3では南武線が追加されたことにより、南武線の 構造物が復旧するまでの期間が反映されたことで P2よりも復旧率が下がる期間があると考えられる。
- ・ボトルネック指標より、P1の場合は上位に入って いない横浜駅の構造物が P4 では上位を占めてい ることがわかる。故に、1路線のみの場合はボトル ネックとならない箇所も、複数路線が乗り入れる ことでボトルネックとなりうる場合がある。
- ・P1 と P4 の指標値を見ると、P4 の上位 10 箇所の指 標値は全て P1 のおよそ半分となっている。このこ とから、複数路線を設定することで機能が冗長性 を有し、リスク値を減少させることがわかる。

## <謝辞>

本研究の一部は、(財)国土技術研究センター研究 開発助成(平成25年度募集)にて実施したものであり、 ここに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 大峯秀人ほか:リスクファイナンスのための線状 施設の地震リスク評価,土木学会論文集 F6(安全 問題) Vol67, No.1, PP14-26, 2011
- 2) 吉川弘道・高澤尚子ほか:線状施設の震災後機能 停止期間に関するシステムリスク解析,土木学会 論文集 F4(建設マネジメント) Vol65.No.2.PP299-309.2009
- 3) 静間俊郎・中村孝明ほか: 地震損傷相関を考慮し た施設群の機能停止評価,土木学会論文集 A Vol67, No.2, PP92-108, 2011
- 4) 静間俊郎ほか:鉄道輸送機能に関する地震時復旧 曲線の利用性の検討, JCOSSAR 2011 論文集, A 論文
- 5) 佐藤梢平:線状施設の地震時システムリスク解析 -広域路線への適用-,平成25年度卒業論文, pp29-31, 2013
- 6) 中村孝明, 宇賀田健: 地震リスクマネジメント, 技法堂, 2009, pp190-200
- 7) 独立行政法人 防災科学技術研究所 地震ハザードステーション J-SHIS http://www.j-shis.bosai.go.jp/
- 8) JR 東日本ホームページ 各駅の乗車人員 http://www.jreast.co.jp/passenger/
- 9) JR 東日本ホームページ 路線別ご利用状況 2009 年度~2013 年度 http://www.jreast.co.jp/rosen\_avr/pdf/2009\_2013.pdf
- 10) 東京急行電鉄ホームページ 2013 年度乗車人員 http://www.tokyu.co.jp/railway/data/passengers/