

地震時システムリスク解析

ー鉄道施設の復旧シミュレーションー

東急建設(株)

(株)篠塚研究所
東京都市大学

○前田欣昌
服部尚道
奥村幹也
静間俊郎
吉川弘道

研究の背景と目的

■ 背景

生産工場や建築物などの民間施設のみならず、鉄道、道路、港湾、空港、電力などの社会基盤施設についても、BCPという視点での耐震検討が進められつつある。

BCP策定では、**事業(機能)停止・低下の可能性**やその**期間の推計**が重要。

■ 目的

広範に敷設された**鉄道路線システム**(仮想)を対象に、シナリオ地震におけるシステムリスクを解析する。

システムリスク・・・システムの復旧期間、復旧過程、ボトルネックなど



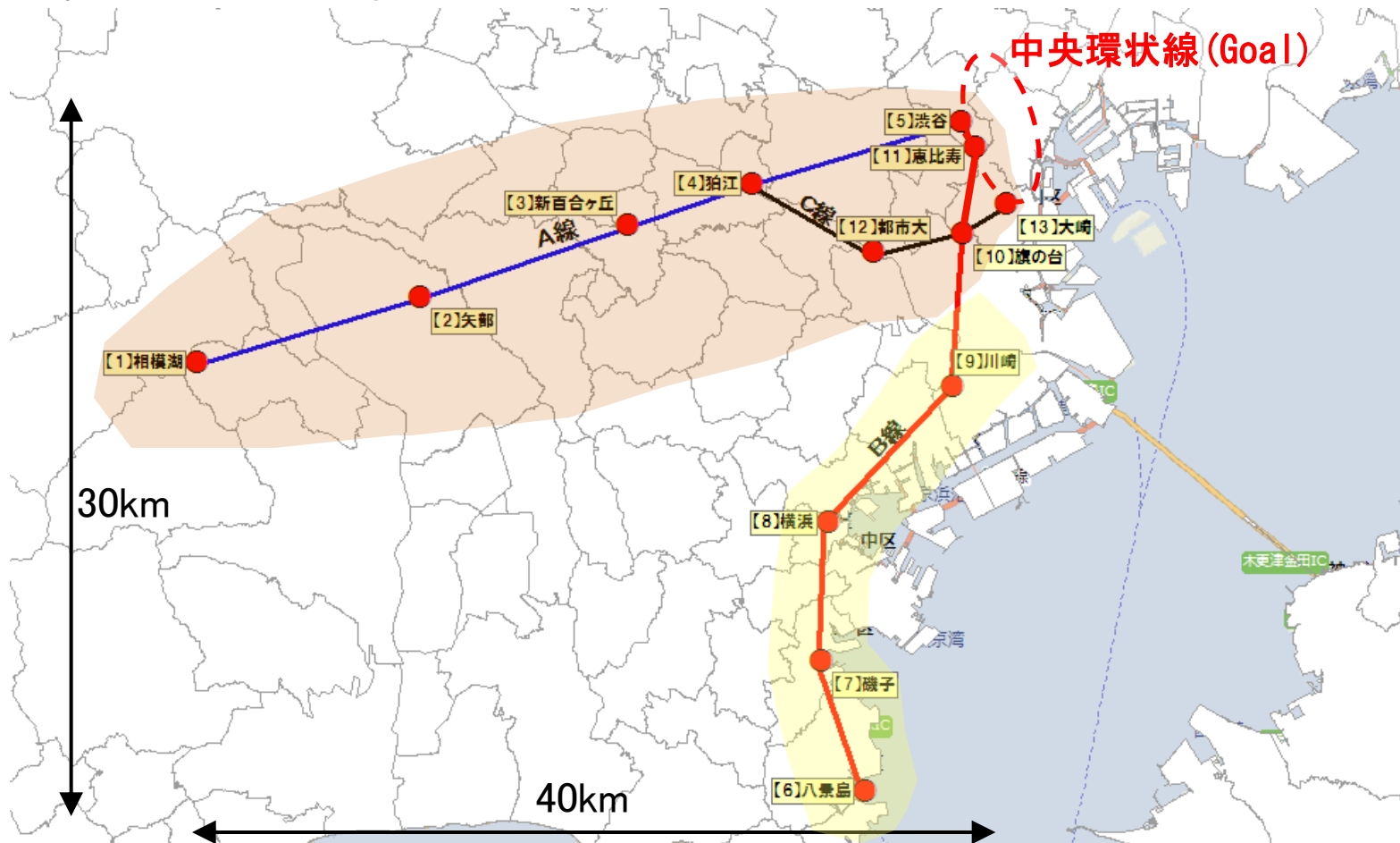
出典: 土木が遭遇した阪神大震災
日経コンストラクション



出典: 鉄道の被災と復旧の記録
日本鉄道建設業協会

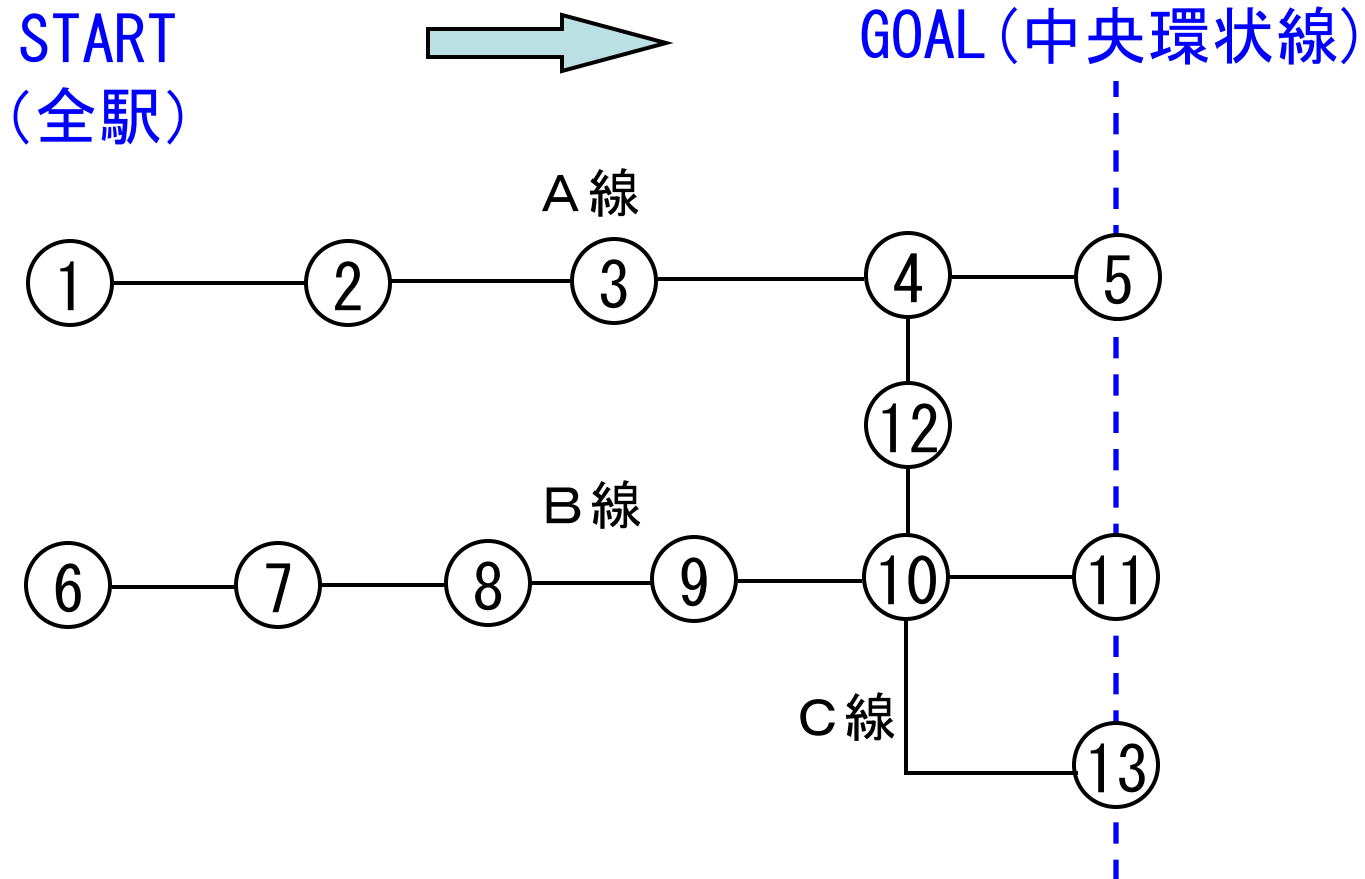
対象システム

- ・対象施設 : 仮想鉄道路線 (ラダーシステム)
- ・損傷対象 : 13の高架橋 (駅に配置) 高架橋 : 4種類 (TYPE I、II、III)
- ・地盤種類 : 2種類 (普通地盤と軟弱地盤) 地盤増幅率を考慮
- ・影響度 : 駅を通過する乗客数
- ・輸送方向 : 上り線のみ



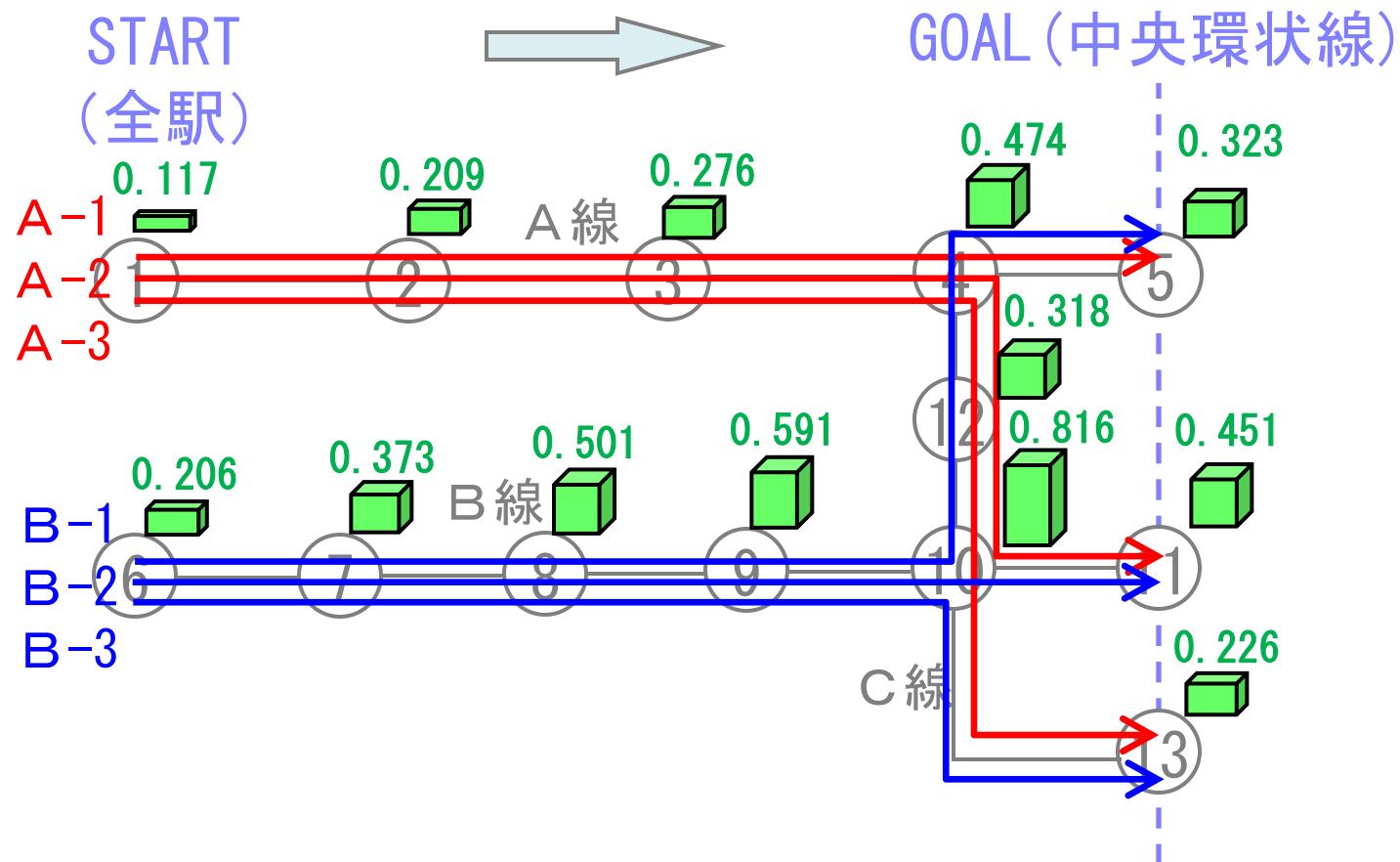
主要駅・高架橋	
1	相模湖
2	矢部
3	新百合ヶ丘
4	狛江
5	渋谷
6	八景島
7	磯子
8	横浜
9	川崎
10	旗の台
11	恵比寿
12	都市大
13	大崎

システムコンポーネント



ブリッジ構造のラダーシステム

対象施設の影響度

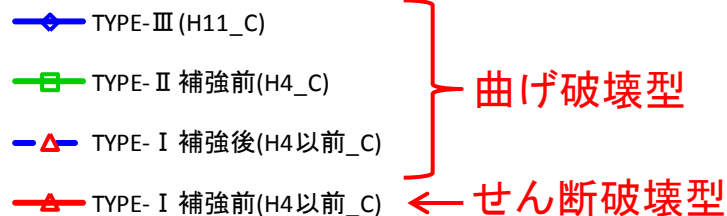
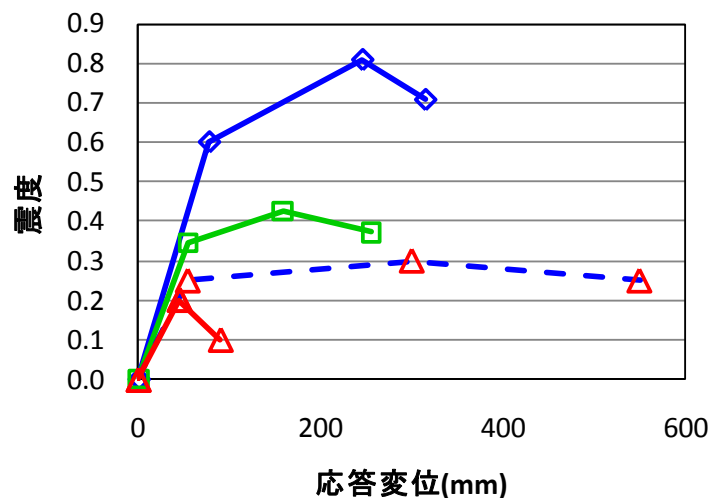


系統⇒6

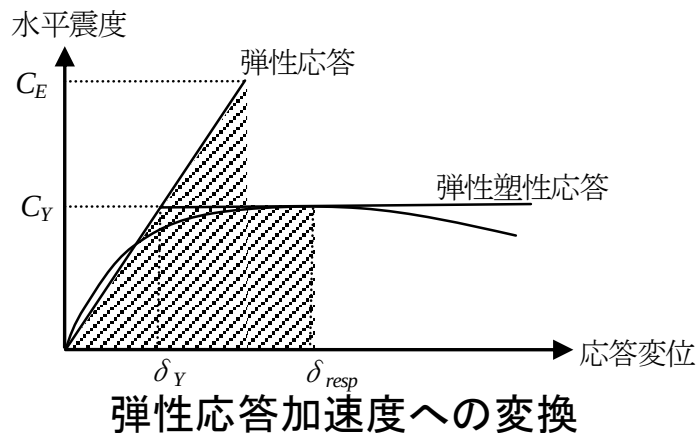
影響度⇒各駅通過客数／全客数

対象施設の脆弱性評価

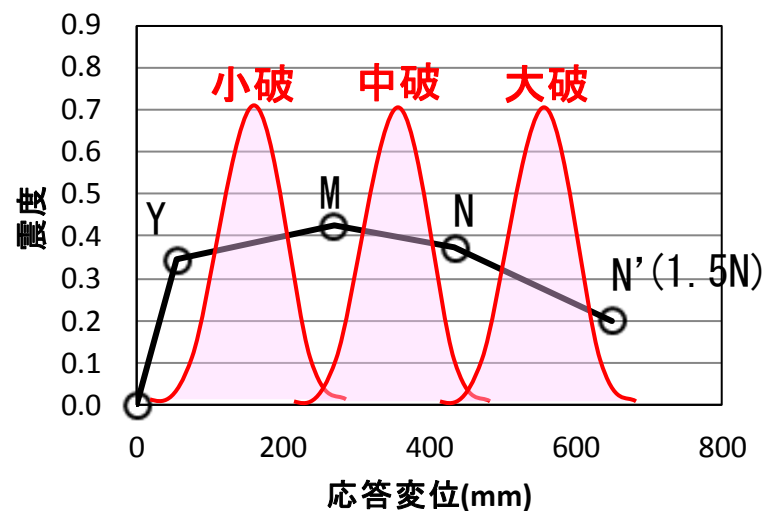
- 高架橋の種類：4種類
- 高架橋の損傷度に応じた弾性応答値を設定



高架橋の脆弱性(設計ベース)



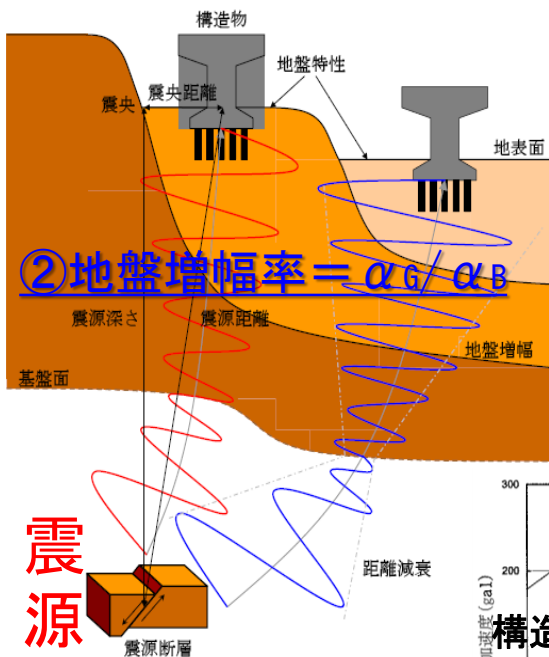
※耐力中央値は各限界状態の中間値に設定



地震加速度の増幅

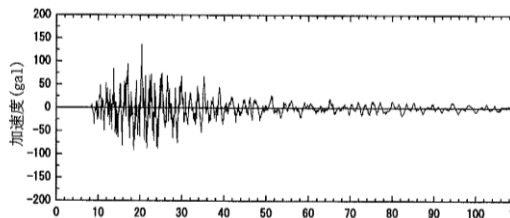
増幅特性

① 建造物の基準化 基盤応答スペクトル



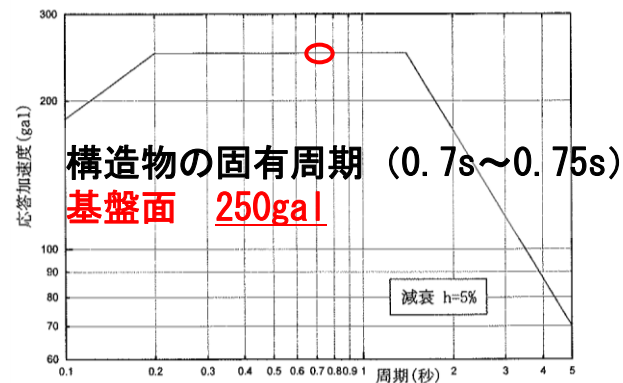
① 基準化基盤応答スペクトル(L1地震動)

最大加速度137gal



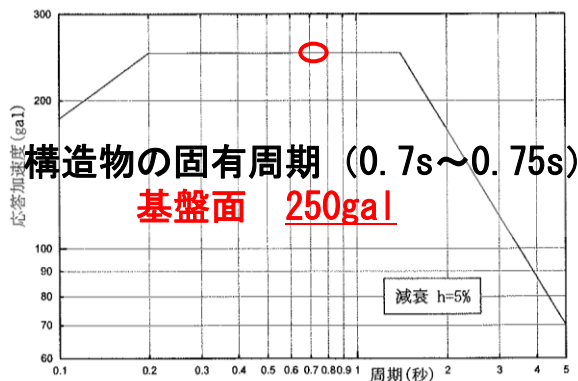
基盤地震動波形 (L1地震動)

1.825倍



基盤面での弾性加速度応答スペクトル

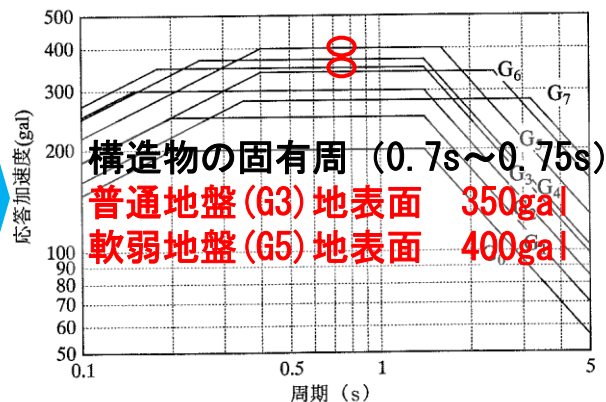
② 地盤増幅率(L1地震動)



基盤面での弾性加速度応答スペクトル

普通地盤
1.4倍

軟弱地盤
1.6倍



地表面での弾性加速度応答スペクトル

施設の脆弱性と基盤加速度への変換

高架橋TYPE I の脆弱性

損傷度	弾性応答 加速度 $\alpha_R(\text{gal})$	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 $\alpha_R/S/\lambda$ (gal)	増幅率 λ	基盤加速度 $\alpha_R/S/\lambda$ (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

※GOAL地点の復旧期間は、市街地で復旧に手間がかかると考え、復旧期間を2倍にする。

高架橋TYPE II の脆弱性

損傷度	弾性応答 加速度 $\alpha_R(\text{gal})$	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 $\alpha_R/S/\lambda$ (gal)	増幅率 λ	基盤加速度 $\alpha_R/S/\lambda$ (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

※GOAL地点の復旧期間は、市街地で復旧に手間がかかると考え、復旧期間を2倍にする。

高架橋TYPE III、TYPE I 補強後の脆弱性

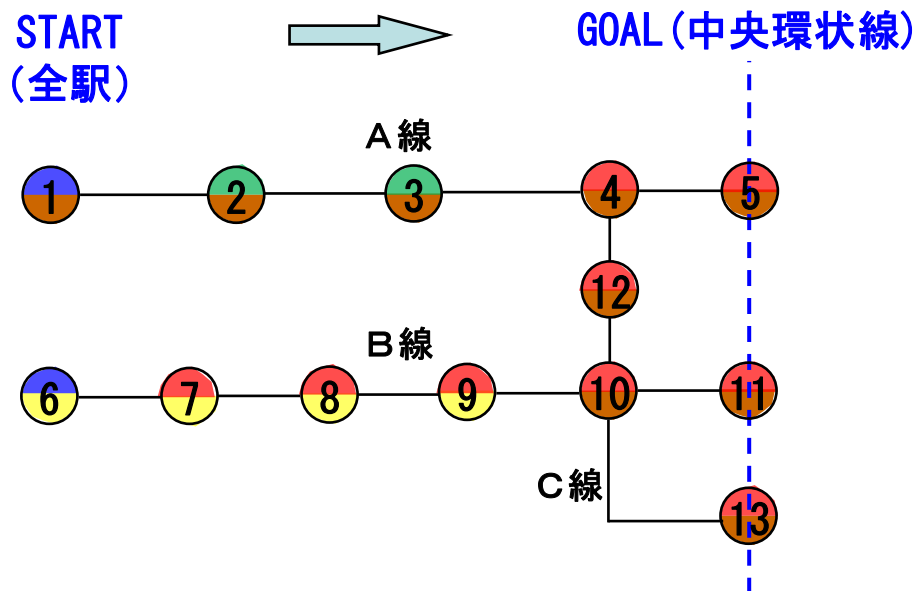
損傷度	弾性応答 加速度 $\alpha_R(\text{gal})$	復旧期間※ (日)	基準化基盤応答 スペクトル S	普通地盤(G3)		軟弱地盤(G5)	
				増幅率 λ	基盤加速度 $\alpha_R/S/\lambda$ (gal)	増幅率 λ	基盤加速度 $\alpha_R/S/\lambda$ (gal)
無被害	0	0	1.825	1.4	0	1.6	0
小破	1296	3	1.825	1.4	507	1.6	444
中破	2088	10	1.825	1.4	817	1.6	715
大破	3060	60	1.825	1.4	1198	1.6	1048

※GOAL地点の復旧期間は、市街地で復旧に手間がかかると考え、復旧期間を2倍にする。

※PBA換算した耐力中央値による一元管理

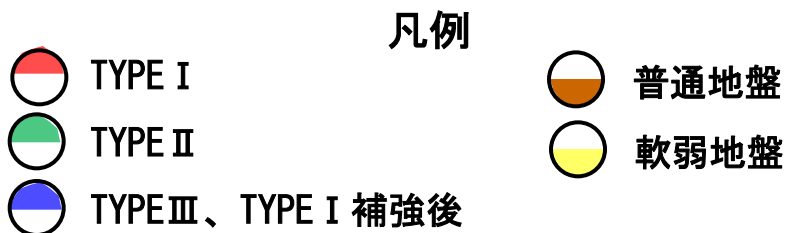
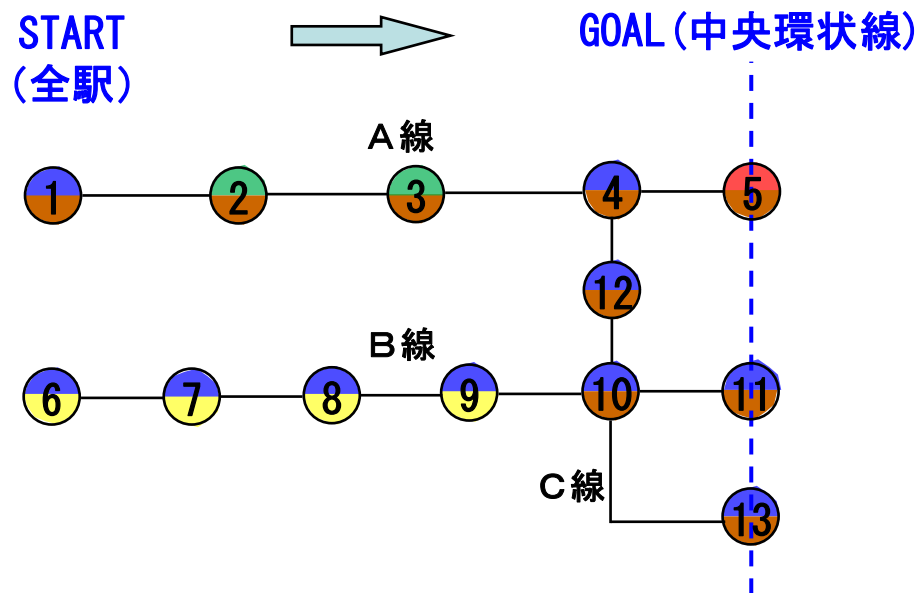
シミュレーションケース

ケース1：補強前



ケース2：TYPE-I 補強

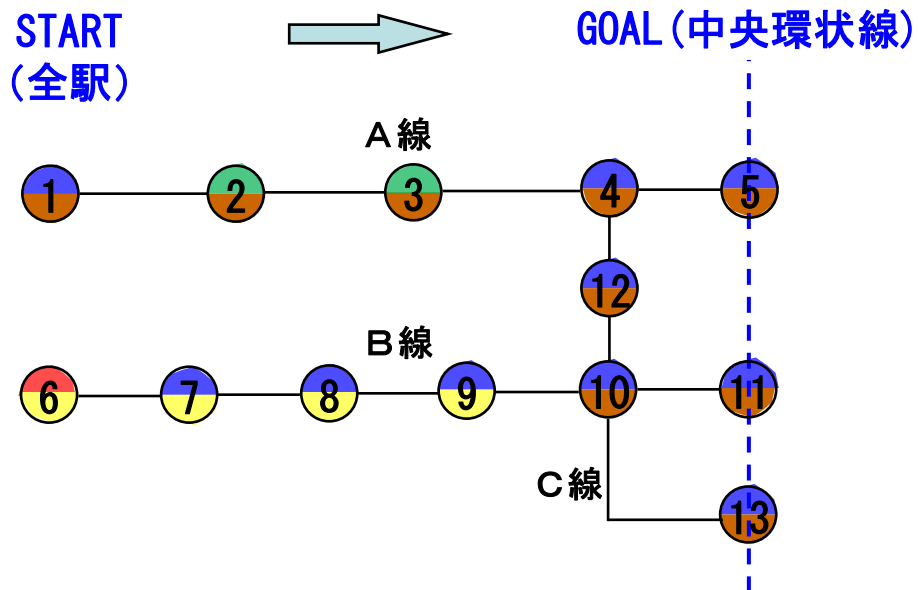
⑤渋谷のみ未補強



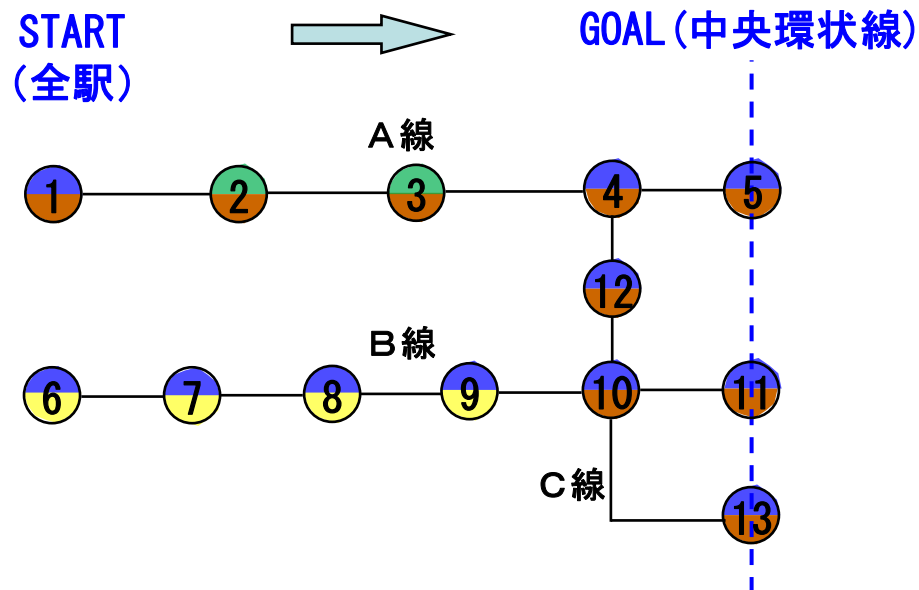
シミュレーションケース

ケース3：TYPE-I 補強

⑦磯子のみ未補強

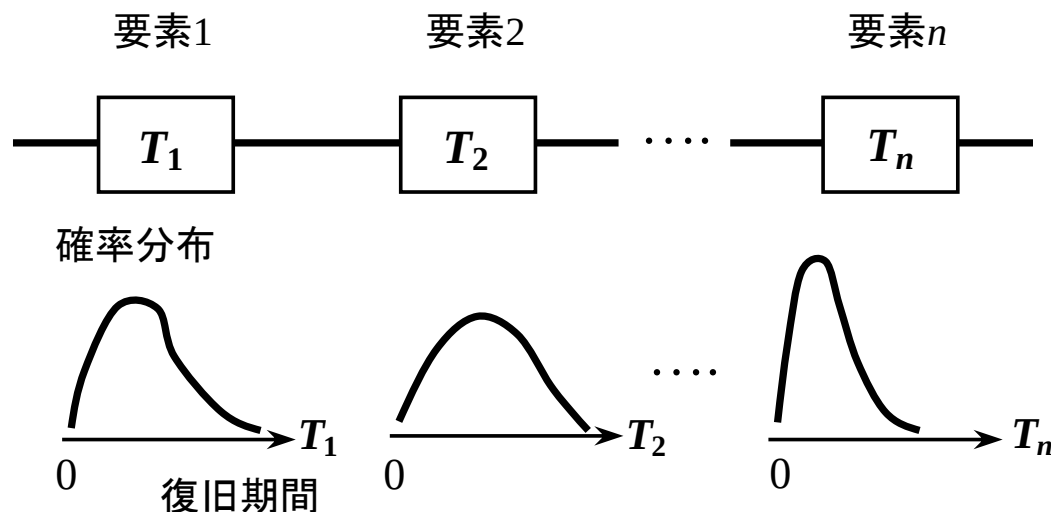


ケース4：TYPE-I 全補強



システムの復旧期間確率関数の評価方法

直列システム



複数の構成要素が損傷した場合は同時復旧を行い最短で修復が完工するよう配慮

各要素最長復旧期間＝システム復旧期間(停止期間)

(1要素でも機能停止するとシステムも停止する)

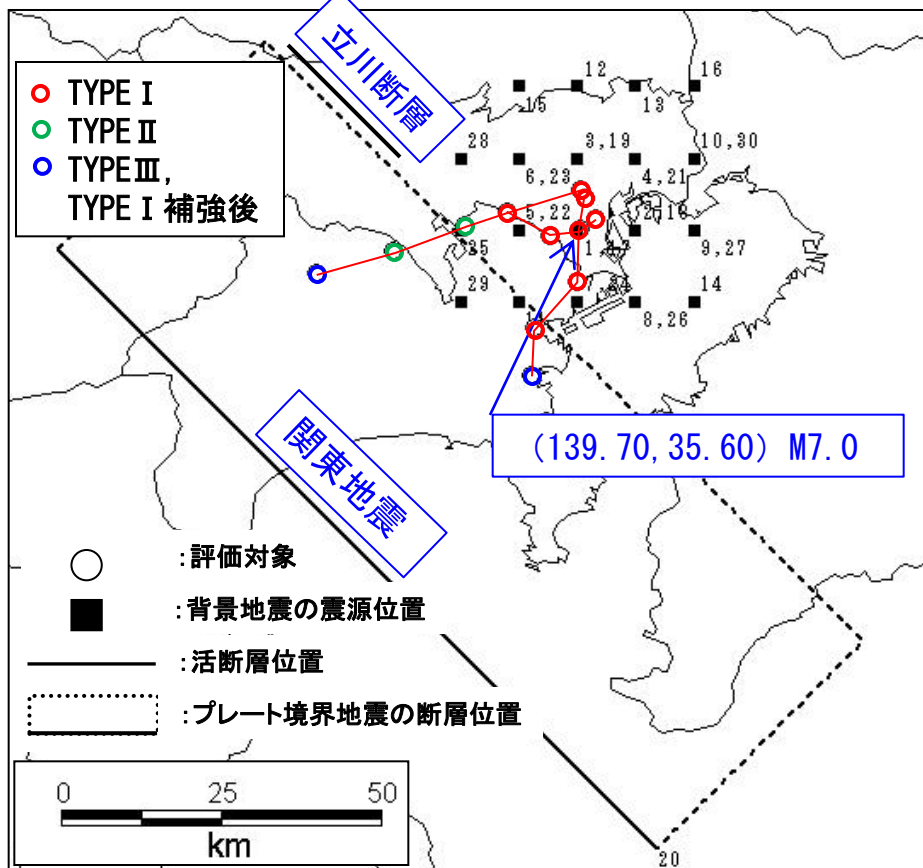
$$T_{|x} = \max(T_1, T_2, \dots, T_n | x) \quad \dots \text{max演算}$$

■解析条件

- ・ 安中の距離減衰式を使用
- ・ 地震動の大きさのばらつき 0.5
- ・ 高架橋耐力のばらつき 0.3

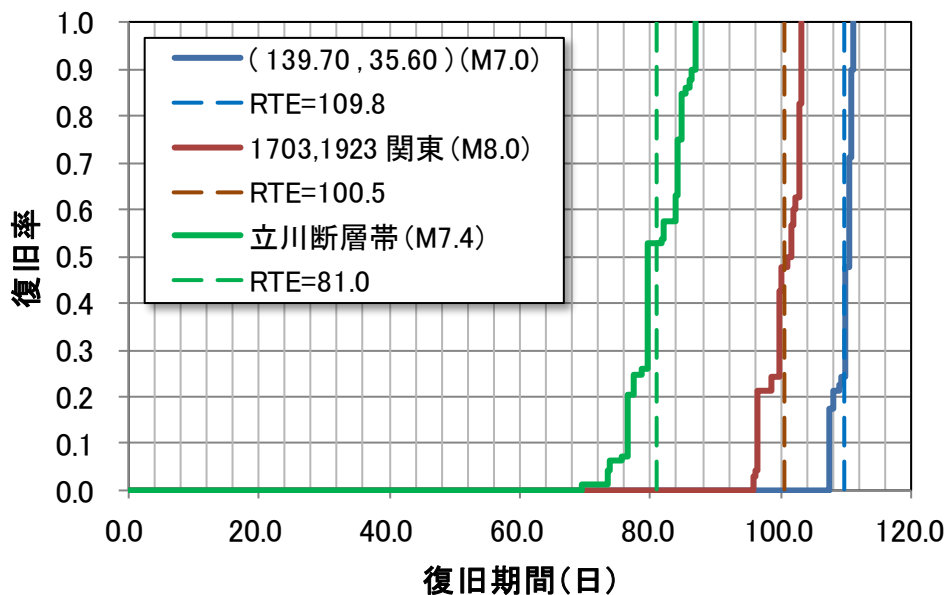
シミュレーション結果

ケース1：補強前



◆考察

- ・ 旗の台直下の背景地震が影響大
- ・ 復旧に多大な時間がかかる
- ・ シナリオ地震によって、復旧期間に差
- ・ 恵比寿がボトルネック



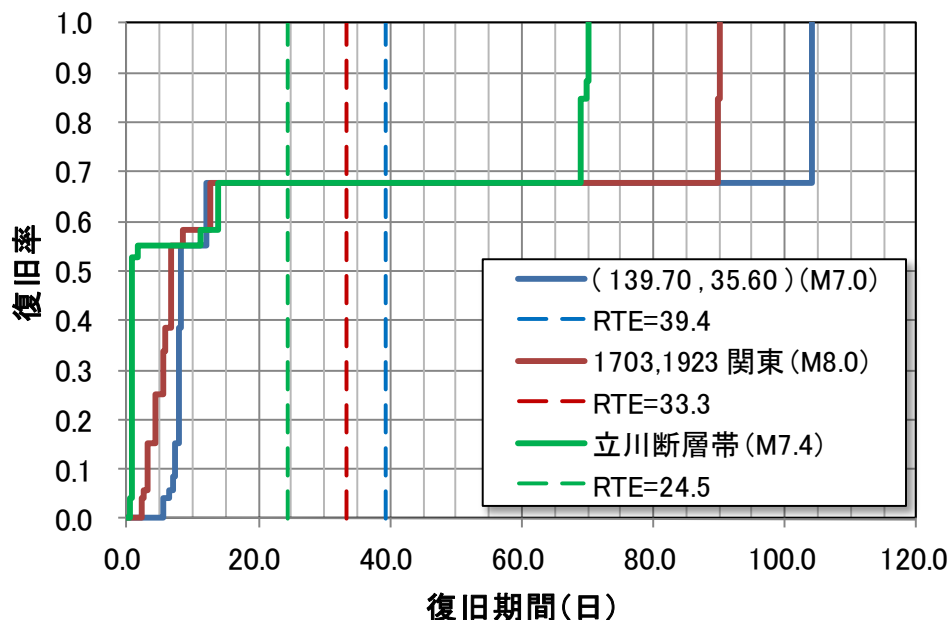
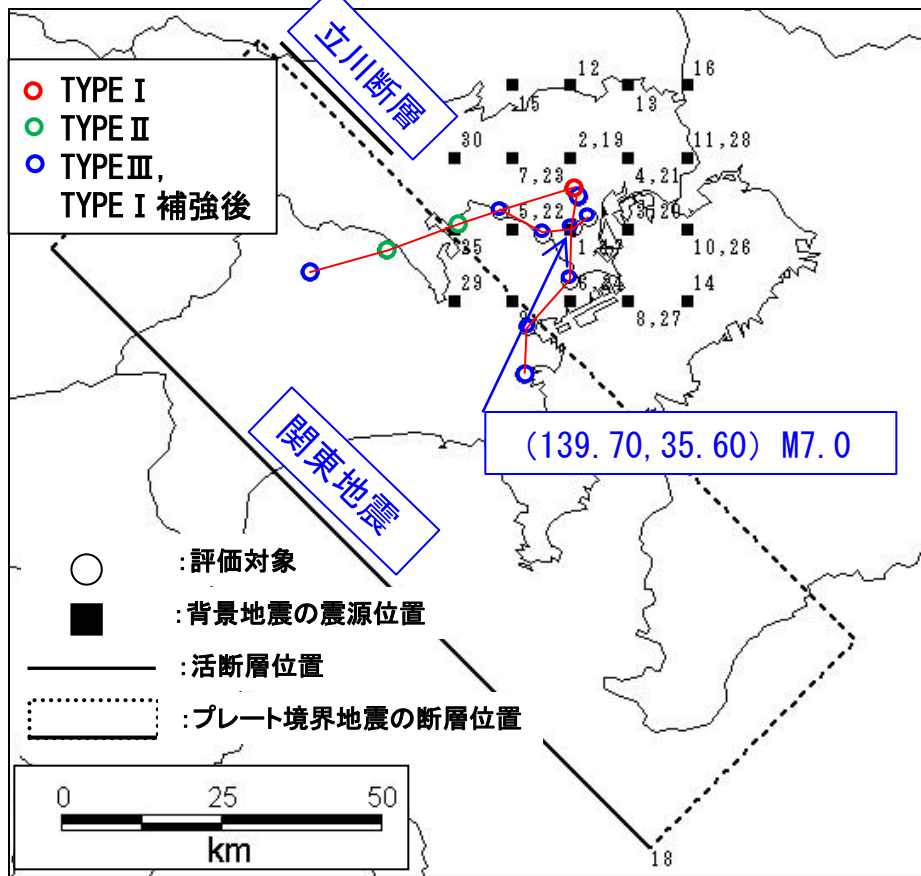
1703, 1923 関東

(M8.0)

損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名	1703, 1923 関東	(M8.0)	
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451	90.02	40.62
旗の台 高架橋梁構造被害	0.816	45.83	37.41
川崎 高架橋梁構造被害	0.591	50.81	30.00
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323	89.87	29.04
横浜 高架橋梁構造被害	0.501	52.67	26.41
狛江 高架橋梁構造被害	0.474	47.22	22.36
大崎 高架橋梁構造被害	0.226	90.44	20.41
磯子 高架橋梁構造被害	0.373	53.68	20.04
都市大 高架橋梁構造被害	0.318	46.75	14.85
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276	11.18	3.08
矢部 高架橋梁構造被害	0.209	13.46	2.81
八景島 高架橋梁構造被害	0.206	5.46	1.13
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117	4.97	0.58

シミュレーション結果

ケース2：TYPE-I 補強、渋谷のみ未補強



1703,1923 関東

(M8.0)

損傷要因	影響度	脆弱性	BI
------	-----	-----	----

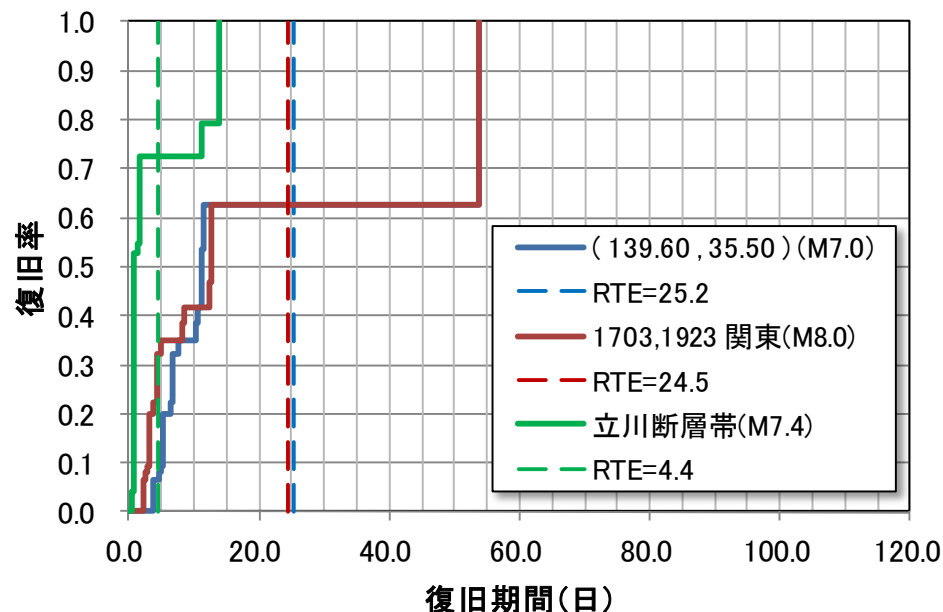
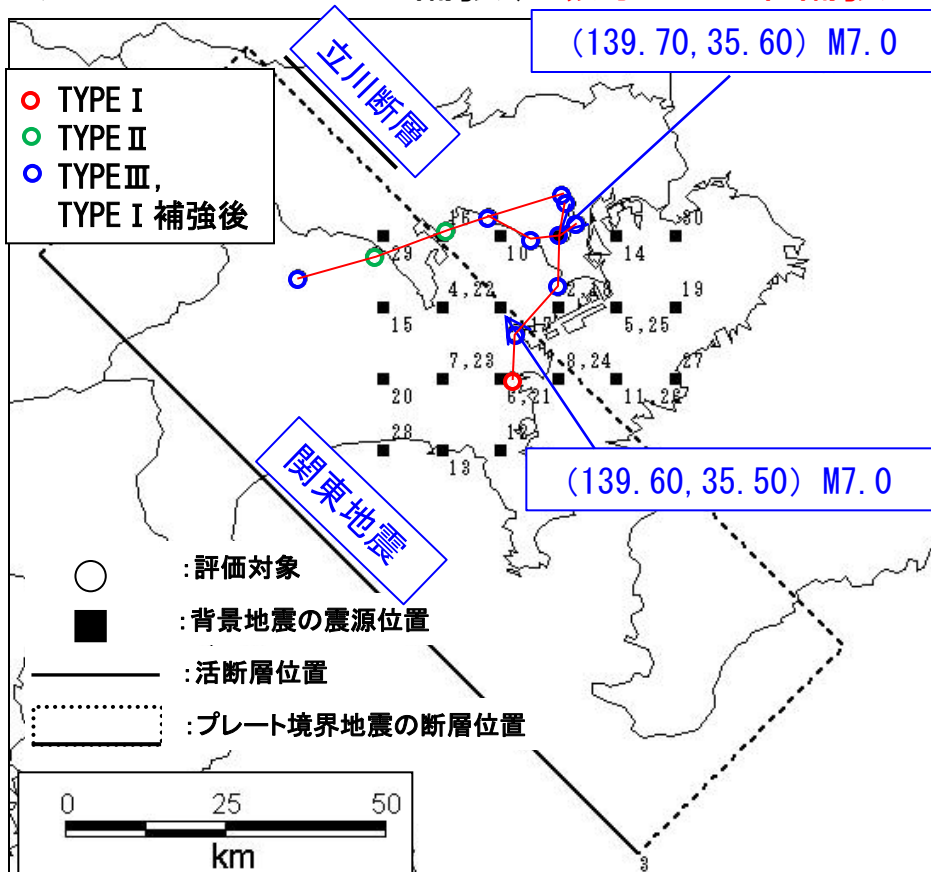
地震名	1703,1923 関東 (M8.0)
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323 89.87 29.04
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276 11.18 3.08
矢部 高架橋梁構造被害	0.209 13.46 2.81
横浜 高架橋梁構造被害	0.501 4.36 2.19
川崎 高架橋梁構造被害	0.591 3.45 2.04
磯子 高架橋梁構造被害	0.373 5.01 1.87
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451 3.67 1.65
旗の台 高架橋梁構造被害	0.816 1.99 1.63
八景島 高架橋梁構造被害	0.206 5.46 1.13
狛江 高架橋梁構造被害	0.474 2.30 1.09
大崎 高架橋梁構造被害	0.226 3.74 0.84
都市大 高架橋梁構造被害	0.318 2.19 0.70
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117 4.97 0.58

◆考察

- ・ 渋谷以外（約7割）は早期に復旧する
- ・ 渋谷がボトルネック
- ・ 渋谷に近い震源の地震ほど復旧に時間がかかる

シミュレーション結果

ケース3：TYPE-I 補強、礒子のみ未補強



1703,1923 関東

(M8.0)

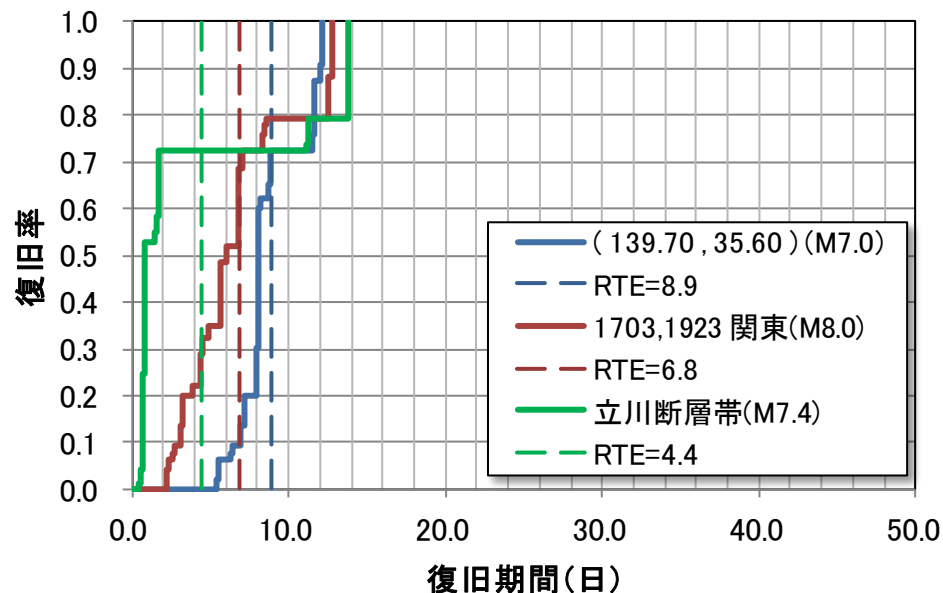
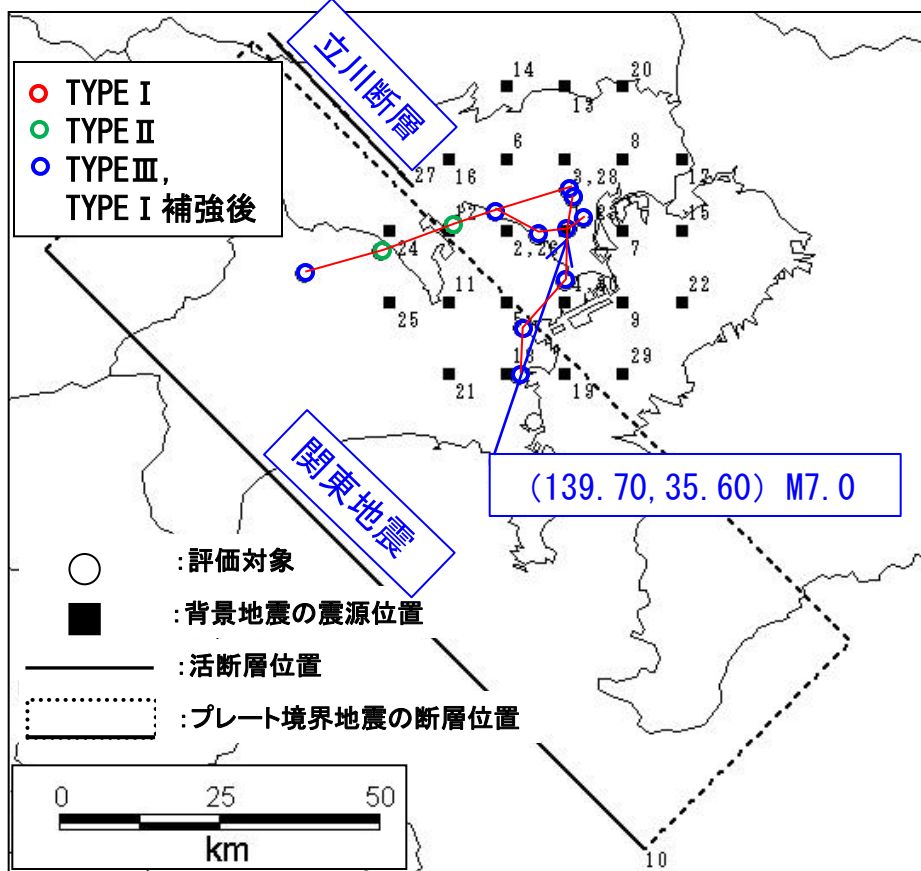
損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名	1703,1923 関東	(M8.0)	
礒子 高架橋梁構造被害	0.373	53.68	20.04
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276	11.18	3.08
矢部 高架橋梁構造被害	0.209	13.46	2.81
横浜 高架橋梁構造被害	0.501	4.36	2.19
川崎 高架橋梁構造被害	0.591	3.45	2.04
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451	3.67	1.65
旗の台 高架橋梁構造被害	0.816	1.99	1.63
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323	3.64	1.18
八景島 高架橋梁構造被害	0.206	5.46	1.13
狛江 高架橋梁構造被害	0.474	2.30	1.09
大崎 高架橋梁構造被害	0.226	3.74	0.84
都市大 高架橋梁構造被害	0.318	2.19	0.70
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117	4.97	0.58

◆考察

- ・ 礒子以外は早期に復旧
- ・ システムに影響を与える地震の震源位置が礒子方面にシフト
- ・ 関東地震の順位が上昇

シミュレーション結果

ケース4：TYPE-I 全補強



1703,1923 関東

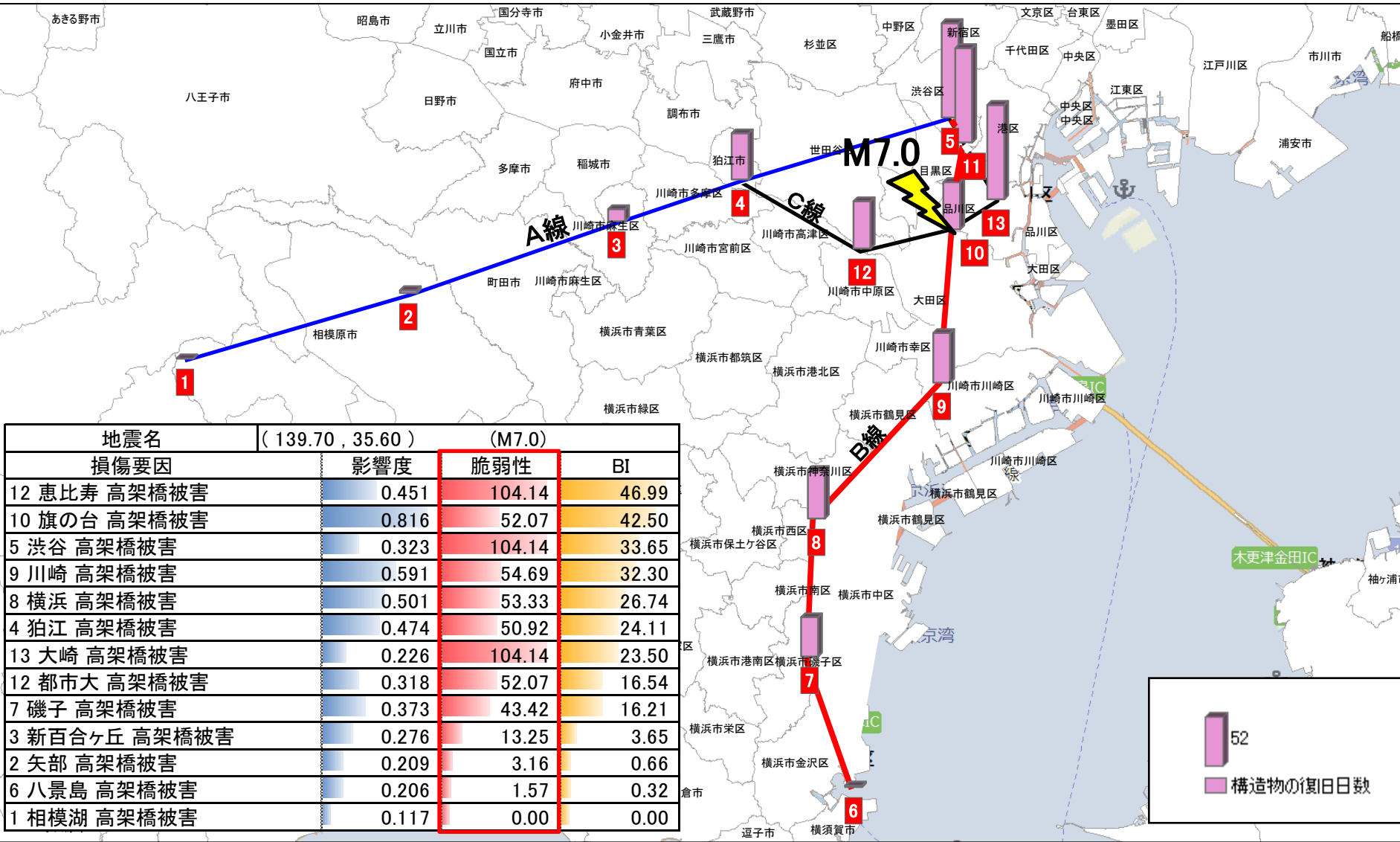
(M8.0)

損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名	1703,1923 関東	(M8.0)	
新百合ヶ丘 高架橋梁構造被害	0.276	11.18	3.08
矢部 高架橋梁構造被害	0.209	13.46	2.81
横浜 高架橋梁構造被害	0.501	4.36	2.19
川崎 高架橋梁構造被害	0.591	3.45	2.04
磯子 高架橋梁構造被害	0.373	5.01	1.87
恵比寿 高架橋梁構造被害	0.451	3.67	1.65
旗の台 高架橋梁構造被害	0.816	1.99	1.63
渋谷 高架橋梁構造被害	0.323	3.64	1.18
八景島 高架橋梁構造被害	0.206	5.46	1.13
狛江 高架橋梁構造被害	0.474	2.30	1.09
大崎 高架橋梁構造被害	0.226	3.74	0.84
都市大 高架橋梁構造被害	0.318	2.19	0.70
相模湖 高架橋梁構造被害	0.117	4.97	0.58

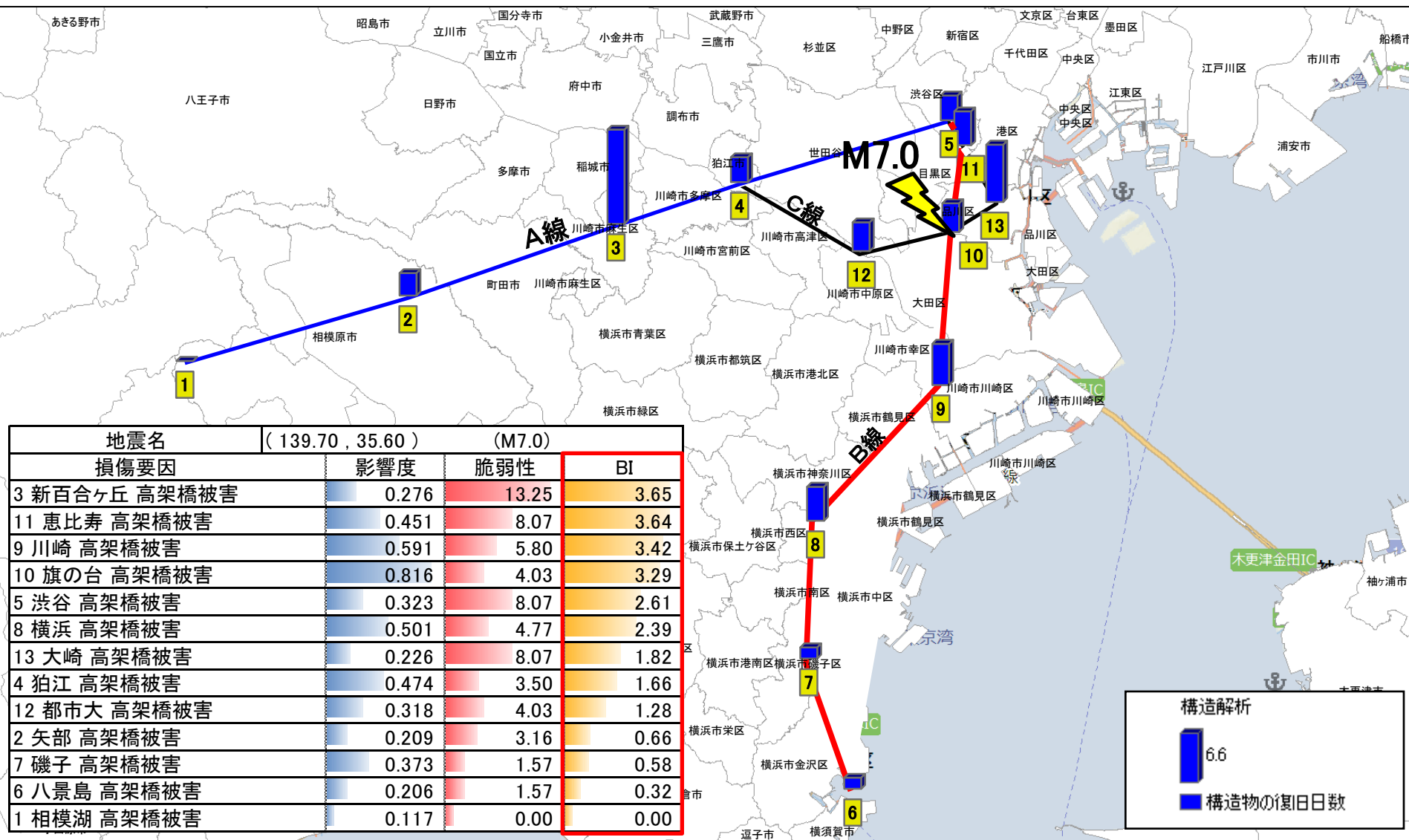
◆考察

- ・全駅比較的早期に復旧
- ・高架橋TYPE IIに近い立川断層の順位上昇
- ・際立ったボトルネックは見られない
- ・ボトルネック箇所が新百合ヶ丘に変化

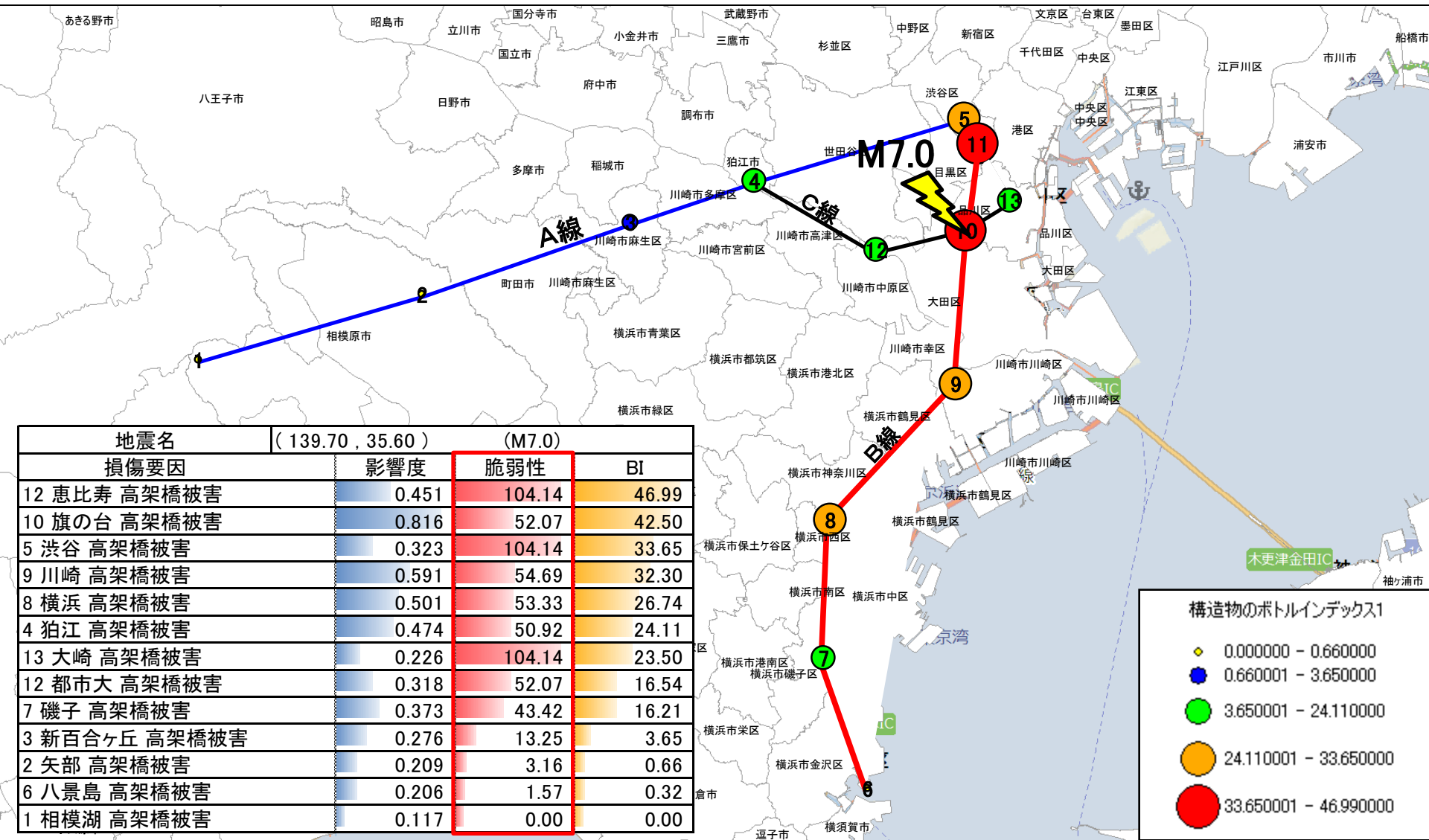
GISによる結果の比較 ケース1(補強前) 構造物の復旧日数



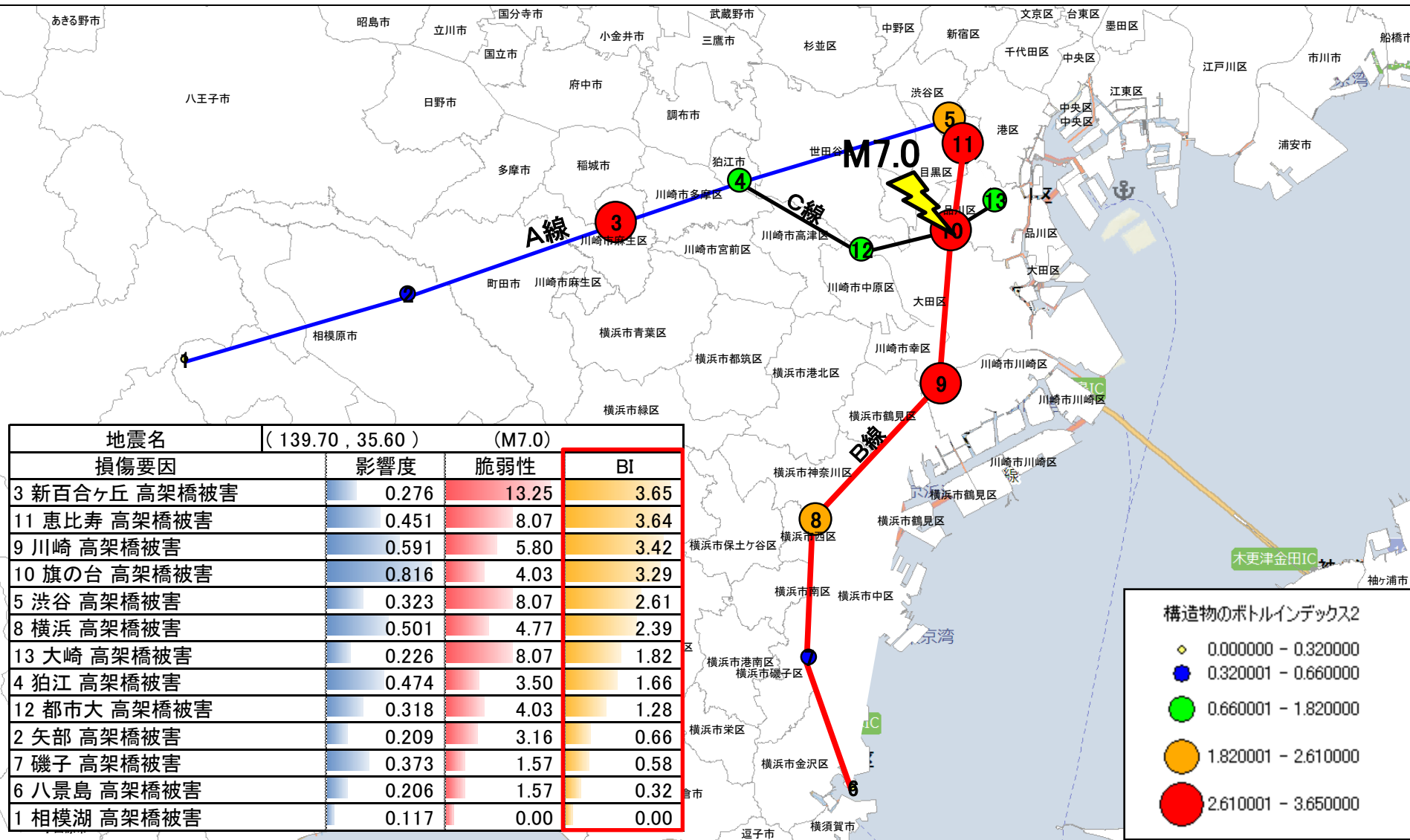
GISによる結果の比較 ケース4(補強後) 構造物の復旧日数



GISによる結果の比較 ケース1(補強前) ボトルインデックス



GISによる結果の比較 ケース4(補強後) ボトルインデックス



まとめ

- ◆ 広域鉄道路線を対象に、乗客数を影響度としたシステムリスク解析を実施した。
- ◆ 解析では、地震工学に関する要素（地盤増幅特性、高架橋の脆弱性、復旧日数など）を考慮した。
- ◆ 本解析手法により、鉄道路線システムの冗長性を考慮し、シナリオ地震に対する復旧曲線やボトルインデックスを定量的に評価した。
- ◆ 評価結果は、BCPの策定、防災対策、耐震補強計画、地震後の点検個所の順位付けに活用できると考える。