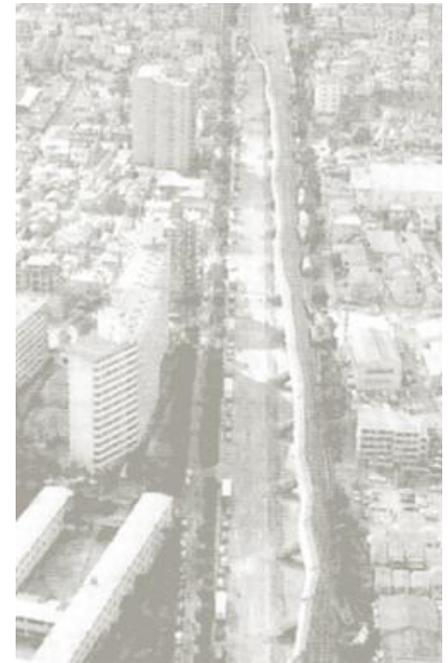


高速道路システムの機能性評価

(株) 篠塚研究所 静間俊郎

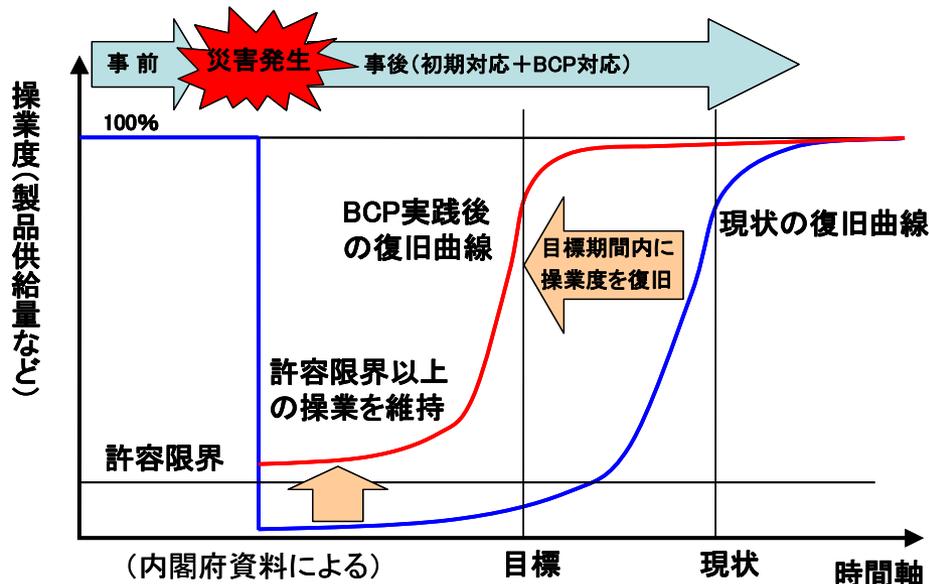
第 45 回総研セミナー



事業継続計画(BCP)と復旧曲線

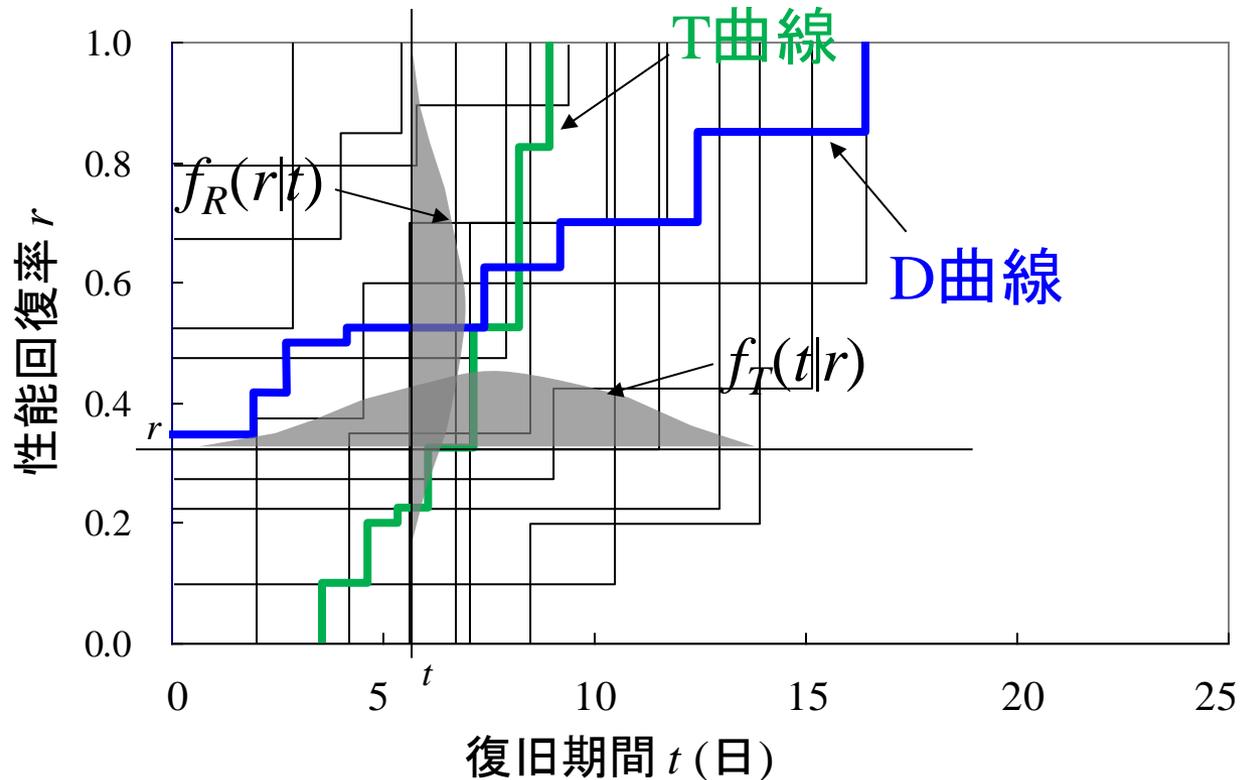
生産工場や建築物などの民間施設のみならず、鉄道、道路、港湾、空港、電力などの社会基盤施設についても、業務継続という視点での耐震検討が進められつつある。

復旧過程を視覚的かつ定量的に把握できる**復旧曲線**は有用。



2つの復旧曲線1

復旧期間・性能回復率の平均値を復旧曲線として代表させる。



$f_R(r|t)$: 復旧期間 t で縦に切断し, 切断面を通過する曲線群の通過確率分布
 $f_T(t|r)$: 性能回復率 r で横に切断し, 切断面を通過する曲線群の通過確率分布

2つの復旧曲線2

T曲線

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t | r) dt$$

$$= \int_0^{\infty} \underline{G_T(t | r)} dt$$

復旧期間の超過確率

期待値

$$E[R_T(r)] = \int_0^{1.0} R_T(r) dr$$

$$= \int_0^{1.0} \int_0^{\infty} G_T(t | r) dt dr$$

D曲線

$$R_D(t) = \int_0^{1.0} r \cdot f_R(r | t) dr$$

$$= \int_0^{1.0} \underline{G_R(r | t)} dr$$

性能の超過確率

期待値

$$E[R_D(t)] = \int_0^{\infty} [1 - R_D(t)] dt$$

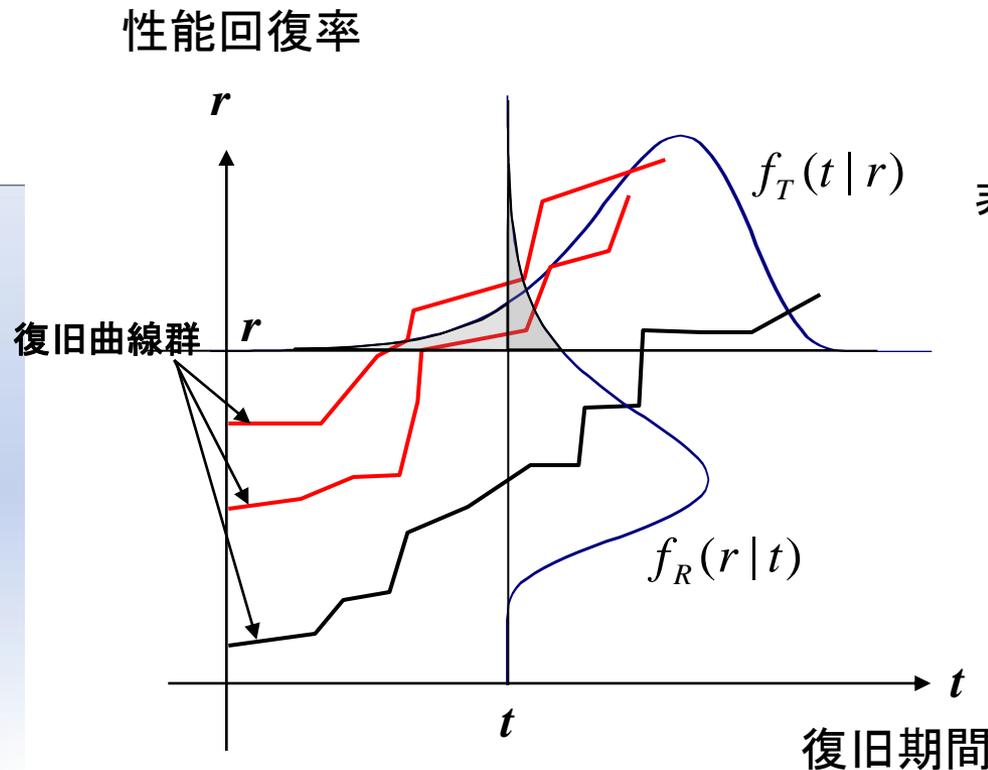
$$= \int_0^{\infty} \int_0^{1.0} G_T(t | r) dr dt$$

両曲線の期待値(RTE; Recovery Time Expectancy)は一致する。

復旧曲線の重要な関係

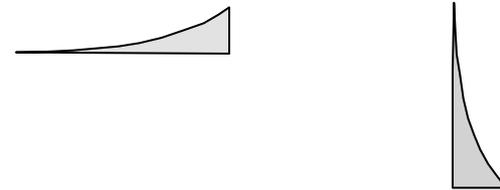
性能回復率 $f_R(r/t)$ の非超過確率関数 $F_R(r/t)$ と復旧期間 $f_T(t/r)$ の超過確率関数 $G_T(t/r)$ は同じ値を取る。 $(F_R(r/t) = G_T(t/r))$

曲線群はそれぞれ交差するものの経過時間に対し上昇する(図中右上に向かう)ことが理由。



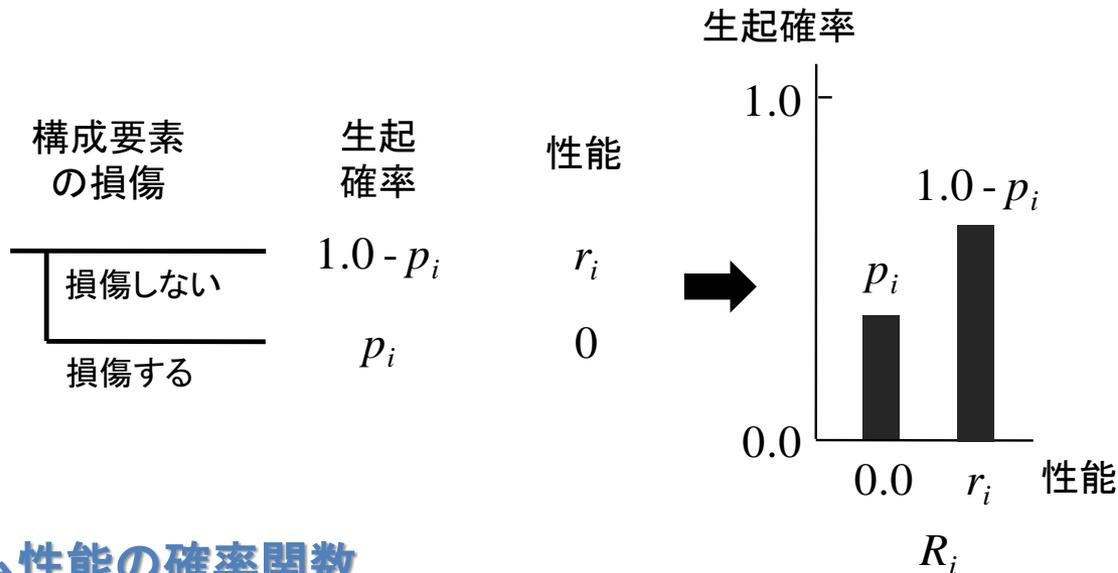
非超過確率関数 超過確率関数

$$F_R(r|t) = G_T(t|r)$$



システム性能の評価方法

構成要素性能の確率関数



システム性能の確率関数

直列システム

$$R_{sys} = \min_{i=1}^n R_i$$



$$F_R(r) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_{Ri}(r)]$$

並列システム

$$R_{sys} = \sum_{i=1}^n R_i$$

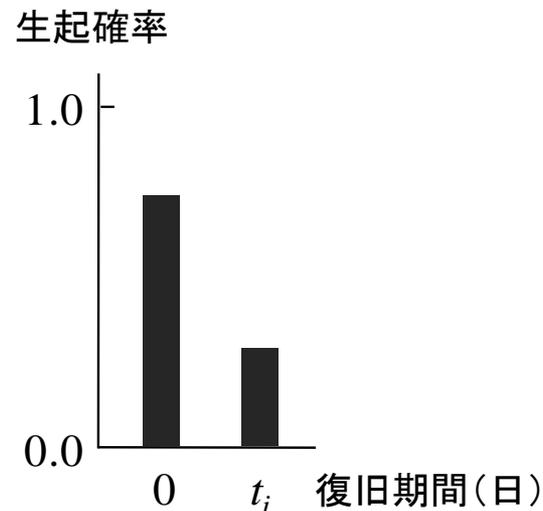


確率関数の和算

システムの復旧期間の評価方法

構成要素の復旧期間の確率関数

構成要素 の損傷	発生 確率	復旧 期間
損傷しない	$1.0 - P_i(x)$	0日
損傷する	$P_i(x)$	t_i 日



システムの復旧期間の確率関数

直列システム

$$T_{sys} = \max_{i=1}^n T_i$$



$$F_T(t) = \prod_{i=1}^n F_{T_i}(t)$$

並列システム

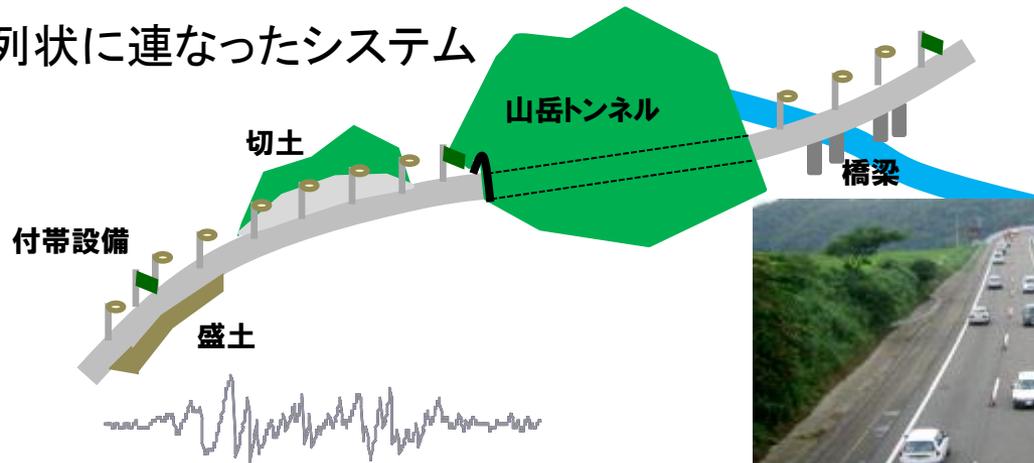
$$T_{sys} = \min_{i=1}^n T_i$$



$$F_T(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_{T_i}(t)]$$

地震時の高速道路車両走行機能

直列状に連なったシステム



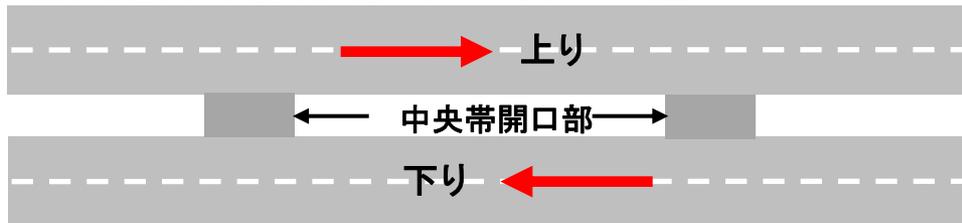
開口部を介し、対面通行により最低限の機能を確保

- 高速道路システムの復旧期間を定量的に評価する方法
- 提案手法を用い、開口部の効果を視覚的に把握できる復旧曲線

道路の被災状態と車両通行機能

道路の被災状態により、通行機能は以下の状態が考えられる。

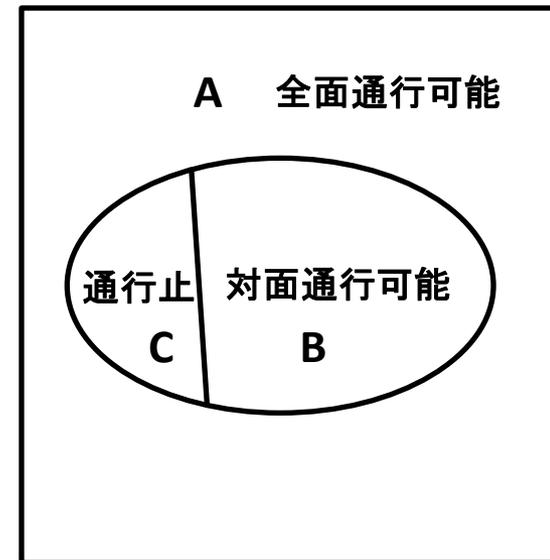
全面通行可能(状態A) 全箇所が健全



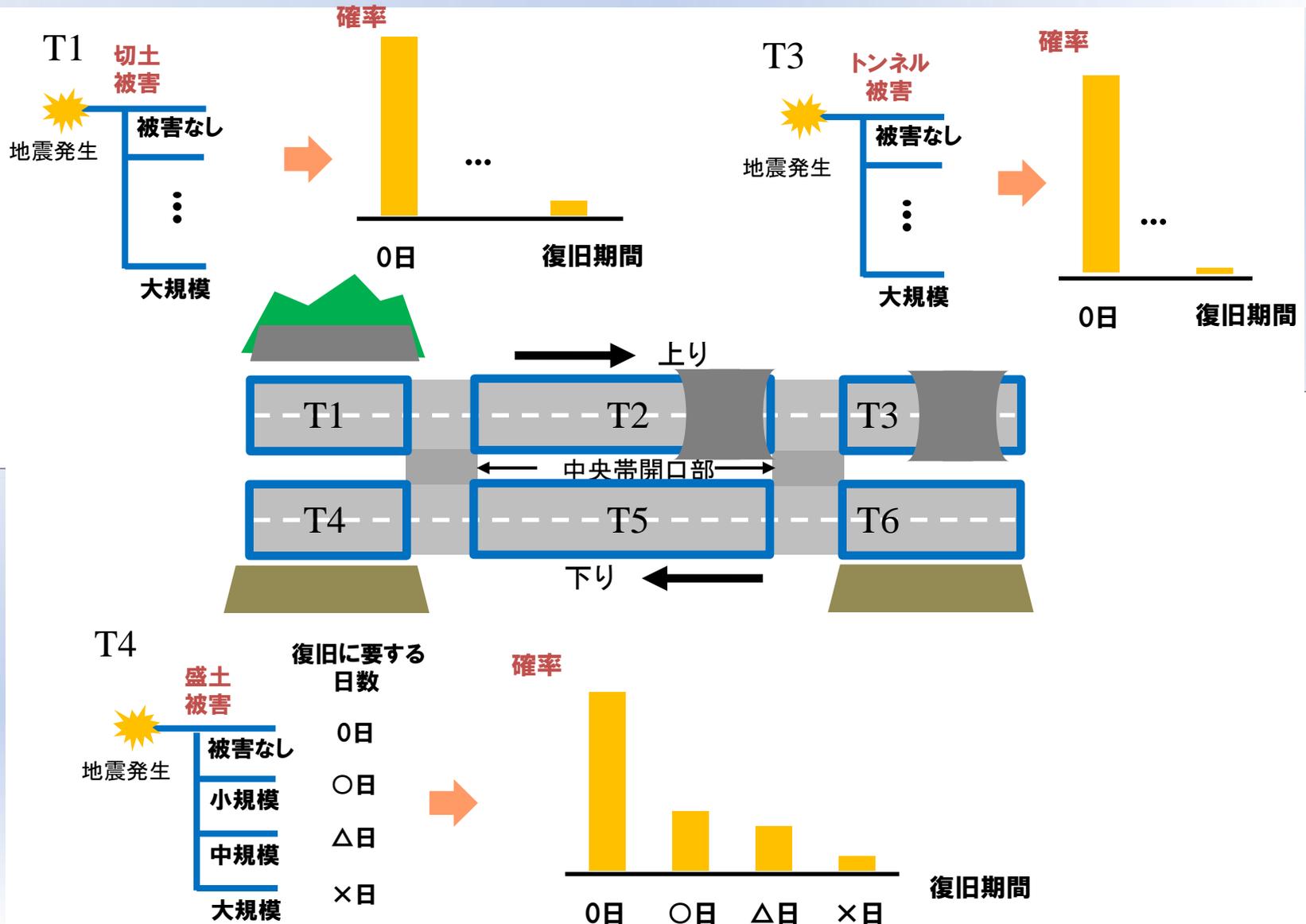
対面通行可能(状態B) 対面通行区間



通行止め(状態C) 開口部間の上下線がともに損傷



地震時の車両通行機能のモデル化1



地震時の車両通行機能のモデル化2

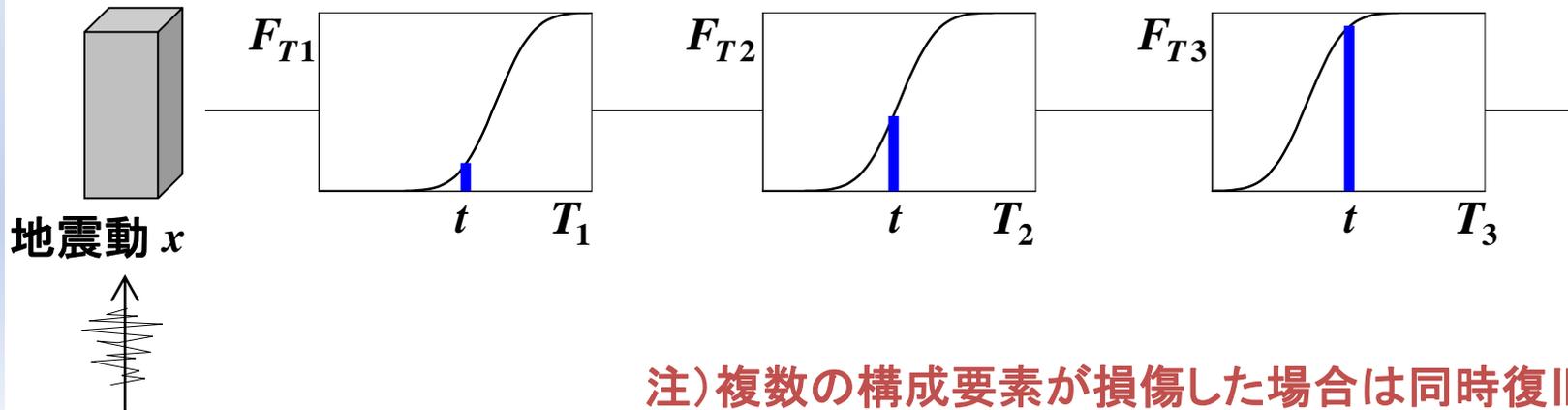
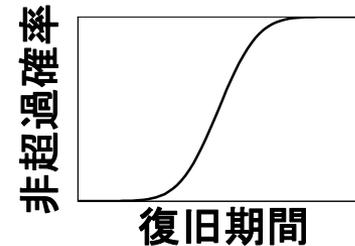
直列システム
の復旧期間

$$T_{|x} = \max(T_{1|x}, T_{2|x}, \dots, T_{n|x})$$

↓
 $T_1 \sim T_n$ は
互いに独立

$$F_T(t|x) = \prod_{i=1}^n F_{Ti}(t|x)$$

構成要素の復旧期間
の確率分布



注) 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する

地震時の車両通行機能のモデル化3

並列システム
の復旧期間

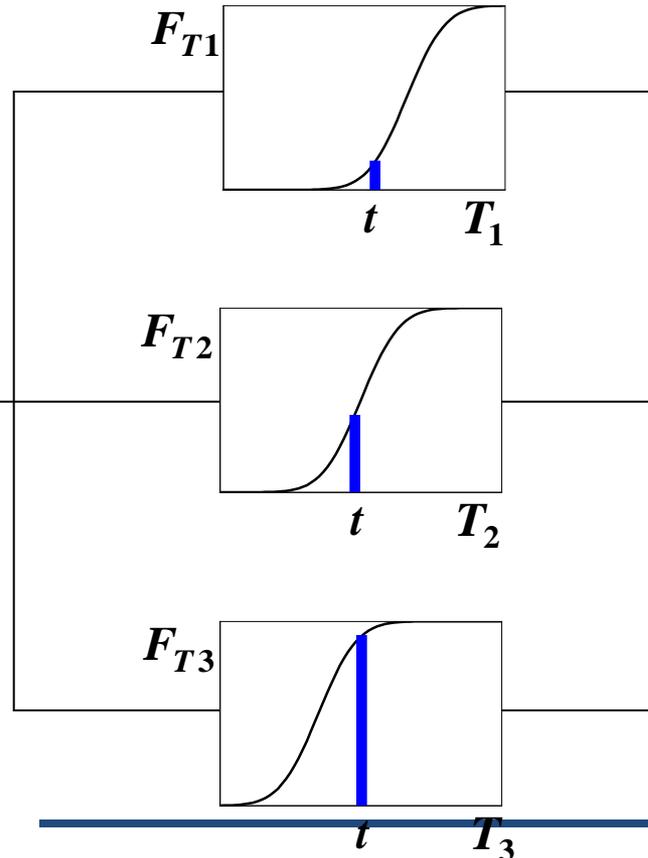
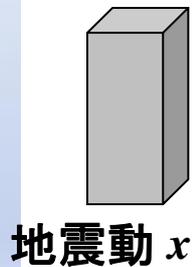
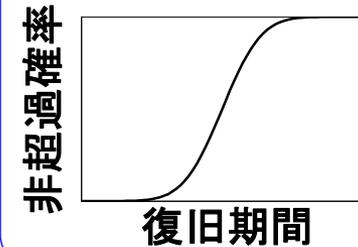
$$T_{|x} = \min(T_{1|x}, T_{2|x}, \dots, T_{n|x})$$



$T_1 \sim T_n$ は互いに独立

$$1 - F_T(t | x) = \prod_{i=1}^n (1 - F_{T_i}(t | x))$$

構成要素の復旧期間
の確率分布



地震時の車両通行機能のモデル化4

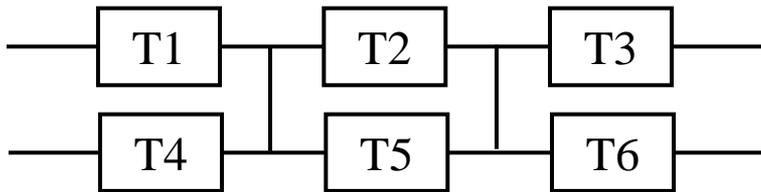
損傷要素の同時復旧の原則を前提とすると

全面通行可能となるまでの期間



$$F_{TA}(t | x) = \prod_{i=1}^n F_{Ti}(t | x)$$

対面通行可能となるまでの期間



Minimal Cut Set

Cut1 Cut2 Cut3

{ T1 , T4 } , { T2 , T5 } , { T3 , T6 }

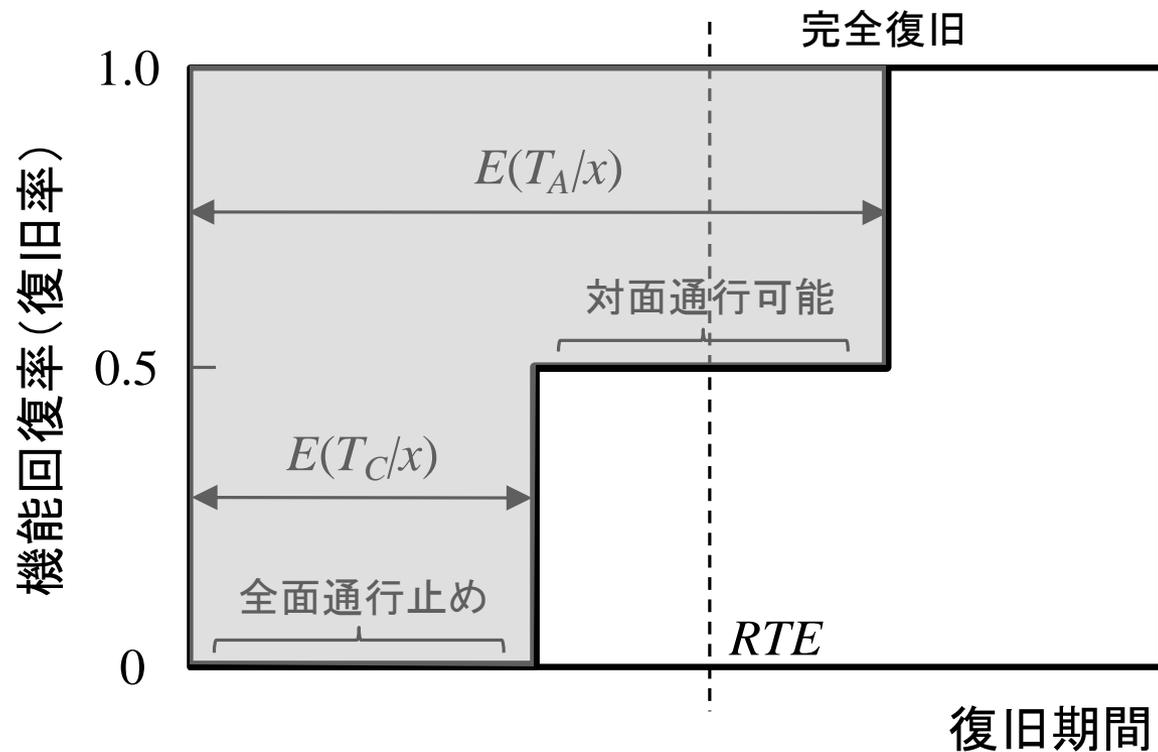
$$F_{TC}(t | x) = \prod_{j=1}^m F_{Tcut j}(t | x)$$

$$F_{Tcut1}(t | x) = 1 - (1 - F_{T1}(t | x))(1 - F_{T4}(t | x))$$

$$F_{Tcut2}(t | x) = 1 - (1 - F_{T2}(t | x))(1 - F_{T5}(t | x))$$

$$F_{Tcut3}(t | x) = 1 - (1 - F_{T3}(t | x))(1 - F_{T6}(t | x))$$

復旧曲線(T曲線)の評価



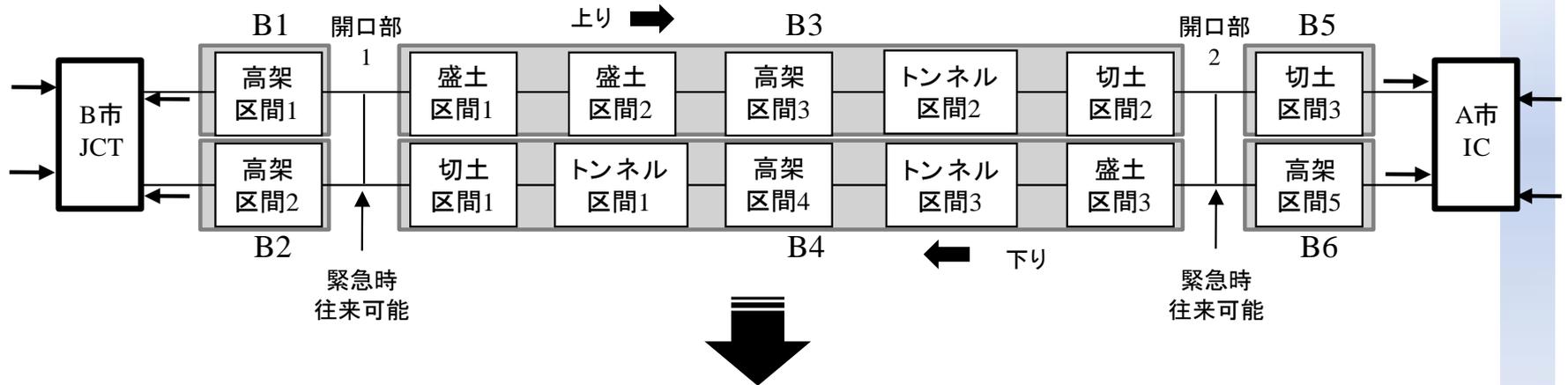
$$E(T_A | x) = \int_0^{\infty} (1 - F_{TA}(t | x)) dt$$

平均復旧期間
(Recovery Time Expectancy)

$$E(T_C | x) = \int_0^{\infty} (1 - F_{TC}(t | x)) dt$$

$$RTE = \frac{1}{2} (E(T_A | x) + E(T_C | x))$$

機能性評価モデル(仮想高速道路)



Minimal Cut Set

{ B1 , B2 } , { B3 , B4 } , { B5 , B6 }

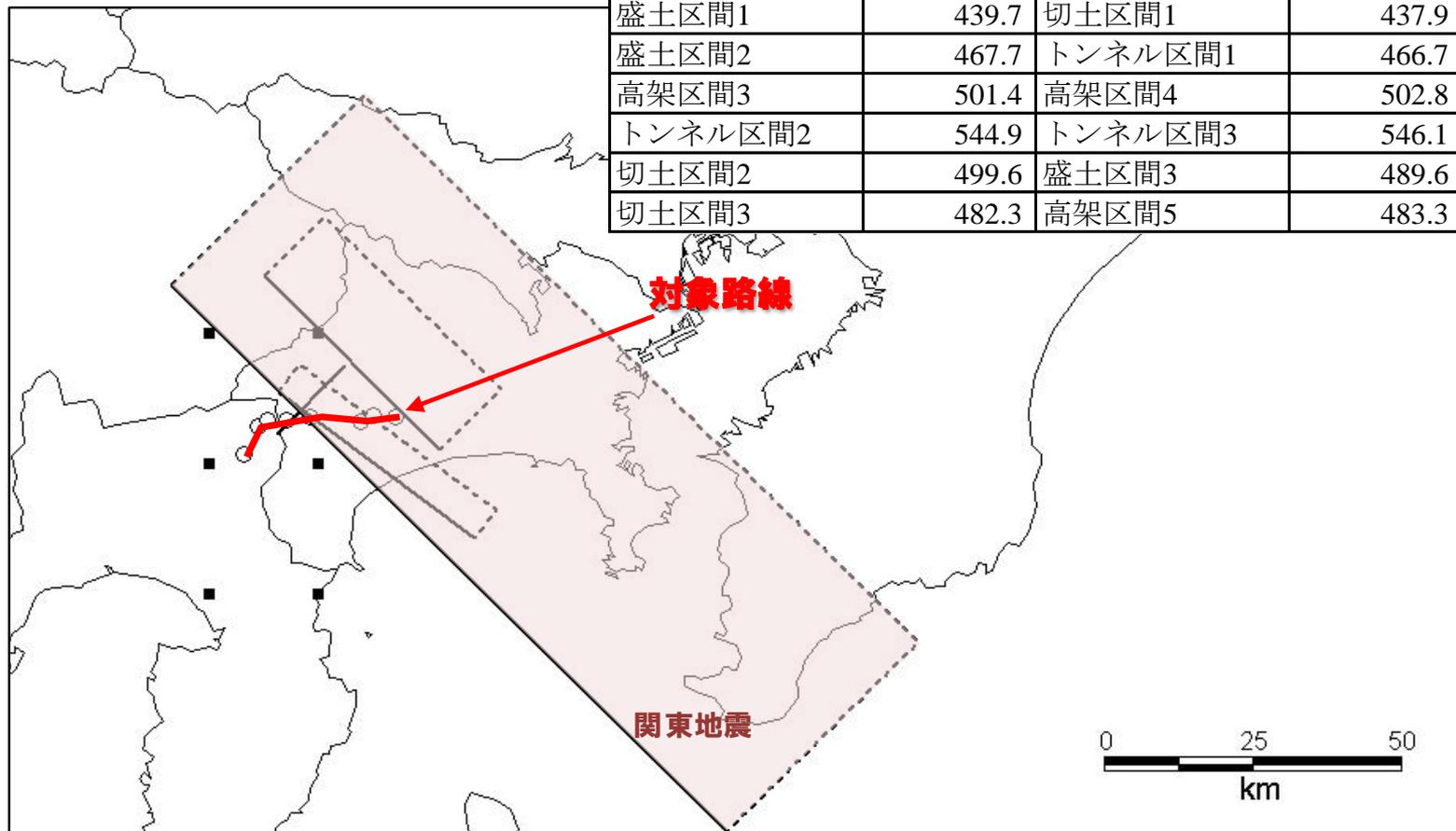
フラジリティ情報

道路 区間名	損傷要因	損傷 形態	耐力中央値 (cm/s^2)	復旧期間 (日)
高架区間 1~5	高架橋梁 構造被害	軽微	770	3
		大破	1500	80
		倒壊	2700	300
盛土区間 1~3	盛土崩落 被害	一部崩壊	440	5
		全面崩壊	550	45
	路面沈下 段差被害	軽微	280	1
切土区間 1~3	斜面崩落 被害	大規模	460	15
		軽微	400	2
		崩壊	800	60
トンネル 区間 1~3	トンネル 構造被害	軽微	940	5
		大破	1170	30
		崩落	2000	300

対象路線と震源の位置関係

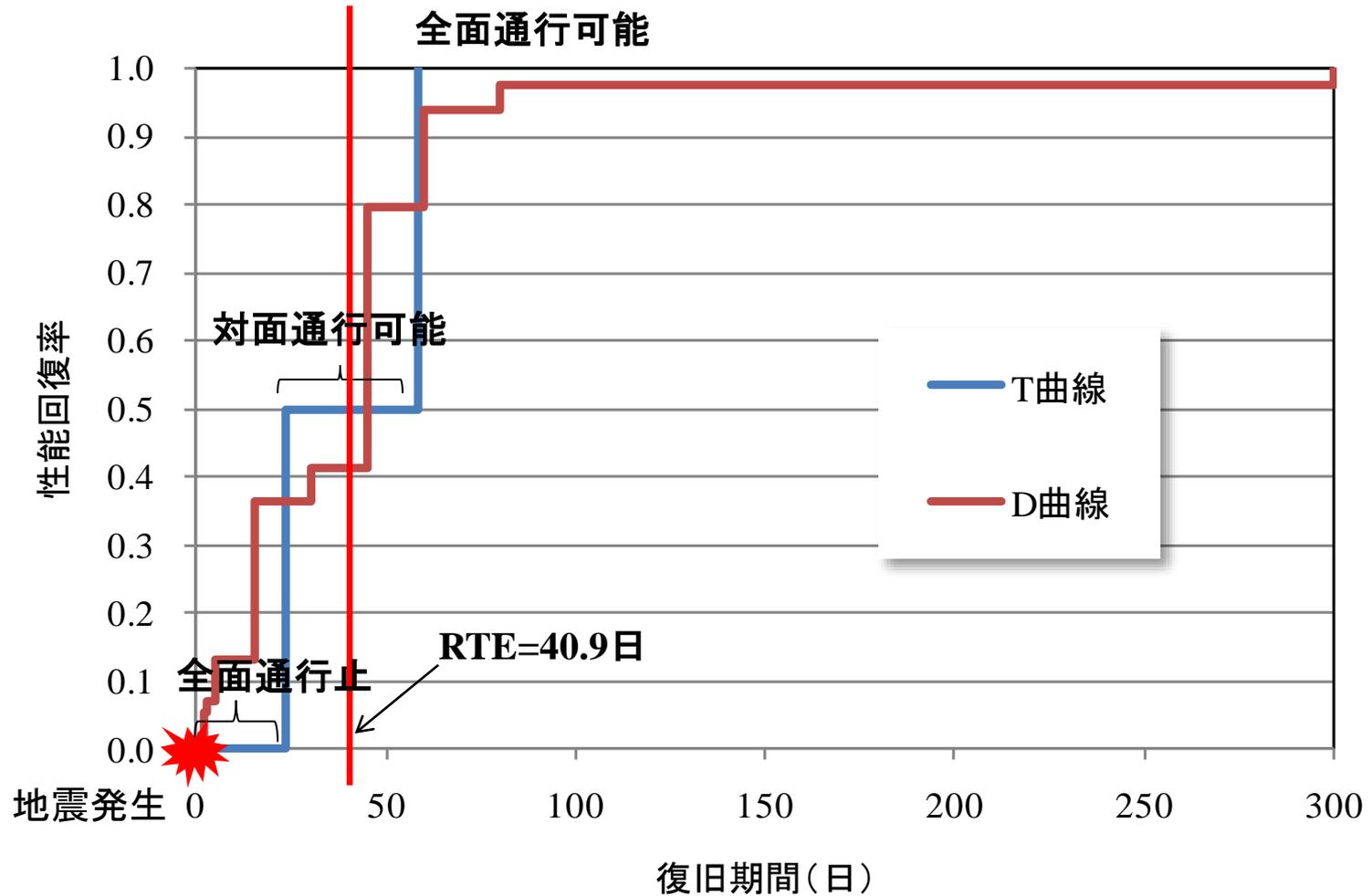
各区間の基盤最大加速度（関東地震時）

区間	PBA(cm/s ²)	区間	PBA(cm/s ²)
高架区間1	376.4	高架区間2	378.0
盛土区間1	439.7	切土区間1	437.9
盛土区間2	467.7	トンネル区間1	466.7
高架区間3	501.4	高架区間4	502.8
トンネル区間2	544.9	トンネル区間3	546.1
切土区間2	499.6	盛土区間3	489.6
切土区間3	482.3	高架区間5	483.3



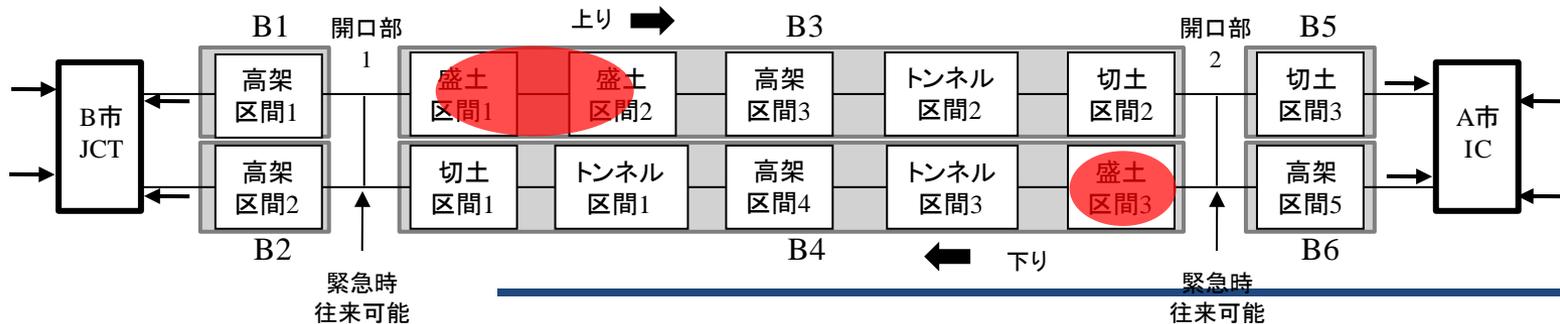
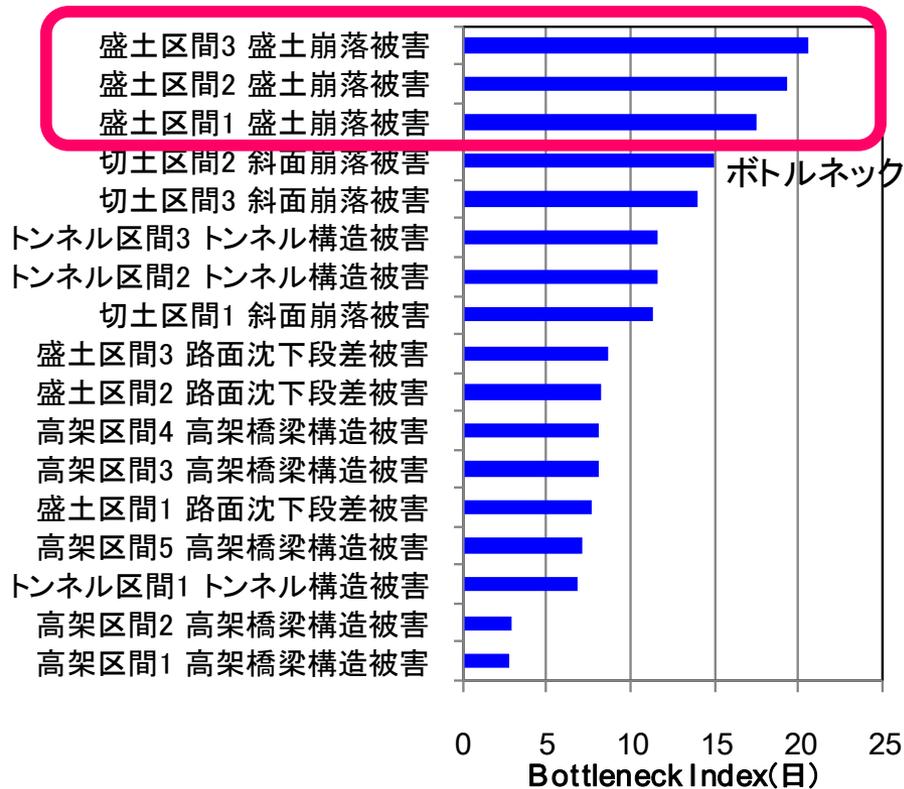
機能性評価結果

復旧曲線

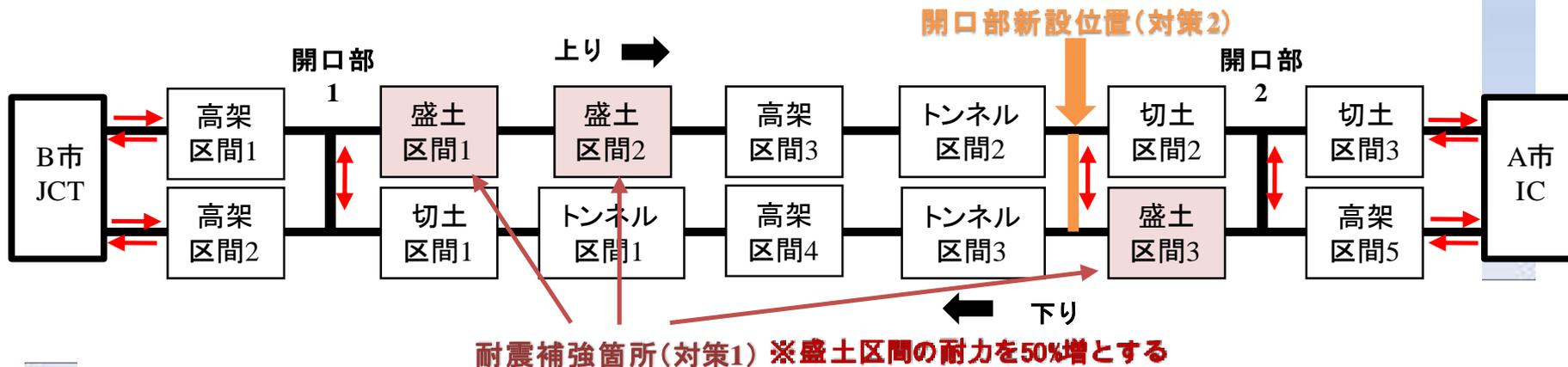


システムのボトルネック

Bottleneck Index (各損傷要因の復旧期間期待値)



システムの機能性改善の対策

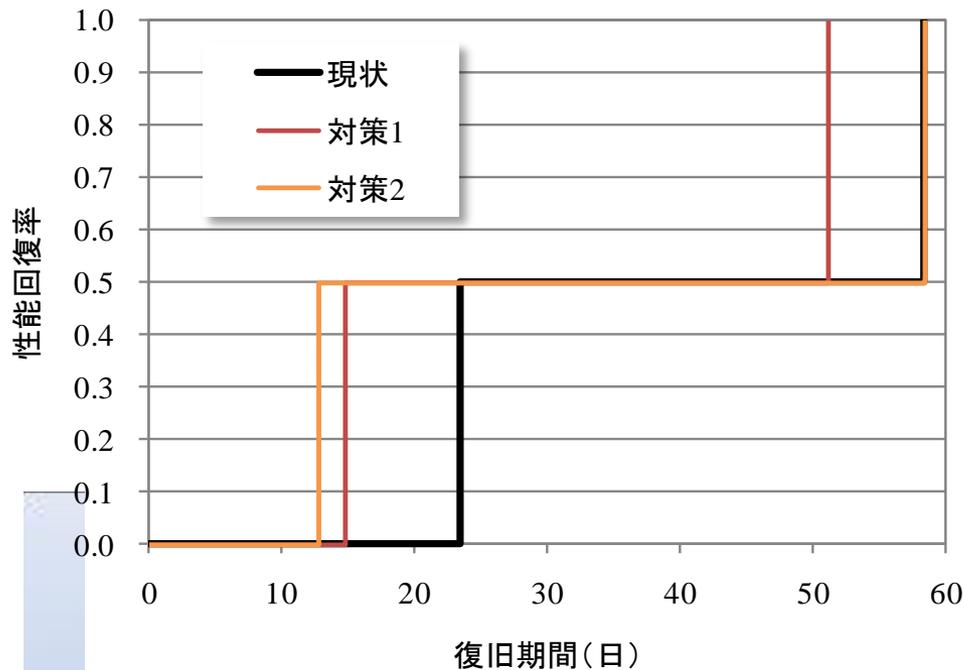


対策1: 盛土区間の耐震補強(盛土区間の耐力を50%増とする)

対策2: 開口部の新設(盛土区間を回避できるルートの新設する)

復旧曲線からみる対策の効果

T曲線



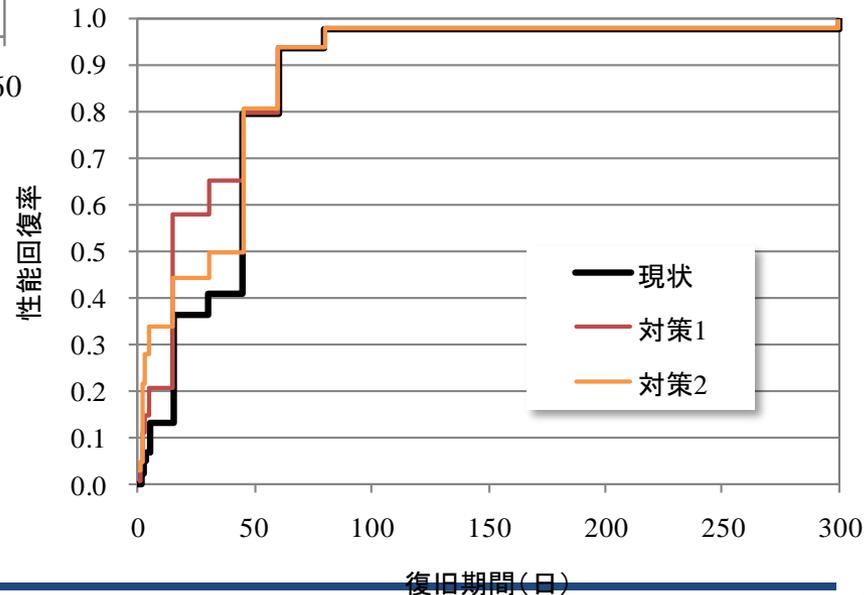
全面通行回復重視 → 対策1が効果的

早期通行回復 (対面通行でもOK) 重視

→ 対策2が効果的

RTE		
現状	対策1	対策2
40.9	33.0	35.6

D曲線(参考)



復旧期間(日)

まとめ

1. 機能が限定されるシステムの復旧過程を示すのはD曲線と比べ、T曲線が適している。
2. ラダー系システムによる機能性評価手法とT曲線により、開口部新設による通行機能改善効果を視覚的に把握することができる。
3. 上下線を行き来可能な開口部を設けることは、対面通行であっても車両通行機能の早期復旧を重視するのであれば、道路構築物の耐震補強といった対策と比べ、コスト面を考えると有効な手段である。

提示した復旧曲線は、対象システムの各要求機能の復旧期間が明示される。

守りたい機能が明確な場合や、一定の性能水準を確保したい場合など、効果的な対策の立案に有用である。