

鉄道構造物の危機耐性の 実務的評価法の開発

鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
主任研究員 和田 一範

■背景

- 激甚化する自然災害を受け、近年、「危機耐性」の重要性が認識
- しかし、概念的なものであり、具体的な評価法は未確立

■目的

- 鉄道構造物の地震に対する「危機耐性」の評価法を開発
- 特に未確立だった、「冗長性」、「ロバスト性」の評価法を開発

1. 危機耐性について
2. 冗長性の定量評価法
3. ロバスト性の定量評価法
4. 試算
5. まとめ・成果の活用

危機耐性とは

●東北地方太平洋沖地震での教訓

Mw9.0→想定を上回る地震の発生



鉄道の高い公共性／生産活動への役割

想定された以上の地震が発生しても

構造物またはシステムとして、破滅的な状況に陥らないように設計する必要性



危機耐性 という新しい概念

2012年の耐震標準に記載

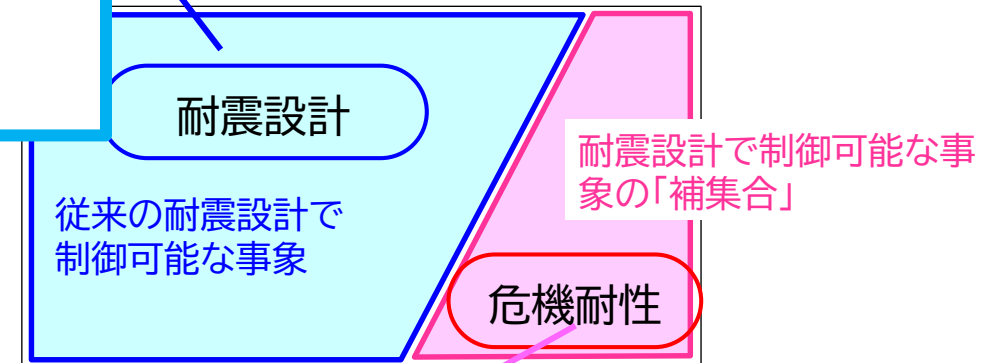


耐震設計標準における取り扱い

■従来の耐震設計の観点

鉄道構造物の性能は「**想定地震動レベル**」で以下を確認

- ① 構造安全性: 構造物が壊れない
- ② 構造復旧性: 復旧に長期間を要しない
- ③ 走行安全性: 列車が脱線しない



■危機耐性に関する観点

- **想定以上の地震**に対しても**破滅的な被害に繋がらない**ような**危機耐性**を有することが望ましい
- **耐震構造計画の段階で配慮**する

危機耐性向上に資すると考えられる対策例

Railway Technical Research Institute

これまでの設計・補強思想の中にも危機耐性向上に資するものがある

例1: 曲げ破壊となる設計・補強



※出典: 和田, 鉄道橋りょう・高架橋の耐震補強, RRR, Vol.79, No.2, 2022

➡ 想定以上の地震でも**急激な破壊が生じにくい**

例2: 基礎先行降伏を防ぐ設計・補強



※出典: 和田, 鉄道橋りょう・高架橋の耐震補強, RRR, Vol.79, No.2, 2022

➡ 損傷を地上部へ集中させることで、**復旧にかかる時間をなるべく短くする**



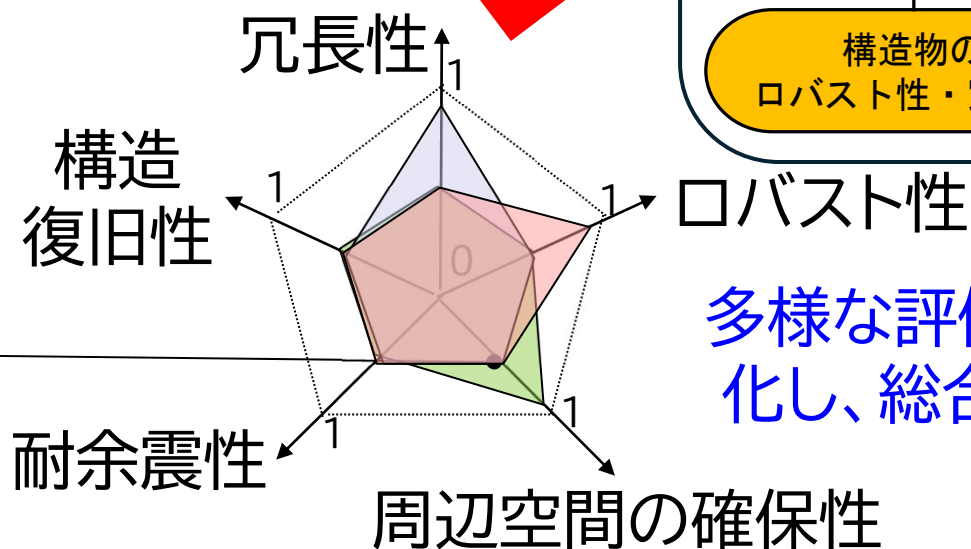
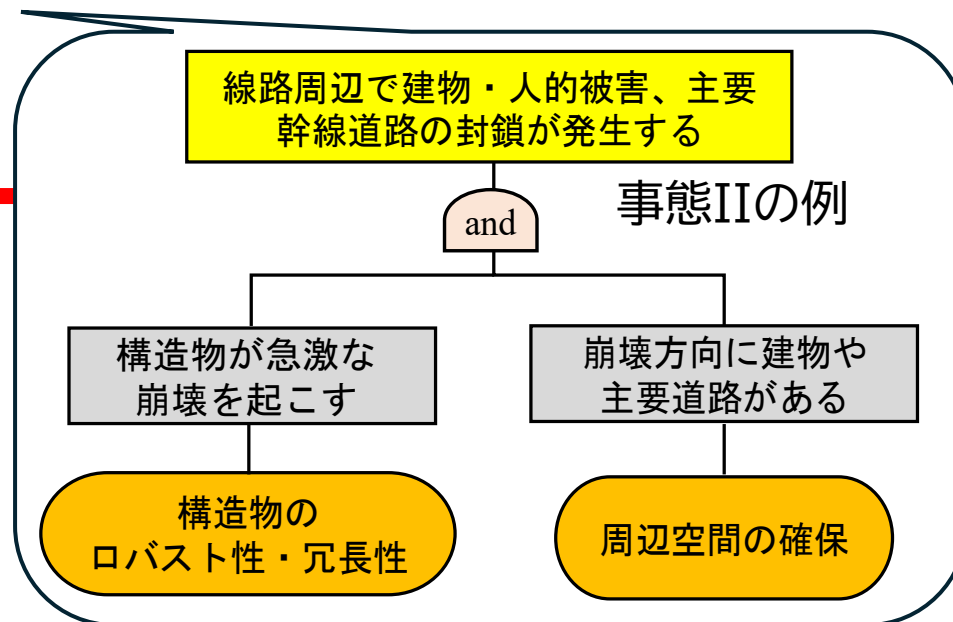
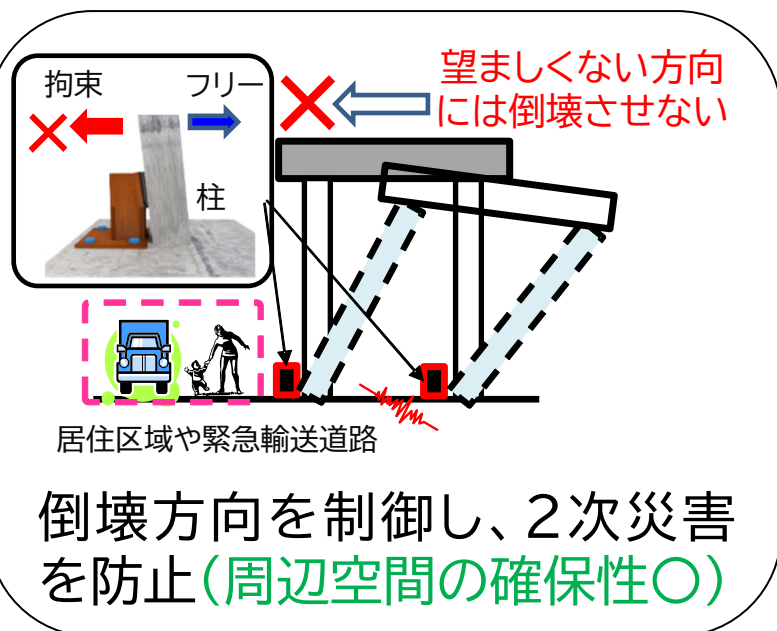
危機耐性は具体的にどのように評価するのがよいか？

危機耐性に関する性能項目の抽出

■鉄道総研での過去の検討(2018)

「避けたい事態」の設定・「シナリオ分析(Fault Tree解析)」

- 事態Ⅰ：乗客の人命が脅かされる
- 事態Ⅱ：制御不能な2次災害が発生する
- 事態Ⅲ：運転再開までに長期間を要する



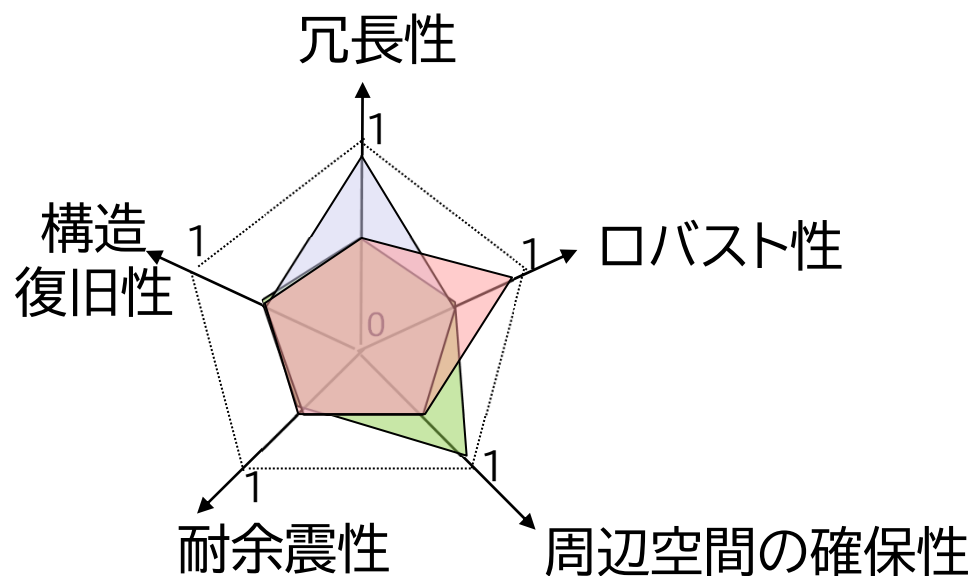
多様な評価軸(性能項目)を指標化し、総合的に危機耐性を評価

危機耐性を定量評価することの意義と本発表の目的

Railway Technical Research Institute

- 破滅的な被害に繋がらないような構造物とすることが重要
- 危機耐性を定量比較することで、新設構造物の構造計画や既設構造物の耐震補強の場面などで適切な構造選定・費用対効果の確認等が可能

- コストが〇〇割増となるが、危機耐性が△△割増となるので採用候補
- 通常の補強が困難だが、□□の対策をすれば通常の補強と同程度の危機耐性が確保できるので採用候補 など



- 危機耐性を定量評価するうえで、「冗長性」、「ロバスト性」の評価法が未確立
- 今回、橋りょう・高架橋を対象にそれらの定量評価法を構築した

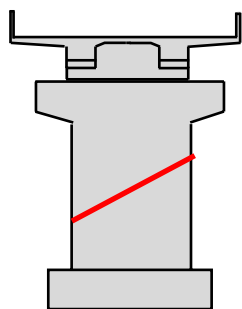
成果①: 冗長性の定量評価法

成果②: ロバスト性の定量評価法

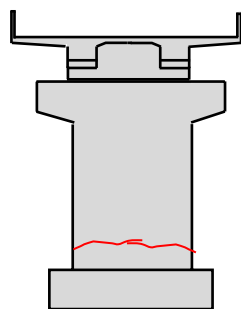
成果③: 試算例

成果①: 冗長性の定量評価法－冗長性とは

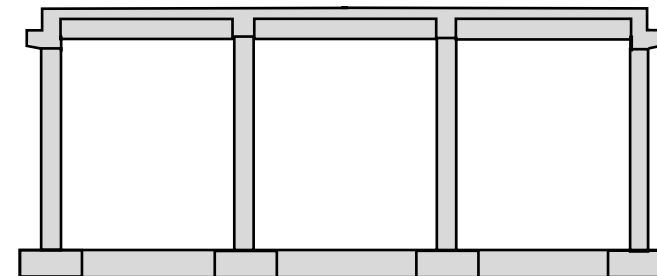
●どのような構造物ならば冗長性が高そうか？



- 単柱橋脚(1本柱)
- せん断破壊先行型
(設計限界＝崩壊)



- 単柱橋脚(1本柱)
- 曲げ破壊先行型
(設計限界≠崩壊)



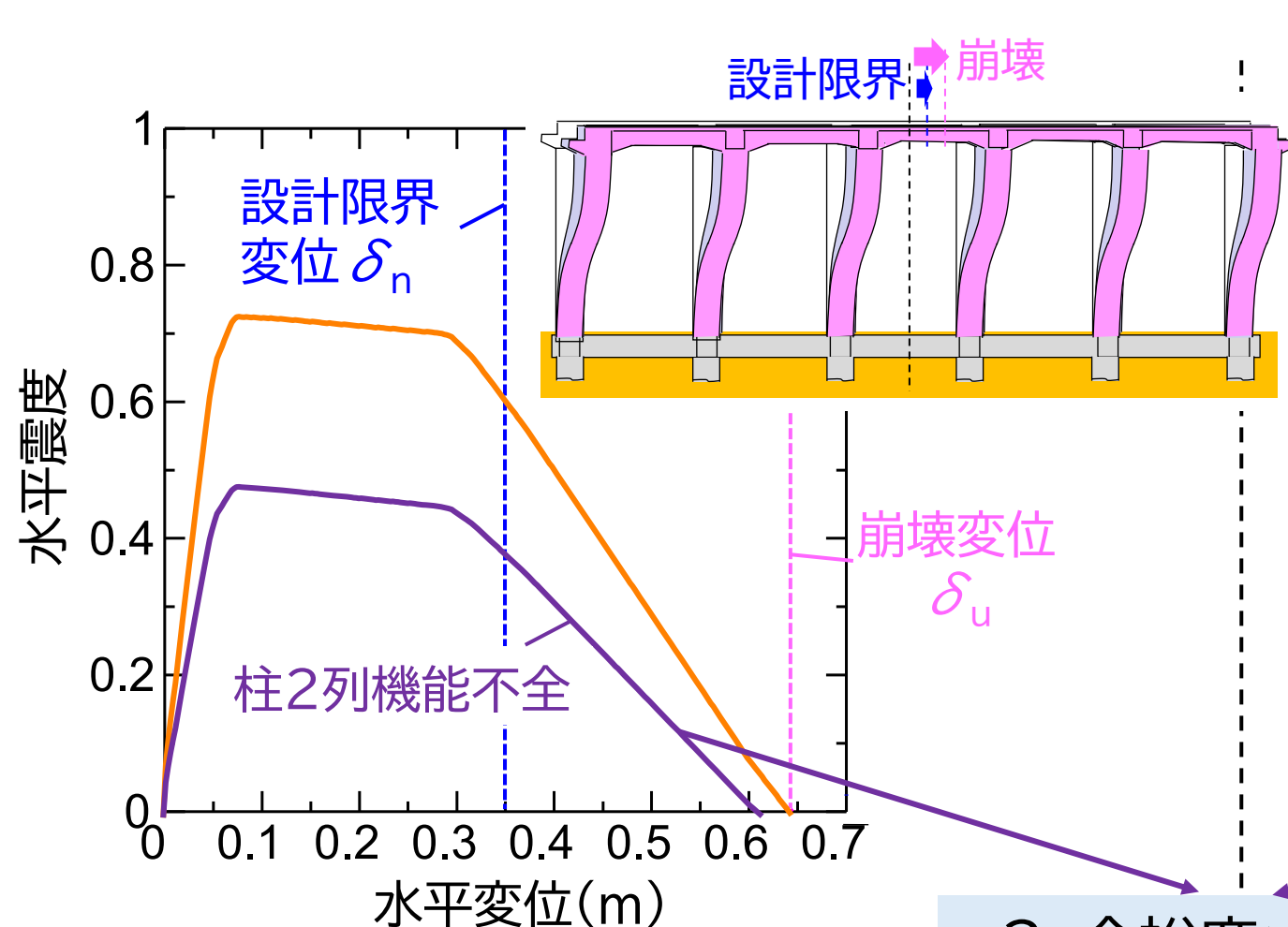
- ラーメン高架橋(柱本数多)
- 曲げ破壊先行型
(設計限界≠崩壊)

小 ← 冗長性の大小関係 → 大

重要なのは

- ✓ 設計限界の先の余裕度
- ✓ 柱部材本数の効果

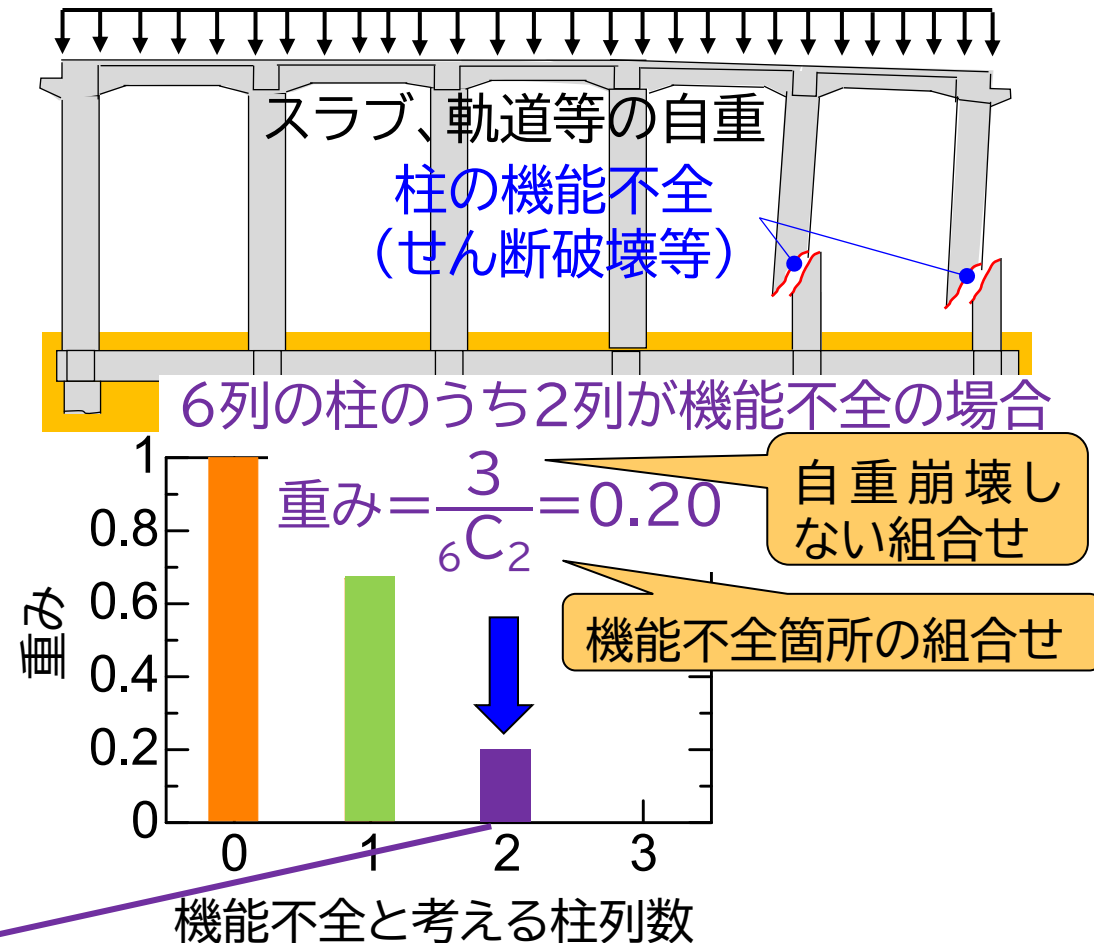
成果①:冗長性の定量評価法(1/2)



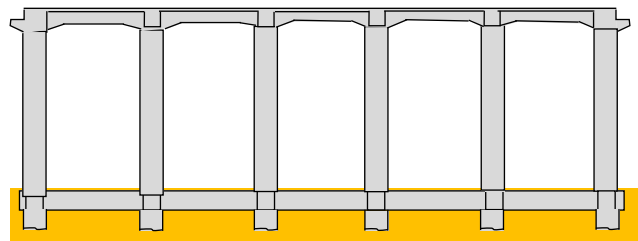
1. 通常の設計はどの程度
余裕度 ($\delta_u / \delta_n - 1$) があるか

3. 余裕度 × 重み
(重み付き余裕度)

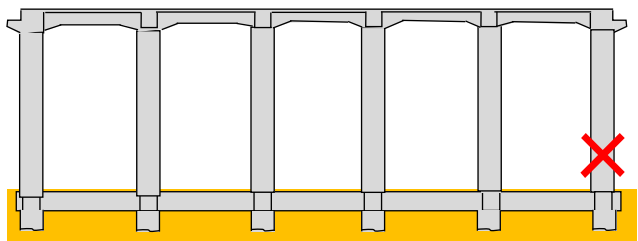
2. 柱が機能不全となるとき
自重崩壊しない割合(重み)算定



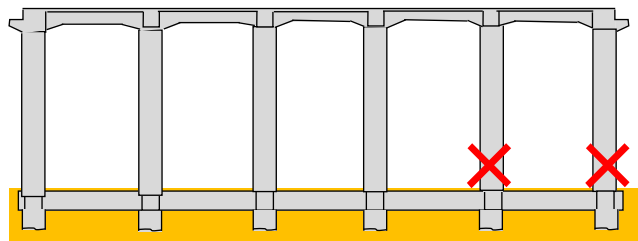
成果①:冗長性の定量評価法(2/2)



■全柱部材が健全
余裕度 = 0.84
重み = $\frac{1}{6C_0} = 1.00$ } 重み付き余裕度 0.84



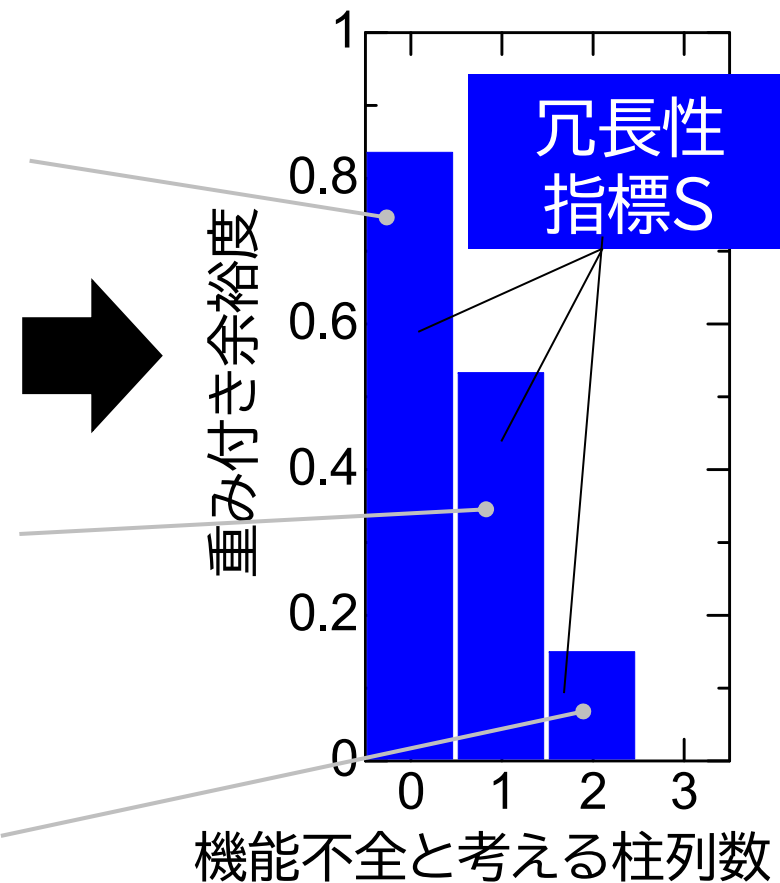
■柱1列が機能不全
余裕度 = 0.80
重み = $\frac{4}{6C_1} = 0.67$ } 重み付き余裕度 0.53



■柱2列が機能不全
余裕度 = 0.75
重み = $\frac{3}{6C_2} = 0.20$ } 重み付き余裕度 0.15

⋮

3. 余裕度×重み(重み付き余裕度)



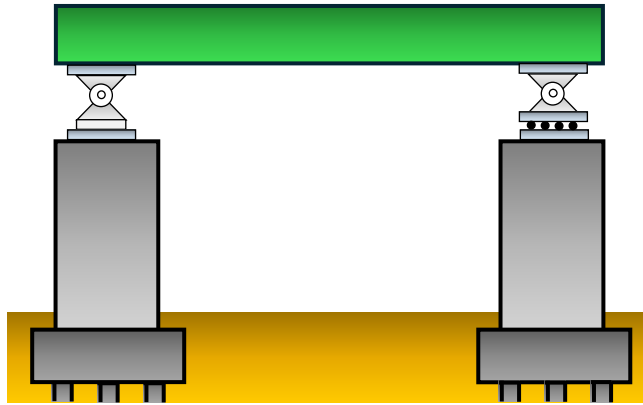
4. 重み付き余裕度を総和(並列性)

余裕度と自重支持性能に関する並列性の観点で冗長性を定量評価(S 大→冗長性大) 10

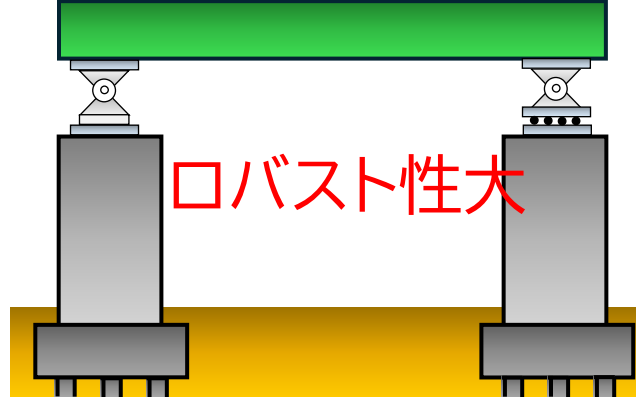
成果②:ロバスト性の定量評価法ーロバスト性とは

Railway Technical Research Institute

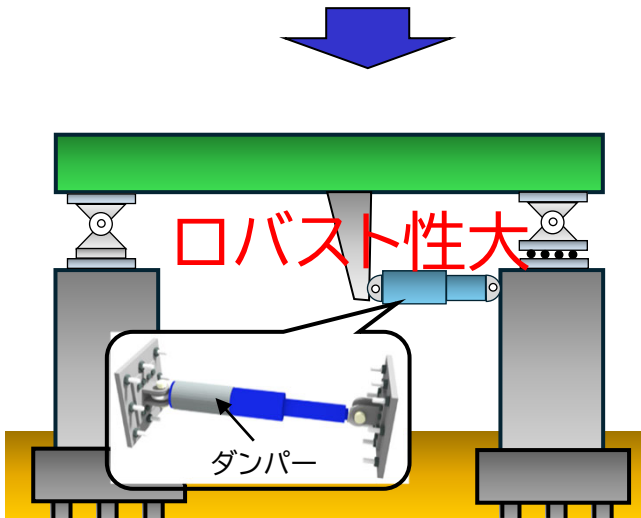
●どのような構造物ならばロバスト性が高そうか？



• 通常材料・調査



• 高品質な材料・調査(物性値のバラツキ小)

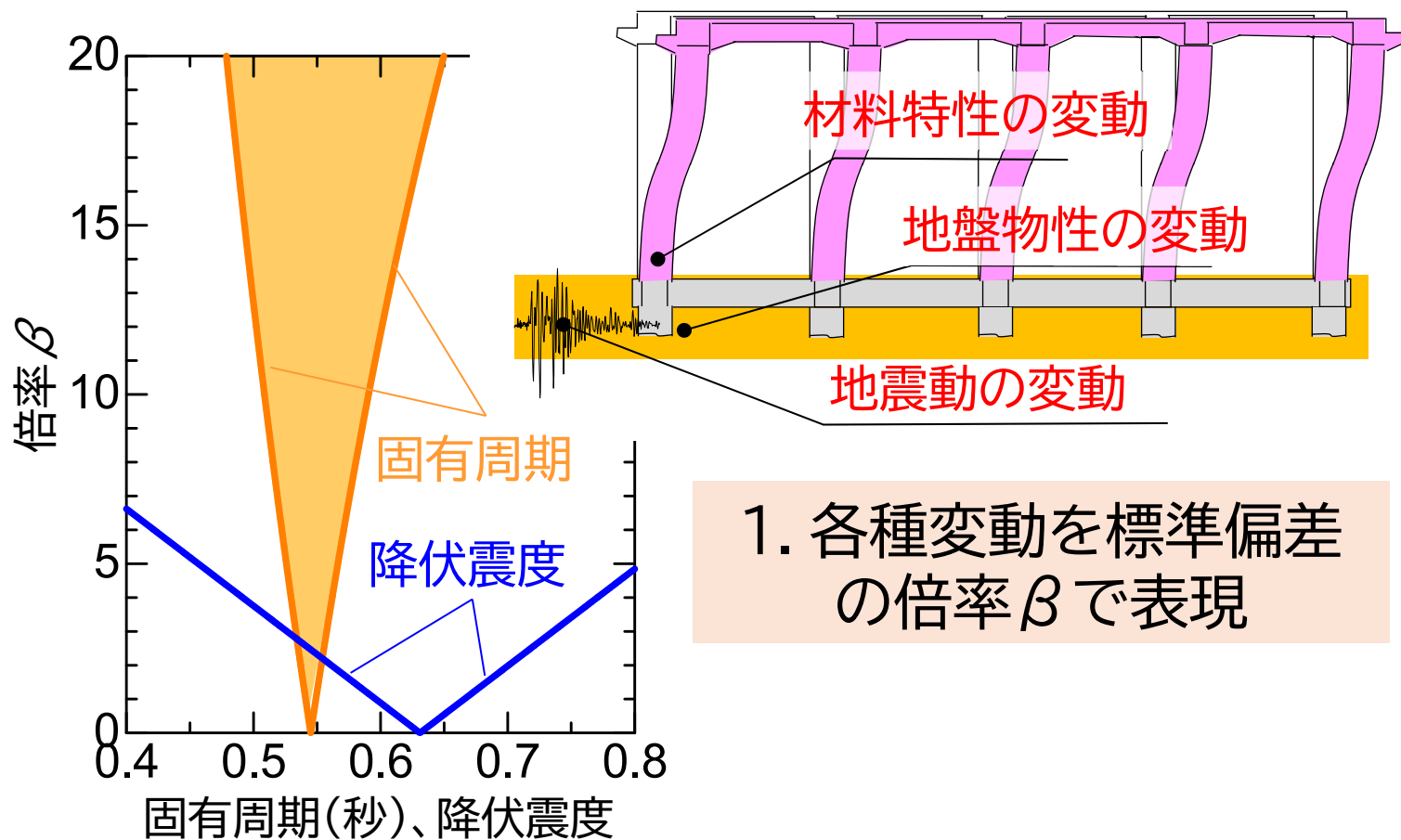


• 制震構造・免震構造など

重要なのは

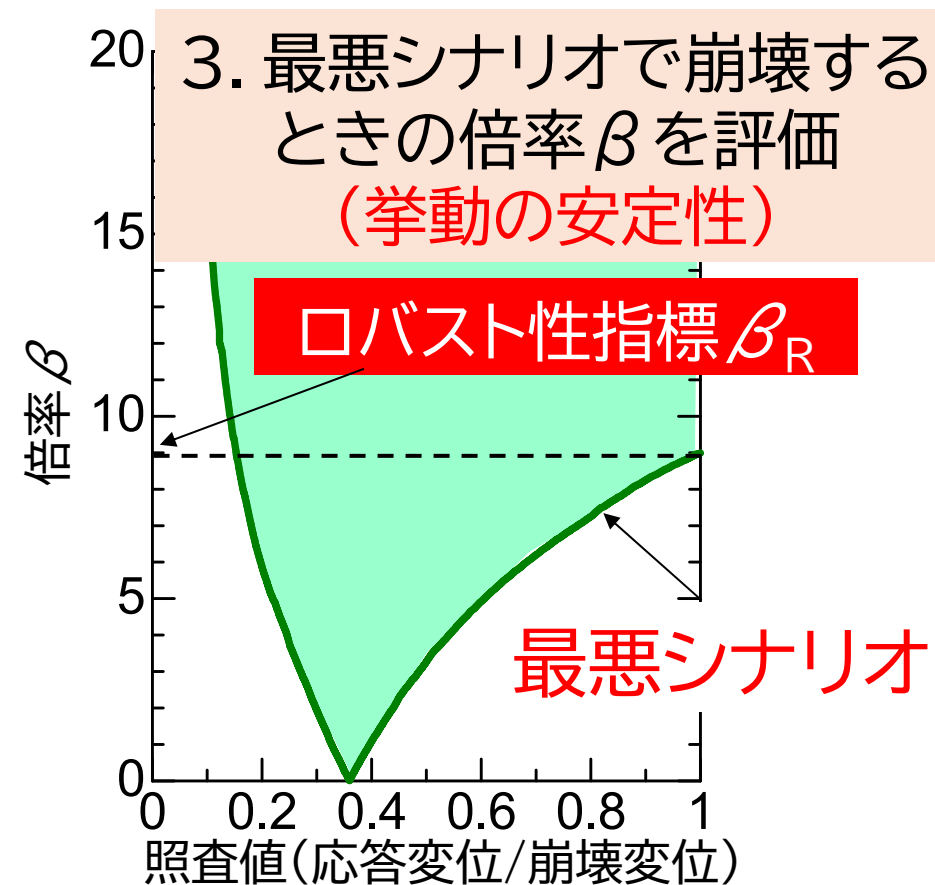
- ✓ 応答値のバラツキ程度
(物性値のバラツキ、応答を何らかし制御)
- ✓ 限界値のバラツキ程度(物性値のバラツキ)
- ✓ 結果として各種変動に対してどの程度崩壊しにくいのか

成果②:ロバスト性の定量評価法



1. 各種変動を標準偏差の倍率 β で表現

材料特性の変動例



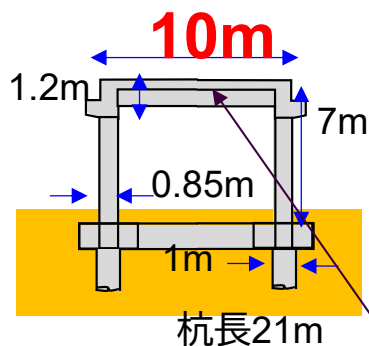
3. 最悪シナリオで崩壊するときの倍率 β を評価
(挙動の安定性)

2. β に応じた応答変位、崩壊変位の変動を評価

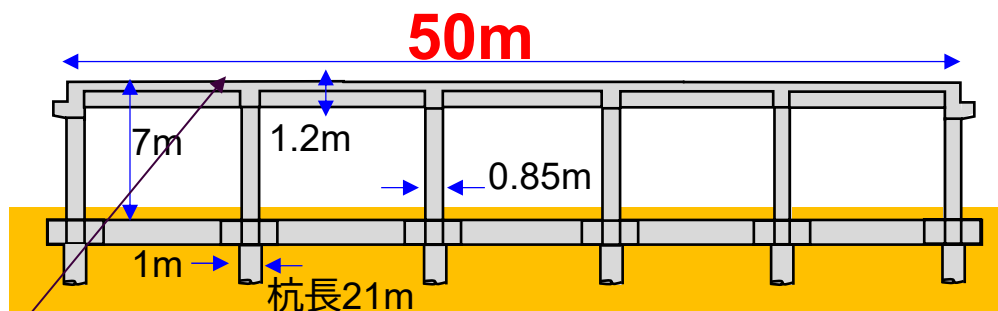
各種変動に対する挙動の安定性からロバスト性を定量評価 (β_R 大 $\rightarrow$ ロバスト性大)

成果③：試算例－検討条件

Case1:1径間

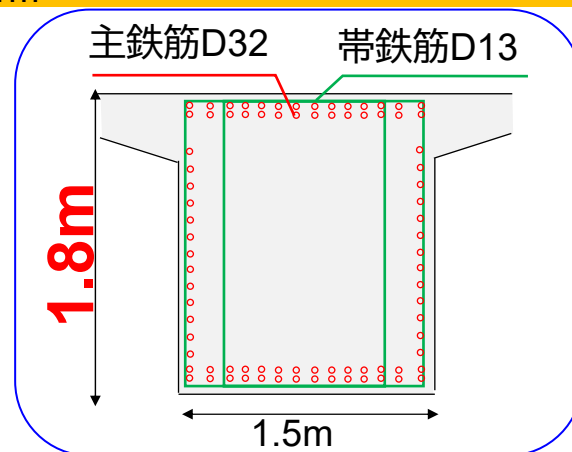
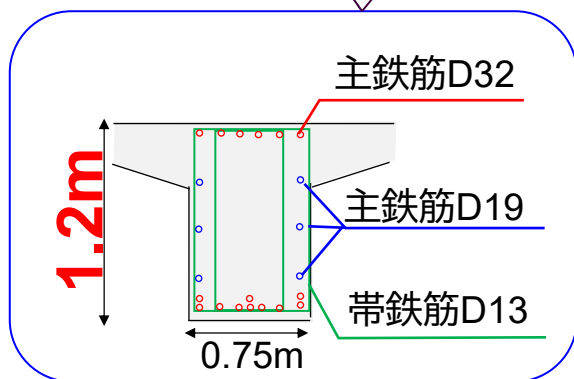
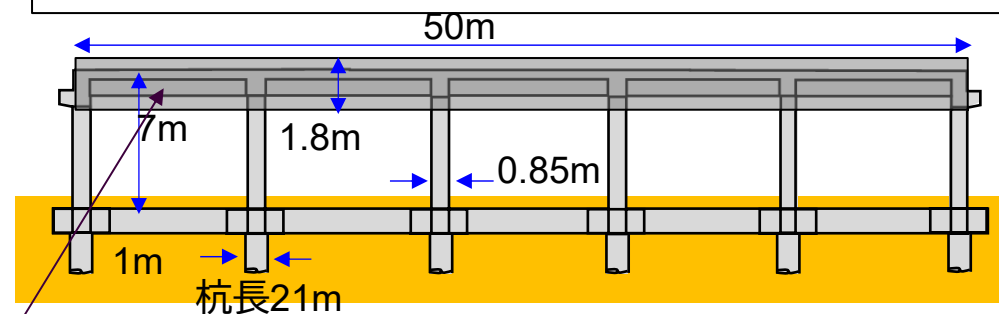


Case2:5径間



Case3:5径間+上層梁大

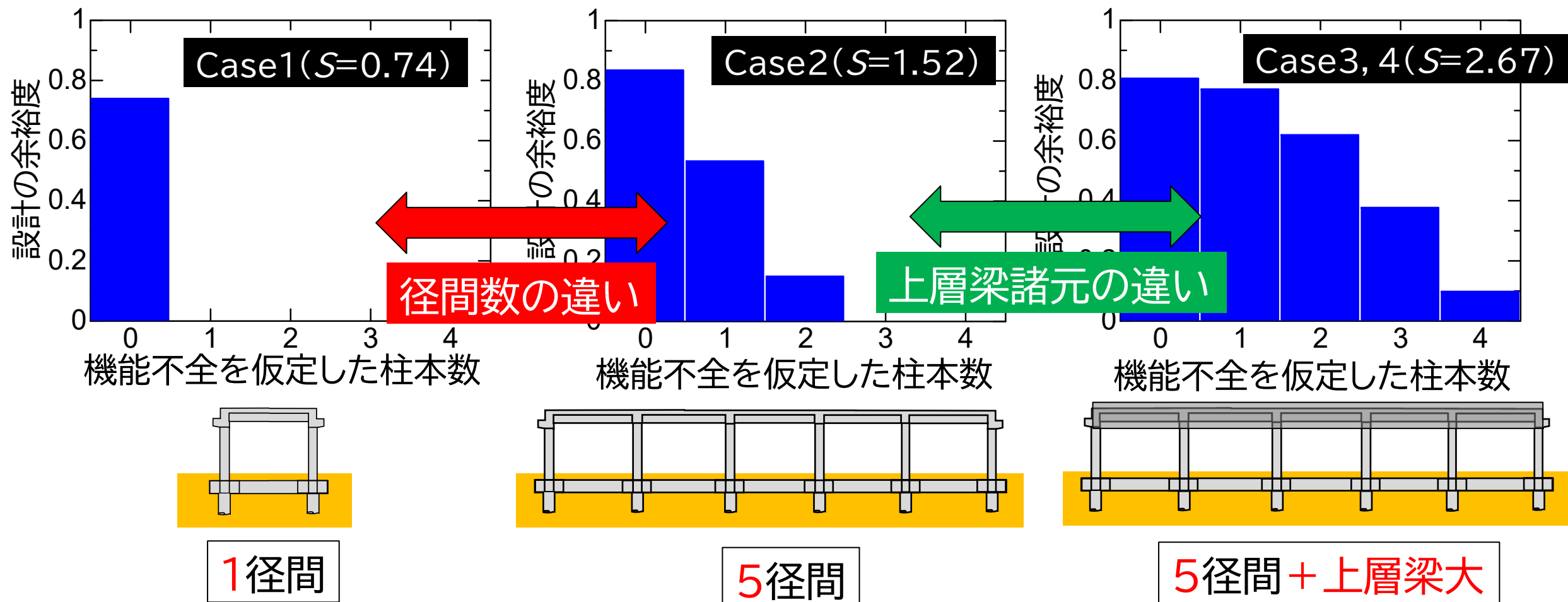
Case4:5径間+上層梁大+バラツキ小



RC部材の変動係数

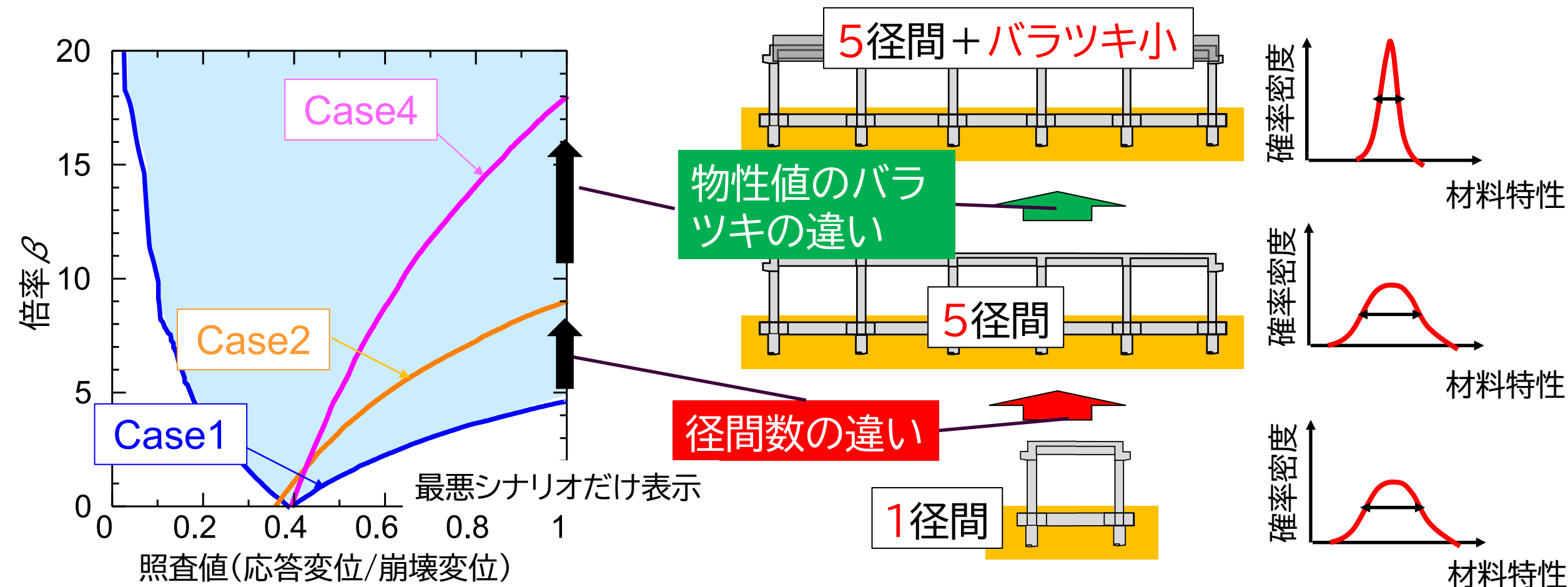
ケース	剛性	強度
Case1～3	0.1	0.04
Case4	0.05	0.02

成果③：試算例－冗長性の試算結果



- 径間数が多い
 - 上層梁の断面耐力が大きい
- 冗長性指標 S が大きくなる

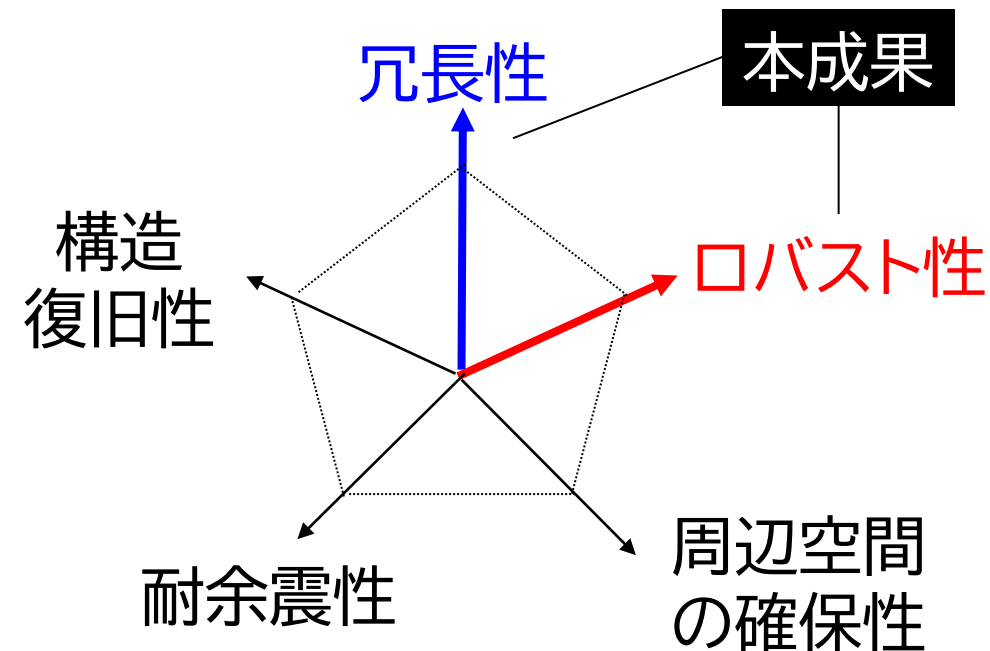
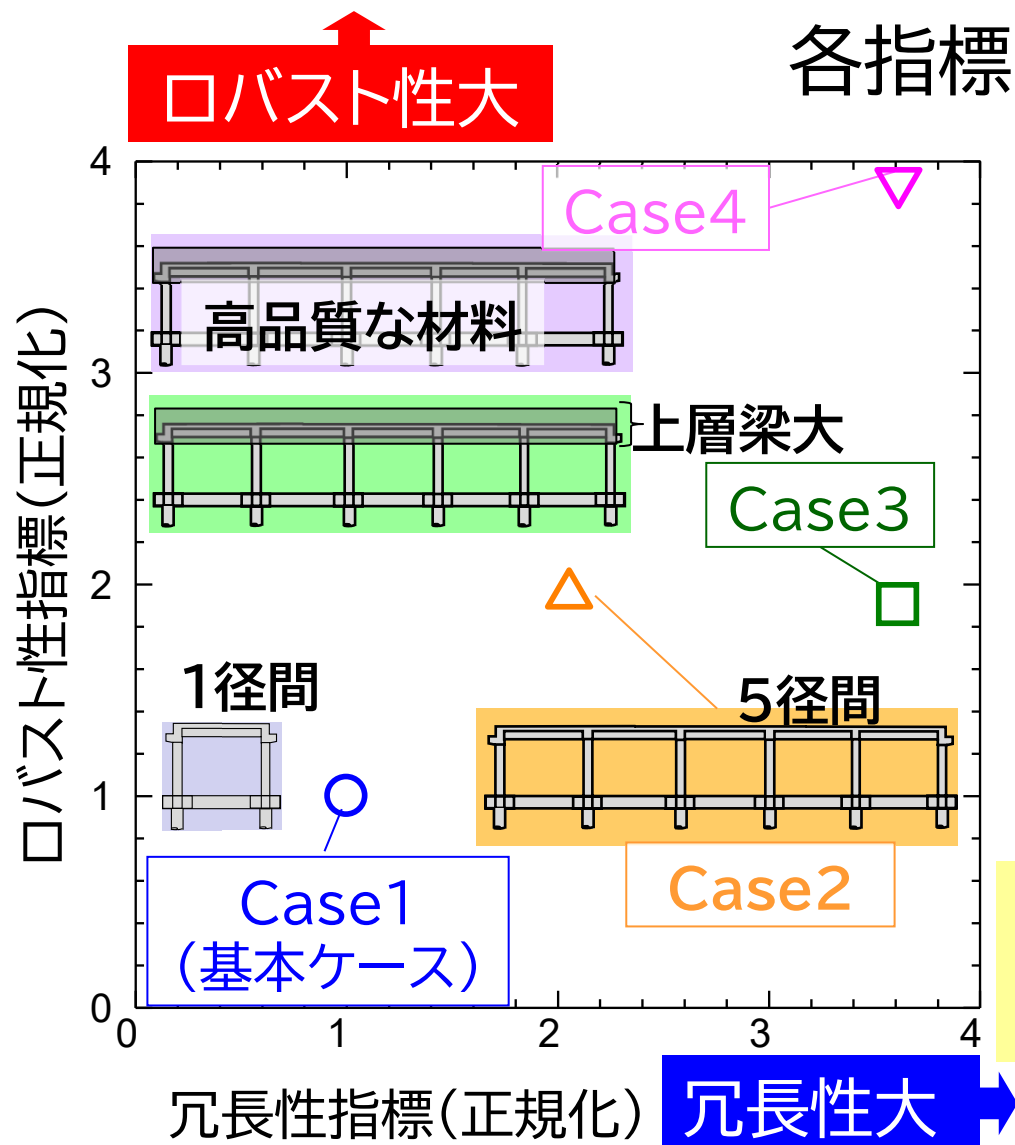
成果③：試算例－ロバスト性の試算結果



- 径間数が多い
- 物性値のバラツキが小さい

ロバスト性指標 β_R が大きくなる

成果③：試算例－試算結果のまとめ



危機耐性の評価軸で、これまで定性的だった冗長性、ロバスト性を定量比較可能に

- 設計に対する「**余裕度**」と「**並列性**」の観点で**冗長性の定量評価法**を構築した**(成果①)**
- **地震動、地盤物性、構造特性の変動**に対する地震時挙動の「**安定性**」の観点で**ロバスト性の定量評価法**を構築した**(成果②)**
- 複数のラーメン高架橋を対象に**試算例を作成し(成果③)**、部材本数、物性のバラツキ、梁の諸元などにより冗長性、ロバスト性に差異が生じることを示した



提案手法により、**冗長性・ロバスト性**の観点から
危機耐性に優れた構造物が実現可能に

- 多様な条件(地域、地盤、制約条件…)ごとの試算例を整備し、鉄道事業者が新設の構造計画や既設の耐震補強をする場合などに危機耐性の高い構造物を選択しやすくする
- より簡便な評価手法へ発展させるとともに、設計マニュアルを整備することで、設計コンサル等が本手法を活用しやすくする



耐震設計標準の改訂へ反映させて、社会に展開する

1. 田中浩平, 室野剛隆, 坂井公俊:地震時の鉄道構造物における危機耐性評価法の構築, 鉄道総研報告, Vol.32, No.9, pp.17-22, 2018
2. 和田一範, 坂井公俊:鉄道橋りょう・高架橋の地震時冗長性の定量評価法, 施設研究ニュース, 2024年7月号
3. 和田一範, 坂井公俊, 高橋良和:鉄道橋りょう・高架橋における冗長性の定量評価法の提案, 日本地震工学論文集, 第25巻, 第1号, pp.64-77, 2025