



Since 1882

研究背景



レジリエンス強化のための 災害廃棄物マネジメントの重要性



【2011年東北地方太平洋沖地震】

地震動と津波による
家屋やインフラ構造物の損壊・流出



構造物の損傷により
約2300万トンの災害廃棄物の発生

- 衛生環境の悪化
- 復旧・復興活動の遅滞



3年もの長期にわたる廃棄物処理

レジリエンス強化のための対策には
災害廃棄物の発生量と
その処理に要する時間の推定が不可欠



Since 1882

研究背景



解析対象地域

南海トラフ



研究背景

Since 1882



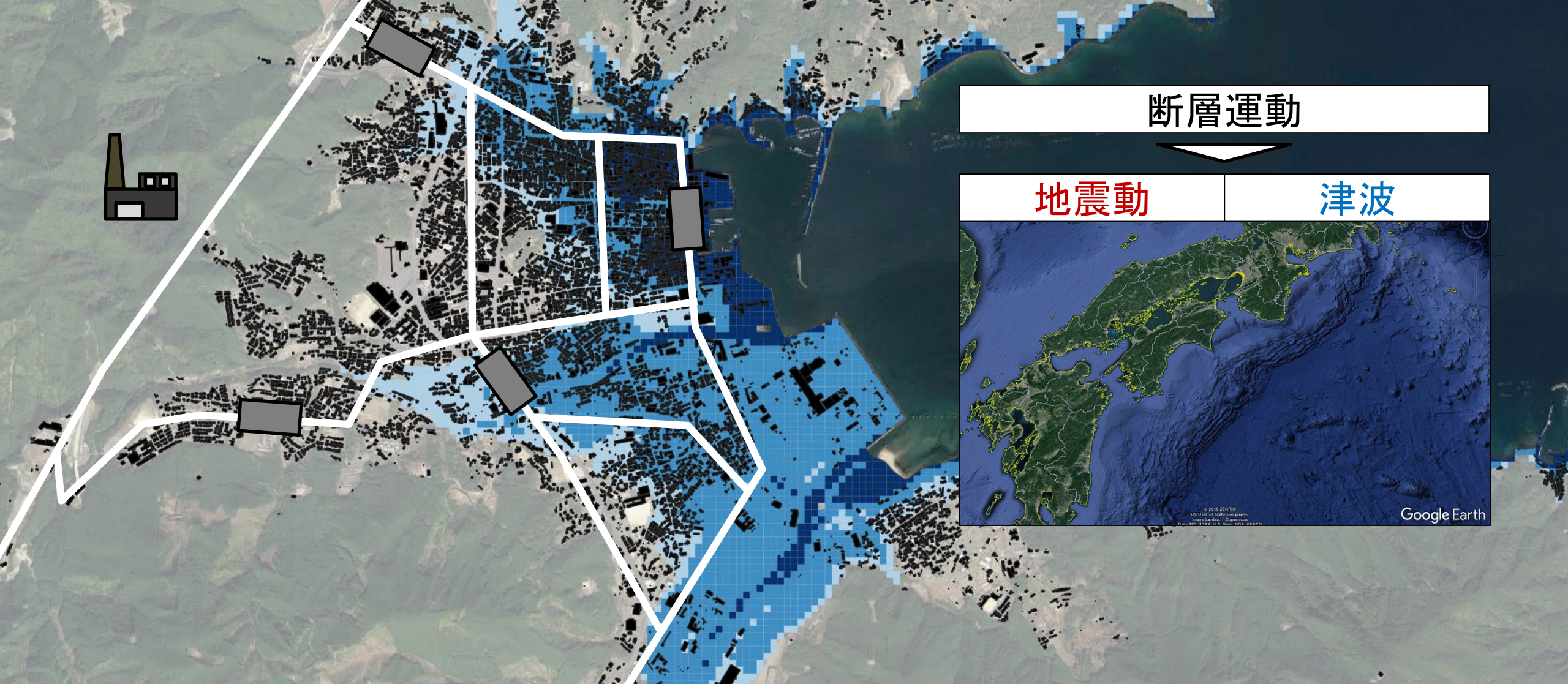
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



断層運動

地震動

津波





研究背景

Since 1882



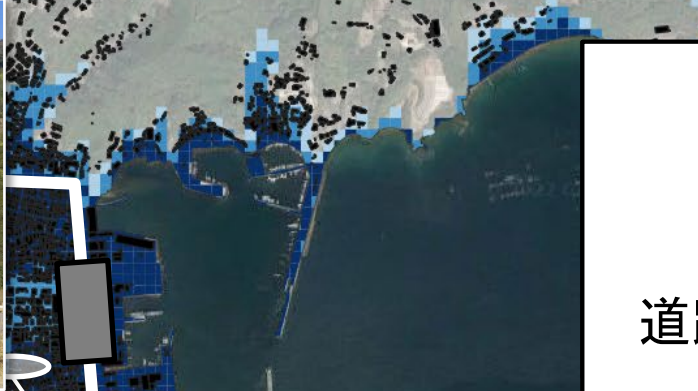
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



地震動と津波による
橋梁の損壊・流出
↓
道路ネットワークの途絶による
廃棄物輸送の遅滞



廃棄物



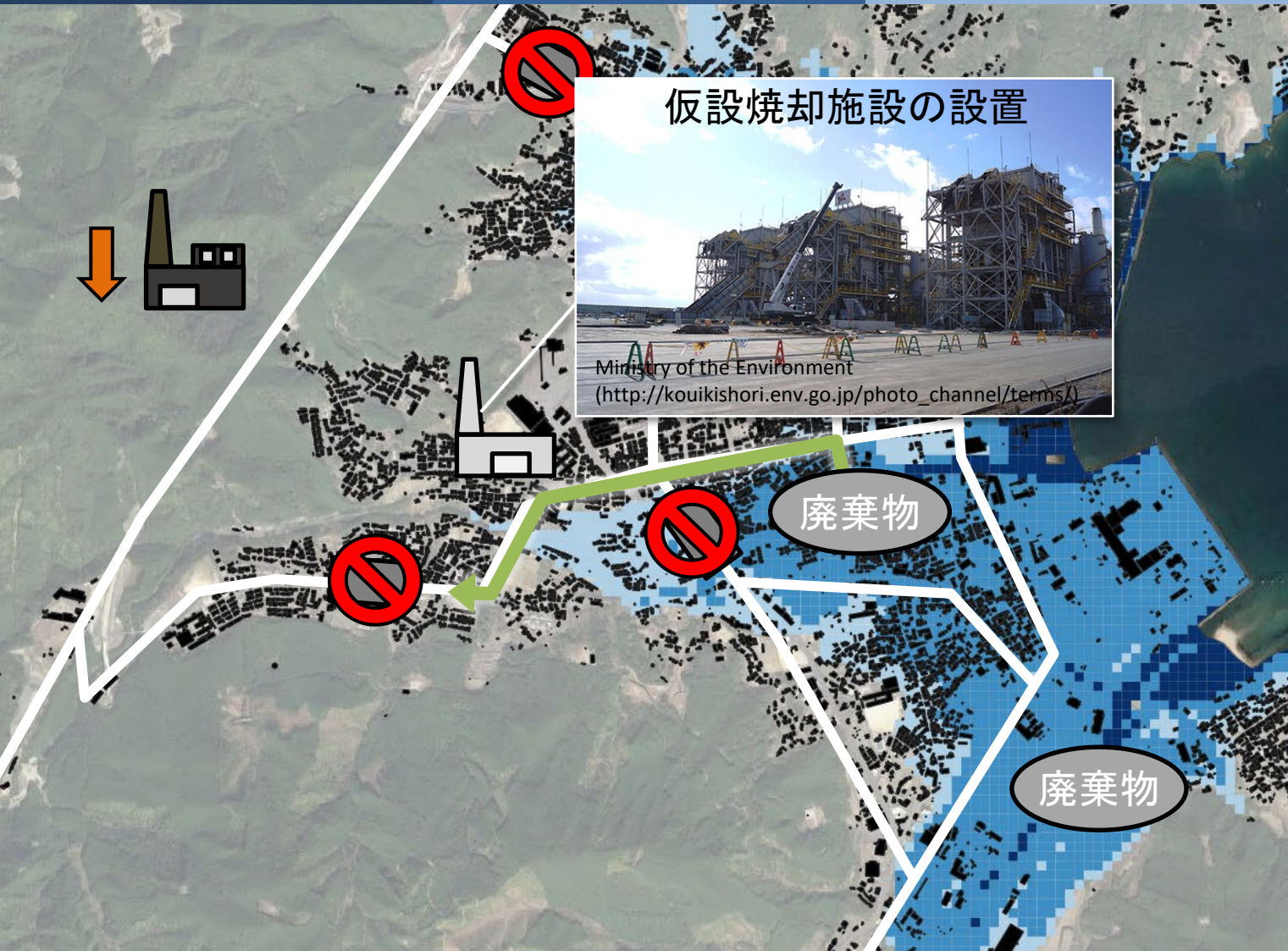
確率論的地震動・
津波ハザード解析

災害廃棄物量の
リスク評価

廃棄物処理システムの
レジリエンス性能

道路ネットワーク
のレジリエンス性能

災害廃棄物の
除去時間の推定



災害廃棄物の除去時間の推定 に関わる課題

1. 被災した道路ネットワークを介した
災害廃棄物の輸送
2. 橋梁および廃棄物処理施設の
損傷からの復旧
3. 処理システムの能力向上のための
仮設焼却施設の設置

推定に関わる不確定性
(例) 断層の動き, 復旧性

災害廃棄物の輸送・処理の推定には、
廃棄物処理システムと道路ネットワーク
の相互依存性を確率的に考慮する必要性



Since 1882

研究背景



確率論的地震動・
津波ハザード解析

災害廃棄物量の
リスク評価

廃棄物処理システムの
レジリエンス性能

道路ネットワーク
のレジリエンス性能

災害廃棄物の
除去時間の推定

仮設焼却施設の設置

災害廃棄物の除去時間の推定
に関わる課題

【本研究の目的】

地震動と津波を伴う南海トラフ地震に対する
災害廃棄物リスクマネジメントの構築のため、
処理システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮して
災害廃棄物量とその処理に要する時間を確率論的に推定する

廃棄物

災害廃棄物の輸送・処理の推定には、
廃棄物処理システムと道路ネットワーク
の相互依存性を考慮することが不可欠



確率論的地震動・津波ハザード解析


災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定

提案手法の適用範囲

: 本手法の対象

A) 可燃性災害廃棄物

木, 繊維, プラスチック



コンクリート



金属



土砂



C) 災害廃棄物処理のガイドライン・データ

環境省 (2018)



2011年東北地方太平洋沖地震



B) 災害廃棄物処理の手順

廃棄物集積所



1. 仮置き

仮置場 (公園等)



3. 仮置き

処理施設



5. 処理

最終処分場



7. 処理

2. 輸送

4. 輸送

6. 輸送

C) 道路ネットワークの損傷

橋梁



盛土



家屋倒壊の道路閉塞への影響





提案手法

Since 1882



確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定

確率論的地震動・津波ハザード解析

構造物位置での地震動・津波ハザード強度に関する同時超過確率(ハザード曲線)

$$G_{\Gamma, \mathbf{h}}(\gamma, \mathbf{h}) = \sum_{e_e \in E_e} \left\{ \int_{\mathbf{h}} \int_{\gamma} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\Gamma}(\gamma | \theta_s) \cdot f_{\mathbf{H}}(\mathbf{h} | \theta_t) \cdot f_{\theta_s, \theta_t}(\theta_s, \theta_t | e_e) d\theta_s d\theta_t d\gamma d\mathbf{h} \right\} \cdot P_{E_e}(e_e)$$

地震動・津波ハザード強度

=

地動最大速度の推定

×

浸水深の推定

×

断層パラメータの相関

×

断層運動の推定に関わる不確かさ



提案手法

Since 1882

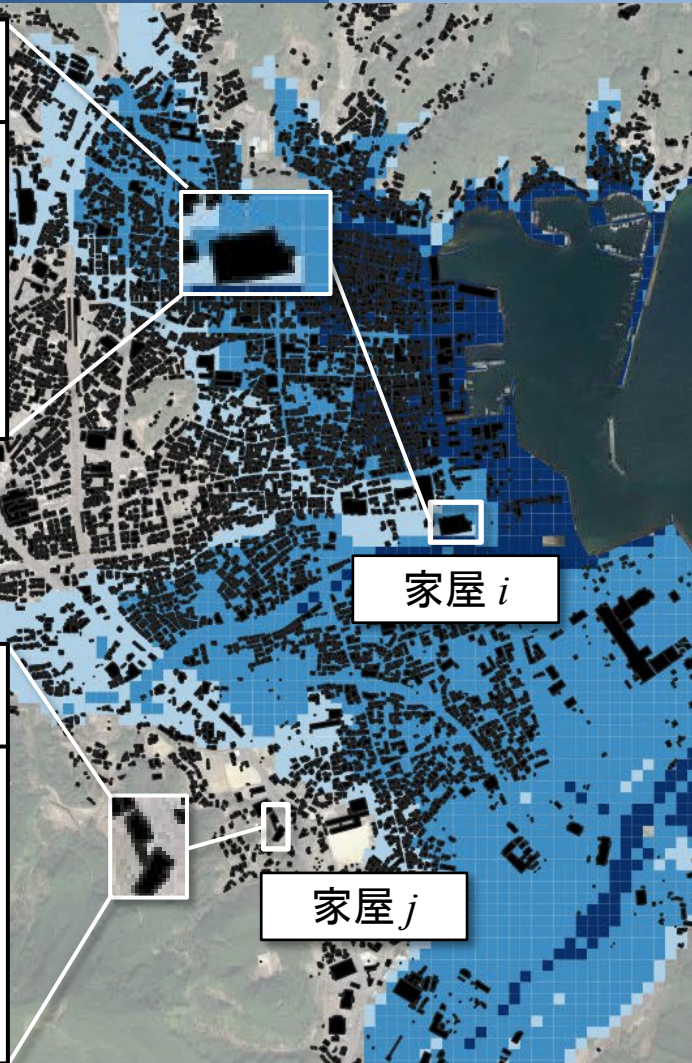
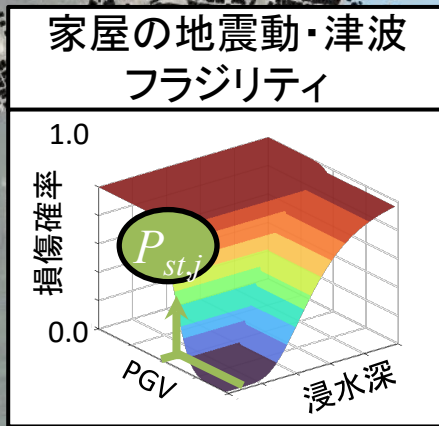
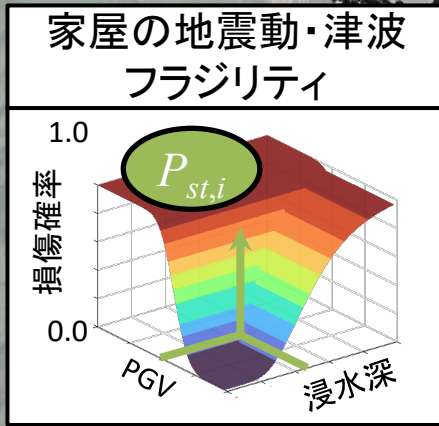
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



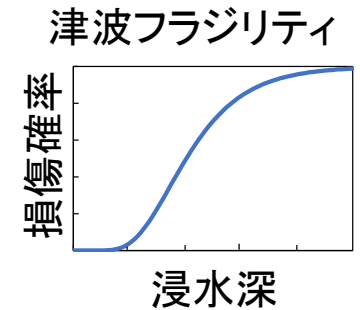
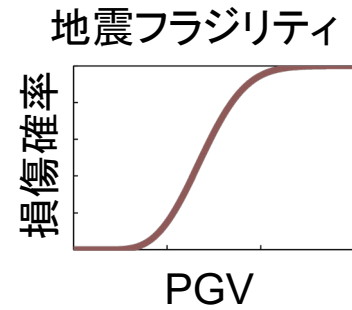
地震動と津波による災害廃棄物量のリスク

$$f_{Q_{cs}} \{ \mathbf{q}_{cs}(t_0) | \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{h} \} = \prod_{i_{bu}=1}^{n_{bu}} \left[P_{u,i_{bu}} \{ q_{cs}(t_0) | ds_{bu,i_{bu}} \} \cdot P_{st,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right]$$

災害廃棄物量 = 発生原単位 × 家屋のフラジリティ

1. 地震動と津波を受ける家屋のフラジリティ評価

$$P_{st,i_{bu}} (ds_{i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) = \max \left\{ P_{s,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}), P_{t,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | h_{j_{gc}}) \right\}$$





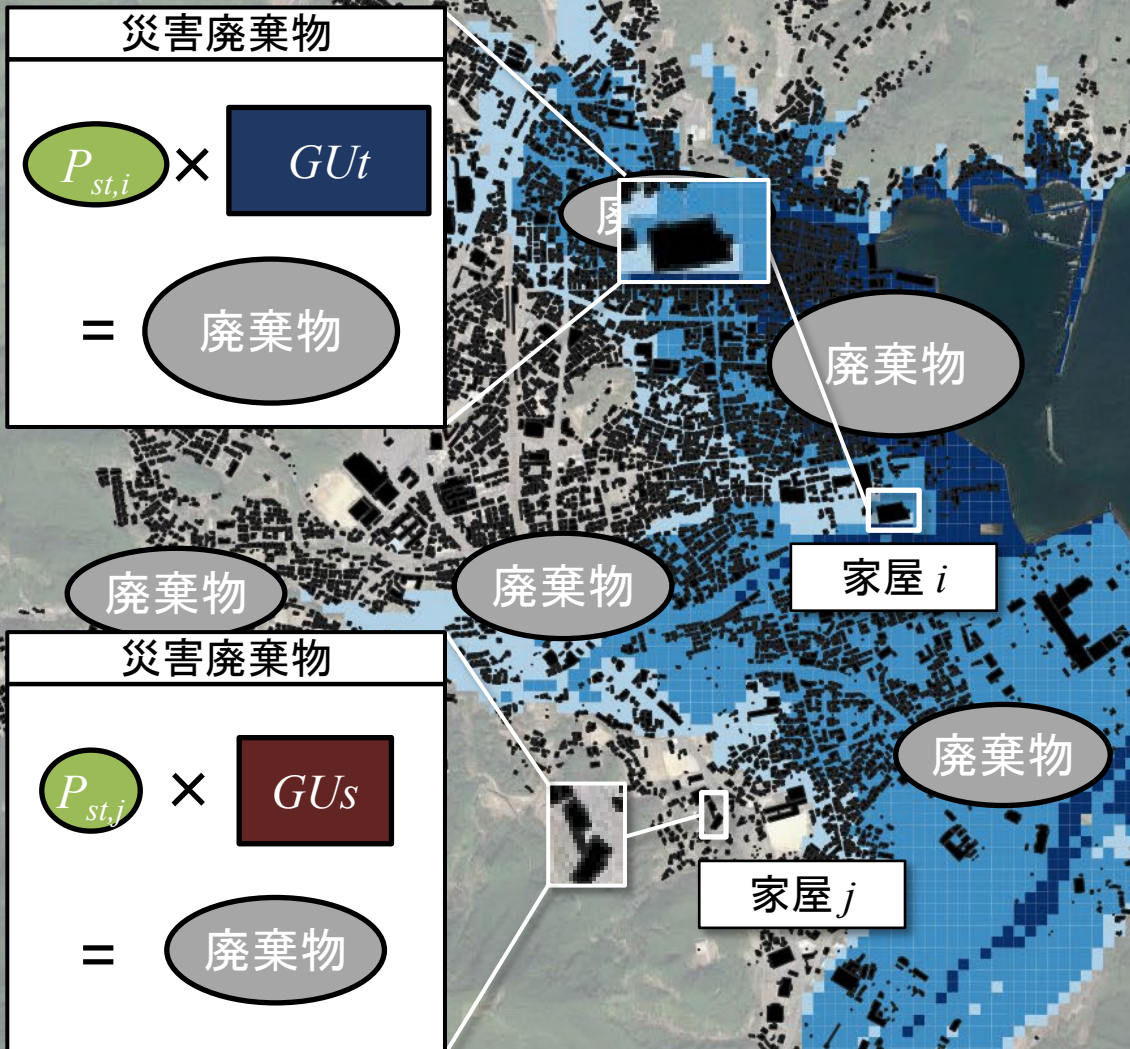
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



地震動と津波による災害廃棄物のリスク

$$f_{Q_{cs}} \{ \mathbf{q}_{cs}(t_0) | \gamma, \mathbf{h} \} = \prod_{i_{bu}=1}^{n_{bu}} \left[P_{u,i_{bu}} \{ q_{cs}(t_0) | ds_{bu,i_{bu}} \} \cdot P_{st,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right]$$

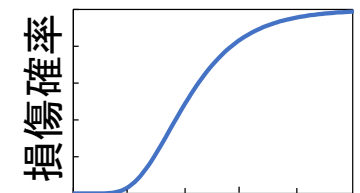
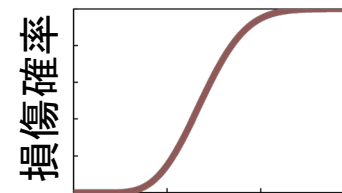
災害廃棄物量 = 発生原単位 × 家屋の脆弱性

1. 地震動と津波を受ける家屋の脆弱性評価

$$P_{st,i_{bu}} (ds_{i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) = \max \left\{ P_{s,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}), P_{t,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | h_{j_{gc}}) \right\}$$

地震脆弱性

津波脆弱性



2. 浸水域および非浸水域に位置する家屋に対して異なる災害廃棄物量の発生原単位(ton/棟)



確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

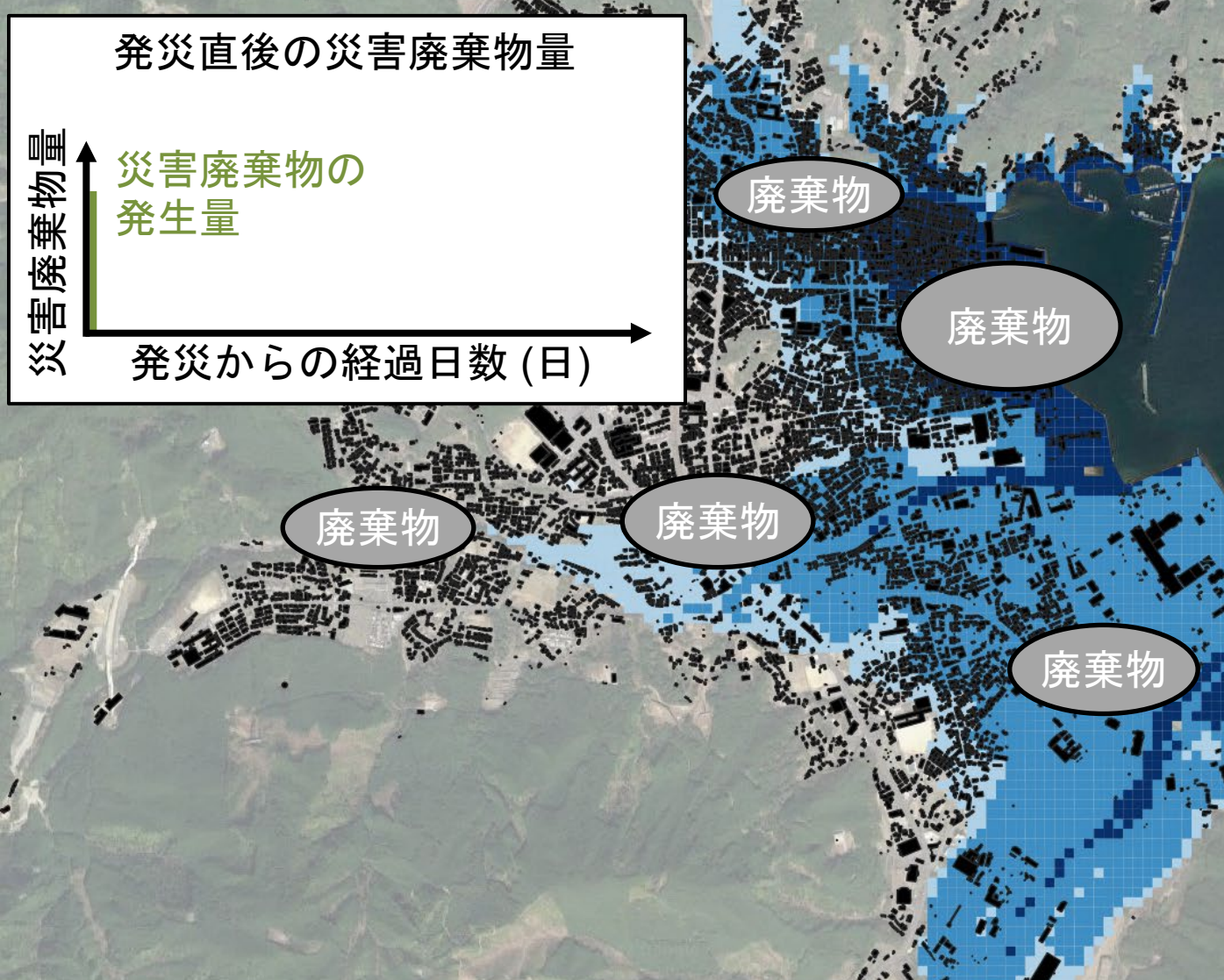
災害廃棄物の除去時間の推定

発災直後の災害廃棄物量

災害廃棄物の発生量

発災からの経過日数 (日)

災害廃棄物量



地震動と津波による災害廃棄物量のリスク

$$f_{Q_{cs}} \{ \mathbf{q}_{cs}(t_0) | \gamma, \mathbf{h} \} = \prod_{i_{bu}=1}^{n_{bu}} \left[P_{u,i_{bu}} \{ q_{cs}(t_0) | ds_{bu,i_{bu}} \} \cdot P_{st,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right]$$

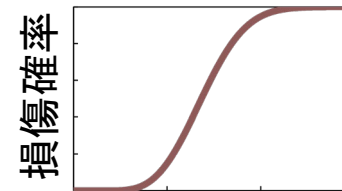
災害廃棄物量 = 発生原単位 × 家屋の脆弱性

1. 地震動と津波を受ける家屋の脆弱性評価

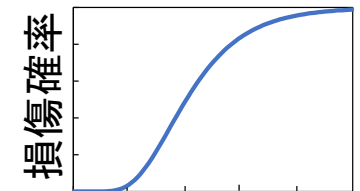
$$P_{st,i_{bu}} (ds_{i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) = \max \left\{ P_{s,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | \gamma_{j_{gc}}), P_{t,i_{bu}} (ds_{bu,i_{bu}} | h_{j_{gc}}) \right\}$$

地震脆弱性

津波脆弱性



PGV



浸水深

2. 浸水域および非浸水域に位置する家屋に対して異なる災害廃棄物量の発生原単位(ton/棟)

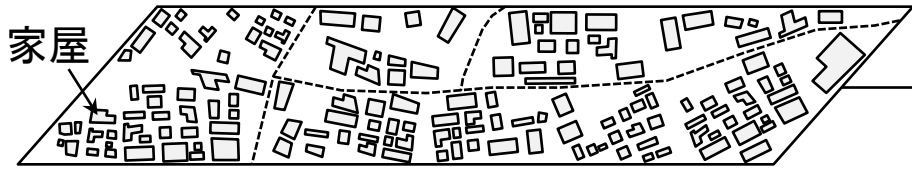


廃棄物処理システムと道路ネットワークの相互依存性

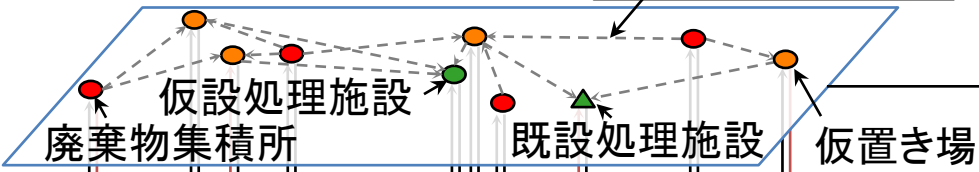
解析対象地域



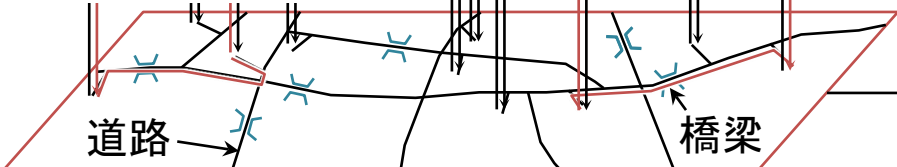
損傷した一般家屋から生じる災害廃棄物



廃棄物処理システム



道路ネットワーク



解析対象地域における空間的な相互依存性

グラフ理論に基づくモデル化

$$\text{解析対象地域 } G = (V_{bu}, G_{wds}, G_{rms})$$

□ 一般家屋

$$\text{廃棄物処理システム } G_{wds} = (V_{cs}^{wds}, V_{tss}^{wds}, V_{epf}^{wds}, V_{tpf}^{wds})$$

- 廃棄物集積所
- 仮置き場
- ▲ 既設処理施設
- 仮設処理施設

$$\text{道路ネットワーク } G_{rms} = (V_{br}^{rms}, E_{rs}^{rms})$$

≡ 橋梁 — 道路



提案手法

Since 1882



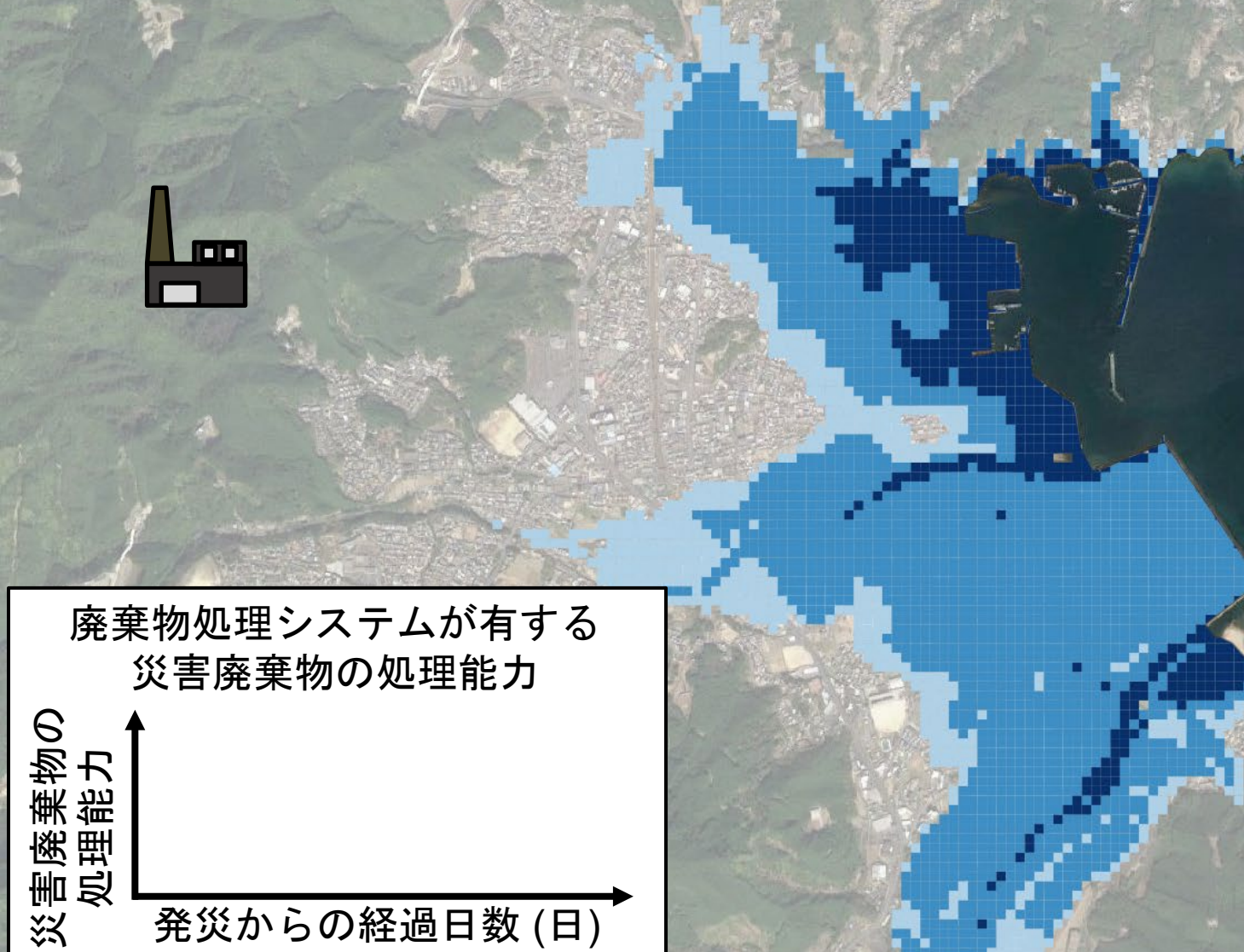
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定

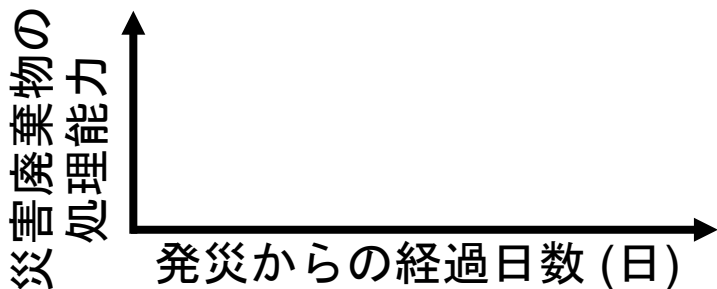


処理システムが有する廃棄物処理能力

$$f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \int_0^\infty \int_0^\infty f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | \mathbf{pc}_{epf}(t), \mathbf{pc}_{tpf}(t)\} \cdot \underbrace{f_{PC_{epf}} \{\mathbf{pc}_{epf}(t) | \gamma, \mathbf{h}\}}_{\text{廃棄物処理能力}} \cdot \underbrace{f_{PC_{tpf}} \{\mathbf{pc}_{tpf}(t)\}}_{\text{既設処理施設の損傷と復旧}} d\mathbf{pc}_{epf} d\mathbf{pc}_{tpf}$$

× 仮設処理施設の設置

廃棄物処理システムが有する災害廃棄物の処理能力





提案手法

Since 1882



確率論的地震動・津波ハザード解析

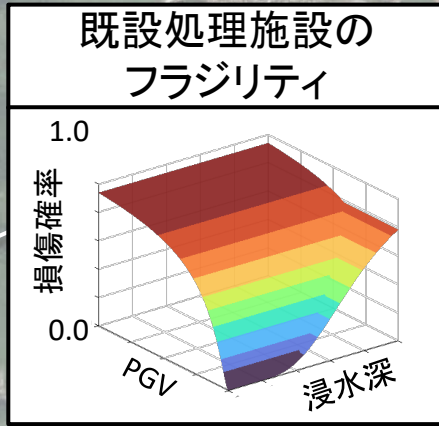
災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定

既設
処理施設



廃棄物処理システムが有する
災害廃棄物の処理能力

災害廃棄物の
処理能力

発災からの経過日数 (日)

処理システムが有する廃棄物処理能力

$$f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \int_0^\infty \int_0^\infty f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | pc_{epf}(t), pc_{tpf}(t)\} \cdot$$

$$\frac{f_{PC_{epf}} \{pc_{epf}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} \cdot f_{PC_{tpf}} \{pc_{tpf}(t)\} dpc_{epf} dpc_{tpf}}$$

廃棄物
処理能力

= 既設処理施設の損傷と復旧

× 仮設処理施設の設置

1. 損傷と復旧を考慮した既設処理施設の能力

処理施設の復旧に要する時間(復旧曲線)

$$f_{PC_{epf}} \{pc_{epf}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \prod_{i_{epf}=1}^{n_{epf}} \left[\frac{P_{pc, i_{epf}} (pc_{epf, i_{epf}}(t) | ds_{i_{epf}})}{\dots} \right]$$

既設処理施設の
脆弱性

$$\sum_{ds_{i_{epf}} \in DS_{i_{epf}}} \left\{ P_{st, i_{epf}} (ds_{i_{epf}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right\}$$



提案手法

Since 1882



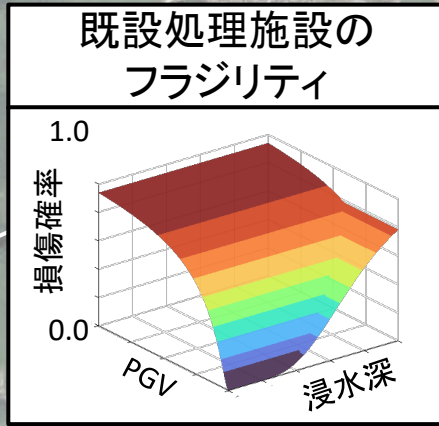
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物のリスク評価

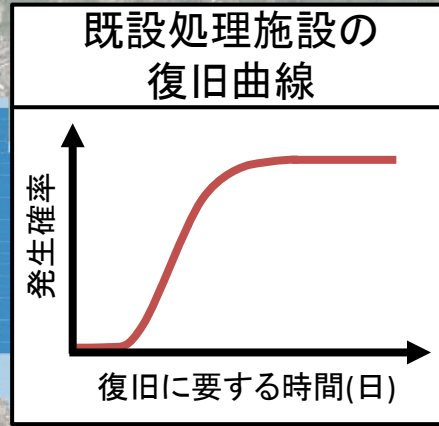
廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



×



処理システムが有する廃棄物処理能力

$$f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \int_0^\infty \int_0^\infty f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | pc_{epf}(t), pc_{tpf}(t)\} \cdot f_{PC_{epf}} \{pc_{epf}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} \cdot f_{PC_{tpf}} \{pc_{tpf}(t)\} dpc_{epf} dpc_{tpf}$$

廃棄物処理能力 = 既設処理施設の損傷と復旧 × 仮設処理施設の設置

1. 損傷と復旧を考慮した既設処理施設の能力

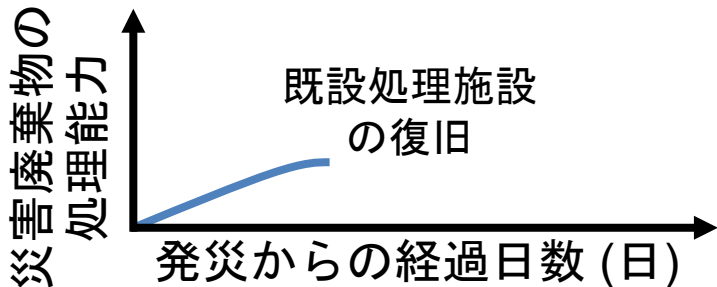
処理施設の復旧に要する時間(復旧曲線)

$$f_{PC_{epf}} \{pc_{epf}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \prod_{i_{epf}=1}^{n_{epf}} \left[P_{pc, i_{epf}} (pc_{epf, i_{epf}}(t) | ds_{i_{epf}}) \right]$$

既設処理施設の脆弱性

$$\sum_{ds_{i_{epf}} \in DS_{i_{epf}}} \left\{ P_{st, i_{epf}} (ds_{i_{epf}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right\}$$

廃棄物処理システムが有する災害廃棄物の処理能力





確率論的地震動・津波ハザード解析

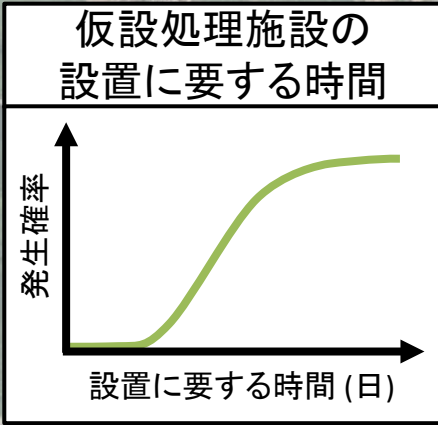
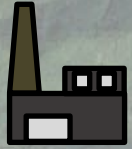
災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

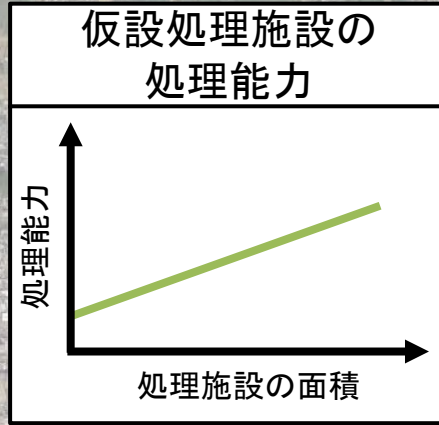
道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定

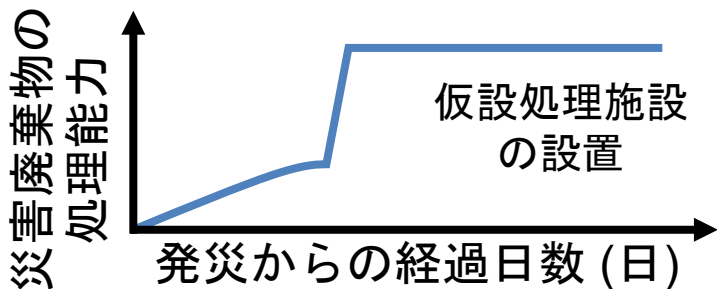
既設
処理施設



×



廃棄物処理システムが有する災害廃棄物の処理能力



処理システムが有する廃棄物処理能力

$$f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \int_0^\infty \int_0^\infty f_{PC_{G_{wds}}} \{pc_{G_{wds}}(t) | pc_{epf}(t), pc_{tpf}(t)\} \cdot f_{PC_{epf}} \{pc_{epf}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} \cdot f_{PC_{tpf}} \{pc_{tpf}(t)\} dpc_{epf} dpc_{tpf}$$

廃棄物
処理能力

= 既設処理施設の損傷と復旧

× 仮設処理施設の設置

1. 損傷と復旧を考慮した既設処理施設の能力
2. 発災後に設置される仮設処理施設の能力



提案手法

Since 1882



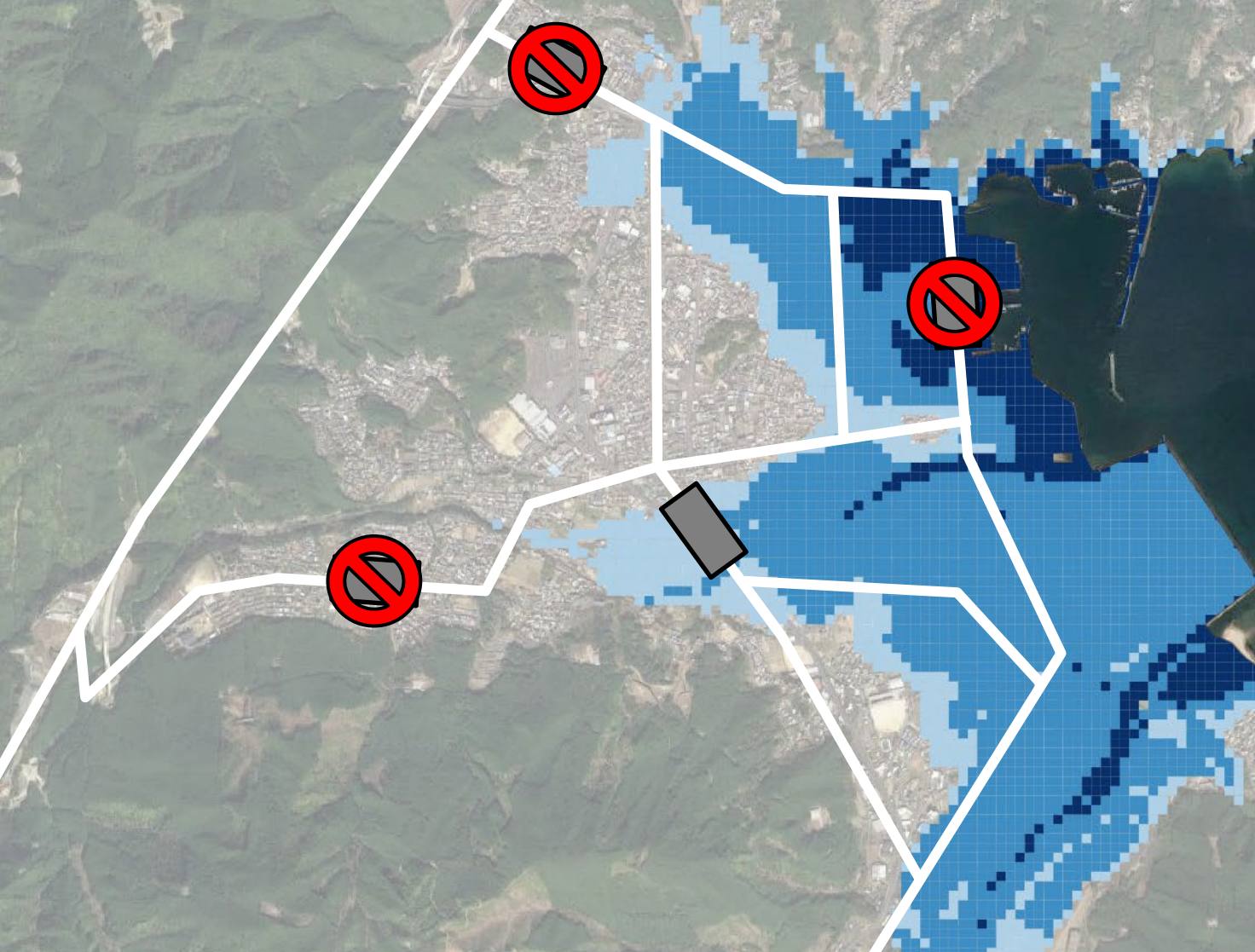
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



道路ネットワークの接続性

$$f_{CR_{G_{rms}}} \{cr_{G_{rms}}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \int_0^1 f_{CR_{G_{rms}}} \{cr_{G_{rms}}(t) | \mathbf{ia}_{br}(t)\} \cdot f_{\mathbf{IA}_{br}} \{\mathbf{ia}_{br}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} d\mathbf{ia}_{br}$$

道路ネットワークの接続性指標 × 損傷および復旧を考慮した橋梁の通行可否の時間変化

1. 橋梁の脆弱性および復旧曲線

橋梁の復旧に要する時間(復旧曲線)

$$f_{\mathbf{IA}_{br}} \{\mathbf{ia}_{br}(t) | \gamma, \mathbf{h}\} = \prod_{i_{br}=1}^{n_{br}} \left[\int_0^{\infty} P_{ia, i_{br}}(ia_{br, i_{br}}(t) | ds_{i_{br}}) \cdot \right]$$

橋梁の脆弱性

$$\sum_{ds_{i_{br}} \in DS_{i_{br}}} \left\{ P_{st, i_{br}}(ds_{i_{br}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right\}$$



提案手法

Since 1882

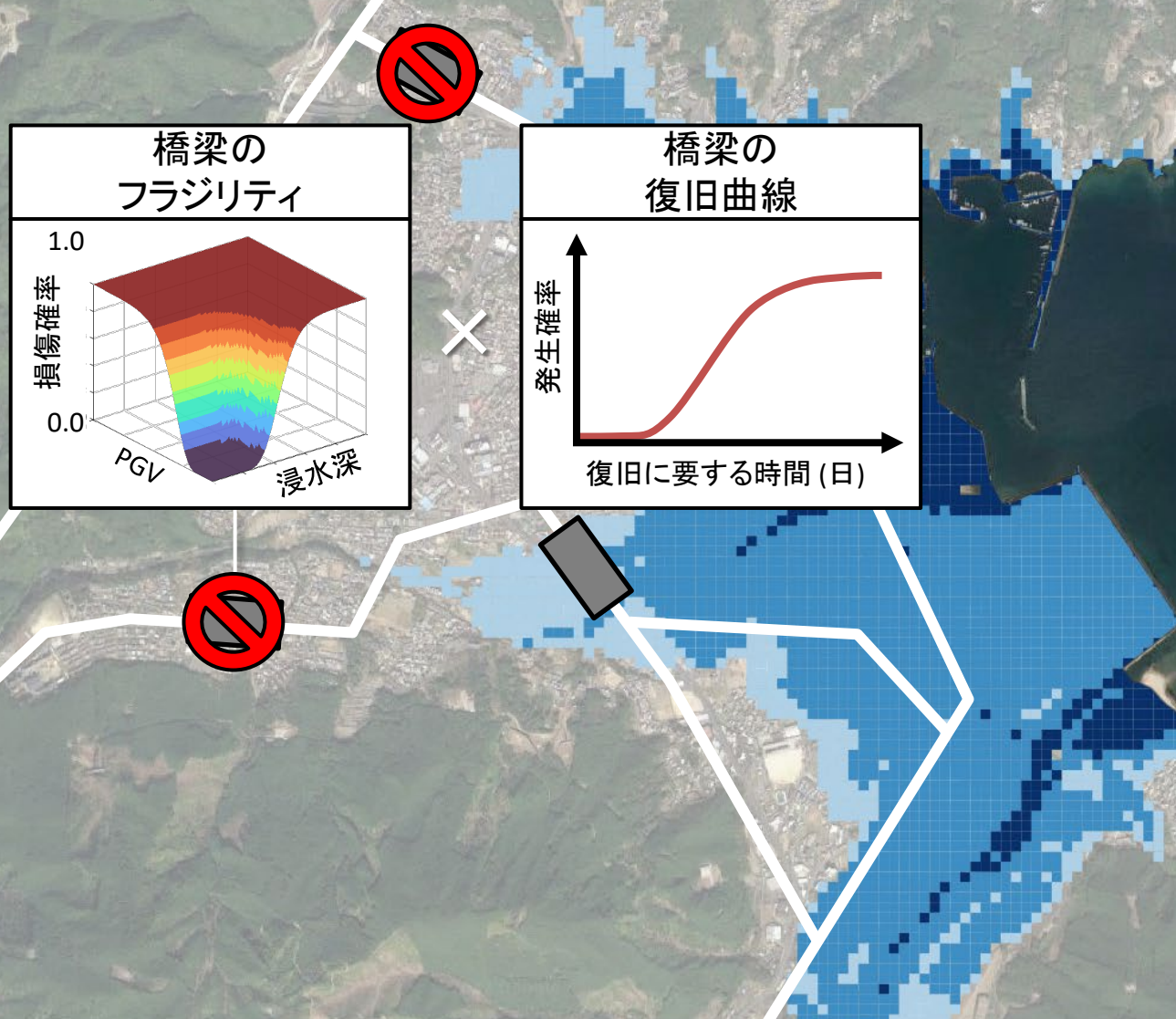
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



道路ネットワークの接続性

$$f_{CR_{G_{rms}}} \{ cr_{G_{rms}}(t) | \gamma, \mathbf{h} \} = \int_0^1 f_{CR_{G_{rms}}} \{ cr_{G_{rms}}(t) | \mathbf{ia}_{br}(t) \} \cdot f_{\mathbf{IA}_{br}} \{ \mathbf{ia}_{br}(t) | \gamma, \mathbf{h} \} d\mathbf{ia}_{br}$$

道路ネットワークの接続性指標 × 損傷および復旧を考慮した橋梁の通行可否の時間変化

1. 橋梁の脆弱性および復旧曲線

橋梁の復旧に要する時間(復旧曲線)

$$f_{\mathbf{IA}_{br}} \{ \mathbf{ia}_{br}(t) | \gamma, \mathbf{h} \} = \prod_{i_{br}=1}^{n_{br}} \left[\int_0^{\infty} P_{ia, i_{br}} (ia_{br, i_{br}}(t) | ds_{i_{br}}) \cdot \right]$$

橋梁の脆弱性

$$\sum_{ds_{i_{br}} \in DS_{i_{br}}} \left\{ P_{st, i_{br}} (ds_{i_{br}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right\}$$



提案手法

Since 1882

確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



道路ネットワークの接続性に関するレジリエンス評価

道路ネットワークの接続性指標 $CR_{G_{rms}}(t)$

$$CR_{G_{rms}}(t) = \frac{\sum_{i_{cs}=1}^{n_{cs}} \sum_{i_{tss}=1}^{n_{tss}} \delta(\exists i_{cs} i_{tss} \text{ connectivity} \in G_{rms}(t))}{n_{cs} \cdot n_{tss}} + \frac{\sum_{i_{tss}=1}^{n_{tss}} \sum_{i_{epf}=1}^{n_{epf}} \delta(\exists i_{tss} i_{epf} \text{ connectivity} \in G_{rms}(t)) + \sum_{i_{tss}=1}^{n_{tss}} \sum_{i_{tpf}=1}^{n_{tpf}} \delta(\exists i_{tss} i_{tpf} \text{ connectivity} \in G_{rms}(t))}{n_{tss} \cdot n_{epf} + n_{tss} \cdot n_{tpf}}$$

廃棄物集積所と仮置き場を結ぶルートの
通行可能性

仮置き場と処理施設を結ぶルートの
通行可能性

橋梁の損傷と復旧を考慮した道路ネットワークの接続関係の時間変化 $G_{rms}(t)$

$$G_{rms}(t) = (V_{br}^{rms}(t), V_{ri}^{rms}, E_{rs}^{rms}(t)) = \left(V_{br}^{rms} - \left\{ i_{br} \in V_{br}^{rms} \mid t < rt_{br, i_{br}}(ds_{br, i_{br}}) \right\}, V_{ri}^{rms}, E_{rs}^{rms} - \left\{ ui_{br} \in E_{rs}^{rms}, u \in G_{rms} \right\} \right)$$

未復旧の橋梁を除いた道路ネットワークの接続関係



提案手法

Since 1882

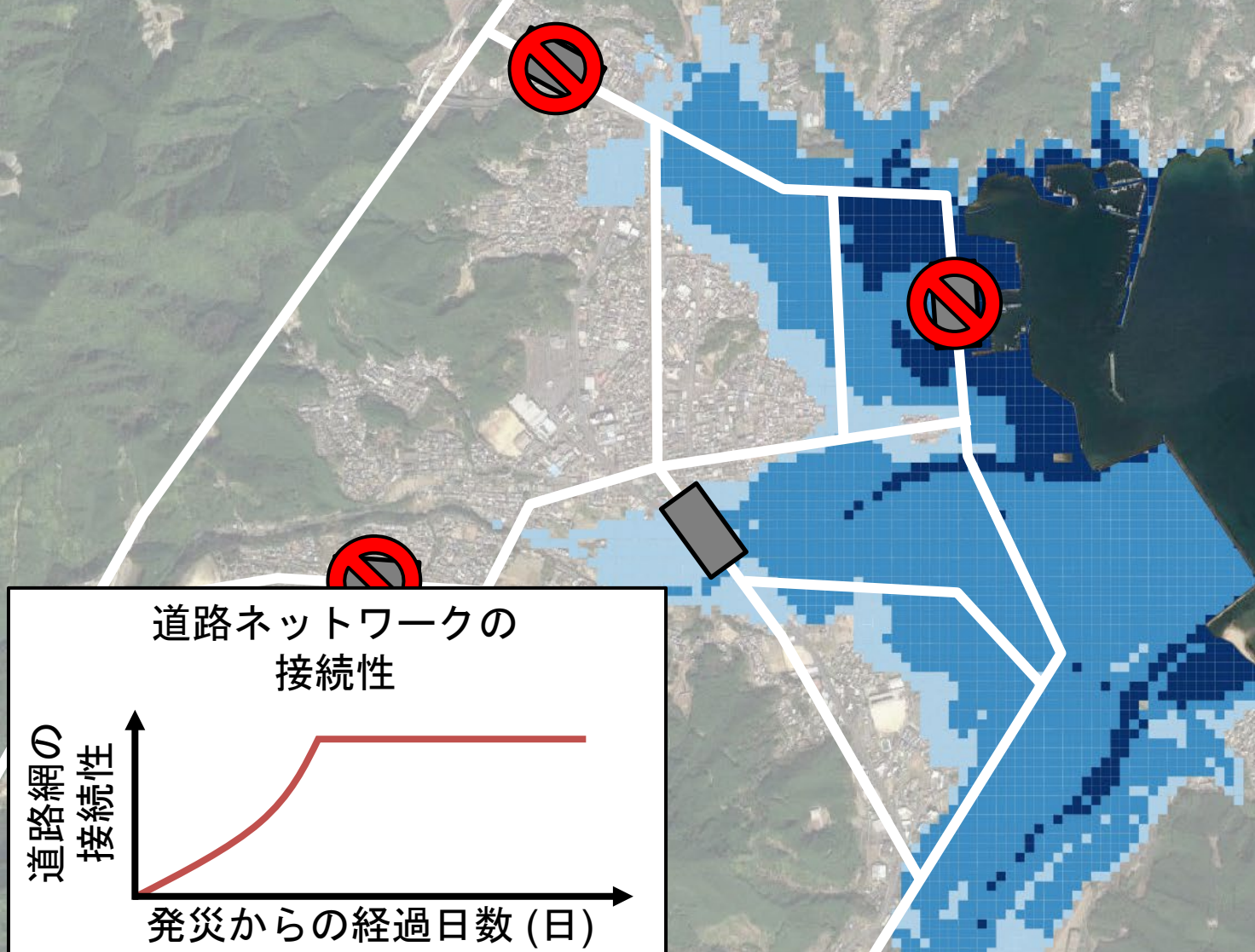
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



道路ネットワークの接続性

$$f_{CR_{G_{rms}}} \{ cr_{G_{rms}}(t) | \gamma, \mathbf{h} \} = \int_0^1 f_{CR_{G_{rms}}} \{ cr_{G_{rms}}(t) | \mathbf{ia}_{br}(t) \} \cdot f_{\mathbf{IA}_{br}} \{ \mathbf{ia}_{br}(t) | \gamma, \mathbf{h} \} d\mathbf{ia}_{br}$$

道路ネットワークの接続性指標 × 損傷および復旧を考慮した橋梁の通行可否の時間変化

1. 橋梁の脆弱性および復旧曲線

橋梁の復旧に要する時間(復旧曲線)

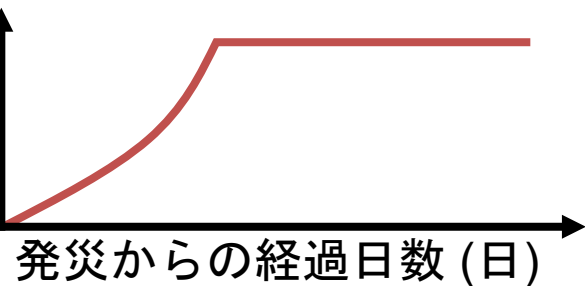
$$f_{\mathbf{IA}_{br}} \{ \mathbf{ia}_{br}(t) | \gamma, \mathbf{h} \} = \prod_{i_{br}=1}^{n_{br}} \left[\int_0^{\infty} P_{ia, i_{br}} (ia_{br, i_{br}}(t) | ds_{i_{br}}) \cdot \right]$$

橋梁の脆弱性 $\sum_{ds_{i_{br}} \in DS_{i_{br}}} \left\{ P_{st, i_{br}} (ds_{i_{br}} | \gamma_{j_{gc}}, h_{j_{gc}}) \right\}$

2. 橋梁の損傷からの復旧を考慮した道路ネットワークの接続性の時間変化

道路ネットワークの接続性

道路網の接続性





提案手法

Since 1882



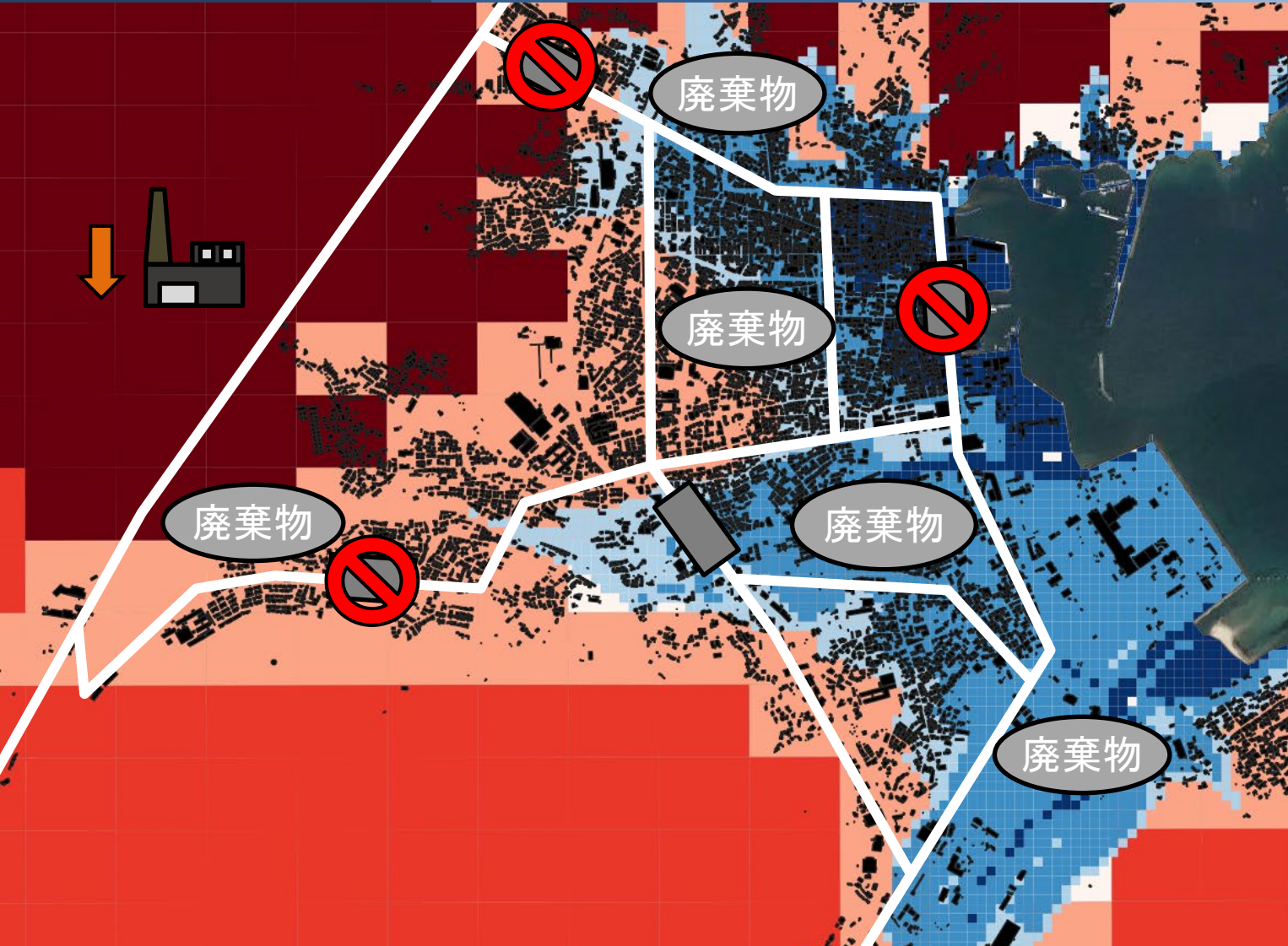
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

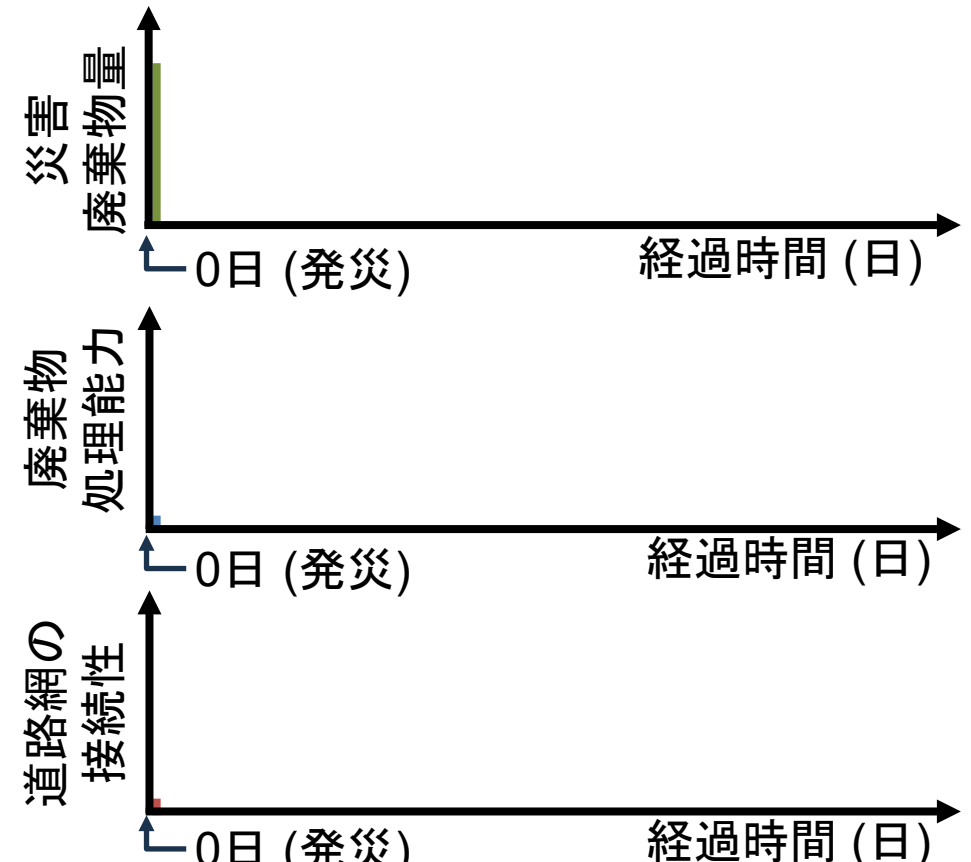
廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



廃棄物処理システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮した災害廃棄物処理の推定





提案手法

Since 1882



廃棄物処理システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮した災害廃棄物処理の動的解析

最小費用流問題の解として得られる災害廃棄物の輸送量

決定変数:

$$tq_{rs, n_{rs}}(t) = (tq_{rs, 1}(t), \dots, tq_{rs, i_{rs}}(t), \dots, tq_{rs, n_{rs}}(t))$$

廃棄物量の制約:

$$0 \leq \sum_{i_{ISS}=1}^{n_{ISS}} tq_{i_{CS}, i_{ISS}}(t) \leq q_{CS, i_{CS}}(t)$$

目的関数:

$$\text{Minimize } \sum_{i_{rs}=1}^{n_{rs}} l_{rs, i_{rs}} \cdot tq_{rs, i_{rs}}(t)$$

仮置き容量の制約:

$$0 \leq \sum_{i_{CS}=1}^{n_{CS}} tq_{i_{CS}, i_{ISS}}(t) \leq sc_{ISS, i_{ISS}} - q_{ISS, i_{ISS}}(t)$$

輸送量の制約:

$$0 \leq tq_{rs, i_{rs}}(t) \leq tc_{rs, i_{rs}}(t)$$

↓ ↑ 廃棄物処理が完了するまで動的解析を実施

質量保存則に基づく災害廃棄物の処理量

廃棄物集積所:

$$dq_{CS, i_{CS}}(t)/dt = - \sum_{i_{ISS}=1}^{n_{ISS}} tq_{i_{CS}, i_{ISS}}(t)$$

仮置き場:

$$dq_{ISS, i_{ISS}}(t)/dt = \sum_{i_{CS}=1}^{n_{ISS}} tq_{i_{CS}, i_{ISS}}(t) - \sum_{i_{EPF}=1}^{n_{EPF}} tq_{i_{ISS}, i_{EPF}}(t) - \sum_{i_{IPF}=1}^{n_{IPF}} tq_{i_{ISS}, i_{IPF}}(t)$$

既設処理施設:

$$dq_{EPF, i_{EPF}}(t)/dt = \sum_{i_{ISS}=1}^{n_{ISS}} tq_{i_{ISS}, i_{EPF}}(t) - pc_{EPF, i_{EPF}}(t)$$

仮設処理施設:

$$dq_{IPF, i_{IPF}}(t)/dt = \sum_{i_{ISS}=1}^{n_{ISS}} tq_{i_{ISS}, i_{IPF}}(t) - pc_{IPF, i_{IPF}}(t)$$



提案手法

Since 1882



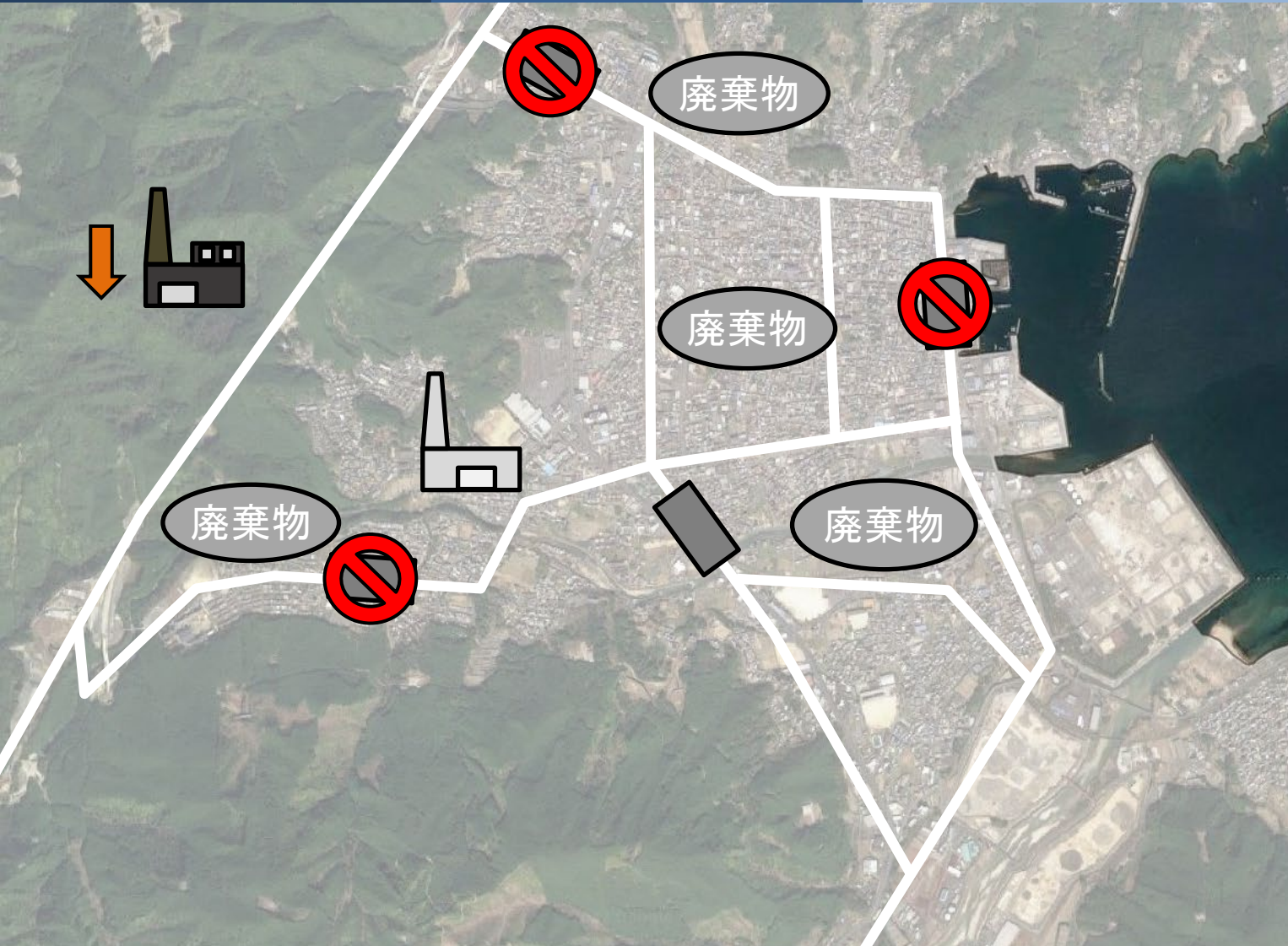
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

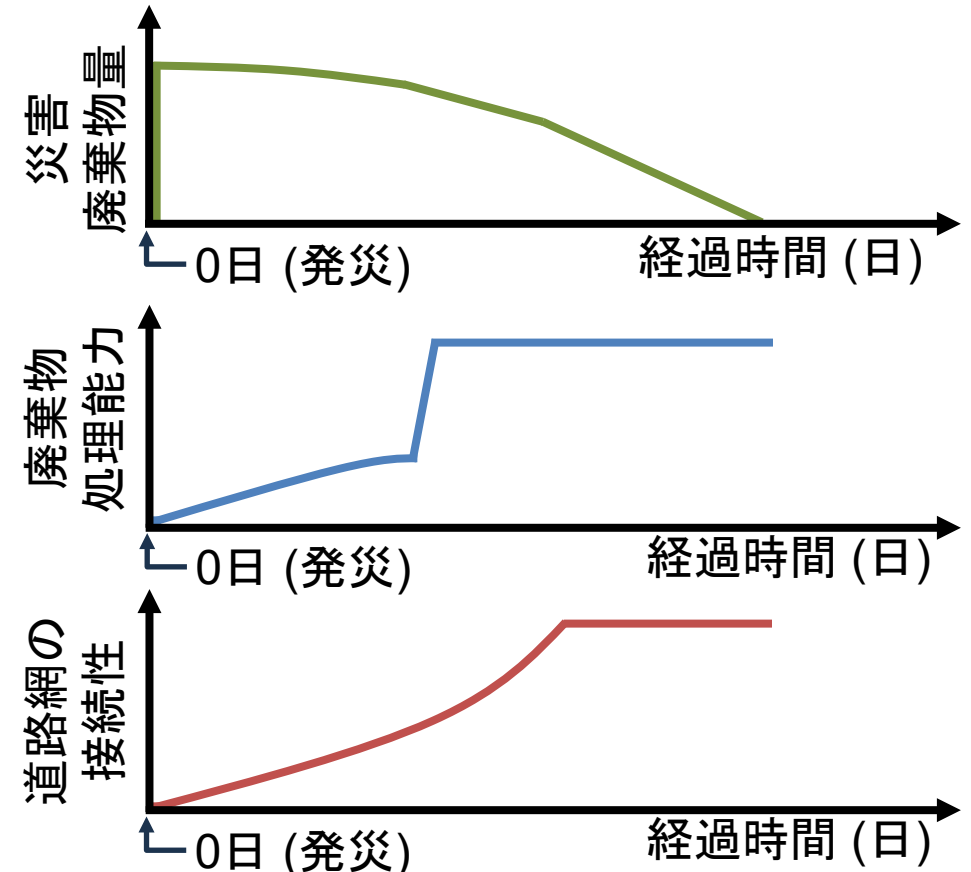
廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



廃棄物処理システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮した災害廃棄物処理の推定





提案手法

Since 1882



確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定

廃棄物処理システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮した

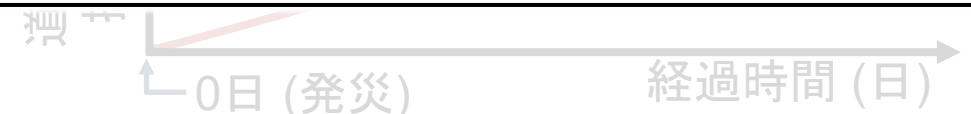
廃棄物処理システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮した災害廃棄物処理の確率論的推定

Monte Carlo simulation (MCS)を用いた不確定性の考慮

災害廃棄物の残余量に関する時間変化 $E[Q_{cs}(t)]$

$$E[Q_{cs}(t)] = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left[\underbrace{q_{cs}(t_0)}_{\text{災害廃棄物の発生量}} \cdot f_{Q_{cs}}(q_{cs}(t_0) | \gamma, \mathbf{h}) + \int_{t_0}^t \int_0^\infty \int_0^\infty \left\{ \underbrace{\frac{dq_{cs}(pc_{G_{wds}}(t), cr_{G_{rms}}(t))}{dt}}_{\text{両システムの相互依存性を考慮した災害廃棄物の輸送・処理の推定}} \cdot \underbrace{f_{PC_{G_{wds}}}(pc_{G_{wds}}(t) | \gamma, \mathbf{h})}_{\text{道路ネットワークの性能の時間変化}} \cdot \underbrace{f_{CR_{G_{rms}}}(cr_{G_{rms}}(t) | \gamma, \mathbf{h})}_{\text{廃棄物処理システムの性能の時間変化}} \right\} dp_{G_{wds}} dcr_{G_{rms}} dt \right] \cdot \left| \frac{\partial G_{\Gamma, \mathbf{H}}(\gamma, \mathbf{h})}{\partial \gamma \partial \mathbf{h}} \right| d\gamma d\mathbf{h} dq_{cs} \times \text{ハザード}$$

発災後t日までに災害廃棄物処理が完了する確率 $P_{wdc}(t) = P\{q_{cs}(t) = 0\}$





提案手法

Since 1882



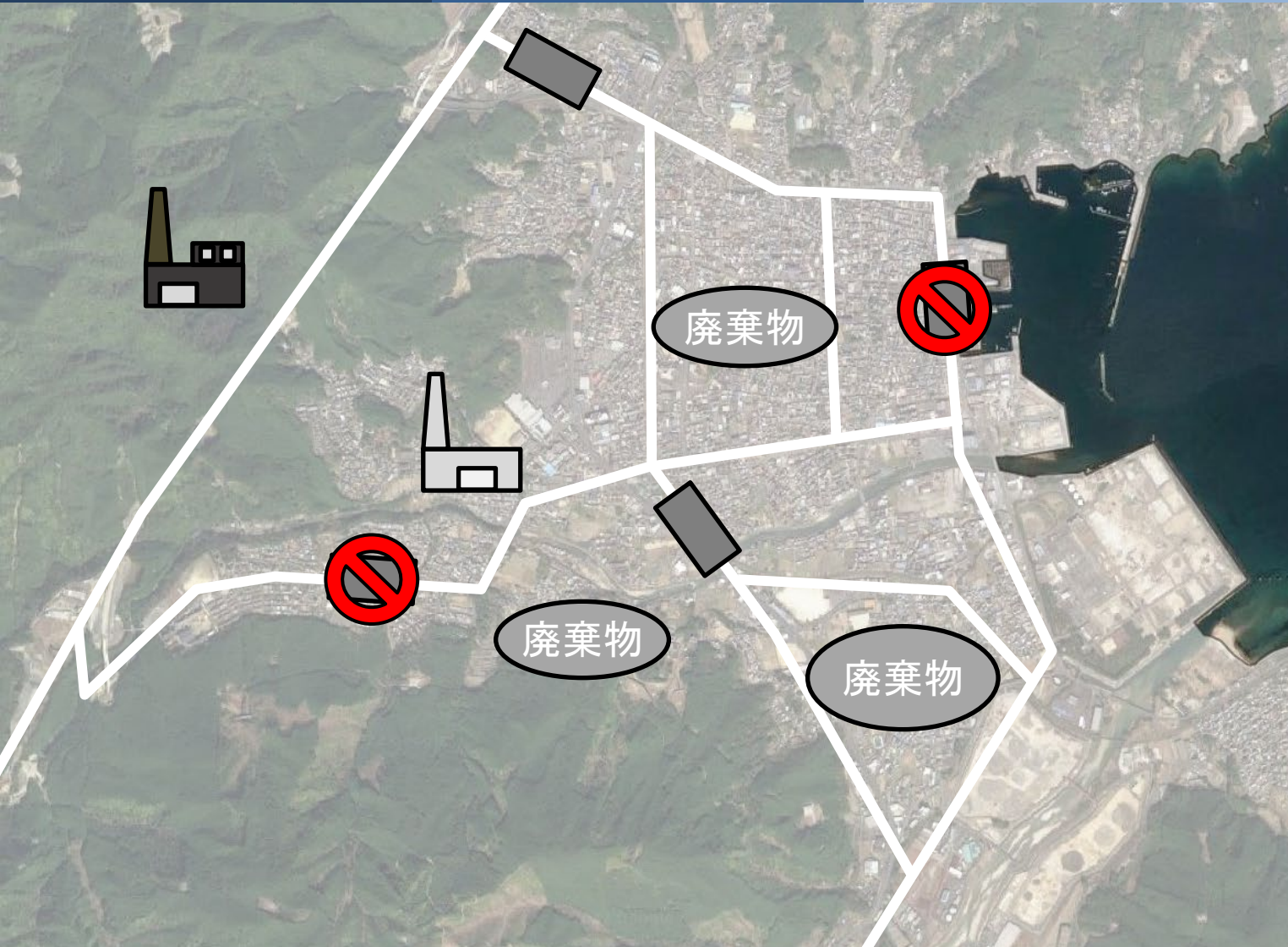
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

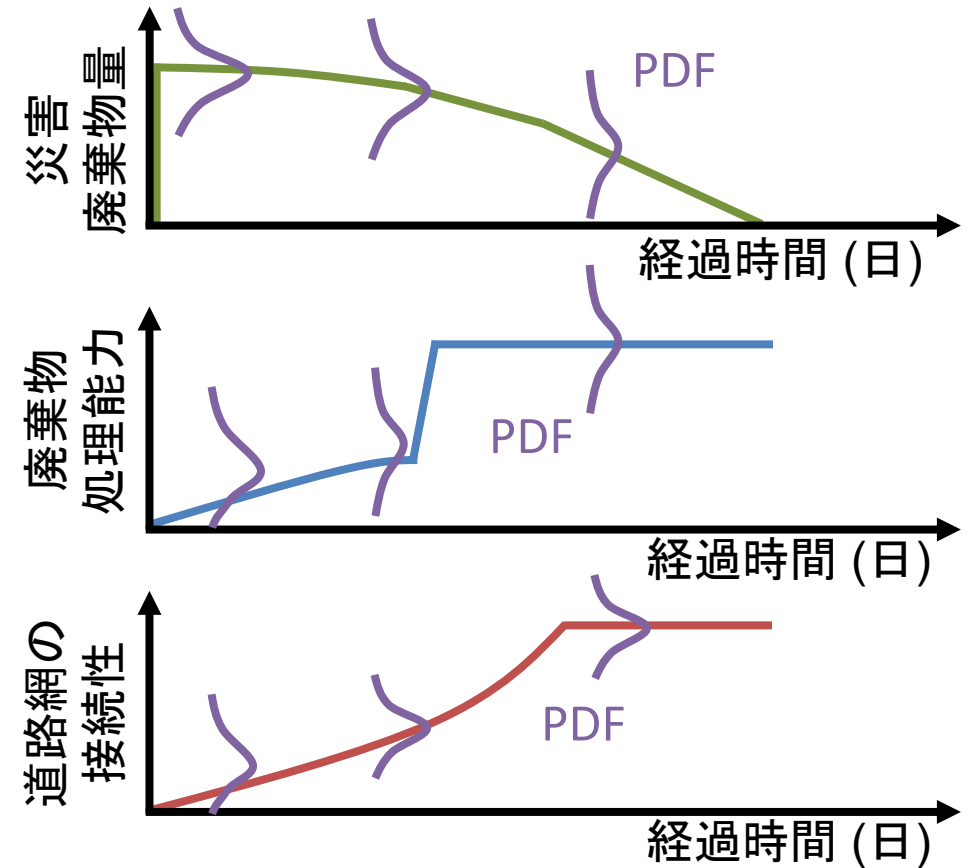
廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定



ハザード・脆弱性・復旧性の推定に関わる不確定性を考慮した確率密度分布(PDF)の推定





提案手法

Since 1882



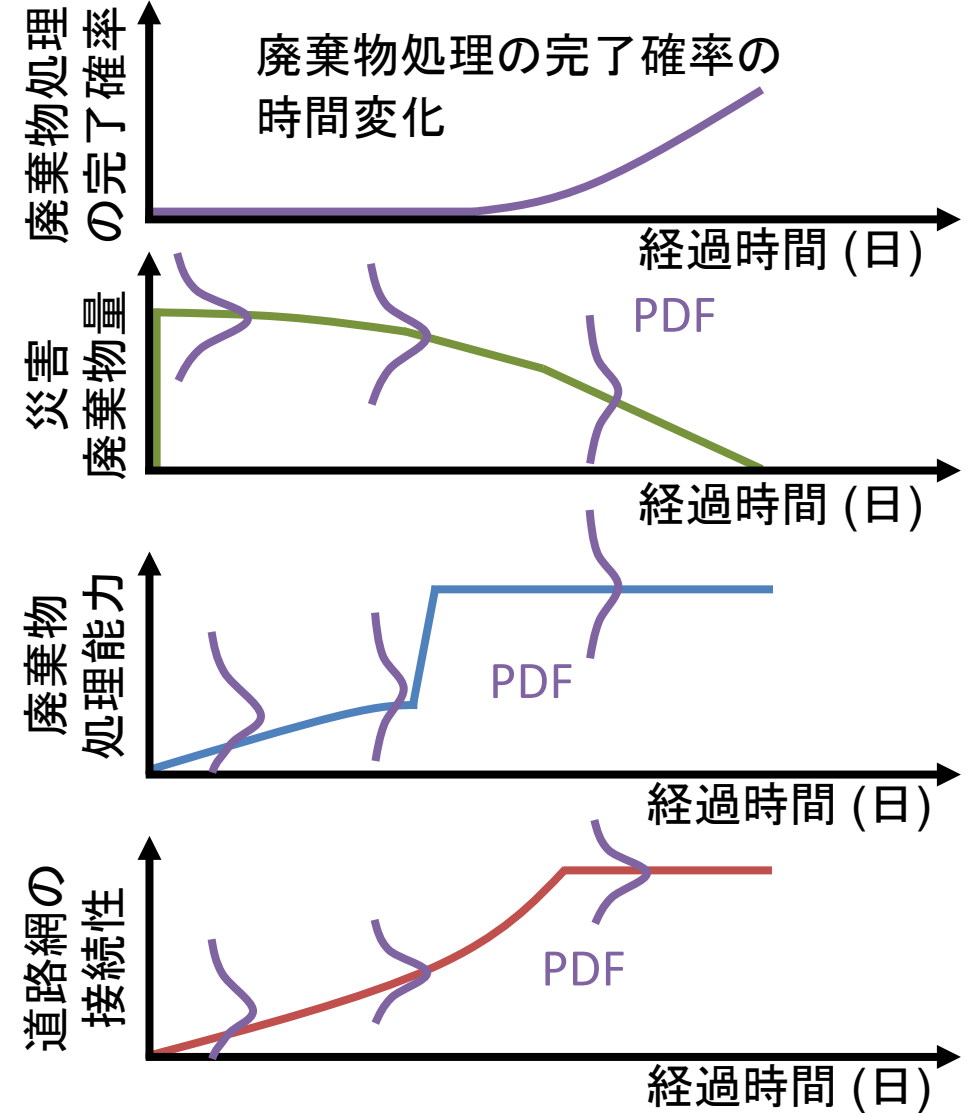
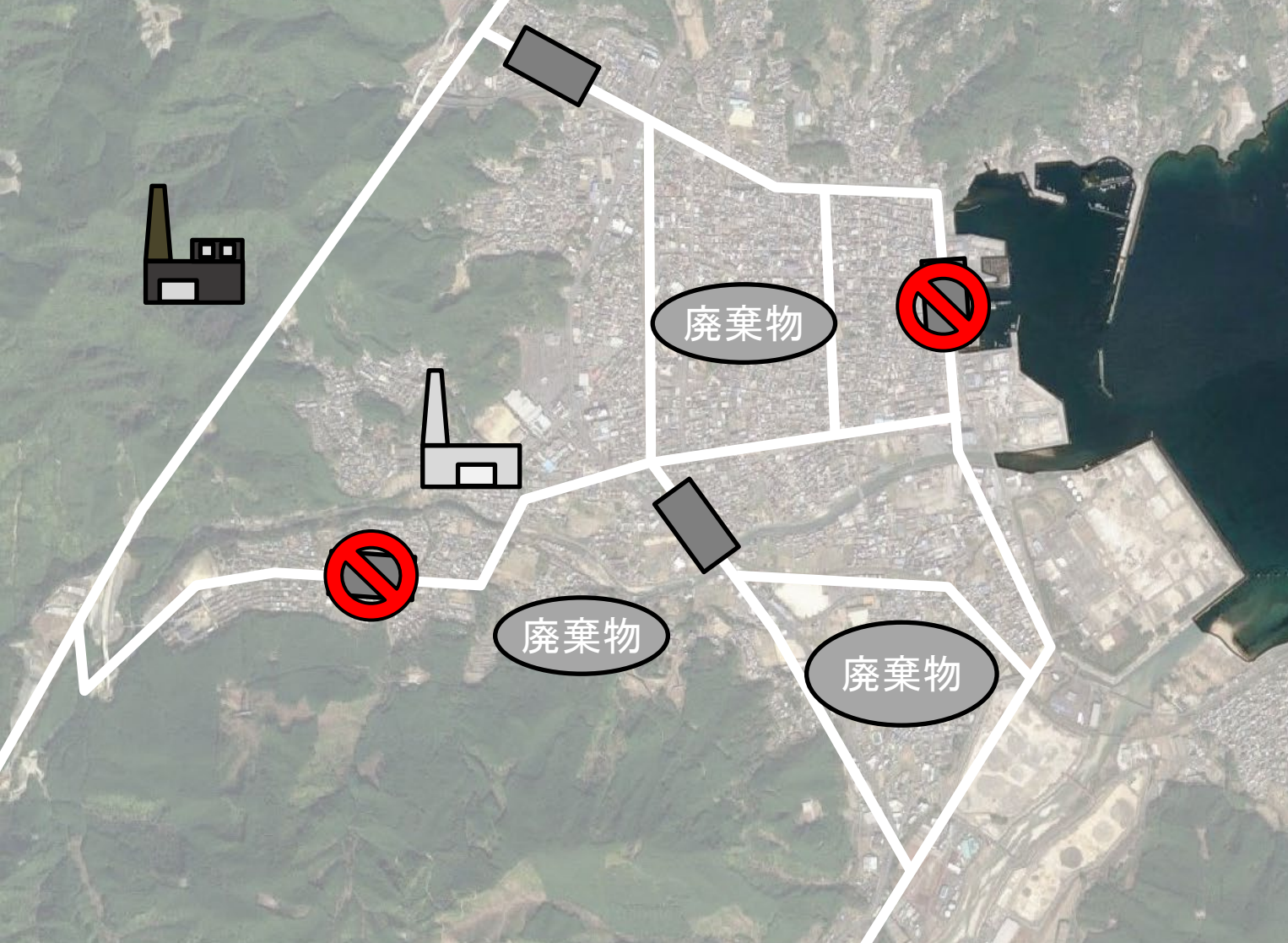
確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定





Since 1882

ケーススタディ





Since 1882

ケーススタディ



確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

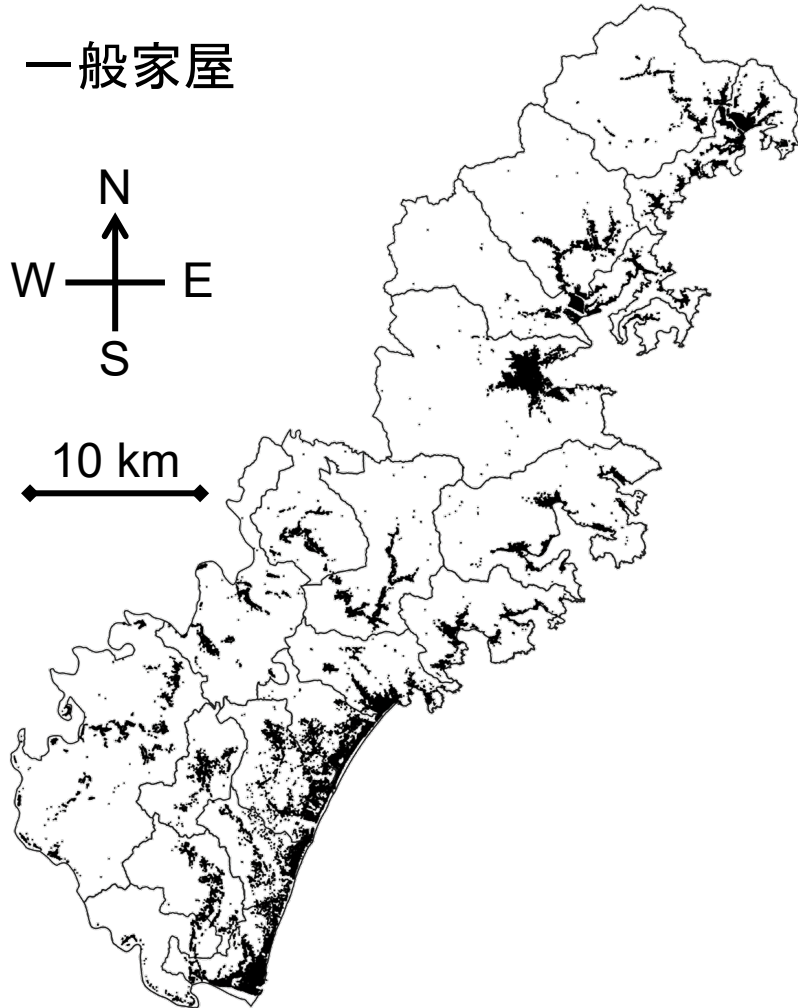
廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

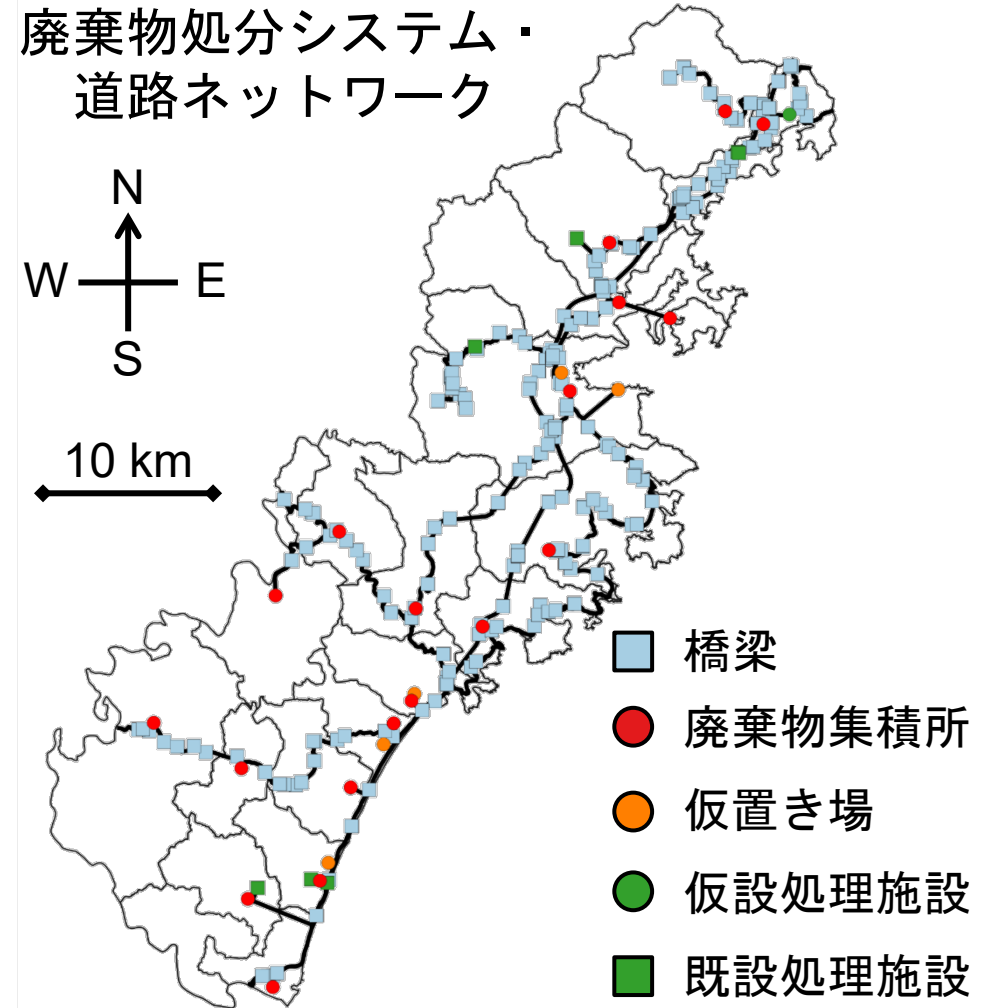
災害廃棄物の除去時間の推定

三重県・東紀州地域（総面積：990km²）

一般家屋



廃棄物処分システム・道路ネットワーク





Since 1882

ケーススタディ



確率論的地震動・津波ハザード解析

災害廃棄物量のリスク評価

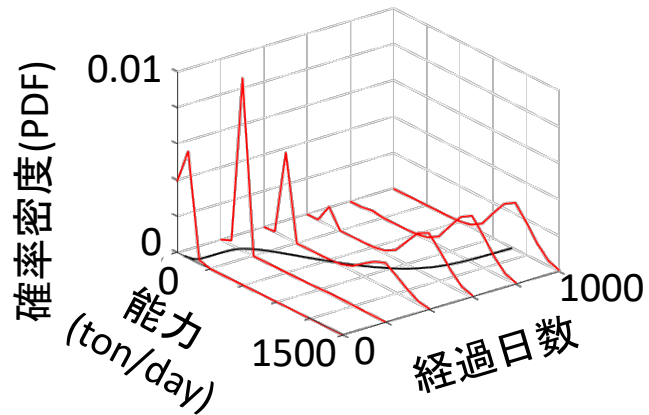
廃棄物処理システムのレジリエンス性能

道路ネットワークのレジリエンス性能

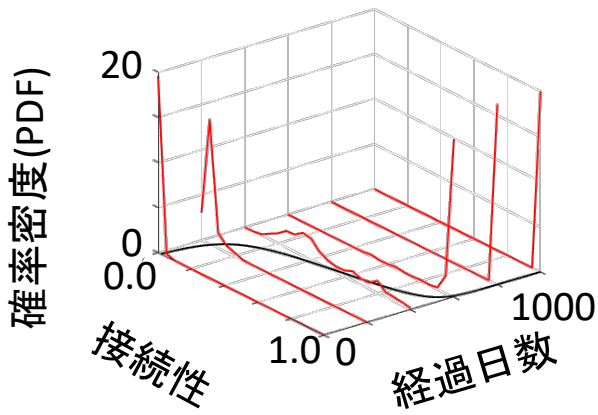
災害廃棄物の除去時間の推定

- 廃棄物処理システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮して三重県紀州地域での災害廃棄物処理時間を推定
- 道路ネットワークの性能低下を無視すると、災害廃棄物処理に要する時間を過小評価する可能性が示唆
- 両システムの復旧性を向上することで、より迅速な災害廃棄物処理が可能

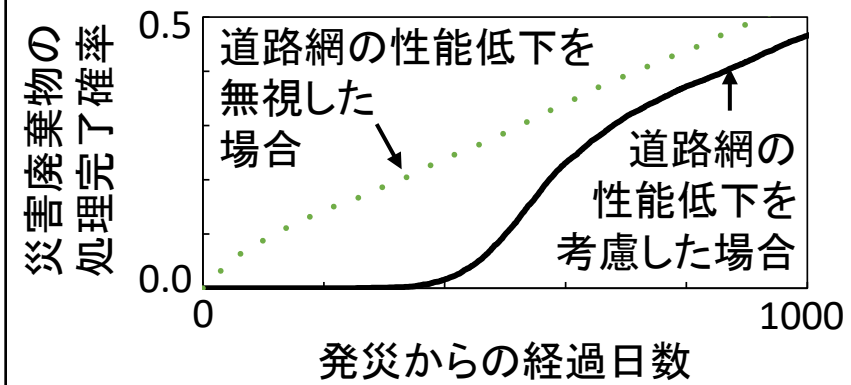
廃棄物処理システム



道路ネットワークシステム



廃棄物処理の完了確率





Since 1882

ケーススタディ



確率論的地震動・津波ハザード解析

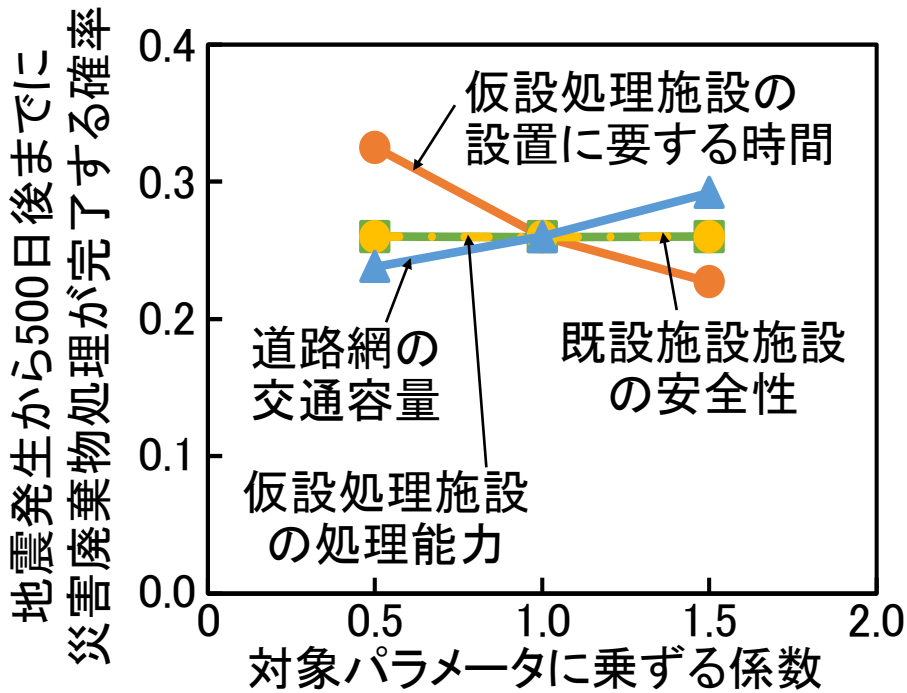
災害廃棄物のリスク評価

廃棄物処理システムのレジリエンス性能

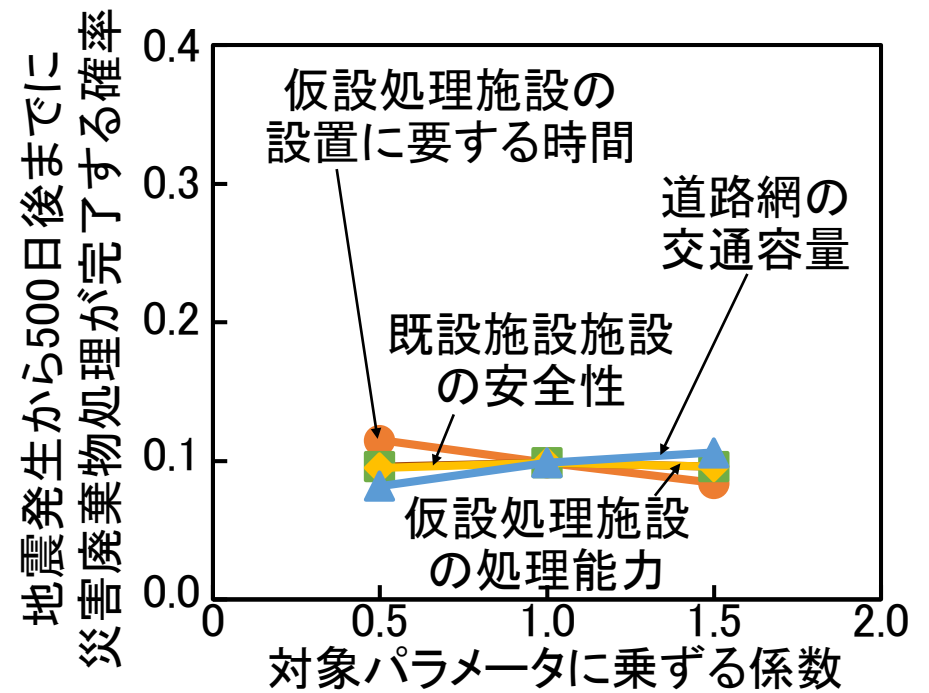
道路ネットワークのレジリエンス性能

災害廃棄物の除去時間の推定

- 廃棄物の輸送・処理に関連するパラメータに対して、感度解析を実施
(4パラメータの影響度: 仮設施設の設置に要する時間 > 道路網の容量 > 既設施設の安全性 = 仮設施設の処理能力)
- 道路ネットワーク上の橋梁の耐震性の高低(兵庫県南部地震以後の耐震基準に従うか否か)によって、同じ対策を施した場合でも、その効果が大きく異なる→両システムの相互依存性を考慮することが不可欠



(a) 道路ネットワーク上の橋梁の耐震性が高い場合



(b) 道路ネットワーク上の橋梁の耐震性が低い場合



Since 1882

災害廃棄物の量と処理時間に関する成果



結論

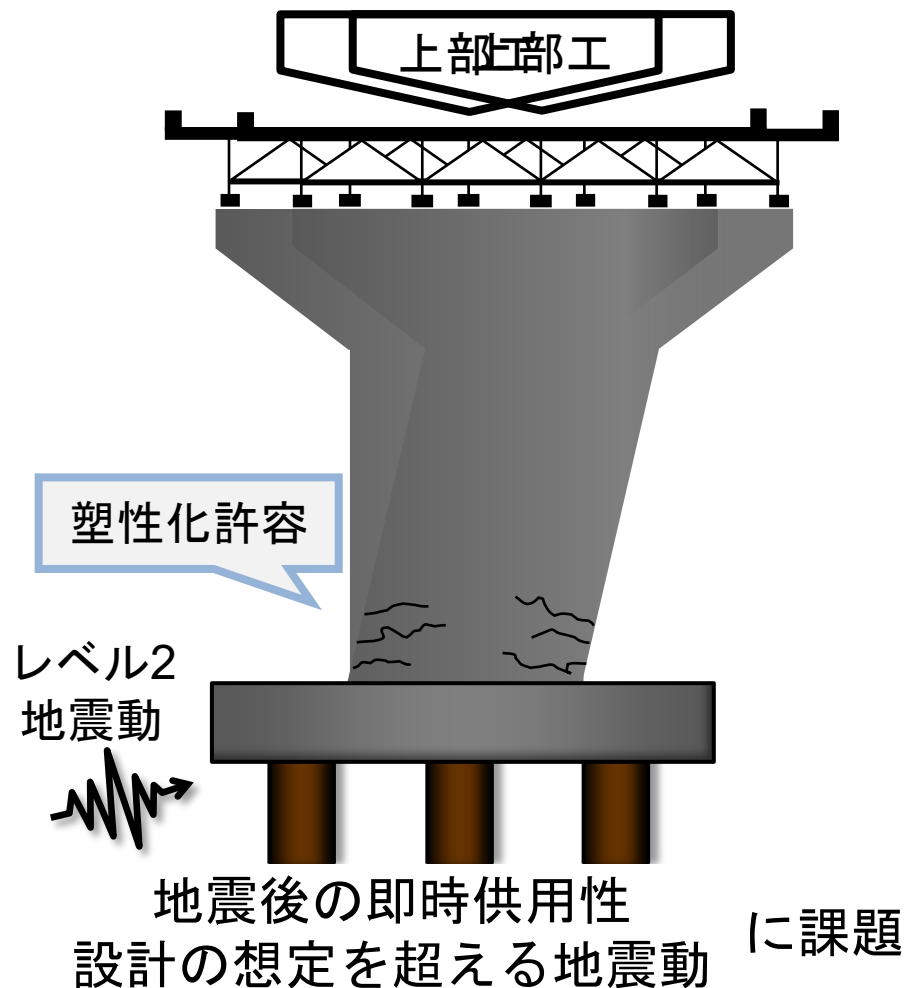
- 地震動と津波により生じる災害廃棄物量のリスク評価を実施した
- 既設処理施設の損傷から復旧と仮設焼却施設の設置を考慮した
災害廃棄物処理システムの処理能力に関するレジリエンス評価手法を構築した
- 地震動と津波を連続して受ける橋梁の損傷とその復旧を考慮した
道路ネットワークの接続性に関するレジリエンス評価手法を確立した
- レジリエンス指標として災害廃棄物の除去時間を確率論的に推定した

今後の課題

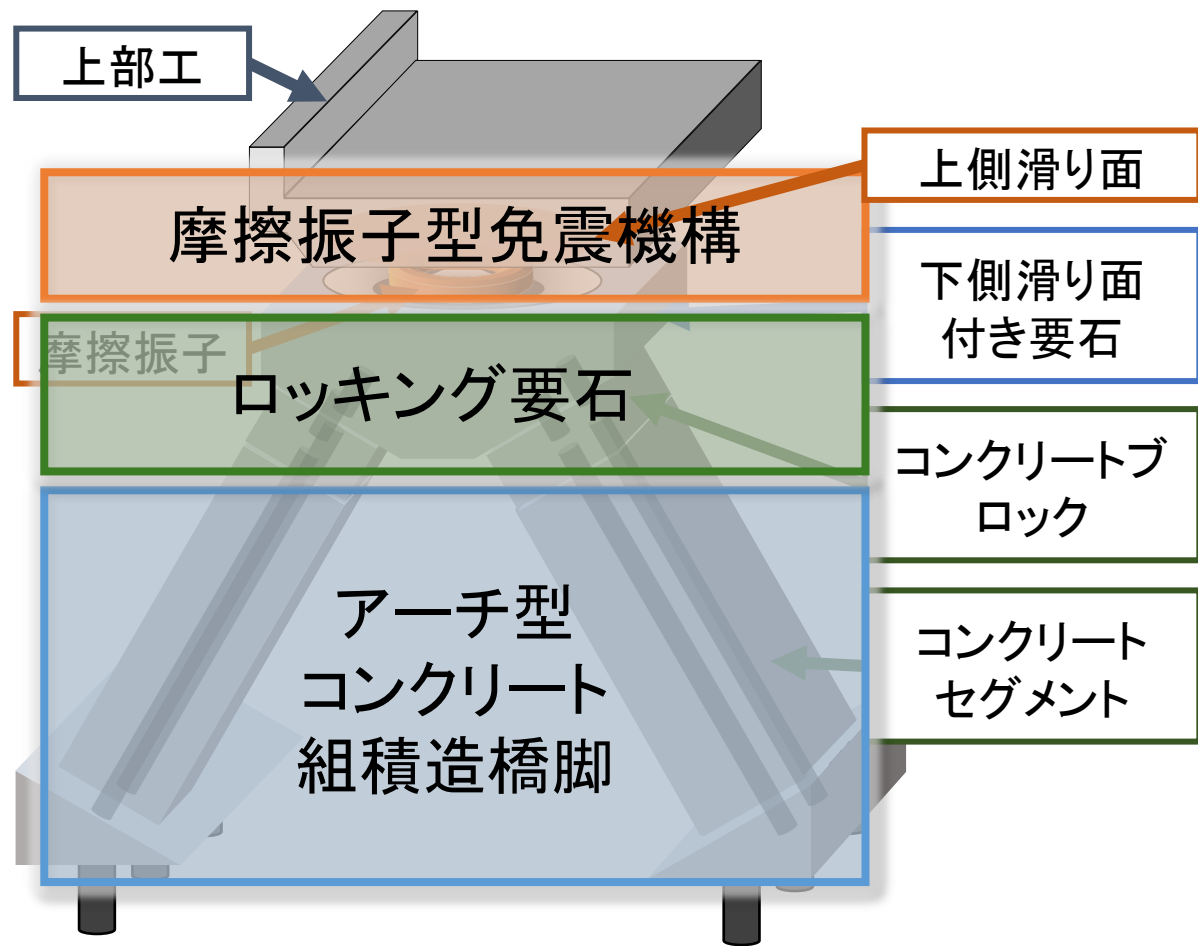
- 構築した災害廃棄物の除去時間推定手法を活用し、地域のレジリエンス強化を目的とした最適化問題を解くことで、適切な災害廃棄物対策を提案する



一般的なRC橋梁



昨年度の提案構造(立体図)

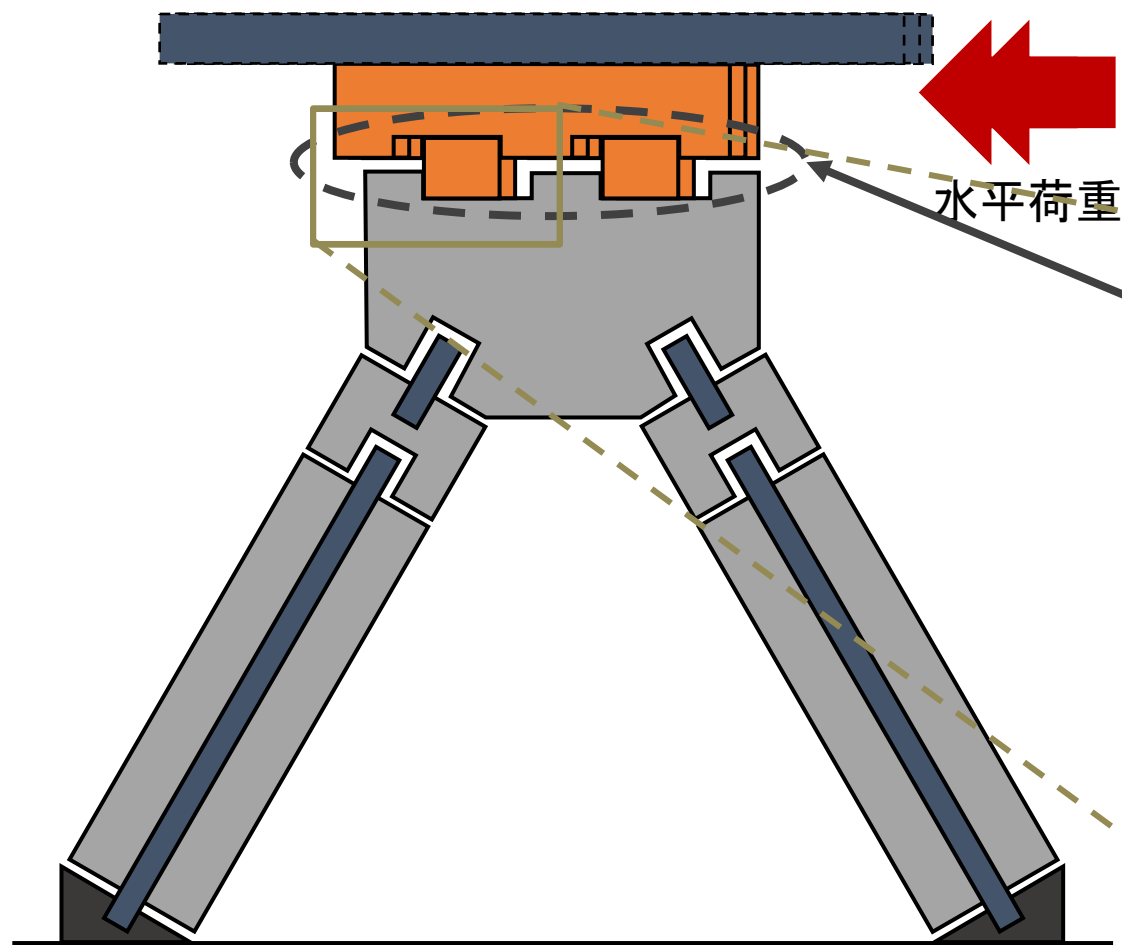


現行の耐震設計法（二段階設計法）からの脱却が求められている

提案下部構造



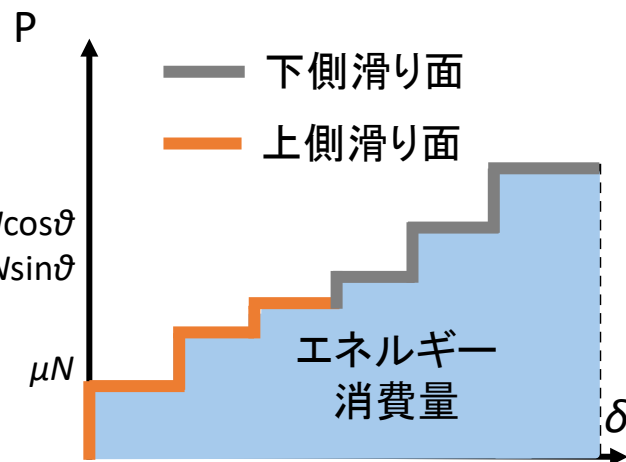
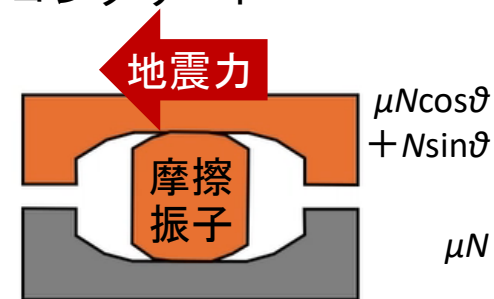
昨年度の提案構造（断面図）



提案構造に期待する地震時挙動

1. 摩擦振子が上側滑り面を滑る
 2. 摩擦振子が下側滑り面を滑る
 3. 上下滑り面に壁を設けることで落橋を防ぐ
- 橋脚に作用する上部工の **地震時慣性力を低減**

- : ナイロン (低摩擦)
- : コンクリート

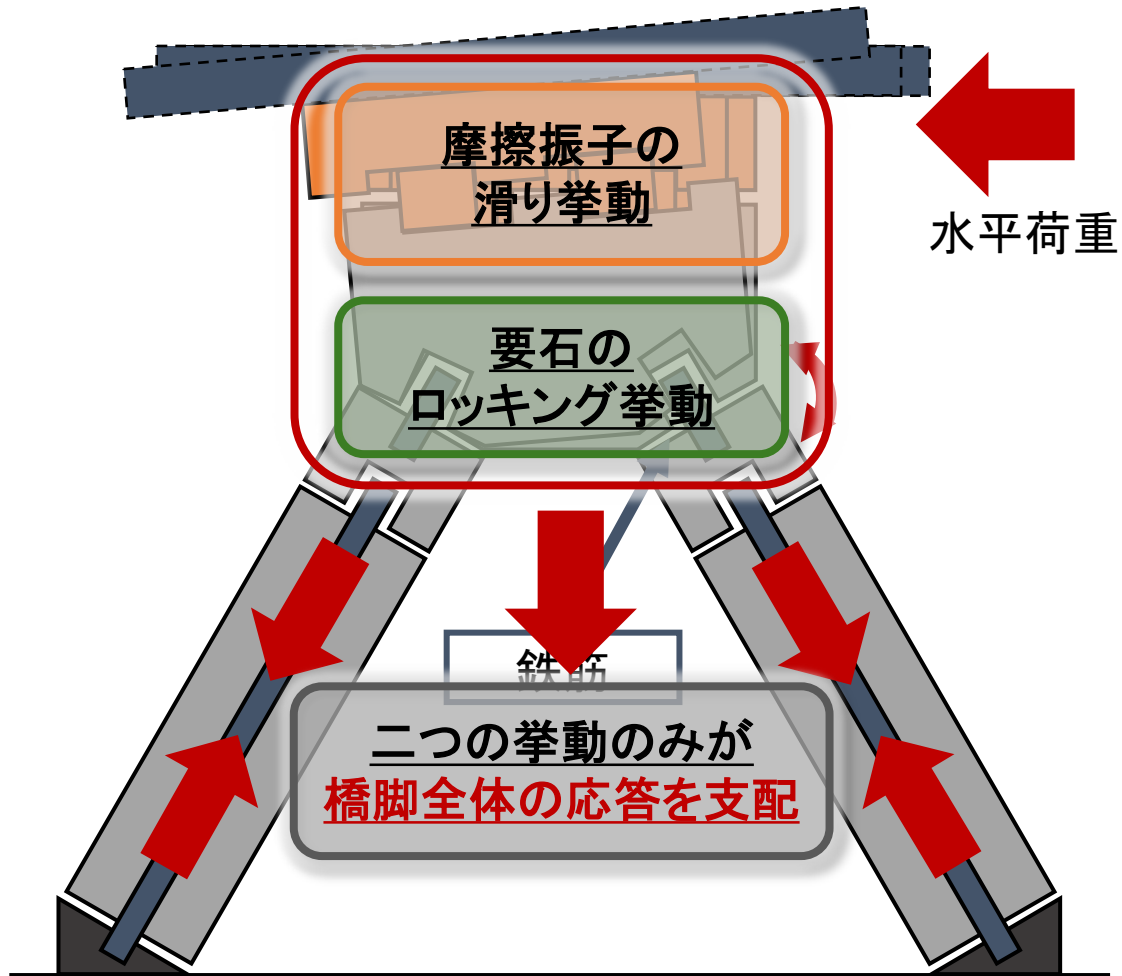


摩擦振子の滑りによって橋脚に作用する **地震時慣性力を低減** & 滑り面の壁によって **落橋を防止**

提案下部構造



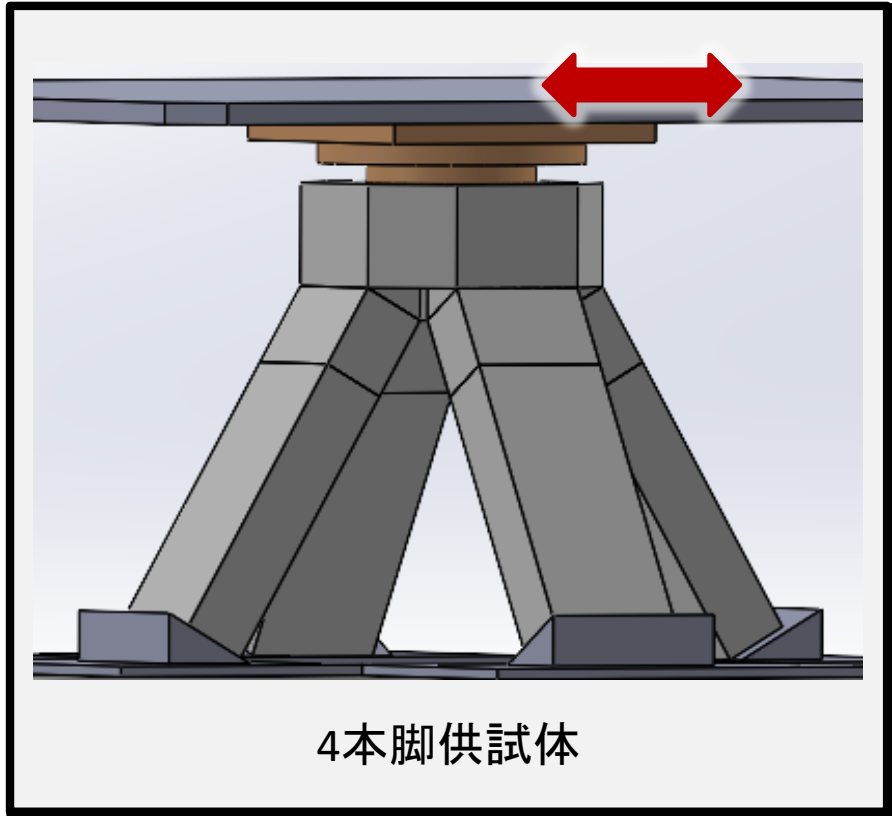
昨年度の提案構造（断面図）



提案構造に期待する地震時挙動

1. 摩擦振子が上側滑り面を滑る
 2. 摩擦振子が下側滑り面を滑る
 3. 上下滑り面に壁を設けることで落橋を防ぐ
 4. 摩擦振子の滑りの限界変位到達後、要石の回転（**ロック挙動**）への移行により脆性的な崩壊に至ることを防ぐ
 5. 自重によって元の状態へと戻る
 6. 滑り挙動中、およびロック挙動中に橋脚部へと作用する力は**圧縮のみ**
- 橋脚に作用する上部工の**地震時慣性力を低減**

滑り挙動・ロック挙動のみが橋脚全体の応答を支配することで、**非線形弾性応答**を実現



昨年度の成果

- ✓ 水平一方向の静的実験(正負交番載荷実験)を実施
- ✓ 摩擦振子の滑りによる高い免震性能を確認
- ✓ 滑りの限界変位到達後, 要石のロッキング挙動へと移行することで, 橋脚は常に弾性状態を維持

昨年度の提案構造における課題

- ✓ 水平二方向への動的載荷(震動実験)に対する応答が未知
- ✓ 衝突力や残留変位に関する検討も不十分

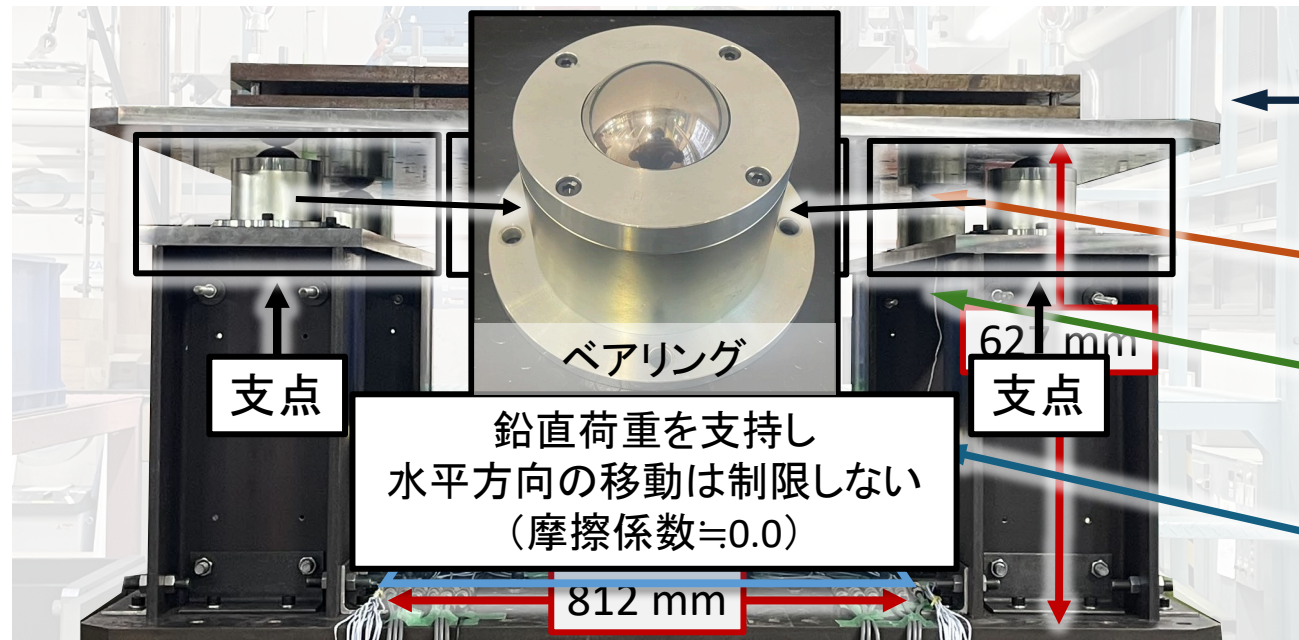
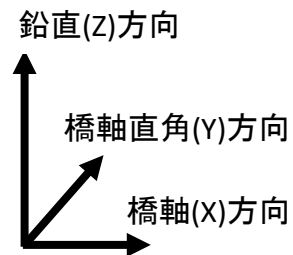
今年度の目的

- ✓ 水平二方向実地震動を受ける提案構造の地震時挙動を震動実験により確認する
- ✓ 要石のロッキングは地震動強度の卓越方向によらず発生し, 二方向加震に対しても非線形弾性挙動を実現する



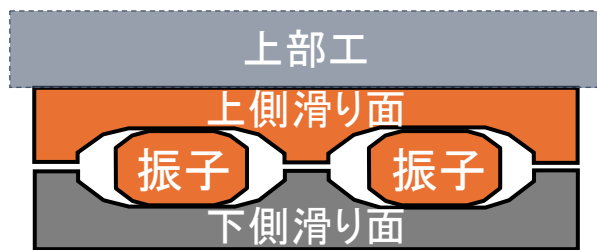
実験用橋脚模型

実橋梁の1/18



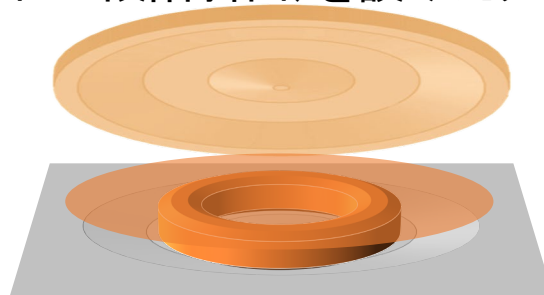
摩擦振子機構

摩擦振子の上下に滑り面(底面+二段階斜面)を設けたダブルリング摩擦滑り面



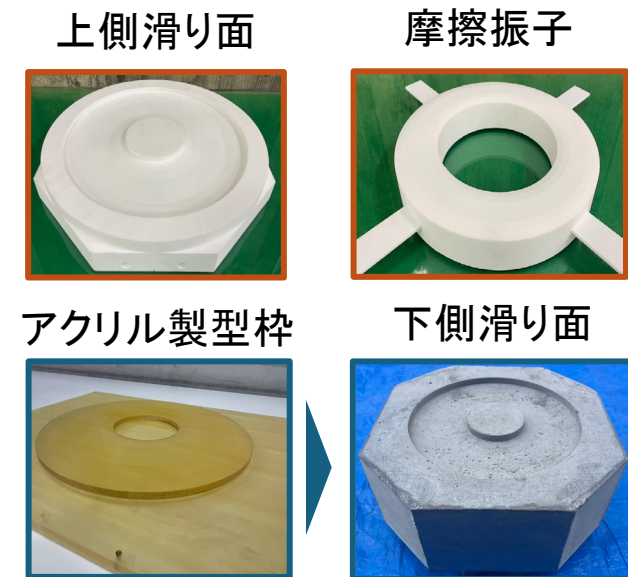
断面図

■ : ナイロン(低摩擦)



立体図

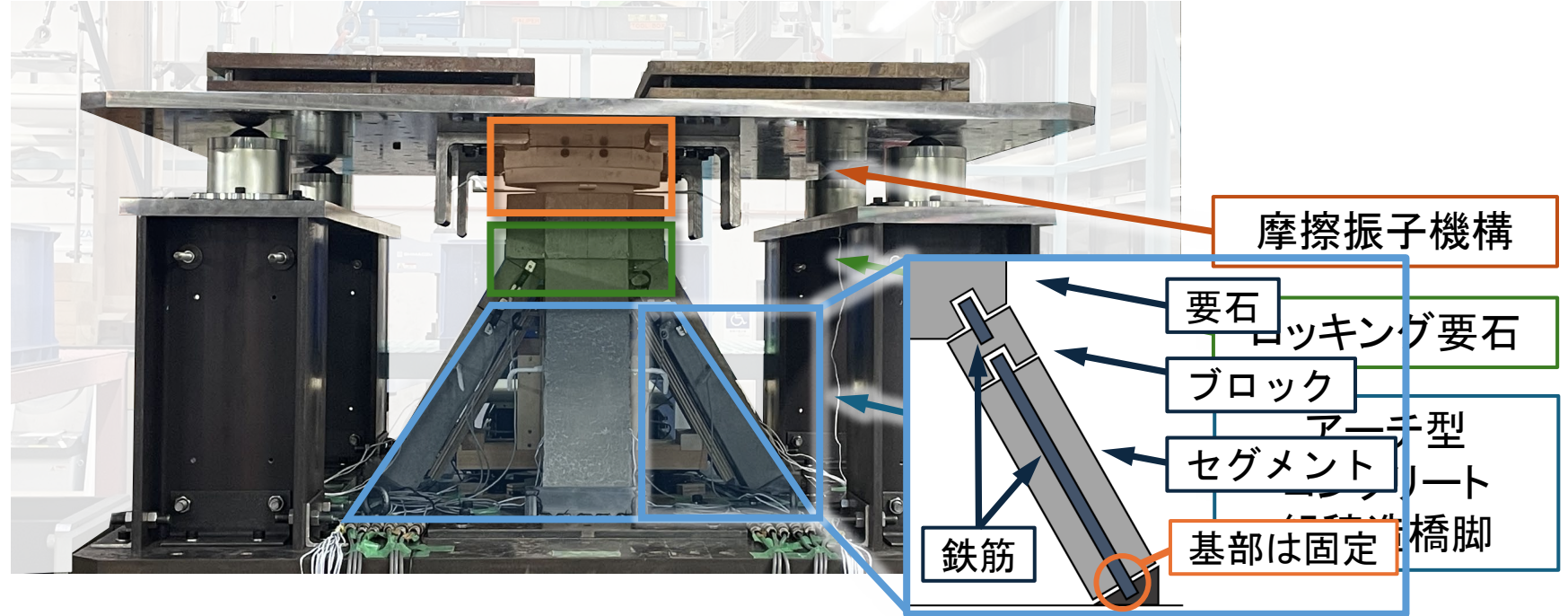
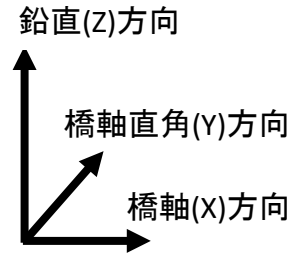
■ : コンクリート





実験用橋脚模型

実橋梁の1/18



■ 摩擦振子機構

摩擦振子の上下に滑り面(底面+二段階斜面)を設けたダブルリング摩擦滑り面

■ アーチ型コンクリート組積造橋脚(橋脚本数:3本または4本)

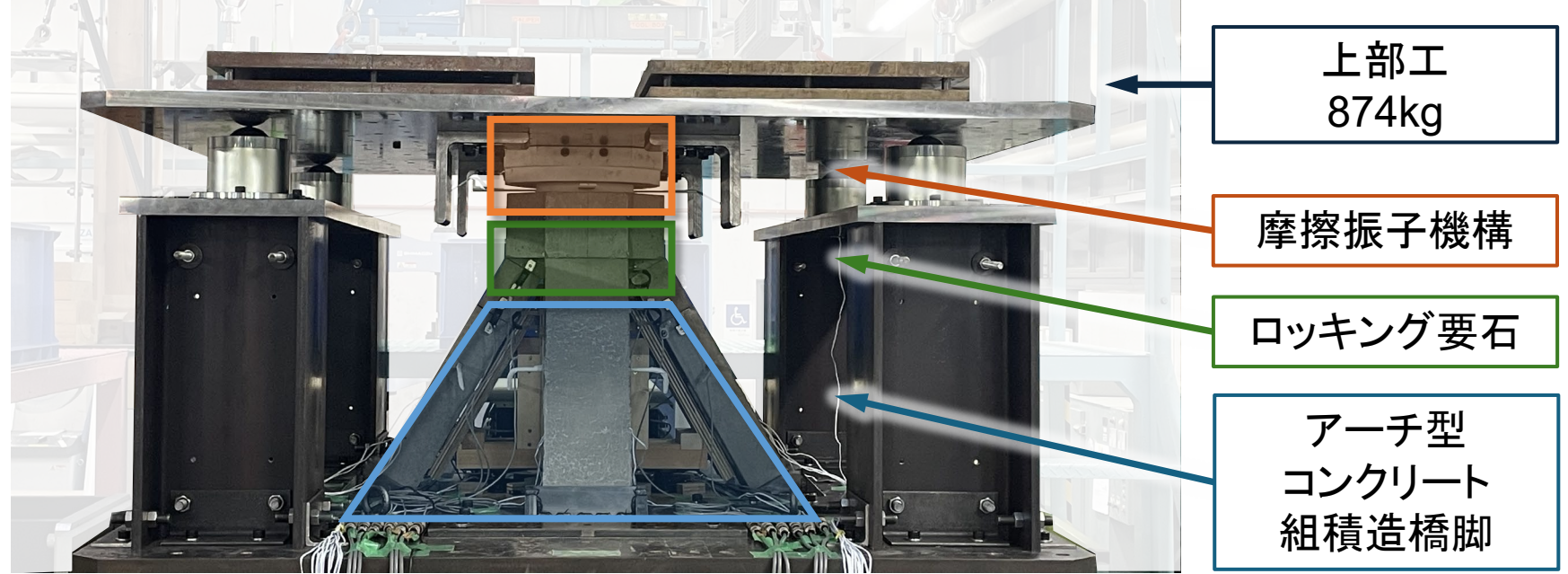
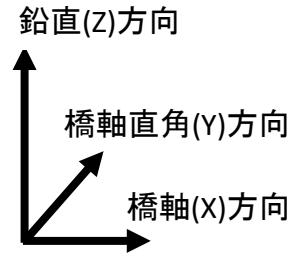
非接続の各部材間に鉄筋がアンボンドの状態で挿入されたアーチ機構

提案構造に期待する挙動(摩擦振子の滑り挙動→ロッキング挙動)が二方向の動的載荷においても方向依存性なく、同様に発揮されることを期待する



実験用橋脚模型

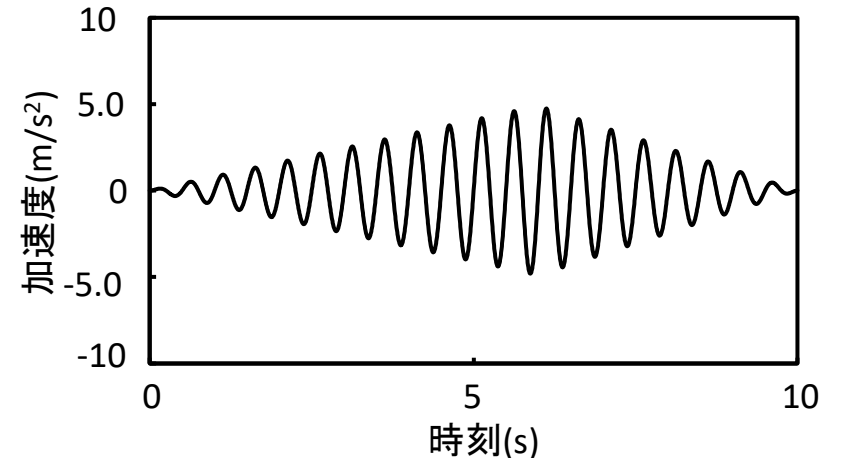
実橋梁の1/18



➤ 入力波

| | | |
|------|-----|---------------------------|
| 橋脚本数 | | 3本, 4本 |
| 入力方向 | | 水平一方向, 水平二方向 |
| 入力波 | 正弦波 | 2.0Hz, 最大PGA0.21~0.34g |
| | 地震波 | 【兵庫県南部地震】 【東北地方太平洋沖地震】 |

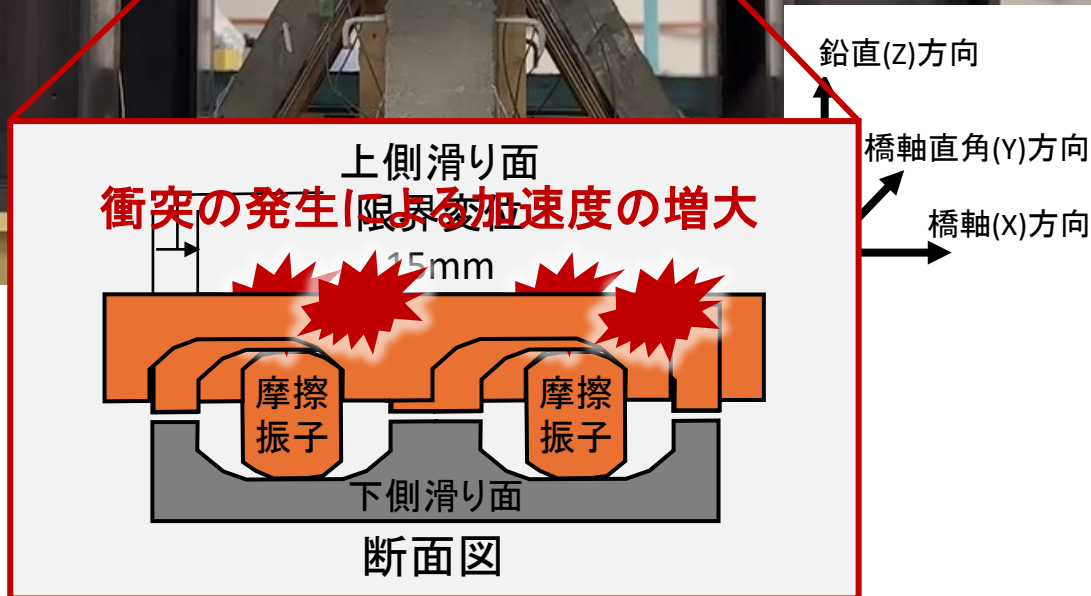
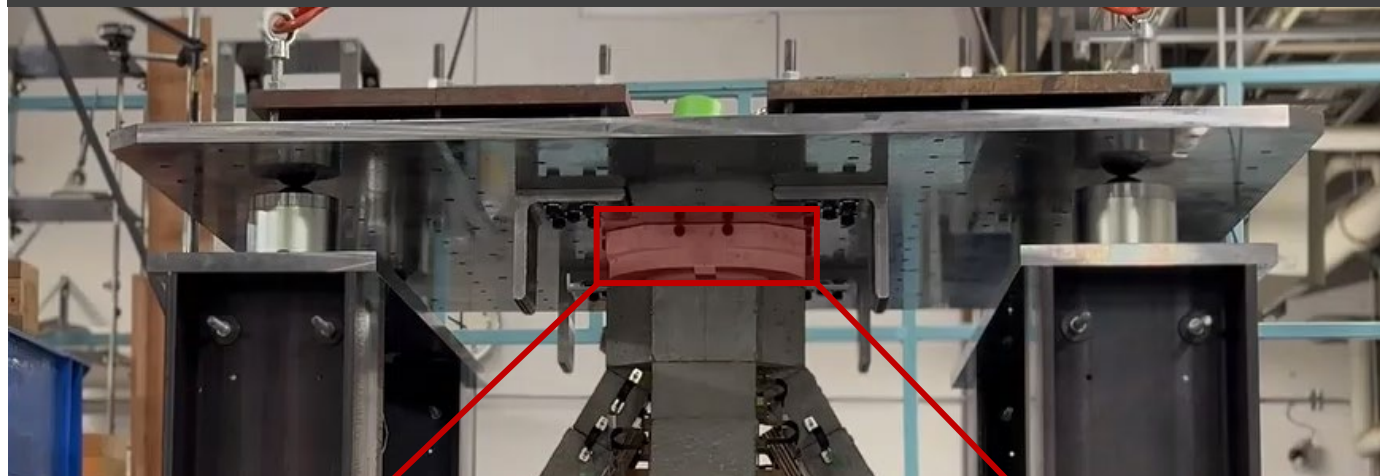
✓ 正弦波: 規則的な波 (基本的動特性の確認)



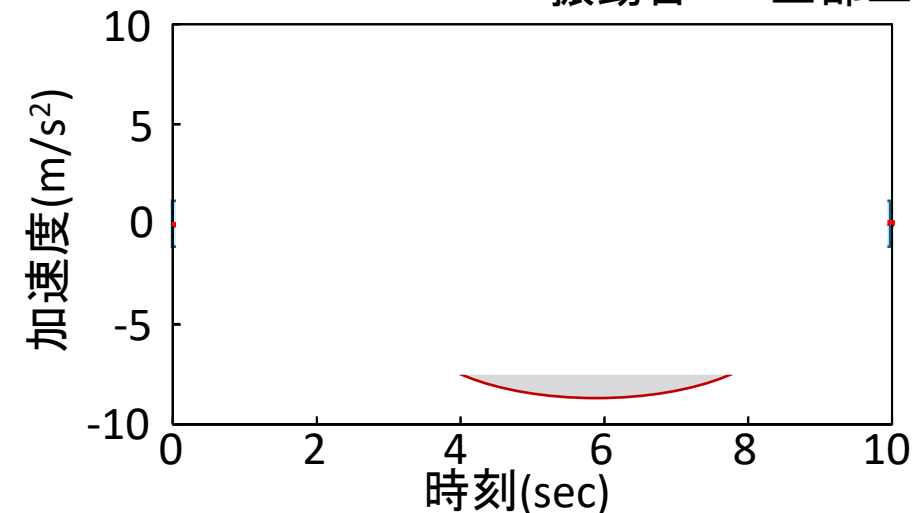
実験結果：一方向正弦波



4本脚供試体 水平一方向正弦波
(周波数2.0Hz, 最大PGA0.34g)



➤ X方向加速度時刻歴 — 振動台 — 上部工



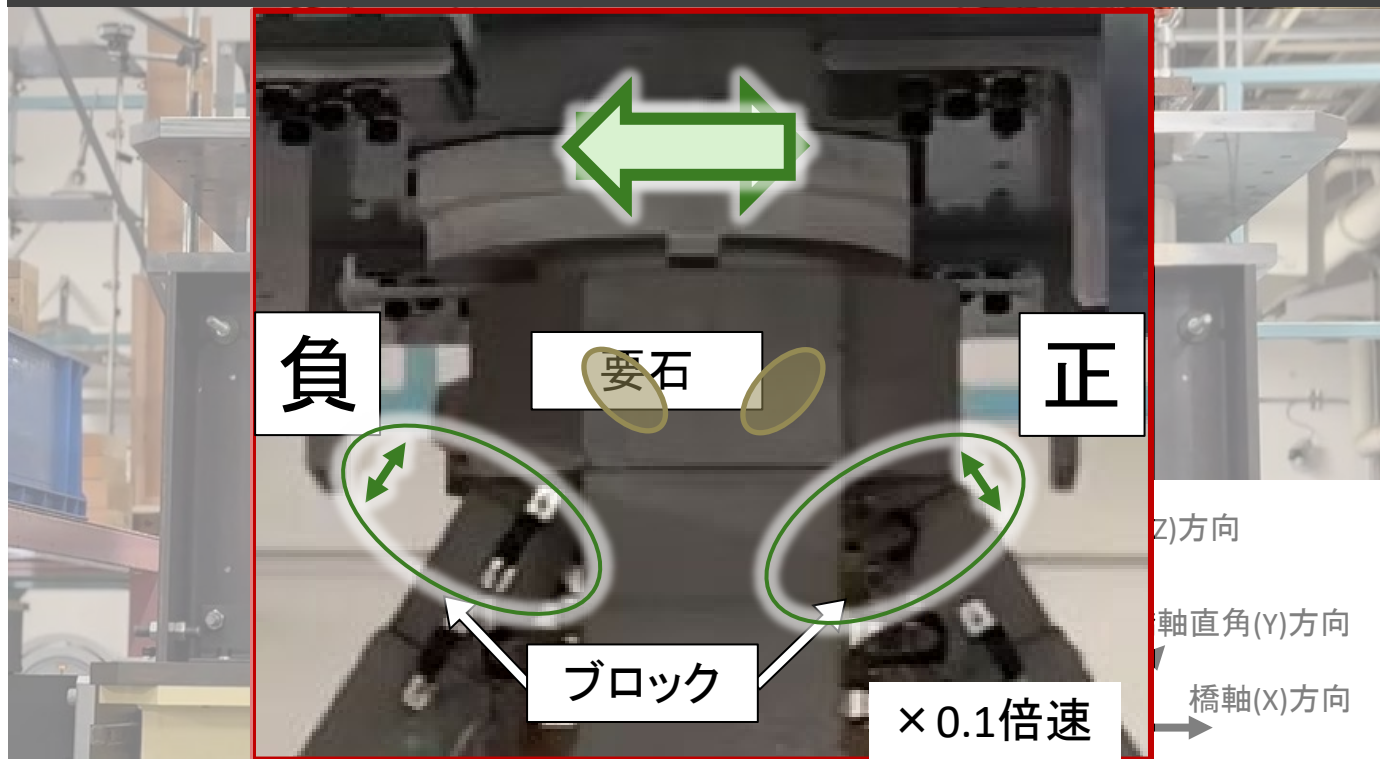
- ✓ 摩擦振子型免震機構による
応答加速度の低減効果を確認
- ✓ 摩擦振子が滑り面の壁に衝突する際に
上部工加速度が急上昇する現象も確認

そのような加速度の増大に対しても
橋脚は安定した状態を維持

実験結果：一方向正弦波



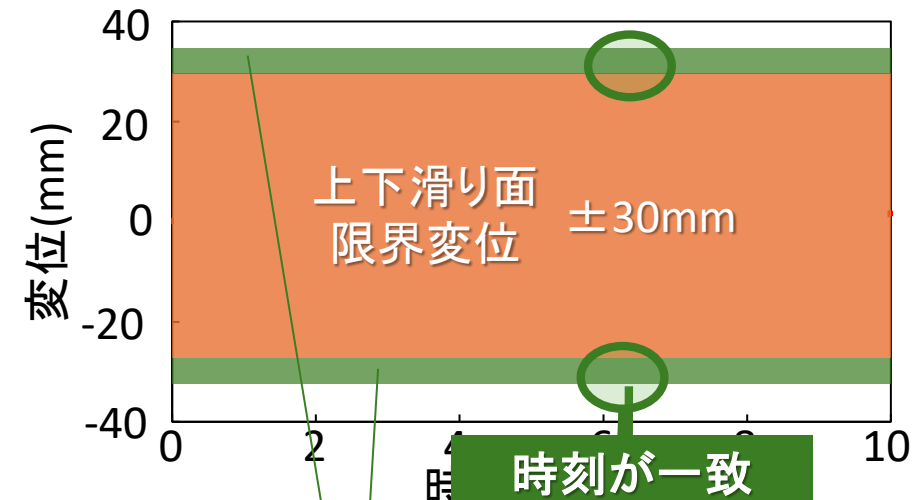
4本脚供試体 水平一方向正弦波
(周波数2.0Hz, 最大PGA0.34g)



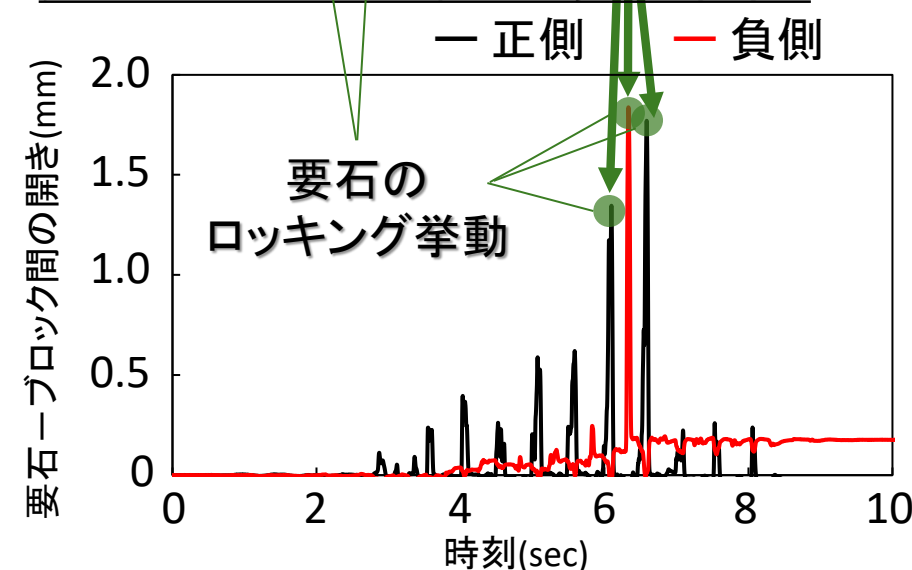
動的実験下においても、滑りの限界変位到達後にのみ
ロッキング挙動へと移行することを確認

上部工の変位(橋脚全体の応答)は
滑り挙動と**ロッキング挙動**のみが支配

➤ X方向変位時刻歴



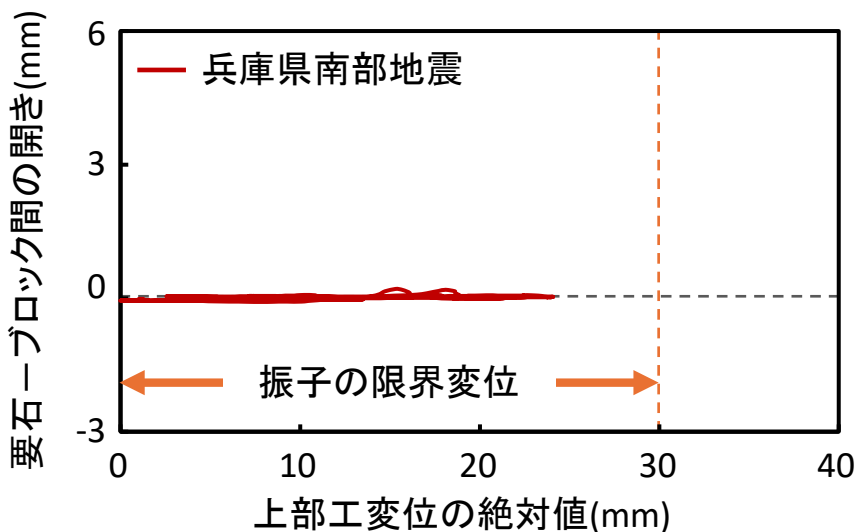
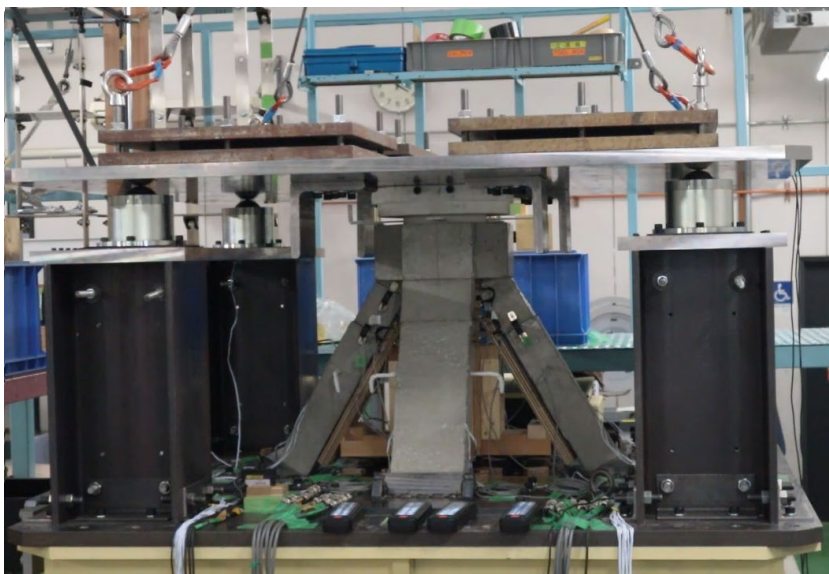
➤ 要石-ブロック間の開きの変位時刻歴



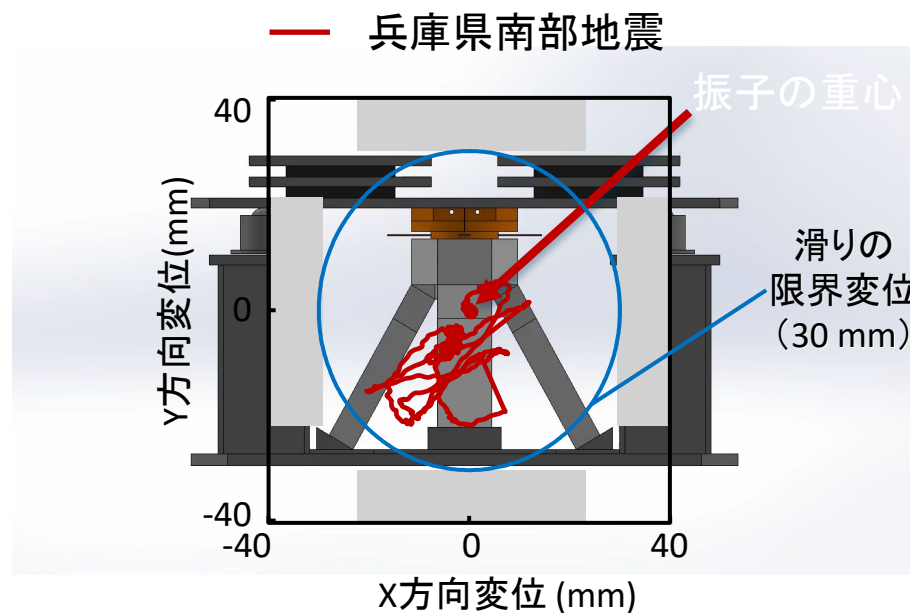
実験結果：二方向兵庫県南部地震



✓ 兵庫県南部地震



✓ 上部工の軌跡



短周期成分が卓越する地震波に対しては、
摩擦振子の滑り挙動のみが発生
(ロッキング挙動に移行しない)

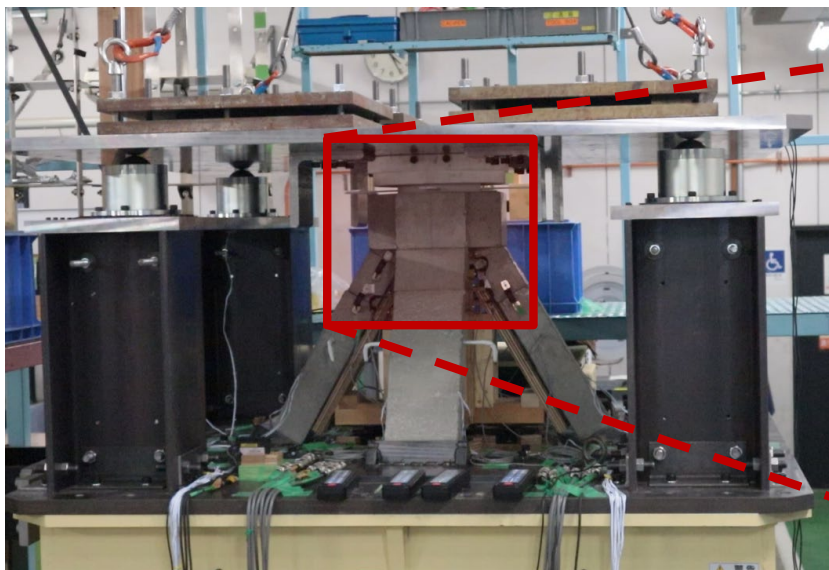


橋脚は弾性応答を維持し
安定した状態で自立した

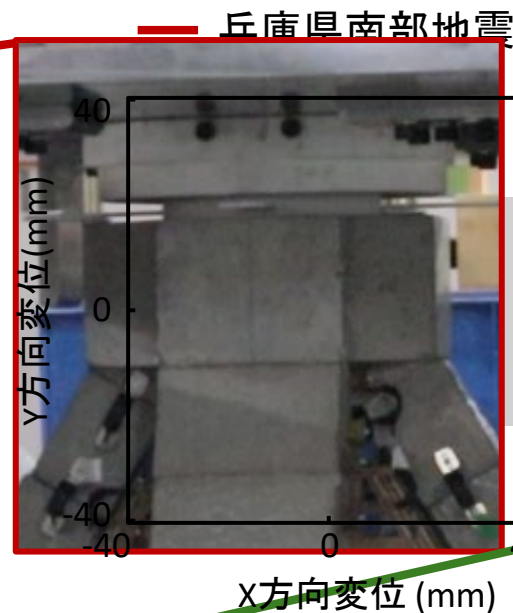
実験結果：二方向東北地方太平洋沖地震



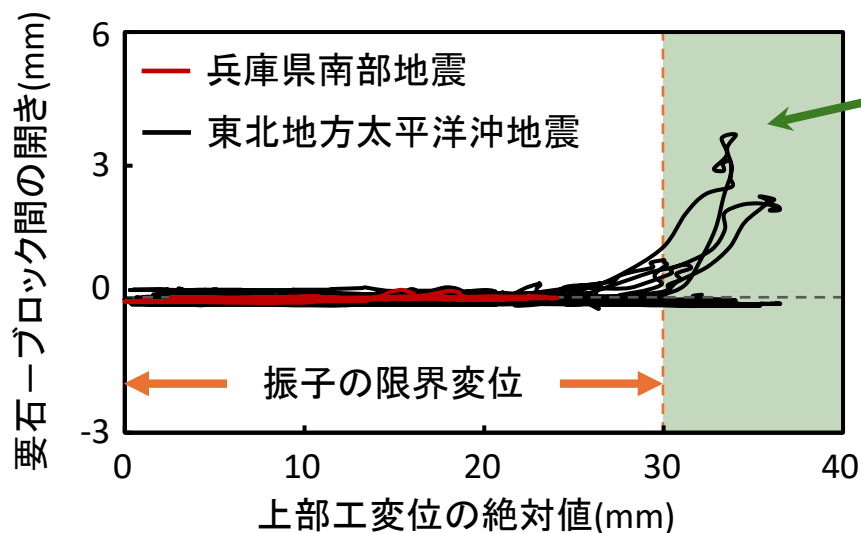
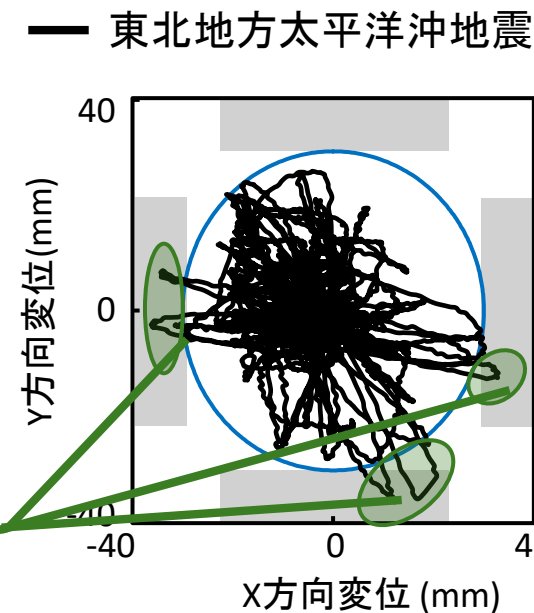
✓ 東北地方太平洋沖地震



✓ 上部工の軌跡



✓ 上部工の軌跡



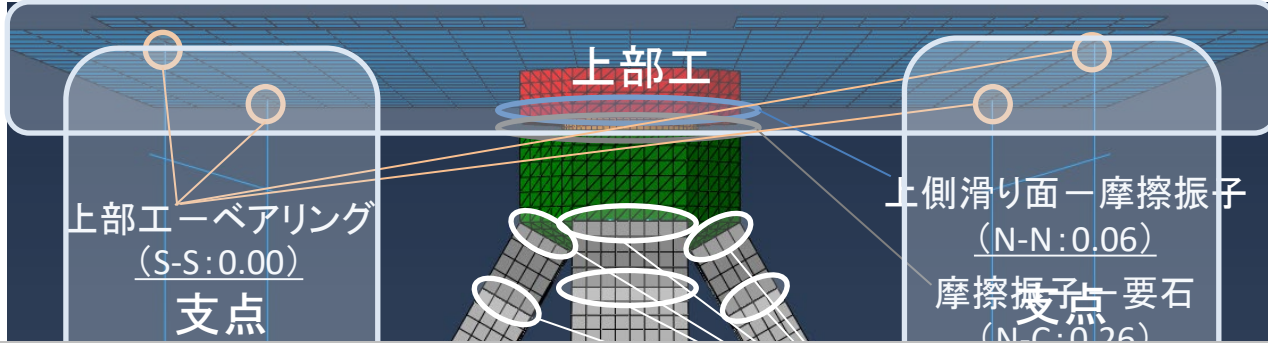
長周期成分が卓越する地震波に対しては、
摩擦振子の滑りの限界変位を超えた後
要石のロッキング挙動が発生することで
非線形弾性応答を実現

地震波の周波数特性に拠らず、提案構造は
高い耐震性能を有していることが確認された

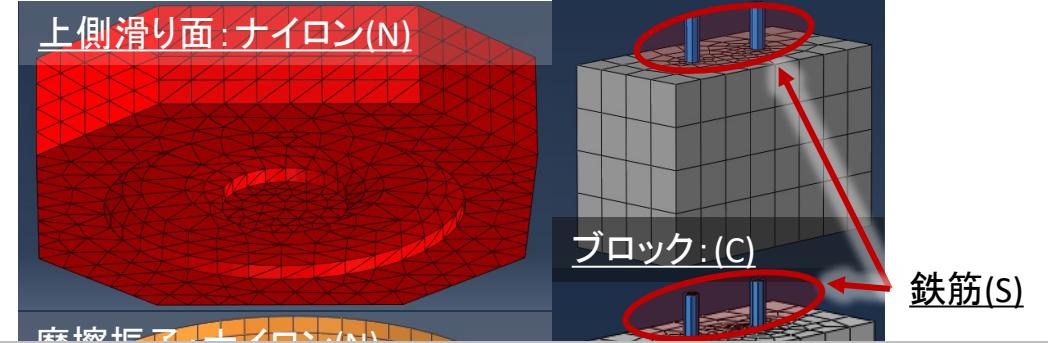
3次元有限要素解析



✓ 実験供試体全体図

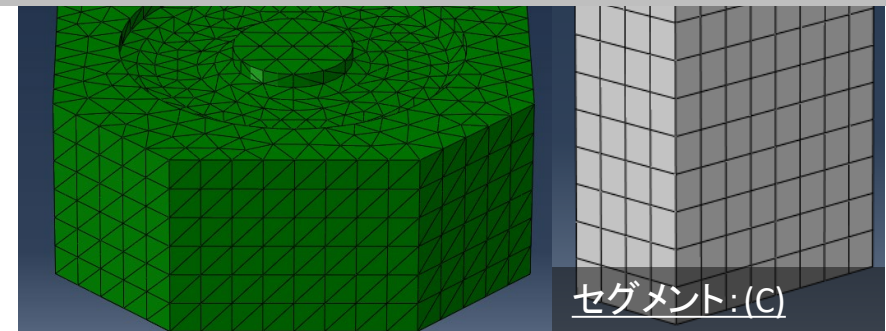


✓ 各部材



汎用構造解析ソフトの **ABAQUS** を用いた3次元有限要素解析によって
提案構造の耐震性能を解析的に検証する

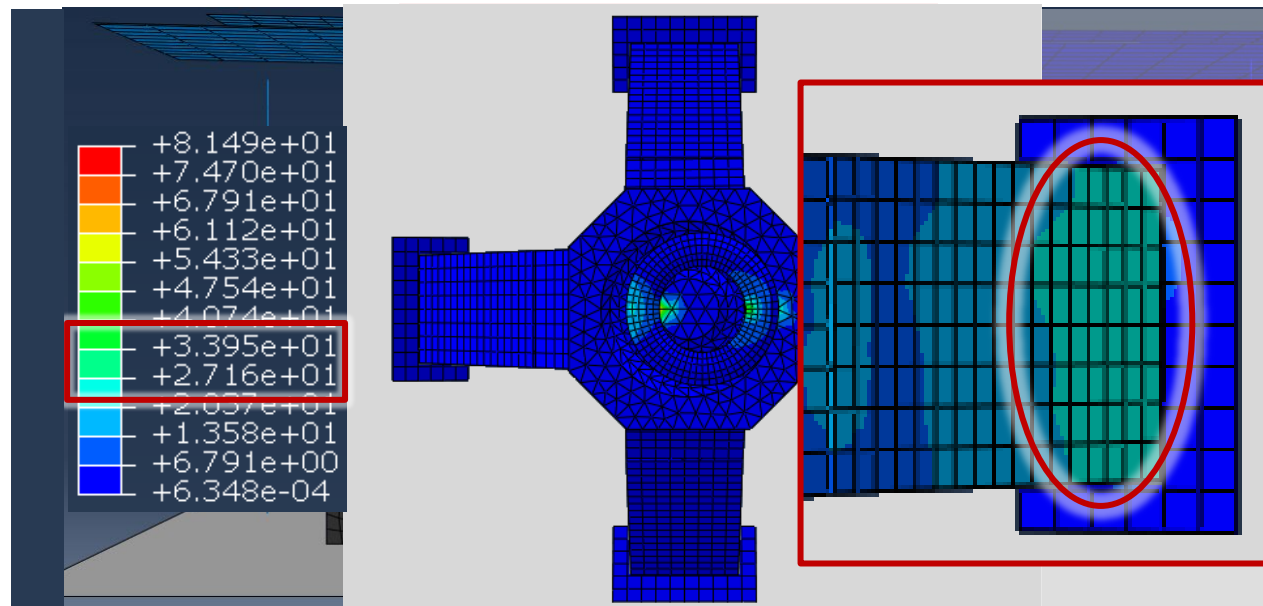
- 一方向正弦波
一方向の規則的な波の入力による
提案構造の解析モデルの妥当性の検証
- 二方向東北地方太平洋沖地震
二方向実地震波入力による
提案構造の耐震性能の解析的な検証



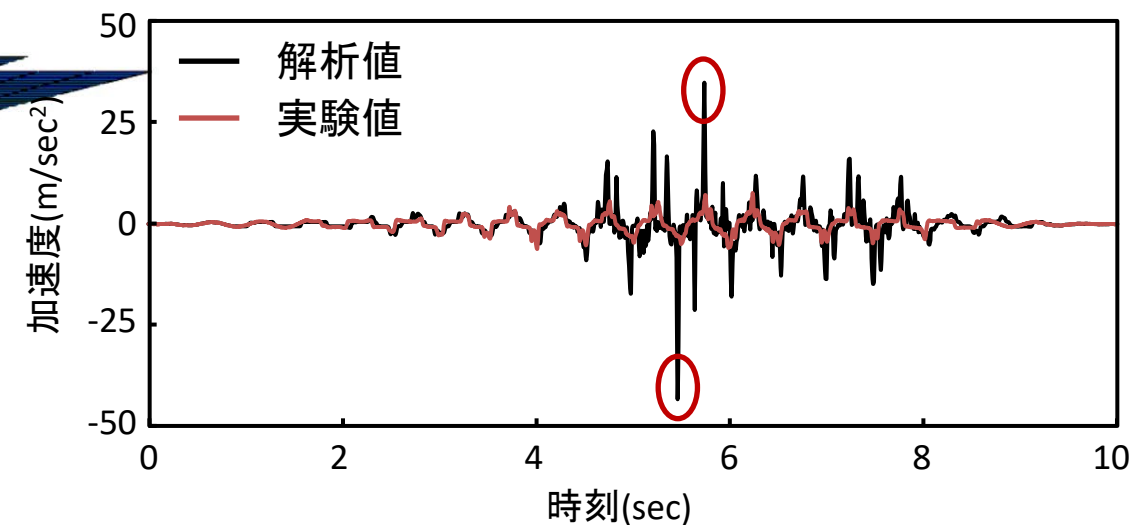
滑り挙動, およびロッキング挙動を
精度よく再現するためより細かく分割

解析結果：一方向正弦波

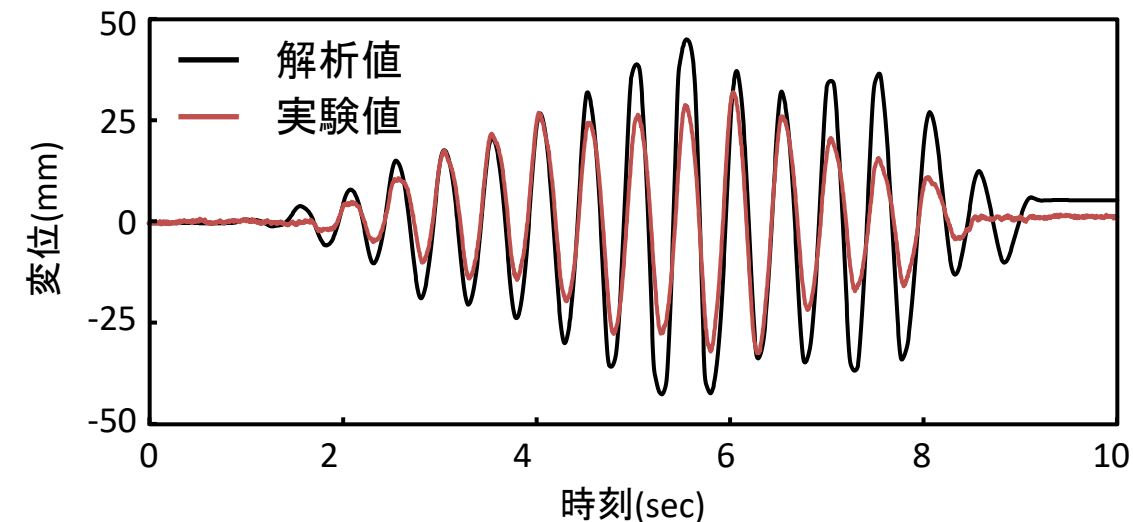
✓ 一方向正弦波



✓ 加速度時刻歴



✓ 変位時刻歴



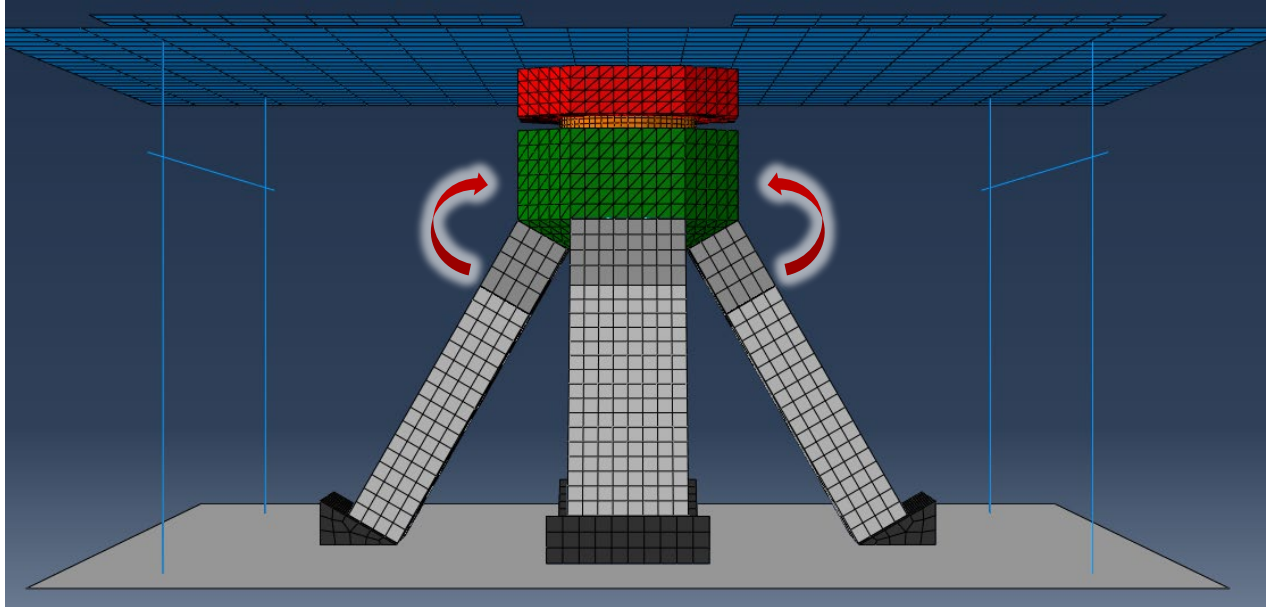
静止摩擦係数の未考慮によって変位が増大

要石の浮き上がりに伴って加速度が増大

そのような加速度の増大に対しても
圧縮強度(42.9 MPa)を超えない範囲での
圧縮力の変動によって対応し、安定した状態を維持

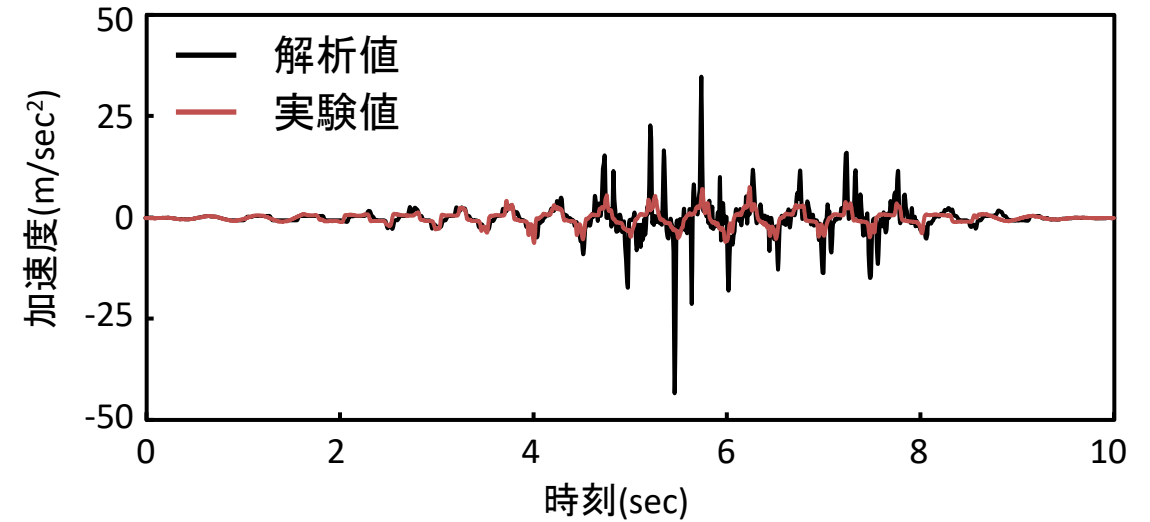
解析結果：一方向正弦波

✓ 一方向正弦波

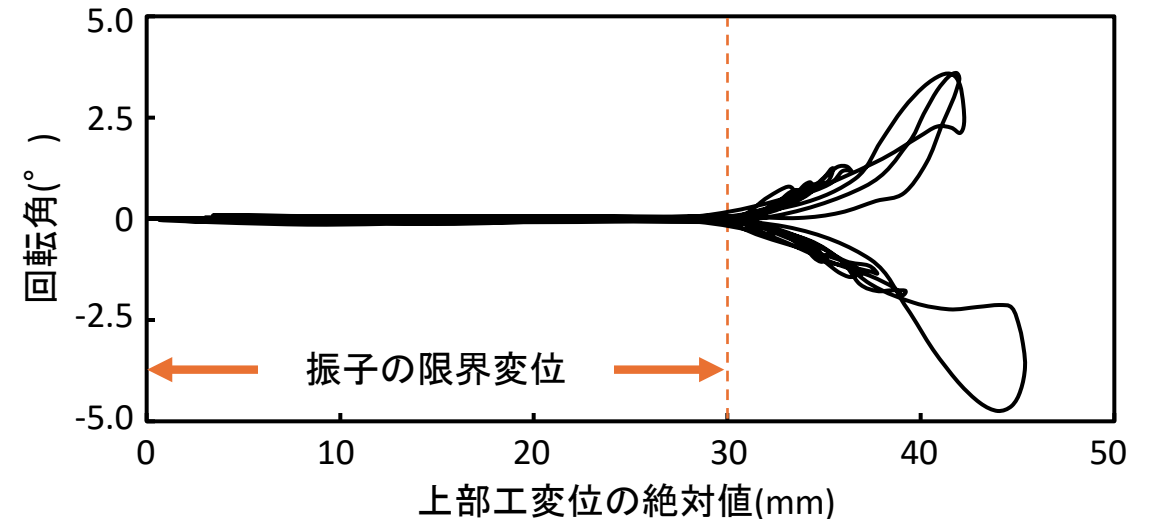


- ✓ 加速度と回転角の間には強い相関関係
→摩擦振子の免震性能を超える作用に対しては
ロッキング挙動への移行によって対応
- ✓ 滑りの限界変位を超過後にのみロッキング挙動が発生
→設計の想定通りの挙動が解析的にも確認された

✓ 加速度時刻歴



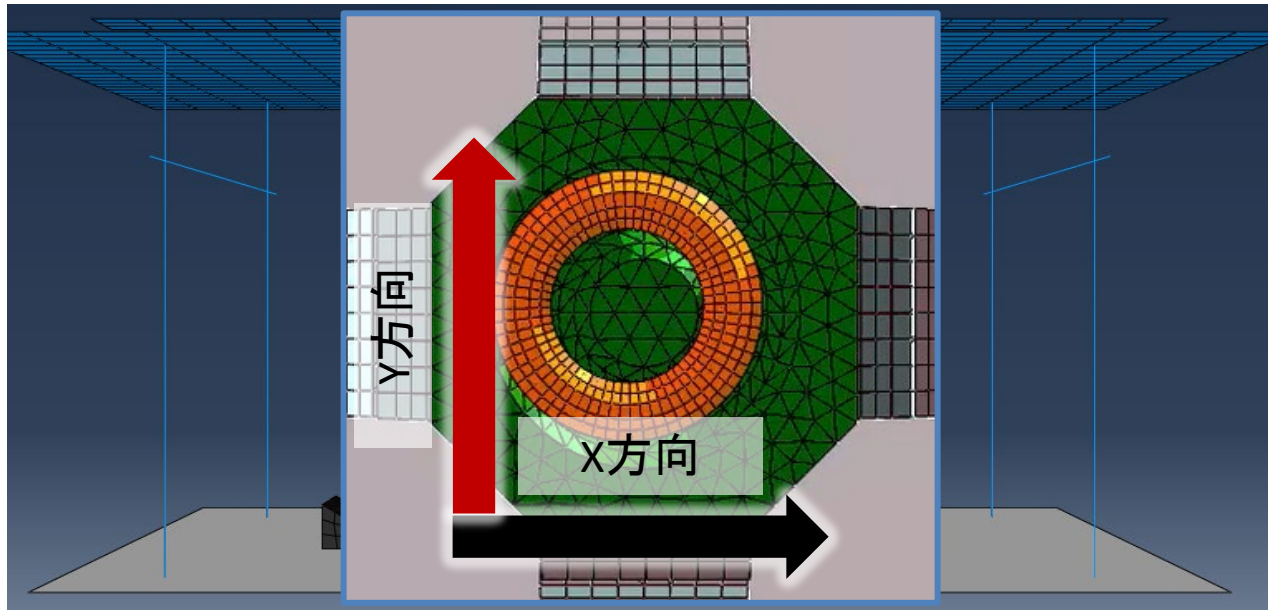
✓ 回転角と変位の関係



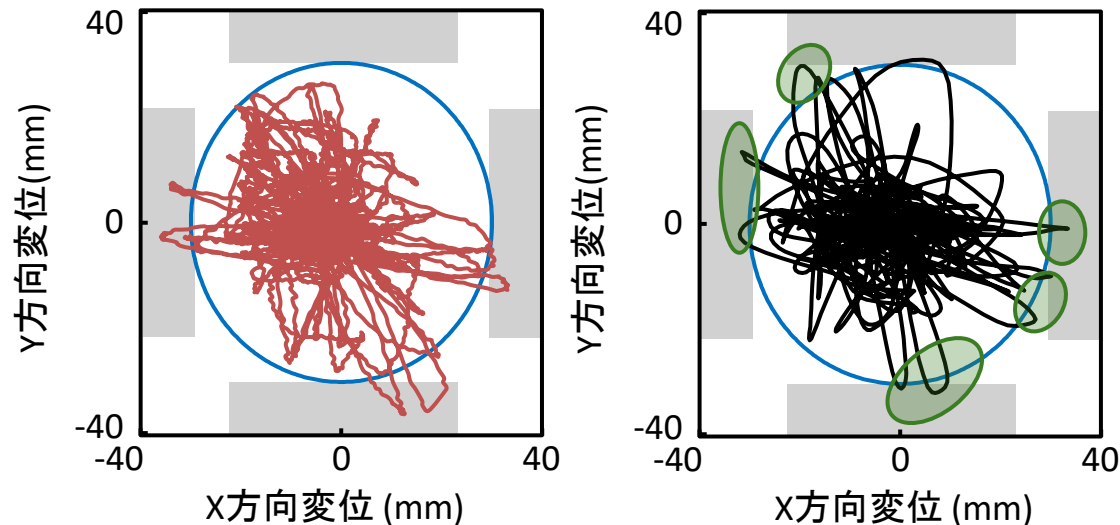
解析結果：二方向東北地方太平洋沖地震



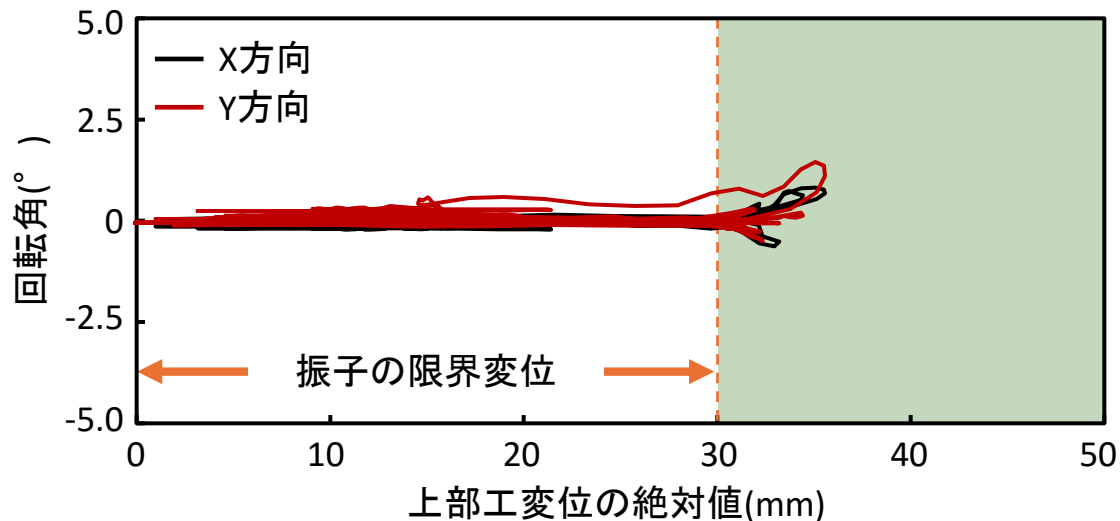
✓ 東北地方太平洋沖地震



✓ 上部工の軌跡 — 実験結果 — 解析結果



✓ 角度と変位の関係



二方向地震波の入力においても
 実験結果と軌跡が概ね一致した
 限界変位を超過した場合にのみロッキングが生じた
 → 設計の想定通りの挙動が得られた

提案構造が有する高い耐震性能が
 解析的にも確認された



仮設橋梁の下部構造に関する成果



今年度の提案構造

- 優れた耐震性能が確認された昨年度の提案構造に対して、橋脚本数を2本から3本, および4本へ増やすことで、二方向への载荷に対する脆弱性の解消を試みた

震動実験：提案構造の地震時応答性状の確認

- 载荷方向によらず、動的载荷においても良好な滑り性能を発揮し、
摩擦振子が滑りの限界変位到達後のみに要石のロッキング挙動へと移行することを確認した
- 橋脚は载荷後まで安定した状態で自立を維持し、即時供用可能であることを確認した

解析：3次元有限要素モデル

- 提案構造に対して、3次元有限要素モデルを用いた震動実験の再現解析を試みた
- 滑りの限界変位到達後のみに要石のロッキング挙動が発生し、
提案構造は高い耐震性能を有することを確認した



【2011年東北地方太平洋沖地震】

1. 津波により多くの**橋梁が倒壊・流出**
 2. 道路ネットワークの寸断
 3. 救命・復旧・復興の大きな妨げ
- +
- 切迫する**南海トラフ地震**
 - **気候変動に伴う豪雨による洪水**



動水圧に対する橋梁の損壊を防ぐことが困難



津波被害（北上大橋）

<https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/road/hisaijoukyoushasinn.html>



豪雨被害（相良橋）

<https://kumamoto-nct.ac.jp/file/nitk-kiyou-2020/pdf/no10.pdf>

2022年制定コンクリート標準示方書

復旧性（レジリエンス強化）の観点から津波・洪水に対する設計法が規定

【新たに規定された限界状態4】

偶発作用により**構造物全体系が一時的に崩壊するが**、人の生命や財産を脅かすような事象が生じず、**構造物全体系の早期の復旧が可能な状態**

例)キャパシティデザインに基づき、
復旧が容易な**桁部材の損傷を意図的に誘導**

残存橋脚を利用した緊急仮設橋の設置→



桁部材のみに損傷を誘導





津波・洪水による橋梁の損壊を前提とした、道路ネットワーク確保のための対策

緊急仮設橋の事前準備

既存の緊急仮設橋の問題点

- 特殊な運搬車両が必要
- 製作費が高額

事前に備蓄した、安価なプレキャストRC部材により、専門知識や特殊な資格がなくとも早期に組立可能な橋梁を開発



機動支援橋

土木学会鋼構造委員会：東日本大震災鋼構造物調査特別委員会報告書，2012.1



緊急仮設橋イメージ

開発する緊急仮設橋の要求性能

- 災害後の制約条件下においても迅速かつ容易に架設可能
- 支間長を自由に調整できる
- 使用后、解体可能で将来的な再利用が可能
- 仮設橋は被災地の復興時のみに使用される
→長期的な性能や耐久性への考慮は不要

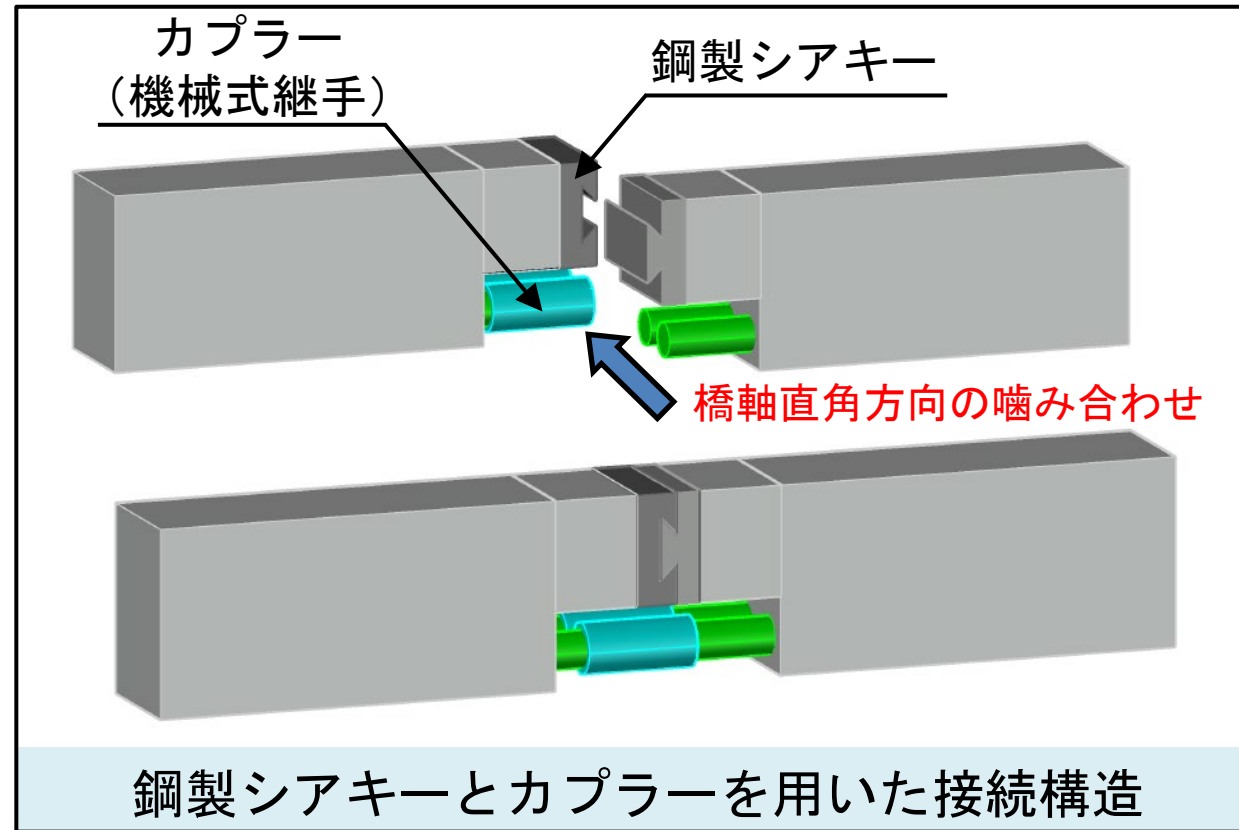
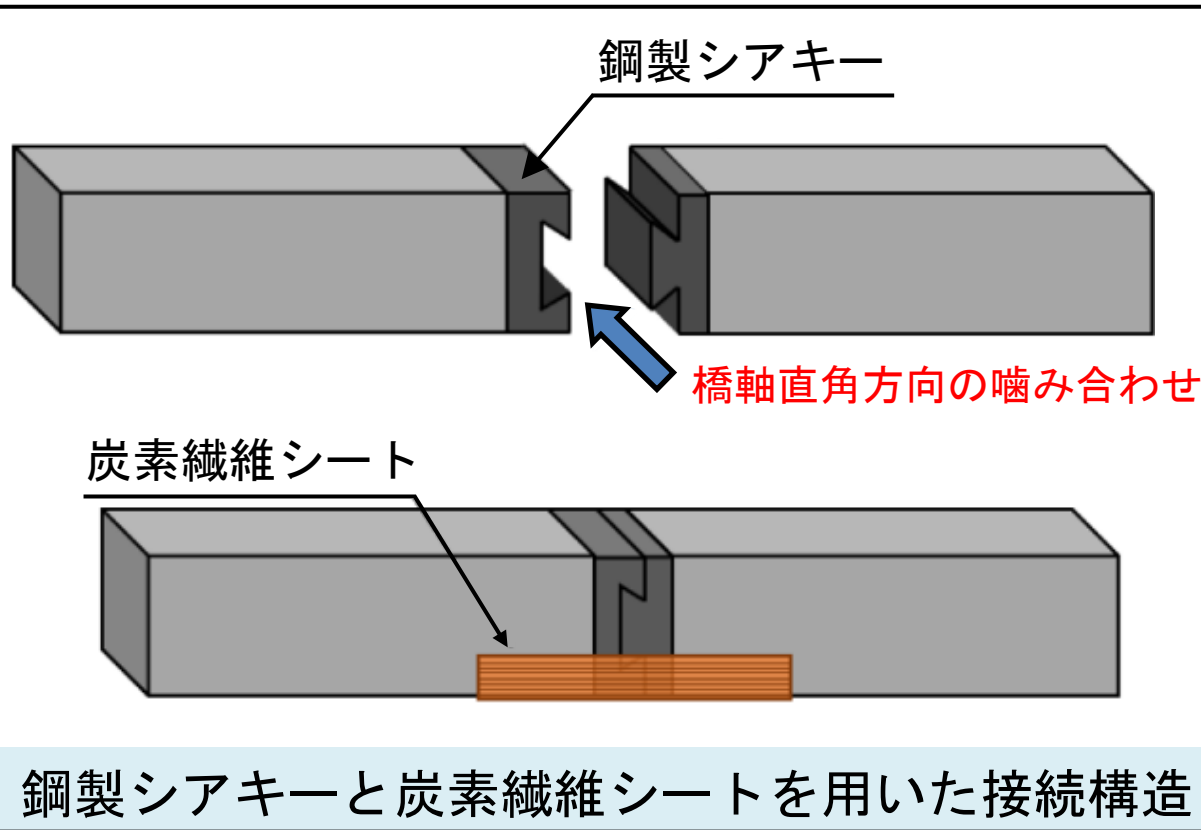
- RCブロック一つ当たりの重量：**500kg以下**
- ブロック連結後の桁長：**10m程度を想定**
- 復旧活動に一般に使用される**25tラフタークレーン (270kN)**が通行可能

開発の中心：**プレキャストRCブロックの接続方法**

プレキャストRCブロック間の接続構造



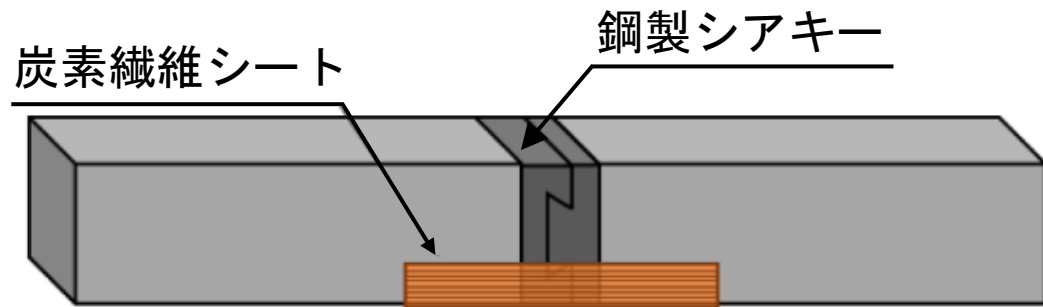
当研究室による既往研究 (鋼製シアキー)



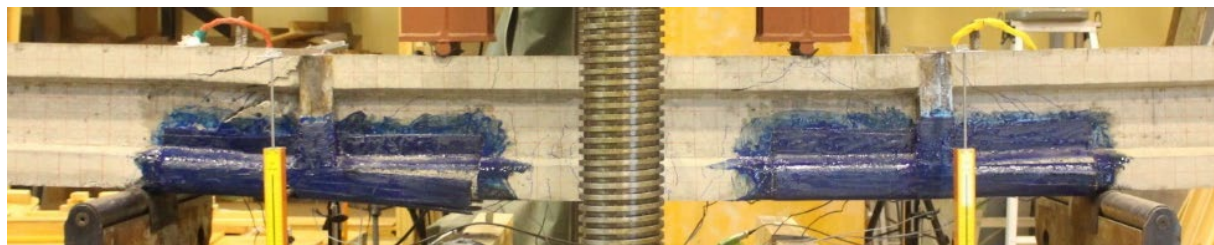
プレキャストRCブロック間の接続構造



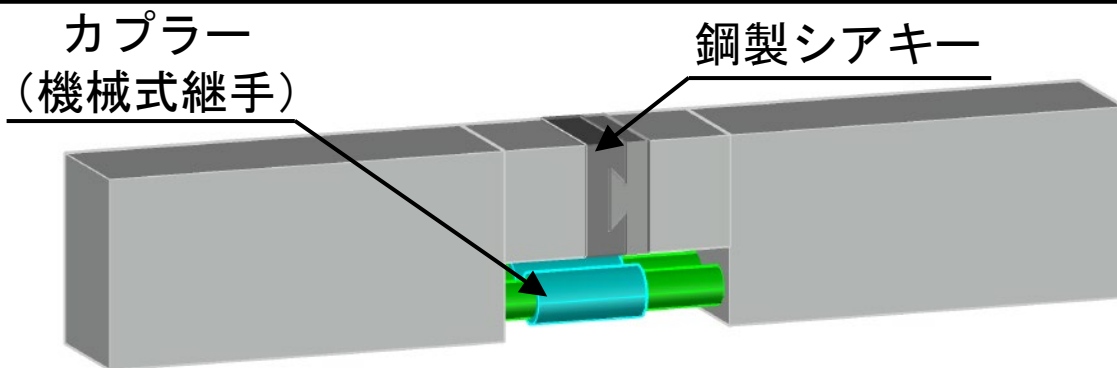
当研究室による既往研究 (鋼製シアキー)



載荷試験時の連結桁供試体



鋼製シアキーと炭素繊維シートを用いた接続構造



載荷試験時の連結桁供試体



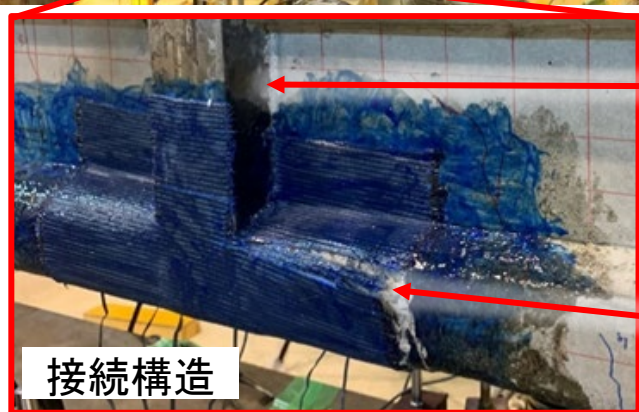
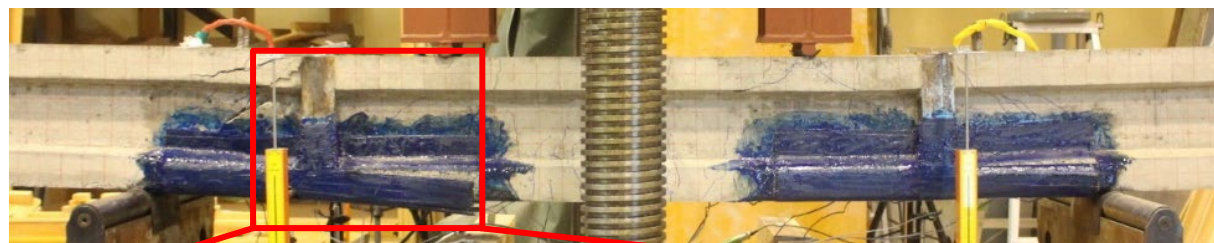
鋼製シアキーとカプラーを用いた接続構造

プレキャストRCブロック間の接続構造



当研究室による既往研究（鋼製シアキー）

載荷試験時の連結桁供試体



鋼製シアキー

炭素繊維シート

接続構造

鋼製シアキーと炭素繊維シートを用いた接続構造

載荷試験時の連結桁供試体



鋼製シアキー

カプラー
(機械式継手)

接続構造

鋼製シアキーとカプラーを用いた接続構造

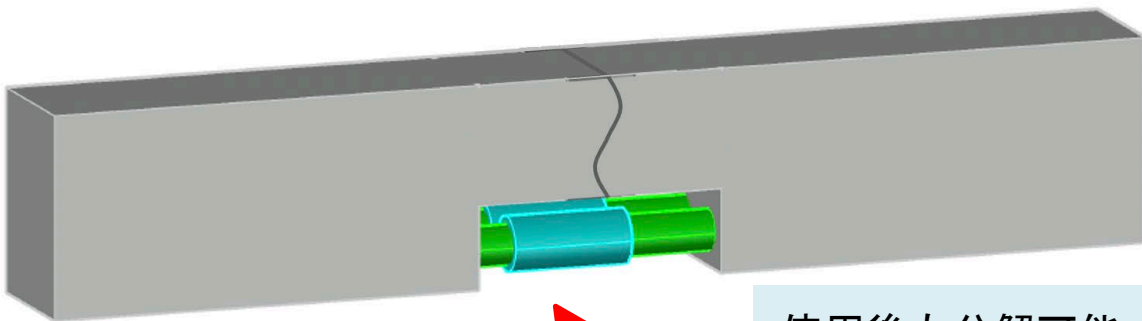
載荷試験より、
いずれの接続構造も **接続部のない通常の桁と同等の曲げ・せん断耐力を有することを確認**

✓ **改善点**：高い施工技術を要する，解体・再利用が困難，鋼製シアキーが高価

プレキャストRCブロック間の接続構造



本研究における提案構造（波形コンクリートシアキー&カプラー）

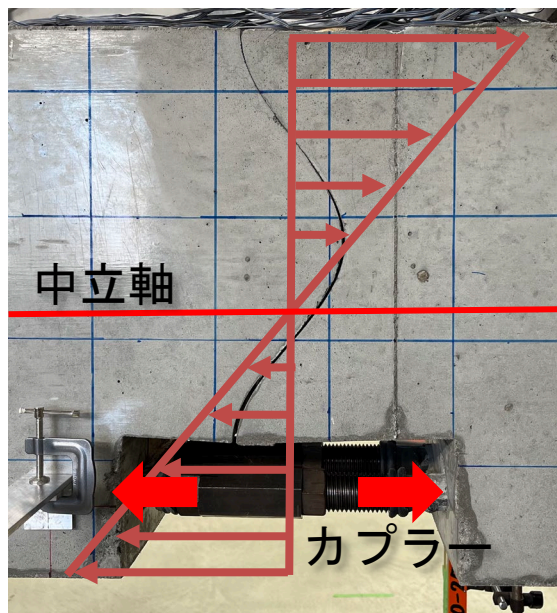


カプラーを接続



使用後も分解可能

ブロック接続のイメージ



ひずみ分布

提案構造の特徴

- ✓ 部材軸方向に単に接触するだけでブロック同士を連結，使用後の分解・再利用が可能
 - エポキシ樹脂系接着剤やモルタルなどを充填しない ドライジョイント を採用
- ✓ 安価なコンクリートで，隅角部のない波形形状を再現することで，接続部における応力集中の緩和を期待
 - （コンクリートシアキー形状は一般に台形形状）
- ✓ コンクリートシアキーが曲げ圧縮力とせん断力，カプラー付き鉄筋が曲げ引張力に抵抗する 合理的な構造
 - プレストレスは与えていない

より安価で，簡易なRCブロックの連結を目指す



本研究における提案構造（波形コンクリートシアキー&カプラー）

検討事項①：最適な波形形状の同定

断面力（曲げ圧縮力・せん断力）を十分に伝達するには、どのようなコンクリートシアキー形状が最適か検討する

（パラメータ：波数，波長，振幅）



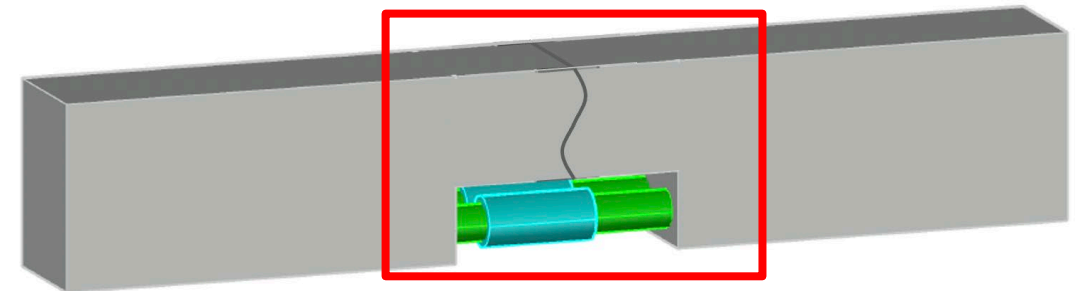
コンクリートシアキー形状は一般に台形形状が採用

検討事項②：接続部のせん断補強方法

コンクリートシアキー同士の噛み合わせによってせん断力が伝達される構造



接続部周辺の適切なせん断補強方法を検討する必要がある



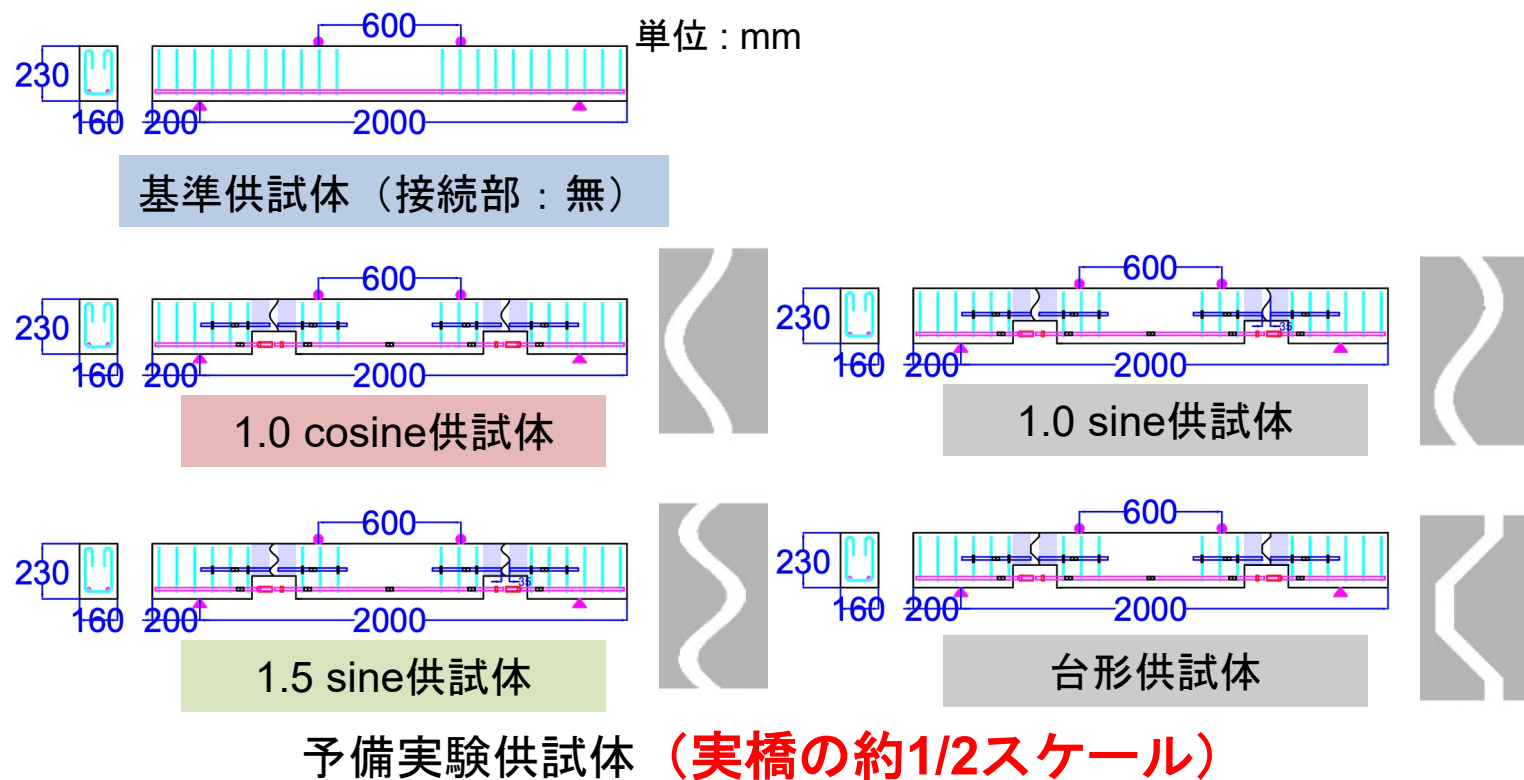
せん断補強を要する区間



検討事項①：最適な波形形状の同定

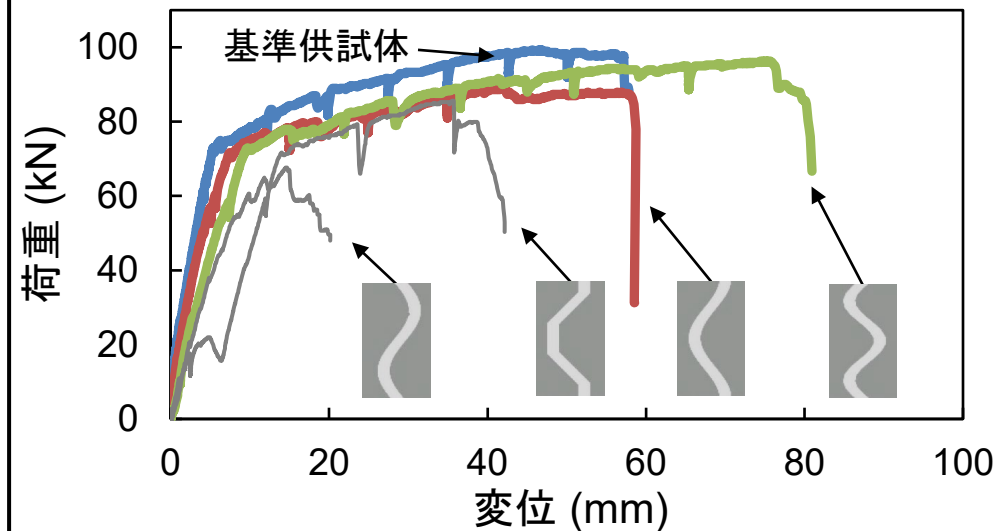
提案する接続構造を用いた実橋の約1/2スケールのプレキャストRCブロック連結桁の4点曲げ載荷実験を実施

コンクリートシアキー形状の違いによる影響を検証



コンクリートシアキー形状の違いによる影響

— 基準供試体 — 1.0 cosine — 1.5 sine
 — 1.0 sine — 台形



➤ **1.0 cosine & 1.5 sine**

基準供試体（接続部のない通常の桁）と同等の耐荷性能を得た

波形コンクリートシアキーの優位性が確認
形状の違いにより破壊形態に差が生じた



本研究における提案構造（波形コンクリートシアキー&カプラー）

検討事項①：最適な波形形状の同定

断面力（曲げ圧縮力・せん断力）を十分に伝達するには、どのようなコンクリートシアキー形状が最適か検討する

（パラメータ：波数，波長，振幅）



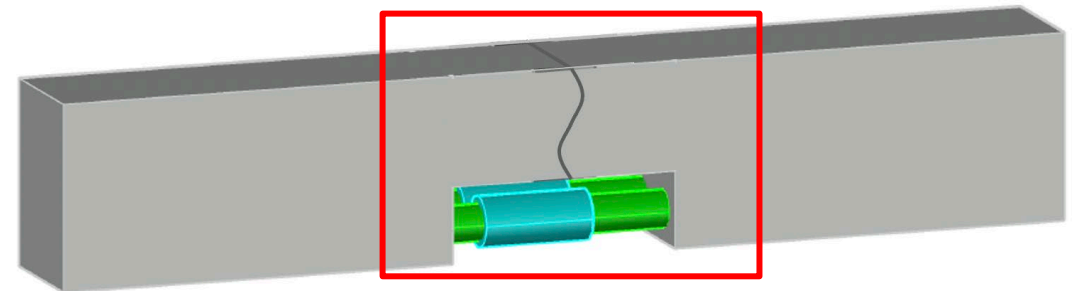
コンクリートシアキー形状は一般に台形形状が採用

検討事項②：接続部のせん断補強方法

コンクリートシアキー同士の噛み合わせによってせん断力が伝達される構造



接続部周辺の適切なせん断補強方法を検討する必要がある



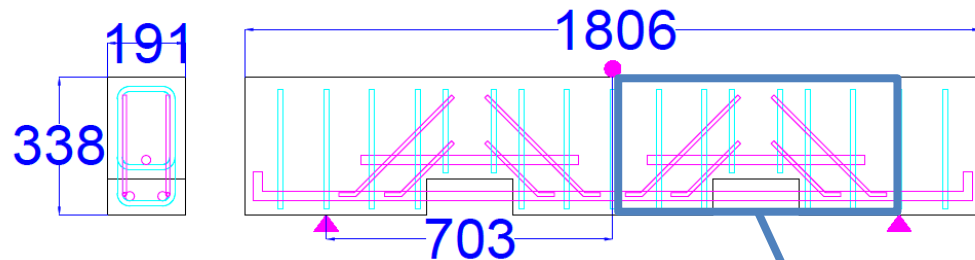
せん断補強を要する区間



検討事項②：接続部のせん断補強方法

ゲルバー梁のリブ部のせん断補強※を参考に配筋方法を提案し、予備実験として3点曲げ試験を実施

提案する配筋によるせん断補強の有効性の検証



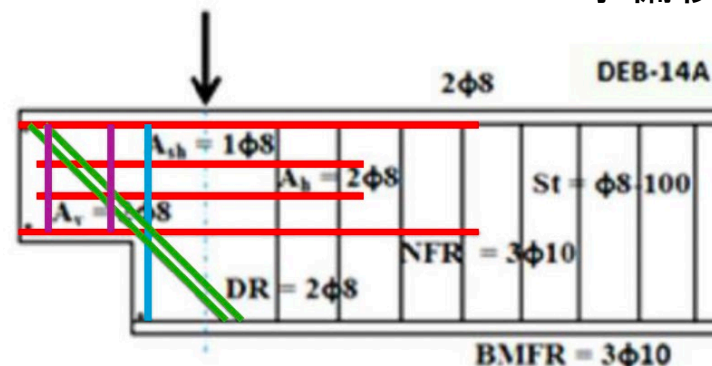
予備検討供試体

終局時のひび割れ性状

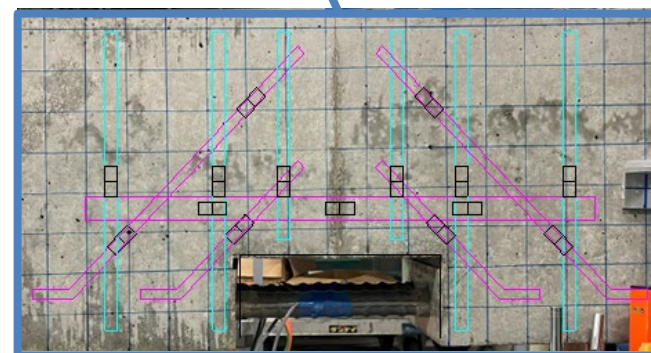
配筋によるせん断補強

隅角部から生じる斜めひび割れに
直行するような配筋を採用

修正トラス理論より算出される
接続部周辺のせん断耐力が
妥当であることを確認



ゲルバー梁のせん断補強※



提案する配筋によるせん断補強

※Mohammed, B.S. et.al : Structural Performance of RC and R-ECC Dapped-End Beams Based on the Role of Hanger or Diagonal Reinforcements Combined by ECC, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.13, No.44, Sep. 2019

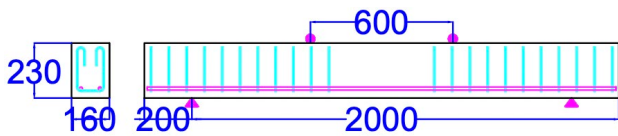
曲げ載荷実験(供試体諸元)



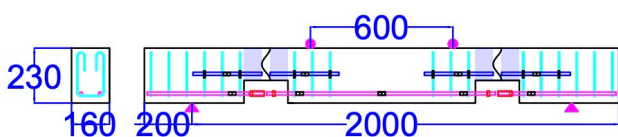
本研究における提案構造 (波形コンクリートシアキー&カプラー)

■ 予備実験

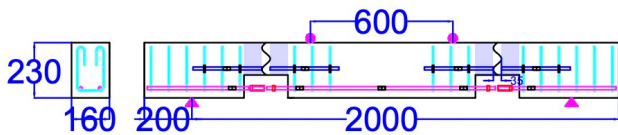
単位: mm



基準供試体 (接続部: 無)



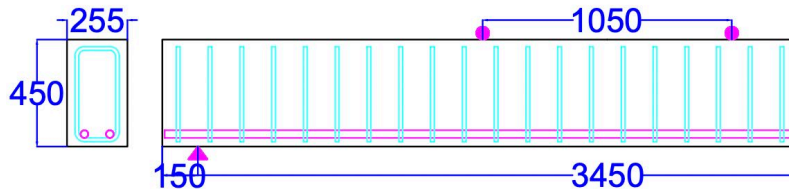
1.0 cosine供試体



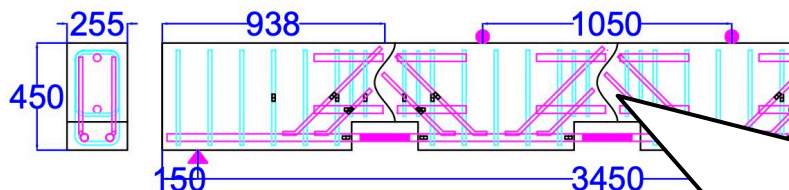
1.5 sine供試体

予備検討供試体
(実橋の約1/2スケール)

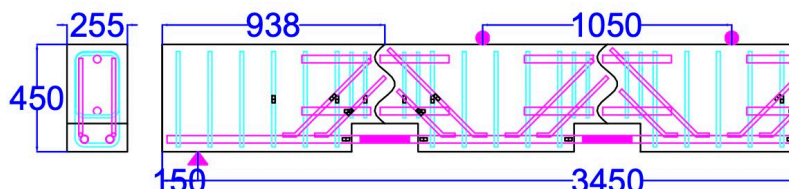
■ 本実験



基準供試体 (接続部: 無)



1.0 cosine供試体

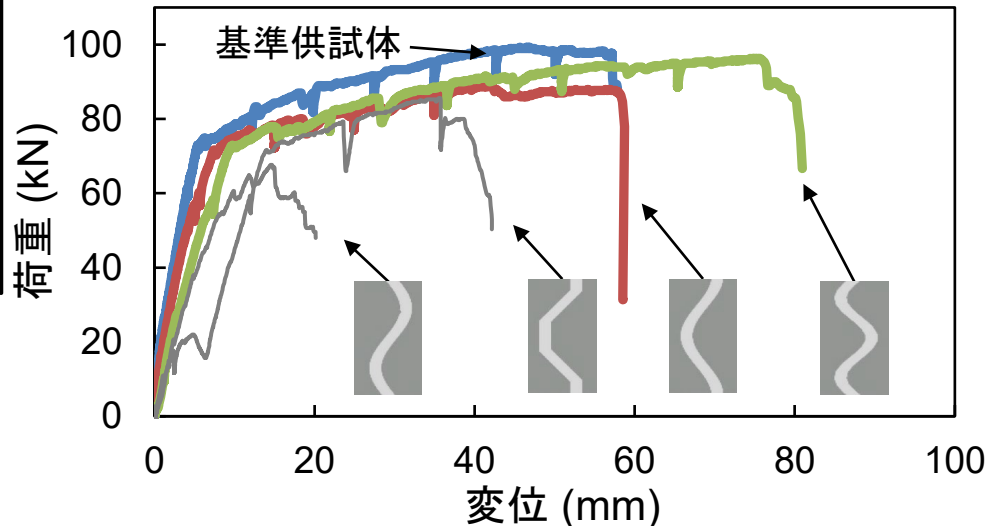


1.5 sine供試体

本実験供試体
(実スケール)

検討事項①: 最適な波形形状の同定

- 基準供試体
- 1.0 cosine
- 1.5 sine
- 1.0 sine
- 台形



コンクリートシアキー形状

➤ 1.0 cosine & 1.5 sine

予備実験で基準供試体 (接続部のない通常の桁) と同等の耐荷性能を得た形状を採用

→波数を維持したまま, 波長・振幅を拡大

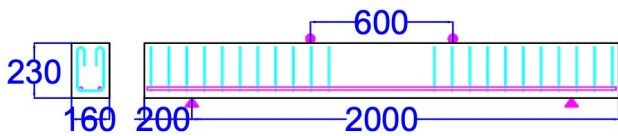
曲げ載荷実験(供試体諸元)



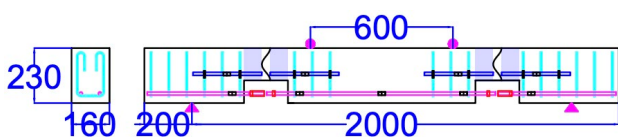
本研究における提案構造 (波形コンクリートシアキー&カプラー)

■ 予備実験

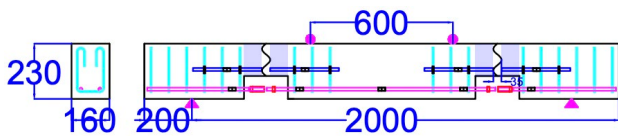
単位: mm



基準供試体 (接続部: 無)



1.0 cosine供試体



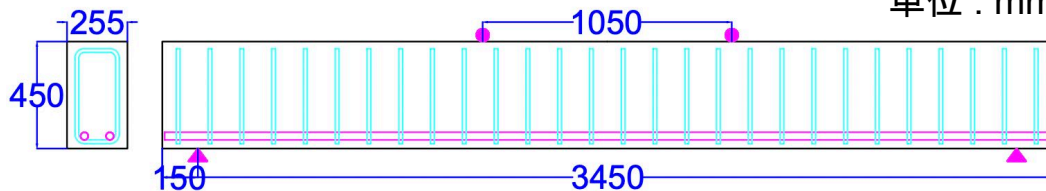
1.5 sine供試体

予備検討供試体

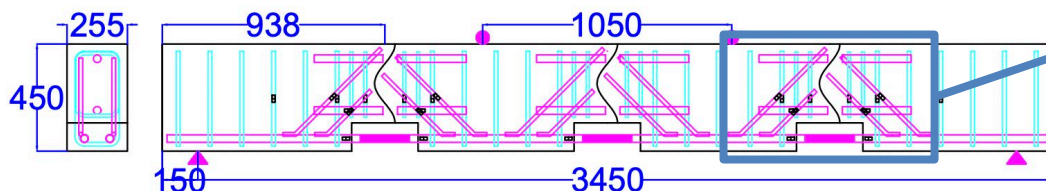
(実橋の約1/2スケール)

■ 本実験

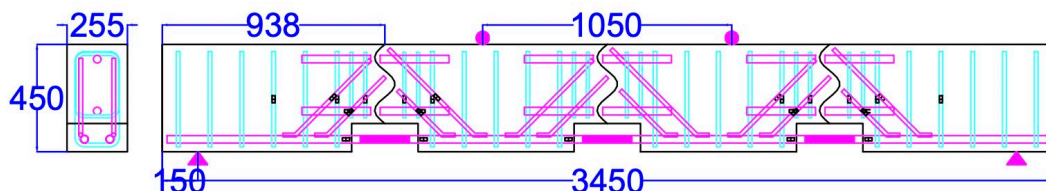
単位: mm



基準供試体 (接続部: 無)



1.0 cosine供試体

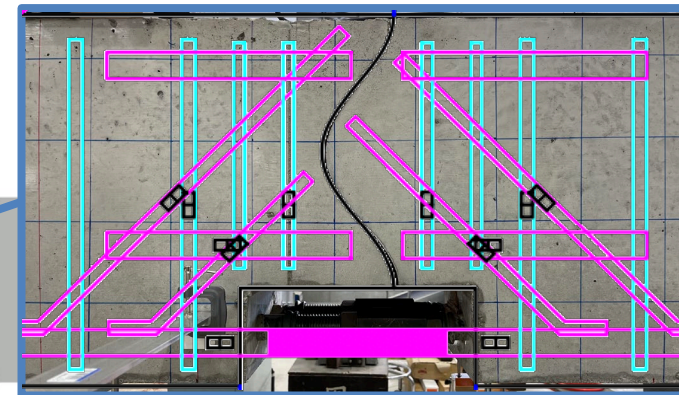


1.5 sine供試体

本実験供試体

(実スケール)

検討事項②:
接続部のせん断補強方法

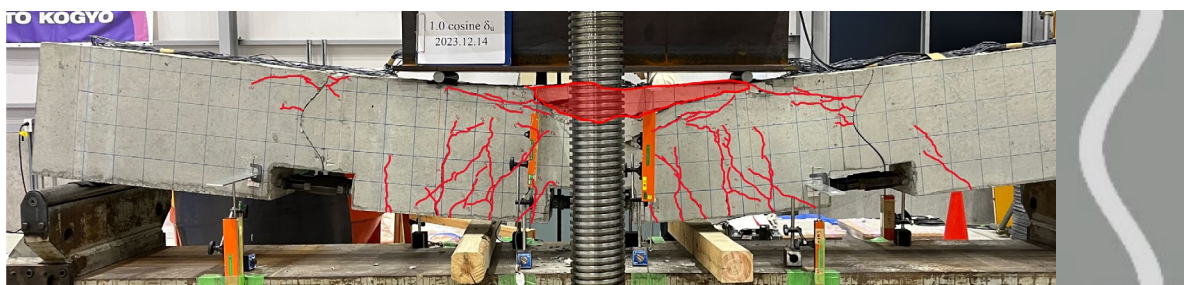


4点曲げ載荷試験を実施し,
寸法効果・せん断補強の有効性を検証

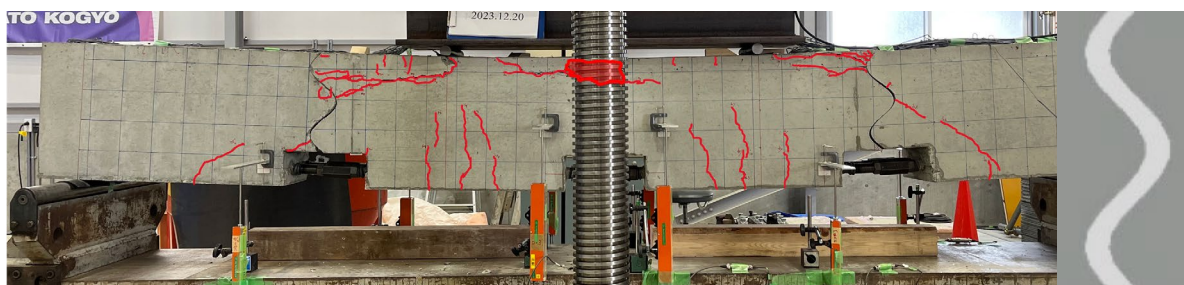
曲げ載荷実験(実験結果)



基準供試体



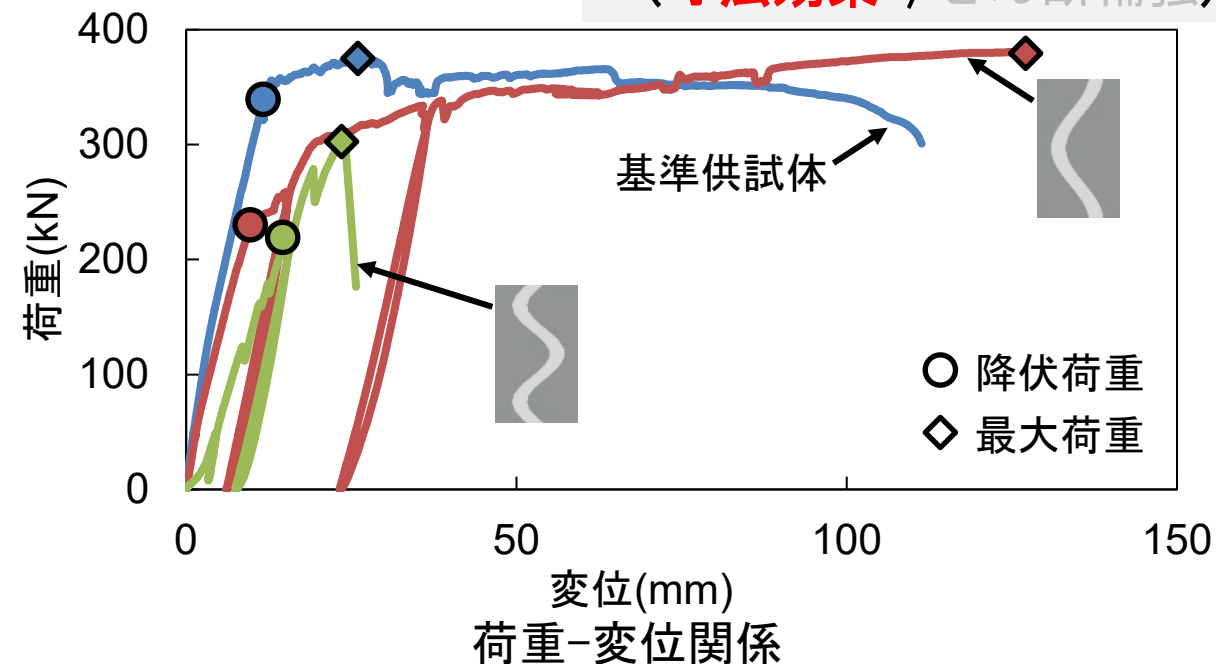
1.0 cosine 供試体



1.5 sine 供試体

試験終了時の供試体損傷状況

(寸法効果 / せん断補強)



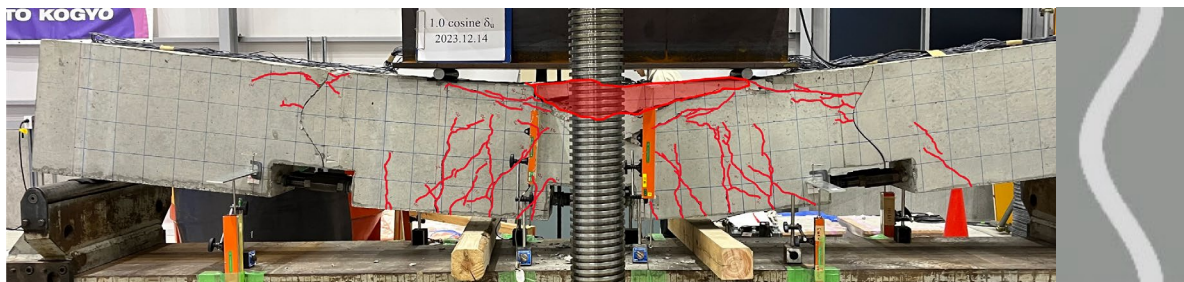
- ✓ 全ての供試体が**曲げ引張破壊**
(軸方向鉄筋降伏後に純曲げ区間圧縮縁コンクリート圧壊)
- ✓ 各区間の接続構造(波形コンクリートシアキー)がRCブロック間の断面力を伝達できたと言える

寸法効果はなく、波数をそのままに拡大して良い

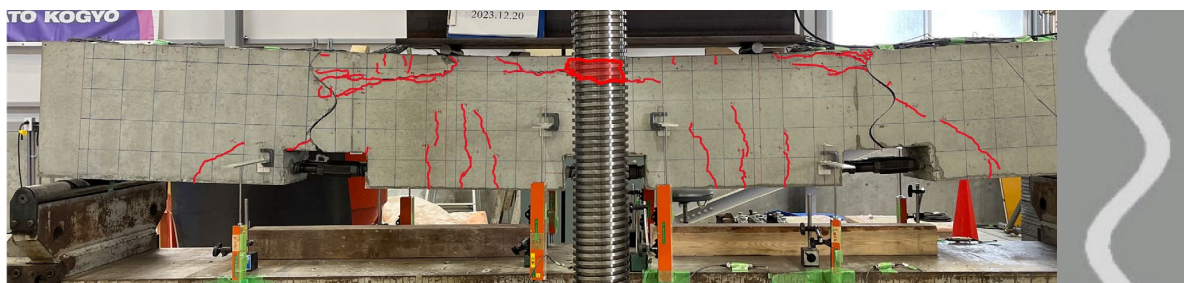
曲げ載荷実験(実験結果)



基準供試体



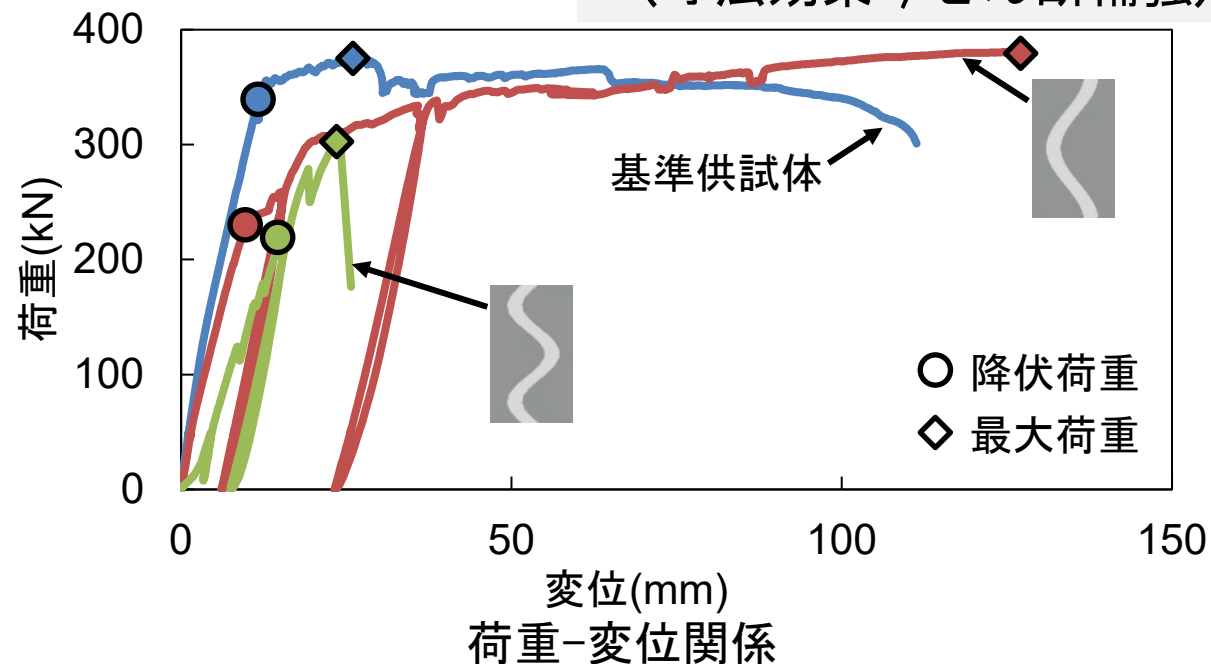
1.0 cosine供試体



1.5 sine供試体

試験終了時の供試体損傷状況

(寸法効果 / せん断補強)



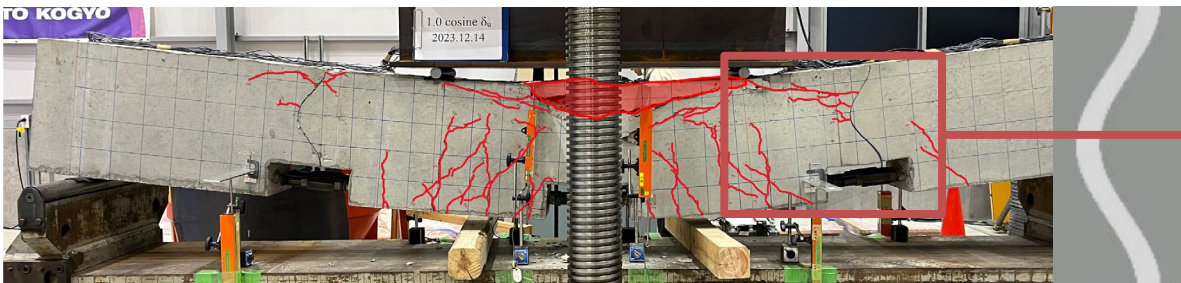
【荷重-変位関係】

- 基準供試体：緩やかな荷重低下により終局(0.8Pmax)
- 1.0 cosine供試体：鉄筋降伏後も荷重が増加傾向
= 10 δ_y で試験を終了
➤ 基準供試体に近い挙動を見せた
- 1.5 sine供試体：
鉄筋降伏の直後に、荷重が急激に低下し脆性破壊

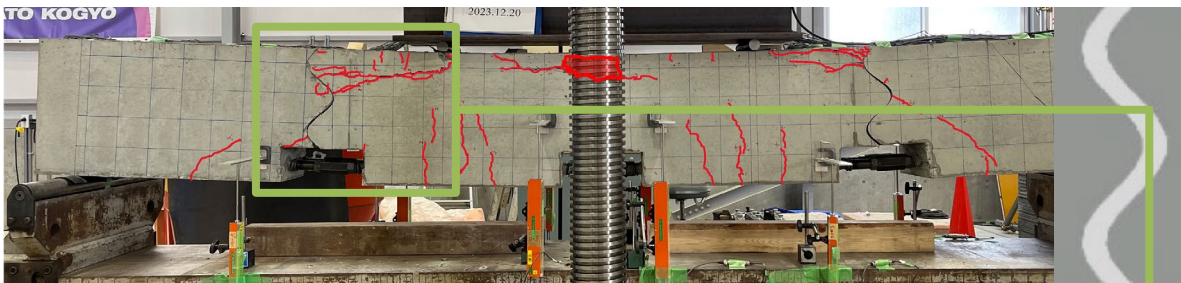
曲げ載荷実験(実験結果)



基準供試体



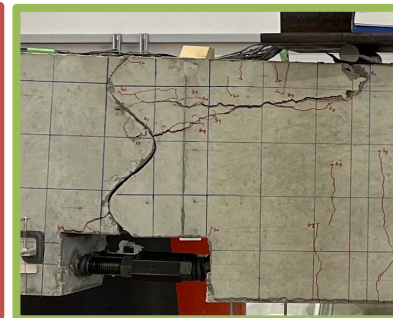
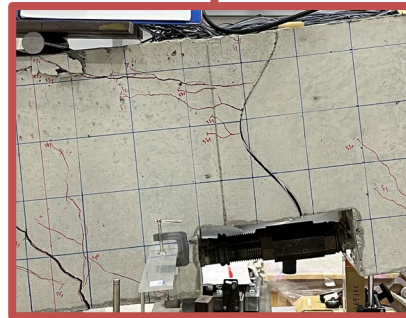
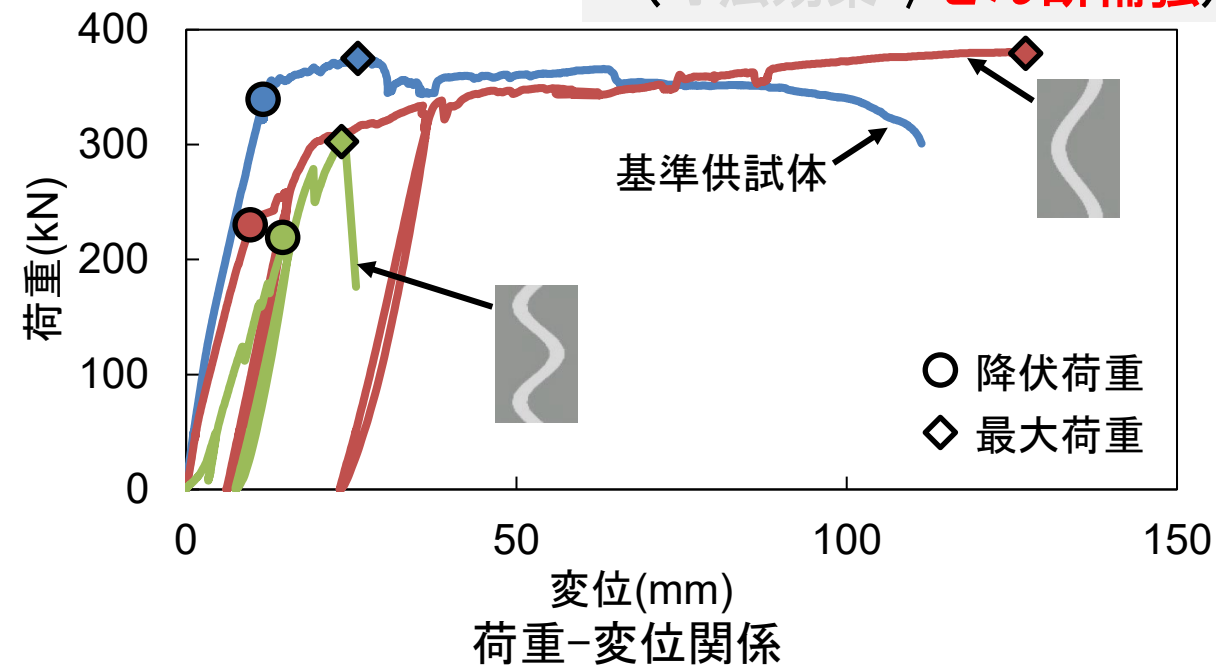
1.0 cosine 供試体



1.5 sine 供試体

試験終了時の供試体損傷状況

(寸法効果 / **せん断補強**)



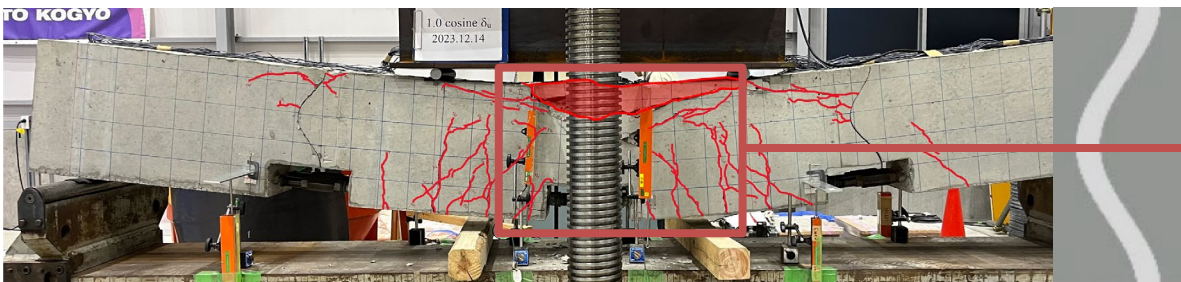
【曲げせん断領域】
コンクリートシア
キー凸部から荷点
に向かうひび割れの
進展を抑制

提案する鉄筋補強のみで、十分なせん断耐力を有し、RCブロック間の断面力を伝達できた

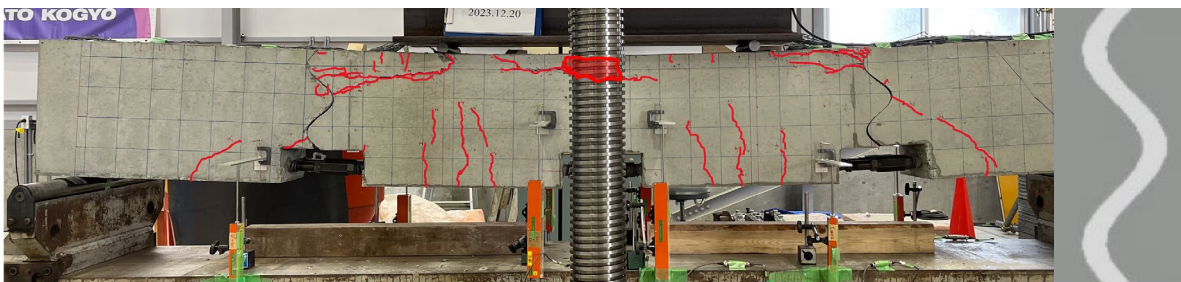
曲げ載荷実験(実験結果)



基準供試体

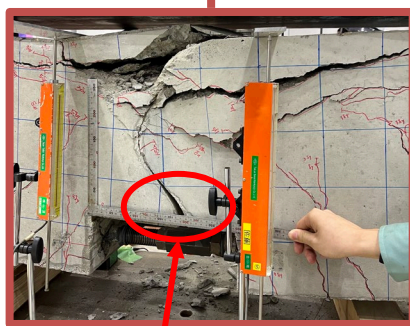
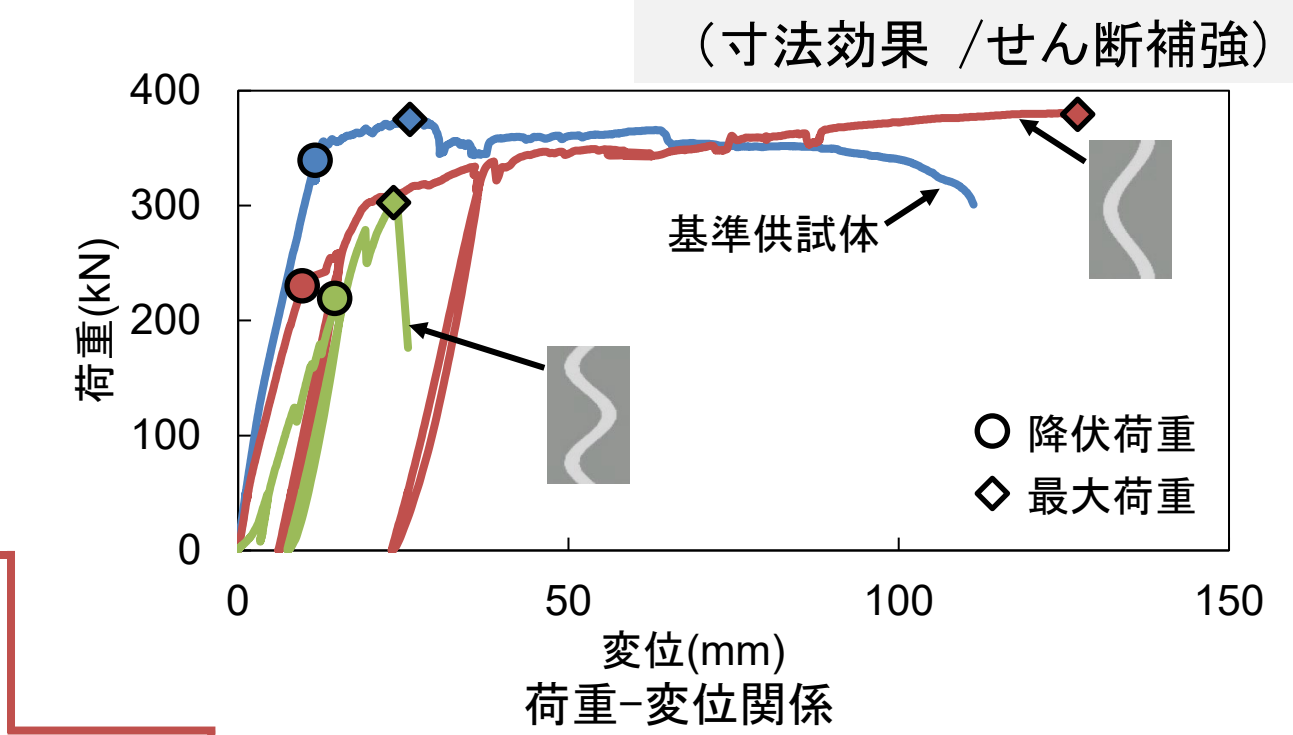


1.0 cosine 供試体



1.5 sine 供試体

試験終了時の供試体損傷状況



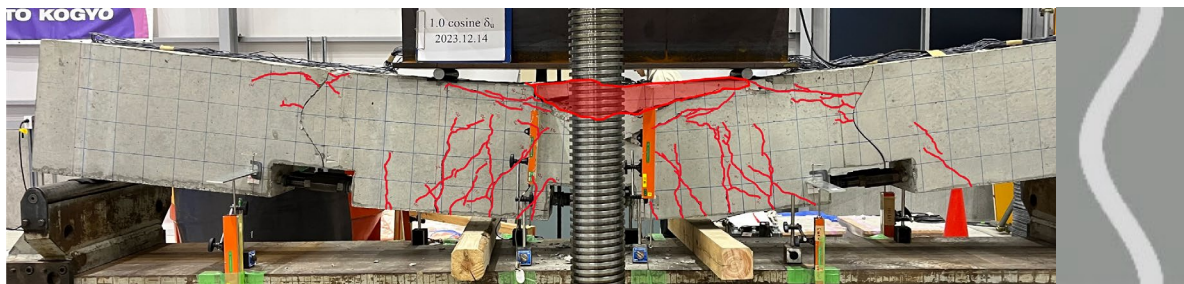
コンクリートシアキー下部が開口

- 【曲げ圧縮領域(1.0 cosine)】
- 靱性挙動
 - 曲げ変形に追従する回転挙動に起因
 - 上部の著しい圧壊が確認
 - ブロック間で生じた摩擦力によって荷重低下の抑制

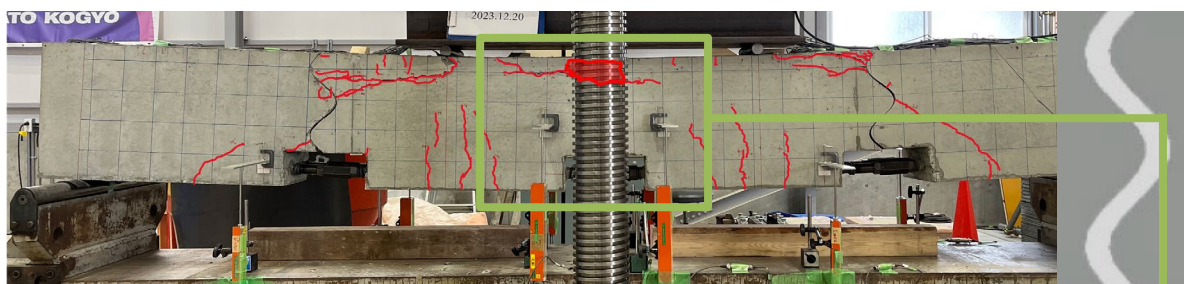
曲げ載荷実験(実験結果)



基準供試体



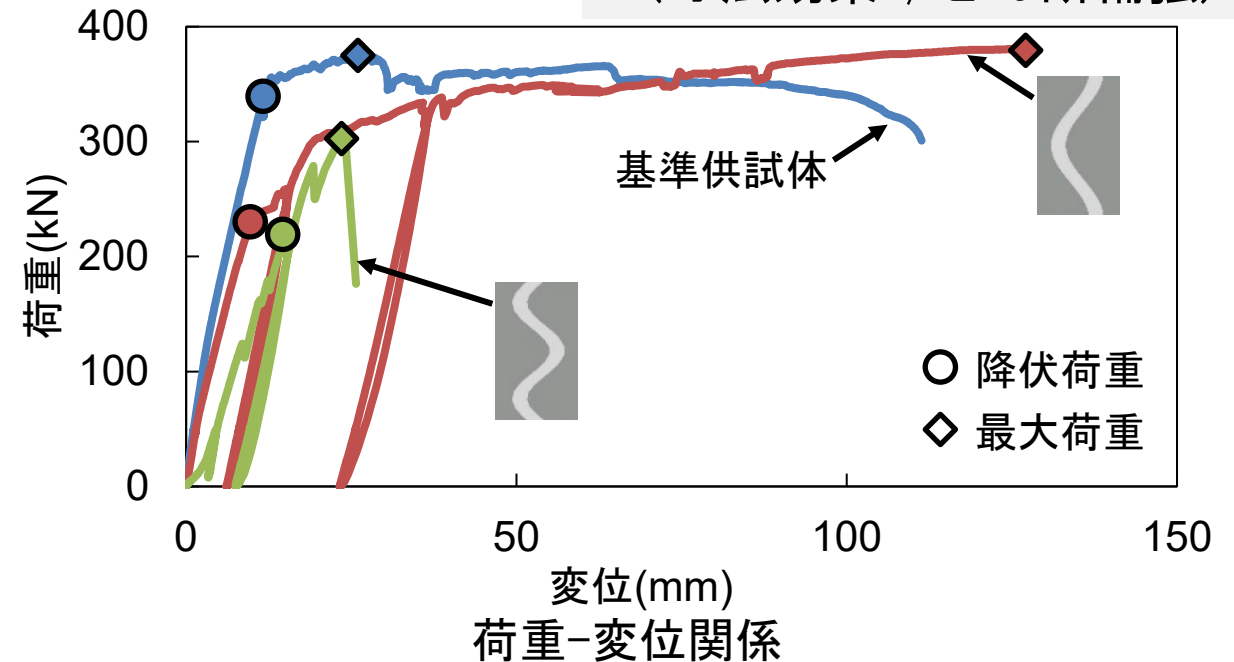
1.0 cosine 供試体



1.5 sine 供試体

試験終了時の供試体損傷状況

(寸法効果 / せん断補強)

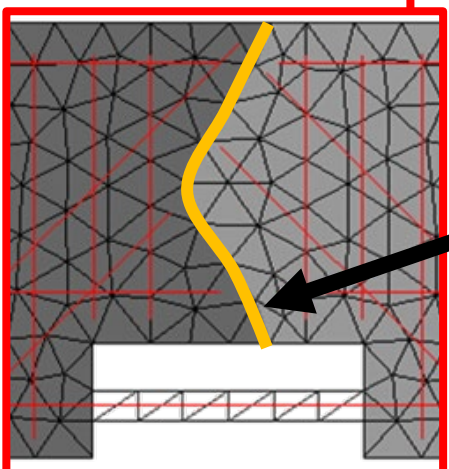
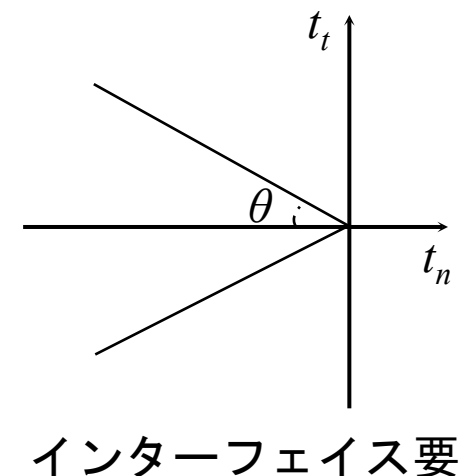
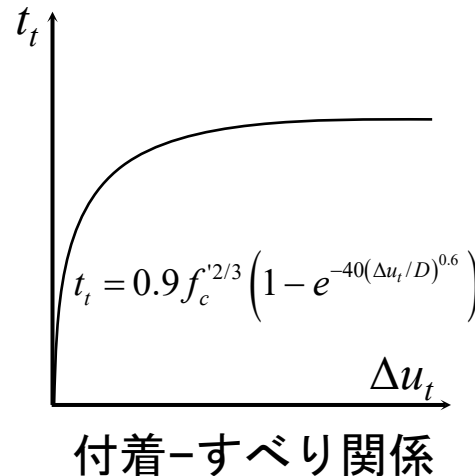
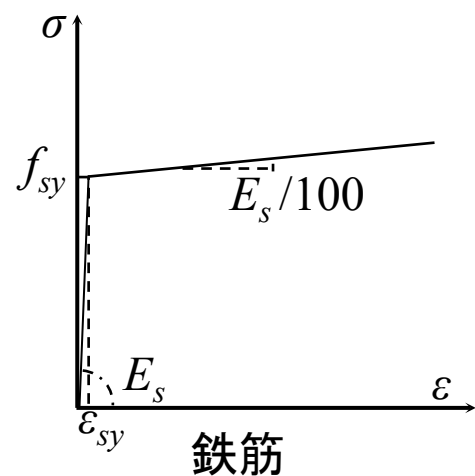
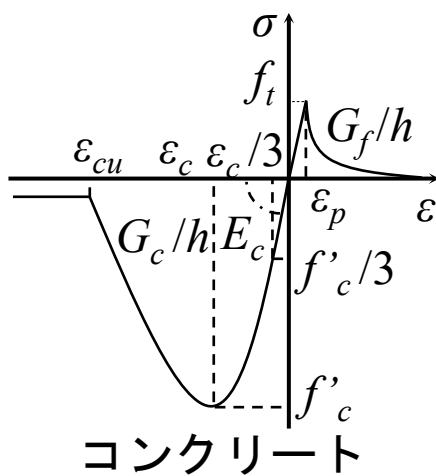
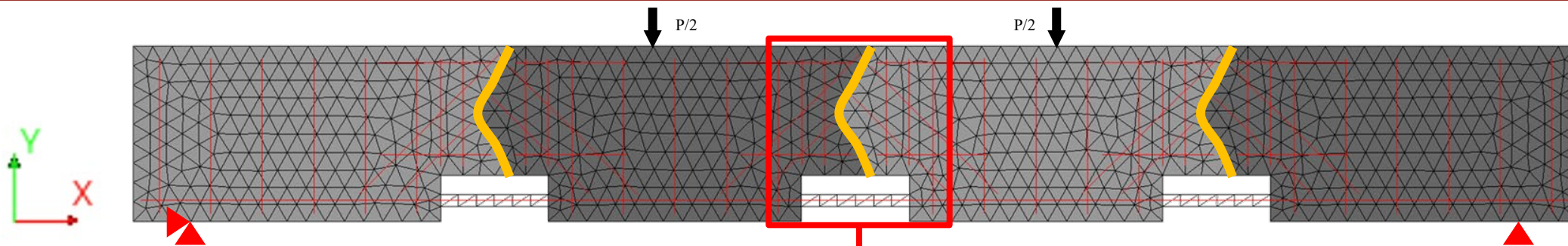


【曲げ圧縮領域(1.5 sine)】

- 波形形状の凹凸の噛み合わせが強く、曲げ変形に伴う回転ができない
- インターロッキングによる荷重増加に伴い、コンクリートシアキーで応力が集中

脆性破壊

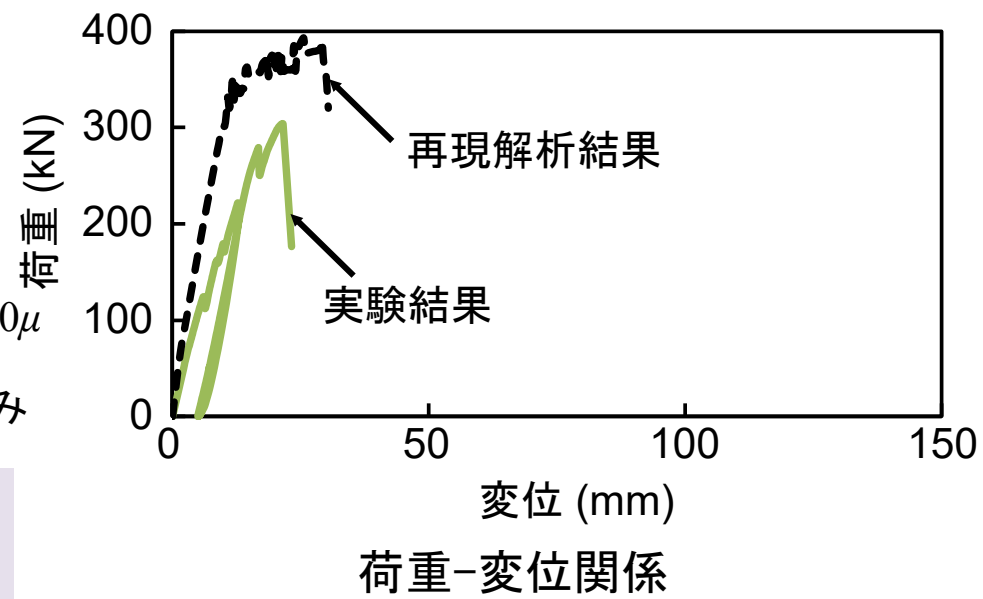
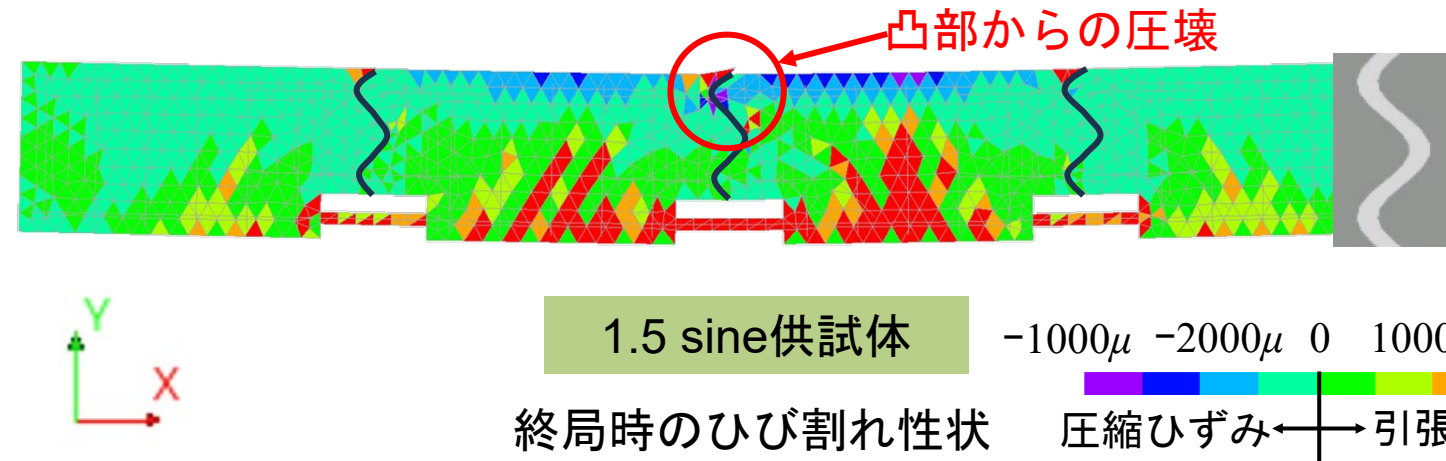
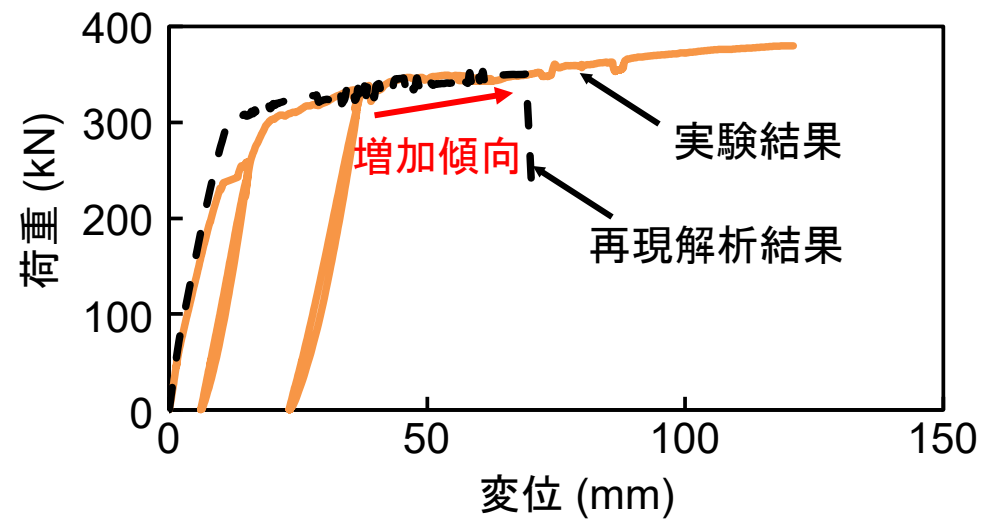
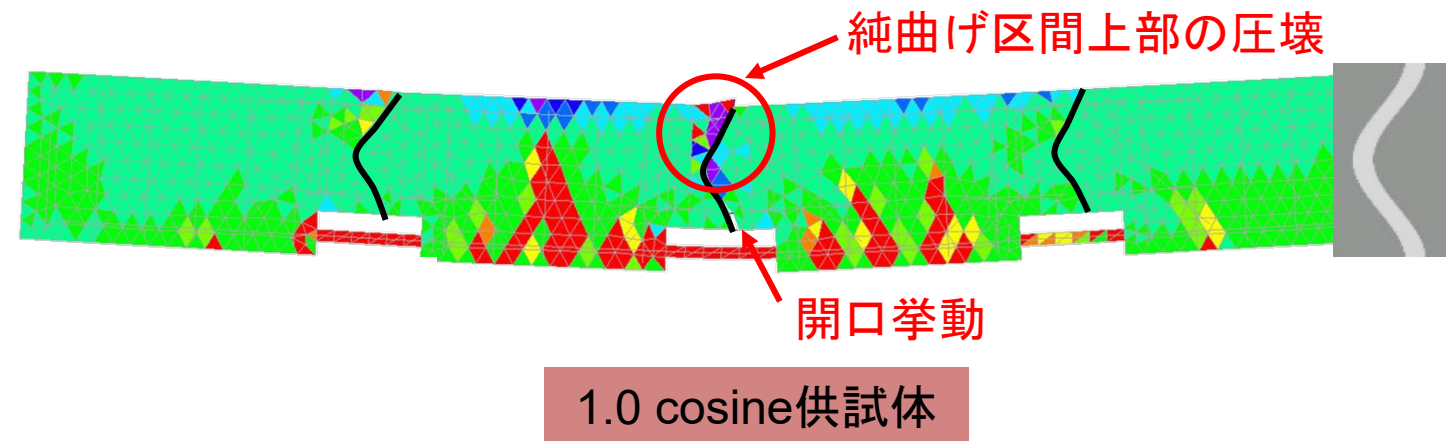
有限要素解析(モデル)



Coulomb摩擦

- メッシュサイズ = 50 mm
- コンクリートシアキーの接触部
→Coulomb摩擦の2次元インターフェイス要素 (摩擦係数=0.5)
→法線方向引張側 : ギャップモデル (引張強度0N/mm²)

有限要素解析(解析結果)

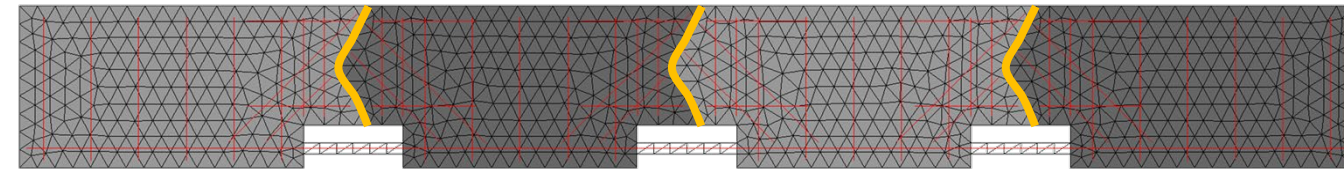


回転挙動を見せる1.0 cosine供試体の最大荷重の表現に課題が残るが、構築した再現解析モデルでコンクリートシアキー形状の違いによる影響を評価できる

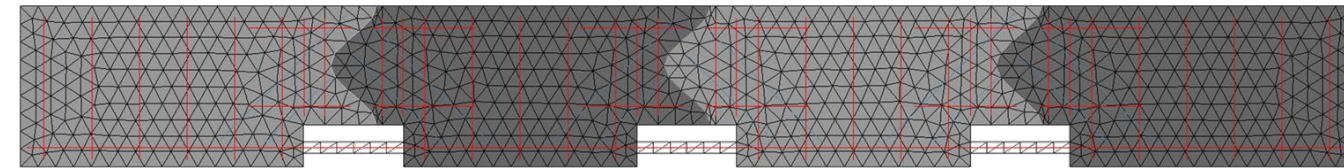


検討事項①：最適な波形形状の同定

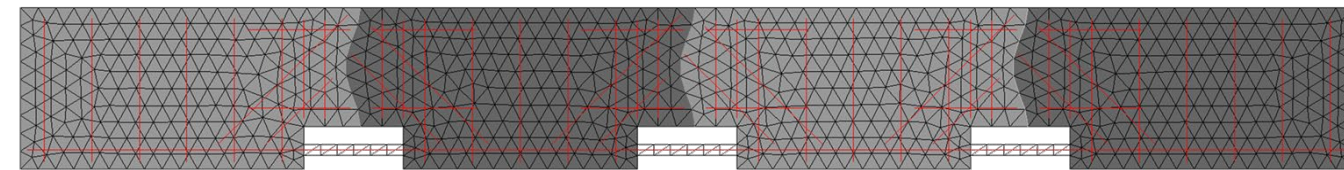
構築したFEモデルを用い、波形コンクリートシアキーの**振幅の大きさ**が連結桁の曲げ挙動に及ぼす影響を評価する



1.0 cosine供試体 (振幅: 1.0倍)

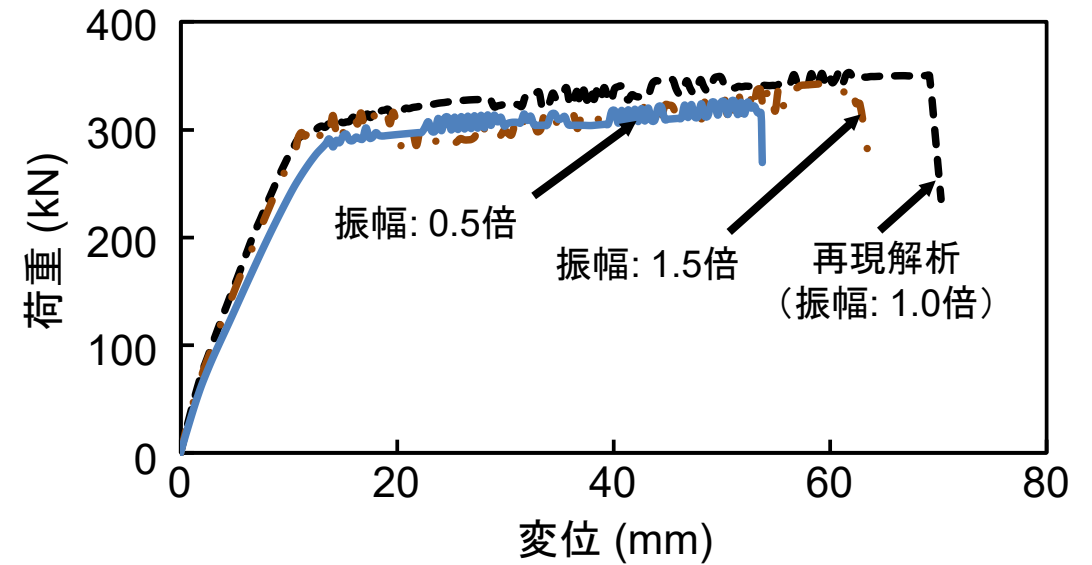


1.0 cosine供試体 (振幅: 1.5倍)



1.0 cosine供試体 (振幅: 0.5倍)

振幅を変更したFEモデル

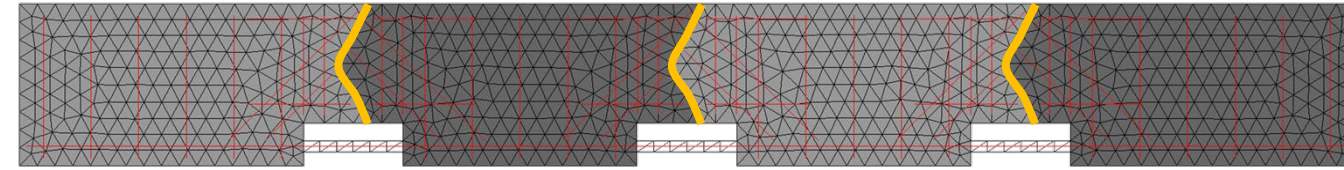


荷重-変位関係

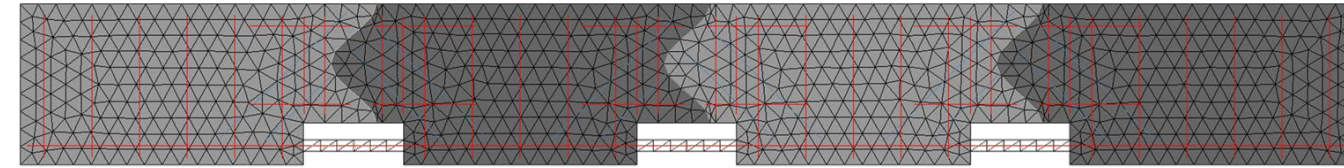


検討事項①：最適な波形形状の同定

構築したFEモデルを用い、波形コンクリートシアキーの**振幅の大きさ**が連結桁の曲げ挙動に及ぼす影響を評価する



1.0 cosine供試体 (振幅: 1.0倍)

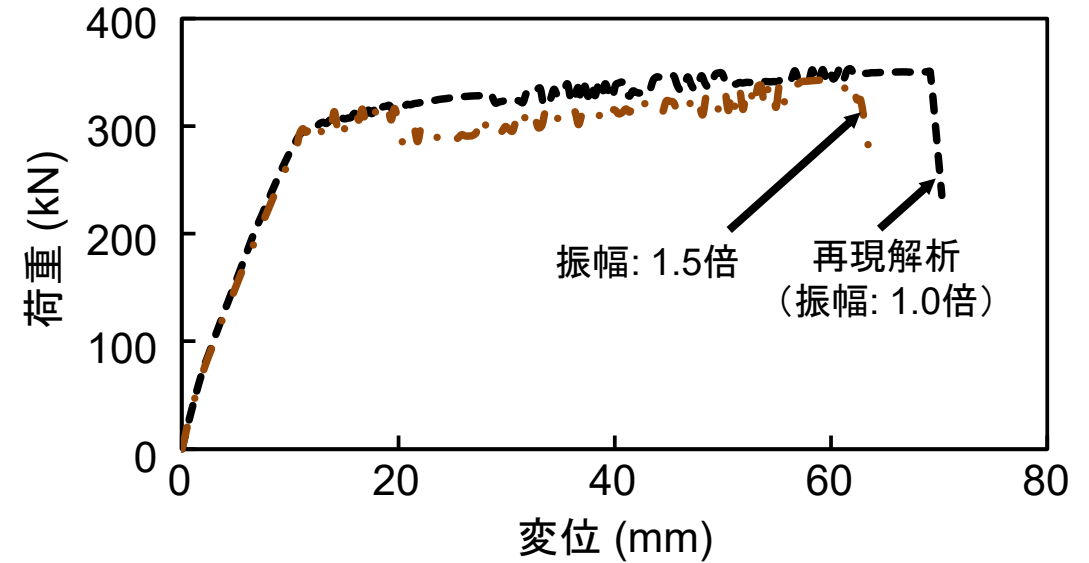


1.0 cosine供試体 (振幅: 1.5倍)

振幅を変更したFEモデル

振幅拡大時：

- コンクリートシアキー同士のインターロッキング→**増加**
- 純曲げ区間にあるコンクリートシアキーの回転が相対的に妨げられる
- 応力集中により、早期に圧縮縁コンクリートの圧壊による荷重低下

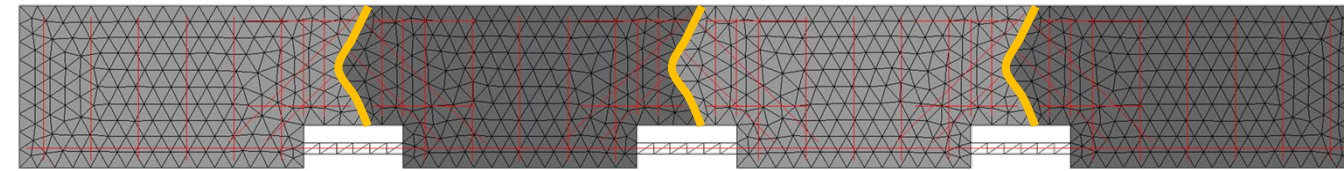


荷重-変位関係

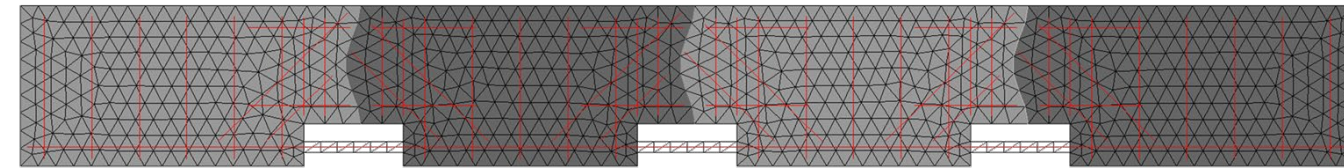


検討事項①：最適な波形形状の同定

構築したFEモデルを用い、波形コンクリートシアキーの**振幅の大きさ**が連結桁の曲げ挙動に及ぼす影響を評価する



1.0 cosine供試体 (振幅: 1.0倍)

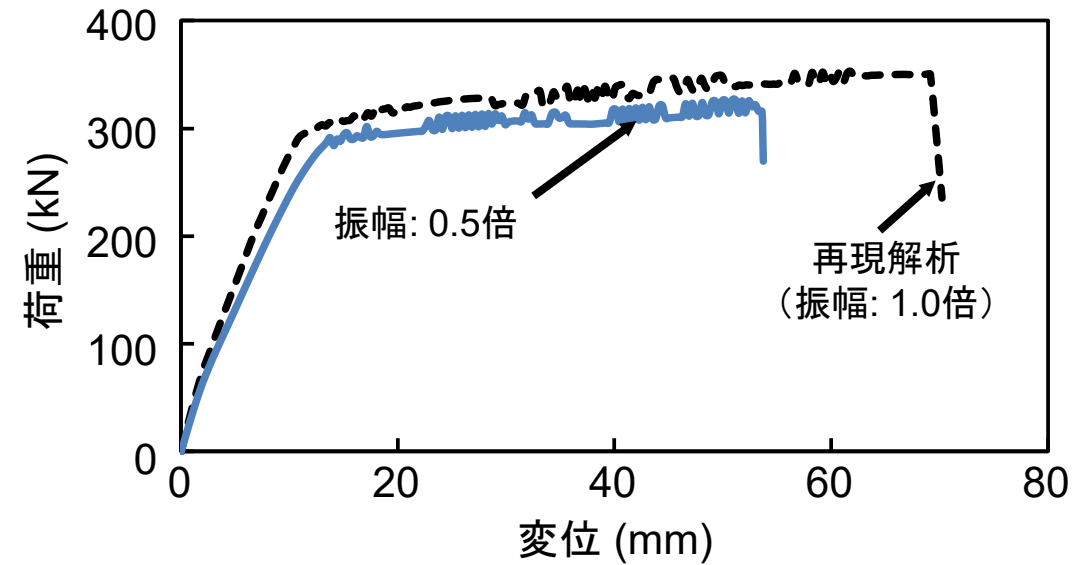


1.0 cosine供試体 (振幅: 0.5倍)

振幅を変更したFEモデル

振幅縮小時：

- コンクリートシアキー同士の接触面で生じる機械的な摩擦力→**減少**
- 初期剛性および終局変位→**低下**



荷重-変位関係



仮設橋梁の上部構造に関する成果



曲げ載荷実験

□ 検討事項①：最適な波形形状の同定

- 波形コンクリートシアキーは寸法効果を受けず，波数をそのままに拡大して良い
- 曲げによる回転を許容することで，接続部を有しないRC桁と同等の耐荷性能を得る
- インターロッキングが生じ，回転が拘束されると脆性的な挙動になる

□ 検討事項②：接続部のせん断補強方法

- 提案するゲルバー梁のリブ部を参考に提案した配筋によるせん断補強が有効

有限要素解析

□ Coulomb摩擦のインターフェイス要素を用いることで，提案構造を有するRCブロック連結桁の曲げ挙動を再現できた

□ FEモデルの適用例として，波形の振幅を変更したコンクリートシアキーを持つ供試体の数値実験を行い，荷重-変位関係に与える影響を考察した



Since 1882

プレスリリース・メディア報道



早稲田大学, 2025年6月5日

Waseda University, June 13, 2025.

Research Activities
早稲田大学 研究活動

| | | | | | | |
|--------------|-------------------------------------|--|---|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| ニュース News | 研究・研究支援組織 Research Organizations | 研究データ・研究機器・研究支援制度 Research Activities Information | 産官学連携 Industry-Academia-Government Collaboration | 研究倫理 Office of Research Ethics | 研究推進ワンストップ窓口 Inquiry | ご支援のお願い Contribution |
|--------------|-------------------------------------|--|---|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|

News
ニュース

05
JUNE
2025

Tags
プレスリリース, 研究活動

✕ ポスト

✉ メールで送信

南海トラフ地震による災害廃棄物量は7~28万トン、処理には1.6年以上必要

南海トラフ地震影響域の早期復興とレジリエンス強化を目指して

ポイント

- ◆ 地震や津波による災害廃棄物の量と処理時間を、その処理・輸送に関わる複数のインフラシステムの被災状況を踏まえて、リスクアプローチに基づき推定する数値モデルを開発しました。
- ◆ 南海トラフ地震・津波の発生を想定した三重県南部のシミュレーションでは、災害廃棄物量は約7万トンから28万トンと推定され、その処理に少なくとも1.6年を要することが分かりました。
- ◆ 本研究により、将来の巨大災害に対する迅速な復旧活動や災害廃棄物処理のためには、複数のインフラシステム管理主体が連携して対策を講じる重要性が明らかになりました。

概要

災害廃棄物は、被災地の復旧や産業に深刻な影響を及ぼし、その処理速度は震災からの復興に要する時間、すなわちレジリエンス^{*1}に直結します。南海トラフ地震では全国で約4.2億トン、東日本大震災の約21倍の災害廃棄物が発生すると推計されており、事前の合理的なマネジメント手法の確立が急務です。

早稲田大学理工学術院の秋山充良（あきやまみつよし）教授、青木康典（あおきこうき）博士、Bandung



About Us Admissions Academics Research Campus Life Alumni Collaboration Give





Since 1882

プレスリリース・メディア報道



プレスリリース

- Waseda University: Improving Resilience to Tsunamis and Earthquakes via Predictions of Waste Disposal Times, June 13, 2025.
- 早稲田大学：南海トラフ地震による災害廃棄物量は7～28万トン、処理には1.6年以上必要，2025年6月5日

メディア報道

- EurekAlert: Improving resilience to tsunamis and earthquakes via predictions of waste disposal times, June 13, 2025.
- MSN: Predicting post-disaster waste disposal times to improve resilience to tsunamis and earthquakes, June 13, 2025.
- The Cool Down (TCD): Scientists make fascinating discovery after studying earthquakes and tsunamis: 'Critical insights', July 13, 2025.
- 共同通信PRワイヤー：南海トラフ地震による災害廃棄物量は7～28万トン、処理には1.6年以上必要，2025年6月5日
- 日本経済新聞：早大など、地震と津波のマルチハザードにより発生する災害廃棄物の量と処理時間を算定する数理手法を開発，2025年6月5日
- マイナビニュース（TECH+）：南海トラフ地震の災害廃棄物処理には1年半以上を要する可能性 - 早大が推定，2025年6月6日

他11件以上



発表論文（国際誌）

- Akiyama, M.: Life-cycle approaches to sustainable and resilient infrastructure: Innovations in multi-hazard frameworks, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2025.
- Aoki, K., Akiyama, M., Alhamid, A.K., Frangopol, D.M. and Koshimura, S.: Resilience-based estimation of the disaster waste disposal time considering interdependencies between waste disposal and road network systems under seismic and tsunami hazards in coastal communities, *Reliability Engineering and System Safety*, 262: 111242, 2025.
- Aoki, K., Akiyama, M., Alhamid, A.K., Frangopol, D.M. and Koshimura S.: Probabilistic connectivity assessment of road networks subjected to ground motion and tsunamis considering the spatial correlations among hazard intensities, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, 29(8): 04024057, 2024.
- Feng, S., Akiyama, M., Hikita, S., Kobayashi, S., Takahashi, H., and Arima, S.: Cyclic loading tests and seismic fragility analysis of rocking arch-shaped segmental pier with annular double sliding system, *Journal of Earthquake Engineering*, 29(11): 2400-2428, 2025.
- Feng, S., Akiyama, M., Usui, S., Hikita, S., Takahashi, H., and Arima, S.: Cyclic loading tests and seismic performance evaluation of arch-shaped concrete masonry segmental pier with annular double sliding system, *Journal of Earthquake Engineering*, 29(2): 465-496, 2024.

発表論文（国内誌）

- 山下智輝, 青木康貴, 宇野洋志城, 秋山充良 : 緊急仮設橋を想定した波形コンクリートシアキー接続構造を有するプレキャストRCブロック連結桁の曲げ挙動, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.47, No.2, pp.145-150, 2025. (年次論文奨励賞)
- 花木冬芽, 青木康貴, 宇野洋志城, 秋山充良 : コンクリートシアキーおよび機械式鉄筋継手の接続部を有するプレキャストRCブロック連結桁の曲げ載荷実験, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.46, No.2, pp.517-522, 2024.



国内外会議発表

- ❑ Vitolo, E., Akiyama, M., Feng, S., Hikita, S., Kobayashi, S., Kato, R., Takahashi, H., Arima, S.: Numerical simulation of the rocking response of vault-shaped piers with double sliding system under bidirectional seismic loading, *The IABSE Young Engineers Colloquium East Asia and Germany* 18 May 2025, Tokyo, Japan ([Technical Paper Presentation Commendation](#))
- ❑ Kato, R., Akiyama, M., Feng, S., Hikita, S., Kobayashi, S., Vitolo, E., Takahashi, H., Arima, S.: Shaking table tests of rocking vault-shaped segmental pier with annular double sliding system, *The IABSE Young Engineers Colloquium East Asia and Germany* 18 May 2025, Tokyo, Japan
- ❑ Kobayashi, S., Akiyama, M., Feng, S., Hikita, S., Takahashi, H., Arima, S.: Experimental Performance Evaluation of Arch-Shaped Precast Concrete Bridge Piers Equipped with Friction Pendulum Systems under Cyclic Loads, *4th IABSE Young Engineers Colloquium in East Asia*, Hong Kong
- ❑ Yamashita, T., Akiyama, M., Hanaki, F., Aoki, K., Uno, Y., Hiromitsu, T.: Experimental and Numerical Study on Precast RC Block Beams with Wave-Shaped Concrete Shear Key Connections for Emergency Temporary Bridges, *4th IABSE Young Engineers Colloquium in East Asia*, Hong Kong
- ❑ Aoki, K., Akiyama, M., Alhamid, K.A., Frangopol, D.M., and Koshimura, S. 2024. Estimation of the disaster waste disposal time in coastal communities subjected to ground motion and tsunami. *Proceedings of 9th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2024)*, pp. 383-387, Hefei, China
- ❑ Aoki, K., Akiyama, M., Alhamid, A., Suzuki, N., Frangopol, D., and Koshimura, S., 2024. Probabilistic estimation of time to dispose of disaster waste caused by ground motion and tsunami. *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*, pp. 1-8, Milan, Italy.
- ❑ Feng, S., Akiyama, M., Yajima, M., Usui, S., Hikita, S., Takahashi, H., and Honda, R., 2024. Cyclic loading tests of concrete masonry piers with annular double sliding isolator. *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*, pp. 1-9, Milan, Italy.



国内外会議発表

- Hanaki, F., Akiyama, M., Aoki, K., Uno, Y., Hiromitsu, T.: Detachable precast RC beams with connections composed of concrete shear keys fabricated by 3D printed molds and steel couplers for emergency temporary bridges, *3rd IABSE Young Engineers Colloquium in East Asia*, Seoul, Korea. (Best Paper Winner)
- Aoki, K., Akiyama, M., Alhamid, A. K., Koshimura, S., Frangopol, D. M.: Framework for estimating probabilistic connectivity of bridge networks under both seismic and tsunami hazards, *3rd IABSE Young Engineers Colloquium in East Asia*, Seoul, Korea.
- Aoki, K., Akiyama, M., Alhamid, A. K., Koshimura, S., Frangopol, D. M. 2023. Probabilistic estimation of time required to dispose of disaster waste generated by both ground motion and tsunami. *International Workshop on Reliability-based Design*, Nagoya, Japan.
- Aoki, K., Alhamid, A. K., Akiyama, M., Koshimura, S., Frangopol, D. M.: Probabilistic estimation of time required for disaster waste disposal generated by both ground motion and tsunami, *Proceedings of 14th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP14)*, Dublin, Ireland. (ICAPS Student Award)
- 山下智輝, 秋山充良, 花木冬芽, 青木康貴, 宇野洋志城, 弘光太郎: 緊急仮設橋を想定した波型コンクリートシアキー接続構造を有するプレキャストRCブロック連結桁の基礎的研究, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会講演概要集, V-188, 2024.
- 小林慎太郎, 秋山充良, 臼井駿矢, 疋田翔悟, 石垣直光, 高橋宏和, 本田利器: 摩擦振子型免震機構を有するコンクリート組積造橋脚へのロッキング挙動の付与および正負交番載荷実験による応答性状の確認, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会講演概要集, CS10-29, 2024. (第79回年次学術講演会優秀講演)
- 青木康貴, 秋山充良, Abdul K. Alhamid, 越村俊一: 南海トラフ地震と津波による災害廃棄物量とその処理時間の確率論的推定, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会講演概要集, CS10-85, 2024.



国内外会議発表

- 小林慎太郎, 臼井駿矢, 疋田翔悟, Feng Shengming, 高橋宏和, 有馬俊, 秋山充良, 本田利器: ダブルリング摩擦振子型免震機構を付与したプレキャストコンクリート組積造アーチ橋脚の正負交番載荷実験, 第27回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.77-80, 2024.(優秀発表賞)
- 青木康貴, 秋山充良, 鈴木乃亜, 越村俊一: 地震と津波の影響を受ける廃棄物処分システムと道路ネットワークの相互依存性を考慮した災害廃棄物の除去時間に関する確率論的推定, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day3-G416-03, 2023.
- 疋田翔悟, 秋山充良, 矢島美季, 臼井駿矢, 高橋宏和, 石垣直光, 本田利器: 摩擦振子型免震機構を有するコンクリートブロック組積造橋脚の正負交番載荷実験, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day3-G416-09, 2023.
- 青木康貴, Alhamid Abdul, 秋山充良, 越村俊一: 地震動・津波ハザードの空間相関性を考慮した橋梁・道路ネットワークの確率論的接続性評価およびその南海トラフ地震影響域への適用, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演概要集, CS10-49, 2023.(第78回年次学術講演会優秀講演)
- 花木冬芽, 秋山充良, 青木康貴, 宇野洋志城: 鋼製シアキーと機械式継手を用いたプレキャストRCブロックの接続方法の提案および曲げ・せん断実験による耐荷力評価, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演概要集, V-54, 2023.
- 疋田翔悟, 秋山充良, 矢島美季, 臼井駿矢, 高橋宏和, 有馬俊, 石垣直光, 本田利器: 摩擦振子型免震機構を有するコンクリートブロック組積造橋脚の正負交番載荷実験, 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演概要集, CS10-114, 2023. (第78回年次学術講演会優秀講演)
- 疋田翔悟, 矢島美季, 臼井駿矢, 石垣直光, 高橋宏和, 秋山充良, 本田利器: コンクリートブロック組積造橋脚上に設けた二重滑り面を持つ摩擦振子の正負交番載荷実験およびその脆弱性評価, 第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.1-4, 2023.(優秀発表賞)
- 青木康貴, 鈴木乃亜, 秋山充良, 越村俊一: 地震動と津波ハザード強度の空間相関を考慮した橋梁・道路ネットワークの途絶確率算定手法の提案, 第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.97-100, 2023.