



技術文書の基本方針

2023年 5月15日

地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会(3期目)

幹事

技術文書(2024年追補版)の背景と目的

背景および目的

- ✓ 2018年改訂では、**三次元解析手法**などを導入した。
- ✓ 2021年は、以下の検討結果を拡充した。
 - ・ **液状化が生じた構造物の地震応答評価手法**
 - ・ **三次元非線形解析を用いた照査手法**
 - ・ **断層変位に対する影響評価手法**
- ✓ 一方で、以下の課題が残されていることから、構造実験および解析検討を実施し、鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査手法を高度化するとともに、2021年版に追補することを目的とする。
 - ・ 岩盤中に存在する破砕帯(弱層)の地震時の変形などによる構造物への影響評価手法の構築(**破砕帯に埋設されたRC構造物の耐震性能評価**)
 - ・ 近年採用実績が増えている円形立坑への液状化影響評価手法の構築(**液状化地盤中の三次元構造物の地震応答評価**)
 - ・ これらの標準化(**耐震性能照査手法の標準化**)



技術文書(2024年追補版)の構成(案)

2021年版に追補するという位置づけとし、2024年版では2021年版の必要箇所を既往の手法として再掲するに留め、「密な地盤の液状化」および「破碎帯」に対する評価技術に特化した追補版とする。

また、耐震性能照査指針2021年版を英文化し、日英版を刊行する。



技術文書(2024年追補版)の構成(案)

目次(案)

第 I 部 密な地盤の液状化に対する影響評価技術

第1章 密な地盤の液状化を考慮した耐震性能照査

※基本事項の整理、既往手法のレビュー、補足説明など

第2章 密な地盤に埋設された構造物の耐震性能照査例

2.1 二次元非線形解析を用いた液状化が生じた構造物の耐震性能照査例

※新規作成「取水立抗」

2.2 三次元非線形解析を用いた液状化が生じた構造物の耐震性能照査例(1)

※新規作成「取水立抗」

2.3 三次元非線形解析を用いた液状化が生じた構造物の耐震性能照査例(2)

※ 2021年版照査例VIと同じ(取水ピット)

第3章 密な地盤の液状化に対する影響評価に係る諸検討

- ・液状化に係る既往文献調査（液状化被害を受けた放水路の事例など）
- ・密な地盤に埋設された三次元RC模型の載荷実験
- ・密な地盤に埋設された三次元RC模型の載荷実験の再現解析(FLIP)
- ・地盤の液状化を考慮した材料非線形解析(COM3)
- ・地盤の液状化を考慮した三次元実規模構造物の材料非線形解析(FLIP、COM3)

技術文書(2024年追補版)の構成(案)

第Ⅱ部 破砕帯に対する影響評価技術

第1章 破砕帯を交差する構造物の耐震性能照査

※基本事項の整理、既往手法のレビュー、補足説明など

第2章 破砕帯を交差する構造物の耐震性能照査例

2.1 二次元非線形解析を用いた破砕帯を交差する構造物の耐震性能照査例

※新規作成「円形トンネル(二次元)」

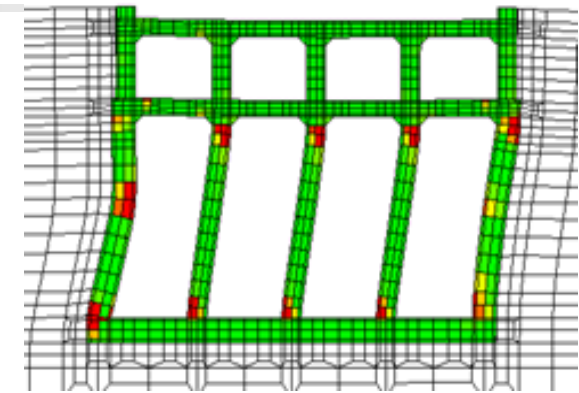
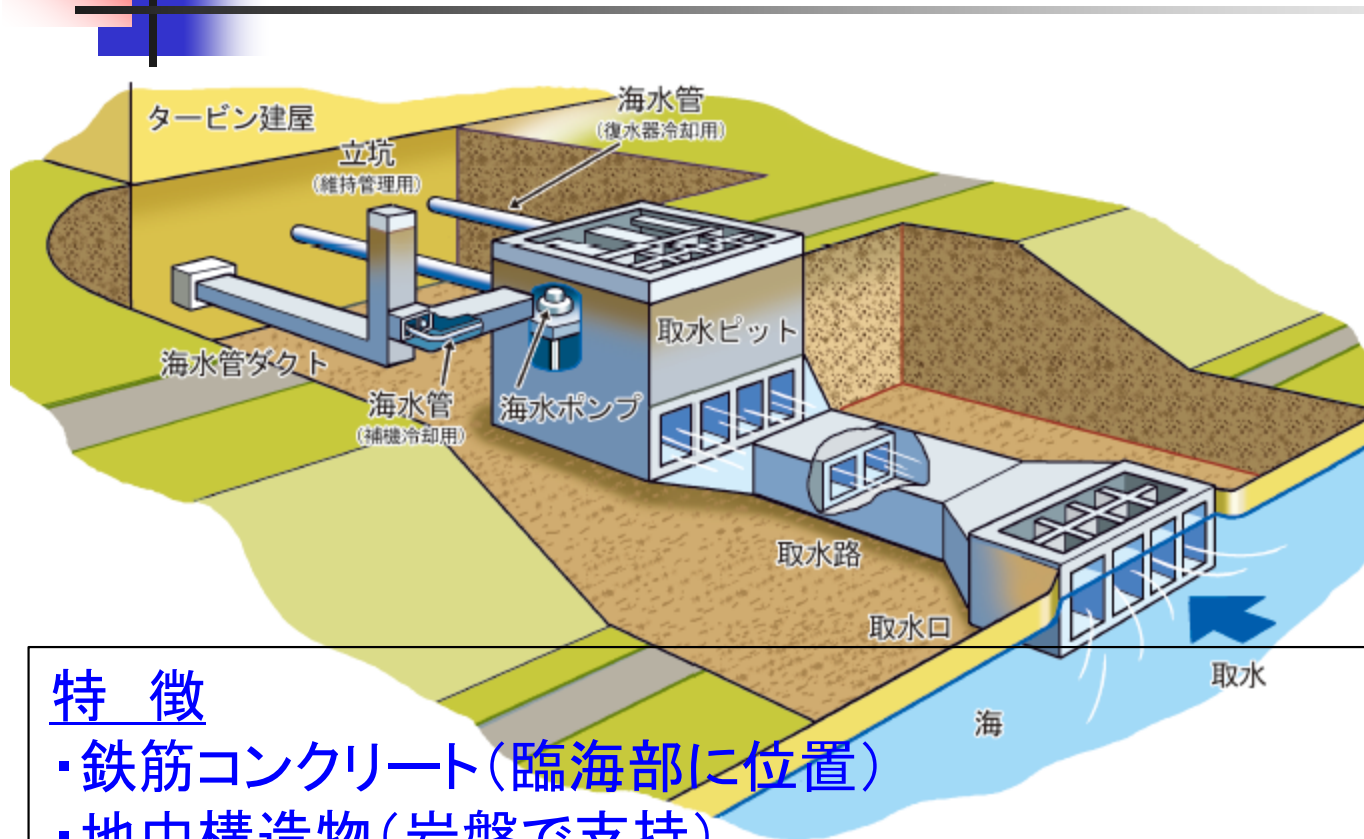
2.2 三次元非線形解析を用いた破砕帯を交差する構造物の耐震性能照査例

※新規作成「円形トンネル(三次元)」

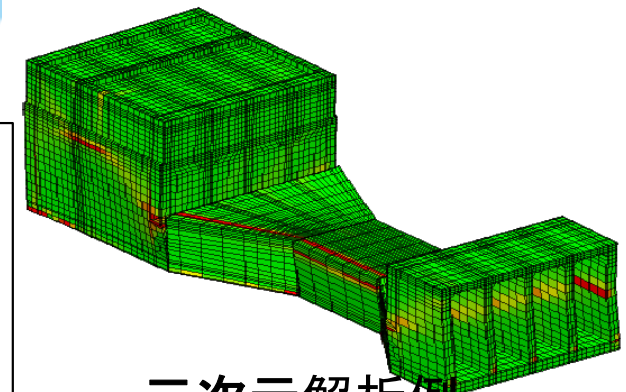
第3章 破砕帯に対する影響評価に係る諸検討

- ・破砕帯に係る既往文献調査（アンケートや審査事例など）
- ・破砕帯に埋設されたRC模型の構造実験
- ・破砕帯に埋設されたRC模型の構造の挙動解析(DIANA)
- ・局所変形を受ける円形トンネルの限界状態に対する検討(COM3)
- ・破砕帯を考慮した実用的な非線形解析手法の検討(実規模解析)

対象とする屋外重要土木構造物の概要



二次元解析例
(取水ピット横断面)



三次元解析例
(取水ピット・主水路・取水口)

特徴

- ・鉄筋コンクリート(臨海部に位置)
- ・地中構造物(岩盤で支持)
- ・線状構造物(取水方向に長い、ジョイントで縁切り)

- ✓ 非常用冷却水の確保のため、重要度Sクラスの機器・配管を間接的に支持
- ✓ 耐震性能照査では、簡便性や保守性の観点から二次元解析が主流である。
- ✓ 最近の基準地震動の増大を受けて、現実性や合理性の観点から、三次元解析手法の導入を推進している。

関連技術に関わる研究活動の現状と取組み状況

1. 液状化地盤中の三次元構造物の地震応答評価

研究の背景

原子力発電所に係わる新規規制基準の制定および地震に関する知見の蓄積により基準地震動が見直され増大していく趨勢にあり、密な地盤であっても液状化が生じる可能性が懸念される。密な地盤中に構築される構造物に対する液状化の影響は、これまで検討事例が少ない。前フェーズでは矩形断面を持つ立坑(矩形立坑)を対象として、載荷実験と再現解析および実大構造物を対象とした解析的検討を実施しているが、周辺地盤の一部の飽和層に僅かに液状化が生じた程度であり、全層液状化およびより液状化しやすい条件における構造物への影響把握が課題として残されている。

また、近年採用が増えている円形断面をもつ立坑(円形立坑)に対する液状化の影響については、これまで検討がなされていない。

研究の目的

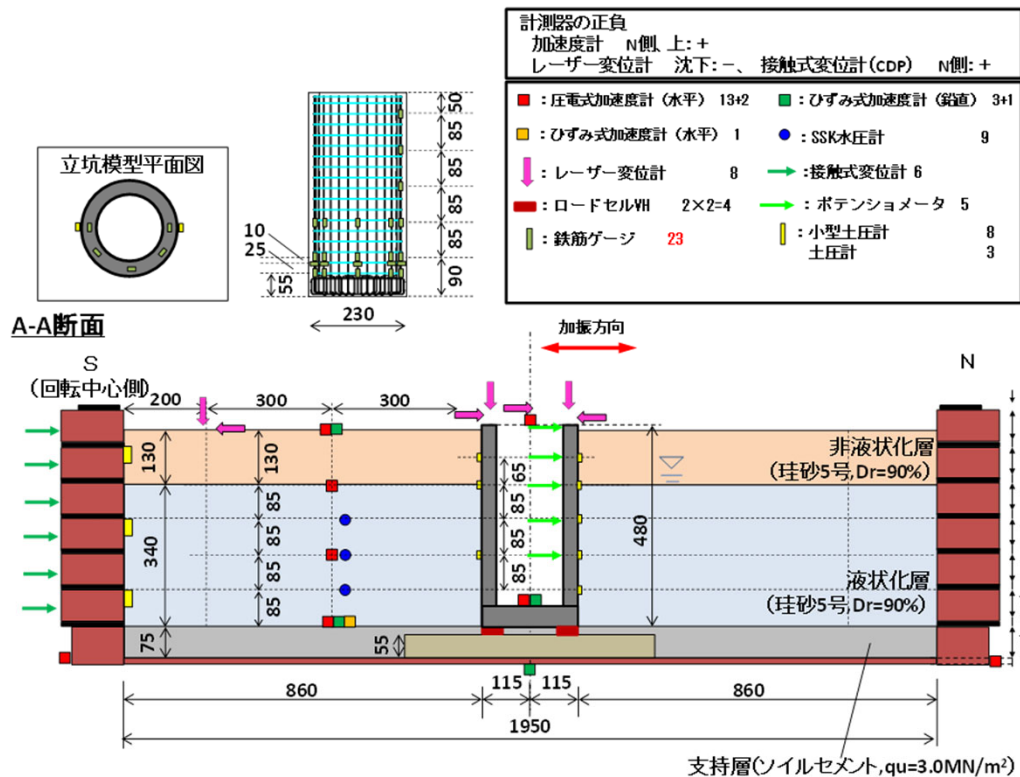
地盤の液状化が屋外重要土木構造物の耐震性能に及ぼす影響を評価して、解析手法および照査手法の構築ならびに体系化を図ることを目的とする。

1-1 RC模型の遠心載荷実験に基づく検討

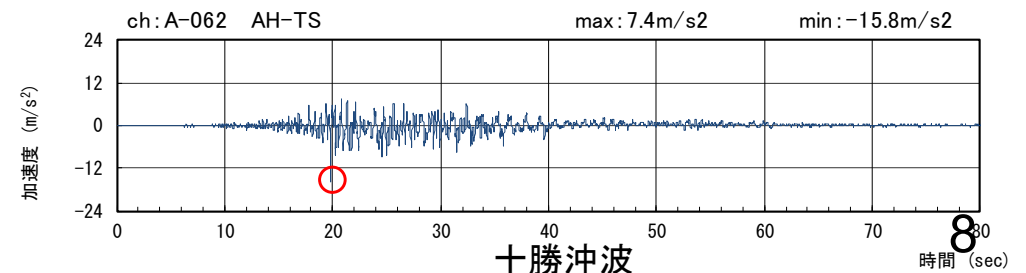
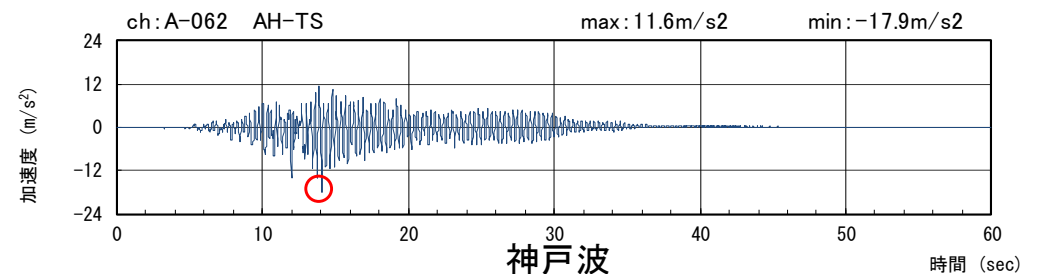
全4ケースの遠心載荷実験のうち、今年度はケース1およびケース2の実験、実験結果のまとめ、事後解析を実施した。

事前解析よりケース3およびケース4の構造物への影響（土圧、応答加速度、損傷状況など）を確認した。

ケース	立坑形状	模型	地盤	備考
1	円形	非線形	液状化地盤	基本ケース
2	円形	弾性	液状化地盤	弾性と非線形の比較
3	円形	非線形	液状化地盤	盛土設置, ケース1との比較
4	円形	非線形	液状化地盤	構造物を岩盤に根入れ, ケース1との比較

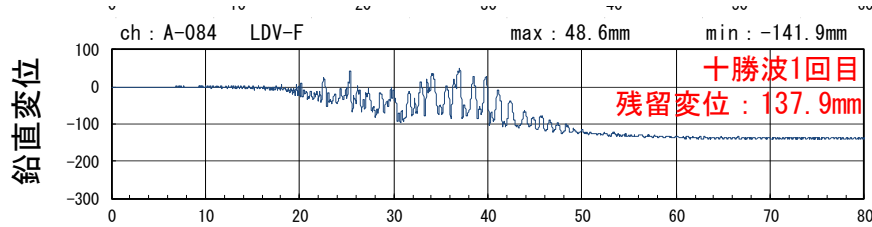


加振は、①神戸波 (1,500gal 目標) → ②十勝沖波1回目 (1,900gal 目標) → ③十勝沖波2回目 (1,900gal 目標) の順で実施した。

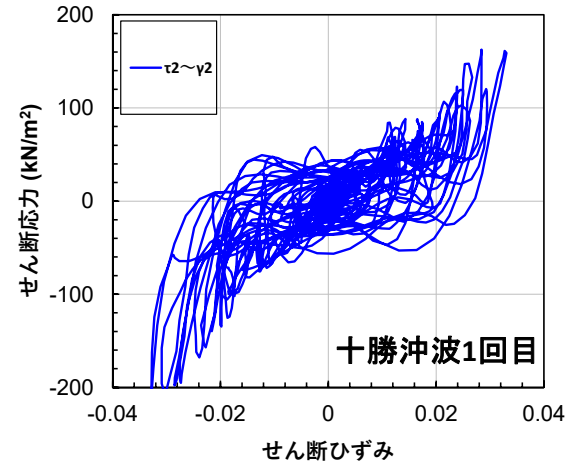
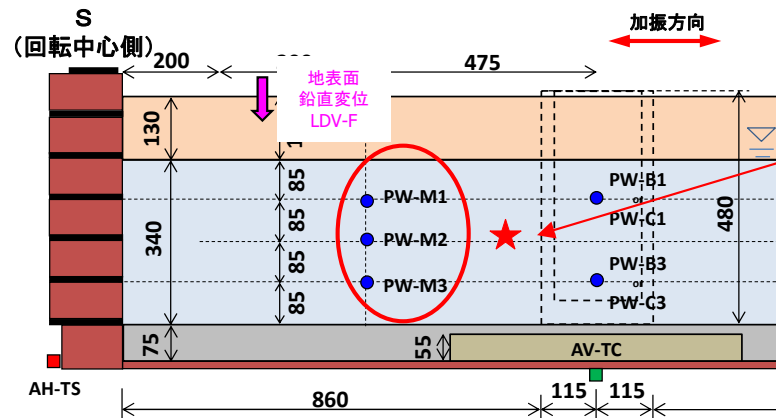


1-1-1 遠心載荷実験結果

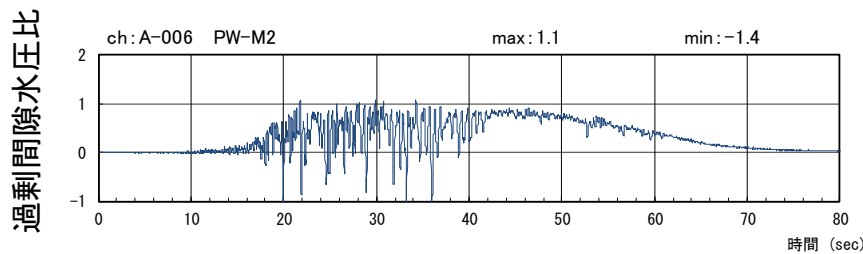
地盤の応答(十勝沖波加振1回目) ← 鉄筋降伏が生じた加振



鉛直変位時刻歴



液状化層中央部★のせん断応力-せん断ひずみ関係

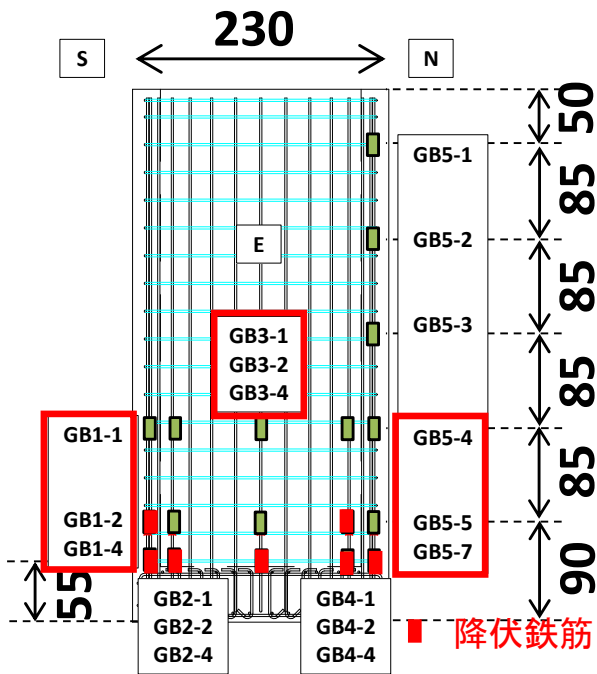


過剰間隙水圧比時刻歴 (PW-M2)

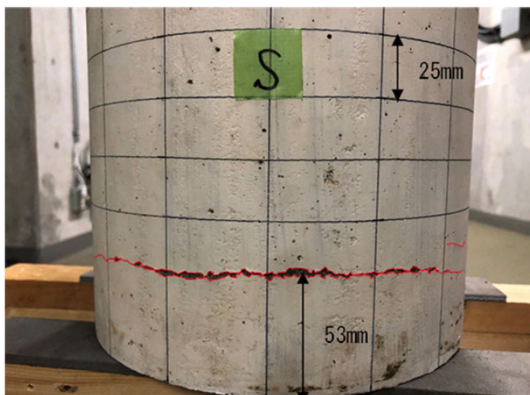
- 十勝沖波加振1回目により、過剰間隙水圧比が1に到達した。水圧比の応答は負圧のが卓越するなど、密地盤特有の応答となった。
- 鉛直変位は約140mm程度と小さく、これは地盤層厚全体の1%に相当する。
- せん断応力-せん断ひずみ関係からは、逆S字カーブを呈していることが見て取れ、典型的な密地盤の挙動を確認した。せん断ひずみが片振幅2%を超えると変形にブレーキがかかり、最大でも3%程度までの変形に留まった。

1-1-2 遠心載荷実験結果

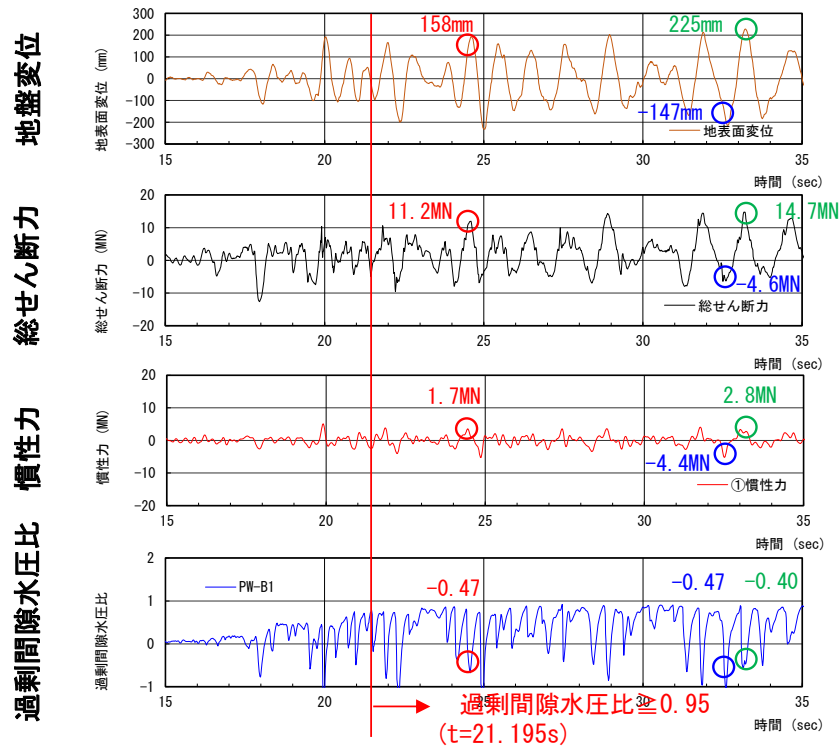
ケース1における立坑の応答(十勝沖波加振1回目)←鉄筋降伏が生じた加振



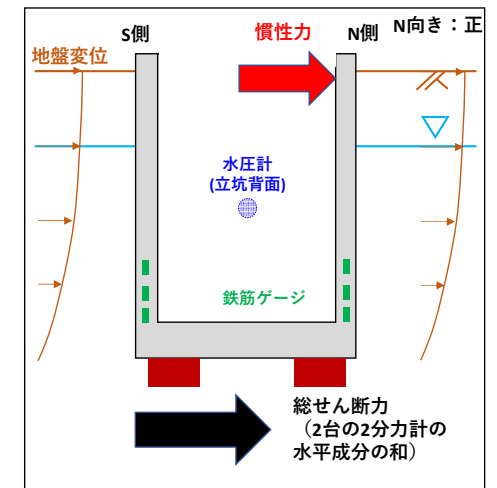
軸方向鉄筋 ゲージ配置図



立坑基部の損傷状況



- S側基部鉄筋の降伏 (t=24.525s)
- E側基部鉄筋の降伏 (t=33.195s)
- N側基部鉄筋の降伏 (t=32.55s)

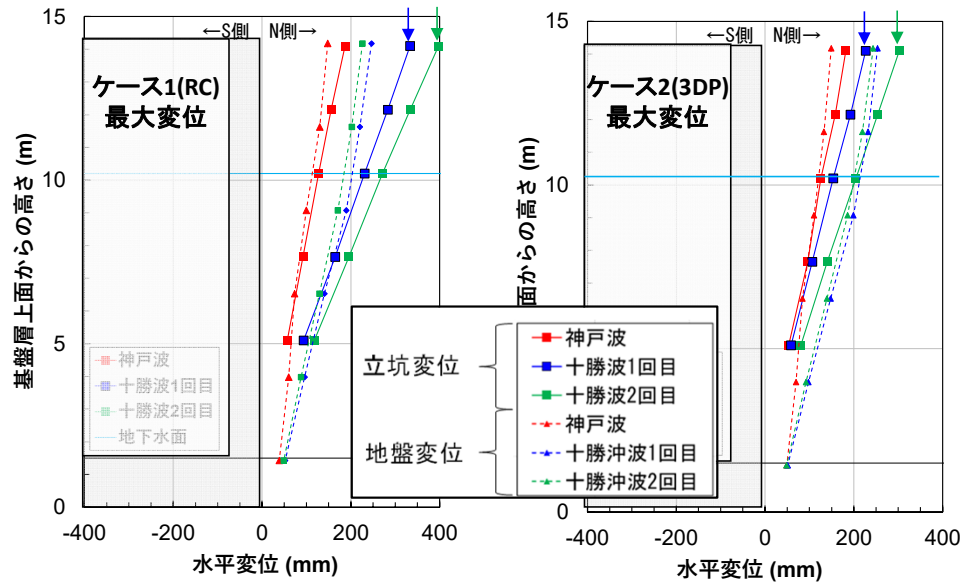


軸方向鉄筋降伏時の作用外力の関係

- 十勝沖波加振1回目で軸方向鉄筋が降伏した(立坑基部)
- 鉄筋降伏時の作用外力を整理すると、①地盤変位の影響を大きく受けること②慣性力の寄与割合が大きくないこと③過剰間隙水圧比が一時的に低下(地盤剛性が一時回復)するタイミングで降伏すること、が明らかになった。

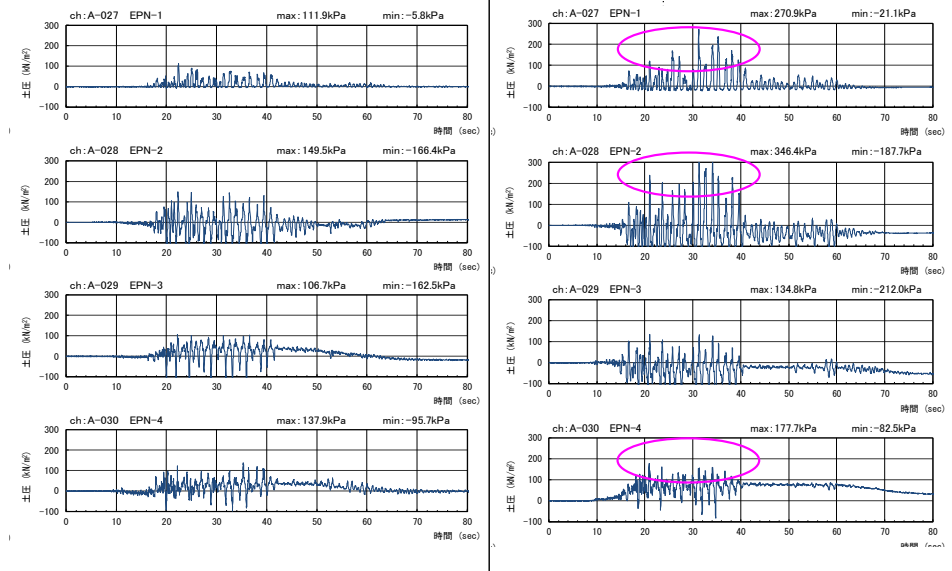
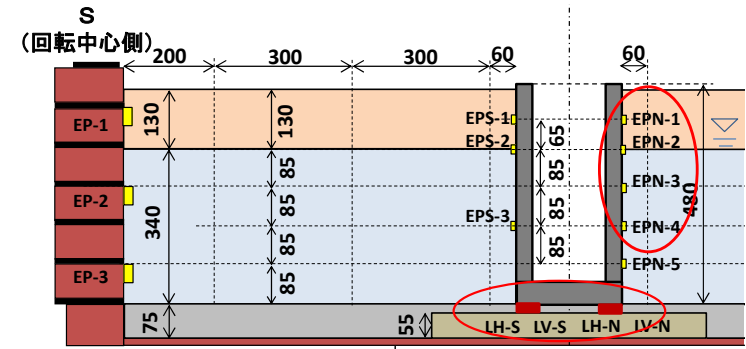
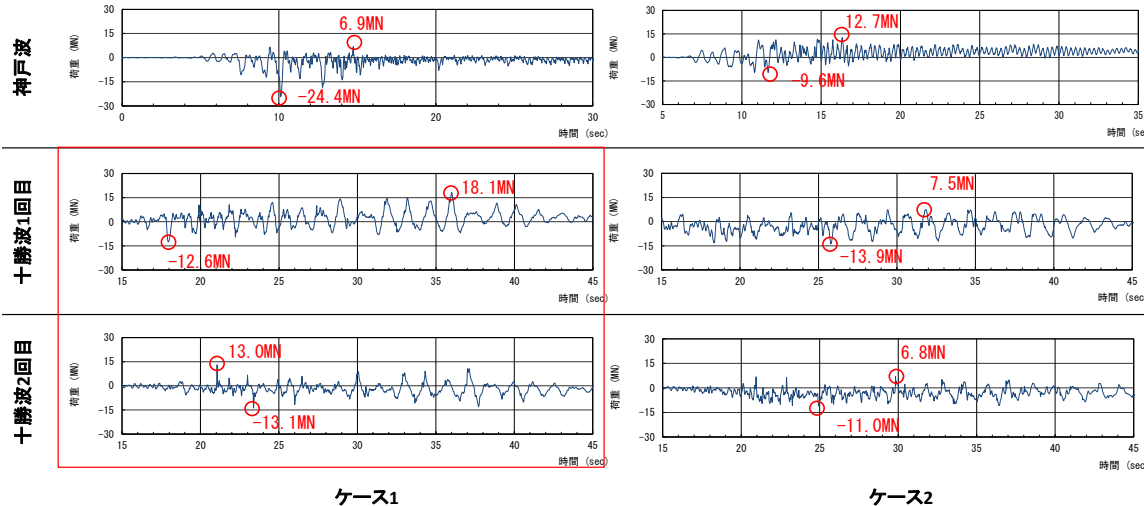
1-1-2 遠心载荷実験結果

ケース1(非線形)とケース2(弾性)の比較



➤ 非線形モデルと弾性モデルの応答を比較した結果、非線形化することで①変位量の増加②動土圧の減少（地盤反力の減少）③総せん断力の減少、といった応答を確認した。

立坑内部 最大水平変位の比較(左:ケース1、右:ケース2)

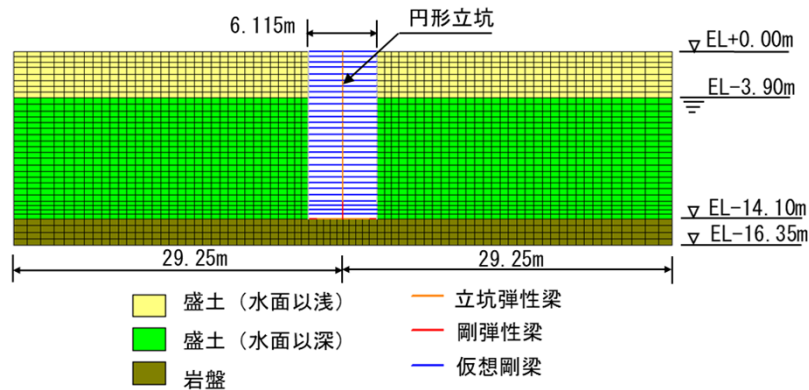


十勝沖波加振1回目における動土圧時刻歴の比較(左:ケース1、右:ケース2)

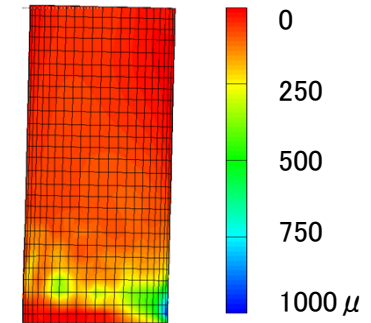
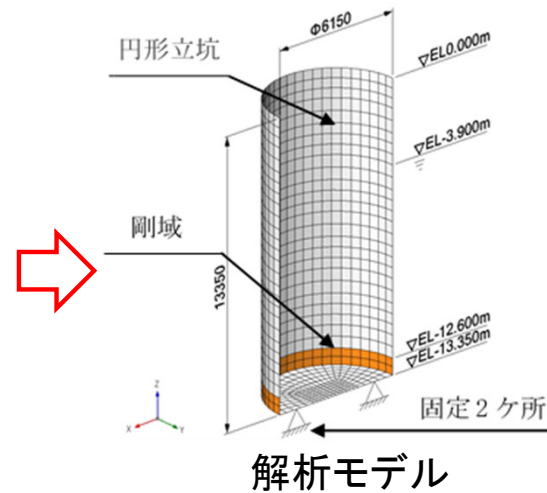
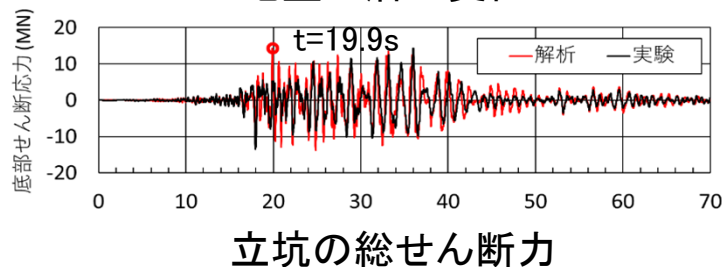
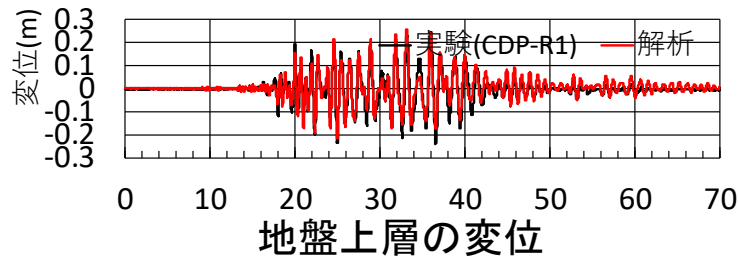
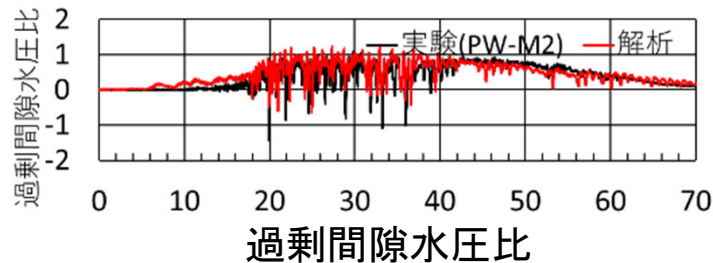
総せん断力時刻歴の比較(左:ケース1、右:ケース2)

1-1-3 遠心載荷実験の再現解析結果

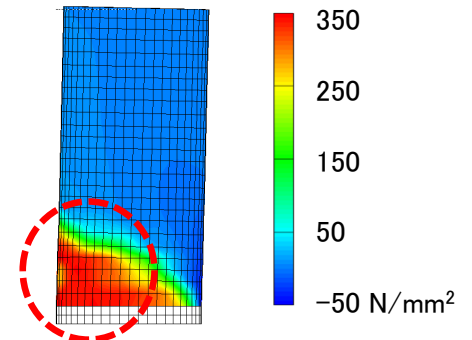
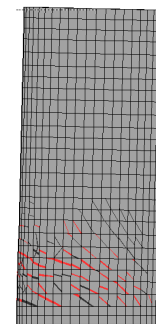
ケース1 (非線形、十勝沖波)の再現解析



解析モデル



最小主ひずみ図



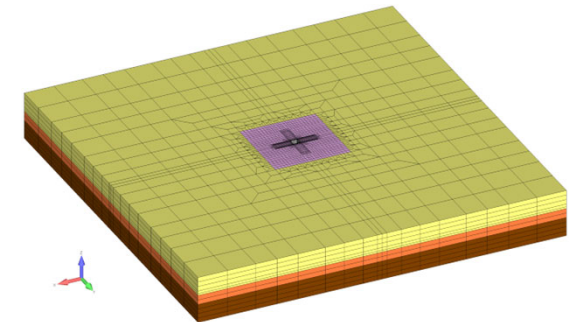
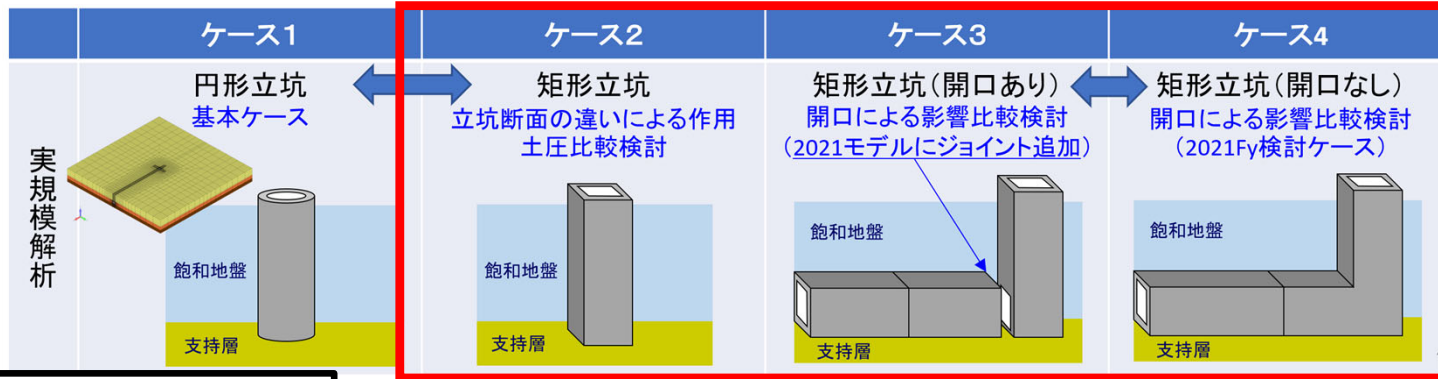
鉛直鉄筋応力図

t=19.9sにおける損傷評価

- 二次元有効応力解析により、実験の再現解析を行い、密な地盤の挙動および円形立坑の応答を再現できることを確認した。
- 三次元構造物モデル (材料非線形) の解析により、円形立坑の破壊モードを再現できることを確認した。

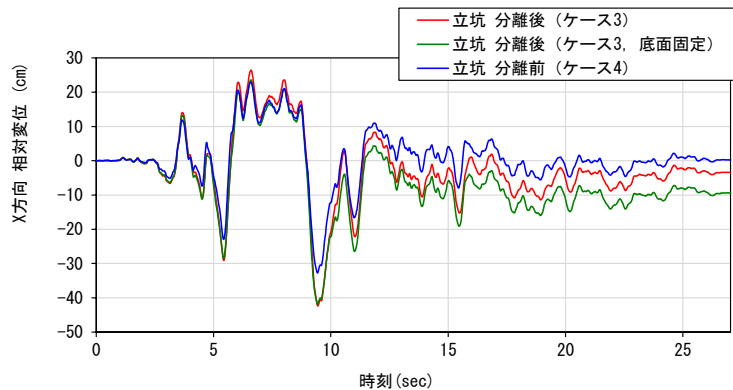
1-2 実規模RC構造物を対象とした解析的検討

解析ケース



解析モデル

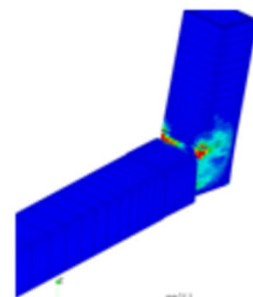
立坑相対変位



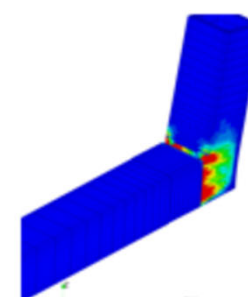
ケース4はケース3に比べて-X方向の変形が抑えられる傾向があった。

ケース3は立坑のロッキングの影響を含んでいた。ケース3の底面を固定したケース3'は開口部に引張ひずみが集中する傾向があった。ケース3'は-X方向に残留変形が残る結果であった。

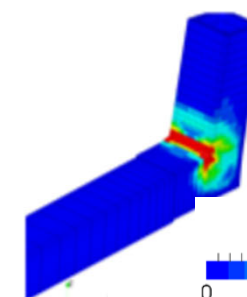
変形+最大主ひずみ分布 (最大変形時)



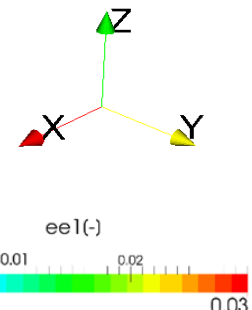
ケース3



ケース3'



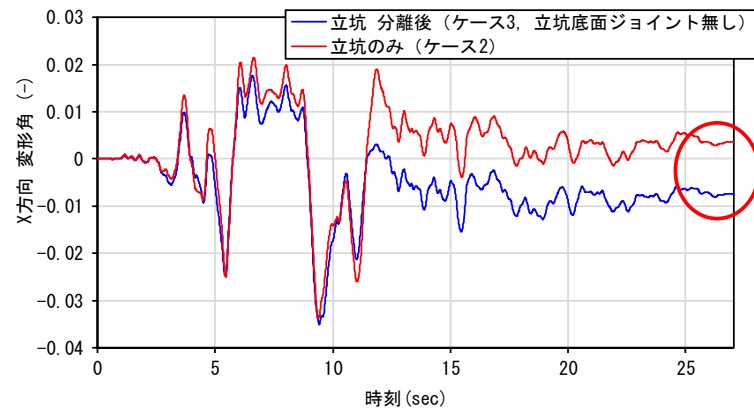
ケース4



1-2 実規模RC構造物を対象とした解析的検討

解析結果 (ケース2, 3'の比較)

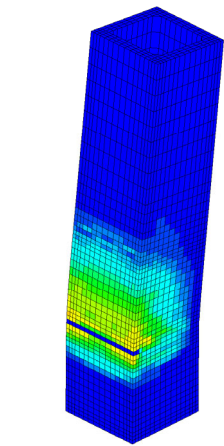
立坑変形角



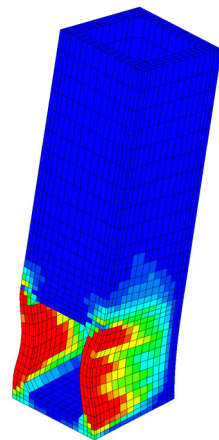
ケース2, 3'で最大変形角は概ね同じであった。残留変形角はケース3'の方が大きく、-X方向に生じていた。

最大主ひずみ分布図から開口部に引張ひずみが集中する傾向があり、加振直交方向の側方土圧の影響も認められた。

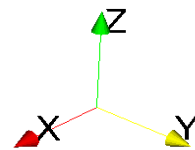
変形+最大主ひずみ分布 (最大変形時)



ケース2



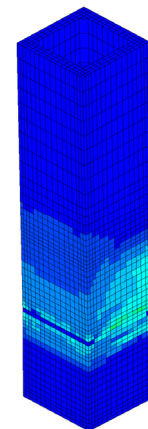
ケース3'



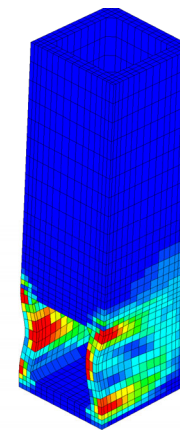
ee1(-)



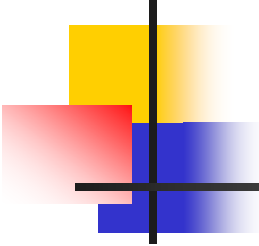
変形+最大主ひずみ分布 (残留変形時)



ケース2



ケース3'



1-3 まとめおよび今後の予定

まとめ

(1) RC模型の遠心載荷実験に基づく検討

ケース1, 2の遠心載荷実験および事後解析を実施し, 二次元有効応力解析により密な地盤の挙動および円形立坑の応答を再現できること, 三次元構造物モデル(材料非線形)の解析により円形立坑の破壊モードを再現できることを確認した。

(2) 実規模RC構造物を対象とした解析的検討

立坑の構造に着目したパラメータ解析を実施し, 構造の違いによる地震応答の差異を確認した。

今後の予定

(1) RC模型の遠心載荷実験に基づく検討

- 2023年度
- 載荷実験の実施および実験結果のまとめ(ケース3, 4)
 - 実験の事後解析(ケース3, 4)およびパラメータ解析

(2) 実規模RC構造物を対象とした解析的検討

- 2023年度
- パラメータ解析
 - 解析の適用性検討

研究の背景

東北地方太平洋沖地震以降の基準地震動の増大に伴って、耐震安全性に対して従来の保守的な評価を高度化することが必要となっている。特に、屋外重要土木構造物が破砕帯(弱層)と交差する場合には、耐震性能照査が厳しくなる可能性が懸念される。

また、破砕帯(弱層)による変形を受けるRC構造物の挙動については未解明な部分も多く、評価手法を構築していくことが求められている。

研究の目的

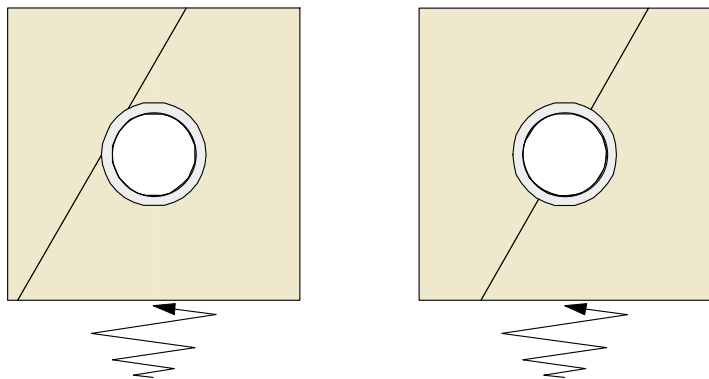
- ①破砕帯(弱層)による変形がRC構造物の耐荷特性や損傷・破壊過程に及ぼす影響を実験的に評価する。
- ②実験の再現解析に基づいて、破砕帯(弱層)をモデル化した二次元および三次元解析手法の適用性を検証する。
- ③破砕帯(弱層)による変形を受けたRC構造物の限界状態の設定に活用する。

※本研究における「破砕帯」について:

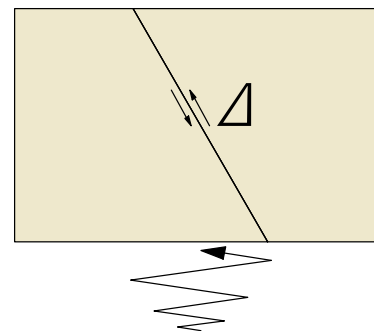
用語の厳密な定義は構造関係者で閉じない議論になると思われるが、ここでは、「地震時に着目領域に含まれる弱層の下端に、同領域外から強制される変位(端的に言えば断層変位)が十分小さいと判断されている場合の当該弱層」を想定している。

2-1 追補版記載内容のイメージ

現状、以下が応答解析モデル・手続きの候補。成立性が確認できれば、対応する判定基準を記載。

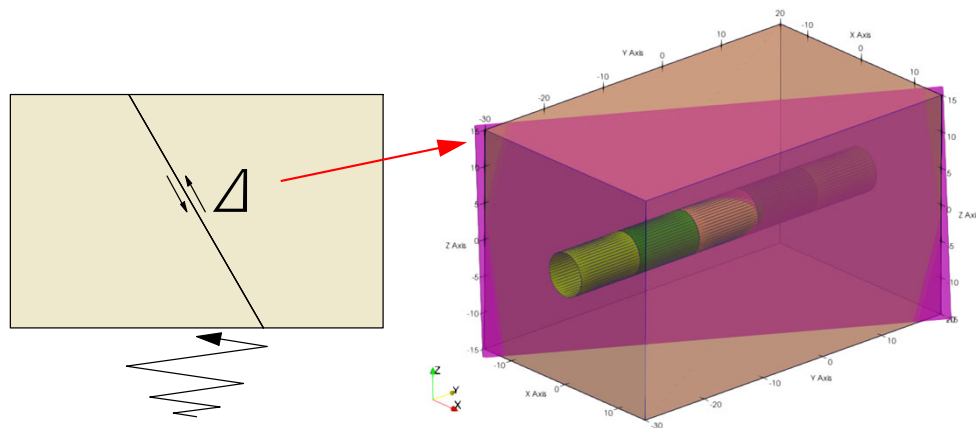


a. 横断面(複数)

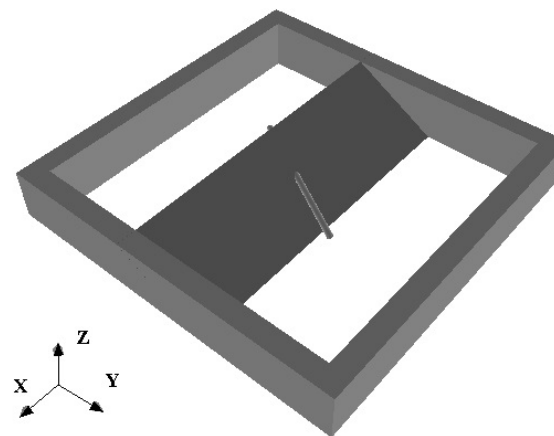


$$\Delta \leq \Delta_{lim}$$

b. 傾斜断面 & 判別式

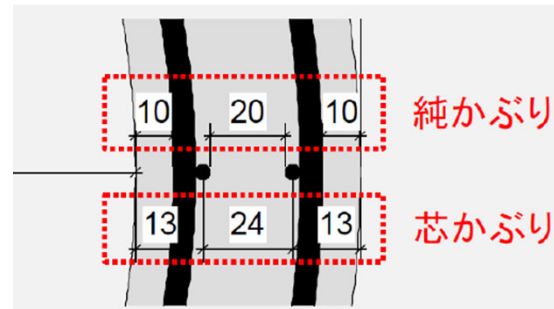
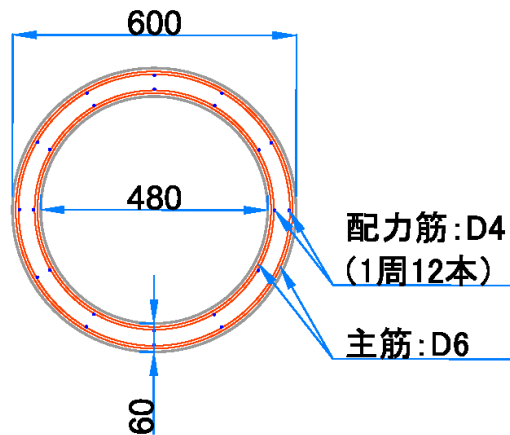
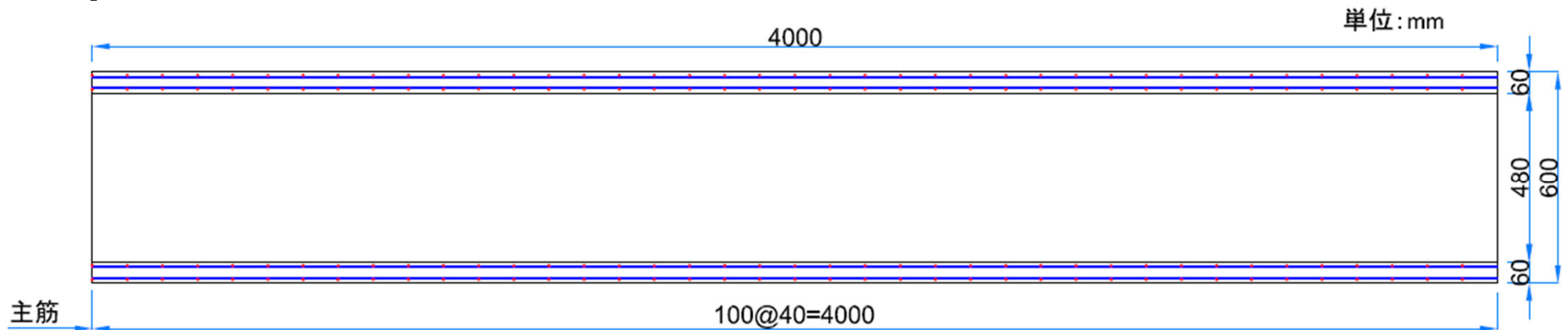


c. 傾斜断面 & 近傍3Dプッシュオーバー



d. 3Dフルモデル動的解析

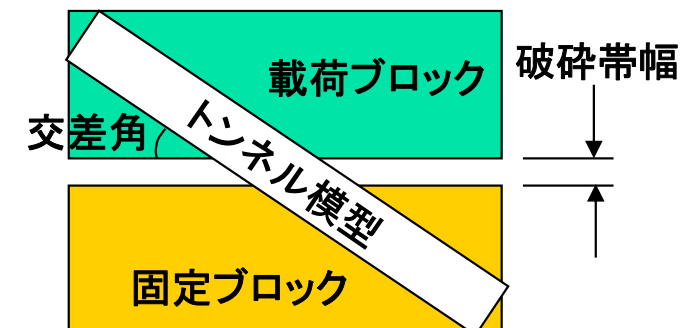
2-2 トンネル模型仕様・試験ケース



- 外径: 600mm, 内径: 480mm, 部材厚: 60mm
- モルタル: 目標強度24~30N/mm²
- 鉄筋: SD295, D6(主筋), D4(配力筋)
- 鉄筋比: 1.1%(主筋), 0.33%(配力筋)

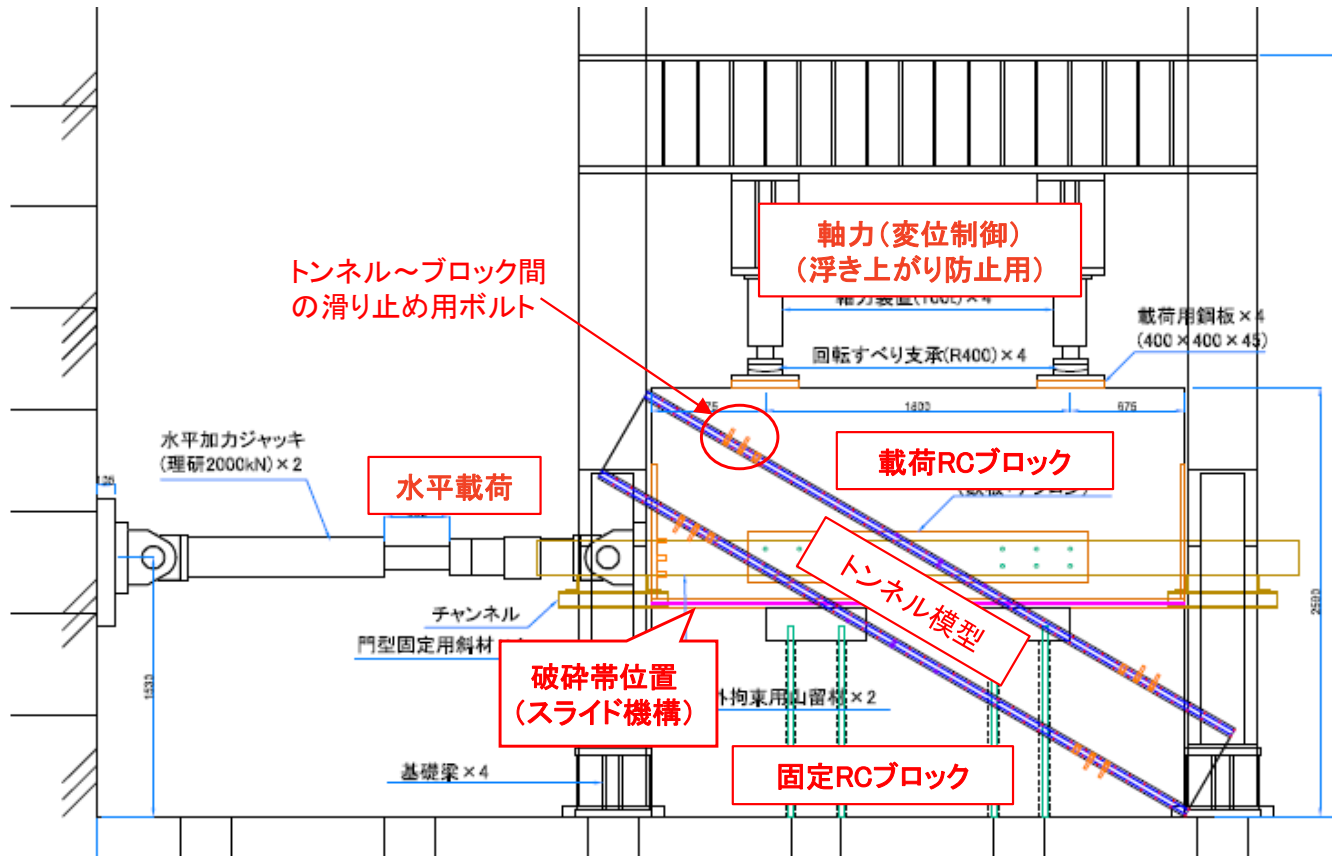
合計4体

	交差角	载荷方向	破砕帯幅	実験日
Case1	30°	X方向	50mm	2022年7月8日
Case2	30°	Y方向	50mm	2022年6月28日
Case3	60°	X方向	50mm	2022年7月29日
Case4	60°	X方向	300mm	2022年7月22日



2-3 載荷方法概要・材料試験結果・主な計測項目

載荷方法概要 Case1(交差角:30° 載荷方向:X方向 破砕帯幅:50mm) の例



実験日の圧縮強度

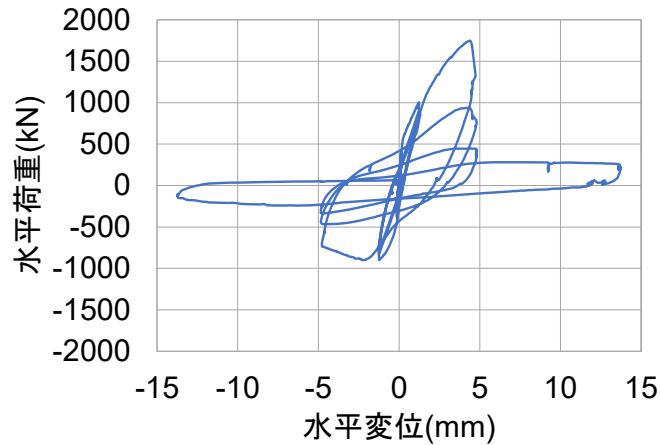
単位 (N/mm²)

	トンネル 模型	RCブロック	
		固定 ブロック	載荷 ブロック
Case1	25.3	38.6	39.7
Case2	27.7	38.9	35.8
Case3	27.7	38.3	35.6
Case4	30.1	36.6	37.8

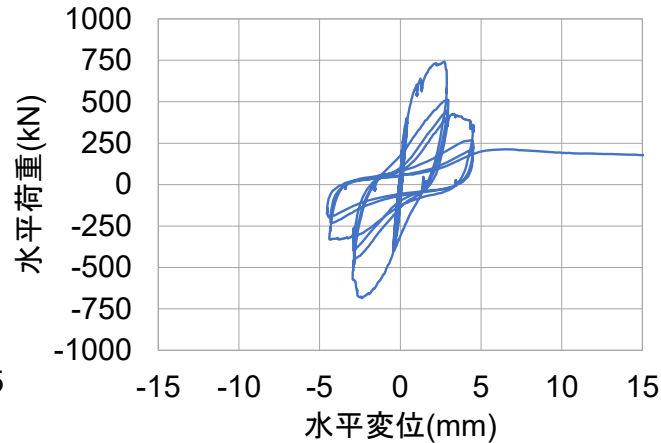
主な計測項目:

- ジャッキの荷重・変位
- ブロックの主要位置の変位
- ブロックとトンネル模型間のずれ変位
- レーザー変位計・カメラによる内空変位・内空観察
- 3Dスキャンによる実験後の試験体状況
- 鉄筋ひずみゲージ・光ファイバーによるひずみ計測
- 実験後の試験体の切断による内部観察

2-4 実験結果 荷重～変位関係

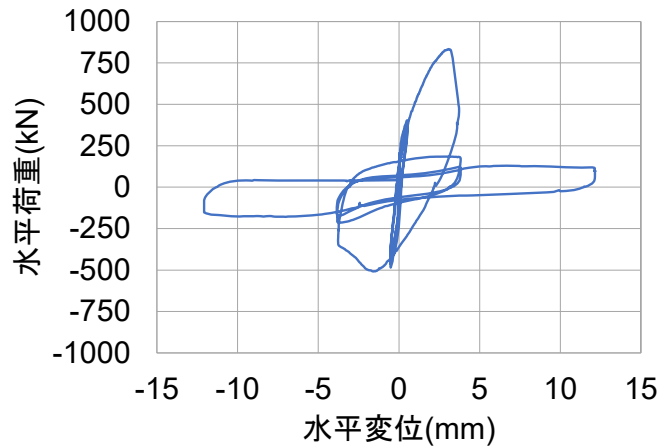
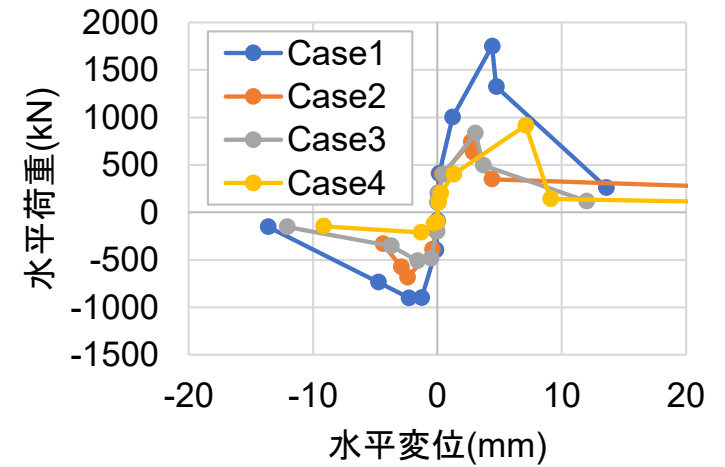


Case1 (30°)

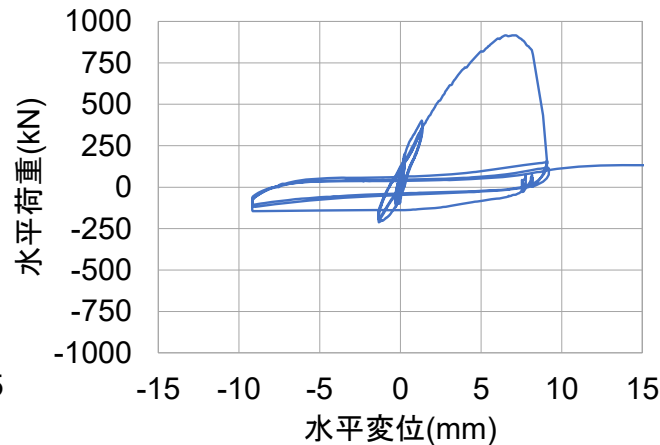


Case2 (30° 直角方向载荷)

包絡線(各载荷ステージの1サイクル目のピーク荷重を結んだもの)



Case3 (60°)



Case4 (60° 破砕帯幅大)

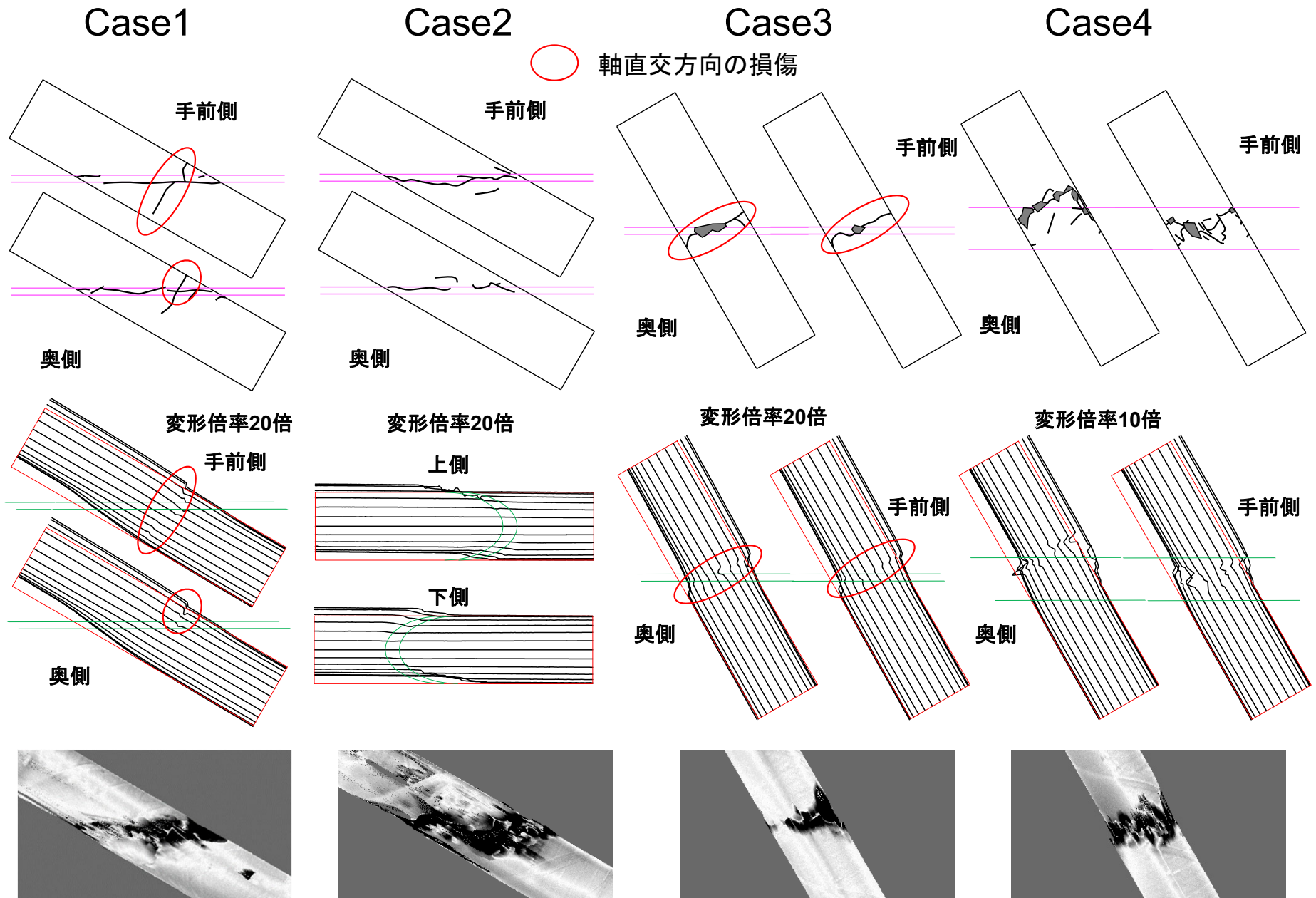
平均せん断強度(最大耐力を破砕帯交差断面積で除したもの)

単位 (N/mm²)

Case1	8.591
Case2	3.645
Case3	7.087
Case4	7.793

2-5 実験結果 破壊性状

内空カメラひび割れ観察
 最大耐力荷重低下直後
 内空計測による変形
 3Dスキャン
 実験後



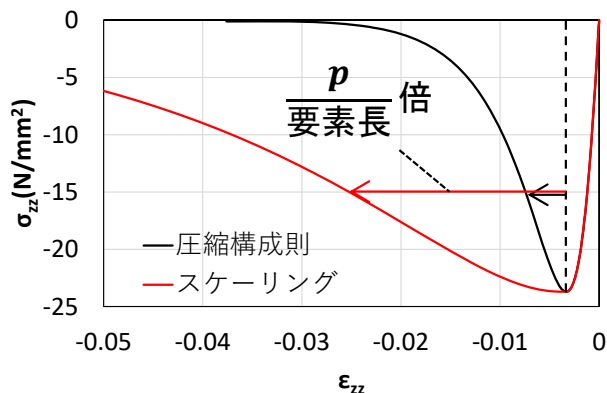
損傷領域が最大耐力荷重低下直後よりも拡大

2-6 事後解析 解析モデルと入力条件

事後解析概要

- 物性値は実験での測定値を使用
- トンネルブロックの界面強度は剥離の再現のため、低い値を採用
- 要素寸法が小さい影響を考慮

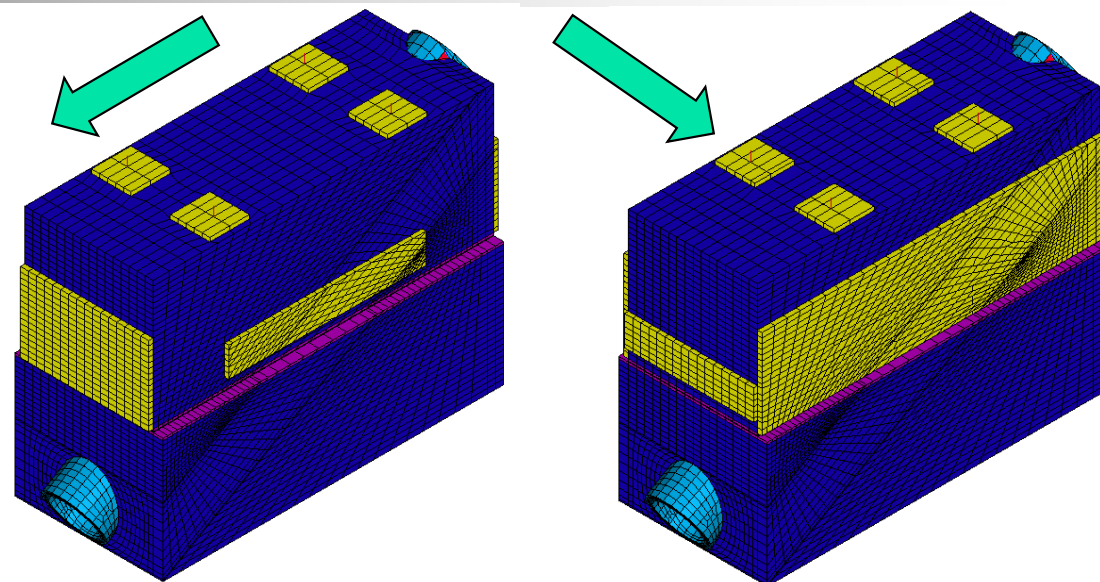
圧縮構成則のポストピークカーブを要素サイズに応じて引き延ばす



p : スケーリング
パラメータ

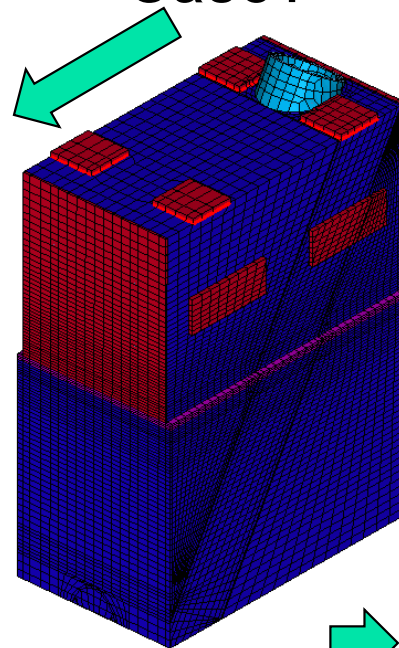
構造部材	モデル化
トンネル	鉄筋コンクリート (離散鉄筋)
ブロック	無筋コンクリート
破碎帯	スリット
PC鋼棒	線要素
部材間	インターフェース 要素

解析コード: Diana Ver10.5

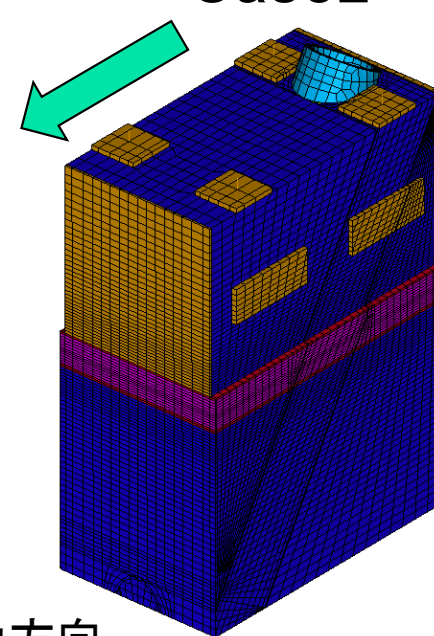


Case 1

Case 2



Case 3

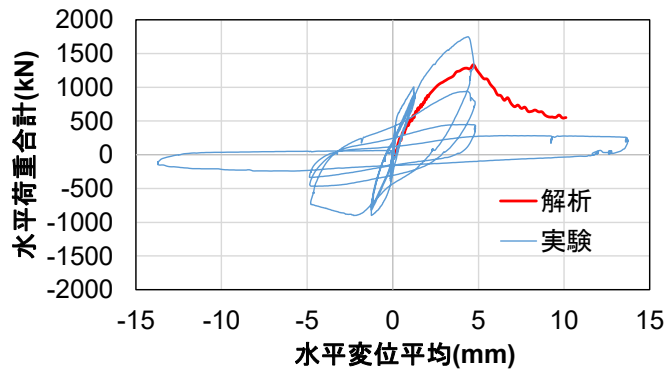


Case 4

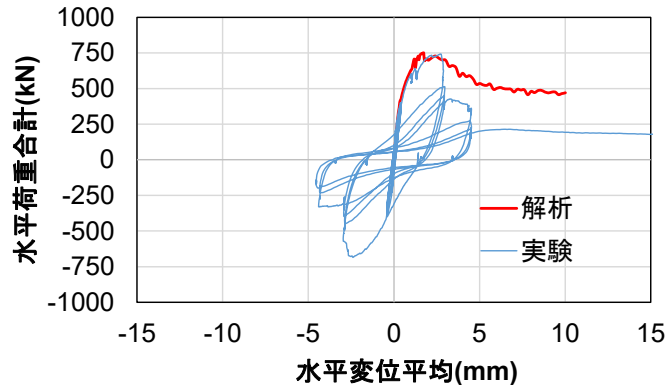
➡ : 加力方向



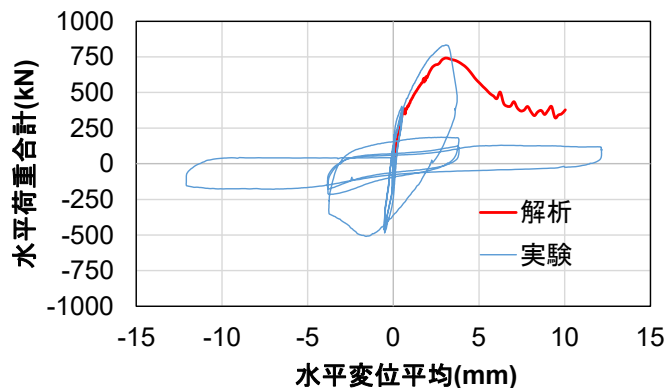
2-7 事後解析 解析結果



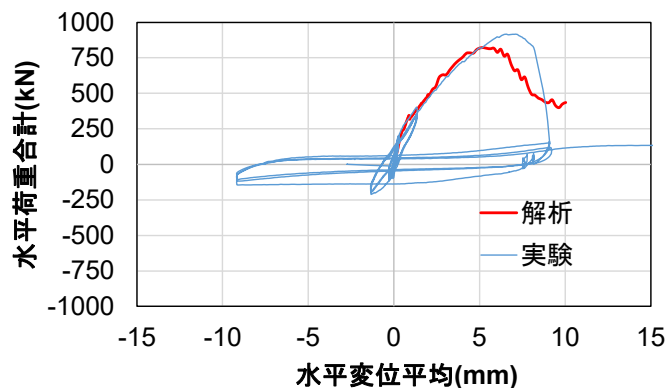
Case1



Case2

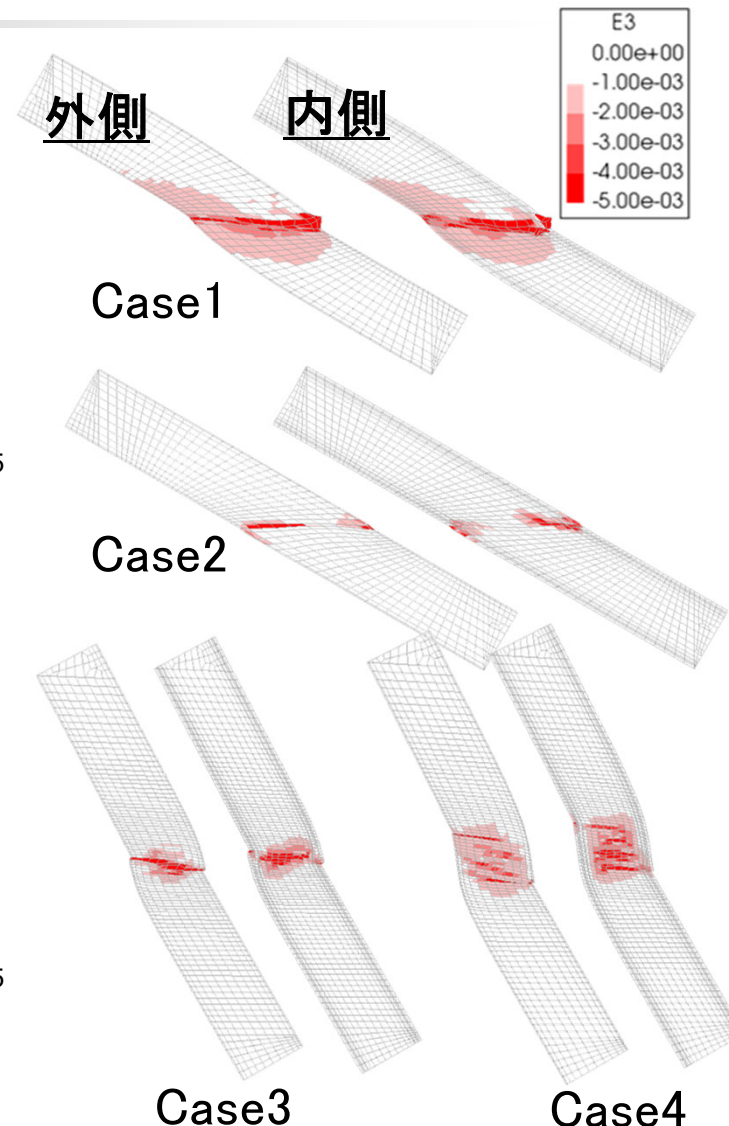


Case3



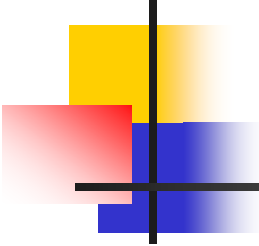
Case4

載荷点水平変位-水平荷重



最大荷重時の最小主ひずみ分布

- ブロック-トンネル間が接触剥離し, 破砕帯中央で圧縮せん断破壊に至る.
- 最大荷重値や, 最大荷重に対する変形量は概ね整合した.
- 解析では, 実験で見られたような軸直交方向の損傷は確認出来なかった.



2-8 まとめと今後の予定

まとめ

破砕帯に埋設されたRC模型の構造実験

- ・各ケースともmmオーダーの変位で最大耐力に至り、急激に荷重低下する。
- ・載荷方向・破砕帯交差角度・破砕帯幅の違いにより、最大耐力・変形性能等が異なる。
- ・各ケースともトンネル模型の顕著な破壊は概ね破砕帯部に集中している。特に傾斜方向載荷(Case1, 3, 4)の場合、最大耐力後の荷重低下は軸直交方向の損傷によって生じ、損傷領域は破砕帯近傍に局所的に限定される。

事後解析に基づく耐震性能評価

- ・各ケースとも最大荷重値とそれに対する変形量は概ね整合した。
- ・各ケースとも破壊領域は破砕帯部に集中しているが、実験で見られたような軸直交方向の損傷は確認出来なかった。

今後の予定

破砕帯に埋設されたRC模型の構造実験

○実験結果の分析

実験の挙動解析に基づく耐震性能評価

○実験の事後解析2 ○解析の適用性検討

関連技術に関する研究活動の現状と取組状況

3. 耐震性能照査手法の標準化

3-1 破砕帯を考慮したトンネルの照査例作成

破砕帯と交差するトンネル構造物を対象として、地震動に起因する破砕帯の変位を受けるトンネルの挙動を検討し照査例として整理する

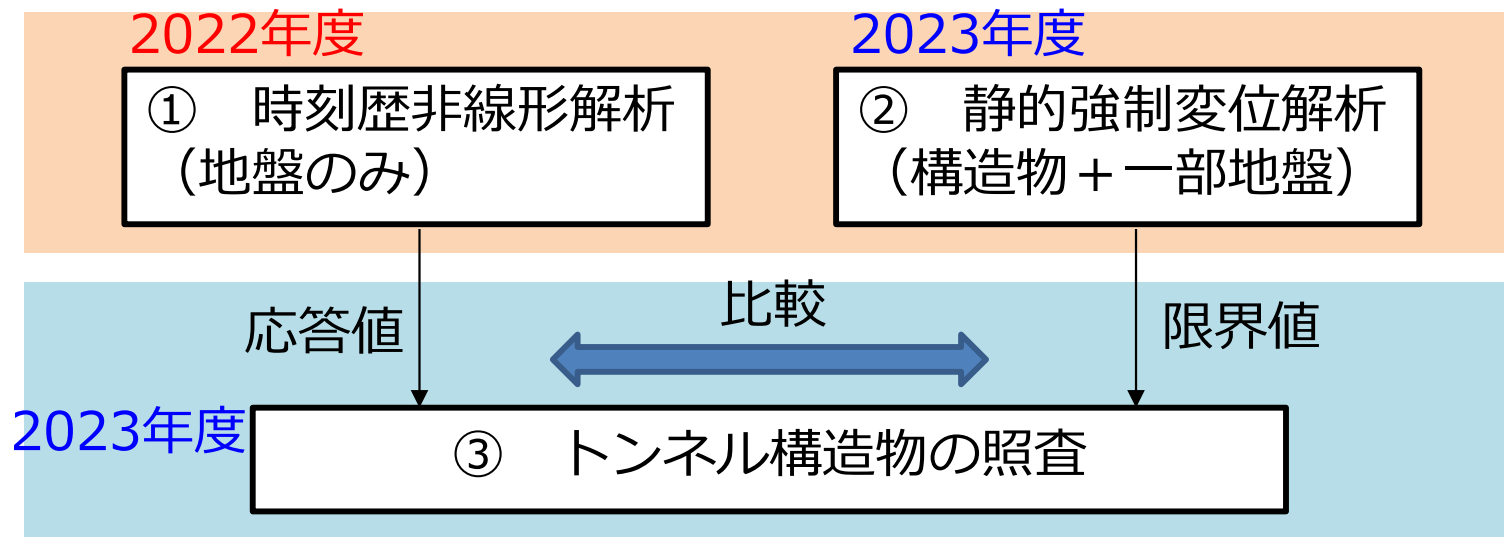


図 検討のおおまかな流れ

- ✓ 実務で使いやすいように、応答値と限界値を別個に評価
- ✓ 3次元的な幾何条件を考慮したモデルを設定
- ✓ 照査指標は実験結果などを鑑みて決定していく

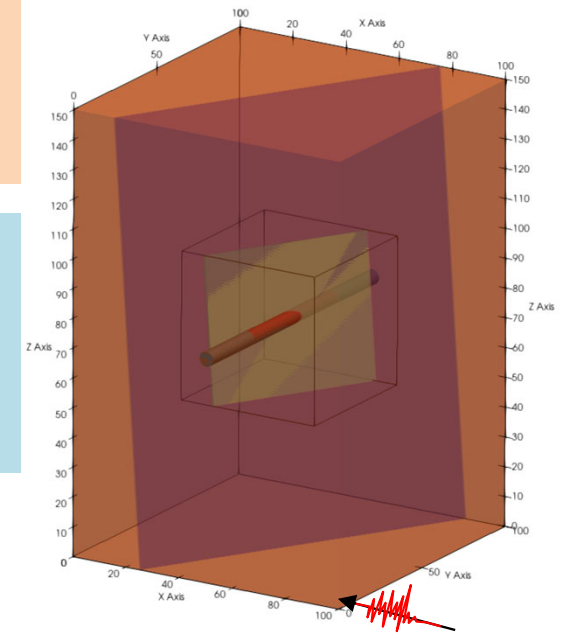


図 検討対象のイメージ

3-1-1 解析モデル案

● 想定する全体領域

- ・境界部は粘性境界による半無限地盤を想定
- ・半無限地盤部分に破砕帯は存在しないものとする

- ・限界値評価（静解）のモデル化領域（黒枠）
 横幅：50m程度
 高さ：50m程度
- ・トンネル径の5倍以上確保

- ・応答値評価（動解）のモデル化領域
 横幅：100～200m程度
 高さ(深さ)：200m程度
 トンネル：深度75m程度

- ・地表面形状等は考慮しない
- ・地盤は基礎地盤マニュアル2009準拠

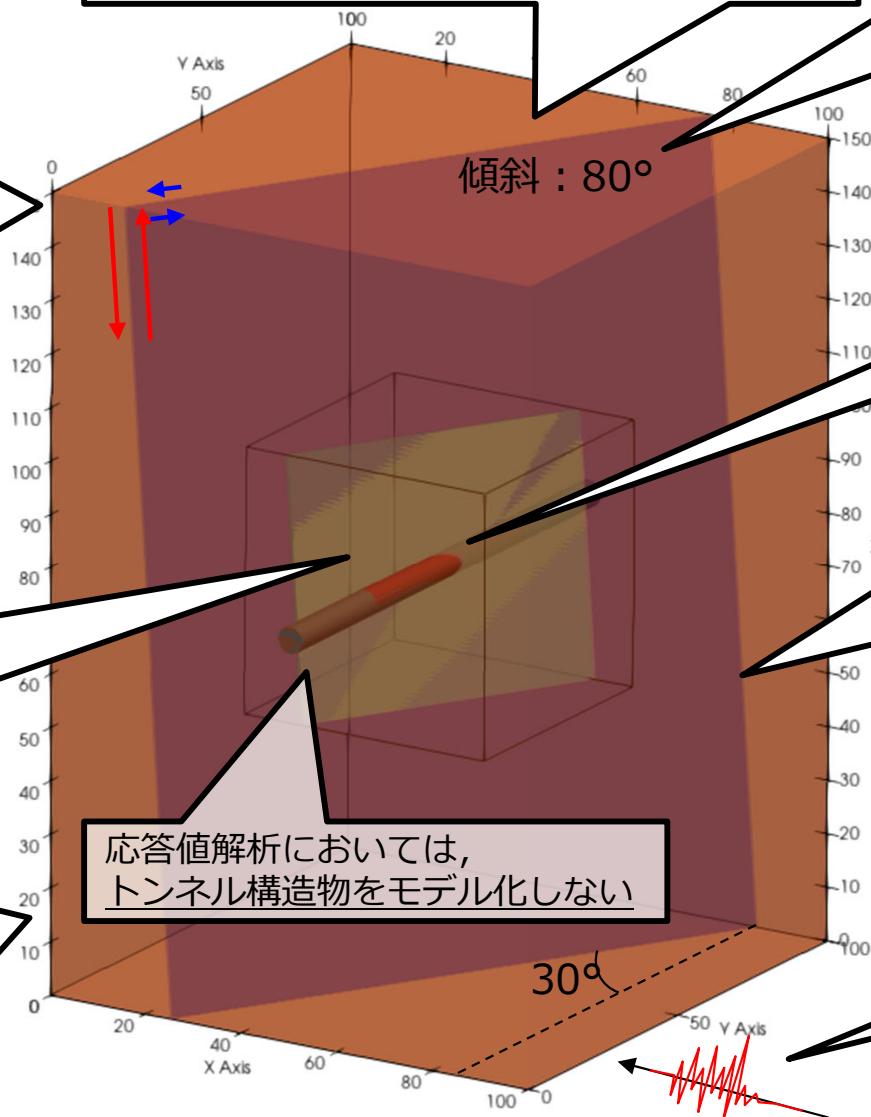
- ・破砕帯の傾斜角80度
 (2次元横断面と対比しやすく、かつ一般性を持たせた条件)

- ・トンネルと破砕帯のなす走向角30度

- ・破砕帯の厚さは、実験との対応を鑑みて50cmとする（ROモデルによるモデル化）

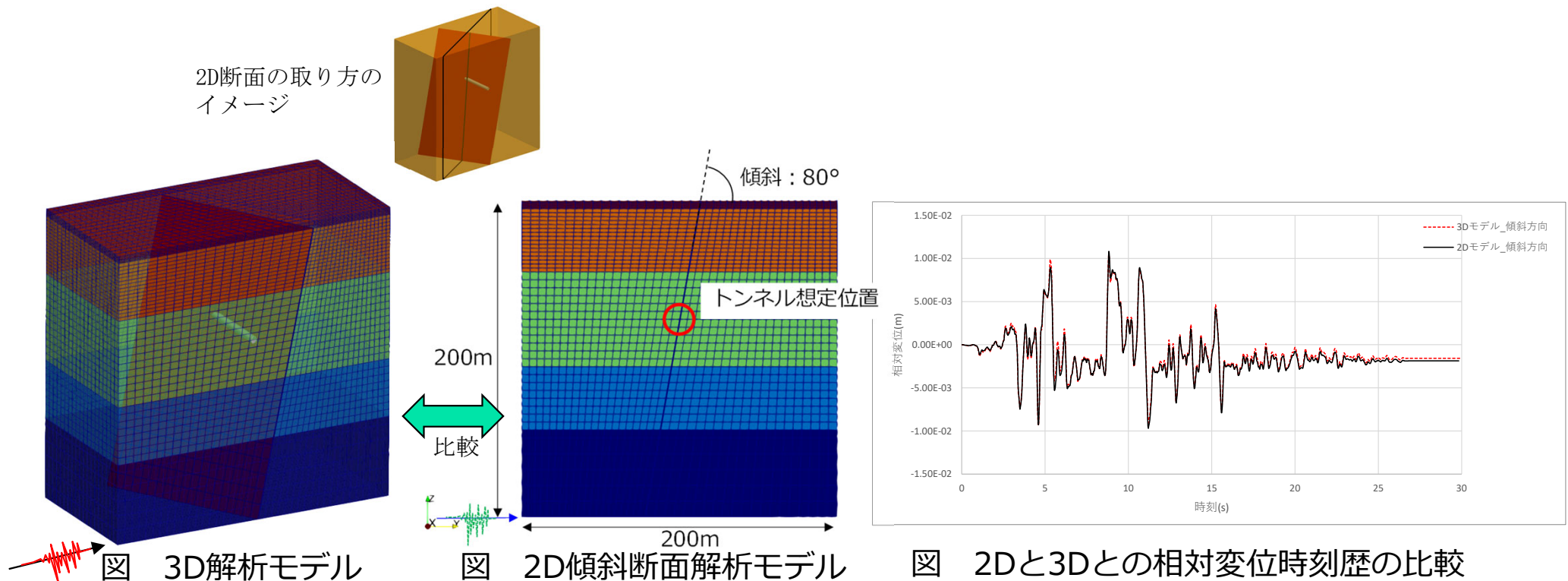
- ・トンネル横断面方向の加震とする

応答値解析においては、トンネル構造物をモデル化しない



3-1-2 応答値算出のための動的解析結果

- 破砕帯を挟んで生じる相対変位は傾斜方向のみに卓越する
- 最大のずれ量は11mm程度となった
- 今回の解析条件においては、破砕帯の傾斜方向に解析断面を設定した2D解析でも同等の評価が可能であることがわかった
- 来年度に材料非線形解析（静的解析）を用いた限界値の算出を行い、今年度の応答値と比較するところで照査例にまとめていく

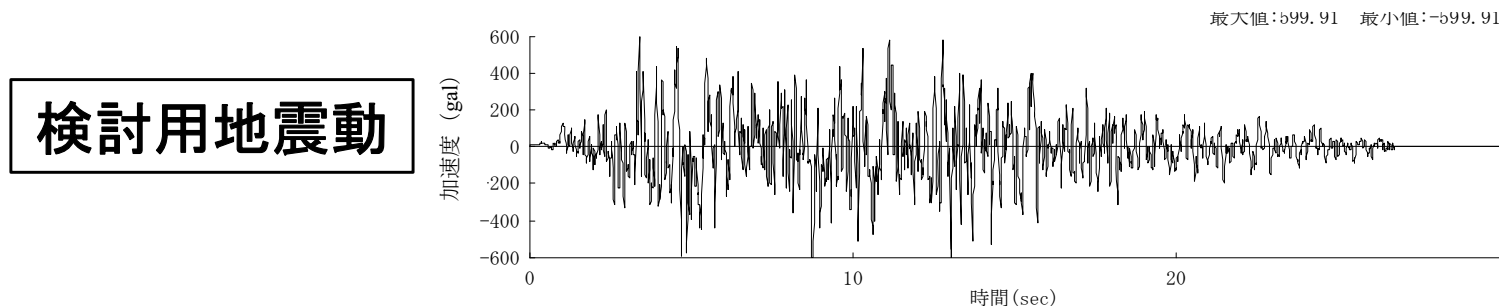
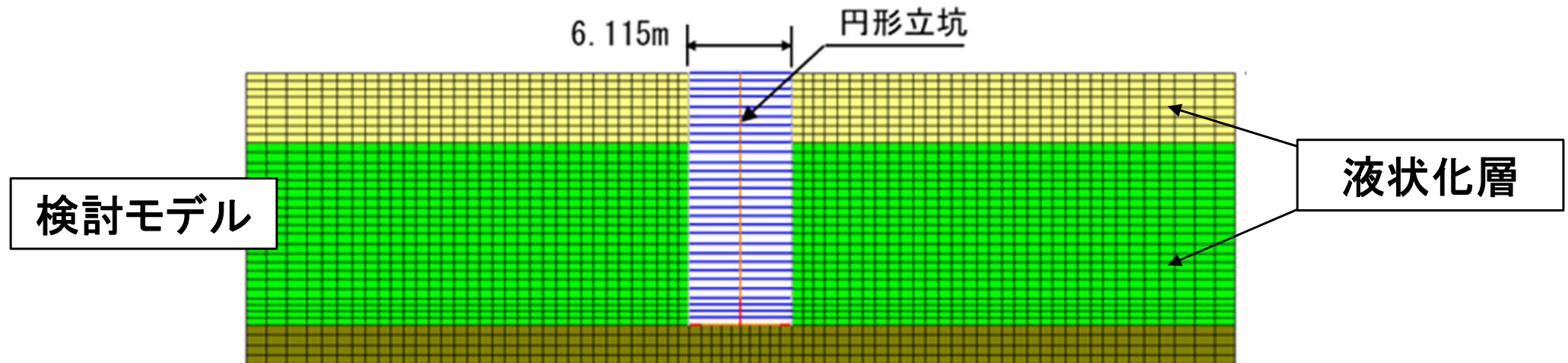


関連技術に関する研究活動の現状と取組状況

3. 耐震性能照査手法の標準化

3-2 液状化地盤中の立坑の照査例作成

2次元の落とし込み検討により、3次元挙動(地盤のすり抜け効果)を最も再現することのできるモデルで照査例の作成を実施する。



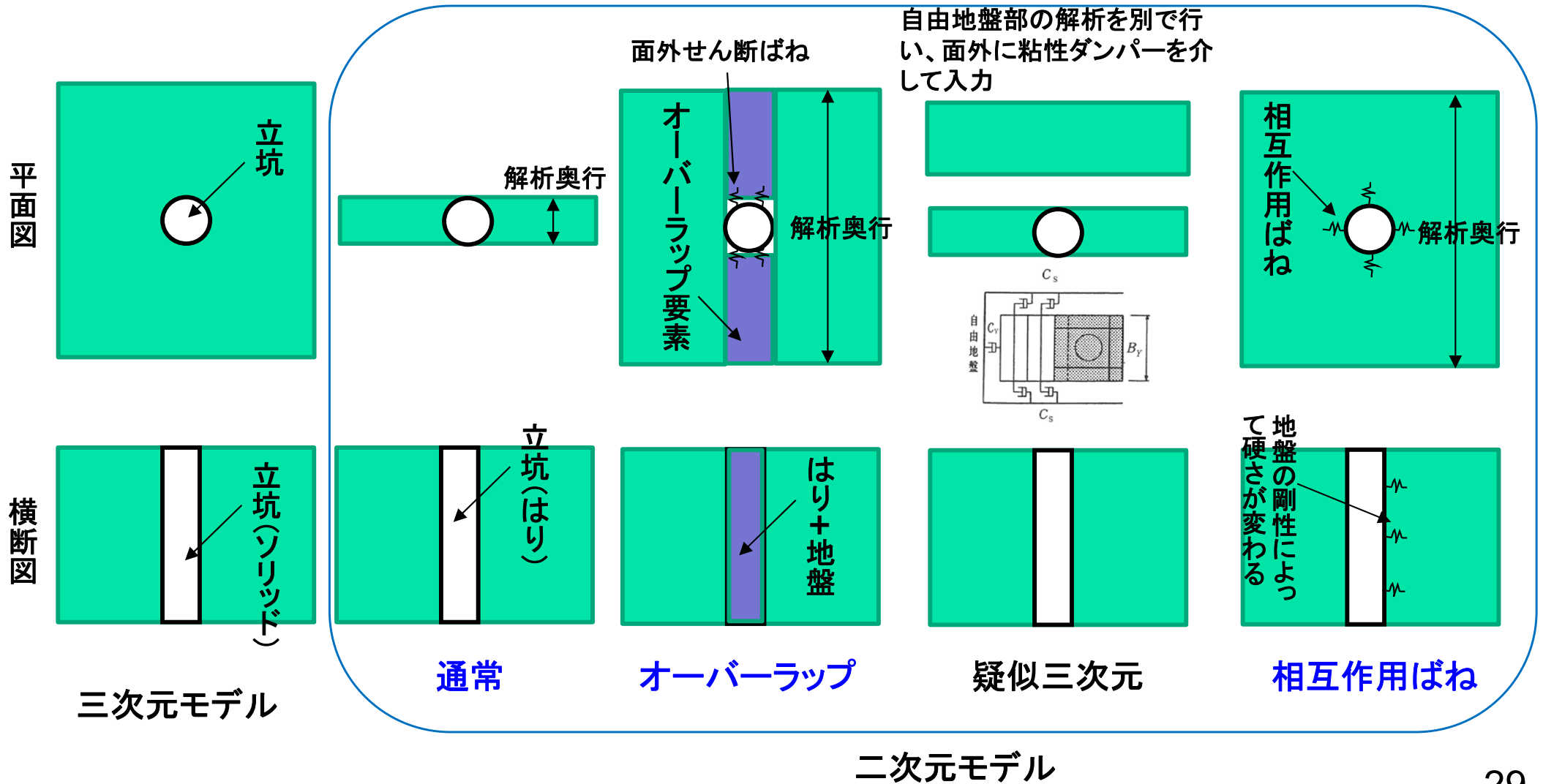
立坑の断面力による照査を実施する。
通常モデルとの比較を実施し、照査値の比較を実施する。

3-2-1 2次元解析への落とし込み検討方針

検討する解析コードはFLIPとする。

以下に検討する解析手法を抽出した。

2次元モデルによる検討は、通常、オーバーラップ、相互作用ばねとする。



3-3 関連技術に関する研究活動のまとめ

主な成果

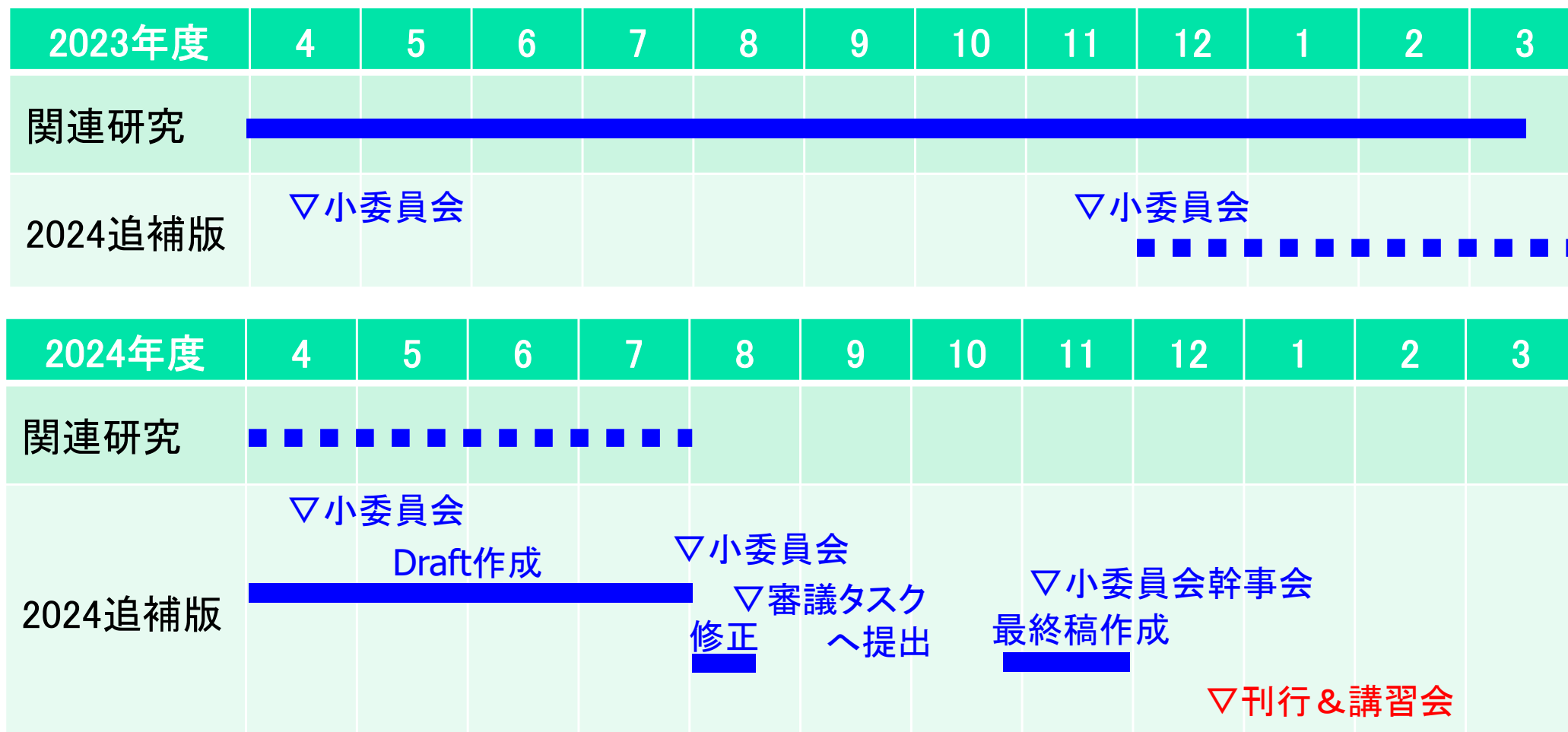
屋外重要土木構造物の耐震性能照査手法の高度化を目的とした一連の研究に実施し、新たな評価方法の構築に向けた実験的・解析的な知見を得た。

1. 破砕帯を想定した弱面を通る円形RCTトンネル模型に、弱面に沿った正負の静的強制変位を与える載荷実験を行って耐荷・変形性能を調べるとともに、その再現解析を実施した。
2. 液状化地盤に埋設された三次元模型の載荷実験および事後解析を実施し解析の再現性を確認した。また、地盤の液状化を考慮した三次元RC構造物の材料非線形解析により構造の違いによる地震応答の差異を確認した。
3. 破砕帯と交差するトンネルの耐震性能照査例を提示するために、三次元と二次元の実規模モデルを作成し、破砕帯部の地震応答に関する知見を得た。

今後の展開

次年度の研究計画について早々に検討を開始し、これらの知見の反映と実験等によるデータ取得・分析を行う。また、評価手法の具体化に関して検討を進めて、2024年発刊予定の耐震性能照査指針・マニュアル追補版に反映させる。

工程(案)



※ 原子力土木委員会の規定において、技術文書審議タスク(中間段階, 最終段階)の開催が必要となっている。

※ その後、外部意見照会および公衆審査、原子力土木委員会の審議を経て、刊行が可能となる。



ご清聴ありがとうございました。