

原子力土木分野における数値解析の妥当性確認

～ペア土圧計によるせん断応力推定法～

2025年 9月 8日

東北電力(株) 山口和英
(旧所属:(一財)電力中央研究所)

1. 原子力発電所の審査における数値解析の位置づけ

原子力発電所の審査，例えば，設計及び工事の計画の認可における土木構造物の審査では，入力地震動（基準地震動 S_s ）に対する構造物や地盤の応答を数値解析により評価する．

解析プログラムは，適用しようとする問題に対する「検証(Verification)」と「妥当性確認(Validation)」を実施している．

2. 検証(Verification) の例

- 地 盤：室内試験におけるせん断弾性係数および減衰定数の非線形性を再現できることの確認．
- 構造物：一般的な知見により解を求めることができる問題に対して理論解と一致することを確認．

3. 妥当性確認(Validation) の例

- **実構造物を模擬した実験**（論文等の既往文献で報告されている実験も含む）の再現解析を行い，実験と概ね一致していることを確認．



妥当性確認に有用な実験の一例として，遠心載荷実験において実施した「**土圧計による地盤せん断応力推定**」と，「**二次元有効応力解析との比較**」を紹介

4. 背景

原子力発電所の重要な土木構造物は、締め固め管理された密な岩ずりなどで埋め戻される。一方、新規規制基準の制定・地震に関する知見の蓄積等により、基準地震動 S_s が増大（加速度や継続時間）しており、密な地盤であっても液状化が生じる可能性が懸念されている。

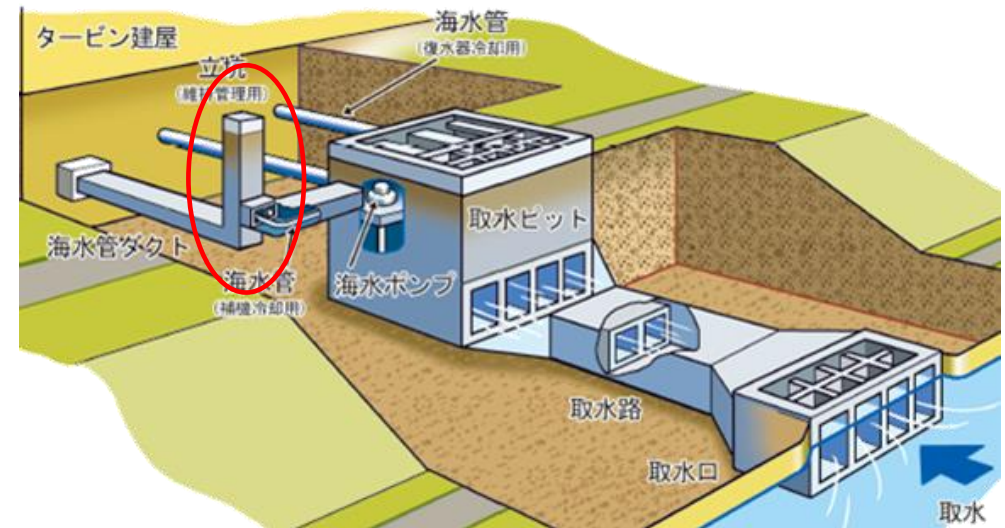
このような地盤における数値解析の妥当性は、一般に遠心力場での加振実験（遠心載荷実験）から得られる加速度・変位・過剰間隙水圧等の計測値、計測値から算定される地盤のせん断応力等から確認されているが、地盤のせん断応力については、これまで評価位置の加速度応答と土塊重量からの簡易的な評価に留まっており、水平成層地盤や、それに近い条件でなければ推定は困難である。



新たなせん断応力推定方法として提案されている「ペア土圧計を用いた地盤のせん断応力推定法」の密な地盤への適用性を遠心載荷実験で確認。

本日の発表内容

5. 遠心載荷実験の概要（ケース1～4）
6. 遠心載荷実験の結果（ケース3, 4）
7. ペア土圧計による地盤せん断応力の推定原理
8. 地盤せん断応力の推定結果（ケース3）
9. 二次元有効応力解析との比較（ケース3）
10. まとめ



原子力発電所の重要な土木構造物の配置例

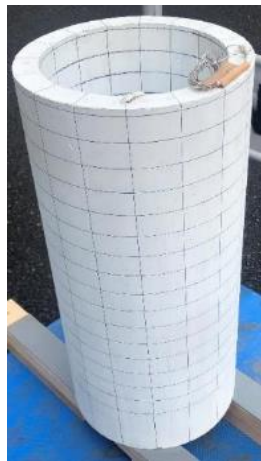
5. 遠心载荷実験の概要

実験ケース

ケース	模型	立坑支持条件	地盤条件	実験の目的
1	RC	岩盤上	水平成層	立坑・地盤の応答評価
2	弾性	岩盤上	水平成層	R C模型との比較
3	RC	岩盤上	立坑の片側に盛土	盛土の偏土圧による影響検討
4	RC	岩盤に根入れ	水平成層	支持条件の影響検討

地盤のせん断応力評価

RC模型

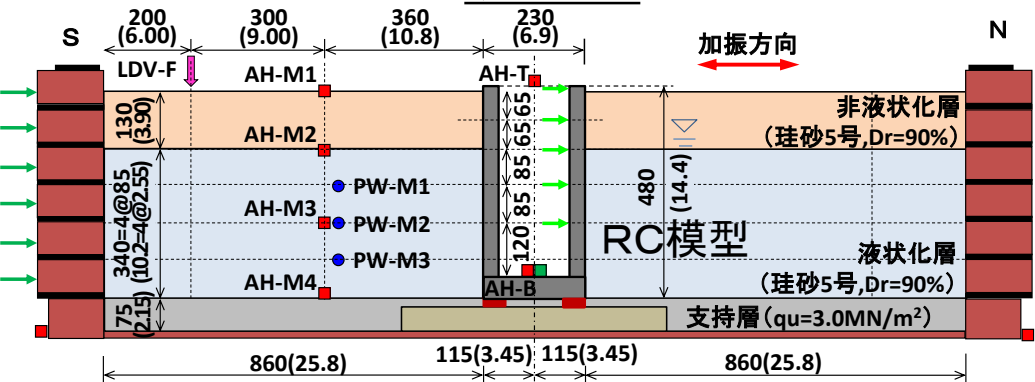


弾性模型

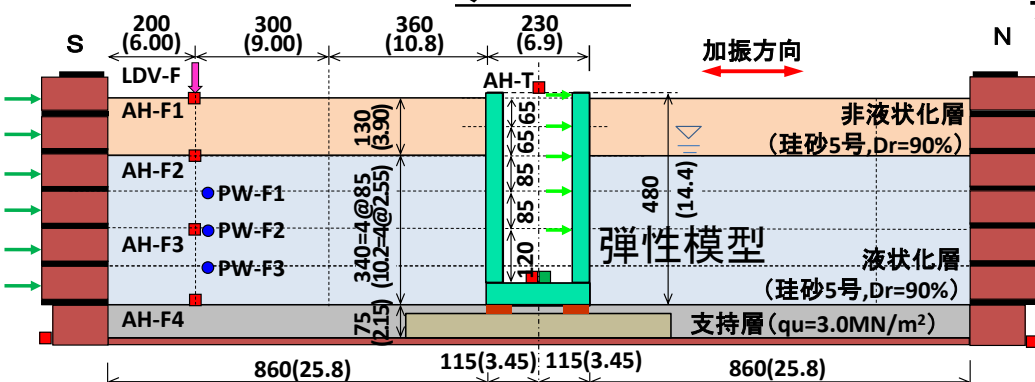


ナイロン 鉄板

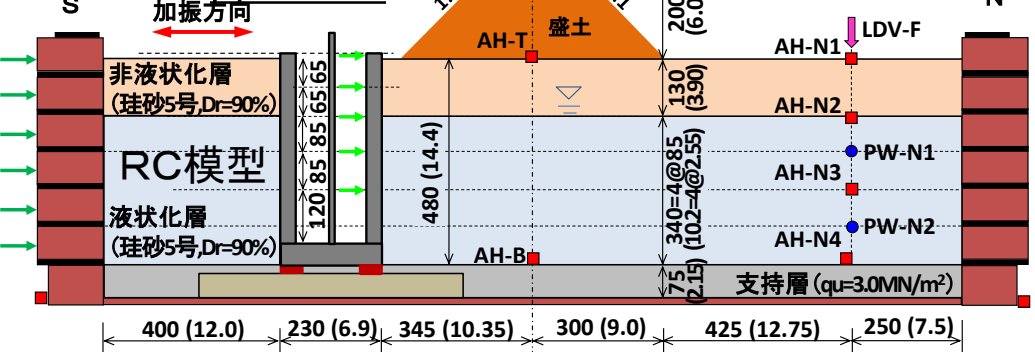
ケース1



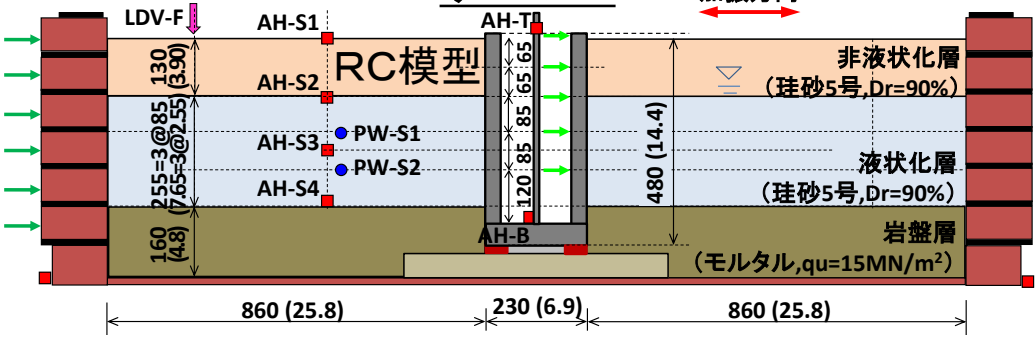
ケース2



ケース3



ケース4



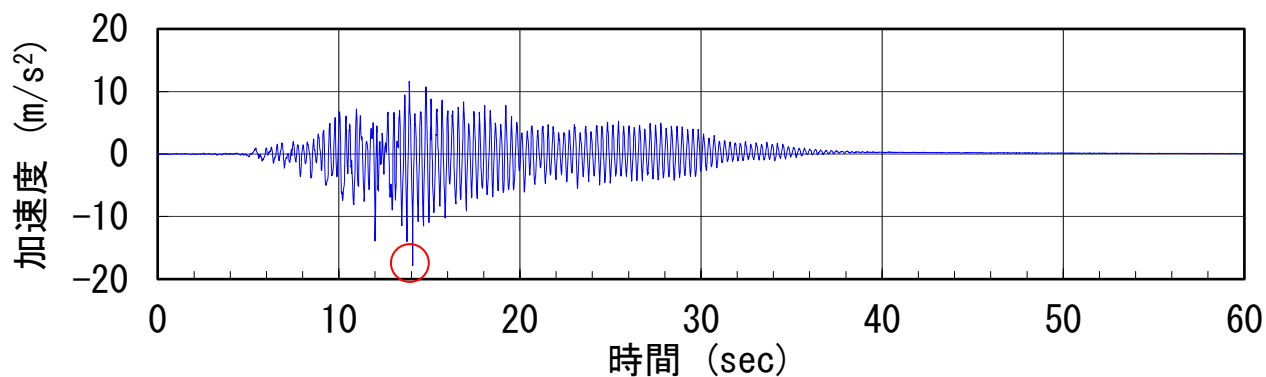
遠心加速度
30G

単位:mm
()内は実スケール換算値(m)

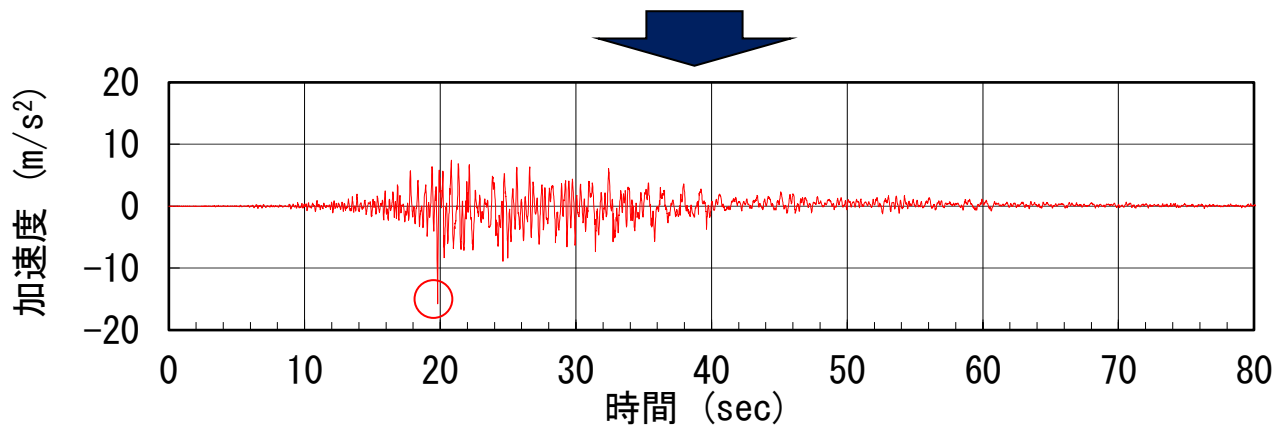
5. 遠心載荷実験の概要

加振波

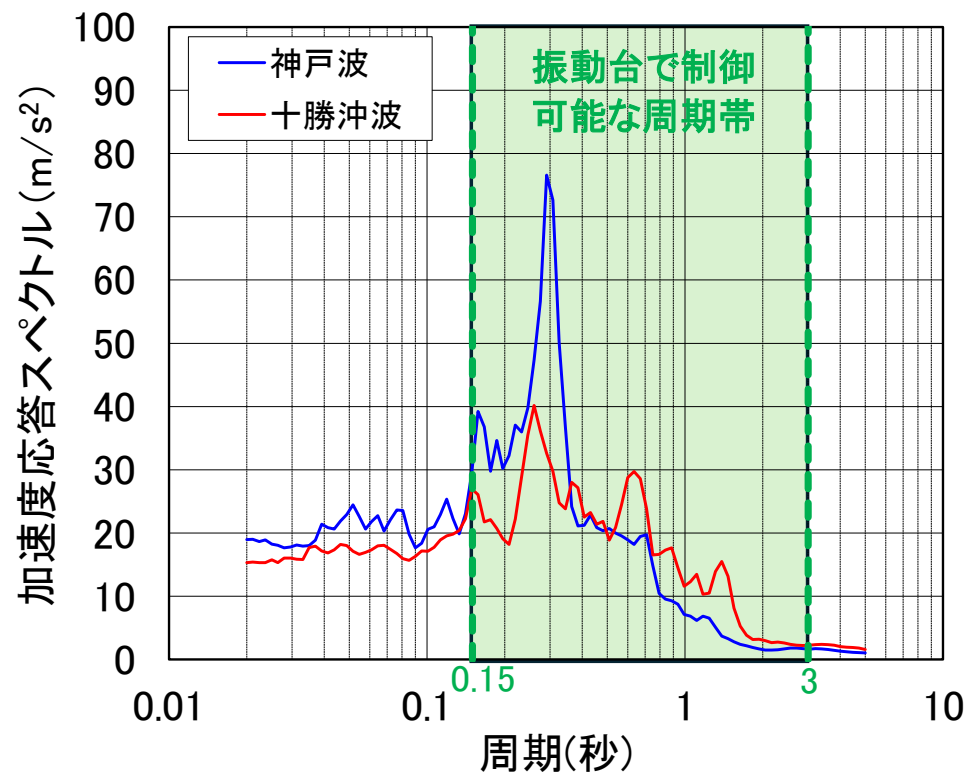
1995年兵庫県南部地震での観測波(神戸波),
2003年十勝沖地震での観測波(十勝沖波)の順で,
振幅調整して入力.



①神戸波(最大加速度 15m/s^2 目標)



②十勝沖波(最大加速度 19m/s^2 目標)



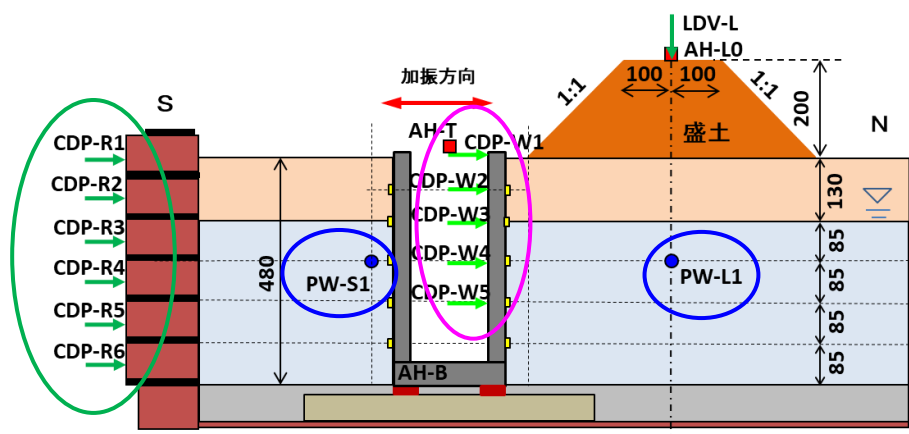
①神戸波

比較的短周期成分で, 立坑応答への影響が大きい地震動(内陸型地震)

②十勝沖波

比較的長周期成分を含み, 継続時間も長く, 地盤応答への影響が大きい地震動(海溝型地震)

6. 主な遠心载荷実験結果（ケース3：十勝沖波加振）

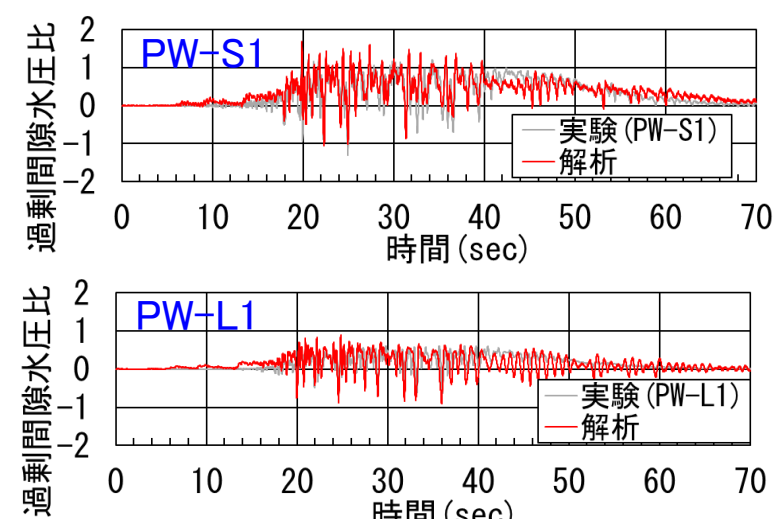
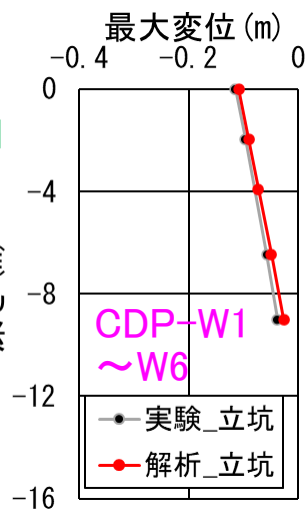
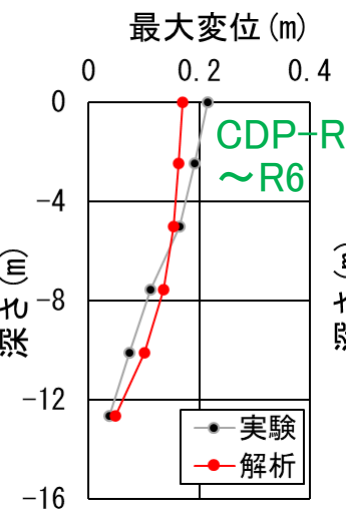


応答値出力位置

地盤最大変位

立坑最大変位

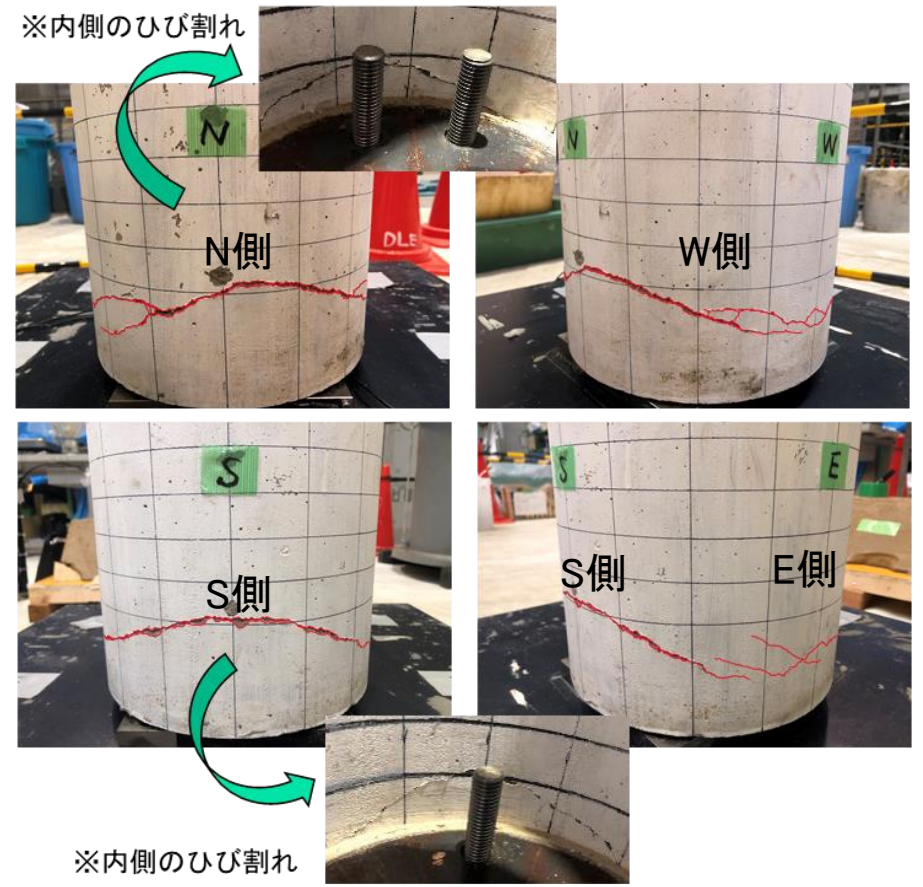
過剰間隙水圧比



・立坑の最大変位は、地盤の1/2程度。

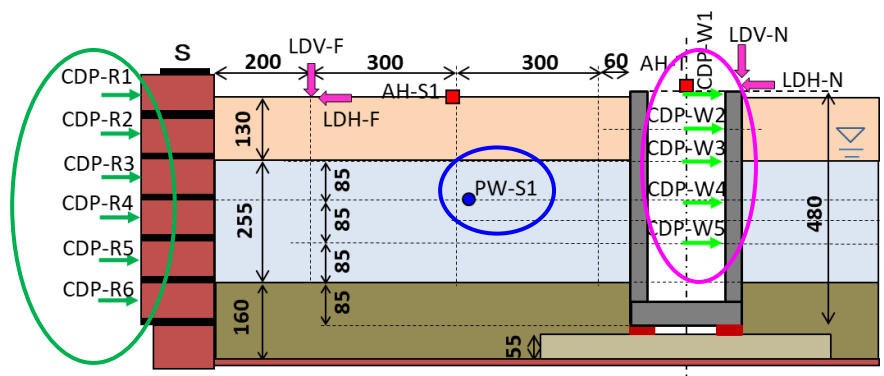
・盛土下部（PW-L1）では、盛土荷重の影響により水圧比1に達しない。

立坑の損傷状況



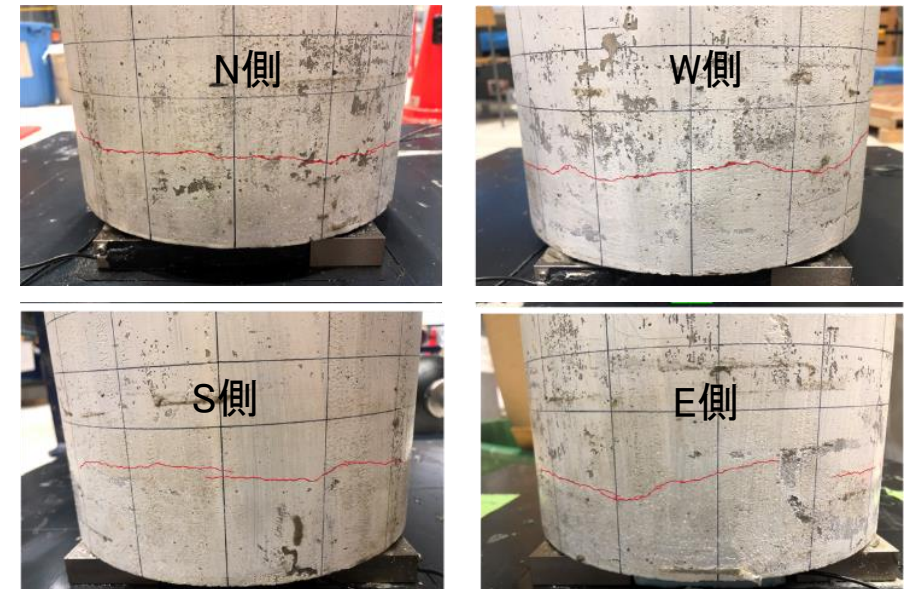
- ・貫通ひび割れが、底版上面付近に発生。
- ・加振方向（N側，S側）は、1本の残留ひび割れが生じ、幅も大きい。
- ・直交方向は、幅の小さい複数のひび割れにに分岐。

6. 主な遠心载荷実験結果（ケース4：十勝沖波加振）



応答値出力位置

立坑の損傷状況

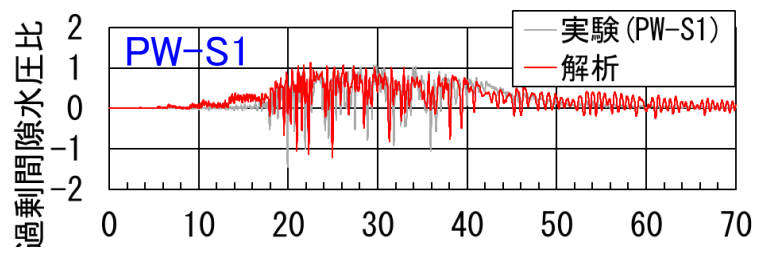
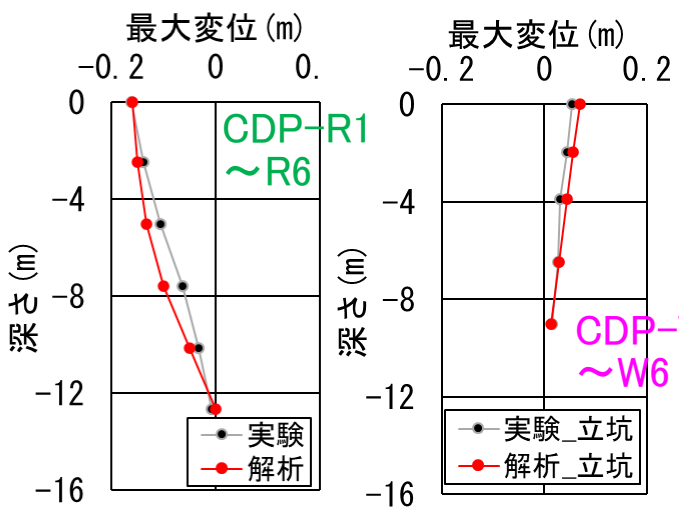


- 1本のひび割れが、底版上面付近に発生.
- 幅は、ケース3より小さい.

地盤最大変位

立坑最大変位

過剰間隙水圧比



- 水圧比1に達している

ケース3, 4とも実験と解析 (FLIP2D) とが概ね一致.



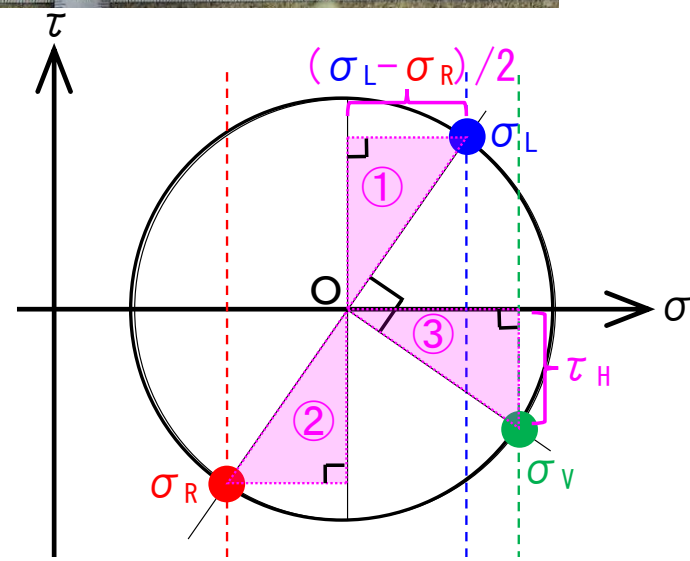
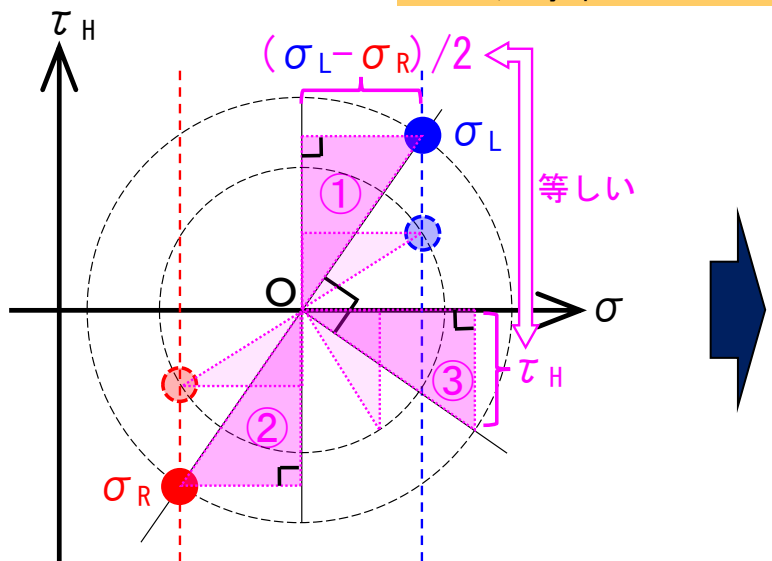
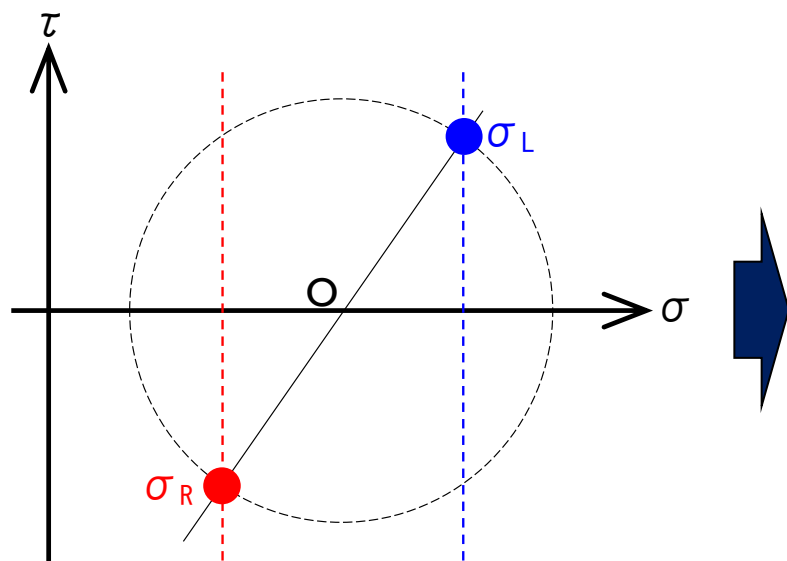
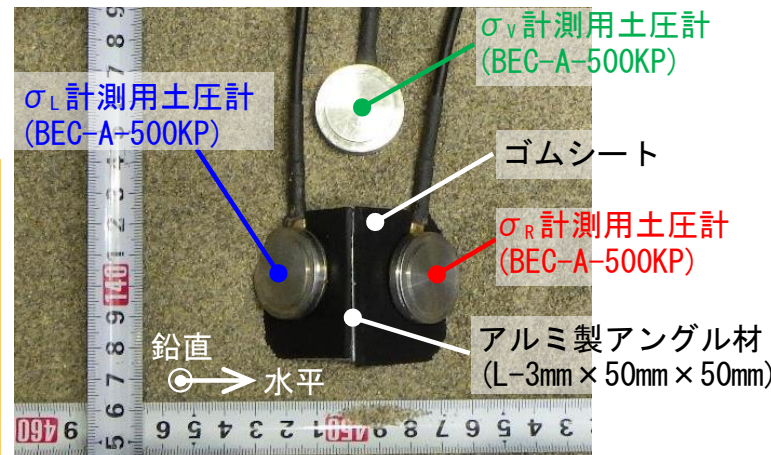
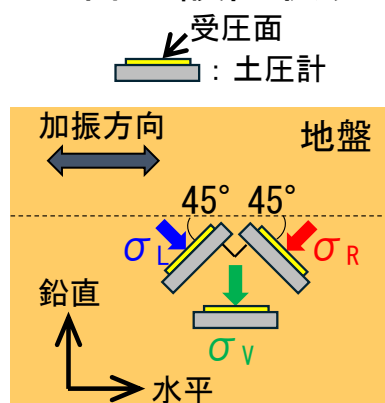
解析 (FLIP2D) により、密な地盤の挙動および円形立坑の応答を再現できる.

- 最大変位は、地盤・立坑ともケース3より小さい（根入れの影響）
- 立坑の最大変位は、ケース3と同様に地盤の1/2程度.

7. 地盤せん断応力の推定原理

ペアの土圧計を水平面から $\pm 45^\circ$ 傾けて設置し、それぞれの土圧計の計測値を受圧面に作用する直応力 σ_L , σ_R と仮定して、Mohrの応力円（以下、Mohr円とする）を描きせん断応力を推定する。

土圧計の設置状況



- σ_L , σ_R は、Mohr円直径の両端に位置する（円周角 $90^\circ \Rightarrow$ 中心角 180° ）。
- ただし、 σ_L , σ_R は、青破線・赤破線のどこに位置するかは定まらないので、Mohr円の大きさも定まらない。

- Mohr円の大きさが定まらなくともピンク色の三角形①～③は常に合同条件が成立。
- 水平面上のせん断応力 τ_H は、 σ_L , σ_R から算定される。

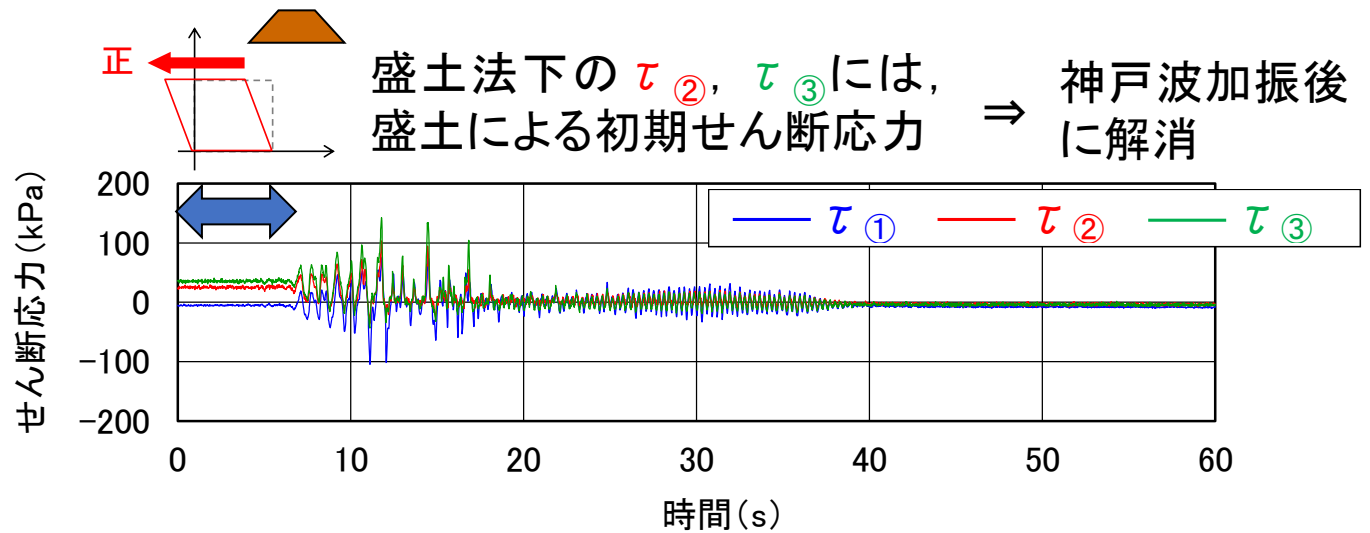
- さらに、鉛直応力 σ_v が得られれば、Mohr円が唯一に定まる。

【参考文献】 Soils and Foundations 64 (2024) 101504

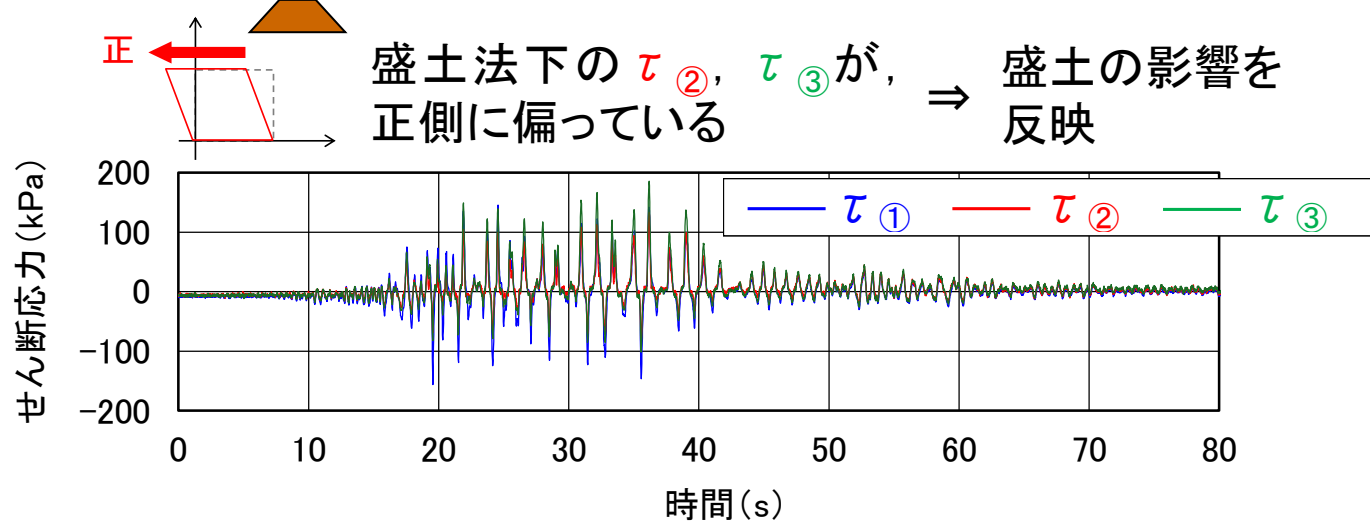
Prospective method to estimate shear stress in the ground using two earth pressure cells Tadashi Kawai

8. 地盤せん断応力の推定結果（ケース3）

①神戸波加振

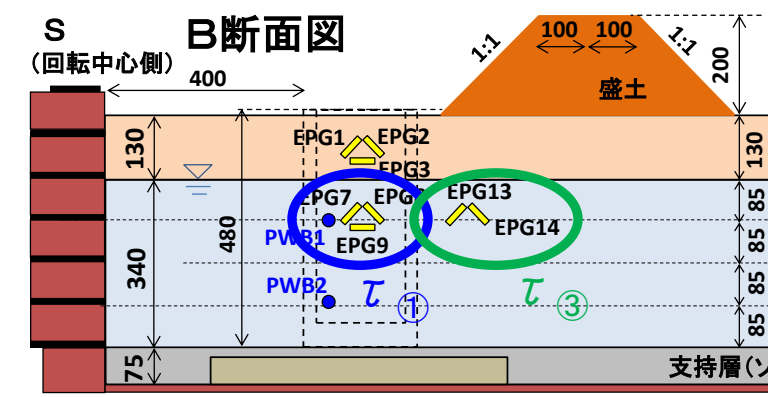
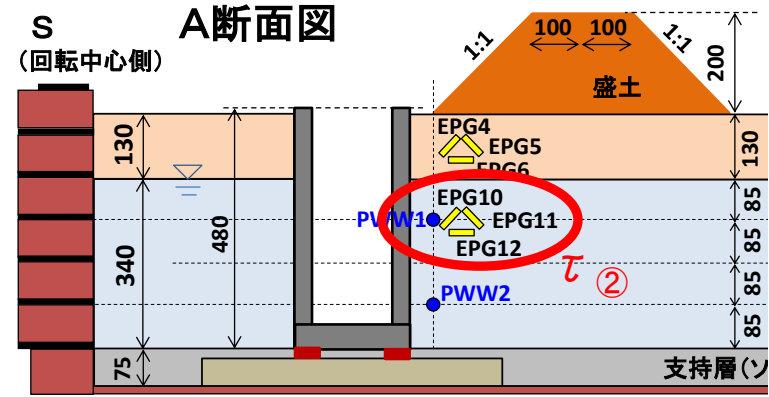
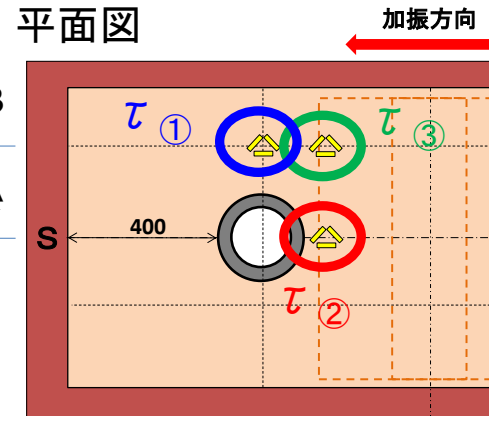


②十勝沖波加振



立坑がある断面のτ②と、立坑がない断面のτ③が概ね一致 ⇒ 立坑の影響は小さい

盛土・立坑による地盤せん断力への影響を評価できていると推察。



➤ ケース 3（十勝沖波加振）を対象



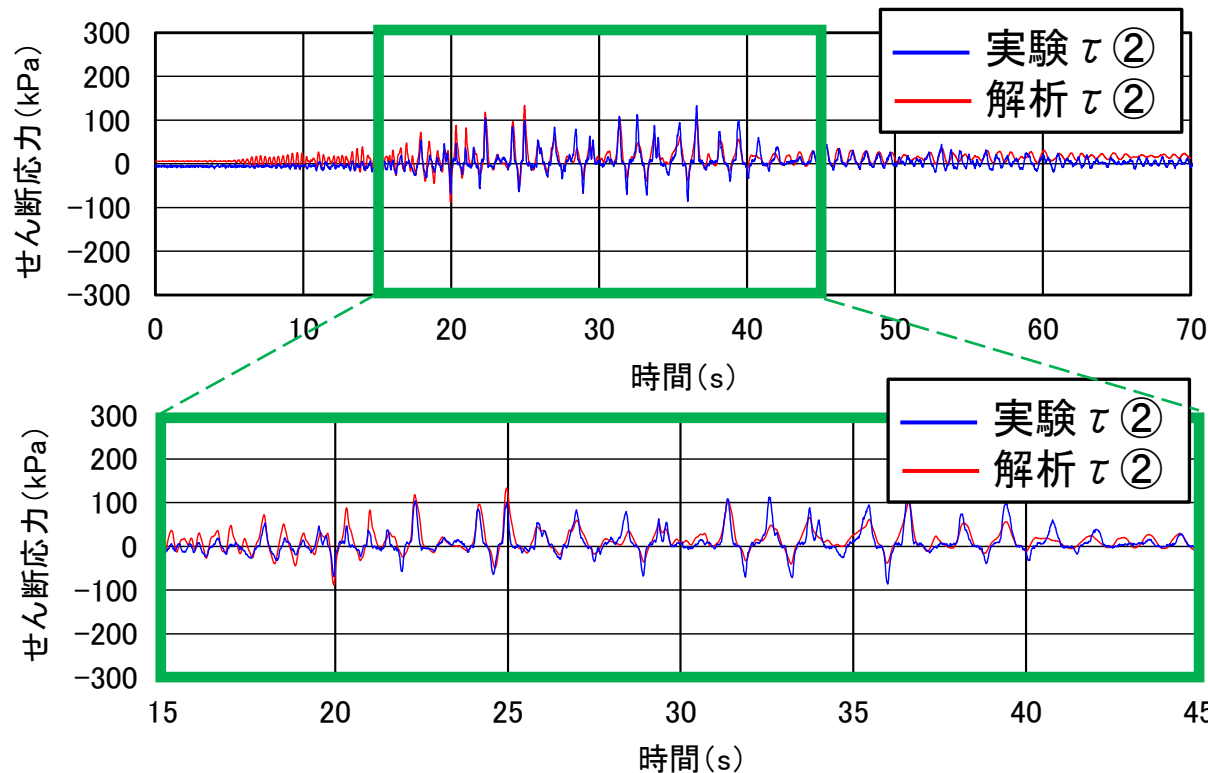
■ ■ : せん断応力比較位置 — : 非線形梁 ($M-\phi$) — : 剛弾性梁 — : 仮想剛梁
— : 線形梁 (地盤の初期せん断剛性と同程度)

上記解析モデルを有効活用して、立坑ないB断面を再現するため、

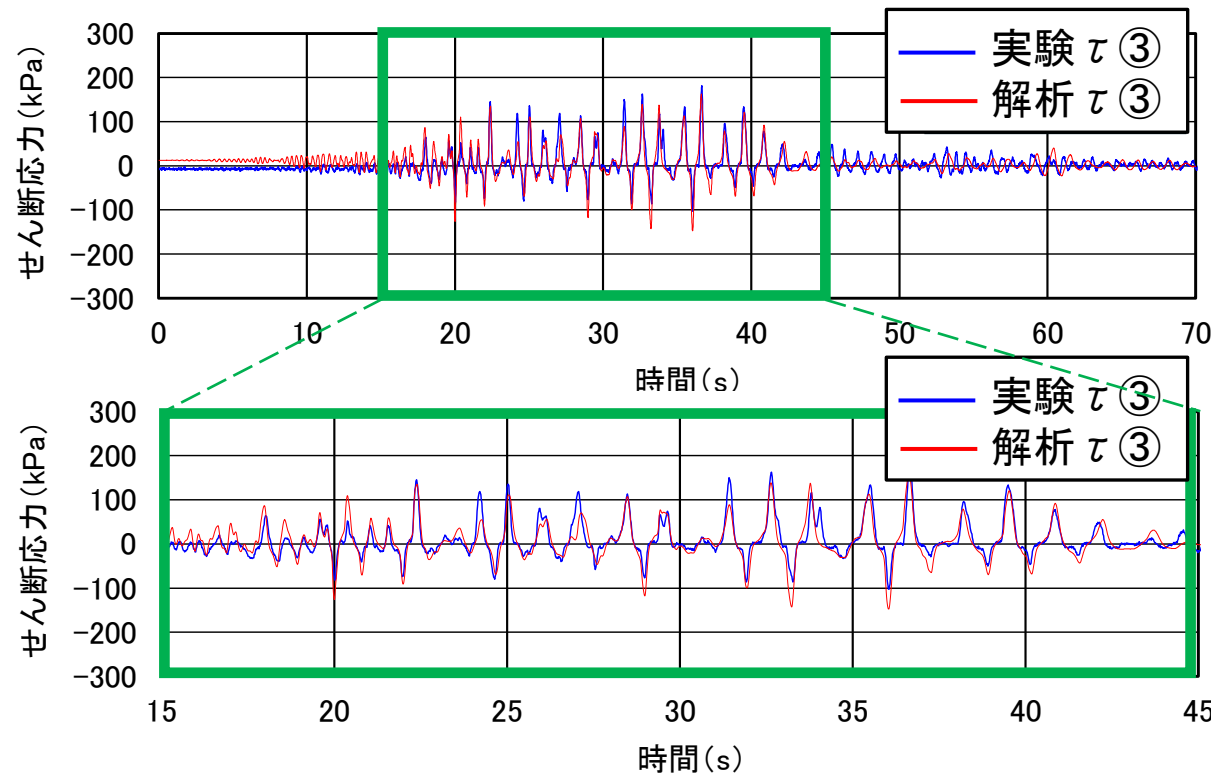
- 10

9. 二次元有効応力解析との比較

実験と解析との比較（十勝沖波加振，上段：全時刻歴，下段：15s～45s拡大）



A断面図



B断面図

ペア土圧計から推定されたせん断応力と，二次元有効応力解析から得られるせん断応力は良く一致



ペア土圧計を用いて地盤のせん断応力を推定することにより，
地盤のせん断応力に着目した数値解析の妥当性確認が可能。

10. まとめ

- ◆ 水平面から $\pm 45^\circ$ 傾けて「ハ」の字形に設置したペア土圧計から、地盤のせん断応力を推定する方法は、斜面を有する密な地盤においても適用可能である。
- ◆ ペア土圧計を用いることにより、地盤のせん断応力に着目した数値解析の妥当性確認が可能となる。
- ◆ ただし、以下の場合には、推定されたせん断応力の妥当性の評価が必要となる。
 - 地盤の連続性が損なわれる場合（過剰間隙水圧の上昇により有効応力の小さい時間が継続する場合や、地中構造物等の影響により土圧計から地盤が剥離し計測値が0となる場合）。

ご清聴ありがとうございました



【謝辞】 本内容は、電力8社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)が実施する研究の一環として実施した研究成果の一部であり、「土木学会論文集Vol.81, No.13(特集号:地震工学)」に採択された論文に基づくものです。