

着床式洋上風力発電のレベル2 地震動を用いた地震応答解析

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 地震防災研究領域

大矢陽介

背景

- 洋上風力発電設備について、欧米では30年以上前より風力発電の技術開発が進んでおり、認証を受けた荷重連成解析コードを利用した設計が行われている。一部の認証コードでは地震動を扱うことができるが、地盤の液状化等の非線形性の取り扱いは難しいと考えられる。
- 統一的解説では地盤の液状化を対象とした地震応答解析として、旧運輸省港湾技術研究所が開発したFLIPが紹介されているが、具体的なモデル化法は示されていない。

目的

レベル2地震動作用時のモノパイル基礎構造に対する地盤の液状化、地震中の風荷重の影響を数値解析より明らかにする。

風車の地震被害 2016年熊本地震

- 久木野風力発電所(熊本県)



タワーの座屈



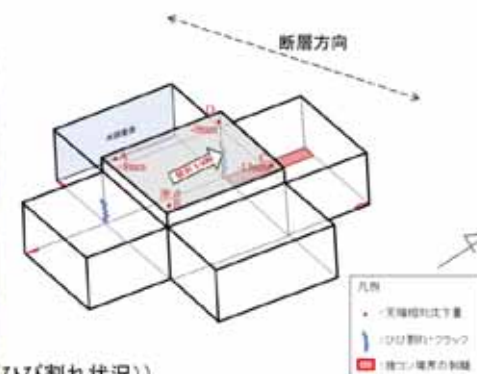
http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/009_05_00.pdf

- 阿蘇にしはらウインドファーム(熊本県)

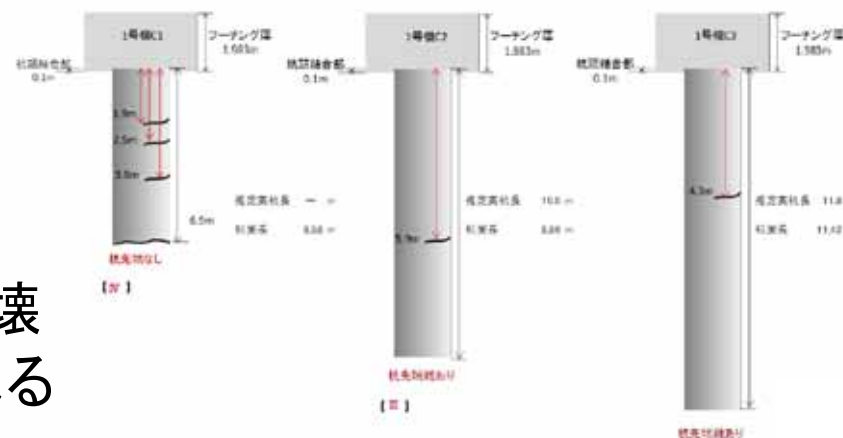


基礎の損傷

http://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/013_03_02.pdf



被災例(3号機(ひび割れ状況))

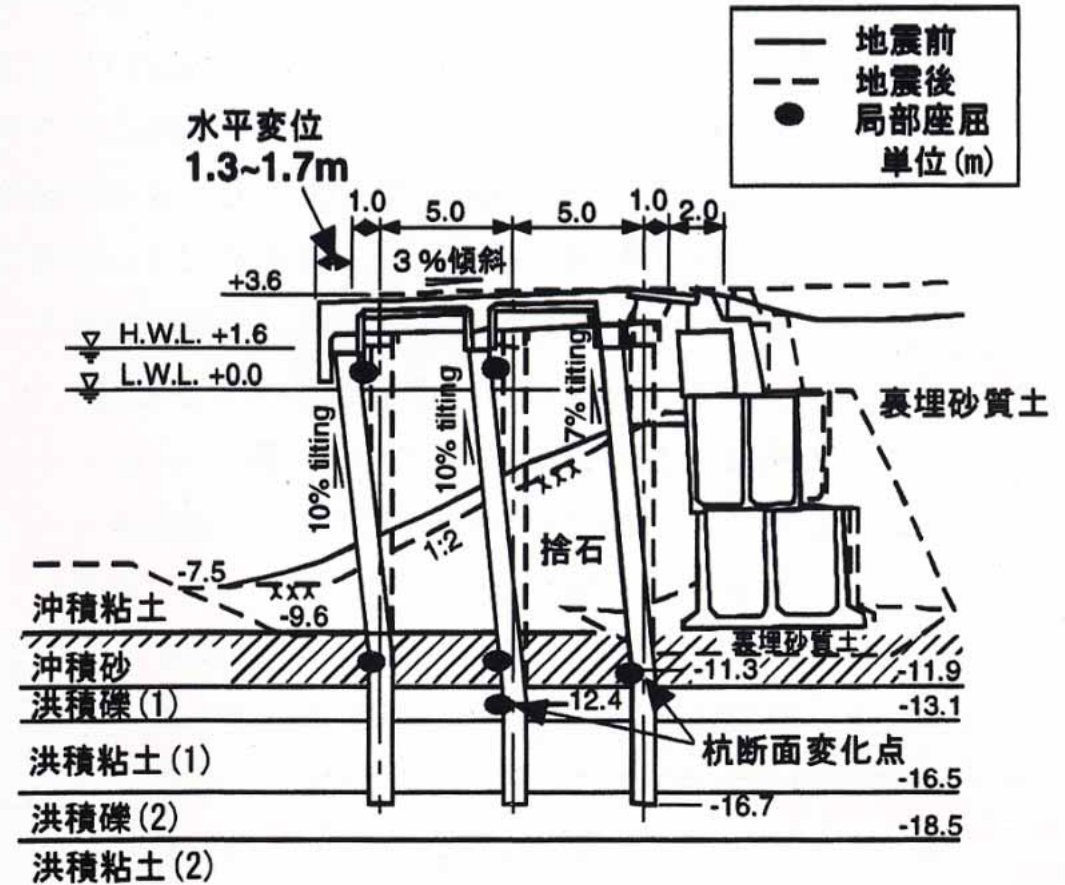


被災例(1号機(抗損傷状況(衝撃弾性波試験結果模式図)))

その他、2018年台風20号による淡路島の倒壊被害などがあるが、洋上での大規模地震による被害は未だ無い。

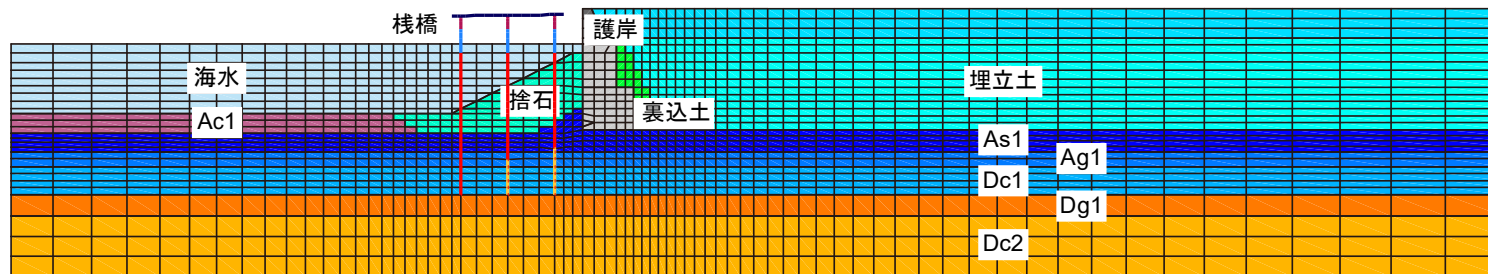
栈橋の耐震設計に関する研究

1995年兵庫県南部地震 神戸港T埠頭

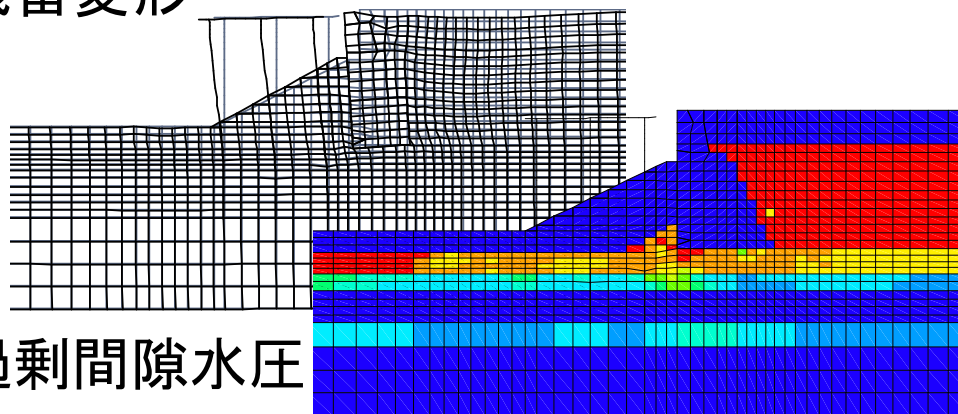


栈橋の耐震設計に関する研究

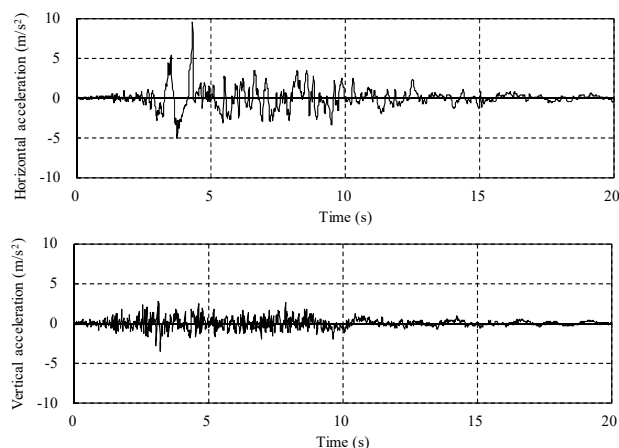
FLIPによる杭-地盤相互作用を考慮した解析



残留変形

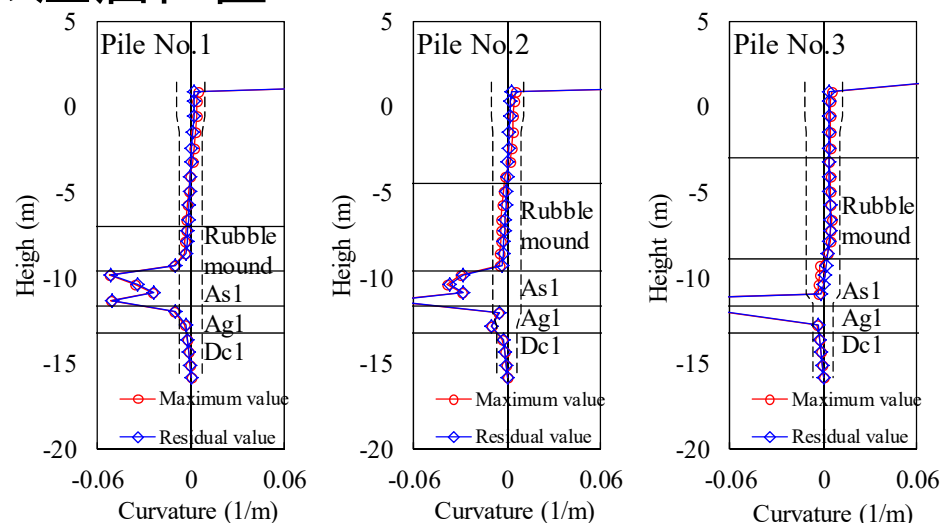


過剰間隙水圧



入力地震動

杭の座屈位置

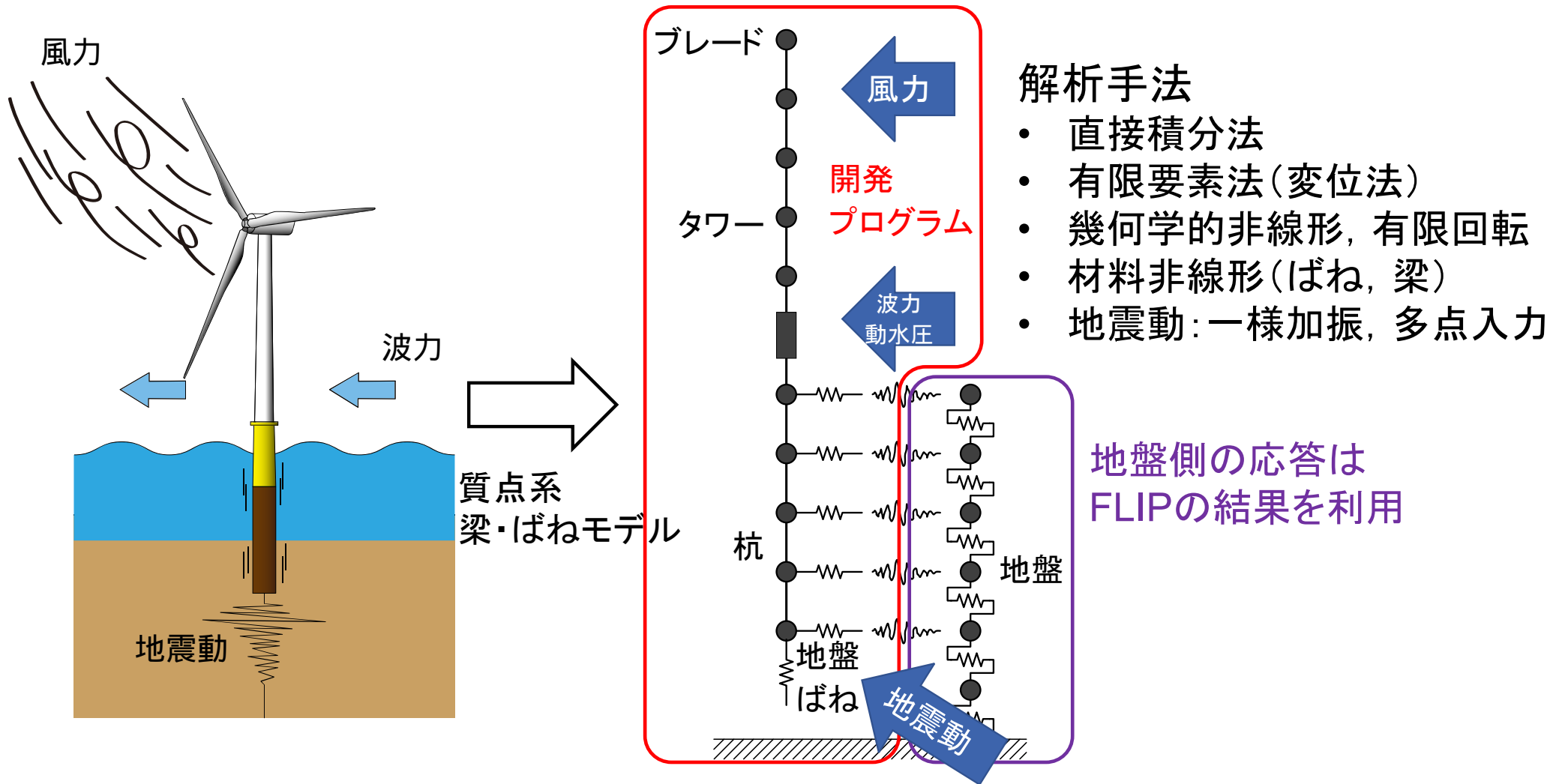


大矢ら(2019)

- 地盤の液状化
 - 液状化に伴う地盤の流動変位
 - 杭の局部座屈を考慮した非線形モデル
- 港湾施設を対象とした変形照査法の考えを風車の設計へ活用したい

地震応答解析の手法

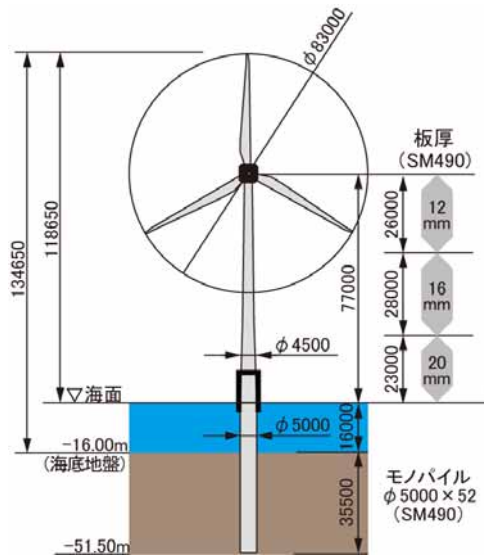
地盤の液状化，風車構造の3次元的な挙動を考慮



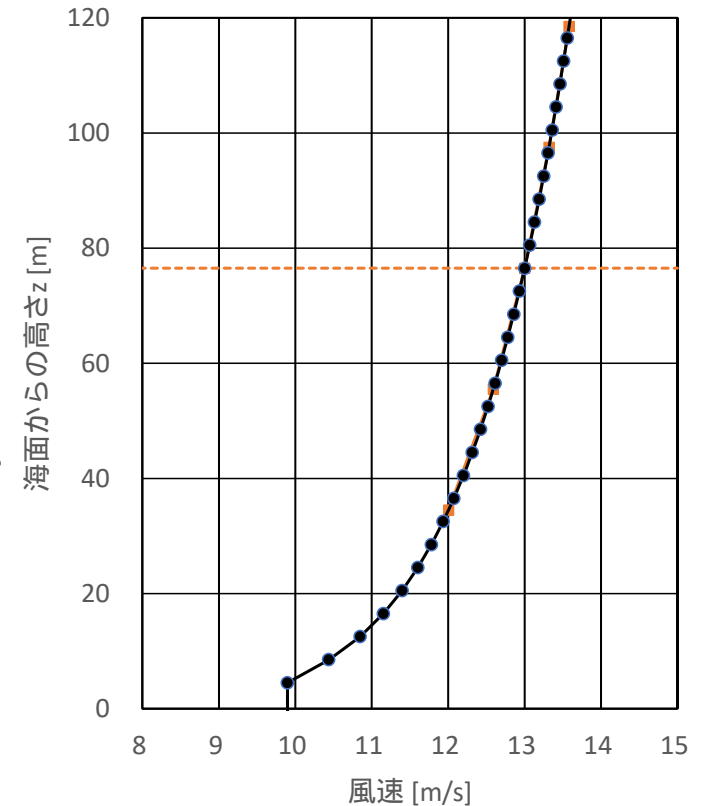
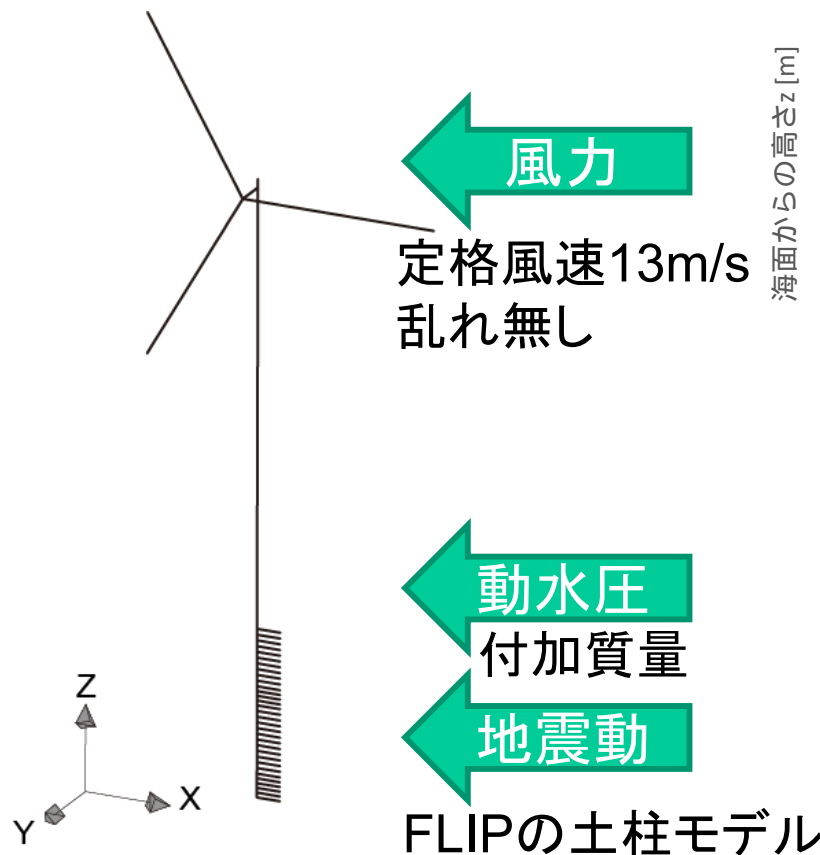
開発プログラムを用いた風力・地震動の同時入力，地盤ばねのモデル化，地盤の流動変位の影響について報告

風力・地震動の同時入力

- 風力・波力連成解析と地震応答解析の両方を考慮できるプログラムが普及していないため、両者を別々に計算し、結果を重ね合わせて評価すること多い
- 風力と地震動の同時入力と重ね合わせを比較



風車・風力のモデル化

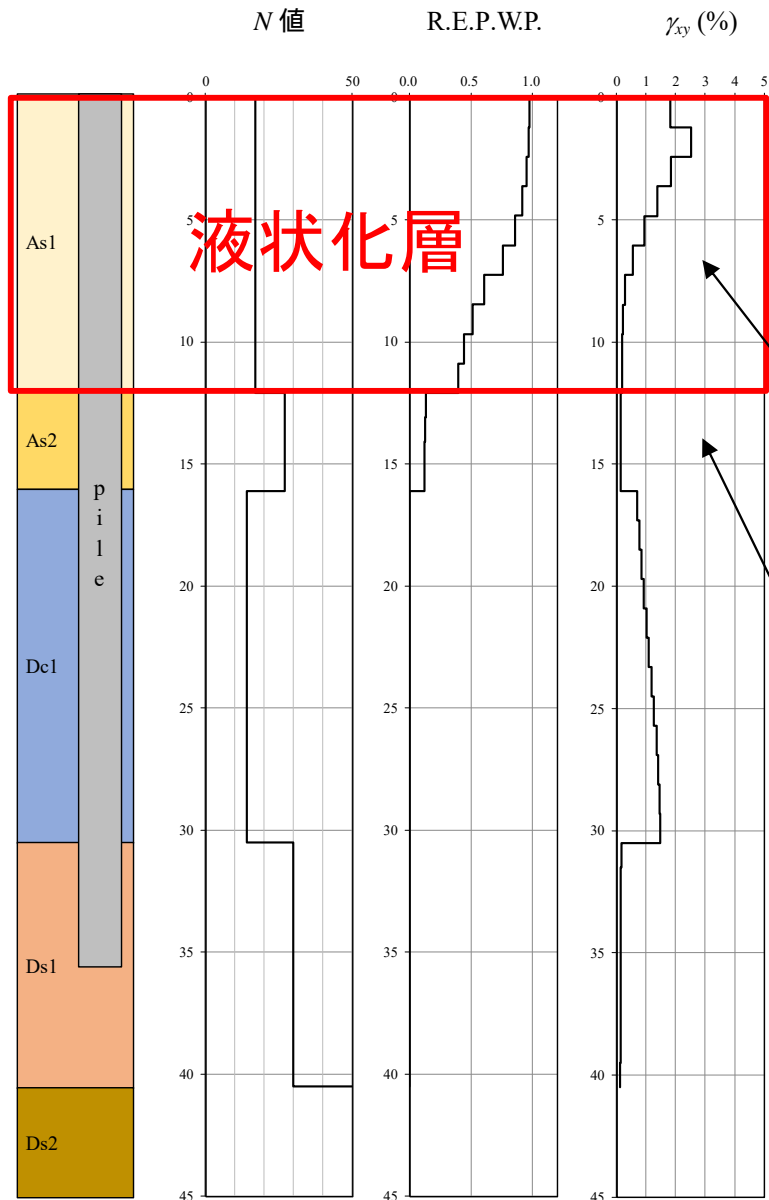


項目	設定/仕様
定格出力	2MW
ロータ直径	83.3m
ハブ高さ	77m
ブレードの重量	191kN
ジェネレータ, ハブ, ナセルの重量	1122.1kN
鋼材	SM490
構造減衰比	0.80%
水深	16m

- 地表面粗度区分Iのべき指数分布
- 発電機トルク, ピッチ位置の制御無し

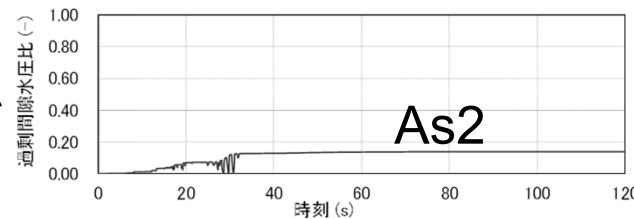
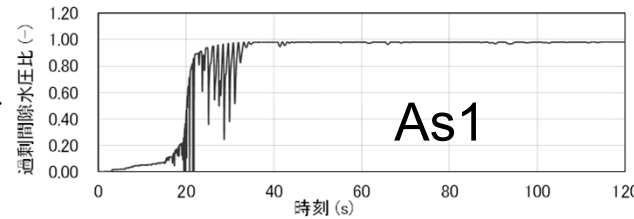
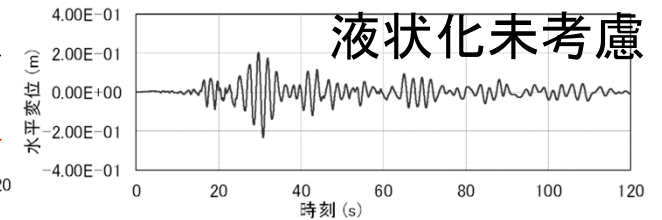
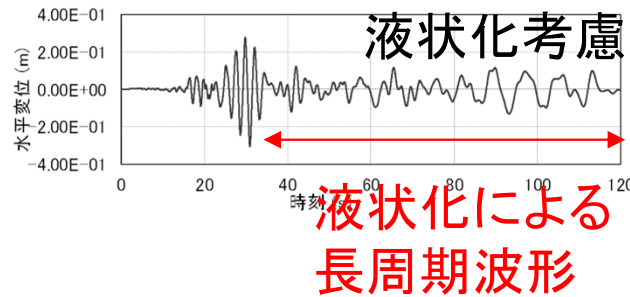
風力・地震動の同時入力

地盤・地震動のモデル化

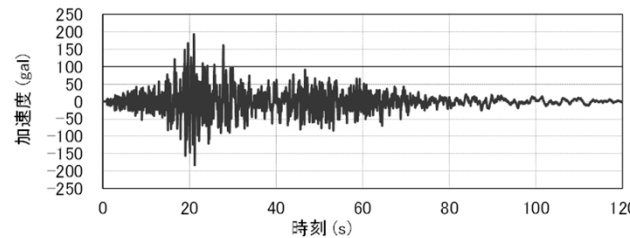


文献の地盤条件を修正

海底面水平変位



液状化の進展

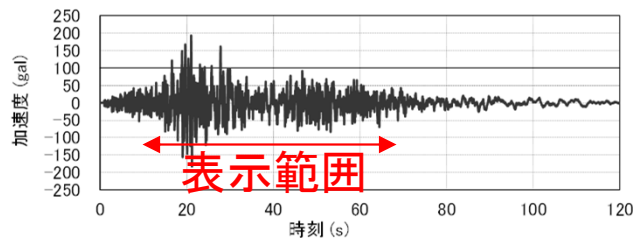


地盤の相対変位と相対速度の時刻歴を風車モデルへ入力

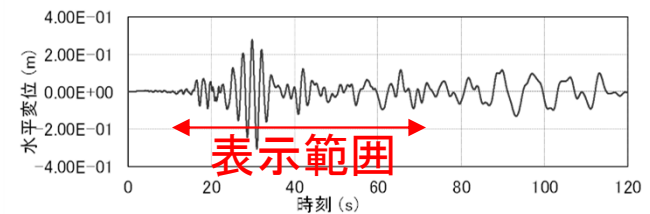
同時入力解析結果 (変形状況の例)



入力加速度



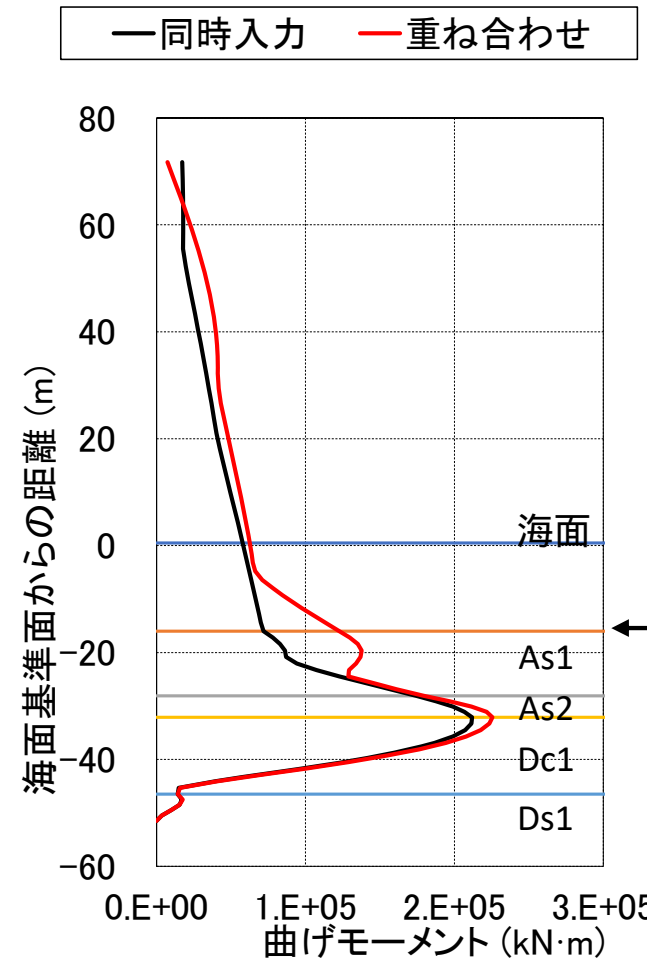
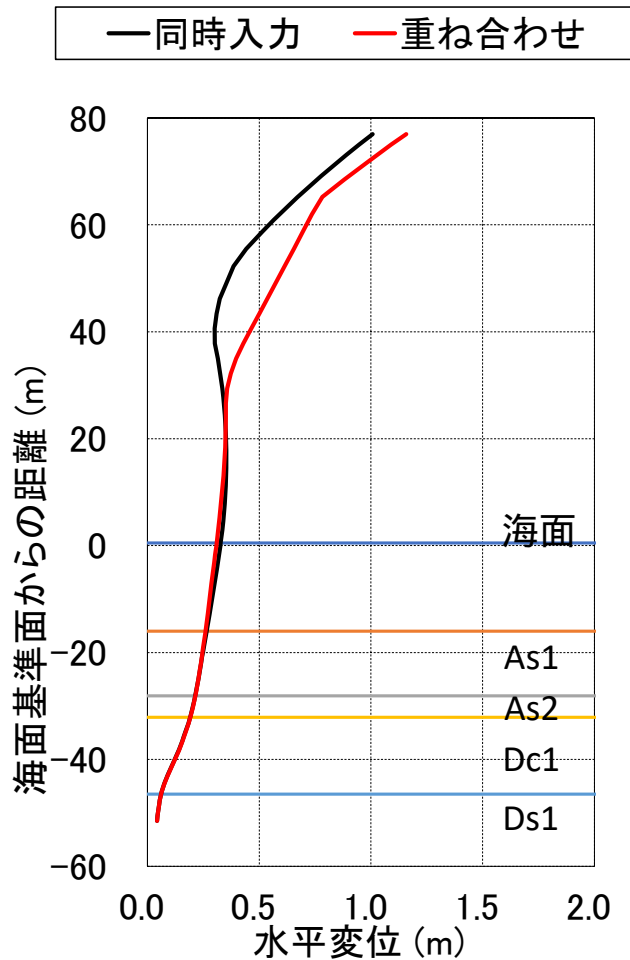
海底面
変位



同時入力と重ね合わせの比較

液状化地盤の考慮無し

(地盤の地震応答解析時の過剰間隙水圧無視,
風車の地震応答解析時の地盤反力係数の低減なし)



絶対値
最大値

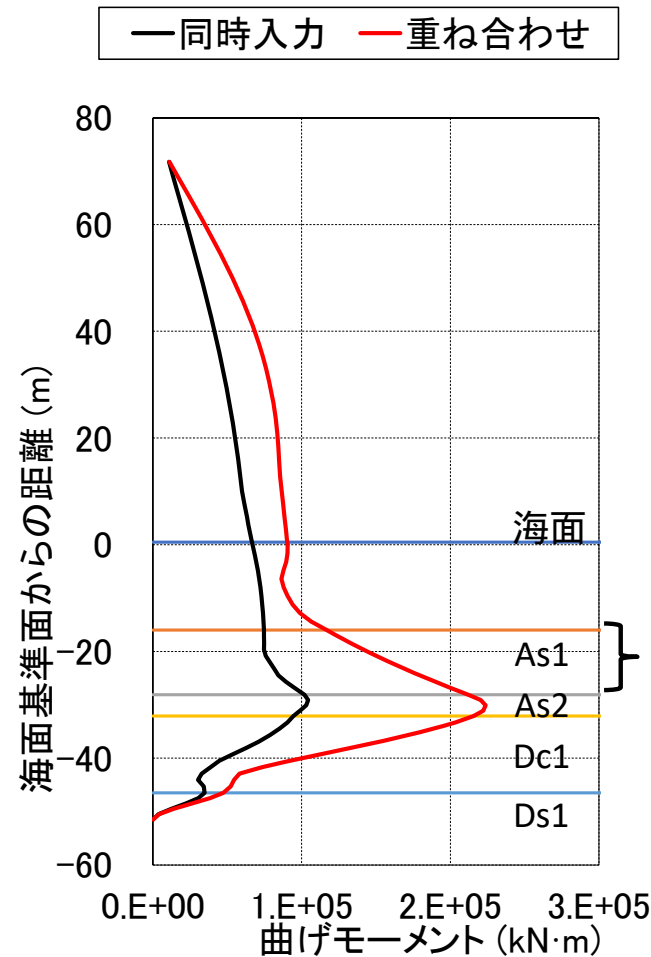
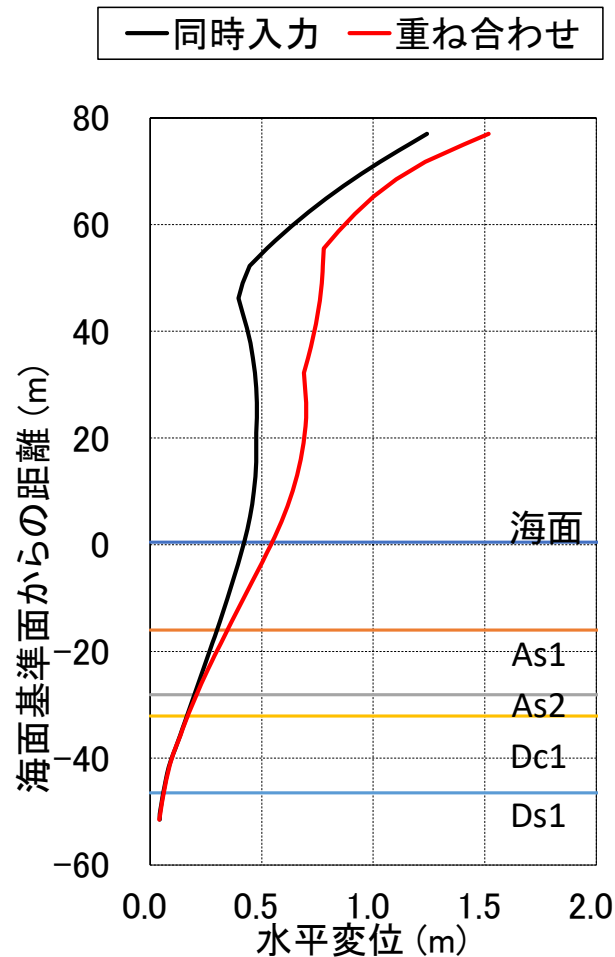
← 海底面

結果の重ね合わせよりも同時入力の方が断面力は小さく、海底面で差が大きくなった。

同時入力と重ね合わせの比較

液状化地盤の考慮あり

(地盤の地震応答解析時の過剰間隙水圧考慮,
風車の地震応答解析時の地盤反力係数の低減あり)



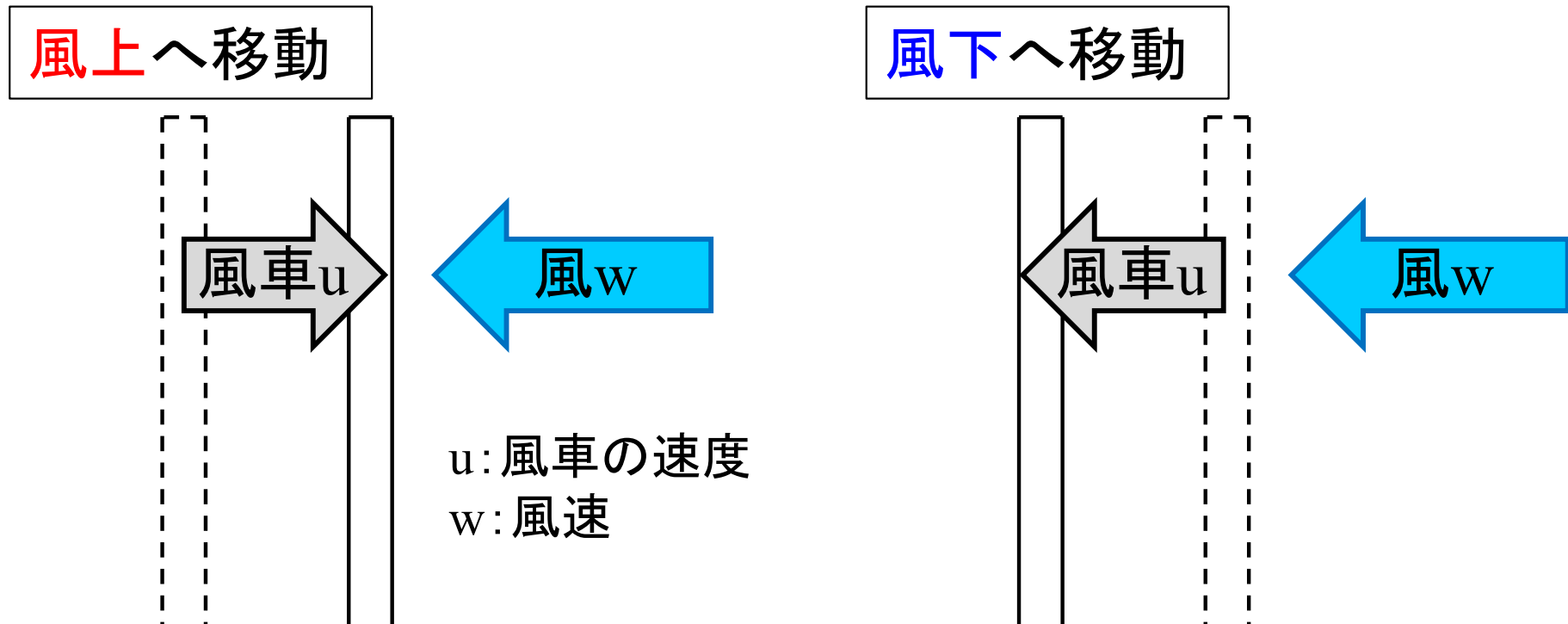
絶対値
最大値

液状化層

結果の重ね合わせよりも同時入力の方が断面力は小さく、液状化層下部で差が大きくなった。液状化地盤において特に両者の差は大きくなった。

同時入力のメリット

地震応答解析で風による外部減衰が加わる



相対速度 $w-u$ が大きくなる
→ 風車を押し戻す力が大きくなる
→ 風車の変位が小さくなる

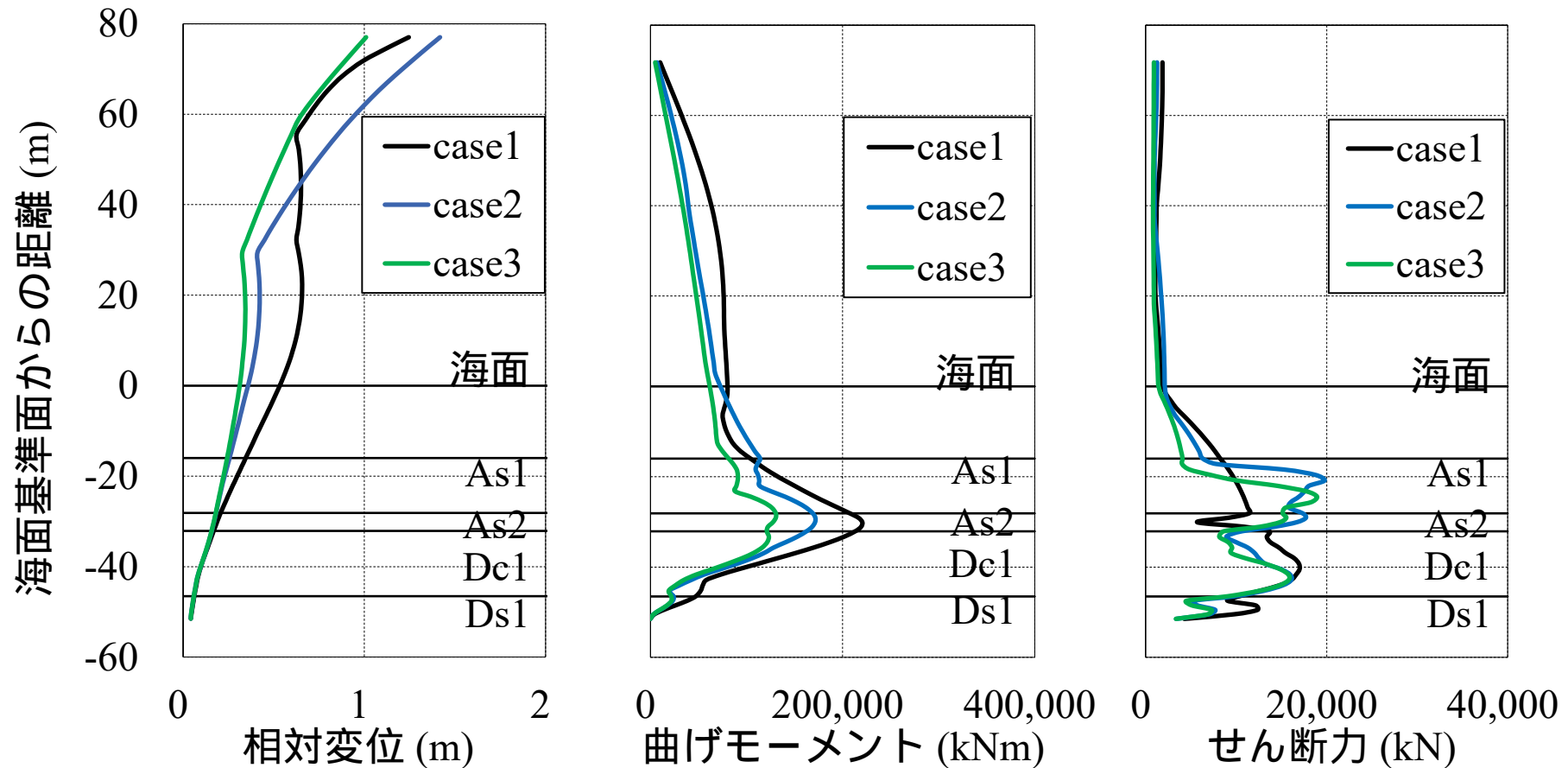
相対速度 $w-u$ が小さくなる
→ 風車を押す力が小さくなる
→ 風車の変位が小さくなる

地盤ばねのモデル化の違い

Case1: 液状化層低減(解析初めから一定)

Case2: 線形, 受働土圧を上限(静的設計で使用)

Case3: 液状化層低減(過剰間隙水圧に応じて逐次変化)



- 曲げモーメントは仮想固定点が深くなるCase1が大きい
- せん断力は地盤反力係数が大きなCase2, Case3が大きい
- 地盤ばねの非線形, 有効応力の変化を精緻に考慮した方が杭の断面力を小さくできる

地盤の流動変位（海底面傾斜）の影響

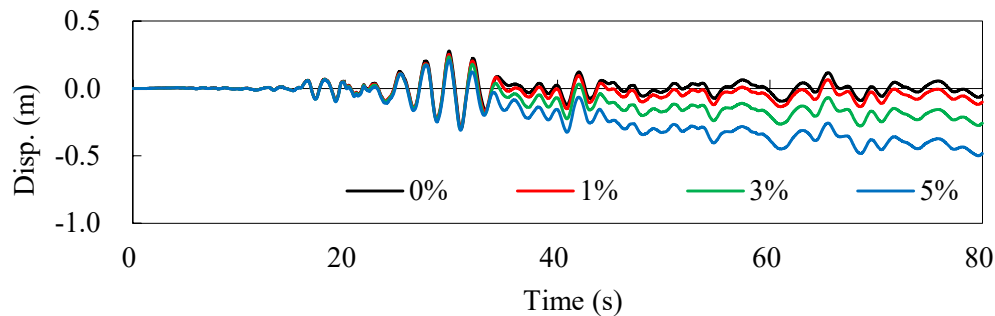
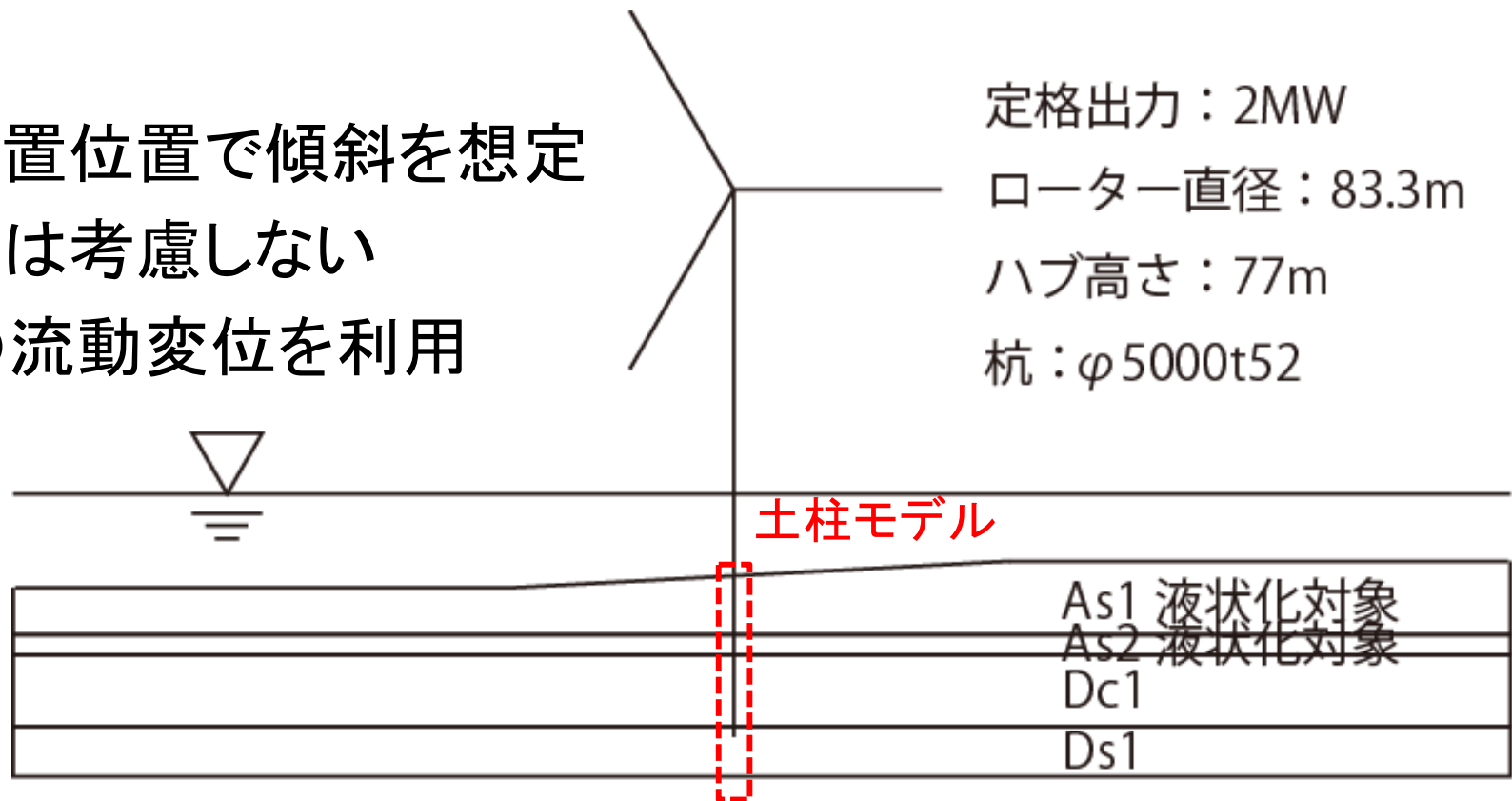
- 風車設置位置で傾斜を想定
- 風荷重は考慮しない
- FLIPの流動変位を利用

定格出力：2MW

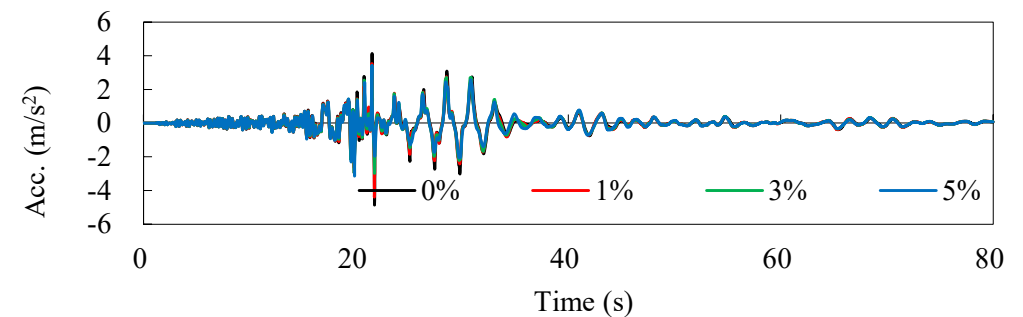
ローター直径：83.3m

ハブ高さ：77m

杭： $\phi 5000t52$



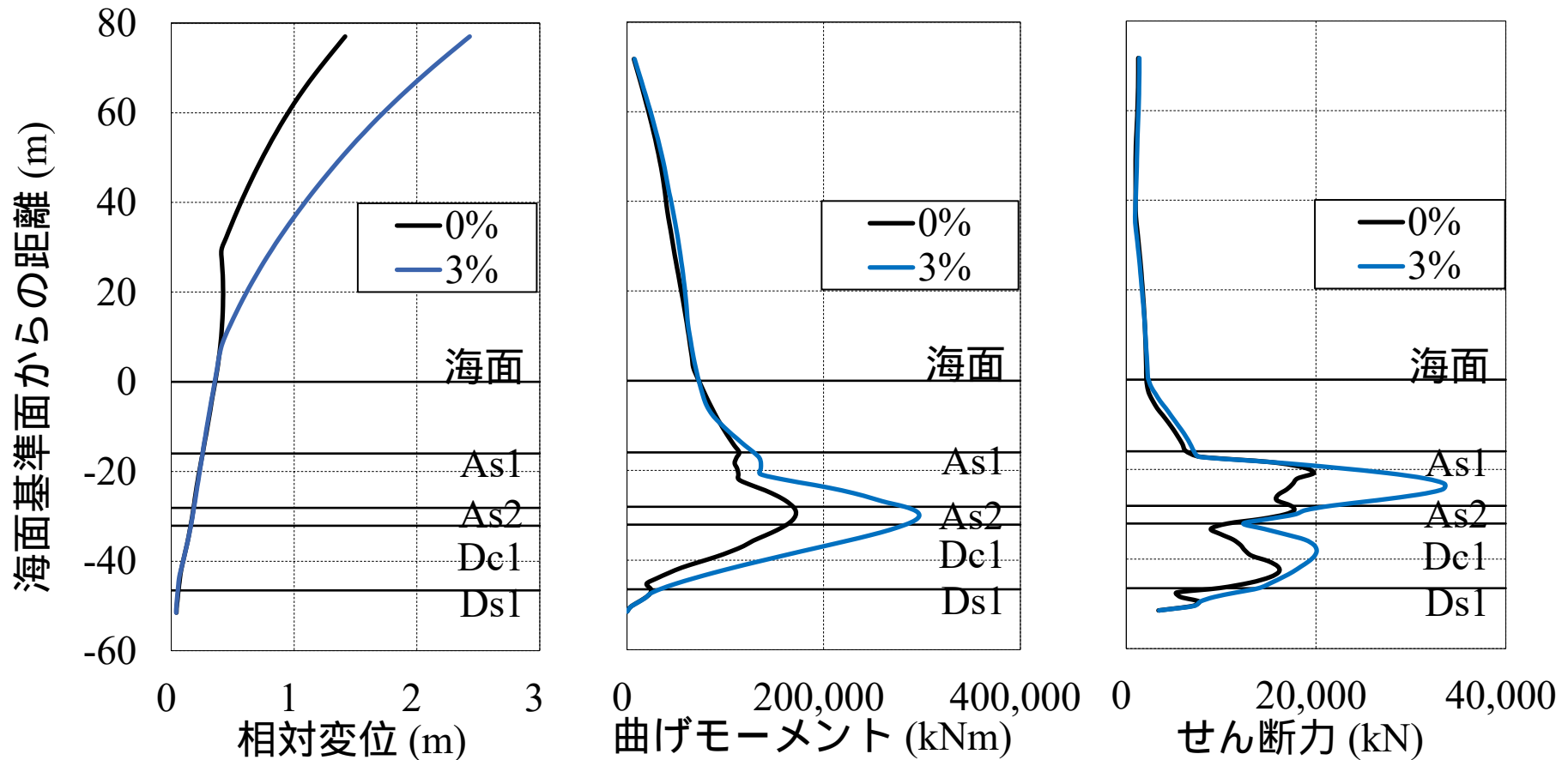
地表面変位



地表面加速度

地盤の流動変位（海底面傾斜）の影響

Case2: 線形, 受働土圧を上限(静的設計で使用)



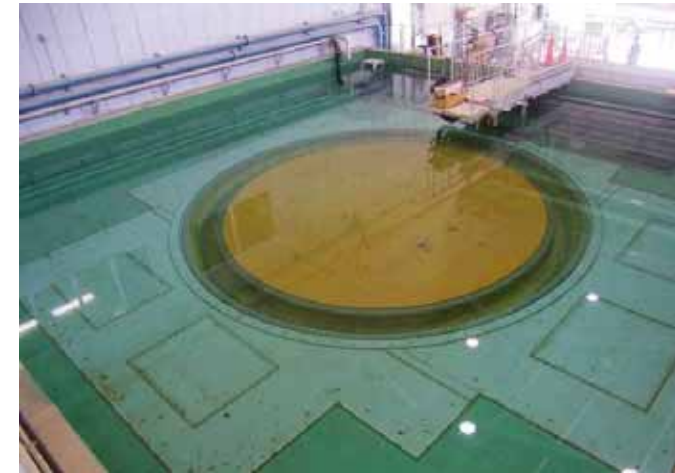
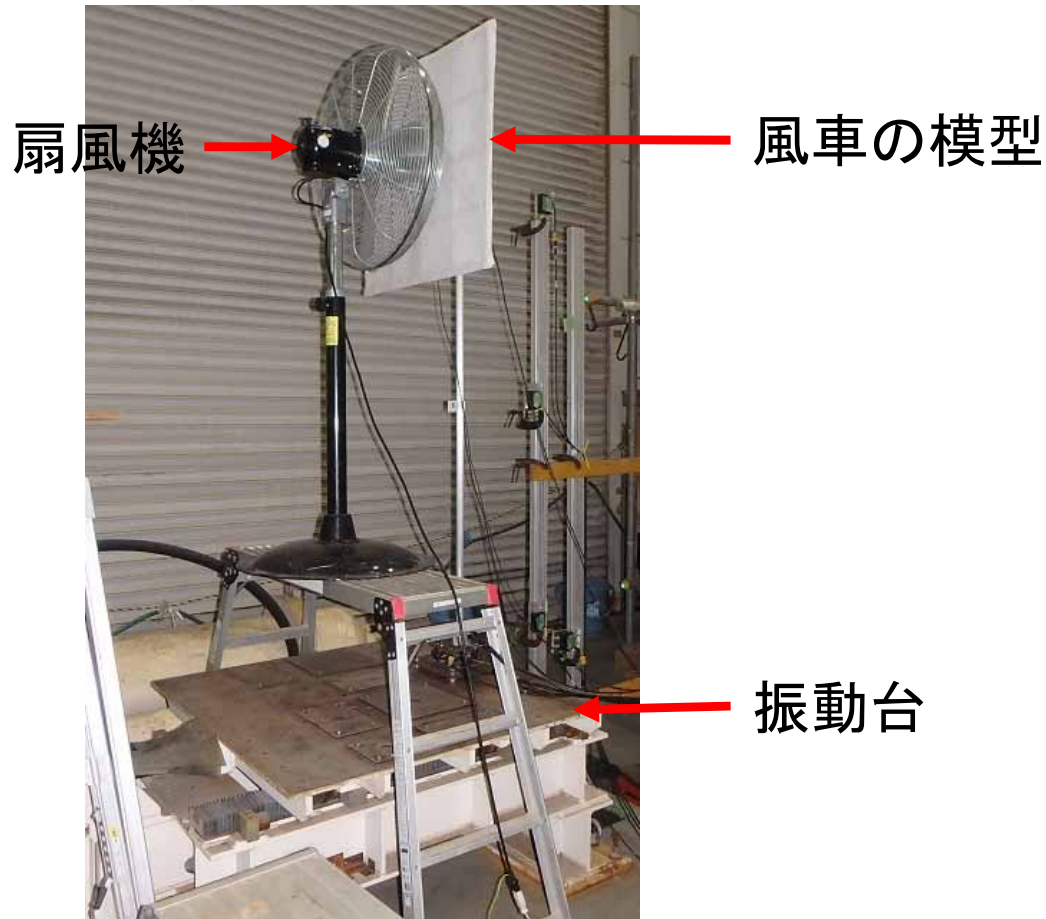
- 最も流動力を大きく評価したCase2で断面力の差は2倍
- 日本海中部地震の際, 勾配1%以下で5mの地盤変位の報告あり

現在進行中の検討

三次元水中振動台を使った模型
振動実験より、数値解析の検証デ
ータを取得予定

三次元水中振動台
(直径6m, 水深2m)

事前検討の様子



ガントリークレーンの模型実験



ご清聴有り難うございました