

砂質土のせん断変形特性に基づく 地盤反力モデルの開発

港湾空港技術研究所 地震防災研究領域
毛利 惇士

はじめに

杭や矢板等のたわみ性壁体が水平力を受けた際に生ずる地盤反力は、一般にWinklerばねに置換されている。

➤ 弾性支承梁モデルの支配方程式

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Bp = 0$$

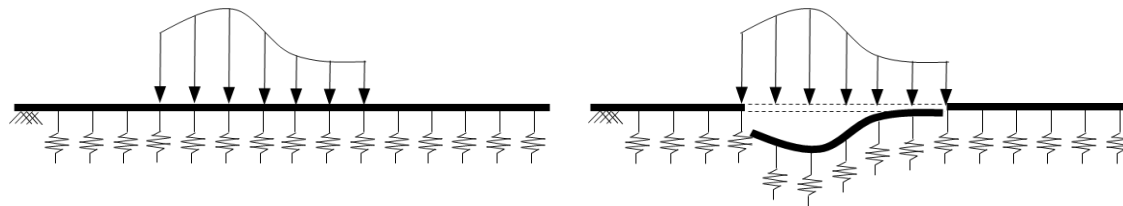
EI : 曲げ剛性, y : 杭の変位(たわみ), x : 深度
 p : 単位幅あたりの地盤反力, B : 杭幅

➤ 地盤反力の表現方法

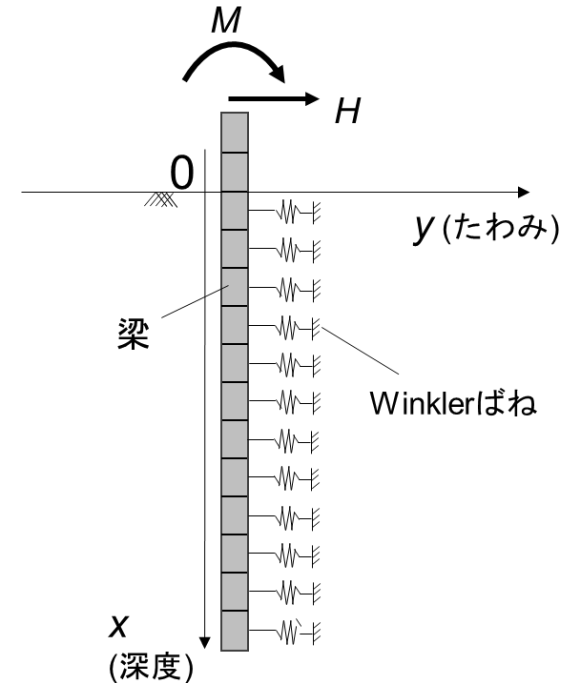
線形モデル: Changの式

非線形モデル: 港研方式

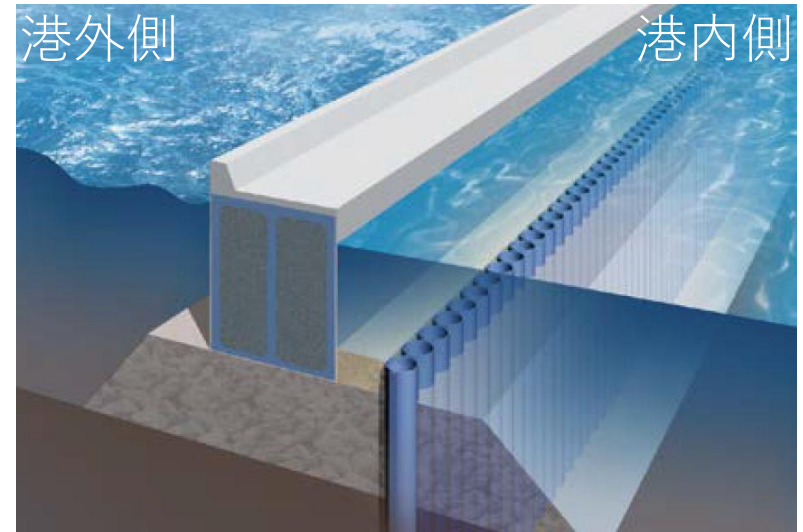
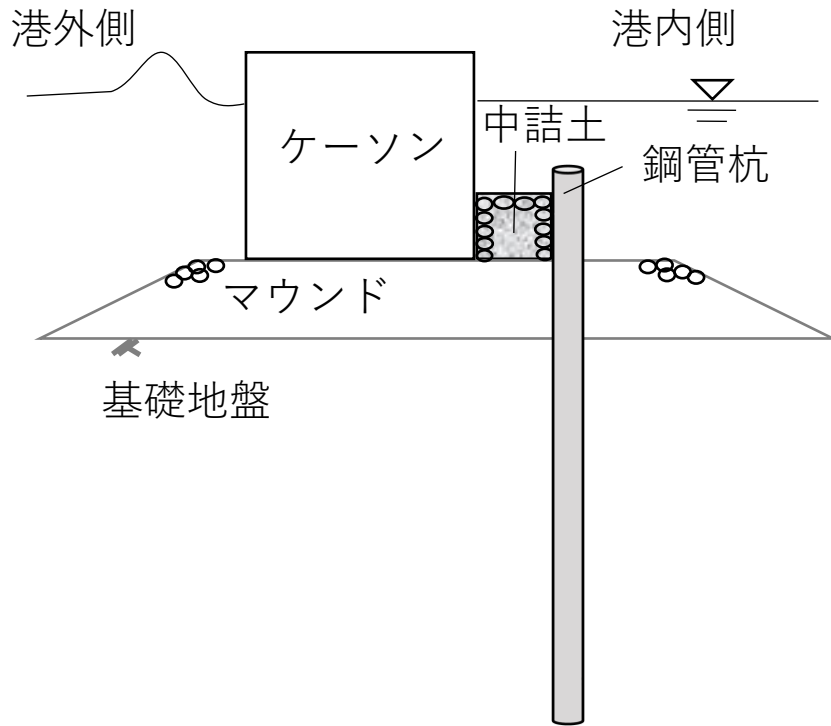
Winklerばねの変形モード



Winklerばねモデルでは、押されたばねのみが変形する。
⇒ばね間に力のやり取りは生じない



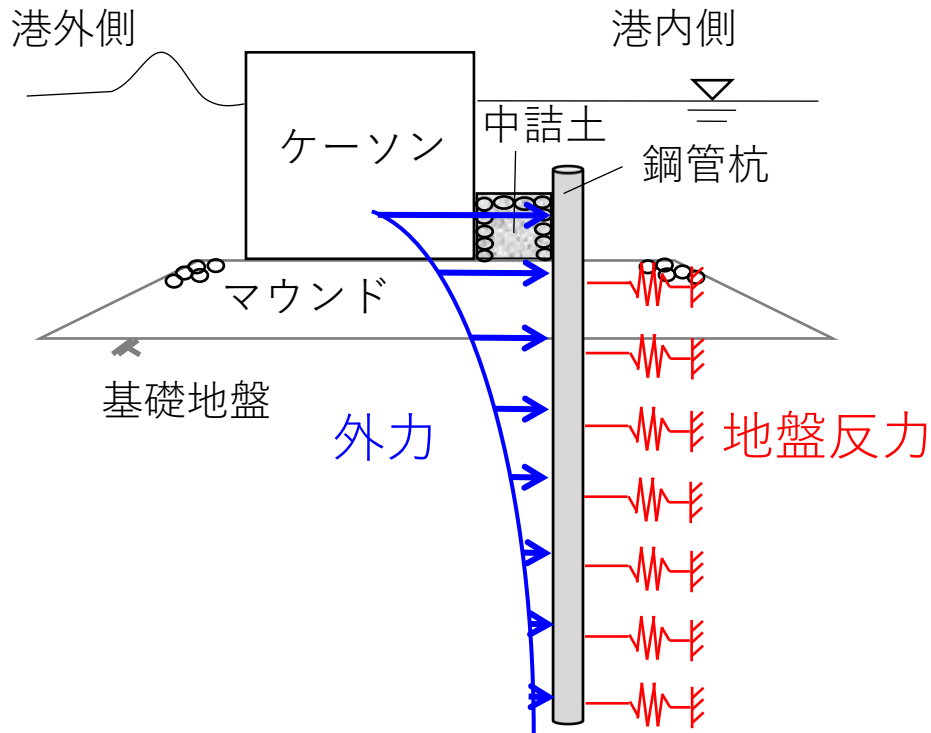
鋼管杭式防波堤補強工法



日本製鉄株式会社カタログに加筆

- 鋼管杭と中詰土を用いた補強により、「粘り強さ」を期待した構造

鋼管杭式防波堤補強工法



ケーソンの大きな変位が許容される
⇒地盤反力を効果的に利用できる構造

杭の水平抵抗性の問題

杭に生じる曲げモーメントの推定

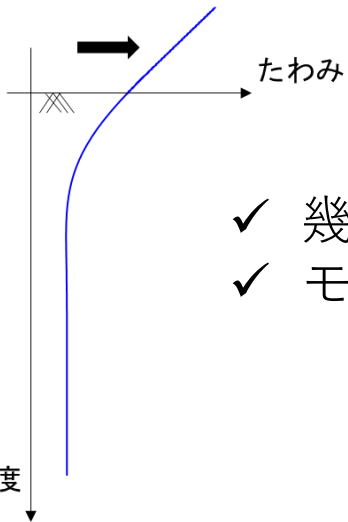


杭に作用する荷重分布の把握が必須

- 鋼管杭と中詰土を用いた補強により、「粘り強さ」を期待した構造

研究目的

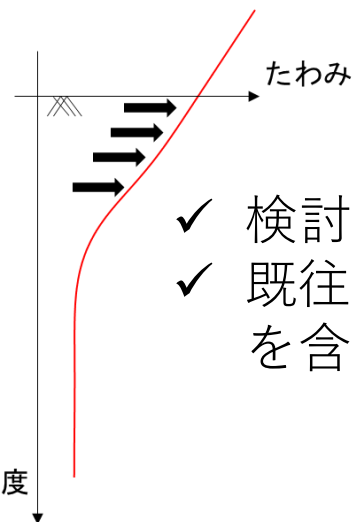
既往(杭頭水平載荷)



- ✓ 幾多の既往研究あり
- ✓ モデルの構築あり

変形モードは類似する挙動

受動杭



- ✓ 検討は不十分
- ✓ 既往のモデルの適用可能性を含めて課題あり

変形モードは外力の作用の仕方に依存する複雑な挙動

どのような地盤反力を考えればよいか？

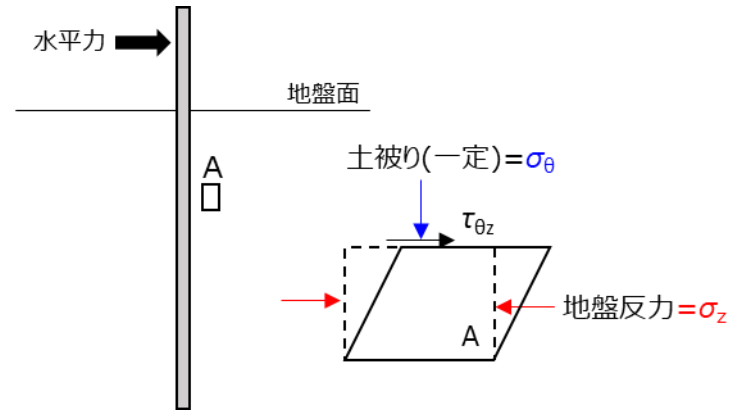
研究内容

地盤ばねと杭の変位量(あるいは変位量と深さ)によって地盤反力が決定すると考えると, 地盤の全ての情報が地盤ばねに集約されることになる.
その物理的解釈は不十分で, 地盤のせん断変形特性との関連付けも難しい.

杭の変位により発生する地盤反力



杭周辺地盤の変形



既往研究

- ✓ p - y 関係に非線形性を取り入れたばねモデル(久保ら, 1964)
地盤反力がたわみの0.5乗に比例する関係を考慮することによって、用いられる地盤反力係数は地盤に固有のものとみなせる。

既往研究

- ✓ p - y 関係に非線形性を取り入れたばねモデル(久保ら, 1964)
地盤反力がたわみの0.5乗に比例する関係を考慮することによって、用いられる地盤反力係数は地盤に固有のものとみなせる。
- ✓ 擁壁の主働・受働土圧問題の2次元モデル試験とその数値計算(中井ら, 1996)
鉛直方向に3分割した擁壁模型の変形プロセスと変形モードが異なる場合の擁壁に作用する土圧分布は、変形プロセスの影響を強く受ける。

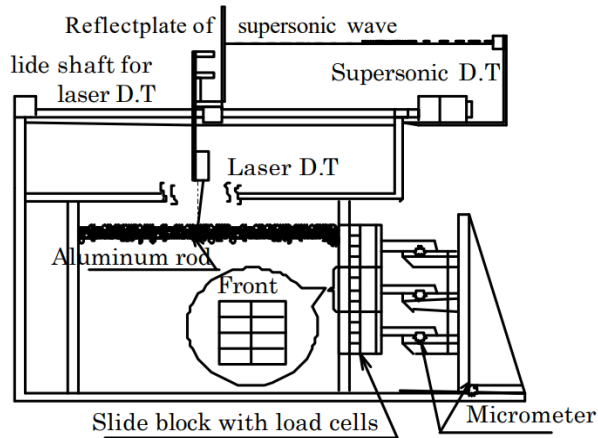


Table.1 変形モード

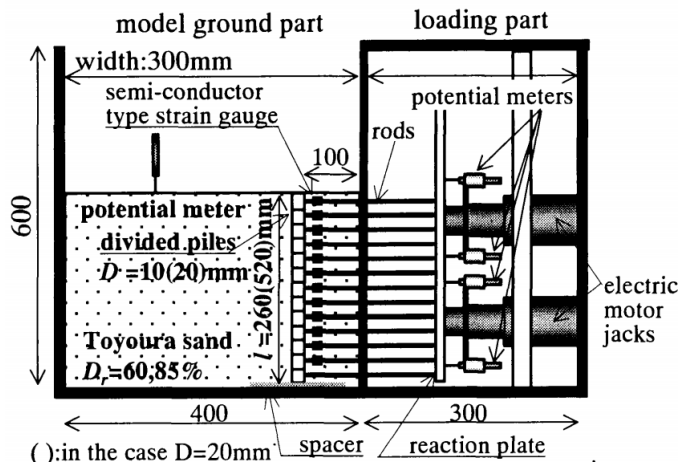
Mode1	Mode2	Mode3	Mode4
Step1 (4mm)	Step1 (4mm)	Step1 (1mm)	Step1 (1mm)
Step2 (4mm)	Step2 (2mm)	Step2 (2mm)	Step2 (2mm)
Step3 (4mm)	Step3 (1mm)	Step3 (4mm)	Step3 (1mm)

Table.2 変形プロセス

Type-A	①	①→②→③の順に 4.0mm
Type-B	②	③→②→①の順に 4.0mm
Type-C	③	① ② ③同時に 4.0mm

既往研究

- ✓ p - y 関係に非線形性を取り入れたばねモデル(久保ら, 1964)
地盤反力がたわみの0.5乗に比例する関係を考慮することによって、用いられる地盤反力係数は地盤に固有のものとなせる。
- ✓ 擁壁の主働・受働土圧問題の2次元モデル試験とその数値計算(中井ら, 1996)
鉛直方向に3分割した擁壁模型の変形プロセスと変形モードが異なる場合の擁壁に作用する土圧分布は、変形プロセスの影響を強く受ける。
- ✓ 双曲線モデルに基づく p - y 関係の表現(神田ら, 2000)
砂地盤中の単杭の p - y 関係は、初期地盤反力係数と極限地盤反力をパラメータとして表される双曲線型 p - y 関係でモデル化できる。



13個並べた分割杭で単杭を模擬

既往研究

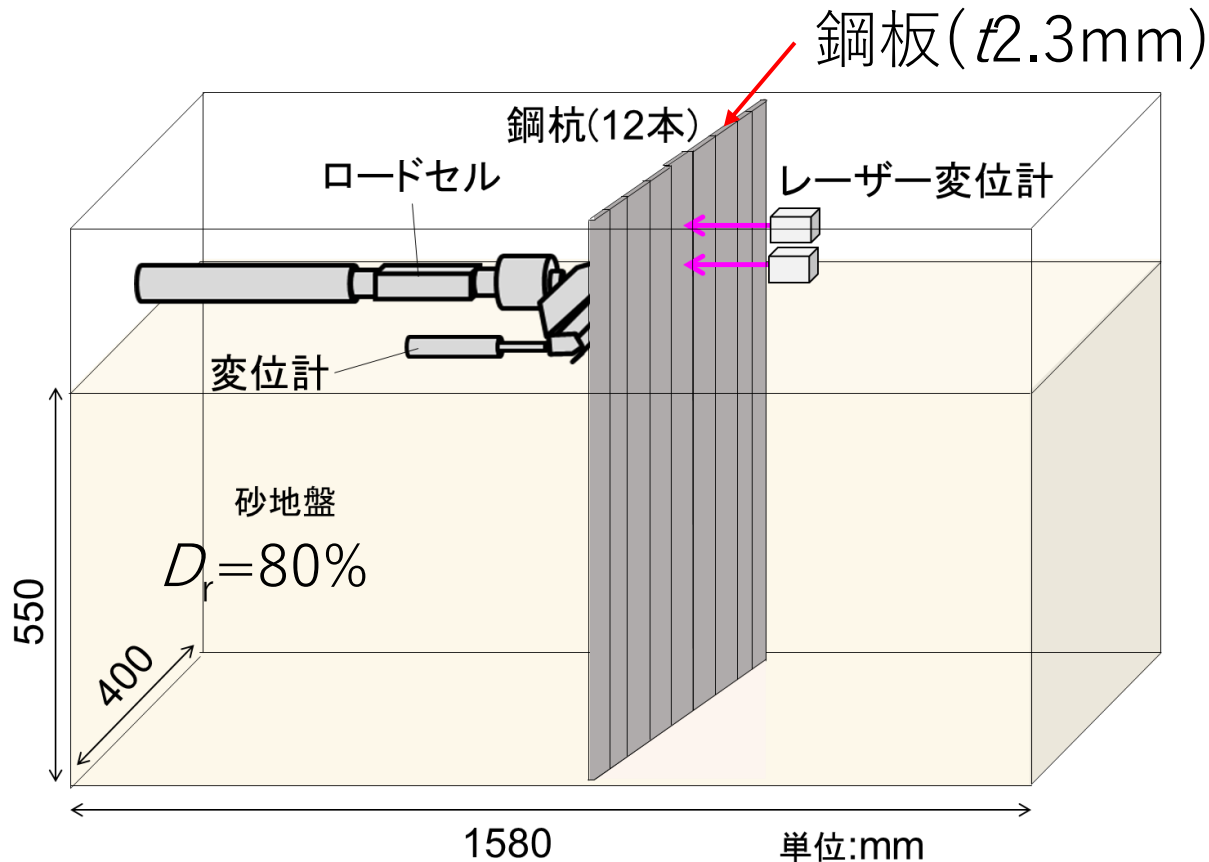
- ✓ p - y 関係に非線形性を取り入れたばねモデル(久保ら, 1964)
地盤反力がたわみの0.5乗に比例する関係を考慮することによって、用いられる地盤反力係数は地盤に固有のものとみなせる。
- ✓ 擁壁の主働・受働土圧問題の2次元モデル試験とその数値計算(中井ら, 1996)
鉛直方向に3分割した擁壁模型の変形プロセスと変形モードが異なる場合の擁壁に作用する土圧分布は、変形プロセスの影響を強く受ける。
- ✓ 双曲線モデルに基づく p - y 関係の表現(神田ら, 2000)
砂地盤中の単杭の p - y 関係は、初期地盤反力係数と極限地盤反力をパラメータとして表される双曲線型 p - y 関係でモデル化できる。
- ✓ 応力ひずみ曲線と p - y 曲線が相似形状と考える手法(Zhang et al, 2017)
室内試験で得られた土の応力ひずみ曲線は p - y 曲線と相似なものともみなせる。

杭頭水平載荷実験(載荷高さ50mm)

➤ 地盤材料

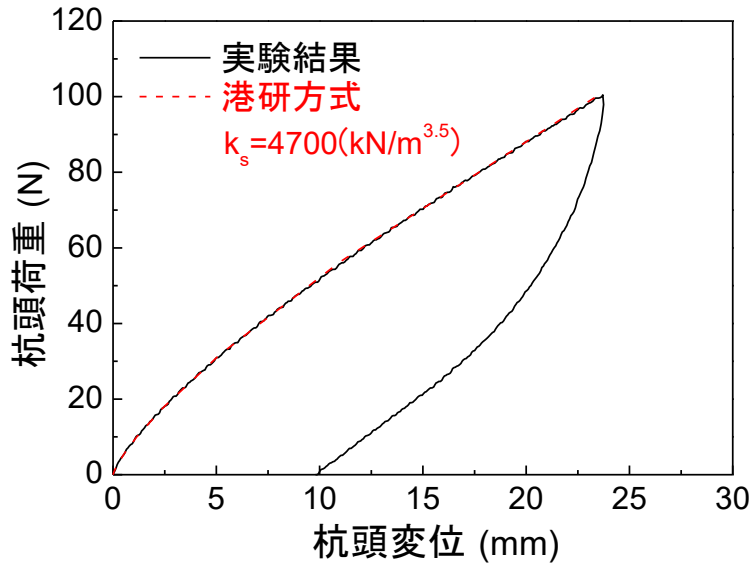
東北珪砂5号(気乾状態)

土粒子密度 $\rho_s = 2.65 (\text{Mg}/\text{m}^3)$, 平均粒径 $D_{50} = 0.548 (\text{mm})$



砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ 杭頭に水平力を受ける場合の単杭の挙動($h=50\text{mm}$)



模型杭 (鋼板) SS400

$B50\text{mm} \times t2.3\text{mm}$ ($E=2.05 \times 10^5 \text{ kNm}^2$)

載荷高さ : 50mm

1mm/minの静的載荷

□ 港研方式S型の地盤反力モデル

$$p = k(x, y) \cdot y \quad k: \text{弾性係数}$$

特徴

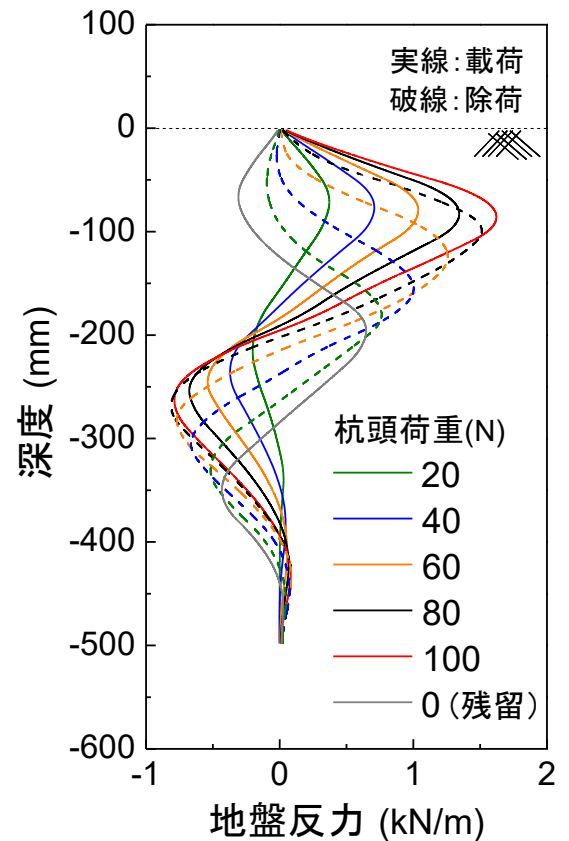
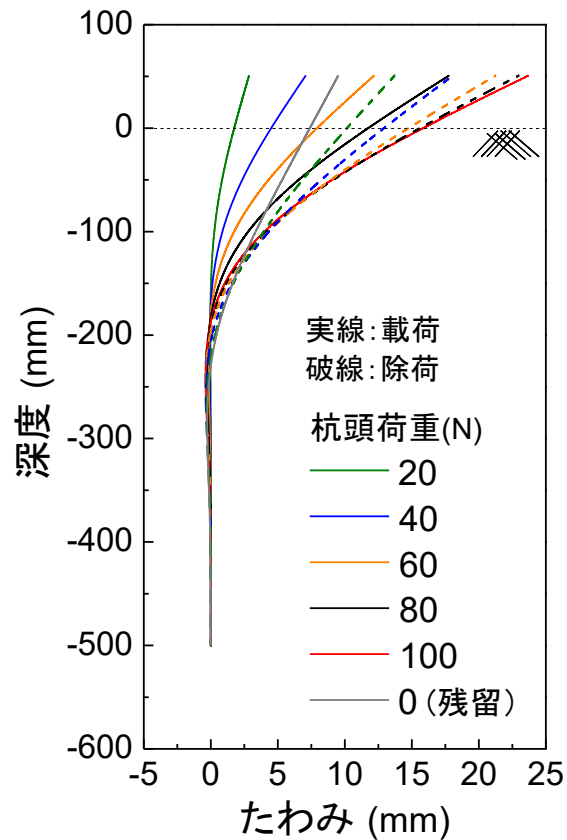
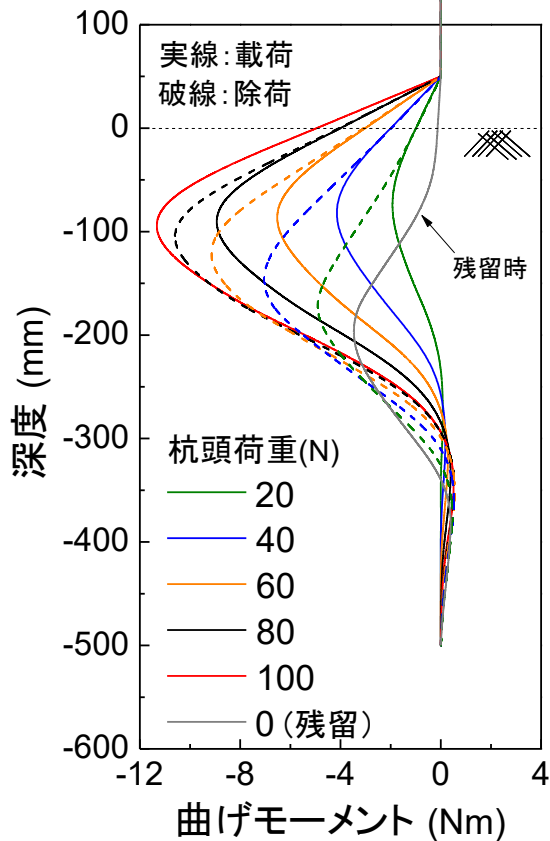
地盤反力係数は、「地盤に固有」
 EI や載荷高さ,変位レベルに依らない

↓ $k \propto \frac{x}{y^{0.5}}$ 実験事実

$$= \alpha \frac{x}{y^{0.5}} \cdot y \quad \Rightarrow \quad p = k_s \cdot x \cdot y^{0.5}$$

砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

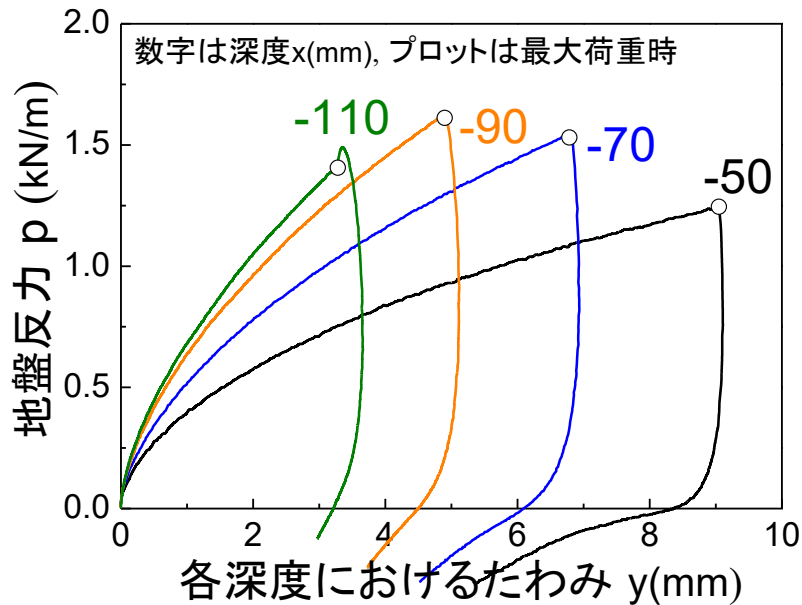
➤ 杭頭に水平力を受ける場合の単杭の挙動($h=50\text{mm}$)



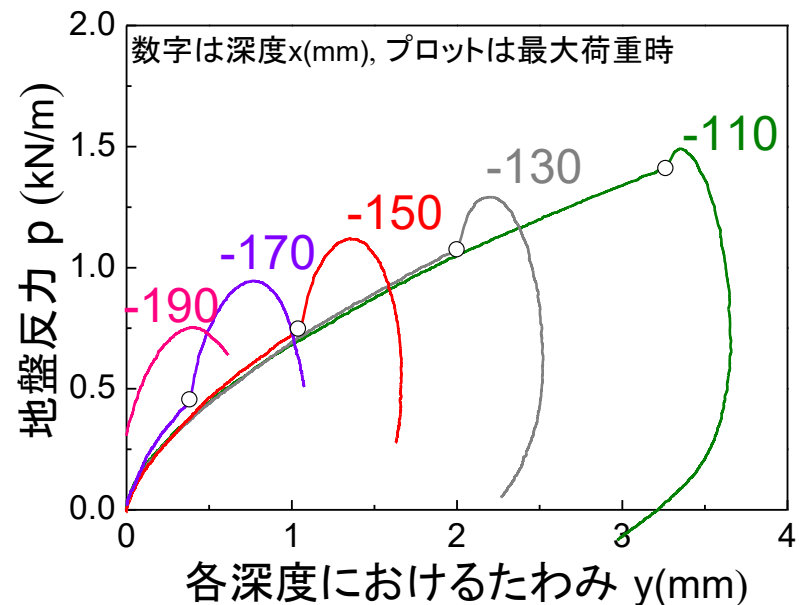
砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ p - y 関係

浅い深度



深い深度

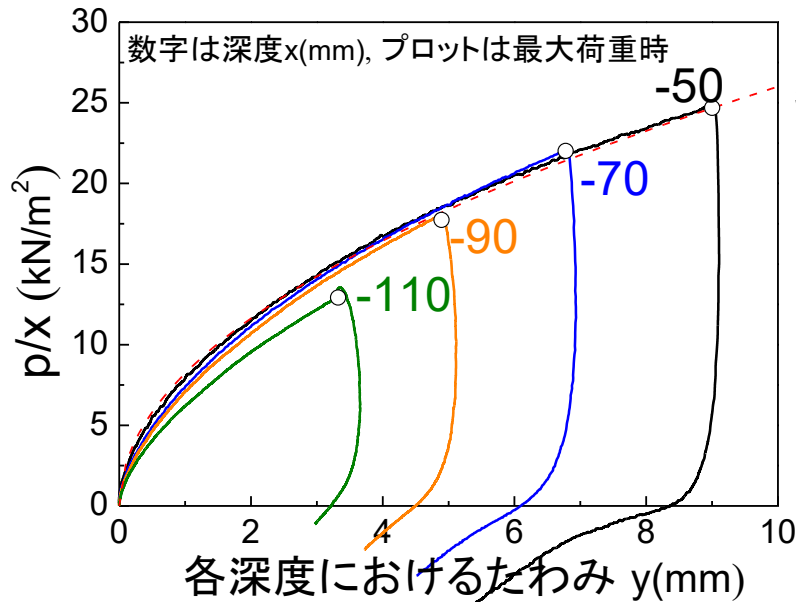


- ✓ 深度-90mm以深では，深度が深くなることによる地盤反力の増加がみられなくなる。

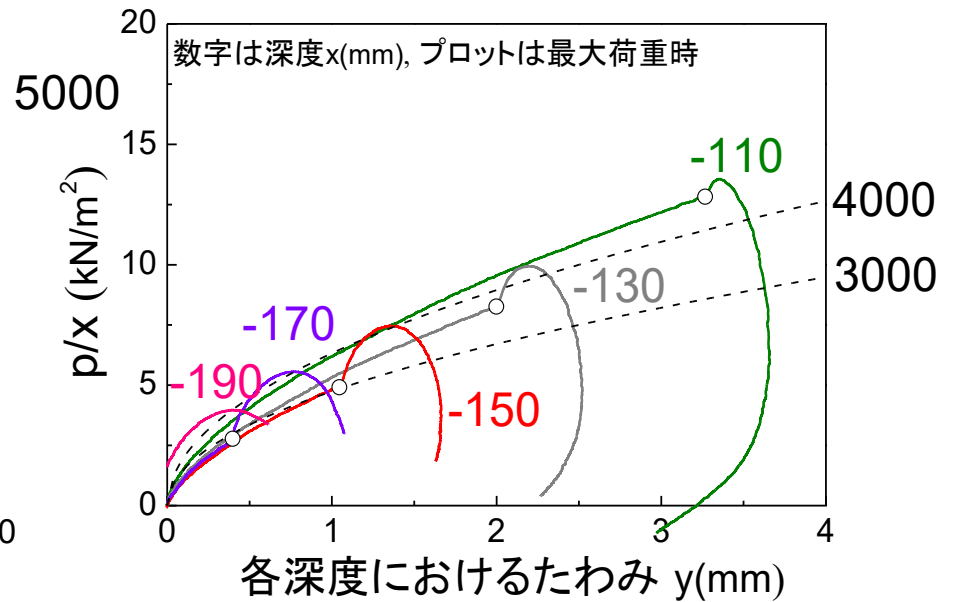
砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ $p/x-y$ 関係

浅い深度



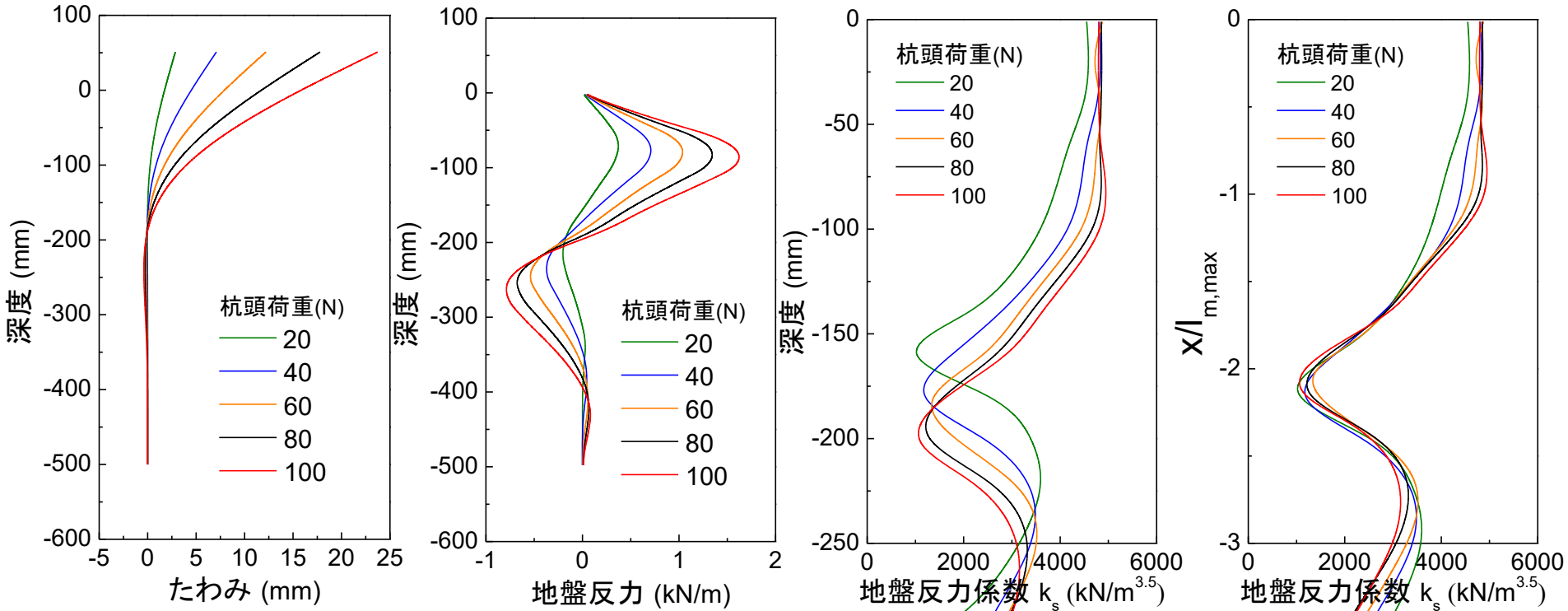
深い深度



- ✓ 深度-90mmよりも浅い区間の $p/x-y$ 関係は概ね一致している。また、港研方式の挙動と良い対応を示している。
- ✓ 深度-90mm以深では、地盤反力係数は深度方向に異なる。変位レベルにも依存している。

砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ 地盤反力係数の深度分布



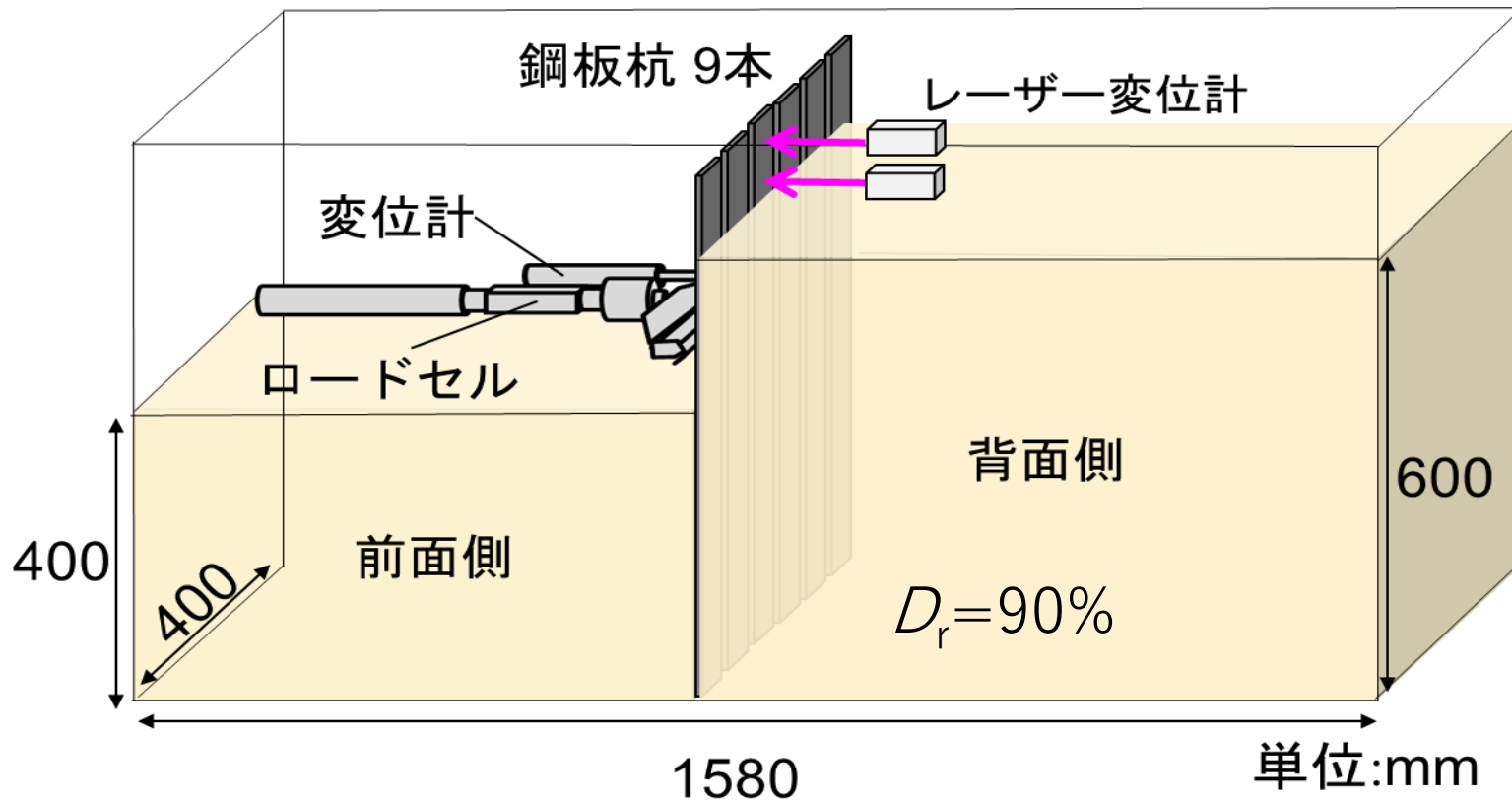
✓ 地盤反力とたわみの関係から求めた地盤反力係数 k_s の深度分布は荷重レベルによって異なっている。

✓ 地盤反力係数の深度分布は、 $x/l_{m,max}$ で表現することで、荷重レベルの違いによる変化が小さくなる傾向にある。

砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

□ 実験概要

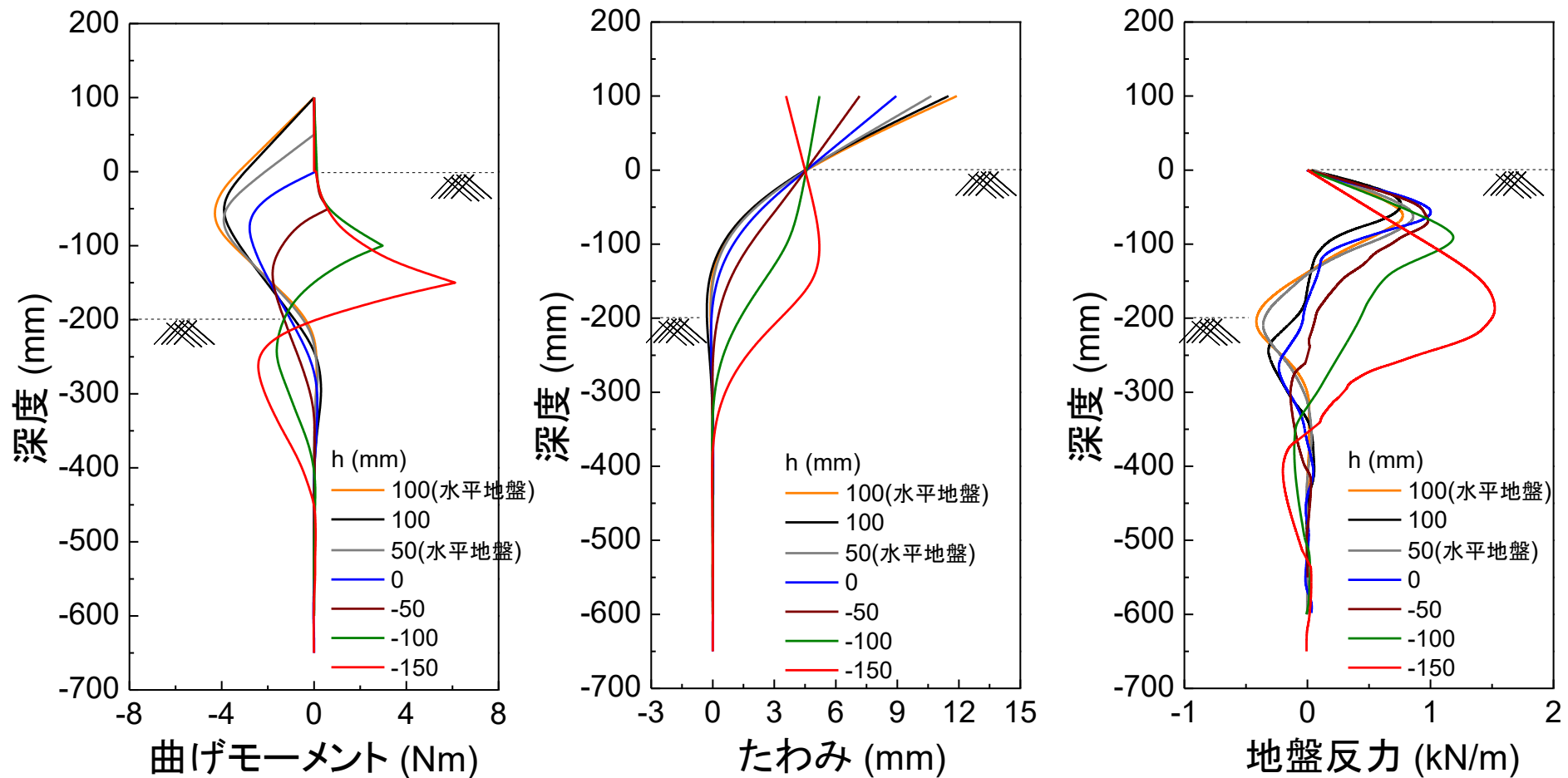
载荷位置を変えた実験を行うため、前面側の地盤を200mm掘削した。



砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

□ 実験結果

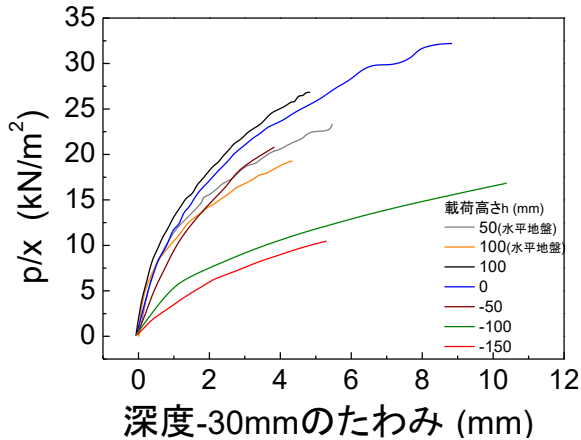
➤ 地表面変位量が4.5mm時の杭の挙動 ($D_r=90\%$)



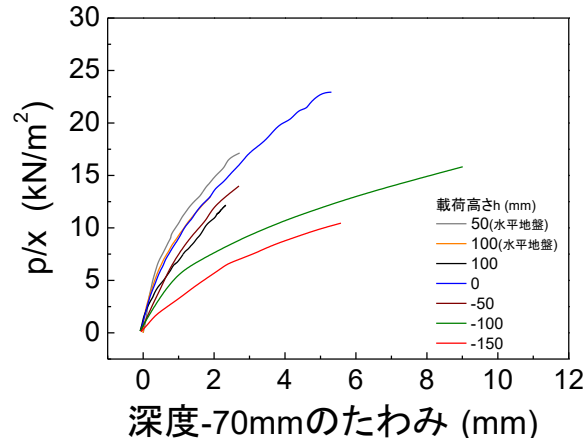
砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ p/x - y 関係

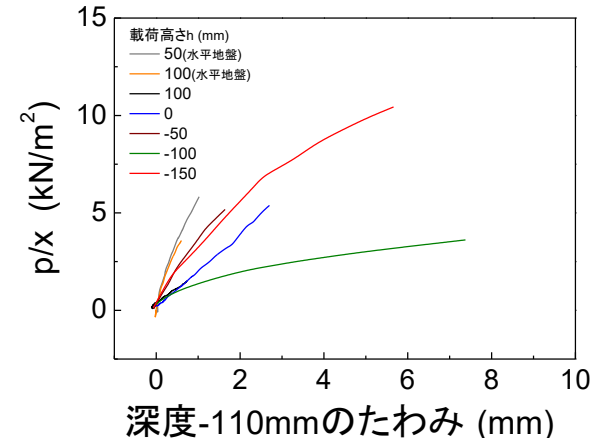
深度-30mm



深度-70mm



深度-110mm

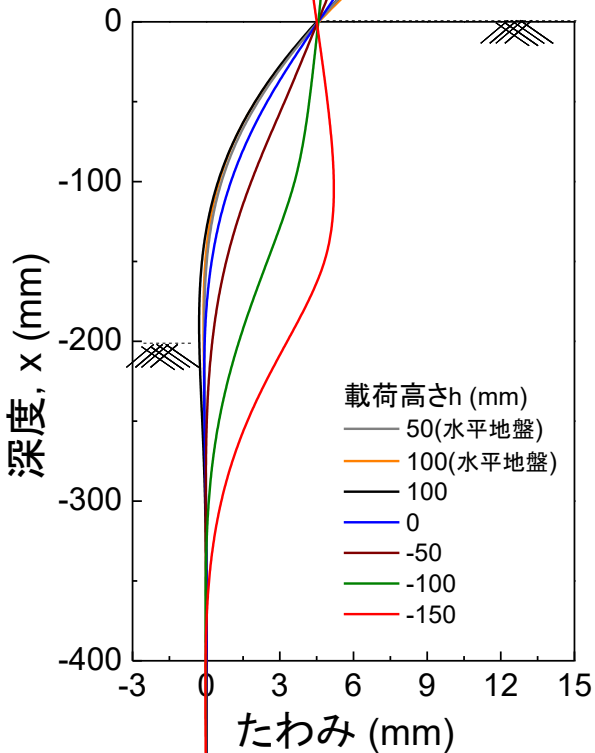


- ✓ 水平力の載荷位置が地表面よりも深い場合，同一変位時の地盤反力が小さい. ⇒ 地盤反力係数 小
- ✓ 載荷位置が地表面よりも高いケースでは，明確な違いがみられない.

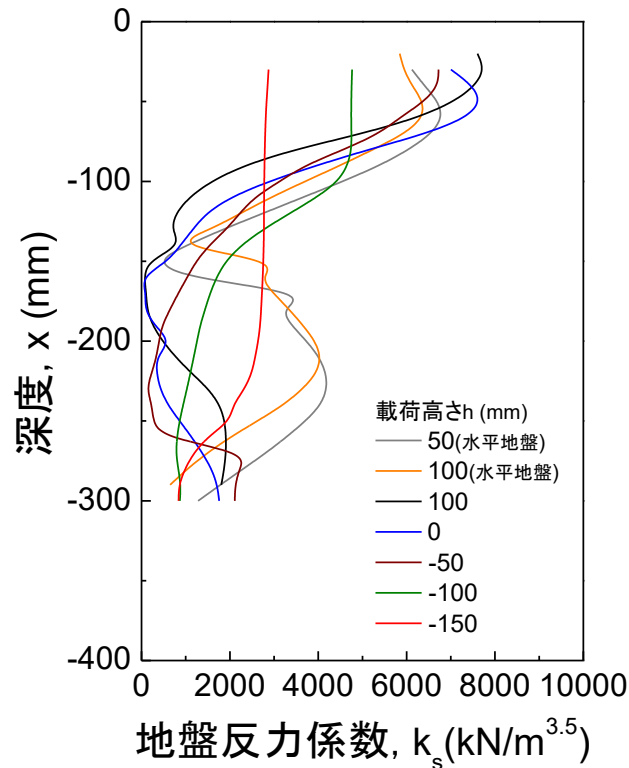
砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ 地盤反力係数の深度分布

➤ 地中部のたわみ



➤ 地盤反力係数の深度分布

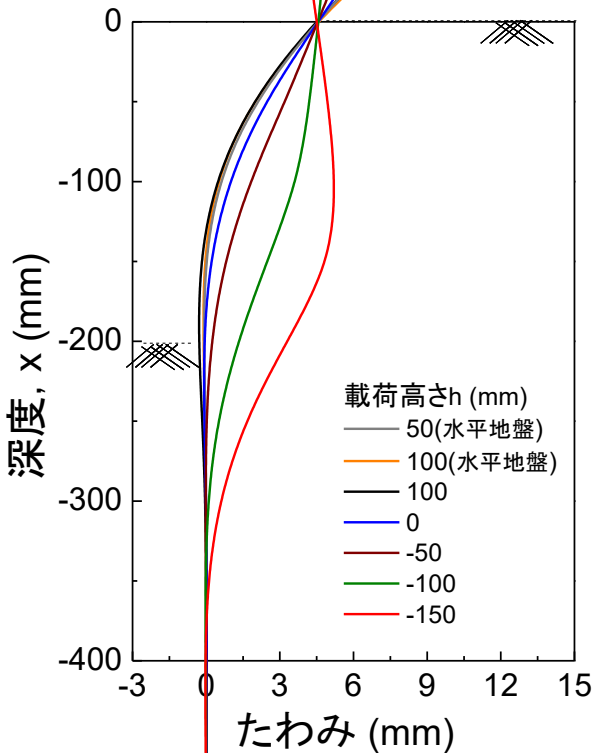


- ✓ 地盤反力係数は深度方向に変化するが、浅い区間では概ね一定とみなせる。
- ✓ 水平力の载荷位置が地表面よりも高い場合はあまり違いがみられないが、**地表面よりも深い場合には地盤の浅い区間から地盤反力係数が小さくなる。**

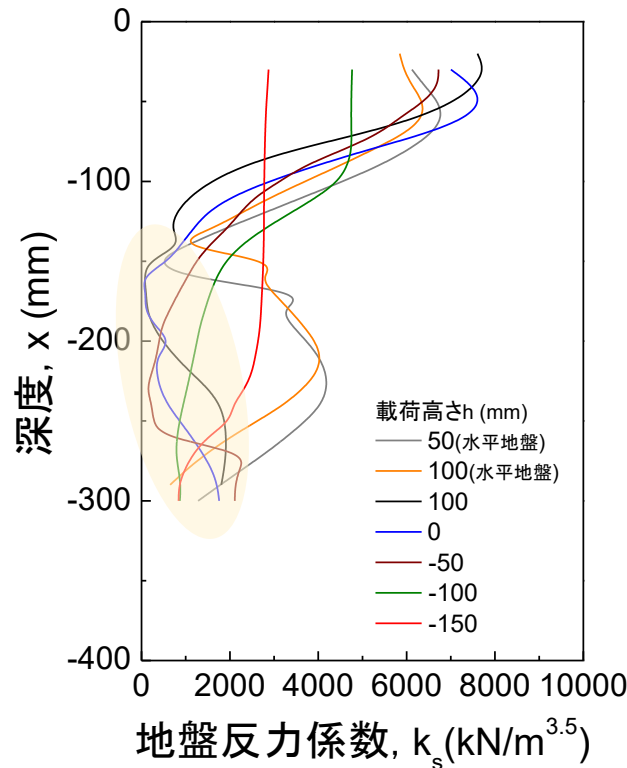
砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ 地盤反力係数の深度分布

➤ 地中部のたわみ



➤ 地盤反力係数の深度分布



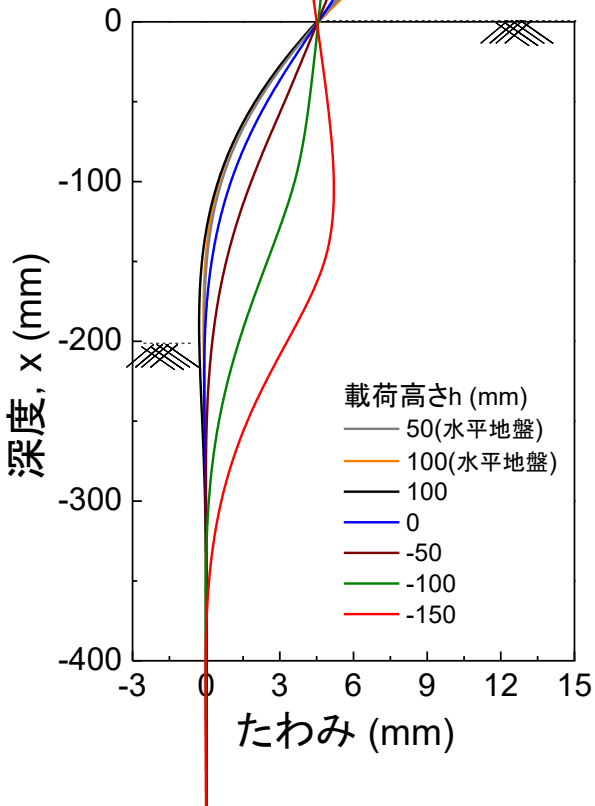
前面側地盤を200mm掘削していることの影響と考えられる。

- ✓ 地盤反力係数は深度方向に変化するが、浅い区間では概ね一定とみなせる。
- ✓ 水平力の载荷位置が地表面よりも高い場合はあまり違いがみられないが、**地表面よりも深い場合には地盤の浅い区間から地盤反力係数が小さくなる。**

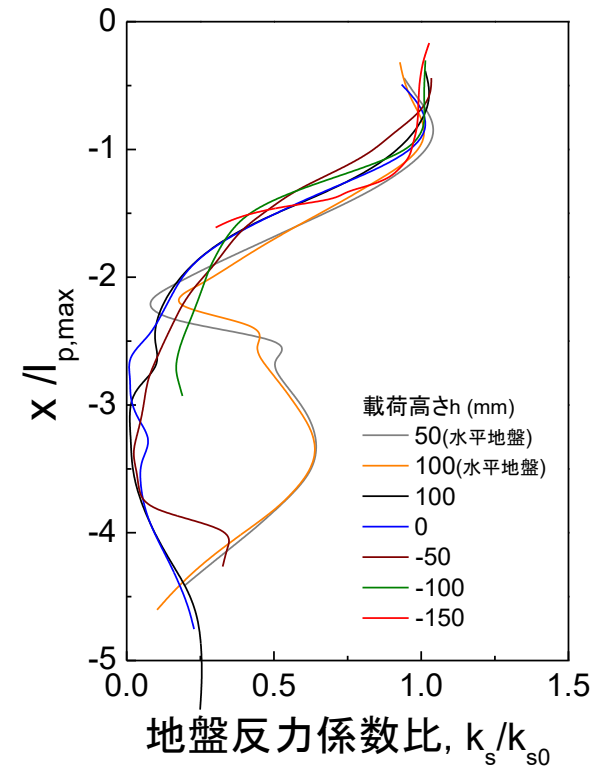
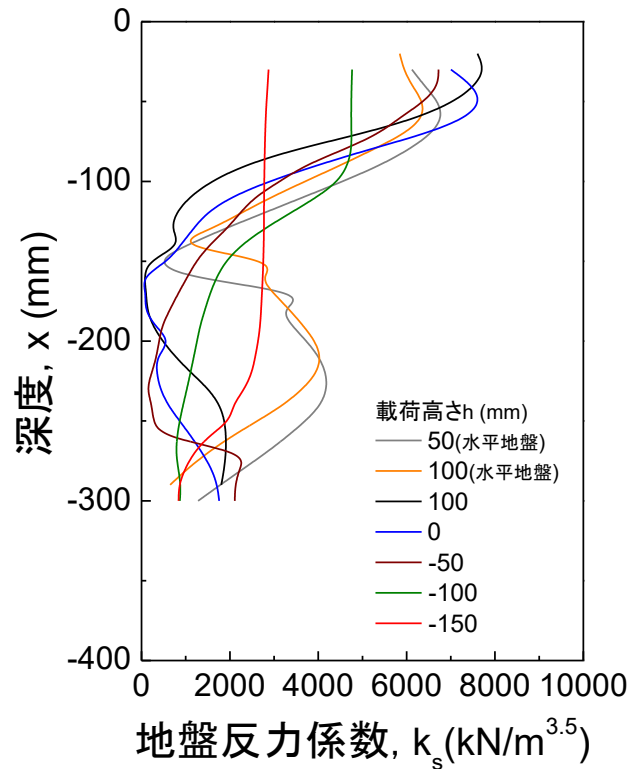
砂地盤中の杭の水平抵抗挙動

➤ 地盤反力係数の深度分布

➤ 地中部のたわみ



➤ 地盤反力係数の深度分布



$l_{p,max}$: 地盤反力が最大となる深度

k_{s0} : 地盤の浅い区間における地盤反力係数の平均的な値

✓ 地盤反力係数の深度分布は, $x / l_{p,max}$ で概ね表現できる.

二次元模型地盤を用いた水平載荷実験

➤ 模型地盤

アルミ丸棒積層体

$\phi 1, 1.5, 3\text{mm} \times \angle 150\text{mm}$

(重量比1:1:1で混合)

➤ 壁体模型

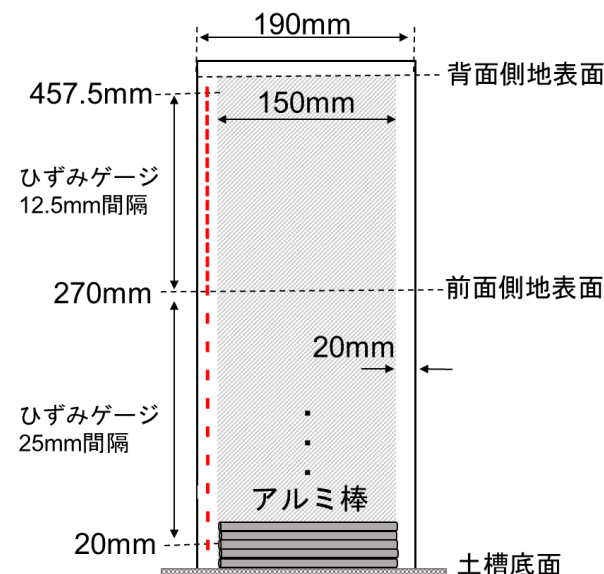
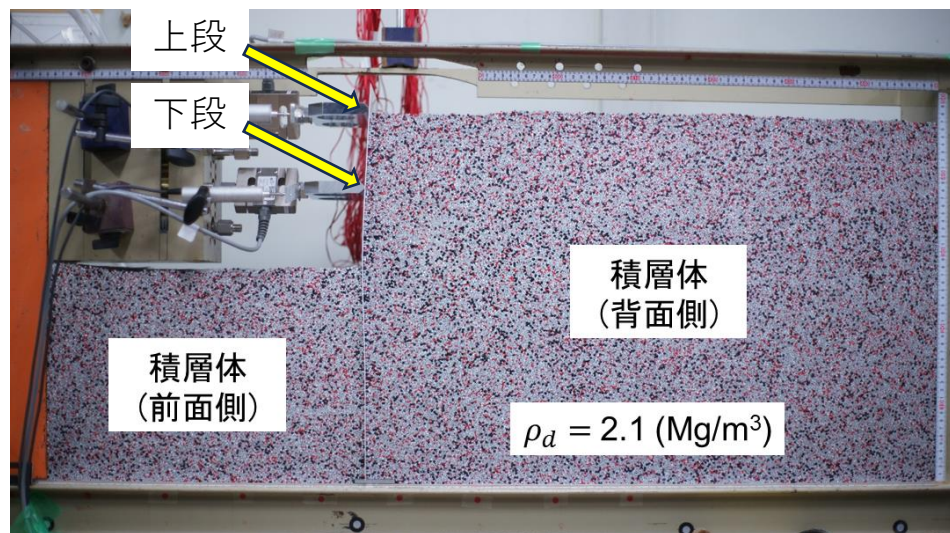
アルミ製の板： $B190\text{mm} \times t1.0\text{mm} \times L500\text{mm}$

$E=7.0 \times 10^4\text{N/mm}^2$

曲げひずみの測定：深度方向に26点×両面

Case1 上段のみの水平載荷

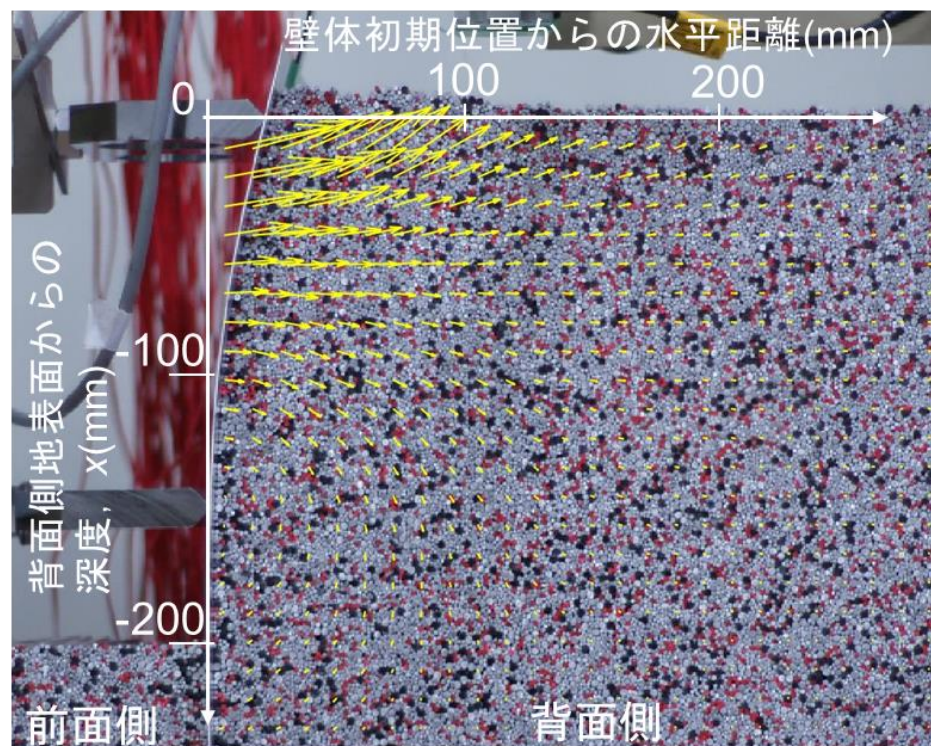
Case2 下段のみの水平載荷



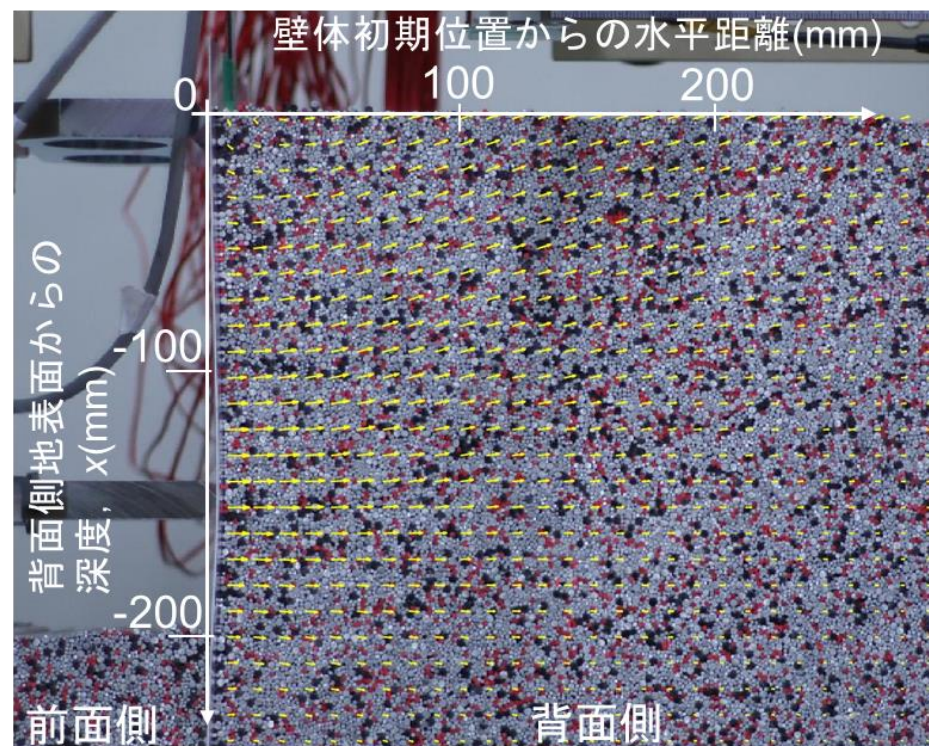
二次元模型地盤を用いた水平載荷実験

- 壁体周辺地盤の変形挙動の解析
- PIVによる変位ベクトル(2倍スケール) (深度-100mmの変位が4mmの時)

Case1



Case2



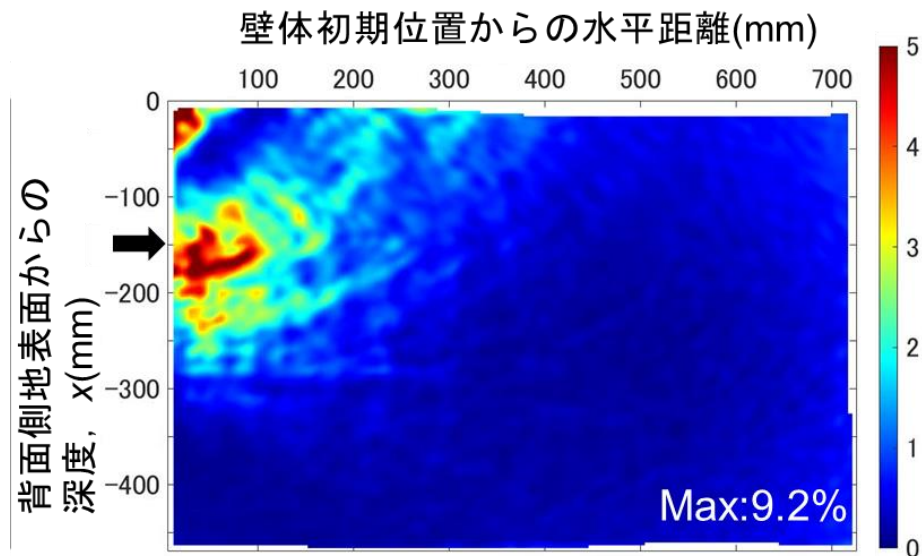
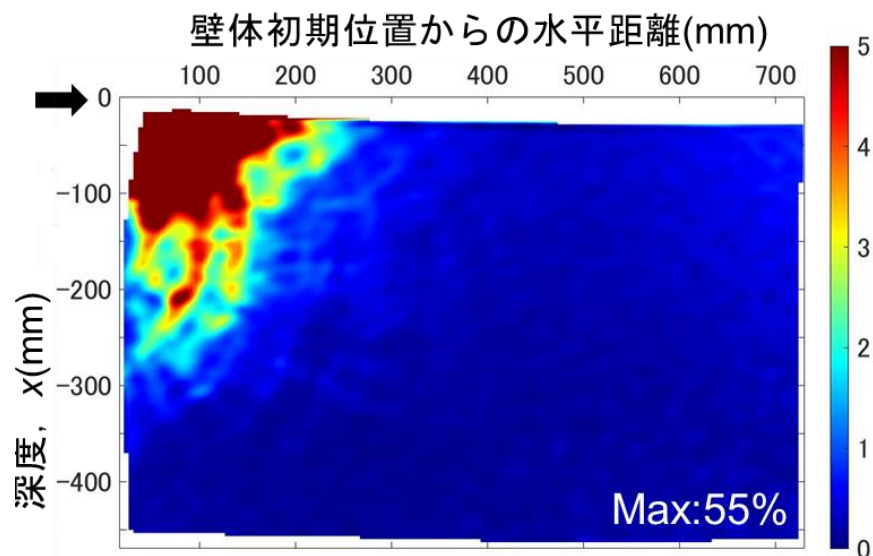
- ✓ 地盤の変位の様子は，壁体の変形によって異なる。
変位量・変位の範囲が異なる他，変位の方に違いがある。

二次元模型地盤を用いた水平載荷実験

- 壁体周辺地盤の変形挙動の解析
- PIVによる最大せん断ひずみ γ_{\max} (%) (深度-100mmの変位が4mmの時)

Case1

Case2

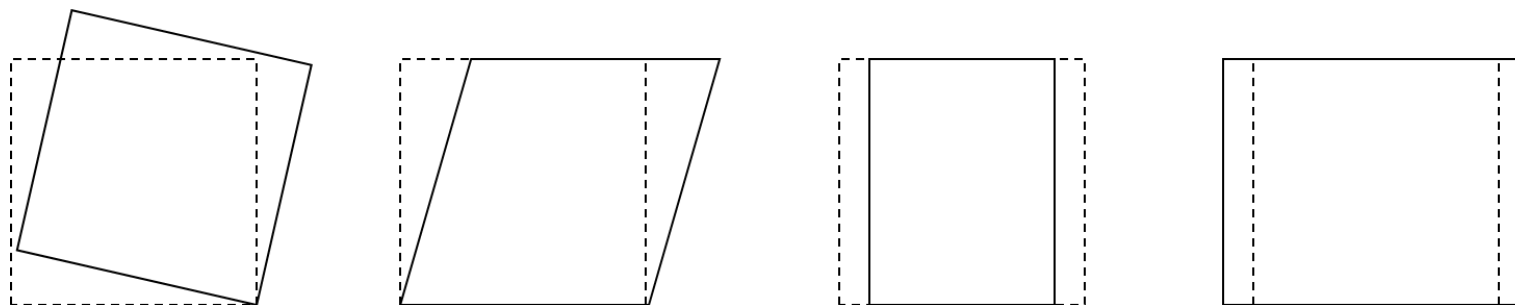


- ✓ Case2ではMax値が小さいが、広い範囲にせん断変形が生じている傾向。
- ✓ 壁体近傍の γ_{\max} は深度方向に複雑に変化。

二次元模型地盤を用いた水平載荷実験

地盤の変形モード

壁体の変形モードの違いによる土要素の変形モードの比較



回転

せん断

圧縮

伸張

$$\delta_s = \gamma_{xy} \times H$$

$$\gamma = \delta_s / y \times 100$$

δ_s :せん断による変位量(mm)

γ_{xy} :せん断ひずみ(%)

H :各要素の高さ(mm)

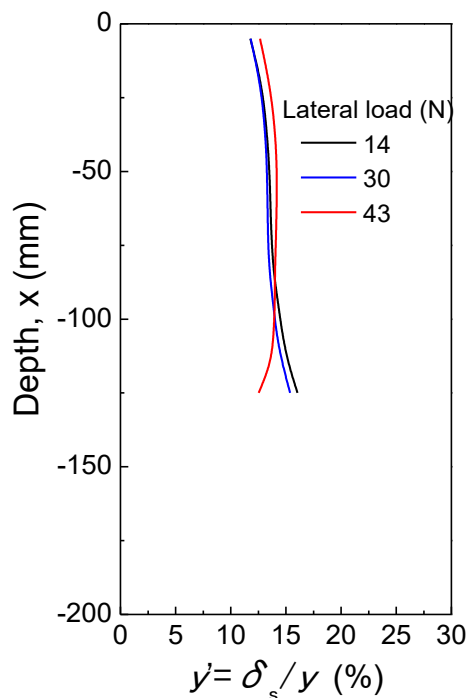
γ :壁体のたわみに含まれるせん断による変位(%)

壁体の水平変位量のうち、地盤のせん断ひずみに起因する水平変位量がどの程度含まれているか？

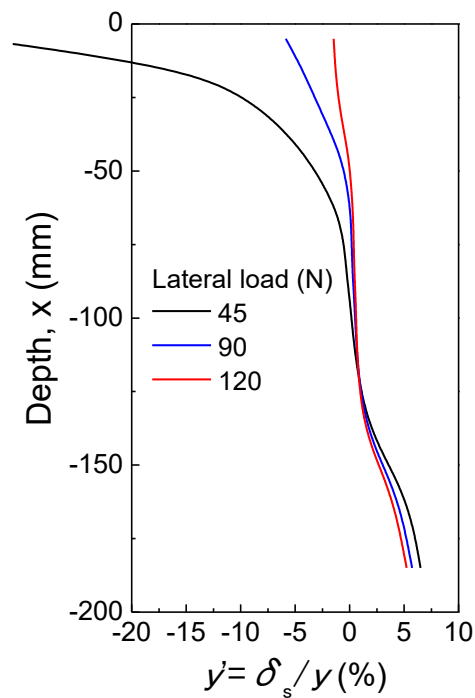
二次元模型地盤を用いた水平載荷実験

地盤の変形モード

Case1



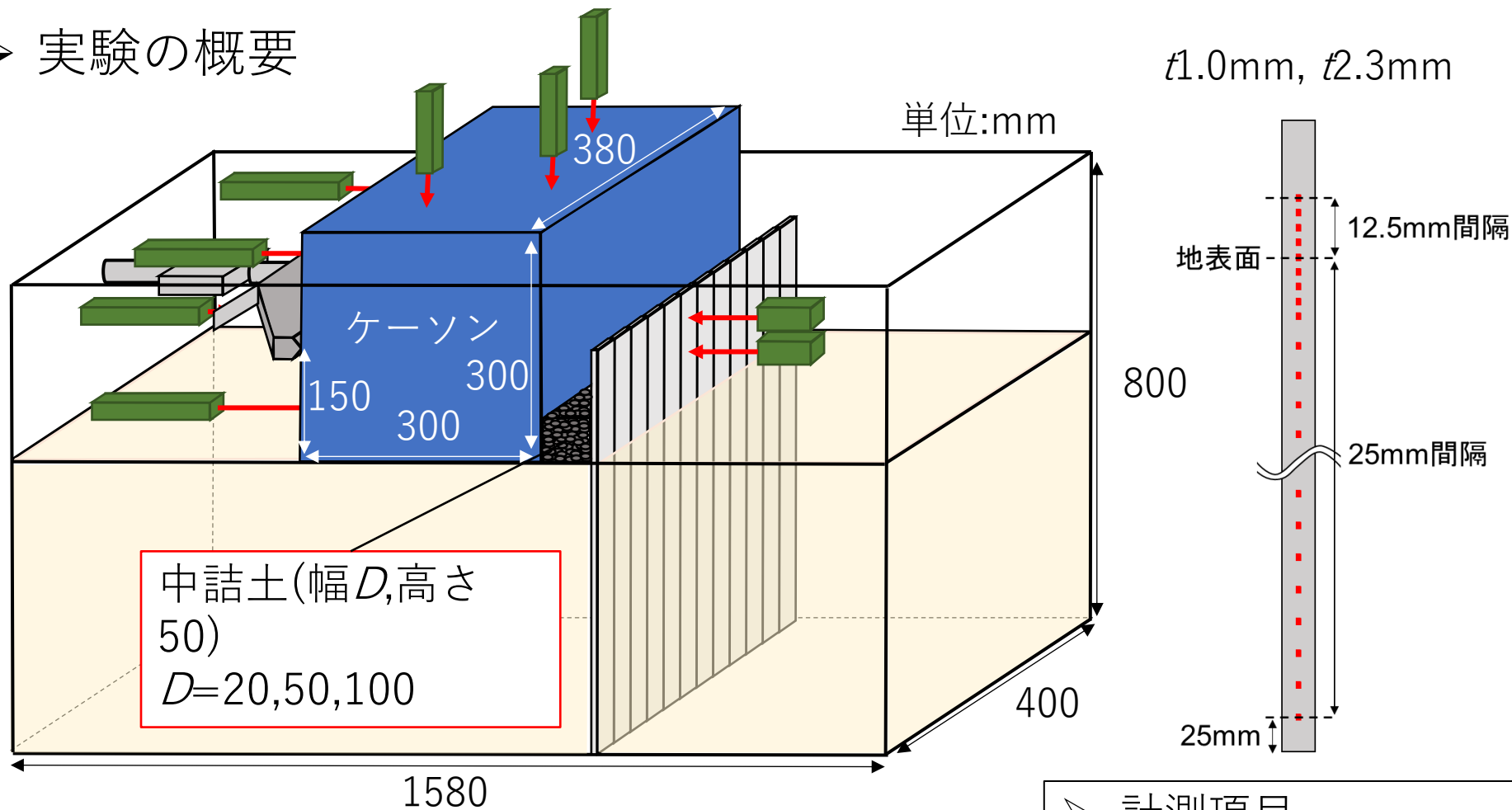
Case2



Case1では y' は15%程度であるが、Case2では-15%程度から5%程度の範囲となっており、深度方向のせん断変形の違いが確認できる。

分布外力を受ける杭の挙動の推定

実験の概要



模型地盤

東北珪砂5号(気乾状態)

$\rho_s = 2.65 (\text{Mg}/\text{m}^3)$

$D_{50} = 0.548 (\text{mm})$

中詰土

玉砂利

$D_{50} = \text{約} 10 (\text{mm})$

計測項目

載荷荷重・変位

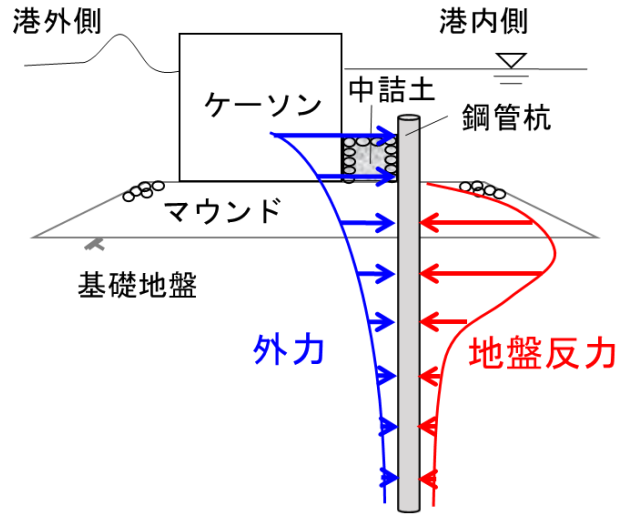
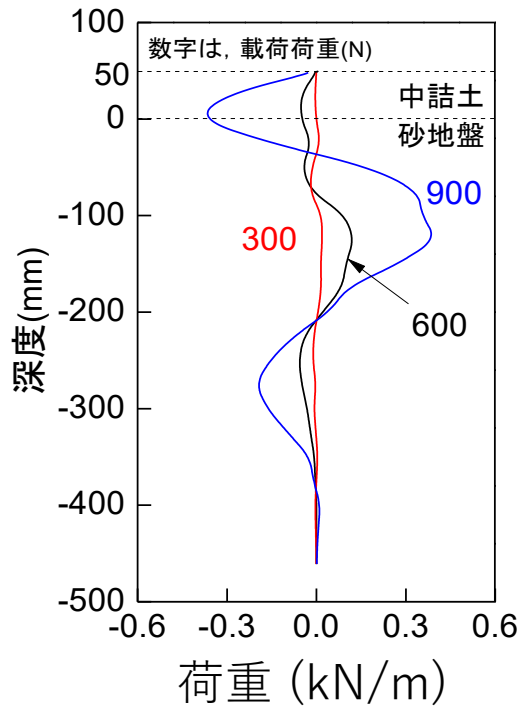
ケーソンの変位

杭の曲げひずみ

地盤の挙動

分布外力を受ける杭の挙動の推定

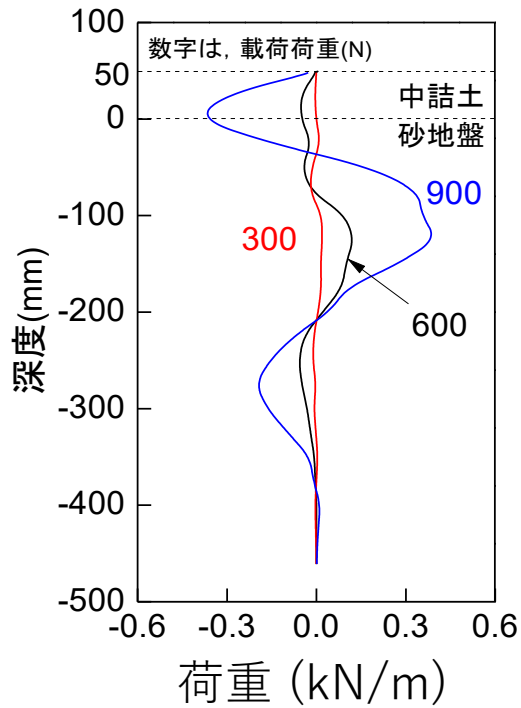
□ 外力の推定手法 中詰土幅 $D=50\text{mm}$ (支持力安全率の大きい条件)



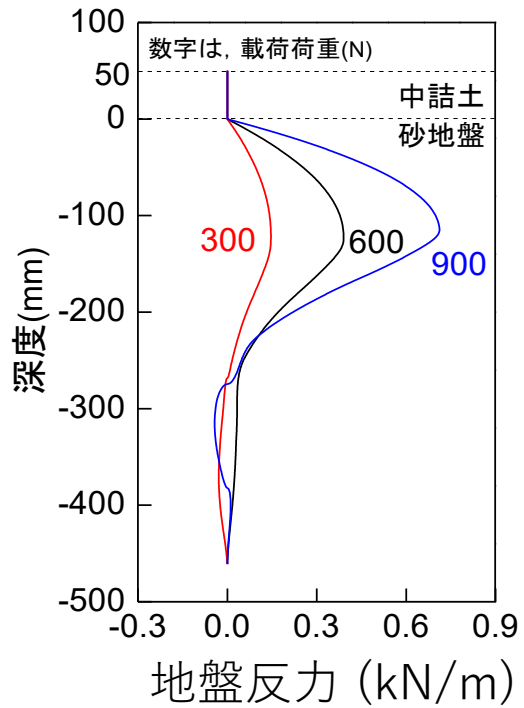
曲げモーメントの2階微分

分布外力を受ける杭の挙動の推定

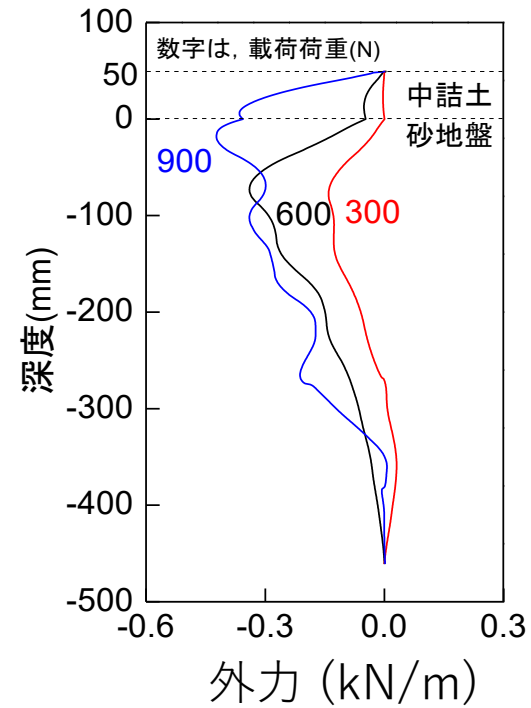
□ 外力の推定手法 中詰土幅 $D=50\text{mm}$ (支持力安全率の大きい条件)



曲げモーメントの2階微分



杭の挙動に基づいて、
地盤反力係数を修正して算出(次スライド)

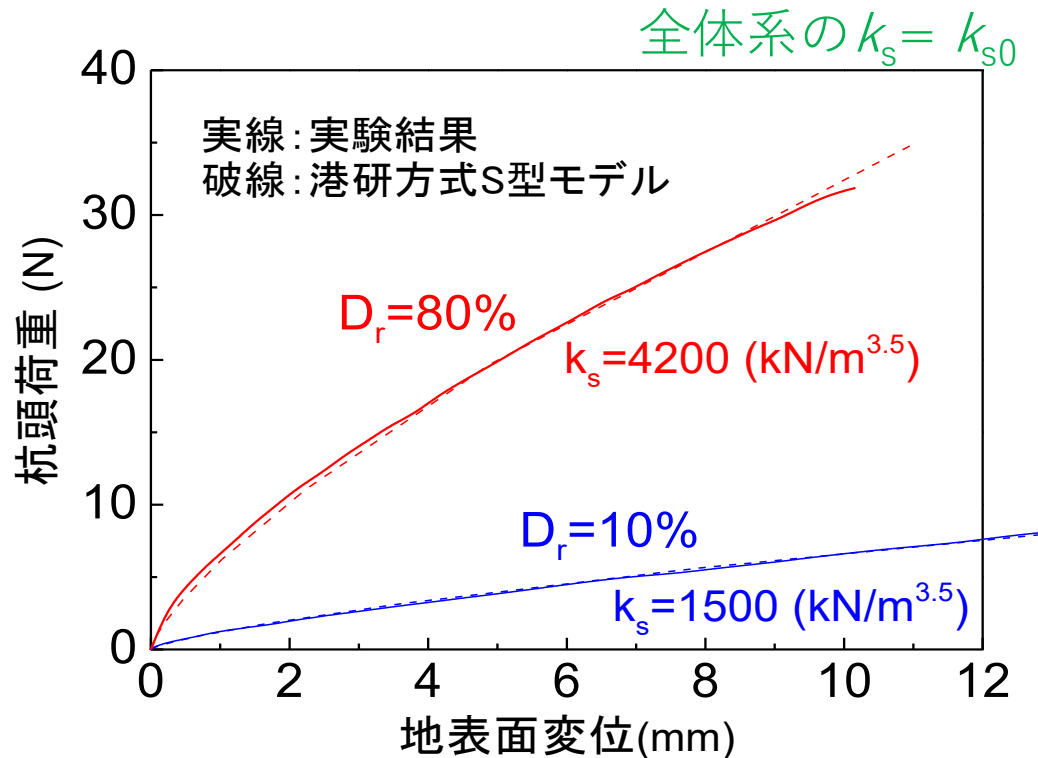


分布外力を受ける杭の挙動の推定

□ 地盤特性の確認

- ・ 載荷高さ50mmの水平載荷実験(水平地盤)
- ・ 杭と地盤の条件は第3章(防波堤の実験)と同様

➤ 杭頭荷重- 地表面変位の関係

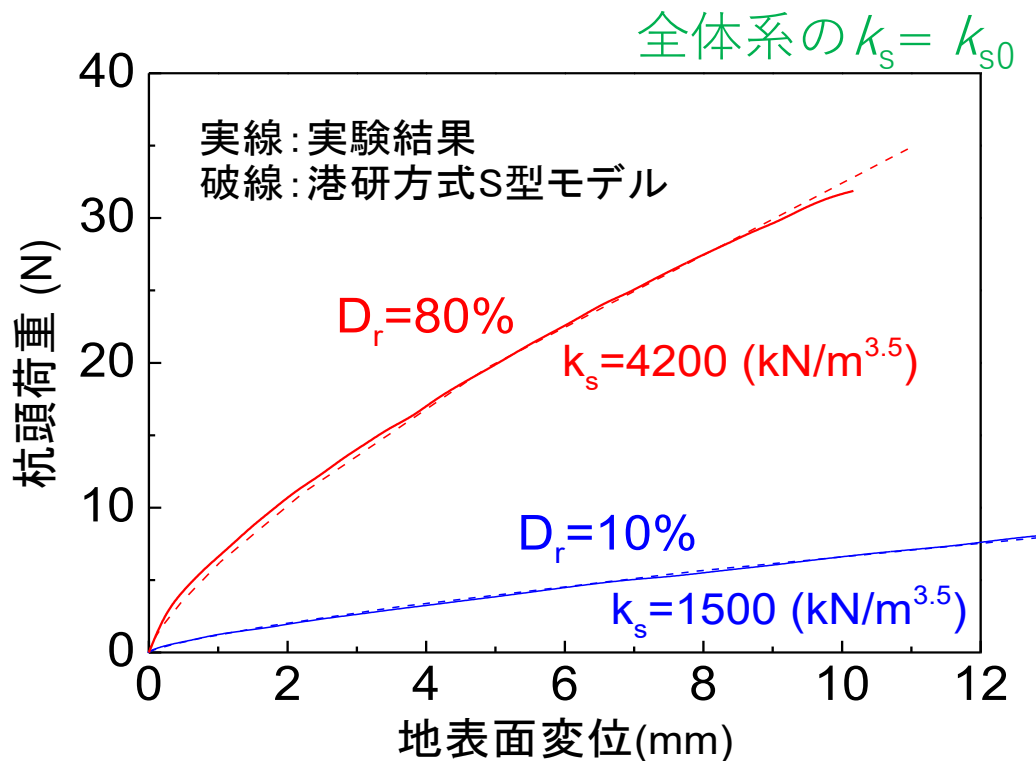


分布外力を受ける杭の挙動の推定

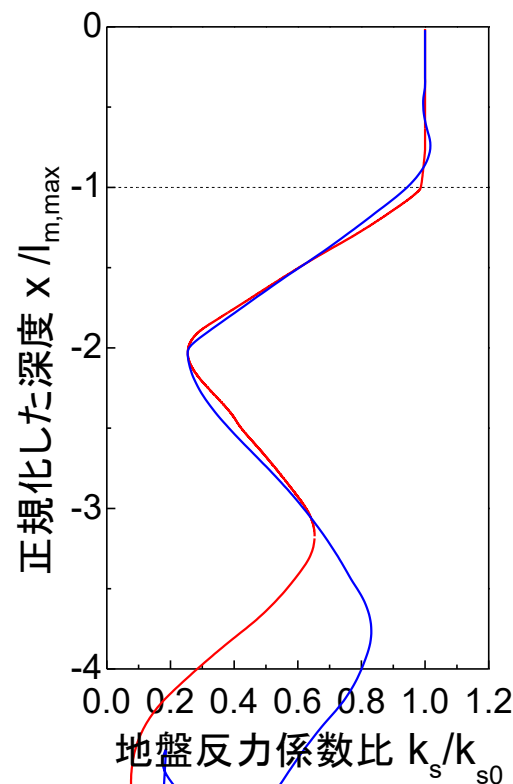
□ 地盤特性の確認

- ・ 載荷高さ50mmの水平載荷実験(水平地盤)
- ・ 杭と地盤の条件は第3章(防波堤の実験)と同様

➤ 杭頭荷重- 地表面変位の関係

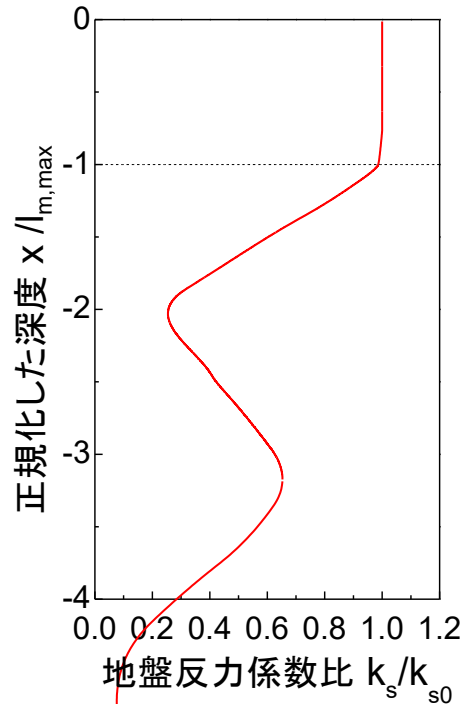
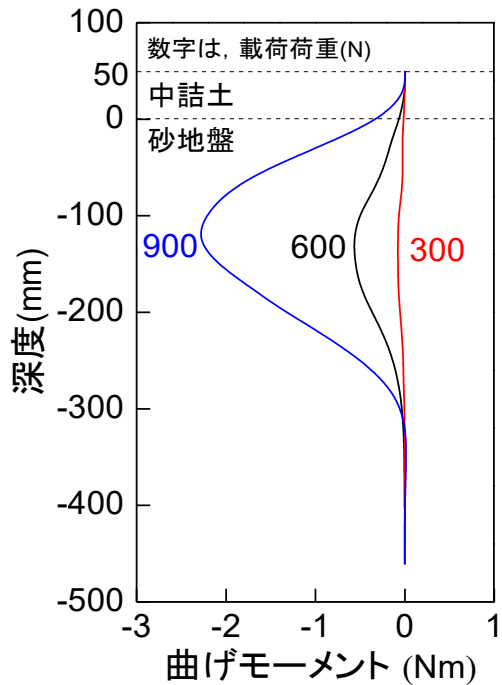


➤ 地盤反力係数の深度分布

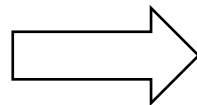


分布外力を受ける杭の挙動の推定

□ 外力の推定手法 中詰土幅 $D=50\text{mm}$ (支持力安全率の大きい条件)



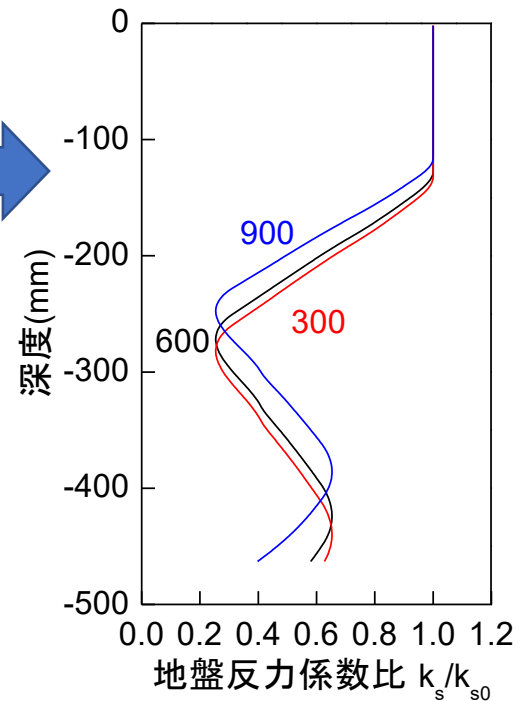
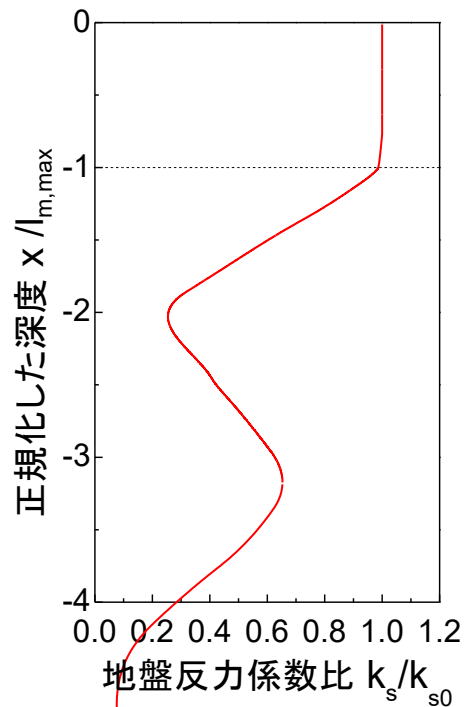
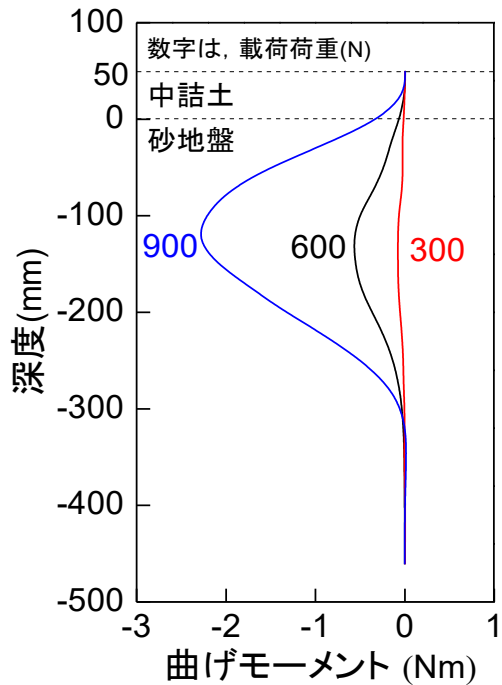
M_{max} の発生深度 $l_{m,max}$ は、荷重レベルで変化する



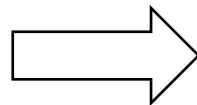
地盤反力係数の深度分布を修正する

分布外力を受ける杭の挙動の推定

□ 外力の推定手法 中詰土幅 $D=50\text{mm}$ (支持力安全率の大きい条件)



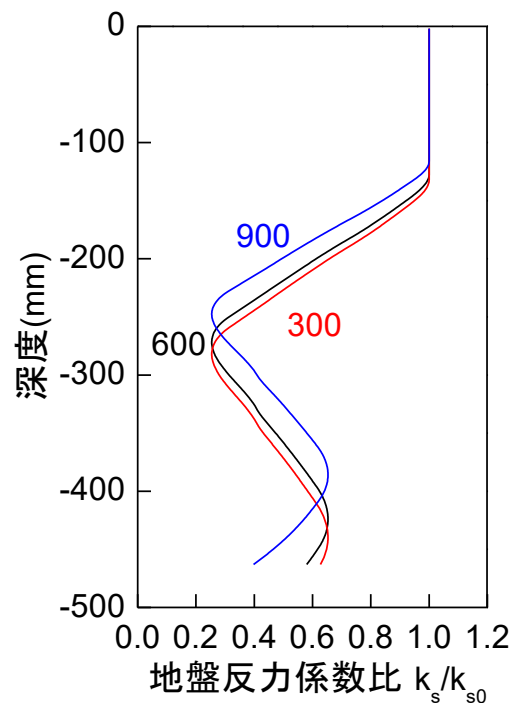
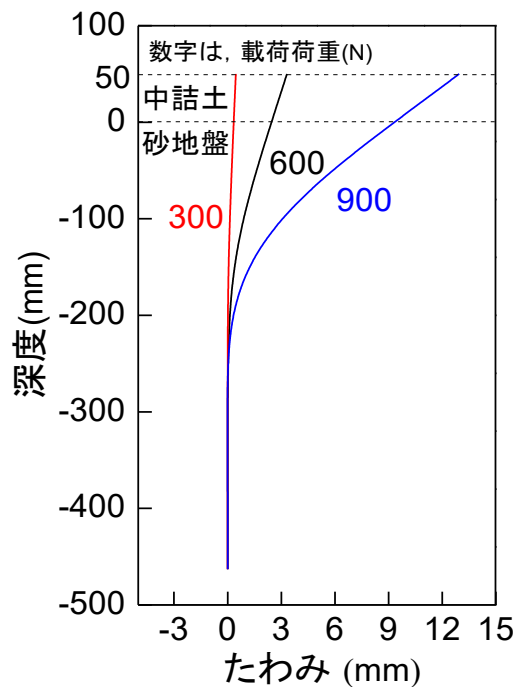
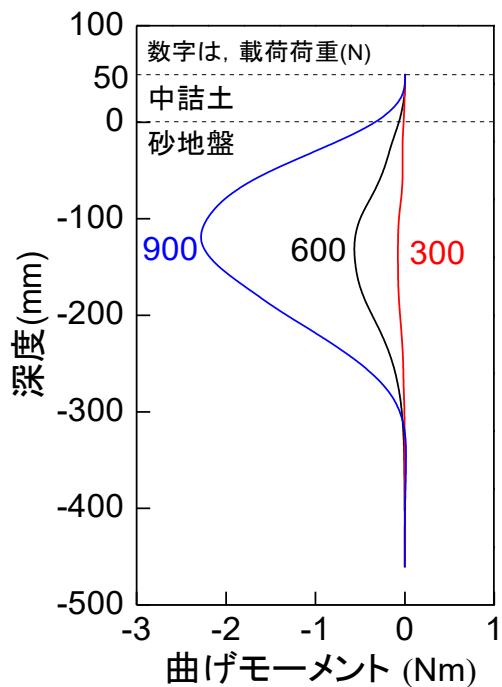
M_{\max} の発生深度 $l_{m,\max}$ は、荷重レベルで変化する



地盤反力係数の深度分布を修正する

分布外力を受ける杭の挙動の推定

□ 外力の推定手法 中詰土幅 $D=50\text{mm}$ (支持力安全率の大きい条件)



M_{\max} の発生深度 $l_{m,\max}$ は、荷重レベルで変化する

$$p = k_s \cdot x \cdot y^{0.5}$$

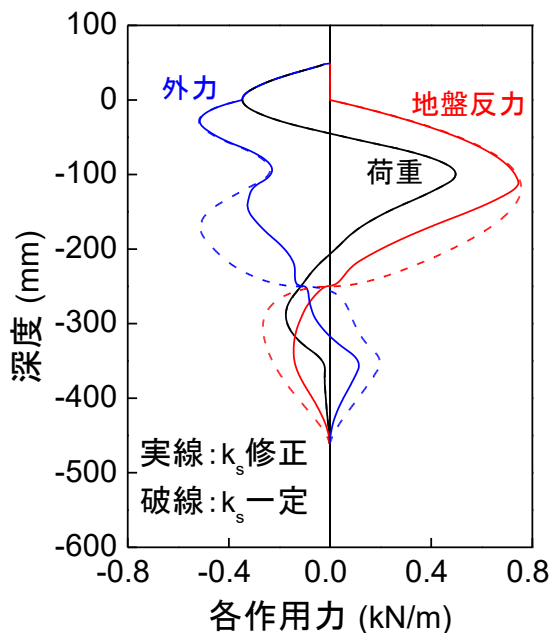
※ k_{s0} をどの値で取り替えるかが課題

本研究では、杭頭水平載荷実験における全体系の k_s を使用した。

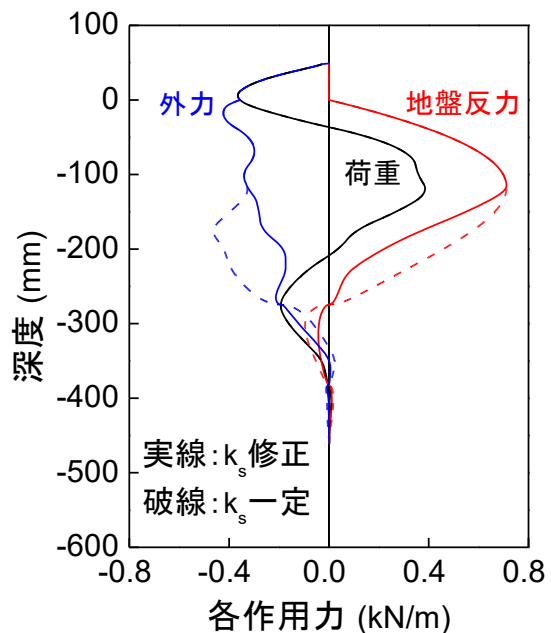
分布外力を受ける杭の挙動の推定

支持力安全率の大きい条件 載荷荷重=900N時の比較

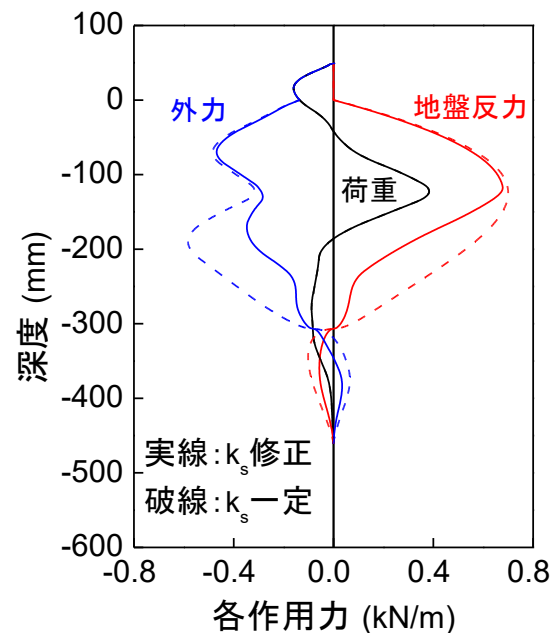
D20mm



D50mm



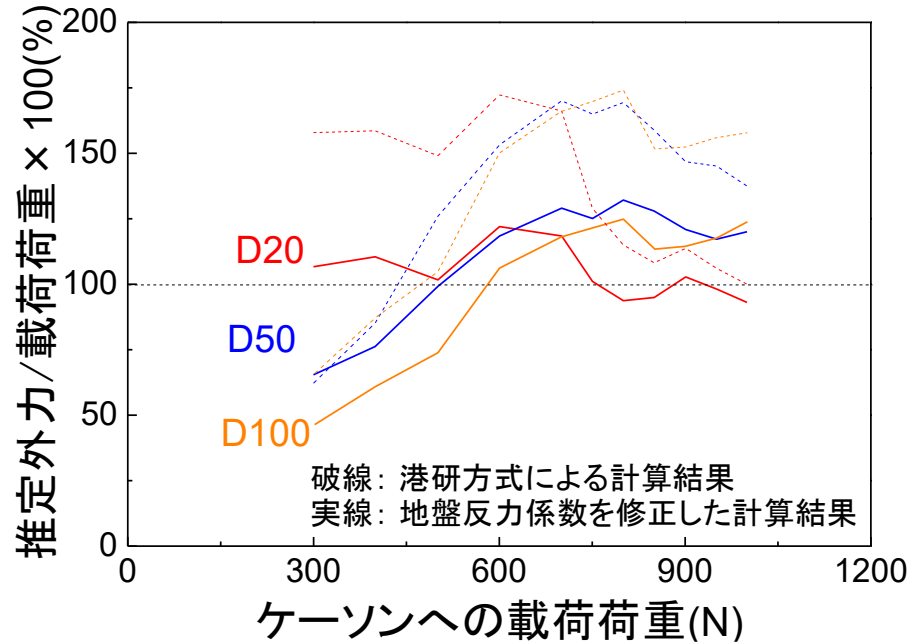
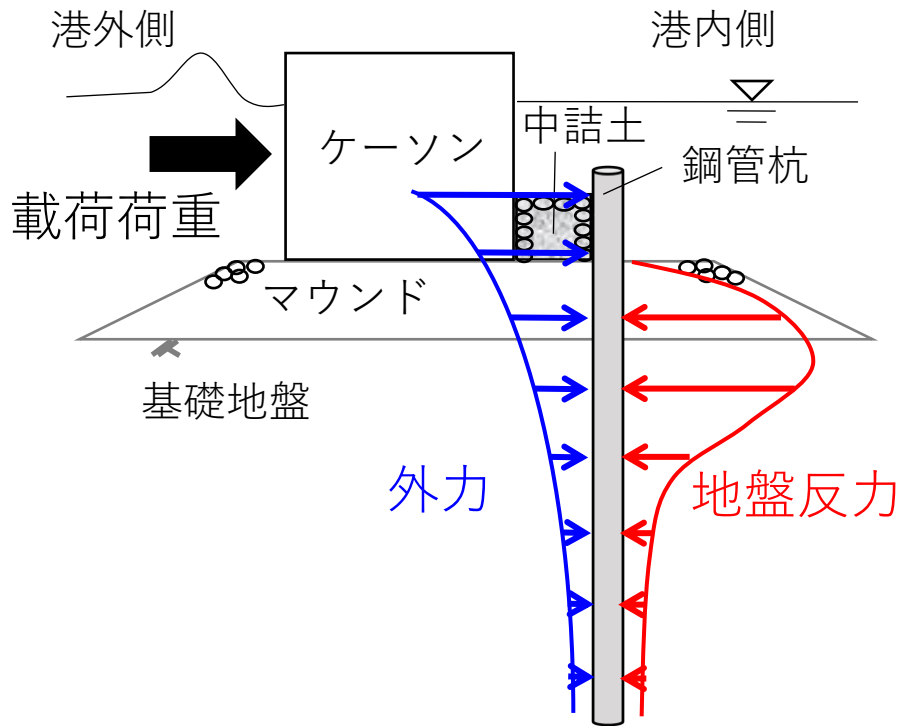
D100mm



- ✓ 中詰土の幅が狭い方が，中詰土部分から押される傾向が強い。
- ✓ 地盤反力係数を修正しない場合，深い区間の各作用力を過大に評価していると考えられる。

分布外力を受ける杭の挙動の推定

➤ 推定した外力の妥当性の検討



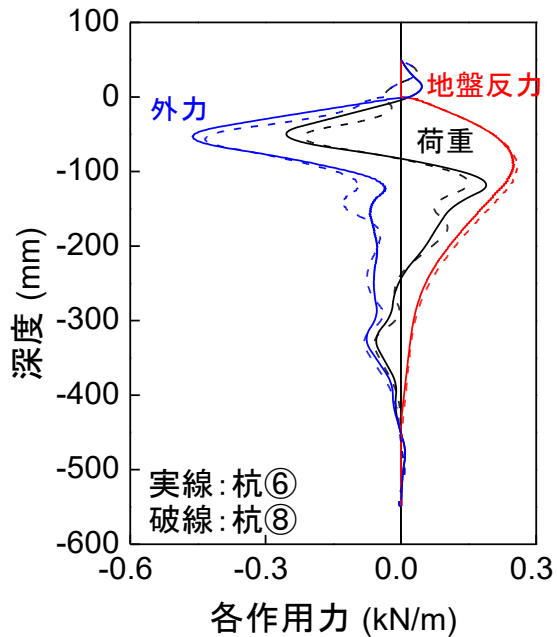
- ◆ 推定外力の合力は、中央の杭に作用する外力の合力を杭の本数倍したものの。
- ◆ 土槽壁面摩擦力を考慮した計算結果

✓ 地盤反力係数の深度分布を修正することで、載荷荷重と推定外力の比は、最大で20%程度の違いとなる。

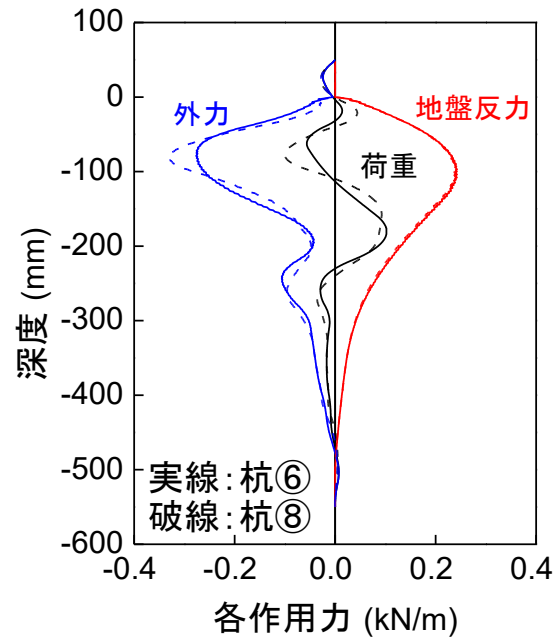
分布外力を受ける杭の挙動の推定

支持力安全率の小さい条件 載荷荷重=600N時の比較

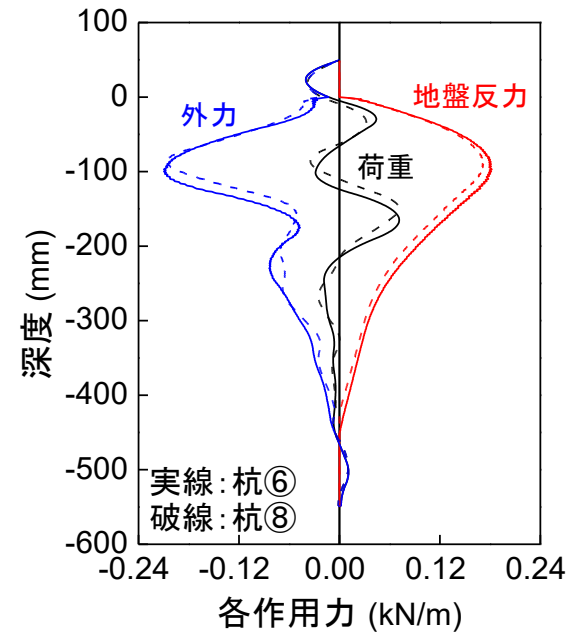
D20mm



D50mm



D100mm

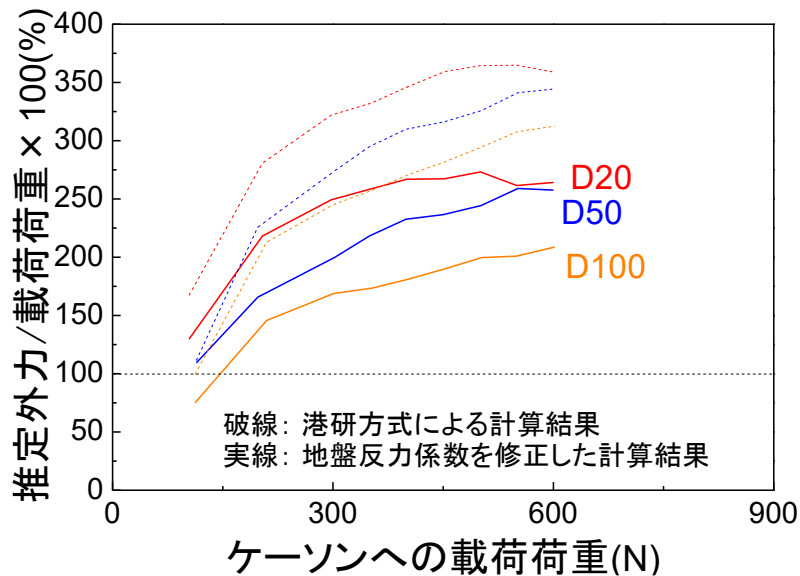


- ✓ 中詰土部分で外力が作用していない。
- ✓ 中詰土の幅が狭い方が，地盤の浅い区間から大きな外力が作用し，幅が広い場合には深くまで外力が作用する。

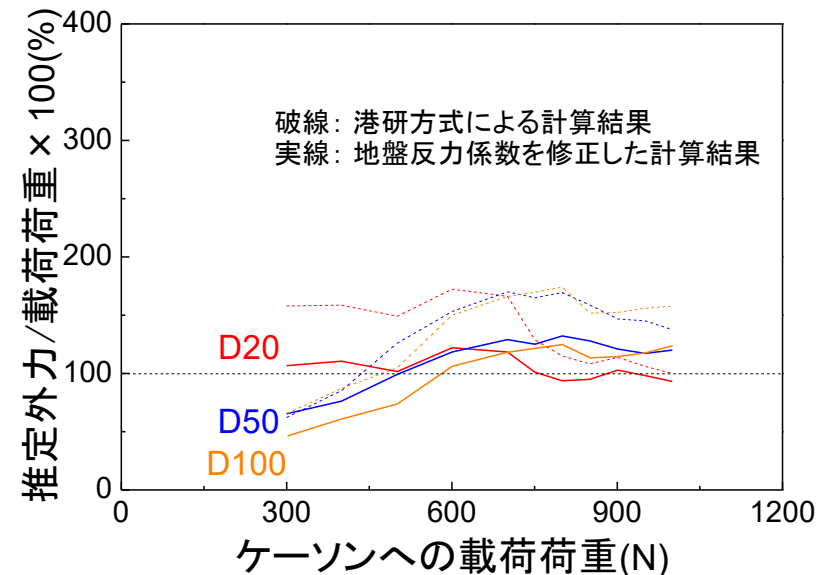
分布外力を受ける杭の挙動の推定

➤ 推定した外力の妥当性の検討 まとめ

支持力安全率の小さい条件



支持力安全率の大きい条件



- ✓ 推定した外力の合力は，地盤反力の表現の仕方に依存する。特に k_{s0} をどのように設定するかが課題である。

ご清聴ありがとうございました。