

2021年8月4日

# 小口径管に作用する管軸直角方向の 地盤拘束力のモデル化



神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

鋤田 泰子

緒方 太郎

大室 秀樹

長谷川 延広

# 研究の背景

---

- 埋設管の地震応答解析において管路と地盤との動的相互作用を説明する地盤ばねの特性は不可欠
  - ・ 高圧ガス指針: 水平引張試験より地盤の降伏を考慮した非線形ばね
  - ・ 水道指針: せん断弾性波速度より算出、降伏状態に関する規定なし→いずれの指針でも地盤ばねの異方性は考慮されていない
- 高圧ガスの試験では300A、600Aが対象。小口径ではない
  
- 米国のライフライン耐震設計基準(ALA)では、断層横断管路のFEM解析において水平方向、鉛直上下の3方向について異なる地盤ばねを規定
  - 水平方向、鉛直上方向: Trautmann, et al (1985)
  - 鉛直下方向: Meyerhof(1955)

# 研究の目的・方法

---

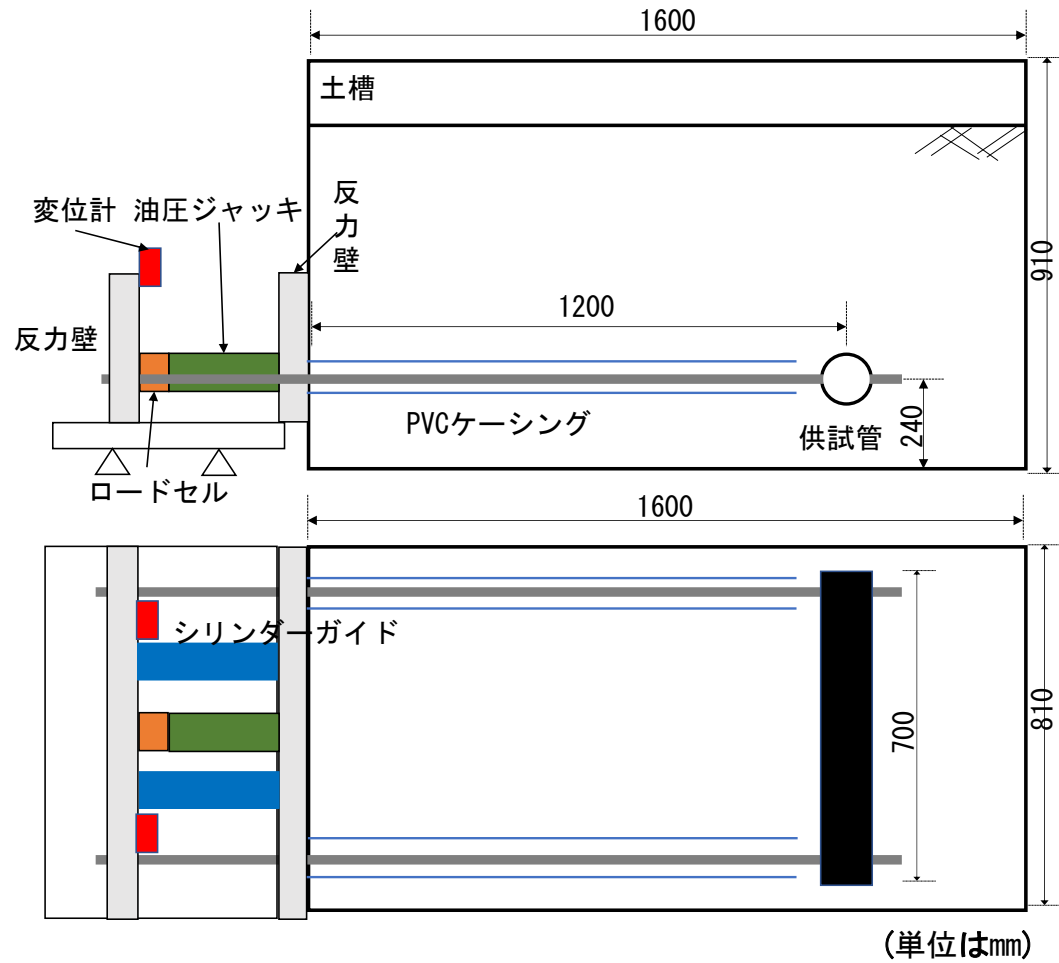
管路に作用する地盤拘束力-変位の関係を明らかにし、それらから地盤ばねの算出方法を提案する



## □ 方法

- ・同一地盤に埋設管を設置し、水平、鉛直上下の3方向に移動させて変位量に対する地盤拘束力を計測する実験を行った
- ・工学的な妥当性を示すため既往の研究との比較を行った
- ・移動方向による地盤拘束力-変位関係の違いを考察した

# 実験装置概要



試験装置 概要



引張装置



供試管設置の様子

# 地盤材料の物理特性

- 使用した地盤材料  
→珪砂8号相当
- 細粒分が2%程度含まれている
- 含水比: 10% (締固め度90%のドライ側)
  
- 砂地盤は600mm程度の層厚ごとに含水比の管理を行い、総重量と締固め後の体積から各層の締固め度を90%以上になるように管理した。
  
- Meyerhofの提案式により相対密度からN値を算出したところ **N=6相当**となった。

地盤材料の物理特性

項目		
土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )		2.67
最大乾燥密度(g/cm <sup>3</sup> )		1.42
粒度分布	砂分(%)	98.01
	細粒分(%)	1.99
	均等係数U <sub>c</sub>	1.5
	曲率係数U <sub>c</sub> '	0.86
	平均粒径D <sub>50</sub> (mm)	0.15
	最大粒径D <sub>100</sub> (mm)	2
粘着力(N/mm <sup>2</sup> )		0.011
内部摩擦角(°)		34
最適含水比(%)		22

Meyerhofの提案式

$$Dr = 208 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 69}}$$

Dr:相対密度(%)

$\sigma'_v$ :有効上載圧(kN/m<sup>2</sup>)

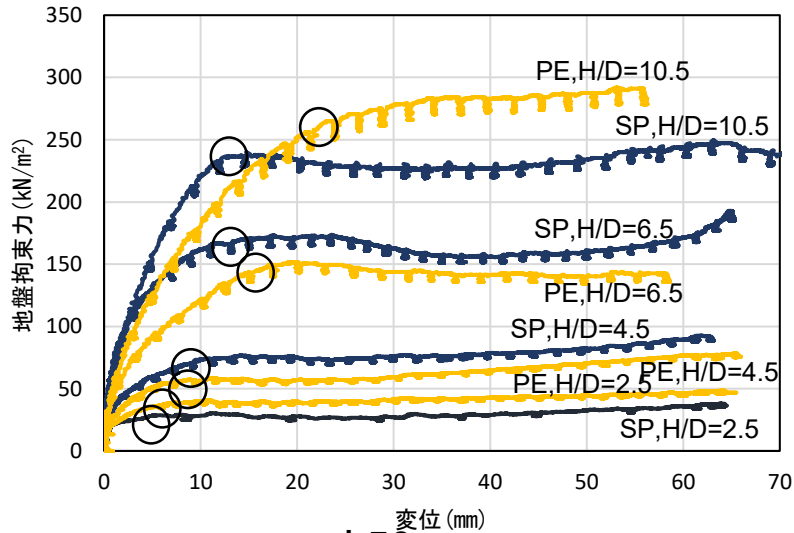
# 実験ケース

引張方向	呼び径	管種	土被りケース
水平	Φ50	SP	2D, 4D, 6D, 10D*
水平	Φ100	SP	2D, 4D, 6D*
水平	Φ150	SP	2D, 3D, 4D*
水平	Φ50	PE	2D, 4D, 6D, 10D*
水平	Φ100	PE	2D, 4D, 6D*
水平	Φ150	PE	2D, 3D, 4D*
鉛直上	Φ50	SP	2D, 4D, 6D, 8D
鉛直上	Φ100	SP	2D, 3D, 4D
鉛直上	Φ150	SP	2D, 2.5D
鉛直上	Φ50	PE	2D, 4D, 6D, 8D
鉛直上	Φ100	PE	2D, 3D, 4D
鉛直上	Φ150	PE	2D
鉛直下	Φ50	SP	1D
鉛直下	Φ100	SP	1D
鉛直下	Φ150	SP	1D
鉛直下	Φ50	PE	1D
鉛直下	Φ100	PE	1D
鉛直下	Φ150	PE	1D

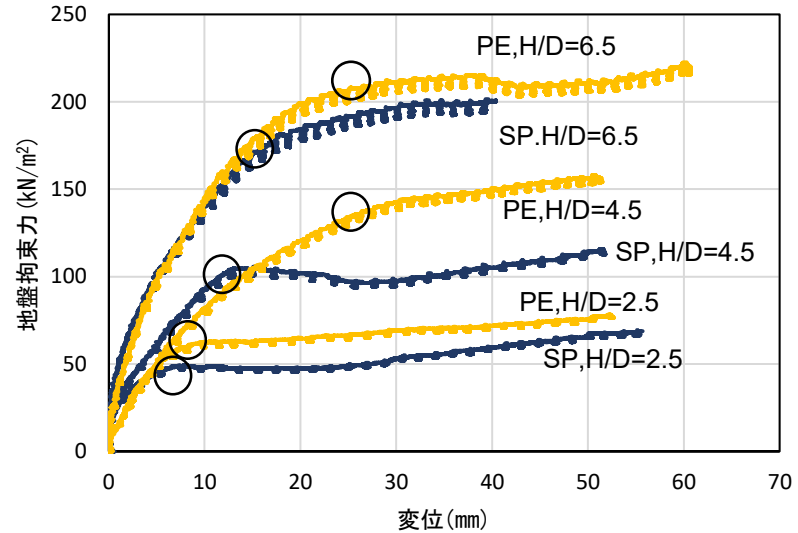
注)\*は上層から2D相当分の地盤は、同重量に換算した土のう袋で載積した

水平引張試験結果

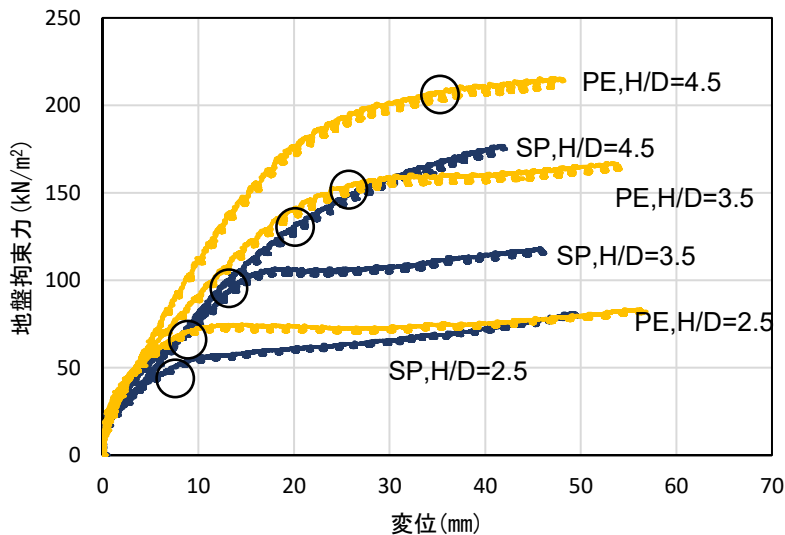
# 地盤拘束力-変位関係



Φ50



Φ100

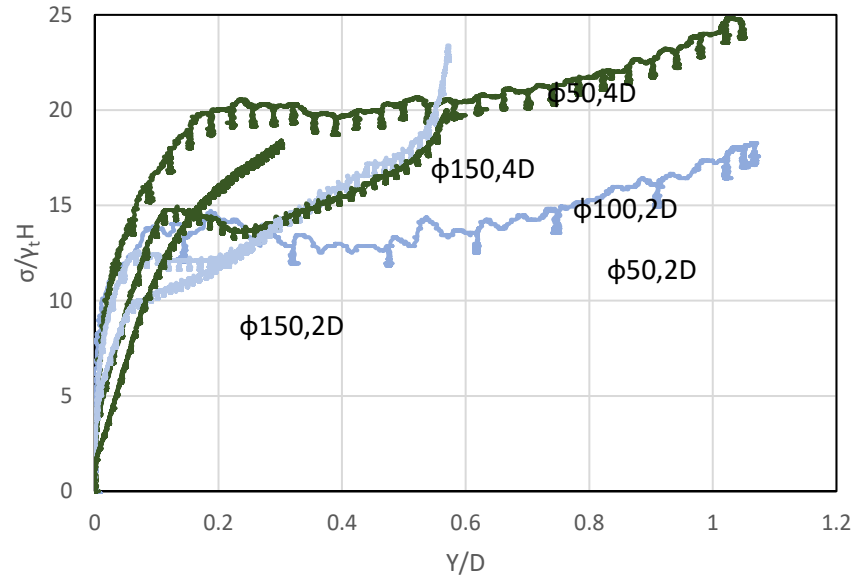


Φ150

— SP    — PE    最大地盤拘束力  
○

- SP, PEほとんど挙動が同じ  
(変形による影響はほとんどない)
- 呼び径が大きい程、最大地盤拘束力  
及びその時の変位は大きくなった
- 土被りが大きい程、地盤拘束力は大きい
- 初期勾配は小口径の方が大きい 7

# 地盤拘束力-変位関係の無次元化



結果の一例として  
SP $\phi 50 \sim \phi 150$ までの  
土被り2D, 4Dのケースを合わせて掲載

## □ 縦軸

管投影面積あたりの地盤拘束力 $\sigma$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )を地盤の単位体積重量( $\text{kN}/\text{m}^3$ )と  
導管中心までの埋設深さ(mm)で除して無次元化

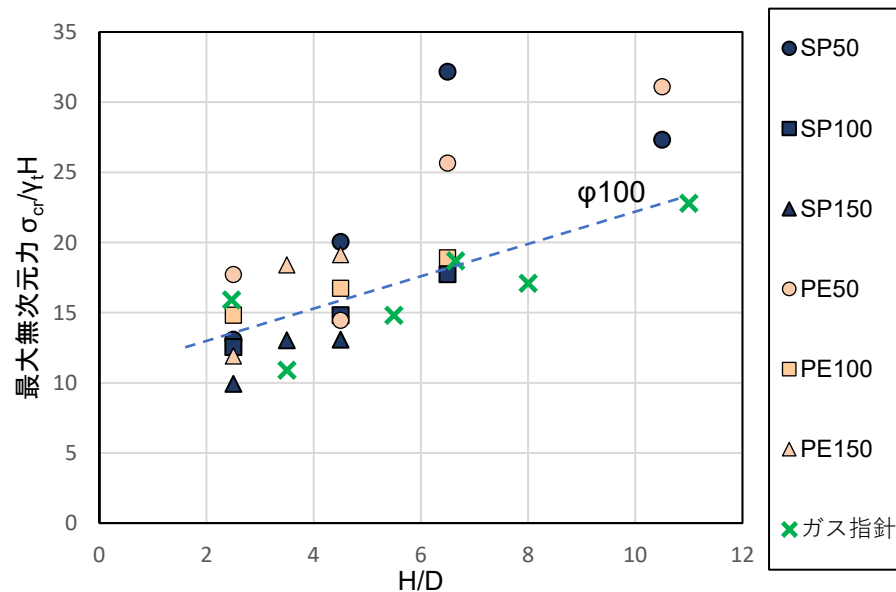
## □ 横軸

埋設管の相対変位 $Y$ (mm)を管の外径 $D$ (mm)で除して無次元化

初期勾配はケースに関わらず一致している



# 最大地盤拘束力の無次元化



・比較のためにガス指針の実験結果も合わせて示している.

・SP $\phi 100$ とPE $\phi 100$ の平均に直線を引いている.

## □ 縦軸

管投影面積あたりの最大地盤拘束力 $\sigma_{cr}$ (kN/m<sup>2</sup>)を地盤の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)と導管中心までの埋設深さ(mm)で除して無次元化

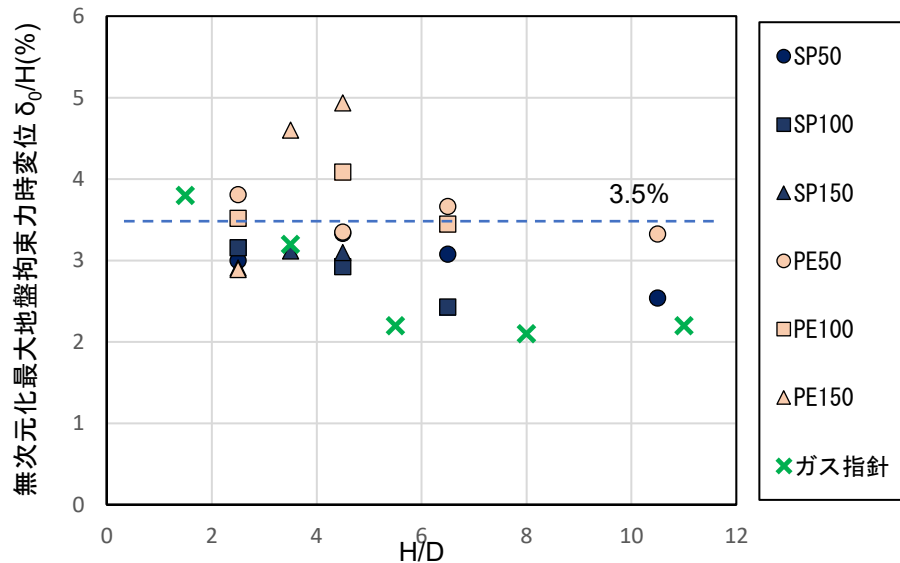
## □ 横軸

導管中心までの埋設深さ(mm)を管の外径で除したものの(mm)

$\phi 100$ ,  $\phi 150$ はガス指針の結果とほとんど一致している

小口径になるほど、無次元化した最大地盤拘束力は大きくなる傾向が確認できた

# 最大地盤拘束力時の変位の無次元化



・比較のためにガス指針の実験結果も合わせて示している.

□ 縦軸

最大地盤拘束力時の変位 $\delta_0$ (mm)を導管中心までの埋設深さ(mm)で除した

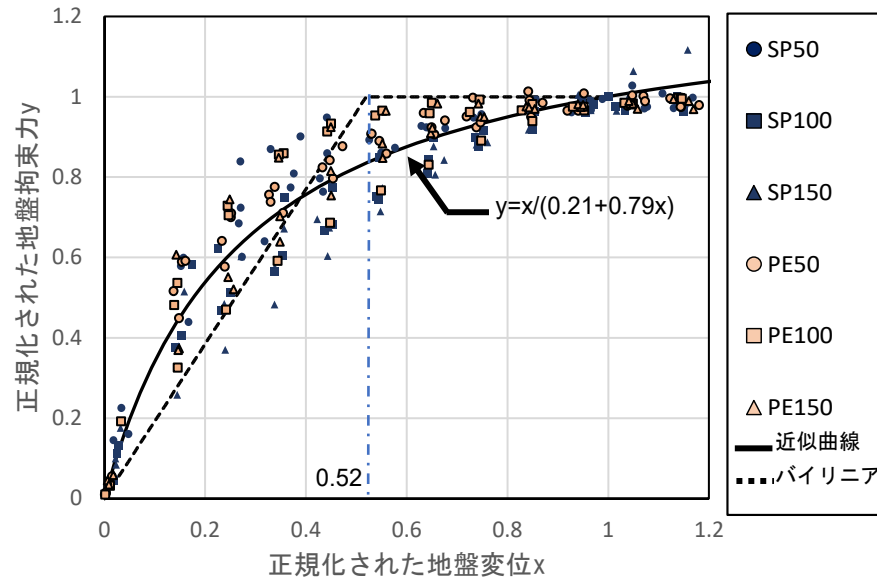
□ 横軸

導管中心までの埋設深さ(mm)を管の外径(mm)で除したもの

H/D=2.5~4.5の $\Phi 50$ と $\Phi 100$ の平均値から、3.5%であると推定した.

Trautmannらは同様の方法で、非常に密な地盤( $\Phi=45^\circ$ 程度)の地盤においては、3%であると推定している.

# 地盤拘束力-変位関係の正規化



$$y = \frac{x}{0.21 + 0.79x}$$

$y = \sigma / \sigma_{cr}$  : 正規化された地盤拘束力

$x = \delta / \delta_0$  : 正規化された地盤変位

$\sigma$  : 地盤拘束力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_{cr}$  : 最大地盤拘束力 (kN/m<sup>2</sup>)

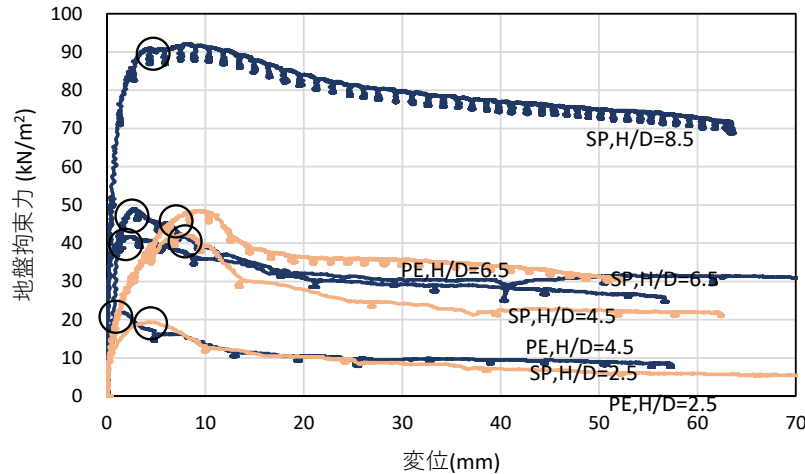
$\delta$  : 地盤変位 (mm)

$\delta_0$  : 最大地盤拘束力を与える地盤変位 (mm)

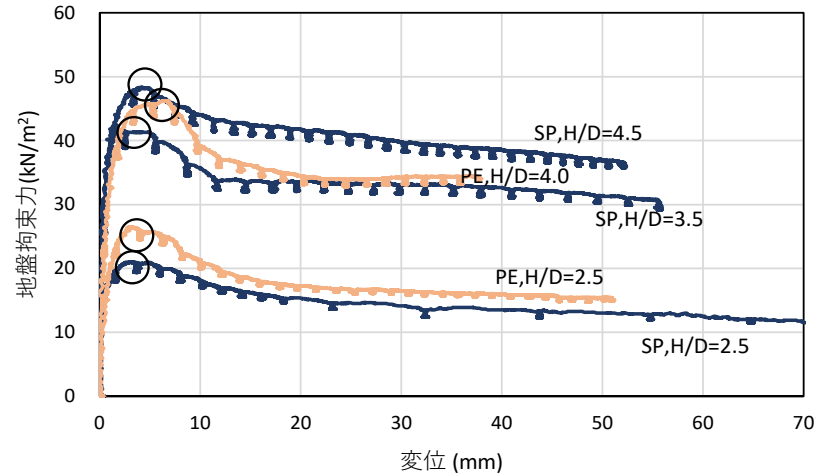
- 地盤拘束力と変位の関係を，最大地盤拘束力とその時の変位で除すことで正規化した。
- 正規化された地盤変位を0.1ピッチごとに平均値をとりプロットしている
- それらの点は概ね双曲線に近似でき，その関係を右上式に示している
- また上記の双曲線と等価なバイリニアを用いた直線により近似した

鉛直上引張試験結果

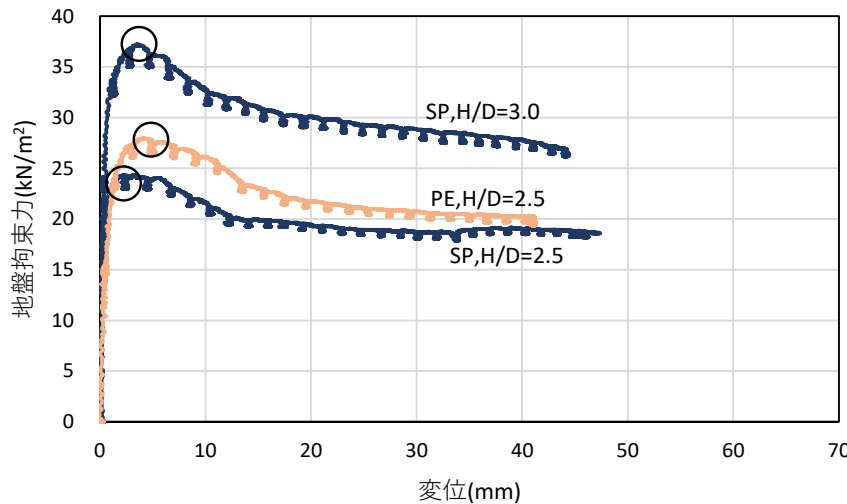
# 地盤拘束力-変位関係



Φ50



Φ100

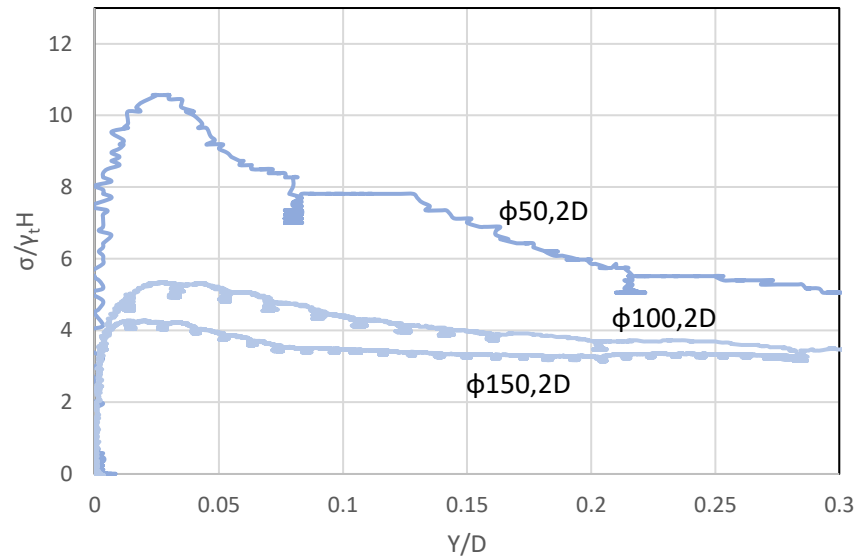


Φ150

— SP    — PE    最大地盤拘束力 ○

- SP, PEほとんど挙動が同じ  
(変形による影響はほとんどない)
- 最大地盤拘束力とその時の変位は、土被りが大きい程大きい
- 水平方向よりも最大地盤拘束力とその時の変位は全体的に小さい

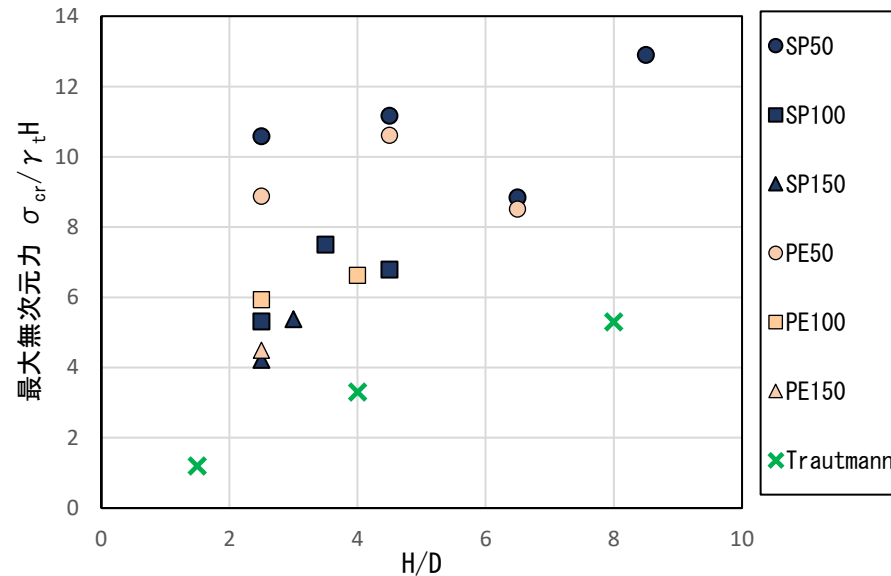
# 地盤拘束力-変位関係の無次元化



結果の一例として  
SPφ50~φ150までの  
土被り2Dのケースを合わせて掲載

- 初期勾配は呼び径に関わらず一致している
- 呼び径が小さいほど、無次元化した地盤拘束力の最大値は大きい
- 水平引張試験より初期勾配は大きい

# 最大地盤拘束力の無次元化

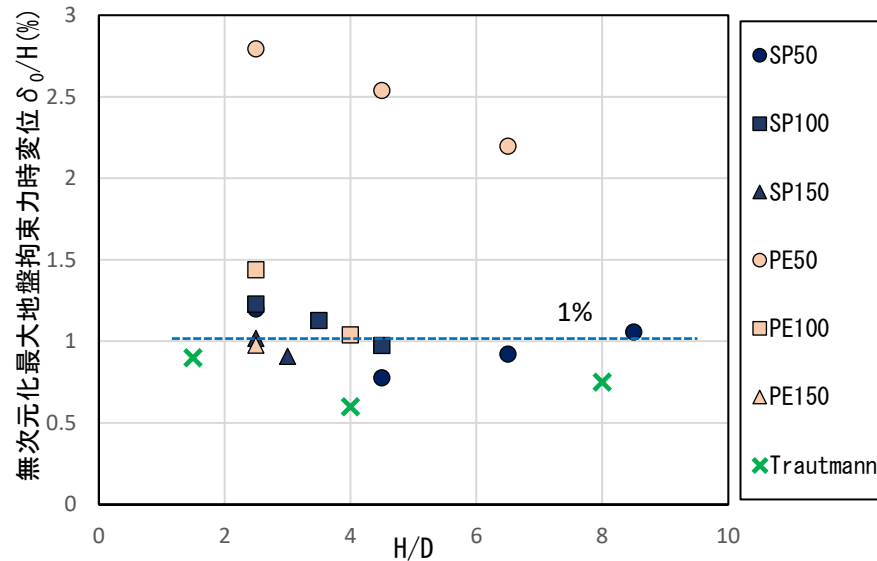


・比較のためにTraurmannらの同様の  
実験結果も合わせて示している

・SPΦ100とPEΦ100の平均に  
直線を引いている

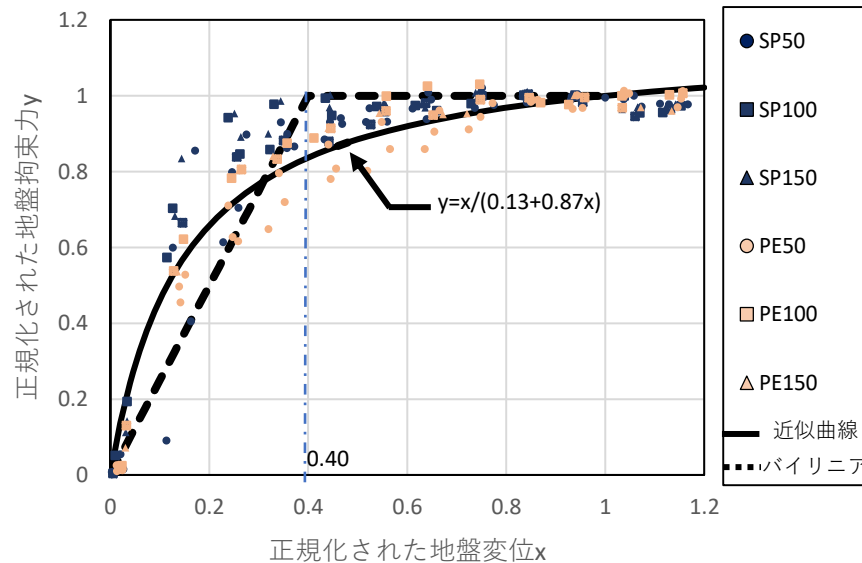
- 管種による大きな違いは見られなかった
- 小口径になるほど、無次元化した最大地盤拘束力は大きくなる傾向が確認できた
- 土被りに比例して、増加する傾向が見られた
- 水平方向(10-30)よりも小さい値(4-13)が確認できた

# 最大地盤拘束力時の変位の無次元化



- 呼び径, 管種に関わらず0.8%~1.5%程度に推移した
- PE $\Phi$ 50のみ、最大地盤拘束力時の変位が大きくでている(1.2mm程度)のは、管がたわんでいることが原因であると推測される

# 地盤拘束力-変位関係の正規化



$$y = \frac{x}{0.13 + 0.87x}$$

$y = \sigma / \sigma_{cr}$  : 正規化された地盤拘束力

$x = \delta / \delta_0$  : 正規化された地盤変位

$\sigma$  : 地盤拘束力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_{cr}$  : 最大地盤拘束力 (kN/m<sup>2</sup>)

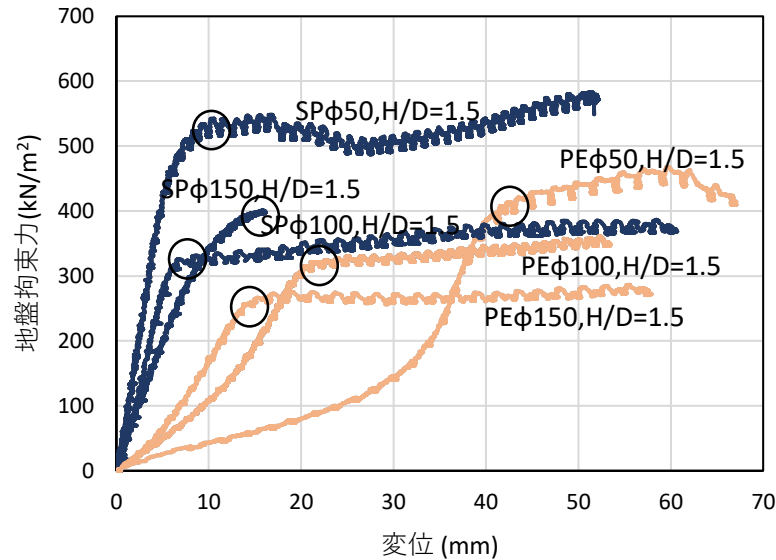
$\delta$  : 地盤変位 (mm)

$\delta_0$  : 最大地盤拘束力を与える地盤変位 (mm)

- 地盤拘束力と変位の関係を，最大地盤拘束力とその時の変位で除すことで正規化した
- 正規化された地盤変位を0.1ピッチごとに平均値をとりプロットしている
- それらの点は概ね双曲線に近似でき，その関係を右上式に示している
- また上記の双曲線と等価なバイリニアを用いた直線により近似した



# 地盤拘束力-変位関係



SP

PE

最大地盤拘束力



・すべて土被り1Dのため、一つの図にまとめて示した

- PEはSPより初期勾配が小さい  
→PE管は変形による影響を受けている
- 水平、鉛直上、鉛直下で最も大きい値がでている
- 小口径管の方が、地盤拘束力は大きい
- 著者らの以前の論文より、土被りにより差異は見られなかった

# まとめ

---

- 地盤拘束力は三方向で異なり、同一変位に対して鉛直下引張試験の時に最も大きくなり、鉛直上引張試験の時に最も小さくなった。
- 最大地盤拘束力時の埋設管の変位 $\delta_0$ は、本実験の対象範囲では土被りや呼び径に依存しない。水平引張の場合は導管中心までの埋設深さの3~5%程度、鉛直上引張では1%前後に推移した。
- 地盤ばね定数は、水平<鉛直上<鉛直下となった。  
(一例として $\phi 50$ の場合、鉛直上は水平の2~3倍程度、鉛直下は9倍程度)
- 同じ土被り厚であっても小口径管になるほど、地盤拘束力及び地盤ばね定数は大きくなる傾向が見られた。