

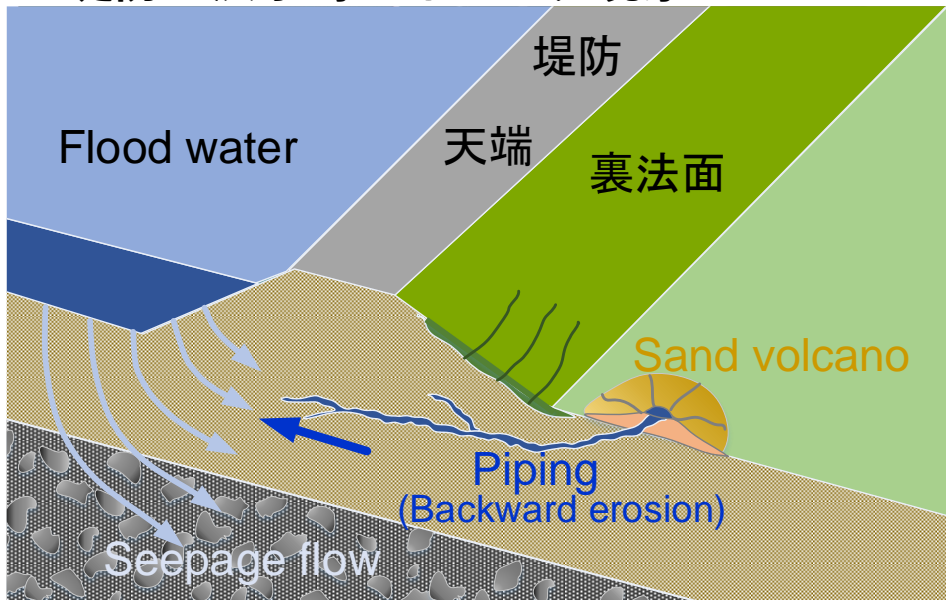
2023年度 河川技術に関するシンポジウム

パイピング模型実験におけるパイプ部の進展 に伴う形状変化の精密測定

井澤良太 愛媛大学大学院理工学研究科
楠部寧々 愛媛大学大学院理工学研究科
岡村未対 愛媛大学大学院理工学研究科

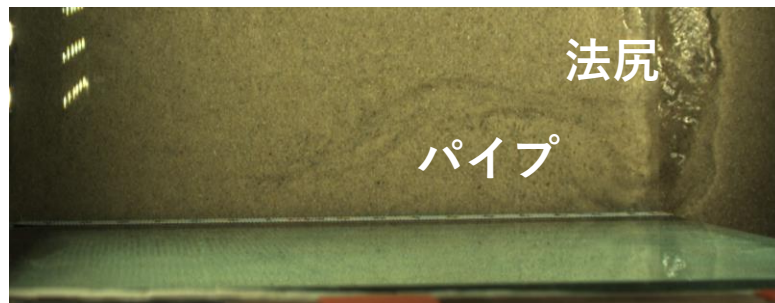
背景

堤防の洪水時パイピング現象

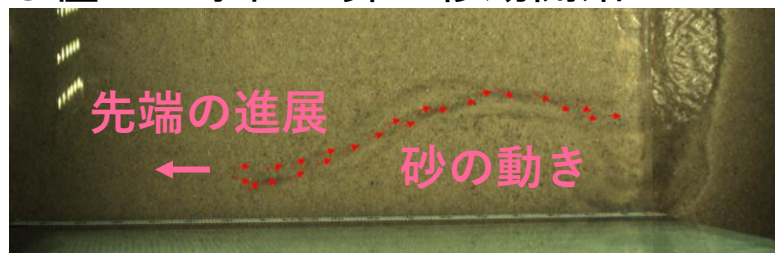


実験でのパイプ内の観察 (楠部ら, 2022)

●移動開始直前



●僅かに水位上昇→移動開始



パイプ全体で同時に動き始め、先端が進展

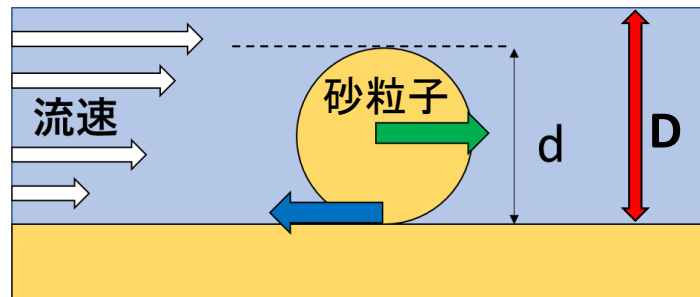
パイプの進展条件≡パイプ内砂粒子の掃流条件

これに基づいたパイピング水位 (H_c/L) 予測法の研究が進んでいる

限界Shields数 $\theta_c = \frac{u_{c*}^2}{G_S'gd} = \frac{D}{4G_S'd} i_p$

u_{c*} : 限界摩擦速度 D : パイプ径 i_p : パイプ内動水勾配
 G_S' : 砂の水中比重 g : 重力加速度 d : 砂の粒径

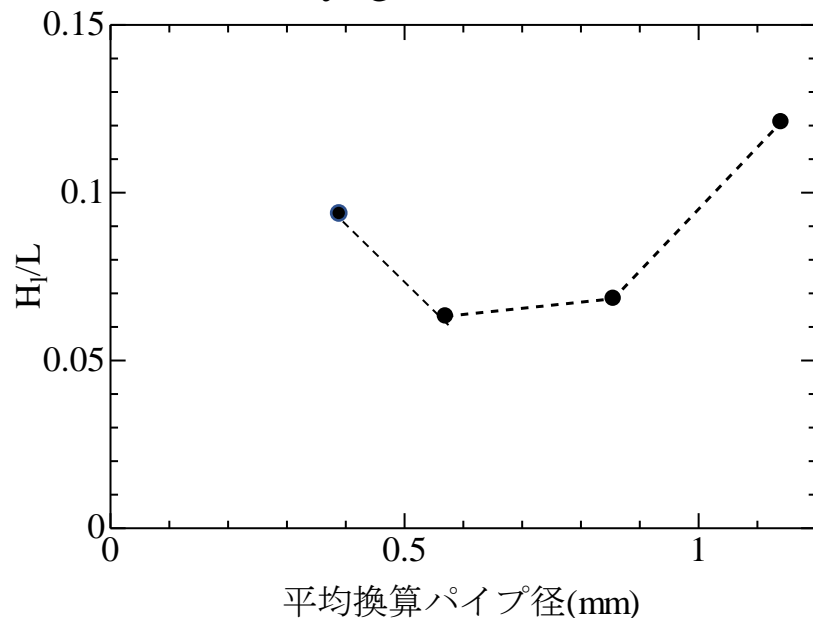
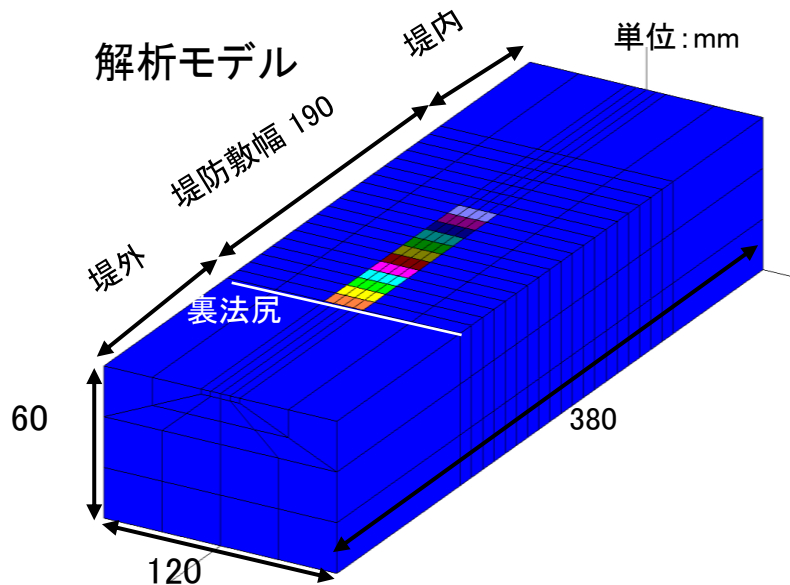
その際、 D の設定が極めて重要



背景

パイプ進展水位予測：

パイプの形状、寸法を設定し、パイプ内流れが限界Shields数となる水位を求める (Okamura, Kusube & Tsuyuguchi, 2023)

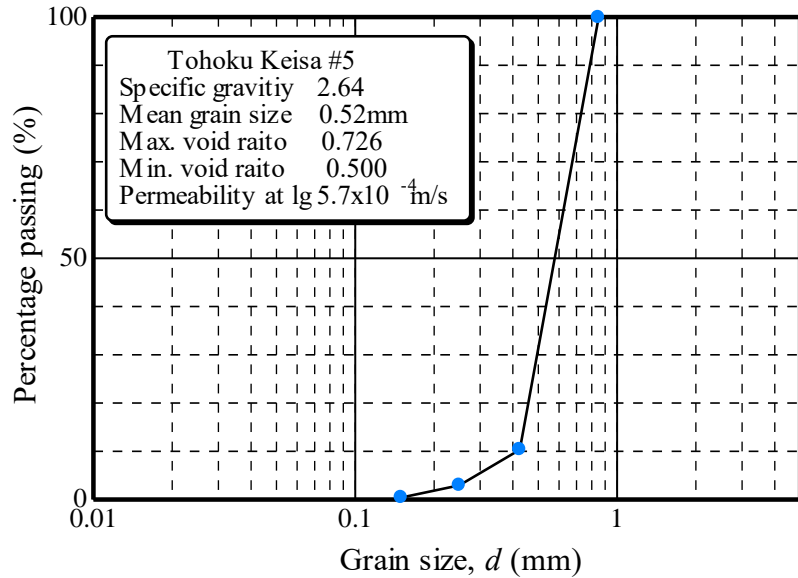


- パイプ進展時の動水勾配(H_1/L)は、パイプ断面の大きさにより敏感に変化
- 予測法の妥当性検証のためにも、パイプの寸法・形状のデータ取得が重要
- 多くの模型実験で実験終了後のパイプ形状は計測されてきたが、洪水中的パイプ進展に伴う形状の変化は明らかでない

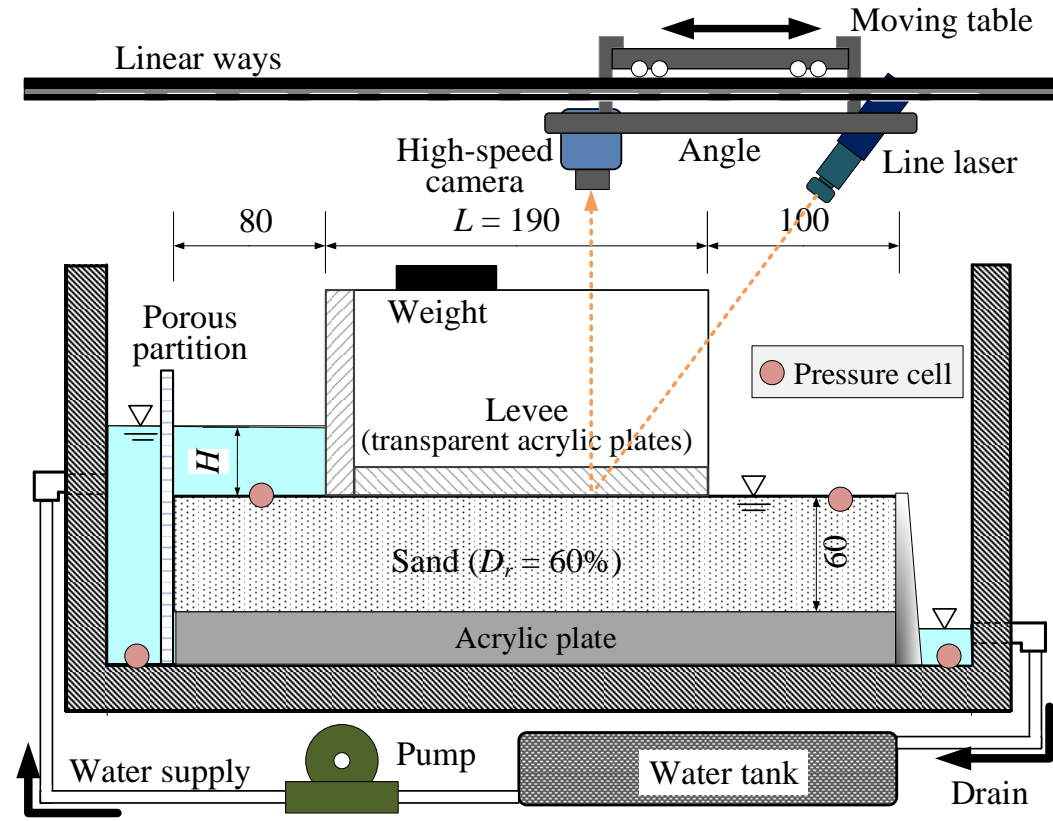
目的

- パイプ進展に伴うパイプ形状を計測するためにラインレーザー法を開発する。
- これを用い、パイピング実験におけるパイプの進展に伴う形状の変化を明らかにする。

実験条件



東北珪砂5号



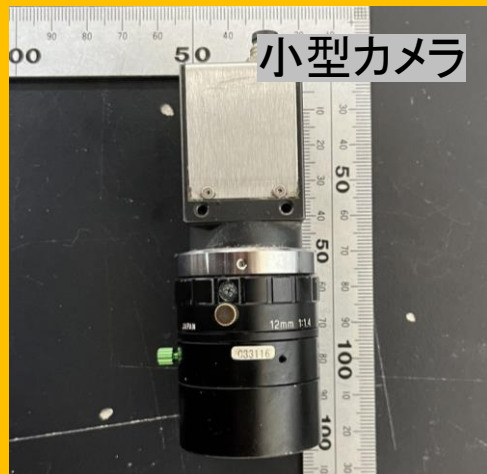
実験模型

- 基礎地盤 (長さ370mm × 高さ60mm × 奥行き120mm)
- 東北珪砂5号用いて $D_r = 60\%$ で作製。
- 実験模型は遠心模型実験装置に搭載し、40G場で洪水実験を実施。

LL法で使用した器具と撮影条件



アクリル堤体



小型カメラ



ラインレーザー

アクリル厚さ: 10mm

アクリルの可視光透過率
波長420~750nm厚さ3mm
に対し93%

解像度: 1600 × 2448pix
Frame rate: 20fps
Exposure: 5000 μ s

重量: 16g
波長: 660nm
焦点距離: 300mm
レーザー幅: 0.3mm

- ・アクリルは基礎地盤観察に十分障害が無い厚さ
- ・写真の輝度は0~255で表現される→明るさのピークが飽和しない
- ・写真の解像度0.06mm/ピクセル
- ・レーザー幅0.3mmの極細ラインレーザーを使用

実験の手順

実験手順

40G

洪水

パイプ形状測定
(LL法) Step1~5

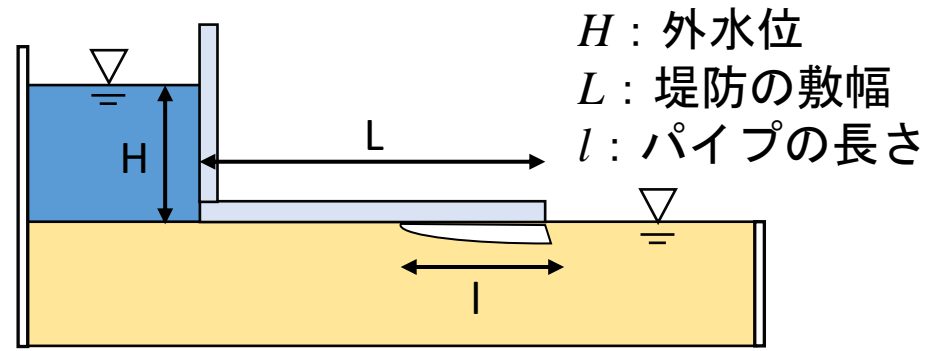
非貫通

貫通

1G

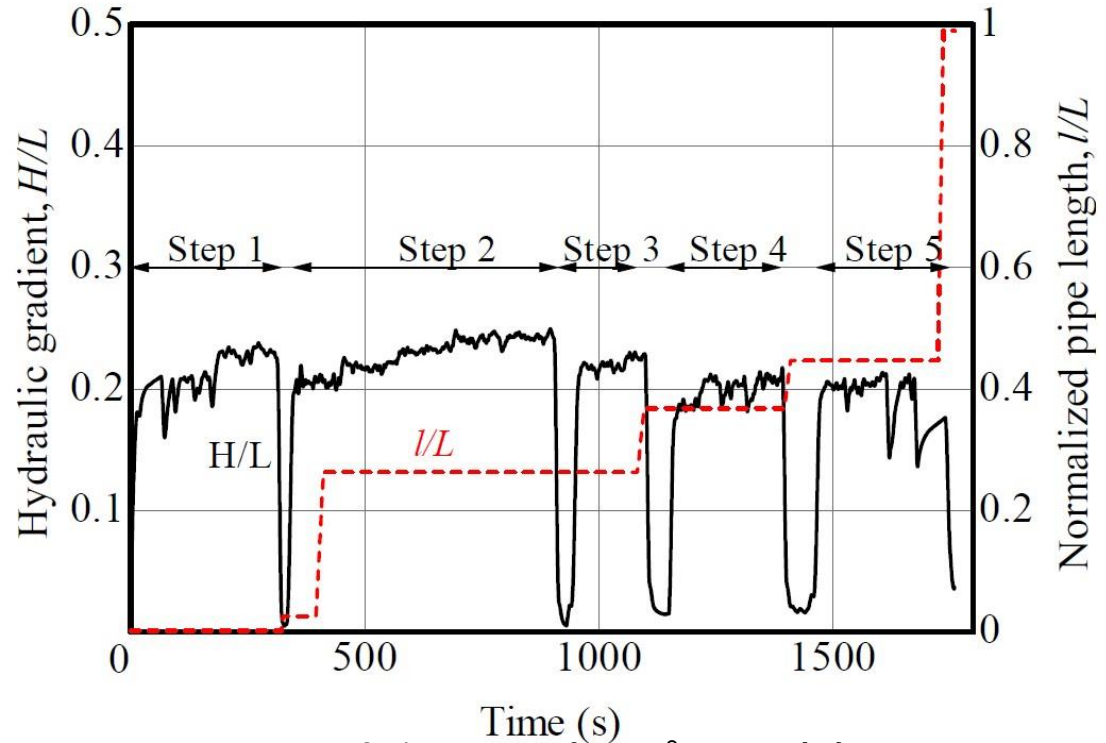
堤体除去

パイプ形状測
(SfM) Step5



H/L : 平均動水勾配 (パイピング外力)

l/L : パイプの進展度

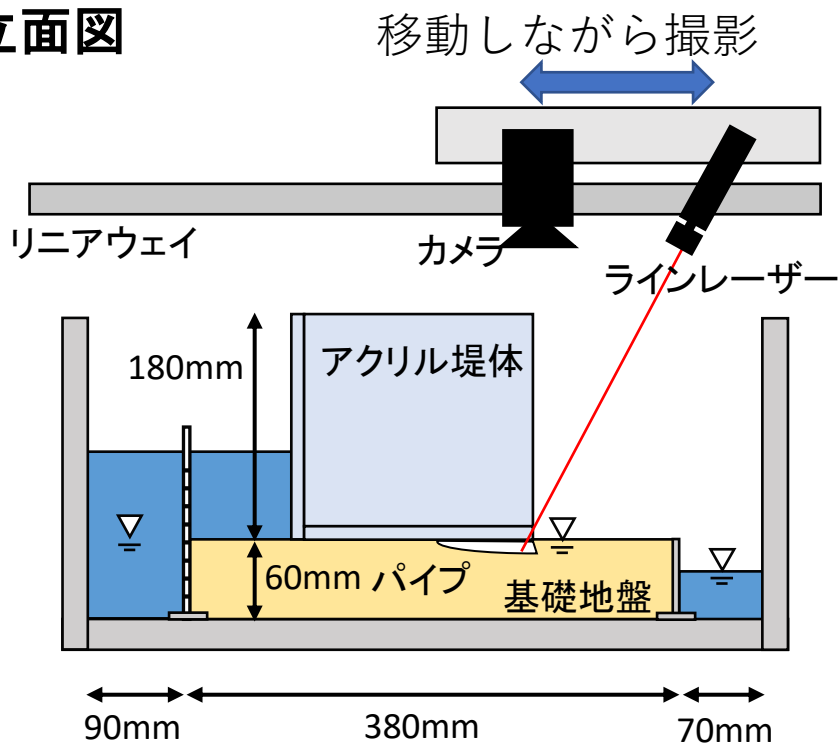


平均動水勾配とパイプ長の時刻歴

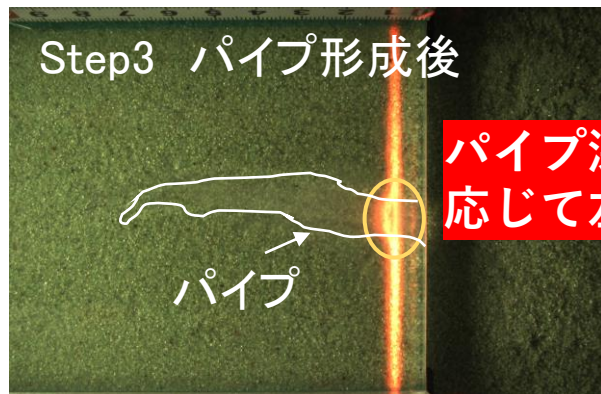
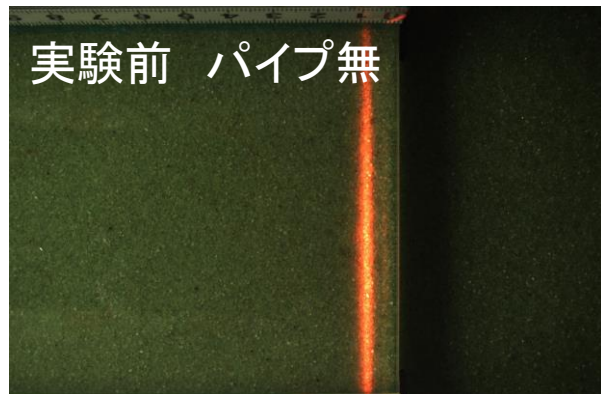
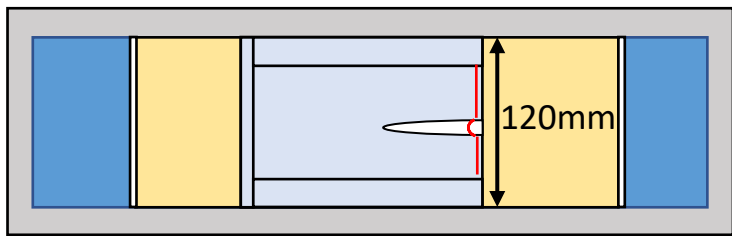
各Step (パイプ長さ $l/L=0.05, 0.26, 0.37, 0.45, 1$) でパイプの3D形状を計測

LL法 測定方法

立面図

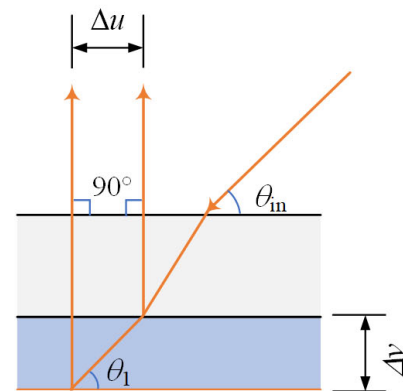


平面図



レーザーの位置を実験前の位置と比較

レーザーの移動量 Δu はパイプ深さ Δv に比例

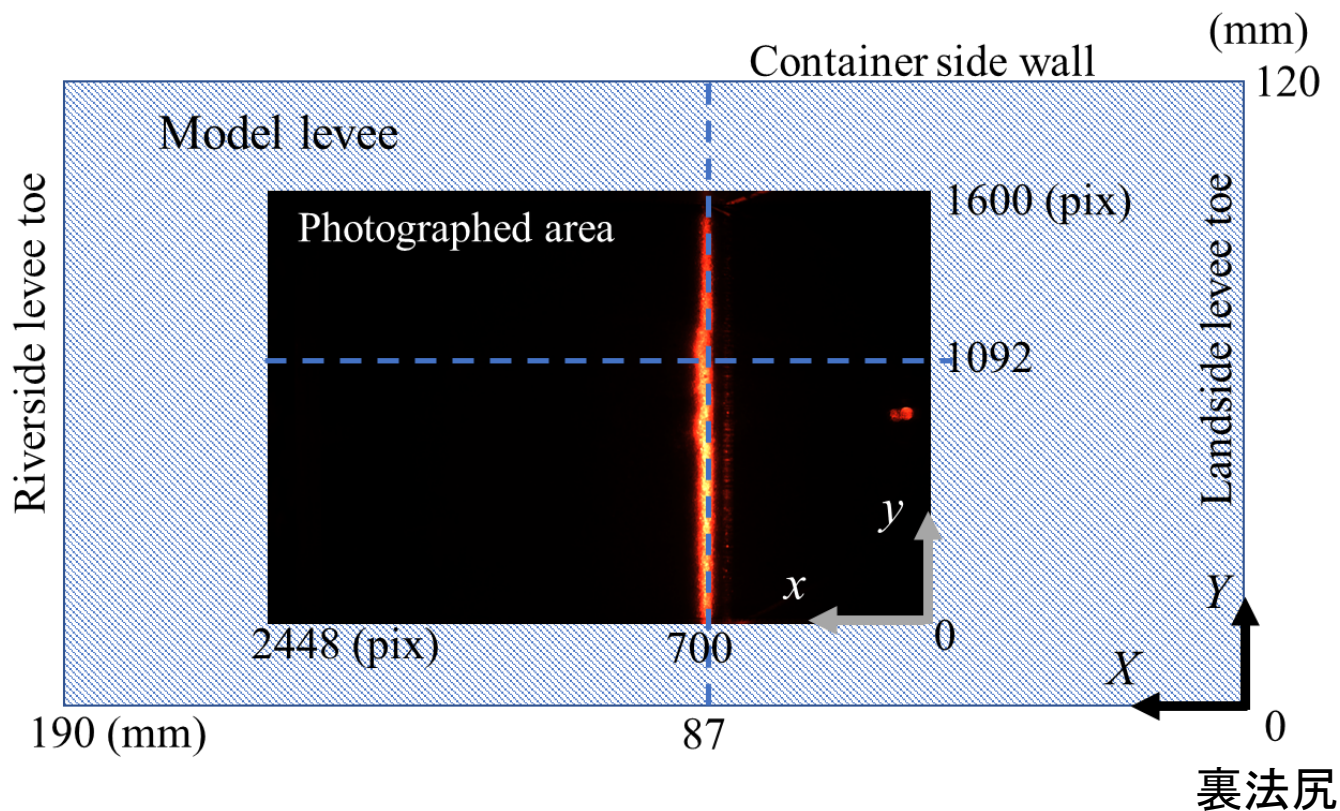


$$\Delta v = \Delta u \tan \theta_1$$

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_{in} n_{air} / n_{water}$$

LL法:によるパイプ深さの測定

座標系について



アクリル堤体

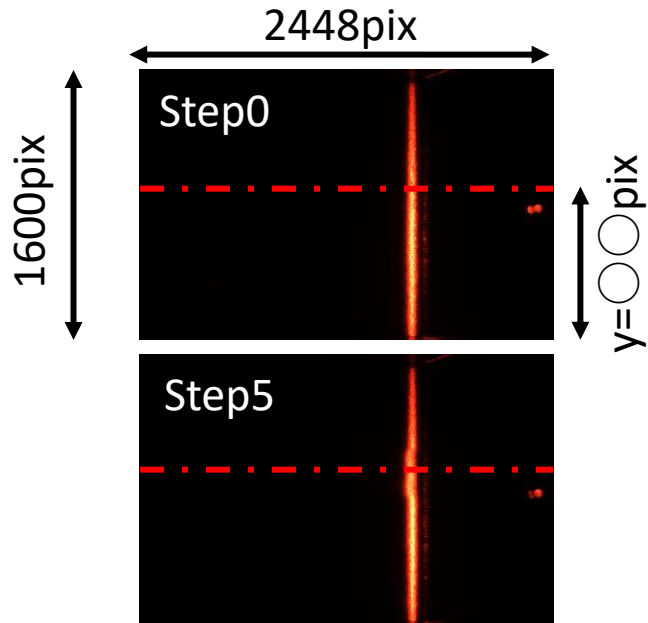
X : 裏法尻からの距離(mm) Y : 壁面からの距離(mm)

写真

x : 水平方向の距離(pix) y : 垂直方向の距離(pix)

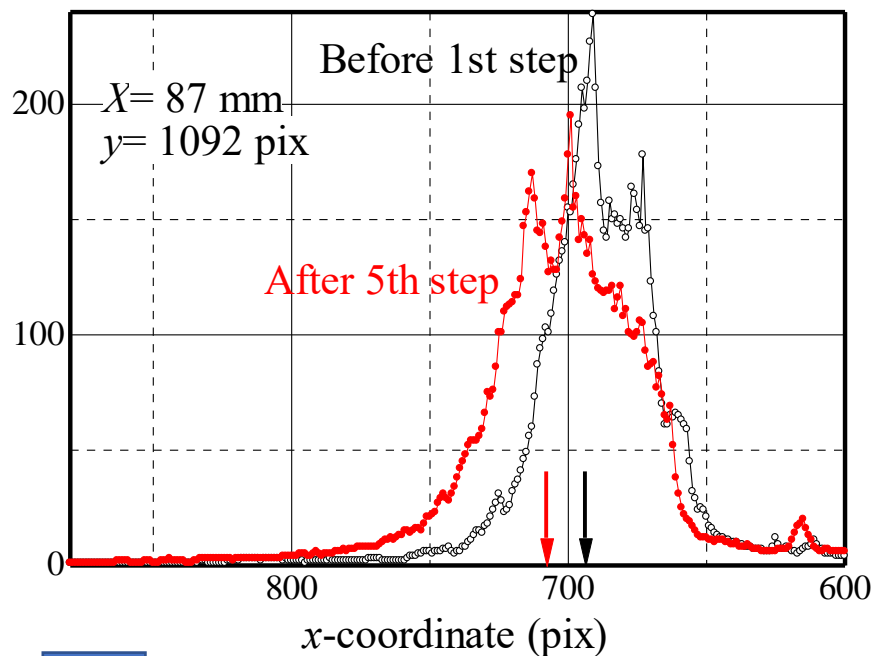
LL法:によるパイプ深さの測定

$y = 1092\text{pix}$ での輝度分布
パイプ形成前後の比較



$X = 00\text{mm}$ の写真

輝度分布: 重心位置よりレーザー位置の変化を特定



これを $y = 0 \sim 1600\text{pix}$ について行い、 $X = 00\text{mm}$ でのパイプ断面形状を測定

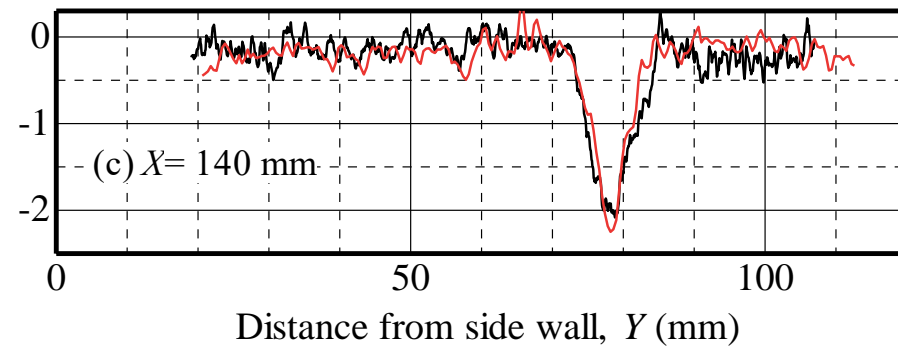
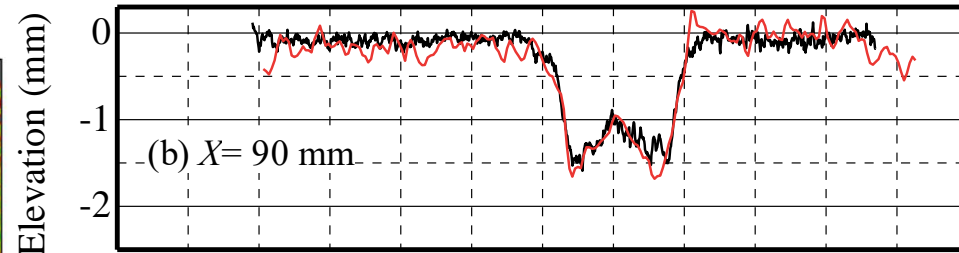
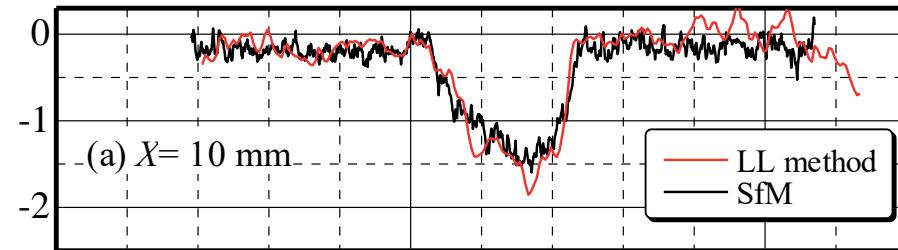
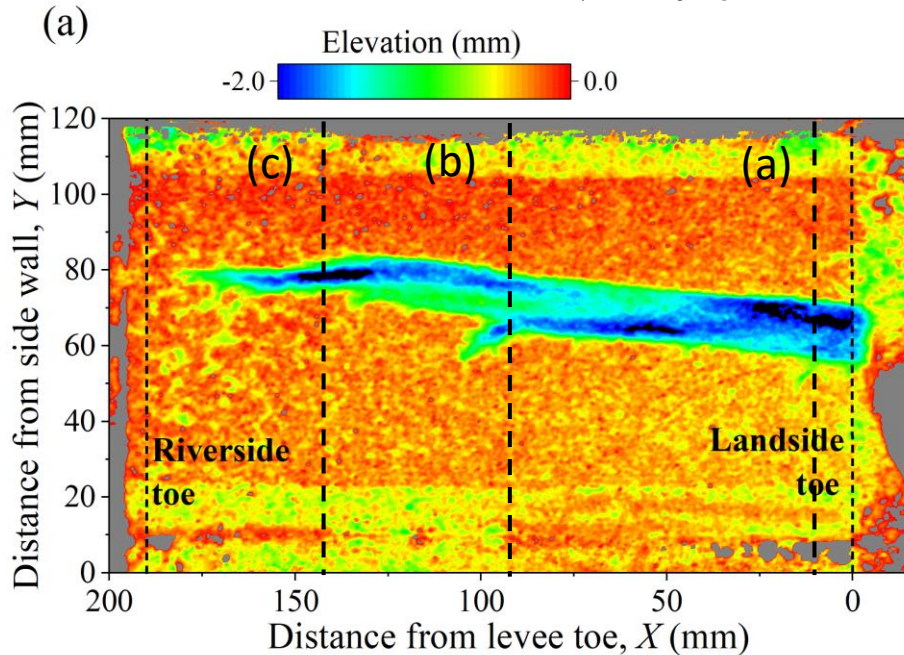
これを $X = 5 \sim 160\text{mm}$ まで5mm間隔で行い、パイプ全体の形状を測定

測定結果：SfMとLL法の比較(実験後のパイプ形状)

Step5終了後

LL法によるパイプ形状と、堤体を撤去して撮影した地盤表面の写真から
SfMで作成したDEMによるパイプ形状を比較

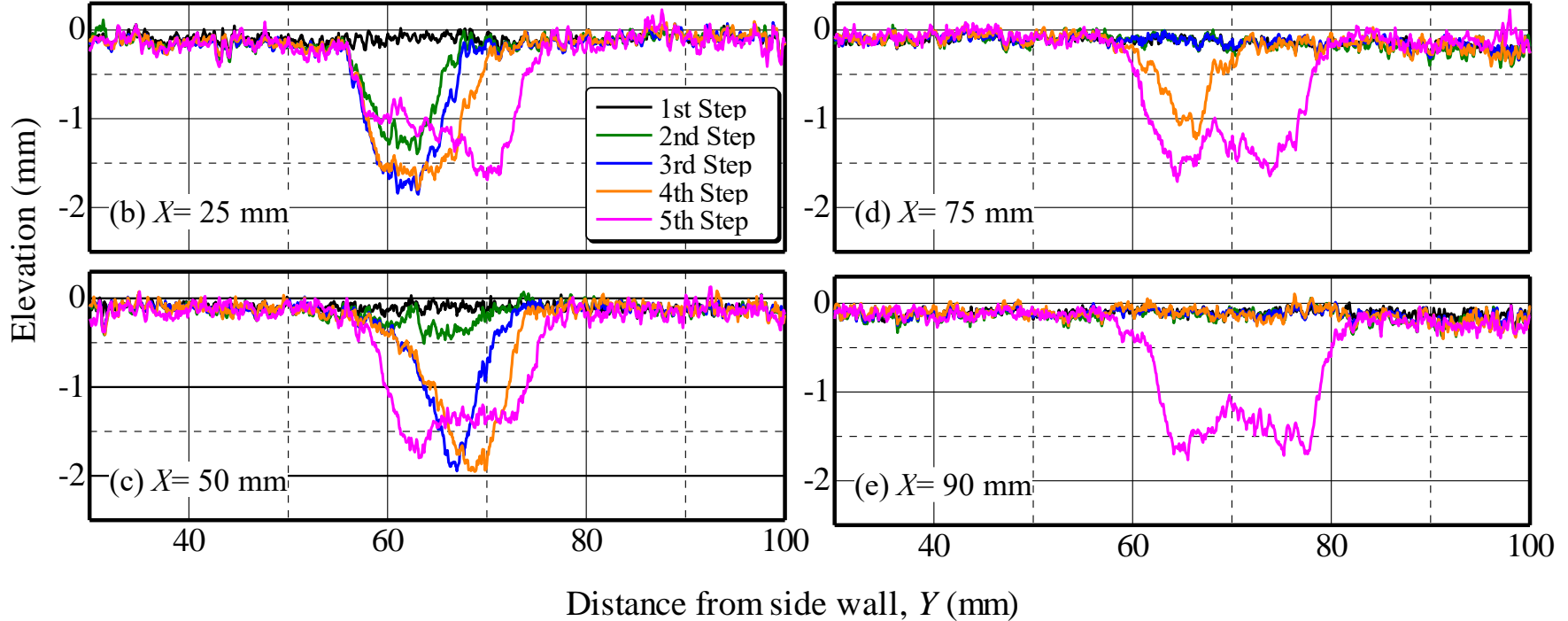
SfMで計測した地盤表面標高



LL法—SfMの差

砂の平均粒径0.52mmより小さく、ほぼ一致した。

パイプ進展に伴う横断面の変化



深さ

- ・砂の平均粒径の3~4倍
- ・貫通時深さは変わらない
または、やや浅くなる

幅

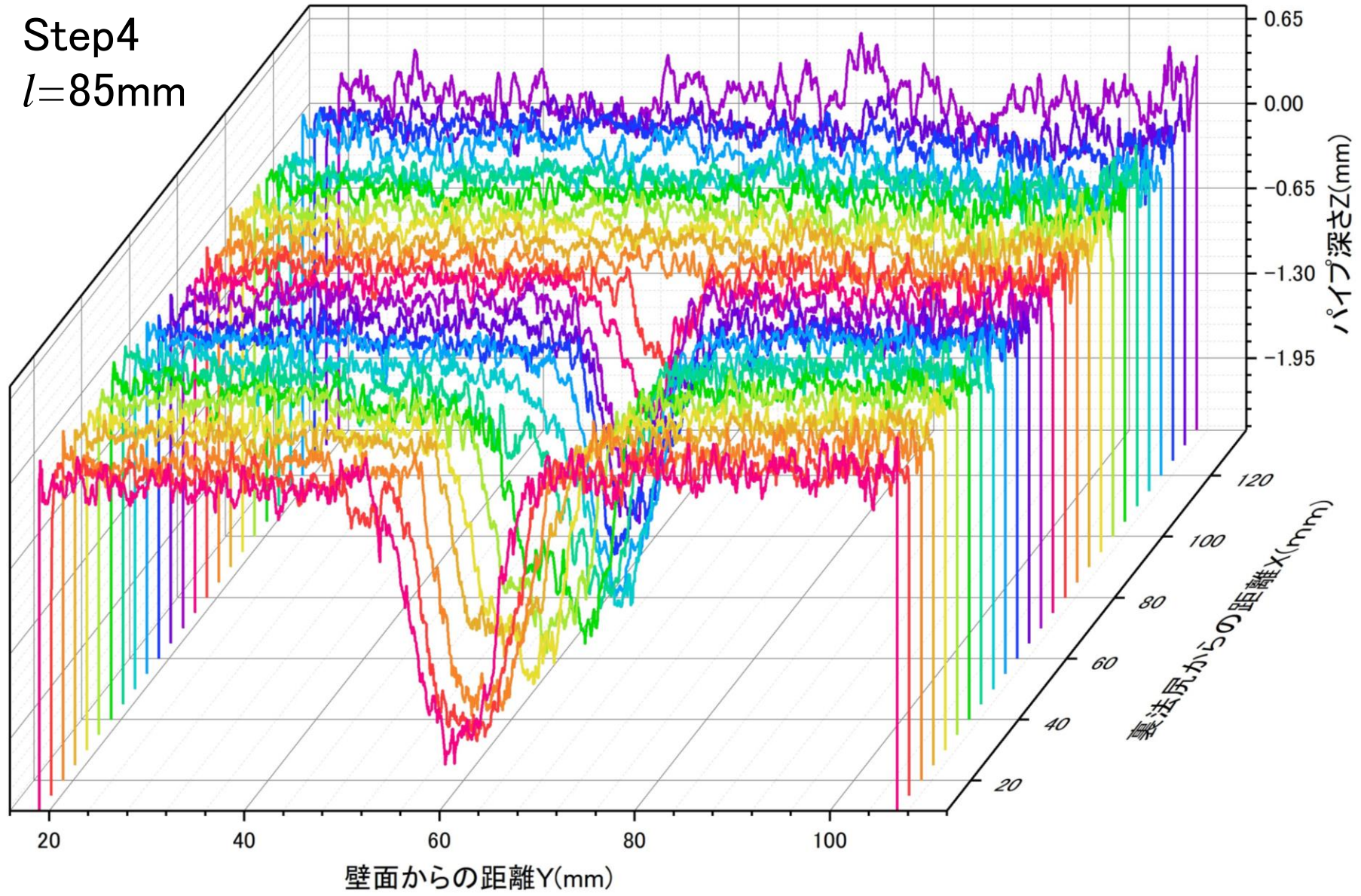
- ・貫通前は深さの6~8倍程度
- ・パイプ延長と共に広がる
- ・貫通時に急拡大した

多くの既往の実験結果 (深さは $5d_{50} \sim 10d_{50}$: それらの殆どは、貫通後に形状を計測)

本研究結果は既往研究より深さ、幅ともにやや小さい。

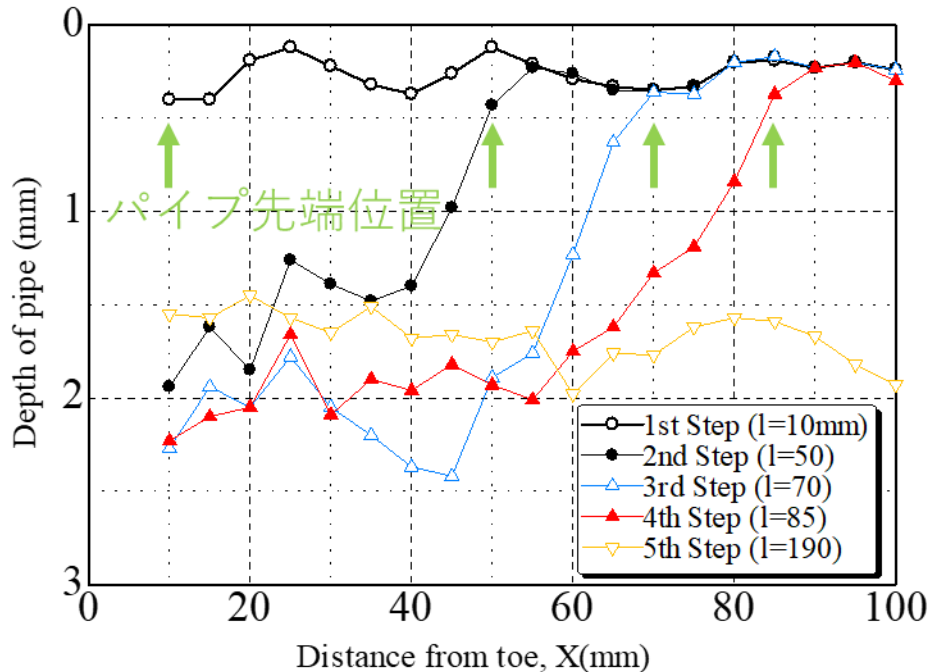
LL法で復元した3次元DEM

Step4
 $l=85\text{mm}$



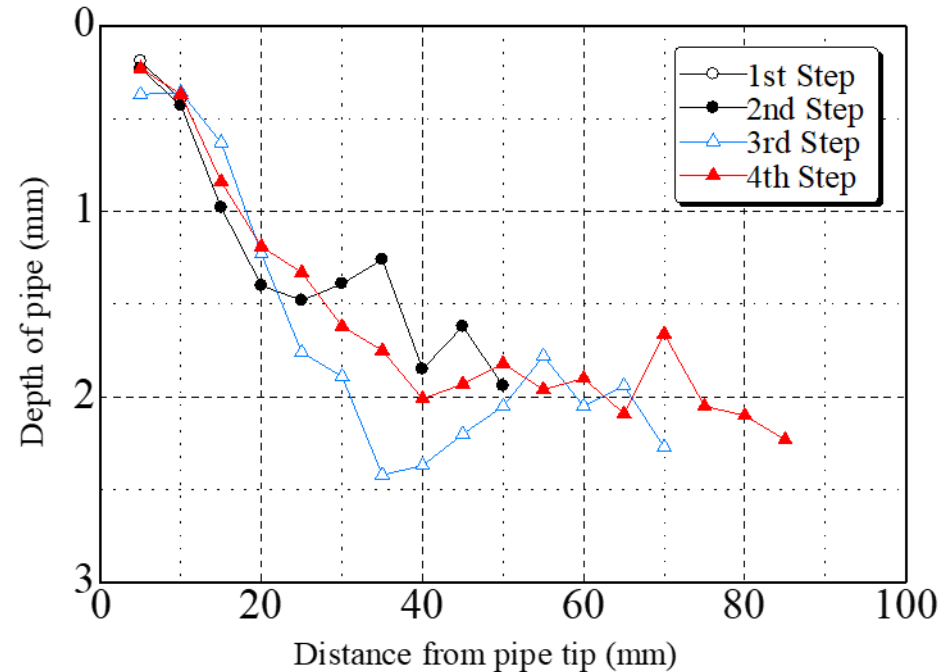
パイプ進展に伴うパイプ縦断形状の変化

パイプ深さと裏法尻からの距離の関係



- ・パイプの出口(裏法尻)での深さは、パイプの進展と共に増加

パイプ深さとパイプ先端からの距離の関係



- ・パイプ先端の形状は、パイプの長さによらず一定。
- ・先端から20~30mmでは6~7°の縦断勾配。
- ・30mmから出口まではほぼ水平。

まとめ

本研究では、パイピングの進展に伴うパイプ形状の変化を模型実験で詳細に調べた。

- 始めに、堤内法尻から堤外側に向かって徐々に進展するパイプ部の3D形状を、パイピング実験でしばしば用いられる透明な模型堤体を通して計測することができるラインレーザー法（LL法）を開発し、その適用性を確認した。
- 続いて、パイピング実験でパイプ部を段階的に進展させ、パイプ長とパイプ形状の関係を調べた。その結果、貫通する前のパイプ横断面の形状は深さが砂の平均粒径の約3倍、幅が深さの6～8倍であり、出口付近の幅及び深さはパイプ長とともに広がってゆくことが分かった。既往の研究報告と比較すると、計測された深さはほぼ一致したが幅は極端に狭かった。これは、既往の研究でのパイプ形状の計測が、ほとんどの場合に貫通した後に行われたためであると考えられる。
- パイプの縦断形状は、先端部が6～7° 傾斜しており、この部分の形状はパイプの長さによらない。
- これまでに限界動水勾配の予測法として提案されている、浸透流解析からパイプ内流れを求め、掃流砂条件からパイプ進展時の平均動水勾配を求める方法の改良に資する、パイプ形状に関する有用な知見が得られた。