土粒子模型を用いた継手張り出し部の摩擦メカニズムの可視化

山村　優[1]・鍬田　泰子[2]

[1]正会員　神戸市水道局（〒650-0001 神戸市中央区加納町 6 丁目 5-1）
E-mail: yu_yamamura@office.city.kobe.lg.jp

[2]正会員　神戸大学大学院　工学研究科（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1）
E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

埋設管の耐震設計指針において，管軸方向の管路と地盤との動的相互作用を表す地盤ばねの特性は，地震外力作用時の埋設管の耐震性を評価する上で重要である．管軸方向の地盤ばね特性は，せん断応力がある限界を超えれば管と地盤との間ですべりが発生するバイリニア型でモデル化されている．しかし，埋設管には継手や接合部があり，管軸方向の摩擦力にはその継手張出し部による摩擦抵抗が含まれるが，それらのモデル化については十分検討されてきていない．本研究は，せん断変位を与えた時の継手張出し部周辺の土粒子の動きを把握するために，管と土粒子を二次元断面に置き換えた模型にせん断変位を与える実験を行い，土粒子の動きを可視化してミクロ的に摩擦メカニズムを明らかにした．

Key Words: *friction, pipe joint, model experiment, soil particle model*

1.　はじめに

埋設管の現行の耐震設計指針では，応答変位法等の耐震計算に用いる管軸方向の管路と地盤との動的相互作用を表す地盤ばねは，あるせん断応力を超えるとすべりが発生するとしてバイリニア型でモデル化されている[1]．この地盤ばねの係数は，埋設管の移動速度に関わらず管と地盤との相対変位に応じて働く一定値で規定されており，動的な効果は考慮されていない．しかし，埋設管と地盤との間に相対変位が発生すると，管路周辺の土粒子は移動して再配置が行われる．土粒子の再配置は，管路の移動速度と地盤締固め条件によって異なり，地盤が締固められているほど，せん断変形に対して正のダイレイタンシーが作用するため，管路はより大きな摩擦力を受ける．管と地盤との間に働く摩擦力を適切に評価するためには，土粒子の再配置のメカニズムを解明する必要がある[2]．

竹本ら[3]は，砂地盤が粒状体であることに着目して，せん断抵抗が引き抜き速度に依存するメカニズムを数値解析を用いて考察している．具体的には，粒状体として見立てたアクリル円柱の塊に一定の上載圧を加えたせん断実験を個別要素法で数値解析するというものである．せん断面に圧縮力が働くためにせん断抵抗が強くなることを示している．

埋設管には継手や接合部があるため，管軸方向の管と地盤との摩擦にはその継手張り出し部による摩擦抵抗が含まれるが，地盤ばねにおいてそれらのモデル化についてはこれまで十分検討されていない．中低圧ガス導管の設計指針[4]では小口径ガス管を対象に張り出し部の面積と摩擦抵抗との関係を実験から求め，経験的に張り出し部による摩擦抵抗を考慮しているが，他の管種や異なる継手形状に適用できるわけではない．

著者らは土槽中の管の引抜き実験を行い，管軸方向の地盤ばね特性について検討を行ってきた[5,6]．この実験では継手のある管も供試管として実験を行っており，継手のない管よりも摩擦抵抗が大きくなることは明らかにした．しかし，地盤の締固め条件や引き抜き速度に着目しており，継手張り出し部の形状や面積などをパラメータにして検討できるほどの実験数を実施していなかった．西川ら[7]も，水道配水用ポリエチレン管を用いて地盤との境界面に発生するすべりに関する実験を行い，管の滑り境界条件について考察している．融着継手を有する青ポリ管を用いた実験も行われ，管引き抜き時に継手部が抵抗となり，継手の前部（引張側）の砂を圧縮するために，せん断応力が直管とは異なることが示されている．また，継手部の後部には変位量に応じた空隙が確認され

ている．つまり，既往の研究では，継手の張り出し部の摩擦抵抗について実管路の引き抜き実験で経験的に計測することはあっても，張り出し部の摩擦機構について詳細に検討はされていない．

本研究では，せん断変位を与えた時の管の張出し部周辺の土粒子の動きを把握するために，管と土粒子を二次元断面に置き換えた模型にせん断変位を与える実験を行い，摩擦力と継手張り出し部周辺の土粒子の動きからミクロ的に摩擦機構を明らかにすることを目的とする．本研究では，とくに上載圧と継手の形状の違いによる粒子の動きに着目した．さらに地盤との相対変位と摩擦力との関係だけでなく，土粒子の動きをミクロ的に把握するため，画像解析によって可視化して分析した．

2. せん断試験装置と実験ケース

(1) せん断試験装置

本研究では管と地盤との摩擦機構を明らかにするために，**図-1** に示すような底板移動型せん断試験装置を作製した．装置は，ハンドルを手動で回すことにより，管路に見立てた底板が水平に一方向に動くものである．底板表面は塩化ビニル（PVC）製である．**図-2** に試験装置の概要図を示す．底板に接触した中央部には長さ 500mm，高さ 100mm，奥行き 50mm のスペースがあり，ここに長さ 50mm，直径 1.6mm のアルミニウム棒（**図-3** 参照）を敷き詰めて，アルミ棒の断面を土粒子に見立てた二次元断面の地盤を構築した．以下，この部分のことを地盤部分と呼ぶ．また，本研究では土粒子の動きを画像解析で分析するため，この地盤部分のうち中央の長さ 400mm，高さ 80mm の面は可視領域となるようにアクリル板にした．

装置上部には上載圧を制御するためのネジとその荷重を測定するためのロードセルを取り付けた．また，ハンドルと PVC 底板の間にもロードセルを取り付け，底面が受けるせん断抵抗を測定した．底板の中央部には継手を模した PVC 板（以下，継手板と呼ぶ）をねじで底板に固定できる（**図-4** 参照）．継手板の厚さと幅，形状は実験ケースによって異なる．また，底板の両端にバネ式の変位計（CDP-25，東京測器）を設置し，底板の変位を計測した．

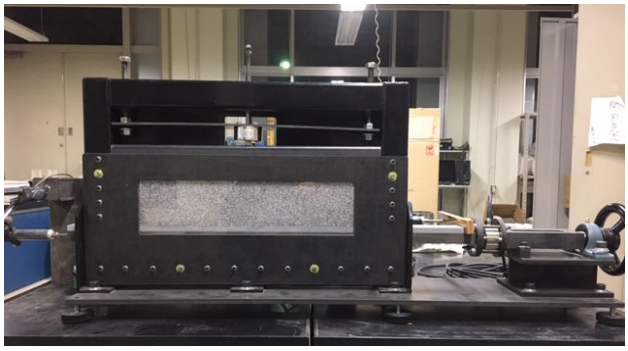


図-1 土粒子模型せん断試験装置

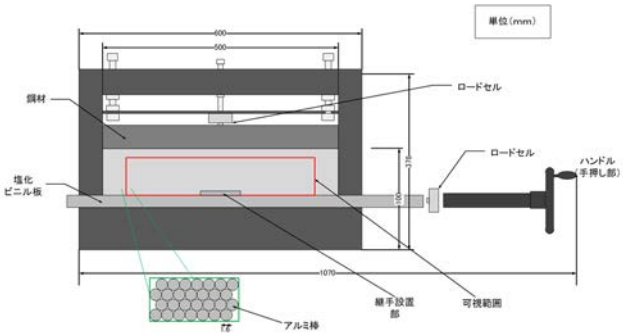


図-2 試験装置の概要図

(2) 実験ケース

せん断実験は，上載圧と継手板を変えて，それぞれ 3 回ずつ行った．地盤の密度を 1.7 g/cm^3 と仮定し，土被り d=0.5 m，0.75 m，1.0 m に相当する上載圧として，上部のロードセルがそれぞれ 126N，230N，334N になるように調整してから実験を開始した．押し込み速度は，ハンドルを回して手動で調整し，5mm/s になるよう調整した．押し込み速度については，摩擦抵抗の速度依存を実験で再現することを期待して複数のケースを設定して実験を行ったが，手動で調整できる速度の範囲では，明瞭な摩擦力の速度依存性は確認ができなかったために，本研究では速度を 5mm/s に固定した．

継手部板については，長方形と台形（両端の角度が 45 度）を考慮した．板厚は，土粒子の粒径に対する実

図-3 アルミ棒

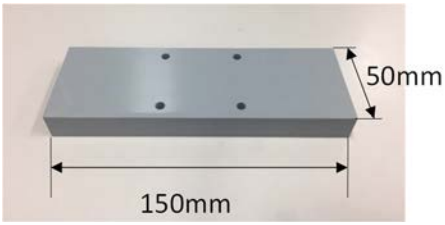


図-4 継手板 A（長方形厚板）

際の継手の張り出している管厚の比を参考にし， 実験で使用するアルミ棒の直径の 5 倍である厚さ 21mm の板厚を基準ケースとして設定した．また，継手張り出し部の厚さによる摩擦抵抗の違いを確認するため，板厚 14mm の継手板も実験ケースとした．以下，厚さ 21mm のものを厚板，厚さ 14mm のものを薄板と呼ぶ．本研究で行う継手板の寸法と実験ケースを**表-1** に示す．

(3) 実験装置の諸元

本研究で用いた土粒子模型のアルミ棒の安息角を求めるため，水平方向の拘束を与えたままアルミ棒を積み上げた後，一気に拘束を外して落下させ，**図-5** のような状態にして計測した．その結果，安息角は 15 度であった．土粒子模型のアルミ棒同士の内部摩擦角といえる．

アルミ棒と継手の張り出し部のない PVC 底板の摩擦係数を得るため，継手板を取り付けずに上載圧を変化させてせん断抵抗を測定した．摩擦係数はせん断抵抗を上載荷重で除して算出した． 上載圧 3 ケースについてそれぞれ 3 回計測を行ったものについて，地盤との相対変位と摩擦係数の関係を**図-6** に示す．底板の変位が 2mm に達するまではせん断抵抗が増加してき，ケースにもよるが継手板がない場合のアルミ棒と PVC 底板との摩擦係数が 0.3 から 0.4 に達するとアルミ棒と底板の間にすべりが発生する．この傾向は上載圧に関わらずいえる．すべり出す変位はおおむね 2mm である．摩擦係数が増減するのは，アルミ棒の敷き詰めにおいて粗密な箇所があり，せん断変位を受けるとアルミ棒が再配置され，せん断抵抗が大小するためと考えられる．アルミ棒を非常に密に積み上げた場合には，底板近くのアルミ棒のみが回転することによってすべりが発生するため，すべりが発生した後のせん断抵抗は一定となった．

表-1 継手板のケースと寸法

継手板	形状	寸法（長さ×厚さ×奥行き）(mm)
A	長方形厚板	150×21×50
B	長方形薄板	150×14×50
C	台形厚板	150×21×50
D	台形薄板	150×14×50

注：台形版の長さは底板接触面の長さ

図-5 安息角の計測

3. 継手張り出し部のせん断試験結果

4 種類の継手板に対して 3 ケースの換算土被り d となるように上載圧を変更させながら，それぞれ 3 回ずつ，合計 36 ケースのの実験を行った．分析は，底板の変位と摩擦係数の関係に基づいて行う．**図-7～図-10** に，継手板を A から D に変更した場合の実験結果を示す．

全体として，土被りが大きいほど，継手板のせん断抵抗は大きくなるが，摩擦係数に換算すると，同一の継手板の摩擦係数はほとんど同じである．すべり始めた後は，せん断抵抗は一定の範囲で増減し，波打つように変動する．その理由として，本実験の設定ではアルミ棒の直径や継手の板厚に対してアルミ棒の敷き詰め範囲が小さく，アルミ棒の直径も均一であったことからアルミ棒の隙間に埋まるものがなく，小さな空隙内のアルミ棒の落下や土アルミ棒同士の噛み合わせによってせん断抵抗が増減することが挙げられる．

多くの結果で，変位と摩擦係数との関係はバイリニア型を示している．継手板がない場合と比較して，実験開始直後の変位が大きくなるまでは継手板が抵抗となり，アルミ棒がすべり出しにくくせん断抵抗のみが増加する傾向にある．ただし，すべりが始まると，継手板のない底板のみの実験結果と同様の結果を示している．

継手板の厚さによる比較として継手板 A と B，継手板 C と D の間で比較を行う．厚板である継手板 A と C では，すべりが生じた後も摩擦係数が徐々に増加をしている．一方で，薄板である継手板 B と D では，すべりが生じて以降，摩擦係数に増減はあるものの傾向として一定値を示し，その値は底板のみでせん断試験をしたときの摩擦係数と大差がないことがわかる．つまり，張り出し部の厚さによって裸管の摩擦力とほぼ同じに見なせる場合があることが示唆される．ただし，厚板である継手板 A と C の厚さは，現在の規格の管厚を基にして設定したもので土粒子が砂の粒径であれば，張り出し部による摩擦抵抗は無視できないものといえる．

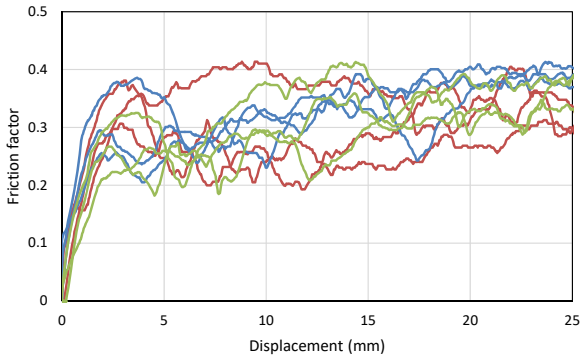
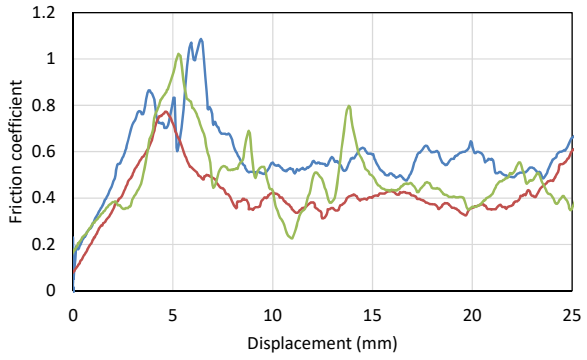
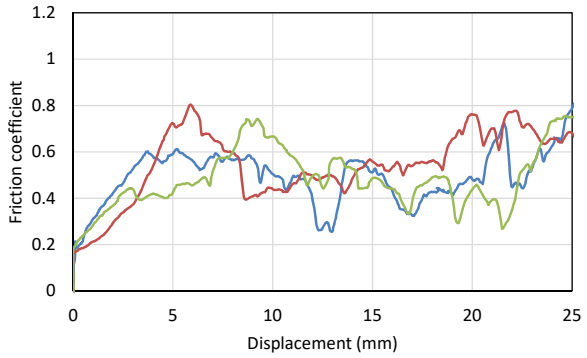


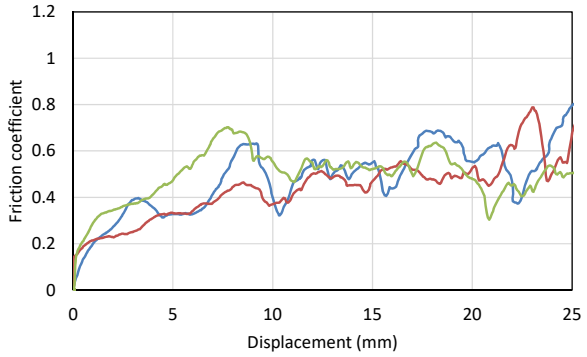
図-6 アルミ棒と PVC 底板の間の摩擦係数



(a) d=0.5m

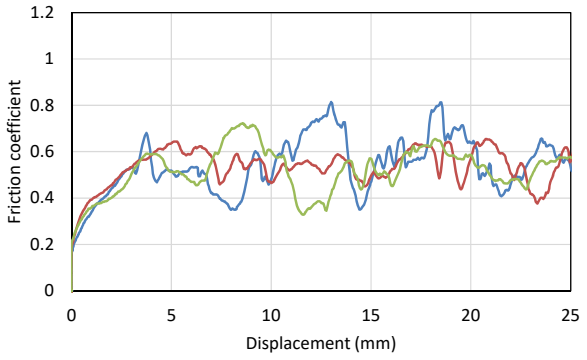


(b) d=0.75m

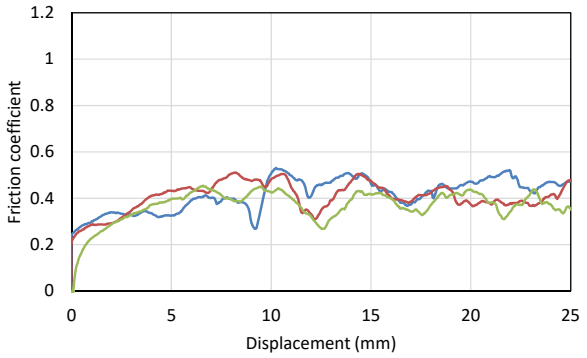


(c) d=1.0m

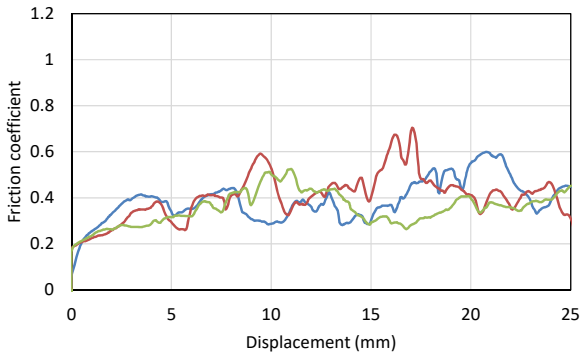
図-7　継手板 A（長方形厚板）ケースにおける変位と摩擦係数との関係



(a) d=0.5m



(b) d=0.75m

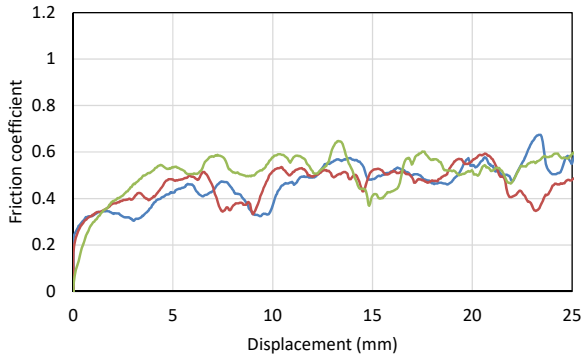


(c) d=1.0m

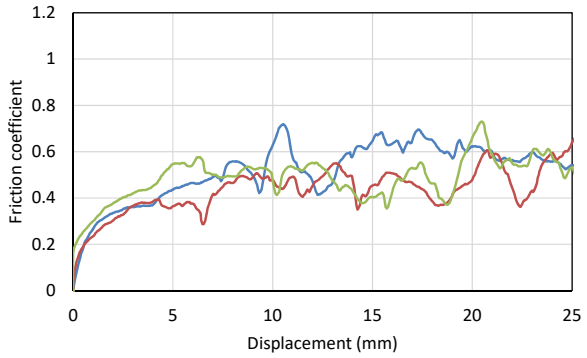
図-8　継手板 B（長方形薄板）ケースにおける変位と摩擦係数との関係

長方形厚板の継手板Aの場合（**図-7**を参照），他の継手板と比べて最初のせん断変位 5～10 mm 付近に摩擦係数のピークがあり，次に係数が一度谷間を迎え，その後徐々に増加する傾向がみられる．ピーク時の摩擦係数は換算土被り d に応じて変動し，一定ではない．継手板の厚さに対して土粒子直径が大きいため，継手板を乗り越えて土粒子が通過するときに上向きの拘束圧力がかかり，その後土粒子間に隙間ができると拘束圧力が急激に解放されると考えられる．換算土被り d=0.5m の摩擦係数のピークは約 1.0 で，継手板がない場合の 3 倍に相当する．

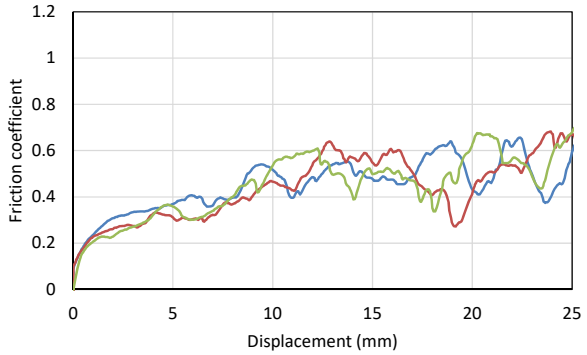
一方，台形継手板 C や D の場合，継手板が厚くなると摩擦係数が高くなり，薄板の継手板 D の場合は約 0.4，厚板の継手板 C の場合は 0.5 である．ただし，せん断抵抗は変位に応じて徐々に大きくなり，長方形の継手板の A に見られるような摩擦係数におけるピークはみられない．継手張り出し部の高さは変更できなくとも，形状を緩やかにするだけで急な摩擦抵抗を抑えられることが考えられる．



(a) d=0.5m

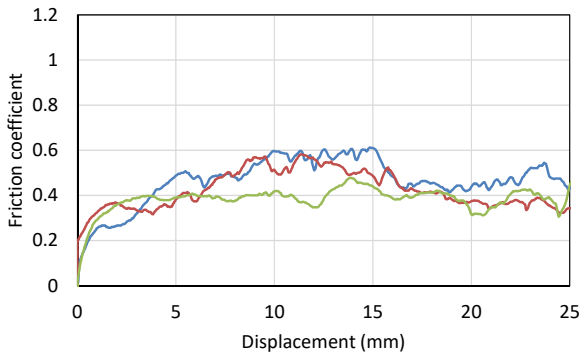


(b) d=0.75m

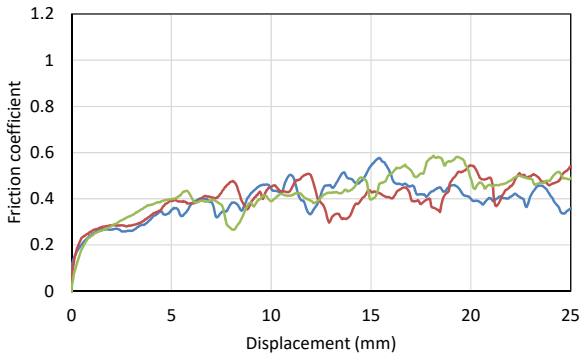


(c) d=1.0m

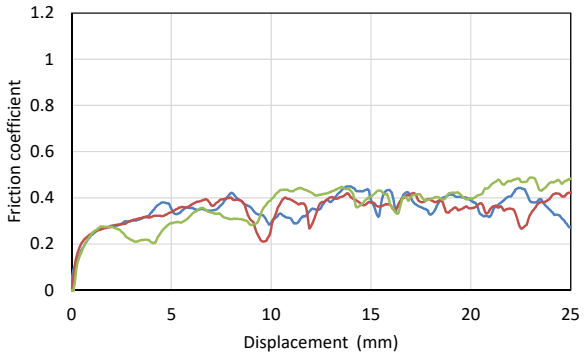
図-9　継手板 C（台形厚板）ケースにおける変位と摩擦係数との関係



(a) d=0.5m



(b) d=0.75m



(c) d=1.0m

図-10　継手板 D（台形薄板）ケースにおける変位と摩擦係数との関係

4.　せん断変位に伴う土粒子の軌跡

継手張り出し部周辺の土粒子の軌跡から摩擦機構を分析するために，せん断試験時の継手板周辺をビデオ撮影した動画からコマ切りした静止画を抽出して画像分析を行った．具体的には，規則的な間隔で配置されたマーキングをしたアルミ棒（以下，マーキング土粒子）の座標を記録していき，マーキング土粒子ごとに時間ステップの座標を連結させて軌跡を描いた．

各実験のマーキング土粒子の軌跡を**図-11** から**図-14** に示す．図中の背景画像はせん断試験開始時のものである．継手板の変位がわかるように，継手板の前方で底板と接触している端点の軌跡もつけた．なお，図中の底板に示されている点は 20mm 間隔である．実験では図中の継手板が左側へと移動する．マーキング土粒子と継手板前方端点の軌跡の丸印の色は，同時刻での位置を示している．

粒子軌跡から，長方形と台形のいずれの継手板であっても，継手板上部にあるマーキング土粒子の垂直，水平の変位量はともに小さく移動していない．また，継手板前方のマーキング土粒子の内，板厚の下半分にある土粒子は前方方向（図左側）に水平移動しているが，板厚の上半分にあるマーキング土粒子は継手板前方で前方上向

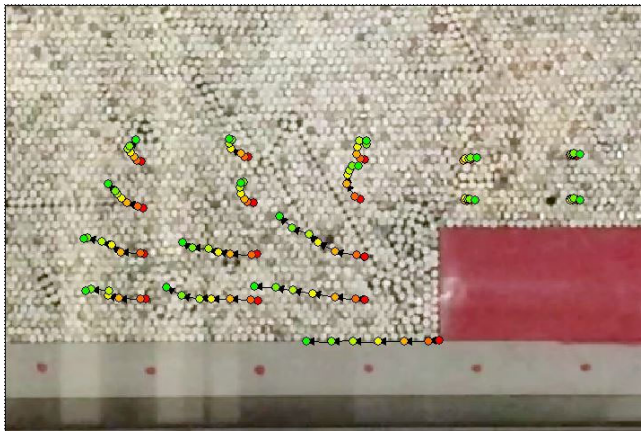


図-11　継手板Ａ（長方形厚板）ケースにおける土粒子の軌跡

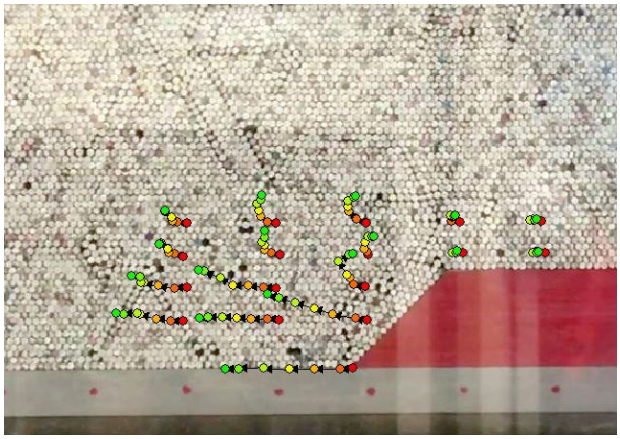


図-13　継手板Ｃ（台形厚板）ケースにおける土粒子の軌跡

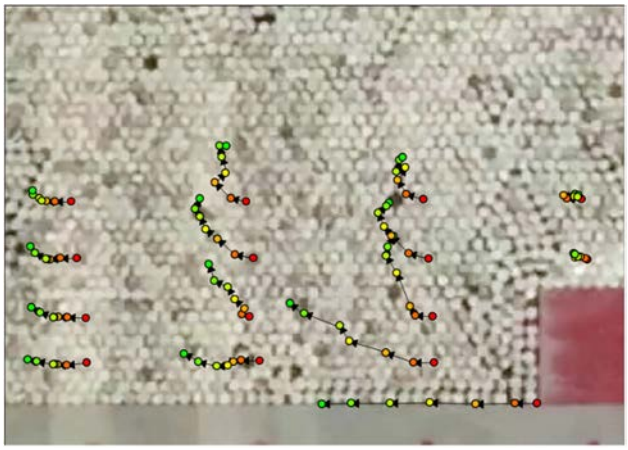


図-12　継手板Ｂ（長方形薄板）ケースにおける土粒子の軌跡

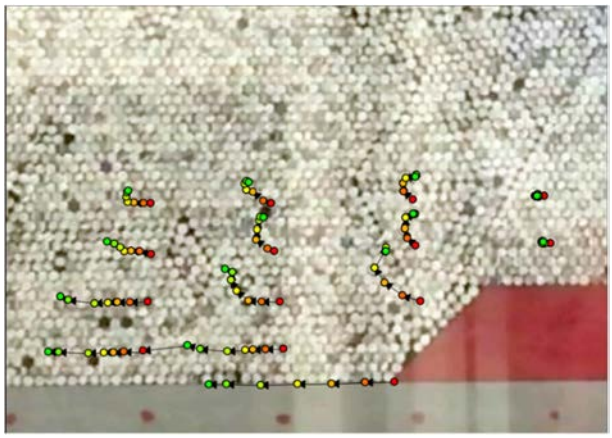


図-14　継手板Ｄ（台形薄板）ケースにおける土粒子の軌跡

き（図左上側）に変位した後，継手板がその直下を通過すると後方（図右側）に移動しており，全体でみると時計回りに渦を巻いていることがわかる．とくに，継手板近傍で前方にあるマーキング土粒子の軌跡の渦は大きく，鉛直上方向に大きな変位が発生している．このことから，継手の張り出し部の摩擦抵抗は，継手部前面での粒子の垂直変位により，底板のせん断面での地盤拘束圧力が増加したためと考えられる．竹本ら[3]の数値解析による考察を実験模型を用いて可視化させることができた．

継手板の厚さの違いについて比較すると，厚板である継手板ＡとＣでは，継手板前方の土粒子がすぐに上方向に移動せず，水平方向に移動し続けている土粒子が多い．これら水平方向に移動する土粒子は継手板前方を押し続けるので，その分摩擦抵抗が大きくなるといえる．一方，薄板である継手板ＢとＤでは早くに上方向に移動して継手板をすり抜けるような土粒子が多い．このことから，薄板の摩擦係数は前述したように底板のみの摩擦係数と明瞭な差が出ないと考えられる．

台形継手板と長方形継手板とを比較すると，台形形継手板の前方では土粒子が密に配置され，底板のせん断変位に応じて継手板に勾配があるために鉛直上方向に土粒子が移動しやすくなる．一方，長方形継手板の形状は鉛直方向の動きを妨げ，土粒子が他の土粒子の上を通過した後に，変位が起こることが確認できる．このため，前述の摩擦係数で見られたように長方形継手板ではピークを有するのに対して台形継手板では変位に応じてなめらかに摩擦係数が上昇することになったと考えられる．

本研究によって継手板周辺の土粒子の鉛直，水平移動については一部のマーキング土粒子に限るが把握することができた．実際には，土粒子自体が回転していることもある．本分析ではその挙動については追えないが，数値解析によって今後確認することは可能である．

5.　まとめと課題

本研究では，せん断変位を与えた時の管の張出し部周辺の土粒子の動きを把握するために，管と土粒子を二次

元断面に置き換えた模型にせん断変位を与える実験を行い，継手張り出し部周辺の土粒子の動きから摩擦機構について分析を行った．本研究の結果をまとめて以下に示す．

- 地盤と管の間にせん断面に継手張り出し部がある場合，張り出し部の管厚が厚く，形状が台形よりも長方形になれば，継手がない場合の摩擦係数に対して最大３倍に増加した．
- 継手張り出し部の厚さが薄ければ，管軸方向の摩擦抵抗に影響しない．
- 継手張り出し部の厚みは同じでも，形状が長方形よりも台形の方が摩擦抵抗の変動は小さい．
- 継手板のせん断変位により，継手板前方の土粒子は渦を描きながら前方上方向に移動することがわかった．　継手張り出し部による摩擦抵抗の増加の原因は，継手板前方での土粒子が垂直上方向に変位することより，せん断面の拘束圧が増加することが原因と考えられる．

本研究の結果より，同じ厚みでも形状により摩擦係数が異なることが明らかになった．本研究を発展させると，継手張り出し部の形状を工夫することにより，管路に作用する摩擦力を低減することができる．また，本研究では，直径が均一なアルミ棒を使用した．粒径の異なるアルミ棒を混合させるなど，より密な土粒子構造のケースが検討できるため，様々な実験ケースを検討する必要がある．

また，本研究の模型実験をもとに数値解析でシミュレーションすることができれば，様々なケースをより詳細に分析することができるので，今後取り組みたい．

参考文献

1) （社）日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針，2000.
2) 小林実央，安藤広和，小口憲武：埋設管に作用する軸方向地震時地盤拘束力に及ぼす地盤の速度と繰り返し変位の影響, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 299-312, 1998.
3) 竹本幸四郎， 澤田純男， 後藤浩之: 数値解析に基づく粒状体のせん断抵抗の速度依存性に関する考察，土木学会関西支部年次学術講演会，2016.
4) （社）日本ガス協会：中低圧ガス導管耐震設計指針，2013.
5) 鍬田泰子，稲瀬友樹，澤田純男：振動台を用いた管　軸方向地盤ばねの速度依存に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol. 73，No. 4，I_376‐I_384，2017.
6) 鍬田泰子，稲瀬友樹，澤田純男：振動台を用いた管軸方向地盤ばねの速度依存に関する実験的研究（その 2），土木学会論文集 A1，Vol. 74，No. 4，I_568‐I_577, 2018..
7) 西川源太郎，塩浜裕一，鈴木剛史，大沼博幹，清野純史：水道配水用ポリエチレン管の地震動に対する耐震性評価に関する研究，土木学会論文集 A1，Vol. 72，No. 4，I_424‐I_433，2016.

VISUALIZATION Of FRICTION MECHANISM AT JOINT PART OF PIPE USING SOIL PARTICLE MODEL

Yu YAMAMURA and Yasuko KUWATA

In the guideline for seismic design of buried pipes, the characteristics of the ground spring, which represents the dynamic interaction between the pipeline in the pipe axial direction and the ground, are important for evaluating the seismic resistance of the buried pipe under the seismic forces. The ground spring characteristic in the pipe axial direction is modeled as a bilinear type in which slip occurs between the pipe and the soil if the shear stress exceeds a certain limit. However, the buried pipe has joints, and the frictional force in the pipe axial direction includes the frictional resistance due to the joint’s overhanging part, but their modeling has not been sufficiently studied. In this study, in order to understand the movement of soil particles around the joint when shear displacement is applied, an shear deformaion experiment in which the pipe and the soil particles are replaced by a two-dimensional cross section is carried out. The movement of soil parices was visualized and the friction mechanism was clarified microscopically.