

平成 30 年 8 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289144

研究課題名(和文)速度依存・変位依存の摩擦構成モデルに基づく地中埋設管の地震時歪評価法の開発

研究課題名(英文)Development of strain evaluation on buried pipeline during earthquakes on the basis of velocity/displacement dependent reaction force

研究代表者

澤田 純男 (Sawada, Sumio)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：70187293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、砂地盤に埋設された管路が地震時に受ける摩擦抵抗力を評価するため、砂地盤と埋設管との間に働く引き抜き抵抗力について研究するものである。特に、摩擦が引き抜き速度に依存することが過去の研究で観察されていたが、そのメカニズムを明らかにする研究がなかったことから、摩擦の速度依存メカニズムを実験的に検討した。砂地盤を模したアクリル円柱の粒状体による要素試験、および砂地盤を対象とした実試験の双方で、摩擦の速度依存性がある条件下で発生することが認められた。また、数値解析(DEM)による分析により、そのメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research project aimed to study the reaction force between sand ground and buried pipe in order to evaluate the friction acting on the buried pipe during the earthquakes. In particular, it has been observed in past research that the friction depends on drag speed, however the mechanism of the dependence has not been clear. We found the similar phenomenon via both the element test by granular materials consisting of acrylic cylinder and actual test by sand box. The mechanism was clarified by numerical analysis (DEM).

研究分野：地震工学

キーワード：地中埋設管 摩擦則 光弾性実験 個別要素法 ライフライン

### 1. 研究開始当初の背景

ガスや水道等のライフラインでは、地中埋設管の地震被害を軽減することが求められている。しかし、地中埋設管の地震時挙動を支配する管路と地盤との摩擦特性については十分明らかにされておらず、結果として地中埋設管の地震挙動解析の多くは、単純なクーロン摩擦が用いられているのが現状である。

管路の摩擦特性に関するいくつかの先行研究があるが、特に島村らによる研究により、管路に働く最大摩擦力は、管路の引き抜き速度に依存し、速度が大きいくほど強い引き抜き抵抗となることが示された。速度依存型の摩擦は、当然ながら現状の耐震設計では考慮されておらず、またその発生メカニズムも明らかにされていない。このため、適切な摩擦モデルの設定ができない状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究は、砂地盤と埋設管との間に働く摩擦について、要素試験、実材料の試験、および数値解析を用いてその発生メカニズムを明らかにするものである。特に、引き抜き速度に依存する速度依存型の摩擦が発生するメカニズムについて、その原因を明らかにすることを旨とする。

### 3. 研究の方法

まず、アクリル円柱を用いた粒状体の光弾性試験を行うことで、摩擦を生じる微細なメカニズムを把握する。その上で数値解析（個別要素法）により、そのメカニズムの本質を明らかにする。並行して砂地盤と管路の引き抜き摩擦に関する試験を実施し、想定したメカニズムで速度依存性が生じるかを確認する。その後、速度依存性を組み込んだ摩擦モデルにより管路の応答解析を行い、その影響について検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) アクリル円柱による光弾性試験

砂地盤と管路との間に働く摩擦は、本質的には砂の粒状体としての振る舞いにより生じるものと考えられる。速度依存性もまた粒状体による挙動が本質的であると考えられるため、アクリル円柱による光弾性試験によりこれを把握することを試みた。本研究で構築した試験装置（図1）は、アクリル円柱の集合体に上面から上載圧をかけた状態で下面を速度一定の下でスライドさせて摩擦試験をするものである。この時、装置背面から偏光させた青色単色光を透過させることで、アクリル円柱のひずみを観察することができる（図2）。

実験では、直径10mmと20mmのアクリル円柱をそれぞれ120本、30本用いてこれらを混合し、アクリル円柱の集合体を作成する。これを高速（2mm/s）、低速（0.2mm/s）で引き抜いたところ（図3）、高速に引き抜く方が短

い引き抜き変位でピーク値に達することが確認された。またこの時のアクリル円柱の振る舞いを確認したところ、低速な引き抜きほどアクリル円柱の水平変形が上部にも推移することが確認された。すなわち、粒状体としての振る舞いの違いが、マクロな摩擦力の違いとして現れる可能性が示された。

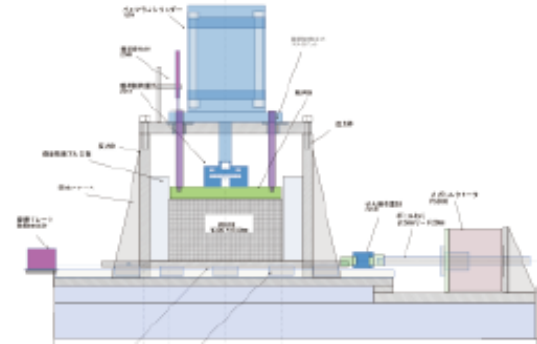


図1 光弾性実験装置の概要

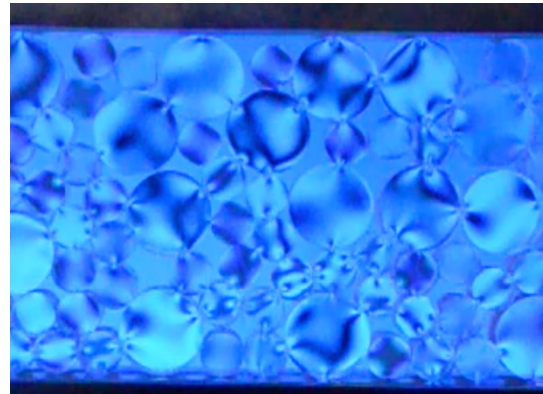


図2 光弾性実験で捉えた応力鎖の例

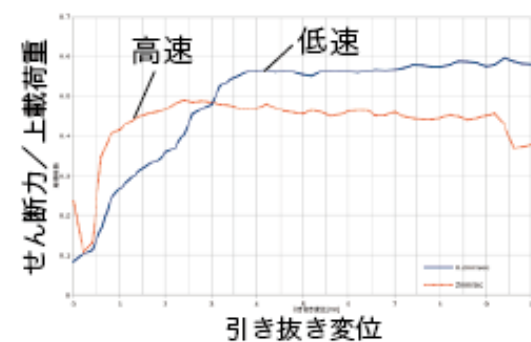


図3 引き抜き試験の結果

#### (2) 個別要素法による数値解析

光弾性実験では、粒子それぞれの動き、および接触点の推移を観察することはできるが、具体的にそれぞれの粒子がどのように力を受けているかを抽出することは難しい。そこで、光弾性実験を再現するための数値解析を実施し、そのメカニズムを考察した。

粒子それぞれの振る舞いを具体的にモデ

ル化する個別要素法を用いる。粒子間の摩擦は、事前の要素試験の結果、速度依存性を示さないため、単純なクーロン摩擦を仮定する。数多くの粒子からなる粒状体に対し、光弾性実験と同様の境界条件を設定して引き抜き試験を実施したところ、速度に依存した引き抜き抵抗力が測定された。高速に引き抜くほど、抵抗力のピークが明瞭となる傾向にあること、またピークの発現は上面の体積膨張の発現に先行することが確認された（図4）。

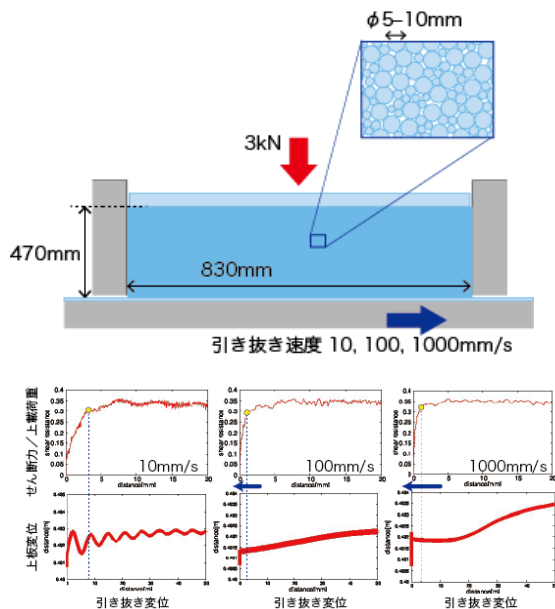


図4 数値解析結果の一例

体積膨張はダイラタンシーによるものであるため、ダイラタンシーの発現と抵抗力に関連があると推察される。ダイラタンシーはせん断変形が卓越する下面付近で生じるが、全体の体積膨張が完了するまで拘束圧は上昇する。拘束圧の上昇が解消されるまでのタイムスケールは、粒状体の厚さにより定まるため、引き抜き速度が速いほど拘束圧が解消されずに摩擦面に法線応力の増加として寄与する。このために、高速に引き抜くほど大きな摩擦抵抗力になるものと考えられる。言い換えれば、正のダイラタンシーが生じるような地盤が密に締固められているような条件において、速度依存性が発現しやすいことが予想される。

### (3) 砂地盤の引き抜き試験

既往の研究で摩擦の速度依存性は明らかになっているものの、その発生の条件は未だ不明確である。そこで、砂地盤に埋設された管路の引き抜き試験を様々な条件下で実施することで、その発生条件を検討した。

引き抜き試験は、管路に働く慣性力がロードセルの測定値に含まれることを防ぐため、管路を固定し、砂箱を振動台で移動させることによって引き抜き力の測定を行った（図5）。地盤材料は、掛津古砂、光明寺砂、またそれ

らの混合土とし、十分締め固めた地盤を用いた。

図6は、混合土における試験結果を整理したものである。与える変位をおおよそ正弦波で与えた場合（低速：DIP-S3-L，高速：DIP-S3-H），高速のケースほど抵抗力が低くなる結果が得られた。これは、初速時に相当大きな速度が働くことで砂粒子の噛み合わせが大きく乱れてしまうこと、またこれは現実的な状況ではないと考えられることから、速度を正弦波として与える（低速：DIP-S3-0.2，中速：DIP-S3-0.5，高速：DIP-S3-1）。この結果、速度の大きなケースほど引き抜き抵抗力が大きいことが示された。

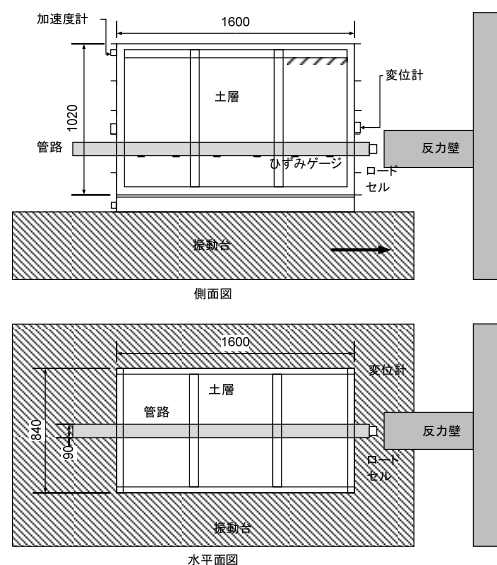


図5 実験装置の概要

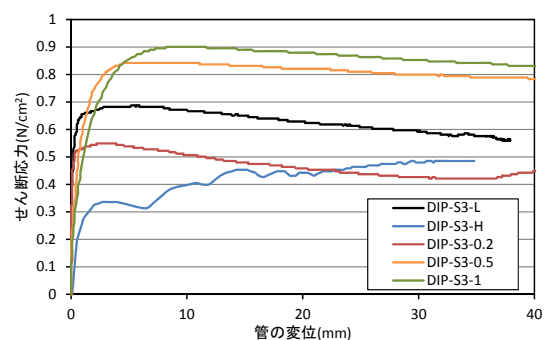


図6 作用速度の違いによる抵抗力の比較

(4) 速度依存性を考慮した埋設管の応答解析  
要素試験／砂地盤試験結果より、埋設管に働く摩擦力が速度依存性を示す場合があることが明らかとなった。このような速度依存性はこれまで管路の応答解析に考慮されていなかったことから、その影響の程度を明らかにする必要がある。管路に変形が生じるためには、管路の延長方向に一様でない波動場

を仮定する必要がある。ここでは、斜め入射を仮定することで生じる管路の変形について検討した。

速度依存性の摩擦力を実験値からモデル化し、これを地盤と管路の相対速度に比例するものとして解析モデルに導入した。速度依存性を考慮しない結果と比較したところ、依存性を考慮することにより管路に働くモーメントの発生が抑制される傾向にあることが明らかとなった。すなわち、速度依存性の効果が大きいと管路の応答を抑える効果が見られる。

この結果は、地震動が斜め入射する場合の結果であるため、例えば異なる地盤を貫くように埋設された管路であれば、管路のすべりが抑制され、より大きな歪みが生じる可能性も考えられる。このような多様な分析／検討は今後の課題である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① 稲瀬友樹, 鋏田泰子, 澤田純男, 振動台を用いた管軸方向地盤ばねの速度依存性に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, 73 巻, 2017, I\_376-I\_384

[https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I\\_376](https://doi.org/10.2208/jscejseee.73.I_376)

② 豊増明希, 後藤浩之, 澤田純男, 高橋良和, 平成 28 年熊本地震における御船 IC 大速度記録の原因分析, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, 印刷中。

[学会発表] (計 5 件)

① 高屋俊康, 後藤浩之, 澤田純男, 光弾性実験に基づく砂地盤と埋設管との摩擦の速度依存メカニズムに関する一考察, 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2015 年。

② 竹本幸士郎, 澤田純男, 後藤浩之, 数値解析に基づく粒状体せん断抵抗の速度依存性に関する考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016 年。

③ 吉田望, 澤田純男, 後藤浩之, 斜め入射を受ける地中線状構造物の解析の比較, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017 年。

④ 稲瀬友樹, 鋏田泰子, 澤田純男, 振動台を用いた埋設管路引抜き実験による地盤摩擦力の速度依存性に関する研究, 平成 29 年度全国会議 (水道研究発表会), 2017 年。

⑤ 鋏田泰子, 稲瀬友樹, 澤田純男, 速度依存性を考慮した管引抜き実験による管軸方向地盤ばねのモデル化, 第 37 回地震工学研究発表会, 2017 年。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

澤田 純男 (SAWADA, Sumio)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号: 7 0 1 8 7 2 9 3

### (2) 研究分担者

鋏田 泰子 (KUWATA, Yasuko)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 5 0 3 7 9 3 3 5

吉田 望 (YOSHIDA, Nozomu)

関東学院大学・総合研究推進機構・教授

研究者番号: 5 0 4 0 5 8 9 1

古川 愛子 (FURUKAWA, Aiko)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 0 0 3 8 0 5 8 5

高橋 良和 (TAKAHASHI, Yoshikazu)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 1 0 2 8 3 6 2 3

後藤 浩之 (GOTO, Hiroyuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 7 0 4 5 2 3 2 3

渦岡 良介 (UZUOKA, Ryosuke)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号: 4 0 3 3 3 3 0 6

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

高屋 俊康 (TAKAYA, Toshiyasu)

竹本 幸士郎 (TAKEMOTO, Koshiro)

稲瀬 友樹 (INASE, Tomoki)