



# A Study on Lateral Displacement Behavior of Buried Pipe in Liquefied Soil

Ono, Kohei

---

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2017-09-25

(Date of Publication)

2018-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6990号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006990>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



別紙様式3 (博士論文審査等内規第2条関係)

## 博士論文内容の要旨

氏名 小野 耕平

専攻・講座 食料共生システム学専攻・生産環境工学講座

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

### A Study on Lateral Displacement Behavior of

### Buried Pipe in Liquefied Soil

### 液状化地盤内における埋設管の水平変位挙動に関する研究

指導教員 河端 俊典

農業用管水路は、農作物の生産に不可欠な用水を長距離に渡り配水する重要な農業用水利施設である。管水路は、水源から圃場に掛けて、複雑な地形に沿って敷設されるため、圧力送水により効率的な分配がなされる。そのため、管水路の屈曲部や分岐部には、水流による遠心力や水圧の不均衡により、スラスト力と呼ばれる外力が常時作用することが知られている。スラスト力による埋設管路の滑動に対する安定性は、管路を支える受働土圧とスラスト力の比で定義される安全率により簡易的に評価されている。

しかしながら、地震に伴い発生する埋戻し地盤の液状化により、管路屈曲部での継手離脱等の被災が相次いでおり、その地震時安定性には大きな課題が残っている。埋設管路の安定性を評価し、各種対策の要否を検討する上では、周辺地盤との相互作用により決定される管路移動量を定量的に予測することが重要であるものの、地盤抵抗力が著しく低下する液状化時における移動量の予測手法は確立されていない。また、安全率に基づいた現行設計は、塑性平衡状態を対象とした評価手法であり、管路の移動に伴う受働土圧の変化を一切考慮していない点から合理的な設計手法であるとはいえない。さらに、液状化の発生が予想される地盤では、有効応力が著しく低下するため、管の変位量と水平抵抗力の関係性は全く解明されていない。

以上の観点から、周辺地盤との相互作用を考慮した液状化時の埋設管路の水平変位特性を解明することにより、合理的な設計手法を提案することを本研究の目的とした。初期有効応力を変化させた飽和地盤内で模型管の水平載荷実験を実施し、間隙水を考慮した2次元個別要素法解析を用いて数値シミュレーションを行った。

本論文は、全7章から構成されている。各章の要旨を以下に示す。

第1章では、研究背景として、農業用管水路の概要についてまとめ、その液状化被害、及び現在の設計基準について概説した。現行設計の抱える課題について指摘するとともに、本研究課題の目的を示した。

第2章では、関連する既往研究について概説した。埋設管及び鉛直アンカーの地中挙動を取り扱った研究に関して、埋設地盤条件に応じて分類した。また、スラスト力に対抗する防護工法と埋戻し地盤を対象とした液状化対策に関する研究事例について示した。

第3章では、小型の模型実験について示し、液状化に伴い地盤の有効応力が低下した際の埋設管の変位特性について検討した。上向き浸透流により有効応力を任意に変化させた飽和地盤内で、模型管に水平変位を与えた。実験結果より、地盤の水平抵抗力は、過剰間隙水圧比に対して線形に変化することなどが明らかとなった。さらに、載荷速度を変化させた実験から、水平抵抗力の速度依存性に関する検討を行った。飽和地盤では、管の移動速度の増加に伴い、管側方受働側地盤の過剰間隙水圧が上昇することが明らかとなり、管の移動により局所的に有効応力が低下する可能性が示された。一方、上向き浸透流により過剰間隙水圧比を1.0近くまで上昇させた地盤では、載荷速度の増加に応じて水平抵抗力が増加することが明らかとなった。

第4章では、小型模型実験で得られた結果を踏まえ、より大型の実験土槽を用いた模型

(氏名： 小野 耕平 No.2)

管の水平載荷実験についてまとめた。荷重制御と変位制御による二通りの方法で模型管に水平変位を与え、より定量的な評価を試みた。実験結果の比較から、埋設管の水平変位特性は、載荷方法に依存しないことが示された。また、模型地盤全域での間隙水圧の計測や、PIV解析を用いた地盤粒子の変位ベクトルの算出により、埋設管の水平変位に対する周辺地盤の移動特性を視覚的に明らかにした。さらに、碎石置換による液状化対策効果、及びジオグリッドを併用したスラスト対策工法に関して実験的な検討を行った。実験結果から、碎石による過剰間隙水圧の消散効果、及びジオグリッドによる管周辺地盤の一体化効果が確認され、液状化時のスラスト対策効果が検証された。

第5章では、第4章で行った模型実験に対する間隙水を考慮した個別要素法による二次元数値シミュレーションについて記した。地盤粒子と間隙水の相互作用は、解析モデルを固体層と液体層に分割することで考慮し、上向き浸透流を流体格子間の水圧勾配で表現することにより、地盤粒子間接触力の低下を再現した。水平載荷シミュレーションにより得られた様々な有効応力下の変位-抵抗力曲線は、実験結果と精度良く一致した。また、地盤粒子の接触力や移動量の分布図から、管の変位に伴う地盤の変形メカニズムを明らかにした。管の変位に伴う間隙比及び過剰間隙水圧の変動に関しても信頼性の高い結果が得られ、本解析の妥当性が検証された。

第6章では、模型実験により得られた変位と抵抗力の関係に対して、双曲線近似による定式化を図った。無次元化した変位-抵抗力曲線に対して双曲線近似を施した結果、地盤有効応力の低下は、関係曲線の初期勾配に影響を及ぼすことが明らかとなった。また、最大水平抵抗力は、既往研究で提案された支持力係数と、過剰間隙水圧を考慮した地盤の有効単位体積重量を用いて算定できることが明らかとなり、埋設深や管径等の各種埋設条件を考慮した変位-抵抗力関係の予測式を構築した。さらに、以上で求めた変位と抵抗力の関係式を用いて、地盤有効応力の変化を考慮した限界状態設計法について提案した。

第7章では、第3章から第6章で得られた結論をとりまとめ、今後の課題について示した。

氏名	小野 耕平		
論文題目	A Study on Lateral Displacement Behavior of Buried Pipe in Liquefied Soil (液状化地盤内における埋設管の水平変位挙動に関する研究)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	河端 俊典
	副査	教授	田中 勉
	副査	准教授	井上 一哉
	副査		
副査			印
副査			印
要 旨			

農業用管水路は、食料の生産に不可欠な農業用水を長距離に渡り配水する重要な農業用水利施設である。管水路は、水源から圃場に掛けて複雑な地形に沿って敷設されるため、圧力送水により効率的な分配がなされる。そのため、管水路の屈曲部や分岐部には、水流による遠心力や水圧の不均衡により、スラスト力と呼ばれる外力が常時作用することが知られている。スラスト力による埋設管路の滑動の有無は、管路を支える受働土圧とスラスト力の比により簡易的に評価されているものの、近年頻発する大地震に伴う液状化の発生により、管路屈曲部における継手離脱等の被災が相次いでおり、その地震時安定性には大きな課題が残っている。埋設管路の安定性を評価し、各種対策の要否を検討する上では、周辺地盤との相互作用により決定される管路移動量を定量的に予測することが重要であるものの、地盤抵抗力が著しく低下する液状化時における移動量の予測手法は確立されていない。

また、安全率に基づいた現行設計基準は、静的な条件を前提とした塑性平衡状態における評価手法であり、管路の移動に伴う受働土圧の変化を一切考慮していない点から合理的な設計手法であるとはいえない。さらに、液状化の発生が予想される地盤では、有効応力の低下に伴い管の変位量と水平抵抗力の関係性が著しく変化するため、合理的な限界状態設計法を検討する意義は大きい。

以上の観点から、周辺地盤との相互作用を考慮した液状化時の埋設管路の水平変位特性を解明することにより、合理的な設計手法を提案することを本研究の目的とした。初期有効応力を変化させた飽和地盤内で模型管の水平載荷実験を実施し、また、間隙水を考慮した2次元個別要素法解析を用いて数値シミュレーションを行った。

本論文は、7章から構成されており、各章の要旨は以下のとおりである。

第1章では、研究背景として、農業用管水路の概要についてまとめ、その地震時液状化被害、及び現在の設計方針について概説した。現行設計の抱える課題について指摘するとともに、本研究課題の目的を示した。

第2章では、関連する既往研究について概説した。埋設管及び鉛直アンカーの地中挙動を取り扱った研究に関して、埋設地盤条件に応じて分類した。また、スラスト力に対抗する防護工法と埋戻し地盤に関する液状化対策に関する研究事例について示した。

第3章では、液状化地盤内における埋設管の変位特性について基礎的な知見を得る目的で、小型の模型実験を実施した。上向き浸透流により有効応力を任意に変化させた飽和地盤内で、模型管に水平変位を与えた。実験結果より、地盤の水平抵抗力は、過剰間隙水圧比に対して線形に変化することなどが明らかとなった。さらに、載荷速度を変化させた実験から、水平抵抗力の速度依存性に関する検討を行った。飽和地盤では、管の移動速度の増加に伴い、管側方受働側地盤の過剰間隙水圧が上昇することが明らかとなり、管の移動により局所的な液状化が発生する可能性が示された。一方、液状化地盤においては、載荷速度の増加に応じて水平抵抗力が増加することが明らかとなった。

氏名

小野 耕平

第4章では、小型模型実験で得られた結果を踏まえ、各種改良を加えた実験土槽を用いて模型管の水平載荷実験を遂行した。荷重制御と変位制御の二通りの方法で模型管に水平変位を与え、より定量的な評価を試みた。実験結果の比較から、地盤の有効応力、水平変位量、及び水平抵抗力の関係は、水平変位の与え方に依存しないことが示された。加えて、模型地盤全域における過剰間隙水圧の計測や、PIV解析を用いた地盤粒子の変位ベクトルの算出により、埋設管の水平変位に対する周辺地盤の移動特性を視覚的に明らかにした。さらに、砕石置換による液状化対策効果、及びジオグリッドを併用したスラスト対策工法に関して実験的な検討を行った。実験結果から、砕石による過剰間隙水圧の消散効果、及びジオグリッドによる管周辺地盤の一体化効果が確認され、液状化時においても一定のスラスト対策効果が得られた。

第5章では、第4章で行った模型実験に対して、間隙水を考慮した個別要素法による二次元数値シミュレーションを実施した。地盤粒子と間隙水の相互作用は、解析モデルを固体層と液体層に分割することで考慮し、上向き浸透流を流体格子間の水圧勾配で表現することにより、地盤粒子間接触力の低下を再現した。水平載荷シミュレーションにより得られた様々な有効応力下の変位-抵抗力曲線は、実験結果と精度良く一致した。また、地盤粒子の接触力や移動量の分布図は、管の変位に伴う地盤の変形メカニズムを明らかにした。管の変位に伴う間隙比及び過剰間隙水圧の変動に関しても信頼性の高い結果が得られ、境界値問題に対する本解析の適用可能性が示された。

第6章では、模型実験により得られた変位と抵抗力の関係に対して、双曲線近似による定式化を図った。無次元化した変位-抵抗力曲線に対して双曲線近似を施した結果、地盤有効応力の低下は、関係曲線の初期勾配に影響を及ぼすことが明らかとなった。また、最大水平抵抗力は、既往研究で提案された支持力係数と、過剰間隙水圧を考慮した地盤の有効単位体積重量を用いて算定できることが明らかとなり、埋設深や管径等の各種埋設条件を考慮した変位-抵抗力関係の予測式を構築した。さらに、この変位と抵抗力の関係式を用いて、地盤有効応力の変化を考慮した埋設管の限界状態設計法について提案した。

第7章では、第3章から第6章で得られた結論をとりまとめるとともに、今後の課題について述べている。

上記の通り、本研究は、農業用水利施設に対する近年の防災意識の高まりの中で、液状化地盤中における埋設管路について、その水平方向挙動を研究したものであり、数多くの重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の 小野耕平は、博士（農学）の学位を得る資格があると認める。