

# 液状化地盤における電柱のドレーン化による地震時変状抑制効果の数値解析的検証

電柱, 液状化対策, 地震応答解析

名古屋大学

○中井 健太郎, 野田 利弘, 鈴木 春香

電力中央研究所

石丸 真

東京電力ホールディングス

伊藤 広和

## 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震をはじめとして, 巨大地震発生時に地盤の液状化に伴う電柱被害(傾斜・沈下・ひび割れ)が数多く発生している. 電柱に対する対策としては, 根柢工法やグラベルドレーン工法が挙げられるが, 前者は液状化地盤に対する適用性は十分検証されていないこと, 後者は住宅などの狭隘箇所への施設が困難である等の問題を抱えている. このような背景のもと, 電柱に対する新しい耐震対策工法として, 鉄筋コンクリート製の電柱内部の中空部を利用して排水する工法が検討されている. すなわち, 電柱地中部にフィルタ付きのドレーン孔を設けることで, 地震時に生じる過剰間隙水圧を早期に消散させ, 電柱周囲の地盤の剛性低下を抑制する工法である. 前報<sup>1)</sup>では, その工法の適用性検証として実施した遠心力模型実験結果について報告し, 電柱をドレーン化することによって, 液状化地盤の電柱の沈下・傾斜に対して一定の効果があることを実証した. 本報では, 同様の条件を模擬した数値解析によって, 電柱ドレーン化の対策効果をより詳細に検証する. 用いた解析コードは, 砂から中間土, 粘土までを同じ理論的枠組で記述し, 地震中だけでなく地震後の変形・破壊挙動をも対象にする水～土骨格連成有限変形解析コード<sup>2),3)</sup>である.

## 2. 解析条件

### 2.1 解析モデル

本解析の目的は, 遠心力模型実験の忠実な再現ではなく, 電柱地中部ドレーン化による対策効果を数値解析的に検証することにある. ここでは, 重力場を想定した実スケールでモデル化した. また, 遠心力模型実験の加振方向が水平方向であることを踏まえ, 簡易的に二次元平面ひずみ条件での地震応答解析を実施した. 解析モデルの概要図を図1に示す. 地盤は遠心力模型実験と同様に, 支持層と緩く堆積した液状化層の2層を想定した.

下端面は不透水層の存在を考慮して, 両側面と合わせて非排水境界としている. 本解析コードでは飽和地盤を対象とするため, 遠心力模型実験で設定した1m分の不飽和土層の存在を, 地表面に鉛直荷重 $20\text{kN/m}^2$ 作用させることで模擬した. 両側面の同一高さの全節点に等変位条件を与え, 周期境界を設けた. 入力地震動を図2に示す. 遠心力模型実験に用いた入力波と等しく, 東北地方太平洋沖地震の際にK-net浦安で観測された地震動を基盤まで引き戻し, 加速度レベルおよび本震と余震のインターバルを調整した波形である. 地震入力時は地盤底面全節点の水平方向に $V_s=400\text{m/s}$ に相当する粘性境界を設定し, 加速度を等しく入力した.

### 2.2 材料定数

地盤の材料定数は, 遠心力模型実験と同様, 谷ら<sup>4)</sup>の研究を参考とした(詳細は省略). 支持層は, 液状化層と同じ材料だが, 密な状態としている. 電柱の材料定数は図1中に示している. 本解析は, 二次元平面ひずみ条件での解析であるため, 電柱はある幅を持った壁体としてモデル化される. そこで, 電柱単体の固有振動数は遠心力模型実験(実物換算値)と等しい $1.5\text{Hz}$ となるように材料定数を換算した(剛性は加振方向に対して等価, 密度は単

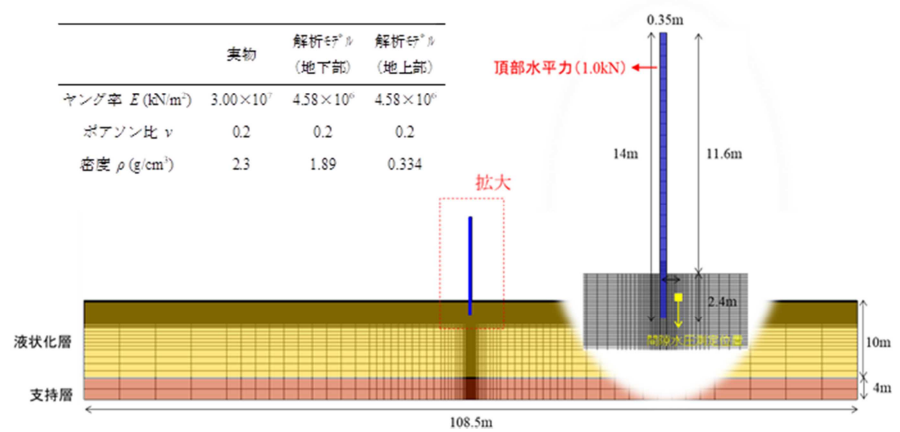


図1 有限要素メッシュと解析モデル

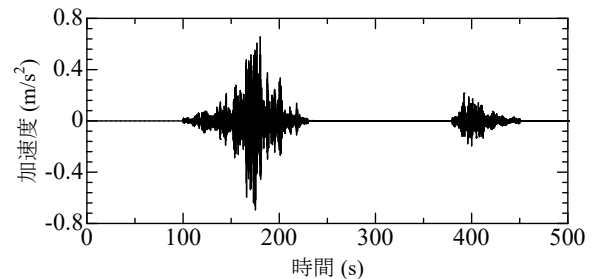


図2 入力地震動

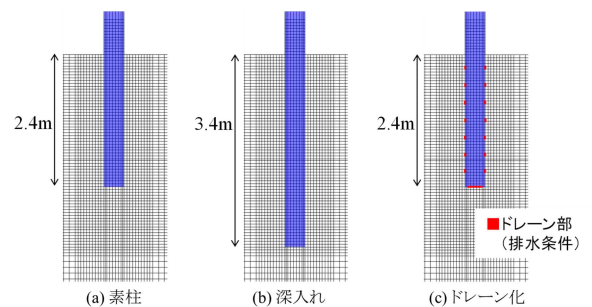


図3 解析ケース

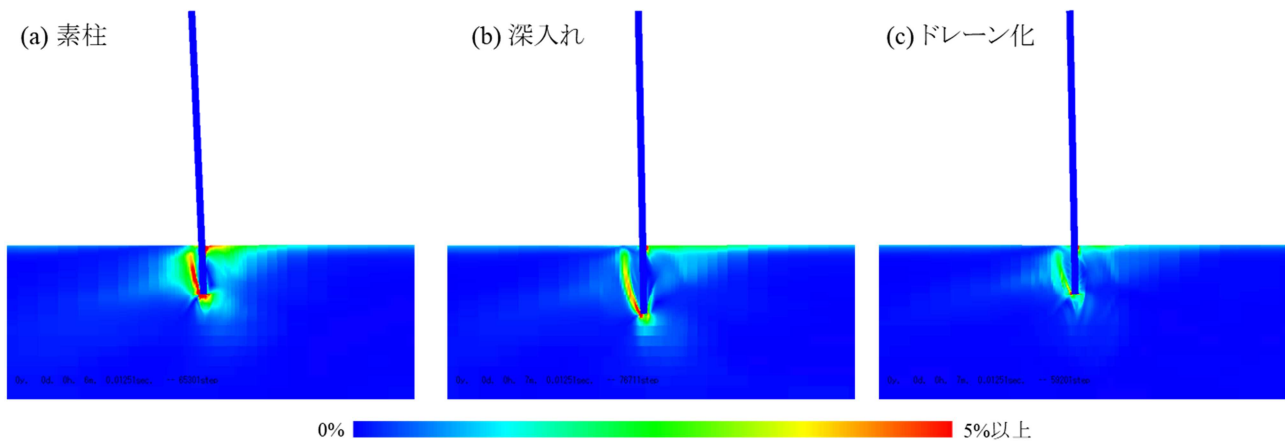


図4 せん断ひずみ分布 (地震入力から 500 秒後)

位奥行き幅当たりの重量が等しくなるように換算)。また、遠心力模型実験と同様に、頂部水平力を死荷重として加えた。

### 2.3 解析ケース

本解析では、対策なしの素柱 (根入れ 2.4m)、深入れ (根入れ 3.4m)、底部・側面ドレーン化 (根入れ 2.4m) の 3 種類の電柱を対象とした。解析におけるモデル化を図 3 に示す。遠心力模型実験におけるドレーン部の透水性は、地盤に比べて十分に大きいことを踏まえて、ドレーン部は簡易的に当該要素の辺を排水条件 (水圧は常に静水圧) とすることで再現した。

### 3. 解析結果

地震入力から 500 秒後のせん断ひずみ分布を図 4 に、電柱頂部における傾斜角の時刻歴変化を図 5 に示す。(a)素柱の場合、電柱底部から地表面に向かってせん断ひずみが卓越し、電柱周りの地中部で大きい。(b)深入れは、電柱底部でせん断ひずみが大きいものの、地表面では大きく低減している。傾斜角を見ると、(a)素柱は本震で大きく傾斜した後で余震中にさらに傾斜するが、(b)深入れは根入れ部の拘束効果によって、本震時・余震時の傾斜が大きく抑制される。また、(c)ドレーン化の場合、地盤内で発生するせん断ひずみおよび電柱の傾斜角は(b)深入れと同様小さい。電柱ドレーン化の対策効果を把握するために、電柱周囲 (計測値点は図 1 中に記載) の過剰間隙水圧比を図 6 に示す。(a)素柱、(b)深入れの場合、地震発生直後から過剰間隙水圧比が上昇し、主要動付近 (地震入力から 170 秒後) に達すると過剰間隙水圧比が 1.0 となって地盤は液状化している。また、本震一余震間隔が短いため、過剰間隙水圧が消散せずに液状化状態が継続している。一方、(c)ドレーン化の場合、過剰間隙水圧が蓄積しにくいいため、地震入力直後の過剰間隙水圧比の上昇が緩やかであることに加えて、主要動付近でも液状化にまでは達しない (過剰間隙水圧比は 1.0 以下)。さらに、本震終了後はドレーン効果で過剰間隙水圧比が 0.5 程度まで減少して、地震後すぐに地盤が剛性回復している。このため、図 5 を見ると、液状化状態が継続している(a)素柱、(b)深入れの場合、余震中に傾斜量がほとんど振動していないが、(c)ドレーン化の場合は地盤が液状化せず剛性を保つので、余震中にも振動する。なお、紙幅の都合上、本報では傾斜角に着目したが、電柱の沈下量についてもドレーン化によって低減できていた。

このため、図 5 を見ると、液状化状態が継続している(a)素柱、(b)深入れの場合、余震中に傾斜量がほとんど振動していないが、(c)ドレーン化の場合は地盤が液状化せず剛性を保つので、余震中にも振動する。なお、紙幅の都合上、本報では傾斜角に着目したが、電柱の沈下量についてもドレーン化によって低減できていた。

### 4. まとめ

電柱に対する新しい耐震対策工法として、地中部電柱ドレーン化工法に対する数値解析的検証を行った。地震中の過剰間隙水圧の上昇を抑制している点、剛性の回復により頂部の揺れ(傾斜)が大きくなっている点など、数値解析結果は遠心力模型実験とよい整合性を示しており、電柱ドレーン化によって液状化地盤の電柱の変状抑制効果があることを確認した。今後は三次元解析を実施し、入力地震動特性の影響等を検討していく。

**参考文献** 1) 石丸真ら(2020): 液状化地盤における電柱のドレーン化による地震時変状抑制効果に関する遠心力模型実験, 第 55 回地盤工学研究発表会概要集, 投稿中. 2) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57. 3) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *S&F*, **48**(6), 771-790. 4) 谷和夫ら(2014): 浅層盤状改良工法による戸建て住宅の液状化被害軽減効果の検証と経済性評価, *地盤工学ジャーナル*, **9**(4), 533-553.

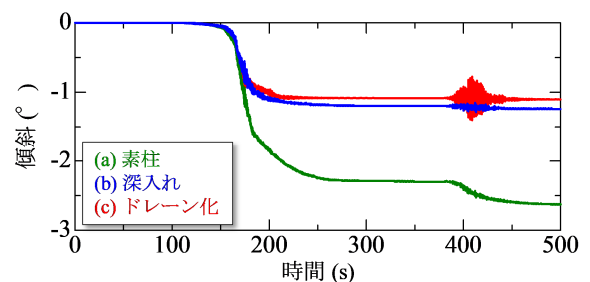


図5 電柱頂部の傾斜量

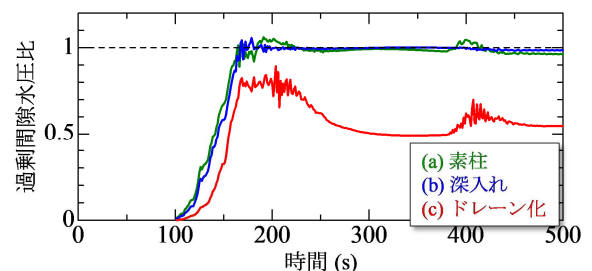


図6 電柱周辺の過剰間隙水圧比