

液状化対策用ドレーンの最適形状に関する一考察

産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター 正会員 竿本 英貴
同上 吉見 雅行

1. はじめに

液状化対策工法は、グラベルドレーン工法に代表される間隙水圧の抑制・消散を目的とする工法や、サンドコンパクションパイル工法のように地盤の密度を増大させ、地盤改良的な効果を期待する工法に大別できる¹⁾。本研究では、グラベルドレーン工法に焦点を当てる。グラベルドレーン工法は通常、直線的な垂直ドレーンが設けられるが、ここでは直線にこだわらず、最大の効率を得るためのドレーン形状やその配置状態を数値解析を利用して探索する。効率的なドレーン形状や配置に関する知見は、液状化対策を実施する上での基礎情報として有用であると考えられる。

今回は、液状化とともに顕在化する間隙水が、地表に効率的に移動することができるような透水係数分布を位相最適化手法^{2),3)}に基づいて求めることにより、地盤内における最適なドレーン形状とその配置を検討した。

2. 最適化問題としての記述

本研究では地震によって地盤が液状化した後の状態を考えており、液状化に至るまでの地盤の挙動は議論しない。さらに問題を簡単化するため、地盤内で水が一樣に湧き出している状態を仮定し、透水係数を適切に分布させることにより、効率的に湧水を地表(全水頭が零)に移動させることを考える(図-1)。以上の仮定を経て、問題を次に示す最適化問題(数理計画問題)として記述することができる。すなわち、目的関数は対象領域の平均的な全水頭を最小化することであり、次のように定式化できる。

$$\text{最小化 } \int_{\Omega} |\nabla H_T|^2 d\Omega \dots\dots\dots (1)$$

上式の H_T は、領域内の各地点での全水頭を示している。また、不等式制約および等式制約として以下の各条件式が付随する。

$$0 < \rho \leq 1, \int_{\Omega} \rho d\Omega \leq \hat{V}, \nabla \cdot (-K(\rho) \nabla H_T) = Q, H_T = 0 \text{ on } \Gamma_D, \nabla H_T \cdot \mathbf{n} = 0 \text{ on } \Gamma_N, \dots\dots (2)$$

ここで、 ρ は設計変数であり、等方の透水係数 K とは $K(\rho) = \rho^3 K_0$ (K_0 は透水係数の最大値) なる関係を仮定している(SIMP法³⁾)。式(2)の左2つの不等式は、設計変数 ρ に関する不等式制約である。解析途中、 ρ は零から1の間の実数をとるが、可能な限り零か1の二値をとるように、透水係数には ρ の3乗を乗じている。また、ドレーン領域の総体積が、 $\hat{V}$ 以下となる条件を課しており、全領域がドレーンとなるような意味のない解を排除している。式(2)の右3つの等式制約は、全水頭 H_T についての支配方程式であり、ダルシーの法則と連続の式(湧き出しあり)から導かれる。ここでは、地表で全水頭が零、他の境界では境界を横切る流束が零となる境界条件を課した。なお、式(1)と式(2)で記述される最適化問題の求解には、FEMベースの汎用ソフトの一つであるCOMSOL Multiphysicsを用いた⁴⁾。

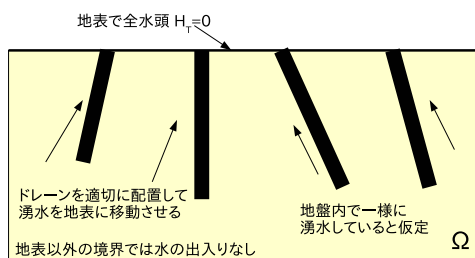


図-1 ドレーンの最適形状とその配置に関する問題設定

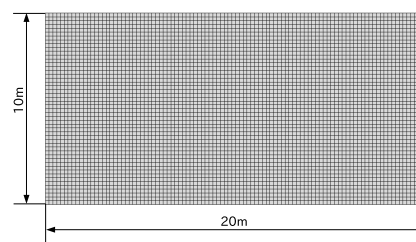


図-2 有限要素メッシュ(5000個の4辺形要素)

キーワード: 液状化, 透水係数, 最適化, 有限要素法

連絡先: 〒305-8567 茨城県 つくば市 東 1-1-1 中央第7, E-mail: h-saomoto@aist.go.jp

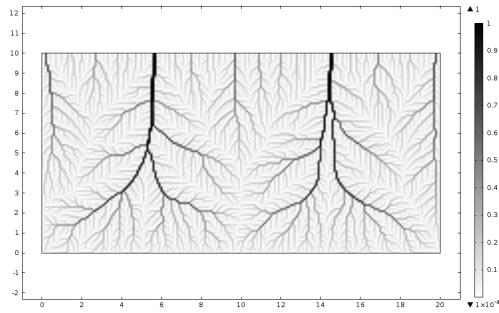


図-3 面積比が 10% の場合の最適解

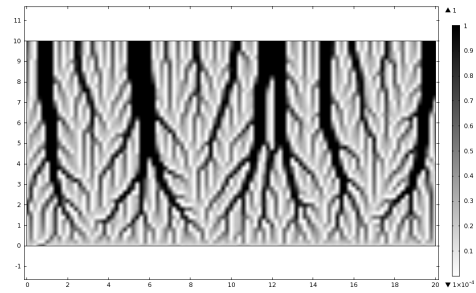


図-4 面積比が 40% の場合の最適解

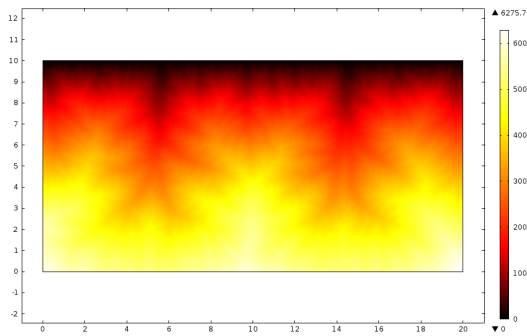


図-5 面積比 10% に対する全水頭分布 (最適解)

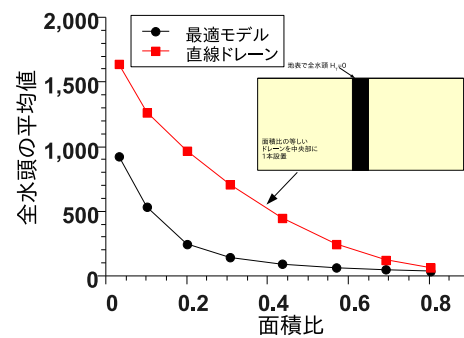


図-6 最適モデルと直線状ドレーンモデルの比較

3. 解析条件

図-2 に用いた有限要素メッシュを示す．液状化対策領域と全領域の面積比をパラメータとして，面積比を 2.5% から 80% まで変化させつつ，各ケースについての透水係数分布の最適解を求めた．ここでは透水係数の最大値を $K_0 = 1.0\text{m/s}$ ，一様な湧水を $Q = 1.0\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ と設定した．次いで，面積比が等しい直線状のドレーンを図-2 中央部に配置して透水解析を行い，最適解を完全に二値化して得られるモデル (以後，最適モデルと記述) との比較を行った．なお，比較解析の際には，ドレーン領域の透水係数は $K = 1.0\text{m/s}$ ，非ドレーン領域では $K = 0.01\text{m/s}$ とした．解析メッシュおよび湧水量は，最適解を求めた際と同じである．

4. 解析結果

図-3 と図-4 は，面積比 R が 10% の場合，40% の場合の最適解をそれぞれ示しており，黒い領域がドレーン領域である．最適なドレーン形状は，植物の根に似た形状となり，どの面積比の場合でも同様の傾向が認められた．似通った形状が山間部の水系や人体の血管系等でも見られることから，得られた形状は物質輸送を効率的に行うための基本形態と考えられる．図-5 は，図-3 に対応する全水頭の分布を示しており，植物の根のようなドレーン形態が反映されている．図-6 は，最適モデルと同じ面積比である直線状ドレーンモデルの全水頭の平均値に関する比較結果である．最適モデルの全水頭の平均値は，ほとんどの面積比において直線状ドレーンモデルの平均値の $1/2$ 以下となった．

5. まとめ

今回の設定では，最適ドレーン形状として植物の根に似た形状が得られ，同じ面積を有する直線的なドレーン形状に比べて効率的であることを定量的に確認した．最適形状を有するドレーンの施工に関しては課題が残るが，効率を改善するための指針を示すことができた．今後は地盤剛性の最大化も同時に考慮した，マルチフィジックス問題下での最適化を試みる．

参考文献

- 1) 渡辺具能: 液状化はこわくない メカニズムと対策 Q&A, 山海堂, 1997.
- 2) M.P. Bendsoe and N.Kikuchi: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Eng., Vol.71, No.2, pp.197-224, 1988.
- 3) M.P. Bendsoe, O. Sigmund: Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer, 2002.
- 4) 近藤継男, 松森唯益, 川本敦史: 低レイノルズ数流れにおける最適物体形状の探索, 機械学会論文集 (B 編), 76 巻, 768 号, pp.1152-1161, 2010.