

# 大規模地震動に対する河川堤防の液状化対策としてのドレーン工法の評価方法

丸田 亮・石原雅規・青柳悠大・佐々木哲也

## 1. はじめに

液状化対策としてのドレーン工法（間隙水圧消散工法）は、図-1(a)に示すように液状化層の中に透水性の高い碎石の柱や人工材を鉛直方向に多数配置することで、地震動により生じる過剰間隙水圧の消散を促進し、液状化の発生を抑制する工法である。

「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）（1997年）」（以下「マニュアル」という。）<sup>1)</sup>では、レベル1地震動相当の外力を想定したドレーン工法の設定方法が示されていた。この設定方法に、レベル2地震動を当てはめた場合に、対策効果が期待できないと考えられたことから、「河川堤防の液状化対策の手引き」<sup>2)</sup>へのドレーン工法の採用が見送られた。

一方で、ドレーン工法は、低振動・低騒音・低変位での施工が可能な点で、締固め工法に比べ有利である。例えば、家屋が隣接する環境下では、ドレーン工法に潜在的なニーズがあると考えられる。また、河川堤防以外の事例（例えば港湾施設）では、大規模地震動が作用した場合でも効果が発揮された事例が報告されている<sup>3)</sup>。

そこで、動的遠心模型実験により大規模地震動に対するドレーン工の堤防の沈下抑制効果とそのメカニズムを確認すること、ドレーン工の過剰間隙水圧消散効果の評価方法及びドレーン工を施し

た堤防の地震後の高さの評価方法（地盤変形解析方法）の開発等を目的とした研究を行ってきた。本報では、これらの概要を報告する。

## 2. ドレーン工法の従来の設定方法と河川堤防の耐震性能照査

ドレーン工法の従来の設定方法と後述する実験結果とを対比させると、実験結果の理解が容易になると考えられるため、マニュアルの従来の設定方法を簡単に示す。

まず、液状化の発生を防止するため、過剰間隙水圧比の最大値が十分に抑制（0.5以下、図-1(c)）可能な改良仕様（ドレーン工の材料・施工法、打設間隔）を設定する。次に、改良範囲を、地震時の堤防の安定性が確保できるよう過剰間隙水圧比を考慮した円弧すべり計算（ $\Delta u$ 法）により設定していた

なお、2007年に河川堤防の耐震性能照査が改定され、地震後の越流防止の観点から、地盤変形解析により求めた地震（レベル2地震動）後の堤防高さと津波を含む照査外水位とを直接比較する方法に変わった<sup>4)</sup>。河川堤防に求められる耐震性能（地震後の堤防高さ $\geq$ 照査外水位）を満足するドレーン工の改良仕様等の設定を行うには、ドレーン工を施した堤防の地震後の高さを評価できる地盤変形解析方法が必要となる。

## 3. ドレーン工の効果とそのメカニズム

### 3.1 動的遠心模型実験の方法

ドレーン工の有無とドレーンの打設間隔を変えた3ケースの1/50スケールの模型を用いて、50Gの遠心力場において加振実験を行った。なお、以降の表記は実寸換算値とする。一部の模型概要を図-2に示す。厚さ10m（地下水位を考慮すると実質9m）の液状化地盤上に高さ5mの堤体を設置した。ケース1が無対策で、ケース2、3では $\phi$ 1.0m

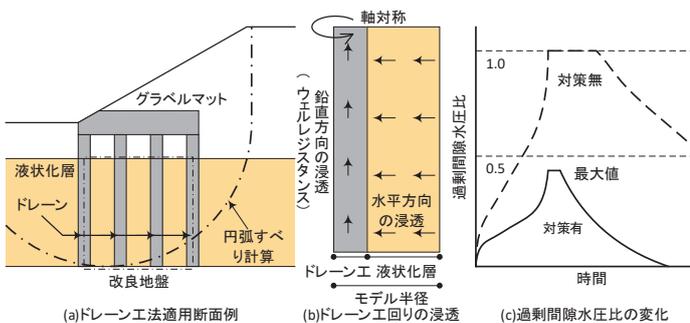
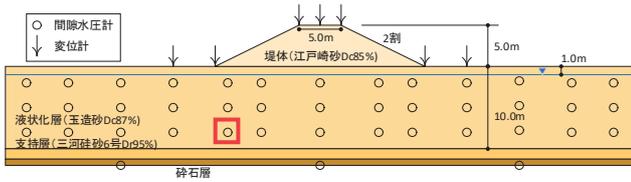
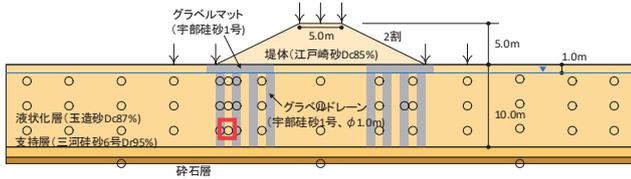


図-1 ドレーン工法の従来の設定方法の概要



(a) ケース1 (無対策)



(b) ケース2 (グラベルドレーン密配置)

図-2 模型断面図

のドレーン工を堤体法面直下に間隔を変えて打設した。ケース2の杭芯間隔（奥行方向も同じ）が2.0m、ケース3が3.0mである。実際の堤防では、基礎地盤への河川水の浸透を懸念し、川表側に施工されることはないが、ドレーン工による沈下量低減効果を明確にするため、左右対称模型とした。入力地震動波形には、道路橋示方書<sup>5)</sup>のレベル2タイプ1地震動（I種地盤）の振幅を0.8倍に調整した波形（図-3）を使用した。

### 3.2 遠心模型実験の結果

図-4に天端中央における沈下量の時刻歴、図-5に堤体法尻直下のGL-8m（図-2の赤枠内。ケース3も同様に杭間中央）における過剰間隙水圧比の時刻歴をそれぞれ示す。

図-4より、最終的な天端の沈下量は無対策のケース1で約1.6m、ドレーン工を施したケース2で約1.1m、ケース3で約1.2mとなり、レベル2地震動に対してもドレーン工法は、他の工法と遜色ない沈下抑制効果を発揮することが確認できた。沈下量が増えるのは、加速度振幅が100gal以上の40秒から130秒の間であることも分かる。

図-5からいずれのケースにおいても過剰間隙水圧比の最大値は1に達しているものの、ドレーン工により100秒までの過剰間隙水圧比が低く抑えられていることにより、沈下量が抑制できたと考えられる。これより、抑制効果を発揮する上では、従来の設定方法のように過剰間隙水圧比の最大値を一定値以下に抑える必要はなく、過剰間隙水圧比が高い時間を短くできれば良いと考えられる。

加振後の模型の変形図を図-6に示す。無対策のケース1の法尻直下地盤（赤枠）に着目すると、

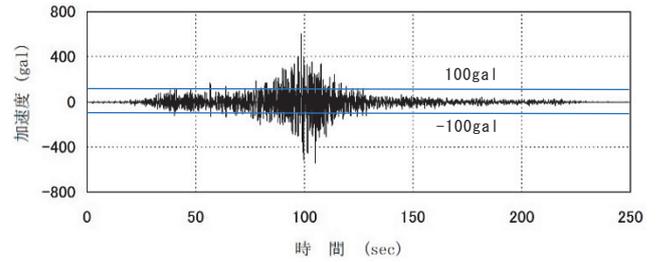


図-3 入力地震動波形

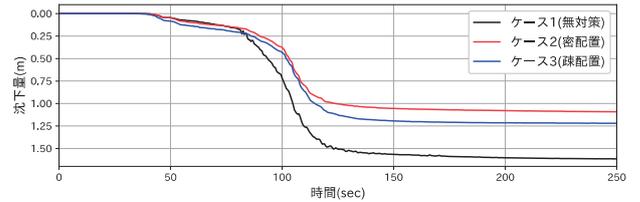


図-4 天端中央における沈下量の時刻歴

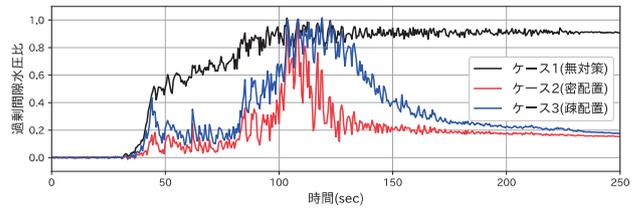
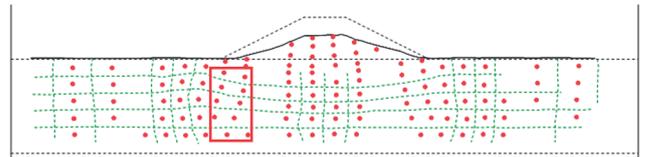
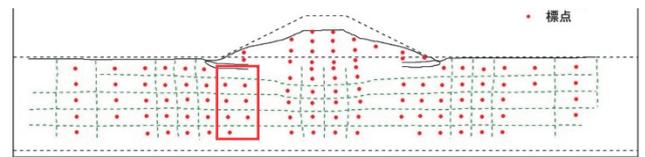


図-5 堤体法尻直下（GL-8m）における過剰間隙水圧比の時刻歴



(a) ケース1 (無対策)



(b) ケース2 (グラベルドレーン密配置)

図-6 加振後の模型の変形図

液状化層がせん断変形することにより、水平方向に変位していることが確認できる。一方で、対策を施したケース2では、同じ位置のせん断変形・水平変位ともに小さくなり、改良地盤が盛土直下の液状化層の側方移動を抑制することが、沈下抑制に繋がったものと考えられる。

## 4. ドレーン工の過剰間隙水圧消散の評価

従来の設定方法では、予め液状化層内の水平の浸透とドレーン工内の鉛直の浸透を2段階で評価（図-1(b)）した結果をまとめた設計図表を利用し

ていた。現状の計算機の能力を勘案すれば、設計図表を用いず、水平・鉛直の浸透を同時に解く解析方法を直接活用するのが妥当と考えられる。

そこで、Seedらが提案した鉛直方向<sup>6)</sup>及び水平方向<sup>7)</sup>の過剰間隙水圧の発生と消散に係る浸透の解析方法を基本に、時々刻々、ドレーン工とその周辺の液状化層の過剰間隙水圧分布を求める有限要素法を用いた非定常浸透流解析を開発した。液状化判定法で必要となるパラメータに加え透水係数を入力すれば解析が可能で、実務で使いやすい

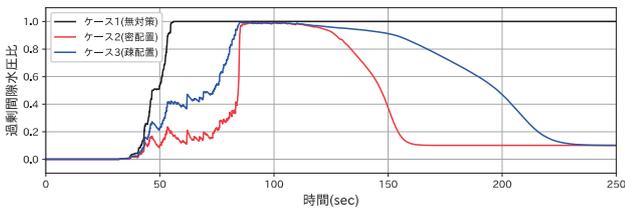


図-7 過剰間隙水圧比の解析結果

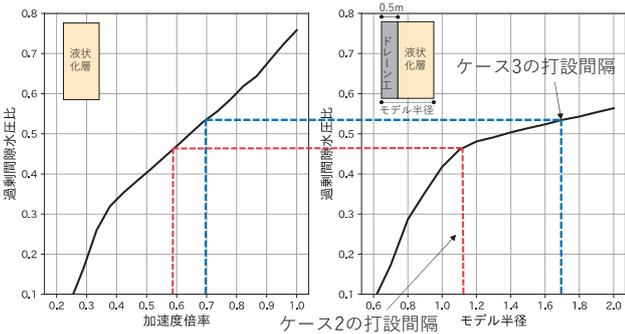
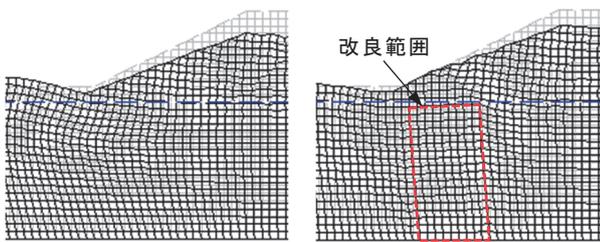


図-8 ドレーン工効果曲線



(a) ケース1 (無対策) (b) ケース2 (密配置)

図-9 地盤変形解析結果

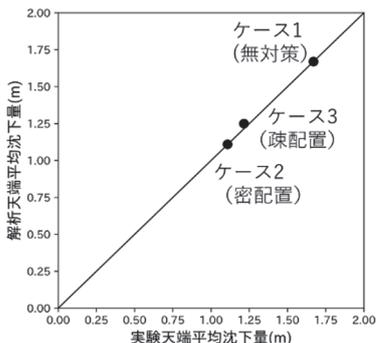


図-10 実験と解析による天端沈下量の比較

方法である。この他、累積損傷度理論に基づいて地震動波形に応じた過剰間隙水圧の発生を考慮できること、部分排水の影響を考慮できること、実務での使用実績の多い石原・吉嶺の体積ひずみの関係<sup>8)</sup>に沿った過剰間隙水圧の消散による体積圧縮量が得られるなどの特徴がある<sup>9)</sup>。

遠心模型実験を対象に、ドレーン工1本と1本のドレーン工が分担する液状化層を合わせた面積と等しい円の半径を解析領域(モデル半径)とする解析から得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を図-7に示す。繰返し三軸強度比 $R_L$ は有限要素法を用いた自重変形解析(ALID、以下「自重変形解析」という。)により無対策の沈下量を再現できように、透水係数を無対策の過剰間隙水圧の消散傾向を再現できるように設定した。実験に比べ全般的に過剰間隙水圧比が大きいのが、対策の有無と打設間隔の違いを評価できることが分かる。

## 5. ドレーン工を施した堤防の沈下量の評価

### 5.1 沈下量の評価方法の概要

前述のとおり、ドレーン工を施した堤防の地震後の高さを評価できる地盤変形解析方法が必要となる。そこで、実務での使用実績の多い自重変形解析を用いた沈下量の評価方法を考案した。

自重変形解析は、静的解析の一種で、ドレーン工の効果を直接考慮できない。このため、改良範囲の液状化に対する抵抗率 $R_L$ をドレーン工の効果に応じて割増すことで、改良範囲を液状化しにくい地盤として扱う方法を考えた。割増しを設定する際に、前述のドレーン工の過剰間隙水圧消散の評価方法を用いる。

図-8に遠心模型実験の $R_L$ の割増率(=倍率-1)を算定するための解析結果を示す。

左側の図は、無対策(ドレーン工が入っていない)で、入力地震動の加速度倍率を変化させ、多数の解析を行うことで得られたものである。基礎地盤の層構成、 $R_L$ 、透水係数が解析結果に反映される。図で示した過剰間隙水圧比は、空間平均かつ加速度が100gal以上の時間平均である。100gal以上で過剰間隙水圧比が高い時間に沈下が生じるといふ実験結果と整合した代表値の取り方とした。

右側の図は、ドレーン工を入れた状態で本来の入力地震動(等倍の加速度振幅)を入力した場合

の解析した結果である。改良仕様の設定で最も重要なパラメータの1つであるモデル半径（打設間隔の関数）を変化させている。この他、ドレーン工の杭径やドレーン工の透水係数も反映される。

打設間隔を決めれば、右側の図からドレーン工の効果を考慮した過剰間隙水圧比が求められる。次いで、同じ過剰間隙水圧比に対応する加速度倍率が左側の図から求められる。 $F_L$  は土の液状化しにくさを表す動的せん断強度比 $R$ と土に作用する応力の大きさを表す地震時せん断応力比 $L$ の比である。 $L$ は加速度の大きさに比例するため、加速度の大きさと $F_L$ は反比例の関係にある。このため、加速度倍率から改良地盤の $F_L$ の倍率を求めることができる。この方法で、基礎地盤条件、ドレーン工の仕様に応じた改良地盤の $F_L$ の倍率を求めることができる。

## 5.2 遠心模型実験の再現解析による検証

正方形配置の打設間隔2.0m（ケース2）と3.0m（ケース3）に対応するモデル半径は1.13mと1.69mとなる。図-8から加速度倍率を求め、 $F_L$ の倍率を求めると1.68倍と1.44倍となる。この倍率を改良地盤に適用し、自重変形解析を行った。ケース1とケース2の変形図を図-9、天端平均沈下量を実験と解析とで比較した結果を図-10に示す。改良地盤の変形の状態も実験と整合しており、沈下量も実験の傾向を適切に評価できている。

## 6. まとめ

大規模地震動を入力した動的遠心模型実験によりドレーン工法の堤防の沈下抑制効果を確認した。沈下を抑制するためには、過剰間隙水圧比の最大値を一定値以下に抑える必要はなく、過剰間隙水圧比が高い時間を短くできれば良いことも分かった。考案したドレーン工の過剰間隙水圧消散効果

の評価方法及びドレーン工を施した堤防の地震後の高さの評価方法（地盤変形解析方法）の概要を紹介し、遠心模型実験の結果を適切に再現できることを示した。

本報で示した評価方法を用いたドレーン工法の設定方法を含む河川堤防の液状化対策の手引きの改定に向け、土木研究所が設置した委員会（委員長：愛媛大学岡村教授）にて議論を行っているところである。議論の材料とするため、加振模型実験等による検証事例を増やし、耐震及び洪水時の浸透の試算等を行っているところである。

## 参考文献

- 1) 土木研究所：河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル（案）、土木研究所資料第3513号、1997.
- 2) 土木研究所：河川堤防の液状化対策の手引き、土木研究所資料第4332号、2016.
- 3) 地盤工学会：液状化対策工法、地盤工学・実務シリーズ、vol.18、pp.385~389、2004.
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・解説 堤防編、最終改定2016.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、p.77、2021.
- 6) H. B. Seed, P. P. Martin and J. Lysmer : Pore-Water Pressure Changes during Soil Liquefaction, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp.323-346, 1976.
- 7) H. B. Seed and J. R. Booker : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits using Gravel Drains, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp.757-768, 1977.
- 8) Kenji Ishihara and Mtsutoshi Yoshimine : Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquake, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 9) 石原雅規、佐々木哲也：液状化による過剰間隙水圧の発生・消散に係る非定常浸透流解析、土木学会第77回年次学術講演会、III-99、2022.

丸田 亮



土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 交流研究員  
MARUTA Ryo

石原雅規



土木研究所 地質・地盤研究グループ 特命上席研究員、博士（工学）  
Dr. ISHIHARA Masanori

青柳悠大



土木研究所 企画部研究企画課 主査、博士（工学）  
Dr. AOYAGI Yudai

佐々木哲也



土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員  
SASAKI Tetsuya