

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・設計法

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 3

担当チーム：土質・振動チーム

研究担当者：佐々木哲也、石原雅規、

梶取真一、佐々木亨、青柳悠大

【要旨】

グラベルドレーン工法は、大規模地震動に対する液状化対策としての効果が不明であり、効果の評価法や設計法が確立されていないことから、現在では利用されなくっている。一方で、東日本大震災では、河川堤防においてグラベルドレーン工法による対策が一定の効果を発揮した事例も確認されている。そこで、本研究では、遠心模型実験によりグラベルドレーン工法の大規模地震動に対する効果を明らかにした。また、液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析による対策効果の評価法と評価法を用いた河川堤防の液状化対策としてのグラベルドレーン工法の設計法を開発し、遠心模型実験結果を適切に評価できることを確認した。

キーワード：河川堤防、グラベルドレーン、遠心力模型実験、浸透流解析、静的地盤変形解析

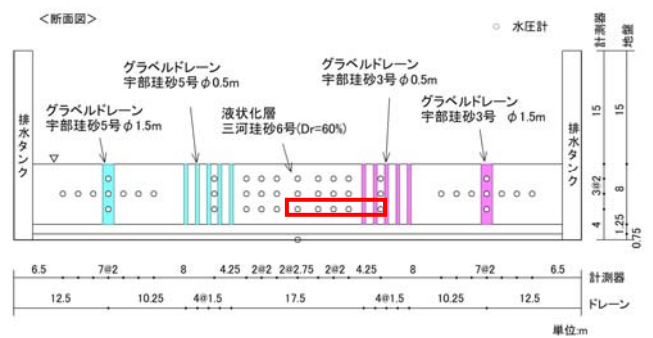
1. はじめに

グラベルドレーン工法は、河川堤防の液状化対策として、かつては「河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル」¹⁾に基づき使用されたが、大規模地震動に対する効果が不明であり、効果の評価法や設計法が確立されていないことから、現行の「河川堤防の液状化対策の手引き」²⁾(以下、手引き)では適用対象外となっている。一方で、東日本大震災では、河川堤防においてグラベルドレーン工法による対策が一定の効果を発揮した事例³⁾も確認されている。また、グラベルドレーン工法には、周辺への影響が少ない、硬さが現地盤に近いためのなじみの問題が少ない等、手引きの対象である締固め工法や固結工法、鋼材を用いた工法にはない特徴がある。このため、グラベルドレーン工法のレベル 2 地震動に対する効果を明らかにし、河川堤防の液状化対策としての評価法や設計法が確立されれば、液状化対策工法の選択の幅が広がることが期待される。

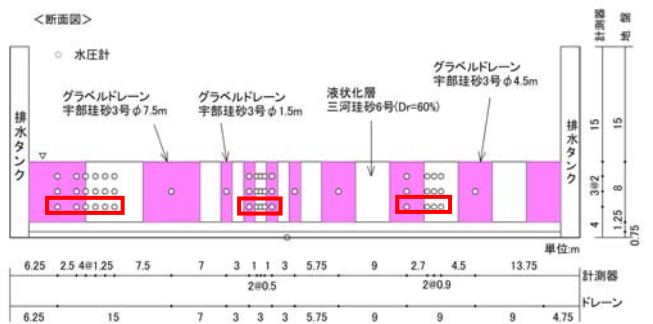
本研究では、液状化地盤にグラベルドレーンを設置した模型を用いて、遠心力場でレベル 2 地震動相当の外力を与える加振実験を行い、液状化対策としてのドレーンの効果を検証した。この結果を踏まえ、液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析による対策効果の評価法を開発した。また、評価法を用いた河川堤防の液状化対策としてのグラベルドレーン工法の設計法を開発し、遠心模型実験結果を適切に評価できることを確認した。

表-1 実験ケース

ケース	地下水位	液状化対策工 (ドレーン)	使用材料		
			ドレーン材 (φ:ドレーン径)	堤体	液状化層
1	水平地盤面 (GL 0m)	左右各2種類	左: 宇部珪砂5号 (φ = 0.5m, 1.5m) 右: 宇部珪砂3号 (φ = 0.5m, 1.5m)	なし	三河珪砂 6号 ($D_r = 60\%$)
2		左右中央各1種類	宇部珪砂3号 (φ = 7.5m, 1.5m, 4.5m)		
3	GL-1m	なし	なし	江戸崎砂 ($D_r = 85\%$)	玉造砂 ($D_r = 87\%$)
4		左右各1種類 (同種類)	宇部珪砂1号 (φ = 1.0m) 密配置		
5		宇部珪砂1号 (φ = 1.0m) 疎配置			



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-1 模型概要 (次頁に続く)

2. 遠心模型実験

大規模地震においても、グラベルドレーン（以下、本節では、ドレーン）が液状化によって発生した過剰間隙水圧を低減させる効果を発揮できるか、さらに堤防の沈下量を抑制することが可能であるかを遠心模型実験によって検証した。

2.1 実験方法

50Gの遠心力場において1/50スケールの模型を用いて加振実験を行った。なお、以降の表記は注積のない限り、実寸換算値を基本とする。実験ケースを表-1に、模型概要を図-1に示す。ケース1、2では、液状化地盤上へ堤体を設置せず、ドレーンの杭径の違いによる液状化対策効果への影響を検証した。ケース1はドレーン材として宇部珪砂3号及び5号を使用し、 $\phi 0.5\text{m}$ 及び $\phi 1.5\text{m}$ のドレーンを材料ごとに2種類設置した。ケース2は宇部珪砂3号を使用し、 $\phi 1.5\text{m}$ 、 $\phi 4.5\text{m}$ 及び $\phi 7.5\text{m}$ の3種類のドレーンを改良率が等しくなるようにそれぞれ設置した。また、ケース3、4、5では、液状化地盤上部へ堤体を設置し、ドレーンの有無や設置間隔の違いによる液状化対策効果への影響を検証した。ケース3はドレーンを設置せず、無対策とした。ケース4、5はドレーン材として宇部珪砂1号を使用し、 $\phi 1.0\text{m}$ のドレーンを、杭芯間隔がケース4は2.0m、ケース5は3.0mとなるように設置した。また、ドレーン上端には厚さ1mのグラベルマットを設置した。

ドレーンの作製は、作製した液状化地盤に所定のドレーンの杭径に応じたステンレスパイプを丁寧に押し込み、パイプ内の地盤材料を吸引後、ドレーン材料を投入し、軽く突き固めて作製した。作製後、パイプはゆっくりと引き抜いた。ケース1、2の液状化地盤は、所定の相対密度となるように空中落下法で、ケース3、4、5の液状化地盤及び堤体は所定の締固め度となるように突固めでそれぞれ作製した。図-2に使用材料の粒径加積曲線を示す。

加振実験の入力地震動波形には、道路橋示方書⁴⁾のレベル2タイプ1地震動（I種地盤）である新晩翠橋の地表面加速度波形を、地表面以下の逸散減衰を考慮して、元の振幅を0.8倍したものを使用した。図-3に入力地震動波形の時刻歴を示す。

2.2 実験結果

2.2.1 杭径の違いによる比較⁵⁾

ここでは杭径の違いによる結果の比較のため、ケース1、2における宇部珪砂3号のドレーン周辺（図-1の赤枠内）の結果について報告する。

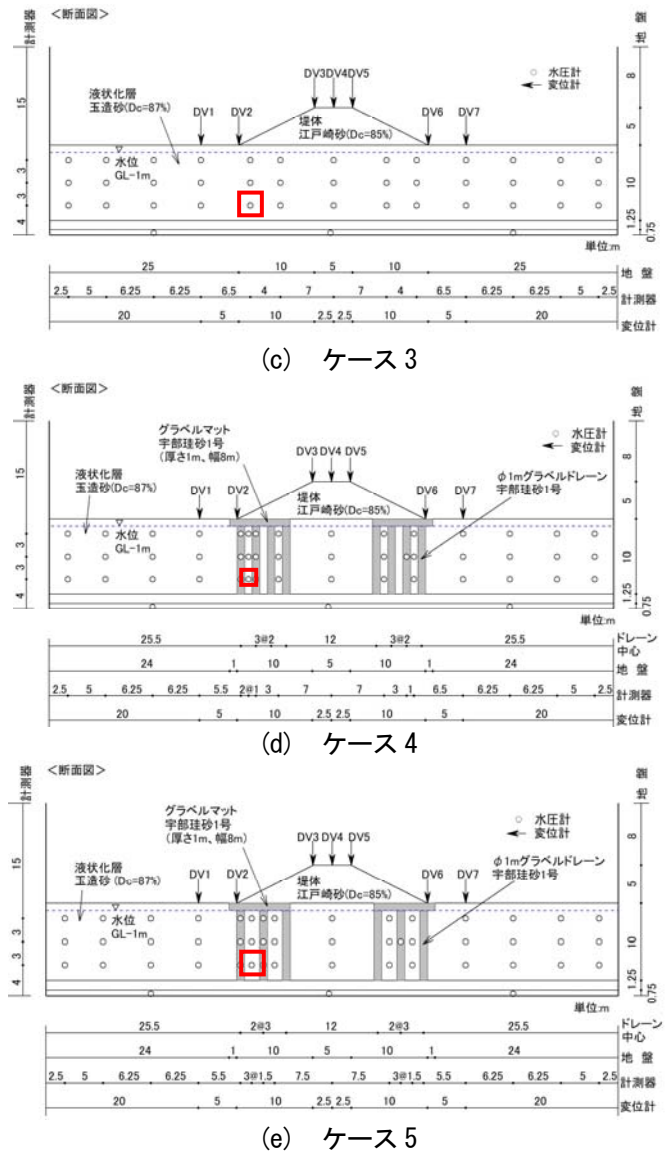


図-1 模型概要（前頁続き）

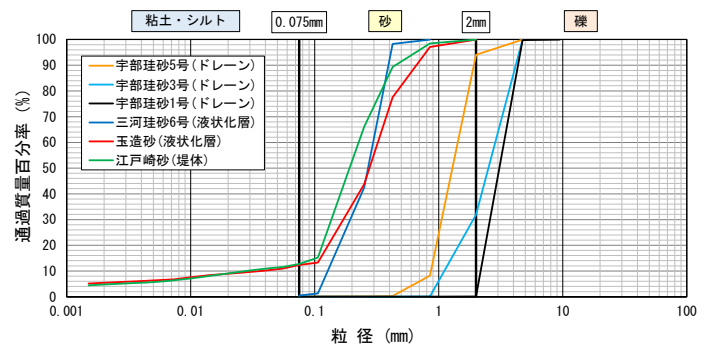


図-2 使用材料の粒径加積曲線

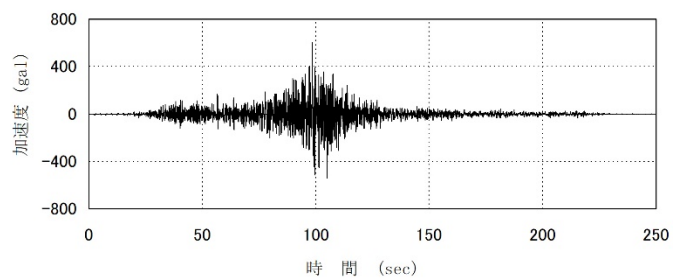
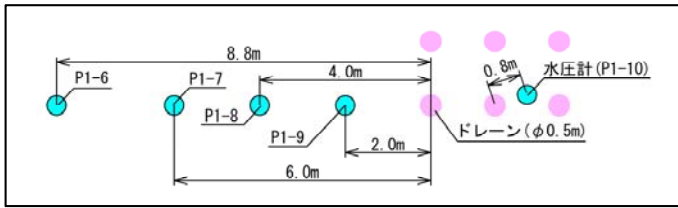
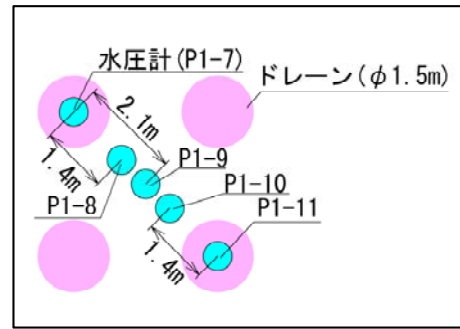


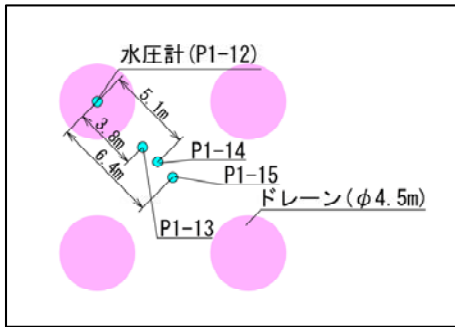
図-3 入力地震動波形の時刻歴



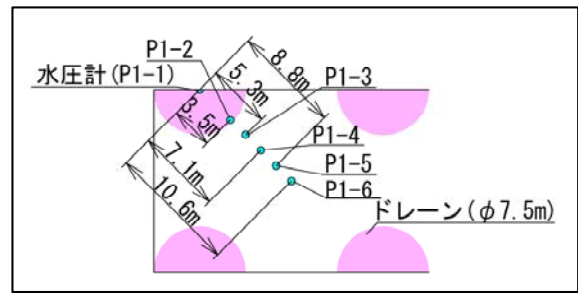
(a) φ0.5m



(b) φ1.5m

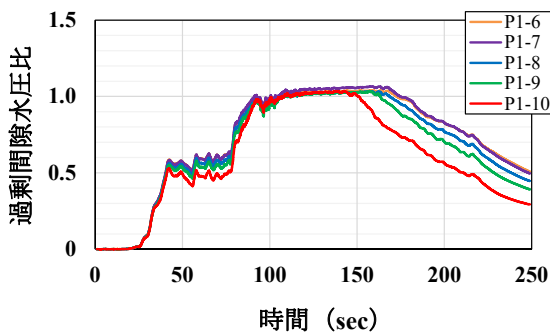


(c) φ4.5m

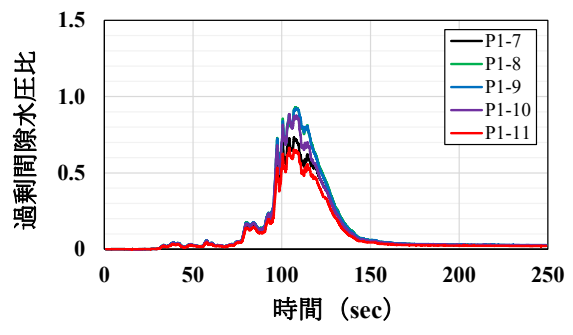


(d) φ7.5m

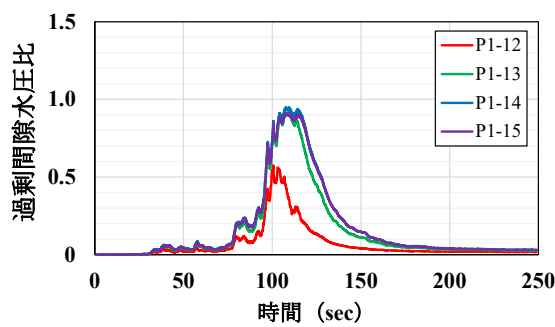
図-4 各ドレーンとGL-6mの水圧計設置箇所的位置関係（平面図）



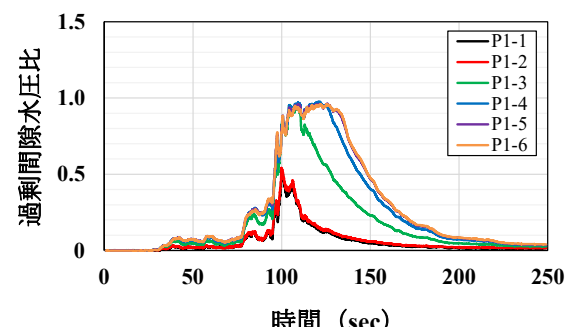
(a) φ0.5m



(b) φ1.5m



(c) φ4.5m



(d) φ7.5m

図-5 GL-6mにおける過剰間隙水圧比の時刻歴

図-1(a),(b)の赤枠内における各ドレーンとGL-6mの水圧計設置箇所の位置関係を図-4に示す。また、図-1の赤枠内に設置した水圧計における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-5に示す。図-5(a)より、φ0.5mのドレーン対象範囲外(P1-6~9)における過剰間隙水圧比は、30

秒程度から上昇し始め、90~160秒付近まで1程度を維持している。一方、図-5(b)~(d)よりφ1.5m、φ4.5m及びφ7.5mのドレーン周辺における過剰間隙水圧比は、杭径によらず概ね80秒程度から上昇し始め、100~110秒程度で最大値に達する結果となり、過剰間隙

水圧比の最大値付近を維持する時間は最大で 25 秒程度であった。φ1.5m 以上のドレーンでは、過剰間隙水圧比が上昇始める時間や最大値を維持する時間の観点から水圧低減効果が確認できる。また、φ1.5m、φ4.5m 及びφ7.5m のドレーン中心における過剰間隙水圧比を比較すると、杭径が大きいほどドレーン中心の過剰間隙水圧比は小さくなっており、φ7.5m のドレーンはφ1.5m のドレーンの 0.7 倍弱であった。以上から、φ1.5m 以上のドレーンがレベル 2 地震動相当の外力においても高い排水機能を発揮することが分かった。なお、φ0.5m のドレーンで水圧低減効果が十分発揮されなかった理由としては、遠心模型では、ドレーンの杭径に対するドレーン材の粒径の比が極端に大きく、ドレーン内の粒子数が極端に少ないことが挙げられる。このため、ドレーンがフィルターとしての機能を発揮できず、砂混じりの泥水がドレーン内を通過し、砂が混じる分だけ見かけの透水性が低下することで十分な排水機能を発揮できなかったこと等が考えられる。この結果をふまえ、次項の実験（ケース 4、5）では、遠心実験においてもドレーンの排水機能が発揮されるよう、ドレーンの外周に不織布を巻いた上でドレーンを設置した。

2.2.2 ドレーンの有無や設置間隔の違いによる比較⁶⁾

ここではドレーンの有無や設置間隔（杭芯間隔）の違いの比較のため、ケース 3～5 の結果について報告する。

図-6 に各実験ケースの天端中央（DV4）における沈下量の時刻歴、図-7 に堤体法尻直下の GL-8m（図-1(c)～(e)の赤枠内）における過剰間隙水圧比の時刻歴をそれぞれ示す。図-6 より、最終的な天端の沈下量は無対策のケース 3（1.61m）、杭芯間隔が比較的広い（密配置）ケース 5（1.21m）、杭芯間隔が比較的狭い（疎配置）ケース 4（1.09m）の順に大きく、密配置のドレーンは無対策の 68%程度の値に抑えている。

図-7 より、いずれの実験ケースにおいても過剰間隙水圧比の最大値は同程度である。しかし、過剰間隙水圧比の最大値に至るまでの上昇過程に着目すると、無対策のケース 3 では過剰間隙水圧比が時間とともに上昇していくのに対し、ドレーンを設置したケース 4、5 では振幅の小さな加振中（約 50～80 秒）にも排水効果を発揮し過剰間隙水圧比の累積を抑えている。また、最大値到達後の消散過程に着目すると、密配置のケース 4 では最大値に至った後、過剰間隙水圧比が急激に減少（消散）しているのに対し、疎配置のケース 5 では約 125 秒から減少し始めていることが分かる。ケー

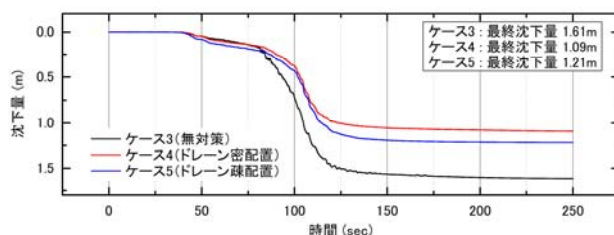


図-6 天端中央における沈下量の時刻歴

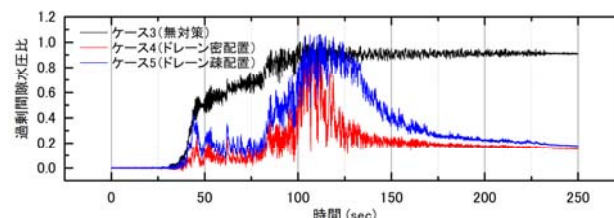


図-7 堤体法尻直下の GL-8m における過剰間隙水圧比の時刻歴

ス 5 がケース 4 と異なり、約 110～125 秒の間、0.80 以上の高い過剰間隙水圧比を維持していたことが図-6 における天端沈下量の差（約 10cm）となって僅かに現れていると考えられる。

図-8 に加振開始から 75 秒、100 秒、150 秒、250 秒後のそれぞれの時間における堤体の変形と液状化地盤全体の過剰間隙水圧比分布を示す。実験土槽のガラス面に沿ってメッシュ状に設置した液状化地盤中の色砂の様子も併せて示している。なお、コンター境界は近接の計測点の値で補間している。図-8 より、いずれの実験ケースもまず堤体法先から側壁近傍に至る水平地盤から過剰間隙水圧比が上昇していることが分かる。過剰間隙水圧比が最大値に至る直前（100 秒時）の無対策のケースでは、水平地盤から堤体法先の深い深度の範囲まで 0.80 以上の高い過剰間隙水圧比の領域が広がっているのに対して、ドレーン改良地盤では堤体法先直下を 0.80 未満の過剰間隙水圧比に抑えていることが分かる。また、150 秒と 250 秒の消散過程に着目すると、ドレーンを施すことで水平地盤部分も消散を促進させていることが分かる。

堤体天端の沈下量や液状化地盤全体の過剰間隙水圧比分布の比較から、ドレーンがレベル 2 地震動相当の外力においても液状化対策として機能していることが確認された。杭芯間隔が異なるケース 4、5 では、堤体天端の沈下量や過剰間隙水圧比分布に大きな違いはみられなかった。

2.3 まとめ

液状化地盤へ異なる条件のドレーンを設置した模型及びドレーンを設置しない模型を用いた遠心力模型実

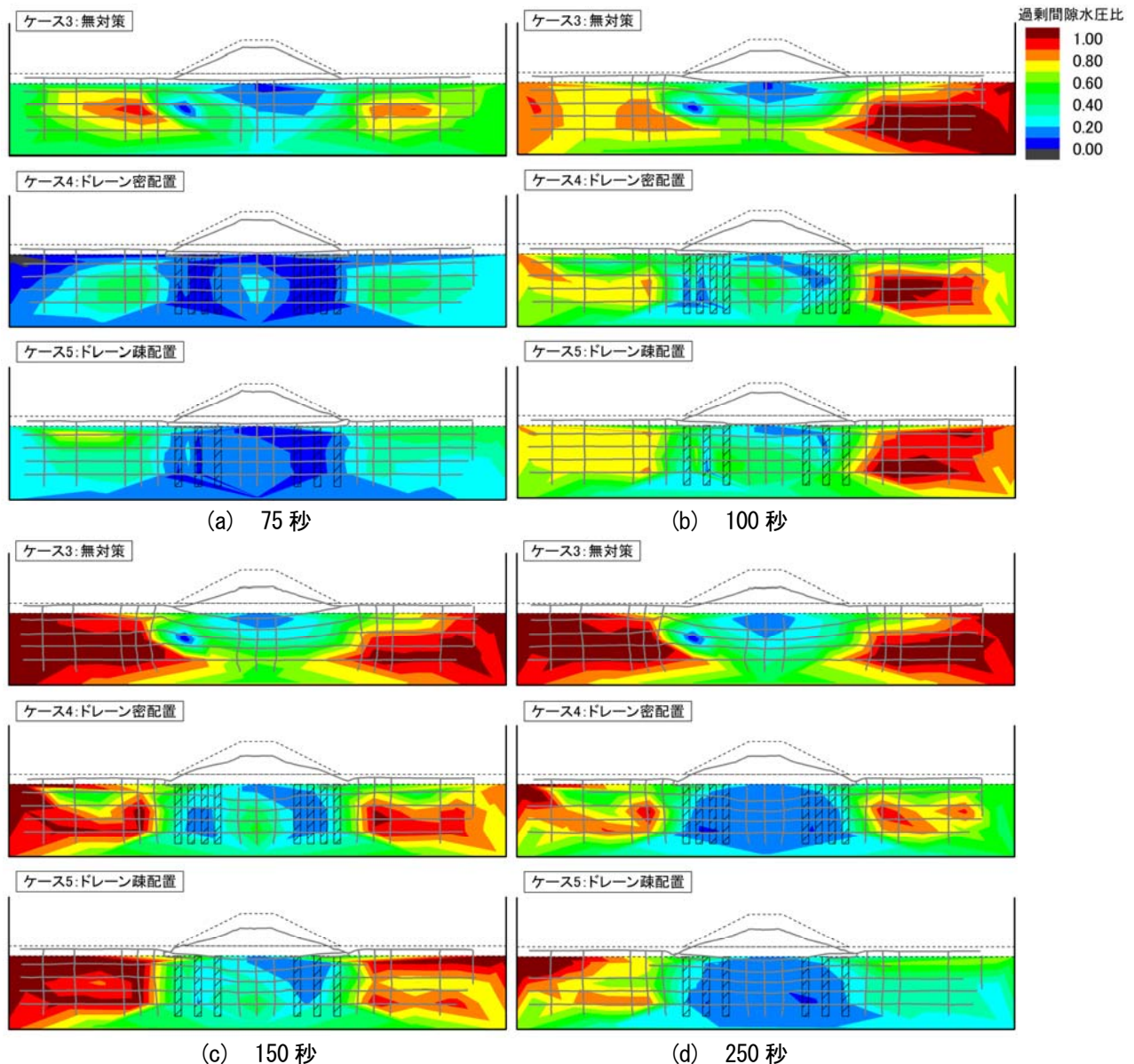


図-8 実験ケースごとの堤体の変形と液状化地盤全体の過剰間隙水圧比分布

験を行い、杭径の違いやドレーンの有無、杭芯間隔の違いが過剰間隙水圧比や河川堤防の沈下等に及ぼす影響について検討した。

杭径の異なるドレーンを用いた実験より、 $\phi 1.5\text{m}$ 以上のドレーンでは、ドレーン対象範囲外における過剰間隙水圧比と比較して、過剰間隙水圧比が上昇し始める時間が遅く、過剰間隙水圧比の最大値を維持する時間が短くなっており、大規模地震動に対してもドレーンの水圧低減効果が確認された。また、ドレーンの有無及び杭芯間隔の異なるドレーンを用いた実験より、ドレーンを設置したケースでは、設置しないケースと比較して、液状化地盤上に設置した堤体天端の沈下量を大幅に抑制する結果となった。

以上の結果から、ドレーンがレベル2地震動相当の

外力においても高い排水機能を発揮し、液状化対策として機能することが分かった。

3. グラベルドレーン工法の水圧低減効果評価法

グラベルドレーンによる過剰間隙水圧の低減効果を評価可能な解析方法を開発した。この解析方法の基礎となるのが、液状化地盤の過剰間隙水圧の発生や過剰間隙水圧消散による体積圧縮を適切に評価できる解析方法である。そこで、3.1で基礎となる液状化地盤の過剰間隙水圧の発生・消散解析方法を説明し、3.2でグラベルドレーンによる過剰間隙水圧低減効果の評価法の説明を行う。

3.1 液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析⁷⁾

3.1.1 概要

開発する方法は、Seed らの方法⁸⁾と同じく地盤内の浸透を有限要素法によって解く方法であるが、表-2に示すとおり道路橋示方書等の液状化判定法の考え方やパラメータを反映させるための様々な拡張や変更を施したものである。全ての入力パラメータは実務で容易に設定可能である。主要な拡張や変更について簡単に説明を行う。体積圧縮係数と過剰間隙水圧の上昇につ

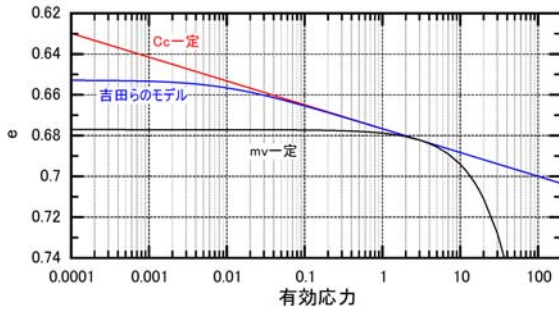


図-9 体積圧縮モデルの違い

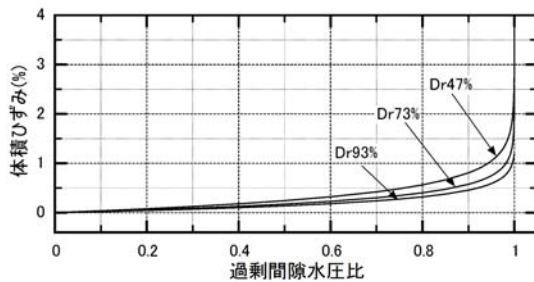


図-10 吉田らのモデルから得られる過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係

表-2 天端中央における沈下量の時刻歴

	Seedらの方法	提案方法
モデル	・軸対称水平1次元	垂直1次元/軸対称2次元/ 断面2次元
地震動	・有効継続時間 ・等価な一定振幅せん断応力の繰返し回数	・地表面における加速度波形
液状化層の物性	・一定振幅に換算した地震動で液状化する繰返し回数 ・透水係数 ・体積圧縮係数	土層毎に ・繰返し三軸強度比 (液状化強度曲線, 相対密度, 吉田らの体積圧縮モデル) ・透水係数
地下水位	—	・設定あり 地下水位より上の非液状化層には物性 (透水係数/不飽和浸透特性/比貯留係数) を設定
過剰間隙水圧の上昇	損傷度に応じて	

いては、項立てし、より詳しく説明を行う。

Seed らの方法は横向きの浸透流を対象としているが、提案方法では、土層間で相互作用や地表の境界条件を考慮するため、垂直方向の流れが含まれる。Seed らの方法では地震動を有効継続時間と繰返し回数で表していたが、提案方法では加速度波形を用いることとした。加速度波形がゼロクロスする度に、ゼロクロス間のピーク加速度の半波が地盤に作用するものとし、深さ方向の低減係数 r_d を考慮した上で、半波毎に地盤内のせん断応力比を算出した。

液状化層の物性としては、繰返し三軸強度比 (以下、 R_L) と透水係数を基本とした。内部では、 R_L と地盤内のせん断応力比から求まる損傷度に応じた過剰間隙水圧の上昇量を要素に与える。損傷度の算出に用いる液状化強度曲線 (S-N 曲線) は、簡便のため、 R_L から設定 ($N=20(L/R_L)^{-3.77}$) することとした。この関係は、土木研究所で実施した凍結サンプリングによる試料を用いた試験結果に対してフィッティングを行ったものである。今回は簡便な推定式を用いたが、要素試験で得られた液状化強度曲線を用いる等の方法も考えられる。

3.1.2 体積圧縮係数

模型実験では液状化層の下端から順に過剰間隙水圧が消散することが知られているが、体積圧縮係数 (以下、 m_v) を一定値とした場合には、液状化層の深度に依らず同時に過剰間隙水圧が消散するような解析結果となってしまふ。圧縮指数 (以下、 C_c) が一定となる

ように m_v を与えると、模型実験で得られる結果と近い解析結果が得られるが、図-9の赤線に示すように有効応力0に向かって際限なく間隙比が変化するため大きな体積圧縮が生じる可能性がある。そこで、図-9の青線のように有効応力が0に向かう時に間隙比の変化が有限である吉田らのモデル⁹⁾を用いることとした。吉田らのモデルの最大体積ひずみ ε_{vo} と係数 c の2つのパラメータを、実務での使用実績の多い石原らによる過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみに関する実験¹⁰⁾等を元に設定することとした。紙面の都合上、式のみを示すと、 $\varepsilon_{vo}=12.47-0.217D_r+0.00105 D_r^2$ 、 $c=0.001+0.063 \varepsilon_{vo}$ となり、相対密度 (以下、 D_r) から設定可能とした。締固め工法的设计²⁾で用いられている関係式を用いれば、 N 値を介して R_L から D_r を推定することが可能である。

また、吉田らのモデルを用いると図-10に示すような任意の相対密度における過剰間隙水圧比と過剰間隙水圧の消散過程で生じる体積ひずみの関係

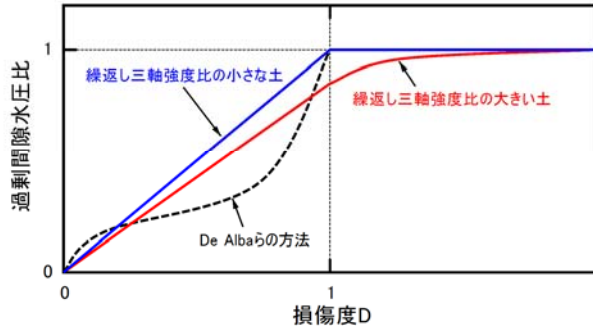


図-11 損傷度と過剰間隙水圧比の模式図

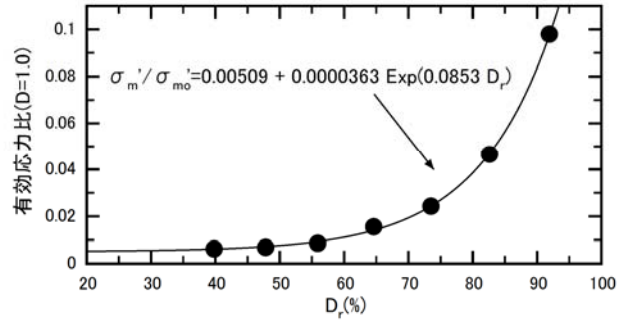


図-12 相対密度と損傷度1における有効応力比

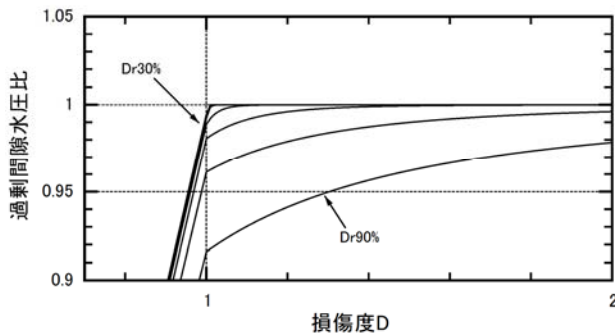


図-13 損傷度と過剰間隙水圧比の関係

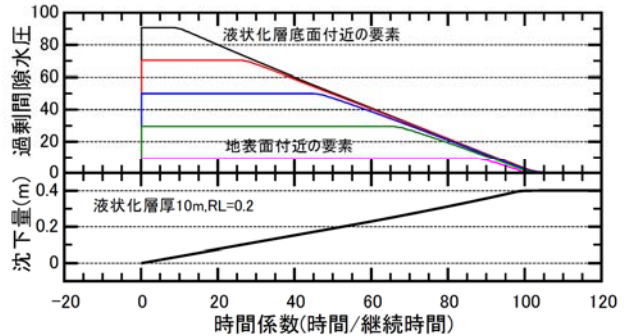


図-14 試算例 (過剰間隙水圧と沈下量の時刻歴)

を求めることが可能となる。

3.1.3 過剰間隙水圧の上昇

Seed らの方法と同様に損傷度 (以下、 D) に応じて過剰間隙水圧を上昇させることとしたが、図-11 に示すように、 $D \leq 1$ では De Albará らの関係は用いず単純な直

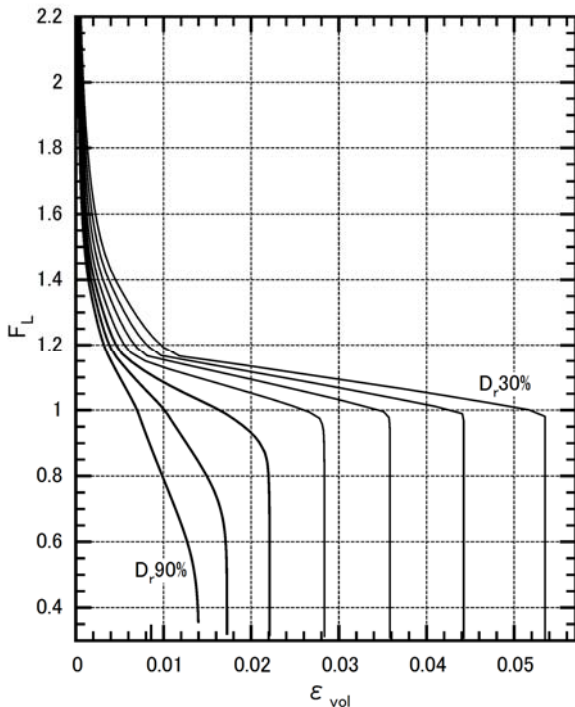


図-15 体積ひずみと F_L の関係

線関係を用いた。要素試験の結果によると、繰り返し三軸強度比の大きな土は、 $D=1$ の時 (ひずみ両振幅が 5% に達した時)、過剰間隙水圧比が 1 よりも小さい傾向がある。そこで、図-11 の赤線のように $D \leq 1$ では過剰間隙水圧比が 1 よりも小さい値に向かって線形に変化させ、 $D > 1$ では過剰間隙水圧比 1 に漸近させることとした。

ここでも石原らによる体積ひずみと F_L の関係⁹⁾ を用いて図-11 の赤線の形状を決定することとした。石原らの関係から $F_L=1$ ($D=1$) における体積ひずみが得られ、吉田らのモデル (図-10 の関係) を用いれば体積ひずみに対応する過剰間隙水圧比 ($=1 - \text{有効応力比}$) を求めることができる。こうして求めた D_r と $D=1$ における有効応力比を図-12 に示す。同様の整理を $F_L < 1$ ($D = F_L^{-3.77} > 1$) で行ったところ、 D と有効応力比の関係が両対数軸上でほぼ直線関係となり、 D_r に応じてその勾配が変化することが確認できた。このような検討から得られた D と過剰間隙水圧比の関係を図-13 に示す。

3.1.4 試算例

提案方法 (垂直 1 次元) により得られる過剰間隙水圧と沈下量の時刻歴の試算例を図-14 に示す。入力波形は道路橋示方書のレベル 2 タイプ 1 の中の 1 つの不規則波とした。模型実験と同様の液状化層の下端から

順に過剰間隙水圧が消散する状況が確認できる。次に D_r を変化させた時の体積ひずみ（液状化層の平均値）と F_L （加速度振幅を変えて調整し、液状化層の平均値）の関係を図-15 に示す。一般的には要素試験結果と類似の結果が得られることが確認できるが、 D_r が小さい土の $1 \leq F_L < 1.2$ で水平の関係にならずに勾配を持っているなどの相違が見られる。この勾配は r_d の影響により $F_L < 1$ となる範囲が加速度振幅に応じて変化するために生じたものである。このように提案方法により、現状の実務で容易に設定可能な定数のみで、土層間の相互作用や境界条件の影響を考慮した過剰間隙水圧の発生・消散に係る検討が可能となる。

3.2 グラベルドレーンによる過剰間隙水圧低減効果の評価法

3.2.1 評価法

前節で示した液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析を軸対称モデルとし、その中心部の要素にドレーンの物性を、周辺部に液状化層の物性を与えることで、グラベルドレーンによる過剰間隙水圧低減効果を表現する評価法を提案した。この評価法による遠心模型実験で得られた過剰間隙水圧の再現性を確認した。

3.2.2 遠心実験の概要

液状化地盤に対して無対策となるケース 6 及びグラベルドレーンを設置したケース 1 (2. に示したケース 1 と同じ) の 2 ケースを対象として、過剰間隙水圧の再現性を確認した。模型概要を図-16、図-17 に示す。

ケース 6 は仕切り板により 4 分割（平面から見て縦横各 2 分割）した液状化地盤（実寸で層厚 8m、以下実寸で表記）の内のひとつで三河珪砂 6 号を用いた無対

策のケースであり、レベル 2 タイプ 1 地震動（I 種地盤）である新晩翠橋の地表面加速度波形を、地表面以下の逸散減衰を考慮して、元の振幅を 0.8 倍したもの（1 倍）を入力した。ケース 1 は前述のとおりである。

3.2.3 解析の入力パラメータの合わせ込み

ケース 6 とケース 1 の実験結果が再現可能な解析の入力パラメータを試行錯誤により求めた。合わせ込んだパラメータは R_L 、液状化地盤の縦方向の透水係数（以下、 k_v ）及び横方向の透水係数（以下、 k_h ）、グラベルドレーンの透水係数（以下、 k_d ）である。無対策のケース 6 では水平方向の水の流れがない鉛直 1 次元、液状化層厚 10m のモデルを使用した。グラベルドレーンを設置したケース 1 では解析半径 6m、液状化層厚 8m のモデルを使用した。解析半径の 6m は、ケース 2 で計測した過剰間隙水圧分布からグラベルドレーンの影響が及ばないと考えられる距離として設定したものである。

無対策の過剰間隙水圧が上昇する過程では、液状化層の透水係数が極端に大きくない限り、部分排水の影響は小さいため、ケース 6 の過剰間隙水圧が上昇する過程で R_L の合わせ込みを行った。図-18 より、過剰間隙水圧が最大になる時間（45 秒付近）と上昇する際の速度（傾き）から $R_L = 0.21$ を設定した。次に、図-19 に示す過剰間隙水圧の消散過程で k_v の合わせ込みを行った。なお、無対策の解析は過剰間隙水圧が減少し始める時間（200 秒弱）と減少する速度（傾き）から $k_v = 9.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ を設定した。

k_d 及び k_h の合わせ込みはグラベルドレーンを設置したケース 1 で行った。なお、ステップはケース 6 と同一の入力加速度となるステップ 3（図-20）を用いた。

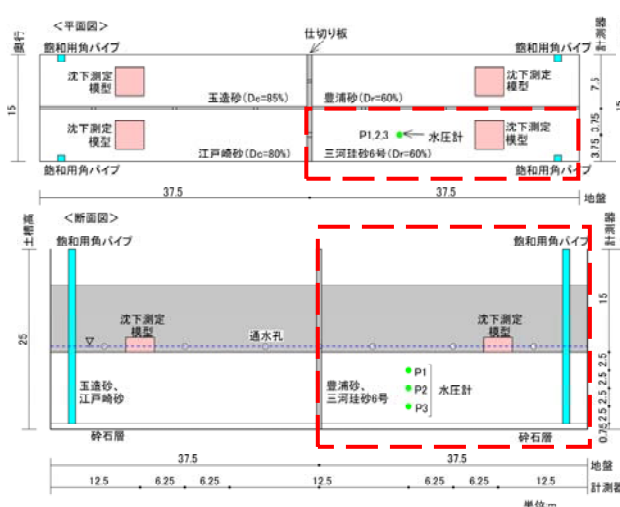


図-16 ケース 6（赤破線内）の模型概要（実寸換算）

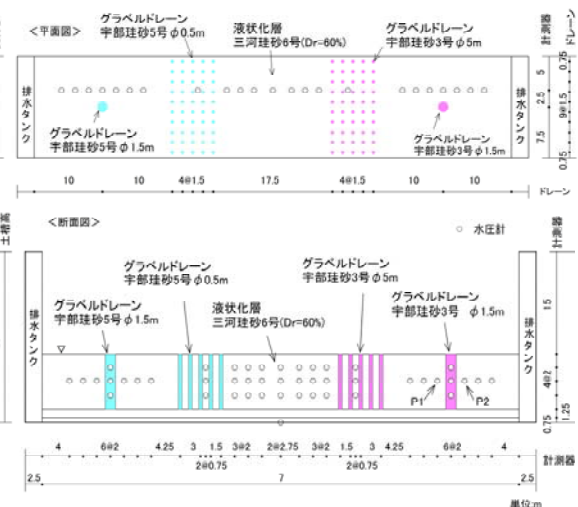


図-17 ケース 1 の模型概要（実寸換算、再掲）

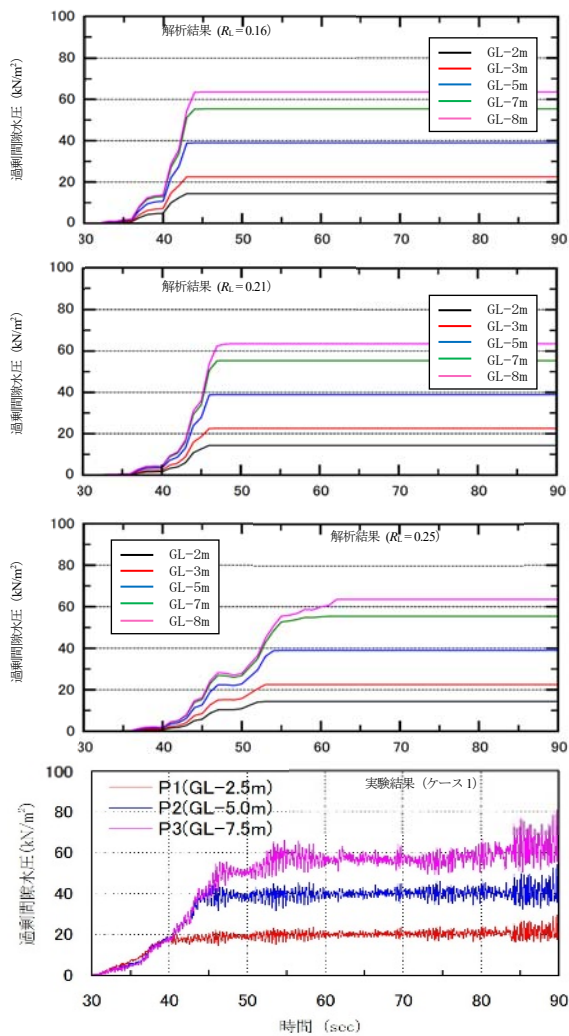


図-18 解析と実験結果の比較 1 (RL の設定)

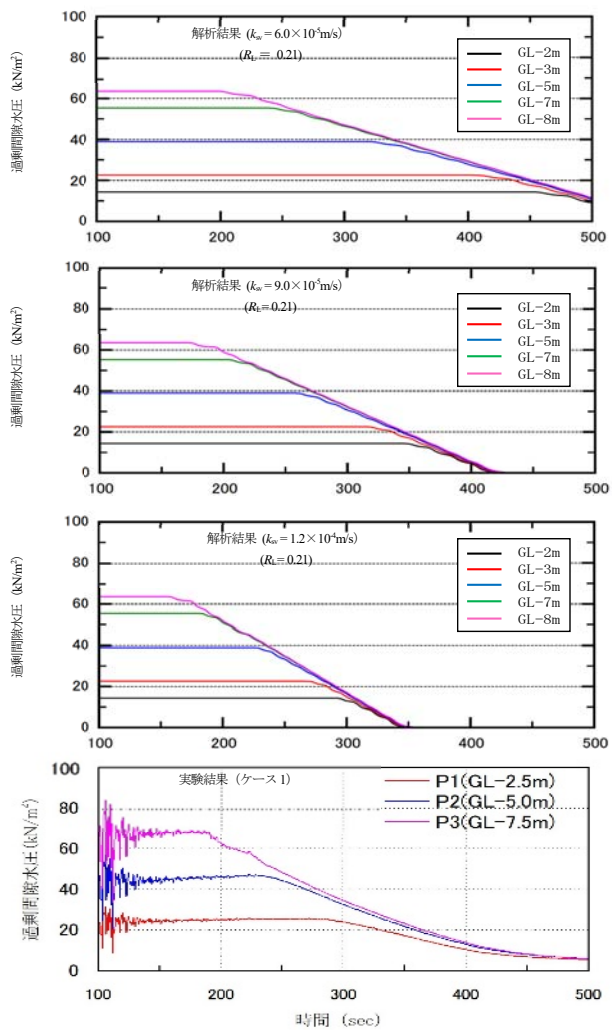


図-19 解析と実験の比較 (kv の設定)

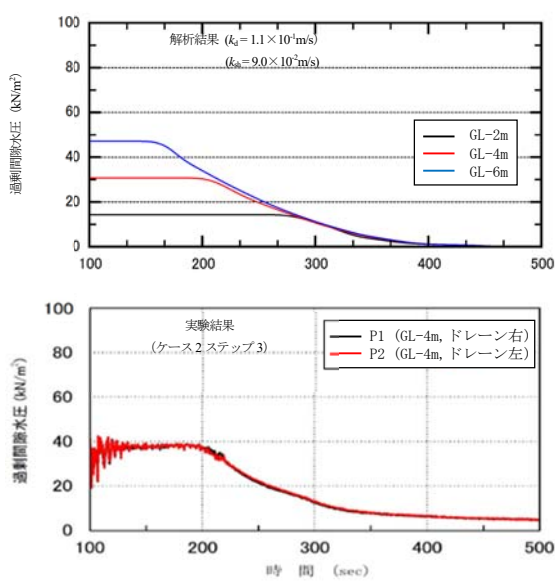


図-20 解析と実験結果の比較
(k_d 、 k_h の設定)

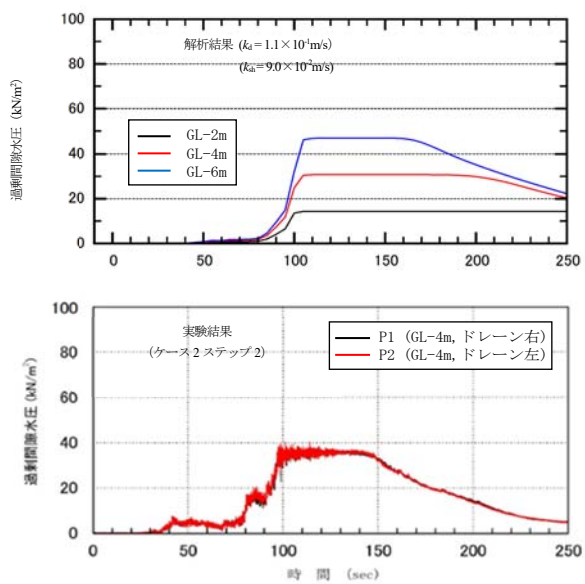


図-21 解析と実験結果の比較
(加速度振幅 1/3)

透水係数の変化は過剰間隙水圧の消散に影響するため、 k_v の合わせ込みと同様に過剰間隙水圧が減少し始める時間（200秒前後）と減少する速度（傾き）から $k_d=1.1 \times 10^{-1} \text{m/s}$ 、 $k_h=9.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ を設定した。このように適切なパラメータ設定を行えば、実験結果を再現でき、液状化対策としてのグラベルドレーンの効果が再現可能であることが確認された。また、合わせ込んだパラメータを用いて、ケース2のステップ2で実験結果の再現解析を行った。図-21より、過剰間隙水圧が減少し始める時間は50秒程度遅くなっており、解析では実験よりもグラベルドレーンの排水効果が過小に計算されているが、過剰間隙水圧が最大となる時間（100秒前後）が一致する等、概ね実験結果を再現している。

3.3 評価法のまとめ

グラベルドレーンが設置されていない模型地盤と設置された模型地盤の遠心実験を対象に、液状化地盤及びグラベルドレーンに関する解析パラメータの合わせ込みを行った。その結果、本評価法によりグラベルドレーンによる過剰間隙水圧の低減効果の再現が可能であることを確認した。

4. グラベルドレーン工法設計法

4.1 設計法の概要

河川堤防の液状化対策としてグラベルドレーン工法を用いる場合の設計法を提案する。

河川堤防では、地震により堤防が沈下し、越流した河川水により決壊することを懸念し、地震後の堤防高さが照査外水位よりも高いことを照査している¹¹⁾。地震後の堤防高さは、液状化を考慮した地盤変形解析により求めることとされており、有限要素法による自重変形解析（以下、ALID）が実務では広く用いられている。

ALIDを河川堤防で用いる場合には、 R_L 、 F_L 及び拘束圧から液状化層の地震時の剛性を求め、地盤の変形を求めるのが一般的である。この方法では、グラベルドレーン工法の効果を直接的に考慮することができない。そこで、グラベルドレーン工法で改良した地盤に、グラベルドレーンの効果に見合った等価な R_L を与えることで、グラベルドレーンによる沈下抑制効果を評価することを考えた。

設計フローを図-22に示す。図中の浸透安全性照査とは、浸透流解析と円弧すべり計算により、すべりに対する安全率や局所動水勾配等（基盤漏水に対する安全性）が所要の範囲にあるか、あるいは、対策前に比べ安全性が低下していないことを照査するものである。

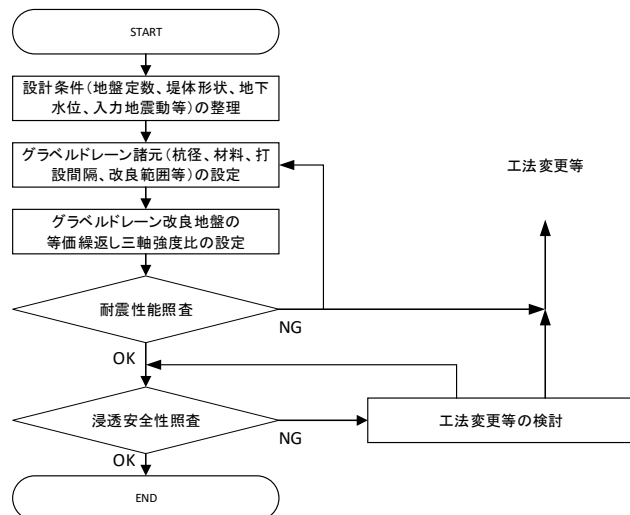


図-22 グラベルドレーン工法設計フロー

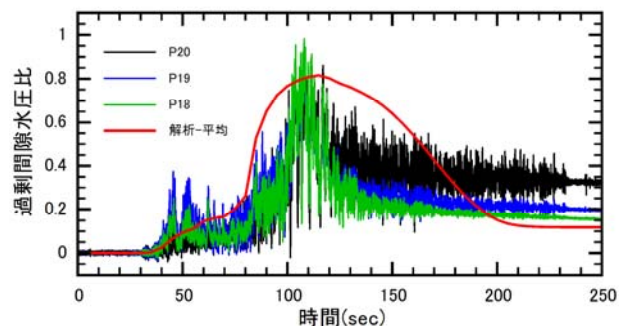


図-23 遠心模型実験と液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析の比較（ケース4）

グラベルドレーン工法を川表側に使うと、堤体や基盤への浸透を助長することになるため、川裏側でしか利用できないこととなる。

4.2 等価繰返し三軸強度比の設定方法

グラベルドレーンの効果に見合った等価な R_L を設定するに当たり、まず、グラベルドレーンをモデル化しない状態（液状化地盤のみ）で、 R_L を変化させ、地震動が作用した場合の過剰間隙水圧比を求める。過剰間隙水圧比は時間的、区間的に変化するため、代表的な過剰間隙水圧比の設定が課題となる。遠心模型実験の結果によると、過剰間隙水圧比の時間的な極大値、空間的な最大値は必ずしも沈下量との対応関係が良いとは言えないことから、ここでは、時間的、空間的に平均した結果を用いることとした。代表値の算出方法に関しては、今後も検討を継続する予定である。

次に、グラベルドレーンをモデル化した状態で、地震動が作用した場合の過剰間隙水圧比を求め、代表値を抽出する。この代表値とグラベルドレーンをモデル化しなかった場合の代表値が一致する R_L を等価 R_L とする。

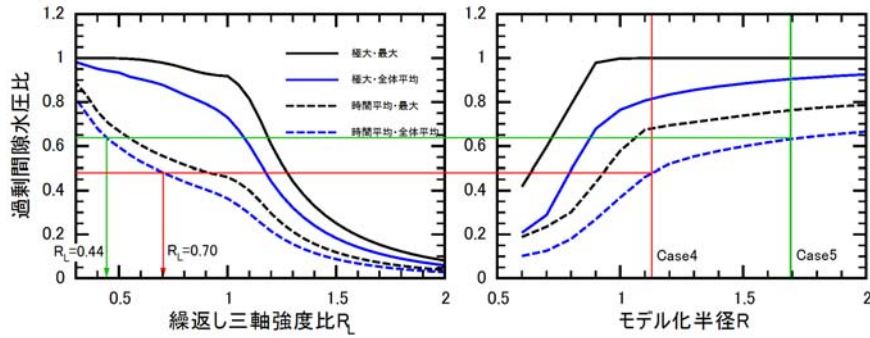


図-24 グラベルドレーン改良地盤の等価繰返し三軸強度比の算出

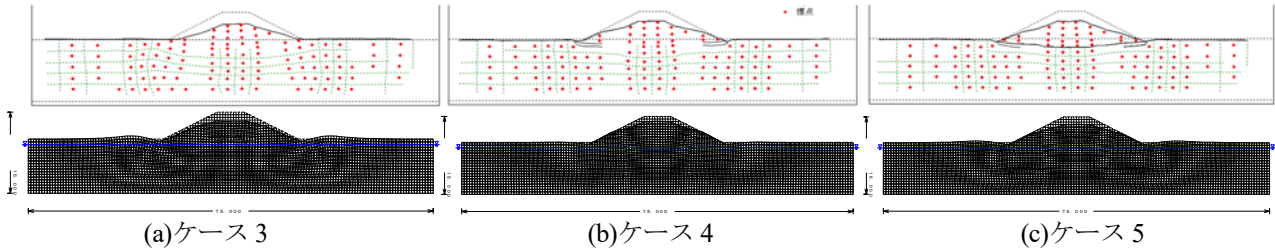


図-25 遠心模型実験と解析の変形図比較 (上段：実験、下段：解析)

4.3 遠心模型実験の再現解析

堤体をモデル化した 2. のケース 3～5 を対象に再現解析を実施した。

まず、無対策のケース 3 を対象に有限要素法による自重変形解析を行い、沈下量を再現することのできる液状化層の R_L を 0.36 と算出した。

次に、グラベルドレーンをモデル化したケース 4 を対象に、液状化層の R_L に 0.36 を設定した上で、液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析を実施した。室内透水試験から得られた透水係数を用いた解析では、過剰間隙水圧比の低下速度が実験結果と比べて極めて大きかったため、過剰間隙水圧比の低下勾配が概ね一致するよう試行錯誤により透水係数を設定した。採用した透水係数 (室内透水試験の $1/5$ の $3.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}$) を用いた解析結果と遠心模型実験の比較を図-23 に示す。

これらの定数を用いて、グラベルドレーンをモデル化しない状態で R_L を変化させた結果を図-24 の左に示す。過剰間隙水圧比の代表値の取り方として、時間的・空間的に、極大・最大か平均をとるかで 4 通りの結果を示しているが、前述のとおり、時間的・空間的に平均した結果を用いた。

さらに、グラベルドレーンをモデル化した状態の解析を実施した。解析の傾向を把握するため、ケース 4, 5 の打設間隔に対応した条件だけでなく、解析半径を 0.6m から 2m までの変化させた結果を図-24 の右に示す。グラベルドレーンの杭半径が 0.5m であるので、解析半径 0.6m は、グラベルドレーンの周りに 0.1m 幅の

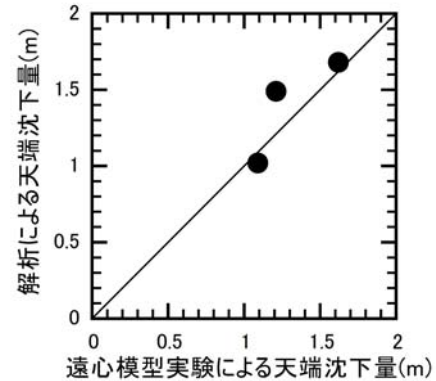


図-26 遠心模型実験と解析の天端沈下量の比較

薄い液状化層をモデル化した状態であり、グラベルドレーンにより大きな効果が発揮され、小さな過剰間隙水圧比が得られている。一方で、解析半径を大きくすると、効果が発揮されにくくなり、過剰間隙水圧比が大きくなる。

正方形配置に対応する解析半径 (グラベルドレーン 1 本が分担する液状化層の体積が等価となる) から、等価 R_L は 0.70 (ケース 4)、0.44 (ケース 5) と求めることができる。

このようにして得られた等価 R_L を ALID に適用し、沈下量を求めた。等価 R_L を設定した範囲は、外側の杭芯間とし、沈下量は天端上節点の平均値である。図-25 にケース 3～5 の加振後の実験・解析の変形図を示す。加えて、遠心模型実験と解析の天端沈下量の比較を図-26 に示す。遠心模型実験結果と概ね整合的な解析結果となっていることが確認できた。

4.4 設計法のまとめ

前述の評価法を用いた設計法を示し、 R_L や透水係数を適切に設定できれば遠心模型実験結果を概ね再現できることを確認した。

5. まとめ

液状化対策としてのグラベルドレーンに関して、遠心模型実験やグラベルドレーンの効果を再現可能な液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析の開発、地震後の堤防高さを考慮した設計法の開発を行った。

- 1) 液状化地盤へ異なる条件のグラベルドレーンを設置した模型及び設置しない模型を用いた遠心力模型実験を行い、杭径の違いやグラベルドレーンの有無、杭芯間隔の違いが過剰間隙水圧比や河川堤防の沈下等に及ぼす影響について検討した。大規模地震動に対しても、水圧低減効果が確認された。また、グラベルドレーンの有無及び杭芯間隔の異なる条件の比較より、グラベルドレーンを設置したケースでは、設置しないケースと比較して、液状化地盤上に設置した堤体天端の沈下量を大幅に抑制することが可能であることが分かった。
- 2) 液状化による過剰間隙水圧の発生・消散解析を用いたグラベルドレーンの過剰間隙水圧の抑制効果の評価法を開発した。本評価法により、遠心模型実験で確認されたグラベルドレーンによる過剰間隙水圧の抑制効果を再現できることを確認した。
- 3) 河川堤防に対する液状化対策としてのグラベルドレーン工法の設計法を開発した。繰返し三軸強度比や透水係数を適切に設定できれば遠心模型実験で得られた沈下量を概ね再現できることを確認した。

- 6) 青柳悠大, 丸田亮, 石原雅規, 佐々木哲也: グラベルドレーンの杭芯間打設間隔が河川堤防の地震時変形と液状化地盤内の過剰間隙水圧比分布に及ぼす影響, 第 57 回地盤工学研究発表会, 2022.
- 7) 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, 第 77 回土木学会年次学術講演会, 2022.
- 8) Seed, Booker: Stabilization of Potentially Liquefacible Sand Deposits using Gravel Drain System, Earthquake Engineering Research Center Report No. EERC 76-10, 1976.
- 9) 吉田望, 規矩大義: 液状化解析に用いる砂の堆積変化特性モデルに関する検討, 第 32 回地盤工学研究発表会, 1997.
- 10) Ishihara, K., Yoshimine M.: Evaluation of Settlements in Sand Deposits following Liquefaction during Earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, 1992.
- 11) 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 II.堤防編, 2016.

参考文献

- 1) 松尾修, 島津多賀夫: 河川堤防の液状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) 佐々木哲也, 石原雅規: 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) 河川耐震対策緊急検討委員会: 東日本大震災を踏まえた今後の河川堤防の耐震対策の進め方について 報告書, 2011.
- 4) 日本道路協会: 道橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2017.
- 5) 丸田亮, 石原雅規, 青柳悠大, 佐々木哲也: 非定常浸透流解析によるグラベルドレーンの液状化対策効果の再現解析, 第 77 回土木学会年次学術講演会, 2022.

EVALUATION AND DESIGN METHOD AS LIQUEFACTION MEASURE OF RIVER EMBANKMENT FOR LARGE SCALE SEISMIC MOTION

Research Period: FY2016-2021

Research Team: Soil Mechanics and Dynamics Research Team,
Geology and Geotechnical Engineering Research Group

Author: SASAKI Tetsuya

ISHIHARA Masanori

KAJITORI Shin-ichi

SASAKI Toru

AOYAGI Yudai

Abstract: The gravel drain method as a liquefaction measure is no longer used because its effectiveness against Level 2 seismic motion is unknown and its evaluation method and design method have not been established. On the other hand, in the Great East Japan Earthquake, it has been confirmed that measures by the gravel drain method have exerted a certain effect on river embankments. Therefore, in this study, the effect of the gravel drain method on Level 2 seismic motion was clarified by a series of centrifuge model experiments. We also developed an evaluation method based on seepage flow analysis and a design method for river embankments using the evaluation method. These method was confirmed to reproduce the results of the centrifuge model experiments.

Keywords: gravel drain method, liquefaction measure, centrifuge model experiment, design method