

ドレーン及びその周りの液状化層の
過剰間隙水圧の発生と消散を簡易に求める解析方法

令和6年5月

石原 雅規 三浦 裕太

(国研) 土木研究所 地質・地盤研究グループ

土質・振動チーム

目次

1	解析方法の概要.....	1
2	解析方法の詳細.....	2
2.1	浸透流解析と過剰間隙水圧の発生.....	2
2.2	損傷度の算出.....	3
2.3	過剰間隙水圧増分の算出.....	6
2.4	体積圧縮係数.....	7
2.5	損傷度と過剰間隙水圧比の関係.....	13
2.6	液状化中の透水係数.....	16
2.7	液状化による応答の減衰の効果.....	18
3	間隙水圧消散工法における解析方法の活用.....	19
3.1	軸対称モデルと実配置の関係.....	20
3.2	間隙水圧消散工法の効果の表し方.....	21
3.3	過剰間隙水圧の代表値.....	22
3.4	ドレーンの効果の及ぶ範囲.....	22
4	プログラムの構成.....	23
5	GUI プログラム	24
6	解析プログラム.....	28
7	後処理プログラム.....	31
7.1	解析結果の読込、図化（アニメーション）	32
7.2	F_L 倍率の算出.....	34
7.3	地盤変形解析への F_L 倍率の反映.....	35
7.4	その他の解析結果整理.....	38
参考文献		38

1 解析方法の概要

ここで紹介する解析方法は、地震動による液状化層の過剰間隙水圧の発生・消散を簡易に求めることができ、主に間隙水圧消散工法の設計を行うことを目的として開発した方法である。

解析方法は以下のような特徴を持つ。

- ・軸対称非定常浸透流有限要素解析（過剰間隙水圧発生項あり）で、液状化による過剰間隙水圧の分布や時刻歴を求めることができる。
- ・中心部分に高い透水係数を設定すれば、間隙水圧消散工法の効果（過剰間隙水圧の低減）を算出できる。
- ・中心部分に高い透水係数を設定しなければ、液状化地盤の地震中及び地震後の間隙水圧の分布、時刻歴を算出できる。
- ・各要素の累積損傷度から、過剰間隙水圧発生量を算出。累積損傷度は、河川構造物や道路橋等の液状化判定に準じて算出するため、十分に透水係数が小さければ、液状化判定と整合する結果が得られる。
- ・石原・吉嶺の体積ひずみの関係と等価な累積損傷度と過剰間隙水圧の関係、体積圧縮係数を用いる（標準値として設定されている）ことで、過剰間隙水圧消散に伴う体積圧縮量は石原・吉嶺の体積ひずみの関係に一致する。

なお、第1章、第2章は、主に石原の博士論文「過剰間隙水圧の発生と消散に係る簡易モデルによる液状化判定法」¹⁾の第6章を再編集したものとなっている。

解析手順及びその概要図（鉛直一次元）を以下に示す。

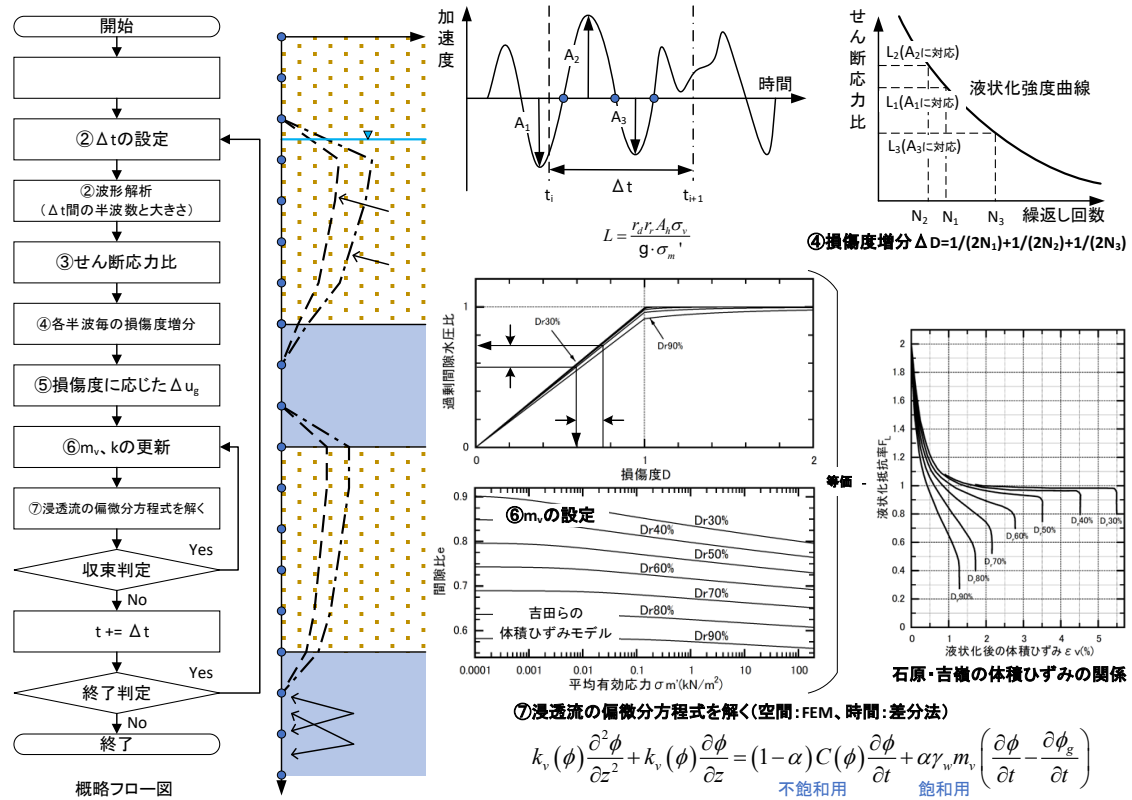


図 1.1 解析方法の手順及び概要図（中心部分に高い透水係数を設定しない場合）

2 解析方法の詳細

2.1 浸透流解析と過剰間隙水圧の発生

Seed ら^{2,3)}に倣い、飽和領域（地下水位以下の範囲）における過剰間隙水圧の上昇を考慮した軸対称の浸透に係る偏微分方程式 (1) を示す。

$$\frac{k_v}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

- u : 過剰間隙水圧
- u_g : 地震動による過剰間隙水圧の発生量

z : 鉛直位置
 y : 中心からの水平位置
 t : 時間
 k_v : 鉛直方向の透水係数
 k_h : 水平方向の透水係数
 m_v : 体積圧縮係数

次に、不飽和領域（地下水位より上の範囲）まで拡張した式(2)を示す。

$$k_v(\phi) \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k_v(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} = (1 - \alpha) C(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \alpha \gamma_w m_v \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial \phi_g}{\partial t} \right) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

ϕ : 全水圧（静水圧＋過剰間隙水圧、大気圧を基準とし、地下水位より上位では負値）
 ϕ_g : 地震動による過剰間隙水圧の上昇量（= u_g ）
 α : 地下水位より上位で 0、下位で 1
 $k_v(\phi)$: 鉛直方向の透水係数で、地下水位より上位ではサクションに応じて変化
 $C(\phi)$: 比水分容量（= $d\theta/d\phi$ 、 θ は体積含水率）

不飽和領域の透水係数はサクションの関数として表されることが一般的であることから、過剰間隙水圧 u ではなく全水圧 ϕ に変えており、全水圧に含まれる静水圧 u_0 を考慮するため、左辺第 2 項が加わっている。また、不飽和領域のサクションの変化に伴う含水量の変化を右辺第 1 項で考慮している。

2.2 損傷度の算出

河川構造物や道路橋の液状化判定法^{4,5)}に準じ、地表面における加速度波形を用いて損傷度を算出する。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式(3)によって算出する。

$$L = \frac{r_d A_h \sigma_v}{g \cdot \sigma_m} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数 ($=1-0.015z$)
 A_h : 地表面における半波毎のピーク加速度
 g : 重力加速度
 σ_m' : 平均有効応力

$$\sigma_m' = \frac{\sigma_v' + 2\sigma_h'}{3} = \frac{(1+2K_0)(\sigma_v - u_0 - \Delta u)}{3} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、

- σ_h' : 水平方向の有効応力
 u_0 : 初期静水圧
 Δu : 過剰間隙水圧
 K_0 : 静止土圧係数 (=0.5 を使用)

損傷度の増分は模式的に図 2.1 に示すとおりで、式(5)により求める。半波毎の損傷度 (の増分) を用いることで、波形の影響を部分的に考慮できる。

$$\Delta D = \frac{1}{2N_{\varepsilon_{da}=5\%}(L)} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

- ΔD : せん断応力比 L の半波による損傷度の増分
 $N_{\varepsilon_{da}=5\%}(L)$: 排水繰返し三軸試験において軸ひずみ両振幅が 5% に達するに必要な応力振幅 L の繰返し回数 (液状化強度曲線)

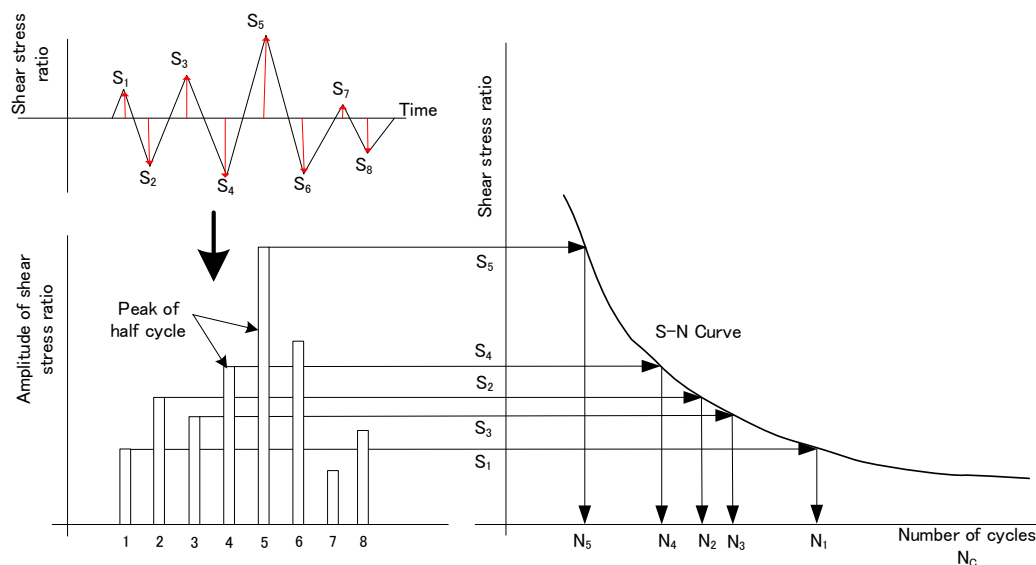


図 2.1 損傷度の算出過程の模式図

液状化強度曲線は、非排水繰返し三軸試験等の要素試験の結果から設定することが可能であるが、供試体の乱れの影響が大きいために、実務では必ずしも要素実験の実施が推奨されていない。このため、 N 値から繰返し三軸強度比 R_L が設定され、要素試験が実施されないことがほとんどである。そこで、液状化強度曲線に推定式を用いることとした。提案されている様々な液状化強度曲線の推定式の中で、後述する石原・吉嶺の体積ひずみの関係⁶⁾の整理が実施しやすかったのが龍岡らの式(6)⁷⁾であった。式(6)の右辺の係数 20 は、非排水繰返し三軸試験において、繰返しせん断を 20 回加えた時に、軸ひずみ両振幅が 5%となるせん断応力比を繰返し三軸強度比 R_L と定義する方法が、河川構造物や道路橋等の液状化判定法では一般的に用いられていることに由来する。

$$N_{\varepsilon_{da}=5\%} = 20 \left(\frac{L}{R_L} \right)^{1/b} \dots\dots\dots (6)$$

土木研究所でこれまで実施してきた凍結サンプリングから得られた要素試験結果を図 2.2 に示す。同図には、式(6)の b の位置を変えた式(7)によりフィッティングを行った結果も示した。

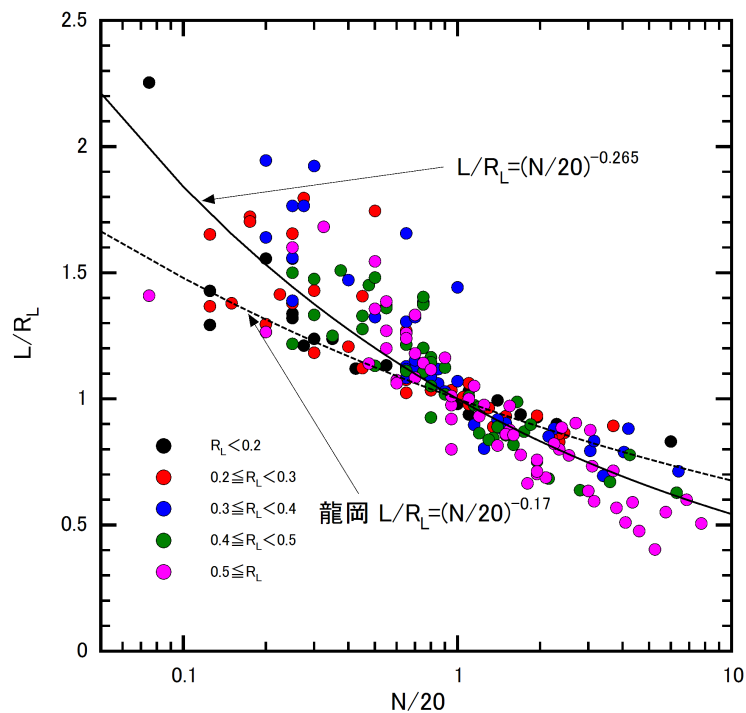


図 2.2 凍結サンプリングから得られた要素試験による繰返し回数とせん断応力比の関係

$$\frac{L}{R_L} = \left(\frac{N_{\varepsilon_{da}=5\%}}{20} \right)^{-b} \dots\dots\dots (7)$$

フィッティングの結果は、龍岡らの結果に比べ、せん断応力比の大きな範囲で三軸試験における軸ひずみ両振幅が 5%に達するのに必要な繰返し回数が多い。細かく見れば、繰返し三軸強度比 R_L が 0.5 以上の試験結果で、フィッティングした曲線よりも急勾配に分布している傾向もみられる。このような傾向を反映するため繰返し三軸強度比 R_L の区分毎にフィッティングを行う方法⁸⁾を採用することも可能であるが、相対密度によらず同じ正規化した液状化強度曲線を使う方が、石原・吉嶺の体積ひずみの関係に近い結果を得ることができることが分かっている。

式(5)に式(7)によるフィッティング結果を代入すると、地震動半波による損傷度の増分は式(8)により求められる。

$$\Delta D = \frac{1}{40} \left(\frac{L}{R_L} \right)^{3.77} \dots\dots\dots (8)$$

凍結サンプリングで採取できる細粒分をあまり含まない試料を用いた試験から導き出した関係式である。プログラム上では、細粒分が多く含まれる場合にも、液状化判定法の補正式により繰返し三軸強度比が補正され、同じく式(8)が用いられる点に留意が必要である。

なお、(累積) 損傷度は、式(9)に示すとおりとなる。

$$D = \sum_i \Delta D_i = \sum_i \frac{1}{40} \left(\frac{L_i}{R_L} \right)^{3.77} \dots\dots\dots (9)$$

部分排水の影響により、損傷度と過剰間隙水圧比は 1:1 の関係とはならないため、次節に示すとおり、式(8)で表される損傷度の増分から、過剰間隙水圧の増分を求める。

2.3 過剰間隙水圧増分の算出

損傷度と過剰間隙水圧比の関係は、図 2.3 に示すように、損傷度が 1 までの範囲では単純な直線関係を使用することとした。その理由の 1 つ目は、レベル 2 地震動のような強い地震動まで考えた場合には、損傷度が 1 以下の精度を上げて、結果が大きくは変わらないためである。2 つ目に、条件によって損傷度 1 以下の水圧の上がり方も様々であり、 N 値と粒度程度の情報では精度が上がらないと考えたためである。繰返し三軸強度比の大きな(密詰めの)土では、繰返し非排水三軸試験において液状化の判断基準となっているひずみ両振幅が 5%になっても、ひずみ振幅が急増せず粘りを有している。この粘りを石原・吉嶺の体積ひずみの関係⁶⁾を元に図 2.3 の赤線のような関係で表現することとした。この関係の具体的な導出方法は、2.5 節で述べる。

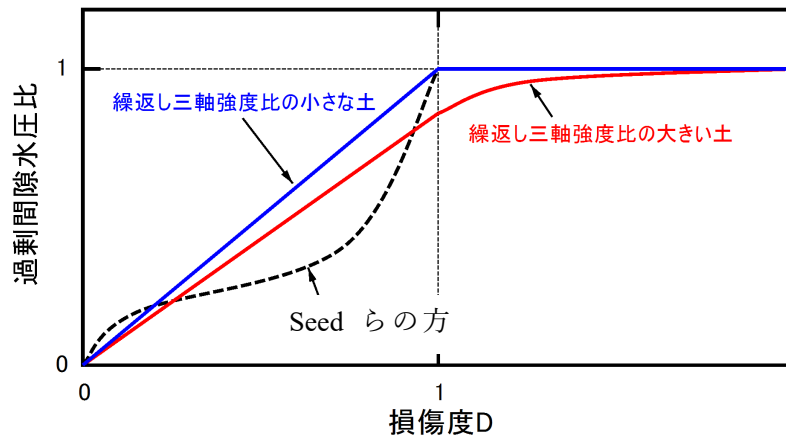


図 2.3 簡易モデルにおける損傷度と過剰間隙水圧比の関係
(部分排水の影響がない場合)

2.4 体積圧縮係数

石原・吉嶺の体積ひずみの関係と整合する体積圧縮係数の設定方法を検討した。

永瀬らは、様々な密度の砂の供試体に対し不規則波を与え、過剰間隙水圧比と液状化後の体積ひずみの関係を図 2.4 のとおり整理した⁹⁾。

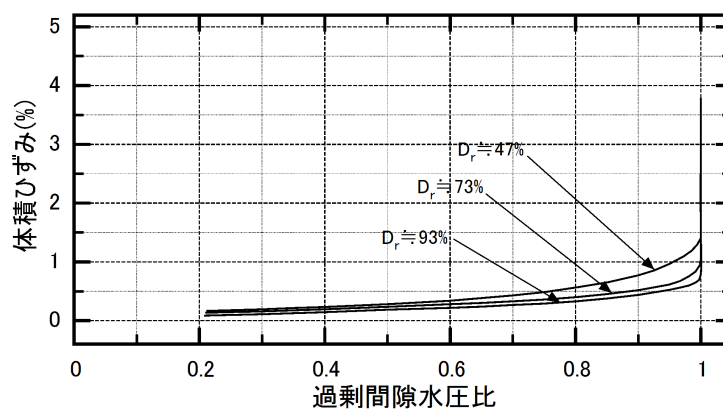


図 2.4 過剰間隙水圧比と液状化後の体積ひずみの関係⁸⁾

この関係によると、過剰間隙水圧比が 0.8 程度までの範囲では体積ひずみが相対的に直線的に増加するが、0.8 よりも大きな範囲では体積ひずみの増加傾向が大きくなり、1 付近で加速度的に増加する傾向が全ての密度で確認されている。また、遠心模型実験では、図 2.5 に示すように過剰間隙水圧比がほぼ 1 の状態がしばらく維持された上で、液状化層下端から順番 (P1 が浅く、P8 が深い) に低下することが確認されている。このような要素試験や模型実験で見られる傾向を再現する方法として、体積圧縮係数 m_v を圧縮指数 C_c と各要素の

時々刻々の有効応力から求め、更新する方法が考えられる。しかし、この方法にも難点がある。図 2.6 に体積圧縮係数 m_v 一定とした場合の体積変化モデルと圧縮指数 C_c 一定とした場合の体積変化モデル、吉田らの体積変化モデル¹⁰⁾の3種類の e - $\log p$ 関係を示す。圧縮指数 C_c 一定の場合には、有効応力がゼロになった場合に無限に大きな間隙比となることから、過剰間隙水圧が消散した時の体積圧縮ひずみは極めて大きくなる可能性があり望ましいとは言えない。このような問題を解消できるのが吉田らの体積変化モデルである。

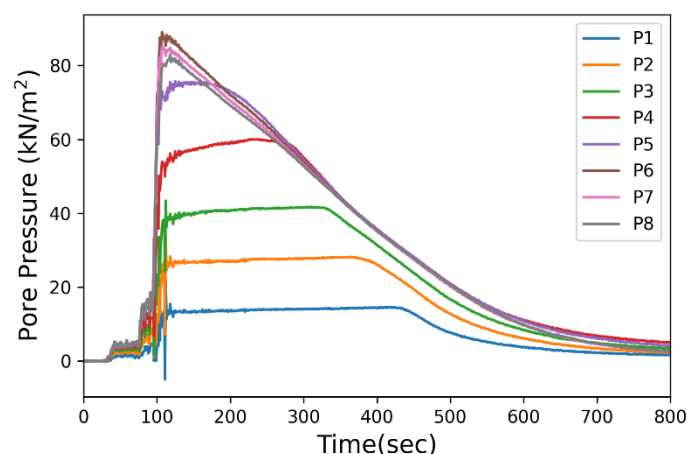


図 2.5 遠心模型実験で得られた過剰間隙水圧の時刻歴（50%加振）

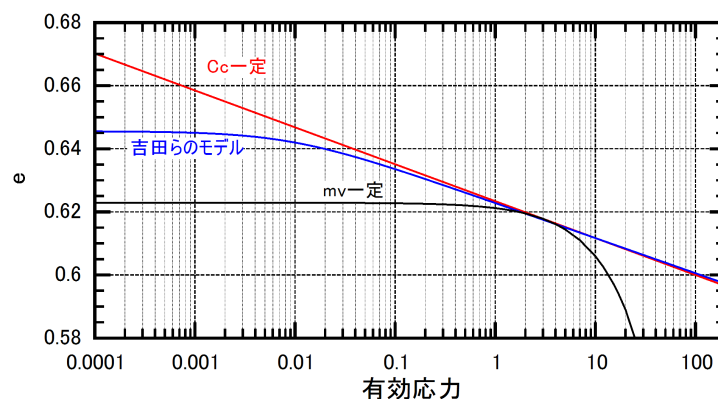


図 2.6 有効応力と間隙比の関係（体積変化モデルの違い）

$$\sigma'_m = \frac{e^{\varepsilon_v/c} - 1}{e^{\varepsilon_{v0}/c} - 1} \sigma'_{m0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

- ε_v : 体積ひずみ
- σ'_{m0} : 過剰間隙水圧消散後の平均有効拘束圧（＝初期平均有効拘束圧）
- ε_{v0} : $\sigma'_m = 0 \sim \sigma'_{m0}$ の過剰間隙水圧消散過程で生じた体積ひずみ
（＝最大体積ひずみ）

c : 係数

このモデルの体積ひずみを間隙比に置き換えた場合の関係が図 2.6 の青線である。有効応力が十分に小さくなるまでの間は圧縮指数 C_c 一定と同じ関係であるが、それより有効応力が小さくなると徐々に間隙比の変化が低減し、最大体積ひずみ ε_{v0} に対応する間隙比で頭打ちとなる。このモデルを用いることで、体積圧縮ひずみ量を望ましい形でコントロールすることができる。

式(10)を変形すると式(11)が得られ、体積圧縮係数 m_v を算出することができる。

$$m_v = \frac{d\varepsilon_v}{d\sigma_m} = \frac{c}{\sigma_m' + \frac{\sigma_{mo}}{e^{\varepsilon_{v0}/c} - 1}} \dots\dots\dots (11)$$

式(11)から体積圧縮係数 m_v を算出するにあたっては、最大体積ひずみ ε_{v0} と係数 c を設定する必要がある。一連の研究成果である永瀬らの研究成果も含めて、実務での使用実績が豊富な石原・吉嶺の体積ひずみの関係と整合するよう設定することとした。

まず、図 2.7 に示す石原・吉嶺の体積ひずみの関係から、図 2.8 に示す相対密度と最大体積ひずみ ε_{v0} の関係を求めた。石原・吉嶺の体積ひずみの関係の F_L が十分に小さく、体積ひずみが一定になった範囲から、最大体積ひずみを読み取り、相対密度との関係を整理したものである。本解析方法の計算中に生じる体積ひずみ（相対密度）に応じて、時々刻々、最大体積ひずみ ε_{v0} のような定数を更新することを念頭に、初期の相対密度と最大体積ひずみが生じた後の相対密度の平均値を代表する相対密度に採用した。この相対密度と最大体積ひずみ ε_{v0} の関係は、相対密度を変数とする関数によってフィッティングが可能であり、最小二乗法で係数を求めたものが式(12)である。

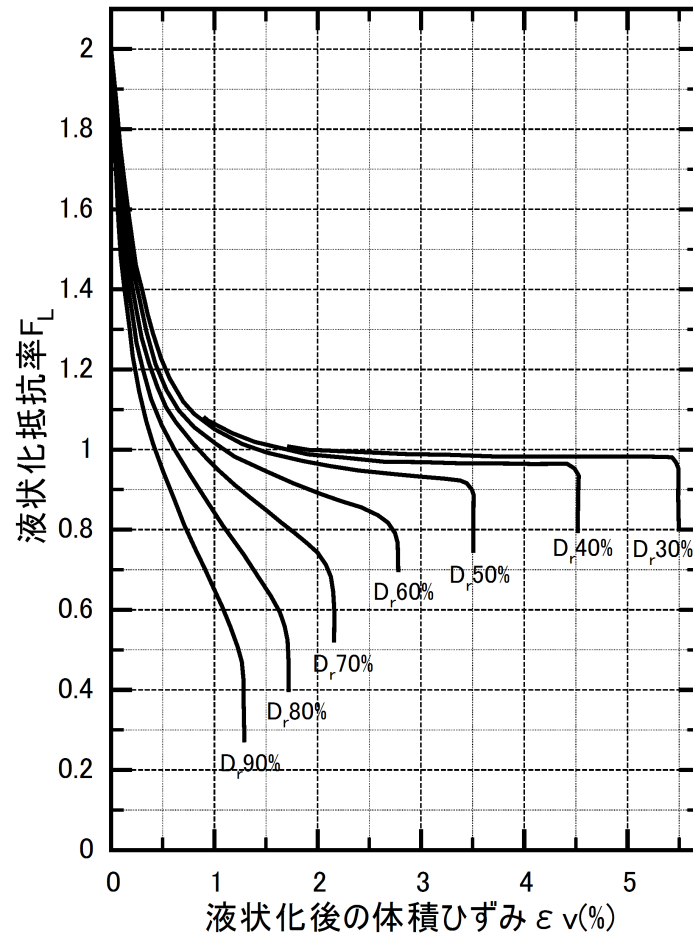


図 2.7 石原・吉嶺の体積ひずみの関係⁶⁾

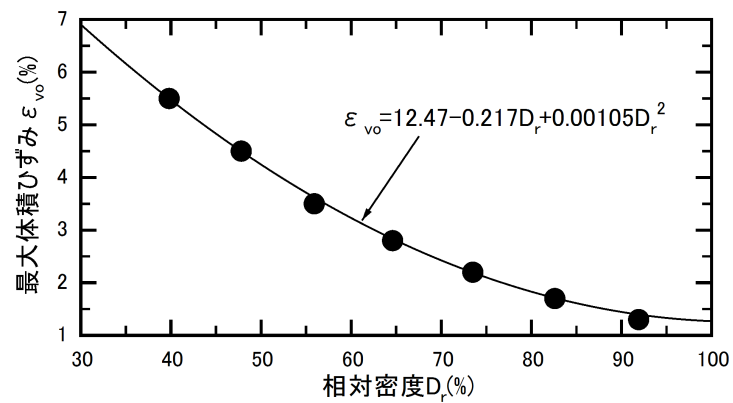


図 2.8 相対密度と最大体積ひずみの関係

$$\varepsilon_{vo} = 12.47 - 0.217D_r + 0.00105D_r^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、この最大体積ひずみは、元になっている要素試験の初期有効応力が 196kN/m^2 であることに留意が必要である。そこで、式(12)で得られる最大体積ひずみを ε_{vo_196} と表記することとする。式(10)に $\sigma_{m'}=196$ 、 $\varepsilon_v=\varepsilon_{vo_196}$ を代入すれば、任意の初期有効応力の場合の最大体積ひずみを求めることができる。

$$\varepsilon_{vo} = c \ln \left\{ 1 + \frac{\sigma_{mo}'}{196} \left(e^{\varepsilon_{vo_196}/c} - 1 \right) \right\} \dots\dots\dots (13)$$

参考に、式(13)で得られる最大体積ひずみの例 ($c=0.04$, $\varepsilon_{vo_196}=0.05$ とした場合) を図 2.9 に示す。最大体積ひずみ ε_{vo} は、初期の平均有効応力に応じて変化することが分かる。ただし、log スケールの横軸に対して直線的な関係であるため、実務で良く使う範囲では、最大体積ひずみ ε_{vo} と初期平均有効応力 $\sigma_{mo}'=196\text{kN/m}^2$ における最大体積ひずみ ε_{vo_196} の違いは、大きくとも数割程度に収まることも分かる。

次に、係数 c について検討する。吉田らは式(14)を用いることで、要素試験結果とよく一致した応力-ひずみ関係が得られるとしている。

$$c = 0.0007 + 0.053\varepsilon_{vo} \dots\dots\dots (14)$$

しかし、この吉田らが推奨する係数 c を適用した場合、永瀬らがまとめた過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係に比べ、図 2.10 (a)に示すように全体的に体積ひずみが小さく算出される傾向が確認された。そのため、永瀬らの要素試験結果と整合的な係数 c を相対密度毎に算出した。このようにして求めた過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係を図 2.10 (b)に示す。式(12)と同じく相対密度との関係を図 2.11 に示す。最小二乗法でフィッティングした結果が式(15)である。

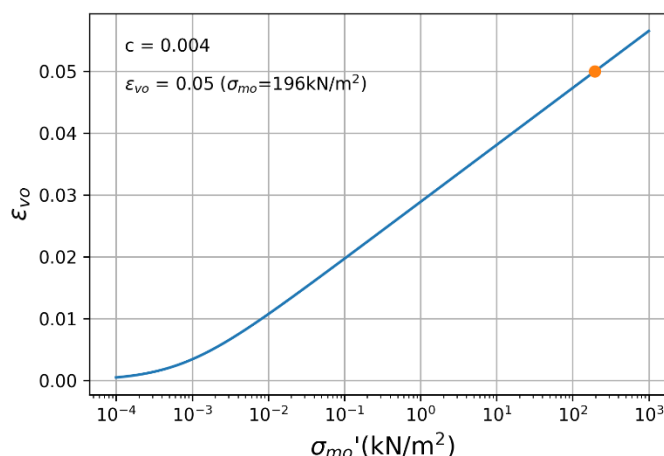
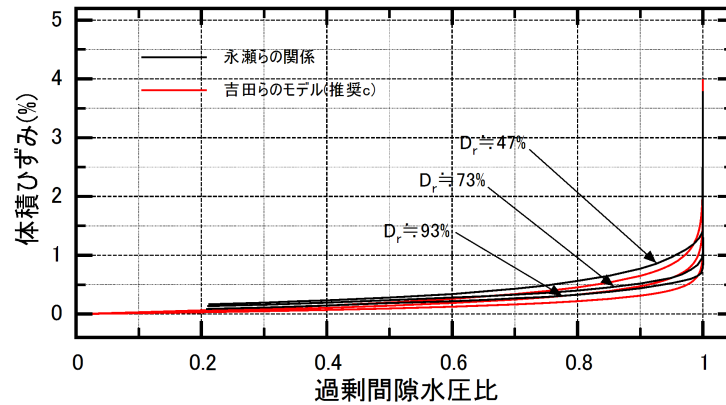
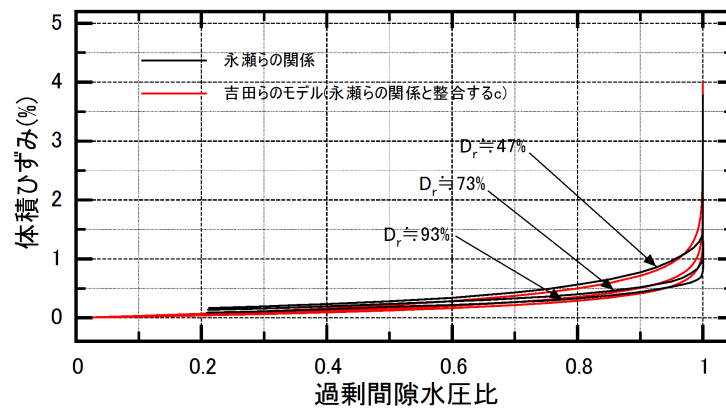


図 2.9 初期有効応力と最大体積ひずみの関係の例



(a) 吉田らの推奨する係数 c を適用した場合



(b) 永瀬らの関係に整合する係数 c を適用した場合

図 2.10 吉田らのモデルから求めた過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係

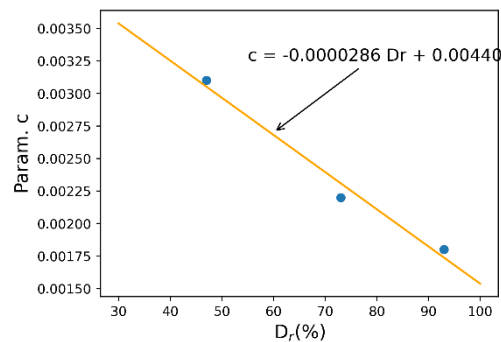


図 2.11 相対密度と係数 c の関係

$$c = -0.0000286 D_r + 0.00440 \quad \dots\dots\dots (15)$$

参考に、初期有効応力 196 kN/m^2 の元で、相対密度毎の有効応力と間隙比の関係を図 2.12 に示す。初期有効応力状態から地震動により体積変化することなく有効応力が 0 になり、圧密する過程を表現した図であるため、有効応力が 0 の時の間隙比が各相対密度に対応して

いる。有効応力が増加（回復）する過程で相対密度が増加する。相対密度が変化したら、最大体積ひずみと係数 c も変化させ、平均有効応力の変化量に対応する体積ひずみの変化量を求め、間隙比に換算した。本解析方法の計算過程でも、これと同様に相対密度に応じた最大体積ひずみと係数 c を使用し、体積ひずみを算出することとした。このような方法では、最大体積ひずみと係数 c の更新頻度によって計算結果が変わってしまうため、1 ステップの体積ひずみが一定値以下となるように時間刻みを調整する機能を本解析方法に付した。

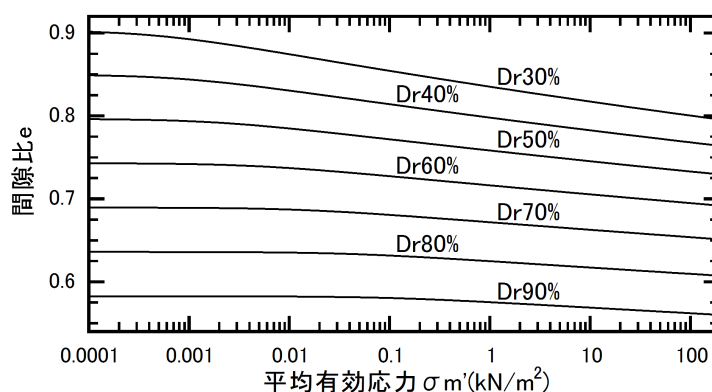


図 2.12 相対密度毎の有効応力と間隙比の関係

ここまで簡易モデルに用いる体積圧縮係数の設定方法を説明してきた。ここでも元にした試験結果は、細粒分をほとんど含まない砂を対象とした試験結果である。

本解析方法に用いる体積圧縮係数の設定方法の適用範囲は、せいぜい細粒分含有率が30%程度までであると考えられる。適用範囲外の土で、試験値から吉田らのモデルのパラメータを設定するには、非排水繰返し三軸試験を実施し、非排水繰返し载荷の後に、間隙水圧を背圧まで戻す過程の体積ひずみを押さえておけばよい。

2.5 損傷度と過剰間隙水圧比の関係

前述のとおり、繰返し三軸強度比に応じて、損傷度と過剰間隙水圧比の関係を变えることとした。

吉田らのモデルから図 2.10 に示すような過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係を得られる。相対密度 30% から 90% まで 10% 刻みに、式(12)と式(15)により最大体積ひずみと係数 c を設定し、吉田らのモデルから過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係を求めた。その結果を図 2.13 に示す。この関係に、石原・吉嶺の体積ひずみの関係から得られる体積ひずみを当てはめれば、対応する過剰間隙水圧比を求めることができる。

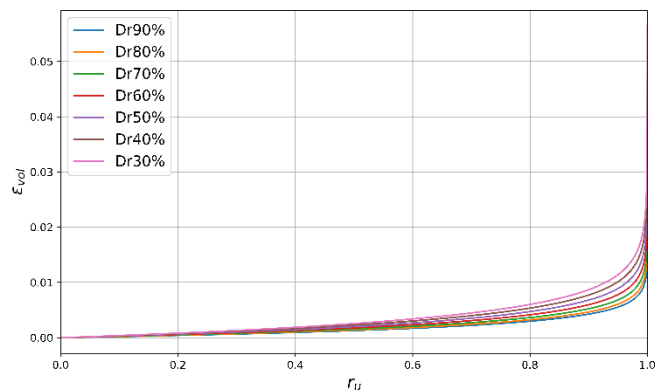


図 2.13 過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係（相対密度 30%～90%）

式(9)を展開すると、損傷度 D と F_L の関係が得られる。

$$D = F_L^{-3.77} \dots\dots\dots (16)$$

式(16)により F_L を損傷度 D に変換し、吉田らのモデルにより体積ひずみを過剰間隙水圧比に変換すれば、石原・吉嶺の体積ひずみの関係を、過剰間隙水圧比と損傷度の関係に変換することができる。

損傷度 1 以下の範囲では、損傷度と過剰間隙水圧比の関係を直線（図 2.3 の赤線と青線）と仮定しているため、損傷度 1 の時の過剰間隙水圧比を定式化できれば良いこととなる。

まず、損傷度 1 ($F_L=1$) の時の過剰間隙水圧比を、石原・吉嶺の体積ひずみの関係から求めた。過剰間隙水圧比を有効応力比に変換し相対密度との関係を図 2.14 のとおり整理した。相対密度が大きく、繰返し三軸強度比が大きいほど、両ひずみ振幅 5%における過剰間隙水圧比が低くなる傾向となった。相対密度は図 2.8 と同じく、初期と最大体積ひずみが生じた後の平均値である。相対密度を変数とする関数でフィッティングした結果が式(17)である。

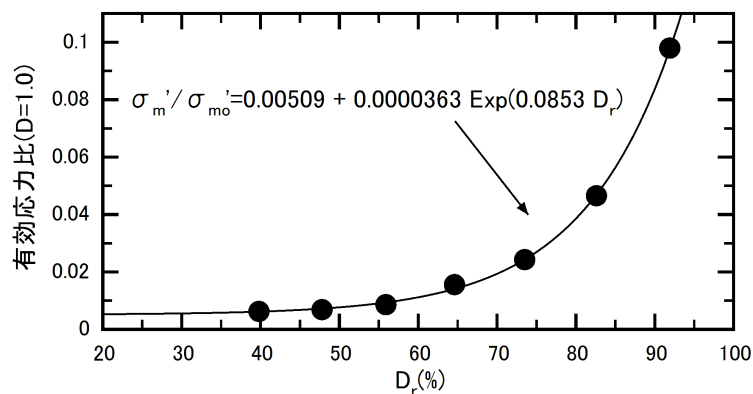


図 2.14 相対密度と損傷度 1 における有効応力比

$$\sigma_{m,D=1}' / \sigma_{mo}' = 0.00509 + 0.0000364e^{0.0853D_r} \dots\dots\dots (17)$$

次に、石原・吉嶺の体積ひずみの関係から、損傷度 1 よりも大きい範囲 ($F_L < 1$) の過剰間隙水圧比を求め、有効応力比に変換し、相対密度毎に損傷度との関係を図 2.15 のとおり整理した。相対密度が小さい範囲 ($D_r \leq 50\%$) と相対密度 90%の一部の区間を除き、両対数軸上で概ね直線的な関係が見られる。このため、有効応力比=0.0001 の時の交点 (赤十字) と式(17)で求められる損傷度 1 における有効応力比を結ぶ直線によって、定式化することとした。

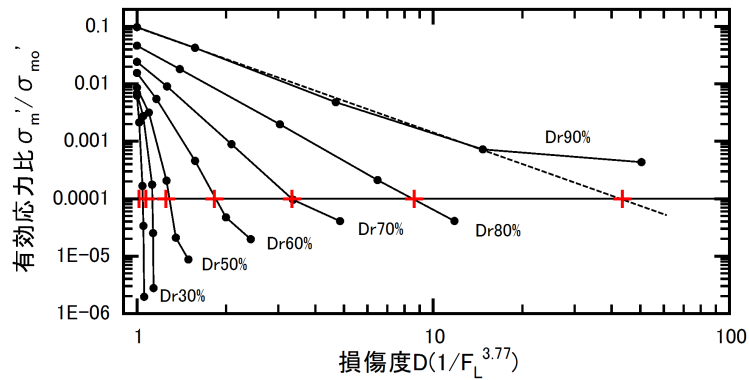


図 2.15 損傷度 ($D > 1$ の範囲) と有効応力比の関係

図 2.15 の赤十字の損傷度と相対密度の関係を図 2.16 に示す。相対密度を変数とする関数によってフィッティングを行った結果、式(18)が得られた。

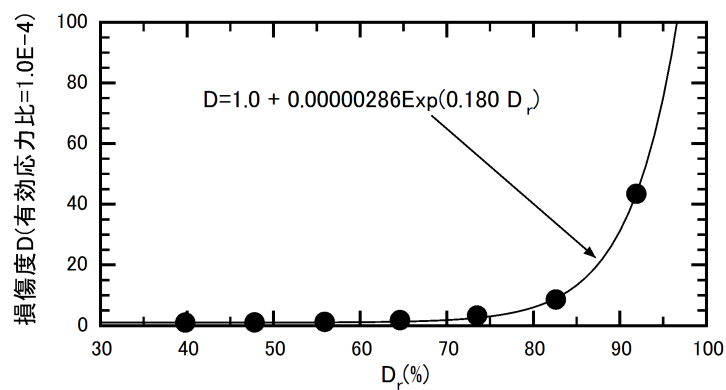
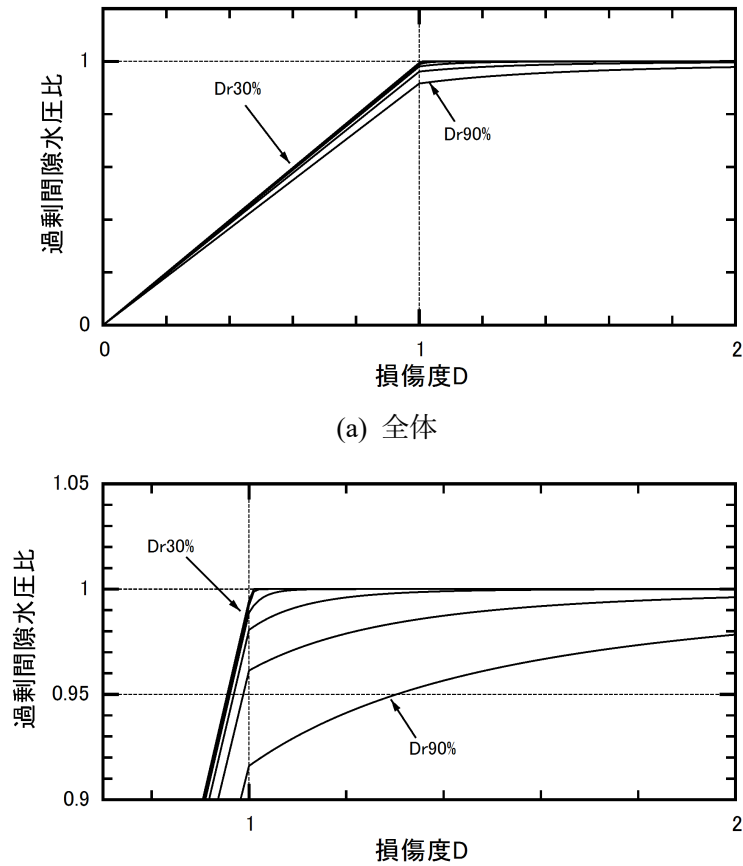


図 2.16 相対密度と有効応力比 0.0001 における損傷度の関係

$$D = 1.0 + 0.00000286e^{0.180D_r} \dots\dots\dots (18)$$

参考に、式(17)、式(18)を用いて、相対密度毎の損傷度と過剰間隙水圧比の関係を求めると図 2.17 のとおりとなる。



(a) 全体
(b) 過剰間隙水圧比 1 付近の詳細
図 2.17 損傷度と過剰間隙水圧比の関係

2.6 液状化中の透水係数

間隙水圧消散工法の設計に用いる際には使わないオプションである。

液状化した土の透水係数は、液状化する前の透水係数よりも大きくなることが知られている。吉田らは、消散過程の解析を実験結果に適合させるには、透水係数を液状化直後に数倍に大きくし、消散とともに初期値に戻す必要があるとしている¹¹⁾。また、大村らは、遠心振動実験結果を基に逆解析を行い、消散過程の透水係数を求め、最大で室内試験の値よりも10倍程度増加することを示しているが、過剰間隙水圧比は0.7程度までの範囲での結論となっている¹²⁾。Shahir らは、液状化中の透水係数の値を過剰間隙水圧比の関数として以下のとおり定式化している¹³⁾。

$$\frac{k}{k_i} = \begin{cases} 1 + (\alpha - 1)r_u^{\beta_1} & r_u < 1.0 \text{ (水圧上昇時)} \\ \alpha & r_u = 1.0 \\ 1 + (\alpha - 1)r_u^{\beta_2} & r_u < 1.0 \text{ (水圧消散時)} \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

ここに、

- k : 透水係数
- k_i : 加振前の透水係数
- r_u : 過剰間隙水圧比
- α, β_1, β_2 : 係数

Shahir らは感度分析において、 $\alpha=20, \beta_1=1.0, \beta_2=8.9$ を用いており、これらのパラメータを用いた場合の過剰間隙水圧比と透水係数比の関係を図 2.18 に示す。

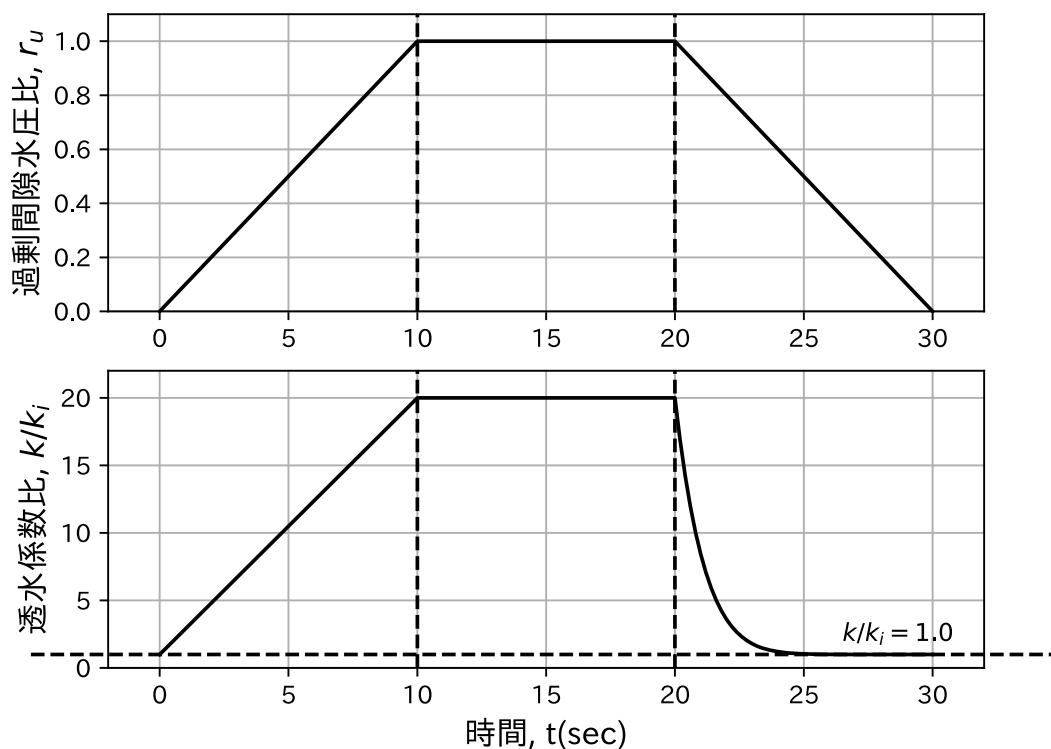


図 2.18 過剰間隙水圧比と透水係数比の関係

大村らの研究で過剰間隙水圧比が 0.7 程度の時に透水係数が 10 倍になっていることからすると、過剰間隙水圧比が 1.0 で透水係数が 20 倍となることは十分に考えられるものの、これらのパラメータの適用性は不明である。

オプションとして式(19)による透水係数の変化を考慮することができるようにした。

2.7 液状化による応答の減衰の効果

間隙水圧消散工法の設計に用いる際には使わないオプションである。

遠心模型実験の結果によると、直下の過剰間隙水圧比が1に近づくと、応答が急激に減少することが確認されている。そこで、図 2.19 に示すように過剰間隙水圧比と応答倍率の関係を1つのパラメータで調整できる式 (20) を用いて加速度応答の減衰を表現した。

$$r_r = 1 - r_u^m \dots\dots\dots (20)$$

ここに、

- r_r : 過剰間隙水圧比に応じた応答倍率
- r_u : 過剰間隙水圧比
- m : 係数

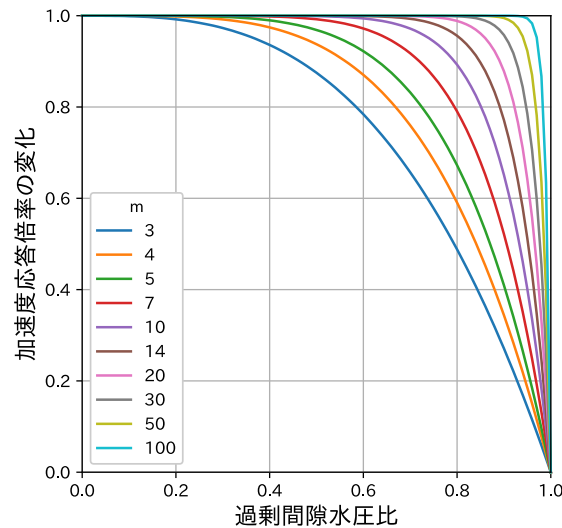


図 2.19 過剰間隙水圧比と加速度応答倍率の関係

遠心模型実験から得られた過剰間隙水圧比と加速度応答倍率の変化の関係、液状化判定法として本解析方法を使用した場合の正解率から $m=14$ が適当であると考えられる。

要素毎に過剰間隙水圧比が求まるために、要素毎に減衰に係る加速度応答倍率が求まる。ある深度の要素における応答倍率が小さい場合に、その深度だけの応答が小さくなる訳ではなく、それより上位に位置する要素の応答も小さくなると考えられる。そこで、下位の要素の応答倍率の中の最小値を液状化による減衰を考慮した応答倍率として用いることとした。また、元々、道路橋示方書等の液状化判定には、地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数 r_d によって地盤の応答の影響が考慮されている。このため、地震時せん断応力比 L を

求める際の加速度の大きさは、地表面における加速度に r_d から算出される応答倍率（図 2.20 左側の初期応答倍率）と液状化による減衰を考慮した応答倍率（図 2.20 中央）を掛け合わせて求めることとした。ちなみに、図 2.20 の中央は、3 層の液状化層があることを仮定した図になっており、下から 2 番目の液状化層の過剰間隙水圧比から求まる応答倍率は 0.8 とあまり低下していないが、一番下の液状化層の応答倍率が 0.4 と 0.8 より小さいため、下から 2 番目の液状化層の応答倍率は 0.4 になることを表している。

オプションとして式(20)による過剰間隙水圧の上昇に伴う地震時せん断力の低減を考慮できるようにした。

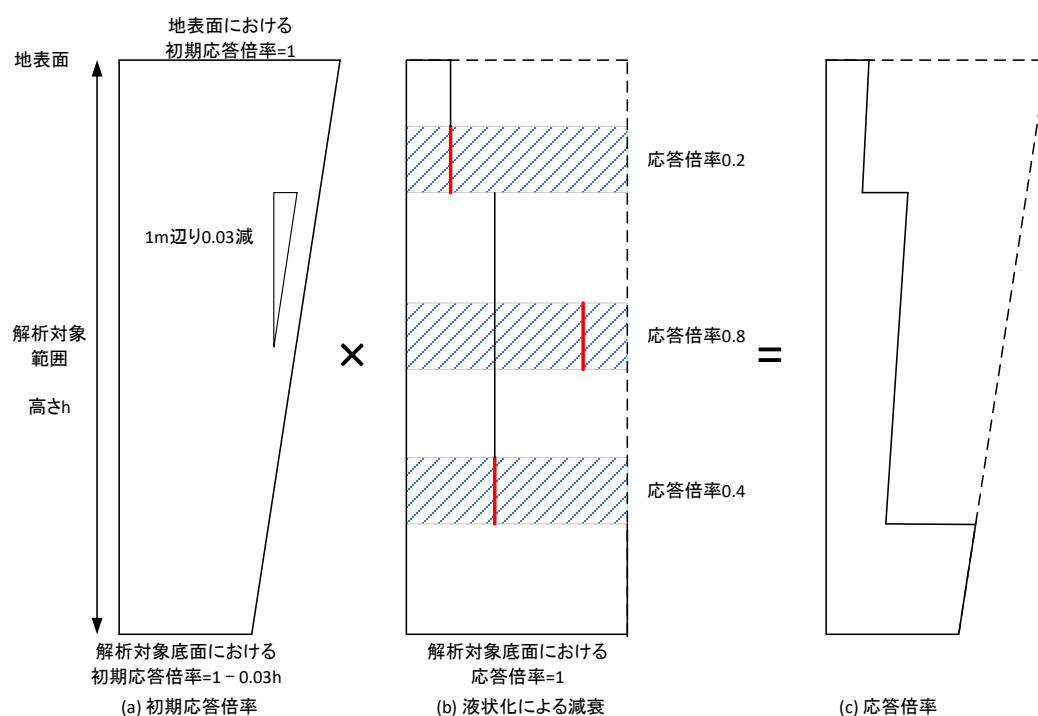


図 2.20 応答倍率の算出方法

3 間隙水圧消散工法における解析方法の活用

河川堤防の耐震性能照査や耐震対策の設計では、液状化による沈下を考慮した地震後の堤防高さを評価し、照査外水位と比較される。実務では、有限要素法による自重変形解析¹⁴⁾が用いられることが多いが、間隙水圧消散工法の効果を直接考慮することができない。そこで、本解析方法を用いて間隙水圧消散工法の効果を、液状化に対する抵抗率 F_L 倍率として出力する方法を考案した。 F_L であれば、有限要素法による自重変形解析に反映させることが可能である。

3.1 軸対称モデルと実配置の関係

軸対称モデルの中心部にドレーンを設定した模式図を図 3.1 に示す。一方で実際の間隙水圧消散工法のドレーンの平面配置は、図 3.2 のようになっている。1 本のドレーンが分担する周辺地盤（液状化層）の平面的な面積が同じとなるように、実際の配置と軸対称モデルを対応させることを考える。実際の配置に対応した軸対称モデルの半径を等価半径として、式(21)あるいは式(22)のように定義する。

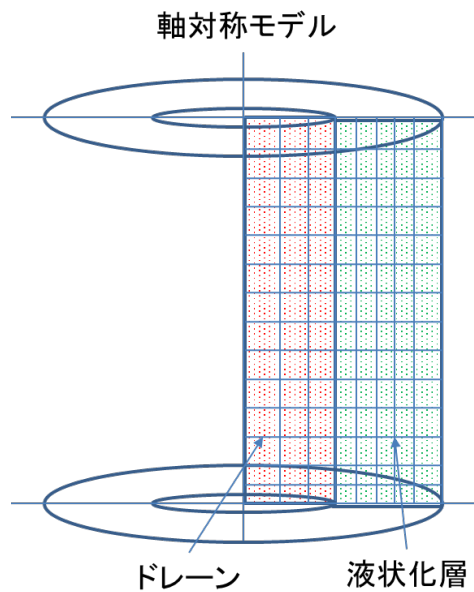


図 3.1 中心部にドレーンを設定した軸対称モデル

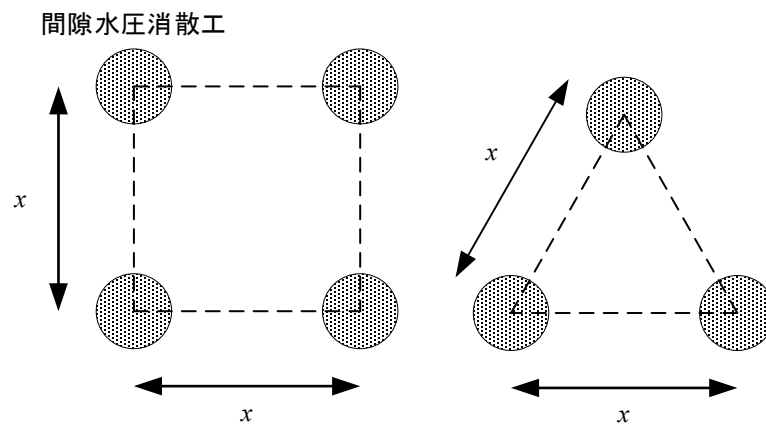


図 3.2 ドレーンの平面配置例

正方形配置の場合

$$r_e = \sqrt{\frac{x^2}{\pi}} \dots\dots\dots (21)$$

正三角形配置の場合

$$r_e = 0.93 \sqrt{\frac{x^2}{\pi}} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、

- r_e : 軸対象モデルにおける液状化層の等価半径
- x : 打設間隔（ドレーン中心間距離）

3.2 間隙水圧消散工法の効果の表し方

土木研究所で実施した遠心模型実験によると、堤防法尻直下地盤を間隙水圧消散工法によって改良した場合、過剰間隙水圧比が1に達しても、その時間が十分に短ければ、堤防の沈下量低減効果が得られることが分かっている。このような動的な特性は、有限要素法による自重変形解析では直接考慮することはできない。そこで、有限要素法による自重変形解析でも間隙水圧消散工法の効果を考慮できるように、液状化に対する抵抗率 F_L 倍率（割り増し）を本解析方法により求める方法を考案した。

しかし、ドレーンの仕様や地盤条件に応じた過剰間隙水圧を本解析方法により求めただけでは、 F_L 倍率にはならない。そこで、次のようなことを考えた。

ドレーンがない無対策の地盤を模擬したモデルを対象に、例えば、元波形の0.5倍の波形を入力した場合には、1.0倍の波形を入力した場合よりも小さな過剰間隙水圧が得られる。次に、ドレーンを入れた時の過剰間隙水圧が、無対策で0.5倍の波形を入力した場合の過剰間隙水圧比に等しかったとする。この場合、ドレーンの効果は、入力波形を0.5倍にするのと同等の効果と考えることが可能である。加速度の大きさと F_L には反比例の関係があるため、 F_L 2倍と同等であると言い換えることができる。

ドレーンが入っていない状態で入力波形の加速度倍率を変えた多数の解析と、ドレーンが入った状態で等価半径を変えた多数の解析を実施すると、図 3.3 のような図が得られる。

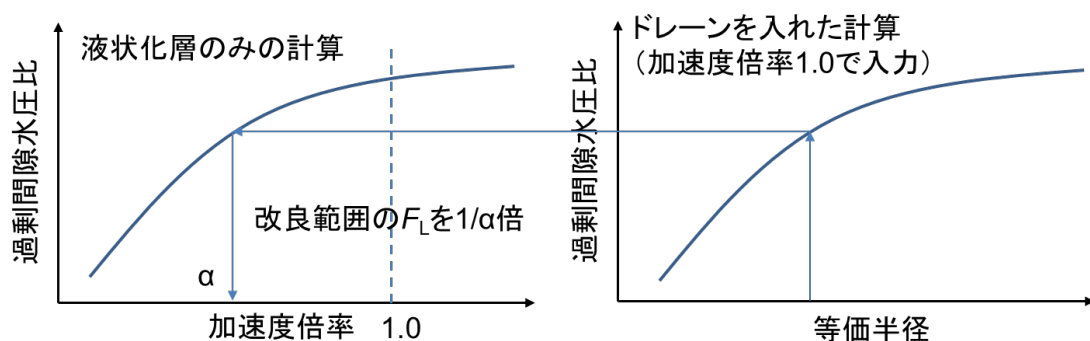


図 3.3 加速度倍率（無対策）と等価半径（ドレーンあり）を変化させた解析結果

この2つの図を対比すれば、ある等価半径に対応した F_L 倍率が得られ、これを用いて有限要素法による自重変形解析を実施すれば、間隙水圧消散工法を施した堤防の地震後高さを評価することが可能となる。

具体的に図 3.3 を求め、これより F_L 倍率を求めようとする、課題が2つある。

3.3 過剰間隙水圧の代表値

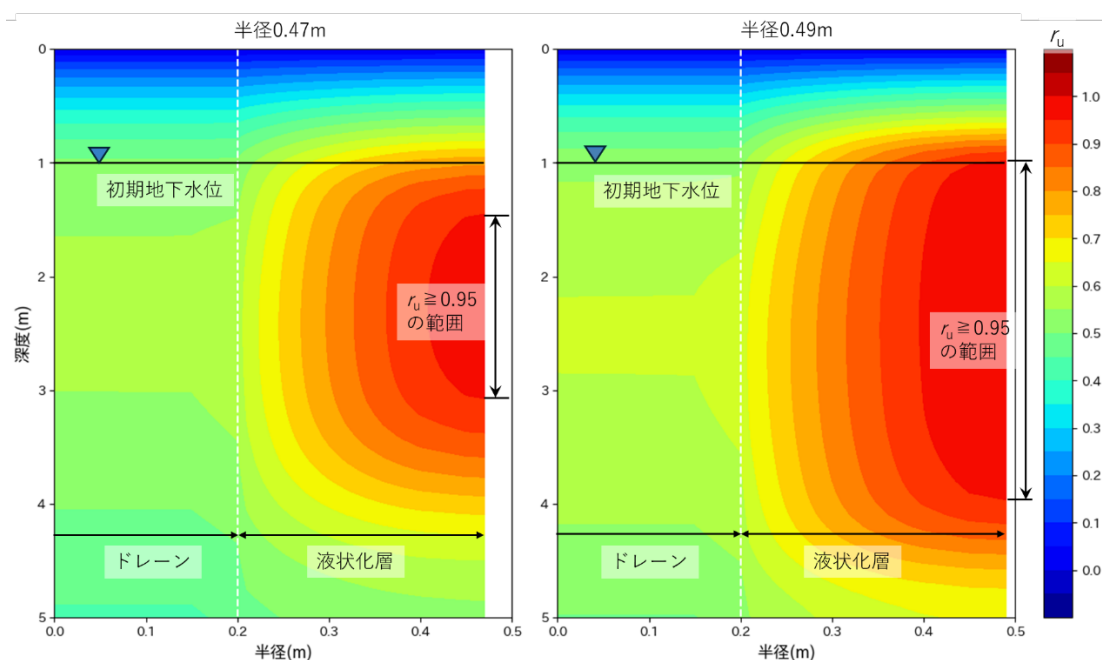
課題の1つ目が過剰間隙水圧の代表値である。本解析方法では、時間的、空間的に無数の過剰間隙水圧が得られる。従前の間隙水圧消散工法の設計法のベースになっていた過剰間隙水圧比の時間的な極大値かつ空間的な最大値を代表値とすることは、遠心模型実験の結果にそぐわないことは明らかである。そこで、平均が考えられることとなるが、平均する範囲の設定が課題となる。様々な試算を行った結果、入力地震動が 50Gal を上回る間（地震動継続時間）で時間的な平均をとり、土層毎に空間的な平均をとれば良いことが分かった。ただし、タイプ II 地震動は、50Gal を上回る時間が極端に短く、この方法が上手く行かない。遠心模型実験によると、過剰間隙水圧比が 1 に達してもその瞬間に沈下が増加する訳ではなく、沈下に時間を要する。このため、極端に短い時間で平均することは適切ではない。少なくとも 30 秒程度は沈下に要していることから、最低 30 秒までとした。

3.4 ドレーンの効果の及ぶ範囲

打設間隔を広げていくと、ドレーンの近辺では効果が得られるが、ドレーンから離れた部分では全く効果が出ない状況が発生する。間隙水圧消散工法を法尻直下の基礎地盤に施した時に液状化による沈下が抑制されるメカニズムは、堤防の自重を由来とするせん断力に対し、間隙水圧消散工法で改良した地盤が一体となって抵抗することであると考えられる。改良地盤内に液状化している部分が混在した状態では、一体性が失われ効果が出にくい状態となることが想定される。実際、ドレーンをフィルムで覆い排水効果がない状態

での遠心模型実験では、無対策以上の沈下が発生している。このため、ドレーンから離れた部分まで、一定の効果が出るような打設間隔を設定する必要がある。

1つの目安として、地震動継続終了時刻（タイプⅡの場合には30秒）において、ドレーンから最も離れた位置で過剰間隙水圧比0.95以上の深度が液状化層の半分以下（図3.4）とした。このようなドレーンの効果の及ぶ範囲を考慮すると、図3.3の右側の図の全ての範囲を使って良い訳ではなく、右側に使えない範囲が存在することとなる。



(a) $r_u \geq 0.95$ の深度が液状化層の半分以下 (b) $r_u \geq 0.95$ の深度が液状化層の半分以上

図 3.4 解析による過剰間隙水圧比 r_u の分布例

4 プログラムの構成

プログラムは、以下の構成となっている。

(1) GUI プログラム (SMGD.exe)

Windows 環境で動作するプログラムで、解析条件の設定、保存、解析の実行が可能である。解析を実行する際には、次の解析プログラムを呼び出す。

(2) 解析プログラム (calc_smgd.exe)

2章で示した解析を実施するためのプログラム。

(3) 後処理プログラム

解析結果の図化（アニメーションを含む）、 F_L 倍率の算出、地盤変形解析への反映を行うためのプログラム。Python で書かれており、Python を実行可能な環境を用意する必要がある。

5 GUI プログラム

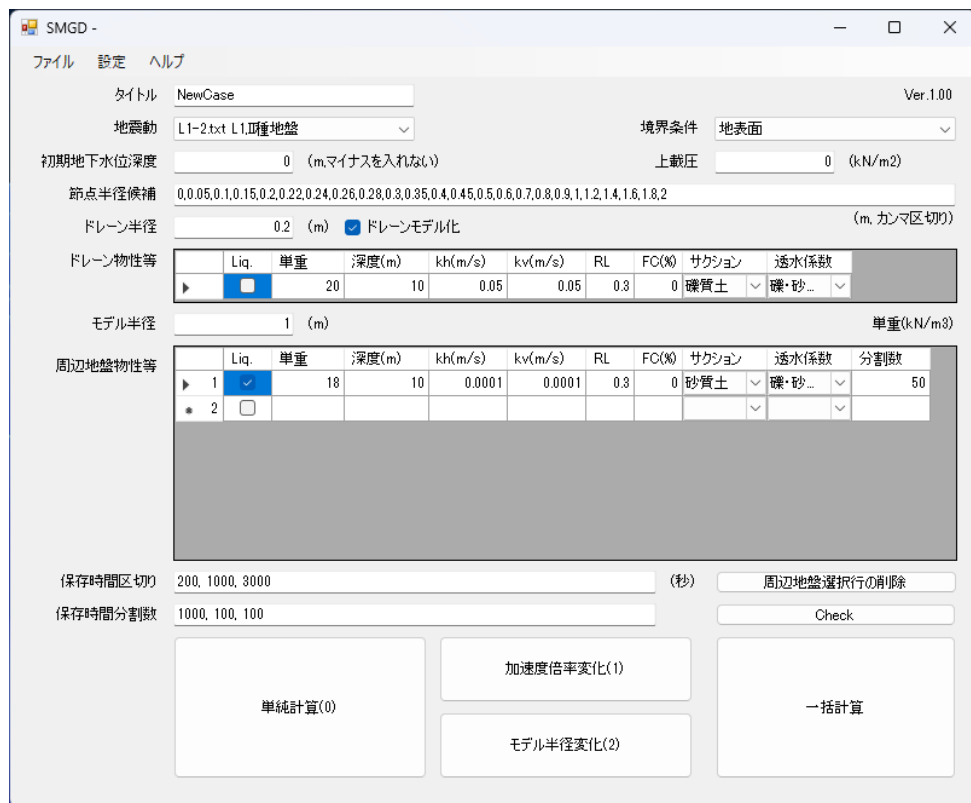


図 5.1 GUI プログラムの外観

一般的な Windows プログラムと共通の使い方や、一定の技術水準を有していれば説明不要の項目も多いため、説明が必要と考えられる部分に絞って、説明を行う。

(1) タイトル

ここに入力した文字列が解析結果の出力のファイル名の一部として使われる。解析条件の保存するファイル名 (*.vgd) とは、独立している。

(2) 入力地震動

input_motion フォルダ内のテキストファイルに沿って、入力地震動のリストが作成される。

独自の地震動で解析を行うことも可能である。テキストファイル (*.txt) で、1 行目に地震動の説明、2 行目に時間間隔(s)、3 行目に地震動継続時間(s)、4 行目以降に加速度(m/s)を羅列する。3 行目の地震動継続時間は、Seed らが解析結果を整理³⁾する際に、時間を正規化するのに使用していたパラメータであり、間隙水圧消散工法の検討に必要な地震動継続時間とは関係ない。

1	L1,II 種地盤	※地震動の説明	
2	0.01		※時間間隔(s)
3	30	※地震動継続時間(s)	
4	-0.4246		※加速度(m/s)を列挙
5	-0.4278		
6	-0.4301		
7	-0.4194		
8	-0.3877		
9	-0.3361		
10	-0.2746		
11	-0.2161		
12	-0.1684		
13	-0.1293		
14	…続く…		

(3) 境界条件

境界条件は、地表面と中心鉛直に、圧力水頭 0 の境界条件を設定することができる。間隙水圧消散工法の検討では、地表面にだけ境界条件を設定すれば良い。

(4) 節点半径候補

ドレーン内を 4～10 分割し、動水勾配が大きくなるドレーンと液状化層の境界付近に節点半径候補を密に配置すると、正しい解析が可能である。解析結果を半径方向に見た時に、1 要素だけで、間隙水圧が変化している場合には節点が不足していると解釈できる。

(5) ドレーン半径等

ドレーン半径に 0 を入力すると、ドレーンがない中実モデルで計算が行われる。地表面にしか境界条件がない場合には、1 次元解析になるため、半径方向に節点が多くあっても意味はない。ドレーン半径に 0 より大きな値を設定し、ドレーンモデル化のチェックを外すと、中空のモデルで計算が行われる。

(6) ドレーン物性等

間隙水圧消散工法の検討では、ドレーンは液状化しないものとして扱えば良い。周辺地盤でも同様であるが、液状化しないものとして扱う場合には、単重への入力値が使用される。逆に、液状化するものとして扱う場合には、単重への入力値は無視され、 R_L 等から単重が自動設定される。液状化層の単重よりもドレーンの単重の方が大きくないと適切に計算されないため、 20kN/m^3 以上を設定しておくのが良い。

R_L 等から単重の自動設定フローを図 5.2 に示す。自動設定は、液状化による部分排水による強度増加を見込むための仕組みである。

深度はドレーンの下端の深度（マイナスは付けない）を設定する。周辺地盤の深度の方が深い場合には、浮基礎のようなドレーンとしてモデル化される。

不飽和特性（サクシヨン-体積含水率関係、比透水係数-体積含水率関係）は、河川堤防の構造検討の手引き¹⁵⁾から選択可能である。

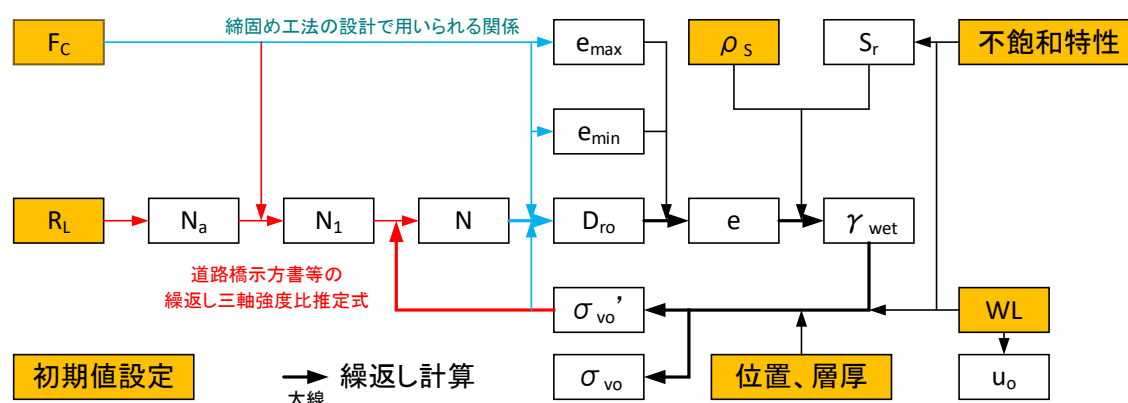


図 5.2 プログラムにおける初期値設定方法

(7) 周辺地盤物性等

ドレーン物性等とほとんど同じ。複数層の設定が可能となっており、地表に近い土層から順番に設定する。深度の列に、各土層の下端の深度（マイナスは付けない）を設定する。分割数は、鉛直方向の要素分割数のことで、土層厚が均等分割される。要素高さは 0.2m 程度が望ましい。

(8) 保存時間区切り、保存時間分割数

カンマ区切りで、時間は秒で入力する。保存時間区切りと保存時間分割数の入力数は同数である必要がある。深度の分割と同様の考え方となっている。例えば、1 番目と 2 番目に設定した時間の間が、2 番目に設定した分割数で均等割される。地震動が作用している間は細かな分割が望ましい（最低 1 秒間隔）。

間隙水圧消散工法の検討では、消散過程は使用しないので、地震動継続時間見合いで設定

する。ただし、タイプⅡ地震動の場合には 30 秒とする。

(9) 単純計算

入力した条件を 1 つだけ計算する。過剰間隙水圧の時刻歴や分布のアニメーションを確認したい場合には、この計算を実施する。他の計算も同様であるが、解析条件を保存してから、実行する。

(10) 加速度倍率変化

入力加速度の倍率を変化させながら、複数の計算を実施したい場合に、このボタンをクリックする。ドレーンモデル化にチェックが入っていても、この計算では自動的にチェックが外された状態で解析が実施される。

(11) 半径変化

モデル半径を変化させながら、複数の計算を実施したい場合に、このボタンをクリックする。

(12) 一括計算

様々な解析条件を保存しておけば、これらを一括計算することができる。

クリックすると、図 5.3 が表示される。上側の白い枠はテキストボックスで、手動入力も可能であるが、ファイル名は間違いやすいので、ファイル選択機能を利用すると良い。ファイル選択機能を使うと、自動的に、加速度倍率変化と半径変化の 2 つのオプションが設定される仕様となっている。

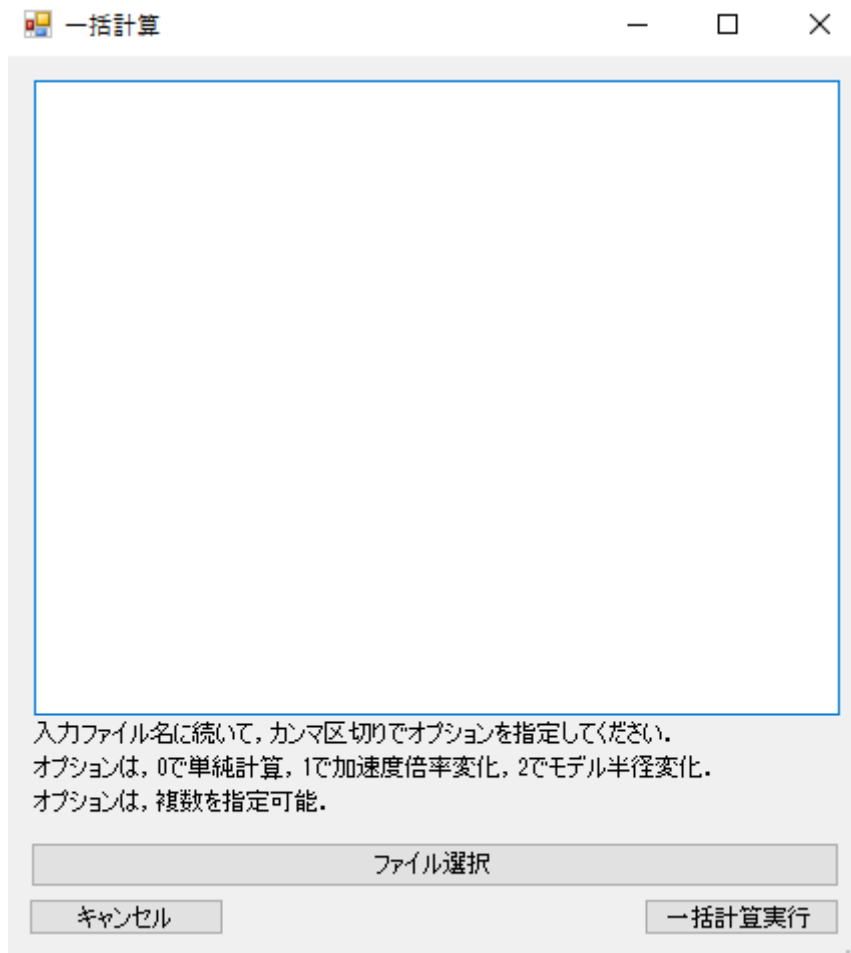


図 5.3 一括計算条件設定用画面

6 解析プログラム

“calc_smgd.exe”という実行ファイルが、解析プログラムの本体となっている。先に紹介した GUI プログラムを使わずに、“calc_smgd.exe”を使うことを想定し、具体の仕様を紹介する。

入力ファイルは以下のような csv ファイル形式となっている。リストだけだと分かりづらい部分を取り出して解説する。入力の考え方、方法は、GUI プログラムとも共通している箇所も多いので、これらも説明を省略する。

- | | |
|---|--------------|
| 1 | <Input> |
| 2 | Title,Sample |

```

3 Boundary Condition,Surface
4 Initial Water Level,1
5 Overburden Pressure,20
6 Input Motion File Name,input_motion¥L2-2-3-3.txt,1.00,1.00,0.25,0.50,True,True,30.0
7 Model Rb,1
8 Node
  R,0,0.05,0.1,0.15,0.2,0.21,0.22,0.23,0.24,0.25,0.26,0.27,0.28,0.29,0.3,0.32,0.34,0.36,0.38,0.
  4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65,0.7,0.75,0.8,0.9,1,1.1,1.2,1.3,1.4,1.5
9 Model Ra,Modeled,0.2
10 GD Mater,False,20.0000,5.0000,5.0000E-002,5.0000E-002,0.3000,0.0000,0,0
11 LL Mater,True,20.0000,5.0000,1.0000E-003,1.0000E-003,0.200,10.0000,1,0,50
12 Representative Depth,True,5, 1, 2
13 Representative Radius,True,False,False,False,False,False
14 Recording Timing Type,1
15 gamma water,9.8,kN/m3
16 Coefficient of Rd,0.015
17 Response Share Stress is Decreasing,False,0.14
18 Recording Timing by T / Td,2,4,8,16,32,64,128,256
19 Number of Recording by T / Td,600,1200,100,100,100,100,100,100
20 Recording Timing by sec,200
21 Number of Recording by sec,1000
22 Change Param Acc Ratio,0.2,1.0,20,True,Sample-ChangeAccRatio-Ans.csv,True
23 Change Param Radius,0.21,2.0,15,Sample-ChangeRadius-Ans.csv
24 </Input>

```

(1) 入力データとして扱われる範囲

<Input>から</Input>までの間が入力データとして扱われる。この外側に、メモのようなものを付けておいても構わない。

(2) 全般的なルール

カンマによって、複数のデータに区切られている。1列目がその行のデータの種類を表しており、変更しない。2列目以降が実際のデータとなり、ここを変更する。

(3) 境界条件

”Boundary Condition”で始まる3行目で設定する。鉛直 (Vertical) と地表面 (Surface) の2種類が設定できる。2つとも設定したい場合には、カンマで区切って、”Vertical,Surface”のよ

うにすればよい。

（４）入力地震動

“Input Motion File Name”で始まる 6 行目で設定する。ファイル名、時間倍率、加速度倍率、間隙水圧発生最小加速度、継続時間設定用加速度、元波形に対して継続時間設定を行うか (True/False)、継続時間の終了時間を指定するか (True/False)、指定する継続時間の終了時間の順で指定する。

加速度倍率をかけた波形に継続時間設定用加速度により継続時間を求めると、加速度倍率に応じて継続時間が変化する。このような変化を回避したい場合に、元波形に対して継続時間設定を行うかを True に設定する。

間隙水圧発生最小加速度以降は、設定しないか、途中で設定しないことが可能である。その場合に、デフォルト値が設定される。デフォルト値は以下のとおりである。間隙水圧発生最小加速度 (0.25)、継続時間設定用加速度 (0.5)、元波形に対して継続時間設定を行うか (True)、継続時間の終了時間を指定するか (False)、指定する継続時間の終了時間 (30.0)。

（５）モデル半径

“Model Rb”で始まる 7 行目で設定。

（６）ドレーン半径等

“Model Ra”で始まる 7 行目で設定。ドレーンをモデル化する場合には、最初に、“Modeled”を入力する。モデル化しない場合には、“Not Modeled”など“Modeled”以外を設定する。次に、ドレーンの半径を設定する。

（７）ドレーンと周辺土層の物性

ドレーンの条件は、“GD Mater”で始まる 10 行目で設定。周辺土層の条件は、“LL Mater”で始まる 11 行目で設定。上記の例では、“LL Mater”で始まる行は 1 行しかないが、複数行設定すれば、複数土層からなる複雑な土層が設定できる。地表面に近い方が順に設定する。

ドレーンも周辺土層も、中身はよく似ている。設定項目が 1 つだけ多い、周辺土層から説明する。

液状化するか (True/False)、飽和単位重量、下端深度、水平方向透水係数、鉛直方向透水係数、繰返し三軸強度比、細粒分含有量、サクシヨン-体積含水率関係 (0/1/2)、比透水係数-体積含水率関係 (0/1)、鉛直方向分割数の順に設定する。

不飽和特性は、「河川堤防の構造検討の手引き」の関係を番号で指定する形式である。

（８）代表深度

“Representative Depth”で始まる 12 行目で設定。均等分割するか (True/False)、均等分割数、

均等分割しない場合の深度の順に設定する。均等分割しない場合の深度は、列挙することで、必要な数（最大 100 個）だけ設定可能である。

（10）代表半径

“Representative Radius”で始まる 13 行目で設定。全て True/False で設定し、中心、グラベル端部、液状化層中心側、液状化層端部、ドレーン平均、周辺土層平均の順に設定する。

（11）計算結果の保存時点の設定方法

“Recording Timing Type”で始まる 14 行目で設定。継続時間（入力加速度ファイル内で設定した継続時間）に対する倍率で設定する場合に 0、時間で直接設定する場合に 1。

（12）加速度変化用の設定

“Change Param Acc Ratio”で始まる 22 行目で設定。加速度倍率の最小、加速度倍率の最大、分割数、ログスケールで均等分割するか（True/False）、解析結果保存用ファイル名、ドレーンなしとするか（True/False）の順に設定する。解析数は、分割数 + 1 となる。

（13）半径変化用の設定

“Change Param Radius”で始まる 23 行目で設定。半径の最小、半径の最大、分割数、解析結果保存用ファイル名の順に設定する。

使い方は、実行ファイルと入力ファイルが同じフォルダにあるという前提で、以下をターミナルに入力するか、バッチファイルとして保存し、実行することができる。最後の 0 は、解析モードを表しており、この部分を変えることで、解析モードを変えることができる。0 で 1 つの条件を解析、1 で 1 つの条件を解析（出力が限定的）、2 で加速度変化、3 で半径変化である。

15 calc_smgd.exe sample.csv 0

7 後処理プログラム

後処理用のプログラムは以下の 2 ファイルとなっている。python を実行可能な環境を用意した上で、(1)、(2) のファイルと GUI プログラム（SMGD.exe）の解析結果を同じフォルダに保存して、(2) のファイルを実行することで、後処理プログラムを実行可能である。

（1）後処理用ライブラリ（post.py）

Python 環境で動作するライブラリで、解析結果の図化（アニメーションを含む）、FL 倍率の算出、地盤変形解析（ALID）への反映を行うためのライブラリとなっている。

（２）後処理用ライブラリの使用例（result.ipynb）

（１）のライブラリの使用例を記載したファイル。解析結果の読込、標準的な図化、 F_L 倍率の算出、地盤変形解析への F_L 倍率の反映の一連の使用例を記載している。Python の開発環境の 1 つである Jupyter notebook 形式となっているため、同形式を実行可能な環境を用意すれば本ファイルを使用可能である。

なお、Jupyter notebook 形式が実行できない環境の場合は、py 形式に変換するか、本資料に記載の内容を参考に py 形式のファイルを作成すれば実行可能である。

以降に、「result.ipynb」の内容の説明を記載する。

7.1 解析結果の読込、図化（アニメーション）

```
1  from post import SMGD_Post, FL_Trans
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  import pandas as pd

4  #----ファイル指定、データ読込----#
5  read_file = "c2p_2-3_T2-3-2"
6  result = SMGD_Post(read_file)

7  #----単純計算の計算条件の読込----#
8  df_condition = pd.read_csv(read_file + "-Ans.csv")
9  equivalent_radius = float(df_condition.loc[0, "Radius"]) #等価半径
10 end_time_duration = float(df_condition.loc[0, "EndTimeDuration"]) # 継続時間の終了時間
11 #----各種グラフの動画表示----#
12 # 処理に時間がかかるため、不必要な場合はコメントアウト推奨
13 ani = result.make_total_anime(p_type=2, time_type=0, radius=[0.0, 0.25, equivalent_radius],
14                               depth=[1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0], skip=9)
15 ani.save(read_file + "_ani.gif")

15 #----過剰間隙水圧比コンター図の作成----#
16 # 継続時間終了時点での出力
```

```
17 out_time = end_time_duration
18 result.make_total_graph(p_type=2, time=out_time, time_type=0, radius=[equivalent_radius],
    depth=[1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0], filename=read_file+"_" + format(out_time, ".2f")+ ".png",
    ru_lim=0.95)
```

1～3 行目は、必要なライブラリの読込を行っている。動作に必要なライブラリがインストールされていない場合は、必要なライブラリを全てインストールする。

4～6 行目は、解析結果の読込を行っている。5 行目で解析結果のタイトル（拡張子無し）を指定して、6 行目で解析結果を `result` という変数に保存している。

7～10 行目は、単純計算の解析結果より、図の出力に用いる条件（等価半径と継続時間の終了時間）の読込を行っている。解析結果によらない任意の値を使用する場合は、9 行目、10 行目をそれぞれ実数値で入力すればよい。

11～14 行目は、単純計算の解析結果をアニメーション化して、「*_ani.gif」というファイルに保存している（*はタイトル名）。解析結果がおかしな挙動となっていないか確認するために一度は確認することが望ましいが、アニメーションの作成には時間を要するため、不要な場合はコメントアウトするとよい。アニメーション化の条件設定は 13 行目の“`p_type`”以降で設定する。“`p_type`”は圧力の表示方法を指定する箇所で、0,1,2 のいずれかで指定する。0 は水压、1 は過剰間隙水压、2 は過剰間隙水压比の表示となる。“`time_type`”は、時間の表示方法を指定する箇所で、0 は時間、1 は時間係数の表示となる。“`radius`”は、リスト形式で半径を指定する。指定された半径の深度方向の圧力分布が描写される。“`depth`”は、リスト形式で深度を指定する。指定された深度で半径方向の圧力分布が描写される。“`skip`”は、gif 形式のアニメーションにする際に、1 ステップを表示した後に表示しないステップ数を意味している。`skip=9` では、1 ステップ表示した後に 9 ステップ分を非表示とするため、10 ステップごとに解析結果を表示する形となる。

15～18 行目は任意の時間における解析結果の出力を行っている。この例では継続時間終了の時点の出力としているが、任意の時間を指定する場合には、17 行目に任意の時間（実数）を入力すればよい。18 行目の条件設定は、13 行目のアニメーション表示と基本的に同一である。異なる点として、18 行目の末尾の“`ru_lim`”のパラメータがある。`ru_lim` が指定されている場合、設定した半径、時間での過剰間隙水压比が、指定した `ru_lim` の値（通常は 0.95）を超えている深度を図に表示する。

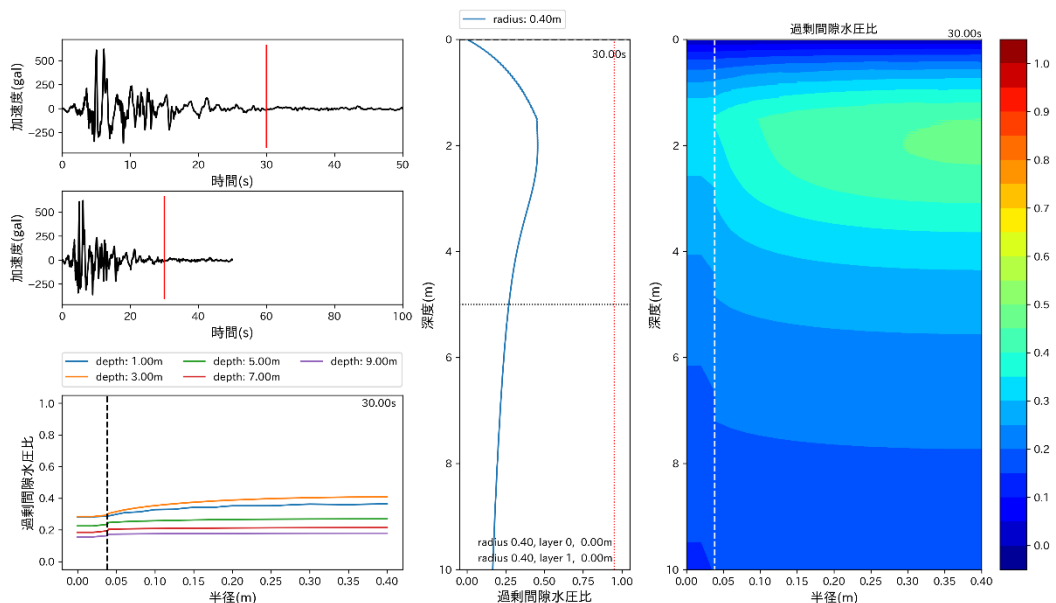


図 7.1 任意時間の過剰間隙水圧比コンター図の出力結果

7.2 F_L 倍率の算出

```

19 #----FL 倍率のグラフ作成----#
20 result.drain_effect.set_params(r_assign = equivalent_radius, flratio_lim = (1,5,0.5), r_lim =
    (0.1, 1.0, 0.1), ru_lim = (0, 1.0, 0.1))
21 result.drain_effect.make_effect_graphs()
22 plt.savefig(read_file + "_effect.png")
23 result.drain_effect.make_r_fl_graph()
24 plt.savefig(read_file + "_r_fl.png")

```

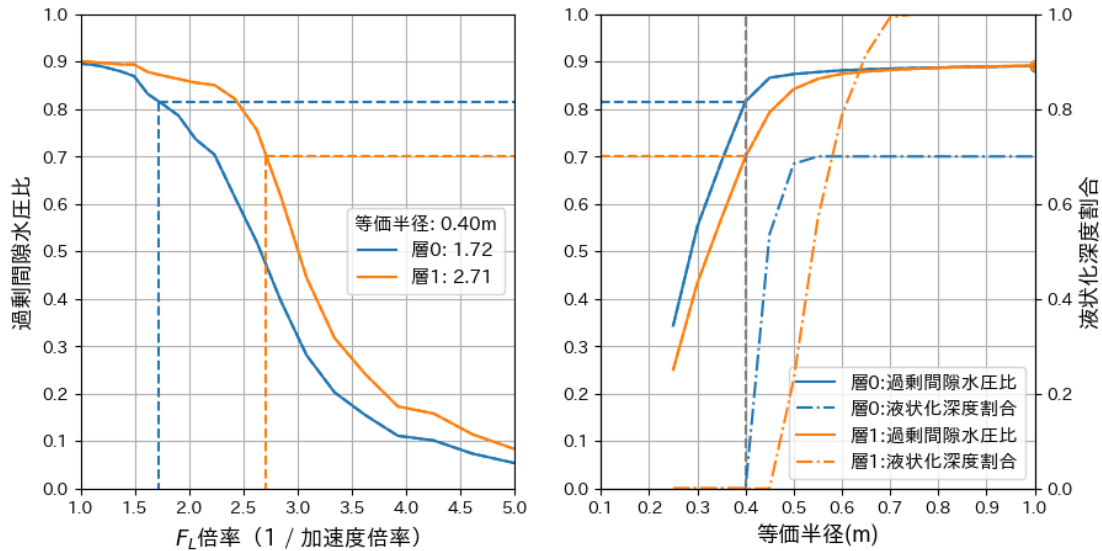
20 行目は F_L 倍率のグラフ作成にあたってのパラメータを設定している。“r_assign”は F_L 倍率を算定する等価半径を指定する。“flratio_lim”、“r_lim”、“ru_lim”は、それぞれ F_L 倍率、半径、過剰間隙水圧比のグラフ縦軸横軸の設定をする箇所であり、カンマ区切りの 1 個目が最小値、2 個目が最大値、3 個目が刻みを表している。

21,22 行目と 23,24 行目は、どちらも F_L 倍率のグラフ作成と保存を行っている。それぞれの出力結果を図 7.2、図 7.3 に示す。

21,22 行目 (make_effect_graphs) の出力結果 (図 7.2) は、右側に半径変化計算結果 (横軸を等価半径、縦軸に過剰間隙水圧比)、左側に加速度変化計算結果 (横軸に F_L 倍率、縦軸に過剰間隙水圧比) を並べて、 F_L 倍率を算定しているものであり、 F_L 倍率算定の過程を確認するためにはこちらの図を出力するのが良い。

23,24 行目 (make_r_fl_graph) の出力結果 (図 7.3) は、横軸を等価半径、縦軸を F_L 倍率として、21,22 行目で出力されたグラフを 1 枚にまとめたグラフとなっている。

図 7.2、図 7.3 に示した例では、1 層目の F_L 倍率が 1.72、2 層目の F_L 倍率が 2.71 となる。



(a) 加速度変化計算結果 (b) 半径変化計算結果

図 7.2 F_L 倍率算定結果 (21,22 行目 (make_effect_graphs) の出力結果)

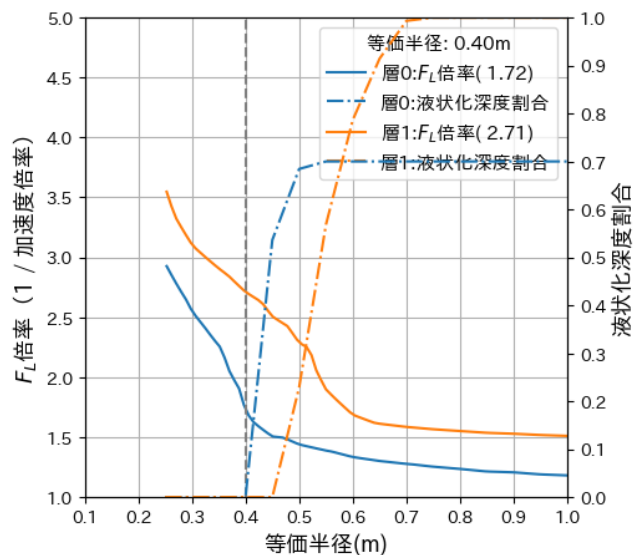


図 7.3 F_L 倍率算定結果 (23,24 行目 (make_r_fl_graph) の出力結果)

7.3 地盤変形解析への F_L 倍率の反映

間隙水圧消散工法による改良範囲の F_L に F_L 倍率を乗算し、自重変形解析を行うことで、

間隙水圧消散工法の効果を反映した地震後の堤防高さを求めることができる。

以下、有限要素法を用いた自重変形解析のプログラムとして、ALID/Win を用いた場合の手順を示す。

```
25 # -----無対策 FL 分布と FL 倍率より対策工の FL 分布を作成-----#
26 source1 = "case2_fl_org.txt"
27 source2 = "CASE2.MSH"
28 fl_ratios = [(1, 75, 80, 1.72), (7, 75, 80, 1.72), (2, 75, 80, 2.71)]
29 ft = FL_Trans(source1, source2, "fl_c2.flv", fl_ratios, "keisanrei-2")
```

26 行目は、無対策の解析条件における F_L 分布の出力結果のファイル名を指定する。 F_L 分布の出力は、ALID/Win のポスト処理プログラムを開き、要素情報表示の機能より、工程番号を液状化流動、表示データを F_L のみとして、全要素の F_L 値を表示した状態で、ファイル保存を行うことで出力できる。

27 行目は、無対策の解析条件で用いたメッシュファイルを指定する。

28 行目は、 F_L 値を変化させる設定を行っている。複数の設定を行えるようリスト形式([,])となっている。1つだけ設定する場合でもリスト形式とする。1つ分の設定がタプル形式(,)となっており、()内のカンマ区切りの1個目がALID上のグループ番号、2個目がALID上のX座標（左端）、3個目がALID上のX座標（右端）、4個目が F_L 倍率となっている。上記の記載例の場合、図 7.4 に示す範囲の F_L 値が変更される設定となる。

29 行目は、設定した条件にて、 F_L 値を変更したファイルを出力する。FL_Trans 内のカンマ区切りの1個目、2個目は26行目、27行目で指定した入力ファイル、3個目は出力ファイルのファイル名（拡張子はflv）、4個目が28行目で指定した F_L 値変更の条件、5個目が出力ファイルのタイトル（ファイルの1行目に記載）となる。

出力されたflvファイルを、ALIDの解析データ編集、液状流動の解析ステップの要素 F_L 値データファイル名に指定することで、変更した F_L 分布を用いた地盤変形解析が実行可能である。図 7.5 に F_L 値変更前の F_L 分布図、図 7.6 に F_L 値変更後の F_L 分布図を示す。

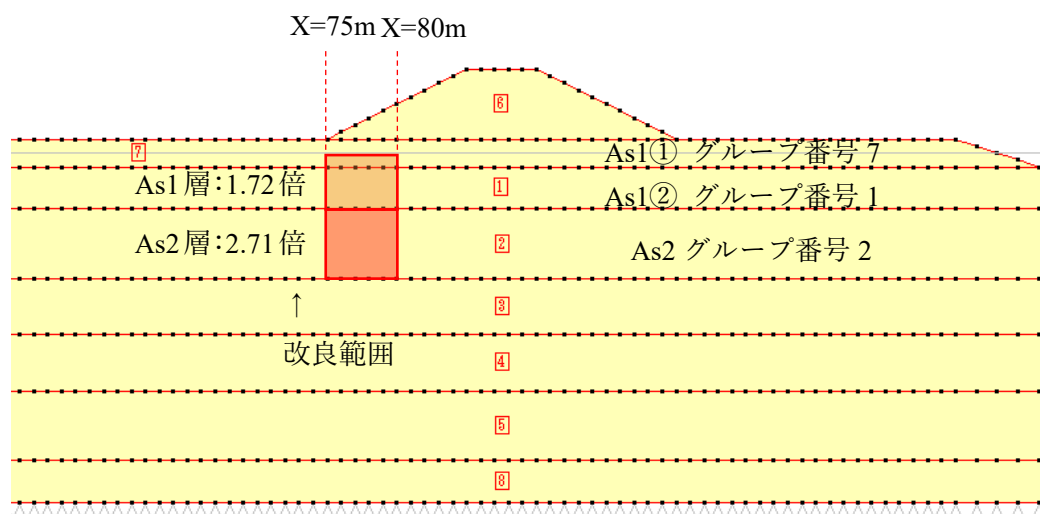


図 7.4 F_L 値変更の範囲

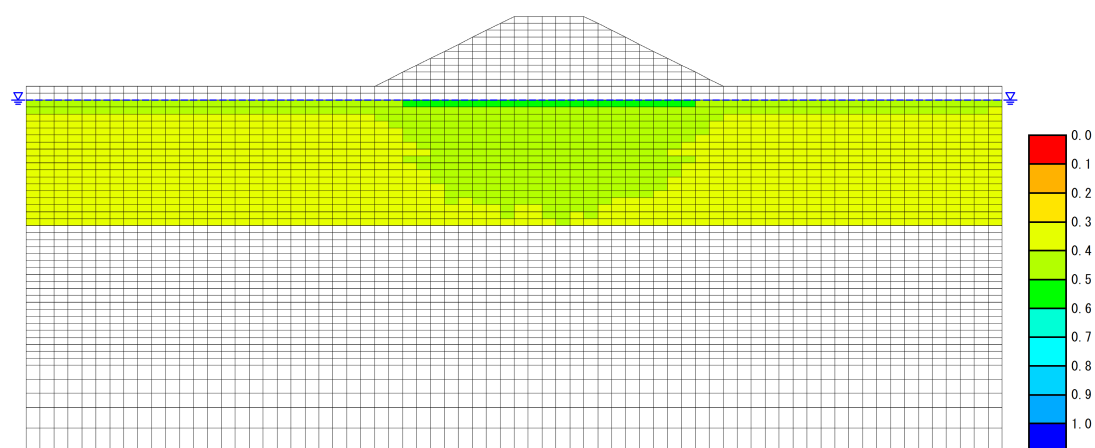


図 7.5 F_L 値変更前の F_L 分布図

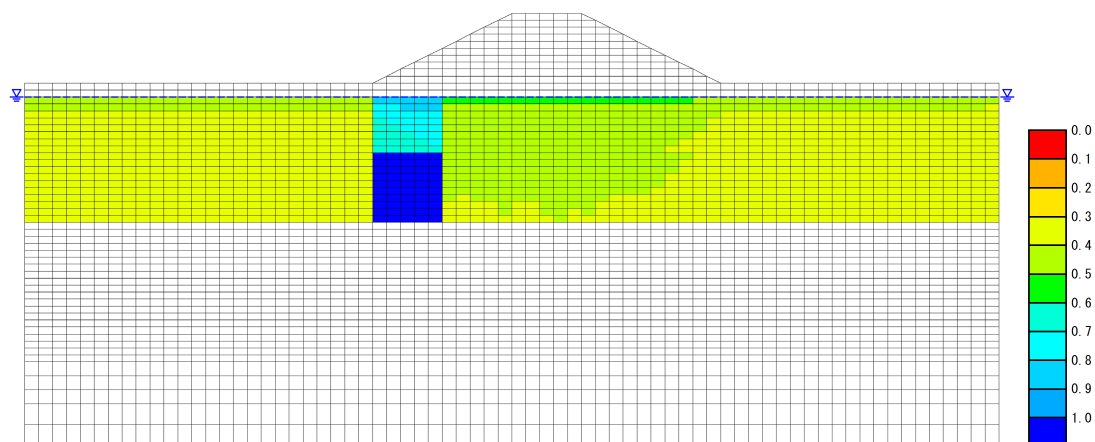


図 7.6 F_L 値変更後の F_L 分布図

7.4 その他の解析結果整理

その他の解析結果の整理機能として、以下の関数が用意されている。各関数の詳細については、「post.py」のコード内の説明で確認することができる。

```
#解析結果の概要
result.make_summary_graph()

#入力波形のグラフ
result.make_acc_graph(time_type=0)

#計算条件エクセルファイルの作成
result.make_condition_excel()

#間隙水圧の時刻歴グラフ
result.make_p_history_graph(index=[1, 10, 121, 130], p_type=2, xlim=[0.0, 100.0])
result.make_p_history_graph(coord=[[0,0], [1.5,0.0], [0.0,9.0], [1.5,9.0]], p_type=2, xlim=[0.0, 100.0])

#間隙水圧のコンター図
result.make_p_contour_graph(p_type=2, time=30)

#間隙水圧のコンター図動画表示
ani = result.make_p_contour_anime(p_type=2, skip=39)
path_gif = (read_file + '_animation.gif')
ani.save(path_gif, writer='pillow')

#水平方向の圧力分布のグラフ
result.make_p_rdis_graph(p_type=2, time=30, depth=[3.0, 5.0])

#水平方向の圧力分布の動画表示
ani = result.make_p_rdis_anime(p_type=1, depth = [3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0], skip=39)
path_gif = (read_file + '_animation.gif')
ani.save(path_gif, writer='pillow')

#深度方向の圧力分布のグラフ
```



```
result.make_p_ddis_graph(p_type=0, time=15, radius=[0.0, 1.1], ylim=(0, 5))
result.make_p_ddis_graph(p_type=2, time=15, radius=[0.0, 1.1], ylim=(0, 5), xlim=(-0.05,
1.05))

#深度方向の圧力分布の動画表示
ani = result.make_p_ddis_anime(p_type=2, radius=[0.0, 1.1], skip=39, ylim=(0, 5))
path_gif = (read_file + '_animation.gif')
ani.save(path_gif, writer='pillow')

#指定した代表要素の各種グラフ
result.make_elem_rpr_history_graph(xlim=[0,100])
```

参考文献

- 1) 石原雅規：過剰間隙水圧の発生と消散に係る簡易モデルによる液状化判定法，東京大学博士論文，pp.74-99, 2023.
- 2) H. B. Seed, P. P. Martin and J. Lysmer : Pore-Water Pressure Changes during Soil Liquefaction, Journal of the Geotechnical Engineering Division, pp.323-346, 1976.
- 3) H. B. Seed and J. R. Booker : Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits using Gravel Drain System, Earthquake Engineering Research Center Report No. EERC 76-10, 1976.
- 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 II.堤防編，pp.14-16, 2016.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書 V 耐震設計編，pp.161-169, 2017.
- 6) K. Ishihara and M. Yoshimine : Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, 1992.
- 7) F. Tatsuoka, S. Yasuda, T. Iwasaki and K. Tokida : Normalized Dynamic Undrained Strength of Sands Subjected To Cyclic and Random Loading, Soils and Foundations, Vol.20, No.3, 1980.
- 8) 石原雅規，杉田秀樹：原位置凍結サンプリング試料による液状化強度曲線の簡易推定式に関する検討，第 60 回土木学会年次学術講演概要集，2005.
- 9) H. Nagase and K. Ishihara : Liquefaction-Induced Compaction and Settlement of Sand during Earthquake, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, 1988.
- 10) 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.
- 11) N. Yoshida and W. D. L. Finn : Sumulation of Liquefaction beneath an Impermeable Surface Layer, Soils Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.19, 2000.
- 12) 大村洋史，仙頭紀明，渦岡良介，風間基樹：液状化後の消散過程における透水係数について，第 37 回地盤工学研究発表会，2002.
- 13) H. Shahir, A. Pak, M. Taiebat and B. Jeremic : Evaluation of Variation of Permeability in Liquefiable Soil under Earthquake Loading, Computers and Geotechnics, Vol.40, pp.74-88, 2012.
- 14) 安田進，吉田望，規矩大義，宇田将人：液状化に伴う残留変形解析方法の河川堤防への適用，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，1999.
- 15) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），JICE 資料第 111002 号，pp.51-56, 2012.