

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

土木研究所 正会員 ○石原 雅規  
土木研究所 正会員 佐々木哲也

1. はじめに 液状化により発生する過剰間隙水圧を予測することは、液状化に係る設計の基本であり、様々な方法が提案され実務に活用されている。簡易的な手法の代表例が過剰間隙水圧比を液状化安全率  $F_L$  を用いて  $F_L^{-7}$  により求める方法であり、液状化層の強度評価等に利用されている。このような方法では土層毎に独立して算出され、土層間で相互に過剰間隙水圧が影響しあうことや地表等の境界条件の影響は考慮されないことが多い。そこで、道路橋示方書の液状化判定法とほぼ同様の入力パラメータを用いて、土層間の相互作用や地表等の境界条件の影響や考慮することのできる、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方法を検討した。水圧分布の経時変化とともに、過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量も算出できる。

2. 提案する方法の概要 提案する方法は、表-1 に示すとおり Seed らの方法<sup>1)</sup>に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いては、項立てし、より詳しく説明を行う。

表-1 Seed らの方法と提案方法の比較

	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の繰返し回数
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	

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 等の方法では地震動を有効継続時間と繰返し回数で表し計算に反映させていたが、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、損傷度に応じて過剰間隙水圧の上昇量を要素に与える。このため、 $R_L$  から液状化強度曲線を設定している。液状化強度曲線を設定方法としては、様々な提案がなされているが、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  $N=20(L/R_L)^{-3.77}$  を用いることとした。今回はこのような単純な式を用いたが、要素試験で得られた液状化曲線を用いる等の方法も考えられる。

3. 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り、模型実験の挙動とは異なる。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-1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-1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<sup>2)</sup>を用いることとした。吉田らのモデルの最

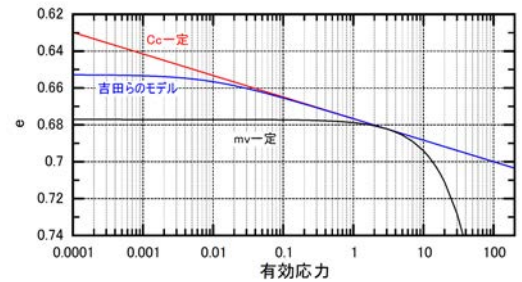


図-1 体積圧縮モデルの違い

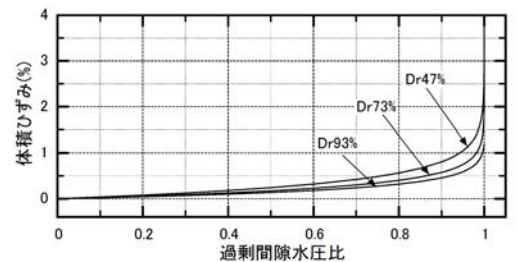


図-2 吉田らのモデルから得られる過剰間隙水圧比と体積ひずみの関係

キーワード 液状化, 簡易モデル, 過剰間隙水圧, 沈下量

連絡先 〒305-0035 茨城県つくば市南原1-6 (国研) 土木研究所地質・地盤研究 G TEL 029-879-6771

大体積ひずみ $\varepsilon_v$ 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<sup>3)</sup>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、 $\varepsilon_{v0}=12.47-0.217D_r+0.00105 D_r^2$ ,  $c=0.001+0.063\varepsilon_v$ となり、相対密度(以下、 $D_r$ )から設定可能とした。締固め工法の設計<sup>4)</sup>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-2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を求めることが可能となる。

**4. 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-3に示すように、 $D \leq 1$ ではDe Albaらの関係は用いず単純な直線関係を用いた。要素試験の結果によると、繰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-3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<sup>3)</sup>を用いて図-3の赤線の形状を決定することとした。この関係から $F_L=1$ ( $D=1$ )における体積ひずみが得られ、吉田らのモデル(図-2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-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-4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は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-5に示す。

**5. 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-6に示す。入力波形は道路橋示方書のL1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を確認できる。次に $D_r$ を変化させた時の体積ひずみ(液状化層厚10m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-7に示す。全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 $F_L < 1$ の深さ方向の範囲が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である。

**参考文献** 1) Seed, Booker : Stabilization of Potentially Liquefacible Sand Deposits using Gravel Drain System, Earthquake Engineering Research Center Report No. EERC 76-10, 1976, 2) 吉田望ら : 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, 3) Ishihara, K.ら : Evaluation of Settlements in Sand Deposits following Liquefaction during Earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, 1992, 4) 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.

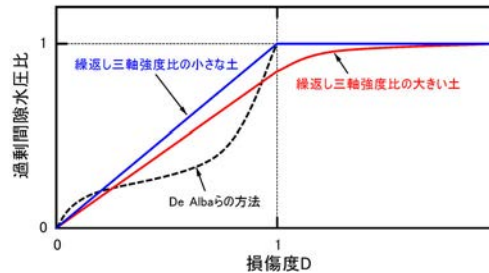


図-3 損傷度と過剰間隙水圧比の模式図

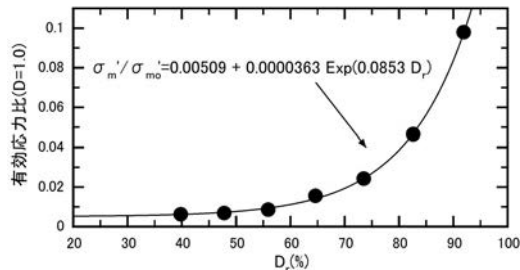


図-4 相対密度と損傷度1における有効応力比

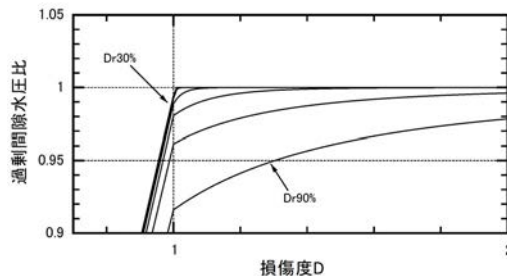


図-5 損傷度と過剰間隙水圧比の関係

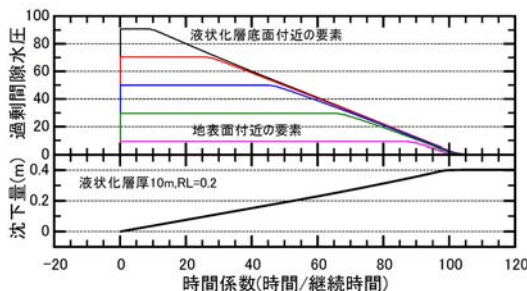


図-6 試算例(過剰間隙水圧と沈下量の時刻歴)

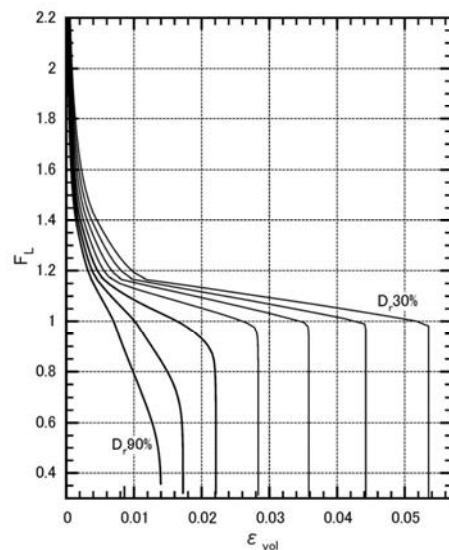


図-7 体積ひずみと $F_L$ の関係