

6 液状化解析コードの現況と動向

一口に液状化解析といっても、目的により使う手法や解析コードが異なる。以下では、目的に応じた液状化解析コードに関して、その現況と動向、および使用時の注意点などをまとめる。なお、以下では液状化解析と有効応力解析という二つの名称が良く使われるが、前者は液状化に関する広い意味で使われ、後者はそのうち有効応力に基づく地震応答解析を指している。しかし、その区別が困難なときもある。

6.1 液状化判定

(1) 簡易液状化判定

各種の設計指針などでは液状化の判定に用いるための式が示されている。これらの多くは電卓を用いた手計算でも可能であるが、市販のソフトも販売されている。その他、例えばエクセルの様なスプレッドシートでマクロを用いてプログラムを作成しているもの、FORTRAN の様なプログラム言語を使って作られるものなど、多様な方法で計算が実施されている。

(2) 地震応答解析に基づく液状化判定

1) 一次元問題

全応力解析、有効応力解析の両方が用いられる。

全応力解析では最大せん断応力を算出して、 F_L による判定に持ち込むことが多いようである¹⁾。また、せん断応力振幅の時刻歴より過剰間隙水圧の発生量を累積損傷理論を適用して求める方法も用いられる¹⁾。これらのケースでは液状化の定義は過剰間隙水圧の発生と捕らえているケースが多い。 F_L 法に持ち込むケースでは液状化の定義にひずみに基づく定義を用いればひずみで液状化を定義したことに相当する。この場合、一般に全応力解析では、有効応力の減少に対応した剛性を用いていない分、剛性を実際よりも高めに評価する可能性が大きいため、全応力解析で得られたひずみと液状化判定に用いるひずみが整合しないという矛盾点はあるが、せん断応力はほぼ予測できていると考えていることに相当する。なお、 F_L 法にはせん断強度 R 、せん断応力 L の表現法に色々なものを使うことが考えられるが、 $F_L=1$ が丁度液状化に相当するというのは論理の必然ではないので²⁾、実証が必要である。設計指針に使われている式や実務でも良く用いられるせん断応力を SHAKE³⁾ で求める方法以外を使う際には注意が必要である（以下に示す³⁾ 項参照）。

これらの方法では、一旦地震応答解析を実行した後、別のプログラムを実行したり、手計算による計算を追加したりする。

一方、有効応力解析を行うのであれば、このような事後の検討は不要で、解析の結果に基づき判定すればよい。この際、古いプログラムでは液状化が発生した時刻などを印刷してくれるものもあるが、多くの解析コードではそのような配慮はない。その場合には、液状化が発生するか否かを判定するだけであれば最大ひずみや最大過剰間隙水圧比の大きさを見れば判断できるが、液状化の発生した時刻まで要求される場合には時刻歴を描く等の操作が必要となる。

2) 多次元問題

一次元問題でも多次元問題でも、基本的には同じであり、全応力解析と有効応力解析が用いられる。一次元解析との大きな違いは応力の取り扱いで、一次元解析専用の解析コードでは有効応力に依存する各種の諸量が有効上載圧依存性として表現され、かつ、側圧に関する議論は行われない。多次元解析では側圧の大きさは側方の境界条件に影響されて変化する。多次元の解析コードを一次元に適用する場合にも同じ事になる。従って、一次元（専用）の解析と多次元の解析で本質的に挙動が違っていることも考えられる。

また、多次元の場合は、斜面や構造物近傍のように初期せん断応力が大きい場合は、変形は大きくなるが、過剰間隙水圧比は1.0まで上昇しない結果となる可能性もあり（たとえば文献4)参照）、一次元とは異なる現象が見られることもある。

3) 留意点

地震応答解析の結果を用いて F_L 値で液状化判定を行う場合、いくつかの留意点がある。

F_L 値は、液状化強度に相当するせん断応力比と、地震によって地盤に作用すると考えられるせん断応力比の比として定義されている。設計指針等ではそれぞれに対する定義式が示されているので、特に地震応答解析を行わ

なくても液状化判定を一意的に行うことが可能であるが、地震応答解析を用いて、これら指針を拡張利用する際には、それらの定義が必ずしも明確でない可能性がある。すなわち、

- ① 設計指針に対応する設計震度を、地震応答解析で得られる地表面加速度で置き換える際には、設計指針で想定している地表面加速度が、液状化が発生したときの地表面加速度であるのか、液状化が発生しなかったときの地表面加速度であるのかが明確でなければ適用できない。しかし、指針には明瞭に示されていないのが普通である。
- ② 地震応答解析で得られた最大せん断応力を用いる場合には、指針でいうせん断応力が液状化が起こったときに発生するせん断応力なのか、液状化が起こらないときに発生するせん断応力なのかにより結果が異なる。
- ③ 地震応答解析を SHAKE の様な等価線形解析で行う場合には、最大せん断応力や最大加速度は過大評価されやすい⁵⁾。

次に、多次元解析で液状化判定を行う場合には、いくつかの判断基準が用いられる。

1) 過剰間隙水圧比による判定

過剰間隙水圧比=1 (または、地盤工学会の指針⁶⁾に代表されるようにほぼ等しくなったら) を液状化と判定する。この際、分母には初期有効上載圧 σ'_{v0} 、初期最大有効主応力 σ'_{10} 、初期平均有効主応力 σ'_{m0} 等が用いられる。また、過剰間隙水圧ではなく、有効応力減少比 $1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$ を用いるという考えもある。

2) ひずみによる判定

せん断ひずみの値として三軸試験の両振幅5%軸ひずみに相当するせん断ひずみ (両振幅7.5%, 片振幅3.75%) が用いられることが多いが、それ以外の値も用いられることがある。また、せん断ひずみの大きさとして、水平面上のせん断ひずみ γ_{xy} 、軸差ひずみ成分も含めた最大せん断ひずみ (相当ひずみと呼ばれることもある。二次元状態では $\sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} / 2$ で表される) が用いられる事もある。

6.2 動的挙動と液状化後の挙動

加速度などを求めるには、地震応答解析を行う必要がある。有効応力解析コードは相当数が開発されているが、これらは、次節にまとめて示す。

杭などの地中構造物、建築物や橋梁などの上部構造物の挙動を求めることもある。この場合、全てを一度に解く方法といくつかのステップに分割して解く方法がある。一般に対象とする構造物によって独特の解き方や考え方があって、これらを含めて一度に解こうとすれば、全ての機能を備えた汎用ソフトなどが必要になるのに対して、分割して解くのであれば、いくつかの専用ソフトを組み合わせることになる。

例えば、上部構造物の応答を考えるのに、地盤は一次元の地震応答を行い、得られた波形を上部構造に入力する方法は従来から良く行われていた方法である。また杭の地震時挙動を求めるのに、一次元の地震応答解析を行い、地盤の変位を取り出して、これをばねを介して作用させる応答変位法も地中構造物では多く用いられてきた方法である。本論ではこれらについては触れない。

液状化の挙動も、有効応力解析を行っていれば自然に可能であるはずであるが、実際には必ずしもそうではない。液状化の挙動として主に要求されるのは、液状化に伴う流動と過剰間隙水圧消散後の沈下である。これらについても本論では原則として触れないが、以下に留意点のみ示す。

液状化に伴う流動では剛性が非常に小さかったり、流体の様に挙動する。このような状態は液状化に対する構成則の自然な延長として出てこない可能性もある。その場合には、別に計算する必要がある。また、最終的な変位状態を求めるのであれば必ずしも有効応力解析が必要というわけではない (たとえば文献7), 8) など)。この分野は定量予測という意味ではまだ研究段階にあると考えられる。

過剰間隙水圧消散後の沈下量は、有効応力解析を行うのであれば、地震後の圧密解析を行えば自然に求められるが、その値については注意が必要である。文献9)によれば、過剰間隙水圧消散後の体積ひずみは F_L や最大せん断ひずみに依存している。一方、多くの有効応力解析で用いられる構成則では体積ひずみに関しては増分弾性が仮定される ($d\sigma'_m = K\sigma'_m d\epsilon_v$) がこの式を用いると有効拘束圧の変化が与えられていると体積ひずみは一意的に定まるので、文献9)の実験事実と整合しないからである。このため、地震応答解析と地震後の圧密解析で体積弾性係数の値を変え、後者については別途求めた体積ひずみを得られる値となるように設定するという解析も行われる (例えば、文献10))。このように分離しない構成則も提案されている (例えば文献11)) し、弾塑性構成則における体積弾性係数 K を塑性ひずみの累積値に応じて低減し、文献9)の室内試験結果の再現を試みた例もある¹²⁾が、一般的というわけではない。また、例えば文献9)の様な方法で体積ひずみを求めた後、最終的な沈下量だけを求める方法もある⁷⁾。

6.3 地震応答解析コード

現在までに、相当数の地震応答解析コードが開発されている。ここではその全てをカバーしているわけではないことをまずお断りしておく。また、説明のために、それに対応する一部のコードを引用していることもあるが、それは単なる例であり、他に同じ条件のコードが存在していないことを意味しているわけではない。また、全てのコードの詳細な点までをチェックしているわけではないので、本文中には記述の簡潔化のため断定的な言い方をしているところもあるが100%そうであることを保証しているわけではない⁹。更に、説明のために引用してある文献は関連しているもの全てというわけではなく、そのような機能などが示されている例ということが多い。

6.3.1 各種評価項目

地震応答解析を評価する際の項目として、次のようなものをあげることができる。

- ①専用, 汎用
- ②基礎方程式
- ③境界条件
- ④各種要素
- ⑤非線形計算手法
- ⑥数値積分手法
- ⑦構成則
- ⑧インターフェイス (プリ, ポスト処理)

(1) 専用, 汎用

地震応答解析を行うだけであれば、運動方程式を解く部分の機能だけがあればよいが、実務ではそれ以外の機能が要求される事がある。当然ながらそのほとんどは地震応答解析の初期状態を確定させるためのものである。

- ・初期応力状態を実現するための自重解析, 盛立解析, 掘削解析など
- ・初期応力状態を指定する機能。当然の様に見えるが, 自重解析でしか与えられないプログラムもある
- ・有効上載圧に静土圧係数をかけたものを側圧とし水平面内に作用するせん断応力がない応力状態を初期応力状態とする機能
- ・杭, 矢板などの構造物を, 工事の過程を考慮して挿入する機能。盛立, 掘削解析と同じであるが, 地盤要素以外の構造要素

また, 地震による最終変位量や沈下量を求める必要があることがあり, 地震後の間隙水圧消散解析を行う場合があるが, これについては前項で述べた。

さらに, 地震応答解析と直接は関係ない解析を行いたい時もある。汎用コードであればほとんどのニーズに対応することができるのに対して, 液状化解析専用のコードでは最初に示した初期応力状態に対するニーズにも応えられないものもある。しかし, 一方では汎用コードの方がデータ作成に多くの手間がかかるという問題がある。コードによってはデータ作成に通じた専任の技術者が必要な場合もある。一般的に, 有効応力解析では専用のコードでも入力データの作成は結構難しい事が多く, 現実には選任の技術を決めているケースも多々ある。

(2) 基礎方程式

有効応力解析を行うには, 水と土の相互作用を考えた理論を用いる必要がある。多相系の材料を扱う理論として, Bowen の式¹³⁾などがあるが, 有効応力解析では用いられていないようである。Bowen の式で, 土が水で飽和しているときには, 有効応力解析で良く用いられる二相系の Biot の式に一致する¹³⁾。このような事もあり, 有効応力解析といえば Biot の式が用いられる。Biot の式は最初圧密現象に対して定式化され, その後動的な問題に拡張されてきた。関連する文献は非常にたくさんあるが, 例えば文献(14)(15)には多くの式が示されている。

有効応力解析に用いられる厳密な Biot の式の支配方程式は例えば土骨格の変位 u , 水の絶対変位 U , 間隙水圧 p で記述され, $u-U-p$ 形式と呼ばれる。しかし, 自由度の多い解析は, 演算時間の増大につながることから, 多く

⁹ 例えば「...として考慮している」と書くと, 全ての解析コードがそうであり, 例外は無いように聞こえるが, 他の方法で考慮しているコードが無いとは言い切れない。正確に書くためには「著者の知る範囲では」とか「考慮しているコードが多い」などと書くべきであろうがそうすると全ての文章をこのように書かなければいけなくなり, 読みにくいものとなる。

の解析コードではこの形式を使うのではなく、消去により未知数を減らしたり、ある項が解析結果に与える影響が小さいとしてその項を無視するなどによって、近似化しているのが一般的である。図-1に、それらの相互関係をまとめて示しているが、動的な解析についていえば、おおよそ次のようである。

u-U-p, u-w-p 形式：厳密な式 (w は水の土骨格に対する相対変位)

u-U, u-w 形式：水の体積弾性係数が無限大ではないとして p を消去した厳密な式

u-p 形式(1)：水の加速度が土骨格の加速度と同じである。Sandhu 流の定式化。

u-p 形式(2)：水の加速度が土骨格の加速度と同じである。Christian 流の定式化（連続式で水の加速度を無視する場合もある）。

非排水条件：間隙水の浸透を考えない。

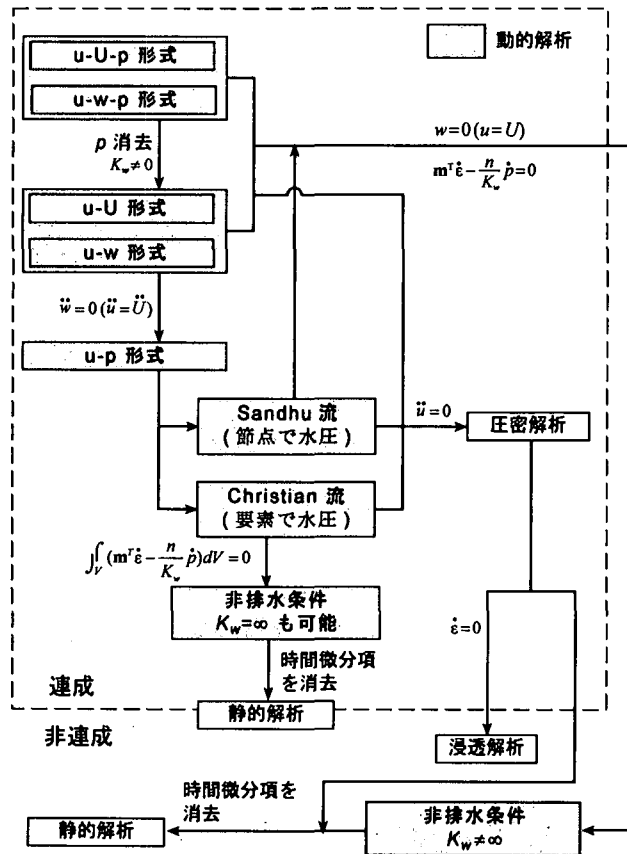


図6.1 Biot の式とその近似式の関係

これら、異なる基礎式を使うと、コーディングは全く異なるものとなる。従って、液状化の問題に対して同じプログラムで近似化の影響を調べることは困難である。圧密の問題や飽和弾性体の動的応答に対して行われたケーススタディでは、近似化の影響は大きくないことが知られている。なお、圧密の問題では加速度項を考慮しないのももちろんであるが、更に水の体積弾性係数を無限大として扱うのが普通である。

地震応答解析での比較が可能なのは非排水条件である。非排水条件は地震応答解析ではよく用いられる仮定であるので、多くのプログラムがこの機能を有している。u-U, u-w 形式などでは、 $u=U, w=0$ とおくことによって非排水条件が実現できるので、非排水条件のために別のコーディングをする必要はない。Christian 流の u-p 形式でも隣接境界との水の流れに相当する項を考慮しないだけなので、やはり別のコーディングをする必要はない。これに対して、Sandhu 流の u-p 形式では、排水と非排水は全く別のコーディングが必要となる。この場合、非排水条件では二相系の式から水圧の項を消去することができ、一相系の式とすることができる。

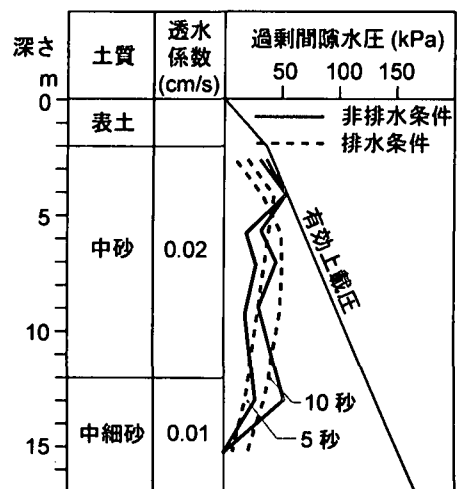


図6.2 非排水仮定の有効性¹⁶⁾

すなわち、一相系に基づく通常の有限要素法のコーディングに対して、間隙水の存在も考慮に入れた体積弾性係数 $K + K_w/n$ (K は土骨格の体積弾性係数、 K_w は水の体積弾性係数、 n は間隙率)と置き換えるだけとなる。このことを逆手にとって、非排水条件しか解析できないプログラムも存在する。この場合、コーディングは非常に簡単となる。

非排水条件の影響はいくつか検討されている。地震時に非排水条件が多く用いられる理由は、地震の継続時間が短いので、排水される水量はわずかであるというのが理由である。しかし、水量はわずかでも、水の体積弾性係数の値は非常に大きいので、その積として得られる水圧の変動は有限の値となり、水圧分布をなめらかにする等の結果となって現れる¹⁶⁾(図6.2)。また、護岸背後地盤に対するケーススタディでは、変位が過剰間隙水圧の上昇にも少なからず影響していることが示されている¹⁷⁾。また、流動による変位では浸透力が大きな役割を果たすと考えられることから、対象とする問題によっては排水性の考慮が重要となることがある。

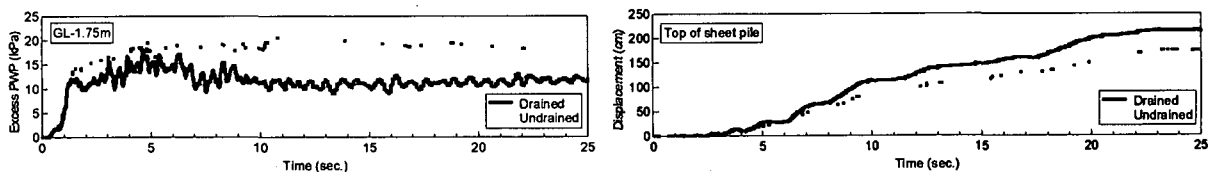


図6.3 非排水条件の影響の例¹⁷⁾

より簡易な方法が用いられることもある。例えば SHAKE を液状化解析に用いるような発想である。SHAKE では等価線形化法の概念を用いて、動的変形特性試験によって得られるせん断剛性と減衰定数のひずみ依存性として非線形性を考慮することができる。そもそも動的変形特性試験は、繰返し载荷の各ステージでは非排水条件下で実験が行われるため、試験結果を見ると大ひずみ域では液状化試験のような逆 S 字型の履歴曲線が得られている¹⁸⁾。従って、動的変形特性試験による非線形性をそのまま解析で考慮することは、液状化時のような大きなひずみレベルにおける応力-ひずみ関係を陰に解析で考慮していると考えられることも可能である。しかし、大ひずみ域における逆 S 字型の履歴曲線は、せん断応力の载荷過程で生じる現象であり、解析で用いるせん断剛性は、動的変形特性試験によって得られる割線せん断剛性であることから、ひずみが大きくなるとせん断剛性が単調に低下する特徴を有しているため、サイクリックモビリティに起因するような波形は現れない。そこで、動的変形特性で大ひずみ領域の剛性を上げることによってサイクリックモビリティを含む液状化挙動を表現しようという考えもある¹⁹⁾。これらは、最大加速度や加速度時刻歴などに着目したものであり、液状化が発生すると一緒に発生するであろう大きな変位の再現性については検討が行われていないようである。

一方で、等価線形解析をベースにしながらも、液状化による剛性変化の特徴を可能な限り考慮することを目的として、時刻歴を区間ごとに区切って等価線形解析を適用しようという考えもある²⁰⁾。

このような手法は、有効応力解析ほど完全に挙動を再現しようというものではなくて、最大加速度や加速度時刻歴など特定の項目に限って再現しようというものであると考えられる。したがって、その使用に関しては適用性に注意する必要がある。

もう少し積極的に全応力解析を使う方法もある²¹⁾。液状化の発生を考慮した応力-ひずみ関係を作ることができれば、全応力解析でも液状化時の挙動を再現することは可能である。ただし、過剰間隙水圧の発生量は求めることができない(応力-ひずみ関係への影響は組み込まれている)し、非排水条件を暗黙のうちに設定している。

非排水条件は、使うフィールドで意味が異なることがある。液状化に関連したフィールドでは個々の要素からの間隙水の出入りがない条件をいう。これに対して圧密の問題では全ての境界では間隙水の出入りがないが個々の要素間の間隙水については拘束していない様である。ただし、圧密の問題では载荷時間はその後の圧密の継続時間に比べ非常に小さいとされることが多いので、その場合には要素間でも間隙水の出入りはなくなる。また、同じ Biot の式を使っても振動問題に適用する場合、振動数が小さい場合には土粒子と水が一体として動くので非排水、振動数が大きくなると土粒子が水と独立して動くので排水挙動であるという使い方がされる²²⁾。この場合、大きい振動数とは砂でいえば1000Hz程度以上であることから、この意味であれば液状化で問題となるような周波数帯域では挙動は非排水である。

(3) 境界条件

地盤の地震応答解析では明瞭な境界を設定することが困難であることが多いので、境界の外部の影響を考慮することが重要になることがある。境界は、大きく底面と側面に分けることができる。底面が剛基盤という境界は

全てのプログラムが備えている境界条件であるが、この他に、半無限地盤への波動の逸散（地下逸散減衰）を考慮した弾性基盤を備えているプログラムも多い。有効応力解析ではダッシュポット²³⁾（粘性境界と呼ばれることもある）が用いられるのが普通である。ダッシュポットは実体波が境界に直交して入射、反射をする際には解析的にも厳密なものである。従って、一次元解析では厳密であるが、多次元解析のように入射波は直交していても反射波が直交していない場合には近似解となる。ただし、底面においては反射波も直交あるいはそれに近い角度と見なし得ることがほとんどなので、その意味では精度はよいといえる。

これに対して、側面では主に表面波の伝播を扱う必要があり、厳密な扱いは困難である。全応力解析や、周波数領域の解析ではエネルギー伝達境界、無反射境界なども扱っているコードがあるが、有効応力解析ではダッシュポットを解して自由地盤と結びつける方法が用いられる。この場合、解析領域の影響が自由地盤に伝播しないようにするためには自由地盤の大きさを非常に大きくとる Large mass 法と剛性マトリックスの作成時に力の伝播が一方向にしか行われなくする方法とがある。なお、側方の境界においてもダッシュポットは表面波を通る厳密解ともなり得るが、その場合には粘性係数は周波数の関数となる²³⁾ため、逐次積分が必要である有効応力解析には用いることができない。

これ以外にも、側面を水平ローラーや固定とする方法は昔から用いられている。ここで固定とした場合には側面からも地震動を作用させたことになるので実情とは相当に異なるが、剛土層の実験のシミュレーションなどでは用いられる。また、解析範囲を十分広くとればその影響は軽減できる。

最近よく用いられる側方境界に、繰返し境界がある。これは解析領域の左右の変位が同じという拘束条件を付ける解析で、時間領域におけるフーリエ解析のように空間方向に解析範囲を周期として同じ領域が繰返し現れるようなものを解析している事になるのでこの名前がある。側方にスムーズな挙動が得られるので解析的には便利な境界であるが、エネルギー伝達境界や無反射境界のように領域から外に出る波動を吸収する機能があるわけではないので、解析領域は広くとる必要がある。この境界は左右の自由地盤が同じでないといけないので、無理矢理そのように解析領域をモデル化するという事も行われるようである。

間隙水の境界条件としては、間隙水圧の値が指定される基本境界（水頭固定）と間隙水量が指定される自然境界（流量固定）がある。地下水位で深の底面境界や側面境界は流量ゼロの非排水境界とする場合が多い。また、構造物との境界面や不透水層との境界面も非排水境界となる。地下水位面は水圧ゼロの排水境界とされる場合が多い。しかしながら、実際には地下水位面の上には不飽和層があり、発生した過剰間隙水圧が不飽和層へ浸透することを考えると、排水境界では地下水位付近の過剰間隙水圧を過小に評価する可能性がある²⁴⁾。不飽和領域を考慮した解析によって、この問題は解決できるが、便法としては、地下水位で浅を液状化の発生を考慮せず（ダイレイタンスを無視するなど）、浸透のみ考慮するモデル化を行う方法もある。なお、排水境界では境界を通して間隙水が流出するが、一次元解析ではその水量を計算し地下水位の上昇を出力する解析コードもある²⁵⁾²⁶⁾。

側方に関しては非排水条件として扱うケースが多いが、一相系材料における粘性係数と同じように間隙水の境界条件を考慮した定式化もある²⁷⁾。

有効応力解析でもう一つ重要なのは、透水係数の異なる材料の間の条件である。例えば、透水係数の高い層から低い層に間隙水が伝播していくと、高い層からの間隙水の供給が低い層の伝播能力を超えることがあり、その場合には境界に水が貯まる事になる。このような現象は、水の存在を考慮したジョイント要素で表現でき、DESRA²⁸⁾²⁹⁾、STADAS³⁰⁾等はその機能を備えているが、多くのコードはこの機能は備えていない。

貯水池、護岸などでは解析領域の中に水が含まれることもある。水の運動方程式は、地盤と異なる記述（例えば、Navier-Stokes）がされるので、両者をつなぐインターフェイス要素が必要となる事もある。u-p 形式では自然に考慮されていることもある。なお、液状化解析の範囲に限れば、水の影響はせん断剛性を0とおいた固体の有限要素法でもかなりその影響を考慮できるので、必ずしも別の支配方程式を用いる必要はない。ただし、この場合でも有限要素で表現された水と、水圧で表現された地盤中の間隙水を結びつけるインターフェイス要素が必要となる。しかし、非排水条件で解析を行うのであれば支配方程式はいずれも変位で記述されるのでこのような要素は必要なくなる。

繰返し境界に限らず、二つの節点や自由度の動きを関連づけたい場合がある。MPC 結合（多点拘束）のような機能があれば対処しやすい。

(4) 各種要素

使える要素の種類が多いほど解析がしやすくなる。地盤の要素として最も多く用いられるのは4節点のアイソパラメトリック要素であるが、8節点要素を用いた解析コードもある。三角形の要素は4節点要素の二つの節点を同じ節点に指定することで設定できるが、この場合誤差は大きくなり、専用の三角形要素の方がよい。ただし、液状化の問題では多くの三角形要素を用いることは無いので、その影響は大きくない。逆に三角形要素ばかりで

地盤を構成すると体積変化の表現で問題が起こることがあり、好ましくない。

水を含む問題では、地震の継続中は等体積に近い条件が成立する。すなわち、見かけのポアソン比が0.5に近くなる。このようなケースを通常の要素（例えば、4節点要素で2点ガウス積分）を用いるとシヤロックという現象が生じることが知られている⁷⁾。これは、せん断剛性が小さくなくてもせん断変形が発生しない、すなわち変位が非常に小さくなるという現象であり、有効応力解析では致命傷となる。これに対処するには次数低減積分が効果的であることが知られている³¹⁾が、一方では次数低減積分を行うと砂時計不安定(hourglass mode)³²⁾という現象が発生しやすくなる。砂時計不安定現象を解決するには抗砂時計剛性³²⁾を導入したり、要素剛性マトリックスの作り方に工夫を凝らしたりする必要がある。一般のプログラムではこのような処理をしていないものもあり、その場合には結果に大きな差が現れる可能性もある⁷⁾。

土と構造物の境界、すべりの表現などではジョイント要素が良く用いられるが、備えていないコードもある。また、境界条件の項でも述べたように、ジョイントが開いた空隙に水が入るようになっていると地盤中など多くのケースで使用することが可能である。

土の要素の他、構造物をモデル化するためのばね要素、はり要素など、実際の解析で有用な要素は多い。

(5) 非線形計算手法

液状化の問題は、非線形現象の数値解析として最も難しいものの一つである。特に液状化が発生してからは、応力点は破壊曲面のごく近傍を移動し、かつ繰返し载荷に伴い何度もそのような状態に陥る。このような状況では、数値計算のコーディングが数値解析の結果に大きく影響を与えることもしばしばである。また、画一的な数値解析の方法がいつでも適用できるとは限らない。プログラムとしていくつかの解法を用意してあるとか、プログラムを使用する際に表には見えないが、数値計算の実際には普通に使われる各種の数値計算制御用の値、例えば収束判定の際のノルムの値、除荷を判定するための微小な値などもユーザーがコントロールできるようになっている方が好ましい。

(6) 数値積分手法

良く使われる数値積分法として、Newmark の β 法がある。また、高振動成分の振動をより多く抑制する（したがって、数値計算が発散する可能性が小さくなる）Wilson の θ 法も液状化の問題では用いられることがある（数値積分法については例えば文献33)34)を参照されたい）。これらの方法では増分計算を一度だけ行なうので、増分終了後には外力と内力に不釣合が発生する。全応力地震応答解析では不釣合力を無視しても誤差を無視できることが多いが、有効応力解析では必須のこともある。したがって、不釣合力をなくす努力が必要であるが、その考慮方法として次のステップに持ち越す方法と、その増分でイタレーションを行い不釣合力をなくす方法がある。後者のケースは数値積分法の名称として例えば Newmark の β 法や Wilson の θ 法とは呼ばず、予測子・修正子法と呼ぶべきであるが、両者を区別していないものもある。

有効応力解析では不釣合力の発生は計算を複雑にすることが多い。不釣合力を発生させない方法に中央差分法がある。中央差分法では数値積分の安定では必ずしも保証されないので、数値積分の時間増分を非常に小さく（例えば1/1000秒以下）にする必要があるが、一方では連立方程式の係数に剛性マトリックスの項が入らないので、（減衰を時間に応じて変えなければ）係数行列は常に一定である。従って、連立方程式を解く手間は上記の方法に比して非常に小さいので、両者を考えれば計算時間という点では引き合うかもしれない。また、上記の有効応力解析でも通常地震応答解析で用いられるような0.01秒というような時間増分では数値計算がうまくいかないで、より小さい（例えば0.001秒）時間増分を用いることがある。このような場合には中央差分法の方が計算時間として有利になる。

この様に見ると、中央差分法は数値積分としては条件付き安定ということで不利な印象があるが、必ずしもそうではない。ただし、陽解法であり、変位などの独立変数が時間の二次関数として変化することを仮定して次のステップの応答を計算しているため、有効応力がほとんど0の状態などでは解として得られる変位（ひずみ）が構成則の適用の範囲内に入っているという保証もなくなることから、コーディングのテクニックが必要になるかもしれない。

また、非線形解析は基本的には線形解析の繰返しであることから、有効応力解析に限らず非線形の問題では常に突然破壊線を越えるような応力状態が得られることもある。この場合、応力点を破壊線内に引き戻す、破壊線を少し大きく設定する等の対処法があり、それによって解が変わることもある。有限の時間増分を用いる以上、応力状態が破壊線を超えたり、平均有効応力が負になることは避けられない。繰返し計算を行わない場合でも、計算ステップ終了毎に応力状態を監視し、適切な応力状態に補正するような工夫が必要となる。

また、解析コードとしては、一つの方法がだめであっても他の方法を使うとうまくいくこともあるので、用意している種類は多い方がよい。

(7) 構成則

液状化の問題に限らず、地盤の問題では構成則が結果を一番左右する。液状化の問題では、昔は一つの解析コードに対して一つの構成則が対応していた。これは、多分に構成則を開発した人（グループ）がコーディングも行っていたためであろうと考えられる。しかし、例えば粘土と砂の存在する地盤を砂の構成則だけで解かなければならないなど、これでは不便な時が多い。

最近では、汎用ソフトで液状化も扱えるものも増えてきた。これらではいくつかの構成則が入っていることが普通である。また、ユーザーサブルーチンとしてユーザーが独自に開発したものも加えられる様になっているとさらに使い勝手はよくなる。

地盤以外の例えば、梁要素、ばね要素などの非線形特性もしばしば重要となる。特に、地盤-基礎-構造物系の性能照査に用いる解析の場合には、これらの非線形性の考慮は極めて重要な要素となる。

(8) インターフェイス（プリ、ポスト処理）

プログラムによっては、プリ、ポスト処理のための専用のツールを用意していることもある。専用のツールがあると、データ作成や事後処理が楽に行えるようになる。しかし、そうでない場合でも汎用のソフトを使うことができることが多い。

地震応答解析の前には構成則のパラメータを決めるという作業が必要である。例えば双曲線モデルのように一次元の全応力解析モデルではパラメータを決めるのは手計算でも可能かもしれないが、有効応力解析を行う場合には、例えば液状化強度曲線をターゲットとしてパラメータを決めるなど複雑な操作が必要である。このためには、動的変形特性試験や液状化強度試験をシミュレートするような解析コードがあれば便利である。汎用のコードであれば1要素のモデルを作り静的な繰返し力を与えれば要素試験のシミュレーションになるが、有効応力解析専用のコードでは別途要素試験専用のコードが作られる。このようなコードは本プログラムの陰に隠れて名前も付けられないときもあるが、解析の流れからすれば重要である。

なお、要素試験に関し、室内試験で得られる挙動が本当に土の微小要素の挙動かということに関しては議論のあるところであり、要素試験が完全にシミュレートできたとしても実構造の挙動が再現できるという保証はない。このため、解析結果を見てパラメータの見直しを行ったり、解のある問題を解いてキャリブレーションを行ったりする必要もある。この意味で、有効応力解析は経験が重要なフィールドということができよう。

6.3.2 各種コード

著者らの保有しているコードおよび著者らが気のついた解析コードについて、主な機能をまとめて表6.1に示す。著者らのものでない場合には開発者または良く使っている方にアンケートを行い確認をして頂いている。なお、機能確認のアンケートに返事なかったコードは一覧表から削除した。

表中○はその機能があること、×はその機能が無いことを示す。また、主な項目の意味は次の通りである。

- 1) 専用と汎用：専用は主として有効応力地震応答解析を目的として作られているコード。例えば自重、盛立解析＋有効応力解析の組み合わせなど。これに対し、汎用は静的、圧密、動的などを各種取りそろえ、一般の問題を対象としている。一次元のコードは専用として分類した
- 2) 液状化構成則は、砂の要素に用いられる有効応力を考慮した構成則で、たくさんあるものについては二つを上限として示している。なお、アンケートの再、学会の出版物に個人名のモデル名を入れるのは好ましくないとの意見もいただいたが、論文中では普通に使われているし、通称として使われていることも多いことから、本論では名前を挙げている。また、モデル名は各回答者のものをそのまま載せたので、同じモデルであってもコードによって異なっている可能性もある。また、人によって呼び名が異なることがある。例えば、西らのモデル³⁵⁾は、その構成則の元となった論文の著者名から西モデルと呼ばれることもあるし、文献35)から西、金谷モデルと呼ばれることもある。すなわち、名称は絶対的なものとは限らない。
- 3) ユーザー定義構成則とはユーザーが自由な構成則サブルーチンを作ってプログラムに組み込める機能があるコードである。
- 4) 文献は、各コード一つでお願いした。現在は文献に示されているものに新しい機能が加わったり、構成則の改良が行われたりしている可能性もある。また、文献として構成則を挙げているものと、コードの手法を挙げているものがある。

表6.1 解析コード一覧

コード名称	基礎方程式	次元	専用汎用	主な液状化構成則	ユーザー定義構成則	はり要素	ばね要素	ジョイント要素	ダッシュポット
ALiSS ³⁶⁾	非排水 ^{*1}	2	専	R-O+Bowlモデル(福武), 任意応力モデル(修正松岡)他	×	線形	非線形	○	○
DESRA ²⁸⁾	u-p	1	専	M-F-Sモデル	×	×	×	○ ^{*3}	○
DIANA ³⁷⁾	u-p	3	汎	東畑・井合モデル, 西モデル他	○	非線形	非線形	○	○
DIANA-J ⁵⁸⁾	u-U, u-p	2	汎	反射曲面, PZ他 ^{*8}	○	線形	線形	○	○
DINAS ³⁸⁾	非排水	3	汎	修正 R-O(3-D)と Bowlモデルの併用	×	非線形	非線形	○	○
DYNAFLOW ³⁹⁾	u-U, u-p	1, 2, 3	汎	Multi-yield 弾塑性モデル	×	非線形	非線形	○	○
DYNES ⁴⁰⁾	u-p	1 (3)	専	吉田モデル, 飛田吉田モデル他	○	×	×	×	○
EFFECT ⁴¹⁾	u-U	2	専	松岡モデル	×	非線形	非線形	○	○
EFFCTD ⁴²⁾	非排水 ^{*2}	2	専	修正 R-O(2次元)と國生らの水圧上昇モデル, 他	×	線形	線形	○	○
EENA-PILE ⁴³⁾	非排水	1	専	累積損傷度, 双曲線モデル	×	○	×	×	×
FLIP ⁴⁴⁾	非排水	2	専	井合モデル	×	非線形 ^{*6}	非線形 ^{*6}	○	○
HiPER ⁴⁵⁾	非排水	3	専	R-O(3次元)+Bowlモデル(福武)	×	非線形	非線形	○	○
LIQCA ⁴⁶⁾	u-p	2, 3	専	岡モデル	×	非線形	×	○ ^{*4}	○
LIQCAFW ⁴⁷⁾	u-w-p	2, 3	専	岡モデル	×	非線形	×	○ ^{*4}	○
LiQSMART ⁴⁸⁾	非排水	1	専	累積損傷度, 半波毎等価線形	×	×	×	×	○
MASH ⁴⁹⁾	u-p	1	専	Davidenkovモデル	×	×	×	×	
MuDIAN ⁵⁰⁾	u-U, u-p, u-p-S	2, 3	汎	下負荷+densificationモデル, 井合モデル他	○	非線形	非線形	○	○
NAFSS ⁵¹⁾	u-w	2	専	西モデル	×	非線形	線形 ^{*5}	○	○
NONSOLAN	u-w	2, 3	汎	弾塑性, 弾塑性+エンドクロニック	○	線形	×	×	
NUW2 ⁵²⁾	u-w ^{*7}	2	専	井合モデル	×	線形	線形	○	○
STADAS ³⁰⁾	u-p	2	汎	吉田モデル, 飛田吉田モデル他	○	非線形	非線形	○ ^{*3}	○
STADAS2 ⁵³⁾	u-p	2	汎	吉田モデル, 修正飛田吉田モデル他	○	非線形	非線形	○ ^{*3}	○
TARA-3 ⁵⁷⁾	u-p	2	専	M-F-Sモデル	×	線形	線形	○	○
YUSAYUSA ⁵⁶⁾	u-p	1	専		×	×	×	×	○

1 圧密の式との併用可 ; *2 浸透流解析と併用可 ; *3 ジョイントの中に水が入る²⁹⁾ ; *4 強度の算定にのみ水圧を反映 ; *5 非線形の対応も可能 ; *6 FLIP 研究会版 ; *7 吸収境界処理を含む ; *8 他の構成則を組み込んだ論文も発表されている⁵⁴⁾⁵⁵⁾。

注) 全てのコードを集めているわけではない。この他, 例えば文献60)には海外のコードも示されている。

注) ダッシュポットは一次元の解析コードでは弾性基盤を考慮するときのみ使われる。

注) 基礎方程式で非排水とあるのは非排水解析のみが可能。それ以外は多くの場合, 非排水も可能であるが当然のこととして示していない。

6.3.3 解析コードの発展

解析コードの使われ方も時代とともに変わってきている。この項では全体として見た解析コードの使われ方、考え方を示す。

液状化研究の初期に開発された DESRA²⁸⁾や YUSAYUSA⁵⁶⁾では実務では液状化発生の予測が重要な役割であった。もちろん液状化以後の計算も可能ではあるが、実務的には液状化発生予測が主要な用途であり、液状化が発生するという事になれば、対策工を検討するなど、液状化発生後の挙動を設計等で必要とされるケースは余り無かった。

その後、二次元、三次元のコードが作られるようになった。TARA-2, TARA-3⁵⁷⁾はその初期のコードの一つであるが、当時開発されつつあった遠心力荷試験による堤体などの液状化後の挙動の実験をシミュレーションすることでその有効性を確認してきた。この様な過程はその他のプログラムも同様であり、その実用性は事例解析を通じて検証されてきている。ここでは、個々の解析コードではなく、全体としての流れに重点を置いて説明する。

(1) 1989年の一斉解析

1989年に地盤工学会で有効応力解析コードの一斉解析が行われた⁵⁸⁾。この一斉解析では当時日本で動いていたほとんどの多次元解析コード(7つ)により一次元と堤体(ダム)モデルの解析が行われた。この一斉解析は、その後の有効応力解析の一つの方向付けを行った。主な点は次のようである。

- ① 応力-ひずみ関係のパラメータを決める際のターゲットとして、従来は液状化強度試験のシミュレーションをすることが多かったが、それではランダムな地震動を受ける際の液状化の発生を予測することが困難と考えられることから、液状化強度曲線をターゲットとすることとした。
- ② 過剰間隙水圧発生量は無次元量で表現した方がイメージをつかみやすい。従来は u/σ'_{m0} や u/σ'_{v0} が用いられることが多かったが、多次元の応力下では全応力も変化することから、これらの代わりに $(1-\sigma'_m/\sigma'_{m0})$ を用いた。
- ③ 7つのコードによる解析結果は相当差があることが認識された(図6.4参照)。

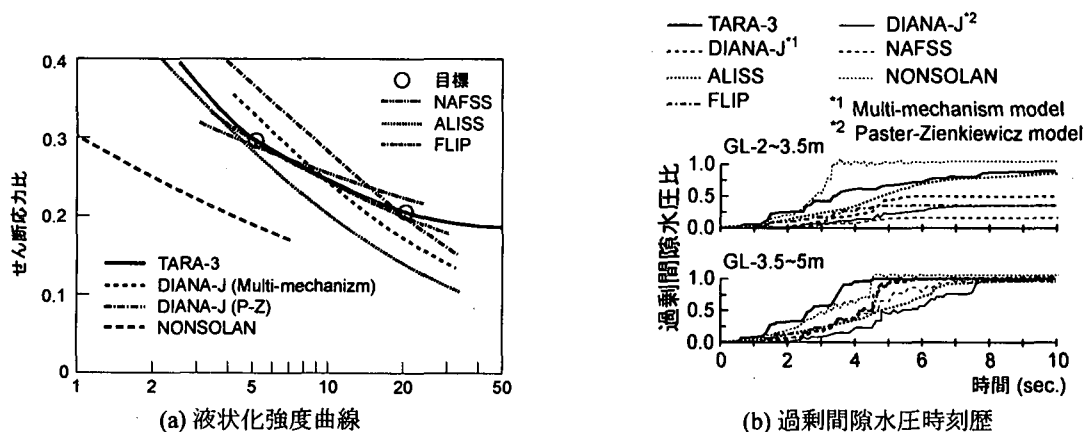


図6.4 川岸町モデルに関する各種コードの解析結果の例(文献58をまとめたもの)。

- ④ 弾塑性の構成則では、①で述べたように設定された液状化強度曲線をうまくあわせることができなかった(図6.4(a)参照)。ターゲットとして繰返し数 $N=5$ と 20 で設定された液状化強度曲線は弱い材料であることからかなり水平に近いものであったのに対して、これらの構成則で得られた液状化強度曲線の勾配は急であった。
- ⑤ やはり、弾塑性の構成則であるが、液状化強度を求めるために、一定応力振幅の荷重を行うと、応力経路が変相線を超えた付近で履歴曲線が定常化してしまい、有効応力は小さくならないし、せん断ひずみは大きくならない。図6.5(a)はその一例であるが、他の弾塑性の構成則も同じ状況であった。しかし、図6.4(b)に見られるように、ランダムな荷重を行うとこれらの構成則でも有効応力は0になった。

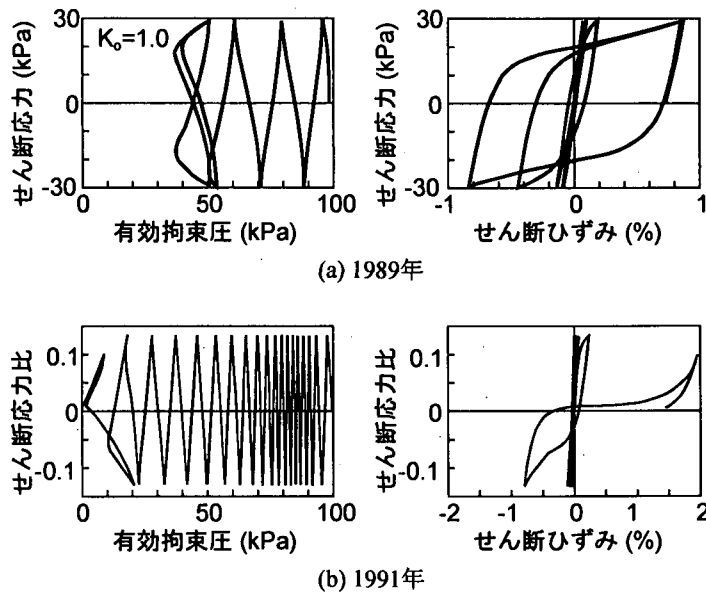


図6.5 構成則の改良の例

上で述べたうち、①、②は現在でも標準的な方法として使われている。③の解析コード間のばらつきは現在も存在する（例えば、このシンポジウムの浮き上がりに対する一斉解析参照）。

有効応力解析について重要なのは、④、⑤である。その後、多くの構成則がこれを改良する方向に向かった。例えば図6.5(b)はその一例（以下で述べる1991年の一斉解析）であるが、応力経路、ひずみの発生量など図6.5(a)と比べるとずいぶん改良されていることが分かる。

この例のように構成則はどんどん改良されることが普通である。一方では表6.1にも示したように、構成則は開発者の名前を持って呼ばれることが多く、この例からも分かるように常に同じというわけではないので、名前を用いるときには注意が必要である。

履歴挙動が定常化するという欠点を改良のための手法は色々あるが、一般的には塑性変形が進む（例えば最大ひずみが大きくなる）、载荷量が増える（例えば消散された履歴エネルギーが増える）ことなどを関数として、より塑性ひずみが発生しやすいようにすることが多いようである。

なお、弾塑性型の構成則に対して、実験式をベースにした構成則（TARA-3, FLIP, ALISS）では液状化強度曲線のシミュレーションは良好であった。そのためか、これらの構成則はその後、ほとんどそのまま使われてきている。

(2) 1991年の一斉解析

この当時の液状化に対する興味は、液状化発生の有無や過剰間隙水圧の発生量であった。これに対してもう一つの問題を与えたのが、1991年に行われた地盤工学会として2度目の一斉解析である⁵⁹⁾。ここでは、液状化対策工法の効果、特に構造物直下の地盤改良の効果を確認することを目的として一斉解析が行われた。前回（1989年）の一斉解析と同じコードが用いられたケースでは構成則の改良が行われたことは既に述べたが、それ以外にもいくつかの新しい構成則も使われた。これらの解析の結果、例えば、構造物直下が液状化する場合の構造物の沈下量に解析コードにより100倍以上も差があることが分かった。このためか、この一斉解析が行われた目的は適切な地盤改良範囲の把握ということであったが、議論はそこまでは行かなかったようで、差があることだけが印象に残った。

これらの事例から分かるように、その後の有効応力解析における興味の対象として、変位量に対する予測精度も取り上げられるようになったが、ひずみが大きく着目されることはなかった。室内試験では液状化強度の表現方法として過剰間隙水圧による方法とせん断ひずみ両振幅による方法があるが、その後の論文を見ても、これらの液状化強度の設定方法を書いていないものが多いし、設定法が書かれているとしても、二つの方法を記述し、その両方をターゲットにしてシミュレーションしている例は著者の知る範囲では無い。

(3) VELACS プロジェクト

多くの人が同じ問題を解析したプロジェクトとしても一つ上げられるのは、VELACS⁶⁰⁾である。このプロジ

エクトでは有効応力解析の精度を確認するというで、図6.6に示すような多くの種類の地盤、地盤-構造物系の実験が行われ、それをブラインド解析として予測させるものであった。これは、アメリカで行われたプロジェクトであったことを反映して、日本からの参加は限定されたが、材料データが十分でない、ばらつきが大きいなど、多くの不満が残る結果となった印象がある。このプロジェクトでは、共通仕様の実験（同じ土層、材料、入力）をいくつかの異なる機関で行うなど、実験面では珍しい試みが行われた。その結果、例えば水平成層地盤の様な簡単な実験でも実験機関で相当な差（各種の解析の誤差以上の差）が現れることがわかったりした⁶¹⁾。また、前述のように多くの種類の地盤、構造物の実験が行われたが、それらの計算の結果、どのケースも良く予測できた解析コードはなかったということが明らかになり⁶²⁾、改めて有効応力解析の困難さがクローズアップされたものとなった。このプロジェクトの主眼は、多くの機関で共通の実験を行うということに置かれていたようで、解析という観点ではその後の発展に寄与する所も余り無かったように思われる。この種のブラインド解析では、例えば結果が良好な場合に、それが解析コード（特に構成則）の持つ特徴のためなのか、解析コードを使った人の使い方（判断力）がよかったのか、それともたまたま運がよくてよい結果になったのか等を明らかにする必要があり、良好でない場合には、良好でなかった原因を議論することが、結果が良好であったことを明らかにすること以上にこの分野の今後の発展にとって重要であるにもかかわらず、その様な場が設けられることなく今日に至ったことが後の発展に繋がらなかった一因であろうと考えられる。

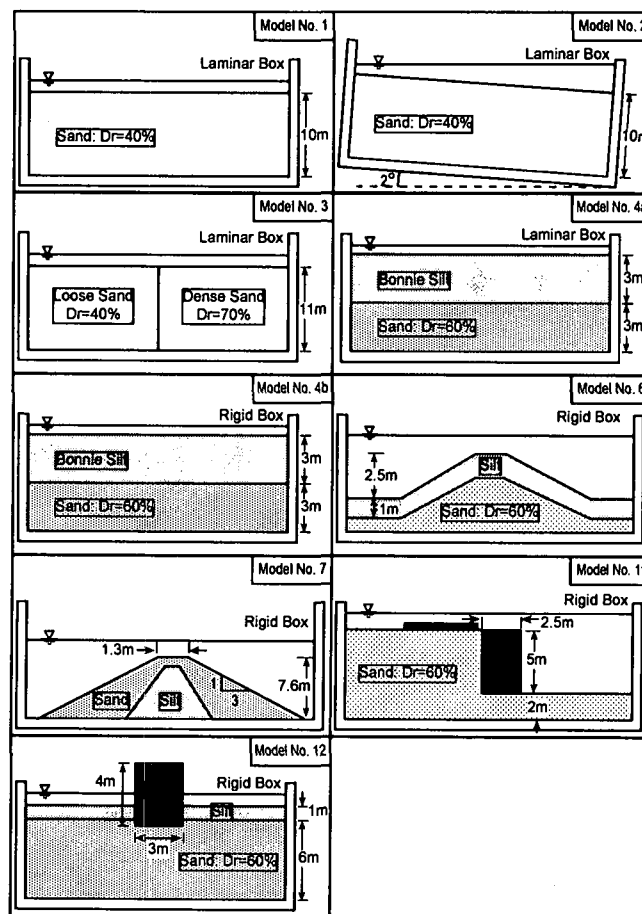


図6.6 VELACS ブラインドテストで用いられたモデル

(4) その後の一斉解析

その後も、日本ではいくつかの研究委員会などで一斉解析が行われることがあったが、前述した地盤工学会の二つの委員会で行った一斉解析では、ほとんどが解析コードの担当者が自身で解析を行い、議論したのに対して、その後は解析コードのユーザーが解析を行うことも多かった。それだけ有効応力解析が一般的になってきたともいえるが、一方ではその結果を見ると各種解析コードの結果に差があることはわかるが、解析コードの発展につながるような議論までには至っていないことが多い。また、一斉解析であるので、ブラインドテストと異なりある程度は他の解析コードの結果を見て結果を調整するような事も行われることもある。さらに、委員会内部では議論が行われても、それらがうまく外部に紹介されないケースもあるようである。

(5) 変位と間隙水圧

変位の問題がクローズアップされるようになったのは液状化に伴う地盤の流動が話題になってからである。この辺の経緯は例えば文献63)に示してあるが、地震被害に対応して問題となったのは緩やかな傾斜地盤（例えば勾配1/100程度）でも数 m にも及ぶ水平変位が発生すること、日本海中部地震における秋田港外港の被害（矢板岸壁）などである。前者に関しては地震応答解析の事例はほとんど無く、液状化の影響を考慮して剛性を低下させる方法が用いられた⁷⁾。後者に対しては、動的解析で解析された事例⁶⁴⁾⁶⁵⁾もあるが、水平変位は実被害より小さく、背後地盤の沈下の形状や、矢板が被害を受けた位置と最大モーメント発生位置が一致しているという定性的なものであった。この時点でもひずみと水圧の両方を意識しているということとはなかったように考えている。

過剰間隙水圧とひずみの両方を液状化の基準として意識したのは、文献53)当たりであろう。この論文では、履歴に応じてせん断弾性係数も小さくなるようにすれば、過剰間隙水圧に関する液状化強度はほとんど変わらず、ひずみによる液状化強度を制御できるとして、明確に二つの液状化強度を区別している。

その他、有効応力解析に影響を及ぼす外的な条件に関する研究も行われるようになった。非排水条件については、文献16)では排水を考慮した場合と比較して水圧分布に違いが発生することを指摘しているが、その後文献17)では矢板護岸について、水圧分布のみならず変位においても無視できない差が出ることを指摘している。これについては6.3.1(2)項で説明した。また、同じ文献では地震の主要動が終わった後の小さい地震動のもとでも変形が進む現象なども指摘している。これらのことは実験でも実証されている⁶⁶⁾。

(6) まとめ

総じて見ると、多くの有効応力解析コードは概ね1990年前半までに開発され、現在はそれらの解析コードを使って色々な問題が解かれている状況にある。有効応力解析コードでは6.3.2節でも示したように、構成則と1対1対応していることが多いことから、このことは多くの有効応力解析に用いられる構成則の主要な部分の開発も概ねこれらの時期に終わっているということがいえる。コードの中には、その後の様々な問題への適用を通じた経験などにより構成則の改良を順次重ねていく努力も行われているが、その詳細は論文発表などがなくよくわからないことも多く、このことが、高度な解析と言われる液状化解析（有効応力解析）が、一部の専門家あるいはその方面の経験豊かな使用者に限定される要因の一つとなっている。

それでは、現在の有効応力解析コードが完全かという決してそうではない。今回の委員会報告の中でも紹介されているが、解析コードによる結果の差は相変わらず存在する。また、特にレベル2地震動を対象にすると液状化以後の地盤の挙動も問題となるが、その点を特に意識した研究も余り無い。例えば図6.7は今回の委員会報告の作業の事例^{b)}であり、図に示した二つの構成則によるシミュレーションでは液状化強度は両者とも同じであるのに対して液状化後の変形特性は全く異なり、沈下量にも大きな差が出ている。このような沈下量の評価は水平変位より難しい問題と考えられるが、解析コードにより10倍程度の差が発生している。

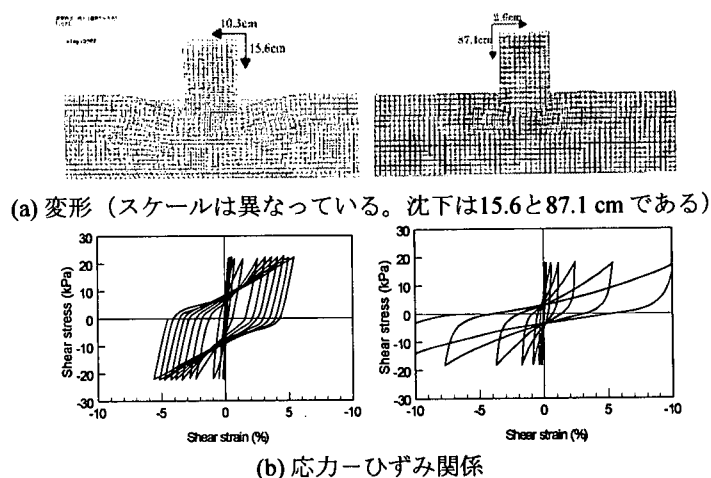


図6.7 液状化強度が同じで液状化後の挙動が違う例

^{b)} 作業の途中経過から図を引用したので、最終報告では値などが異なっている。

(7) 将来に向けて

この他、将来の改良点として次のようなものが挙げられる。

a) 挙動把握（要素試験）

- 1) 液状化に至る過程：実験でも捕らえられていない⁶⁷⁾。
- 2) 液状化後の挙動：実験では捕らえられていない⁶⁷⁾。
- 3) 透水係数：液状化後に変化する⁶⁸⁾²⁹⁾。
- 4) ひずみによる液状化と水圧による液状化：ランダムな載荷では有効応力が0になっても変形が非常に小さくなる事例もある²⁾。
- 5) 試料採取時の乱れ⁶⁹⁾（凍結試料でない原位置から採取した試料で正しい液状化強度が求められないとすれば、それができないとき一般技術者は何をすべきか）

b) 外的条件

- 1) 流動現象は、室内試験（要素試験）では把握することができない。
- 2) 非排水解析の適用性
- 3) 微振動による変形継続の効果（6.3.3(5)参照）。浸透流の評価
- 4) 非液状化層の特性評価とその考慮法。引張り破壊現象。
- 5) 初期応力とそれに至る応力履歴の影響
- 6) 不飽和領域の液状化。二次液状化。

6.4 終わりに

駆け足ではあるが、液状化解析コードの現状を大まかに紹介した。著者らの時間の都合などもあり、地震応答解析（特に有効応力解析）に主眼をおいた記述となっている。液状化に関してはこの他、液状化に伴う流動の問題⁶³⁾等も重要で、この分野では流動後の変形のみに着目した残留変形解析も多用されるが、本論では示していない。機会があればこれらについてもまとめてみたいと考えている。

なお、本論のようなまとめは難しいもので、客観的に書いたつもりでも、著者らの主観が入ってしまう。また、文献等の調査でも完全を記するのは困難であるし、引用した文献は孫引きはせず一々原論文を当たったつもりではあるが著者らの勘違いなども含まれている可能性がある。読者の寛容を期待するところである。

参考文献

- 1) 液状化対策の調査・設計から施工まで 第3章 液状化予測，土質工学会，1993
- 2) 吉田望（2000）：液状化に関する設計について考える，1995年兵庫県南部地震5周年特別企画 日本地震あれからこれから，土木学会地震工学委員会，pp. 81-84
- 3) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley
- 4) 吉田望，永瀬英生，三浦均也（1999）：液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響，地盤の流動化に伴う発生メカニズムと解析法（その2），土と基礎，Vol. 47, No. 9, pp. 49-54
- 5) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 6) 地盤工学会（2000）：土の繰返し非排水試験，土質試験の方法と解説—第1回改訂版—，pp.635-702
- 7) 安田進，吉田望，安達健司，規矩大義，五瀬伸吾，増田民夫（1999）：液状化に伴う流動の簡易評価法，土木学会論文集，No. 638/III-49, pp. 71-89
- 8) 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集，土木学会，2001
- 9) Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of Settlements in sand deposits following liquefaction during Earthquakes, Soils and Foundations, 32, 1, 173-188.
- 10) 阪神淡路大震災・地盤調査研究会（1998）：平成9年度報告書
- 11) 吉田望，規矩大義（1997）：液状化解析に用いる砂の体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講演集，pp. 889-890
- 12) 渦岡良介，八嶋厚：液状化後の体積変形予測に対する砂の繰返し弾塑性モデルの適用性，土木学会第56回年次学術講演会，III-A089, pp.178-179, 2001.
- 13) Bowen, R. M. (1976): Theory of Mixtures, Continuum Physics, Vol. III, Eringen ed., Academic Press, New York

- 14) Zienkiewicz, O. C. and Bettess, P. (1982) Soils and other Saturated Media under Transient, Dynamic Conditions; General Formulation and the Validity of Various Simplifying Assumptions, *Mechanics of Geomaterials*, pp. 1-16
- 15) 液状化解析の基礎方程式, 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 1999
- 16) 吉田望, 辻野修一 (1989) : 液状化解析における非排水条件仮定の有効性, 第44回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 644-645
- 17) 王均, 佐藤正行, 吉田望 (1998) : 矢板護岸被害の有効応力解析における非排水条件の影響, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, 第3部(A), pp. 254-255
- 18) Yoshida, N. (1995): Processing of strain dependent characteristics of soil for nonlinear analysis, Proc., First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, pp. 473-478
- 19) 社本康広 (1998) : サイクリックモビリティを考慮できる等価有効応力解析法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), B-1, pp. 569-570
- 20) 宇高竹和, 内田治, 田中典明, 佐藤博 (2000) : 多重等価線形解析による液状化解析手法の提案, 土と基礎, Vol. 48, No. 8, pp. 5-8
- 21) Yoshida, N., Kiku, H. and Suetomi, I. (1998): Earthquake response analysis under very severe earthquake, Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, Vol. 2, pp. 757-764
- 22) Ishihara, K. (1970): Approximate forms of wave equations for water-saturated porous materials and related dynamic modulus, *Soils and Foundations*, Vol. 10, No. 4, pp. 10-38
- 23) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. (1969): Finite Dynamic Model for Infinite Media, *Journal of Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE*, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-877
- 24) 渦岡良介, 久保哲夫, 八嶋厚, 張鋒: 不飽和層への浸透現象を考慮した液状化解析, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.153-163, 2001.
- 25) Martin, P. P. and Seed, H. B. (1978): APOLLO, a Computer Program for the Analysis of Pressure Generation and Dissipation in Horizontal Sand Layers during Cyclic or Earthquake Loading, Report No. UCB/EERC-78/21, University of California, Berkeley
- 26) 吉田望, 東畑郁生 (1991) : YUSAYUSA-2・SIMMDL-2理論と使用法, 佐藤工業, 東京大学, 1995年改訂
- 27) 三浦均也, 吉田望 (1997) : 地盤中を伝播する波動の透過・反射の連成解析と無反射境界, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp. 883-884
- 28) Finn, W. D. L., Lee, K. W., and Martin, G. R. (1977): An Effective Stress Model for Liquefaction, *GED, ASCE*, Vol. 103, No. GT6, pp. 517-533
- 29) Yoshida, N. and Finn, W. D. L. (2000): Simulation of liquefaction beneath an impermeable surface layer, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, Vol. 19, No. 5, pp. 333-338
- 30) Yoshida, N. (1993): STADAS, A computer program for static and dynamic analysis of ground and soil-structure interaction problems, Report, Soil Dynamics Group, The University of British Columbia, Vancouver, Canada
- 31) Zienkiewicz, O. C. (1984): *The Finite Element method*, 3rd edition, McGraw Hill, 1977 : 日本語訳 吉識雅夫, 山田嘉昭, マトリックス有限要素法, 三訂版, 培風館
- 32) Flanagan, D. P. and Belytschko, T. (1981): A uniform strain hexahedron and quadrilateral with orthogonal hourglass control, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 17, pp. 679-706
- 33) 鷲津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本義之, 川井忠彦 (1983) : 有限要素法ハンドブック II, 培風館
- 34) 戸川隼人 (1975) : 有限要素法による振動解析, サイエンスライブラリー情報電算機33, サイエンス社
- 35) Nishi, K. and Kanatani, M. : Constitutive relations for sand under cyclic loading based on elasto-plasticity theory, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 2, pp. 43-59, 1990.
- 36) Fukutake, K., Ohtsuki, A., Sato, M. and Shamoto, Y. : Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 19, No. 7, pp. 977-992, 1990
- 37) DIANA User's Manual release 7.2, TNO Building and Construction Research
- 38) 福武毅芳 : 土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究, 名古屋工業大学博士論文, 1997
- 39) Prevost, J. H. (2002) : DYNFLOW, A nonlinear transient finite element analysis program, Princeton University
- 40) 吉田望 (1995) : DYNES3D, A computer program for dynamic response analysis of level ground by effective stress-nonlinear method
- 41) 伊藤浩二 : 動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その1) —基礎理論と地盤構成モデル—, 大林組技術研究所報, No. 51, pp. 7-14, 1995.
- 42) 阿部 博 : Liquefaction shaking table tests for sandy ground with embankment, 土木学会論文集, III, No.554, pp. 1-17, 1996
- 43) 今村晃, 吉田洋之, 柳下文雄, 塩見忠彦, 時松孝次 : 杭間地盤の液状化を考慮した質点系モデルの構築 (その1) ~ (その3), 日本建築学会大会学術講演会梗概集 (投稿中), 2003.
- 44) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1993

- 45) 大槻明, 福武毅芳, 藤川智, 佐藤正義: 液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, No. 495/I-28, pp. 101-110, 1994
- 46) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 47) 岡二三生, 小高猛司, 森本良, 喜多信代: 相対加速度を考慮した有限変形液状化解析法の適用性, 土木学会第57回年次学術講演会, III-539, pp.1077-1078, 2002.
- 48) 塩見忠彦, 土方勝一郎, 貫井泰, 横山治男, 柳下文雄, 小山桂介: 累積損傷度を考慮した簡易液状化解析手法(その1)~(その2), 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp379-382, 1999.
- 49) Martin, P. P. and Seed, H. B. (1978): MASH, a computer program for the non-linear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered deposits, Report No. UCB/EERC-78/23, University of California, Berkeley
- 50) 塩見忠彦, 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 津國正一(1998): 地盤と構造物の非線形挙動を考慮した構造解析システムの開発, 竹中技術研究報告, No.54
- 51) 金谷守, 西好一, 当麻純一, 大波正行: 有効応力に基づく地盤の非線形解析手法の開発とその検証, 土木学会論文集, No. 505, III-29, pp. 49-58, 1994.
- 52) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H. and Fang, H. L.: Cyclic Mobility Behaviour of Sand by the Three-Dimensional Strain Space Multimechanism Model, Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 18, pp. 397-415, 1994.
- 53) Kurose, H., Sato, M., Azuma, H., Ozeki, K. and Yoshida, N. (2001): Effective stress analysis by shear strain controllable model and its application to centrifuge shaking model test, Proc. 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, Paper No. 9.37
- 54) 森尾敏, 日下部伸, 塚本耕治(1991): 多極面モデルによる解析, 盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, pp. 175-184
- 55) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Numerical simulation of the Kobe Port Island Liquefaction, Proc. 11WCEE, Paper No. 330, Acapulco, 1996.
- 56) Ishihara, K. and Towhata, I. (1980): One-dimensional Soil Response Analysis during Earthquake Based on Effective Stress Method, Journal of the Faculty of Engineering, Vol. XXXV, No. 4, The University of Tokyo, pp. 656-700
- 57) Finn, W. D. L., Yogendrakumar, M., Yoshida, N. and Yoshida, H. (1986): TARA-3, a program for nonlinear static and dynamic effective stress analysis, Soil Dynamic Group, University of British Columbia, Vancouver
- 58) 地盤と土構造物の地震時挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 1989
- 59) 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, 1992, 土質工学会
- 60) Arulanandan, K. and Scott, R. F. ed.: Proc. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California, 1993, Balkema
- 61) Arulanandan, K. and Scott, R. F. (1993): Project VELACS - Control test results, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 8, pp. 1276-1292
- 62) Scott, R. F.(1993): Lessons learned from VELACS project, Proc. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California
- 63) 講座: 液状化に伴う地盤の流動と構造物への影響, 土と基礎, Vol. 47, No. 5, 1999~Vol. 46, No. 4, 2000
- 64) Fujii, Y., Hatanaka, M., Tanaka, Y. (1989): Liquefaction analysis of seawall during 1983 Nipponkai-chubu earthquake, Proc., 2nd U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, Technical Report NCEER-89-0032, pp. 322-335
- 65) Iai, S. and Kameoka, T. (1993): Finite element analysis of earthquake induced damage to anchored sheet pile quay walls, Soils and Foundations, Vol. 33, No. 1, pp. 71-91
- 66) Okamura, M., Abdoun, T. H., Dobry, R., Sharp, M. K. and Tobaoda, V. M. (2001): Effects of sand permeability and weak aftershocks on earthquake-induced lateral spreading, Soils and Foundations, Vol. 41, No. 6, pp. 63-77
- 67) 吉田望(2003): 性能設計に向けた土の動的性質と地震時挙動, 土と基礎, Vol. 51, No. 2, pp. 2-7
- 68) Arulanandan, K. and Sybico, J. Jr. (1992): Post-liquefaction settlement of sand -mechanism and in situ evaluation, Proc. 4th Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Honolulu, Hawaii, Technical Report NCEER-92-0019, pp. 239-247
- 69) 時松孝次, 大原淳良(1990): 凍結サンプリング, 土と基礎, Vol. 38, No. 11, pp. 61-68