

論文の内容の要旨

論文題目 Numerical method for three-dimensional prediction of lateral flow
in liquefied subsoil

液状化に起因する地盤流動の三次元数値予測

氏名 小林 義和

地震によって発生する地盤災害の一つとして、液状化によるものがあげられる。液状化による被害は、たとえ構造物が地震力に耐えられるように設計されていたとしても、それを支持する地盤が剛性強度を失ってしまうため、時には深刻な被害を構造物に及ぼすことがある。たとえば、1964年に発生した新潟地震では、液状化による空港ビルの沈下や、地盤の側方流動にともなう橋台の滑動による昭和大桥の落橋など、深刻な被害が観測された。

このような液状化による地盤流動量の推定法はいくつか提案されているが、その中でももっとも汎用性が高く、主に利用されている手法は、液状化砂の構成則を採用した有限要素解析である。

しかし、このような有限要素法による解析には、次のような問題がある。

1. 液状化砂の構成則が、間隙水圧の上昇と剛性の減少過程を主に対象として作られているため、完全液状化状態における性質を忠実に再現しているかどうかには疑問がある。

2. 液状化現象では、有効拘束圧が0になることで剛性が消失し、非常に大きな流動が発生することは既知である。しかし、これらの有限要素法は、固体力学が基礎になっているため、剛性が0になるような状態だと解析が不安定になる。このため、有効拘束圧が0になるような状態においても、実際の解析では、ある程度の剛性を残すような処理がなされているため、液状化地盤の流動量が、実際の流動量に比較して過小評価されることが予想される。
3. 一般に液状化砂の構成則は多数の材料定数を持っており、それらは三軸試験などの土質試験によって決定される。しかし、この調査には多大な費用と労力が必要であり、解析対象領域全体にわたって詳細な調査をおこなうことは容易ではない。
4. 液状化による地盤流動では、一般に変形量が非常に大きくなり、ときにはせん断歪みが数100%に及ぶようなこともありうるが、一般に普及している解析用プログラムで大変形を考慮している物は、そうは多くない。仮にALE法やUpdate Lagrange法などによって大変形による影響が考慮されていたとしても、構造物の沈下などのように境界の移動量が非常に大きい場合には適用ができない。
5. 仮に上記のような問題が解決されたとしても、その計算量は現在の計算機には荷が重く、実用的な用途には利用が難しい。

そこで、このような問題を解決する方法として、エネルギー原理に基づいた液状化地盤の側方流動量推定法が東畑によって提案された。

この手法では、まず液状化地盤の水平流動量 $u(x, z)$ は、深さ方向に1/4周期の \sin 関数によって補間されており、次のような z に関して変数分離された形式で示されている。

$$u(x, z) = F(x) \sin \frac{\pi(z - B)}{2H}$$

ただし、 H は液状化層厚、 B は非液状化層厚である。また、鉛直方向の変位 w に関しては流動中の体積変化を0とみなすことによってさらに自由度の低減を試みている。さらに、水平方向の流動分布 $F(x)$ についても、流動に伴う水平方向の質量保存に注目することによって解析的な関数として与えられている。このような変位仮定によって、二次元的な広がりをもつ地盤の流動問題に対して、数値解析によらない水平流動解析手法が提案され、従来の有限要素法がもっていた自由度数の増加に伴う計算量の増大や、大変形問題への適用性の問題を回避することに成功した。さらに、近年の研究成果によって、液状化した砂が粘性流体的な挙動

をするという知見が得られていることに注目し、液状化地盤をニュートン流体としてモデル化することによって、材料定数数の低減および構成則部分の計算量の低減がおこなわれている。また、時間の効果については、変数分離が仮定され、初期状態から静的な解に向かって流動が進展していくような仮定がおこなわれている。さらに、この手法はオレンセによって三次元モデルに拡張され、汎用性を向上させるために水平方向には有限要素法によって離散化がなされた。

しかし、この手法では、流動量の分布が深さ方向に 1/4 周期の sin 関数で仮定されていたため、地表に剛性をもった不飽和層が存在するような例においては、流動がその剛性によって拘束され、流動が発生しにくくなる。さらに時間領域における解析では、変数分離が仮定されているため、最終的な安定点が存在しない、すなわち静的な解が存在しないような問題に対しては解析が不可能であった。

そこで本研究では、東畑らによって提案された手法に次のような拡張をおこない、より汎用性を高めた解析手法の提案をおこなった。

1. 既存の変形モードに、1/2 周期の sin 関数による変形モードを追加し、変形仮定を地表面に剛性が高い不飽和層が存在した場合においても流動の発生が可能なように改良した。これによって、液状化砂の側方流動量は、1/4 周期の sin 関数による変形モードと 1/2 周期の sin 関数による変形モードの和となる。
2. 既存の方法では、静的な解析であるか、もしくは時間の項を変数分離によって別途考慮していたが、Lagrange の運動方程式を採用することによって時間領域の解析に拡張をおこなった。

この変位仮定の改良によって、たとえば二次元モデルにおける液状化地盤の水平流動量分布は、次のようにあらわされる。

$$u(x, z, t) = F(x, t) \sin \frac{\pi(z-B)}{2H} + J(x, t) \sin \frac{\pi(z-B)}{H}$$

このように、本手法では、既存の定義に 1/2 周期の sin 関数による変形モードが追加されただけでなく、 x のみの関数であった F が時間の影響も含むように改良されている。以降、1/4 周期の sin 関数による変形モードを F モード、1/2 周期の sin 関数による変形モードを J モードと呼ぶ。また、この F モードと J モードは、Lagrange の運動方程式の解として、独立に求まる。

また、この提案法の実験について詳細な検討をおこなった結果、実際の解析を

おこなう際に考慮すべき点が次のように明らかになった。

二次元モデルおよび三次元モデル共通項目

1. Jモードを追加することによって、過去におこなわれた振動台による模型実験の結果をより良好に再現することに成功した。
2. FモードおよびJモードは最終的な変形量に対して唯一解をもたず、その最終的な流動停止点はF+Jの関数として与えられる。
3. FモードおよびJモードは、ポテンシャルエネルギーに対して独立ではないが、消散エネルギーや、運動エネルギーに対しては独立であるため、Lagrangeの運動方程式によって動的解析に拡張することによって、FおよびJをえることができる。
4. FモードとJモードの成長速度を比較すると、Fモードの粘性による減衰力が、Jモードよりも小さいため、Fモードの成長速度がJモードに比べて速くなる。したがって、単純な斜面のモデルでは、主にFモードによって流動する。
5. 既存の方法では、時間に関する項が変数分離されて解析がおこなわれていたため、任意の時刻における地盤の変形形状は、最終変形形状に対して常に相似形であったが、本手法では、そのような現象は発生しない。
6. 液状化砂の粘性は、流動速度には影響するが、最終的な変形形状には影響をおよぼさない。

二次元モデルに関する項目

1. 要素境界においては、一般に地表高が不連続となる。
2. その不連続性は、ポテンシャルエネルギーを最小にするように発生する物ではなく、地表高の定義により、流動量変化と地盤の形状によって決定される。
3. 地表面勾配が大きい領域では、要素境界における地表高の差が大きくなる可能性があるため、要素分割をより細かくおこなう必要がある。
4. 地表高の評価を行う場合には、節点において地表高が不連続となるため、要素中心における値など、何かしらの代表値を採用する必要がある。

三次元モデルに関する項目

1. Lagrangeの未定乗数法によって要素境界の地盤高が連続になる境界条件が導入されたため、二次元モデルのような要素境界における地盤高の不連続性は発生しなくなったが、それに伴って内挿関数が二次となっているため、流動停止状態における地表高も二次関数となった。

2. 地表高が二次関数で与えられているため、流動にともなって地表面に凹凸が観測されるようになった。この凹凸も、二次元モデルにおける要素境界の地表高の不連続性と同様に、ポテンシャルエネルギーを最小にするために発生するわけではなく、流量の変化と地盤の幾何特性によって発生する物である。この影響を抑制するためには、凹凸が激しい領域において、要素分割をより細かくする必要はある。
3. 流動にともなって発生する地表面の凹凸により、地表高の評価を行う場合には、二次元モデルの場合と同様に、何かしらの代表値を採用する必要がある。

また、本手法を 1990 年のフィリピン地震で発生したダグパン市における構造物の沈下事例に適用し、本手法の妥当性について検討をおこない、本手法では、実際の沈下量と比較して、大きく評価されることが判明した。

さらに、水谷によっておこなわれた振動台による模型実験に本手法を適用し、この事例においては、粘性係数を臨界減衰比で 20 程度にすると良好な結果を与えることがわかった。

さらに、1995 年の兵庫県南部地震において発生した、神戸ポートアイランドのケーソンの被害に対して本手法を適用し、その妥当性について検討をおこなった。