

エネルギー原理に基づく構造物の沈下解析において 基礎幅および液状化層厚が沈下量に与える影響

小林 義和¹・東畑 郁生²

¹正会員 工博 日本大学助手 理工学部土木工学科

²正会員 工博 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

近年、地震時における構造物の沈下や土構造物の崩壊、ライフラインの断絶など、液状化した地盤の水平流動に起因する災害が多数報告されており、このような液状化地盤による水平流動量を推定する方法として、東畑らによってエネルギー原理に基づく手法が提案された。この手法は、解析的手法であり、比較的単純な形状の地盤を対象としていたが、後に拡張され、現在は、より柔軟な適用性を有している。そこで本研究では、本手法によって、大成建設株式会社でおこなわれていた液状化地盤上の送電鉄塔基礎の沈下を想定した遠心載荷実験結果の再現を試みた。また、そのモデルに対して液状化層厚および基礎幅を変更することによって、本手法の挙動特性に関する検討を行った。

Key Words: *liquefaction, lateral ground flow, subsidence, large deformation*

1.はじめに

近年、液状化した地盤の側方流動に伴う構造物などへの被害事例が多数報告されている。これらの被害推定を行うために数々の研究が行われているが、これらの手法の主な目的は、その地盤における液状化の有無を評価することであった。

このため、液状化地盤の水平流動量を定量的に評価する手法として、東畑ら¹⁾によってエネルギー原理に基づいた流動量推定法が提案された。この手法では、過去に行われた振動台模型実験の結果に基づいて、深さ方向の水平流動量分布が1/4周期のsin関数で仮定されたこと、および液状化した砂をニュートン流体としてモデル化したことが特徴となっており、計算量の大幅な低減がはかられている。また、この手法は、当初液状化地盤の流動状態を容易に推定することを可能にするために、解析的な手法となっていたが、後にオレンセラ²⁾や筆者ら³⁾によって拡張がおこなわれ、任意形状の3次元地盤の地盤流動を時間領域で追跡することが可能になっている。

そこで本研究では、本手法を、大成建設株式会社によっておこなわれた送電鉄塔基礎を想定し

た基礎の遠心載荷装置による沈下実験⁴⁾に適用し、実験結果の再現を試みた。さらに、そのモデルの液状化層厚や、基礎幅等を変更することによってこれらの変化が解析結果に与える影響について検討をおこなった。

2.エネルギー原理に基づく流動量推定法

ここでは、本手法の特徴である液状化地盤の水平流動量分布の仮定と、その変位仮定をもちいたエネルギー原理に基づく流動量推定法について簡単に解説をおこなう。

(1) 変位仮定

本手法では、液状化地盤の水平流動量として、図.1に示されるように、次のような変位仮定をおこなっている。

$$u = F_u \sin \frac{\pi(z-B)}{2H} + J_u \sin \frac{\pi(z-B)}{H} \quad (1)$$

$$v = F_v \sin \frac{\pi(z-B)}{2H} + J_v \sin \frac{\pi(z-B)}{H} \quad (2)$$

ただし、 u は x 軸方向の水平流動であり、 v は y 軸方向の水平流動量を示している。式(1)および

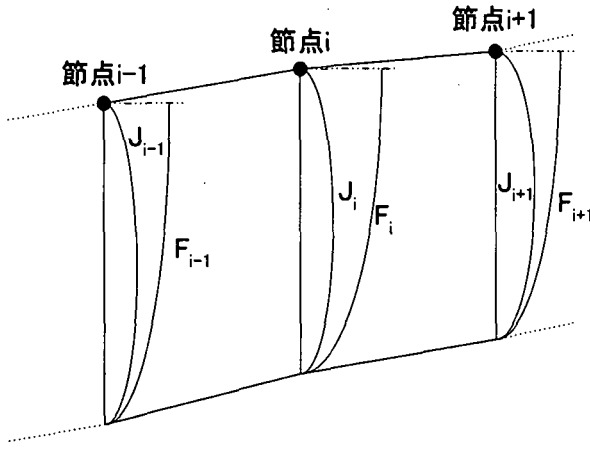


図.1 水平変位仮定図(x-z 平面)

式(2)では、液状化砂の水平流動量が 1/2 周期の sin 関数と 1/4 周期の sin 関数の和で表されることをあらわしている。さらに、本手法では、液状化層内の任意点における鉛直変位を求めるため、流動中の圧密の影響を無視することによって、次のような条件を仮定している。

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

この仮定では、液状化によって地盤が流動する時間は過剰間隙水圧の消散に対して十分短く、流動中の体積歪みが 0 であることを仮定している。このため、この条件式(3)に式(1)および式(2)を代入することによって、鉛直変位 w に関する微分方程式が与えられるため、この微分方程式を液状化層底面において鉛直変位が 0 であるような境界条件の下に解けば任意の点における鉛直変位 $w(x, y, z, t)$ を求めることができる。ただし、上に述べたように、この仮定では、液状化地盤の圧密による体積変化が考慮されていないため、沈下量を求める際には、この圧密による沈下量を、一時圧密理論などをもちいることによって別途算定する必要がある。

(2) 支配方程式およびエネルギー定義

このように導かれた変位から、系全体における運動エネルギー K が次式によって求められる。

$$K = \frac{1}{2} \int_V \rho(u^2 + v^2 + w^2) dv \quad (4)$$

また、本手法では、液状化砂がニュートン流体として挙動することが仮定されているため、ニュー

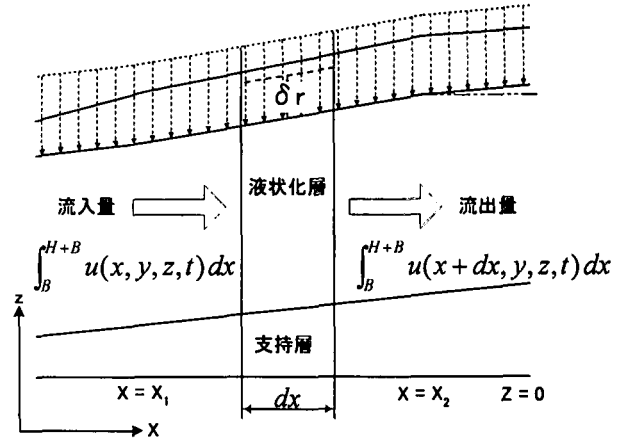


図.2 要素 i における地表面昇降量

トン流体の応力テンソルから消散エネルギー D を次式のように求めることができる。

$$D = \int_V \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 dv \quad (5)$$

ただし、

$$u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w \quad (6)$$

このため、上式に式(1)および(2)を代入することによって液状化層全体の消散エネルギーを求めることができる。

また、液状化地盤が持つポテンシャルエネルギーについては、図.2 に示されるような液状化層地表面の昇降量から求められる。ある要素における体積収支から、その要素内における地表高変化 δr を求めると、次式のようになる。

$$\delta r = \delta r_x + \delta r_y \quad (7)$$

$$\delta r_x = \frac{\partial}{\partial x} \int_B^{H+B} u(x, y, z, t) dz \quad (8)$$

$$\delta r_y = \frac{\partial}{\partial y} \int_B^{H+B} v(x, y, z, t) dz \quad (9)$$

ここで、式(7)によって求められた液状化層地表面の昇降量から、液状化層のポテンシャルエネルギーは次式のように導かれる。

$$P_l = \int_B^{H+B+\delta r} \rho g z dz \quad (10)$$

このポテンシャルエネルギーの定義式では、地盤の大変形にともなう幾何形状の変化が考慮されている。これらのエネルギーを、Lagrange の運

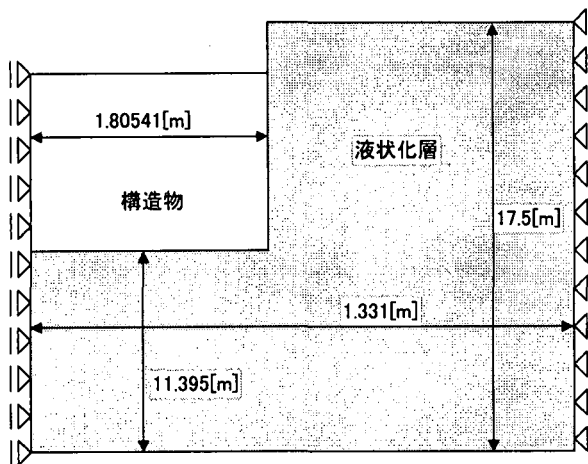


図.3 解析対象モデル図

動方程式に代入し、水平方向に関して有限要素法で離散化することによって、液状化層の水平流動量とそれに伴う地表面の昇降量を求めることができる。

3. 遠心載荷装置による基礎沈下実験の再現

ここでは、大成建設株式会社によっておこなわれた遠心載荷実験⁴⁾における鉄塔基礎模型を実スケールに変換し、計算を容易にするために図.3に示すような軸対象モデルとしてモデル化した。また、基礎の直下では、基礎幅の1/2の深さまでは液状化を起こさないことを仮定し、このモデルに対して粘性係数を変化させた解析をおこない、実験結果の再現を試みた。

ここで、図.4に解析結果および実験結果を示す。図.4によれば、実験結果に近い解を与える粘性係数は、 $1.0\text{E}+8[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ となっており、非常に大きな値となっている。この原因として、まず液状化砂の粘性係数は非常に幅広く分布していることがあげられる。また、解析対象が遠心載荷実験による結果を実スケールに変換したものであるため、それによる影響も少なくないと思われる。

この実験を比較的良好に再現する粘性係数においても、300[s]を過ぎた時点で解析値が実験値を上回っていくが、これは、実験ではこのあたりで有効応力の回復が始まり、剪断強度による抵抗力の発生によって流動が停止しているためと考えられる。

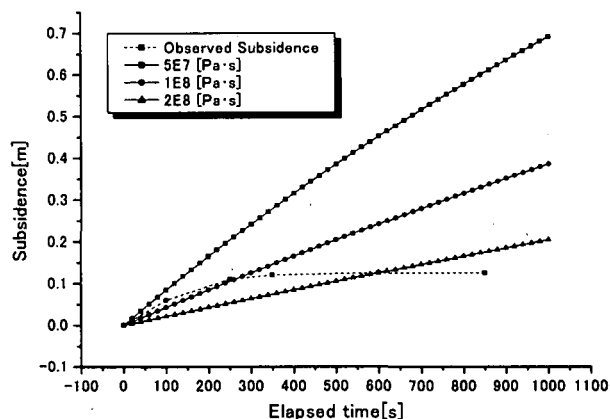


図.4 遠心載荷実験の再現結果

4. 液状化層厚が解析結果に与える影響

ここでは、遠心載荷装置による基礎の沈下実験の解析モデルに対し、液状化層厚のみを変化させ、液状化層厚が沈下量に与える影響について検討をおこなった。ここでは、基準として、粘性係数 $\mu=2.0\text{E}+8[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ の解析例を採用している。ここで、この比較結果を図.5に示す。図.5では、実スケールに変換された実験結果において、過剰間隙水圧の消散が十分終了した時点を流動の停止点とし、解析におけるその時刻の沈下量がプロットされている。ただし、この流動が停止する時刻については、実験結果を基準とし、間隙水圧の消散に必要な時間が液状化層厚に比例することを仮定して、液状化層厚の関数として次式のように算出している。

$$T = \frac{L}{L_{EXP}} T_{EXP} \quad (11)$$

ただし、

L_{EXP} 実験における液状化層厚

L 解析における液状化層厚

T_{EXP} 実験における流動停止までの時間

T 解析における流動停止までの時間

である。ここで、実験における流動停止までの時間は、約600[s]となっている。図.5によれば、液状化層厚の増大に伴って、過剰間隙水圧の消散が終了した点における沈下量が増加していることがわかり、これは、液状化層内の歪み速度分布

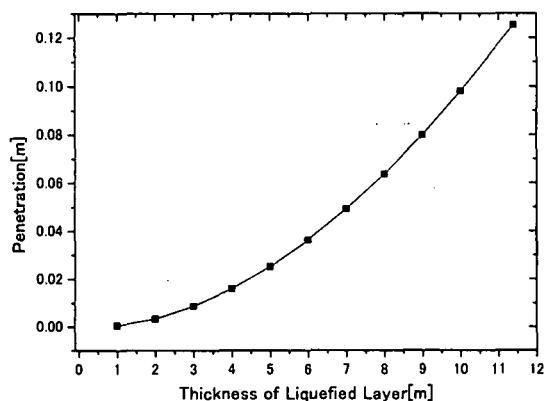


図.5 液状化層厚を変化させた場合の沈下量

に起因するものである。

基礎の沈下に伴い、質量保存の法則から、基礎が地盤に貫入した体積が基礎直下からそれ以外の領域へ排出されなければならない。ここで、液状化層厚が薄くなると、基礎貫入量と等しい体積を排出するために必要な水平流動量が液状化層が厚い場合よりも大きくなるため、結果として液状化層内の剪断歪み速度が大きくなる。これに液状化砂の粘性が抵抗するため、結果として基礎の沈下が抑制される結果となる。したがって、この結果は、液状化層厚以外の条件が等しければ、液状化層厚が厚いほどその地盤上の構造物は、液状化によってより大きな被害を受けることを示唆している。

5. 基礎幅の変化が沈下に与える影響

ここでは、実験結果を基準とし、基礎幅を変化させた解析をおこなうことによって、基礎幅の変化が沈下に与える影響について検討をおこなった。この解析では、基礎幅の変更に伴い、基礎直下における非液状化領域の深さも基礎幅の半分となるため、基礎幅が広くなるに従って、液状化層厚も薄くなっていくことになる。ここで、この解析における流動の終了点については、液状化層厚を変化させた解析と同様に、式(11)によってもとめた。ここで、この解析結果を図6に示す。図6によれば、基礎幅の増大によって基礎の自重が増加しているにもかかわらず、沈下は抑制されていることがわかる。これは、前述した液状化層厚が薄くなることも一つの原因であるが、さらに基礎の底面積の拡大に伴う流動距離の増加も原因

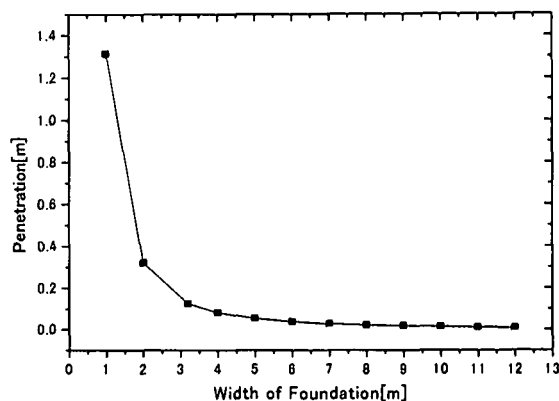


図.6 基礎幅を変化させた場合の解析結果

の一つである。

6. 結論

本研究では、エネルギー原理に基づいた液状化地盤の流動変位推定手法によって液状化地盤上の基礎の沈下解析をおこない、本手法の挙動に関する検討をおこなった。この結果、この手法では、液状化層厚が薄くなると基礎の沈下が抑制されることがわかった。また、基礎の幅を広くとることによっても、間隙水圧の消散が終了した時点における総沈下量が、基礎幅が狭い構造物よりも低く抑えられることがあることも示された。

参考文献

- 1) Ikuo Towhata, Roland P. Orense, Hirofumi Toyota, Mathematical principles in prediction of lateral ground displacement induced by seismic liquefaction, Soils and Foundations, 1996
- 2) Roland P. Orense, Ikuo Towhata, Three dimensional analysis on lateral displacement of liquefied subsoil, Soils and Foundations, 1996
- 3) 小林 義和, 液状化に起因する地盤流動の三次元数値予測, 東京大学博士論文, 2001. 4
- 4) Kawasaki, K., Sakai, T., Yasuda, S., & Satoh, M. (1998). Earthquake-induced settlement of an isolated footing for power transmission tower. Proc. Centrifuge 98, (pp.271-276). Balkema