

粘性流体モデルによる送電鉄塔の 三次元沈下解析

小林 義和¹・東畑 郁生²

¹ 日本大学理工学部土木工学科助手 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)

kobayasi@civil.cst.nihon-u.ac.jp

² 東京大学大学院工学系研究科教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

towhata@geot.t.u-tokyo.ac.jp

送電鉄塔基礎では、基礎の底面積が構造物総重量に対して比較的小さいため、液状化による基礎地盤の強度喪失に伴う沈下に対する抵抗力が小さく、大きな沈下が発生する可能性がある。このような構造物の液状化に伴う液状化地盤への沈下では、その駆動力が構造物の沈下量に伴って変化する大変形問題であり、このような問題は、大変形を考慮していない解析では追跡することが難しい。そこで本研究では、液状化による送電鉄塔基礎の沈下を、より少ない計算量で大変形解析が可能な粘性流体モデルによって解析した。その結果、送電鉄塔基礎の周辺を地盤改良し、それぞれの基礎を一体化させることによって基礎の沈下を大幅に低減することができる可能性を示唆する結果をえた。

Key Word : liquefaction, subsidence, geometric nonlinearity, viscous fluid model, energy transmitting tower, foundation

1. はじめに

地盤が液状化によってその強度を失い、粘性流体的な挙動することから、送電鉄塔基礎のように底面積が重量と比較して小さく、接地圧が大きくなるような構造物では、基礎地盤への貫入への抵抗力が小さくなり、液状化に起因する構造物の沈下が大きくなることが予想される。しかし、このような現象を数値解析によって解明することは、地盤の大変形による幾何非線形性を考慮しなければならないことから一般的な固体力学による有限要素解析では困難であった。

粘性流体モデルと液状化地盤の水平変位を2種のsin関数の和で近似する手法は、振動台による盛土構造物を対象とした模型実験¹⁾や、重力式護岸の背後地盤の液状化による海側へのはらみ出し²⁾、1963年の新潟地震による空港ビルの沈下事例³⁾など、液状化地盤の変形解析に使われ、適切な粘性係数を与えることによって、これらの実験や地震による被害事例を再現することが報告されている。この手法では、地盤の大変形による影響が考慮されており、さらにその変位仮定と液状化砂のモデル化の簡易さから計算量が少な

く、実用的な手法となっている。

そこで、本研究では、粘性流体モデルと液状化地盤の変位仮定を組み合わせた手法によって遠心載荷試験による送電鉄塔基礎モデルの液状化時の沈下解析を行った。また、送電鉄塔の基礎周りの地盤改良の影響をされたことをによる基礎沈下の抑制効果に関する検討を行った。

2. 解析方法

ここでは、粘性流体モデルと水平変位仮定による液状化地盤の流動解析法について簡単に述べる。詳細については、参考文献⁴⁾を参照されたい。

液状化による地盤変形は、地震による慣性力ではなく、重力がその主たる原因であり、その変形形状は過去の振動台模型実験⁵⁾により、次のように提案されている。

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

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

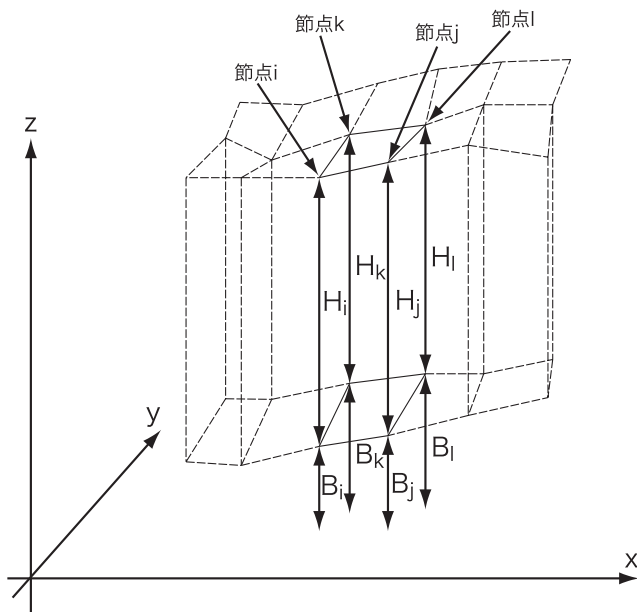


図.1 解析対象モデル図

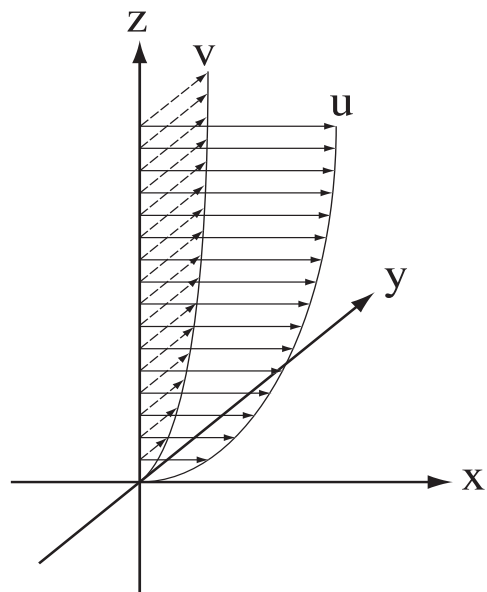


図.2 液状化地盤の水平変位

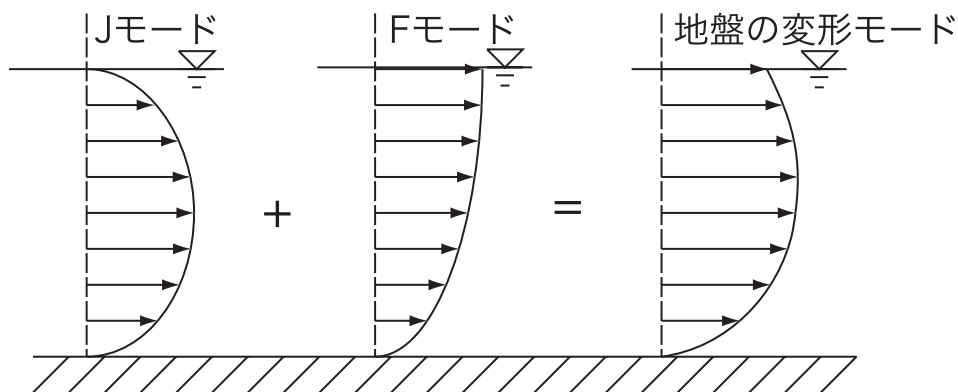


図.3 軸方向における変形モード仮定

ただし, u , v はそれぞれ x , y 軸方向への変位であり, H , B はそれぞれ液状化層厚と液状化層底面の高さである. 式 (1) および式 (2) に示される変位仮定では, 図.1 に示されるようなある要素の任意点における液状化地盤の水平変位を表しており, このときの B , H は次のようになる.

$$B = a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 \quad (3)$$

$$H = b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 \quad (4)$$

これは, B , H がそれぞれ 1 次の内挿関数で内挿されたことと等しい. このため, それぞれの係数は要素毎に存在し, ある要素において各節点における座標および B , H を式 (3) および式 (4) に代入し, それを連立させることによって求めることができる.

この変位仮定では, 図.2 に示されるように, 液状化地盤の水平変位を x 方向, y 方向それぞれ独立に定義し, それぞれの方向について図.3 に示されるように, 液状化砂の水平変位を $1/4$ 周期と $1/2$ 周期の $\sin$ 関数による変形モードの和として表している. 今後, $1/4$

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.

液状化地盤の任意の点における水平変位は, 振動台模型実験の結果から式 (1), 式 (2) のように仮定することができるが, この水平変位の水平面における分布は, 対象地盤の形状などによって変化し, 一意的にその分布形状を仮定できない. そのため, 本手法では, F_u , J_u , F_v , J_v については水平面上で有限要素法によって離散化を行い, 任意形状の地盤への対応を可能にしている.

液状化地盤の鉛直変位については, 地盤流動中の非排水条件を仮定し, 等体積条件を与えることによって求めた. 等体積条件は, 次のように与えられる.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

ここで, w は鉛直方向変位である. 式 (5) に式 (1) および式 (2) を代入することによって, 液状化地盤の鉛直変位に関する微分方程式を求め, その微分方程式を境

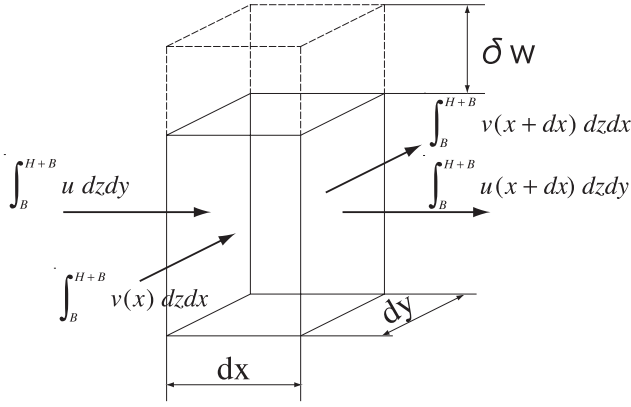


図.4 流動に伴う地表面昇降量

境界条件 $w=0|_{z=0}$ を与えることによって解くと、液状化地盤中の鉛直変位が次のように与えられる。

$$w = \sum_{i=1}^{12} w_i \quad (6)$$

$$w_1 = \frac{2H}{\pi} \frac{\partial F_u}{\partial x} \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{2H} - 1 \right\} \quad (7)$$

$$w_2 = \frac{F_u}{H} \left\{ (a_1 + a_3 y)H + (b_1 + b_3 y)(z-B) \right\} \sin \frac{\pi(z-B)}{2H} \quad (8)$$

$$w_3 = \frac{2F_u}{H} (b_1 + b_3 y) \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{2H} - 1 \right\} \quad (9)$$

$$w_4 = \frac{H}{\pi} \frac{\partial J_u}{\partial x} \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{H} - 1 \right\} \quad (10)$$

$$w_5 = \frac{J_u}{H} \left\{ (a_1 + a_3 y)H + (b_1 + b_3 y)(z-B) \right\} \sin \frac{\pi(z-B)}{H} \quad (11)$$

$$w_6 = \frac{J_u}{\pi} (b_1 + b_3 y) \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{H} - 1 \right\} \quad (12)$$

$$w_7 = \frac{2H}{\pi} \frac{\partial F_v}{\partial y} \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{2H} - 1 \right\} \quad (13)$$

$$w_8 = \frac{F_v}{H} \left\{ (a_2 + a_3 x)H + (b_2 + b_3 x)(z-B) \right\} \sin \frac{\pi(z-B)}{2H} \quad (14)$$

$$w_9 = \frac{2F_v}{\pi} (b_2 + b_3 x) \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{2H} - 1 \right\} \quad (15)$$

$$w_{10} = \frac{H}{\pi} \frac{\partial J_v}{\partial y} \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{H} - 1 \right\} \quad (16)$$

$$w_{11} = \frac{J_v}{H} \left\{ (a_2 + a_3 x)H + (b_2 + b_3 x)(z-B) \right\} \sin \frac{\pi(z-B)}{H} \quad (17)$$

$$w_{12} = \frac{J_v}{\pi} (b_2 + b_3 x) \left\{ \cos \frac{\pi(z-B)}{H} - 1 \right\} \quad (18)$$

ただし、この鉛直変位には、液状化によって発生する圧密による沈下量は含まれていないため、必要な場合には一次元圧密理論などによって別途考慮する必要がある。これによって求められた液状化地盤の変位によって、液状化地盤の運動エネルギーは一般的な運動

エネルギーの定義によって、次のように求めることができる。

$$K_l = \int_S \int_B^{H+B} \frac{1}{2} \rho (\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2) dz ds \quad (19)$$

ここで、 S は液状化地盤を水平面に写像した領域を示す。ここで、注目すべき点として、この手法では従来の有限要素法による液状化解析と異なり、鉛直方向の変位分布が解析的な関数の和として与えられているため、鉛直方向に節点を設ける必要がないことである。これにより、三次元解析を行う場合でも、実際に方程式を解くときには二次元問題となっており、劇的な計算量の低減を実現している。

次に、消散エネルギーであるが、本手法では、液状化砂が粘性流体的な挙動をすることから、完全液状化後の液状化砂をニュートン流体としてモデル化している。このため、液状化地盤中の単位時間あたりの消散エネルギーは、ニュートン流体の応力テンソルより、次のように求めることができる。

$$D_l = \int_S \int_B^{H+B} \mu \{ D_{l1} + D_{l2} \} dz ds \quad (20)$$

$$D_{l1} = 4 \left(\frac{\partial \dot{u}}{\partial x} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial \dot{v}}{\partial y} \right)^2 + 4 \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} \frac{\partial \dot{v}}{\partial y} \quad (21)$$

$$D_{l2} = \left(\frac{\partial \dot{u}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{v}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{u}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} \right)^2 \quad (22)$$

ただし、 μ は液状化砂の粘性係数である。なお、鉛直変位の水平方向の変化に起因する消散エネルギーは、一般の液状化地盤では、その勾配が数%と小さく、その他の項と比較してその影響が大きいことを仮定することによって無視している。

また、液状化地盤のポテンシャルエネルギーの定義については、液状化地盤の大変形による影響を考慮するため、次のように求められている。

$$P_l = \int_B \int_B^{H+B+\delta w} \rho g z dz dx \quad (23)$$

ここで、 δw は、流動に伴う液状化地盤の地表面の昇降量であり、この地表面昇降量は、図.4に示されるように、液状化地盤中の微小要素柱における液状化砂の体積収支によって次のように求めることができる。

$$\delta w = \delta w_1 + \delta w_2 \quad (24)$$

$$\delta w_1 = -\frac{2H}{\pi} \left(\frac{\partial F_u}{\partial x} + \frac{\partial J_u}{\partial x} \right) - \frac{2(b_1 + b_3 y)}{\pi} (F_u + J_u) \quad (25)$$

$$\delta w_2 = -\frac{2H}{\pi} \left(\frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{\partial J_v}{\partial y} \right) - \frac{2(b_2 + b_3 x)}{\pi} (F_v + J_v) \quad (26)$$

ここで、式(23)では、鉛直方向の積分範囲に地表面昇降量 δw が含まれている。これにより、液状化地盤の大変形による影響が考慮され、液状化地盤の変形の特

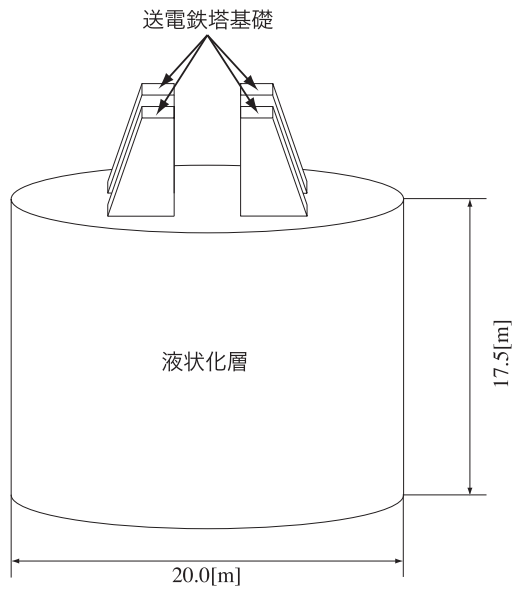


図.5 実験モデル

表.1 実験モデル諸元

液状化砂質量密度	1.9[kg/m ³]
液状化層厚	17.5[m]
基礎質量	35.8[t]
送電鉄塔質量	73.2[t]
モデル直径	20[m]
基礎根入れ深さ	4.3[m]

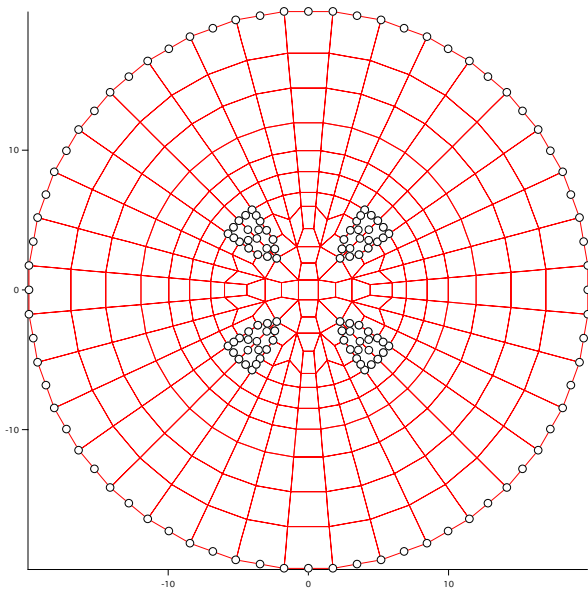


図.6 Model 1 メッシュ図

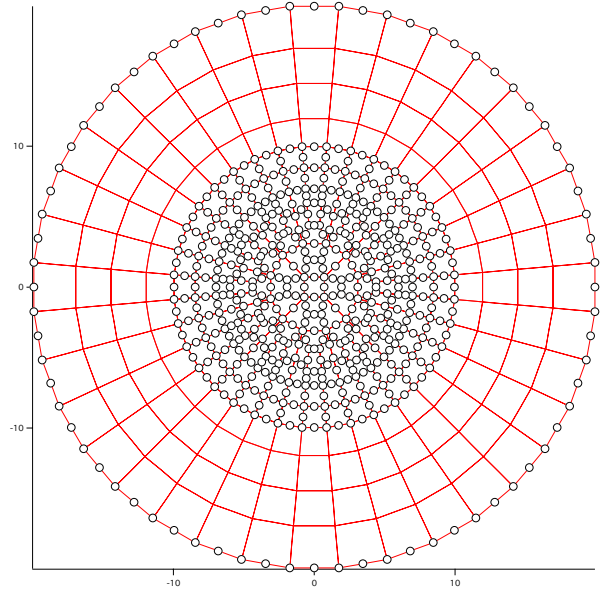


図.7 Model2 メッシュ図

徴である,幾何非線形を適正に考慮することができる.

これらによって求められた運動エネルギー,消散エネルギー,ポテンシャルエネルギーを Lagrange の運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = - \frac{1}{2} \frac{\partial D_i}{\partial \dot{q}_i} \quad (27)$$

$$L = K_i - P_i \quad (28)$$

に代入することによって,液状化地盤の変形の時刻歴を求めることができる.ただし, L は Lagrangean であり, q_i は一般化された変位である.ここでは, q_i は,各節点における F_u , J_u , F_v , J_v となる.

3. 解析モデル

前節で述べた液状化地盤の流動解析法で,送電鉄塔基礎の沈下解析を行った.ここで,対象となる送電鉄塔を図.5に,この送電鉄塔および周辺地盤の諸元を表.1に示す.この送電鉄塔を,基礎がそのまま地表面に設置された場合と基礎周囲が薬液注入等によって地盤改良され,4本の基礎が一体化して沈下していく場合について解析を行った.ここでは,基礎が独立して沈下していくモデルを Model1, 基礎が一体化して沈下していくモデルを Model2 とする.なお,これらのモデルでは送電鉄塔および基礎は,液状化層の地表面に作用する地表面力としてモデル化されており,送電鉄塔お

よび基礎の慣性力は、それらの質量と等価な質量を地表面に付加することによって考慮した。

Model1における解析モデルを図.6に示す。ただし、節点上に白円が設置されている領域が送電鉄塔基礎が設置されている領域である。このモデルでは、液状化地盤に根入れされた4本の送電鉄塔基礎を、図.6に示されているようにそれぞれ独立した地表面力として扱っており、その大きさは、次のように与えられる。

$$P = \frac{W_f + W_t / 4}{A_f} \quad (29)$$

ただし、ここでは送電鉄塔が一様に沈下していくことを仮定しており、液状化層地表面に作用する地表面力の大きさは、それぞれ送電鉄塔基礎および送電鉄塔重量の1/4となっている。 W_f , W_t および A_f は、それぞれ基礎重量、鉄塔重量、基礎の接地面積である。また、このモデルの外周は固定されている。

Model2における解析モデルを図.7に示す。Model2では、基礎周囲の地盤が改良され、基礎が一体となって沈下していくことが仮定されている。そのため、ここでは、4基の基礎がすべて含まれるような円形領域を考え、この領域が地盤改良によって一体化して沈下していくことを仮定した。ここで、この改良地盤、基礎および送電鉄塔の重量が、この改良領域に均一に分布することを仮定し、改良領域における液状化層地表面に作用する地表面力を、次のように求めた。

$$P = \frac{W_s + W_f + W_t / 4}{A_f} \quad (30)$$

ただし、 W_s , W_f , W_t および A_f は、それぞれ改良領域において根入れ深さ以上に存在する液状化砂の重量、基礎重量、鉄塔重量、改良領域面積である。

また、このような基礎の沈下の場合、基礎直下の領域において、基礎直下に液状化しない領域が存在するため、両モデルにおいて、基礎および改良領域直下に5.0[m]の非液状化領域を仮定した解析も行った。

なお、これらのモデルでは、送電鉄塔基礎直下の領域と、それ以外の領域の境界で、液状化層厚が不連続となっている。式(1)および式(2)では、このような液状化層などの液状化地盤の幾何形状が不連続になることを想定していないため、このような状況に対応するためには、この二つの領域を結合する境界条件が必要となる。そこで、ここでは、液状化地盤の鉛直変位の導出と同様に等体積条件を仮定し、境界へ流入する液状化砂の体積と、境界から流出する液状化砂の体積に次のような境界条件を設けた。

$$V_1 = V_2 \quad (31)$$

ただし、 V_1 , V_2 は、それぞれ一方より不連続境界へ流入・流出した液状化砂の体積である。ここで、不連続

境界に鉛直な軸に写像された変位を深さについて積分することによって、不連続境界から隣接する領域に流出および流入した体積を求めることができる。

$$\iint_{B_1}^{H_1+B_1} n_1 \cdot U_1 dz dr_1 - \iint_{B_2}^{H_2+B_2} n_2 \cdot U_2 dz dr_2 = 0 \quad (32)$$

$$U_1 = \{u_1, v_1\} \quad (33)$$

$$U_2 = \{u_2, v_2\} \quad (34)$$

$$n_1 \cdot \left\{ F_{u1} \sin \frac{\pi(z-B_1)}{H_1}, F_{v1} \sin \frac{\pi(z-B_1)}{H_1} \right\} \quad (35)$$

$$n_1 \cdot \left\{ J_{u1} \sin \frac{\pi(z-B_1)}{H_1}, J_{v1} \sin \frac{\pi(z-B_1)}{H_1} \right\} \quad (36)$$

$$n_2 \cdot \left\{ F_{u2} \sin \frac{\pi(z-B_2)}{H_2}, F_{v2} \sin \frac{\pi(z-B_2)}{H_2} \right\} \quad (37)$$

$$n_2 \cdot \left\{ J_{u2} \sin \frac{\pi(z-B_2)}{H_2}, J_{v2} \sin \frac{\pi(z-B_2)}{H_2} \right\} \quad (38)$$

ただし、 n は不連続境界の垂線方向の単位ベクトルであり、液状化地盤の変形を、不連続境界に鉛直な軸に写像するためのものである。また、 U_1 は領域1における不連続境界上の水平変位ベクトル、 U_2 は領域2における不連続境界上の水平変位ベクトルである。この境界条件をLagrangeの未定乗数法によってLagrangeの運動方程式に組み込み、解析を行った。

また本手法によって解析を行うためには、液状化砂の粘性係数が必要であるが、これについては、液状化地盤における平均的な初期有効応力を数kPaとし、Chaminida⁶⁾による要素試験の結果から粘性係数を50[kPa・s]と200[kPa・s]とした。

4. 解析結果

Model1, Model2の液状化砂の粘性係数50[kPa・s]における解析結果を図.8に示す。この結果では、液状化砂の粘性が小さいため、流動開始後数秒間で送電鉄塔の沈下が終了してしまっている。基礎が独立して沈下するModel1の場合、図.8によれば基礎直下に非液状化領域をつけると、その非液状化領域が存在しない場合に比べて、送電鉄塔の沈下速度が多少遅くなっていることがわかる。これは、その非液状化領域が存在するために、基礎直下領域における液状化層厚が小さくなるため、基礎が同じ大きさだけ沈下した場合の、基礎直下の液状化層におけるひずみ速度が大きくなるためである。このため、液状化砂の粘性による抵抗力が大きくなり、基礎の沈下速度が遅くなる。これは、基礎周りが地盤改良されているModel2においても同様の結果になるが、Model2では、図.8において基礎

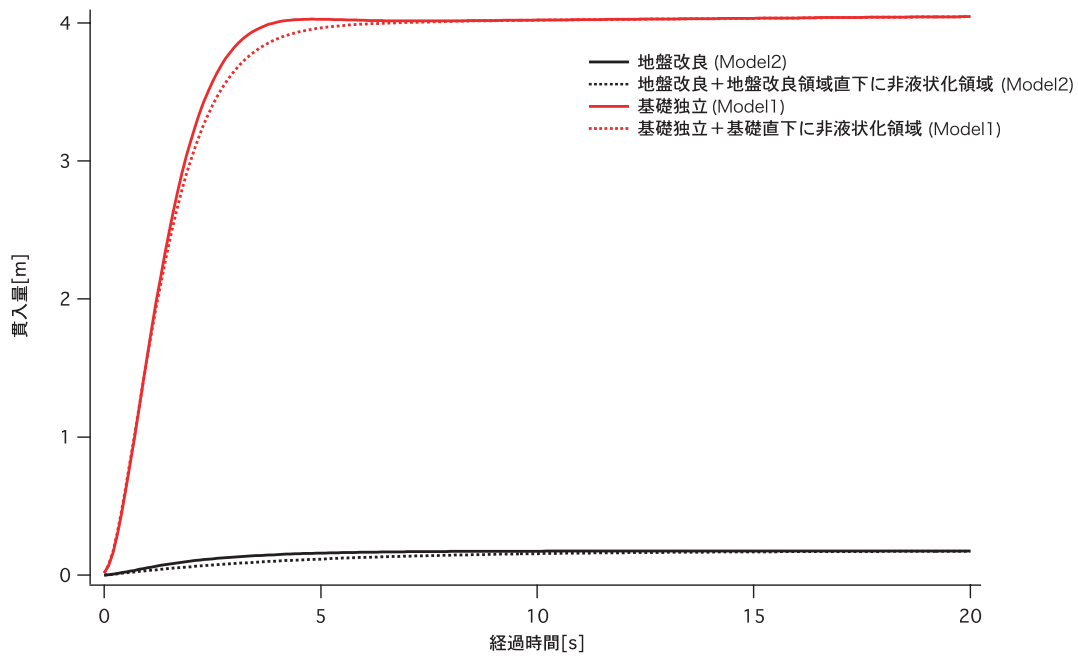


図.8 粘性係数 50[kPa・s] における解析結果

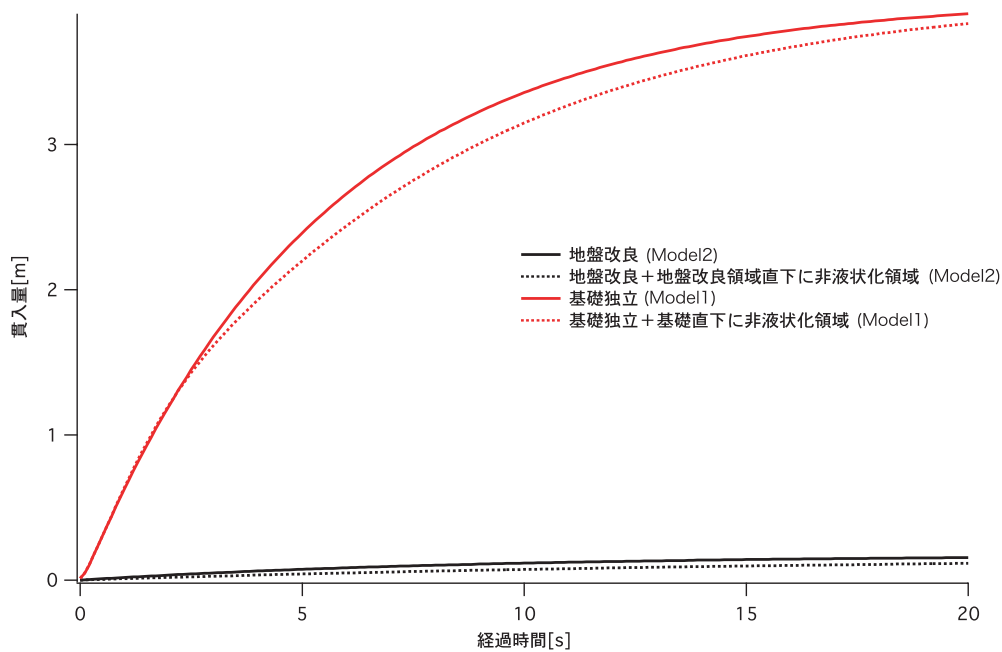


図.9 粘性係数 200[kPa・s] における解析結果

の沈下量が非常に小さいため、基礎の沈下速度に多少の差は見られるものの、この効果に起因する大きな差は見られない。また、Model1 と Model2 の結果を比較すると、Model2 では、Model1 にたいして基礎の沈下量が劇的に低減されていることがわかる。これは、基礎周辺の地盤を改良し、それぞれの基礎が一体となって沈下するようにしたため、図.10 に示されるように基礎および鉄塔の重量がその広がった底面積に分配され、結果として Model1 にたいして接地圧が低下

したためである。

このことから、送電鉄塔基礎のように、接地面積が小さく、液化化時に地盤への貫入が危惧されるような場合には、その周辺の地盤改良を行うことによって基礎を一体化させて沈下させ、結果として基礎の接地圧を低減することによって、沈下を抑制できる可能性があることが示された。

次に、液化化砂の粘性係数を 200[kPa・s] にした場合の結果を図.9 に示す。図.9 では、図.8 に示される結

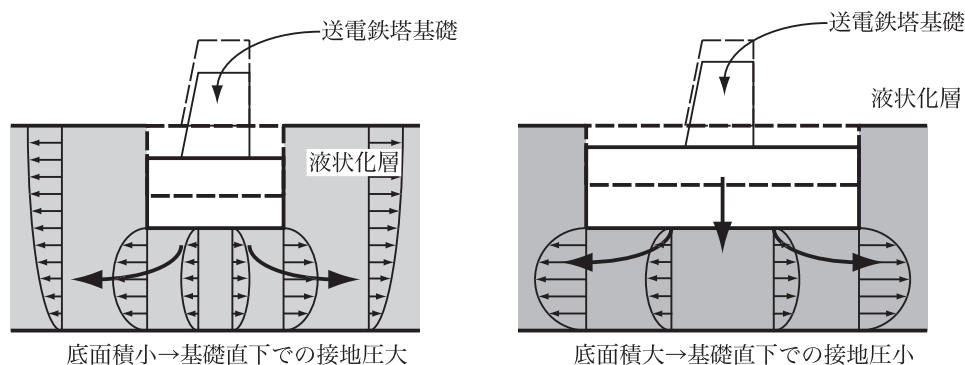


図.10 鉄塔基礎沈下模式図

果と比較し、液状化砂の粘性係数が高いため送電鉄塔基礎の沈下の進行が遅くなっている。この事例においても、基礎周辺を改良した Model2 では、Model1 と比較して基礎の地盤への貫入量が非常に小さくなっており、この場合においても、基礎周辺を地盤改良によって一体化させることによる基礎沈下の低減が示唆されている。

本手法を使用するためには、液状化による地盤流動の継続時間と、液状化砂の粘性係数が必要である。液状化による地盤流動の継続時間については、模型実験などでは、その透水性の高さから振動の終了と同時に流動が停止してしまうが、実際の地盤では、より長時間にわたって流動が継続する可能性がある。この流動継続時間に関しては、地盤の透水性なども影響していることが考えられ、一意的に決定することは困難である。このため、対象となる構造物の重要性によって、主要動の継続時間の何倍というように安全を考慮して決定することも考えられる。液状化地盤の粘性係数に関しては、現状では、現象を再現する粘性係数の存在は確認されているが、その決定方法については、いまだ不明な点が多く、より正確な粘性係数を決定する手法の確立が必要である。しかし、粘性係数が液状化層に依存することや、流動中も剛性を完全に失っているわけではなく、ビンガム流体的な挙動をしていることを示唆する結果も出ており、今後その特性はより明らかになると思われる。

また、本手法では、液状化地盤の水平変位に対して、式(1)および式(2)で示されるような変位仮定を行っている。この変位仮定は、液状化層の中間になんらかによって支持された剛な部分が存在した場合には成立しなくなるが、一般に液状化がよく発生する埋め立て地などではこのような条件は存在しにくいいため、問題は少ないと思われる。しかし、このような拘束条件が結果に重要な影響を及ぼす事例においては、変形モードを追加するなど、変位仮定の改良が必要になる。

5. まとめ

本研究では、粘性流体モデルと振動台模型実験から求められた液状化砂の変形モードを組み合わせた手法によって、送電鉄塔基礎の沈下解析を行った。この結果、三次元モデルにおいて液状化地盤上の送電鉄塔基礎の沈下の解析が可能であることが示された。また、送電鉄塔基礎周辺を地盤改良し、基礎周辺地盤を一体化させることによって、送電鉄塔基礎の沈下が抑制されることを示唆する結果がえられた。

参考文献

- 1) 水谷 崇亮, 液状化に起因する盛土基礎の側方流動の矢板による軽減, 東京大学博士論文, 2000.3
- 2) 小林 義和, 液状化地盤の流動変位の三次元大変形動的解析, 土と基礎 側方変位・流動の予測と対策特集号, Vol.50 No.2 Ser.No.529, p.7-p.9, 2002.2
- 3) Acacio A. A., Kobayashi Y, Towhata I., Bautista R. T., Ishihara K, SUBSIDENCE OF BUILDING FOUNDATION RESTING UPON LIQUEFIED SUBSOIL; CASE STUDIES AND ASSESSMENT, Soils and Foundations, Vol.41 Number 6, p.111-p.128, 2001.12
- 4) 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, 2001.3
- 5) Ikuo Towhata, Rolando P. Orense, Hirofumi Toyota, Mathematical principles in prediction of lateral ground displacement induced by seismic liquefaction, Soils and Foundations, Vol.39 No.2, pp.1-19, 1999
- 6) Chaminda P.K. Gallage, 西村聡, 東畑郁生, TIME DEPENDENT NATURE OF LIQUEFIED SAND, 第 37 回地盤工学研究発表会 発表講演集, pp.1995-1996, 2002.7

(2003.6.30 受付)

Three dimensional analysis on subsidence of energy transmitting tower based on viscous fluid model

Yoshikazu Kobayashi and Ikuo Towhata

Subsidence of energy transmitting tower on liquefied ground is very large due to the small cross section on the bottom of foundations. This is a large deformation problem that driven force to the foundations varies with the subsidence to liquefied ground. It is not easy to simulate this problem by conventional finite element method based on solid mechanics since the difficulty of consideration on geometric nonlinearity. Therefore, in this paper, three dimensional subsidence analysis of energy transmitting tower on liquefied ground was conducted by a method that can take the effect of large deformation into account easily and reduce the amount of computation by adopting viscous fluid model and deformation assumption of lateral displacement of liquefied ground. The result suggested that the amount of the subsidence of footings on liquefied ground is reduced by improving liquefied ground around footings.