

(23) 液状化による側方流動の数値解析と考察

東京電力 ○佐藤 博 土居 賢彦
 東海大学 浜田 政則
 篠塚研究所 中村 孝明

1. まえがき

新潟地震(1964年)、日本海中部地震(1983年)等の被害調査により、地中構造物の被害の多くは液状化による地盤の側方流動が原因であることが明らかにされてきたが¹⁾、側方流動の発生メカニズム、地中構造物に及ぼす影響については未解明な部分が多いのが現状である。

本報告は側方流動のメカニズムを検討するため、実験による側方流動地盤の挙動について液状化地盤を粘性流体と仮定した2種類の数値解析によりシミュレーションを行ったものであり、実験結果を再現できる見通しが得られたので、以下にその内容を報告する。

2. 数値解析の概要

(1) 一次元解析

図-1に示すように斜面を有する地盤モデルを考える。砂層をVoigtモデルで表せられる粘弾性体とすれば、砂層の微小領域の力の釣合により、運動方程式はつぎのとおりである。

$$(\rho/g) (\partial^2 u / \partial t^2) - \eta (\partial^3 u / \partial t \partial z^2) - G (\partial^2 u / \partial z^2) = \rho \theta \quad \text{--- ①}$$

ここに η : 粘性係数、 G : せん断弾性係数

流動変位の深度分布を多次モードまで含めた正弦関数で近似すれば、

$$u = \sum_i a_i(t) \sin \{ (2i-1) \pi z / 2H \} \quad a_i(t) : i \text{次モードの地表面変位} \quad \text{--- ②}$$

支配的となる1次モードのみを考慮すると、流動方向の運動方程式は次のとおり表される。

$$(\rho/g) \ddot{a}_1(t) + (\pi^2 \eta / 4H^2) \dot{a}_1(t) + (\pi^2 G / 4H^2) a_1(t) = 4\rho \theta / \pi \quad \text{--- ③}$$

(2) 二次元解析

a. 解析方法

実地盤の条件にはさまざまな場合があり、例えば地表に非液状化層がある場合、対象断面が二次元的に変化する場合、さらには将来流動地盤中にある構造物への影響を検討する場合等、それぞれに対してより詳細なモデル化が必要である。既往の被害事例の分析ならびに室内の側方流動実験から、液状化した地盤は流体的な挙動を示すのではないかと推測が示されており、ここではこのことを考慮して図-2に示すように、液状化層を流体としてBEM、非液状化層を弾性体としてFEMでモデル化する。

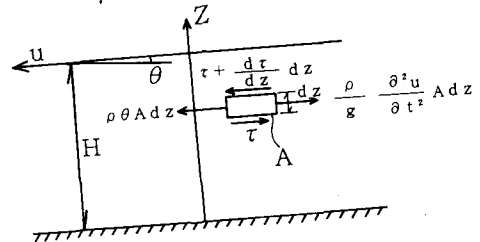
液状化層である領域 Γ では非圧縮、非回転の完全流体とし、速度ポテンシャル ϕ が存在すると考えると支配方程式は次のとおりである。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in } \Gamma \quad \text{--- ④}$$

$$(B.C.) \quad \partial \phi / \partial n = Vn \quad \text{on } S_1 \quad \text{--- ⑤}$$

$$\partial \phi / \partial n = 0 \quad \text{on } S_2 \quad \text{--- ⑥}$$

ここに Vn は非液状化層の運動速度の法線成分である。



u : 流動変位 θ : 地表面勾配
 ρ : 単位体積重量 H : 液状化層厚

図-1 一次元解析モデル

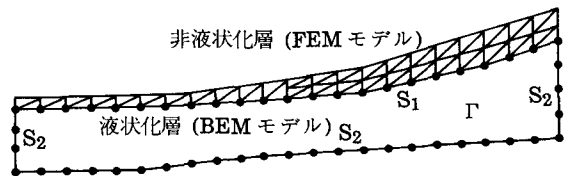


図-2 二次元解析モデル

次に、解析処理の容易性を考慮して流体を疑似粘性流体とし、粘性抵抗力は速度に比例すると仮定すると液状化層の圧力方程式は次のとおりである。

$$P/\rho = -(\partial\phi/\partial t) - (u^2 + v^2)/2 - \alpha\phi - gz \quad \text{--- ⑦}$$

ここに α は流動抵抗係数と定義し、その他は u, v ：速度の x, y 成分 z ：基準面からの高さである。また、液状化層から非液状化層に作用する流体力は図-3に示すとおり圧力 P と摩擦せん断力 q とし、この q は疑似粘性流体との仮定から、次のように表す。

$$q = \beta(\partial\phi/\partial s) \quad \partial\phi/\partial s \text{ : 接線方向の速度} \quad \text{----- ⑧}$$

β はせん断力係数と定義する。非液状化層については、減衰を考慮せず、剛性のみを考慮するものとする。

b. 疑似粘性流体の α, β と粘性流体の粘性係数 η との関係

底面に平行な層流状態の流れを考える。粘性流体では速度は深度方向に放物線分布であるが、疑似粘性流体ではこれを一様分布と考え、両者の流量が等しいと置くことにより、次の関係が得られる。

$$U = (3/2)u_a \quad U \text{ : 粘性流体の最大速度} \quad u_a \text{ : 疑似粘性流体の一様速度} \quad \text{---- ⑨}$$

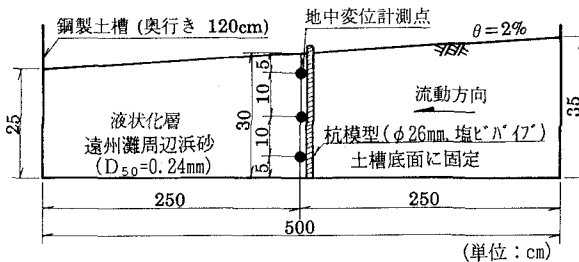
粘性流体、疑似粘性流体における圧力勾配、壁面のせん断力がそれぞれにおいて等価と置くことにより、疑似粘性流体の流動抵抗係数 α 、せん断力係数 β と粘性流体の粘性係数 η の間には次の関係がある。

$$\alpha = 12\eta/(\rho H^2) \quad \beta = 6\eta/H \quad \text{(非液状化層有り)} \quad \rho \text{ : 単位体積重量} \quad H \text{ : 液状化層厚} \quad \text{---- ⑩}$$

$$3\eta/(\rho H^2) \quad \text{(非液状化層無し)}$$

3. 側方流動実験結果の数値シミュレーション

図-4に示す実験装置を用いて、液状化による側方流動を発生させ、計測された地表面の変位、速度の経時変化について、前記の解析によるシミュレーションを行った。なお実験は、下表に示すように砂層の相対密度、入力加速度を変えた2ケースについて実施した。ここでは両解析とも液状化層を流体と仮定した。二次元解析については表層の非液状化層がない場合に相当し、一次元解析では地表面勾配 θ は実験から求められる流動継続時間内で、時間に比例して減少するものとした。



実験ケース		
実験ケース	相対密度	入力最大加速度 (土槽奥行方法)
ケース1	13 %	正弦波166gal
ケース2	49 %	正弦波460gal

図-4 実験の概要

次に解析に用いる粘性係数については次の3種類の方法により推定した。

1つは、①の運動方程式において、せん断剛性の項ならびに慣性力の項を無視することにより求められる次式により、実験より求められた地表面の流動速度を用いて推定した。

$$\eta = \rho \theta H^2 / (2Vs) \quad Vs \text{ : 地表面の流動速度} \quad \text{--- ⑪}$$

もう1つは、実験より求められた円柱形杭模型に作用する荷重から、下記のLambの式より推定した。

$$\eta = q(2.002 - \ln Re) / (4\pi V) \quad Re = \rho Vd / \eta \quad \text{--- ⑫}$$

ここに q : 杭模型に作用する単位杭長当たりの荷重 Re : レイノルズ数

V : 砂層の流動速度 d : 杭模型の直径

3番目の方法については、別途実施した要素実験により液状化地盤中を移動する物体に作用する荷重から推定される粘性係数と地盤のFL値との関係を求め²⁾、これから図-5のとおり推定した。

これらをまとめると表-1のとおりである。これによると、相対密度の小さいケース1ではどの場合も等しい値になるが、相対密度の大きいケース2では、推定方法によりばらつきがみられる。

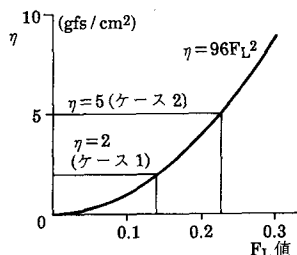


表-1 実験から推定される粘性係数

実験ケース	相対密度 (%)	η (gfs/cm ²)		
		①式	②式	要素実験
ケース1	13	2	2	2
ケース2	49	12	24	5

図-5 要素実験結果による粘性係数の推定

シミュレーション結果を図-6に示す。ケース1については両解析ともに比較的良好に実験結果を再現できている。特に二次元解析では流動継続時間も実験結果と一致している。これに対してケース2については、両解析とも概ね流動変位、速度ともに実験値より大きい傾向にある。

液状化により砂層が完全に流体になるとすると、図-7のように砂層の中央を中心として斜面上流より下流に向かって体積の移動が生じる。図に示した斜線部の体積Vは等しくなることから、砂層中央部の流動変位の深度分布を正弦曲線と仮定すれば、地表変位aは次式より

$$V = 250 \times 5 / 2 = \int_0^{30} a \cdot \sin(\pi H / 60) dH \quad \therefore a = 33 \text{cm}$$

となる。この値はケース1の最終地表変位約30cmとほぼ一致するが、ケース2の実験値はこれより小さい。

ケース1は、相対密度が13%と非常にゆる詰めであり、さらに流動が継続している間にわたって最大加速度で加振が継続していることから、砂層が流体に近い挙動を示し、そのため流体と仮定した数値解析結果とよく一致しているものと考えられる。

これに対してケース2は、相対密度が49%とケース1に比べて密であり、また流動が継続している途中で加振加速度が減少しており、砂層全域にわたって完全液状化状態にはなっていないか、あるいは流動の途中で部分的に間隙水圧が消散し剛性が回復したことが推測される。このため粘性係数の推定もばらつき、実験結果も流体と仮定した解析値より小さくなったものと考えられる。

4. 考察

今回の実験結果について数値シミュレーションを行った結果、砂層が完全に液状化状態を保持して流動を起こしている理想的な状態においては、これを(疑似)粘性流体として扱うことによりその挙動を定量的に再現できる見通しが得られた。

これに対して、実地盤の斜面においては、流動後、傾斜が水平になっていないものがほとんどであり、粘性流体と仮定すれば流動変位は無限大になり、実現象とはあわない。実現象では流動が途中でとまるための原因があるためと考えられる。この原因としては現在のところ以下の項目が考えられる。

①地盤の剛性が残存する。：実地盤は均質ではなく、不完全な液状化状態にある部分が存在すれば、その剛性が流動を拘束すると考えられる。

②表層に非液状化層があり、これが流動地盤に対して抵抗する。：日本海中部地震における能代市の下水道管路の被害事例より、地中の液状化層が表層の非液状化層より変位が大きい場合があることから、非液状化層が流動を拘束することが考えられる。

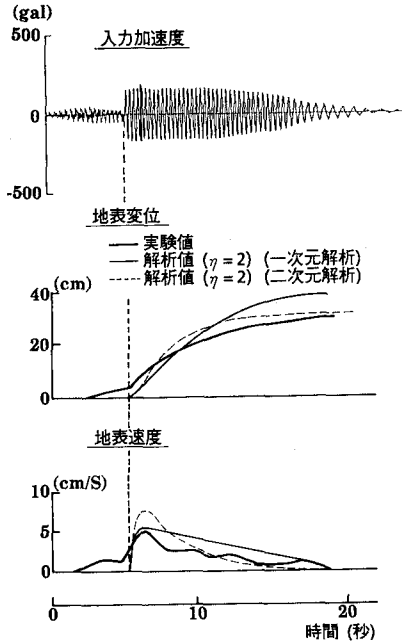


図-6 (1) シミュレーション結果 (ケース1)

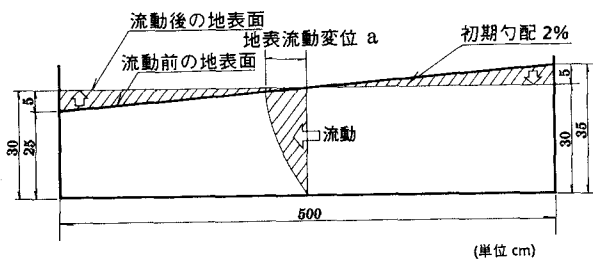
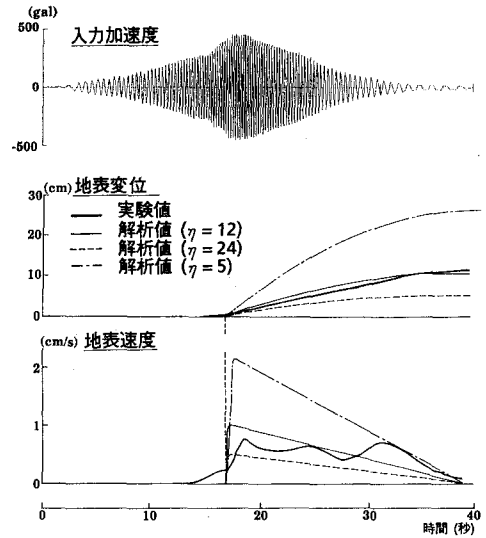
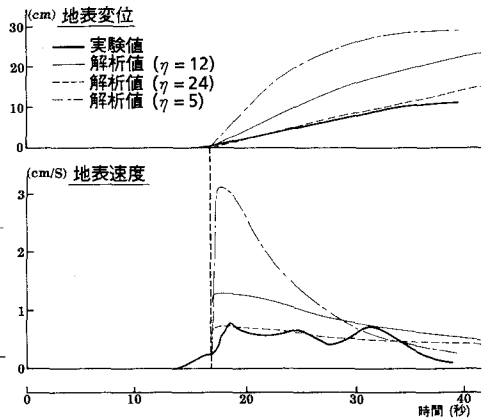


図-7 側方流動による体積移動の概要



(a) 一次元解析



(b) 二次元解析

図-6 (2) シミュレーション結果 (ケース2)

③液状化が終了する。：実験では液状化が終了するまで、砂層は完全液状化状態を保持しているが、実地盤においては、液状化の継続時間と流動の継続時間との関係が明確ではないものの、流動する過程において間隙水圧の消散に伴い不完全液状化状態となり、剛性が回復することが考えられる。

④大変形時に地盤の剛性が回復する。：相対密度、拘束圧にもよるが、大変形時に地盤の剛性が回復することが考えられる。

実現象では、これら①～④の要因が相互に作用しているものと考えられる。

5. あとがき

数値解析により実験における側方流動現象を再現できる見通しが得られた。実地盤においては局所的に非液状化層が残存するなど、地盤の剛性を考慮する必要があると考えられることから、今後は大変形時の液状化地盤の剛性、粘性係数を把握するとともに、より詳細な数値解析により実現象におけるメカニズムの解明に向けて検討を進める予定である。

(参考文献) 1) 浜田他：液状化の永久変位と地震被害に関する研究、土木学会論文集、第376号、1986

2) 浜田他：液状化している砂の物性に関する実験的研究、第28回土質工学研究発表会、1993