

(67) 液状化した地盤の永久変位量の簡易予測法

東京大学
不動建設

東畑郁生
山田和彦

1. まえがき

近年液状化した地盤が水平方向に数mにも及ぶ永久変位を起こす事が知られ(浜田ら、1986)、埋設管や道路に及ぼす影響が話題となっている。筆者らは早くからこの永久変位の簡易予測法の開発に取り組んでおり、勾配数%程度の緩斜面の流れ下りについてはこれを重力による表層土の斜面方向圧縮である、として成果を発表した(東畑、1985)。

永久変位が発生する事自体は、数々の実測例によって、疑いを容れない。しかし、その発生機構たるや、未だ定説が存在しない。地表面に傾斜が少しでもある場合、実測された永久変位は必ず斜面下り方向を向いている。従って重力が永久変位の発生に一役買っている事は疑いない。しかし、新潟市内では水平な地盤でも大きな永久変位が生じているが、重力には水平方向成分が存在しないので、永久変位を重力による水平方向圧縮で説明することが出来ず、従って1985年の簡易解析法は役に立たない。

新潟市内で永久変位を生じた地盤では、地表面が水平であっても推定される液状化層の下面が傾いており、液状化した土がこの斜面を流れ下った、との考えがある。しかし、表面が水平な場合、このようなことは不可能である。これは、海底面が傾斜しているにもかかわらず海水が沖へ向かって流れ去らない事実によって容易に理解される。

筆者らは、以上のような困難な現象を扱う簡易な手法を最近開発した。本稿ではその概要を報告する。

2. 振動台実験結果

筆者ら(山田他、1989)は振動台模型実験結果から、1)液状化した砂は液体又は非常に剛性の小さな固体として振舞うので、流動後の後の表面が水平になり、2)表面を水平に直すためには物質の横方向流動が必要であり、3)土の水平方向永久変位は液状化層底部で小さく、上方向大きい事を示した。

さて、水平な地盤でも液状化層厚が一様でなければ、過剰間隙水圧の消散と再圧密によって不等沈下が発生し、地表は傾く。傾斜を水平に戻すための流動が不等沈下と「同時進行」すれば、地盤には水平方向永久変位が残る。図1と2はこの説を支持するためのもので、底部にビニールで包んだ飽和砂層を設け、その上に乾燥砂を置いて地表を水平とした。図1は飽和砂層が液状化した時の状況であるが、水平方向の永久変位は生じていない。これは、地表面が水平なため液状化砂の全ヘッド(位置ヘッド+圧力ヘッド)に勾配が無く、流れが生じなかったのである。その後ビニールが破れて全ヘッド勾配が生じ、液状化砂は右方から噴出した(図2)。このように、液状化砂の変位は、液体として、全ヘッド勾配に支配されており、不等沈下はこの勾配を生む有効な要因である。

3. 永久変位の計算法

永久変位の解析解を求めるため、図3のような状況を考える。傾き θ の基盤上に厚さ H_0 、単位体積重量 γ の液状化砂層がある。地表には p なる上載圧があり、表層土をこれで表現しうる。両端($x=0$ 、 L)で水平変位 $=0$ である。 H_0 や p は水平座標 x の一次関数と仮定する。

$$H_0 = H_{10} + \alpha x, \quad \alpha = (H_{20} - H_{10}) / L \quad (1)$$

$$P = P_1 + \mu x, \quad \mu = (P_2 - P_1) / L \quad (2)$$

液状化砂層が鉛直方向にひずみ v だけ圧縮(圧密)されると、図3で (x_0, y_0) にあった砂は (x_c, y_c) に移動する。

$$x_c = x_0, \quad y_c = y_0 - v (y_0 - x_0 \tan \theta) \quad (3)$$

この時砂層の厚さは $H_c = (1-v)(H_{10} + \alpha x_c)$ (4) である。この状態では全ヘッドが釣合わないので土は体積一定で流動して $(x_c - u, y_c - w)$ へ変位する。この時の状態が図4であるが、体積ひずみは圧密沈下によるものだけなので、

$$H_{1e} + H_{2e} = (1-v)(H_{10} + H_{20}) \quad (5)$$

次に変位後の全ヘッドを計算する。これが厳密に一樣ではなく、勾配にして微小量 $\tan \phi$ だけ水平からずれる事を許せば、

$$\begin{aligned} & \text{全ヘッド} - (x_c - u - L/2) \tan \phi \\ & = (x_c - u) \tan \theta + H_{1e} + [(H_{2e} - H_{1e})/L] (x_c - u) + [(P_1 + \mu(x_c - u))/\gamma] \\ & - (x_c - u - L/2) \tan \phi = \text{一定} \end{aligned}$$

$x_c = 0$ と L で水平変位 $u = 0$ であり、両点で上式の値は等しいから、

$$H_{1e} - H_{2e} = L (\tan \theta + \mu/\gamma - \tan \phi) \quad (6)$$

(5) (6) より H_{1e} 、 H_{2e} を求め、これを線形補間すると、砂層の厚さが得られる。

$$H_e = (1-v)(H_{10} + H_{20})/2 - (\tan \theta + \mu/\gamma - \tan \phi)(x_c - L/2) \quad (7)$$

但し $x_e = x_c - u$ は流動後の x 座標である。

次に水平変位 u を計算する。実験により u は液状化層底部で小さく、上方で大きい事がわかったので、その鉛直方向分布を正弦曲線で近似する。

$$u = F(x_c) \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \frac{y_c - x_c \tan \theta}{(1-v)(H_{10} + \alpha x_c)} \right\} \quad (8)$$

ここで $F(x_c)$ は未知の関数で、地表の変位に等しい。また境界条件 $F(0) = F(L) = 0$ (9) がある。流動は体積一定で起こるので、図5で断面 DI を通過した体積 DIJ は、地表面の上昇量 $ABEG$ に等しい。(4) (7) (8) を用いて両者を計算し等置すると

$$F(x_c) = x_c + \frac{8}{\pi} \frac{(1-v)(H_{10} + \alpha x_c)x_c}{(C_2 - C_3 x_c) - \left\{ (C_2 - C_3 x_c)^2 - \frac{16}{\pi} C_1 (1-v)(H_{10} + \alpha x_c)x_c \right\}^{1/2}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{但し} \quad c_1 &= \alpha(1-v) + \tan \theta + \mu/\gamma - \tan \phi \\ c_2 &= (1-v)(H_{10} - H_{20}) - L(\tan \theta + \mu/\gamma - \tan \phi) - [4(1-v)/\pi]H_{10} \\ c_3 &= [4(1-v)/\pi]\alpha \end{aligned}$$

(10) は境界条件 (9) を満たしており、(8) に代入すれば水平変位分布が求まる。鉛直変位 w を計算するためには、体積一定の連続条件を使う。

$$\frac{\partial u}{\partial x_c} + \frac{\partial w}{\partial y_c} = 0 \quad (11)$$

(8) を (11) に代入して y_c について積分し、底面 $y_c = x_c \tan \theta$ で $w = 0$ なる境界条件を満足させれば、

$$\begin{aligned} w &= [2(1-v)/\pi] \{ \alpha F + (H_{10} + \alpha x_c) (dF/dx_c) \} (\cos S - 1) \\ &+ [F/(H_{10} + \alpha x_c)] (\alpha y_c + H_{10} \tan \theta) \sin S \end{aligned}$$

但し

$$S = (\pi/2) (y_c - x_c \tan \theta) / [(1-v)(H_{10} + \alpha x_c)] \quad (12)$$

これに圧密成分 $w_c = v(y_c - x_c \tan \theta)$ [(3)式] を加えて、全鉛直変位 (下向き正) を得る。

4. 計算例

$L=200$ m、液状化層厚 $H_{10}=10$ m、 $H_{20}=5$ m、地表面水平（高低差 $DZ=0$ m）、 $v=0.05$ 、上載荷重無し、 $\tan\phi=0.001$ を基準に各パラメータの感度分析を試みた。図6は基準ケースにおける水平変位、鉛直変位（圧密成分を含む）の x 方向分布である。水平変位 u は放物線分布に近いが、中央よりやや上流側で最大値を示す。鉛直変位は液状化層の厚い下流側で最大となった。以後斜面中央（ $x=200$ m）での水平変位 u を使って議論する。図7は斜面長 L の影響である。 u が最大となる L が存在し、 L が250mより大きくなると圧密沈下後の地表勾配が $\tan\phi$ より小さい（高低差25 cm以下）ので流動が起こらない。液状化層圧 H_0 の影響を調べるため、図8では $H_{10}-H_{20}$ を5 mに保ったまま層厚を変えたが、層が厚いほど変位量は小さい（図5で IDJ 一定、 ID が増えると IJ が減少）。一方比 H_{20}/H_{10} 一定で層厚を増すと、不等沈下量が増え、変位も大きくなる（図9）。層が十分薄い時は $\tan\phi$ より小さい地表勾配しか起こらないので、変位も発生しない。最後に地表の高低差 DZ の影響 [H_{10} と H_{20} は一定]を図10に示す。不等沈下しか流動原因の無かった今迄に比べ、 $DZ>0$ は遙かに大きな変位を引き起こす。

次に、新潟市の地盤を対象に行なった例を図11に示す。解析解が両端で水平変位ゼロを仮定しているのので、これに合致するような事例を取り挙げた。 $v=0.03$ を仮定したが、厚さ4 m程度、長さ400 m、地表勾配0.2%でおおよそ10 mの変位を得た。これは図中の地表面にプロットした実測値よりやや大きい。

5. むすび

振動台実験結果を基に液状化地盤の永久変形を求める解析解を導いた。非線形有限要素解析法では膨大な計算時間を要する問題が、この方法では一瞬にして解くことができる。

6. 参考文献

- 浜田、安田、磯山、恵本；土木学会論文報告集 376Ⅲ-6、211-220、1986。
 東畑；液状化による地盤永久変位の簡易予測法、土木学会年次学術講演会、第三部門、51-52、1985。
 山田他；土質工学研究発表会 No.374、1989。

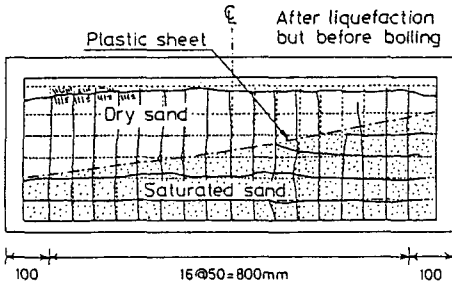


図1 乾燥した水平砂層の下に水で飽和した砂層のある場合：液状化した時の変形

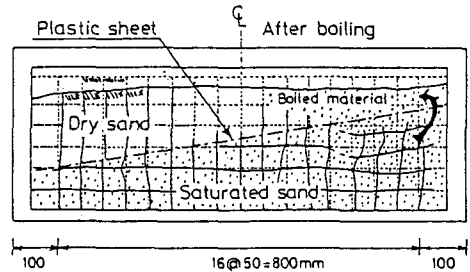


図2 図1で噴砂後の変形

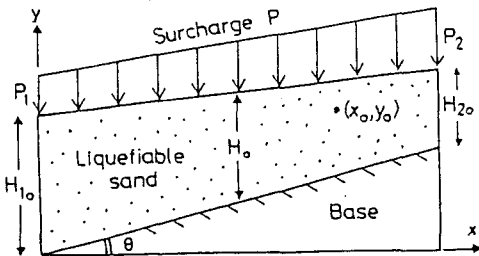


図3 変位前の液状化砂層のモデル

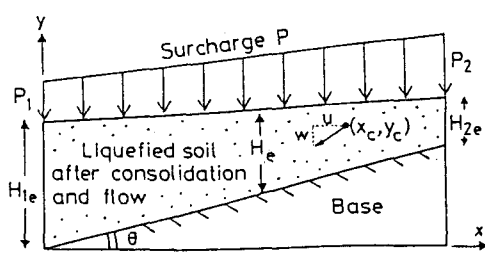


図4 圧密沈下と流動が起こった状態での砂層の形

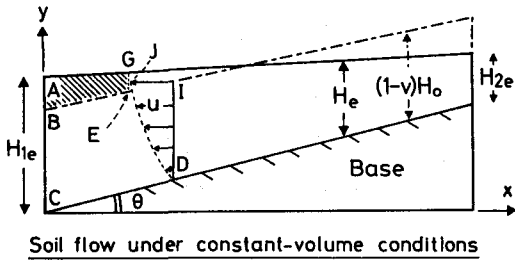


図5 体積一定流動のモデル

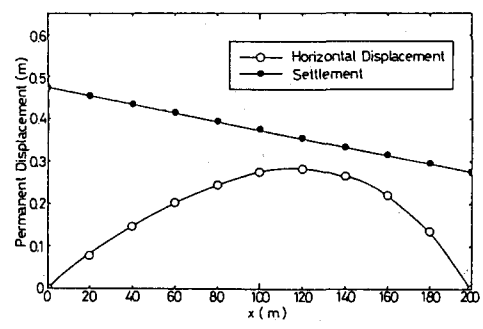


図6 計算された地表水平・鉛直変位の分布

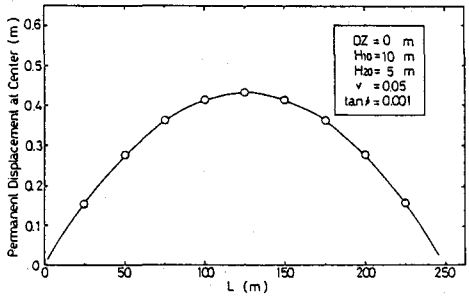


図7 斜面長Lの影響

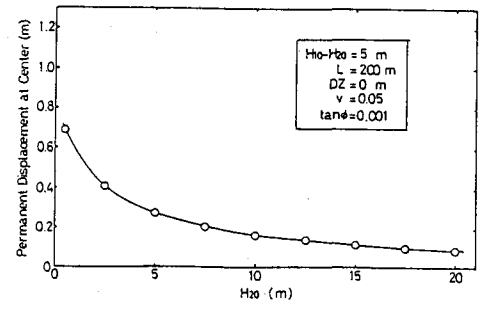


図8 液状化層厚の影響 (H10 - H20一定)

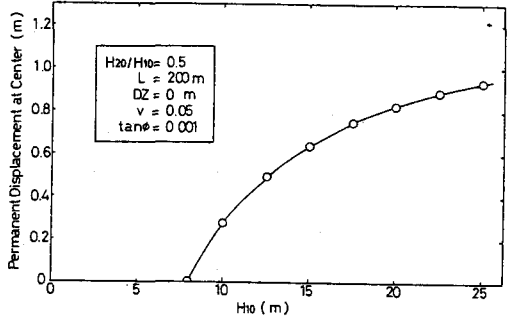


図9 液状化層厚の影響 (H20/H10一定)

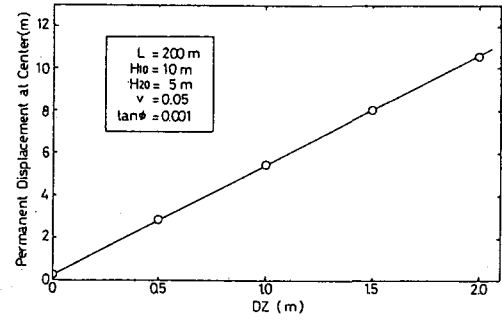


図10 地表勾配の影響

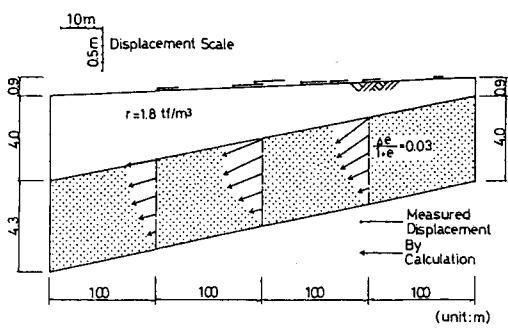


図11 新潟市内での計算例と実測例との比較