

粘土地盤における盛土に伴う側方流動圧の簡易予測法

A Simple Method for Predicting Lateral Flow Pressure in Clay Ground under Embankment

任 垠 相 (いむ ゆんさん)

広島大学大学院工学研究科博士課程後期 学生

森 脇 武 夫 (もりわき たけお)

広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻

新 宅 由 英 (しんたく よしえ)

傾計測リサーチコンサルタント 建設コンサルタント事業部

1. はじめに

軟弱地盤上に道路盛土や河川堤防を建設する際には、地盤は鉛直方向に沈下するだけでなく、一般に側方流動と呼ばれる水平方向の変形も生じる。この側方流動は、背面盛土による橋台の水平移動、周辺盛土による基礎杭の変状など、多くの構造物に被害を及ぼす。このような側方流動による被害を防止・軽減するためには、既設構造物へ加わる外力となる側方流動圧を予測し、既設構造物の被害程度を予測するとともに、必要に応じて取られる対策工の効果を判定する必要がある。

そこで本論文では、盛土によって粘土基礎地盤で生じる側方流動圧を事前設計の段階で簡易に予測する方法を提案する。

2. 弾性理論解

盛土荷重が載荷された場合の地盤内の鉛直応力は、ブシネスク (Boussinesq) の弾性解に基づくオスターバーグ (Osterberg) の図表によって求められることが多い。この図表は、地盤を弾性体と仮定しているにもかかわらず、実地盤に対しても適用性が良く、盛土荷重による粘土地盤の圧密沈下量を予測する際など、実設計で常用されている。そこで本論文でも、図—1のような盛土形状の荷重が載荷された場合の地盤内の水平応力を Boussinesq の弾性解を用いて求めた。その結果、点 A における水平応力は式(1)で与えられる。詳細は文献1)を参照されたい。

$$\sigma_{x, emb} = \frac{p}{\pi} \left[\frac{A}{a} \tan^{-1} Z_A + \left(1 - \frac{A}{a} \right) \tan^{-1} Z_B - \frac{C}{c} \tan^{-1} Z_C - \left(1 - \frac{C}{c} \right) \tan^{-1} Z_X + \frac{z}{a} \log \left| \frac{1+Z_B^2}{1+Z_A^2} \right| - \frac{z}{c} \log \left| \frac{1+Z_X^2}{1+Z_C^2} \right| \right] \dots (1)$$

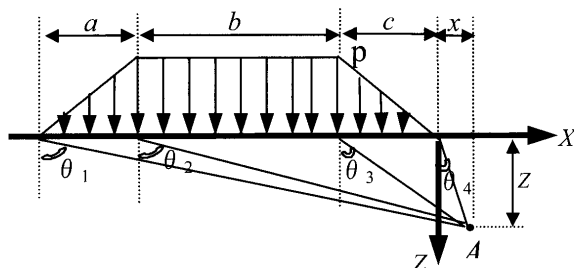
ここで、 $A=a+b+c+x$, $B=b+c+x$, $C=c+x$, $X=x$, $Z_A=A/z$, $Z_B=B/z$, $Z_C=C/z$, $Z_X=X/z$ である。特に、左右対称の盛土の法尻直下、すなわち図—1中で $a=c$ で $x=0$ の場合の地盤内の水平応力は式(2)のようになる。

$$\sigma_x = \frac{p}{\pi} \left[\left(2 + \frac{b}{a} \right) \cos^{-1} \left(\frac{z/a}{\sqrt{(z/a)^2 + (2+b/a)^2}} \right) - \left(1 + \frac{b}{a} \right) \cos^{-1} \left(\frac{z/a}{\sqrt{(z/a)^2 + (1+b/a)^2}} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{z/a}{\sqrt{(z/a)^2 + 1}} \right) + \frac{z}{a} \log \left| \frac{((z/a)^2 + (1+b/a)^2) \cdot ((z/a)^2 + 1)}{(z/a)^2 \cdot ((z/a)^2 + (2+b/a)^2)} \right| \right] = p \cdot I_h \dots (2)$$

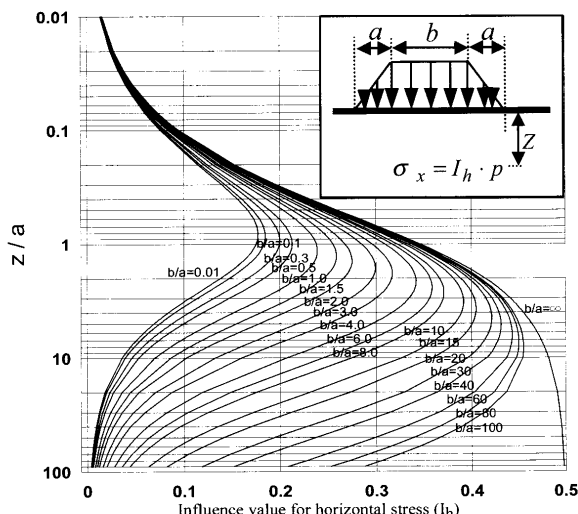
ここに、 I_h は影響値である。この式を用いて対称盛土荷重による地盤内水平応力の影響値を図化したものが図—2である。この図表から、盛土の形状と盛土荷重の大きさから、地盤内の任意の点での水平応力を簡単に求めることができる。

3. 室内模型実験

室内模型実験²⁾は地盤内水平応力の理論解を求めた弾



図—1 盛土荷重による地盤内水平応力



図—2 対称盛土荷重による盛土法尻直下の地盤内水平応力の影響値

論文

性地盤と同様に深度方向に密度および強度が一様な地盤を対象として、弾性地盤と粘土地盤の違い、および盛土の載荷速度の違いを検討するために、図-3のような模型実験土槽に正規圧密状態の粘土地盤を作成し、それに載荷速度の異なる盛土載荷を行い、このときに生じる側方流動圧と過剰間隙水圧の深度方向分布、および地表面の沈下形状の時間的推移を測定した。なお、本実験における側方流動圧の測定は、盛土法尻直下で行い、この位置の水平変位が生じないような拘束条件のもとで行った。これは、盛土法尻のごく近傍にある既設構造物へ盛土による側方流動の影響が及ばないように盛土法尻に矢板や連壁などの対策工が取られることが多いこと、および対策工に水平変位が生じないように拘束した場合に側方流動圧が最大となり、この値を用いて事前設計を行えば安全側となることを考慮して設定した。なお、実際の対策工に作用する側方流動圧は、対策工の剛度によって大きく変化する。対策工の剛度と側方流動圧との関係は今後詳細に検討し、別途報告したいと考えている。

本研究で行った室内模型実験は、載荷速度の影響 (Case 1~4) と盛土形状の影響 (Case 3 と 5) を調べるために、表-1のようなパターンを設定した。

この表中、載荷荷重 Δp は地盤の極限支持力 ($q_u = 5.14c_u$) に対して安全率が $F_s = 1.26$ になるように 10.8 kPa と決めた。なお、地盤の非排水せん断強度はベーンせん断試験によって $c_u = 2.65$ kPa と求められている。また、盛土の形状係数 b/a は盛土天端と盛土法面の長さ

表-1 室内模型実験のパターン

	載荷荷重 Δp (kPa)	盛立て速度指数 t^*	盛土の形状係数 b/a
Case 1	10.8	0.003	2.30
Case 2	10.8	0.067	2.30
Case 3	10.8	0.675	2.30
Case 4	10.8	2.000	2.30
Case 5	10.8	0.675	1.33

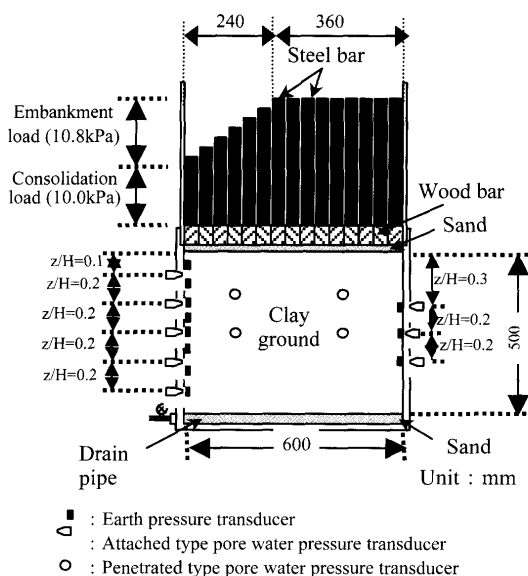


図-3 試験装置の詳細図

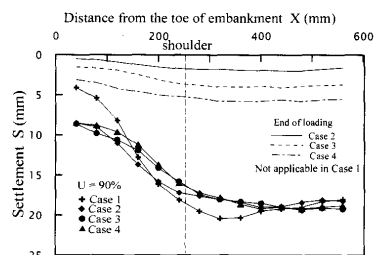


図-4 基礎地盤の表面沈下量

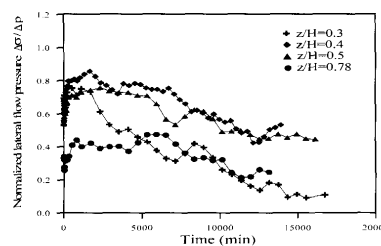


図-5 Case 3における側方流動圧の経時変化

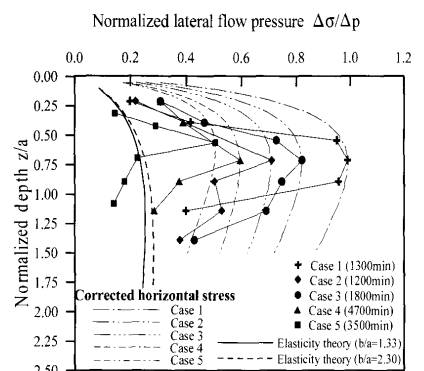


図-6 盛土法尻直下での最大側方流動圧

比であり、盛立て速度指数 t^* は三木ら³⁾が提案したもので、次式によって定義される。

$$t^* = \frac{t_e}{\frac{T_{90} \cdot (H_d)^2}{c_v}} \quad (3)$$

ここで、 H_d 、 t_e 、 T_{90} 、および c_v は、最大排水距離、盛土の載荷に要する時間、圧密度90%に対する時間係数、および地盤の圧密係数である。なお、Case 1は載荷速度1.54 kPa/minで10.8 kPaまで一気に載荷した場合であり、Case 2, 3, 4は載荷荷重10.8 kPaをほぼ3等分に分割し、各載荷段階の圧密度がそれぞれ30%, 60%, 90%に達する放置時間を取って載荷した場合である。

図-4は、盛土荷重の載荷直後とCase 1の最終沈下量を基準として盛土中央の表面沈下量から求めた圧密度が90%に達した時点での基礎地盤の地表面沈下形状を示したものである。この図より、盛土の載荷が速いほど、盛土法尻付近の沈下量が大きくなるとともに、盛土法尻部と盛土中央部との沈下量の差も大きくなることが明らかである。さらに、載荷直後の地表面沈下形状を見ると、載荷中では不同沈下の発生量は少なく、圧密中に大きく発生していることが分かる。これらはDarragh⁴⁾などが指摘したように側方流動が生じる限界荷重が存在し、その値は載荷速度によって変化することを意味している。図-5には、Case 3における盛土法尻下での側方流動圧の経時変化を示した。ここで、側方流動圧は載荷荷重で正規化したものであり、時間は載荷終了時を原点に取ったものである。この図より、側方流動圧は盛土荷重を載荷後、しばらく時間が経過して圧密進行中に最大となることが分かる。また、この側方流動圧は、不同沈下を引き起こす基礎地盤中の非排水せん断変形によって生じる負のダイレイタンスによって発生する過剰間隙水圧の影響を受け、基礎地盤の上部ほど、圧密初期段階に急激に上昇し、その後急激に減少することが分かる。図-5はCase 3の場合であるが、他のCaseにおいても同様の傾向を示した¹⁾。

図-6は、最大値が得られた時点における側方流動圧の深度方向分布を示したものである。この図から、側方流動圧の実測値は深度

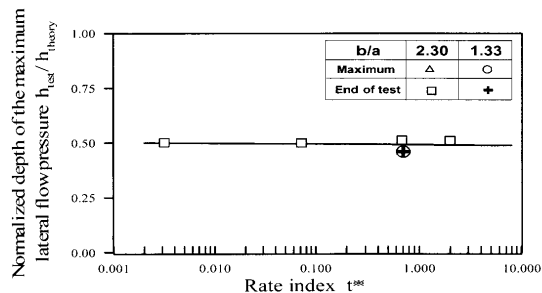
方向にはほぼ三角形分布となること、盛土の载荷が速いほど最大側方流動圧が大きくなること、および最大側方流動圧が発生する深度は盛土の载荷速度とはあまり関係ないことが明らかになった。また、盛土の形状係数が小さくなると、最大側方流動圧の発生する深度が浅くなることから分かる。

4. 弾性理論解の補正

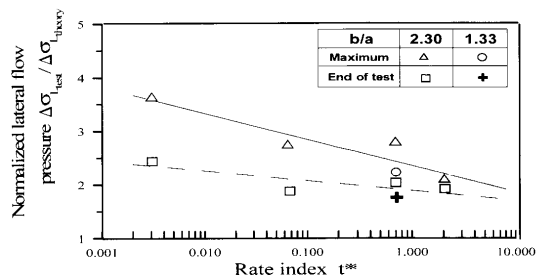
図—6で示したように、Boussinesqの弾性理論解を用いて算出した地盤内の水平応力と模型実験によって得られた側方流動圧は大きく異なっている。これは、理論と実測で、応力～ひずみ関係が異なること、および盛土法尻下の地盤内の水平方向の拘束条件が異なることに主として起因している。そのため、理論解を用いて盛土法尻下の粘土地盤中に設けられた対策工に作用する側方流動圧を予測するためには、これらに関する補正を行う必要がある。そこで本研究では、理論と実測で側方流動圧が最大となる深度と、この最大値の大きさが一致するような補正係数を理論値と実測値を比較することによって求め、これによって地盤内の水平応力分布の理論値を補正する方法を提案する。

図—7は最大側方流動圧が生じる実測深度と理論深度の比と载荷速度の関係を示したものである。この図より、最大側方流動圧が生じる深度（最大値深度）は、盛土の幾何学条件や载荷速度に影響されなく、理論解で得られる最大値深度のほぼ1/2となることが分かる。また、図—8は実測された最大側方流動圧と理論値の最大水平応力の比と载荷速度の関係を示したものである。ここで示した最大側方流動圧とは深度方向に分布する側方流動圧の最大値で、時間経過とともに変化するこの値が時間的に最大となった時点と圧密がほぼ終了した時点の値が示されている。この図より、側方流動圧の最大値は盛立て速度指数の対数に対して直線的に変化し、理論値の2～4倍となり、盛土の载荷速度の影響を受けることが分かる。同様に、圧密がほぼ終了した時点での最大側方流動圧と理論値の比も盛立て速度指数の対数とほぼ直線関係にあるが、時間的に最大となった時点より载荷速度の影響を受けないことが分かる。さらに、この図において盛土形状の異なるCase 5の値もほぼ同一直線上に乗ることが分かる。これは、盛土形状の違いは理論解によって考慮でき、理論値と実測値の違いは図—8の関係をj用いて表すことができることを示している。

以上の結果より、図—7と8の補正係数をj用いてBoussinesqの弾性理論解を補正した結果を図—6に示す。補正係数をj用いた予測値と実測値を比較すると、最大値深度より浅い部分では予測値と実測値は比較的一致するが、最大値深度より深い部分では予測値は実測値よりかなり大きくなった。このように本手法は、実測値を必ずしも正確に予測できる結果とはなっていないが、予測値はいずれも安全側であり、概略設計における予測手法としては有用であるjと考える。



図—7 最大側方流動圧発生深度と载荷速度の関係



図—8 最大側方流動圧と载荷速度の関係

5. ま と め

本論文では、盛土に伴う粘土地盤の側方流動圧を簡易に予測する方法として、まず Boussinesqの弾性解に基づいて作成した図表を利用して盛土荷重による地盤内水平応力の理論値を求め、次にそれを実際の粘土地盤の特性、盛土の载荷速度、および対策工による拘束条件に応じて補正する方法を提案し、その適用性を検討した。その結果、本予測法は側方流動圧の深度分布形状で若干合わないところがあるものの、盛土に伴って粘土地盤中で生じる側方流動圧を簡易に予測でき、かつ盛土の载荷速度の影響を考慮できる方法として有効であることが明らかとなった。

なお、スペースの都合上、本論文では省略するが、深度方向に強度増加がある地盤では、最大側方流動圧が生じる深度が本論文で得られた深度より浅くなるjことが遠心模型実験より明らかとなっている。このように本論文で得られた結果は限られた条件に対するものであるが、今後、遠心模型実験の結果も取り入れて、予測法の一般化を図っていきたい。

参 考 文 献

- 1) Im, E. S. and Moriwaki, T.: Effects of construction speed of embankment on lateral earth pressure acting on earth retaining structure in clay foundation ground, International Journal of Physical Modeling in Geotechnics, 2002 (投稿中).
- 2) 任 垠相・森脇武夫: 盛土に伴う軟弱地盤の圧密沈下と最大側方流動圧に及ぼす载荷速度の影響, 第46回地盤工学会シンポジウム平成13年度論文集, pp. 109~114, 2001.
- 3) 三木博史・関 一雄・竹田敏彦: 軟弱地盤上の盛土に伴う側方流動圧の評価に関する模型実験, 第21回土質工学研究発表会, pp. 1031~1034, 1986.
- 4) Darragh, R. D.: Controlled water test to preload tank foundations, ASCE, SM5, pp. 303~328, 1964.

(原稿受理 2001.10.2)