粘性土使用補強盛土に関する基礎的研究

東京理科大学 福岡正巳
岡三興業株式会社 三沢清志

概要:

粘性土を用いた補強盛土は工事完成後降雨浸透等のために変形する。その変形が許容しうる場合と許容しえない場合がある。ところでこの様な変形がどのような原因で起こるかを検討することにした。まずその原因が盛土材料の物性にあることに着目し、盛土材料の応力と変形の関係を室内試験で確かめることにした。土の変形に関する基本的性質は変形係数 E とポアソン比またはポアソン数 μ によって表される。盛土材料には粒径の大きなレキが含まれていることが多いのでこのことを考慮する必要がある。また盛土の高さは比較的低いので、低圧力のもとで試験しなければならない。このようなことを考慮してスチール製の大きな円形のモールドを造り、その中にサンプルの土を詰め、上下圧を加え、沈下とモールドの変形を測定し、計算によって変形係数とポアソン数を求めた。更にせん断変形係数を求めるために大型の単純せん断試験機を製作し、この試験機を用いてせん断弾性係数をもとめた。

First Step Research on Reinforced Soil Embankments with Cohesive Soils

Masami FUKUOKA (Science University of Tokyo)
Kiyoshi MISAWA (Okasan Kogyo Co., Ltd.)

ABSTRACT:

Reinforced soil embankments deform by percolation of rain water after end of construction. There are cases which can be allowable and not. Why such deformation occur should be investigated. Noticing that those deformation are due to physical properties of soil, relationship between stress-strain relationship was studied by the laboratory test. The deformation property is expressed by coefficient of linear deformation and Poisson's ratio or Poisson's number. Usually fill materials contain large gravels. As fills are relatively low, stresses in the fills are low. These conditions should be taken into account when the testing apparatus is designed. A large steel cylinder attached by wire strain gages filled with soil sample was subjected to vertical load by a jack. Coefficient of linear deformation and Poisson's number were obtained by computation. A kind of simple shear apparatus was used to obtain shear modulus. soil sample

粘性土使用補強盛土に関する基礎的研究

○東京理科大学 福岡正巳
岡三興業株式会社 三沢清志

1. まえがき

補強盛土材料に砂が使用された場合は変形量が少なく、完成後雨水等が浸透しても変形量がほとんど増大しない。ところが粘性土を使った補強盛土の中には雨期に大きな変形を起こしたと言う例が報告されている。アメリカで行なわれた IGS 北アメリカ支部のシンポジウムでは、高さ約 9 m の擁壁の上に建物を建てたが、数か月後に大きな変形が起こり基礎から 3 分の 1 を残して上部を斜面に置き換えた。また数年前に建設が築造した高さ 7.5 m の補強盛土では、雨期に沈下と前方への移動量が著しく増大した。この盛土は仮設物であったために数か月後に取り壊されたが、盛土の使命を完全に果たした。この盛土には補強材に取り付けられた歪み計の他に、変位計、沈下計、土圧計、間隙水圧計、等が取り付けられており、工事中だけではなく、工事完成後も観測が続けられた。その貴重なデータを整理して、1994 年 9 月のシンガポールにおける IGS の国際会議に報告した。降雨浸透による土の物性の変化が変位の原因であると結論づけた。¹⁾もしも土質試験によって盛土中並びに竣工後の降雨浸透による土の物性の変化を調べることができれば、盛土の変位が予測できるのではないかと考えた。盛土の変形量を計算するために用いる土質定数は直線変形係数 E 、とボアソン比またはボアソン数 m である。三軸圧縮試験に於いて容積変化を測定し、計算によって E 、 m を求めることができる。しかし実際には圧力円筒内の圧力をあげると、供試体は収縮するので、自然状態での E 、 m の値を求めることはできない。また低い圧力での試験は難しい。一般に使用している試験機では粒径の大きなれきを含んだ材料の試験はできない。また含水比を変化させて試験することも容易ではない。そこで粗い粒子を含む土を低圧力の下で経済的に試験する装置を製作し、試験することにした。

2. 室内試験と実物盛土との関連性

図-1 の体積要素に作用する垂直応力と変形の関係は次の式によって表される。

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{1}{mE} (\sigma_y + \sigma_z) \quad \text{--- (1)}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{1}{mE} (\sigma_z + \sigma_x) \quad \text{--- (2)}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{1}{mE} (\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{--- (3)}$$

図-1 体積要素の応力とひずみ

図-2 盛土内の体積要素と垂直応力

図-3 盛土内の体積要素とせん断応力

盛土内の体積要素と垂直並びにせん断応力をそれぞれ図-2と3に示した。これは平面ひずみ状態であるから、(2)式において、 $\varepsilon_y = 0$ 、 $\varepsilon_x = \varepsilon_h$ 、 $\varepsilon_z = \varepsilon_v$ 、 $\sigma_x = \sigma_h$ 、 $\sigma_z = \sigma_v$ と置けば、

$$\varepsilon_h = \frac{\sigma_h}{E} - \frac{1}{mE} \left\{ \frac{1}{m} (\sigma_v + \sigma_h) + \sigma_v \right\} \text{----- (4)}$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - \frac{1}{mE} \left\{ \frac{1}{m} (\sigma_v + \sigma_h) + \sigma_h \right\} \text{----- (5)}$$

次にひずみに関しては

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad , \quad E = 2G \left(1 + \frac{1}{m} \right) \text{----- (6)}$$

Gはせん断弾性係数である。

以上のことから、変形係数Eとポアソン数mから盛土内の応力と変形の関係が求まることがわかった。

さて盛土内の応力が小さいこと、盛土には粗粒材料が含まれているために、普通に用いられている三軸圧縮試験機では試験ができない。またなるべく経済的に試験をしたいという要求から、精度は多少悪いことを承知の上で、次のような試験装置を製作することにした。前田建設の補強盛土では $m = 2.5 - 3.5$ 、 $E = 6.1 - 0.19 \text{ MPa}$ の範囲であったから、これを参考にして試験装置の容量並びに精度を選んだ。第一の形式では圧縮型を第二の形式では単純せん断型を採用した。圧縮型の試験装置のモールドは図-4に示すように円筒である。

図-4 モールド

図-5 土の圧力とモールドの引っ張り力の関係

この円筒は半径R、高さH、厚さtである。この中に試料土を詰め、ジャツキで上下圧Qを加える。垂直応力は $\sigma_v = Q / (\pi R^2)$ である。水平方向の土圧 σ_h と円筒の水平方向の伸びひずみの関係をあらわす式をたてると次のようになる。

$$\sigma_h = E_s t \varepsilon_s / R \text{----- (7)}$$

ここで、 E_s 、 ε_s はそれぞれ円筒の材料（スチール）のヤング率並びに線形ひずみ、tは円筒の厚さである。円筒にスチールを用いると、その弾性係数は土の変形係数に比較して非常に大きいので、円筒の伸びは無視できる。従って試料土の水平方向の伸びも無視できる。そこで（１）、（２）、（３）式は次のように変形できる。

$$0 = \frac{\sigma_h}{E} - \frac{1}{mE} (\sigma_v + \sigma_h) \text{----- (8)}$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E} - \frac{2}{mE} \sigma_h \text{----- (9)}$$

（８）式より

$$m = 1 + \frac{\sigma_v}{\sigma_h} \text{----- (10)}$$

（９）式より

$$E = (\sigma_v - 2 \sigma_h / m) / \varepsilon_v \text{----- (11)}$$

式（７）、（１０）、（１１）によってm、Eが求められる。

第二の試験装置は図－６に示すように上下圧を加えた後に試料土にせん断変形を起こさせる。せん断応力とせん断ひずみの関係は（６）式で与えられている。

図－６ 単純せん断試験装置の構造を示す図

3. 第一形式、圧縮型の試験装置並びに試験方法

図-7は圧縮型の試験装置を示す。

図-7 圧縮型の試験装置

モールドの円筒はスチール製で、直径60 cm、高さ40 cm、厚さ1.6 mmで、周囲に長さ30 mmのワイヤーストレインゲージが $3 \times 8 = 24$ 個張りつけてある。上下圧は最初0.5 tfから始め、最終的には10 tfとした。円筒内には摩擦を軽減するためグリースを塗った。試料は山梨県の葛野川の東京電力のダムの現場から採取した。直径約10 cm以上のれきは取りのぞいた。試験は現場から運んできた状態の含水比で3回行なった。4回目と5回目は180 kgfの試料に26リットルの水を加え、さらに6回目は200 kgfの試料に28リットルの水を加え、合計6回試験を実施した。準備した試料を4等分して円筒内に投入して表面を均し、締め固めのために各層ごとに0.5 tfの荷重をジャッキで加えた。試料の厚さは40 cmよりわずかに小さかった。

4. 圧縮型試験機による試験の結果

試料の単位体積重量、含水比は表-1に、ジャッキによる載荷重と圧縮量の関係を図-8に示す。試験番号4、5、6で圧縮量が小さくなっているのは、水を加えたためであろう。実際の盛土では含水比の増加によって圧縮沈下が起こる。この試験の結果からこのような材料を使用すれば盛土の沈下が起こるということが予見できるかもしれない。

荷重の増加によってモールドに張りつけたワイヤーストレインゲージは伸びる。円筒の材質、製作、土試料が不均一であるため、ゲージの伸びには相当なバラツキがあった。中段のゲージのひずみと荷重の関係を求め、さらに(10)式によってポアソン数 m を求めると表-2のようになる。

表-1 試料の単位体積重量と含水比

試験 番号	単位体積重量、 tf/m^3		含水比、% (粗れき分を 除く)
	試験前	試験後	
1	1.64	1.80	9.8
2	1.65	1.87	8.2
3	1.63	1.74	9.6
4	1.61	1.69	8.6
5	1.90	2.02	12.1
6	2.00	2.10	12.3

注：含水比がばらついているのは目視で粗れきを取りのぞいて、細粒分だけの含水比を計ったためである。

図-8 荷重と圧縮量の関係

表-2は垂直荷重とポアソン数の関係である。試験の範囲ではポアソン数は3.0と3.3の間である。 $m=3.0$ として(11)式により変形係数Eを計算した結果も表-2に併記した。 $E=12-23\text{ kgf}/\text{cm}^2$ の間にある。圧力による差はそれほど大きくはない。

表-2 垂直荷重とポアソン数との関係

荷重tf	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
応力 σ_v , kgf/cm ²	0.18	0.35	0.53	0.71	0.88	1.06	1.24	1.42	1.59	1.77
ポアソン数, m	3.1	3.0	3.0	3.2	3.3	3.2	3.2	3.1	3.1	3.1
変形係数E, kgf/cm ²	20	12	23	14	15	15	16	17	17	15

5. 単純せん断型試験装置並びに試験方法

図-9は単純せん断型の試験機である。供試体の寸法は80×80×80cmで周囲はゴム膜で包む。図-8(a)は側面図である。供試体がせん断変形を起こしたときにも形が崩れないようにスチール製のコロ付き側壁フレームで囲む。図の左右はゴム膜の外側に鉄板が置かれ、鉄板は可動壁と書いてあるフレームに連結されている。このフレームを側方からジャッキで押すと(b)図のように変形する。

実際の補強盛土と関連づけてこの試験機の容量と精度を決めなければならない。盛土の高さH、土の単位体積重量 γ 、前壁面から十分後方の位置における土圧係数K、として盛土底面のせん断応力を求めると

$$(1/2)K\gamma H^2/H = K\gamma H/2$$

$$H=10\text{m}, \gamma=2\text{tf/m}^2, K=0.5$$

とすると、せん断応力は、

$$K\gamma H/2=5\text{tf/m}^2$$

鉛直方向圧力は20tf/m²

せん断ひずみの最大値は

4%である。

図-9 単純せん断型試験機

図－9 単純せん断型せん断試験機
(c)

このような計算の結果上下方向並びに横方向のジャッキの容量とストロークを決めた。上下方向並びに横方向のジャッキの容量はそれぞれ10 tと30 t、横方向ジャッキのストロークは18cmとした。また試料の最大寸法を考慮して試料を入れる箱の寸法を決めた。せん断速度は約1/3 mm/minとした。試料は約5cmの層厚で合計16-18回にわけて軽く締め固めなが詰めた。試料の単位体積重量並びに細粒部分の含水比は表－3に示す。

表－3 単純せん断試験の試料の単位体積重量と含水比

試験 回数	上下圧力 tf/m ²	単位体積重量 tf/m ³	含水比 %
1	6	1.89	6.58
2	9	2.00	6.80
3	12	1.92	6.80
4	9	2.40	9.80

6. 単純せん断型試験の結果

図－10はせん断ひずみとせん断応力の関係を示す。鉛直応力の他に単位体積重量と含水比がせん断応力とせん断ひずみの関係に影響したので、鉛直応力が大きければせん断ひずみが小さくなるという確かな結論は得られなかった。

図－11はせん断ひずみとせん断弾性係数および変形係数の関係を示した。せん断ひずみが0.005よりも小さいところでは、せん断弾性係数は大きい、せん断ひずみがこりより大きな範囲ではせん断弾性係数は一定値に近付き $G=20-10$ の範囲に入る。変形係数はポアソン数 $m=3$ として計算すると $E=8G/3$ となり、図－11の右側のスケールで読み取ることができる。圧縮試験型の試験で得られた変形係数と比較すると約倍になっている。

図-10 せん断ひずみとせん断応力の関係 図-11 せん断ひずみとせん断変形の関係

7. 考察

試験結果を利用して実際の盛土の変位を予測してみることにした。図-12は高さ10mの補強盛土である。このような盛土の変位を予測する方法はいろいろある。しかし今回の試験によって得られた定数の精度は決して十分なものとはいえない。そこでとりあえず大胆に簡略計算を試みた。高さ5mの位置に厚さ1m、長さ5mの体積要素を想定する。これまでの実測の経験から水平土圧係数 $K=0.2$ とする。土の単位体積重量を 2tf/m^3 とすると、鉛直土圧は 10tf/m^2 、水平土圧は 2tf/m^2 であるから水平方向のひずみは(4)式で計算される。変形係数 $E=20\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン数 $m=3$ として計算すると、ひずみは 0.01333 となり、伸びは5mで 6.7cm となる。この値は大体実際にも起こりうるものである。鉛直方向のひずみは(5)式で計算される。計算の結果ひずみは 0.04 となり、これが盛土全体の平均値と仮定すると、高さ10mの盛土の天端の沈下は 40cm となる。これも大胆な予測値としてはよさそうである。

図-12 高さ10mの補強盛土

ポアソン数と共に水平土圧係数は壁面の水平変位に大きな影響があり、補強材の役目のひとつは土圧係数を高く保つことにある。ひずみと土圧係数、ポアソン数の関係は次の式で表される。

$$E \sigma_h = [K - \{ (1+K) / m + 1 \} / m] \sigma_v = X \sigma_v \text{----- (12)}$$

Xの値をKとmの関数として表すと表-4のようになる。

表-4 $X = K - \{ (1 + K) / m + 1 \} / m$ の値

m	K								
	.10	.15	.20	.25	.30	.35	.40	.45	.50
2.8	-.40	-.35	-.31	-.27	-.22	-.18	-.14	-.09	-.05
2.9	-.38	-.33	-.29	-.24	-.20	-.16	-.11	-.07	-.02
3.0	-.36	-.31	-.27	-.22	-.18	-.13	-.09	-.04	0
3.1	-.34	-.29	-.25	-.20	-.16	-.11	-.07	-.02	+0.02
3.2	-.32	-.28	-.23	-.19	-.14	-.10	-.05	0	+0.04
3.3	-.30	-.26	-.21	-.17	-.12	-.08	-.03	+0.01	+0.06
3.4	-.29	-.24	-.20	-.15	-.11	-.06	-.02	+0.03	+0.08
3.5	-.28	-.23	-.18	-.14	-.10	-.05	0	+0.05	+0.09

8. むすび

粘性土を使用した盛土の変位を予測するためには盛土の物性を表す変形係数とポアソン数の値が重要であり、室内試験によってこれらの値を求める方法を提示した。しかしながら試験装置はまだ多くの改良が必要である。特に圧縮試験型の試験装置の円筒の改良が必要である。また室内試験の試料の締め固めの結果えられた供試体の密度と現場における盛土の密度が等しくならなければならないし、降雨浸透によって含水比が変化する状態を再現するにはどうすればよいかを研究する必要がある。図-12のように盛土の後方に斜面がある場合には盛土と斜面の間の摩擦が変位に大きな影響をするので、これについても研究しなければならない。盛土の前面の構造ならびに表面付近の締め固めが不十分な土が表面の変位に関係するが、これは予測が極めて困難である。

室内試験で求めた物性値を用いて計算をし、変位を予測し、現場での実測値と照らし合せて、両者の相違点を明らかにし、両者がよりよく一致するように研究を進めていく必要がある。

謝辞

この報告作成に当たっては東京電力株式会社並びに岡三興業株式会社の方々のお世話になった。ここに厚くお礼を申し上げる。

参考文献

1. M. Itoh, M. Shirasawa, A. Itoh, K. Kumagai, M. Fukuoka: Well Documented Case Study of a Reinforced Soil Wall, Proc. 5th Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, 5-9 September 1994, pp.255-258.
2. M. Fukuoka, Friction at Upper and Lower Faces and Tension in Reinforcing Sheets, 同上, pp.243-246.