

非饱和砂土的表现粘聚力研究

刘丰收¹, P. Lubking²

(1. 黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 河南 郑州 450003; 2. 荷兰代尔夫特岩土工程研究所, 荷兰)

摘要:以不同粒度的砂, 在不同的含水量情况下, 采用无侧限压缩试验的方法, 研究非饱和砂的表现粘聚力与砂的粒度、含水量等的关系。试验表明, 在研究范围内, 非饱和砂的表现粘聚力随含水量的增加而升高, 并且随粒度的减小而升高, 随粒度的增大而减小。

关键词:非饱和砂; 表现粘聚力; 土工试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2001)07-0006-02

众所周知, 含有一定水分的砂的性质与饱和状态以及干砂的性质不同, 处于潮湿状态的砂的抗剪强度明显高于饱和砂和干砂, 在干旱和半干旱地区, 地下水位以上的土体均处于这种非饱和状态, 如何确定非饱和砂的强度尚需深入研究。

自1959年 Bishop 提出非饱和土的有效应力理论以来, 对于非饱和土的抗剪强度、变形、渗流、矿物成分、土-水特性等做了大量的研究。然而, 这些研究多以粘土为研究对象, 对非饱和砂土的研究则非常少。众所周知, 砂土通常不具有粘聚力, 当砂土处于非饱和状态时, 由于孔隙水吸力的作用, 砂土的抗剪强度得到一定的提高, 其原因乃表现粘聚力。

有很多的工程实践与非饱和土的抗剪强度有关。如对于天然或人工边坡, 大气降雨将使其处于饱和状态, 土体的抗剪强度将随土体的饱和而降低, 其稳定状态也将随之发生变化, 而当土体中的水逐渐下渗, 含水量逐渐降低, 土的抗剪强度具有逐渐升高的趋势, 边坡的稳定状态也随之升高。这种现象同样发生在处于地下水位以上的浅基础、堤坝以及人工开挖的坑、槽中。对非饱和土强度的理解, 将有助于工程师对边坡等工程的稳定性的评价和设计。

1 基本原理

研究表明, 非饱和土的抗剪强度与土颗粒的吸力以及内摩擦角有关, 1978年, Fredlund^[1]提出非饱和土的独立变量原理, 认为土的非饱和抗剪强度与土的应力及土的吸力有关:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中: τ 为土体抗剪强度; c' 为土的内聚力; σ 为土

体应力; u_a 为空气压力; u_w 为水的压力; φ' 为土的摩擦角; φ^b 为由于空气吸力而产生的摩擦角。

Oberg^[2], Vanapoli^[3]和 Fredlund^[4]也均提出了类似的经验方程以估计非饱和土的抗剪强度。从这些方程中可以看出, 当空气压力为大气压时(土的空隙与大气相连 $u_a = 0$), 由于非饱和土吸力的存在, 由此而引起的抗剪强度的增加是土的吸力 u_w 的函数, 可写为下式:

$$\nabla \tau = F(u_w, \varphi) \quad (2)$$

对于砂土, 抗剪强度的这部分称为非饱和砂土的表现粘聚力, 可以用下式表示:

$$c_a = (S_r) u_w \tan \varphi' \quad (3)$$

式中: c_a 为非饱和砂土的表现粘聚力; S_r 为非饱和砂土的饱和度; u_w 为砂土的吸力; φ' 为砂土的内摩擦角。

研究表明, 土的吸力与土的孔隙直径、液体的表面张力以及液体的弯月面的半径有关(如图1和式4所示)。

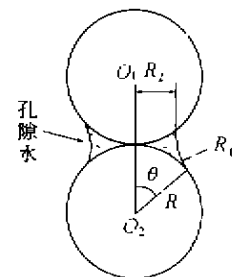


图1 土颗粒间吸力示意图

$$u_w = T_s \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

式中: T_s 为液面的表面张力; R_1, R_2 为液面的半径。

对于级配较好的砂土, 由于细粒组分的存在, 减小了粗颗粒间的孔隙直径, 小的孔隙和小的弯月面通常可以产生较大的吸力。由此看来, 在相同含水量的情况下, 细砂及含有较多细粒组分的砂土的表现

粘聚力要比粗砂中及细粒组分较少的砂土的表观粘聚力要高。

2 试验材料和方法

基于上述设想,本文选择了5种具有不同粒度组成的砂土进行试验:①Zeyen砂,这是一种在荷兰比较常见的天然细砂;②Baskarp砂,产于瑞典的一种天然细砂;③Reijsbergen砂,荷兰代尔夫特实验室一种常用砂;④Veghel砂,一种天然中砂;⑤泥工砂,一种筛分后混合的砂,用于建筑中砌墙等。这5种砂分别代表不同的粒度和成因,特别是Baskarp砂和Veghel砂,因其不同的细粒含量,可同时研究土中细粒组分对粘聚力的影响,其粒度组成示于表1。从表1中可以看出,Zeyen砂和Veghel砂含有更多的细粒组分,而其它3种砂的细粒组分则较少。

表1 砂的粒度组成

名称	D_{50}/mm	D_{10}/mm	D_{60}/D_{10}	$<63\mu\text{m}$	$<20\mu\text{m}$
Zeyen	0.08	0.053	1.64	18	5
Baskarp	0.128	0.08	1.56	1	0
Veghel	0.16	0.053	3.45	12	5
Rijsbergen	0.23	0.13	1.97	1	1
Mortar	0.49	0.22	2.55	1	1

本文采用无侧限抗压试验进行室内试验,试验仪器由荷载框架、承载底座、荷载施加手柄、位移计以及测量荷载大小的电子测量装置组成。试验过程中的位移和荷载的大小要同时记录下来,以绘制应力-应变曲线,确定试样的最大主应力。试验中,砂样的应变速度约为万分之一。

3 试样的制备

对于每种用于试验的砂,使其与预先确定的含水量充分混合均匀,在试样桶中进行击实,并搁置约20h以上,以便于土样中的水在样品中分布均匀,试样所用的含水量为4%~16%。含水量小于4%时,砂土太干,无法制造样品,而对含水量超过16%的样品,制样也较为困难,且试验过程中存在排水现象,故含水量以16%为上限。

4 试验与数据处理

试验采用应变控制加载速度,应变率大约为 $10^{-4}/\text{s}$ 。对于试验取得的应力-应变曲线,读取每一试样的最大荷载,计算最大主应力,采用摩尔-库仑包络线计算砂土的粘聚力,如图2所示。

由图2可方便地得出如下计算非饱和砂表观粘聚力的表达式

$$c_a = \frac{1}{2} \sigma_v \left(\frac{1}{\cos \varphi} - \tan \varphi \right) \quad (5)$$

式中: c_a 为非饱和砂的表观粘聚力; σ_v 为实验的最大垂直应力; φ 为砂土的内摩擦角。

砂土的内摩擦角可以通过相关经验关系得到,据式(5)可以计算出各种土的表观粘聚力如表2和图3所示。

表2 各种非饱和砂的表观粘聚力 kPa

含水量/%	泥工砂	Rijsbergen砂	Baskarp砂	Veghel砂	Zeyen砂
4	0.76	1.79	2.23	3.53	
8	0.86	1.83	3.19	3.60	4.49
12	0.98	1.91	3.43	3.65	5.19
16		1.98	4.12		5.81

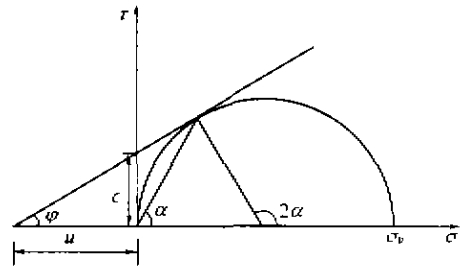


图2 利用摩尔-库仑包络线解释无侧限抗压强度

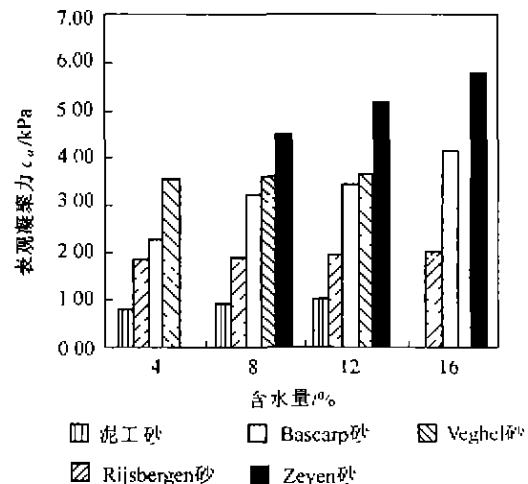


图3 各种非饱和砂的表观粘聚力

由试验结果可以看出,砂土的表观粘聚力随砂的粒径的增加而减小,随含水量的增加而升高。从Baskarp砂和Veghel砂的试验结果可以注意到,尽管Baskarp砂比Veghel砂的颗粒要小,但因Veghel砂含有较多的细粒组分,故表现出较高的表观粘聚力。

5 结语

试验结果表明,在干燥状态和饱和状态不具有粘聚力的砂,在非饱和状态下表现出一定的粘聚力,粘聚力的大小与砂土的含水量、平均粒径、孔隙大小和细粒组分的含量有关。砂土的表观粘聚力随细粒组分的增加而增加,随砂土的平均粒径(下转第17页)

A类:为I₁类(或基岩、老粘土)堤基,一般为宽或较宽外滩,无渗透稳定和岸坡稳定问题。

B类:主要为II₂类堤基,外滩一般较宽,堤内发育有少量的渊塘,无严重渗透变形险情发生。

C类:主要为II₁类、III类堤基,外滩宽度一般较窄,堤内渊塘较发育且深度较大,险情较多,深泓贴岸,塌岸现象较严重。

D类:主要为I₂类、II₃类、III类堤基,一般为窄外滩或无外滩,堤内渊塘发育,有较严重的渗透变形发生,岸坡迎流顶冲,塌岸现象严重,危及堤身安全。

4 已建堤防工程堤身质量的评价

堤防勘察时,应按照均质土坝坝身质量检测的基本要求,对已建堤防堤身质量状况进行普查并评价,给设计提供除险加固的基本资料,评价亦可分为好(a)、较好(b)、较差(c)、和差(d)4类。

a类:①断面达到规范标准,护坡、防浪林等设施齐全。②堤身稳定。③穿堤建筑物不致引发堤身差异沉降及集中渗透。④筑堤材料,均质土堤粘粒含量为15%~30%,塑性指数为10~17,防渗体粘粒含量为15%~40%,塑性指数为10~20,土料无植物根茎、砖瓦垃圾等杂质,石料、砂砾料及混凝土骨料应符合现行建材勘察规程要求。⑤堤身填筑干重度为大于15 kN/m³,渗透系数 $K \geq 1 \times 10^{-5}$ cm/s,无软弱夹层、裂缝、生物洞穴、散漫、漏水等工程缺陷。⑥工程管理,内外护堤地无坑塘、洼地及违章建筑,护坡等设施维护良好。

b类:①断面基本达到规范标准,护坡防浪林等设施基本齐全。②堤身稳定。③穿堤建筑物不致引发堤身显著差异沉降及集中渗透。④筑堤材料,均质土堤粘粒含量为10%~30%,塑性指数为7~17,防渗体粘粒含量为15~40%,塑性指数为10~20,土料有少量植物根茎、砖瓦垃圾等杂质,石料、砂砾料及混凝土骨料应基本符合现行建材勘察规程要求。⑤堤身填筑干重度大于14 kN/m³,渗透系数 $K \geq 1 \times$

10^{-4} cm/s,仅有少量软弱夹层、裂缝、生物洞穴、散漫、漏水等工程缺陷。⑥工程管理,内外护堤地仅有少量坑塘、洼地及违章建筑,护坡等设施维护尚良好。

c类:①断面未达到规范标准,护坡防浪林等设施不齐全。②堤身尚稳定。③穿堤建筑物引发堤身发生不太严重的差异沉降及集中渗透。④筑堤材料,均质土堤粘粒含量为8%~30%,塑性指数大于4,防渗体粘粒含量10%~40%,塑性指数大于7,土料有植物根茎、砖瓦垃圾等杂质,石料、砂砾料及混凝土骨料不符合现行建材勘察规程要求。⑤堤身填筑干重度大于13.5 kN/m³,渗透系数 $K \geq 1 \times 10^{-3}$ cm/s,有软弱夹层、裂缝、生物洞穴、散漫、漏水等工程缺陷。⑥工程管理,内外护堤地有坑塘、洼地及违章建筑,护坡等设施受到损坏。

d类:①断面未达到规范标准,护坡防浪林等设施不齐全。②堤身稳定状况不良。③穿堤建筑物引发堤身发生差异沉降及集中渗透。④筑堤材料,均质土堤粘粒含量为0~30%,塑性指数大于或等于0,防渗体粘粒含量为8%~40%,塑性指数大于4,土料有植物根茎、砖瓦垃圾等杂质,石料、砂砾料及混凝土骨料不符合现行建材勘察规程要求。⑤堤身填筑干重度大于13 kN/m³,渗透系数 $K \geq 1 \times 10^{-3}$ cm/s,有较多软弱夹层、裂缝、生物洞穴、散漫、漏水等工程缺陷。⑥工程管理,内外护堤地有深塘、洼地及违章建筑,护坡等设施受到损坏。

5 结 语

淮河流域河流多,但规模一般不大,近几十年区域性天气以干旱为主,但逢洪涝年份,河道排水不畅,宜形成灾害,所以堤防工程挡水时间不长,险情记录不多,进行评价分类时,主要应考虑土类及其物理力学、渗透性指标,结合工程出现险情的实例,运用类比法进行综合分析、评价。

(收稿日期:2001-07-27 编辑:马敏峰)

(上接第7页)和孔隙直径的增加而减小,在试验范围内,随含水量的增加而增加,并且和砂的密度表现出一定的相关性。

参考文献:

- [1] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313 ~ 321.
- [2] Oberg A L, Sallfors G. Determination of shear strength param-

eters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1997, 20(1): 40 ~ 48.

- [3] Vanapalli S K, Fredlund D G. Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength[A]. In: Charles D Shackelford, et al. Advances in Unsaturated Geotechnics, Proceedings of sessions of Geo-Denver 2000[C], 195 ~ 209.
- [4] Fredlund D G, Xing. Equation for the soil water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnics Journal, 1994, 31, 521 ~ 532.

(收稿日期:2001-08-14 编辑:马敏峰)