

现代黄河水下三角洲粉土的临界水力坡降探讨*

冯秀丽¹ 马艳霞¹ 林霖¹ 徐丛亮²

(¹ 青岛海洋大学海洋地球科学学院 266003)

(² 黄河水利委员会 郑州 450000)

摘要 通过室内试验,测定不同密实度粉土的临界水力坡降。由试验结果可以看出,粉土的临界水力坡降与一般砂性土有着较大差异,一般砂性土临界水力坡降 $i_{cr} = (\rho - \rho_s) / \rho_s$,变化范围在 0.8 ~ 1.5 之间,而现代黄河水下三角洲粉土的临界水力坡降为 9.5 ~ 16.5。同时对土体进行受力分析,考虑颗粒间的凝聚力,对以上结果产生的机理进行分析,并找出临界水力坡降与其物理性质指标之间的关系。

关键词 粉土,桶形基础,临界水力坡降,流土,物理性质指标

粉土是砂性土和粘性土之间的一种过渡类型,工程性质与砂性土和粘性土也存在较大差异。在海上石油开发,特别是边际油田的开发,可移动桶形基础的利用,与粉土有着密不可分的关系。桶形基础一般较短,往往将海底第一层土(一般为粉土,如

* 教育部博士点基金资助项目 2000042305 号
第一作者:冯秀丽,出生于 1962 年,从事海洋工程地质研究,博士,副教授。E-mail:xiulifeng@mail.china.com

收稿日期:2002-03-06;修回日期:2002-03-29

胜利油田、辽河油田)直接作为持力层。另外,桶形基础多采用负压下沉降^[1],在桶形基础内外就形成渗流场,选用多大的负压才能不使粉土产生流动或顺着流水管流出而造成失稳,粉土的临界水力坡降值是关键所在,但是对粉土的临界水力坡降人们一向关心较少,无经验值可查。

1 粉土渗透变形的形式

根据中华人民共和国水利电力部《土工试验规程》SDI 28-87 中无粘性土扰动试样从下向上渗透变形试验(SDI 28-032-87)和无粘性土扰动试样水平管涌试验(SDI 28-033-87)中的一系列规定,对粉土进行渗透变形试验^[2]。

渗透变形是一个十分复杂的问题,它的形式及其发生发展与地质情况、颗粒级配、水力条件、水流方向等因素有关^[3],通常可归结为以下4种:

(1)管涌:在渗流作用下,颗粒沿着孔隙通道移动或被水流带走;(2)流土:土体的颗粒群在渗流作用下同时起动并带走,它可以是整体性,也可以是局部性;(3)接触冲刷:渗流沿着不同介质的接触面流动时,把颗粒带走;(4)接触流土:渗流垂直与不同介质的接触面流动时,把其中一层的颗粒移入到另一层中去。

在实际工程中,渗透变形发生的形式,可以是单一形式出现,也可以是几种形式伴随出现于不同部位。对于粉土中发生的渗透变形,由于粉土基本是均质,且一般为下卧不透水层,因此发生的渗透变形主要为管涌和流土两种形式。

对于管涌和流土,除用试验方法确定外,国内外已有一些判别方法,如用土的不均匀系数来判别;用骨架孔径与细粒(填料)粒径之比来判别;用微分曲线类型来判别^[4];目前用的较多的是用细粒含量判别,它是根据细粒在骨架孔隙内的充填程度,通过计算用某一细粒含量的上限和下限区分流土和管涌;也可用一个判别式算出某一细粒含量作为判别界限。后面的方法中涉及到骨架颗粒和填料细粒的区分粒径,这是一个不固定的粒径。因为较粗颗粒形成的孔隙,恰好为较细颗粒所填充。从实际情况来看,发生管涌时,首先被冲动的是土体中较细的颗粒,这些颗粒在孔隙中处于自由状态,并不与骨架颗粒一起承重。而且它们自身所形成的孔隙,已经不能为更细小的颗粒所充填,因此就有可能根据受力情况用某一固定粒径来确定骨架与填料的区分粒径。一般用2 mm粒径为界限,也有用1 mm或5 mm为界限,还有用微分曲线上的断裂点粒径来区分的。根据粒度资料已知,海底粉土分选较好,颗粒普遍较细,中值粒径为0.06 mm,

上述方法不太适合。这里是根据临界水力坡降与不均匀系数的关系判断可能发生的渗透变形的形式,伊斯托美娜根据理论分析并结合一定数量的试验资料,给出了无粘性土的临界水力坡降与不均匀系数的关系,并按不均匀系数把土划分为流土型、过渡型和管涌型3类: $C_u = 2 \sim 10$,为流土型; $C_u = 10 \sim 20$,为过渡型; $C_u = 20 \sim 40$,为管涌型^[4]。根据粒度资料结果,粉土的不均匀系数 C_u 为 2.84 ~ 9.00,因此将其划分为流土型土。

2 试验原理及方法

2.1 试验原理

根据水力学原理,在水流中任何一点的总水头包括下列3项,即:压力水头、速度水头和位势水头,且水流中各点的总水头同为一常数^[5],即:

$$\frac{p_1}{\rho_w g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \text{常数} = \frac{p_2}{\rho_w g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h$$

式中 p_1, p_2 为任意两点上的水压力,单位为 kPa;
 ρ_w 为水的密度,单位为 g/cm^3 ; g 为重力加速度; v 为水流速度,单位为 m/s ; z 为位势水头,单位为 m ; Δh 为水头损失,单位为 m 。

上式为泊努力方程式。当水在水头差作用下流动时,水与器壁间的粘滞阻力作用必然要消耗水头。然而在工程中考虑土中水的渗流问题时,常因水的流速相对甚小,而将渗流中的速度水头忽略不计。

在水中任意两点间产生渗流时,则该二点的水头差为 $H_1 - H_2 = H$, 其与两点间渗流长度 L 之比称为水力梯度,即水力坡降,常以无量纲向量 i 表示,即 $i = (H_1 - H_2) / L = H / L$

2.2 试验方法

试验是用制备样品进行的,分成3组,每组4件试样:

组次1:容重 $\rho = 20.0 \text{ kN/cm}^3$,含水率 $\omega = 26\%$,孔隙比 $e = 0.701$,干容重 $\rho_d = 1.59 \text{ kN/cm}^3$,凝聚力 $C = 6 \sim 10 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi = 25 \sim 30^\circ$;

组次2:容重 $\rho = 19.5 \text{ kN/cm}^3$, $\omega = 29.5\%$, $e = 0.793$, $\rho_d = 1.51 \text{ kN/cm}^3$,凝聚力 $C = 4 \sim 6 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi = 20 \sim 25^\circ$;

组次3:容重 $\rho = 19.0 \text{ kN/cm}^3$, $\omega = 32.9\%$, $e = 0.889$, $\rho_d = 1.41 \text{ kN/cm}^3$,凝聚力 $C = 3 \sim 5 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi = 15 \sim 20^\circ$;

样品厚度均为4 cm,选用南55改进型渗透仪。

实验时将下进水口与供水管连接,首先使仪器充

水,检查仪器各部件是否堵塞及漏水等。检查完毕后,降低供水项,使仪器中水位与下透水板的下沿齐平。打开全部测压头,使之处于排气状态。将分层制备好的样品安装好,然后采用热水饱和法对样品进行充分饱和,即在供水箱内储存热水,缓慢提升水箱,每次提升 1 cm,停 30 min,再提升水箱。随着供水箱的上升,让水由仪器底部向上渗入,使试样缓慢饱和,以完全排除试样中的空气。

试验时,对于初始渗透坡降及渗透坡降的增值,主要考虑试验用粉土为流土型,可适当大些。仔细观察试验过程中出现的各种现象,如水的混浊程度、冒气泡、细颗粒的跳动、移动或被水流带走、土体悬浮、渗流量等,并描述下来。

3 试验结果

按上述方法进行 3 组样品的渗透变形试验,不断提高试验时的水头差,记录渗透量和时间的关系,同时观测试验现象,并计算水力坡降和渗透速度随时间的变化。从每组中选一个试样结果,在双对数纸上,以渗流坡降 i 为纵坐标,渗流速度 v 为横坐标,绘制渗流坡降与渗透速度关系曲线(图 1)。

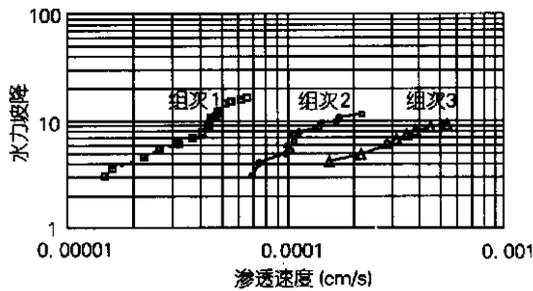


图 1 水力坡降与渗透速度的关系

Fig.1 The relationship between hydraulic gradient and permeability speed

从图中可以看出,粉土的临界水力坡降与一般砂性土有着较大差异。一般砂性土临界水力坡降 $i_{cr} = (\rho - \rho_w) / \rho$, 变化范围在 0.8 ~ 1.5 之间,而测试粉土的临界水力坡降为 9.5 ~ 16.5。同时还可以看到,粉土的水力坡降、渗透速度和土的密实度、含水量等初始物理性质指标有着密切关系。

4 机理分析

根据上述理论和试验结果表明只要有水头差

存在,水一般会在土体中产生流动(水头损失必须超过土体初始水力坡降才会流动)。当水在土体中流动时,将会引起水头的损失,而这种水头损失是由于水在土体孔隙中流动时,力图拖曳土粒消耗能量的结果。这时水流在拖曳土粒时将给予土粒以某种拖曳力,在工程上称之为渗透力,大小等于单位土体内水流所受的阻力 $j = i \rho_w$, 其作用方向与渗流(或流线)方向一致,是一种体积力,常以 kN/m^3 表示。

研究土体发生流土的临界水力坡降,首先应对单元土体进行受力分析,单元土体除了受本身的向下重力作用和向上的渗透力外,由于粉土颗粒之间具有一定的粘结力(砂性土一般粘结力为零),发生流土破坏还要克服颗粒之间的连结,见图 2,

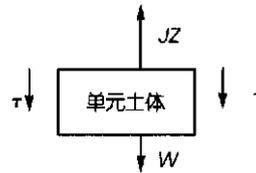


图 2 粉土单元体发生流土时的应力状

Fig.2 The stress state of silt unit happening soil flow

J 为渗透力,单位为 kN/m^3 ; W 为单元土体的重力,单位为 kPa ; τ 为单元土体间的剪切强度,单位为 kPa ;

根据极限平衡原理可知,当单元土体处于极限平衡状态时,

$$J \int_0^z dz = W + \tau$$

$$\text{即 } i_{cr} \rho_w z = (\rho - \rho_w) \int_0^z dz + C + \sigma \tan \varphi$$

其中 ρ 为水的密度 (kN/m^3); ρ_w 为土的密度 (kN/m^3); C 为土的凝聚力 (kPa); σ 为法向应力 (kPa); z 为渗径长度; φ 为土的内摩擦角。这里由于试验样品厚度不大,法向应力很小,因此公式中 $\sigma \tan \varphi$ 项可忽略。积分得

一般砂性土^[7]颗粒较粗,凝聚力为零,才会有

$$i_{cr} \rho_w z = (\rho - \rho_w) \int_0^z dz + C = (\rho - \rho_w) z + C$$

而粉土颗粒较细,含有一定量的粘土颗粒,凝聚力不等于零,所以才会使其临界水力坡降大大增加。上式成为

$$i_{cr} = \frac{(\rho - \rho_w)z + C}{\rho_w \cdot z} = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} + 2.5 \frac{C}{z}$$

这与上面试验结果是一致的。

5 粉土临界水力坡降计算模型

在工程实践中,利用土的力学性质指标和物理性质指标之间的关系,可以更方便地求出粉土的临界水力坡降,另外粉土的渗透性与其粘粒含量有着密切关系,通过对以前大量实测资料的统计得:

$$\text{凝聚力 } C = 0.65 \rho_d + 0.25 \rho_c - 8$$

临界水力坡降

式中 i_{cr} 为粉土发生流土的临界水力坡降; ρ , ρ_d 为粉

$$i_{cr} = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} + 1.63 \rho_d + 0.62 \rho_c - 20$$

土天然容重和干容重 (kN/m^3); ρ_d 为粉土中的粘粒百分含量 (%)。

知道粉土的临界水力坡降,在实际工程中具有重要的指导意义。在水利工程中要控制水头高度,以免发生流土破坏;在海上可移动桶型基础施工时则要控制负压大小,以免桶内粉土发生流土破坏而变成悬液,被抽水管带出,造成空桶现象,减小桶型基础的承载力,甚至发生失稳。

6 结论与建议

(1) 根据粒度结果分析,现代黄河水下三角洲粉土发生渗透变形的形式主要是流土;(2) 粉土的临界水力坡降比一般砂土的临界水力坡降约高 10 倍;(3) 粉土的临界水力坡降与其物理性质指标的关系为:

$$i_{cr} = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_w} + 1.63 \rho_d + 0.62 \rho_c - 20$$

(4) 在水利工程和海上桶型基础施工中应密切关注粉土的临界水力坡降和渗透性,避免工程事故发生。

参考文献

- 1 黄新生. 滩海油田建设中桶型基础的开发利用, 中国海洋平台, 1996, 11(5): 196 ~ 201
- 2 中华人民共和国水利电力部编. 土工试验规程 (SD 128-87). 北京: 水利水电出版社, 1989. 21 ~ 25
- 3 中华人民共和国水利电力部编. 土工试验规程 (SD 128-87) 说明书. 北京: 水利水电出版社, 1989. 83 ~ 90
- 4 钱家欢主编. 土力学. 南京: 河海大学出版社, 1988. 28 ~ 45
- 5 吴望一. 流体力学. 北京: 北京大学出版社, 1998. 35 ~ 39

DISCUSS OF SILT CRITICAL HYDRAULIC GRADIENT IN MODERN HUANGHE SUBAQUEOUS DELTA

FENG Xiu-li¹ MA Yan-xia¹ LIN Lin¹ XU Cong-liang²

(¹ Marine Geosciences College, Ocean University of Qingdao, 266003)

(² Hydrocommittee of Huanghe, Zhengzhou, 450000)

Received: Mar., 6, 2002

Key Words: Silt, Critical hydraulic gradient, Bucket foundation, Soil flow, Physical property index

Abstract

By laboratory test, this paper shows the critical hydraulic gradient of silt with different degree of compaction. From the results it can be found that silt's critical hydraulic gradient differs greatly with sandy soil's. In common the critical hydraulic gradient of sand is $i_{cr} = (\rho - \rho_w) / \rho_w$, and it can change from 0.8 to 1.5. However the critical hydraulic gradient of silt is 9.5 ~ 16.5. Meanwhile this paper analyses the forces acting on soil mass and considers the cohesion within grains, then analyses the cause of the results above, and finds the relation between critical hydraulic gradient and silt's physical property index.

(本文编辑: 李本川)