

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0433-08

原状非饱和 Q_3 黄土的土压力 原位测试和强度特性研究

李加贵^{1,2}, 陈正汉², 黄雪峰², 李 佳³

(1. 解放军后勤工程学院 研究生大队, 重庆 400016; 2. 解放军后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 400041;
3. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 为了揭示原状黄土的土压力的分布规律及其在开挖过程和浸水过程中的变化规律, 对兰州市一个高 18 m 的 Q_3 黄土边坡进行了现场试验, 量测了边坡的位移、土压力、基质吸力和含水率, 观测了该边坡的破坏过程, 同时进行了一组控制吸力的原状黄土的非饱和三轴剪切试验。研究结果表明: ①原状 Q_3 黄土的表观黏聚力和有效摩擦角与吸力之间均为非线性关系。②原状黄土边坡的土压力随着土坡开挖深度的增加而不断增大。边坡开挖结束后的土压力分布大致呈中间大, 两端小的三角形, 最大土压力位置在大约坡高的 1/3 位置处。与朗肯土压力理论计算结果相比, 实测黄土边坡的土压力远小于计算值。在浸水条件下, 非饱和黄土的边坡土压力增速较大, 浸水是边坡产生破坏的直接原因。

关 键 词: 非饱和黄土; 土压力; 吸力; 强度特性; 浸水试验; 原位测试

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

In-site test on earth pressure and saturating collapse test for unsaturated loess Q_3 on high slope

LI Jia-gui^{1,2}, CHEN Zheng-han², HUANG Xue-feng², LI Jia³

(1. The Graduate Student Administrant Department of Logistical University Engineering of PLA, Chongqing 400016, China;
2. Department of Architecture Engineering, Logistical University Engineering of PLA, Chongqing 400041, China;
3. College of Civil Engineering, Lanzhou Science and Technology University, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to obtain the distributed rule of the earth pressure for unsaturated loess Q_3 at the original state and its rules of changes during the process of excavating or saturating, an in-site test was done on an 18 m high slope, which included displacement, earth pressure, suction and the process of collapse. Meanwhile, a series of indoor triaxial shear tests on unsaturated loess Q_3 at the original state were also conducted. The outcome as follows: ①For the unsaturated loess Q_3 at the original state, the relation between the apparent cohesion and suction is nonlinear, between the effective friction angle and suction is nonlinear too. ②The earth pressure of unsaturated loess Q_3 at the original state increases with the excavating depth, which results in the shape of triangle at the end of excavation, high in the middle, low at the two ends; and the maximum earth pressure at the 1/3 height of the slope. Compared with the calculated result from Rankine's theory, the tested earth pressure is relatively lower, whereas it increases rapidly on the condition of saturation. In short, saturation is the direct cause of the slope collapse.

Key words: unsaturated loess; earth pressure; saturating; suction; in-site test

1 引 言

黄土在我国分布很广, 与国家发展战略(特别是西部大开发)和工程建设的关系极为密切^[1]。黄土是典型的非饱和土, 它的变形和强度随环境与气候条件而剧烈变化^[2], 被称为“难对付的土”^[3]。黄土在天然条件下含水率低、强度高、承载力大,

受水浸湿则强度骤降, 易发生滑坡, 如甘肃盐锅峡—八盘峡黑方台灌区 1968—1998 年共发生滑坡 52 次, 最大滑距达 385 m, 最大滑体为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$, 迫使村民 3 次搬迁^[4]。随着工程建设的发展, 深基坑工程大量涌现, 如甘肃省国税局综合楼基坑深 9.2 m^[5], 陕西省文化体育科技中心制冷塔的黄土基坑深 18 m^[6]。高切坡和深基坑的变形和支护引起了

收稿日期: 2009-03-16

第一作者简介: 李加贵, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事非饱和土理论与工程应用研究。E-mail: my707@live.com

众多学者的重视,其重点是确定作用在支护结构上的主要荷载——土压力。《建筑边坡支护技术规范》^[7]和《建筑基坑支护技术规范》^[8]对土压力都用朗肯理论或库仑理论计算,但计算的土压力大小和分布与实际情况相差很大。

现场监测是了解天然黄土中应力、水分、变形等物理量及其变化规律的重要手段。姜晨光等^[9]进行了大量的基坑周边土压力现场监测,以现场监测数据为依据,总结出了华北平原地下不同深度土压力(水平主应力)计算的统计型经验公式和基坑开挖导致的坑壁土体水平主应力损失的统计型经验公式。王钊等^[10]在山西运城应用张力计、热传导探头等吸力量测手段,对山西省运城地区黄土的吸力特性进行试验研究,测出了该黄土在脱湿过程的土-水特征曲线。

从已有资料中可知,对膨胀土现场吸力量测的工作较多^[11-13],有对基坑土压力及变形进行监测的工作^[14-15],还有对土压力计算模型进行分析

的^[16-17]。但对非饱和黄土吸力、变形或土压力进行现场量测的研究工作甚少。本文试图通过对一自然边坡进行垂直切削的方式,测试非饱和黄土边坡的土压力与分布形式,为进一步研究非饱和黄土的自然土压力计算理论提供试验资料;在切坡后进行了坡顶浸水,以观察由浸水引起的土压力增长、吸力的变化、渗透性及边坡的破坏过程。为了与土压力理论的预测结果进行比较,专门做了一组控制吸力的非饱和原状土的三轴排水剪切试验,研究了强度参数的变化规律。

2 试验概况

试验场地位于兰州理工大学后山,属于黄河南岸 III 级阶地自然坡地,土层较厚,属于风成的 Q₃ 黄土,黄土层为粉土及粉质黏土。该边坡自然高度为 18 m。场地在地下 20 m 深度范围内未见地下水。试验中取削坡范围内原状土,进行常规物理性质试验,其结果见表 1。

表 1 试验黄土物理性质指标
Table 1 Physical character indices of loess

取土深度 / m	土体相对 密度 G _s	含水率 w / %	干密度 ρ _d / (g/cm ³)	孔隙比 e ₀	孔隙率 n / %	饱和度 S _r / %	液限 w _L / %	塑限 w _p / %	塑性指数 I _p
1.5~15	2.71~2.72	6.1~9.4	1.24~1.33	1.04~1.18	47.2~54.2	14.5~24.5	26.2~30.6	16.6~18.5	9.6~12.5

为了研究非饱和黄土的土压力大小及分布情况,试验采用固定桩与开挖边坡间设置拉筋,开挖端采用螺栓及钢板锚固于边坡开挖面。锚固桩位于垂直开挖边坡影响范围外,用以固定拉筋,如图 1 示。拉筋的竖向间距为 1.5 m,共设置了 9 根拉筋,见图 2。拉筋上贴钢筋应变片,在筋受力拉伸时测得其应变,然后依据率定值换算为拉力,并认为钢筋受力近似等于土压力。使用国防科技大学湘银河数据采集仪进行了钢筋应变的数据采集。

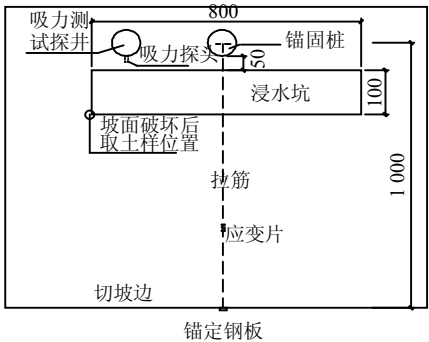


图 1 试验区域内平面布置图 (单位: cm)
Fig.1 Disposal in the plane area (unit: cm)

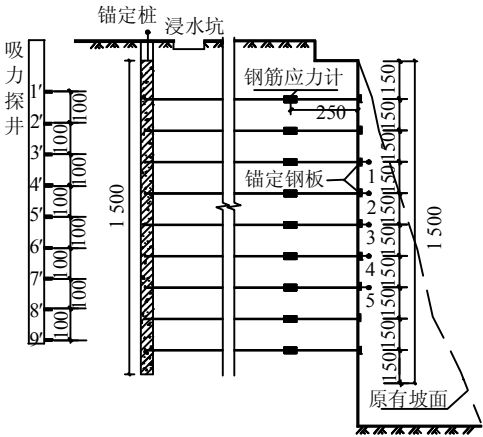


图 2 试验设置及原有坡面示意图 (单位: cm)
Fig.2 Disposal of the test and sketch map of inhere slope (unit: cm)

非饱和黄土的吸力是影响边坡稳定性的重要因素。为此,笔者对吸力进行了测试。试验用仪器为清华大学李未显教授研制的智能型土吸力现场自动记录量测装置。该设备主要由美国进口组件结合土工试验要求组成,主要包括 COMCR-10 数据自动采集系统模块、AM16 多路选择器、192 数据传送

模块、CR 操作显示仪等 (均为美国产品), 再配备精密加热继电模块、RS232 接口转换器、电源适配器、UPS 不间断电源。采用文献[18]介绍的由清华大学改进的 TS-II 系列中的 A 型探头。试验前, 在距浸水坑边缘处 0.5 m 处垂直向下 10 m 埋设了吸力测试探头。吸力探头沿探井井深方向, 从 2 m 开始, 每米设置一个, 如图 2 中所示的 1' ~ 9' 点。

试验过程分为两个阶段: 天然含水率状态测试阶段和浸水阶段, 其历时共 142 d。第 1 阶段分为挖桩孔、从自然坡面打洛阳铲至桩孔处、固定拉筋、灌注固定桩、开挖边坡等 5 步, 时间从 2007 年 11 月 20 日至 2008 年 3 月 25 日。采用分层垂直向下开挖法 (每层 1.5 m), 即先开槽固定拉筋 (加一定预应力, 数据处理时再消除), 然后在 1.5 m 以上向两侧削土, 用以测量第 1 层土压力强度。试验中, 第 1 层削至每侧 5 m, 第 1 根拉筋上力不再发生变化, 此时认为 5 m 为横向坡面上最大影响宽度。之后进行第 2 层土的开挖, 方法同上, 试验共开挖了 15 m 深。试验第 2 阶段为浸水阶段, 从 2008 年 3 月 26 日至 4 月 12 日止。浸水坑为 8 m × 1 m 的矩形区域, 深为 0.6 m (如图 1)。浸水目的主要是测量在浸水情况下土压力的变化及边坡浸水破坏的全过程。图 3、4 为开挖前和开挖过程中的边坡。



图 3 开挖前的边坡

Fig.3 Slope before excavated



图 4 开挖过程中的边坡

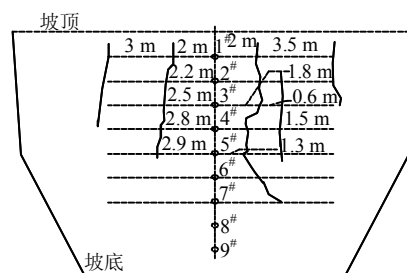
Fig.4 Excavating slope

试验区域情况如图 1 所示。坡顶浸水试验时间是从 2008 年 3 月 26 日下午至 2008 年 4 月 11 日下午, 共浸水 16 d。浸水期间无降雨。水头保持在 0.35 m, 发现坡面最大水平位移达 1.1 cm 后停水, 2008 年 4 月 12 日上午 11 时坡面垮塌。实时测量了土压力的变化情况、吸力随着浸水时间的变化情况、坡面的水平位移等。在坡面破坏后, 立即采集了浸水坑边滑动面下垂直范围内的土样, 进行含水率的测量。

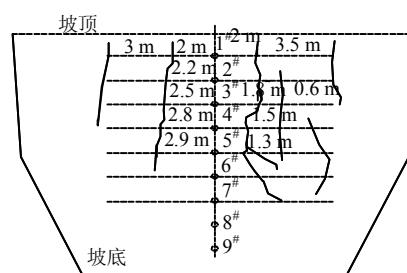
3 试验结果及分析

3.1 边坡破坏情形的描述

从 2008 年 3 月 26 日下午开始浸水, 到 2008 年 4 月 10 日, 亦即破坏前 2 d 描绘的边坡裂缝如图 5(a)所示; 4 月 12 日, 亦即破坏当天早晨描绘的边坡裂缝如图 5(b)所示, 裂缝明显可见, 最大处约有 3 mm 宽, 坡顶为散土, 裂缝不可见。12 日 11 时, 发生坍塌, 其连续过程是: 先是剪出口位置处土被推出, 之后坡顶土下沉, 再是浸水坑周边土开始滑出。其过程仅几秒钟时间, 坡面土水平向滑距达 38 m 远。图 6 为浸水试验情形, 图 7 为滑塌后的边坡。坡面裂缝是在浸水 12 d 后出现的, 之后水平方向位移出现较大增量。在破坏前一天, 增量最大。滑动面不是规则的圆弧状, 而是 3 个圆弧前后衔接的复合式滑动面, 呈现出坡顶部分较陡, 中部略缓, 下部较平坦的形式。在边坡浸水破坏后, 测量其滑动面, 三段圆弧式曲线结果如图 8 中所示。AB 段较陡, BC 段次之, CD 段比较平缓。其中 AB 段所在区域为浸水区, BC 段为湿润区, CD 段为天然含水率区。



(a) 4 月 10 日 11 点 20 分绘



(b) 4 月 12 日 9 点绘

图 5 破坏前裂缝图

Fig.5 Sketch map of slope's crack before destroy



图 6 浸水试验情形

Fig.6 Saturating test status



图 7 滑塌后的边坡

Fig.7 Slope after collapse

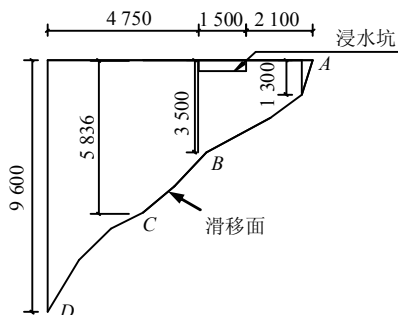


图 8 三段式滑动面曲线示意图 (单位: cm)

Fig.8 Sketch map of three segments slippage (unit: cm)

对于滑移面形成的原因, 主要应是 AB 、 BC 、 CD 段所在区域土的湿度状态与应力状态不同。 AB 段土的饱和度较高, 土的强度相对较低, 应是边坡滑动的牵引段; BC 段为主滑动段, 属于纯剪受力, 即受平行滑面的下滑力与滑床的阻滑力构成一对力偶作用; 而 CD 段为抗滑段, 受来自主滑段和牵引段的滑坡推力, 发生真正意义上的剪切破坏。

3.2 坡面位移

在试验过程中, 实时观测了坡面的水平位移。结果显示, 在浸水 10 d 后才有明显的位移。破坏前测得最大位移为 1.1 cm, 该值出现在 1 号位移观测点, 亦即第 3 根拉筋处。观测到的最大水平位移与施工经验上的警戒值相当。图 9 为坡面位移 m 与时间 T 的变化曲线。

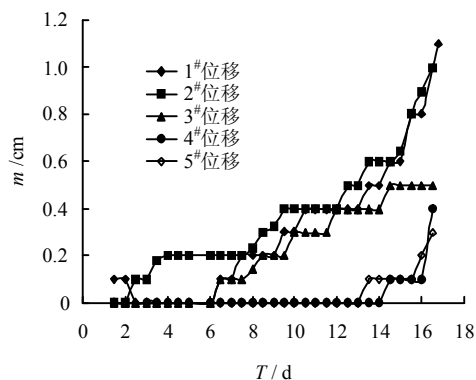
图 9 坡面位移 m 与浸水时间 T 曲线

Fig.9 Displacement and saturating time curve

3.3 吸力的变化

边坡浸水后, 边坡土中的吸力 s 发生规律性变化。图 10 为距离井口不同深度处探头的吸力随着时间的变化曲线。由图可见, 在开始浸水大约 24 h 后水就浸至 1 号探头 (2 m 深处), 而到达 2 号探头 (3 m 深处) 用时约为 75 h。在浸水至 2 m 深位置时 (1 号探头), 其吸力降幅度较大, 但在突降之后, 吸力下降速度放慢, 最终也没有降至 0。其余各探头也表现出此现象。试验中, 在浸水至 5、6 m 深后, 观察到吸力变化越来越慢。

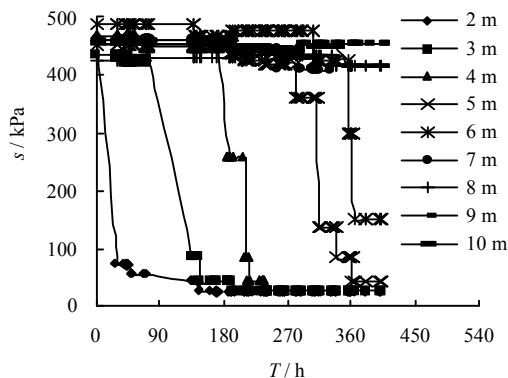


图 10 浸水期间实测吸力与时间关系

Fig.10 Measured suction and time during saturated

3.4 渗透性

影响黄土渗透系数的因素很多, 如孔隙比、颗粒组成、黏粒含量、结构特征等。另外, 试验区有大量的根孔及裂隙孔洞等。本次试验, 共浸水 16 d, 浸水深度为 8.1 m。可知, 浸水时期内竖向平均渗透速度为 5.86×10^{-6} m/s。从本试验的结果来看, 浸水 16 d 后, 水平向渗距约为 1.5 m。不可否认, 浸水区域内植被根系的存在是影响竖向及水平向渗透差异的因素之一。

对于非饱和土来说, 基质吸力的存在, 使边坡

的稳定安全系数维持在一个较高的水平; 当土体的渗透系数较小时, 尽管水入渗到土体深部比较困难, 但却能使浅层的土体迅速接近饱和, 使局部的孔隙水压力由负值变为正值, 基质吸力由此迅速降低到接近于 0, 造成边坡稳定安全系数的急剧下降, 从而导致边坡滑塌。

3.5 含水率等值线及浸水峰面

浸水 16 d 后, 边坡破坏, 立即从坑边向下垂直范围内取土样, 并在每米处由浸水坑向坡面方向间隔 0.2 m 取样, 绘制含水率等值线及浸水峰面于图 11。结果显示, 最大浸水深度为 8.1 m, 横向浸水最大范围为 1.45 m, 即浸水峰面距离坑边最大距离。浸润角约为 21.5° , 这说明, 水平方向的渗透系数远小于垂直方向的渗透系数, 土的峰面受垂直和水平方向土的渗透性质的影响。

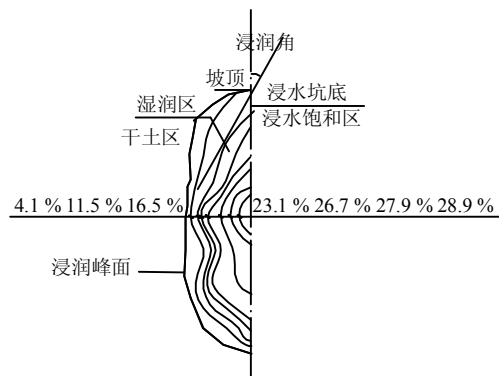


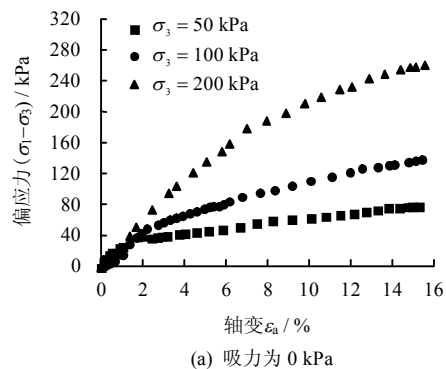
图 11 浸水试验的含水率等值线及浸润峰面
Fig. 11 Isolines of water content and peak value surface

3.6 原状非饱和黄土强度特性研究

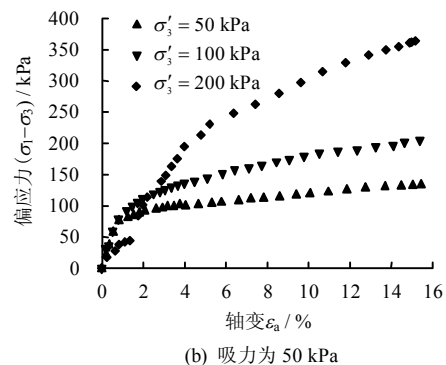
为了与朗肯土压力计算理论相比较, 取 7.5 m 深处土样进行非饱和三轴试验, 试验中控制吸力和净围压, 先固结, 再进行排水剪切。共做了 12 组试验, 其中 3 组为饱和三轴试验, 试样干密度为 1.32 g/cm^3 , 控制 12 个试样间天然干密度差值不超过 0.05 g/cm^3 ; 为了做控制不同吸力的三轴排水剪切试验, 9 个非饱和试样的初始含水率控制为 18%。试验仪器为后勤工程学院研制的非饱和土三轴仪, 关于仪器的介绍可参阅文献[19]。

非饱和三轴试验采用控制吸力和净围压为常数的固结排水剪切法, 在预定的净围压和吸力作用下固结至体变和排水稳定后开始剪切, 剪切速率为 0.0066 mm/min 。变形稳定和排水稳定标准分别为: 体变在 1 h 内不超过 0.0063 cm^3 , 即排水量在 2 h 内不超过 0.012 cm^3 。饱和三轴进行的是固结排水试验。

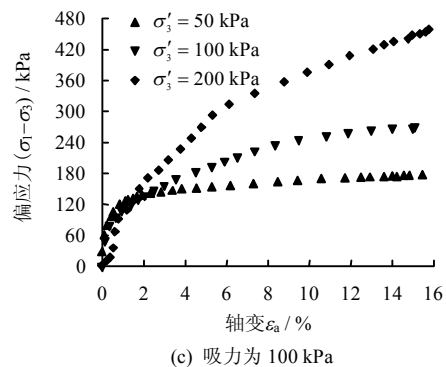
由试验结果, Q_3 黄土三轴剪切应力-应变性状基本呈现应变硬化的特征, 试样为塑性破坏, 见图 12。对塑性破坏, 取轴应变 $\varepsilon_a = 15\%$ 时的应力为破坏应力。12 个三轴剪切试验的破坏应力及强度参数列于表 2 中。



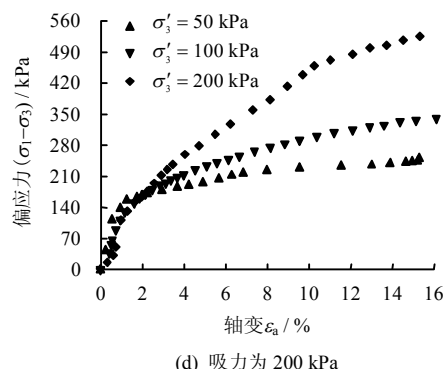
(a) 吸力为 0 kPa



(b) 吸力为 50 kPa



(c) 吸力为 100 kPa



(d) 吸力为 200 kPa

图 12 Q_3 黄土的应力-应变关系
Fig. 12 Stress-strain relationships of loess Q_3

表 2 试验方案及结果
Table 2 Test schemes and results

u_a /kPa	$(\sigma_3 - u_a)$ /kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /kPa	p_f /kPa	ξ /kPa	$\tan \omega$	c /kPa	φ /(°)
0	50	71.00	73.67				
	100	138.85	146.28	6.60	0.89	3.12	22.82
	200	262.00	287.33				
50	50	132.51	94.17				
	100	201.53	167.18	35.12	1.01	16.67	25.66
	200	360.00	320.00				
100	50	174.20	108.07				
	100	267.03	189.01	52.48	1.13	25.10	28.41
	200	446.95	348.98				
200	50	244.10	131.37				
	100	335.60	211.87	95.05	1.14	45.48	28.50
	200	518.00	372.67				

注: u_a 为孔隙气压力, $\sigma_3 - u_a$ 为净围压, $\sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力。

强度参数可由 p - q 平面内的强度包线求得, 由图 13 可知, 吸力相同的一组试验点落在一条直线上, 可用下式表达:

$$q_f = \xi + p_f \tan \omega \quad (1)$$

式中: ξ 和 $\tan \omega$ 分别是直线的截距和斜率, 用最小二乘法确定, 其值列于表 2 中。土的内摩擦角 φ 可从下式求得^[19]

$$\sin \varphi = \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega} \quad (2)$$

而土的总黏聚力 c 则由下式给出^[19]:

$$c = \frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \xi \quad (3)$$

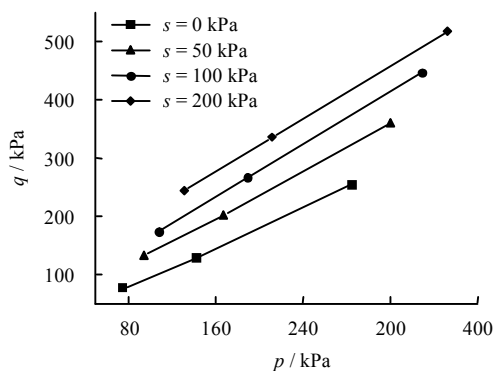


图 13 p - q 平面内的强度包线

Fig.13 Strength envelopes in p - q plane

由式 (2)、(3) 可计算出土的强度参数 c 和 φ , 其值列于表 2 中。从表中可以看出, 控制吸力试验的黏聚力 c 随吸力增大而增大, 内摩擦角 φ 的变化也是随着吸力的增大而增大, c - s 关系如图 14 所示, φ - s 关系如图 15。

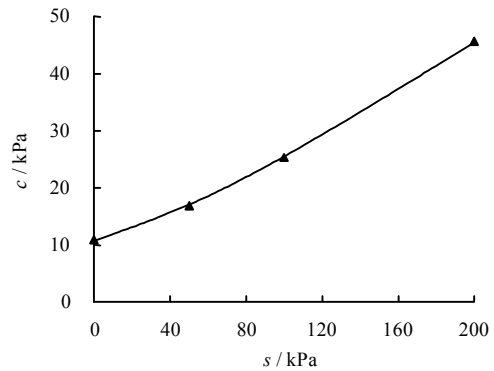


图 14 c - s 关系曲线

Fig.14 Relationship between c and s

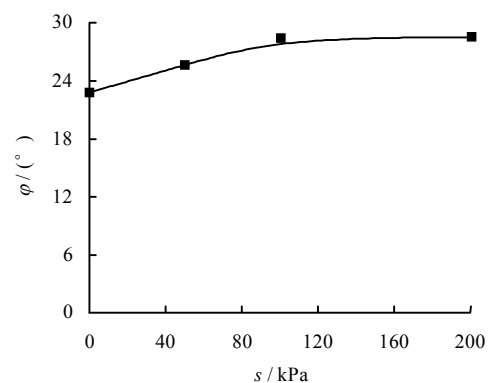


图 15 φ - s 关系曲线

Fig.15 Relationship between φ and s

在试验所做的吸力范围内, c 随着吸力的变化基本呈线性增加 (图 14); 由此可以得到该试验土的吸力摩擦角。有效内摩擦角 φ 在试验所做的吸力范围内不能取常数, 但可取吸力为 0 kPa 时, 即等于饱和土的有效内摩擦角 φ' 。采用 Fredlund 等^[20]提出的非饱和土抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b + (\sigma_n - u_a)_f \tan \varphi' \quad (4)$$

式中: c' 为土的有效黏聚力; $(u_a - u_w)$ 为吸力; $\tan \varphi^b$ 为因吸力的增加而引起抗剪强度增加的速率; $(\sigma_n - u_a)_f$ 为破坏时的法向压力; φ' 为土的有效内摩擦角。将图 10 中数据点进行线性拟合, 得到本试验用土的强度参数: $c' = 4.46$ kPa, $\varphi^b = 11.7^\circ$ 。

由图 15 可知, 原状非饱和 Q₃ 黄土的有效内摩擦角与吸力的关系是非线性的, 在低吸力范围内 (0~100 kPa), 有效内摩擦角变化幅度较大, 从吸力为 0 kPa 的 22.82° 增大至吸力为 100 kPa 时的 28.41°。当吸力超过 100 kPa 后, 有效内摩擦角基本保持不变。这一特点与重塑土的情况是不同的, 由文献^[19]可知, 重塑非饱和黄土的有效内摩擦角

不随吸力改变, 是常数。

3.7 浸水前后的土压力变化

对每一根拉筋来说, 对坡面的约束范围, 竖向为 1.5 m, 横向影响范围可从坡面的裂缝及边坡滑塌后的宽度进行分析取值 (见图 5、7), 本试验中应取为 7 m, 即以拉筋为中心, 两边各取 3.5 m, 故在计算中横向影响范围取为 7 m。在土压力 (用 p_a 表示) 的分析计算中, 均考虑了这种约束范围的影响, 即 $p_a = \text{钢筋拉力} / \text{受约束区面积}$, 受约束区面积为 $1.5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 。

自然含水率状况下, 随着开挖深度的增加, 土压力逐渐增大, 但水平位移几乎没有变化, 一直维持在 3 mm 以内。图 16 为开挖过程中, 1~9 号测点土压力 p_a 与时间 T 的变化曲线, 即为土压力的变化规律。

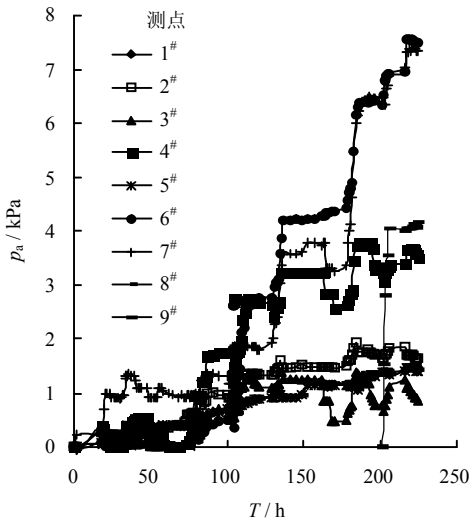


图 16 天然含水率状态下切坡时间与土压力强度关系
Fig.16 Excavating time and earth pressure during the natural water content

图 17 所示为切坡完成后土压力包线。与朗肯土压力理论、Fredlund 公式计算值进行对比, 计算中采用了非饱和三轴试验的结果。朗肯公式为

$$p_a = \gamma z k_a - 2c' \sqrt{k_a} \quad (5)$$

Fredlund 公式为

$$p_a = \gamma z \frac{1}{N_\phi} - 2c' \frac{1}{\sqrt{N_\phi}} - 2(u_a - u_w) \tan \phi^b \frac{1}{\sqrt{N_\phi}} \quad (6)$$

式中: $1/N_\phi = k_a = \tan^2(45^\circ - \phi'/2)$, 由图 10, 实测基质吸力的初值在各点均在 300 kPa 以上, 因此, 在采用 Fredlund 公式计算时基质吸力取 300 kPa, c' 、 ϕ^b 采用室内三轴的结果, ϕ' 可取为 22.82° 。

由实测及公式计算可知, 最大土压力的出现位置在坡高的 1/3 处。朗肯理论的计算值远大于实测值。采用 Fredlund 理论计算时, 在 11.24 m 以上为裂缝, 故不存在土压力; 在 11.24 m 以下时, 土压力值大于实测, 这是因公式没能考虑黄土结构性的影响。可见, 土压力的大小不仅受吸力的影响, 还与非饱和黄土的结构性有很大关系。在坡顶沿至 1/3 坡高以上, 实测浸水前后的土压力与朗肯土压力的分布有一定的相似性。但在坡底至 1/3 坡高处二者分布不同, 实测值开始内敛, 而朗肯值仍线性增大。

浸水导致了土坡含水率的增加, 浸水坑区域内土饱和度提高, 相应的强度降低, 对边坡的稳定性产生了影响, 最终导致边坡的滑塌, 这反映在实测土压力的增大。由此可见, 黄土的结构性对土压力的影响是很大的。图 17 中绘出由浸水后的土压力曲线, 与朗肯理论计算值进行了对比。由图可以看出, 由于浸水的原因, 土压力增加较大, 是边坡产生破坏的直接原因。在剪出口位置上, 亦即边坡的 1/3 高处土压力高达 30.8 kPa。

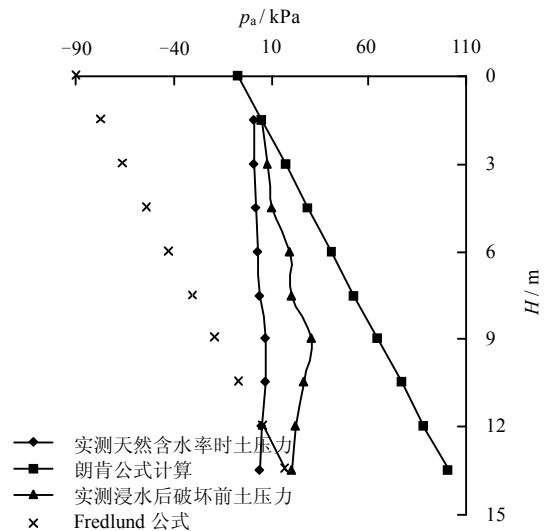


图 17 实测天然含水率状态下及浸水后土压力与现有理论计算对比

Fig.17 Comparison between the test pressures and computed results using present theory

4 结 论

(1) 在天然含水率状态下, 对非饱和 Q_3 黄土边坡开挖过程中, 边坡位移量较小; 坡面没有肉眼可见裂缝; 原状黄土边坡的土压力随着土坡开挖深度的增加而不断增大, 但土压力的数值很小, 至开挖完毕仍远小于朗肯公式的计算值; 边坡开挖结束后的土压力分布大致呈中间大、两端小的三角形, 最大土压力位置在大约坡高的 1/3 位置处。

(2) 在浸水条件下至边坡破坏前的过程中, 边坡位移量不断增大, 至破坏前达到 1.1 cm, 水平位移与工程经验的警戒值相当; 裂缝随浸水时间开展, 破坏前裂缝明显可见, 宽度约为 3 mm; 在浸水初期, 吸力减小较快, 但减小速度随着浸水时间迅速降低; 边坡土压力随浸水时间增大, 至边坡破坏前仍小于朗肯公式计算值, 浸水是边坡产生破坏的直接原因; 土压力的分布及最大值位置没有变化。

(3) 原状非饱和 Q_3 黄土黏聚力随吸力的增加而增大, 可用线性关系描述; 有效内摩擦角与吸力的关系是非线性的, 这一结果与重塑黄土的强度特性是大不相同的。

参考文献

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1996.
- [2] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 非饱和土与特殊土研究的最新进展[C]//膨胀土处治理论、技术与实践——全国膨胀土学术研讨会文集. 北京: 人民交通出版社, 2004: 36—49.
- [3] FREDLUND D G, RAHADJO H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 王家鼎. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999.
- [5] 吴克彬. 对深基坑悬臂式支护结构计算方法的新探讨[C]//湿陷性黄土研究与工程. 北京: 中国建筑出版社, 2001: 428—430.
- [6] 张浩, 杨琦. 土钉支护技术在黄土场地深基坑工程中的应用[C]//湿陷性黄土研究与工程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 419—427.
- [7] 郑生庆, 郑颖人, 李耀刚, 等. GB 50330—2002 建筑边坡支护技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 黄强, 杨斌, 李荣强, 等. JGJ120—99 建筑基坑支护技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [9] 姜晨光, 贺勇, 刘波, 等. 基坑开挖坑壁土压力原位监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1874—1876.
JIANG Chen-guang, HE Yong, LIU Bo, et al, Field observation and analysis on soil pressures of pit walls in foundation pit excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(Supp.): 1874—1876.
- [10] 王钊, 骆以道, 肖衡林. 运城黄土吸力特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 51—54.
WANG Zhao, LUO Yi-dao, XIAO Heng-lin. Experimental study on suction characteristics of loess in Yuncheng Region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 51—54.
- [11] 黄绍铨, 柯尊敬, 范秋雁. 天然膨胀土边坡现场气象、吸力、含水量、土层变形综合观测[C]//中加非饱和土学术研讨会论文集. 武汉: 中国土木工程学会土力学与基础工程分会, 1994: 184—193.
- [12] 汤明高, 许强, 黄润秋. 滑坡体基质吸力的观测试验及变化特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 355—362.
TANG Ming-gao, XU Qiang, HUANG Run-qiu. Experiment and analysis of suction of unsaturated soil in slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 355—362.
- [13] 吴礼舟, 黄润秋, 胡瑞林. 膨胀土自然边坡吸力和饱和度量测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 343—346.
WU Li-zhou, HUANG Run-qiu, HU Rui-lin. Measurement of suction and saturation of natural expansive soil slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(4): 343—346.
- [14] 林国根. 基坑工程支护结构受力和变形特性试验研究[J]. 岩土工程界, 2005, 8(7): 63—66.
- [15] 刘特洪, 包承纲. 刁南灌区膨胀土渠道滑坡过程的监测和分析[C]//中加非饱和土学术研讨会论文集. 武汉: 中国土木工程学会土力学与基础工程分会, 1994: 177—183.
- [16] 龚慈, 魏纲, 徐日庆. RT 模式下刚性挡墙土压力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1588—1592.
GONG Ci, WEI Gang, XU Ri-qing. Earth pressure against rigid retaining wall rotating about top[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1588—1592.
- [17] 宋林辉, 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移的土压力模型在横向承载桩分析中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1035—1039.
SONG Lin-hui, MEI Guoxiong, ZAI Jin-min. Application of soil pressure model considering displacements to lateral loaded piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1035—1039.
- [18] 徐捷, 王钊, 李未显. 非饱和土的吸力量测技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊): 905—909.
XU Jie, WANG Zhao, LI Wei-xian. The measuring techniques of unsaturated soil suction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 905—909.
- [19] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82—90.
CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(1): 82—90.
- [20] FREDLUND D G, H. RAHADJO. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.