

非饱和原状黄土垂直高边坡潜在土压力原位测试 试验研究

黄雪峰^{1, 2}, 李 佳¹, 崔 红¹, 张建华¹, 邱 爽¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 后勤工程学院建筑工程系, 重庆 400041)

摘 要: 通过现场大型原位测试试验, 对非饱和原状黄土垂直高边坡土压力分布特征进行现场实测研究。试验采用钢筋拉结, 钢筋后端锚固在距边坡滑移面以外较远的锚固桩上, 其前端在边坡邻空面边界处, 采用钢板及螺栓固定。本次试验切坡高度为 14.5 m, 切坡由上至下分段进行, 通过安放在拉筋上的测力计测量拉筋所受的拉力, 通过换算, 得出前端钢板上所受到在切坡过程中土体应力释放所产生的土压力, 从而得到不同切坡深度各测试点的土压力大小及分布特征。试验结果表明: 实测最大土压力强度在边坡高度 H 的 $2/3$ 处, 在此高度以上土压力强度接近正三角形分布, 以下土压力强度迅速减小, 在坡脚处接近为零, 呈倒三角形分布, 与经典的朗肯土压力和库仑土压力分布是不相同的。

关键词: 非饱和原状黄土; 高边坡; 土压力分布

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)04-0500-07

作者简介: 黄雪峰(1960-), 男, 副教授, 博士, 主要从事特殊土与非饱和土、湿陷性黄土、桩基工程等方面的研究与设计工作。E-mail: hxfen60@163.com。

Distribution characteristics of earth pressure for unsaturated intact loess

HUANG Xue-fen^{1, 2}, LI Jia¹, CUI Hong¹, ZHANG Jian-hua¹, QIU Shuang¹

(1. Department of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Department of Civil Engineering,

Logistic Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: On the basis of the object and problems in researches on earth pressure of unsaturated intact loess, field tests are performed, in which one end of a tie bar is anchored in a pile that is at the stable region of a slope, and the other end is anchored in the free force of the slope by steel plate and screw. The height of the vertically cut slope is 14.5 m. Slope cutting is performed as segmentation from top to bottom of the undisturbed slope. The tension of the tie bar is measured so as to calculate the earth pressure on the steel plate. The test results indicate that the acting position of the maximum earth pressure strength is at one-third of the height of the vertically cut slope. When the point of application is higher than one-third of the height of the vertically cut slope, the distribution of earth pressure exhibits an approximate triangle, and when the point of application is lower than one-third of the height of the vertically cut slope, the earth pressure strength decreases as the point of height increases. The test results are obviously different from the Rankine's and Coulomb's classical theories for earth pressure.

Key words: unsaturated intact loess; high slope; earth pressure distribution

0 引 言

我国西北黄土多分布在干旱地区, 常年少雨且蒸发量极大。在干旱的环境中, 黄土形成了以多孔隙、竖向节理发育、土粒之间以胶结结构为基本特征的第四纪沉积物。在天然湿度下它的压缩性较低, 强度较高^[1]。非饱和原状黄土的土压力是土力学中的一个难题, 其分布特征是支挡结构设计的关键问题, 许多学者为土压力的研究做出了很大的努力^[2-6]。主要研究方法大多采用模型试验:

(1) Terzaghi(1934)的大型挡土墙试验, 揭示了土压力的大小与墙体的位移形式及位移量都有关的现象^[2]; Fang、周应英等人^[3-5]研究了墙体不同运动形式下, 主动土压力强度沿墙高的分布及其作用点的位置; Narain、Fang、徐日庆等人^[6-8]研究了墙体不同运动形式下, 被动土压力强度沿墙高的分布及其作用点的位置问题, 在刚性挡土墙后面回填砂土或压实黏土用

土压力盒量测主动土压力, 在试验过程中若某点土体产生塑性变形, 但挡墙为刚性, 会限制土体变形, 使土体产生应力重分布, 并且土压力变化与挡墙的变形、位移形式有关, 测出的土压力结果与土体在自由变形条件下, 所测得到的原状土土压力分布特征不一致。

(2) 岳祖润等人^[9]用重塑的压实黏性填土做挡土墙压力的离心模型试验, 其模拟结果与经典的土压力分布不同, 成中间大两头小的形式, 但其为重塑土, 实验结果与原状还有一定的差别。非饱和土力学自1993 成为一门相对独立的学科后, 由于其理论的复杂性、测试手段的滞后, 至今发展很慢。Fredlund 通过非饱和土的强度理论推导了扩展的朗肯土压力^[10], 有些学者运用此理论, 用非饱和土的室内试验得出的结论做了一些土压力对比性的计算^[11], 计算结果与经典土压力的结论有些差异。但是对于非饱和原状土土压力实验研究的资料则非常少; 此次试验是在土压力测试方法中的一次新的尝试, 在国内外均属罕见, 也未见相应的有关文献资料。

1 试验概况

1.1 试验场地地质地貌条件

试验场地位于甘肃省兰州市七里河区兰工坪, 地处黄河南岸Ⅲ级阶地。主要土性为马兰黄土, 黄土层厚度大于 60 m, 未见地下水; 所选试验场地山体边坡为天然斜坡, 坡度为 60°~70°, 垂直高度大于 15 m, 其坡顶、坡面无明显节理, 并且坡顶与坡脚均为平整场地, 原天然边坡的地貌特征见图 1。



图1 试验原边坡

Fig. 1 Undisturbed slope for experiment

1.2 试验场地土的物理力学性质

该场地黄土为干燥环境下的风成黄土, 为原生的 Q₃ⁿ 马兰黄土, 粒组成分以粉土为主, 土质均匀, 具有大孔隙, 易溶盐含量高, 边坡顶部 1 m 范围内为植物根系活动土层。黄土层土质均匀, 成灰黄—褐黄色,

土质疏松, 天然含水率 $w = 6.6\% \sim 9.4\%$, 天然干密度 $\rho_d = 1.24 \sim 1.33 \text{ g/cm}^3$, 孔隙比 $e_0 = 1.04 \sim 1.14$, 具有强烈的湿陷性, 最大自重湿陷系数为 $\delta_{zs} = 0.110$, 自重湿陷量为 990 mm, 为Ⅳ级(严重)湿陷性, 黏聚力 $c = 10.0 \sim 22.0 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $j = 20^\circ \sim 26^\circ$, 其试验边坡土体的主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 土的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil

取土深度 /m	含水率 w /%	天然密度 ρ /(g·cm ⁻³)	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	孔隙比 e_0	饱和度 S_r /%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
1.5	6.6	1.32	1.24	1.18	15.1	10.0	26
3.0	6.1	1.35	1.27	1.14	14.5	12.0	22
4.5	8.3	1.38	1.27	1.14	15.9	14.0	23
6.0	8.3	1.42	1.31	1.07	21.0	17.0	24
7.5	9.0	1.42	1.30	1.09	22.5	18.0	25
9.0	8.5	1.41	1.30	1.09	21.2	20.0	22
10.5	8.1	1.39	1.29	1.10	20.0	21.0	23
12.0	8.4	1.44	1.33	1.04	21.9	20.0	20
13.5	7.8	1.43	1.33	1.04	20.3	22.0	22
15.0	9.4	1.45	1.33	1.04	24.5	19.0	24

1.3 测试方法

本次试验为保持土体的原状性, 采用人工作业。在距边坡临空面 11 m 处(远离滑移面), 开挖直径为 800 mm 的人工成孔锚固桩, 桩长 14 m。用洛阳铲在原边坡面上打水平孔, 孔径 100 mm, 水平孔与锚固桩和切坡保持垂直, 为消除拉筋及钢筋应力计在孔内与土体产生摩擦力, 孔内先放置直径为 100 mm 的 PVC 管(如图 2), 在管内插入拉筋和钢筋应力计, 如图 3, 4。从上至下共 9 个水平孔, 孔的垂直间距为 1.4 m。第一个水平孔距坡顶为 2 m, 如图 6。



图 2 PVC 管

Fig. 2 PVC tube

拉筋选用直径为 22 mm 的Ⅱ级钢, 钢筋一端固定在锚固桩上视为固定端, 在临空面的另一端用 0.1 m² 钢板及螺栓固定, 见图 5。



图 3 拉筋与钢筋应力计焊接成型

Fig. 3 Tei bar welded with rebar stress gauges



图 4 钢筋应力计插入 PVC 管

Fig. 4 Rebar stress gauge inserted into PVC tube



图 5 临空面固定端

Fig. 5 Anchored end of free force arrangement

本次试验要点：把原始斜坡切成垂直边坡，每切一段采用钢板和螺栓对拉筋进行原始固定，随着下一段切坡进行，由于土体应力释放，便会对钢板产生土压力，土压力通过钢板转化为拉筋拉力，其大小通过钢筋应力计来量测，并通过智能数据采集系统对数据进行自动连续定时采集，可通过 GPRS 无线网络系统进行数据传输。在锚固桩的桩顶、坡顶、坡面上下不

同深度均设置有水平位移观测点，观测切坡过程中的水平向位移。此次试验与刚性挡土墙测定土压力的试验方法最大的区别在于由于各个测点相对独立，使边坡临空面土体自由变形，能真实的反映原状土边坡土压力强度，试验布置见图 6。

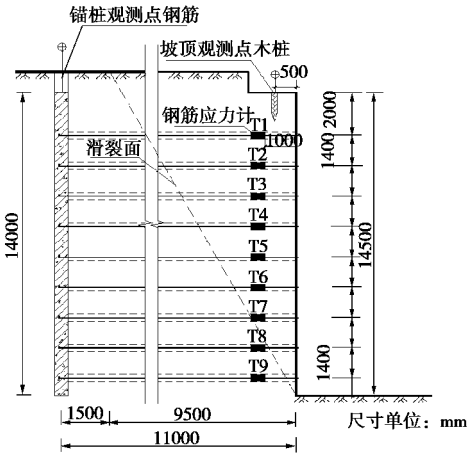


图 6 试验布置详图

Fig. 6 Experimental arrangement

切坡时，首先以安放有钢筋应力计的垂直断面为中心，向左右两侧切槽，切槽深度 14.5 m，宽度 1 m，将拉筋临空面端用螺栓做应力零点固定。再由槽中间向两侧按每层切坡高度为 1.4 m 进行切坡，当此层向两侧扩到某一宽度时，此层的应力计和此层以上各点的应力计数据不再发生变化时，此层的切坡宽度就可认为是对土压力不再有影响的宽度。根据实测此宽度的平均值约 4 m。

2 土压力实测结果及分析

2.1 土压力强度计算与修正

钢板上实测土压力强度由下式计算：

$$S_{al} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中 S_{al} 为测点处钢板上的土压力强度； F 为钢筋应力计测得的拉力； A 为钢板的面积 0.1 m^2 ；土中应力传递会发生扩散现象，拉筋承受的拉力并不仅由钢板面积的水平土体所产生，而是由钢板后近似锥形的土体所产生，如图 7 (a)，故需对钢板上的土压力强度进行修正。当切坡完成时，坡顶位移只有 1.0 mm，边坡的位移非常小，在此种情况下边坡的变形为小变形，假设土体为均质、各向同性的半无限空间的线性变形体，应力在土中的扩散按弹性理论计算。拉筋所受的拉力可假设成半无限空间表面作用的一个集中力 F ，由半平面表面受法向集中力作用的解^[12]：

$$\left. \begin{aligned} s_x &= -\frac{F}{2\pi r^2} \left\{ \frac{3x^2z}{r^3} - (1-2n) \left[\frac{z}{r} - \frac{r}{r+z} + \frac{x^2(2r+z)}{r(r+z)^2} \right] \right\}, \\ s_y &= -\frac{F}{2\pi r^2} \left\{ \frac{3y^2z}{r^3} - (1-2n) \left[\frac{z}{r} - \frac{r}{r+z} + \frac{y^2(2r+z)}{r(r+z)^2} \right] \right\}, \\ s_z &= -\frac{3Fz^3}{2\pi r^5} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

粉质黏土取 $\nu=0.25$, $r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$, 可计算在 Z 轴上 $Z=z_0$ 时, $\sigma_z=0$; 在 $Z=z_0$ 的 XOY 平面上当 $Y=y_0$ 、 $X=x_0$ 时, $\sigma_y=0$ 、 $\sigma_x=0$, 从而得到应力扩散范围, 把应力扩散的锥形体用与其同等长度的矩形等体积换算, 换算得到的矩形 XOY 面上的截面积与钢板面积的比值就为修正系数 β 如图 7 (c), 由计算得 $\beta=0.04$, 故得修正后的边坡土压力强度:

$$s_a = b \cdot s_{al} \quad , \quad (3)$$

在修正过程中没有考虑边坡的滑移面对应力扩散范围的影响及土的非均质性, 用弹性理论计算得出的扩散面积偏大, 修正系数偏小。

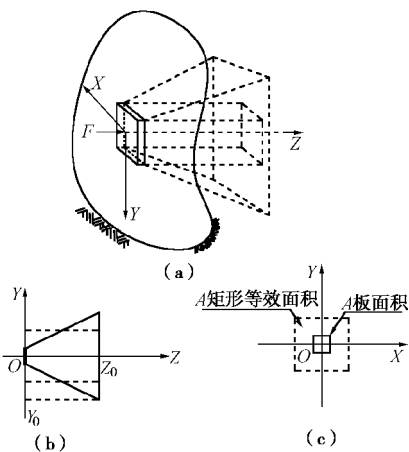


图 7 等效面积换算示意图

Fig. 7 Equivalent area of conversion

2.2 土压力随切坡深度的变化特征

切坡过程中各深度土压力强度分布曲线特征见图 8~15, 实测土压力强度变化值见表 2。从各图中可以看出: 在切坡过程中土压力强度分布曲线一直保持着上、下部小, 中下部大的抛物线形状; 在每次切坡完成的高度中, 中下部土压力强度分布曲线有明显拐点, 随着切坡高度的增加, 土压力分布的峰值点由圆滑变得尖锐突出。在工况一(切坡深度为 4.8 m), 土压力强度分布曲线开始成类似抛物线形状, T1 和 T3 土压力小, T2 土压力较大。在工况二时(切坡深度为 6.2 m), T2、T3 的土压力增大, T3 土压力强度约增加了 0.403 kPa。

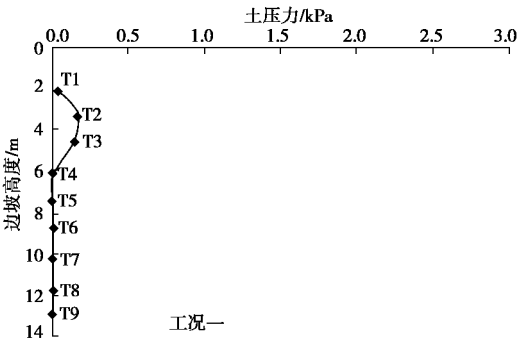


图 8 切坡深度为 4.8 m 土压力分布

Fig. 8 Earth pressure distribution of the depth of the cut slope at depth of 4.8 m

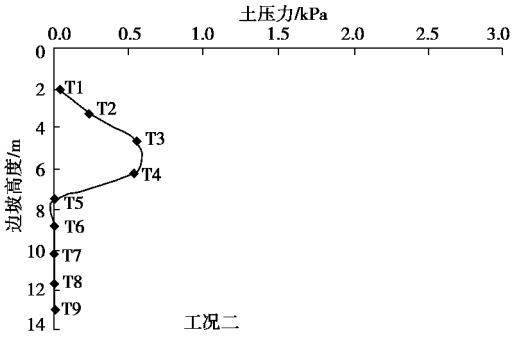


图 9 切坡深度为 6.2 m 土压力分布

Fig. 9 Earth pressure distribution for the cut slope at depth of 6.2 m

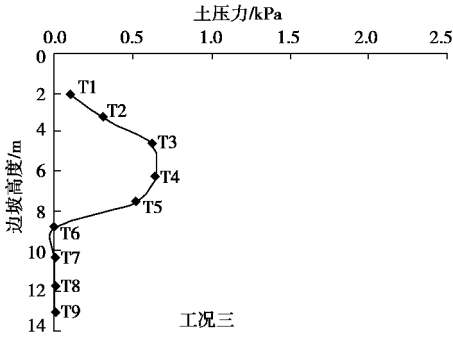


图 10 切坡深度为 7.6 m 土压力分布

Fig. 10 Earth pressure distribution for the cut slope at depth of 7.6 m

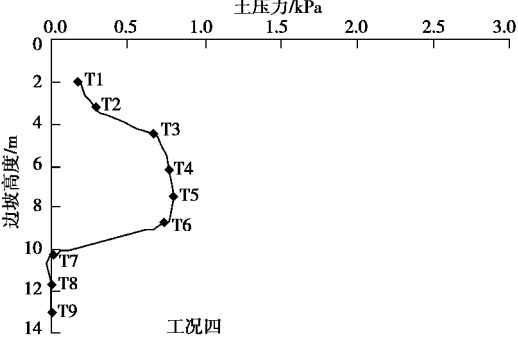


图 11 切坡深度为 9.0 m 土压力分布

Fig. 11 Earth pressure distribution for the cut slope at depth of 9.0 m

表 2 实测土压力强度变化统计表

测试阶段	测试点								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
工况一（切坡深度为 4.8 m）	0.037	0.161	0.142	0	0	0	0	0	0
工况二（切坡深度为 6.2 m）	0.038	0.232	0.545	0.532	0	0	0	0	0
土压力强度增量	0.001	0.071	0.403	0.532	0	0	0	0	0
工况二（切坡深度为 6.2 m）	0.038	0.232	0.545	0.532	0	0	0	0	0
工况三（切坡深度为 7.6 m）	0.096	0.306	0.612	0.634	0.506	0	0	0	0
土压力强度增量	0.058	0.074	0.067	0.102	0.506	0	0	0	0
工况三（切坡深度为 7.6 m）	0.096	0.306	0.612	0.634	0.506	0	0	0	0
工况四（切坡深度为 9.0 m）	0.177	0.310	0.664	0.765	0.795	0.737	0	0	0
土压力强度增量	0.081	0.004	0.052	0.131	0.289	0.737	0	0	0
工况四（切坡深度为 9.0 m）	0.177	0.310	0.664	0.765	0.795	0.737	0	0	0
工况五（切坡深度为 10.4 m）	0.419	0.589	0.853	1.037	1.262	1.417	1.292	0	0
土压力强度增量	0.242	0.279	0.189	0.272	0.467	0.680	1.292	0	0
工况五（切坡深度为 10.4 m）	0.419	0.589	0.853	1.037	1.262	1.417	1.292	0	0
工况六（切坡深度为 11.8 m）	0.427	0.603	0.889	1.177	1.411	1.717	1.638	0.443	0
土压力强度增量	0.008	0.014	0.036	0.140	0.149	0.300	0.346	0.443	0
工况六（切坡深度为 11.8 m）	0.427	0.603	0.889	1.177	1.411	1.717	1.638	0.443	0
工况七（切坡深度为 13.2 m）	0.467	0.682	0.936	1.328	1.675	2.362	2.422	1.366	0.404
土压力强度增量	0.04	0.079	0.047	0.151	0.264	0.645	0.784	0.923	0.404
工况七（切坡深度为 13.2 m）	0.467	0.682	0.936	1.328	1.675	2.362	2.422	1.366	0.404
工况八（切坡深度为 14.5 m）	0.538	0.696	0.966	1.365	1.756	2.592	2.665	1.973	1.571
土压力强度增量	0.071	0.014	0.030	0.037	0.081	0.230	0.243	0.607	1.167

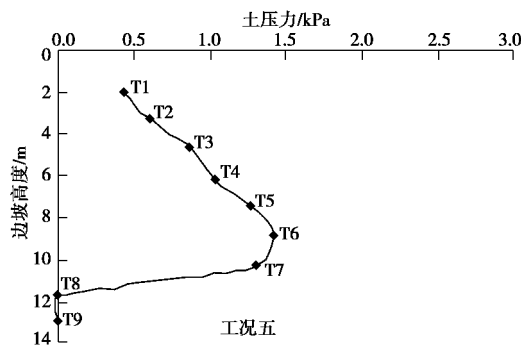


图 12 切坡深度为 10.4 m 土压力分布

Fig. 12 Earth pressure distribution for the cut slope at depth of 10.4 m

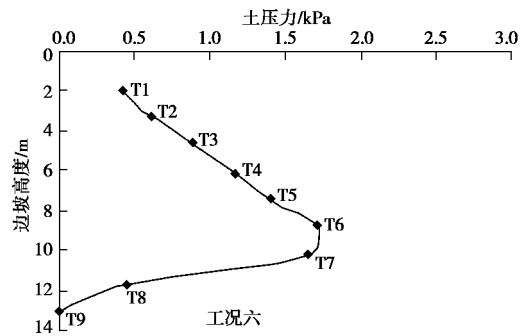


图 13 切坡深度为 11.8 m 土压力分布

Fig. 13 Earth pressure distribution for the cut slope at depth of 11.8 m

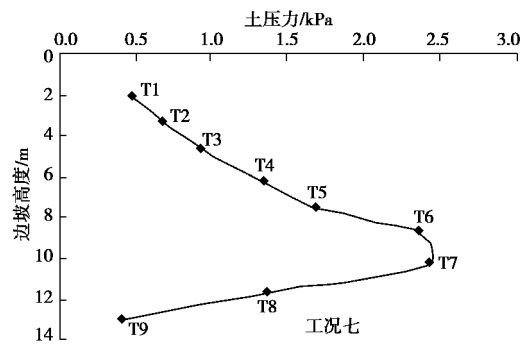


图 14 切坡深度为 13.2 m 土压力分布

Fig. 14 Earth pressure distribution for the cut slope at depth of 13.2 m

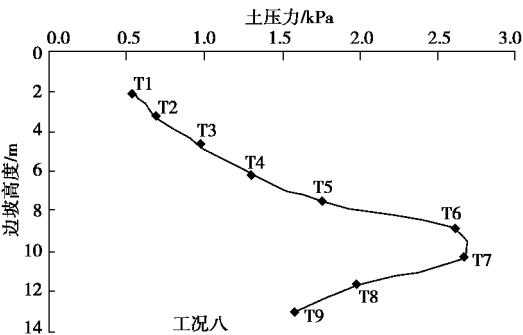


图 15 切坡深度为 14.5 m 土压力分布

Fig. 15 Earth pressure distribution for the cut slope at depth of 14.5 m

当从工况四到工况五，切坡深度在 9.0~10.4 m，

T1 到 T6 点的土压力强度的增加速率是前四工况的 3~4 倍, 土压力强度增速加快, 从工况四到工况五得到土压力强度的变化情况可知, 9~10 m 的边坡高度是土压力变化的分界点, 若边坡总高度小于 9 m, 土压力很小且土压力强度随着边坡高度增加的速率较慢, 但若边坡高度大于 10 m 时边坡各点的土压力强度变化速率迅速增大, 并且在 10.4 m 时, 边坡各点的土压力强度是在 9.0 m 时的 1.3~2.3 倍, 最大土压力强度差为 1.292 kPa。工况六到工况八, 切坡深度 11.2 m~14.5 m, 最大土压力强度是以 2.3 倍的速率在增加。土压力强度变化与切坡深度成非线性关系。

2.3 实测土压力分布特征及机理分析

在工况八(切坡到 14.5 m)时, 土压力的分布形态为上下部小, 中偏下部大, 最大土压力强度深度在 10 m 左右, 其值为 2.665 kPa, 约在边坡总高度的 2/3 处。在边坡高度 2/3 以下土压力迅速减小, 由此可见边坡底部土体对坡脚土体有明显的约束作用。在切坡过程中最大土压力强度作用点不断下移, 但其位置一直保持在切坡高度的 2/3 左右。在边坡高度的 2/3 以上, 土压力随着边坡高度的增加而增加; 在 2/3 处以下, 土压力随着边坡高度的增加而减小, 且减小的速度大于增加的速度, 边坡各点土压力强度随着边坡高度的增加成非线性变化。在切坡过程中, 某个滑动面上的剪应力达到它的抗剪强度时, 此滑动面就处于极限平衡状态, 使边坡稳定性遭到了破坏, 形成了潜在的滑动土体, 滑动土体沿着滑动面的切线方向产生斜向下的滑动趋势。在各个工况的土压力强度分布中, 坡脚处的土压力都非常小, 可以看出边坡下部土体对坡脚土体的约束效应明显, 故在坡脚处很难形成剪出口, 对于非饱和原状黄土垂直边坡, 剪出口一般在边坡高度的 2/3 处左右, 即在每次切坡完成后, 在该次切坡高度的 2/3 处左右会形成潜在剪出口, 故每次完成的切坡高度的 2/3 处左右土压力强度最大。切坡过程实际上是潜在滑移面不断下移的过程, 滑移面下移过程见图 16。

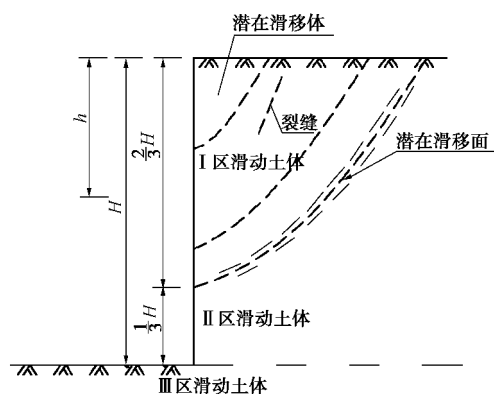


图 16 土压力产生示意图

Fig. 16 Generation of earth pressure

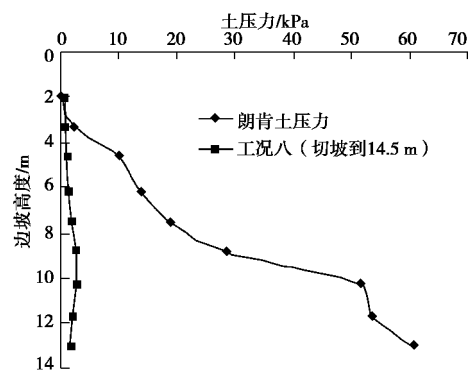


图 17 实测土压力与计算土压力分布对比图

Fig. 17 Comparison between measured and calculated earth pressures

3 实测土压力与朗肯计算土压力比较

由于其边坡上部为平坦地势, 且切坡后的边坡为垂直边坡, 故假设土体中的应力状态为半空间的应力状态。固定拉筋前端的钢板面积很小, 设其与土体的摩擦力计为零, 所以可用朗肯土压力理论计算其试验边坡测试点的土压力。又因为在此种情况下, 朗肯土压力是库伦土压力理论的一个特例, 故仅用朗肯土压力与实测土压力比较即可。计算土压力强度与实测土压力强度对比曲线如图 17。实测土压力强度分布曲线与经典朗肯土压力强度计算所得分布曲线有两点不同:

(1) 对于边坡临空面某一点, 用朗肯土压力计算此点的结果只会随着土体参数的改变而发生变化, 当边坡总高度改变时此点土压力强度不变, 而在切坡过程中, 此点的土压力强度会随着切坡总高度的增加呈非线性变化。在切坡过程中, 每层切坡其上部土体都会产生潜在的滑移面, 在向下切坡过程中, 滑移面的位置也随之下移, 如图 16。

(2) 用朗肯土压力理论计算得出的土压力强度在边坡底部最大, 而实测的则是 $2H/3$ 处最大, 底部的土压力强度非常小。用朗肯土压力理论计算得出的最大土压力强度在坡底处, 其值为 62 kPa, 是实测值的 22 倍。朗肯土压力理论是根据半空间的应力状态和土单元体的极限平衡条件得出的, 但对于大多数边坡, 其土体的应力状态并不是处在极限平衡状态, 土压力是处在静止土压力与主动土压力之间或者静止土压力与被动土压力之间。库伦土压力理论假设滑动面为平面, 用滑动土体整体的力系平衡推导土压力, 但对于大多数非饱和土边坡, 滑动面不可能为一平面, 且剪出口不在坡脚处。在边坡的滑移面中, 当某个面上抗滑力小于滑动力时, I 区滑动土体便会沿着此面产生滑移的趋势, 对于大多数非饱和黄土边坡的滑移问题, 在坡脚没有被破坏的情况下, 滑移面的剪出口一般在边

坡的 $2H/3$ 处的可能性最大。在Ⅱ区稳定土体临空面产生土压力主要有两个原因：①稳定土体阻止滑动土体滑移时产生的摩擦力；②滑动土体的自重力作用在Ⅱ区稳定土体上使稳定土体产生侧向力；但随着高度的减小，Ⅲ区边坡底部土体对Ⅱ区稳定土体的约束效应越明显，其作用机理见图 16。

4 结论和认识

(1) 本次试验采用的测试方法与传统的挡墙和土压力盒测试方法不同，能直接测出原状非饱和黄土土压力，这种实测方法是一次新的尝试。

(2) 随着切坡深度的增加，实测的各测点的土压力增大呈非线性关系，在 $9\sim 10\text{ m}$ 的切坡高度是土压力变化的分界点，在此高度以上，土压力强度随着切坡深度增加变化速率较慢，呈近似线性关系。在此高度以下，土压力强度随着切坡深度增加变化速率加快，呈非线性关系，此时土压力强度的增加速率为前者的 $3\sim 4$ 倍。可以认为：在此次试验的土性指标条件下的原状非饱和黄土的自立稳定高度在 $9\sim 10\text{ m}$ 。

(3) 实测得到的坡顶与坡脚的土压力强度较小，土压力强度最大值在边坡的 $2H/3$ 处，因此在非饱和原状黄土边坡中，其移面并不是通过坡脚滑出，剪出口产生在边坡高度的 $2/3$ 处。

(4) 对于非饱和原状黄土土压力用经典的朗肯、库仑土压力进行计算误差较大，本次试验用朗肯土压力理论计算值是实测值的 22 倍，因此在此次试验指标的条件下非饱和原状黄土土压力是很小的。

(5) 边坡临空面产生的侧向水平力不能简单的认为是土压力的概念，根据实测的土压力分布特征，其是由滑动土体的下滑推力引起的。

参考文献：

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Mechanics and engineering of loess[M]. Xi'an: Shannxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] TERZAGHI K. Record earth pressure testing machine[J]. Engineering News Record, 1932, **109**(29): 365 - 369.
- [3] FANG Y S, ISHIBASHI M. Static earth pressures with various walls movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, **112**(3): 317 - 333.
- [4] 周应英. 桥用刚性挡土墙的土压力模型试验研究[J]. 国外公路, 1987, **7**(3): 14 - 17. (ZHOU Ying-ying. Model test study of the earth pressure on the rigid retaining wall used in bridges[J]. Journal of Foreign Highway, 1987, **7**(3): 14 - 17. (in Chinese)).
- [5] 周应英, 任美龙. 刚性挡土墙后主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(2): 19 - 26. (ZHOU Ying-ying, REN Mei-long. Experimental study of the active earth pressure on rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(2): 19 - 26. (in Chinese)).
- [6] NARAIN J, SARAN S, NANDAKUMARAN P. Model study of passive earth pressure in sand[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1969, **95**(4): 969 - 983.
- [7] FANG Y S, CHEN T J, WU B F. Passive earth pressures with various walls movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(8): 651 - 659.
- [8] 徐日庆, 陈页开, 杨仲轩, 等. 刚性挡墙被动土压力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 569 - 575. (XU Ri-qing, CHEN Ye-kai, YANG Zhong-xuan, et al. Experimental research on the passive earth pressure acting on rigid wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 569 - 575. (in Chinese)).
- [9] 岳祖润, 彭胤宗, 张师德. 压实黏性填土挡土墙土压力离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(6): 90 - 95. (QIU Zhu-run, PENG Yin-zong, ZHANG Shi-de. Centrifuge model tests on lateral pressure on walls retaining compacted clayey backfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(6): 90 - 95. (in Chinese)).
- [10] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [11] 吴剑敏, 李广信, 王成华. 非饱和土基质吸力对基坑支护计算的影响[J]. 工业建筑, 2003, (7): 6 - 10. (WU Jian-min, LI Guang-xin, WANG Cheng-hua. Effect of matric suction of unsaturated soil on the estimation of the load and internal force on supporting structure for deep excavation[J]. Chinese Journal of Industrial Construction, 2003, (7): 6 - 10. (in Chinese)).
- [12] 陆明万, 罗学富. 弹性理论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. (LU Ming-wan, LUO Xue-fu. Basis of elastic theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)).