

文章编号:1671-8879(2005)06-0006-04

加筋土挡墙滑动破裂面的大型模型试验

高江平^{1,2}, 俞茂宏¹, 胡长顺², 陈忠达²

(1. 西安交通大学 航空航天学院, 陕西 西安 710049;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:通过对加筋土模型挡墙加载破坏现象的观察和破坏后裂缝的逐层剖析,提出了加筋土挡墙新的破裂面形式,认为具有上覆荷载的加筋土结构应存在两组潜在的滑动破裂面,它们都属折线形复合式滑裂面,其下部倾斜部分均为朗金破裂面,而上部分别为过均布荷载中心及过承载板之后加筋体拉裂区后部界面的竖直平面。它们比传统的 0.3H 法及朗金破裂面更具有普遍性。

关键词:道路工程;加筋土挡墙;模型试验;破裂面

中图分类号:U417.11

文献标识码:A

Large model experiment on sliding rupture of reinforced earth retaining wall

GAO Jiang-ping^{1,2}, YU Mao-hong¹, HU Chang-shun², CHEN Zhong-da²

(1. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on the analysis about the each layer's cracks of the reinforced earth retaining walls which are destroyed under the surcharge load, a new kind of rupture form is put forward, it is considered that there are two group potential ruptures in the reinforced earth retaining walls under the surcharge load. They are both belong to the compound rupture which is the fold line, its lower part is the Rankine's rupture, and the higher part is the vertical plane. One of the two vertical plane passes through the center of the distribute load, and another passes through the behind boundary of the pulling crack zone which locates on behind of the loading plate. They are more common than the traditional rupture about the 0.3H method or Rankine's rupture. 7 figs, 6 refs.

Key words: road engineering; reinforced earth retaining walls; model test; rupture

0 引言

加筋土技术是自 20 世纪 60 年代初由法国工程师亨利·维达尔提出并在全球范围内迅猛发展起来

的、具有广泛应用前景的年轻的土工技术,它在土木工程各领域得到了大量的推广应用,工程技术人员和科研工作者对加筋土的机理及其工程应用技术进行了大量的理论分析和试验研究,取得了丰硕的研

收稿日期:2004-03-15

基金项目:交通部“九五”行业联合科技攻关项目(95-05-85)

作者简介:高江平(1964-),男,陕西渭南人,长安大学副教授,西安交通大学博士后。

究成果,有力地推动了该项技术的发展。

加筋土挡墙属加筋土技术的一个很重要的应用领域,在世界各国的公路工程中成功地修筑了大量的实体工程,但也不乏加筋土挡墙因结构设计上的原因而导致工程失败之例。从目前研究现状和工程应用的角度来看,可以认为加筋土作为一种复合材料,对其机理和结构设计的研究仍不够成熟,表现出工程实践超前于理论研究的特点,需要对其作进一步的研究^[1~3]。本文利用室内加筋土挡墙大型模型试验的结果,提出了更具有普遍性的加筋土挡墙滑动破裂面的形式,可供工程设计中参考使用。

1 模型试验

1.1 模型墙概况

试验用的模型箱为一矩形箱体,它利用角铁焊成框架,两侧壁为固定于角铁框架上的有机玻璃板(厚1 cm),后壁为焊在角铁框架上的钢板。它们均具有足够的刚度,受力时基本不变形。加筋土模型墙的尺寸为:长160 cm、宽130 cm、高120 cm,所用加筋带为宽13 mm、厚1 mm的铝合金带,沿墙高共布设13层加筋带,相邻层垂直间距3 cm。其长度分3种规格,自上而下分别为146 cm、109 cm和89 cm。承载板为矩形,面积20 cm×80 cm。模型墙如图1、图2所示。

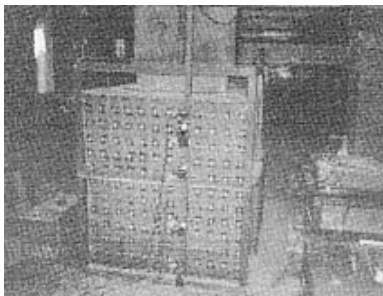


图1 加筋土挡墙模型

1.2 模型墙的砌筑

模型墙的实施严格按照现场施工操作顺序进行。回填土为甘肃定西黄土,经重型击实试验,测得其最大干密度 $\gamma_{dmax} = 18.62 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 、最佳含水量 $w_0 = 13.2\%$ 。回填土先经击碎过筛,在最佳含水量下分层填筑,每分层击实厚度为3 cm。从上至下,在对应于墙高0~90 cm、90~104 cm、104~120 cm范围内,压实度依次为90%、93%、95%。

2 加载破坏试验剖析

加载试验从荷载为0开始,按9.8 kN的间隔逐

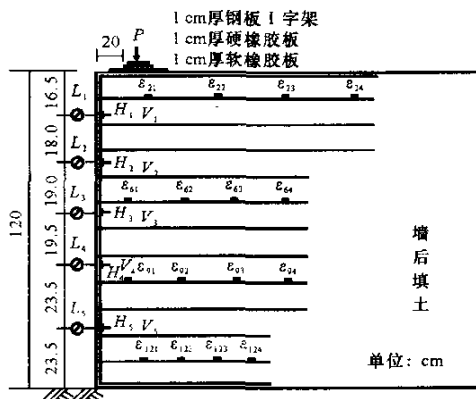


图2 加筋土挡墙加载方式布置图

级加荷直至破坏。试验加载至49 kN时墙面板因受到挤压摩擦而发出微弱的响声,加载至147 kN时听到较大的“砰、砰”的响声,并且墙体侧面开始出现裂缝;加载至156.8 kN时承载板后的加筋体表面裂缝贯通,自墙顶向下第3、第4块面板联结处,透过墙面板可观察到土体中出现了1条水平裂缝;加载至166.6 kN时墙侧面土体中的裂缝增多;加载接近196 kN时加载已困难,压力值出现回落现象;加载超过205.8 kN时,加筋体中传出的响声较多;加载至236.77 kN时,荷载再提高不上去了,为所能施加的最大荷载。加筋体顶面和左、右两侧面裂缝随荷载的增大而不断增多、增宽。

2.1 加载破坏后各分层填土顶面裂缝分布

加载破坏后墙顶面裂缝分布见图3。

加载破坏后,承载板所在位置沉陷坑呈内深外浅形,这主要是由于墙面板一侧为临空面而产生向前的位移所致。坑后部深约2.8 cm,向前部逐渐变浅至深约1.7 cm,平均坑深2.3 cm。沿沉陷坑四角各有1条宽约3 mm、呈45°角向外扩散的裂缝,承载板后侧长边附近分布有数条与其大致平行的横向长裂缝,这是由于加筋体受外荷载作用后,向下沉陷及向临空面方向滑移而受到加筋的约束所形成的拉裂破碎带;在加筋体顶面宽度方向的中部,有1条向后延伸的长约56 cm的纵向裂缝,它是由于外荷载较大时,模型两侧的角铁支架产生很小的横向挠曲变形而使土体随之向两侧产生了微小的移动,而将其从中间拉裂。

第2分层顶面沉陷坑仍呈内深外浅形(图4),坑后部最深为2.5 cm,内壁及两侧壁有密集的多级错台、沉陷坑四角各分布有数条向外呈辐射状的喇叭形裂缝,它们与模型墙左、右侧面的裂缝相连通。坑后缘外20~30 cm范围内分布有2~3条大致与



图3 加载破坏后加筋土模型挡墙顶面裂缝分布图

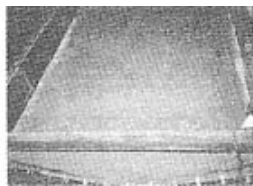


图4 加筋土模型挡墙第2分层顶面裂缝分布图

沉陷坑长边平行的横向长裂缝;在加筋体横向宽度的中间部位,仍有1条长约60 cm的纵向裂缝自沉陷坑后缘向加筋体后部延伸。

以下各分层顶面裂缝分布、形状及其位置的移动变化规律均与以上各分层的规律相似,直至第15分层(离顶面45 cm)顶面最大坑深7 mm,坑边缘消失,坑两后角处辐射状裂缝仍存在。

从以上对各分层顶面裂缝分布特征的逐层追踪分析可知,加筋体中间位置的长纵缝是由于模型架受较大荷载后,向两侧产生很小的挠曲变形,而将土体从中间部位拉裂,属附带出现的裂缝,作理论分析时可不予考虑,其余裂缝分布在2个区:分布于承载板底面之下的裂缝和分布于承载板面积之外的裂缝。承载板底面下的裂缝呈与周边(主要是左、内、右3侧)平行的环状裂缝,属剪切裂缝,随着深度的增加,其间距越来越大,而错台高度越来越小,并随沉陷坑的消失而消失。分布于承载板底面之外的裂缝又分为两大组:第一组位于承载板左、右两侧边与模型墙两侧边界范围之内,并分别沿承载板左、右侧边的4个角向外呈辐射状的喇叭形裂缝,该组裂缝与模型两侧地基的喇叭状破裂面相贯通,两侧地基裂缝分布的范围自上而下逐渐扩大,且与承载板下沉陷坑两后角对应的辐射裂缝保持的深度较深,而与其两前角对应的裂缝保持的深度较浅;另一组裂缝为分布于离承载板后缘约30 cm范围内并与其大致平行的数条横向长缝,其发展深度基本上与沉陷坑两侧的辐射裂缝及沉陷坑的消失位置相对应。另外,对应于墙高中部长度变短的几层加筋带的末端附近都出现了较长的横向裂缝。

从受荷后加筋体中裂缝的分布特征及其发展的深度可知,承载板之后的加筋体上部一定深度范围内存在一个拉裂区,其宽度为图5中的直线长度 $e'J'=x-(d+B)$ 。

2.2 加载破坏后墙左侧面裂缝的分布

如图6所示,加筋体承载破坏后,破裂面呈喇叭形刺入式破坏。沿深度方向,裂缝分布在承载板下的上5层墙面板范围内,高度约46 cm,宽度在离墙

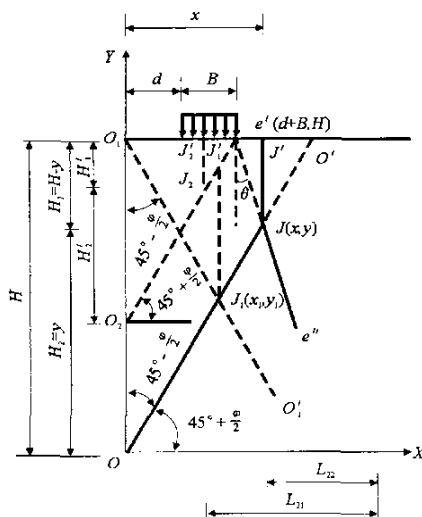


图5 加筋体简化破裂面图

面板54 cm范围内,最长裂缝54 cm,最宽裂缝3 mm,位于自上而下第2块与第3块墙面板连接处,所见到的水平裂缝分布在该处筋带上下各一块面板的高度范围之内,说明该范围内筋带所受到的拉拔力最大,因而它们被向外拉拔的位移也大^[5,6]。

2.3 加载破坏后墙右侧面裂缝分布

由图7可见,破坏仍属喇叭形刺入式破坏,裂缝分布在上5块面板深度范围之内,高约49 cm,宽度在墙面板后顶宽41 cm之内。



图6 条带式加筋土模型挡墙左侧面裂缝分布图



图7 条带式加筋土模型挡墙右侧面裂缝分布图

3 破裂面的形式

根据以上对加筋土模型挡墙加载破坏试验观察分析的结果,可以认为加筋体中活动区与锚固区的分界面为简化的复合形破裂面(图5)。

过墙脚O点及承载板内缘e'点分别作朗金破裂面OO'及地基的喇叭形刺入式破裂面e'e'',二者相交于J点,过J点向回填土表面作竖直线JJ',折线OJJ'即为简化的破裂面,其上、下两部分高度可按下述方法确定。

3.1 确定交点

以墙脚O为原点,建立坐标系XOY,直线OJ的方程为

$$y = kx = x \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (1)$$

直线 $e'J$ 的方程为

$$\frac{y-H}{x-(d+B)} = \tan(270^\circ + \theta) = -\cot\theta \quad (2)$$

简化式(2)得

$$y = -x \cot\theta + (d+B) \cot\theta + H \quad (3)$$

解联立式(1)、式(3)的方程组得

$$x = \frac{(d+B) \cot\theta + H}{\tan(45^\circ + \varphi/2) + \cot\theta} \quad (4)$$

$$y = x \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (5)$$

3.2 确定 H_1 、 H_2

由图5易知

$$H_1 = H - y, H_2 = y \quad (6)$$

本文中, $d = 20$ cm, $B = 20$ cm, $H = 120$ cm, $\varphi = 30^\circ$, $\theta = 17.74^\circ$ (实测得到), 代入式(4)~式(7)得

$$x = 50.44 \text{ cm}, \quad y = 87.37 \text{ cm}$$

$$H_1 = 32.63 \text{ cm}, \quad H_2 = 87.37 \text{ cm}$$

3.3 对滑动破裂面的进一步分析

对图5所示的滑动破裂面,若超载为连续满铺式,折线 OJJ' 变成完整的朗金破裂面 OO' ;若墙顶无超载作用,则完全为墙土自重作用,按土力学原理,其另一组破裂面与小主应力面的夹角为 $(45^\circ - \varphi/2)$,那么该组破裂面可通过墙顶 O_1 与墙面成 $(45^\circ - \varphi/2)$ 角作直线 $O_1O'_1$,它与 OO' 交于 J_1 点,折线 $OJ_1J'_1$ 为填土自重作用时的破裂面,亦即规范中的 $0.3H$ 法破裂面,因 $\triangle O_1J_1O$ 为等腰三角形,故 J_1 的坐标为

$$x_1 = \frac{H}{2} \cot(45^\circ + \varphi/2) \approx 0.29H$$

$$y_1 = H/2$$

由此分析可知,本文提出的破裂面比 $0.3H$ 法及朗金破裂面更为一般,换句话说,后两者仅为前者的特例。

3.4 第二组潜在的破裂面

由理论分析及试验观察可以认为,加筋土结构还应有另一组潜在的破裂滑动面,即图5中的 $O_2J_2J'_2$ 面,该破裂面的作法如下:

自超载内边缘 e' 向墙面引朗金破裂面 $e'O_2$,再自超载的中心 J'_2 点竖直向下引垂线 J'_2J_2 与朗金破裂面交于 J_2 点, $O_2J_2J'_2$ 即为潜在的一组破裂面,其所以引垂线 J'_2J_2 ,是因为与此线相交的各层加筋在其交点处受超载作用而产生的附加拉力最大,其连线即为潜在的一组破裂面的竖直面部分。

由于存在两组潜在破裂面,故加筋的锚固长度

应分别大于 L_{21} 和 L_{22} ,并且要验算加筋带的抗拉强度,使其满足设计要求。

4 结 语

通过对加筋土模型挡墙加载破坏现象的观察和破坏后裂缝的逐层剖析,总结了加筋土挡墙的破坏特征,并提出了其滑动破裂面的具体形式,认为具有上覆荷载的加载土结构应存在两组潜在的滑动破裂面,它们都属折线形的复合式滑裂面,其下部倾斜部分均为朗金破裂面,而上部分别为过均布荷载中心及过承载板之后加筋体拉裂区的后部边界的竖直面。它们比传统的滑动破裂面更具有普遍性,这对于普通特别是多级高大加筋土挡墙的设计具有重要的指导意义。

参考文献:

References:

- [1] Buhan P D, Garnier D. Three dimensional bearing capacity analysis of foundation near a slope[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(3): 153-163.
- [2] Jones C J, Msc B F, Fice P P, et al. Reinforced earth trial structure for dewsburyring road[J]. Proc Instn civ Engrs, Part 1, 1990, 88(4): 321-345.
- [3] Bolton M D, Pang P L R. Collapse limit states of reinforced earth retaining walls[J]. Geotechnique, 1982, 32(4): 349-367.
- [4] 李海深,杨果林,邹银生. 加筋土挡土墙 动力特性分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 28-31.
LI Hai-shen, YANG Guo-lin, ZOU Yin-sheng. Analysis of dynamic character of reinforced earth retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 28-31.
- [5] 高江平,石兆旭,俞茂宏. 网状与条带式加筋土挡墙墙面位移的测试[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(2), 42-45.
GAO Jiang-ping, SHI Zhao-xu, YU Mao-hong. Testing of surface's displacement about netted and striped reinforced Walls[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005, 25(2), 42-45.
- [6] 张友葩,高永涛,吴顺川,等. 失稳挡土墙加固数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4), 17-21.
ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Numerical analysis of reinforcement for unstable retaining wall[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4), 17-21.