

加筋土边坡的破坏形式*

介玉新^① 洛桑尼玛^② 郑瑞华^① 李广信^①

(^①水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学) 北京 100084)

(^②中国人民银行拉萨中心支行 拉萨 850000)

摘要 了解加筋土边坡的破坏形式有助于加筋土边坡的设计和施工监测。对不同形式的加筋土边坡进行离心模型试验,绘制了边坡的破坏形式。试验结果表明:加筋土边坡能够保持较好的整体性,一般不会像未加筋边坡那样突然坍塌;坡面附近土体内部可能先于坡顶产生裂缝,因此在实际工程中观察到显著的坡顶裂缝后,应当意识到在坡面附近的坡体内部也可能产生了裂缝。一般情况下筋材模量越大加筋效果越好,但在筋材和土接触面强度一定的情况下,筋材模量增大到一定程度后继续增大筋材模量是没有太大意义的。

关键词 土工合成材料 加筋土 边坡 离心模型试验 破坏

中图分类号: TU411.93 **文献标识码:** A

FAILURE PATTERN OF REINFORCED SOIL SLOPES

JIE Yuxin^① LOPSANG Nyema^② ZHENG Ruihua^① LI Guangxin^①

(^①State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(^②Lhasa Branch of People's Bank of China, Lhasa 850000)

Abstract It is known that investigating the failure pattern is important for the design and construction monitoring of reinforced soil slope. In this paper, reinforced soil slopes with different reinforcements and soils are studied using centrifuge modeling. During the modeling, failure patterns are drawn and compared. Results show that the reinforced soil slopes are generally able to maintain better integrity and are not likely to collapse suddenly. Cracks may first occur near the slope surface. Therefore, significant cracks on the top of the slope may always imply that hidden cracks near the slope surface have also occurred. Generally, larger reinforcement modulus can bring better reinforcing effect. However, if the strength of the interface cannot be improved appropriately, it can be useless to indefinitely increase the modulus of the reinforcement once it is large enough.

Key words Geosynthetics, Reinforced soil, Slope, Centrifuge model test, Failure

1 引言

修建加筋土边坡是土工合成材料应用的主要形

式之一。随着我国基础设施建设的发展,加筋土边坡的应用越来越广泛。了解加筋土边坡的破坏形式能够使工程设计和施工监测更有针对性。加筋土边坡的破坏形式一方面可以通过对失事工程的调查获

* 收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-19.

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201001027),国家自然科学基金项目(50979047),重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732103).

第一作者简介:介玉新,主要从事土工数值分析、土工合成材料等方面的教学和科研. Email: jieyx@tsinghua.edu.cn

取,另一方面,可以通过模型试验进行研究。徐林荣等^[1]通过在坡顶对一高 80cm 的模型边坡施加荷载研究加筋土陡坡的破裂面位置和形态,发现各层筋带断点位置的连线构成的破裂面形状并不是光滑曲线,而是一种形状不规则的“锯齿线”。认为造成这种现象的原因是上下层筋材之间的隔离作用使得虽然筋材之间的土体已形成破裂面,但在筋材破坏之前,局部破坏无法穿越筋材形成联通的破裂面。筋材的隔离作用制约着加筋陡坡的破裂面位置和形态。

由于离心模型试验能够较好地模拟自重应力场,所以是最常用的模型试验手段。比如,Porbaha 用离心模型试验研究了建在不同地基上,不同边坡坡度和不同织物长度筋材的挡土墙在自重荷载下的破坏型式^[2,3]。张嘎等^[4]对一坡角 84° 的加筋土陡坡进行离心模型试验,基于离心场图像采集和位移测量系统得到了整个加载过程中土坡的形态及位移场的完整变化过程。土工织物明显改变了土坡的位移场发展规律和边坡破坏形态。

章为民等^[5]对加筋挡土墙进行离心模型试验研究,试验发现一般的破坏过程为,先是墙体发生一定变形,然后形成类似于对数螺旋线的剪切破坏带,从而把墙体分为剪切带前墙体、剪切破坏带、剪切带后墙体。随着荷载增加,剪切破坏带逐步向后扩大,而剪切带前、后墙体基本无剪切变形发生。当剪切带变形发展较大,达到筋材断裂强度时,墙体突然整体坍塌。

杨锡武和易志坚^[6]利用离心模型试验对不同布筋方式的加筋边坡坡面侧向位移及位移场等变形性态进行研究,结果表明加筋增加边坡稳定性的效果与布筋方式密切相关。认为坡体中的最大剪应力出现在边坡 $H/3 \sim H/2$ 高度范围内,由于加筋的阻裂作用,在此范围内加密(强)布筋可以有效地阻止最大剪应力所导致的裂纹(缝)扩展贯通,阻止边坡滑动面形成,从而增加边坡的稳定性。边坡下部加密布筋对 $H/3 \sim H/2$ 范围内的剪切裂纹(缝)上下扩展贯通过程中所起的阻断作用很小,因而不是合理的布筋方式。全断面均匀加密则在经济上不够合理。

邹静蓉等^[7]对坡度 1:0.75 的土工格室加筋路堤进行离心模型试验。发现模型边坡变形破坏过程表现为如下几个阶段:(1)变形阶段。随着离心加速度的增加,边坡变形增大;(2)开裂阶段。开裂有垂直开裂和水平开裂 2 种情况。在垂直方向裂缝位

置基本都位于格室区的末端;(3)初始破坏阶段。当垂直变形和水平变形达到一定程度后,在坡脚产生局部塑性变形,并逐渐扩大;(4)破坏阶段。随着局部破坏扩展,加筋边坡完全破坏并产生完整滑裂面。试验中土工格室没有拔出或拉断。

本文介绍了我们采用离心模型试验得到的边坡破坏形式。包括纤维加筋黏性土边坡,分层加筋的黏性土和砂土边坡等。所观测到的边坡破坏形式、破坏过程对认识相关工程问题,揭示筋土相互作用机理是很有意义的。

2 纤维加筋黏性土直立边坡破坏形式

图 1 是离心模型试验中两个纤维加筋土直立边坡的破坏形式。具体试验现象和有关分析见文献[8]。试验采用的是取自北京白河堡的黏土。试样含水率 16.8%,干密度分别为 $1.55\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。加筋材料采用聚丙烯纤维,长度 30cm,纤维掺量为 0.2% (重量比)。制作完成后的模型边坡尺寸为 $30.3\text{cm}\times 35\text{cm}\times 20\text{cm}$ (长×宽×高)。两个试验分别进行到加速度为 100g 和 120g 时停机(图 1)。

试验过程中发现素土边坡的破坏往往是突发性的。在事先无明显征兆的情况下突然倒塌。而加筋土边坡的破坏是渐进的。加筋土直立边坡中最早发生裂缝或裂缝开展较大的部位通常在土坡顶面,其位置距临空面为 12~17cm。随着裂缝和边坡变形的发展,距临空面较远的部位也出现裂缝,加筋土坡的滑裂面有一个从外向里的发展过程。加筋土坡不是只有一个,而是有先后产生的一簇滑裂面。

3 分层加筋黏性土边坡破坏形式

针对分层加筋黏性土边坡,我们也进行了一系列的离心模型试验。试验采用的黏性土比重为 2.71,最优含水率和塑性指数分别为 18.4% 和 14。试验用土的制样干密度为 $1.30\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,含水率为 24%。通过三轴试验得到黏性土的黏聚力为 20.1kPa,内摩擦角 20.3°。

为了比较不同材料的加筋效果,在试验中选用了 3 种加筋材料,分别为医用纱布、铁丝窗纱和镀锌铁皮,试样的平均强度和拉伸模量见表 1。

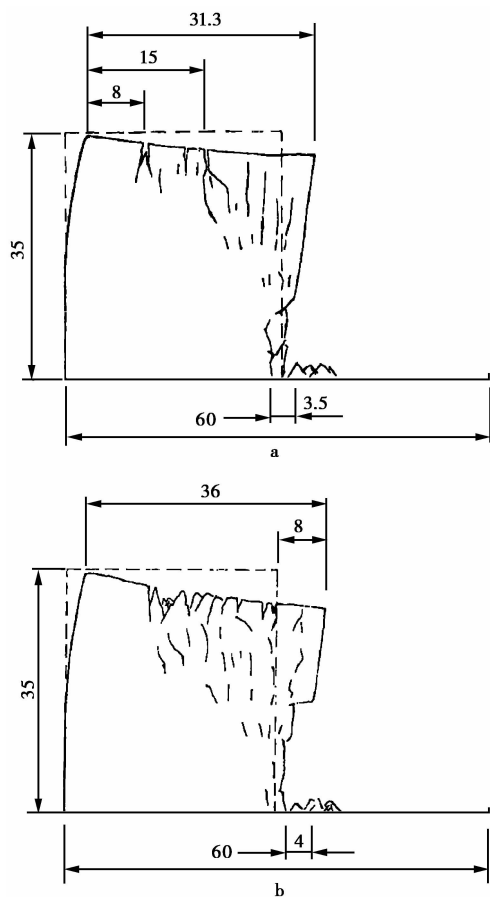


图1 纤维加筋土直立边坡(单位:cm)

Fig. 1 Fiber reinforced steep slope

- a. 干密度 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 加速度 100 g ;
 b. 干密度 $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 加速度 120 g

表1 加筋材料的性质

Table 1 Parameters for the reinforcing materials

名称	医用纱布	铁丝窗纱	镀锌铁皮
极限抗拉强度/N	104.3	1965.0	3276.8
拉伸模量/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	20.9	393.0	655.4

离心模型试验试样总高度为31cm,其中边坡高度 $H=27\text{cm}$,下部地基高度4cm。边坡坡度3:1(坡角 72°)。模型试验中筋材长度均为19cm。医用纱布加筋的间距考虑2种情况:间距3cm和6cm。其中间距3cm对应的筋材层数为9层,间距6cm对应的层数为5层。铁丝窗纱和镀锌铁皮加筋间距均为6cm(图2)。

首先对未加筋的素土边坡进行试验。试验发现从0g加载到25g的过程中,边坡土体位移量很小,以较小的土体沉降为主,坡面处有鼓出的趋势,但是还不太明显,在这段时间内土体还是相对稳定的。加速度从25g逐渐向32g增大时,沉降量开始加大,

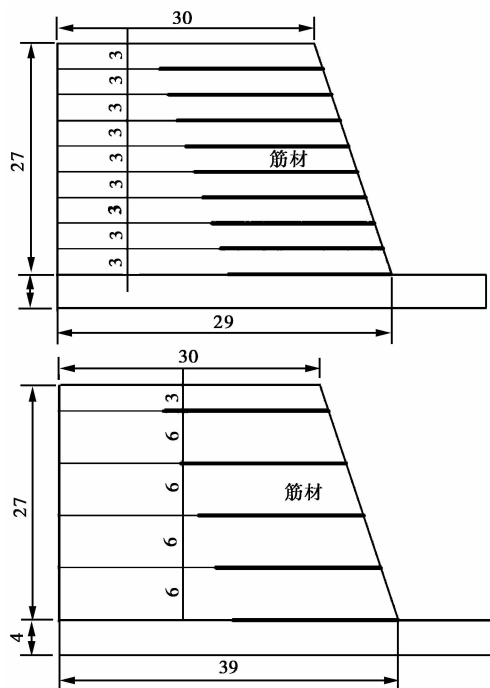


图2 加筋土模型边坡(上:间距3cm;下:间距6cm,单位:cm)

Fig. 2 Model slope with reinforcement

下部土体鼓出量也更加明显。继续加载,沉降量逐渐增大,当达到35g时,边坡下三分之一处进一步鼓出并出现了局部破坏,而且出现了大量的竖向裂缝,这些裂缝的位置连接起来大致能形成圆弧。坡顶中部位置出现了一条深度约5cm的拉裂缝。可以认为此时边坡已经处于破坏状态。随着裂缝的发展,离坡面大约3.5cm处土体突然倒下,破坏具有很强的突发性。坡面坍塌后,土坡处于新的平衡状态。在后续的加载过程中,土体整体上能够保持稳定,变形以沉降为主,试验进行到100g时停机。图3是停机后的破坏形式。其中虚线部分为土坡的初始形状,可以看到土体后壁与模型边壁脱开了一定的距离,并且在坡顶处产生了竖向的拉裂区。

对医用纱布间距6cm加筋的模型边坡试验表明,在加速度为0~30g时边坡变形很小,土体基本保持其原来形状;30~40g时坡面下三分点处离坡面1cm的位置产生裂缝,向下发展到坡脚,土体从裂缝处脱落。表明该处发生了局部破坏,筋材之间的土体表面滑落;40~50g时下面的裂缝向上发展至坡面中部。同时坡顶后壁出现拉裂缝;50~65g时从坡面发展出来的裂缝继续发展到坡顶,坡面土体脱落;在坡顶距离坡面不远处也产生了几条拉裂缝;65~100g时坡顶的拉裂缝宽度较大,坡面附近土体内部也有一些裂缝。100g停机后的破坏形式

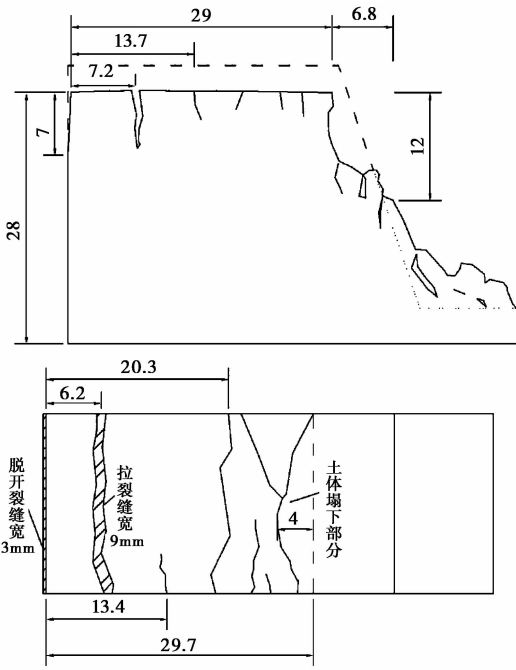


图3 素土边坡(单位:cm)

Fig. 3 Plain soil slope

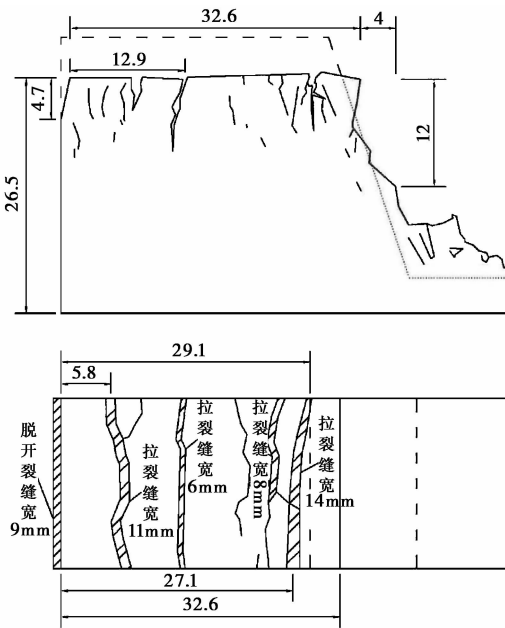


图4 医用纱布加筋黏性土边坡(间距6cm,单位:cm)

Fig. 4 Cohesive soil slope reinforced with medical bandage gauze (spacing = 6 cm)

见图4。从俯视图看坡顶主要裂缝条数为5条。其中贯穿坡顶的裂缝为4条。

对医用纱布间距3cm加筋的模型边坡试验表明,在加速度达25g前边坡变形很小,加速度25~35g时有明显沉降,坡面下三分点处土体有鼓出现

象;35~40g时在土体明显鼓出位置产生了一条裂缝,裂缝长度约为3cm,产生于2条筋材之间,等于筋材间距,在裂缝周围至坡脚处的土体有一定的破坏;40~45g时裂缝附近的表面土体脱落,裂缝往上发展至土体中部,同时在坡顶后壁出现拉裂缝;45~50g时裂缝继续有所发展,坡面处筋材间的局部土体脱落。50g停机后的破坏形式见图5。从俯视图看坡顶主要裂缝条数为3条。其中贯穿坡顶的裂缝为1条。

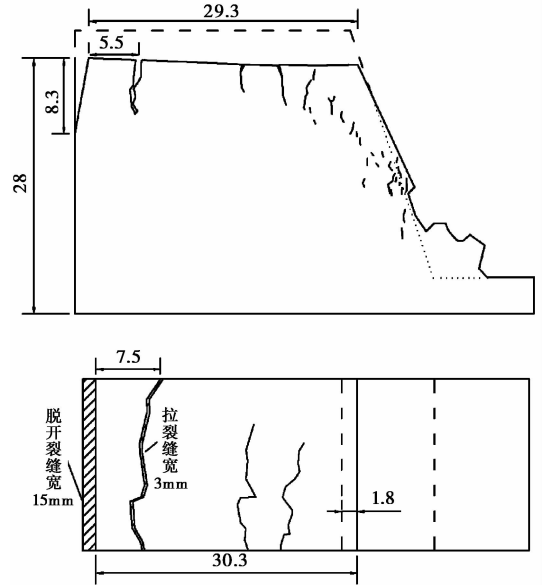


图5 医用纱布加筋黏性土边坡(间距3cm,单位:cm)

Fig. 5 Cohesive soil slope reinforced with medical bandage gauze (spacing = 3 cm)

对铁丝窗纱间距6cm加筋的模型边坡试验表明,0~40g时土体有少量变形,加筋区域沉降量较小,土体后壁未加筋部分的沉降量较大,坡面下三分点位置有鼓出现象;40~45g时从坡脚到下三分点之间产生裂缝,裂缝距坡面约1cm;45~100g时裂缝向上发展至三分之一坡高的位置。水平位移随加速度而增大,但边坡整体性保持较好。100g停机后的破坏形式见图6。从俯视图看坡顶主要裂缝条数为4条。其中贯穿坡顶的裂缝为2条。

对镀锌铁皮间距6cm加筋的模型边坡试验表明,在加速度较小时边坡变形很小,随加速度增加变形增大,坡面鼓出;35~40g时距坡脚五分之一坡高位置处坡面产生一条裂缝,裂缝随加速度增加而逐渐发展,45g时裂缝长度达5cm,裂缝位置处筋材间的坡面土体脱落,产生局部破坏。45~100g时裂缝随加速度增大自下而上逐渐发展,坡面下半部分裂

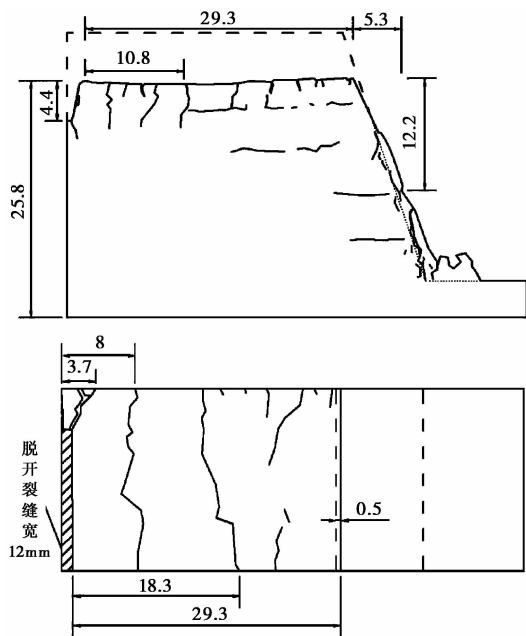


图6 铁丝窗纱加筋黏性土边坡(间距6cm,单位:cm)

Fig. 6 Cohesive soil slope reinforced with iron window screen(spacing=6cm)

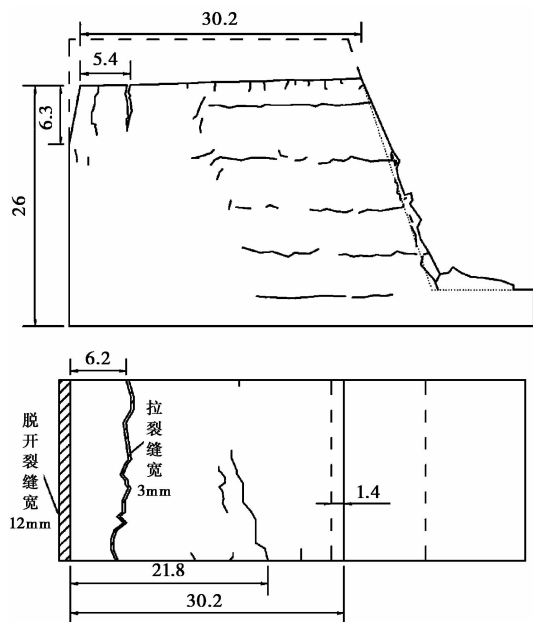


图7 镀锌铁皮加筋黏性土边坡(间距6cm,单位:cm)

Fig. 7 Cohesive soil slope reinforced with sheet iron(spacing=6cm)

缝之外的表面土体脱落,但坡面整体性仍然保持较好。100g 停机后的破坏形式见图7。从俯视图看坡顶主要裂缝条数为3条。其中贯穿坡顶的裂缝为1条。

从破坏形式看,素土边坡很容易发生突然坍塌,

加筋土边坡则能保持较好的整体性。也就是,尽管发生了较多裂缝以及坡面局部土体脱落,但不至于整体坍塌。就加筋土边坡来说,加筋土边坡的裂缝主要发生在3个位置:坡面附近坡脚至一半坡高位置,坡顶,以及每层筋材与土的接触位置。其中坡面附近最先发生可见的裂缝。坡顶的裂缝则主要是拉裂缝。筋材与土接触处的裂缝一方面可能是由于筋材与土之间的相对位移引起,另一方面也可能在于这里是制样时击实土层的分层界面,比其他位置土的强度略低。坡顶较大的裂缝主要位于加筋土加筋范围之外的填土中。而在加筋范围内,由于筋材的拦阻,裂缝发展较窄,深度也不大。由于坡顶的裂缝不是首先产生的裂缝,所以在实际工程中观察到显著的坡顶裂缝后,应当意识到在坡面附近的坡体内部也可能产生了裂缝。

医用纱布间距6cm加筋边坡的较宽裂缝的数量较多,主要原因可能是它在50~65g时已经破坏,加到100g使得它的裂缝进一步加大了。加筋间距小,筋材模量大,坡顶裂缝的数量则会减小。未加筋区域总是存在一条裂缝,发展较快,且极易贯穿土坡断面。加筋区往往也会产生至少1条裂缝,但发展较慢。

通过测量坡面的水平位移发现,加筋使得水平位移最大的位置相对于未加筋边坡有了一定提高,未加筋边坡的最大变形位置大约在坡脚以上三分之一坡高处,加筋边坡最大变形位置可能在三分之一坡高至一半坡高之间。

铁丝窗纱加筋与镀锌铁皮加筋相比,虽然镀锌铁皮的模量较大,但由于它与土的接触面强度比较低,试验发现镀锌铁皮加筋边坡的水平位移更大,最终的破坏也更明显些。表明在筋材模量达到一定程度后,起控制作用的主要是筋材与土之间的接触情况,此时继续增大筋材模量所起的作用不大。

4 分层加筋砂土边坡破坏形式

针对分层加筋的砂土边坡,进行了4组试验,采用的加筋材料和间距同上。试验均采用包裹式,避免砂土从坡面漏出(图8~图11)。

对医用纱布间距6cm加筋的情况:试验加速度在0~5g的范围内,土体边坡基本没有位移。加速度从5~10g的变化过程中,土体有一个突然的沉降和水平位移,而且其变形量比较明显。加速度从10g增加到15g的过程中,坡面土体相继破坏散落,

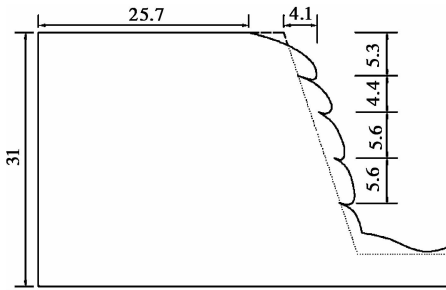


图8 医用纱布加筋砂土边坡(间距6cm,单位:cm)
Fig. 8 Sand slope reinforced with medical bandage gauze (spacing=6cm)

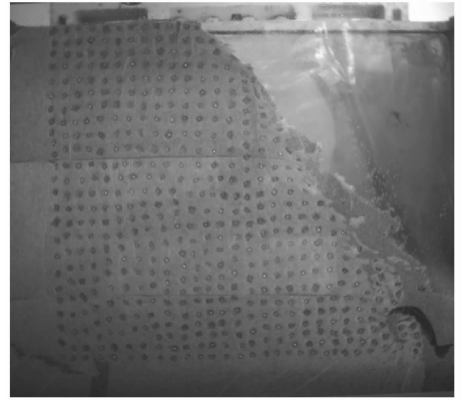


图11 镀锌铁皮加筋砂土边坡(间距6cm)
Fig. 11 Sand slope reinforced with sheet iron (spacing=6cm)

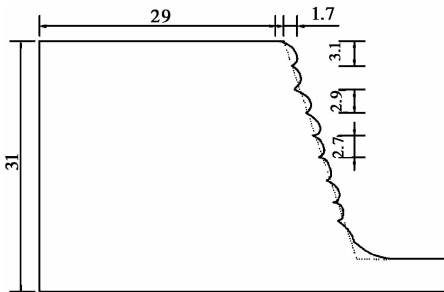


图9 医用纱布加筋砂土边坡(间距3cm,单位:cm)
Fig. 9 Sand slope reinforced with medical bandage gauze (spacing=3cm)

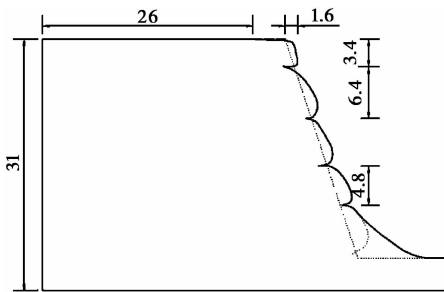


图10 铁丝窗纱加筋砂土边坡(间距6cm,单位:cm)
Fig. 10 Sand slope reinforced with iron window screen (spacing=6cm)

由于包裹式加筋材料的作用,筋材之间的土体散落使得筋材鼓出,其中土体下三分点处的筋材鼓出相对较大,当加速度达到一定数值,坡面的土体全部突然散落鼓出。加载到100g后停机(图8)。

对医用纱布间距3cm加筋的情况:加载开始到15g的范围内,土体变形很小,坡面土体没有出现散落的情况。15~20g的加速度变化过程中,土坡顶部和下三分点土体散落并且筋材鼓出,其中顶部土体最先散落。荷载继续增加,土体变形也继续发展,同时其他筋材之间的土体也陆续散落鼓出,但是相

比于筋材间距为6cm的试验,这组试验的土坡鼓出量明显减小,加载到100g停机(图9)。

对铁丝窗纱间距6cm加筋的情况:加载开始到15g的加速度范围内,土坡位移很小,土体没有发生任何的破坏。加速度从15~20g的过程中,土体逐渐发生较大的变形,加速度达20g时下三分点附近土体散落并筋材鼓出,由于该筋材刚度较大,因此相同条件下鼓出量相对较小。荷载继续加载到50g,每层土的鼓出量和整个土体的变形量也逐渐变大,尤其最底部的土层鼓出量最大。加载到100g后试验停机,此时的鼓出量变得更加剧烈,图10为停机后的最终情况。

对镀锌铁皮间距6cm加筋的情况:从0~20g的加速度范围内,土坡位移量相对较小,加速度从25g开始土体有了明显的变形,其中最底部的土体有鼓出现象,同时上部铁皮开始滑开,形成一种折线形的坡面。加速度达30g时,各层铁皮滑移量较大,坡面的折线形状更加突出。加载到35g时土体变形更加剧烈,保持该加速度一段时间,土坡突然倒塌,每层筋材所包裹的土也全部散落,加载到50g后试验停机。从图11可以看出虽然镀锌铁皮的强度和刚度都较大,但由于与土的接触面摩擦强度较低,加筋效果并不好。

5 结论

本文进行了不同形式加筋土边坡的离心模型试验。试验结果表明相对于素土边坡,加筋土边坡能保持较好的整体性,尽管发生了较多裂缝以及坡面局部土体脱落,但一般不会像未加筋边坡那样突然发生整体的坍塌,便于受边坡影响人员的及时撤离。

边坡的最大位移发生在三分之一坡高和一半坡高之间的土体范围内,在这个范围内也最容易首先发生局部破坏。另外,边坡坡脚处也会产生相对强烈的变形。加筋黏性土边坡的裂缝主要发生在坡面附近、坡顶、以及每层筋材与土的接触面位置。其中坡面附近最有可能先于其他部位产生裂缝。坡顶的裂缝则主要是拉裂缝。坡顶裂缝位于边坡表面,在实际工程中便于观测。但它不一定是首先产生的裂缝。所以在实际工程中观察到显著的坡顶裂缝后,应当意识到在坡面附近的坡体内部也可能产生了裂缝。

由于分层铺设的筋材能够限制裂缝的扩展,所以加筋区域坡顶裂缝一般深度不大,宽度也较小。但在加筋区域之外的未加筋区域,尤其筋材后缘的素土中更容易发生裂缝。所以在工程实践中应加强加筋区域与未加筋区域的衔接和过渡,使得两者变形协调,避免发生过大的沉降差或开裂。

试验也表明,其他条件相同的情况下,筋材间距越密,效果越好,模量越大效果越好。但模量增大到一定程度,效果已不明显,此时筋材与土的接触面将起主导作用。也就是说,筋材的作用效果受制于筋材与土的接触面情况,在筋材与土接触面强度不能提高的情况下,无限度地增大筋材模量是没有太大意义的。

参 考 文 献

- [1] 徐林荣, 胡绍海, 华祖焜, 等. 加筋土陡边坡破裂面位置和形态试验研究[J]. 长沙铁道学院院报, 1998, **16**(3): 6~10.
Xu Linrong, Hu Shaohai, Hua Zukun, et al. Model tests and investigation on location and pattern of failure surface in reinforced
- steep slope. Journal of Changsha Railway University, 1998, **16**(3): 6~10.
- [2] Porbaha A, Goodings DJ. Centrifuge modeling of geotextile-reinforced cohesive soil retaining walls [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(10): 840~847.
- [3] Porbaha A, Goodings DJ. Centrifuge modeling of geotextile-reinforced steep clay slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**(5): 696~704.
- [4] 张嘎, 王爱霞, 张建民, 等. 土工织物加筋土坡变形和破坏过程的离心模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, **48**(12): 2057~2060.
Zhang Ga, Wang Aixia, Zhang Jianmin, et al. Centrifuge modeling of the failure of geotextile-reinforced slopes. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2008, **48**(12): 2057~2060.
- [5] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 加筋挡土墙离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(3): 84~91.
Zhang Weimin, Lai Zhongzhong, Xu Guangming. Centrifuge modelling of geotextile-reinforced cohesiveless soil retaining walls. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(3): 84~91.
- [6] 杨锡武, 易志坚. 基于离心模型试验和断裂理论的加筋边坡合理布筋方式研究[J]. 土木工程学报, 2002, **35**(4): 59~64.
Yang Xiwu, Yi Zhijian. Study on reasonable distribution of reinforcement for reinforced slope. China Civil Engineering Journal, 2002, **35**(4): 59~64.
- [7] 邹静蓉, 杨忠, 郑国荣, 等. 土工格室加筋路堤边坡离心模型试验研究[J]. 公路工程, 2007, **32**(5): 5~9.
Zou Jingrong, Yang Zhong, Zheng Guorong, et al. Test research on centrifugal model of reinforced geogrid embankment slope. Highway Engineering, 2007, **32**(5): 5~9.
- [8] 介玉新, 李广信, 陈轮. 纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, **20**(4): 12~15.
Jie Yuxin, Li Guangxin, Chen Lun. Study of centrifugal model tests on texpol and cohesive soil slope. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(4): 12~15.