文章编号:1673-9469(2025)01-0066-09 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.009

多级加筋土高陡边坡工程特性及影响因素分析

赵明发[1],杨旭峰[2],杨广庆[1,3*]

(1.石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;2.中铁建大桥工程局集团第五工程有限公司,四川 成都 610000;3.土工合成材料应用河北省工程研究中心,河北 石家庄 050043)

摘要:通过对四级加筋土高陡边坡工程现场试验,研究了多级有纺高强聚酯土工布加筋高陡边坡基底垂直应力的分布规律,结果表明,基底垂直应力沿筋材方向呈现非线性分布,最大值出现在筋材末端。利用PLAXIS 2D对四级加筋土高陡边坡断面进行数值模拟,研究了该多级加筋陡坡结构的返包体背部水平土压力、各级边坡坡面水平变形、土工布应变以及边坡潜在破裂面等结构特性变化规律,并分析了筋材长度、筋材间距、填料内摩擦角以及平台宽度等影响因素对边坡水平变形特性的影响。研究得出,各级边坡水平土压力在平台处发生突变,沿坡高呈现锯齿状分布;各级边坡坡面水平变形在不同位置处均出现明显的"鼓肚"现象;不同高度处土工布应变沿筋材铺设方向呈非线性分布,并且呈现"双峰"与"单峰"两种分布形式;边坡潜在破裂面存在整体圆弧滑动破裂面和复合式破裂面两种形式,进一步发现筋材间距和长度对高陡边坡水平变形影响较为显著。

关键词:四级加筋土高陡边坡;现场试验;结构特性;影响因素

中图分类号:TU43 **文献标识码**:A

Analysis of Engineering Characteristics and Influencing Factors of Multi-stage Reinforced Soil High Steep Slope

ZHAO Mingfa[1], YANG Xufeng[2], YANG Guangqing[1,3*]

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group No. 5 Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China; 3. Hebei Engineering Research Center on Application of Geosynthetics, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Through field tests on a four-level reinforced soil high steep slope project, the distribution law of vertical stress at the base of a multi-level spun high-strength polyester geotextile reinforced high steep slope was studied. The results showed that the vertical stress at the base exhibited a nonlinear distribution along the direction of the reinforcement material, with the maximum value occurring at the end of the reinforcement material. Using PLAXIS 2D, numerical simulations were conducted on the cross-section of a four-level reinforced soil steep slope to study the changes in structural characteristics such as horizontal soil pressure on the back of the backfill body, horizontal deformation of the slope surface at each level, geotextile strain, and potential fracture surface of the slope. The influence of factors such as reinforcement length, spacing between reinforcement materials, friction angle inside the filling material, and platform width on the horizontal deformation characteristics of the slope was also analyzed. Research has shown that the horizontal soil pressure on various levels of slopes undergoes a sudden change at the platform, exhibiting a serrated distribution along the slope height; The horizontal deformation of slope surfaces at all levels shows obvious "bulging" phenomena at different positions; The strain of geotextile

收稿日期:2023-12-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52079078)

第一作者:赵明发(1997—),男,河北衡水人,硕士研究生,从事加筋土技术方面的研究。

*通信作者:杨广庆(1971—),男,河北沧州人,博士,教授,从事土工合成材料性能与加筋土技术方面的研究。

at different heights shows a nonlinear distribution along the direction of reinforcement laying, and presents two distribution forms: "double peak" and "single peak"; There are two types of potential fracture surfaces for slopes: integral circular sliding fracture surfaces and composite fracture surfaces. It was further found that the spacing and length of reinforcement materials significantly impact the horizontal deformation of high and steep slopes.

Key words: four-level reinforced soil high steep slope; field test; structural characteristics; influencing factor

随着我国经济的快速发展,基础建设规模不断扩大,加筋土高陡边坡填方工程越来越多,通过设置边坡平台更好地开发了土地资源,也因其施工简单、占地少等优势被广泛应用于公路、铁路等工程建设中。

国内外学者对加筋土边坡进行了一系列研究,陈凌伟等[1]通过离心模型试验研究了基础刚度对边坡稳定性的影响,分析了筋材拉力与加筋边坡变形特征;Chen 等[2]通过室内模型试验研究了填土黏聚力与内摩擦角对边坡稳定性的影响机制;任洋等[3]通过离心模型试验和数值模拟相结合的方法,研究了超高陡加筋土填方边坡工后变形以及土压力分布特性,得出了加筋土边坡变形主要有坡体局部开裂、面板鼓胀等形式;牛笑笛等[4]通过对成昆铁路新型整体刚性面板加筋土挡墙进行现场原位监测,得出了施工期间基底垂直应力、墙背土压力、墙顶沉降、土工格栅应变以及墙面水平变形变化规律,并且分析了地震对挡墙稳定性的影响;Chen 等[5]通过 PLAXIS 有限元软件对加筋陡坡进行数值模拟,研究了填料剪胀角、筋土界面参数对边坡内部筋材拉力分布的影响;杨广庆等[6]通过多组室内模型试验,分析了平台宽度对台阶式加筋土挡墙垂直应力的影响;介玉新等[7]采用有限元软件 ABAQUS 分析了坡体填土变形模量、泊松比以及筋材刚度对加筋土边坡变形特性的影响,得出了筋材最大拉力沿竖向分布近似为三角形或者梯形,在加筋土边坡整体分布上呈现锯齿状,拉力突变点在两级边坡台阶位置处;Tiwari 等[8]利用有限元软件探究了筋材刚度、竖向间距、坡顶荷载对 10 m 加筋土边坡稳定性的影响;杨校辉等[9]基于瑞典条分法,提出了多级高边坡稳定性计算方法和边坡滑移面搜索模型,并通过有限元法对其进行了验证;杨果林等[10]通过对南昆铁路高边坡进行现场原位监测,研究了施工期间坡体土压力、桩身弯矩以及坡面变形的变化规律,并且分析了多级组合式支挡结构的力学演变特征。目前国内外学者研究最多的一般为 2 级或者 3 级加筋土边坡,并且高度一般小于 20 m,缺乏对高于 3 级加筋土边坡的受力特性研究,并且对多级高陡边坡的坡体受力研究也不够成熟;同时现在标准、规范等[11-12]对于 2 级及以上加筋边坡的设计还没有明确规定,因此研究相关设计参数对多级边坡变形的影响具有重要意义,为以后多级边坡的设计提供了理论参考。

本文基于山西省忻州市保德县兴保铁路复线工程 4 级加筋土高陡边坡展开现场原位监测,结合有限元模拟对多级加筋土高陡边坡展开受力分析研究。主要研究内容:加筋土高陡边坡施工期间基底垂直应力、坡面水平变形、返包体背部水平土压力、筋材应变以及潜在破裂面变化情况,并研究了筋材长度、筋材间距、填料内摩擦角和平台分级宽度设计参数对多级加筋陡坡变形的影响。

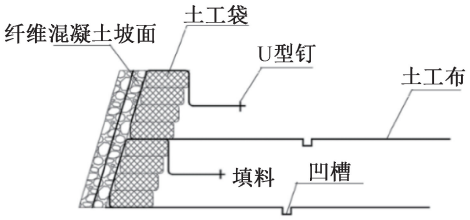
1　现场原位监测

1.1　工程概况

该加筋陡坡填方工程位于山西省忻州市保德县境内,区域地貌主要以黄土梁峁和深沟为主,自然坡率较陡,坡率为 1∶0.48~1∶2.4,边坡最大高度为 80 m。

该加筋土边坡第一、二、三级边坡坡率均为 1∶0.5,第四级边坡坡率为 1∶1.5,边坡平台宽度为 3 m;加筋材料选用有纺高强聚酯土工布,其抗拉强度不小于 280 kN/m,第一级边坡布置 7 层 25 m 长土工布,第二级边坡布置 13 层 20 m 长土工布,第三级边坡布置 13 层 18 m 长土工布,筋材竖向间距均为 0.6 m,第四级边坡采用"长筋+短筋"的交错形式布置,长筋层之间设置两层短筋层,长筋层间距 1.8 m,短筋层间距 0.6 m;返包回折土工布长度 3 m,土工布返包后,使用 U 型钉将返包回折的土工布与填土进行固定,并使用张拉器将其拉紧、固定,土工布具体铺设方式如图 1 所示;第一、二、三级边坡坡面均采用"挂网喷混"防护,钢丝网采用 3 mm 高镀锌机编网,上部喷 0.1 m

(a) 土工布现场铺设



(b) 土工布铺设结构简图

图1 有纺高强聚酯土工布具体铺设方式

Fig. 1 Specific laying method of woven high-strength polyester geotextile

厚C35纤维混凝土,第四级边坡坡面采用C35混凝土方格框架梁防护。

工程各项指标要求:填料为黄土,黏聚力为10 kPa,内摩擦角为29°,最优含水率为12.4%;返包体采用透水土工袋装瓜米石,其渗透系数不小于10^{-3} cm/s;土工布抗拉强度为319.4 kN/m,峰值应变为10.38%,2%应变强度为46.39 kN/m,5%应变强度为134.5 kN/m。

1.2 加筋土高陡边坡现场监测仪器布置

测试设备主要是长沙金码测控科技股份有限公司提供的柔性位移计、土压力盒等,监测仪器元件参数见表1,加筋土边坡监测仪器布置图见图2,水平土压力盒的埋设见图3所示。

表1 监测仪器元件参数

Tab. 1 Parameters of monitoring instrument components

名称	型号	量程	精度
土压力盒	JMZX-5006AT	0.6 MPa	0.001 MPa
柔性位移计	JMDL-2405AT	50 mm	0.01 mm

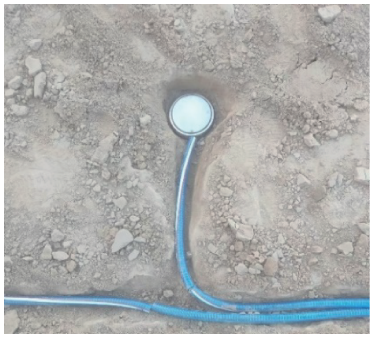


图3 水平土压力盒的埋设图

Fig. 3 Embedment diagram of horizontal soil pressure box

1.3 监测结果分析

目前现场施工到了第15层土工布,施工填筑高度较矮,施工期间加筋土边坡基底垂直应力的变化情况如图4所示。

(1)在边坡填筑初期,各层填土不同位置处垂直土压力近似相等,但随着坡体高度的增大,各层填土不同位置处垂直土压力以不同的增长速率增大,并且呈现非线性分布。主要因为在边坡填筑初期筋-土间相对位移较小,筋-土之间摩擦作用尚

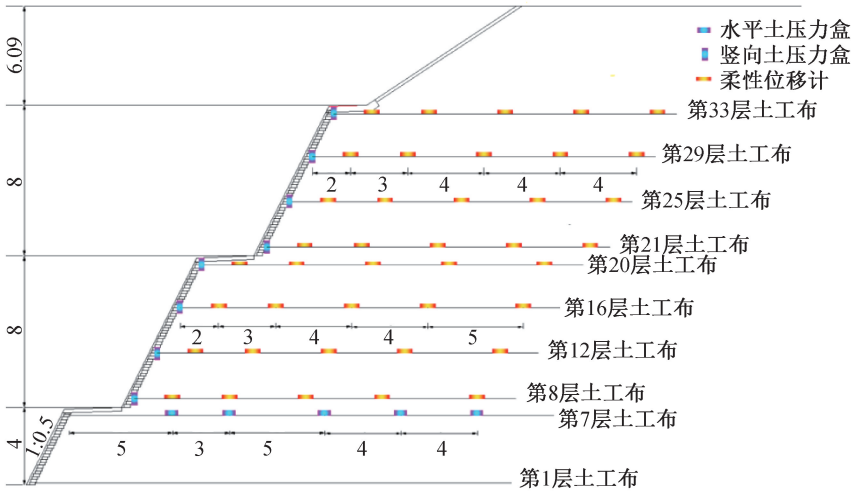


图2 加筋土边坡监测仪器布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of monitoring instruments for reinforced soil slope(unit:m)

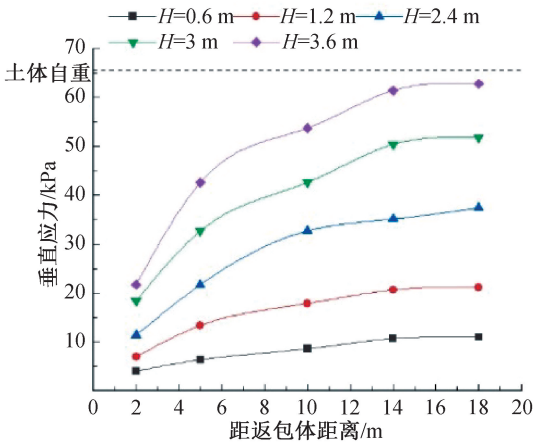


图 4　第二级加筋边坡垂直应力沿筋材铺设方向的分布

Fig. 4　Distribution of vertical stress along the direction of reinforcement material laying for the second level reinforced slope

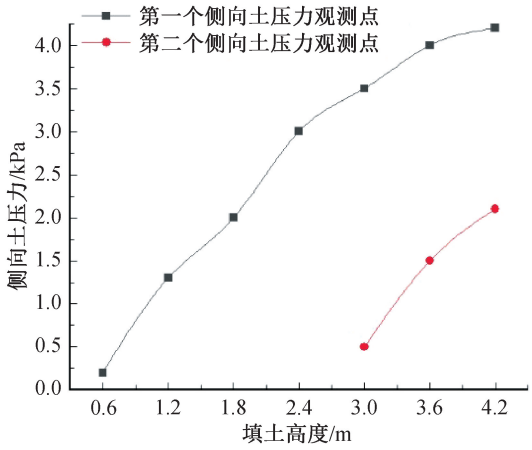


图 5　返包体背部侧向土压力随填土高度变化

Fig. 5　Lateral soil pressure on the back of the return package varies with the height of the fill soil

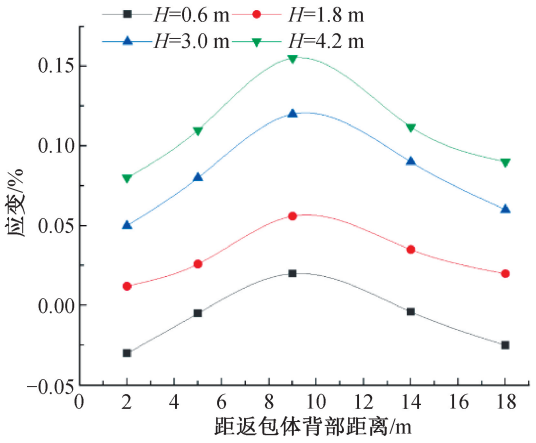


图 6　第 8 层土工布应变变化

Fig. 6　Strain variation of the 8th layer geotextile

未发挥,但随着填土高度的不断增大,各层填土不同位置处筋-土摩擦效应的发挥程度不同,进而导致各层填土平面的垂直土压力呈非线性分布。

(2)临近返包体处垂直土压力较小,最大值出现在筋材末端。主要因为土工布不仅受到加筋土体产生的垂直土压力的影响,而且还受到非加筋土体产生的水平土压力以及因水平土压力产生的倾覆力矩的影响。此外,返包体背部土工布受到填土的摩擦挤压产生了“横向土拱”效应,返包回折土工布对填土产生了“网兜”效应,因坡体向外倾斜引起返包体处应力释放共同导致临近返包体处垂直土压力较小。

(3)同一高度下,加筋土体内部垂直土压力实测值小于理论值(土体自重)。主要因为土工布“网兜”效应的影响,对上覆填土产生向上的托举力,使坡体内部应力重分布,垂直土压力减小。

施工期间,受施工进度的影响,现场得到的数据有限,底部第二级边坡返包体背部侧向土压力随填土高度变化规律曲线如图 5 所示,第 8 层土工布应变沿筋材铺设方向变化如图 6 所示。

根据图 5 分析可知,随着边坡填筑高度的增加,两个侧向土压力测点所得的侧向土压力都逐渐增大,但是侧向土压力增长速率均逐渐减小,主要原因为填筑高度的增加导致返包体向外倾斜,侧向土压力得到释放,另外返包回折土工布的“网兜效应”也使得侧向土压力增长速率减小。根据图 6 分析可知,第 8 层土工布随着填土高度的增加,应变呈现先减小后增大的趋势,并呈现“单峰”分布,在距返包体 9 m 处出现峰值。

2　四级加筋土高陡边坡数值模拟

2.1　模型材料参数的选取

通过工程地质勘察报告确定原始边坡由细圆砾土、细砂以及新黄土组成,地基土由强风化砂岩组成,加筋土边坡填料为黄土填料;边坡平台、方格框架梁均采用 C35 混凝土浇筑,抗滑桩采用 C40 混凝土浇筑,其材料参数参照《混凝土结构通用规范》[13]选取,原始边坡坡体、加筋土边坡填土以及地基土均采用摩尔库伦模型,混凝土、锚杆以及土工布分别采用线弹性、弹塑性以及弹性模型模拟,其中土工布刚度为 2 345 kN/m,其余模型材料参数见表 2 所示。

利用 PLAXIS 2D 对整个加筋土边坡施工过程进行模拟分析,断面纵向长度较大,纵向变形可以忽略,因此采用平面应变模型进行模拟,为减小

表 2 模型材料参数

Tab. 2 Material parameters of the model

材料	重度 γ/(kN·m^{-3})	杨氏模量 E/kPa	泊松比 υ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
坡体填料	18	6.00×10^{4}	0.30	10	29
细圆砾土	21	2.50×10^{5}	0.20	0	32
细砂	19	4.00×10^{5}	0.23	0	23
中砂	20	4.50×10^{5}	0.23	0	28
新黄土	16	4.50×10^{4}	0.30	20	25
C35 混凝土	25	3.15×10^{7}	0.20	—	—
C40 混凝土	25	3.25×10^{7}	0.20	—	—
锚杆	—	2.00×10^{11}	—	—	—

模型边界效应的影响,地基深度取 35 m,宽度取 85 m,最上级边坡向后延伸 29 m。根据室内拉拔试验取筋土界面系数为 0.38,加筋土边坡模型左右两侧限制其水平变形,顶部自由,模型底部既限制其水平位移又限制其竖向位移,数值分析模型如图 7 所示。

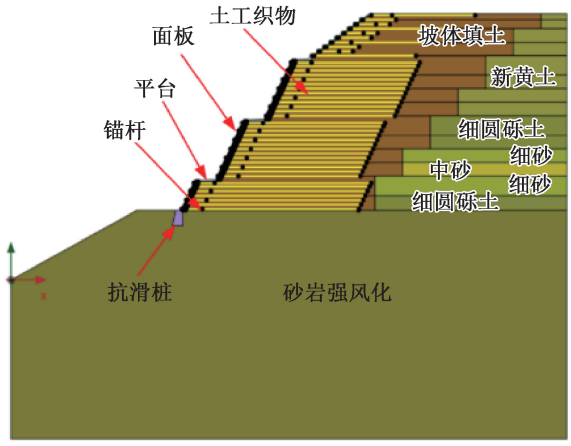


图 7 数值分析模型

Fig. 7 Numerical analysis model

2.2 数值模型的验证

为验证数值模型的正确性,将现场第二级边坡基底垂直应力与返包体背部侧向土压力实测值分别与模拟值进行对比分析,根据图 8 和图 9 所示,可以明显地看出两者的分布规律与走向变化与模拟值基本相同。边坡基底垂直应力曲线前端实测值略小于模拟值,主要因为坡体向外倾斜,垂直应力略有减小,随着距坡面距离的增加,基底垂直应力逐渐增大;返包体背部侧向土压力曲线末端实测值小于模拟值,主要因为随着填筑高度的增加,返包回折土工布网兜效应充分发挥,侧向土压力减小,多方面验证了加筋土高陡边坡数值模型参数选取的合理性。

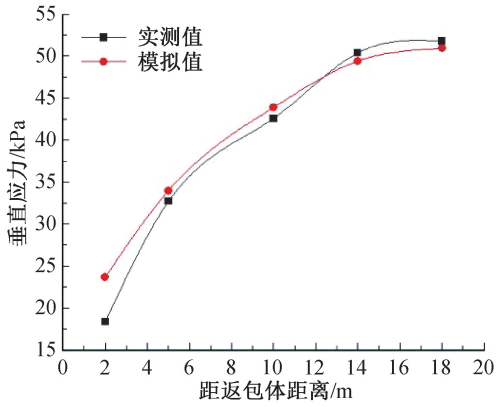


图 8 第二级边坡基底垂直应力对比

Fig. 8 Comparison of vertical stress at the base of the second-level slope

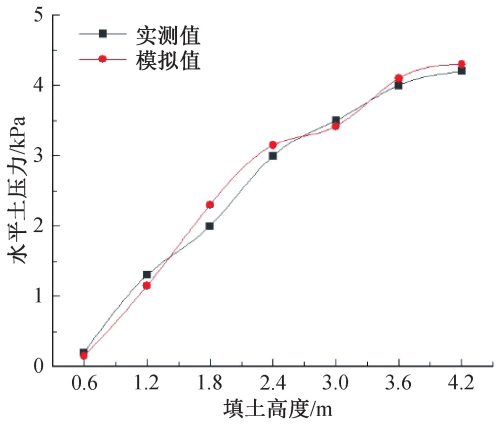


图 9 第一个测点返包体背部侧向土压力对比

Fig. 9 Comparison of lateral soil pressure on the back of the return package at the first measuring point

2.3 加筋土边坡工程填筑期间受力特性

受施工进度的影响,现场原位试验只监测了边坡基底垂直应力的分布规律,因此本小节将通过有限元数值模拟,继续分析 4 级加筋陡坡模型填筑期间坡面水平变形、不同高度处土工布应变、水

平土压力以及潜在破裂面的变化。

2.3.1　坡面水平变形

依据仿真模拟结果,本节将对各级边坡的坡面水平变形变化规律进行研究,各级边坡填筑完成时,坡面水平变形如图 10 所示。

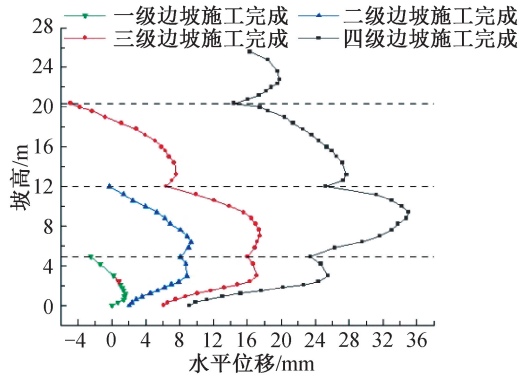


图 10 各级边坡填筑完成时坡面水平变形随坡高变化图

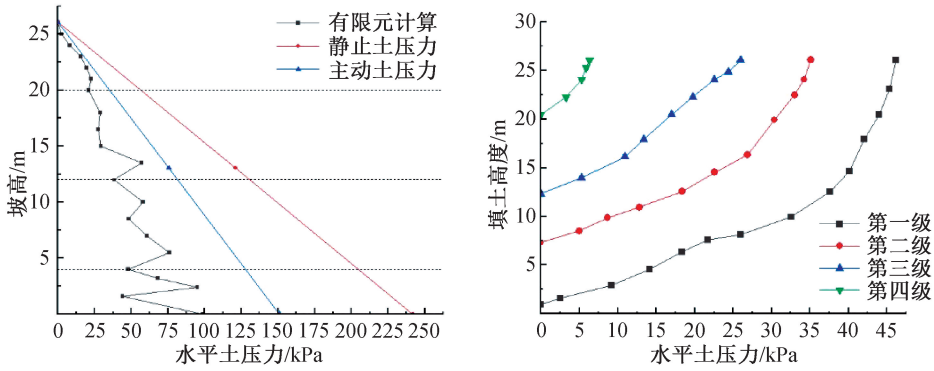
Fig. 10 Variation of horizontal deformation of slope surface with slope height after the completion of slope filling at all levels

由图 10 可知:(1)不同填筑高度下坡面水平位移沿坡高方向呈非线型分布,随着上部坡体的施工,加筋土边坡水平变形呈增大趋势,且变化速率逐渐增大。(2)当第一级边坡上部未施加填土荷载时,坡面整体变形不明显,坡面最大水平变形位于 1.2 m 坡高位置处,最大变形量为 1.56 mm。随着上部坡体填筑,一级边坡坡体在上部填土自重荷载作用下逐渐密实,坡面变形最大位置逐渐从边坡底部向边坡顶部移动,在顶部接近 $0.86H_1$ 处出现最大值,并且呈现“鼓肚”现象。主要因为边坡的水平变形受到了上级坡体荷载的影响,加筋土边坡上下级坡体间设置了台阶,基于台阶的减载效应,坡顶处水平土压力得到释放,筋土之间摩擦作用得不到充分发挥,引起坡面水平变形的激增。(3)第二级边坡上部未施加填土荷载时,坡高 $0.7H_2$ 以上坡面出现内倾趋势,可能由于随着填土荷载的增加,土工布随坡体填土发生沉降,基于土工布与坡面板的连接,造成坡面向坡体方向移动,同时桩基础在受到逐渐增大的填土荷载作用下发生沉降,引起坡面绕坡脚的转动,从而引起第二级边坡坡面中下部水平位移过小。(4)第三级边坡随上部填土高度的增加,出现整体平行外移的现象,可能由于边坡平台以及坡脚墙的施工使临近返包体处填土逐渐压缩沉降,从而产生挤压变形,导致坡面板出现平行外移的现象。(5)填筑完成时,加筋土边坡水平变形整体上呈现“锯齿状”分布,在各级边坡平台处水平变形均会发生骤减现象,并且从上到下骤减现象越来越明显。第二级边坡的水平变形量最大,其次为第三级边坡、第一级边坡和第四级边坡,并且各级边坡分别在 $0.67H_2$、$0.2H_3$、$0.86H_1$、$0.5H_4$ 处均出现不同程度的“鼓肚”现象。

2.3.2　返包体背部水平土压力

模型填筑完成时,返包体背部水平土压力变化如图 11(a)所示。模型填筑过程中,返包体背部不同位置处水平土压力随坡高变化如图 11(b)所示。

由图 11 可知:(1)在边坡填筑完成时,返包体背部水平土压力沿坡高呈非线性分布[14]。不同高度处的水平土压力均小于主动土压力,在边坡中上部模拟结果所得水平土压力与主动土压力相差较小,在边坡中下部水平土压力与主动土压力相差较大。这主要是由各级边坡间平台的存在导致边坡中上部主要受坡体填土自重影响,而中下部同时受自身坡体和上级坡体填土荷载影响。这将导致边坡中下部水平变形较大,水平土压力得到释放,同时筋-土之间相互作用也限制了水平土压



(a) 返包体背部水平土压力沿坡高分布变化　(b) 返包体背部水平土压力随坡高变化

图 11 返包体背部水平土压力变化图

Fig. 11 Diagram of horizontal soil pressure changes on the back of the return package

力的增长。(2)由图11(a)可知,随着填筑高度的增加水平土压力逐渐减小,但在各级边坡平台处水平土压力都会发生突变,水平土压力沿坡高整体上呈现“锯齿状”分布。主要因为各级边坡平台处会发生水平位移“骤减”现象,水平土压力得不到有效地释放,因此各级边坡平台处会发生水平土压力“骤增”的现象,如图10所示。(3)由图11(b)可知,随着坡体填筑高度的增加,各级边坡返包体背部水平土压力逐渐增大,但增长速率逐渐降低。主要因为随着填筑高度的增加,返包体作为边坡临时面板逐渐发生变形,以及返包体背部土工布形成的“网兜效应”共同导致水平土压力增长速率降低。

2.3.3 土工布应变分析

模型填筑期间,土工布应变沿筋材铺设方向分布如图12所示。

从图12可以看出:(1)随着上部坡体填筑高度的增加,土工布应变沿筋长方向呈非线性分布,可能由于同一高度处不同位置加筋土体产生不均匀沉降,从而引发土拱效应导致的。不同层位土工布应变分布规律不同,第1层与第32层出现“双峰”分布,第1个峰值位置靠近加筋边坡潜在破裂面,加筋边坡整体受力导致第2个峰值出现在土工布中后端;第10层与第20层出现“单峰”分布。(2)第20层土工布应变出现负值,最小值为-0.2%,可能由于该层土工布整体处于受弯状态所导致。随着上部坡体填筑高度的增加,各层土工布应变逐渐增大,但增长速率逐渐减小,土工布的“网兜效应”以及土工布层数的增加均使得竖向应力作用效果减弱,从而土工布的增长速率逐渐减小。

2.3.4 边坡潜在破裂面

利用强度折减法分析四级加筋土边坡安全性,并对四级加筋陡坡潜在破裂面形式进行了研究,其位移增量云图如图13所示。

从图13可知:四级加筋土边坡存在多条明显的潜在破裂面,在众多潜在破裂面下计算加筋边坡安全系数为1.49,满足《铁路路基支挡结构设计规范》中要求的安全系数不小于1.3的要求,该结构是安全的。潜在破裂面分别为穿过加筋坡体区域外由地基近表面滑出的深层整体圆弧滑动破裂面和穿过加筋坡体区域的复合式破裂面,整体圆弧滑动破裂面穿过边坡底部抗滑桩,抗滑桩的存在抑制了整体圆弧滑动破裂面向地基深处发展。加筋土通过提高土体的抗剪强度,增加了土体对深层滑动的阻力,从而有助于防止大规模的滑动

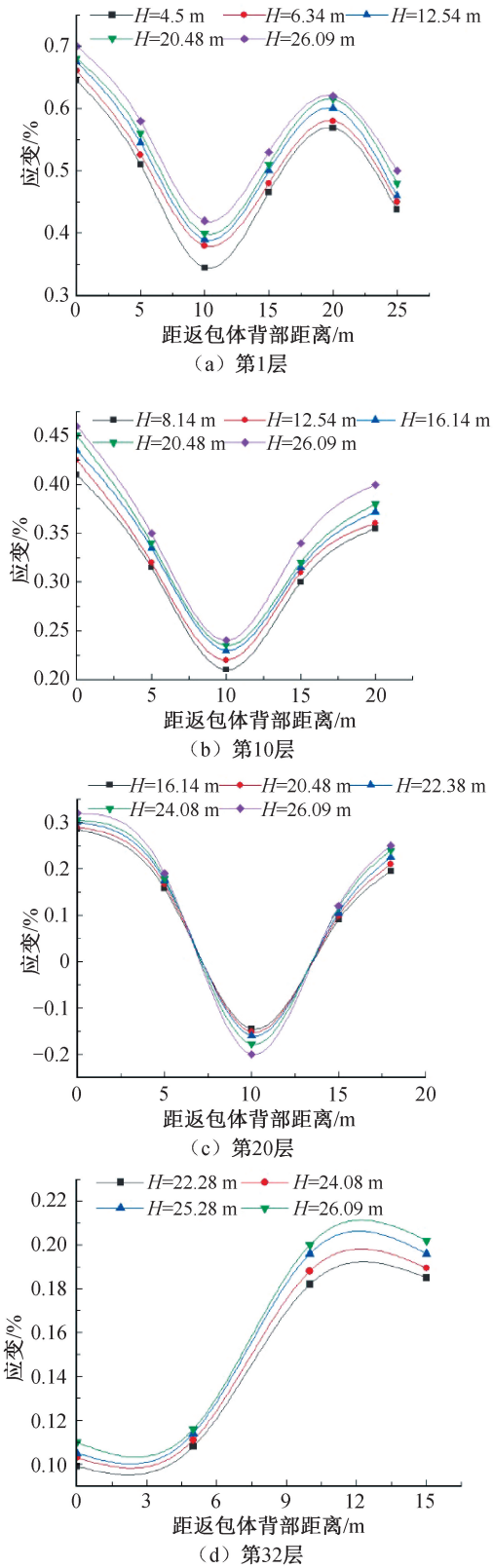


图12 土工布应变填土高度变化曲线

Fig. 12 Variation curve of geotextile strain filling height

破裂;对于可能发生复合式破裂的区域,加筋层可以有效地限制土体的位移,减少土层之间的相对滑动,从而抑制复合式破裂面的发展。传统的单

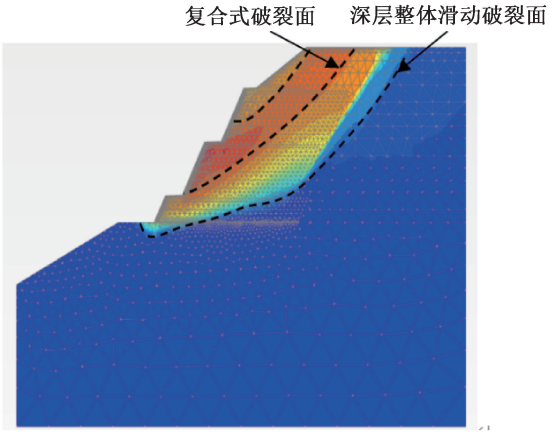


图 13　加筋土边坡潜在破裂面云图

Fig. 13　Cloud map of potential fracture surface of reinforced soil slope

级加筋土边坡为规则的圆弧滑动破裂面和折线型破裂面,多级加筋土边坡破裂面形式与传统单级加筋土边坡不同,后续需要对多级加筋土边坡破裂面变化规律进行深层次研究,为多级加筋土边坡的设计提供有力的参考。

3　多级加筋土边坡水平变形影响因素分析

3.1　筋材长度对坡面水平变形的影响

为研究筋材长度对边坡水平变形的影响,在控制其他影响因素不变的情况下,只改变筋材的长度,以第三级边坡筋材长度 18 m 为参照对象,将各级边坡筋材长度同比例增大或缩小,取第三级边坡筋长 14、16、18、20 和 22 m 五种筋材长度进行研究,水平变形曲线如图 14 所示。

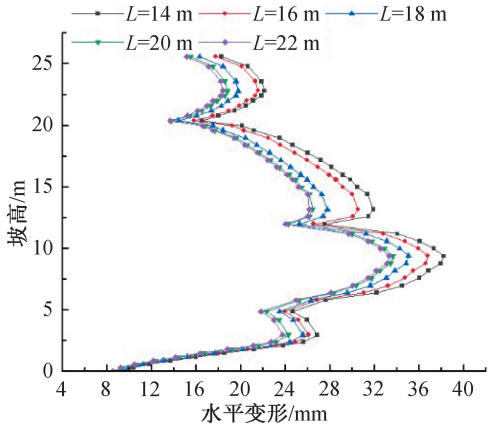


图 14　筋材长度对边坡坡面水平变形的影响

Fig. 14　Influence of reinforcement length on horizontal deformation of side slope

从图 14 可知,筋长为 14、16 m 时,二、三、四级边坡水平位移增幅明显,并且每级边坡“鼓肚”现象更加显著,随着筋材长度的增加,边坡水平变形减小,“鼓肚”现象也得到了缓解,边坡中部最为显著,筋长为 20 m 时,最大水平变形减少 15%,筋长为 22 m 时,最大水平变形减少 18%,由此可以看出边坡坡面水平变形在一定范围内随着筋长增加显著减小,但筋长超过一定范围时,就会形成加筋富裕的现象,富裕筋材部分不会产生太大的加筋效果,坡面水平变形也很难得到改善,因此只是简单地通过增加筋材的长度来限制边坡水平变形是不可行的。由此该工程合适的加筋长度为 18~20 m,因此建议加筋土边坡的筋材长度为坡高的 70%~80%为宜。

3.2　筋材间距(加筋率)对坡面水平变形的影响

为研究筋材间距对坡面水平变形的影响,在控制其他影响因素不变的情况下,研究 0.4、0.6、0.8 和 1 m 四种筋材间距对坡面水平变形的影响,坡面水平变形曲线如图 15 所示。

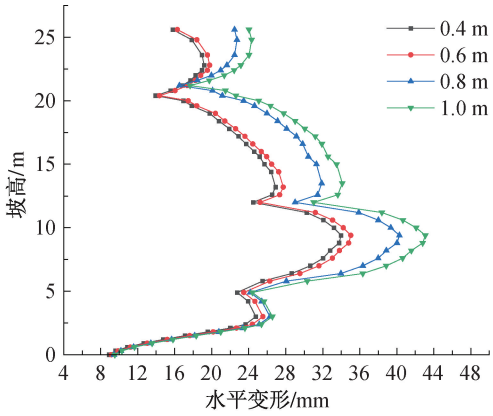


图 15　筋材间距对边坡坡面水平变形的影响

Fig. 15　Influence of bar spacing on horizontal deformation of side slope

从图 15 可知,随着筋材间距的增大,坡面水平变形也随之逐渐增大,水平变形沿坡高的分布形态也略有改变。当筋材间距由 0.6 m 增大到 0.8、1 m 时,水平变形分别增大了 30%、45%。筋材间距由 0.6 m 减小到 0.4 m 时,水平变形也相应减少了 8%,虽然加筋率越大,筋材对土体的水平变形约束越强,加筋土结构极限强度越大,但是筋材对土体的约束作用还是有限的,筋材间距过小会导致一部分筋材起不到作用,容易形成“超筋土”,导致工程造价高,施工难度大,建议本工程筋材间距控制在 0.4~0.6 m 较为合适。

3.3　填料内摩擦角对坡面水平变形的影响

为研究填料内摩擦角对坡面水平变形的影响,

选取填料内摩擦角为21°、25°、29°、33°和37°五种情况进行分析,坡面水平变形曲线如图16所示。

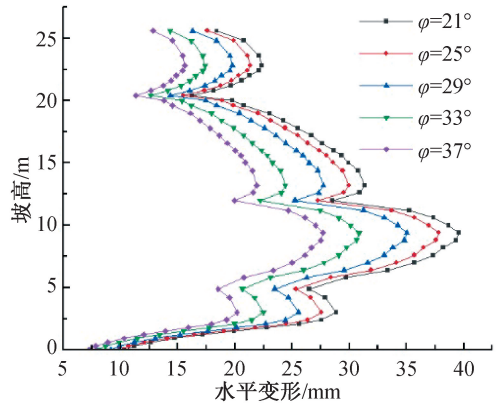


图16 填料内摩擦角对边坡坡面水平变形的影响

Fig. 16 Influence of internal friction angle of fillers on horizontal deformation of slope surface

从图16中数据分析可知,随着填料内摩擦角的增大,坡面水平变形逐渐减小,但坡面水平变化趋势未发生明显变化。当填料内摩擦角从21°增大到25°、29°时,水平变形分别减小了5%、11%,可能由于土颗粒之间的咬合作用增强,筋土之间摩擦作用充分发挥,边坡坡面背部水平土压力减小,因此坡面水平变形减小;但当摩擦角增到33°和37°时,边坡坡面水平变形变化量较小,因此在保证工程安全性的前提下,填料的内摩擦角并不是越大越好,针对此工程填料内摩擦角控制在25°~33°较为合适。

3.4 平台宽度对坡面水平变形的影响

为研究平台宽度对边坡坡面水平变形的影响,取平台宽度2、2.5、3、3.5、4 m五种情况进行分析,坡面水平变形曲线如图17所示。

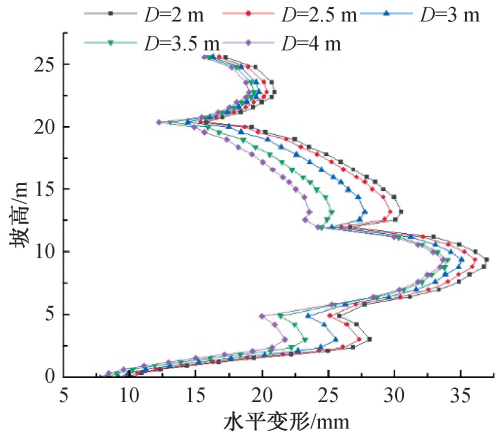


图17 平台宽度对边坡坡面水平变形的影响

Fig. 17 Influence of platform width on horizontal deformation of slope surface

从图17数据分析可得,边坡水平变形受平台宽度影响较大,随着平台宽度的增大,坡面水平变形逐渐减小,且平台宽度越大,减小趋势越明显。台阶宽度由2 m增加至4 m时,二级边坡水平变形由36 mm减小至30 mm,减小了16%;三级边坡水平变形由29.23 mm减小至22.68 mm,减小了22%。可能随着平台宽度的增大,平台的减载效应逐渐降低,降低了上级坡体自重荷载的影响;另一方面坡体中筋材的加筋效应增大了加筋坡体的应力扩散角,虽然平台宽度为4 m时,水平变形量最小,但在实际工程中能够减少土地资源的占用,因此平台宽度取2.5~3.5 m较为合适。

4 结论

1)多级加筋土边坡基底垂直应力沿筋长方向呈非线性分布,最大值出现在筋材末端。沿坡高方向,垂直土压力随填筑高度增加而逐渐增大。

2)返包体背部水平土压力沿坡高呈现非线性分布,在平台处出现明显的“骤增”现象。随着坡体填筑高度的增加,水平土压力逐渐增大,并且随着填筑的进行逐渐趋于稳定。

3)随着坡体填筑高度的增加,各级坡面水平变形在平台处发生“骤减”现象,沿坡高方向呈现锯齿状分布。

4)随着填筑高度的增加,各级边坡最大变形位置存在明显变化,第一级边坡由底部$0.3H_1$向顶部$0.86H_1$移动,第二级边坡由底部$0.11H_2$向顶部$0.67H_2$处移动,第三级边坡最大水平变形位置位于$0.3H_3$处附近。各级边坡从下到上分别在$0.86H_1$、$0.67H_2$、$0.2H_3$、$0.5H_4$处均出现不同程度的“鼓肚”现象。

5)土工布应变随上部填土高度增加而逐渐增大,沿筋材铺设方向呈非线性分布。不同层位土工布应变呈现“双峰”与“单峰”形式分布。

6)研究了筋材间距、筋材长度、填料内摩擦角以及平台宽度对边坡变形的影响,其中筋材间距和筋材长度对边坡水平变形影响明显,在以后的加筋土边坡设计中应将其控制在合理范围内。

参考文献:

[1] 陈凌伟,李 波,李从安,等. 基础刚度对加筋边坡稳定性影响的离心试验研究[J]. 岩土工程报, 2022, 44(S2): 58-61.

(下转第81页)

3)最后利用 Revit 建立了附着式升降脚手架模型族库,运用 HTML5、CSS+JavaScript 等编程语言,选取 BIMFACE 轻量化引擎,实现 BIM 模型在 Web 端的显示与交互,实现附着式升降脚手架运行状态的可视化管理。

参考文献:

[1] 裴兴旺, 赵向东, 周崇刚, 等. 基于灰色欧几里得的全钢型附着升降脚手架安全性评价[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 405-415.

[2] 白凤美, 李佳洋. 附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(S2): 35-39.

[3] 金占勇, 夏 爽, 黄春雷, 等. 基于 CiteSpace 的国内 BIM 研究热点与趋向分析[J]. 建筑经济, 2021, 42(6): 103-107.

[4] HUANG Y L, CHEN W F, CHEN H J, et al. A monitoring method for scaffold-frame shoring systems for elevated concrete formwork[J]. Computers & Structures, 2000, 78(5): 681-690.

[5] KIM H, AHN H. Computing in civil engineering[M]. The United States of America: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2011.

[6] 刘 垚. 附着式升降脚手架力学特性分析及其设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.

[7] 周 磊. 倾斜附着式升降脚手架静力稳定及防坠动力特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.

[8] 解金箭. 附着式升降脚手架安全管理研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2017.

[9] 方 兴. 基于 BIM 技术的附着升降脚手架信息化管理应用研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.

[10] 刘剑锋. 基于物联网的附着式升降脚手架安全监控管理系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

[11] 莫言迟, 刘占省, 张安山, 等. 融合 BIM 技术和物联网的消防安全数据管理方法[J]. 建筑技术, 2021, 52(6): 710-713.

[12] DONG Y, XU Y, LI H, et al. A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(1): 229-242.

(责任编辑　王利君)

(上接第 74 页)

[2] CHEN Y, LIN H, CAO R, et al. Slope stability analysis considering different contributions of shear strength parameters[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(3): 04020265.

[3] 任 洋,李天斌,杨 玲,等. 基于离心模型试验与数值计算的超高陡加筋土填方边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 836-844.

[4] 牛笑笛, 杨广庆, 周诗广, 等. 铁路新型整体刚性面板加筋土挡墙现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(5): 1-10.

[5] CHEN J, ZHANG W, XUE J. Zoning of reinforcement forces in geosynthetic reinforced cohesionless soil slopes[J]. Geosynthetics International, 2017, 24(6): 565-574.

[6] 杨广庆,刘华北,吴连海,等. 台阶宽度对加筋土挡墙垂直应力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 209-216.

[7] 介玉新,周诗博,郭政豪,等. 平台分级对加筋土边坡稳定性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1178-1187.

[8] TIWARI G, SAMADHIYA N K. Factors influencing the distribution of peak tension in geosynthetic reinforced soil slopes[J]. Indian Geotechnical Journal, 2016, 46(1): 235-244.

[9] 杨校辉,陆 发,郭 楠,等. 多级黄土高边坡稳定性计算及数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 172-177.

[10] 杨果林,李琪焕,段君义,等. 膨胀土高边坡多级组合式支挡结构力学特性现场试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 171-180.

[11] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

[12] 山西省交通厅. 公路加筋土工程设计规范:JTJ 015—91[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构通用规范:GB 55008—2021[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2021.

[14] 靳 静,杨广庆,王志杰,等. 多级加筋土高挡墙的工程特性及影响因素[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 8-16.

(责任编辑　王利君)