

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.013

加筋土挡墙工作特性数值分析

陈晓飞, 吴建翔, 李园

(扬州市市政建设处, 江苏 扬州 225000)

摘要: 为加深对墙后填土表面倾斜加筋挡土墙工作特性的理解, 采用有限单元法对某一工程实际案例进行了分析。计算中考虑了分级填土过程, 研究了施工过程中面板的水平位移, 格栅拉力的分布, 以及抗滑安全系数等内容。结果表明加筋区域具有较好的整体性, 可视为具有加筋长度的等宽重力式挡土墙。破坏形式为沿墙底的滑动破坏和加筋区域以外填土中的圆弧滑动破坏。加筋土挡墙背面也是潜在的破裂面。对比分析了格栅抗拉刚度、长度、间距等因素对面板水平变形、安全系数和破坏模式的影响, 所得结果对相关工程有较好的参考意义。

关键词: 加筋土挡墙; 有限元; 位移; 格栅拉力; 稳定性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)04—0081—06

Numerical Analysis on Working Behaviors of Reinforced Earth Retaining Walls

CHEN Xiaofei, WU Jianxiang, LI Yuan

(Yangzhou Municipal Construction Department, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

Abstract: In order to improve the understanding of the working characteristic of reinforced earth retaining walls with inclined fill, a practical engineering case was analyzed using the finite unit method. The step construction process was considered in the calculation. Based on results of the numerical analyses, horizontal displacement of the panel during construction, distribution of the geogrid tension, and factor of the safety were analyzed. Results show that the reinforced area has good integrity and can be regarded as an equal-width gravity retaining wall. The failure includes sliding failure along the bottom of wall and circular sliding failure in the fill outside the reinforced area. The backside of the reinforced earth retaining wall is also a potential rupture surface. The effects of tensile stiffness, length, spacing of geogrid on horizontal deformation, safety factor and damage mode were compared and analyzed.

Keywords: reinforced earth retaining wall; finite element method; displacement; geogrid tension; stability

加筋土挡墙是指在土体中按一定的间距水平铺设强度较高、延伸率较小的土工格栅加筋材料, 通过加筋材料与土体的相互作用, 形成类似重力式挡土墙的整体结构, 从而达到维持稳定性的目的^[1-2]。与一般的重力式挡土墙相比, 加筋土挡墙具有自重轻、施工简便、对地基承载力要求低、适应变形强等优点^[3-4]。实际工程中, 常采用极限平衡法进行加筋土挡土墙的设计, 设计合理与否在于假定的破坏模式是否正确。目前对墙后填土水平的加筋挡土墙已有较成熟的设计方法^[5], 一般先假设墙后土压力分布, 然后再确定平衡土压力大小所需要的加筋体

强度, 分析内部稳定性, 并根据传统重力式挡土墙的分析方法验算外部稳定性。这类方法无法给出土体的应力应变和墙体的变形, 尤其是对墙后填土表面倾斜的情况, 如何合理评价挡墙的稳定性的值得进一步研究。

由于有限元方法能较为合理模拟材料的力学性能, 精确反映施工过程和边界条件, 适用于研究各类土工建筑物的工作特性^[6-8]。盛学庆等^[9]基于土体位移和塑性应变结果, 指出破坏面时始于墙底向上延伸的曲面, 并分析了边坡断面形式、加筋力学特性与铺设方式对包裹式加筋土挡墙稳定性的影响。

收稿日期: 2021-04-03

修稿日期: 2021-05-01

基金项目: 住房和城乡建设部科技项目(2018-K5-008)

作者简介: 陈晓飞(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事土木工程方面的工作。E-mail: chxf_yz@163.com

林彤^[10]从应力和塑性应变分布的角度对三级加筋土挡墙的工作特性进行了研究,通过与离心机试验和工程实际的对比,印证了计算方法的可靠性。徐超等^[11]研究了有限填土加筋土挡墙的稳定性和破坏模式,确定了复合滑动面形状。Leshchinsky 等^[12]基于数值分析结果,总结了加筋土挡墙可能的内部破坏、外部破坏、复合破坏以及整体破坏模式。陈建峰等^[13]研究了加筋土挡墙的内部破坏演化过程,认为筋材由下而上依次断裂,挡墙内部破坏面与地基圆弧滑移面贯通,为复合滑动模式。

为加深对加筋土挡墙后侧存在倾斜填土时工作特性的理解,本文结合某一实际工程,采用有限元软件 ABAQUS 进行了数值分析,研究了加筋体材料和加筋方式对加筋土挡墙稳定性的影响。

1 数值计算模型

1.1 依托工程概况

某生态修复工程需要进行山体修复。人工山体堆填用土拟采用当地余泥渣土,填土方量约 23 万 m^3 ,堆填厚度最大 12 m 左右。由于工程临近城市交通主干道,为保证用地不超红线范围,工程拟采用加筋土挡墙收坡。图 1 给出了填土高度最大的断面示意图,填土-1 为砂砾;由于原地基表面存在一定的不良杂土,施工时将其开挖,分台阶回填了填土-2 (硬塑粉土夹粉质黏土);填土-3 为粉土。加筋土挡墙的高度为 7.02 m,坡比 1:0.05。加筋材料选用长 9 m 的土工格栅,厚度 5 mm,纵向极限抗拉强度 120 kN/m,竖向间距 0.3 m;加筋土面层为 C25 混凝土预制模块。墙下设置厚 0.6 m 的灰土垫层。墙后土体采用二级变坡,坡比分别为 1:3 和 1:6,坡顶距地基表面 12.6 m。

由于墙后填土表面倾斜,采用常规理论方法进行计算有一定的难度和局限性。为保持工程的安全性,本文采用数值分析的方法,对该加筋土挡墙的工作特性进行分析,评价挡土墙的稳定性的,进而对工程设计进行优化。

1.2 计算软件和几何模型

数值计算采用有限元软件 ABAQUS 进行。分析在平面应变条件下进行,为避免边界条件对计算结果的影响,水平方向尺寸取 70 m,地基深度取 20 m,模型总高度 32 m。土体采用平面四节点等参元划分;不考虑加筋土工格栅的抗弯刚度,采用杆单元划分,土工格栅与土体的相互作用采用嵌入功能模拟。挡土墙面板采用梁单元模拟,各面板之间设定

为铰接。共计划分 21 999 个单元,22 325 个节点。

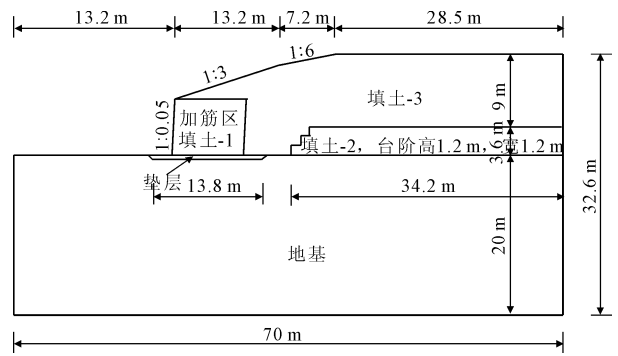


图 1 加筋土挡墙典型截面示意图

1.3 材料模型和计算参数

挡土墙面板采用弹性模型模拟,弹性模量 $E = 28 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.2$ 。土体采用莫尔-库仑模型模拟,该模型能较好反映土体强度特性等优点,虽存在模拟土体剪胀剪缩性的能力一般等缺点,但由于参数容易确定,物理意义明确等优点,在岩土工程分析中得到了广泛应用。计算中参数根据岩土工程勘探报告确定,数值如表 1 所示。

表 1 土体计算参数

土体	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /kPa	泊松比	凝聚力 /kPa	摩擦角 /($^\circ$)
地基	20.0	5770	0.35	35.0	13.3
垫层	20.0	50000	0.30	0.0	40.0
填土-1	20.0	50000	0.30	0.0	35.0
填土-2	20.0	5770	0.30	35.0	13.3
填土-3	18.5	10000	0.33	4.3	20.9

为分析土工格栅材料性能和布筋形式对加筋土挡墙工作特性的影响,计算中考虑了格栅抗拉刚度、长度和间距等相应参数的变化,具体计算方案见表 2。

表 2 计算方案

编号	抗拉刚度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	长度 /m	间距 /m	抗拉强度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	安全系数	最大格栅拉力 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	
						竣工	破坏
C1	13000	9	0.3	120	1.30	18.3	60.2
C2	8000	9	0.3	120	1.30	17.2	56.1
C3	3000	9	0.3	120	1.30	15.2	38.4
C4	1000	9	0.3	120	1.29	14.7	22.3
C5	100	9	0.3	120	2.4m 时破坏	—	—
C6	13000	3	0.3	120	9.6m 时破坏	—	—
C7	13000	6	0.3	120	1.18	18.4	21.3
C8	13000	12	0.3	120	1.39	19.4	76.0
C9	13000	9	0.6	120	1.30	34.9	39.8
C10	13000	9	1.2	120	1.2m 时破坏	—	—

1.4 计算工况

为模拟施工过程,填土共分为11级进行,前10级填土厚度1.2 m,最后1级填土0.6 m。格栅在相应填土过程中激活,发挥抗拉作用。当填土完成之后,将土体和加筋体的强度进行强度折减,进而确定加筋土挡墙的稳定系数。强度折减法的本质是根据施工结束后的应力状态,逐步减小土体的粘聚力和摩擦角,直至破坏为止。破坏时强度的折减幅度可认为是传统意义上的安全系数。

2 计算结果及分析

本节主要结合方案C1分析加筋土挡墙在不同阶段的工作特性,后续将对对比分析各参数的影响。

2.1 面板水平位移

图2是方案C1不同填土高度下面板的水平变形,图中曲线的局部波动反映了分层填土的特点。由于填土自重作用下,土体水平变形指向临空面,面板在基础约束和土体水平挤压的联合作用下向土坡外变形。某一填土高度下,面板水平变形沿面板高度向上逐渐减小,隐含体现了土工格栅加筋有效约束了土体水平变形,保证了土体稳定性。随着填土高度的增加,面板水平变形逐渐变大,填土结束时的面板底部位移为16.3 cm,面板顶部位移7.70 cm,表明加筋土挡墙可允许较大的水平变形。

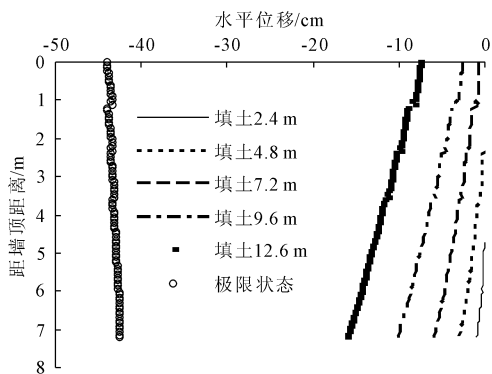


图2 面板水平变形

图2中极限状态指的是利用强度折减法求解得到土体破坏状态。注意到破坏时面板的位移模式与施工过程中的结果有明显的区别,面板水平变形近似沿高度均匀分布,基本处于42 cm~44 cm之间,顶部的水平变形略大于面板底部的结果,这意味着破坏时加筋土挡墙倾覆破坏可能性较小,主要是沿加筋土挡墙底面的水平剪切破坏。

2.2 格栅拉力

图3是填土结束时格栅拉力分布,拉力最大值

汇总于表2。清晰起见,图3中只给出了部分格栅的计算结果,如图中的格栅编号G1是从墙顶向上的第1根格栅。与图2中面板变形分布对应,墙底附近的水平变形最大,相应位置格栅的拉伸也较大,因此拉力最大值发生在底层格栅,最大值18.2 kN/m。沿墙体向上,格栅拉力逐渐减小。各格栅最大拉力的位置逐渐右移,且格栅拉力逐渐变得平滑,意味着施工结束时土体整体性较好,大部分高程土体中的变形相对均匀,没有潜在的滑动面。另外注意到,格栅尾部也存在一定的拉力,这主要是由于相应位置土体竖向变形造成格栅拉伸所引起的。

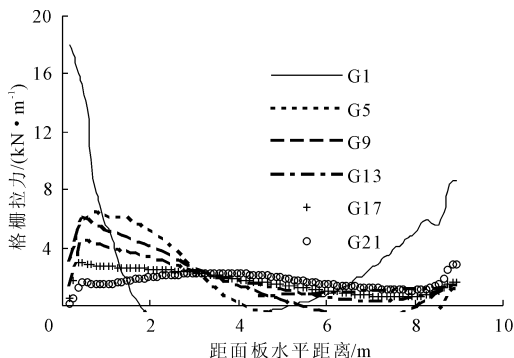


图3 竣工时格栅拉力

图4是土体破坏时的格栅拉力分布。对比填土结束时的结果可以看出,底层格栅受拉区有明显的增加,最大拉力出现的位置也有明显的变化。填土结束时,格栅拉力最大值出现在靠近面板的位置,体现了加筋格栅对面板的拉紧作用。土体破坏时,格栅尾部的拉力变化复杂,数值均较大,最大值约为60 kN/m。这可能是由于土体破坏面通过底层格栅的尾部,格栅收到较大的拉伸作用。随着高程的增加,格栅拉力逐渐减小,分布也越均匀。这意味着破坏时的滑动面没有经过加筋区,相应区域有较好的整体性。

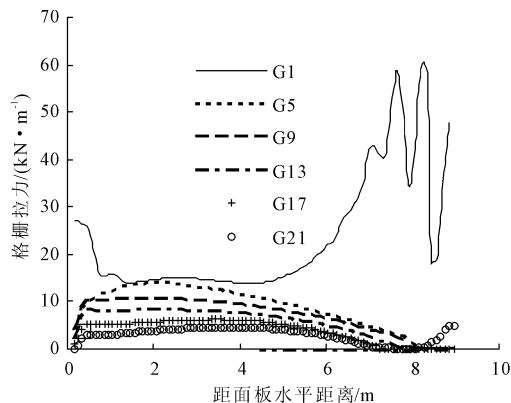


图4 破坏时格栅拉力

2.3 加筋土挡墙稳定性

工况 C1 的计算结果表明当土体强度折减幅度为 1.30 时,土坡失稳,即安全系数为 1.30。图 5(a)和图 5(b)分别是破坏时的水平和竖向位移分布。扣除施工位移,强度折减引起的水平和竖直位移增量分别见图 6(a)和图 6(b)。根据位移的变化梯度,可以确定土体中潜在破坏面的位置。结果表明破坏面首先从填土表面向左下方发展,绕过加筋土挡墙底部后向左上方延伸到墙前地基表面。由于加筋作用,墙后加筋土未出现破坏,整体性较好,可视为具有加筋长度的重力式挡土墙。土体呈现出沿加筋挡土墙底面的水平滑动破坏和墙后倾斜填土中的圆弧滑动破坏共同组成的复合破坏特点。注意到滑动面绕过底部土工格栅的尾部,这解释了图 4 中格栅 G1 的拉力分布特点。

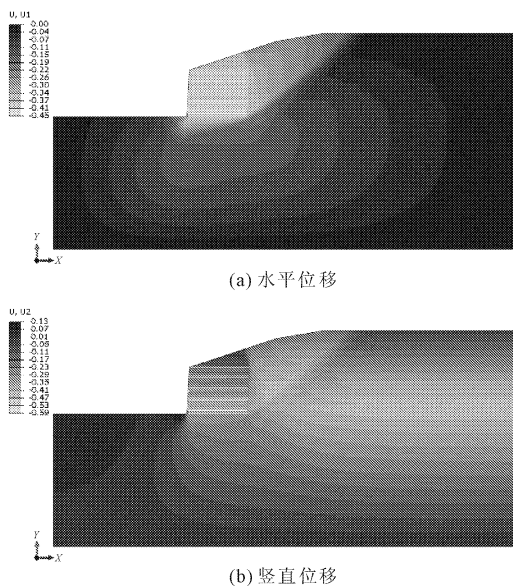


图 5 破坏时的位移分布

格栅的加筋效果从图 7 中填土等效塑性应变的分布也可以得到印证。强度指标下降之后,土体强度不能满足稳定性的要求,当单元出现屈服后,产生塑性应变,荷载向周围转移,当等效塑性应变贯通成片后,土体破坏。等效塑性应变的条带分布与根据位移确定的潜在滑动面位置基本一致。同时注意到,加筋范围内的土体可视为具有加筋长度的重力式挡土墙,墙背不同填土材料的交界处存在一定的剪应力,强度折减后也出现了较集中的塑性应变,是潜在的破裂面,该破裂面也通过加筋挡土墙顶部的倾斜填土。另外,墙端土体的等效塑性应变较大,是

相对较危险的区域。陈建峰等^[14]也指出,软土地基上加筋土挡墙的破坏模式可简化为加筋填土中的朗肯破坏面与地基中圆弧滑动面的组合。

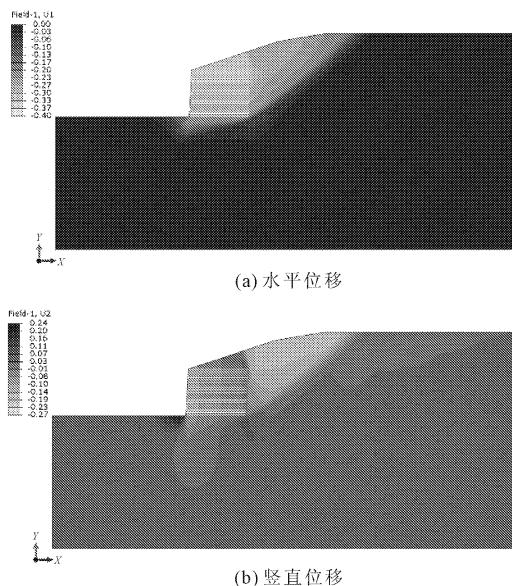


图 6 强度折减引起的位移增量

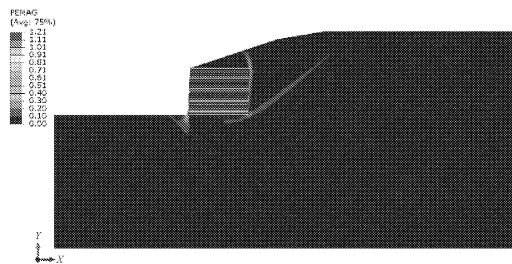


图 7 破坏时等效塑性应变分布

2.4 格栅抗拉刚度对稳定性的影响

竣工时面板顶部水平位移和破坏时的安全系数随格栅抗拉刚度的变化如图 8 所示,安全系数同时汇总于表 2,图 9 是相应的破坏面位置。结果表明格栅的抗拉刚度主要影响加筋土挡墙面板的水平位移,抗拉刚度越大,格栅拉力越大,阻碍土体水平变形的作用越明显,面板水平变形越小。但格栅刚度达到 8 000 kN/m 之后,通过提供刚度减小变形的作用不再明显。C1 - C4 工况下土体的破坏面位置基本接近,均表现为加筋土挡墙底部的水平滑动和填土中的圆弧滑动,因此安全系数大小也十分接近,均为 1.30 左右。对应工况 C5,格栅刚度过小,不能有效约束土体水平位移,靠近临空面的土体单元有足够的应变达到主动破坏,当填土高度达到 2.4 m 时,土体就已破坏,破坏面为通过墙踵倾斜向上的直线。

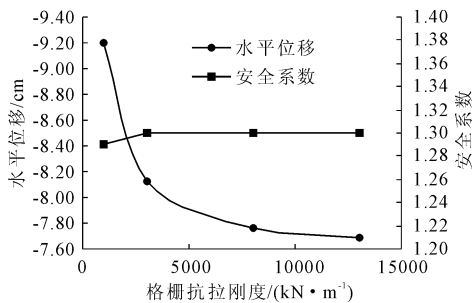


图 8 格栅抗拉刚度的影响

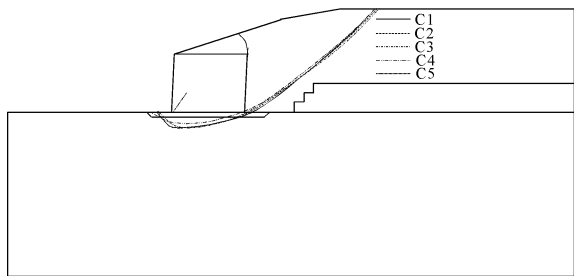


图 9 不同格栅抗拉刚度下的破坏面

2.5 格栅长度对稳定性的影响

格栅长度对面板顶部水平位移和安全系数的影响如图 10 所示,破坏面位置见图 11。

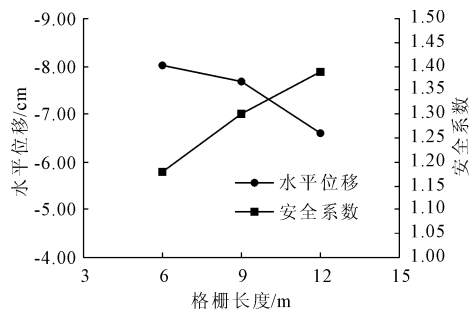


图 10 格栅长度的影响

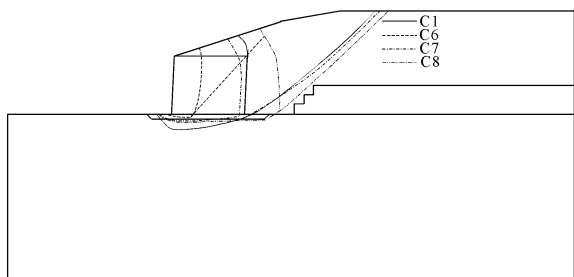


图 11 不同格栅长度下的破坏面

当格栅长 3 m 时,填土高度达到 9.6 时就已破坏,破坏面包括沿着土工格栅尾部与面板平行的平面和通过底部格栅尾部倾斜向上的斜面两种可能。随着格栅长度的增加,面板顶部水平位移逐渐减小,安全系数逐渐增加,破坏模式区别不大。当格栅长度伸入填土分区 3 之后,破坏时格栅拉力提高明显,

形成的加筋土区域扩大,滑弧尺寸更大,整体稳定性有明显的提高,安全系数达到 1.39。

2.6 格栅间距的影响

格栅间距对面板顶部水平位移和安全系数的影响如图 12 所示,破坏面位置见图 13。结果表明格栅间距主要影响加筋土挡墙的内部稳定性。间距 1.2 m 时,第一层填土中没有加筋体存在,土体强度无法维持现有坡度下的稳定性,填土高度 1.2 m 时就已破坏。间距 0.6 m 时内部稳定性得到保证,由于间距较大,格栅拉力有明显的提高,最终破坏面位置与间距 0.3 m 时近似一致,破坏主要在墙后倾斜填土和加筋格栅尾端的土体之中形成,安全系数也很接近,但间距较大的情况下,墙体位移略大。周健等^[16]也指出,增大筋材布置间距会使墙体位移增加,当间距较小时,加筋土均能很好地与土体共同变形,不会出现拔出破坏。

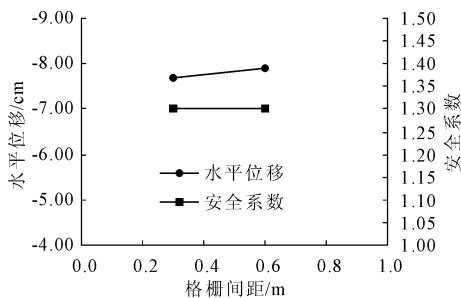


图 12 格栅间距的影响

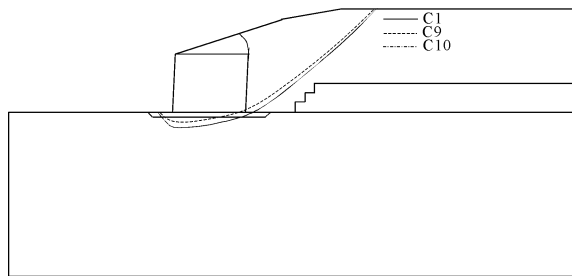


图 13 不同格栅间距下的破坏面

3 结论

结合实际工程,采用有限元模拟了加筋土挡墙的施工过程,分析了土体位移、格栅拉力随施工过程的变化规律。利用强度折减法分析了加筋土挡墙的稳定性的变化规律。对格栅抗拉刚度、间距和长度等因素进行了分析,结果表明:

- (1) 加筋区域具有较好的整体性,可视为具有加筋长度的等宽重力式挡土墙。破坏形式为沿墙底的滑动破坏和加筋区域以外填土中的圆弧滑动破坏。加筋土挡墙背面也是潜在的破裂面。

(2) 格栅抗拉刚度越大,面板水平变形越小。但格栅刚度达到 8 000 kN/m 之后,通过提供刚度减小变形的作用不再明显。若格栅刚度过小,填土过程中土体就已破坏,破坏面为通过墙踵倾斜向上的直线。

(3) 增加格栅长度有利于提高土坡的稳定性和减小面板变形。若格栅过短,填土过程可能在填土-1 区中破坏。

(4) 格栅间距主要影响加筋土挡墙的内部稳定性。间距 0.3 m 和 0.6 m 后两种情况下的内部稳定性有保证,破坏主要在墙后倾斜填土和加筋格栅尾端的土体之中形成,安全系数接近。

参考文献:

- [1] 李思汉,蔡晓光,景立平,等. 加筋土挡墙变形特性研究进展[J]. 世界地震工程,2019,35(4):114-124.
- [2] Shukla S, Sivakugan N, Das B. Fundamental concepts of soil reinforcement – an overview[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2009,3(3):329-342.
- [3] Wu H, Yao C, Li C, et al. Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering[J]. Materials, 2020,13(7):1774.
- [4] Jiang Y, Han J, Parsons R L. Numerical evaluation of secondary reinforcement effect on geosynthetic – reinforced retaining walls[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020,48(1):98-109.
- [5] 杨广庆. 加筋挡土墙合理设计方法的探讨[J]. 长江科

学院院报,2014,31(3):11-18.

- [6] 陈子玉,宋彦辉,严 豪. 有限元强度折减法应用的几个问题及拓展[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):196-200.
- [7] Djebablah W, Nouaouria M S, Adjabi S. Numerical study of the behaviour of geosynthetic – reinforced soil retaining walls under a uniform surcharge[J]. International Journal of Structural Engineering, 2020,10(2):139-149.
- [8] 范海涛,张 涛,赵渊源,等. 砂石桩 – 土钉墙组合支护结构的变形及稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):117-121.
- [9] 盛学庆,吴 浩,邓岳保. 包裹式加筋土挡墙有限元分析及方案优化[J]. 人民长江,2019,50(S2):202-206.
- [10] 林 彤. 超高三级加筋土挡墙的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(11):1651-1654.
- [11] 徐 超,梁 程,罗玉珊. 有限填土加筋土挡墙的稳定性和破坏模式分析[J]. 水文地质工程地质,2017,44(1):104-109,122.
- [12] Leshchinsky D, Vulova C. Numerical investigation of the effects of geosynthetic spacing on failure mechanisms in MSE block walls[J]. Geosynthetics International, 2001,8(4):343-365.
- [13] 陈建峰,田 丹,柳军修. 刚/柔性组合墙面加筋土挡墙内部破坏机制[J]. 岩土力学,2018,39(7):2353-2360.
- [14] 陈建峰,张 旭,柳军修. 软土地基刚/柔性组合墙面加筋土挡墙离散连续耦合数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(2):159-166.

(上接第 22 页)

- [11] 郎颖娴. 基于 CT 数字图像的三维岩石细观孔隙模型与数值试验[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [12] 沙润东,梁正召,钱希坤. 动载下含孔洞岩石试样动态破坏过程模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):65-70,92.
- [13] 郎颖娴,梁正召,段 东,等. 基于 CT 试验的岩石细观孔隙模型重构与并行模拟[J]. 岩土力学,2019,40

(3):1204-1212.

- [14] 于庆磊,杨天鸿,唐世斌,等. 基于 CT 的准脆性材料三维结构重建及应用研究[J]. 工程力学,2015,32(11):51-62,114.
- [15] 廖志毅,唐春安. 爆炸应力波作用下岩体破碎特性数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):98-102,107.