

DOI: 10.11779/CJGE201702005

基于影响带观测的加筋土坡稳定性分析

胡幼常¹, 靳少卫¹, 宋亮², 毛爱民², 刘杰²

(1. 武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063; 2. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830006)

摘要: 为了观测土工格栅加筋影响带的范围, 采用特制的一侧透明的拉拔盒, 共对 6 种不同级配的粗粒土分别完成了 4 种法向压力下的拉拔试验。通过预埋于土中用大头针尖制作并包裹于导线皮中的位移观测点, 直接观测了土工格栅在粗粒土中拉拔引起的土粒位移, 发现格栅的拉拔会带动其上一厚度范围内的土体发生移动, 这个范围称之为加筋影响带。试验发现平均粒径 $d_{50} > 0.83 \text{ mm}$ 的粗粒土中, 土工格栅加筋影响带的厚度 δ 与试样的法向压力没有关联, 主要与土粒级配有关, 当 $d_{50} < 1.05 \text{ mm}$ 时, δ 随 d_{50} 的增大有较显著的增加; 而当 $d_{50} > 1.05 \text{ mm}$ 后, 这种趋势明显减缓; 特别是当 $d_{50} > 1.65 \text{ mm}$ 后, 二者呈良好的线性递增关系。基于这一试验结果, 提出了考虑加筋影响带的加筋土坡稳定性分析方法, 简称影响带法。在这一方法中, 认为土工格栅的加筋作用相当于增加了加筋影响带内土的黏聚力, 而内摩擦角不变。从而将加筋土坡简化为成层土坡, 使计算大为简化。而计算得到的加筋土坡稳定安全系数在加筋层距不大于 0.6 m , 且格栅抗拉强度大于 20 kN/m 时, 与有限元强度折减法的计算结果符合良好。

关键词: 加筋影响带; 土工格栅; 拉拔试验; 位移观测; 加筋土坡; 稳定性分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)02-0228-07

作者简介: 胡幼常 (1961 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: huyouchang@163.com。

Stability analysis of reinforced soil slopes based on observation of reinforcement-effected strip

HU You-chang¹, JIN Shao-wei¹, SONG Liang², MAO Ai-min², LIU Jie²

(1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Xinjiang Transportation Planning Survey and Design Institute, Urumqi 830006, China)

Abstract: In order to observe the effected strip of geogrid-reinforcement, a series of geogrid pull-out tests are conducted in a test box which has one Plexiglas wall, applied 4 different vertical pressures on each specimen prepared respectively with 6 granular soils, with each having a different particle gradation. Through the Plexiglas wall, the displacements of the soil particles are observed with the help of the embedded marks which are the pinpoints wrapped by rubber wire coat. The displacements are found of the soil particles in the region from the top surface of the geogrid up to a certain height in the soil mass. This region is herein referred to as the reinforcement-effected strip. It is demonstrated that δ , the depth of the geogrid-effected strip, is related to the particle gradation rather than to the vertical pressure loaded on the specimen while d_{50} , the average diameter of soil particles, is greater than 0.83 mm . As d_{50} gets larger, δ increases rapidly when d_{50} is less than 1.05 mm and increases slowly when d_{50} is greater than 1.05 mm . Especially, while d_{50} is greater than 1.65 mm , δ has a good linear increasing relationship with d_{50} . Based on the test results, a method considering the reinforcement-effected strip, RESM for short here, is suggested to analyze the stability of a reinforced soil slope, in which the function of a geogrid reinforcement is assumed just only to increase the cohesion of the soil within the reinforcement-effected strip. Therefore, a reinforced soil slope is regarded as a layered soil slope in RESM, leading to a more simple stability analysis of a reinforced soil slope. The safety factors calculated by RESM are approximately equal to those by the strength reduction method while the reinforcement spacing is not greater than 0.6 m and the geogrid tensile strength is greater than 20 kN/m .

Key words: reinforcement-effected strip; geogrid; pull-out test; displacement observation; reinforced soil slope; stability analysis

0 引言

加筋土坡在道路工程中应用越来越多, 但其稳定

基金项目: 新疆维吾尔自治区交通运输厅科技项目 (2012-303-5)

收稿日期: 2015-12-08

性分析方法在工程实践中仍广泛采用传统的极限平衡法^[1-2]。尽管这种方法在反映筋、土相互作用方面还很欠缺,但它概念清晰,计算简单,便于应用。而另一种正在发展的方法是有限元极限分析法^[3-4],目前还没有写入规范。

合理的加筋土坡稳定性分析方法应能恰当地反映加筋机理,然而加筋机理还远没有研究清楚,所以对加筋机理的深入研究就显得十分重要。在这方面,包承纲则提出了“间接影响带”理论^[5]。他认为,土中的加筋材料不仅会在土与筋材的接触面上产生直接加筋作用,而且也会在接触面以外的一定范围内对土体产生一种间接加固作用,并称之为“间接影响带”,本文称之为“加筋影响带”。包承纲认为^[5],由于筋材附近一定范围内的土会同时发生颗粒之间位置的调整或颗粒的破碎,使土的强度增大。这种土体强度的增大与筋材表面的糙度和结构、土的粒径和性质,以及所受的压力大小密切相关。土的粒径越粗,筋材表面的糙度越高,以及外加压力越大,则这种影响的范围也越大,间接加固作用也就越强。丁金华等^[6]采用长江科学院的 DHJ60 大型拉拔试验装置完成的相关试验初步证明了加筋影响带的存在。为了进一步探讨加筋影响带厚度的主要影响因素及其影响规律,笔者采用改进的拉拔仪,通过直接观测筋材拉拔过程中筋-土界面及以上一定范围内土粒移动轨迹的方法,完成了土工格栅分别在不同级配粗粒土中的拉拔试验,初步得到了加筋影响带厚度与土的平均粒径 d_{50} 的统计关系。并提出了考虑加筋影响带的加筋土坡稳定性分析方法。

1 加筋影响带观测试验

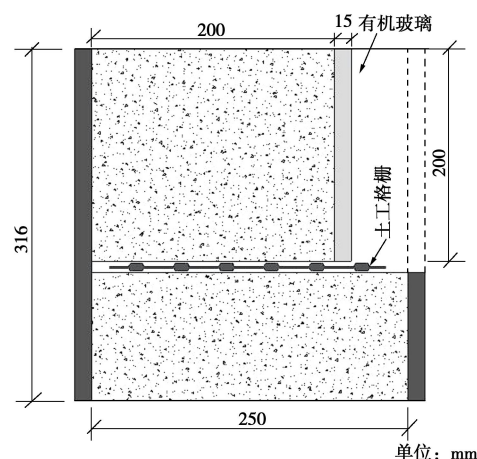
1.1 试验装置及加筋影响带观测方法

用于加筋影响带观测的试验仪器为一台在温州锐搏检测仪器有限公司定制的土工合成材料拉拔试验仪(图1(a)),其中的拉拔盒笔者进行了专门设计。与拉拔方向垂直的拉拔盒竖直剖面如图1(b)所示。上盒的一侧为15 mm厚有机玻璃,有机玻璃内壁粘贴透明坐标胶纸,以便观测土的位移;下盒的宽度大于上盒,其目的是让受拉拔的筋材伸出上盒底部之外,以便模拟加筋土体内部筋-土相互作用的情况。如果筋材不能伸出上盒之外,则观测到的是筋材边缘部分筋-土相互作用的情况。边缘处的筋-土相互作用会弱于内部,特别是当筋材是网孔结构的格栅等材料时,由于边缘部分有非完整网孔的存在,更不能很好地反映内部情况。为了避免土中细颗粒从有机玻璃底边漏出,在有机玻璃底边粘贴一薄层海绵条,安装时使海绵与土工格栅轻轻接触。为了尽量避免土粒从位于拉拔盒正面的土工格栅拔出口带出,在拔出口内侧土工格栅

的上、下表面处各放置一条土工布包裹的砂条。



(a) 拉拔仪



(b) 拉拔盒

图1 拉拔试验装置

Fig. 1 Equipment for pull-out tests

试验时先按预定的密度在下盒中装填土料至与下盒顶面齐平,再放置宽度略小于下盒净宽的筋材,然后将上盒固定在下盒上。必要时在上、下盒的壁板接触面之间加薄垫片,保证上盒的有机玻璃底面粘贴的海绵条与筋材轻轻接触,避免接触过紧。在上盒中分层装填与下盒同样密度的相同土料,每填一层土,需在有机玻璃内侧的土中预定的位置埋设位移观测点。位移观测点系采用红色或蓝色导线,将金属线芯抽出后切成约3~5 mm长的小段,每段插入一根大头针(针尖以不外露为度),剪断导线外的多余部分而做成。埋设时,用镊子夹住导线小心地放置在预定位置,并与有机玻璃内壁贴紧,见图2。红色或蓝色的导线在土中容易发现,细小的大头针尖可保证足够的位移观测精度。本次试验采用肉眼直接观测,可估读到0.1 mm。按上述方法准备好试样后,在预定的法向压力下实施拉拔试验,拉拔速率为1 mm/min,每次总拉拔时长为90 min,即拉拔位移达到90 mm时终止试验。除仪器通过所联电脑自动记录拉拔曲线外,还在拉拔开始前、拉拔过程中和试验终止后记录各位移观测点的纵横坐标,得出各测点的位移,根据所有测点的移动轨迹,判断加筋影响带的范围。

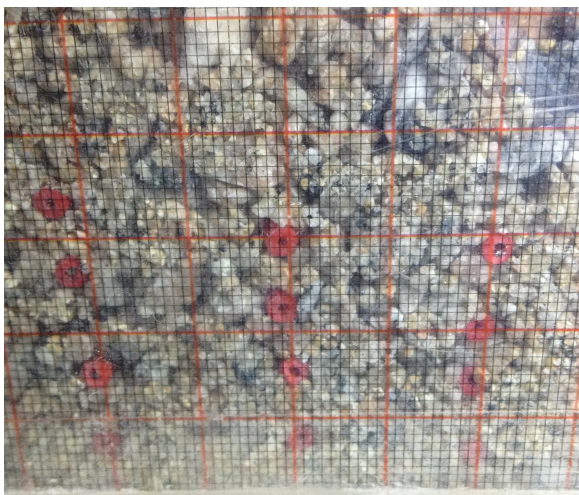


图 2 位移观测点

Fig. 2 Marks for observing displacements

上述试验装置结构简单, 操作方便, 可直接观察在筋材的拉拔过程中, 筋-土界面及该界面以上土粒的移动情况, 能直接证明加筋影响带的存在, 位移观测精度可估读到 0.1 mm, 对宏观研究来说观测精度是可行的。但加筋影响带的研究应达到微观的尺度, 将来可考虑辅以数字图像等技术进行局部的细观观测, 宏观与细观两种观测手段相结合, 有望更准确地得到加筋影响带的范围。

1.2 试验方案及试验材料

根据张嘎等^[7-8]的研究成果, 加筋影响带的厚度主要与筋材的结构、粗糙度、土粒级配、法向压力等有关, 本次试验采用 1 种土工格栅, 6 种级配的粗粒土, 分别完成了 0, 50, 100, 150 kPa 的 4 种法向压力下的拉拔试验, 并对加筋影响带进行了观测。

试验采用聚丙烯双向拉伸土工格栅, 网孔净尺寸 34.68 mm×35.88 mm, 肋宽 3.88 mm, 厚度 2.40 mm。经拉伸试验测得其抗拉强度和抗拉刚度指标如表 1 所示。

表 1 土工格栅的力学指标

Table 1 Mechanical properties of geogrid

项目	破坏拉力 /(kN·m ⁻¹)	破坏应变 /%	2%应变拉力 /(kN·m ⁻¹)	5%应变拉力 /(kN·m ⁻¹)
纵向	27.7	20.1	5.5	10.9
横向	30.7	26.4	4.9	9.6

试验用的 6 种粗粒土均为风干土, 它们的级配曲线如图 3 所示, 试样装填密度#1 为 1.62 g/cm³, #2 为 1.59 g/cm³, #3 为 1.47 g/cm³, #4 为 1.50 g/cm³, #5 为 1.56 g/cm³, #6 为 1.67 g/cm³。

1.3 试验结果

图 4 是#1 土(黄砂)在法向压力为 50 kPa 时观测到的土粒位移分布情况。为了直观, 图 4 中观测点初

始位置的水平坐标做了微小调整, 使其刚好位于整数刻度上, 并使同一纵列观测点的初始位置处于同一竖直线上; 观测点在试验过程中或试验结束时的水平坐标做同步调整。土工格栅位于纵坐标为 $Y=0$ 的水平面上, 拉拔端的拉拔盒壁位于 Y 轴处。其他试验结果与图 4 类似, 不一一列出。观测结果表明拉拔过程中水平位移较明显, 离格栅近的土粒水平位移大, 离得远的则小。

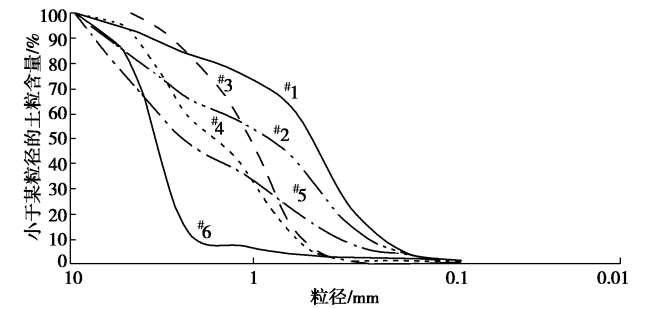


图 3 土的颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle-size distribution curves of soils

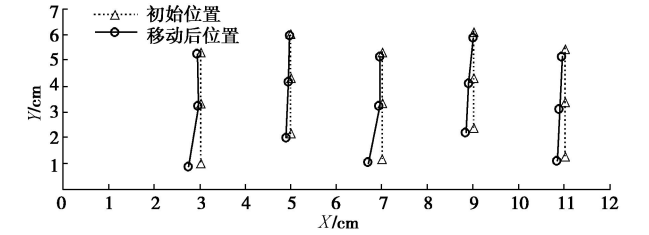


图 4 格栅的拉拔引起的土粒位移

Fig. 4 Displacements of soil particles induced by pulling out geogrid

从图 4 可知, 除靠近格栅表面的观测点外, 以上各观测点移动后仍近似在一条直线上, 根据试验数据经拟合得到不同试验条件下的该直线, 其在 Y 轴上的截距即为单侧加筋影响带的厚度。以 5 列观测点得到的 5 个影响带厚度平均值作为该试验条件下单侧加筋影响带厚度(表 2), 同一土样在 3 种或 4 种法向压力下得到的影响带厚度平均值则为该土样的单侧加筋影响带厚度 δ (表 2)。

表 2 单侧影响带厚度

Table 2 Depths of geogrid-effected strip in granular soils (mm)

土样 编号	平均粒径 d_{50}/mm	法向压力/kPa				平均影响带 厚度 δ/mm
		0	50	100	150	
#1	0.60	35.9	30.8	26.3	22.8	29.0
#2	0.83	34.0	39.9	34.2	32.8	35.2
#3	1.05	44.1	37.3	39.8	37.8	39.8
#4	1.65	44.3	42.5	34.7	—	40.5
#5	2.40	42.9	41.5	47.7	—	44.0
#6	3.45	54.9	44.3	48.2	—	49.1

注: 表中“—”表示没有观测到有效数据。

从表 2 的数据可知, 平均粒径最小的#1 土, 加筋

影响带的厚度随法向压力的增大而减小, 这印证了陈建峰等^[9]用颗粒流模拟的土工格栅在砂土中影响带厚度的规律, 即随着压力的增大而使颗粒之间的摩擦力、颗粒咬合与筋材中的嵌锁力作用增强, 影响带厚度有所减小。而对于较粗的其他 5 种土样, 法向压力对影响带厚度的影响较小, 张嘎^[10]的试验也观察到了与此相同的现象。

将表 2 中影响带平均厚度 δ 与土粒平均粒径 d_{50} 的关系绘在图 5 中, 可见当 $d_{50} < 1.05 \text{ mm}$ 时, δ 随 d_{50} 的增大有较显著的增加; 而当 $d_{50} > 1.05 \text{ mm}$ 后, 这种趋势明显减缓; 特别是当 $d_{50} > 1.65 \text{ mm}$ 后, 二者几乎是线性递增的关系, 其拟合直线 AB 的方程为

$$\delta = 4.78d_{50} + 32.62 \quad (1)$$

式中, δ 和 d_{50} 的单位均为 mm。

如果实际工程中采用 $d_{50} > 1.65 \text{ mm}$ 的粗粒土, 则可用式 (1) 估计土工格栅的影响带厚度。

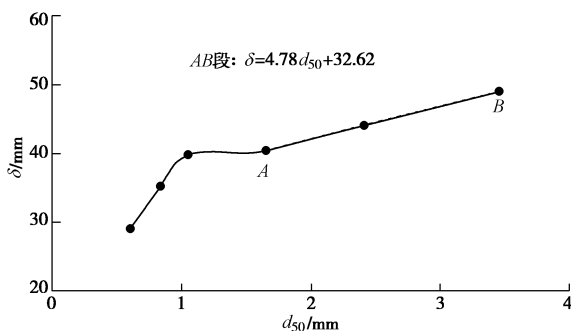


图 5 $\delta - d_{50}$ 关系曲线

Fig. 5 $\delta - d_{50}$ curve

由式 (1) 确定的土工格栅在粗粒土中的影响带厚度与张嘎等^[8]的试验结果相接近。张嘎等^[8]在钢板上粘贴土工布, 采用平均粒径分别为 7.0 mm 和 10.0 mm 的粗粒土, 在大型直剪仪上完成了土工布与粗粒土间的界面作用试验, 观测到界面影响带的厚度约为土粒平均粒径 d_{50} 的 5~6 倍。

2 加筋土坡稳定性分析的一般方法

2.1 规范法 (即极限平衡法)

工程实践中, 加筋土坡一般都采用极限平衡法分析其稳定性, 即在未加筋土坡的传统圆弧滑动条分法中考虑筋材拉力的作用^[11], 如国家标准^[2]以及现行公路设计规范^[1]都是如此, 且当筋材为土工格栅和土工织物等柔软满铺材料时, 圆弧滑面上每层筋材的位置作用着与滑面相切的筋材拉力^[1-2], 于是, 加筋土坡的稳定安全系数由下式计算^[1-2]:

$$F_s = F_{su} + \frac{M_R}{M_D} = F_{su} + \frac{NT_a R}{M_D} \quad (2)$$

式中, F_s 为加筋土坡的稳定安全系数, F_{su} 为未加筋时土坡的稳定安全系数, M_R 为筋材提供的抗滑力矩,

M_D 为未加筋时土坡的滑动力矩, N 为加筋层数, T_a 为筋材的设计抗拉强度, R 为滑弧半径。

该方法实质上是筋材和土的作用分开考虑的, 没有从本质上考虑筋-土的相互作用, 计算时与传统的圆弧条分法相同, 需要事先假定滑动面形状和位置。由于纯土坡的极限平衡条分法在理论上可看成是塑性理论的下限解^[12], 其结果是偏于安全的, 可靠性经受了几十年工程实践的检验, 是趋于成熟的方法^[4, 12], 所以将其用于加筋土坡的稳定性分析是目前规范中的普遍做法。这种方法概念清晰, 计算简单, 也积累了较多的经验, 所以仍是目前各国规范中普遍采用的方法^[1-2]。

为了分析式 (2) 的实质, 将其改写为^[13]

$$N(T_a / F_s)R = M_D - M_D \frac{F_{su}}{F_s} \quad (3)$$

式 (3) 右边第一项表示需要抵抗的滑动力矩, 右边第二项为在要求的安全系数 F_s 下土体自身的抗滑力矩; 等式左边为需要筋材担负的力矩, 显然筋材的抗拉强度 T_a 是在除以加筋土坡的安全系数 F_s 后再参与分担荷载的^[13]。李广信^[13]指出了这其中存在的不合理性, 因为现行规范^[1, 2]考虑筋材老化、蠕变和施工损伤等影响, 要求在确定筋材的设计抗拉强度 T_a 时需将筋材的极限抗拉强度除以可能高达 6.0 或以上^[13] (国家标准建议采用 2.5~5.0^[2]) 的折减系数, 所以 T_a 本身是已经大打折扣之后的强度, 属于容许拉力, 只要筋材实际所受拉力不超过 T_a 就行, 而不必重复考虑安全系数。所以在理论上, 规范方法是过于保守的^[13]。

2.2 有限元强度折减法 (简称强度折减法)

郑颖人等^[4]在 Zienkiewicz 提出的有限元强度折减法与超载法的基础上提出了有限元极限分析法。该方法是在弹塑性有限元模型中, 通过降低土的强度或者增大荷载, 使边坡达到极限状态, 求得边坡的稳定安全系数^[4]。在边坡稳定分析中, 结合边坡稳定安全系数的定义, 有限元极限分析法可以分为有限元强度折减法与有限元超载法。其中, 有限元强度折减法与传统极限平衡法的安全系数定义是一致的, 对未加筋土坡, 所得结果与传统极限平衡法也是一致的^[4]。如果将其用来分析加筋土坡, 则通过筋-土界面模型, 可更好地考虑筋-土的相互作用; 同时由于可以计算出土体和筋材的变形, 从而能将筋材实际发挥的拉力与筋材实际产生的应变联系起来^[14], 不像规范法那样只能笼统地认为在边坡处于极限平衡状态时所有筋材的拉力都达到考虑边坡安全系数 F_s 后的设计抗拉强度, 是很有发展前途的加筋土坡稳定分析方法^[3-4]。但这个方法还需寻找合理有效的破坏判据^[4, 14], 也需得到工程实践的检验, 所以还没有纳入规范之中。

3 影响带法

根据本文和其他试验^[6, 10]观测到的加筋影响带客观存在的事实, 同时为了简化计算, 借鉴 Yang^[15]关于加筋相当于增加了土体围压的观点, 笔者假设筋材所起的作用相当于对加筋影响带范围的土体施加了围压 $\Delta\sigma_3$, 亦即使影响带内土的黏聚力增加了 Δc , 而内摩擦角不变。设一层筋材其上下两侧的影响带厚度之和为 2δ , 考虑到按规范^[1-2]规定的设计方法, 会保证筋材有足够的锚固长度, 加筋土坡一般不会发生筋材的拔出破坏, 所以这里假定破坏型式是筋材的拉断破坏, 这样, 加筋土坡达到极限平衡状态时, 筋材拉力达到其设计强度 T_a , 因此 σ_3 可按下式计算:

$$\Delta\sigma_3 = \frac{T_a}{2\delta} \quad (4)$$

根据影响带内土体的极限平衡条件, 有 $\sigma_1 = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot \tan(45^\circ + \varphi/2)$
 $= \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2(c + \Delta c) \tan(45^\circ + \varphi/2)$ 。

式中, $\Delta c = \frac{1}{2} \Delta\sigma_3 \tan(45^\circ + \varphi/2)$ 。

式 (4) 代入得

$$\Delta c = \frac{T_a}{4\delta} \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (5)$$

这样, 就把土工格栅加筋土坡简化成了成层土坡, 计算得到简化。

上述简化方法基于加筋土的准黏聚力理论, 但这里将获得准黏力的范围限定在加筋影响带内, 而非整个加筋土体。该法的主要特点是能反映加筋影响带的存在和作用, 并使加筋土的分析计算得到简化。需要指出的是, 以加筋影响带内土的黏聚力增加来反映加筋的作用, 不能反映加筋对筋-土接触面附近土体的应力-应变关系的影响。

4 算例及分析

图 6 是一个假想的土工格栅加筋路堤边坡, 边坡高度为 20 m, 坡率为 1:1。格栅加筋层在竖直方向等间距布设, 每层筋材的长度足够长, 以保证不发生拔出破坏, 从而在下面的讨论中排除筋材长度的影响。路堤填土和地基土的物理力学指标采用某公路项目的实测值。其中, 路堤压实土的黏聚力 $c=8$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=31^\circ$, 重度 $\gamma=19.3$ kN/m³, 弹性模量 $E=42$ MPa, 泊松比 $\mu=0.30$, 土粒平均粒径 $d_{50}=20.1$ mm; 地基土的黏聚力 $c_1=17.8$ kPa, 内摩擦角 $\varphi_1=32.2^\circ$, 重度 $\gamma_1=18.6$ kN/m³, 弹性模量 $E_1=50$ MPa, 泊松比 $\mu_1=0.30$ 。现分别采用以上 3 种方法, 对格栅层间距 S 分别为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m, 格栅设计抗拉强度

T_a 分别等于 10, 15, 20, 25, 30 kN/m 组合出的 20 种工况, 计算加筋土坡的稳定安全系数 F_s 。

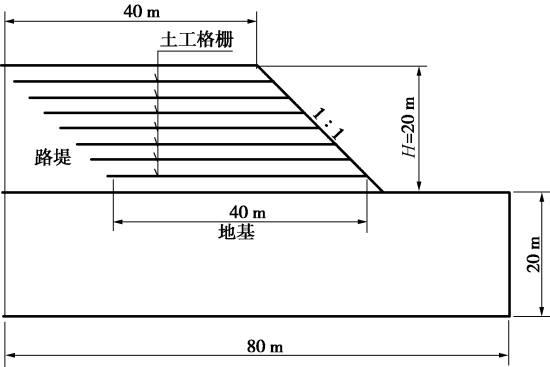


图 6 土工格栅加筋路堤边坡

Fig. 6 Geogrid-reinforced embankment slope

其中, 规范法和影响带法都采用现行公路规范^[1]推荐的简化 Bishop 条分法, 用岩土工程软件 Geo5 完成计算。规范法的计算公式为式 (2); 影响带法中, 影响带的厚度按式 (1) 计算, 影响带土的黏聚力增量按式 (5) 计算。

强度折减法也利用 Geo5 软件完成计算。程序在计算过程中, 对土的强度参数 c (土的黏聚力) 和 $\tan\varphi$ (φ 为土的内摩擦角) 都以大于 1 且循环递增的系数 F 不断进行折减 (格栅的强度不折减), 直至土体达到破坏状态, 此时的折减系数就是边坡的安全系数 F_s 。由于本算例以确定边坡稳定安全系数为目的, 基于郑颖人等^[4]的研究, 边坡土和地基土都采用理想弹塑性模型来描述其应力应变关系, 采用莫尔-库仑屈服准则, 不考虑土体的剪胀性。土工格栅单元只能抗拉, 不具有抗弯能力。格栅采用理想弹塑性模型, 只有两个参数, 一个是弹性阶段的轴向抗拉刚度 EA , 它是单位宽度的格栅拉力与对应的拉应变之比。这里根据某生产厂家给出的双向拉伸聚丙烯土工格栅 2% 应变所具有的抗拉强度计算出 EA 值 (见表 3)。另一个参数是屈服强度, 其值取格栅的设计抗拉强度 T_a 。格栅与土之间设置界面单元, 界面折减因子取 0.9^[1], 相当于格栅与土之间的摩擦系数为 $f=0.9 \tan\varphi$ (φ 为边坡土的内摩擦角)。当界面上的剪应力小于摩擦强度时, 界面处于弹性阶段, 并可产生很小的弹性位移, 当界面上的剪应力超过摩擦强度时, 界面产生塑性滑动。

表 3 土工格栅的抗拉强度和抗拉刚度

Table 3 Tensile strengths and stiffnesses of geogrid

抗拉强度 $T_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	10	15	20	25	30
抗拉刚度 $EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	170	250	350	450	525

各方法算得的不同工况下的加筋土坡稳定安全系数如图 7 所示。

从图 7 可知, 当格栅层间距 $S=0.4$ m 和 $S=0.6$ m, 格栅抗拉强度 $T_a>20$ kN/m 时, 本文提出的影响带法

与强度折减法得到的安全系数很接近, 说明此时影响带法是适用的。但随着 S 的增大和 T_a 的减小, 二者的差值也随之增大, 影响带法就不适用了。图 7 还表明除 S 较大, T_a 较小的情况外, 规范法算得的安全系数都比强度折减法的小。

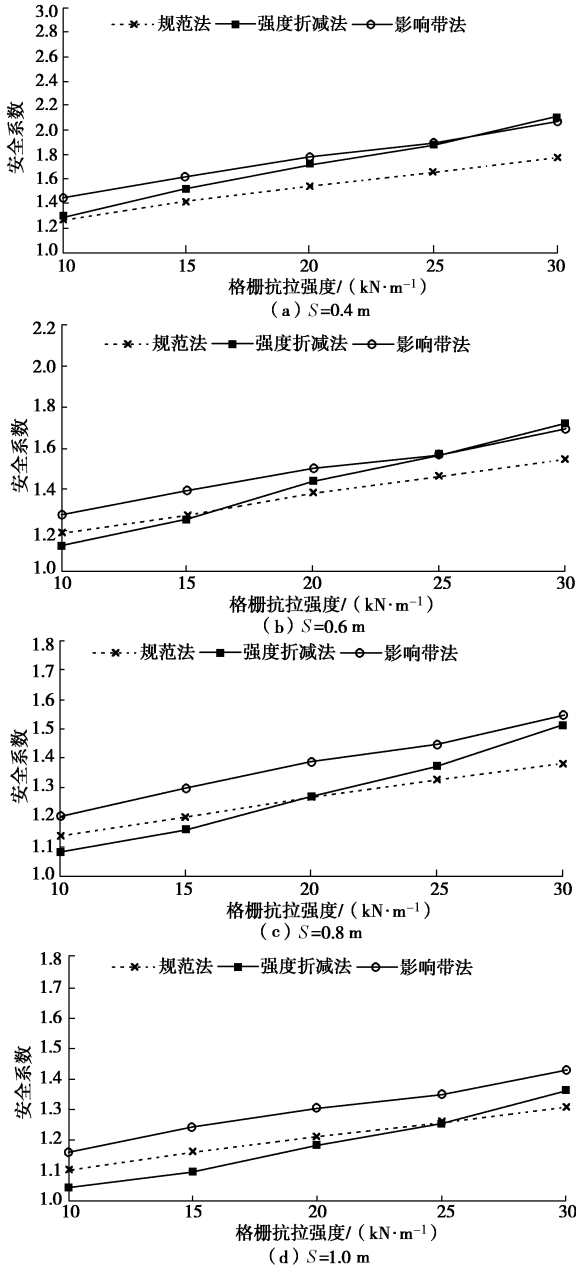


图 7 安全系数与格栅抗拉强度的关系曲线

Fig. 7 Relationship between safety factor and tensile strength of geogrid

为了充分发挥加筋土工程的优良抗震性能, 吸取 1999 年台湾大地震的经验, 加筋土结构中筋材的层间距 S 不宜过大^[16]。公路规范^[1]规定 S 不宜大于 0.8 m, 文献[16]给出的加筋土挡墙标准图中 S 都为 0.5 m。加筋土工程中筋材设计强度超过 20 kN/m 的情况很常见。所以影响带法的适用条件在实际工程中常能碰到。

不难发现, 影响带法和规范法与强度折减法计算结果差别的大小都与边坡中格栅总强度 NT_a (N 为格

栅层数) 有关。不妨将单位高度边坡内筋材的总抗拉强度称为格栅强度分布密度, 并记为 t , 则有

$$t = \frac{NT_a}{H}, \quad (6)$$

式中, N 为格栅层数, T_a 为格栅的设计抗拉强度 (kN/m), H 为边坡高度 (m), t 为格栅强度分布密度 (kN/m²)。

当格栅层以等间距 S 布置时, 一般有 $N = H/S$, 所以式 (6) 又可写为

$$t = \frac{T_a}{S}. \quad (7)$$

图 8 是根据计算数据得到的 F_s 与 t 的关系曲线。该图表明, 当 $t > 42$ kN/m² 时, 影响带法的计算结果与强度折减法的很接近; 当 $t < 42$ kN/m² 时, 影响带法会得到偏高的结果。而规范法在 $t < 25$ kN/m² 时, 计算的安全系数比强度折减法的略高, 且差别不大; 但当 $t > 25$ kN/m² 后, 前者低于后者, 并且其差值随 t 的增大而增大。所以规范法在 t 较大时会过于保守, 这印证了李广信的分析^[13]。图 9 是影响带法和规范法计算的安全系数与强度折减法安全系数的相对误差 R 与格栅强度分布密度 t 的关系曲线, 它定量地反映了上述差别和规律。

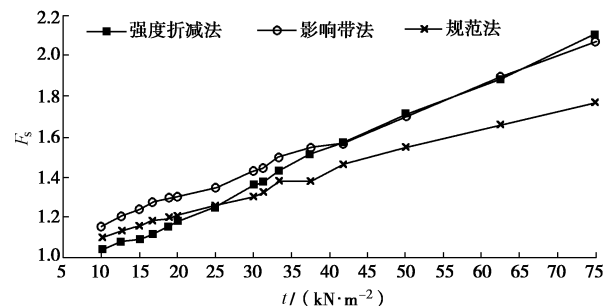


图 8 $F_s - t$ 关系曲线

Fig. 8 $F_s - t$ curves

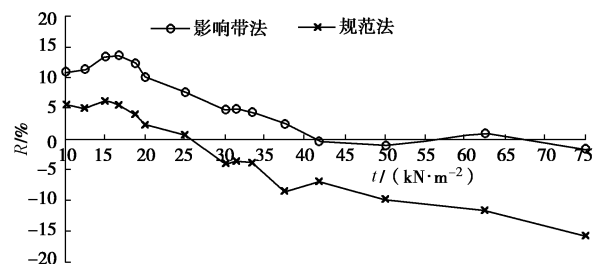


图 9 $R - t$ 关系曲线

Fig. 9 $R - t$ curves

5 结 论

(1) 土工格栅在粗粒土中的拉拔试验证实了加筋影响带的存在, 且影响带的厚度主要与粗粒土的粒径级配有关, 而依法向压力几乎无关 (平均粒径 d_{50} 不超过 0.6 mm 的土除外)。当土粒平均粒径 $d_{50} > 1.65$ mm 后, 影响带的厚度与 d_{50} 呈线性递增关系。

(2) 本文提出筋材强度分布密度的概念, 并初步探讨加筋土边坡稳定性与筋材强度分布密度的关系。

(3) 本文提出了考虑加筋影响带的土工格栅加筋土坡稳定性分析的简化方法——影响带法, 该法本质上仍属于极限平衡条分法, 但它将复杂的加筋土坡简化为成层土坡, 使计算大为简化。计算实例表明, 当筋材强度分布密度较大时, 该法计算出的加筋土坡稳定安全系数与强度折减法的计算结果相近。

(4) 与强度折减法相比, 规范法计算的加筋土坡安全系数在筋材强度分布密度 t 较小时略微偏高; 但当 t 较大时又会偏低, 其偏低的程度随 t 的增大而增大。

参考文献:

- [1] JTG/T D32—2012 公路土工合成材料应用技术规范[S]. 2012. (JTG/T D32 — 2012 Technical specifications for application of geosynthetics in highway[S]. 2012. (in Chinese))
- [2] GB/T 50290—2014 土工合成材料应用技术规范[S]. 2014. (GB/T 50290 — 2014 Technical code for application of geosynthetics[S]. 2014. (in Chinese))
- [3] 介玉新, 李广信. 有限元法在加筋土结构设计中应用的必要性和可行性[J]. 长江科学院院报, 2014, **31**(3): 34 - 38. (JIE Yu-xin, LI Gang-xin. Necessity and feasibility of FEM in the design of reinforced soil structure[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, **31**(3): 34 - 38. (in Chinese))
- [4] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪, 等. 有限元极限分析法及其在边坡工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 11 - 12, 16. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, LI An-hong, et al. FEM limit analysis and its application in slope engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 11 - 12, 16. (in Chinese))
- [5] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(9): 1735 - 1744. (BAO Cheng-gang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(9): 1735 - 1744. (in Chinese))
- [6] 丁金华, 包承纲, 丁红顺. 土工格栅与膨胀岩界面相互作用的拉拔试验研究[C]// 第 2 届全国岩土与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 442 - 449. (DING Jin-hua, BAO Cheng-gang, DING Hong-shun. Pull-out test study on the interaction between geogrid and swelling rock[C]// Proceedings of the 2nd Chinese Conference on Geotechnical Engineering. Beijing: China Science Press, 2006: 442 - 449. (in Chinese))
- [7] 张 嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 21 - 25. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 21 - 25. (in Chinese))
- [8] 张 嘎, 张建民. 土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, **27**(1): 51 - 55. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on behavior of interface between soil and geotextile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(1): 51 - 55. (in Chinese))
- [9] 陈建峰, 李辉利, 柳军修, 等. 土工格栅与砂土的细观界面特性研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 1): 66 - 71. (CHEN Jian-feng, LI Hui-li, LIU Jun-xiu, et al. Mesoscopic study of interface properties of geogrid-reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S1): 66 - 71. (in Chinese))
- [10] 张 嘎. 粗粒土与结构接触面静动力学特性及弹塑性损伤理论研究[D]. 北京: 清华大学, 2002. (ZHANG Ga. Static and dynamic behaviors for intact face between granular soil and structure[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002. (in Chinese))
- [11] 包承纲. 土工合成材料应用原理与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 191 - 193. (BAO Cheng-gang. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008: 191 - 193. (in Chinese))
- [12] 李广信. 高等土力学[M]. 清华大学出版社, 2004: 326 - 341. (LI Gang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 326 - 341. (in Chinese))
- [13] 李广信. 岩土工程 50 讲——岩坛漫话[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2010: 93 - 95. (LI Gang-xin. 50 lectures on geotechnical engineering — Informal discussions in the geotechnical circles[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2010: 93 - 95. (in Chinese))
- [14] 介玉新, 秦晓艳, 金 鑫, 等. 加筋高边坡的稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 660 - 666. (JIE Yu-xin, QIN Xiao-yan, JIN Xin, et al. Stability of high reinforced soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 660 - 666. (in Chinese))
- [15] YANG Z. Strength and deformation characteristic of reinforced sand[D]. Calif: University of California, 1972.
- [16] 唐善祥, 杜 亮, 刘 力, 等. 加筋土挡墙工程图集[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2015. (TANG Shan-xiang, DU Liang, LIU Li, et al. Drawings of reinforced soil retaining walls[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))