

吴迪, 李艾文, 李丹, 等. 岩溶路基加筋防塌治理的简化设计方法[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 538-547.

DOI: 10.11932/karst2023y001

岩溶路基加筋防塌治理的简化设计方法

吴迪¹, 李艾文¹, 李丹¹, 贾龙², 韦学英¹, 吴建建¹

(1. 桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:近年来岩溶地区呈高发态势的路面塌陷灾害不断威胁城市交通安全。用回填压实法治理塌陷时, 埋入土工织物所形成的加筋垫层, 能增强土体稳定性, 防止二次塌陷。然而加筋治理方案中筋材的锚固长度分析及受力计算理论相对缺失, 现存的加筋体设计方法也较少考虑塌陷发生后加筋治理铺设范围的选择, 这些不足严重制约了土工合成材料在岩溶路基塌陷中的工程应用。针对这一现状, 提出了一种岩溶路基塌陷后加筋治理的设计方法。该方法采用条分法对筋材上方土拱以下范围的填土进行受力分析, 结合筋-土的作用特点, 给出了塌陷区和稳定区加筋体拉力的计算公式, 进而推导了加筋治理合理锚固长度的计算公式, 并梳理了加筋体锚固长度设计流程; 在此基础上, 基于相关文献的模型试验结果及前人的计算方法对设计方法进行合理性验证, 并进一步讨论塌陷宽度、加筋体最大挠度对加筋体拉力和合理锚固长度的影响。结果表明: (1) 提出的加筋设计方法计算简洁, 所得结果与试验结果更为吻合, 由此建立的土工织物加筋垫层治理岩溶区城市路面塌陷的筋材拉力计算理论, 对于工程实践具有一定的指导意义; (2) 加筋体拉力在塌陷边缘处达到最大, 塌陷宽度才是影响加筋体受力和合理锚固长度的主要因素, 而加筋体最大挠度对合理锚固长度的影响较小。

关键词: 路基工程; 岩溶路基塌陷; 加筋治理; 锚固长度; 设计方法

中图分类号: U416 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)03-0538-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶地面塌陷与人类活动息息相关, 过量开采地下水和大量地下工程建设等人为活动是近年来岩溶塌陷频发的重要原因^[1-3]。在城市等人类活动频繁的地方, 路面塌陷事故时有发生, 同时由于此类地点人员相对密集, 造成的直接或间接经济损失十分巨大^[4-5]。

城市道路环境出现路面塌陷后, 出于治理快速且经济的方面考虑, 常采用回填压实法治理, 但越来

越多的工程实例表明此种方法存在弊端, 最为突出的就是治理后易发生再次塌陷^[5-6]。根本原因是因为回填压实治理无法阻断塌陷坑洞周边填土体系的渗流通道, 水土流失依然存在。在地下水活动较为剧烈的海堤附近发生路面塌陷后, 常采用在地表下铺设防渗土工膜的方式使得土体不易被渗流带走, 便于塌陷的治理^[7]。土工织物相较于土工膜具有加筋和反滤的双重特性, 因此, 在塌陷路面回填压实过程中铺设入土工织物较比传统回填压实法能进一步稳固土体, 标本兼治。土工织物治理岩溶路基塌陷的

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.42067044); 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026028)

第一作者简介: 吴迪(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程方面的科研与教学。E-mail: wudi@guet.edu.cn。

通信作者: 韦学英(1977-), 女, 高级工程师, 工学学士, 主要从事岩土工程灾害治理方面的科研与教学。E-mail: 53697424@qq.com。

收稿日期: 2022-01-10

模型试验研究已经开展,然而,对于加筋垫层有效传递荷载时的内在作用机理以及路基塌陷后的土工织物治理设计方法,目前的研究还不完善。

土工合成材料治理不稳定土体的研究已取得具有一定深度的成果,关于防治岩溶路基塌陷的研究正在逐年增加。模型试验方面,吴迪等^[8]在锚固区土工织物布筋长度为不同倍数塌陷宽度的条件下,通过分析织物的土压力、竖向位移和织物拉力得出,合理锚固长度应等于或略大于一倍塌陷宽度。贺炜等^[9]发现在塌陷坑上方布设土工格栅加筋垫层可削弱路基内填土差异沉降,弱化土拱效应,且这种影响在加筋体层数增加后更为明显。Le等^[10]开展的铝条相似土试验表明,塌陷区的加筋体变形在计算过程中采用悬链线应变偏大,设计偏安全。数值模拟方面,Huang等^[11]基于PFC2D建立的DEM模型表明,路堤填土内摩擦角对加筋体变形时的受力及地表沉降影响很大;而万梁龙等^[12]基于PLAXIS3D建立的有限元模型表明,岩溶塌陷影响下的加筋路基筋材最大拉力和地表最大沉降受土体粘聚力的影响较为显著,而内摩擦角的影响较小。在理论分析方面,黄杰等^[13]介绍了6种常用的空穴加筋的设计方法和它们所依据的理论及假定,并讨论了各种设计方法的适用性,比较了各自的优缺点。丁烈梅等^[14]分别采用薄板理论和Trapdoor理论分析加筋路堤中筋材张拉膜效应和路堤土拱效应,提出了设计挠度已知情况下的加筋路堤设计方法。王非等^[15]考虑了土工织物的存在会抑制落水洞上覆路堤土的不均匀变形,提出了基于不完全发展的土拱效应的土工织物加筋设计方法。

现有加筋设计方法中,对于加筋体最大拉力出现在塌陷边缘处这一认识已达到基本统一^[16-17],对于塌陷区加筋体上竖向应力分布形式,大多认为是均匀分布,只是在数值大小的计算上对太沙基土拱理论相关参数进行了不同的修正^[18-23];陈福全等^[24-25]则基于Huckert等^[26]的研究成果将其简化为中央小两边大的倒三角形。对于塌陷区加筋体变形的假定形状,主要分为圆弧状^[27]、抛物线^[22,25,28],但大都假定加筋体与土体无相对位移,不存在摩擦力,这与实际情况不符。

此外,现有研究多针对岩溶区路基塌陷前的加筋防治,且加筋体仅考虑加筋特性,故选用的加筋材料多为刚度较大的土工格栅或土工格室,而兼具加

筋和反滤特性的土工织物则更适用于岩溶区路基塌陷后的治理,增强路基承载力的同时能预防路基再次塌陷。对于岩溶区路基塌陷后的土工织物治理,现有的加筋设计方法,较多的考虑加筋体拉力和地表沉降,对铺设加筋体的长度多认为路堤下满铺^[12],与岩溶路基塌陷后的治理存在差异。事实上在治理城市环境中常出现的路基塌陷时,于岩溶塌陷坑体范围内的一定埋深处布设适当长度的土工织物,既能有效传递荷载,又能保持水土稳定。一方面,塌陷区上方部分荷载会通过土拱效应传递至稳定区,部分荷载也会通过土工织物张拉所产生的拉膜效应进一步传递至稳定区;另一方面,土工织物能通过反滤作用防止土颗粒的流失,治标治本。土工织物防治路面塌陷地质模型分析示意图如图1所示。将该方法应用于工程实践,更需要考虑回填土中加筋体的锚固长度以及筋材拉力的计算问题。

本文提出了一种岩溶地面塌陷后加筋治理的简化设计方法。该方法假定塌陷发生后土拱是一个半圆^[29],随后对塌陷区土拱以下填土进行条分,且考虑了加筋土与填土间的摩擦作用。在不考虑稳定区加筋体滑移下得到塌陷区加筋体任一位置拉力值和加筋体最大拉力值得求解表达式,并将最大拉力值与锚固力进行比较以得到合理锚固长度。

1 公式推导

在计算方法推导过程中,笔者对模型进行如下基本假定,据此建立的假定模型如图2所示。

(1)假定塌陷区上方土拱形式为半圆,在给定的坐标系内土拱半圆方程为 $y_1 = \sqrt{(B/2)^2 - x^2}$ 。

(2)假定塌陷区加筋体变形为悬链线,给定的坐标系内悬链线方程为 $y_2 = k \cdot \cosh(x/k) - k - w$ 。

(3)假定塌陷区土拱以下条分土块不考虑孔隙水压力,且相邻条分土块底部各滑动面上抗滑安全系数 F_s 均相同并设其为1。

(4)假定加筋体达到“完全兜受上部填土并保持稳定”这一效果,仅需满足“稳定区提供的锚固力大于等于塌陷边缘处稳定区方向筋材拉力”这一条件。

由假定(2),塌陷区加筋体变形为悬链线, k 为悬链系数, w 为塌陷区中心处加筋体下垂高度。由边界条件,当 $x = B/2$ 时, $y_2 = 0$,代入整理可得:

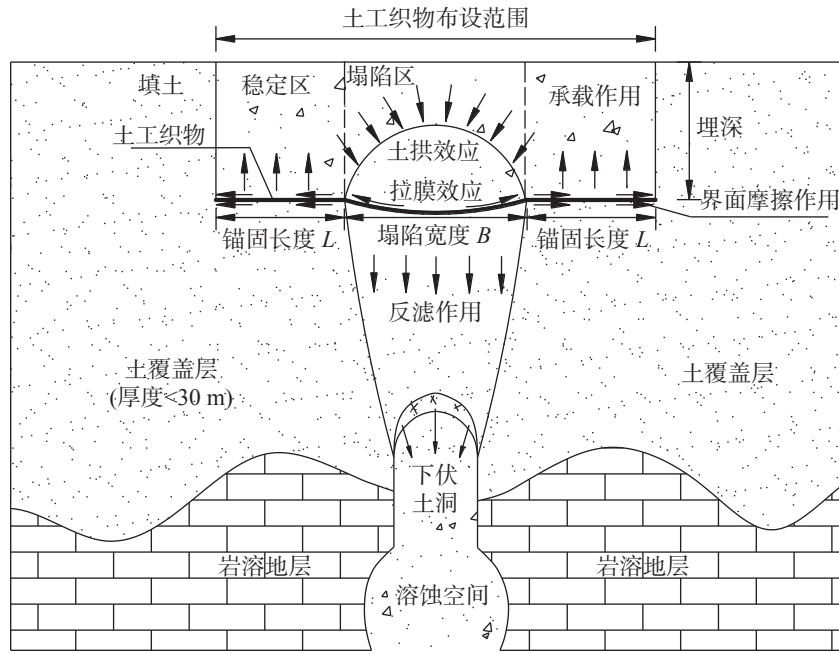


图 1 土工织物防治路面塌陷地质模型分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the geological model for prevention and control of pavement collapses by using geotextiles

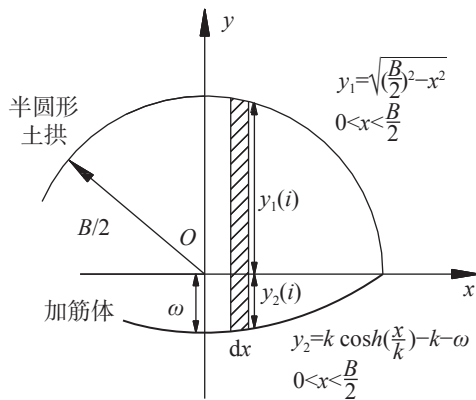


图 2 基本假定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of basic assumptions

$$k = B^2/8\omega \quad (1)$$

1.1 土拱下填土受力分析研究

首先, 根据填土种类获得填土内摩擦角 φ_i 和粘聚力 c_i , 然后采用简化毕肖普条分法, 取其中一个条分土块 i 进行受力分析(图 3)。此时土条 i 滑动面弧长 $l_i(l_i \cos \alpha_i = dx)$, 土条宽度为 dx , 受力时土块有重力 W_i , 滑动面法向力 N_i , 滑动面切向力 T_{si} , 并且土条取自土拱整体中, 两侧分别作用有法向力 E_i 和 E_{i+1} , 切向力 X_i 和 X_{i+1} , 其中令 $\Delta X_i = X_i - X_{i+1}$ 。

由极限状态下力的平衡以及摩尔-库伦抗剪强度理论, 有:

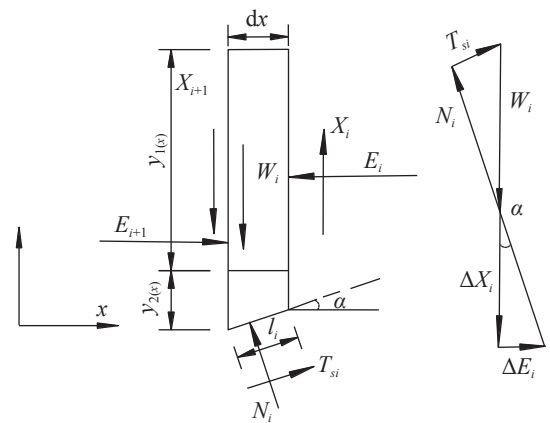


图 3 条分土块受力分析

Fig. 3 Force analysis of slice soil blocks

$$\left. \begin{aligned} T_{si} &= \frac{c_i l_i + N_i \tan \varphi_i}{F_s} \\ W_i + \Delta X_i - T_{si} \sin \alpha_i - N_i \cos \alpha_i &= 0 \\ W_i &= \gamma(y_1 - y_2) dx \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

此时土条稳定问题为超静定问题, 为使得问题得解, 毕肖普条分法假设 $\Delta X_i = 0$ 。已经证明, 这种简化方法对于安全系数的影响仅为 1% 左右, 计算结果满足工程精度要求。则有以下公式:

$$\left. \begin{aligned} T_{si} &= \frac{[c_i + \gamma(y_1 - y_2) \tan \varphi_i] dx}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi_i} \\ N_i &= \frac{[\gamma(y_1 - y_2) - c_i \tan \alpha_i] dx}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi_i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

1.2 塌陷区加筋体受力分析

取土条 i 下方加筋体微段进行受力分析(图 4), 因为采用条分法时, 假设土体两侧的竖向力以及法向力各自抵消, 并未传力至加筋体, 此时受力有切向反力 T_s' , 法向反力 N' , 左侧拉力 (T_H, T_V) , 右侧拉力 (T_H+dT_H, T_V+dT_V) 。

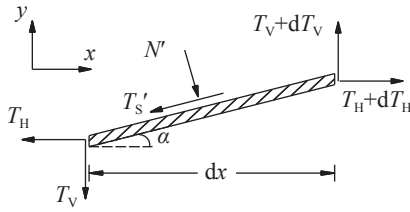


图 4 塌陷区加筋微段受力

Fig. 4 Stress of reinforced micro-segment in the subsidence area

因此由力的反作用性, 可得下式:

$$\left. \begin{aligned} T_s' = T_{si} &= \frac{[c_i + \gamma(y_1 - y_2) \tan \varphi_i] dx}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi_i} \\ N' = N_i &= \frac{[\gamma(y_1 - y_2) - c_i \tan \alpha_i] dx}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi_i} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据力的平衡, 塌陷区加筋体拉力的水平、竖向分力可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} T_H &= C_1 \\ T_V &= \int \gamma(y_1 - y_2) dx \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: C_1 为积分常数。

对 T_V 积分计算整理, 得:

$$T_V = \gamma \left[B^2 / 8 \cdot \arcsin(2x/B) + Bx/4 \cdot \sqrt{1 - (2x/B)^2} \right] - \gamma [k^2 \cdot \sinh(x/k) - (k + \omega)x] + C_2 - C_3 \quad (6)$$

式中: C_2, C_3 为积分常数。

由边界条件, 当 $x=0$ 时, $T_V=0$, 代入上式得:

$$C_2 - C_3 = 0 \quad (7)$$

于是:

$$T_V = \gamma \left[B^2 / 8 \cdot \arcsin(2x/B) + Bx/4 \cdot \sqrt{1 - (2x/B)^2} \right] - \gamma [k^2 \cdot \sinh(x/k) - (k + \omega)x] \quad (8)$$

对 T_V 求一阶导数, 有:

$$T_V' = \frac{B\gamma}{2\sqrt{1 - (2x/B)^2}} + \gamma [k + \omega - k \cdot \cosh(x/k)] \quad (9)$$

此时要求 $x \neq \pm(B/2)$ 。

由加筋体变形可知, 当 $0 \leq x < B/2$ 时, $y_2 < 0$, 即, $k + \omega - k \cdot \cosh(x/k) > 0$ 。此时, $T_V' > 0$, 在 $0 \leq x < B/2$ 上恒成立, 所以 T_V 此时单调递增, 当 x 无限趋于 $B/2$,

即塌陷边缘位置, T_V 取得最大值, 可得

$$T_{V\max} = T_{V(B/2)} = \gamma (\pi B^2 / 16 + \omega B / 2) \quad (10)$$

由图 4, 有:

$$y_2' = \tan \alpha = T_V / T_H \quad (11)$$

则有:

$$T_H = \gamma B^3 / 16\omega + \gamma B^2 / 8 \quad (12)$$

在塌陷区, 加筋体拉力可表示为:

$$T = \sqrt{T_H^2 + T_V^2} \quad (13)$$

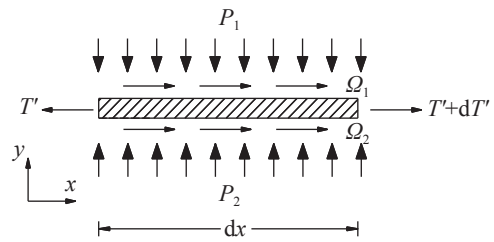
在塌陷边缘处取最大值:

$$T_{\max} = T_{(B/2)} = \sqrt{T_H^2 + T_{V\max}^2} \quad (14)$$

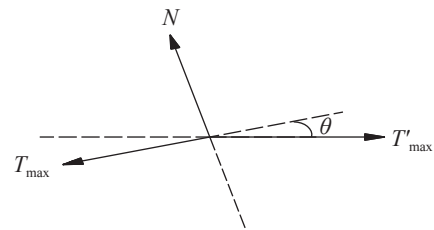
式中: $T_{V\max}$ 与 T_H 由公式 (10)、(12) 给出。

1.3 稳定区加筋体受力分析

取一个加筋体微段受力分析(见图 5(a)), 此时受力有左侧拉力 $(T', 0)$ 右侧拉力 $(T' + dT', 0)$, 筋土作用力 $P_1 + P_2$ 。



(a) 稳定区加筋微段受力



(b) 受力角度关系

图 5 稳定区加筋体受力情况

Fig. 5 Stress of the reinforced body in the stability area

根据力的平衡关系可知,

$$dT' = -(P_1 + P_2) dx \quad (15)$$

积分可得:

$$T' = -(P_1 + P_2)x + C_4 \quad (16)$$

从中可知, x 越小, T' 越大。

取 $x=(B/2)$ 处加筋体微段受力分析(见图 4(b)), 受力有稳定区筋材拉力 T'_{\max} , 塌陷区筋材拉力 T_{\max} , 塌陷边缘支撑力 N 。其中:

$$T'_{\max} = T_{\max} / \cos(\theta) \quad (17)$$

由 $y_2' = \tan(\alpha)$, 有 $\alpha = \arctan(y_2')$, 在 $x = B/2$ 处

$$\theta = \arctan\left(y_2'\Big|_{x=B/2}\right) \quad (18)$$

代入整理可得:

$$\cos\theta = (B^2 - 8w^2)/B^2 \quad (19)$$

于是:

$$T'_{\max} = B^2 T_{\max} / (B^2 - 8w^2) \quad (20)$$

式中: T_{\max} 的取值由公式 (14) 给出。

1.4 考虑规范的筋材受力计算

由于公路路基设计等规范对加筋体治理路面塌陷未进行详细说明, 参考《复合地基技术规范》(2012年)中规定后发现, 加筋体塌陷区最大下垂高度 ω 可取塌陷宽度的 1/10, 即 $\omega = B/10$, 最大不宜超过 0.2 m。

$$\omega = \begin{cases} B/10 & 0 < B < 2m \\ 0.2 & B \geq 2m \end{cases} \quad (21)$$

此时, 加筋体拉力的求解公式表示为:

$$T_{V\max} = \begin{cases} \gamma(\pi B^2/16 + B^2/20) & 0 < B < 2m \\ \gamma(\pi B^2/16 + B/10) & B \geq 2m \end{cases} \quad (22)$$

$$T_H = \begin{cases} 3\gamma B^2/4 & 0 < B < 2m \\ (5B+2) \cdot \gamma B^2/16 & B \geq 2m \end{cases} \quad (23)$$

$$T'_{\max} = \begin{cases} 25T_{\max}/23 & 0 < B \leq 2m \\ T_{\max}(1 - 8/25B^2) & B \geq 2m \end{cases} \quad (24)$$

1.5 加筋体合理锚固长度计算

假定加筋体能完全免受塌陷区上部填土只需满足稳定区筋材提供的锚固力大于或等于塌陷边缘处稳定区方向的筋材拉力 T'_{\max} 这一条件, 然而目前关于塌陷发生后稳定区竖向应力分布函数 $P(x)$ 的表达式尚未统一, 致使锚固力计算方式多样。因此下文基于两种不同的应力函数取值方法对锚固力进行计算, 进而求解出锚固长度。第一种锚固长度计算方法是借助缩尺试验、数值计算等研究手段获得 $P(x)$ 的表达式后, 代入公式 (25) 即可解得关于稳定区加筋体长度 x 的不等函数, 以此获得稳定区合理锚固长度 L , 第一种锚固长度计算方法如下:

$$f \cdot \left[\int_{B/2}^L (P_1(x) + P_2(x)) dx \right] \geq T'_{\max} \quad (25)$$

式中: f 为稳定区筋土界面作用系数 ($f < 1$); $P_1(x)$ 、 $P_2(x)$ 分别为塌陷稳定后稳定区加筋体上、下表面竖向应力分布函数。

在进行估算时, 稳定区竖向应力分布函数 $P(x)$ 可根据现有土拱理论计算, 然而基本假定 (1) 根据

H&R 土拱模型(二维平面问题)提出, H&R 土拱模型计算 $P(x)$ 时要求给出稳定区确切的土拱影响宽度, 对本情况不适用, 但 Terzaghi 基于著名的 Trapdoor 试验提出的经典土拱理论很好地解决该问题。因此可以依据 Terzaghi 土拱模型计算 $P(x)$ 对合理锚固长度 L 进行估算, 第二种锚固长度不等式计算方法见下式:

$$2f \cdot \int_{B/2}^L P_3(x) dx \geq T'_{\max} \quad (26)$$

在相关的土拱理论中, 稳定区竖向应力分布多为确定的均匀分布, 因此上式中, $P_3(x)$ 为太沙基模型下不动边界上竖向应力分布函数, 是定值。同时在估算时的加筋体塌陷区最大下垂高度 ω 可依据规范选取。

当采用试验或数值方法时, 竖向应力函数 $P(x)$ 有所变化, 则锚固长度随之受到影响。同时, 因公式 (25) 为锚固长度 L 的变限积分不等式, 则在第一种应力函数取值方法里, 令 $\Phi(x)$ 为稳定区加筋体上、下表面竖向应力分布函数 $P_1(x)$ 、 $P_2(x)$ 加和的表达式原函数。但应力函数采用太沙基模型时为定值, 则 $P_3(x)$ 可视为常数。综上可得, 有关锚固长度 L 的计算函数不等式如下:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(L) &\geq \frac{T'_{\max}}{f} + \Phi\left(\frac{B}{2}\right) \quad \text{试验数值法} \\ L &\geq \frac{T'_{\max}}{2fP_3(x)} + \frac{B}{2} \quad \text{估算法} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

为保证工程可靠性, 上述公式在实际应用时, 建议根据场地情况在公式 (27) 中引入安全系数, 使计算锚固长度偏安全。

1.6 加筋体锚固长度设计流程

朱斌等^[21] 给出的加筋体设计方法是基于膜理论的, 需要在水平加筋允许应变的基础上调节筋材刚度, 才能计算出允许拉力, 而分析岩溶塌陷的土体变形时主要考虑土拱效应。因此本文提出的加筋简化流程则结合相关理论对路基模型内的加筋体上部的土拱效应进行分析, 进而得出稳定区和塌陷区加筋体所受荷载。简化方法设计流程如下。

(1) 运用毕肖普简化条分法对土拱下方土块进行条分, 分析其土压力的荷载传递方式, 通过公式 (3) 得出滑动面法向力 N_s , 滑动面切向力 T_s ;

(2) 对筋材微段受力分析, 将 $x=0$ 边界条件代入公式 (5) 可得公式 (8) 塌陷区加筋体所受拉力的竖向

分力 T_v , 将 $x=B/2$ 边界条件代入公式 (8) 得到公式 (10) 塌陷边缘位置最大值 $T_{v\max}$, 根据力的极限平衡得到加筋体拉力的水平方向分力 T_H , 最后将塌陷区加筋体水平方向拉力 T_H 分别与塌陷区拉力 $T_{v\max}$ 以及塌陷边缘区最大拉力 $T_{v\max}$ 进行合成得出公式 (13) 塌陷区拉力 T 与公式 (14) 塌陷区边缘最大拉力 T_{\max} ;

(3) 分析塌陷区中心筋-土的摩擦作用时, 考虑稳定区筋材拉力 T_{\max} 与塌陷区筋材拉力 T_{\max} , 呈对称分布, 取塌陷区边缘位置处加筋体进行微段受力分析, 代入由悬链线方程 y_2 求导计算出的公式 (19) 稳定区与塌陷区筋材拉力夹角 θ , 得到稳定区筋材拉力 T_{\max} ;

(4) 参考《复合地基技术规范》(2012 年) 中的规定, 对加筋体拉力进行修正, 得出公式 (22) 塌陷边缘位置加筋体拉力竖向分力最大值 $T_{v\max}$ 与公式 (24) 稳定区筋材拉力 T_{\max} ;

(5) 引入稳定区筋土界面作用系数 f 对筋土作用进行分析, 并与筋材塌陷边缘处稳定区方向的拉力 T_{\max} 作比较, 在公式 (27) 中代入稳定区竖向应力分布函数 $P(x)$ 后, 即可确定稳定区合理锚固长度 L 。

上述设计方法中, 找寻稳定区加筋体竖向应力分布函数 $P(x)$ 时, 可依据试验或数值计算获得, 也可依据太沙基土拱模型公式进行估算。但在实际应用时为使计算的锚固长度偏安全, 建议根据场地情况在公式 (27) 中引入安全系数。

2 计算方法分析与验证

2.1 加筋体拉力公式验证

吴迪等^[8]在塌陷宽度和填土高度相同时, 分别进行了四组基于不同锚固长度的加筋体室内模型试验, 监测了土工织物在稳定区和塌陷区不同位置的受力情况。从中可以看出, 加筋体锚固区长度 L 在塌陷区宽度为 B (B 为 0.3 m) 的不同倍数时, 对土压力以及和织物拉力有一定的作用, 最终由其模型试验确定的稳定区合理锚固长度为 $0.5B < L < 1.0B$ 。为验证公式 (23) 和公式 (24) 的可靠性, 将已有的模型试验参数代入公式 (23) 和 (24) 进行计算与验证。

选取文献 [8] 中的 Z2 组 ($L=1.0B$) 稳定区加筋体上、下表面土压力数据拟合得到竖向应力分布函数 $P_1(x)$ 、 $P_2(x)$, 结合文中试验实测塌陷区中心处加筋

体下垂距离 ω 以及加筋体拉拔试验测得的筋土界面参数 ($f=0.24$), 通过公式 (12)、(14) 和 (25) 即可给出加筋体在塌陷区中部处的水平拉力和稳定区边缘处的最大拉力以及计算的合理锚固长度。以模型试验拉力结果作为参照, 用本文的计算方法得出的结果与其他计算方法得出的结果进行对比 (表 1)。

表 1 结果对比

Table 1 Comparison of results

方法	$T_H/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	$T'_{\max}/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$
文献[8]的试验结果	2.67	2.57
本文理论计算	1.63	1.73
赵洪元计算方法 ^[20]	4.96	5.22
朱斌计算方法 ^[21]	—	0.52
Giroud计算方法 ^[30]	—	1.78
BS8006计算方法 ^[31]	—	1.71

表 1 中, 塌陷区中心处 T_H 为 Y1 (塌陷中心处) 处拉力值, 稳定区边缘处 T_{\max} , 为 Y2 (位于稳定区, 距离塌陷稳定区交界 50 mm 处) 和 Y3 (位于塌陷区, 距离塌陷稳定区交界 50 mm 处) 处拉力值的均值。由于已有模型研究受试验条件所限, Y2、Y3 与塌陷边界存在一定距离, 试验中 Y2 和 Y3 处拉力值的均值较 T_{\max} 要小。然而由表 1 可知, 采用本文提出的加筋体拉力计算方法所得的结果与试验结果更吻合。当采用考虑规范的加筋体拉力计算方法时, 求得的 T_H 和 T_{\max} 分别为 $1.15 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $1.32 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$, 与代入实测的 ω 计算结果存在一定差异, 但相差不大。同时, 由模型试验^[8] 确定的稳定区合理锚固长度为 $0.5B < L < 1.0B$, 当采用试验数据按本计算方法确定的合理锚固长度为 $0.57B$, 与试验结论一致。当代入太沙基理论计算的 $P(x)$ 求得合理锚固长度为 $0.60B$, 计算存在偏差, 但相差不大。

2.2 加筋体拉力影响参数分析

对加筋体水平拉力 T_H 和最大拉力 T_{\max} 进行分析时, 稳定区竖向应力依据文献 [8] 的结果大致呈递减的指数形式分布。同时, 相关参数也参照已有试验进行设定, 且分别改变塌陷宽度 B 和塌陷稳定时加筋体最大挠度 ω , 分析如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知, 随着塌陷宽度的增大, 加筋体拉力明显增大, 与之对应的合理锚固长度也由最初的 $0.4B$ 增大至 $2.0B$ 。对于较小宽度的塌陷, 采用埋铺

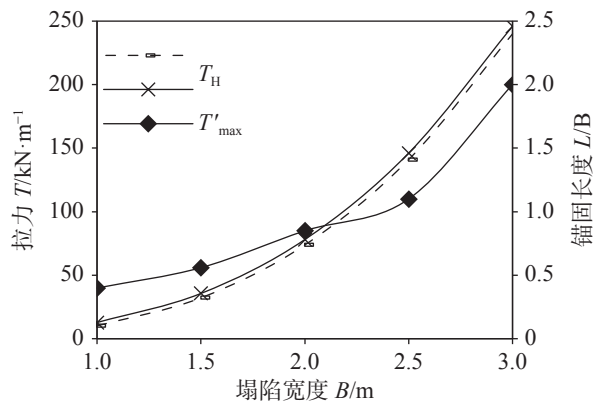


图6 塌陷宽度对拉力和合理锚固长度的影响

Fig. 6 Influence of collapse widths on tensile force and on reasonable anchorage lengths

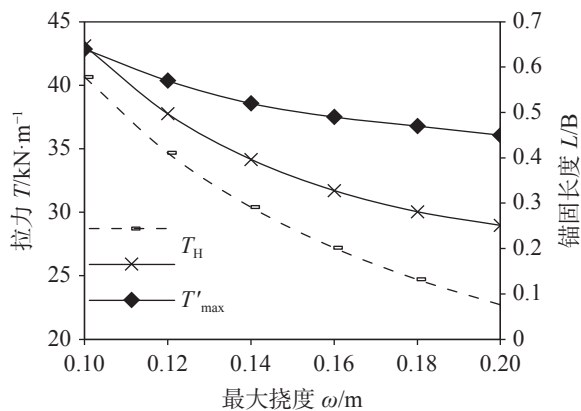


图7 加筋体最大挠度对拉力和合理锚固长度的影响

Fig. 7 Influence of maximum deflection of reinforced body on tensile force and on reasonable anchorage lengths

加筋材料治理具有较好的适用性,对加筋材料的强度以及工程开挖量要求均合理;对于较大宽度的塌陷,仅靠加筋材料治理是不经济的,此时可采取与其他工程措施相结合的手段来治理。

由图7可知,随加筋体最大挠度的增大,加筋体拉力逐渐减小,与之对应的合理锚固长度也相应减小,但减小的幅度不及拉力。当加筋体最大挠度偏大时可能会影响治理效果,且此时也不能明显减少工程开挖量。为保证治理效果,对于塌陷坑不大且对路面变形要求较高的塌陷治理时,应选取较小的加筋体最大挠度来进行计算。

3 结论

本文通过分析加筋体变形特征求得土中加筋体的抗拉强度,进而明晰计算锚固长度的方法,从中得

出以下结论:

(1)本文提出的简化设计方法所得结果接近于模型试验值,计算过程简单,结果可靠,对岩溶路基塌陷后的土工织物加筋治理具有理论及工程应用指导意义;

(2)塌陷宽度是影响土工织物治理的重要因素。设计方法表明,当路基塌陷范围较大时,土工织物受力和锚固长度均很大;

(3)塌陷稳定时的加筋体挠度对加筋体变形的影响较小,但面对路面变形要求高的路基时,仍需重视加筋材料锚固长度的选择。

参考文献

- [1] 罗小杰,沈建.我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J].中国岩溶,2018,37(1):101-111.
LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 101-111.
- [2] 吴亚楠.泰安市城区-旧县水源地岩溶地面塌陷历程及影响因素分析[J].中国岩溶,2020,39(2):225-231.
WU Yanan. Analysis on development history and influencing factors of the karst collapse in Tai'an-Jiuxian water source area[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(2): 225-231.
- [3] 郑晓明,金小刚,陈标典,刘鹏瑞,杨戈欣,李海涛,杨涛.湖北武汉岩溶塌陷成因机理与致塌模式[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):75-82.
ZHENG Xiaoming, JIN Xiaogang, CHEN Biaodian, LIU Pengrui, YANG Gexin, LI Haitao, YANG Tao. Mechanism and modes of karst collapse in Wuhan City, Hubei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 75-82.
- [4] 陈雨昂,唐荣,方建,孔锋.2014-2018年中国城市路面塌陷时空规律与原因分析[J].水利水电技术,2020,51(7):108-116.
CHEN Yu'ang, TANG Rong, FANG Jian, KONG Feng. Analysis on spatio-temporal law and causation of urban road collapse in China from 2014 to 2018[J]. Water Resources and Hydropower Engineering: 2020, 51(7): 108-116.
- [5] 胡聿涵,白玉川,徐海珏.近10年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J].公路,2016(9):130-135.
HU Yuhan, BAI Yuchuan, XU Haijue. Analysis of reasons for urban road collapse and prevention and control countermeasures in recent decade of China[J]. Highway, 2016(9): 130-135.
- [6] 孙锡良,陈亮晶,欧健,陈文东.湖南宁乡煤炭坝镇富家村岩溶地面塌陷成因分析及防治建议[J].中国岩溶,2018,37(3):421-426.
SUN Xiliang, CHEN Liangjing, OU Jian, CHEN Wendong. Cause analyses and prevention suggestions for the karst collapse in the Fujia village of Hunan, China[J]. Carsologica Sinica,

- 2018, 37(3): 421-426.
- [7] 刘阳, 刘家才. 某海堤后方地面塌陷原因分析[J]. *水运工程*, 2019(8): 92-96.
LIU Yang, LIU Jiakai. Reason analysis of ground collapse in the rear of a seawall[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019(8): 92-96.
- [8] 吴迪, 吴建建, 徐超, 陈学军, 黄翔. 土工织物治理岩溶路基塌陷的模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(Supp.2): 143-153.
WU Di, WU Jianjian, XU Chao, CHEN Xuejun, HUANG Xiang. Model test of geotextiles in controlling the collapse of karst roadbed[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Supp.2): 143-153.
- [9] 贺炜, 李昆, 王芳洪. 防岩溶塌陷加筋垫层大比例模型试验及设计理论研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(5): 980-988.
HE Wei, LI Kun, WANG Fanghong. Large-scale experimental study of multi-layered reinforcement to prevent underneath sinkhole in karst terrain and the design method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(5): 980-988.
- [10] Vinh Le, Jie Huang, Sazzad Bin-Shafique, A T Papagiannakis. Model tests of subsidence of the reinforced soil over voids[C]//Ground Improvement and Geosynthetics, Shanghai, ASCE, 2014 (238): 312-321.
- [11] Jie Huang, Vinh Le, Sazzad Bin-Shafique, A T Papagiannakis. Experimental and numerical study of geosynthetic reinforced soil over a channel[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2015, 43(5): 382-392.
- [12] 万梁龙, 陈福全, 邹维列. 岩溶塌陷影响下加筋路基承载机理研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(2): 56-62.
WAN Lianglong, CHEN Fuquan, ZOU Weilie. Mechanisms of load transfer in geosynthetic-reinforced embankments subjected to localised karst collapse[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(2): 56-62.
- [13] 黄杰, 王钊, 肖衡林. 空穴加筋的设计方法及讨论[J]. *长江科学院院报*, 2002(5): 24-26, 30.
HUANG Jie, WANG Zhao, XIAO Henglin. Design method of reinforcement over voids and discussion[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002(5): 24-26, 30.
- [14] 丁烈梅, 郭超祥. 水平向加筋体抗沉陷作用机理分析及设计方法[J]. *土木工程与管理学报*, 2016, 33(3): 57-60, 67.
DING Liemei, GUO Chaoxiang. Mechanical performance and design method of horizontal reinforcement subjected to subsidence[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, 33(3): 57-60, 67.
- [15] 王非, 缪林昌. 落水洞上覆路堤土工加筋设计新方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, 39(6): 1217-1221.
WANG Fei, MIAO Linchang. New design method of geosynthetic-reinforced embankment over sinkhole[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2009, 39(6): 1217-1221.
- [16] 刘飞成, 张建经, 曾鹏毅. 一种桩网路堤荷载传递机制的简化分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(Supp.1): 3747-3755.
LIU Feicheng, ZHANG Jianjing, ZENG Pengyi. A simplified method to analyze load transfer mechanisms of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Supp.1): 3747-3755.
- [17] Han J, Gabr M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(1): 44-53.
- [18] 周亦涛, 陈福全. 抗条形沉陷的土工合成材料加筋体设计[J]. *中国科技论文*, 2019, 14(4): 441-446.
ZHOU Yitao, CHEN Fuquan. Design of reinforcement of geosynthetics for resisting strip settlement[J]. *China Science Paper*, 2019, 14(4): 441-446.
- [19] 付宏渊, 殷苗苗, 贺炜. 防治公路岩溶塌陷的土工合成材料设计理论研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(10): 2983-2988.
FU Hongyuan, YIN Miaomiao, HE Wei. Study of design theory of geosynthetics for treating road sinkhole collapse hazard in karst terrain[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 2983-2988.
- [20] 赵洪元, 蔺港, 杨胜波. 公路路堤抗溶洞塌陷水平加筋体受力机理及设计方法研究[J]. *中外公路*, 2015, 35(4): 35-38.
- [21] 朱斌, 陈若曦, 陈云敏, 陈仁朋. Trapdoor 位移相关土压力及抗沉陷加筋设计新方法[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(12): 1895-1901.
ZHU Bin, CHEN Ruoxi, CHEN Yunmin, CHEN Renpeng. Trapdoor deflection-related earth pressure and new design method of reinforcements to resist local subsidence[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1895-1901.
- [22] 贺炜, 付宏渊. 岩溶区路堤下塌陷防治的水平加筋设计方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(Supp.1): 365-370.
HE Wei, FU Hongyuan. Design of horizontal reinforcement as prevention of sinkhole hazards for roadbed engineering in karst areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(Supp.1): 365-370.
- [23] 张东卿, 薛元, 罗强, 刘菟茹, 郑永飞. 水平加筋体加固岩溶路基受力机理及设计方法[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(2): 336-342.
ZHANG Dongqing, XUE Yuan, LUO Qiang, LIU Wanru, ZHENG Yongfei. Load mechanisms and design method for karst subgrade reinforced by horizontal geosynthetic reinforcement[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(2): 336-342.
- [24] 陈福全, 赖丰文. 抗土洞塌陷的低填方加筋路基荷载传递机制及设计方法[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(7): 1180-1189.
CHEN Fuquan, LAI Fengwen. Load transfer mechanisms and design method of low geosynthetic-reinforced embankments subjected to localized sinkholes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(7): 1180-1189.
- [25] 陈福全, 万梁龙. 岩溶塌陷影响下加筋路基加筋体设计方

- 法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(1): 208-216.
- CHEN Fuquan, WAN Lianglong. Design method for geosynthetics as reinforcement to prevent embankments from collapsing due to localised sinkholes[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(1): 208-216.
- [26] Huckert A, Briancon L, Villard P, Garcin P. Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Experimental and analytical approaches[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(3): 442-456.
- [27] Abusharar S W, Zheng J J, Chen B G, Yin J H. A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(1): 39-52.
- [28] Lu W H, Miao L C. A simplified 2D evaluation method of the arcing effect for geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 65(65): 97-103.
- [29] Helwett W J, Randolph M F. Analysis of piled embankment[J]. *Ground Engineering*, 1988, 21(3): 12-18.
- [30] Giroud J P, Bonaparte R, Beech J F. Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids[J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 1990, 9(1): 11-50.
- [31] British Standard Institution. BS-8006 Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills[S]. 2010.

Simplified design method of reinforcement treatment for karst subgrade collapse

WU Di¹, LI Aiwen¹, LI Dan¹, JIA Long², WEI Xueying¹, WU Jianjian¹

(1. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Karst areas are widely distributed in China, especially in South China. With the proposal of the Belt and Road Initiative, a large amount of infrastructure has to be built in the karst area. However, the diversity of structure and mechanical properties of karst make it difficult for us to construct roads on karst foundations. In recent years, the frequent occurrence of settlement and even collapse of the road surface caused by karst foundations under soil layers of roads has threatened the safety of urban transportation and the development of economy. Therefore, the treatment of karst collapse has become an urgent engineering problem. For the controlling of karst collapse under a complex urban road environment, the treatment of karst collapse by the method of backfilling and compacting is economical in construction and can be finished in short time, but collapses are prone to happen again after treatment. In this case, the treatment can be carried out with geosynthetics, namely filling the geotextile in the subsidence area during the backfilling and compacting process. This kind of treatment utilizes not only the reinforcement effect of geotextiles to achieve the self-stability of the entire reinforced soil system, but also utilizes the filtration performance of geotextiles to prevent the loss of soil particles backfilled, thus addressing both the symptoms and root causes of the collapse. However, the interface interaction between reinforcement and soil is so complex in this method that the corresponding design method of reinforcement is still not clear. In previous studies, the design method of reinforcement focuses on the prevention of collapse before its occurrence. In this kind of method, reinforcement materials are generally used with sufficient anchoring length for full paving. As for the design method of treatment after collapse, there are few studies on the range selection of paving reinforcement. In addition, the maximum tensile force of geotextile will affect its strength design and then impact the overall strength of the reinforced body. Therefore, the previous studies on anchoring length and the lack of theories on calculating reinforcement force have restricted the application of reinforcement in engineering practice.

In order to accurately calculate the maximum tensile force of the reinforcement and to study the anchoring length of the geotextile, a design method for reinforced treatment of karst roadbed collapse was proposed. Firstly, the simplified Bishop's strip method was used to analyze the soil force. According to the characteristics of tension action between reinforcement and soil, the calculation formula of the reinforcement force in subsidence areas and stability areas was deduced by assuming that the deformation of the reinforcement was catenary. Meanwhile, with the

assumption that the anchoring force of the reinforced body was greater than the maximum tensile force to ensure the settlement stability of the subsidence area, a calculation formula for the reasonable anchoring length of the reinforcement was worked out and the relevant design procedure of the anchor length was sorted out. Additionally, based on the test results of existing models and the comparison with previous calculation methods, the calculation method of adding reinforcement tension and of the reasonable anchoring length was verified, on this basis of which the parameter design was conducted according to the relevant experimental results. It was assumed that the vertical stress in the stability area was roughly distributed in a decreasing exponential form. Finally, the effects of collapse width and maximum deflection of the reinforcement on the tensile force and on reasonable anchoring length were analyzed.

The results show that firstly, a design method of anchoring length of geotextile reinforced cushion for treating urban road collapses in karst areas has been established in this study. In order to ensure the reliability of the proposed design method of reinforcement, the methods of determining values involving the vertical stress distribution function $P(x)$ of the tensile force reinforcement should be taken into account, one is the value determination by model tests or numerical means; another is the value estimation according to the classical earth arch theory. Meanwhile, when determining the anchoring length, it is necessary for us to introduce the corresponding factor of safety in combination with the actual situation to ensure the project quality. Secondly, the calculation results by the design method in this study are more consistent with the test results of other methods, which suggests that the proposed method not only increases the safety of preventing karst subgrade collapse, but also effectively improves the utilization effect of reinforcement. The result is of referential value for engineering practice. Moreover, the design method in this study also shows that both the anchoring length and the tensile force of reinforced body demanded by geotextile are big when the range of subgrade collapse is large. Thirdly, the collapse width is the main factor affecting the force of the reinforced body and the reasonable anchoring length. But the maximum deflection of the reinforced body has little effect on the reasonable anchoring length. Therefore, it is necessary to choose the anchoring length of the geosynthetics for the subgrade with a high standard required by the tendency to road deformation.

Key words subgrade engineering, karst subgrade collapse, geotextile reinforcement, anchoring length, design method

(编辑 杨杨)