

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201912044

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

钟昌茂^{1,2}, 邱恩喜¹, 魏永幸², 王智猛², 刘苑茹², 万旭升¹, 李康乐¹

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 根据瑞典条分法和简化毕肖普法分析边坡稳定性原理, 通过对抗滑桩及桩间土的稳定力矩与滑动力矩进行单独分析及计算, 提出基于桩体强度的路堤边坡稳定性分析桩-土分算法。采用桩-土分算法和规范法对具有不同加固桩桩径、桩间距和路堤高度的边坡稳定性及滑坡破坏特点进行分析。结果表明, 桩-土分算瑞典条分法计算所得稳定系数最大, 桩-土分算毕肖普法次之, 规范法所得稳定系数最小。基于 3 种方法的路堤边坡稳定系数均随坡高增大而降低, 规范法与桩-土分算法计算所得稳定系数差值, 随边坡高度增大呈先增大后减小的抛物线形变化。此外, 桩-土分算法分析所得边坡最不利滑面位置出现了“下移”现象, 根据规范法边坡最不利圆弧滑面穿过地基加固区中部, 但当路堤边坡高度为 9~15 m 时, 桩-土分算法分析所得最不利圆弧滑面绕开了柔性桩加固区域, 位于柔性桩加固区底部以下区域, 且此时边坡仍然存在不稳定性。

关键词: 瑞典条分法; 桩-土分算; 路堤稳定性; 稳定系数; 最不利滑面

中图分类号: P642.22; TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0100-08

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

ZHONG Changmao^{1,2}, QIU Enxi¹, WEI Yongxing², WANG Zhimeng², LIU Wanru², WAN Xusheng¹, LI Kangle¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In the current specification, the stability analysis of the embankment slope is calculated by combining the strength parameters of the two parts of pile and the soil into a single parameter, which will cause the slope stability and the position of the most unfavorable slip surface to deviate from the actual project. Therefore, by using the Swedish strip method and the simplified Bishop method to analyze the slope stability principle, through the separate analysis and calculation of the stability moment and sliding force distance of the anti-slide pile and the soil between the piles, a pile-soil algorithm for embankment slope stability analysis is proposed. The pile-soil division algorithm and the code method are used to analyze the stability and landslide failure characteristics of slopes with different reinforcement pile diameters, pile spacing and embankment heights. The results show that the pile-soil calculation has the largest stability coefficient calculated by the Swedish strip method, followed by the pile-soil calculation Bishop method, and the standard method has the smallest stability coefficient. The embankment slope stability coefficients based on the three methods all decrease as the slope height increases. The difference between the stability coefficients calculated by the

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-05-18

基金项目: 高速铁路红层泥岩地基膨胀性细观力学行为研究(2020YJ0416); 西南地区红层泥岩道路工程特性及修建技术研究(KYY2019140(19-20)); 国家自然科学基金项目资助(41601068)

第一作者: 钟昌茂(1993-), 男, 硕士, 主要从事工程地质与岩土工程研究。E-mail: swpuzcm@163.com

standard method and the pile-soil algorithm shows a parabolic change that increases first and then decreases as the slope height increases. The difference between the two pile-soil separation algorithms is approximately linear. In addition, the position of the most unfavorable sliding surface of the slope obtained by the analysis of the pile-soil analysis algorithm shows a “downward” phenomenon. With the code method, the most unfavorable arc sliding surface of the slope passes through the middle of the foundation reinforcement area. However, when the height of the embankment slope is 9 ~ 15 m, the pile-soil algorithm analysis indicates that the most unfavorable arc slip surface passes the flexible pile reinforcement area and is located below the bottom of the flexible pile reinforcement area, and the slope is not yet stable.

Keywords: Sweden arc method; pile-soil algorithm; embankment stability; stability factor; the most unfavorable slip surface

路堤修建过程中,常遇到承载力较低的软弱地基,导致路堤出现滑塌失稳、变形沉降等工程病害,严重威胁铁路工程的顺利修建和稳定运营。而水泥土搅拌桩复合地基是工程中处理软基的常用方法,因此对水泥搅拌桩等加固的复合地基路堤边坡稳定性分析及处置技术进行深入研究具有重要意义。边坡稳定性分析理论主要有刚体极限平衡理论、变形分析理论和塑性极限分析理论三种^[1],刚体极限平衡理论常采用瑞典圆弧法、Bishop法、Janbu法等。土质边坡失稳时临界滑动面常呈现为圆弧状或呈折线状^[2],在《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)中针对路基失稳时的边界形状提供了圆弧滑动法、平面滑动和折线滑动三种边坡稳定性计算方法。变形分析理论是将土坡稳定与变形结合起来,利用有限元等数值计算对边坡的稳定性进行计算^[3-5]。塑性极限分析理论则是基于极限状态条件下的能量守恒原理(即外力功率与内部能量消耗平衡),以求解边坡稳定稳定系数^[6-7]。本文基于刚体极限平衡理论中的瑞典圆弧法与毕肖普法,对水泥土搅拌桩加固地基的路堤边坡稳定性进行分析。

对桩加固的复合地基路堤稳定性分析,根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)提供的方法,可将加固桩与桩间土两部分的强度参数整体复合为单一的强度参数(以下简称规范法),进而计算路基和路堤整体稳定性。但是在复合为单一强度参数后,其桩体强度参数有所折减,所求出的稳定系数并非为真实稳定系数,其折减值与复合地基的置换率、路基高度、桩体参数等有一定关系。并且,有研究表明,采用折减的强度参数计算边坡稳定性时会导致计算结果的失真^[8-9]。

本文基于规范所提供设计方法,提出了新构思,即分别计算出加固桩和桩间土抗剪强度,并进一步计算

出加固桩和桩间土的稳定力矩和滑动力矩,最后得到路堤边坡稳定系数。研究表明,基于桩-土分算方法的稳定系数大于规范法计算所得稳定系数,两种方法计算的稳定系数差值呈现出一定规律性。并且,对于已加固边坡,规范法分析所得最不利圆弧滑面穿过柔性桩加固区,但桩-土分算法分析所得最不利滑面位于加固桩底部以下区域,绕过了柔性桩加固区,更加接近实际情况。

1 复合地基稳定性计算规范法

根据《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016),计算圆弧滑动型路基及路堤整体稳定性时可采用瑞典条分法,但不通过单桩抗剪强度计算滑动力矩,而是采用加固桩与桩间土两部分强度参数整体复合为单一强度参数,进而计算路基及路堤整体稳定性。

1.1 散体材料桩复合地基抗剪强度指标

散体材料桩加固的复合地基,其抗剪强度指标按式(1)、式(2)进行确定:

$$c_c = (1 - m)c_s \quad (1)$$

$$\text{tg}\varphi_c = (1 - m)\text{tg}\varphi_s + m\text{tg}\varphi_p \quad (2)$$

式中: c_c, φ_c ——复合地基土的黏聚力和内摩擦角;

c_s, φ_s ——桩间土的黏聚力和内摩擦角;

φ_p ——桩体内摩擦角;

m ——复合地基置换率,根据桩承担面积的不同,采用公式 $m = nA_p/A$ 进行计算^[10] (A_p 为单桩面积, A 为桩周复合土体单元面积, n 为桩的根数)。

1.2 柔性桩复合地基抗剪强度指标

柔性桩复合地基抗剪强度按式(3)进行确定:

$$\tau_c = m\tau_p + (1 - m)\tau_s \quad (3)$$

式中: τ_c ——复合地基的抗剪强度;

τ_p ——桩体的抗剪强度;

τ_s ——桩间土的抗剪强度。

1.3 稳定系数计算

根据式(1)、式(2)或式(3)获得复合地基抗剪强度参数后,其稳定系数 K 可按式(4)计算,计算示意图如图 1 所示。

$$K = \frac{\sum S_k + \sum S_t}{P_T} \quad (4)$$

$$P_T = \sum W_k \sin \alpha_k + \sum W_t \sin \alpha_t$$

$$S_k = W_k \cos \alpha_k \tan \varphi_{qk} + c_{qk} l_k$$

$$S_t = W_t \cos \alpha_t \tan \varphi_{qt} + c_{qt} l_t$$

$$W_k = W_{ck} + W_{dk}$$

式中: P_T ——各土条在滑弧切线方向的下滑力和;

S_k ——地基土内(AC 弧)抗剪力;

S_t ——路堤内(CD 弧)抗剪力;

W_k, W_t ——第 k 条、第 t 条土条重量。下标 k, t 表示土条编号, k 表示土条底部滑裂面在地基土层内, t 表示土条底部的滑裂面在路堤填料内;

W_{dk}, W_{ck} ——当第 k 土条滑裂面处于地基内(AC 弧)时,分别为滑面以上该土条中的地基自重及路堤自重;

α_k, α_t ——第 k 、第 t 土条底滑面的倾角;

l_k, l_t ——第 k 、第 t 土条底滑面的长度;

R ——滑动圆弧半径;

c_{qk}, φ_{qk} ——当第 k 土条滑裂面处于地基内(AC 弧)时,分别为该土条所在土层的快剪黏聚力及快剪内摩擦角;

c_{qt}, φ_{qt} ——当第 t 土条滑裂面处于路堤内(CD 弧)时,分别为该土条所在路堤填料的黏聚力与内摩擦角。

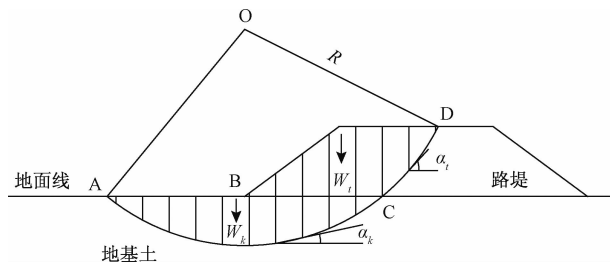


图 1 规范法计算路堤稳定性示意图

Fig.1 Schematic diagram for calculating the stability of embankment by the criterion method

2 复合地基稳定性桩-土分算计算原理

2.1 桩-土分算瑞典条分法

基于边坡圆弧滑动破坏方式,分别计算加固桩和桩间土的抗剪强度,最后得出路基边坡稳定系数 K 。如图 2 所示土坡,未加固时,取单位长度土坡按平面问题计算。设可能滑动面为圆弧 AD,圆心为 O,半径为 R 。

将滑动土体 ABCD 分成许多竖向土条,任一土条 i 上的作用力包括土条重力 W_i 、滑动面 ef 上的法向力 N_i 及切向反力 T_i 、土条两侧的法向力 E_i, E_{i+1} 及竖向剪切力 X_i, X_{i+1} 。(假定土条和桩两侧 E_i 和 X_i 的合力等于 E_{i+1} 和 X_{i+1} 的合力,同时它们的作用线也重合,因此土条和桩两侧的作用力相互抵消^[11]):

$$N_i = W_i \cos \alpha_i \quad (5)$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i \quad (6)$$

滑动面 ef 上的抗剪强度 τ_{fi} :

$$\tau_{fi} = \sigma_i \tan \varphi_i + c_i = \frac{N_i}{l_i} \tan \varphi_i + c_i = \frac{W_i \cos \alpha_i}{l_i} \tan \varphi_i + c_i \quad (7)$$

式中: α_i ——土条 i 滑动面的法线(亦即半径)与竖直

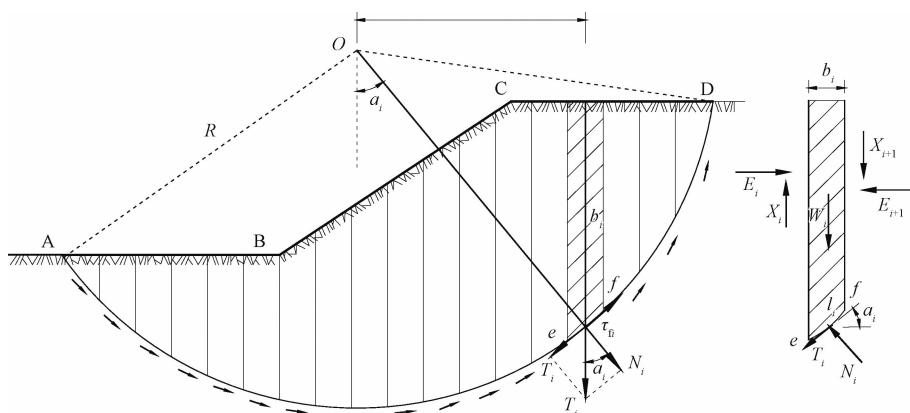


图 2 瑞典条分法计算路堤边坡稳定性示意图

Fig.2 Schematic diagram of the Swedish arc method for calculating embankment stability

线的夹角;

σ_i ——滑面 ef 所受正应力;

c_i, φ_i ——滑动面上地基土或路堤填料的黏聚力及内摩擦角。

土条 i 上的作用力对圆心 O 产生的滑动力矩 M_s 及稳定力矩 M_r 分别为:

$$M_s = T_i R = W_i R \sin \alpha_i \quad (8)$$

$$M_r = \tau_{fi} l_i R = (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) R \quad (9)$$

加固桩存在时,如图3所示土坡,取长度为 l_z 的(l_z 为复合地基加固桩的桩间距)土坡按平面问题计

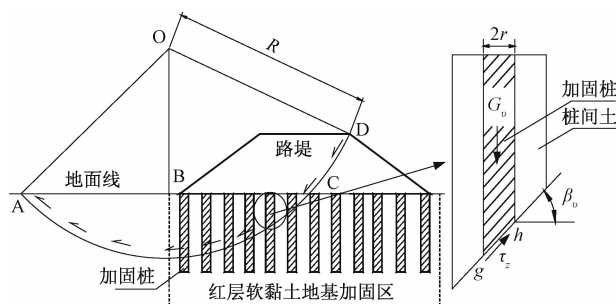


图3 复合地基路堤稳定性桩-土分算示意图

Fig.3 Stability diagram of embankment with composite foundation

$$K = \frac{M_r + M_z - M_c}{M_s} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) + \sum_{v=1}^b (G_v \cos \beta_v \tan \varphi_v + c_v s) - \sum_{u=1}^b (G_u \cos \beta_u \tan \varphi_u + c_u s)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \sum_{v=1}^b G_v \sin \beta_v - \sum_{u=1}^b G_u \sin \beta_u} \quad (14)$$

式中: M_s ——复合地基路堤对圆心 O 产生的滑动力矩。

2.2 桩-土分算毕肖普法

对于复合地基路堤稳定性,在考虑桩体抗剪强度情况下还可采用简化毕肖普法进行分析^[11]:

如图2所示土坡,由土条 i 的竖向平衡条件有:

$$N_i \cos \alpha_i = W_i + X_{i+1} - X_i - T_i \sin \alpha_i \quad (15)$$

假定 τ_{fi} 与滑面上的切向力 T_i 相平衡,则:

$$T_i = \tau_{fi} l_i = \frac{1}{K_b} (N_i \tan \varphi_i + c_i l_i) \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得:

$$N_i = \frac{W_i + (X_{i+1} - X_i) - \frac{c_i l_i \sin \alpha_i}{K_b}}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{K_b}} \quad (17)$$

已知土坡的稳定力矩为:

$$M'_r = \sum_{i=1}^n (N_i \tan \varphi_i + c_i l_i) R \quad (18)$$

将式(17)代入式(18)有:

算。同样设可能滑动面为圆弧 AD , 圆心为 O , 半径为 R , 并将滑动土体 $ACDBA$ 分成许多竖向土条, 对土条进行受力分析。假定滑面内有 b 根桩, 桩滑面 gh 的面积 s 为:

$$s = \frac{\pi r^2}{\cos \beta_v} \quad (10)$$

式中: β_v ——桩 v 滑动面的法线(亦即半径)与竖直线的夹角;

r ——桩的半径。

则桩 v 上的抗剪力对圆心 O 产生的稳定力矩 M_z 为:

$$M_z = \tau_z \frac{\pi r^2}{\cos \beta_v} R \quad (11)$$

$$\tau_z = \frac{G_v \cos \beta_v}{s} \tan \varphi_v + c_v \quad (12)$$

式中: τ_z ——加固桩 v 的抗剪强度;

G_v ——加固桩滑面 gh 所受竖向压力;

c_v, φ_v ——加固桩 v 的黏聚力及内摩擦角。

桩所置换的土条 u 产生的稳定力矩 M_c :

$$M_c = \tau'_u s R = \left(G_u \cos \beta_u \tan \varphi_u + c_u \frac{\pi r^2}{\cos \beta_u} \right) R \quad (13)$$

式中: G_u ——桩置换土作用在滑面 gh 的竖向压力。

则整个土坡相应于滑动面为 ACD 时的稳定系数 K :

$$M'_r = \sum_{i=1}^n \frac{[W_i + (X_{i+1} - X_i)] \tan \varphi_i + c_i l_i \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{K_b}} R \quad (19)$$

毕肖普假定土条间竖向剪切力 $X_i = X_{i+1}$, 得:

$$M'_r = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\alpha i}} (W_i \tan \varphi_i + c_i l_i \cos \alpha_i) R \quad (20)$$

$$m_{\alpha i} = \cos \alpha_i + \frac{1}{K_b} \tan \varphi_i \sin \alpha_i$$

同理, 边坡中加固桩的稳定力 M_z 矩为:

$$M'_z = \sum_{v=1}^b \frac{1}{m_{\beta v}} (G_v \tan \varphi_v + c_v s \cos \beta_v) R \quad (21)$$

$$m_{\beta v} = \cos \beta_v + \frac{1}{K_b} \tan \varphi_v \sin \beta_v$$

加固桩置换土条的稳定力 M_c 矩为:

$$M'_c = \sum_{u=1}^b \frac{1}{m_{\beta u}} (G_u \tan \varphi_u + c_u s \cos \beta_u) R \quad (22)$$

$$m_{\beta u} = \cos \beta_u + \frac{1}{K_b} \tan \varphi_u \sin \beta_u$$

则路堤边坡稳定系数 K_b 为:

$$K_b = \frac{M'_r + M'_z - M'_c}{M'_s} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{(W_i \lg \varphi_i + c_i l_i \cos \alpha_i)}{m_{\alpha i}} + \sum_{v=1}^{v=b} \frac{(G_v \lg \varphi_v + c_v s \cos \beta_v)}{m_{\beta v}} - \sum_{v=1}^{v=b} \frac{(G_u \lg \varphi_i + c_i s \cos \beta_v)}{m_{\beta i}}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i + \sum_{v=1}^{v=b} G_v \sin \beta_v - \sum_{v=1}^{v=b} G_u \sin \beta_v} \quad (23)$$

式中: M'_s ——复合地基路堤对圆心 O 产生的滑动力矩。

3 边坡稳定系数及破坏特点研究

3.1 计算案例

以路堤边坡填高分别为 3, 6, 9, 12 和 15 m 为例, 对路堤边坡稳定系数 K 进行计算, 路堤上部填料重度为 20 kN/m^3 , $\varphi = 36^\circ$, $c = 54 \text{ kPa}$; 下部红黏土软基参数为 $\varphi = 5^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$, 重度为 19 kN/m^3 。采用水泥搅拌桩加固路堤, 强度参数如表 1 所示, 桩直径分别为 0.5 m 和 0.8 m, 间距分别设置为 1.2, 1.5 和 1.8 m, 正

方形布置。软基加固深度分别为 10, 15, 20, 25 和 30 m, 均穿过未加固时的边坡最不利滑动破坏面。

3.2 地基边坡稳定系数变化规律

在路基高度为 3, 6, 9, 12 和 15 m、搅拌桩水泥掺入量为 20%、并养护 90 d 的情况下, 对各边坡未加固时的最不利滑面的稳定性进行分析。结果如图 4 所示, 在桩径及桩距相同的情况下, 桩-土分算瑞典条分法的(式(14))、规范法(式(4))以及桩-土分算毕肖普法(式(23))计算所得稳定系数均随路堤高度增加而降低。

表 1 水泥土搅拌桩强度参数^[12]

Table 1 Strength parameters of cement soil^[12]

水泥掺入量/%	水泥土搅拌桩养护龄期/d							
	7		28		60		90	
	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
20	0.28	50.50	0.59	52.30	0.64	57.50	0.78	63.30
7	0.13	25.60	0.37	29.43	0.40	46.80	0.41	52.32

规范法计算所得路堤边坡稳定系数见图 4(a), 稳定系数最大值和最小值出现在边坡高度为 3 m 和 15 m 时, 分别介于 2.94 ~ 14.51 和 0.98 ~ 3.41 之间。基于桩-土分算瑞典条分法的路堤稳定系数见图 4(b)。其最大值出现在边坡高度为 3 m 时, 范围为 4.21 ~ 16.51; 最小值则为边坡高度 15 m 时, 范围为 1.37 ~ 3.93。

图 4(c) 为桩-土分算毕肖普法的稳定系数计算值。当路基高度为 3 m 时其稳定系数最大, 范围为 4.01 ~ 13.86; 当边坡高度为 15 m 时, 其稳定系数最小, 范围为 1.37 ~ 3.60。图 4(a)~(c) 间的对比表明, 在桩径、桩距及边坡高度相同的情况下, 桩-土分算毕肖普法所得稳定系数低于桩-土分算瑞典条分法法稳定系数, 但高于规范法计算所得稳定系数。

图 5 为规范法计算所得路堤稳定系数与桩-土分算瑞典条分法所得稳定系数差值率 μ , 其值随边坡高度呈抛物线形变化:

$$\mu = \frac{K_{\text{分算法}} - K_{\text{规范法}}}{K_{\text{分算法}}} \quad (24)$$

式中: $K_{\text{分算法}}$ ——公式(14)计算所得稳定系数;

$K_{\text{规范法}}$ ——公式(4)计算所得稳定系数。

在桩距为 1.2 m 时, 稳定系数差值率随路堤高度

从 3 m 增加到 9 m 时呈上升趋势, 最大值在桩径为 0.8 m 及路堤坡高为 9 m 时达到, 为 19.6%; 当路堤坡高从 9 m 增加到 15 m 时, 差值率则呈下降趋势, 但最小值出现在边坡高度 3 m 时(图 5a、c)。差值率随路堤的高度不断增大而先增大后减小, 总体趋势呈抛物线形变化。

在桩距为 1.8 m 的情况下, 稳定系数差值率随路堤高度仍然呈先增大后减小的抛物线形变化, 但其峰值提前出现在路堤高度为 6 m 的情况下。即差值率最大值出现在桩径为 0.8 m 及路堤坡高为 6 m 时, 为 40.3%。

图 6 为桩-土分算瑞典条分法与桩-土分算毕肖普法求得的稳定系数差值率。结果表明, 采用后者计算出来的稳定系数总体低于桩-土分算瑞典条分法的稳定系数。两者差值率随路堤高度增加及桩距的增大减小, 随桩径的增大而增大, 近似线性变化。总体而言, 2 种桩-土分算法得到的稳定系数差值率位于 0 ~ 18% 范围内。

由于规范法是将桩体的强度参数与土体的强度参数进行复合为一整体计算, 这一方法虽然在理论上确实提高了土体的强度参数, 但是也折减了桩体的强度

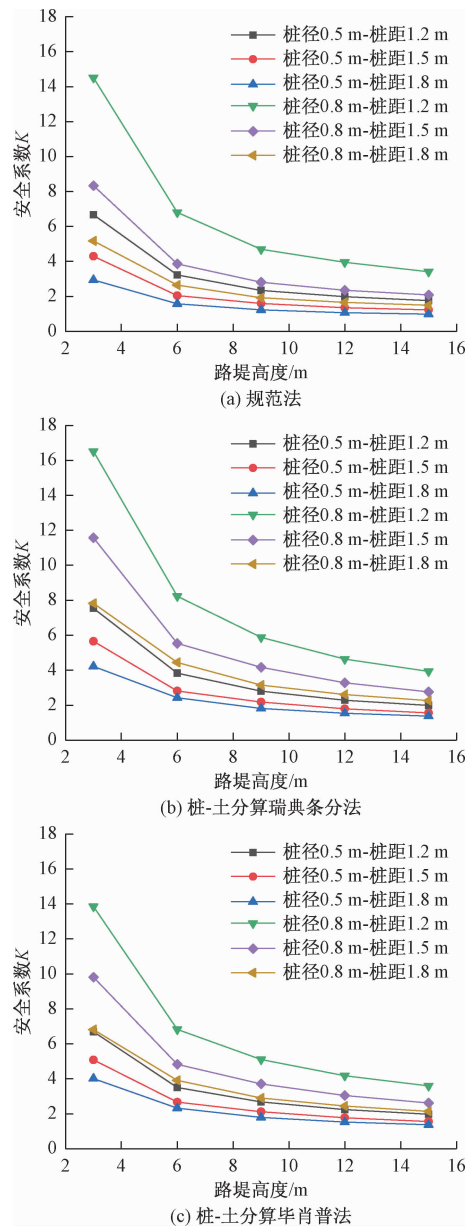


图 4 桩-土分算法与规范法分析所得路堤边坡稳定系数
Fig.4 Safety factor of embankment slope calculated based on new methods and specification method

参数,故小于实际的稳定系数值。

因此,桩-土分算法更加接近工程实际,而规范法则更偏保守。路堤边坡稳定系数计算结果表明,基于 3 种方法的稳定系数在边坡高度较高时均较为接近,此时差值也较小。

3.3 路堤边坡破坏特点分析

上述研究表明,采用桩-土分算法和规范法对同一路堤稳定性进行分析将获得不同稳定系数,同时,基于不同方法的路堤最不利滑面及其剪入剪出口也具有差异性。图 7 为不同方法分析的路堤最不利滑面位置,

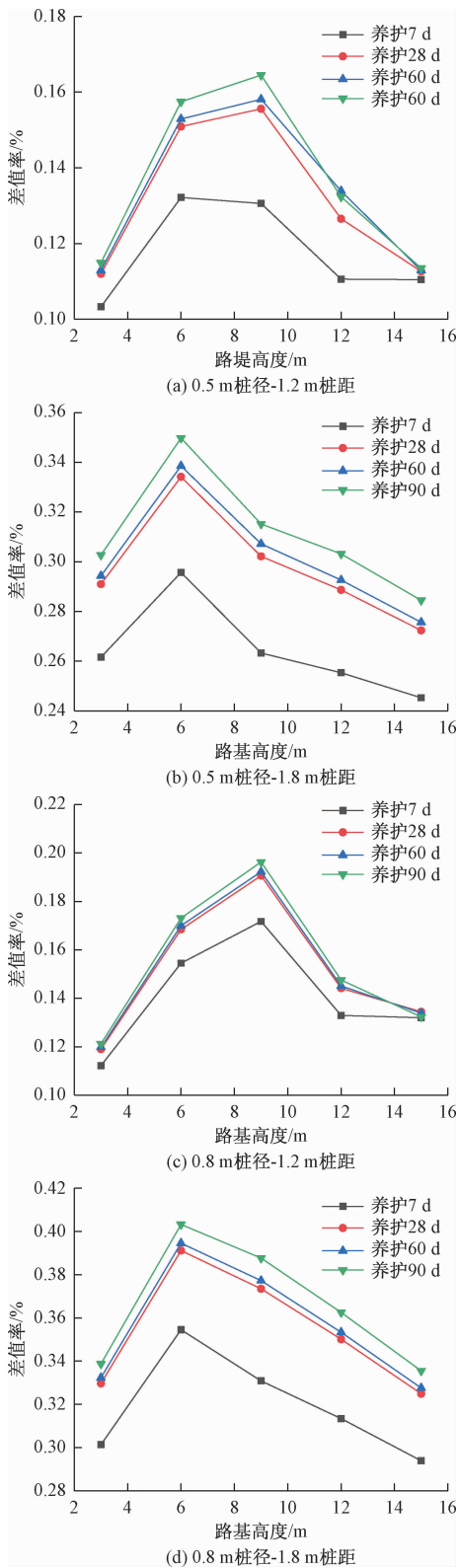


图 5 桩-土分算瑞典条分法与规范法的路堤稳定系数差值率
随路堤高度、加固桩径和桩距变化规律
Fig.5 Law of difference in the safety factor of the new Swedish arc method and the standard method varies with the height of the roadbed, the pile diameter and the pile distance

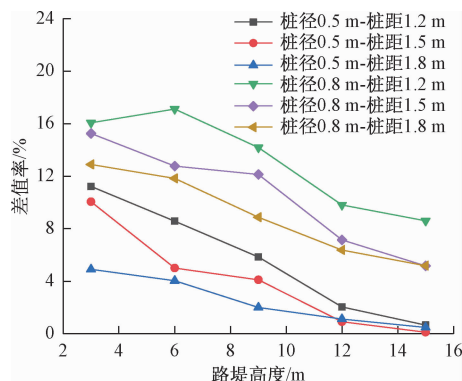


图6 桩-土分算瑞典条分法与桩-土分算毕肖普法所求稳定系数差值率

Fig.6 Safety factor difference rate of the Bishop's method and the Swedish arc method

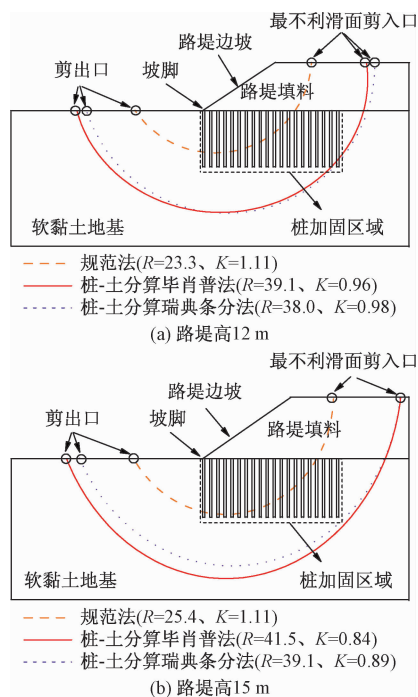


图7 三种方法下的路堤最不利滑面随路堤高度变化规律

Fig.7 Variation in the most unfavorable slip surface of the embankment under different methods with the height of the embankment

其中,加固桩为7%水泥含量的水泥土搅拌桩,养护龄期为90 d,桩径为0.5 m,桩间距1.5 m。

当路堤高度为12 m时(图7a),基于规范法求得的路堤最不利滑面穿过路堤加固区域中部,滑面半径及稳定系数与9 m高路堤相同,剪入剪出口位置没有较大变化;而基于桩-土分算的毕肖普和瑞典条分法分析得最不利滑面均出现在加固桩最右侧桩底部,剪入口在最右侧加固桩的右边,剪出口位于路堤坡脚较远

处。当路堤高度继续增加到15 m时(图7b),3种方法分析的最不利滑面位置与路堤高度为12 m时相同,但滑面半径增大1~3 m。因此,最不利滑面剪入口均向路堤右侧移动,而路堤剪出口向远离路堤坡脚方向移动。

采用桩-土分算法对本文其他案例进行分析表明,最不利滑面位置主要受路堤高度影响。桩-土分算瑞典条分法分析结果表明,当路堤高度为9~15 m时,最不利滑面将出现在桩加固区底部,而路堤高度较低的情况下则不会出现这种情况。而桩-土分算毕肖普法分析结果表明,最不利滑面出现在桩加固区底部的情况同样是在路堤高度较高(12 m和15 m)的情况下,即最不利滑面位置出现了“下移”现象,并且加固后的边坡整体仍然存在不稳定性。

从计算原理分析,由于规范法是将加固桩与桩间土复合成一个整体,进而分析地基整体稳定性,所以路堤边坡最不利滑面始终在路堤中部。而桩-土分算法考虑了加固桩桩体的抗剪强度,所以在桩加固区域,路堤边坡稳定性较好,不会出现最不利滑面。如图7所示,随路堤高度增加,桩-土分算法分析所得最不利滑面始终位于加固桩桩体底端以下区域。

4 结论

(1)在桩径及桩距相同时,桩-土分算瑞典条分法与规范法计算所得边坡稳定系数均随坡高增大而减小;在桩距和坡高相同时,则随桩径增大而增大。两者差值率随坡高增大而先减小后增大,呈抛物线形变化。

(2)桩-土分算毕肖普法计算所得稳定系数小于桩-土分算瑞典条分法稳定系数,差值率随边坡高度增加而减小,近似线性变化,差值率在0%~18%范围内。

(3)与规范法求得最小稳定系数圆弧滑面不同,在路堤高度较高的情况下,桩-土分算法分析所得不利圆弧滑面绕开了柔性桩加固区,位于加固区底部而出现了“下移”现象,且加固后的边坡仍然存在不稳定性。

参考文献(References):

- [1] 刘燕燕,李修磊,冯明珠.土质边坡失稳破坏的双安全系数稳定性分析方法[J].公路工程,2019,44(4):118-123.[LIU Y Y, LI X L, FENG M Z. Stability analysis method for double safety factors of soil slope failure[J]. Highway Engineering, 2019, 44

- (4): 118 - 123. (in Chinese)]
- [2] 王根龙,伍法权,张军慧,等. 变形体条件的土质边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(增刊2): 193 - 196. [WANG G L, WU F Q, ZHANG J H, et al. Analysis on the stability of soil slope with deformation condition [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 2007, 15(Sup 2): 193 - 196. (in Chinese)]
- [3] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381 - 3388. [ZHENG Y R, ZHAO S Y. Application of strength reduction fem in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381 - 3388. (in Chinese)]
- [4] 郑颖人. 岩土数值极限分析方法的发展与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1297 - 1316. [ZHENG Y R. Development and application of numerical limit analysis for geological materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1297 - 1316. (in Chinese)]
- [5] 向钰周, 郑颖人, 阿比尔的, 等. 加筋土破坏面的模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 2977 - 2982. [XIANG Y Z, ZHENG Y R, ABI Erdi, et al. Model test and numerical simulation of reinforced soil failure surface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 2977 - 2982. (in Chinese)]
- [6] 王江营, 文世新, 曹文贵, 等. 塑性极限分析上限法在边坡安全系数求解中的应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(5): 42 - 46. [WANG J Y, WEN S X, CAO W G, et al. Application of plastic limit analysis upper bound method on the calculation of safety factor on slope [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2009, 6(5): 42 - 46. (in Chinese)]
- [7] 王根龙, 伍法权, 李巨文. 岩质边坡稳定塑性极限分析方法——斜分条法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1767 - 1771. [WANG G L, WU F Q, LI J W. Rock slope stability analysis based on plasticity limit theory—method of slices with inclined interfaces [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1767 - 1771. (in Chinese)]
- [8] 陈子玉, 宋彦辉, 严豪, 等. 双参数强度折减法研究中存在的问题分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 125 - 132. [CHEN Z Y, SONG Y H, YAN H, et al. Analyses of the existing problems in the double parameters reduction method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(2): 125 - 132. (in Chinese)]
- [9] 陈新泽, 唐辉明, 杨有成, 等. 基于 FLAC3D 强度折减法滑坡三维稳定性研究——以三峡库区白果树古滑坡群为例[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(2): 24 - 29. [CHEN X Z, TANG H M, YANG Y C, et al. 3D analysis of landslide stability based on strength reduction FLAC3D; taking Baiguoshu paleo-landslide group in the Three Gorges Reservoir area as example [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(2): 24 - 29. (in Chinese)]
- [10] 闫明礼, 罗鹏飞, 佟建兴, 等. 复合地基面积置换率[J]. 工程勘察, 2014, 42(9): 30 - 35. [YAN M L, LUO P F, TONG J X, et al. Area replacement rate of composite foundation [J]. Engineering Investigation, 2014, 42(9): 30 - 35. (in Chinese)]
- [11] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. [GAO D Z. Soil mechanics and foundation engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese)]
- [12] 曾榕, 陈先华, 谢永健. 红粘土地区深层搅拌水泥土加固机理及应用[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(6): 46 - 48. [ZENG R, CHEN X H, XIE Y J. Reinforcement mechanism and application of deep mixing cement soil in red clay area [J]. West-China Exploration Engineering, 2006, 18(6): 46 - 48. (in Chinese)]

编辑: 张明霞