

文章编号: 1674—8247(2023)06—0046—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 06. 009

# 考虑筋材有效拉力的加筋土路堤稳定性分析方法

蒋楚生<sup>1</sup> 闫清卫<sup>2</sup> 陈廷君<sup>3</sup> 肖世国<sup>3</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031;

3. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

**摘要:**加筋土技术在铁路路基工程中的应用愈加广泛,而工程设计中拉筋最大有效拉力的取值尚存在不合理之处。本文针对拉筋有效拉力对路堤边坡稳定性的影响,建立了考虑不同位置拉筋最大拉力的加筋土路堤边坡稳定性分析方法。研究表明:(1)将由侧摩阻力与抗拉断力控制的拉筋所能提供的极限抗拉作用力与拉筋的破坏模式相关联,分别计算拉筋拉断和拔出破坏模式下的极限拉力,以确定不同位置拉筋可提供的最大有效拉力;(2)基于瑞典圆弧条分法,将拉筋作用作为附加抗滑力矩引入边坡稳定系数计算公式,给出了加筋土路堤稳定性分析方法,可编制 Microsoft Excel 计算表格,在实际工程中方便使用;(3)典型工程实例分析表明,本文方法与数值模拟得到的路堤边坡稳定系数误差在 5% 以内,提出的方法具有合理性与实际可操作性。

**关键词:**加筋土路堤;边坡稳定性;瑞典圆弧法;拉筋破坏模式;筋材有效拉力

中图分类号: U213. 1

文献标志码: A

## Stability Analysis Method of Reinforced Earth Embankment Slope Considering Effective Tensile Force of Reinforcements

JIANG Chusheng<sup>1</sup> YAN Qingwei<sup>2</sup> CHEN Tingjun<sup>3</sup> XIAO Shiguo<sup>3</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. MOE Key Laboratory of High-speed Railway

Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The reinforced soil technology is widely used in railway subgrade engineering, but it is still not reasonable for the determination of effective tensile force of reinforcements involved in the reinforced slope stability in practical design. In order to deal with the influences of the tension of reinforcements on the slope stability, an analysis method for the reinforced slope stability considering possible maximum tension of the reinforcements at various locations is proposed. The research results show that (1) The relationship between failure modes and maximum tension effect of the reinforcements controlled by side friction on their surfaces and ultimate pulling force of the materials are established to determine the possible maximum tension provided by the reinforcements. (2) Based on the Swedish slice method, the reinforcement action is introduced into the calculation formula of slope stability coefficient as an additional anti-sliding moment. So the stability analysis method of reinforced soil embankment is given and it can be carried easily out via Microsoft spreading sheets in the designs of practical engineering. (3) Analysis results of some typical engineering examples show the relative error between the proposed method and the stability coefficient of embankment slope obtained by numerical simulation is less than

收稿日期: 2023-01-06

作者简介: 蒋楚生(1964-),男,教授级高级工程师。

引文格式: 蒋楚生,闫清卫,陈廷君,等. 考虑筋材有效拉力的加筋土路堤稳定性分析方法[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 46-50.

JIANG Chusheng, YAN Qingwei, CHEN Tingjun, et al. Stability Analysis Method of Reinforced Earth Embankment Slope Considering Effective Tensile Force of Reinforcements [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 46-50.

5%, and the proposed method is reasonable and practical.

**Key words:** reinforced earth embankment; slope stability; Swedish circle method; reinforcement failure mode; effective tensile force of reinforcements

自1963年法国工程师 Henri Vidal 提出加筋的理论和分析计算方法以来<sup>[1-2]</sup>,具有加固效果明显、抗震性能好、圬工与占地少、适用范围广、经济效益显著等优点的加筋土结构被广泛应用于岩土边坡工程中<sup>[3]</sup>。目前关于边坡稳定性分析的研究已有很多<sup>[4-5]</sup>,但涉及加筋土边坡稳定性分析的方法尚不成熟<sup>[6-7]</sup>。有些学者曾从试验和数值模拟的角度研究了加筋土边坡稳定性问题。章为民<sup>[8]</sup>等通过离心试验对加筋土挡墙的破坏形式、加筋参数对墙体影响等进行了研究;高文华<sup>[9]</sup>等利用有限差分方法分析了土工格栅加固的边坡承载能力和稳定性;周世良<sup>[10]</sup>等经原位测试得出筋材拉力峰值特征;介玉新<sup>[11]</sup>等利用离心模型试验和有限元强度折减法对加筋土边坡进行分析,探讨了平台分级的影响。

在工程实践中有时将加筋结构等效为重力式挡墙,按重力墙的分析方法计算,该方法分析结果与实际情况可能存在较大差异。于是,有学者参考土质边坡稳定性分析方法,将拉筋拉力考虑为外力作用以分析加筋土边坡稳定性。然而,以上方法在稳定性分析中,对拉筋所提供的拉力均采用其极限拉断力,未考虑拉筋提供的最大拉力还受其表面侧摩阻力的影响。有鉴于此,本文针对加筋土路堤边坡,对拉筋所能提供的最大拉力予以充分考虑,在分析拉筋拉力产生原因的基础上,将拉筋的破坏模式引入到边坡稳定性分析中,以建立便于工程实际操作的加筋土路堤稳定性分析的合理方法。

## 1 理论分析

为简化计算,对加筋土路堤边坡稳定性问题的分析作如下假设:

- (1) 滑动面的剪出口为坡脚点。
- (2) 拉筋的拉力方向保持水平。
- (3) 拉筋的破坏模式分为两种,即筋材拉断破坏和从土体中拔出破坏。
- (4) 滑动面为圆弧面,计算稳定系数时采用瑞典圆弧法。

加筋土边坡稳定性分析模型如图1所示,滑动面圆心为  $O$  点,与坡脚的水平距离为  $x_0$ ,竖直距离为  $y_0$ ,圆弧半径为  $R$ ,坡顶有竖直向下的大小为  $q$  的均布荷载,边坡坡高  $H$ ,坡角为  $\beta$ ,长度为  $L_j$  的第  $j$  层拉筋的

拉力为  $T_j$ ,其与上一层拉筋的竖直距离为  $d_j$ ,与圆心的竖直距离为  $y_j$ 。采用瑞典圆弧法时任意第  $i$  个土条的受力模式如图2所示,其中  $W_i$ 、 $l_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\Delta x_i$  及  $Q_i$ 、 $N_i$  分别为第  $i$  块土条的重力、滑面长度、倾角和宽度以及滑面上的切向与法向作用力,条间力  $E_i$  与  $E_{i-1}$  大小相等且位于同一方向。

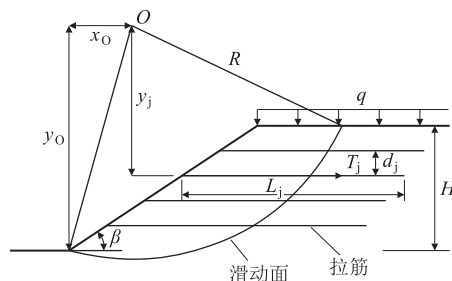


图1 加筋土边坡稳定性分析模型图

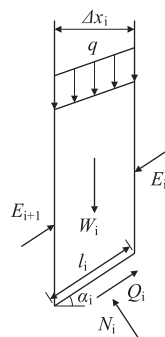


图2 瑞典圆弧法任意土条受力模式图

### 1.1 土体滑动力矩

滑动力矩包括潜在滑体自重及坡顶荷载产生的力矩。滑体自重产生的力矩是滑动土体的重力对滑动中心的力矩,坡顶均布荷载的力矩是坡顶后缘潜在滑体上的均布力对滑动中心的力矩。因此,采用对滑体的竖直线分法,可得滑动力矩:

$$M_s = \left( \sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \sum_{i=1}^m q \Delta x_i \sin \alpha_i \right) R \quad (1)$$

式中:  $M_s$ ——滑动力矩;

$n$ ——滑体条分的总数;

$M$ ——有坡顶荷载的条块数。

### 1.2 土体抗滑力矩

土体抗滑力矩即为滑面上的抗滑力产生的力矩,亦可采用对滑体的竖直线分法获得:

$$M_r = \sum_{i=1}^n (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) R$$

(2)

式中: $M_r$ ——土体抗滑力矩;  
 $c_i$ 、 $\varphi_i$ ——第*i*个条块滑面处的黏聚力和内摩擦角。

1.3 拉筋抗滑力矩

对于水平加筋的路基边坡,拉筋亦可提供抗滑力矩,可表示为:

$$\Delta M_r = \sum_{j=1}^k T_j \times y_j$$

(3)

式中: $\Delta M_r$ ——抗滑力矩;  
 $k$ ——加筋的总层数;  
 $y_j$ ——第*j*层拉筋拉力 $T_j$ 对滑体转动中心的力臂。

对于加筋土路基,根据拉筋与土体的相互作用特征,拉筋的破坏模式可分为两种,即拉筋材料的拉断破坏和拉筋从土体中拔出破坏。与这两种破坏模式相对应,拉筋产生的拉力分别为拉筋材料的极限拉断力与拉筋表面土体的最大侧摩阻力。拉筋对边坡土体所能提供的最大拉力为二者中的小值。

拉筋拔出土体时,可从稳定土体中或潜在滑体中拔出,但由于加筋土边坡通常在坡面附近有一定的构造性连接,因此拉筋的拔出破坏多表现为从稳定土体中拔出。此时需克服拉筋与土体之间的摩擦阻力,每一拉筋与土体之间有上下2个接触界面,设拉筋与土体之间的摩擦系数为 $\mu$ ,第*j*层拉筋在稳定土体中的长度为 $S_j$ ,第*j*层拉筋距坡顶深度为 $h_j$ ,则第*j*层拉筋拔出的极限拉力 $P_j$ 为:

$$P_j = 2\mu(\gamma \times h_j + q) S_j$$

(4)

第*j*层拉筋所能提供的最大拉力为:

$$T_j = \min \{ U_j, P_j \}$$

(5)

式中: $U_j$ ——第*j*层拉筋的极限拉断力。

将式(5)代入式(3)即可确定拉筋的抗滑力矩。

1.4 加筋土边坡稳定性

根据瑞典圆弧条分法,加筋土边坡的稳定系数为:

$$F_s = \frac{M_r + \Delta M_r}{M_s}$$

(6)

式中: $F_s$ ——加筋土边坡稳定系数。

将式(1)~式(3)代入式(6),即可得在任意圆弧滑面下的加筋土边坡的稳定系数。不断变化滑动中心位置,搜索确定最小稳定系数及其对应的滑面即为所求滑面。

因此,在实际工程设计中,可以不断调整拉筋的

层数、长度等参数,使计算得到的加筋土边坡的稳定系数达到相关规范要求,以实现优化设计。相关计算可以在 Microsoft Excel 中完成,方便工程应用。

2 工程实例

2.1 实例 1

选取某工程加筋土边坡实例,典型横断面如图 3 所示,边坡高度为 10.051 m,坡率 1 : 0.7,坡顶作用 20 kPa 的均布荷载;填土参数  $c = 0$ ,  $\varphi = 34^\circ$ ,  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ;筋材为抗拉强度是 90 kN/m 的单向土工格栅,筋材从上而下第 1~11 层的长度均为 6 m,第 12~16 层的长度均为 8 m,竖向间距均为 0.6 m,第 1 层筋材距坡顶面深度为 0.451 m,第 16 层筋材与坡底面竖向距离为 0.6 m。拉筋与土体之间的摩擦系数取土体内摩擦角正切值的 0.6 倍,即  $\mu = 0.4$ 。以坡脚为坐标原点。

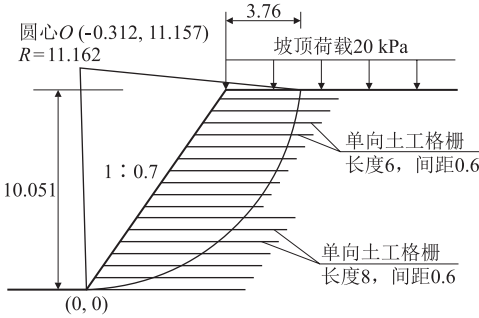


图 3 实例 1 加筋土路基的典型横断面图(m)

根据本文方法,经过搜索计算得到,圆弧滑面的圆心为(-0.312,11.157),半径  $R = 11.162 \text{ m}$ 。相应的土体抗滑与滑动力矩、拉筋抗滑力矩计算结果如表 1、表 2 所示。

表 1 实例 1 土体抗滑与滑动力矩表

条号 <i>i</i>	$W_i/\text{kN}$	$\alpha_i/(\text{ }^\circ)$	$l_i/\text{m}$	$M_{si}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{ri}/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1	38.04	76.20	3.15	412.32	41.31
2	72.49	63.72	1.70	725.48	191.52
3	92.28	55.91	1.34	853.06	325.99
4	107.25	49.50	1.16	910.30	450.90
5	119.29	43.85	1.04	922.47	566.08
6	123.38	38.29	1.12	853.36	729.10
7	112.36	32.73	1.05	678.11	711.64
8	99.26	27.50	0.99	511.60	662.89
9	84.40	22.51	0.95	360.65	587.00
10	67.97	17.70	0.92	230.66	487.51
11	50.13	13.01	0.90	125.96	367.72
12	30.96	8.41	0.89	50.54	230.59
13	10.53	3.86	0.88	7.91	79.07

通过式(6)可得此加筋土边坡稳定系数为 1.88。为检验本文方法计算结果的合理性,采用有限差分

表 2 实例 1 拉筋抗滑力矩表

层号 <i>j</i>	<i>S<sub>j</sub></i> /m	<i>h<sub>j</sub></i> /m	<i>T<sub>j</sub></i> /kN	<i>y<sub>j</sub></i> /m	$\Delta M_r$ /(kN·m)
1	1.98	0.45	45.96	1.56	71.56
2	1.66	1.05	54.51	2.16	117.57
3	1.38	1.65	58.39	2.76	160.97
4	1.13	2.25	58.64	3.36	196.86
5	0.92	2.85	56.42	3.96	223.24
6	0.74	3.45	52.93	4.56	241.22
7	0.61	4.05	49.57	5.16	255.65
8	0.53	4.65	47.91	5.76	275.83
9	0.50	5.25	49.80	6.36	316.57
10	0.52	5.85	57.45	6.96	399.68
11	0.62	6.45	73.69	7.56	556.86
12	2.79	7.05	90.00	8.16	734.13
13	3.07	7.65	90.00	8.76	788.13
14	3.49	8.25	90.00	9.36	842.13
15	4.11	8.85	90.00	9.96	896.13
16	5.11	9.45	90.00	10.56	950.13

值模拟软件 FLAC3D 对本例进行了分析共有 18 922 个节点,9 210 个实体单元。土体采用理想弹塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 强度准则,填土及土工格栅的物理力学参数如表 3 所示。通过强度折减法计算得到的边坡潜在滑面及其稳定系数如图 4 所示。可见,本文方法与数值模拟确定的滑面位置大致相同,而且数值模拟得到的边坡稳定系数为 1.85,本文方法的结果与之相差仅为 1.60%。

由表 2 可知,由于筋材的极限拉断力相对较大,第 1~11 层的拉筋拉力均未达到其材料极限拉力,即表明该部分拉筋提供的拉力由摩阻力控制。若不考虑这一因素,仍取筋材极限拉力计算分析,则将高估加筋土路基边坡的稳定性。

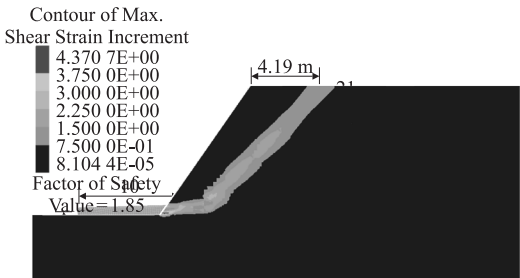


图 4 实例 1 稳定性分析的 FLAC3D 数值模拟结果图

2.2 实例 2

选取某工程加筋土边坡实例,典型横断面如图 5 所示,边坡高 5 m,坡度 70°,坡顶无荷载,填土参数  $c = 15 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 25^\circ$ ,  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ 。筋材竖向间距均为 0.5 m,自上而下第 1 层筋材与坡顶面竖向距离为 0.25 m,第 10 层筋材与坡底面竖向距离为 0.25 m,

表 3 实例 1 的主要物理力学参数表

参数	填土	土工格栅
弹性模量/MPa	50	200
泊松比	0.4	0.33
黏聚力/kPa	0	—
内摩擦角/(°)	34	—
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	2 000	—
极限拉力/(kN/m)	—	90

拉筋长度为 5~8 m。拉筋与土体之间的摩擦系数  $\mu = 0.35$ ,拉筋材料为金属条带,极限抗拉强度为 28.20 kN/m。

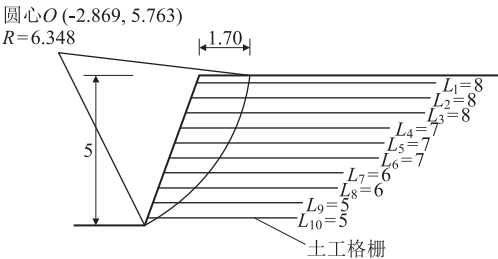


图 5 实例 2 加筋土边坡的典型横断面图(m)

采用本文方法,通过搜索计算得到土体抗滑与滑动力矩、拉筋抗滑力矩结果,从而得此加筋土边坡稳定系数为 3.15,如表 4、表 5 所示。

表 4 实例 2 土体抗滑与滑动力矩表

条号 <i>i</i>	<i>W<sub>i</sub></i> /kN	$\alpha_i$ /(°)	<i>l<sub>i</sub></i> /m	<i>M<sub>si</sub></i> /(kN·m)	<i>M<sub>ri</sub></i> /(kN·m)
1	0.32	81	0.51	1.99	48.35
2	1.50	76	0.52	9.21	50.14
3	3.25	72	0.53	19.62	53.03
4	5.94	67	0.54	34.72	58.60
5	9.57	62	0.57	53.65	67.22
6	14.29	57	0.60	76.06	79.80
7	21.05	51	0.64	103.87	100.49
8	26.99	45	0.71	121.14	123.82
9	23.56	39	0.79	94.11	129.84
10	11.89	31	0.97	38.88	122.61

同样,采用 FLAC3D 数值模拟软件对本例进行分析,共有 8 918 个节点,4 302 个实体单元。填土及土工格栅的物理力学参数如表 6 所示。数值模拟计算结果如图 6 所示,可见,本文方法与数值模拟所确定的滑面位置基本一致,而数值模拟得到的稳定系数为 3.06,本文方法与之仅相差 2.94%。

综上所述,除第 1 层拉筋拉力由摩阻力控制外,其余拉筋最大拉力均由筋材的极限拉断力控制,这是因为本例中筋材的极限拉断力相对较小。



表5 实例2拉筋抗滑力矩表

层号 <i>j</i>	<i>S<sub>j</sub></i> /m	<i>h<sub>j</sub></i> /m	<i>T<sub>j</sub></i> /kN	<i>y<sub>j</sub></i> /m	$\Delta M_{gj}/(kN\cdot m)$
1	6.24	0.25	17.49	1.01	17.71
2	6.16	0.75	28.20	1.51	42.67
3	6.13	1.25	28.20	2.01	56.77
4	5.13	1.75	28.20	2.51	70.87
5	5.19	2.25	28.20	3.01	84.97
6	5.3	2.75	28.20	3.51	99.07
7	4.48	3.25	28.20	4.01	113.17
8	4.76	3.75	28.20	4.51	127.27
9	4.13	4.25	28.20	5.01	141.37
10	4.67	4.75	28.20	5.51	155.47

表6 实例2的主要物理力学参数表

参数	填土	土工格栅
弹性模量/MPa	50	200
泊松比	0.4	0.33
黏聚力/kPa	15	—
内摩擦角/(°)	25	—
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 600	—
极限拉力/(kN/m)	—	28.2

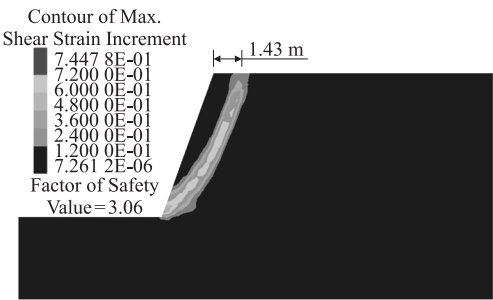


图6 实例2稳定性分析的FLAC3D数值模拟结果图

3 结论

本文将加筋土路堤边坡中的拉筋所能提供的极限抗拉作用力与拉筋的两种可能的破坏模式相关联,基于瑞典圆弧法,给出了一种合理考虑拉筋最大拉力的加筋土路堤边坡稳定性分析方法,得到主要结论如下:

- (1) 对于加筋土路基,拉筋存在筋材拉断和从土体中拔出两种破坏模式,与其对应的拉筋最大拉力分别为筋材极限拉断力与拉筋表面土体的最大侧摩阻力,不同位置的拉筋对边坡整体抗滑稳定性所能提供的最大拉力应取二者中的小值。若不加以区分,拉筋最大拉力均取为筋材的极限拉断力,将高估边坡稳定性,偏于不安全一面。
- (2) 可将拉筋可能提供的最大拉力产生的力矩作为附加抗滑力矩,计入边坡稳定系数计算公式中。实例分析表明,本文方法算得的稳定系数与FLAC3D数

值模拟结果相差在5%以内,两种方法得到的潜在最危险滑面位置基本一致。

参考文献:

[1] KOERNER R M, SOONG T Y. Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(6): 359 – 386.

[2] SCHLOSSER F, LONG N T. Recent Results of French Research on Reinforced Earth [J]. Journal of the Construction Division, 1974, 100(3): 223 – 237.

[3] 何光春,周世良. 加筋土技术的应用及进展[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(5): 11 – 15.  
HE Guangchun, ZHOU Shiliang. Application and Advancement of Reinforced Earth Technique [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(5): 11 – 15.

[4] CHEN Zuyu, MORGENSTERN N R. Extensions to the Generalized Method of Slices for Stability Analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(1): 104 – 119.

[5] DUNCAN J M. State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-element Analysis of Slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(7): 577 – 596.

[6] KERRY ROWE R, SKINNER G D. Numerical Analysis of Geosynthetic Reinforced Retaining Wall Constructed on a Layered Soil Foundation [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(7): 387 – 412.

[7] WU J T H, LEE K Z Z, PHAM T. Allowable Bearing Pressures of Bridge Sills on GRS Abutments with Flexible Facing [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(7): 830 – 841.

[8] 章为民,赖忠中,徐光明. 加筋挡土墙离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 84 – 91.  
ZHANG Weimin, LAI Zhongzhong, XU Guangming. Centrifuge Modelling of Geotextile-reinforced Cohesiveless Soil Retaining Walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 84 – 91.

[9] 高文华, Richard J. Bathurst. 条形荷载作用下加筋土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 374 – 380.  
GAO Wenhua, BATHURST R J. Stability Analysis of Reinforced Slope Loaded by a Strip Footing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 374 – 380.

[10] 周世良,何光春,汪承志,等. 台阶式加筋土挡墙模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 152 – 156.  
ZHOU Shiliang, HE Guangchun, WANG Chengzhi, et al. Study on Stepped Reinforced Soil Retaining Walls by Model Tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 152 – 156.

[11] 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.  
JIE Yuxin, ZHOU Shibo, GUO Zhenghao, et al. Centrifuge Model Tests and Strength Reduction Method for Influence of Bench Arrangement on Stability of Reinforced Slopes [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1178 – 1187.