

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.014

引用格式: 陈武. 软土地区反压护道合理断面设计[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 67-71.

Citation: CHEN Wu. Reasonable cross-sectional design of the back-pressure berm in soft soil areas [J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 67-71.

## 软土地区反压护道合理断面设计

陈武

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

**摘要:** 软土地区反压护道断面设计中常根据工程经验拟定若干个尺寸进行反复试算, 计算量大且易出现反压护道断面尺寸不够科学合理的问题。文中以洞庭湖平原某高速公路反压护道为例, 利用整体圆弧法稳定性分析原理推导将滑动面上内摩擦角  $\varphi$  的作用包含于黏聚力  $c$  中的“综合  $c$  法”, 并采用该方法分析反压护道的合理断面尺寸。结果表明, 反压护道高度一般为 40%~25% 路堤高度, 对应的反压护道宽度为 5~35 m; 绘制反压护道合理断面计算图, 其中不同内摩擦角对应的曲线接近平行, 当稳定系数  $F$  取 1.1 时, 内摩擦角  $1^\circ$  的作用大约相当于黏聚力 0.1 kPa 的作用, 可通过换算简化不同内摩擦角的线性内插, 与根据规范方法计算所得稳定系数对比, 稳定系数  $F$  取 1.1 较贴近实际工程。

**关键词:** 公路; 软土地区; 反压护道; 断面设计; 综合  $c$  法

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0067-05

在软土地区修建高速公路会遇到软土路基稳定性问题。软土地基在填方路基荷载作用下易发生失稳, 常采用反压护道的方式进行应急处置。反压护道设计的关键是确定科学合理的断面尺寸, 常根据工程经验取不同反压护道高度和宽度进行试算, 计算量大且存在一定盲目性。日本宫川早见在假定内摩擦角  $\varphi = 0^\circ$  的基础上, 采用整体圆弧法对软土地基进行了简化稳定性分析<sup>[1]</sup>。朱梅生在宫川早见简化稳定性分析的基础上对软土地区路堤合理断面选择方法进行了分析<sup>[2]</sup>。张玉成等对强度折减法与常用边坡稳定性分析方法进行对比, 验证了强度折减法对反压护道路堤和堤坝稳定性分析的适用性<sup>[3]</sup>。赵宁雨等考虑黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的共同作用, 提出了填方路堤反压护道断面设计解析方法<sup>[4]</sup>。文献[5-12]采用有限元方法和强度折减法对反压护道断面设计进行了研究。高速公路经过软土地基时, 常遇到地基条件以黏聚力为主、内摩擦角较小的情况(内摩擦角一般小于  $10^\circ$ )。本文针对这种情况, 结合地基强度参数, 参考文献[13-15], 采用整体圆弧滑动简化分析方法推导将滑动面上内摩擦角  $\varphi$  的作用包含于黏聚力  $c$  中的“综合  $c$  法”, 合理设计反压护道的断面尺寸, 并结合项目实际情况绘制反压护道合理断面计算图, 通过地基土参数直接查询

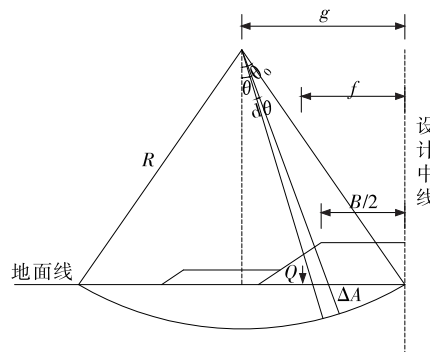
反压护道的合理断面尺寸。

### 1 简化稳定分析

#### 1.1 简化推导极限平衡方程

根据软土地基路堤失稳滑动的工程特点做如下假设: 1) 仅考虑软土地基的抗滑因素, 不考虑路基填筑本体; 2) 滑裂面始于路堤中线与地基交界处。

如图 1 所示, 软土地基上填土荷载在滑动面上的滑动力矩  $M$  为:



$g$  为路基中线到滑动面圆心的水平距离;  $f$  为路基中线到填土荷载重心的水平距离;  $R$  为滑动圆弧半径;  $\theta_0$  为滑动圆弧计算中心角  $\theta$  的一半;  $B$  为路基宽度;  $Q$  为软土地基上填土荷载;  $\Delta A$  为  $d\theta$  对应滑体微小单元面积

图 1 反压护道简化分析示意图

$$M = Q(g - f) \quad (1)$$

滑动面上抗滑力矩由黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  两部分提供。滑动面上黏聚力  $c$  提供的抗滑力矩  $M_1$  为:

$$M_1 = RcL = 2R^2\theta_0 c \quad (2)$$

式中:  $L$  为滑动圆弧长度。

$d\theta$  对应滑体微小单元面积  $\Delta A$  为:

$$\Delta A = \Delta A_1 - \Delta A_2 = \frac{1}{2}R^2 d\theta - \frac{1}{2}R^2 \frac{\cos^2\theta_0}{\cos^2\theta} d\theta \quad (3)$$

内摩擦角  $\varphi$  在微小单元面积  $\Delta A$  滑面上作用的抗滑力矩  $\Delta M_2$  为:

$$\Delta M_2 = \Delta A \gamma \cos\theta \tan\varphi = \frac{1}{2} \gamma \tan\varphi R^2 \left( \cos\theta - \frac{\cos^2\theta_0}{\cos\theta} \right) d\theta \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  为地基土的天然重度。

滑动面上内摩擦角  $\varphi$  提供的抗滑力矩  $M_2$  为  $\Delta M_2$  沿滑动面的积分, 即:

$$M_2 = 2 \int_0^{\theta_0} \frac{1}{2} \gamma \tan\varphi R^2 \left( \cos\theta - \frac{\cos^2\theta_0}{\cos\theta} \right) d\theta \quad (5)$$

将  $R = g/\sin\theta_0$  代入式(2)、式(5), 消除  $R$ , 得:

$$M_1 = g^2 \left( \frac{2\theta_0}{\sin^2\theta_0} \right) c \quad (6)$$

$$M_2 = g^2 \left[ \frac{\sin\theta_0 - \cos^2\theta_0 \ln\left(\frac{1+\sin\theta_0}{\cos\theta_0}\right)}{\sin^2\theta_0} \right] \gamma \tan\varphi \quad (7)$$

在极限平衡状态下,  $\sum M = 0$ , 即  $M = M_1 + M_2$ , 可得:

$$Q = \frac{g^2}{g-f} \left( \frac{2\theta_0}{\sin^2\theta_0} \right) c + \frac{g^2}{g-f} \cdot \left[ \frac{\sin\theta_0 - \cos^2\theta_0 \ln\left(\frac{1+\sin\theta_0}{\cos\theta_0}\right)}{\sin^2\theta_0} \right] \gamma \tan\varphi \quad (8)$$

## 1.2 滑动体特征分析

当  $Q$  为极小值时, 可求得最危险滑动面的位置。对式(8)中变量  $g$  求导,  $\partial Q/\partial g = 0$ , 得  $g = 2f$ 。最危险滑动面中心线的位置恒在  $g = 2f$  确定的线上。

对式(8)中变量  $\theta$  求导,  $\partial Q/\partial \theta = 0$ , 可求得最危险滑动面位置条件下滑弧角  $\theta_0$ :

$$(\tan\theta_0 - 2\theta_0)c + \left[ \ln\left(\frac{1+\sin\theta_0}{\cos\theta_0}\right) - \sin\theta_0 \right] \cdot \gamma \tan\varphi = 0 \quad (9)$$

将地基土参数  $\gamma$ 、 $c$ 、 $\varphi$  代入式(9), 即可得到滑

弧角  $\theta_0$ , 进而求得滑弧半径  $R$ 、荷载  $Q$  等。

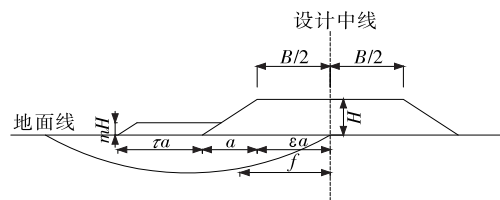
## 1.3 反压护道荷载确定

根据软土地基路堤失稳滑动的特点, 假设滑裂面始于路堤中线与地基交界处(见图2)。总荷载  $Q$  为反压护道填土荷载和半幅路堤填土荷载之和, 荷载重心的水平距离  $f$  为各部分形状的荷载对路堤中线的静矩和除以总荷载  $Q$ , 则:

$$Q = \left( \epsilon + \frac{1}{2} + \tau m \right) aP \quad (10)$$

$$f = \frac{\sum Q_i f_i}{Q} = \frac{\frac{1}{2} \frac{\epsilon^2 + \epsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m \left( \epsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m \right)}{\epsilon + \frac{1}{2} + \tau m} a}{a} \quad (11)$$

式中:  $\epsilon$ 、 $\tau$ 、 $m$ 、 $a$  如图2所示;  $P$  为路基的荷载强度,  $P = \gamma H$ 。



$m$  为反压护道高度系数;  $\tau$  为反压护道宽度系数;  $a$  为路基边坡的水平距离;  $\epsilon$  为路堤形状系数;  $H$  为路基填土高度

图2 反压护道荷载的简化分析示意图

将式(10)、式(11)和  $g = 2f$  代入式(8), 得到路堤中部荷载强度表达式:

$$P = \frac{2 \left[ \frac{2c\theta_0 + \gamma \tan\varphi \left[ \sin\theta_0 - \cos^2\theta_0 \ln\left(\frac{1+\sin\theta_0}{\cos\theta_0}\right) \right]}{\sin^2\theta_0} \right]}{\frac{\epsilon^2 + \epsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m \left( \epsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m \right)}{\left( \epsilon + \frac{1}{2} + \tau m \right)^2}} \quad (12)$$

## 1.4 基于“综合 c 法”的反压护道稳定系数计算

考虑到地基滑动面上抗滑力矩由  $c$  和  $\varphi$  共同提供, 采用将滑动面上内摩擦角  $\varphi$  的作用包含于黏聚力  $c$  中的“综合 c 法”, 用综合黏聚力  $c_d$  表示  $c$  和  $\varphi$  共同提供的抗滑力矩。根据文献[2], 对于带反压护道的路堤, 内摩擦角  $\varphi = 0$  时极限荷载为:

$$P = 5.52 \frac{\epsilon^2 + \epsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m \left( \epsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m \right)}{\left( \epsilon + \frac{1}{2} + \tau m \right)^2} c \quad (13)$$

综合黏聚力  $c_d$  为:

$$c_d = \frac{P_{\varphi \neq 0}}{P_{\varphi = 0}} c = \frac{2c\theta_0 + \gamma \tan \varphi \left[ \sin \theta_0 - \cos^2 \theta_0 \ln \left( \frac{1 + \sin \theta_0}{\cos \theta_0} \right) \right]}{2.76 \sin^2 \theta_0} \quad (14)$$

将稳定系数  $F$  定义为软土实际提供的强度  $c_0$  与要求的软土强度  $c_1$  的比值,即  $F = c_0/c_1$ ,则反压护道的稳定系数  $F$  为:

$$F = \frac{c_d}{c} = \frac{5.52 \frac{\epsilon^2 + \epsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m \left( \epsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m \right)}{\left( \epsilon + \frac{1}{2} + \tau m \right)^2} c_d}{P} \quad (15)$$

## 2 反压护道的合理断面分析

### 2.1 反压护道宽度变化对稳定系数的影响

假定反压护道高度( $m$  值)为定值,分析反压护道宽度( $\tau$  值)变化对稳定系数的影响:

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = 5.52m \frac{c_d}{P} \cdot \frac{[m^2 - 2m(\epsilon + 1) + 2\epsilon + 1]\tau - m \left( \epsilon + \frac{1}{2} \right) + \epsilon + \frac{1}{3}}{\left( \epsilon + \frac{1}{2} + \tau m \right)^3} \quad (16)$$

式中:  $\epsilon > 0; \tau > 0; 1 > m > 0; m^2 - 2m(\epsilon + 1) + 2\epsilon + 1 = (\epsilon + 1 - m)^2 - \epsilon^2 > 0; (\epsilon + 1/2 + \tau m)^3 > 0$ 。

反压护道高度系数  $m \leq 1/2$  时,  $-m(\epsilon + 1/2) + \epsilon + 1/3 > 0$ , 有  $\partial F/\partial \tau > 0, \partial^2 F/\partial \tau^2 > 0, F$  无极大值,即路基的稳定性随着反压护道宽度的增加而提高。

### 2.2 反压护道高度变化对稳定系数的影响

假定反压护道宽度( $\tau$  值)为定值,分析反压护道高度( $m$  值)变化对稳定系数的影响。 $\partial F/\partial m = 0$ , 即:

$$\left( \epsilon + \frac{1}{2} + \tau m \right) (2\tau\epsilon + 2\tau + \tau^2 - 2\tau m) - 2\tau \left( \epsilon^2 + \epsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m\epsilon + 2\tau m + \tau^2 m - \tau m^2 \right) = 0 \quad (17)$$

可得:

$$m = \frac{\left( \epsilon + \frac{1}{2} \right) \tau + \epsilon + \frac{1}{3}}{\tau^2 + 2\tau(\epsilon + 1) + 2\epsilon + 1} \quad (18)$$

$\partial^2 F/\partial m^2 < 0$  时,式(18)满足  $F$  达到极大值的条件,这时  $m$  和  $\tau$  的关系唯一合理。针对固定的反压护道宽度,均有唯一合理的反压护道高度与之对应,使得  $F$  值达到极大。当  $m$  值高于或低于式(18)的计算值时,稳定系数降低。当反压护道宽度( $\tau$  值)趋近于无穷大时,反压护道高度( $m$  值)趋近于零,研究的意义不大。当反压护道宽度( $\tau$  值)趋近于无穷小时,反压护道高度系数  $m = (\epsilon + 1/3)/(2\epsilon + 1)$ ,为形状系数的函数,且  $m$  的最大值不超过  $1/2$ 。代入公路路堤形状系数,分析得路堤反压护道高度系数  $m$  的取值范围为  $0.40 \sim 0.25$ ,即反压护道高度为  $40\% \sim 25\%$  路堤高度,对应反压护道宽度为  $5 \sim 35$  m。

### 2.3 反压护道的合理断面设计步骤

反压护道断面设计中,确定的参数通常有路基填土密度、路基荷载强度  $P$ 、路堤形状系数  $\epsilon$ 、地基土密度  $\gamma$ 、抗剪强度参数  $c$  和  $\varphi$ 、稳定系数  $F$ 。设计步骤如下:

(1) 将地基土参数  $\gamma, c, \varphi$  代入式(9),求得滑弧角  $\theta_0$ 。

(2) 将地基土参数  $\gamma, c, \varphi$  和滑弧角  $\theta_0$  代入式(14),求得综合黏聚力  $c_d$ 。

(3) 将路堤形状系数  $\epsilon$  代入式(18),确定反压护道高度系数  $m$  和宽度系数  $\tau$  的关系式。

(4) 将设计要求达到的稳定系数  $F$ 、路堤形状系数  $\epsilon$ 、荷载强度  $P$ 、综合黏聚力  $c_d$  代入式(15),联合式(18)确定的  $m$  和  $\tau$  关系式,求得  $m$  和  $\tau$ 。

(5) 求反压护道的合理断面尺寸,反压护道宽度  $l = \tau a$ ,反压护道高度  $h = mH$ 。

## 3 算例分析

### 3.1 工程概况

以湖南省某高速公路为例,采用上述方法进行反压护道断面设计。该高速公路位于洞庭湖平原

区,湖相及河湖相沉积盆地的软土分布广泛,其中 21 km 路段以填方形式通过软弱地基,填土高度为 3~8 m。

目前该高速公路已通车试运营,路堤两侧存在大量鱼塘,当地居民经常性地清理鱼塘,对路堤的稳定产生一定安全隐患。其他加固软土地基的方法已无法实施,而采用反压护道可提高路堤的安全储备,且施工方便、经济,是消除该高速公路路堤安全隐患的有效手段。图 3 为采用反压护道加固处置地基平面图。

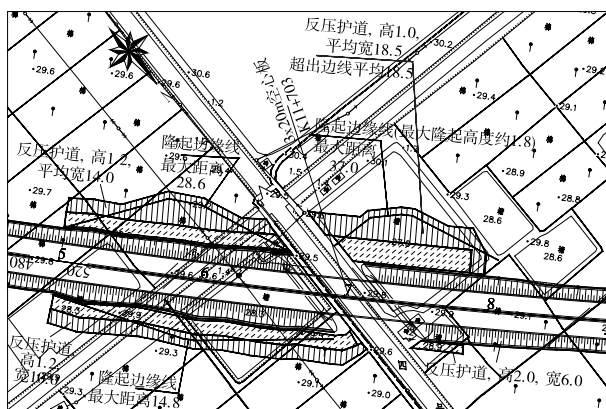


图 3 反压护道加固处置地基平面图(单位:m)

### 3.2 反压护道合理断面计算图

鉴于该项目设置反压护道的路段较多,计算工作量大,根据上述方法结合工程实际编制反压护道合理断面计算图(见图 4),通过地基土参数直接查询反压护道的合理断面尺寸。路基断面参数:路基宽度为 26 m,填高为 3~8 m,边坡坡比为 1:1.5。地基土重度  $\gamma$  为 18.8 kN,内摩擦角  $\varphi$  选取  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ ,内摩擦角根据实际情况选择线性内插。稳定系数  $F$  根据实际情况选择 1.00、1.05、1.10。

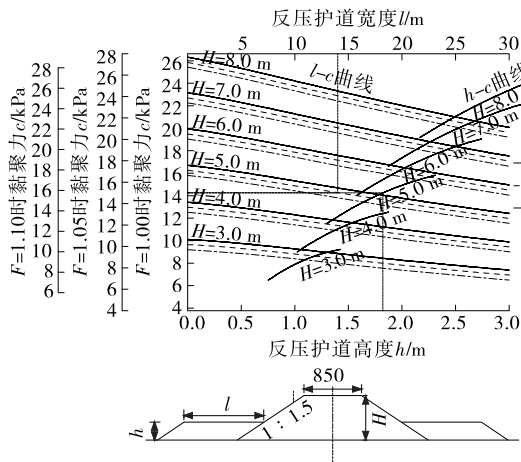


图 4 反压护道合理断面计算图

根据图 4,  $c=15$  kPa、 $\varphi=5^\circ$ 、 $H=5$  m、 $F=1.05$  时,反压护道宽度  $l=14.00$  m,高度  $h=1.82$  m。

在反压护道合理断面计算图中,不同内摩擦角对应的曲线接近平行,针对项目不同的内摩擦角可选择线性内插。选取稳定系数  $F=1.10$  时二组数据,对其反压护道合理断面尺寸进行对比,结果见表 1。由表 1 可知:稳定系数  $F$  取 1.10 时,内摩擦角  $1^\circ$  的作用大约相当于黏聚力 0.1 kPa 的作用,可通过换算简化不同内摩擦角的线性内插,大大提高计算效率。

表 1  $F=1.10$  时反压护道合理断面尺寸对比

组别	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	反压护道 宽度/m	反压护道 高度/m
一组	16.0	0	15.44	1.88
	15.5	5	15.49	1.78
	15.0	10	15.53	1.67
二组	12.0	0	21.52	1.35
	11.5	5	21.66	1.26
	11.0	10	21.72	1.18

### 3.3 反压护道稳定系数对比分析

针对反压护道稳定性验算,结合地质勘探资料中计算参数,将  $c=15$  kPa、 $\varphi=5^\circ$ 、 $H=5$  m 计算确定的反压护道合理断面尺寸,采用 JTG/T D31-02—2013《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》<sup>[14]</sup> 推荐的圆弧滑动法中有效固结应力法进行对比验算,结果见表 2。稳定系数计算图见图 5。由表 2 可知:规范计算的稳定系数与稳定系数取值呈线性关系;因简化稳定分析时未考虑路基填筑本体,同时假定滑裂面始于路堤中线与地基交界处,计算的稳定系数与采用规范方法计算的稳定系数存在差异;稳定系数  $F$  取 1.10 时,按规范计算的稳定系数  $F=$

表 2 稳定系数对比

稳定系数取 值 $F$	规范方法计算的 稳定系数 $F$	反压护道 宽度/m	反压护道 高度/m
1.00	1.11	9.22	2.02
1.05	1.17	14.00	1.82
1.10	1.24	18.55	1.67
1.15	1.31	22.97	1.54

注:稳定安全系数容许值为 1.20。

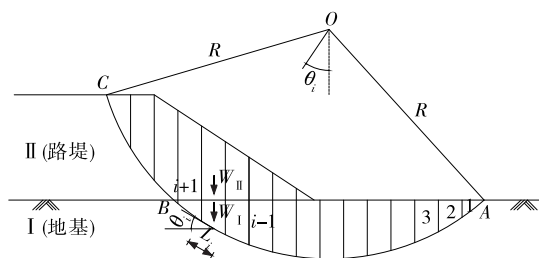


图 5 稳定系数计算示意图

1.24, 满足容许值(1.20)要求, 稳定系数  $F$  取 1.10 较贴近实际工程。

#### 4 结论

本文在工程实践经验和理论推导的基础上, 利用整体圆弧滑动简化分析方法推导将滑动面抗剪强度参数中内摩擦角  $\varphi$  作用包含于黏聚力  $c$  中的“综合  $c$  法”, 以更贴近工程实际条件。通过“综合  $c$  法”分析, 针对固定的反压护道宽度, 均有唯一合理的反压护道高度与之对应, 使稳定系数  $F$  值达到极大。当反压护道高度高于或低于计算的合理值时, 稳定系数降低。路堤反压护道高度一般为 40%~25% 路堤高度, 对应反压护道宽度为 5~35 m。

结合项目实际情况编制公路反压护道合理断面计算图, 通过计算图可根据路基土参数直接查出反压护道的合理断面尺寸, 大大缩减反复试算的工作量。结合反压护道合理断面计算图, 不同内摩擦角对应的曲线接近平行, 针对项目不同的内摩擦角可选择线性内插。稳定系数  $F$  取 1.10 时, 内摩擦角  $1^\circ$  的作用大约相当于黏聚力 0.1 kPa 的作用, 可通过换算简化不同内摩擦角的线性内插, 大大提高计算效率。

参考采用规范方法计算的稳定系数, 稳定系数  $F$  取 1.10 较贴近实际工程。

#### 参考文献:

- [1] MIYAKAWA I. Some aspects of road construction over peaty or marshy areas in Hokkaido with particular re-

ference to filling methods[J]. Soils and Foundations, 1960, 33(4): 99-107.

- [2] 朱梅生. 软土地区路堤合理断面之选择[J]. 土木工程学报, 1964, 11(2): 48-60.
- [3] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 在软土地基上有反压护道路堤及堤坝的稳定计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 844-848.
- [4] 赵宁雨, 梁波, 黄锋, 等. 一种填方路堤反压护道断面设计的解析方法研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2914-2920.
- [5] 陈金锋, 宋二祥. 西南山区机场高填方边坡反压护道优化设计[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 85-91+97.
- [6] 蒋鑫, 邱延峻, 魏永幸. 基于强度折减法的斜坡软弱地基填方工程特性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 622-627.
- [7] 薛雷, 孙强, 秦四清, 等. 非均质边坡强度折减法折减范围研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 275-280.
- [8] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
- [9] 吕陈伏. 软基填方路堤的稳定性及其反压护道断面尺寸优化[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [10] 李建国, 王珣. 路基承载力与路堤稳定性及沉降关系研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(5): 12-15+67.
- [11] 张书生, 吴志高. 反压护道在地方一级公路中的应用[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 26-28+36.
- [12] 刘展瑞, 张潭, 罗克文, 等. 基于沉降实测数据的软土地基土工参数优化计算[J]. 公路与汽运, 2021(6): 88-91+94.
- [13] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路软土地基路堤设计与施工技术细则: JTG/T D31-02—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [15] 重庆市城乡建设委员会. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

收稿日期: 2023-07-05

\*\*\*\*\*  
(上接第 66 页)

- [7] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路滑坡防治设计规范: JTG/T 3334—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [8] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股

份有限公司, 2015.

- [9] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

收稿日期: 2023-06-16