第 15 卷　第 22 期　2015 年 8 月
1671—1815(2015)22-0079-04

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 15　No. 22　Aug. 2015
ⓒ　2015　Sci. Tech. Engrg.

交通运输

软弱地基路堤的反压护道设计方法研究

赵宁雨[1,2]　吴志伟[1]　唐冉松[1]　董天雄[1]

（重庆交通大学土木建筑学院[1]；山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地[2]，重庆 400074）

摘　要　针对软弱地基内摩擦角非零条件下的高速公路软土路堤稳定性问题，采用圆弧滑动稳定性分析方法，在工程中具有确定的地基岩土参数的情况下，推导了同时考虑 c 和 φ 提供抗滑力矩时的合理反压护道宽度和高度的简化计算方法。对比了考虑和不考虑内摩擦角影响的护道断面尺寸的差异，并对其滑动面特征进行了对比分析。结果表明综合考虑 c 和 φ 的分析方法更接近大部分软弱地基的实际情况，是一种实用的简化分析方法。

关键词　反压护道　　填方路堤　　软弱地基　　简化分析

中图法分类号　U416.1；　　**文献标志码**　A

公路建设中通过工程性质较差的软土地区是工程中常遇到的问题。由于软弱基地基承载力低，在填方路堤荷载的作用下容易发生稳定事故，成为软土路基工程中的重要课题之一。反压护道方法作为一种在填方路堤通过软弱地基或路堤地基处理失败时提高路堤稳定性的方法，在路堤填方工程有着广泛的应用。

反压护道方法中的核心问题是如何合理地确定护道的截面尺寸，即护道宽度和高度，使得该尺寸能在占用土地面积、节约反压土方量和获得合理的安全系数之间取得最优的平衡。这方面研究较早的资料是朱梅生[1]在假设内摩擦角 φ 为零的基础上不考虑软基上填土体本身的滑动力和抗滑力的条件下，采用整体圆弧滑动法对软土地基的稳定性进行的分析。陈金锋等[2]针对有限厚度软土层上的填方边坡的反压护道问题，采用三折线滑动体的郎肯方法进行了稳定性分析。而对于广泛存在的非零 φ 软弱地基上的高填方路堤的稳定性问题，相关解析方法研究还较少见到。

针对深厚非零 φ 软土地基上的反压护道问题，在简单圆弧分析方法的基础上，增加内摩擦角 φ 的影响因素，建立了适用于非零 φ 软土路堤合理护道截面尺寸的方法，然后对所采用的方法对护道高度和宽度等特征进行了理论分析，并通过工程实例验证了该改进方法对非零 φ 值软土的适用性。

2014 年 12 月 9 日收到　　国家自然科学基金(5117849)，重庆市教育科学技术研究项目(KJ1400303)和重庆市自然科学基金(cstc2013jcyjA30019)资助

第一作者简介：赵宁雨(1981—)，男，四川南充人，博士，讲师。E-mail：zny2008@163.com。

1　路堤圆弧滑动条件下极限平衡方程的推导

针对软弱地基上路堤的稳定性问题利用极限平衡的思想，并根据工程中路堤滑动的工程经验特点[2—5]，作如下两点假设：① 路堤填土本身的抗剪强度忽略不计；②滑裂面起始于路堤中点的路堤对称轴处。如图 1 所示，对于路堤或路堤和反压护道的荷载，滑体上的总平衡关系有：$\sum M = 0$，滑动力矩

$$M_0 = Q(g - f) \tag{1}$$

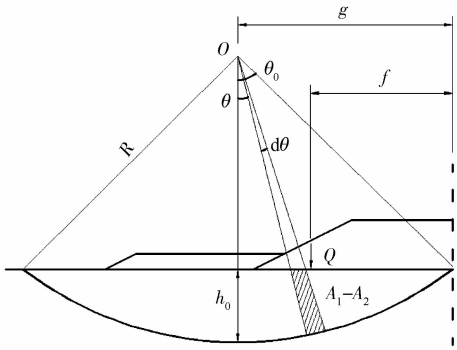

图 1　简化分析的圆弧滑面

Fig. 1　Circular sliding face of simplify analysis

抗滑力矩由两部分组成：①滑动面黏聚力 c 提供的抗滑力矩

$$M_1 = 2R^2\theta_0 c \tag{2}$$

②滑动上 φ 提供的抗滑力矩。取如图 1 所示一微元体进行分析，滑体内的面积可表示为

$$\Delta A_1 = \frac{1}{2}R^2 \mathrm{d}\theta\ ;$$

$$\Delta A_2 = \frac{1}{2}r^2 \mathrm{d}\theta = \frac{1}{2}R^2 \frac{\cos^2\theta_0}{\cos^2\theta}\mathrm{d}\theta;$$

面积：$\Delta A = \Delta A_1 - \Delta A_2 = \frac{1}{2}R^2\left(1 - \frac{\cos^2\theta_0}{\cos^2\theta}\right)\mathrm{d}\theta$。

重力在滑动面微段切向方向上的抗滑力矩为

$$M_2 = \frac{1}{2}\gamma\tan\varphi R^2\left(\cos\theta - \frac{\cos^2\theta_0}{\cos\theta}\right)\mathrm{d}\theta \tag{3}$$

积分 M_2

$$M_2 = 2\int_0^{\theta_0}\frac{1}{2}\gamma\tan\varphi R^2\left(\cos\theta - \frac{\cos^2\theta_0}{\cos\theta}\right)\mathrm{d}\theta \tag{4}$$

将关系 $R = \frac{g}{\sin\theta_0}$ 代入式(2)和式(4)的积分结果，则有

$$M_1 = g^2\left(\frac{2\theta_0}{\sin^2\theta_0}\right)C \tag{5}$$

$$M_2 = g^2\left[\frac{\sin\theta_0 - \cos^2\theta_0\ln(\sec\theta_0 + \tan\theta_0)}{\sin^2\theta_0}\right]\gamma\tan\varphi \tag{6}$$

由 $M_0 = M_1 + M_2$，表示为路堤荷载的形式：

$$Q = \frac{g^2}{g-f}\left(\frac{2\theta_0}{\sin^2\theta_0}\right)c + \frac{g^2}{g-f}\times \left[\frac{\sin\theta_0 - \cos^2\theta_0\ln(\sec\theta_0 + \tan\theta_0)}{\sin^2\theta_0}\right]\gamma\tan\varphi \tag{7}$$

式(7)即为同时考虑软弱地基抗剪强度 C 和 φ 情况下的极限平衡关系。从式中可以看出分别由 C 和 φ 确定的抗剪强度在形式上具有一致性。在未知地基土材料参数条件下展开对式(7)的讨论将是复杂的。对于工程中的应用，在已知地基土参数的情况下利用式(7)的平衡条件进行简化分析是方便的。

2 基于确定地层参数的工程简化分析

2.1 工程概况

洪雅高速 K7+300～K7+410 段里程为一填方形式通过的软弱地基路堤工程。当施工到路面设计高程时(约 6.0 m)时，路堤中线附近开裂，右侧已填筑路基下沉约 45 cm，现场勘测结果显示路基基础已产生圆弧滑动破坏。如图 2 所示。

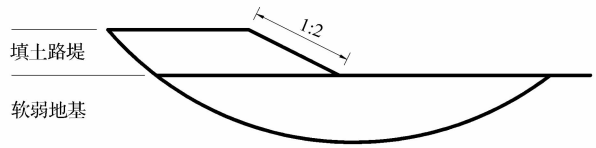

图 2 路堤滑动圆弧面勘察结果

Fig. 2 Survey results of embankments circular sliding face

根据室内试验成果和滑动路堤的反演分析，滑带土的抗剪强度指标和物理力学参数如表 1 所示。

表 1 滑带土抗剪强度参数综合取值表

Table 1 Shear strength parameters integrated value table of slip zone soil

岩土名称	状态	天然重度/(kN·m^{-3})	内聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
填 土	稍密	19.5	26.0	25.2
地基土	软塑	18	20.0	11

2.2 确定强度参数的软弱地基简化分析

2.2.1 滑动体特征分析

对式(7)，由 $\frac{\partial Q}{\partial g} = 0$ 求在荷载 Q 取得最大值时的 g 所满足的条件，得：$g = 2f$。将其代入式(7)，化简后得到

$$Q = 8\left(\frac{\theta_0}{\sin^2\theta_0}\right)cf + 4\left[\frac{\sin\theta_0 - \cos^2\theta_0\ln(\sec\theta_0 + \tan\theta_0)}{\sin^2\theta_0}\right]\gamma f\tan\varphi \tag{8}$$

将通过综合分析得到的地基土体参数代入式(8)，并由 $\frac{\partial Q}{\partial \theta_0} = 0$ 求得在荷载 Q 取得最大值时的 g 所满足的条件，得

$$40\tan\theta_0 + 7\ln(\sec\theta_0 + \tan\theta_0) = 80\theta_0 + 7\sin\theta_0,$$

可解得：$\theta_0 \approx 65.26°$。进一步可以确定滑体的特征：

$$\begin{cases} ①圆心：g = 2f,\ \theta_0 = 65.26°确定的点 \\ ②圆弧半径：R = \frac{g}{\sin\theta_0} = 2.2f \\ ③切入地基深度：h_0 = 1.163f \\ ④荷载：Q = 11.04fc + 3.12f\gamma\tan\varphi = 231.7f \end{cases} \tag{9}$$

2.2.2 反压护道荷载分析

如图 3 所示，可以求得在反压护道时的荷载和作用点位置表达式

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

$$f = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon^2 + \varepsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m\left(\varepsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m\right)}{\varepsilon + \frac{1}{2} + \tau m}a \tag{11}$$

代入式(9)得

$$P = 115.85\frac{\varepsilon^2 + \varepsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m\left(\varepsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m\right)}{\left(\varepsilon + \frac{1}{2} + \tau m\right)^2} \tag{12}$$

上式中存在以下条件:$\varepsilon > 0$,$\tau > 0$,$1 > m > 0$ 。

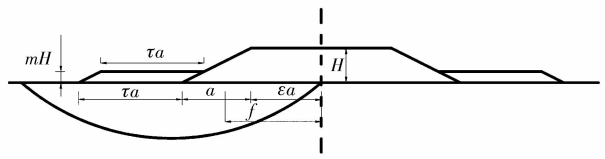

图 3　带反压护道时的路堤荷载简化分析

Fig. 3　Load simplified analysis of embankment with loading berm

2.2.3　基于等效黏聚力的安全系数的定义

在式(9)中,当忽略内摩擦角作用,而只考虑黏聚力 C 值的作用,则式(9)变为

$$Q = 11.04fc \tag{13}$$

将式(10)和式(11)代入式(13)可得:

$$P = 5.52\frac{\varepsilon^2 + \varepsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m\left(\varepsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m\right)}{\left(\varepsilon + \frac{1}{2} + \tau m\right)^2}c \tag{14}$$

式(14)便是朱梅生[1]只考虑黏聚力时的反压护道荷载最终表达式。考虑软体地基中滑动面上的抗滑力矩,在 φ 值不为零的情况下,有两部分组成。根据 φ 值在滑动面上提供抗滑力矩在式(7)中的表现形式与 c 值相同,故而提出等效黏聚力的概念 c' 值来描述有 c 和 φ 提供的抗滑力矩。对于确定的场地条件,c、φ、γ 将是确定的值,如定义安全系数为 $F = \frac{c'_0}{c'}$[6],其中 c'_0 为地基实际的等效黏聚力强度,c' 为要求达到一定安全系数时的地基黏聚力。因此,式(12)可写为等效黏聚力的形式:

$$P = 5.52\frac{\varepsilon^2 + \varepsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m\left(\varepsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m\right)}{\left(\varepsilon + \frac{1}{2} + \tau m\right)^2}c' \tag{15}$$

进而基于等效黏聚力的安全系数 F 可写为如下形式:

$$F = 5.52\frac{\varepsilon^2 + \varepsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m\left(\varepsilon + 1 + \frac{1}{2}\tau - \frac{1}{2}m\right)}{\left(\varepsilon + \frac{1}{2} + \tau m\right)^2}\frac{c'}{P} \tag{16}$$

工程算例参数计算可求得等效黏聚力 c'_0 = 20.99 kPa。在将 c 和 φ 共同作用转化为等效黏聚力作用后,关于反压护道合理断面尺寸问题的讨论可以采用只考虑黏聚力的方法进行。

2.2.4　反压护道断面尺寸的合理形式

在假定护道宽度 τ 为定值情况下(工程中常常受地形或征地条件限制),对护道高度变化时安全系数的最值条件进行分析。由 $\frac{\partial F}{\partial m} = 0$,得到:

$$\left(\varepsilon + \frac{1}{2} + \tau m\right)(2\tau\varepsilon + 2\tau + \tau^2 - 2m\tau) - 2\tau\left(\varepsilon^2 + \varepsilon + \frac{1}{3} + 2\tau m\varepsilon + 2\tau \mathrm{m} - \tau^2 m - \tau m2\right) = 0 。$$

上式化简后为:

$$m = \frac{\left(\varepsilon + \frac{1}{2}\right)\tau + \varepsilon + \frac{1}{3}}{\tau^2 + 2\tau(\varepsilon + 1) + 2\varepsilon + 1} \tag{17}$$

因为 $\frac{\partial^2 F}{\partial m^2} < 0$,$F$ 具有极大值,由此求得护道高度 m 和护道宽度 τ 的合理关系。在工程应用中可通过已知条件代入式(17)先确定 m 和 τ 的关系,再将式(17)代入式(15)即可求解出合理的 m 和 τ 值。

2.2.5　反压护道的简化设计方法的对比分析

对于算例工程中的已知条件:路堤高度 H = 6 m,坡率 1∶2,路堤顶宽为 12.25 m,则:ε = 1.02;安全系数取 1.2 时的等效黏聚力 c' = 17.49,不考虑汽车荷载影响。对于分别考虑和不考虑内摩擦角时,采用本文提出的简化计算方法进行反压护道断面的设计分析时。

(1)不考虑内摩擦影响时(φ = 0°),由式(17)求得 τ 和 m 的关系,再将其带入式(15),解得 τ = 1.82,m = 0.3,反压护道宽度为 $a\tau$ = 21.84 m,反压护道高度为 mH = 1.8 m。

(2)考虑地基土内摩擦角时(φ = 11°),由式(17)求得 τ 和 m 的关系,再将其带入式(15),求解得 τ = 1.4,m = 0.326;反压护道宽度为 $a\tau$ = 16.8 m,高度 mH = 1.96 m。

表 2　两种方案的对比

Table 2　compatition of designs

地基条件	反压高度/m	反压宽度/m	占地面积/[m^2·(100 m)$^{-1}$]	护道土方/[m^3·(100 m)$^{-1}$]
φ = 0°	1.80	21.84	2 184	3 931
φ = 11°	1.96	16.80	1 680	3 293

通过对比两种方案中考虑和不考虑地基土内摩擦角时的情况对比。从表 2 中可得以下结论。

(1)在获得相同的安全系数条件下,考虑内摩擦角影响的护道宽度为 16.8 m,高度为 1.96 m;不考虑时的护道宽度为 21.84 m 高度为 1.8 m。在有内摩擦角作用下,等效黏聚力虽然只增长了 5%,但护道占地面积和使用土方上都节省了 19.4%。考虑内摩擦角时护道高度只增加 0.16 m,即可使护道宽度减少 5.04 m,说明简化算法在优化护道断面尺

寸上具有良好的效果。

(2)在方案 2 中,分别不考虑和考虑内摩擦角和影响是的的滑体特征:中心至滑弧起点距离 f 分别为 15.77 m 和 14.35 m,滑体圆弧半径 R 分别为 37.67 m 和 34.73 m。说明不合理的断面尺寸,使得多余的护道荷载增大了地基的滑动范围。图 4 所示为方案二中两种情况的计算断面尺寸对比情况。

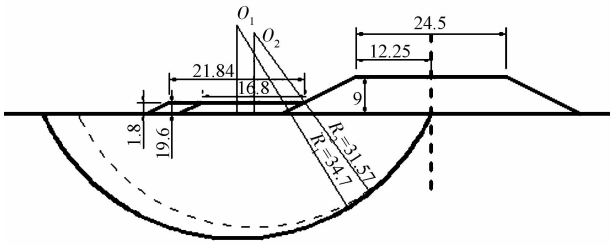

图 4 两种压护道形式的断面和滑动面比较

Fig. 4 Comparison analysis of embankment with loading berm

3 结论

(1)本文提出的考虑内摩擦角非零情况下的软弱地基上路堤的反应护道合理断面的设计方法适合于地基土内摩擦角非零地区的实际工程地质背景,并根据工程经验确定的滑动点起始于路堤中部的假设条件,更符合实际情况。

(2)结合工程场地地层参数的简化算法,通过定义等效黏聚力对内摩擦角对抗滑力矩的影响,在安全系数公式上进行简化分析的原理,使后续讨论更加简单。通过实际工程计算分析,表明了方法的优越性。

参 考 文 献

1 朱梅生. 软土地区路堤合理断面之选择. 土木工程学报,1964;11(2):48—60
Zhu Meisheng. Selection of reasonable cross-section of embankment in soft soil region. China Civil Engineering Journal, 1964; 11(2): 48—60

2 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. 工程力学, 2012; 29(6):85—97
Chen Jinfeng, Song Erxiang. Optimized design of loading berm for highfill slope of airport in mountainous area of southwest China. Engineering Mechanics, 2012; 29(6):85—97

3 沈细中,沈华中,刘隆斌,等. 基于遗传算法的堤坝反压优化设计. 长江科学院院报, 2003; 20(4): 35—38
Shen Xizhong, Shen Huazhong, Liu Longbin, *et al*. Optimizing anti-press design of dike and dam based on genetic algorithm. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003; 20(4): 35—38

4 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. 岩土力学, 2007;28(10):844—848
Zhang Yucheng, Yang Guanghua, Hu Haiying, *et al*. Stability study of embankment or dam with back berm on soft soil foundation. Rock and Soil Mechanics, 2007;28(10):844—848

5 四川蜀通岩土工程公司. 洪雅高速公路遂宁至资阳段 A 合同段 K7 +300 路基沉降工程地质勘察报告. 成都:四川蜀通岩土工程公司,2012
Sichuan Shutong Geotechnical Englneering Company. Hongya highway subgrade settlement engineering geological investigation report of a contract section k7 + 300 from Suining to Ziyang. Chengdu: Sichuan Shutong Geotechnical Englneering Company,2012

6 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算. 岩土工程学报, 1997;19(2): 1—7
Song Erxiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997;19(2): 1—7

Study on Design Method of Loading Berm for Embankment on Soft Subgrade

ZHAO Ning-yu[1,2], WU Zhi-wei[1], TANG Ran-song[1], DONG Tian-xiong[1]

(Civil Engineering School Chongqing Jiaotong University[1],

State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering[2], Chongqing 400074, P. R. China)

[**Abstract**] To probe the stability problem of highway embankment above soft soil foundation, where geotechnical parameters are available, based on the simple circular sliding stability analysis method, the simplified calculation method of reasonable loading berm width and height with considering c and φ to provide anti-slide torque is deduced; and the Strength Swedish slice method is used for contrastive analysis of the safety factor and sliding face. The results show: the analytical methods of synthetically considering c and φ is closer to the situation that the internal friction angle of soft subgrade is nonzero. the proposed method is a simplified applicable analysis method.

[**Key words**] loading berm embankment soft subgrade simplified analysis