

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.07.005

风化料包边填砂路堤边坡稳定性分析

李英勇¹, 刘树堂², 曹卫东²

(1. 山东省交通运输厅公路局, 山东 济南 250002; 2. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为研究风化料包边河砂填筑路堤的边坡稳定性, 基于强度折减法计算分析了填料压实度、含水率、路堤高度、边坡坡度及风化料包边宽度等诸多因素对边坡安全系数的影响规律。结果表明, 路堤高度确定时, 随着边坡坡度的增大, 路堤的边坡稳定性显著下降; 随着砂含水率的减小, 安全系数呈增大趋势。在文中涉及的工程条件下, 风化料包边宽度不对安全系数起决定性作用, 其宽度可依据施工压实要求和料源的丰足程度确定。方差分析表明, 边坡坡度、风化料包边宽度及填料含水率3个因素对边坡稳定性影响的程度依次为: 边坡坡度 > 含水率 > 风化料包边宽度。

关键词: 道路工程; 边坡稳定性; 强度折减法; 填砂路堤; 风化料包边

中图分类号: U416.1⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2013) 07-0025-05

Analysis of Stability of Sand-filled Embankment Slope Covered with Weathered Rock Material

LI Ying-yong¹, LIU Shu-tang², CAO Wei-dong²

(1. Highway Bureau of Shandong Provincial Department of Communications, Jinan Shandong 250002, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

Abstract: To study the slope stability of river sand embankment covered with weathered rock material, based on strength reduction method, the effect of many factors including compaction degree of filler, water content, height of embankment, slope gradient and thickness of weathered rock material cover layer on the embankment slope safety coefficient is analyzed. The results indicate that (1) when the embankment height is determined, the slope stability of embankment significantly decreases with the increase of slope gradient; (2) the safety coefficient increases with the decrease of water content of sand. The thickness of weathered material cover layer does not play a decisive role on the safety coefficient under the engineering condition involved in the paper, and the thickness can be determined according to the requirement of compaction and fullness of material sources. The result of variance analysis shows that the sequence of three influencing factors in terms of the influencing degree on the slope stability is slope gradient > water content of filler > thickness of weathered material cover layer.

Key words: road engineering; slope stability; strength reduction method; sand-filled embankment; weathered rock material cover layer

0 引言

高速公路建设不仅占用大量土地, 而且因路堤一般较高还消耗大量诸如粘土类的筑路材料, 充分利用沿线其它可替代材料填筑路基, 对于保护耕地

与土地资源节约化使用具有重要的现实意义。本文依托的青(州)—临(沭)高速公路途经临沂市的某段稻田区, 当地筑路用粘土资源匮乏, 但河砂与风化料资源相对丰富, 因此拟定该段路堤采用河砂填筑与风化料包边。与通常的填土路堤相比, 河砂

收稿日期: 2012-08-23

作者简介: 李英勇(1970-), 男, 山东德州人, 博士, 研究员。(leeyong@163.com)

路堤的边坡稳定性与防护是一个须特别重视的工程问题。国内学者虽然开展了一些高速公路填砂路基边坡稳定性分析的相关研究^[1-4]，但由于所用填料与包边材料的地域性差异和路基设计不同，已有的研究及工程经验不能照搬。为此，针对本路段路堤设计高度（6~10 m），深入研究风化料包边河砂填筑路堤的边坡稳定性是非常必要的。

关于边坡稳定性分析的方法有多种，但大致可分为极限平衡法和数值方法2种，其中最常用的是极限平衡法。极限平衡法需先假定边坡破坏滑动面的位置和形状，通过分析潜在滑动体的受力状态来对边坡的稳定性进行评价。对于均质土坡，可以通过各种优化方法来搜索危险滑动面，获得边坡的安全系数^[5-8]。极限平衡法有诸多优点，如它不需要初始条件等，但在某些情况下，在对边坡进行稳定分析的同时，还需了解边坡内部的应力应变状况，此时极限平衡法就无法满足这种要求。强度折减法是一种数值计算方法，该法既能计算边坡稳定性又能计算边坡内部的应力应变等，因此本文采用强度折减法研究风化料包边河砂填筑路堤的边坡稳定性。

1 强度折减法原理与材料参数确定

1.1 基本原理

所谓剪切强度折减法，就是在理想弹塑性有限元计算中将坡体的抗剪切强度参数以折减系数不断降低，直到系统达到不稳定状态，此时有限元静力计算不收敛，由此而获得的强度折减系数就是滑坡安全系数^[9]。

在计算过程中对坡体和滑动面的强度参数（黏聚力 c 和内摩擦角 φ ）逐步折减，如式（1）所示：

$$c' = \frac{c}{F}, \varphi' = \arctan \frac{\tan \varphi}{F}, \quad (1)$$

式中， c 、 c' 分别为折减前后的粘聚力； φ 、 φ' 分别为折减前后的内摩擦角； F 为折减系数，当系统达到不稳定状态时为安全系数。

1.2 材料参数的确定

除了路堤高度和边坡坡角等几何参数之外，有限元强度折减法还需粘聚力、内摩擦角、变形模量、泊松比、干密度和含水率等材料参数。本文涉及到的材料参数主要通过室内试验及相关的研究成果并经论证后确定。

1.2.1 河砂材料参数确定

依据文献 [10]，采用直剪试验测定河砂在不同干密度与不同含水率状态下的抗剪强度参数 c 、 φ

值。试验设计了5个含水率、5种干密度，共得到25种砂体试样，每个试样在不同压力水平（50、100、150、200、250、300及400 kPa）下进行直剪试验。图1是典型的直剪试验曲线（试样干密度 1.76 g/cm^3 ，含水率 5.8% ）结果之一，图2则是该砂样抗剪强度与竖向压力之间的关系曲线。

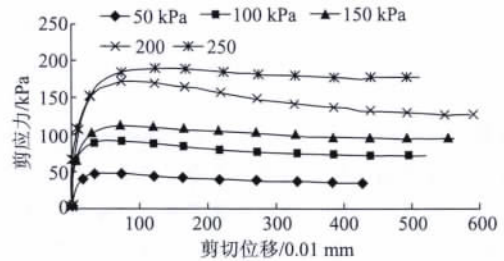


图1 河砂直剪试验剪切曲线

($\rho_d = 1.76 \text{ g/cm}^3$, $\omega = 5.8\%$)

Fig. 1 Curves of direct shear test of river sand

($\rho_d = 1.76 \text{ g/cm}^3$, $\omega = 5.8\%$)

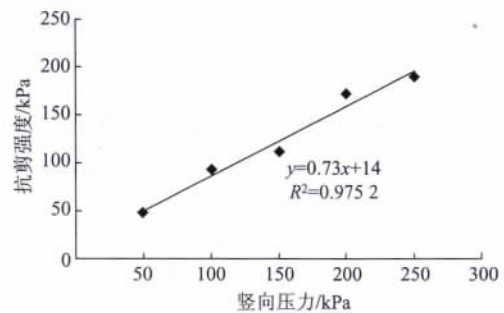


图2 河砂抗剪强度与竖向压力的关系曲线

Fig. 2 Relation between shear strength and vertical pressure of river sand

利用试验所获得的大量试验数据（限于篇幅，试验数据略），通过多元非线性回归分析，建立了砂体的抗剪强度与干密度、饱和度和竖向压力之间的统计关系式：

$$\tau = 36.6667 S_r (1 - S_r) + p \cdot (0.5011 \rho_d - 0.3256 S_r), \quad (2)$$

式中， τ 为抗剪强度； S_r 为饱和度； p 为竖向压力； ρ_d 为干密度。

式（2）复相关系数为0.99045，经过显著性检验，得知回归方程在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时是显著的，因此可据此关系式计算砂体在任意干密度、含水率和竖向荷载作用下的抗剪强度参数 c 和 φ ，即式（2）的+前半部分可用来计算粘聚力，+后括号内部分用来反算内摩擦角。

依据文献 [11] 给出的近似关系式（3）确定河砂的泊松比 μ ：

$$\mu = \frac{1}{2}(1 - \sin\phi), \quad (3)$$

根据工程经验, 土的泊松比一般在 0.3 ~ 0.4 之间, 仅在饱和粘土不排水条件下泊松比可能接近 0.5, 因此采用式 (3) 如所得的结果大于 0.4 时则取值为 0.4。

河砂的弹性模量参考文献 [12] 的成果确定, 建立了压缩模量与砂土相对密实度、细粒含量及含水率之间的统计关系:

$$E_s = 29.315 - 0.788W + 23.822D_r - 0.248 \times 0.598\omega, \quad (4)$$

式中, E_s 为压缩模量; W 为细粒含量, 即粒径小于 0.075 mm 颗粒质量百分比; D_r 为砂的相对密实度; ω 为砂样含水率。

变形模量与压缩模量具有式 (5) 所示的关系, 得到压缩模量后, 可按式 (5) 计算出河砂的变形模量; 计算边坡稳定性时利用变形模量来近似代替河砂的弹性模量:

$$E = E_s \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu}\right). \quad (5)$$

确定了河砂的弹性模量和泊松比后即可根据式 (6) 和式 (7) 确定计算所需的体积模量和剪切模量参数:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}, \quad (6)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (7)$$

1.2.2 风化石料参数确定

风化石料的抗剪强度参数与弹性模量通过常规三轴试验获得, 试验结果如表 1 所示。抗剪强度参数与弹性模量分别取表 1 中的平均值, 泊松比同样按照式 (3) 计算求得, 结果一并列于表 1 中。

表 1 风化石料三轴试验结果

Tab. 1 Result of triaxial test of weathered rock material

压实度/%	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	弹性模量/kPa	泊松比
94	25.09	121.94	776.9	0.29
96	19.95	161.87	858.6	0.33
98	21.92	170.08	939.4	0.31

2 边坡稳定性分析

2.1 计算模型

采用的路堤模型及有关参数如图 3 所示, 河砂作为路堤内部填料, 外部采用强风化石料包边, 根据地基地质情况, 地基土层分为 4 层。

2.2 计算方案与安全系数结果

本文主要研究风化石料包边宽度、边坡坡度及砂

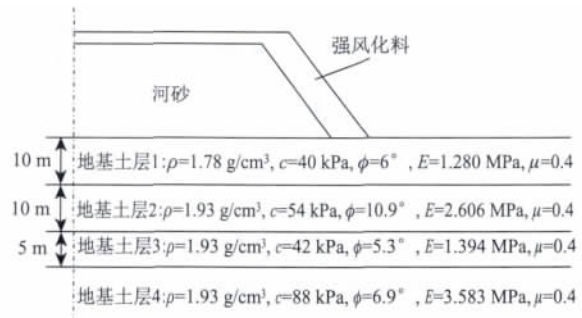


图 3 边坡稳定分析模型

Fig. 3 Slope stability analysis model

含水率等因素对边坡安全系数的影响规律, 如全面计算可能的方案将使计算工作量浩大。为减少计算工作量, 采用正交试验设计方法来安排计算方案, 拟定的因素及水平见表 2。另外对安全系数的计算, 还考虑了不同路堤高度、不同压实度的情况, 因此选用 5 因素 4 水平 $L_{16}(4^5)$ 正交表是适合的。采用的正交表及 FLAC 3D 计算的安全系数结果如表 3 所示。

表 2 影响因素及其水平

Tab. 2 Influencing factors and levels

影响因素		水平			
符号	因素名称	1	2	3	4
A	边坡坡度	1:1.75	1:1.5	1:1.25	1:1
B	风化石料包边宽度/m	1	2	3	4
C	河砂含水率/%	10	8	6	4

表 3 正交试验设计与计算结果

Tab. 3 Orthogonal test and calculation result

方案 编号	影响因素					安全系数					
	A	B	C	高度 10 m			高度 6 m				
				94%	96%	98%	94%	96%	98%		
1	1(1:1.75)	1(1)	1(10)	1	1.73	1.71	1.68	2.45	2.42	2.39	
2	1(1:1.75)	2(2)	2(8)	2	1.75	1.74	1.72	2.49	2.46	2.44	
3	1(1:1.75)	3(3)	3(6)	3	1.79	1.77	1.75	2.52	2.49	2.47	
4	1(1:1.75)	4(4)	4(4)	4	1.80	1.79	1.77	2.54	2.52	2.51	
5	2(1:1.5)	1(1)	2(3)	4	1.71	1.71	1.68	2.45	2.42	2.40	
6	2(1:1.5)	2(2)	1(4)	3	1.75	1.74	1.71	2.45	2.44	2.42	
7	2(1:1.5)	3(3)	4(10)	2	1.66	1.64	1.62	2.34	2.32	2.30	
8	2(1:1.5)	4(4)	3(2)	1	1.69	1.68	1.66	2.39	2.38	2.35	
9	3(1:1.25)	1(1)	3(4)	2	1.67	1.66	1.65	2.35	2.34	2.32	
10	3(1:1.25)	2(2)	4(3)	1	1.65	1.64	1.63	2.32	2.30	2.29	
11	3(1:1.25)	3(3)	1(2)	4	1.62	1.61	1.60	2.27	2.27	2.25	
12	3(1:1.25)	4(4)	2(10)	3	1.58	1.56	1.55	2.24	2.22	2.20	
13	4(1:1)	1(1)	4(2)	3	1.55	1.54	1.52	2.16	2.15	2.13	
14	4(1:1)	2(2)	3(10)	4	1.50	1.49	1.47	2.10	2.09	2.08	
15	4(1:1)	3(3)	2(4)	1	1.54	1.54	1.54	2.17	2.17	2.17	
16	4(1:1)	4(4)	1(3)	2	1.52	1.53	1.52	2.17	2.17	2.17	

2.3 安全系数结果分析

2.3.1 变化趋势分析

各因素水平对安全系数的影响趋势见图 4 (限于篇幅, 仅绘制路堤高度 10 m 情况, 高度 6 m 的类

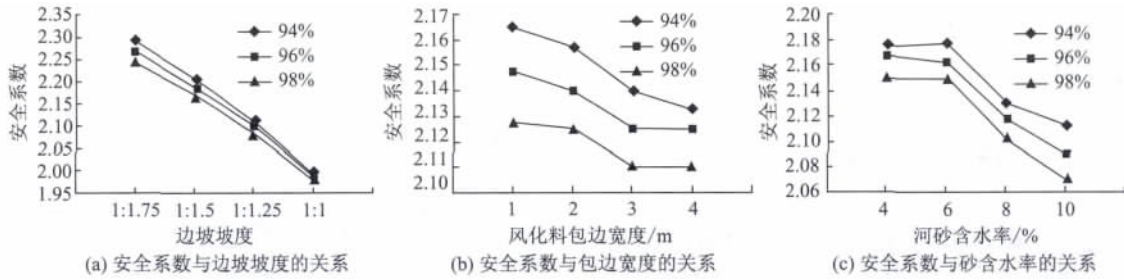


图4 安全系数与各因素水平的关系曲线

Fig. 4 Relation of safety coefficient with influencing factors and their levels

似), 图5是不同地基条件下潜在滑动面的形态(反映在FLAC 3D中,用剪切应变率的云图来表征)。

由图4可知:(1)在路堤高度确定的情况下,随着边坡坡度的加大,安全系数显著降低;(2)随着砂含水率的减小,安全系数增大,这主要是由于含水率降低增大了砂粒之间摩擦力从而提高了砂体抗剪强度的缘故;(3)随着风化料包边宽度的增大,安全系数却呈现缓慢减小趋势。这种现象与加大包边土宽度能提高路堤边坡安全系数的常规认识相悖。这是由于风化料的密度(2.15 g/cm³)大于砂的密度(1.78 g/cm³),而潜在滑动面切过地基(如图5(a)所示),因此风化料包边宽度加大即增大了滑动面以上破裂体的重力,从而加大滑移的可能性,致使边坡安全系数降低。(4)随着路堤压实度的提高,安全系数也呈下降趋势。这是因为尽管压实度的增加能提高路堤砂体的内摩擦角从而有利于安全系数的增大,但由于潜在滑动面切入地基,而较高的压实度加大了滑坡体重力;2种正反作用的综合结果增加了破坏的可能性。但不能因此说压实度越小越好,因为即使压实度较大时,边坡的安全系数仍较大,符合规范要求,而压实度提高显然有利于减少路堤本身的沉降变形。

则边坡安全系数随之增大。

2.3.2 方差分析

为考察边坡坡度A、风化料包边宽度B及填料含水率C对路堤边坡安全系数的影响程度,进行了方差分析,结果如表4所示。

表4 方差分析结果

Tab. 4 ANOVA result

路堤高度/m	压实度/%	F 值			显著性		
		A	B	C	A	B	C
10	94	3.6	0.023	0.31	*	—	—
	96	6.6	0.044	0.85	**	—	—
	98	11.2	0.018	1.81	***	—	—
6	94	7.7	0.044	0.62	**	—	—
	96	13.7	0.045	1.41	***	—	—
	98	24.1	0.040	3.19	***	—	*

注: $F_{0.10}(3,7) = 3.07$, $F_{0.05}(3,7) = 4.35$, $F_{0.01}(3,7) = 8.45$ * ** * 和 ‘—’ 分别表示高度显著、显著、一般显著和不显著。

由表4可知:(1)路堤高度为10 m时,随着压实度由低到高,路堤边坡坡度对边坡稳定性的影响分别为一般显著、显著与高度显著,而风化料包边宽度与填料含水率的影响作用不显著。(2)路堤高度为6 m时,路堤边坡坡度对边坡稳定性的影响尤为显著,而填料含水率仅当压实度达到98%时对安全系数有一般显著性影响。(3)3个因素的影响次序为:边坡坡度>含水率>风化料包边宽度。因此,从边坡稳定的角度考虑,选择适当的边坡坡度是最主要的工程措施。风化料包边宽度的变化对安全系数的影响较小,其设置主要起功能性作用,用来保护砂体边坡免受风吹和雨水的冲刷,因而宽度的确定主要是基于施工压实和料源丰足程度。

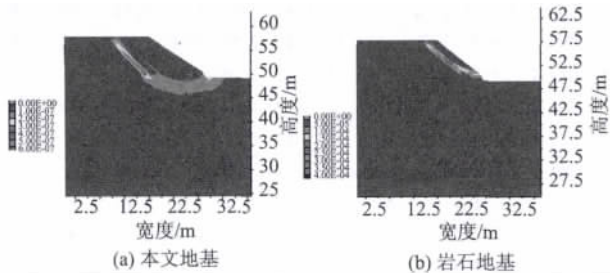


图5 不同地基条件下潜在滑动面的形态

Fig. 5 Forms of potential sliding surface under different subgrade conditions

当地基为岩石层时,潜在滑动面(如图5(b)所示)外移,滑弧通过坡脚,这时增大包边土宽度

3 结论

(1)建立了砂体的抗剪强度与干密度、饱和度

和竖直压力之间的统计关系式,可用于确定砂体在任意干密度、含水率和竖直荷载作用下的抗剪强度参数。

(2) 路堤高度确定时,随着边坡坡度的增大,路堤的边坡稳定性显著下降;随着砂含水率的减小,安全系数呈增大趋势。

(3) 由于包边风化料的密度大于填料砂的密度,且潜在滑动面切入地基,致使风化料包边宽度越大,边坡的稳定性反而越低。基于此,风化料包边宽度应基于施工压实的要求和料源丰足程度予以确定。

(4) 边坡坡度、风化料包边宽度及填料含水率3个因素对边坡稳定性影响的程度由大到小的次序为:边坡坡度>含水率>风化料包边宽度。因此适当的边坡设计是保证边坡稳定性的最重要的工程措施。

参考文献:

References:

- [1] 蒋鑫,凌建明,谭炜,等. 高速公路填砂路基边坡稳定性分析 [J]. 铁道工程学报, 2008 (9): 1-6.
JIANG Xin, LING Jian-ming, TAN Wei, et al. Slope Stability Analysis of Sand Embankment for Expressway Engineering [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008 (9): 1-6.
- [2] 谭炜,贾致荣,杨若冲. 包边填砂路基边坡稳定性计算方法研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (3): 38-42.
TAN Wei, JIA Zhi-rong, YANG Ruo-chong. Study on Stability of Sand-filled Embankment Slope with Cover Layer [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (3): 38-42.
- [3] 贾致荣. 包边填砂路基边坡稳定性分析 [J]. 铁道建筑, 2008 (5): 70-73.
JIA Zhi-rong. Study on Stability of Sand-filled Embankment Slope with Cover Layer [J]. Railway Engineering, 2008 (5): 70-73.
- [4] 蒋鑫,凌建明,李进. 高速公路填砂路基设计若干关键问题 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 6 (3): 570-575.
JIANG Xin, LING Jian-ming, LI Jin. Some Critical Problems on Sand Embankment Design for Expressway [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 6 (3): 570-575.
- [5] 邓学钧. 路基路面工程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
DENG Xue-jun. Subgrade-pavement Construction [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [6] 陈印东,刘叔灼. 基于强度折减法的边坡稳定性分析 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (24): 5938-5942.
CHEN Yin-dong, LIU Shu-shuo. Stability Analysis of Slope Based on Strength-reduction Method [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10 (24): 5938-5942.
- [7] 戴首平. 基于强度折减法的填方边坡稳定性分析 [J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2012 (3): 9-14.
DAI Shou-ping. Stability Analysis of Fill Slope Based on Shear Strengthen Reduction [J]. Journal of Lanzhou Polytechnic College, 2012 (3): 9-14.
- [8] 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 Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of Strength Reduction FEM in Soil and Rock Slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (19): 3381-3388.
- [9] 刘明维,郑颖人. 基于有限元强度折减法确定滑坡多滑动面方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (8): 1544-1549.
LIU Ming-wei, ZHENG Ying-ren. Determination Methods of Multi-slip Surfaces Landslide Based on Strength Reduction FEM [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (8): 1544-1549.
- [10] JTG E40—2007, 公路土工试验规程 [S].
JTG E40—2007, Test Methods of Soils for Highway Engineering [S].
- [11] 郑宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (5): 626-628.
ZHENG Hong, LI Chun-guang, LI Chao-fen, et al. Finite Element Method for Solving the Factor of Safety [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (5): 626-628.
- [12] 王玉锁,王明年,童建军,等. 砂类土体隧道围岩压缩模量的试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (6): 1607-1613.
WANG Yu-suo, WANG Ming-nian, TONG Jian-jun, et al. Test Research on Compression Modulus of Sandy Soil Tunnel Surrounding Rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (6): 1607-1613.