

· 地基与基础 ·



软基堆载水平滑动与软基挤出稳定分析*

刘吉福^{1,2,3,4}, 郑刚¹, 安关峰²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 广州市市政集团有限公司, 广东 广州 510060;

3. 中国铁建港航局集团有限公司, 广东 珠海 519070;

4. 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 511442)

摘要: 现有规范仅规定加筋地基进行水平滑动或软基挤出验算, 对水平滑动、软基挤出稳定分析方法假定的滑动体竖向界面位置通常与实际存在出入, 且不能考虑附加应力扩散的影响。为克服上述缺点, 水平滑动、软基挤出稳定分析时不限定滑动体竖向界面的位置, 采用Flamant解计算堆载在地基中产生的附加应力。分析表明, 软基上堆载需要同时进行圆弧滑动、水平滑动、软基挤出等破坏模式的稳定验算, 水平滑动、软基挤出最危险滑动体竖向界面不一定位于坡肩和坡脚。采用建议方法计算的水平滑动、软基挤出稳定安全系数通常与现有方法计算结果不同。

关键词: 水平滑动; 软基挤出; Flamant解; 朗肯土压力

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0184-06

Stability analysis of lateral slide and extrusion of fill on soft foundation

LIU Ji-fu^{1,2,3,4}, ZHENG Gang¹, AN Guan-feng²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Guangzhou Municipal Group Co., Ltd.,

Guangzhou 510060, China; 3. CRCC Harbour & Channel Engineering Group Co., Ltd., Zhuhai 519070, China;

4. CRCE Harbour & Channel Engineering Group Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: Stability analyses of lateral slide and soft foundation extrusion are required only in codes about application of geosynthetics. The practical location of vertical boundaries of sliding body always doesn't coincide with that postulated by present methods for stability analysis of lateral slide and soft foundation extrusion and the influence of spread of superimposed stress can't be taken into account by present methods. It is proposed that location of vertical boundaries of sliding body isn't limited at shoulder or toe of fill and the superimposed stress is calculated by Flamant solution to overcome shortcomings of present methods. It is shown by analysis that stability analyses for circular slide, lateral slide and soft foundation extrusion should all be carried out for fill on soft foundation, vertical boundaries of sliding body with minimum safety factor of stability aren't often at shoulder and toe of fill and the safety factors of stability calculated by the proposed method are often different from those calculated by present methods.

Key words: lateral slide; soft foundation extrusion; Flamant solution; Rankine earth pressure

在软基上修建港口、公路, 常遇到堤坝、围堰、岸坡等的稳定问题。通常只有土工合成材料应用技术规范中要求进行水平滑动、软基挤出稳

定分析^[1-6], 似乎非加筋地基不需要验算水平滑动、软基挤出稳定性, 因此不少堤坝、围堰、岸坡等稳定分析时忽略了水平滑动或软基挤出稳定

收稿日期: 2012-07-22

*基金项目: 国家自然科学基金(51078263)

作者简介: 刘吉福(1971—), 男, 博士后, 教授级工程师, 主要从事港口与航道、公路等施工、科研等工作。

验算, 导致地基位移过大或开裂, 甚至出现水平滑动。图1为出现水平滑动破坏的工程照片。

关于水平滑动或软基挤出稳定验算的现有方法中水平土压力通常采用朗肯土压力, 滑动体竖向界面分别位于坡肩和坡脚处(图2)^[1-3,7]。朗肯土压力不能考虑附加应力沿深度的扩散, 在坡脚处不产生土压力。另外, 工程中水平滑动或软基挤出产生的裂缝或滑塌后壁通常位于坡肩后一定距离处, 隆起位移也通常与现有方法假定的滑动体竖向界面位置不一致^[8-9]。



图1 水平滑动

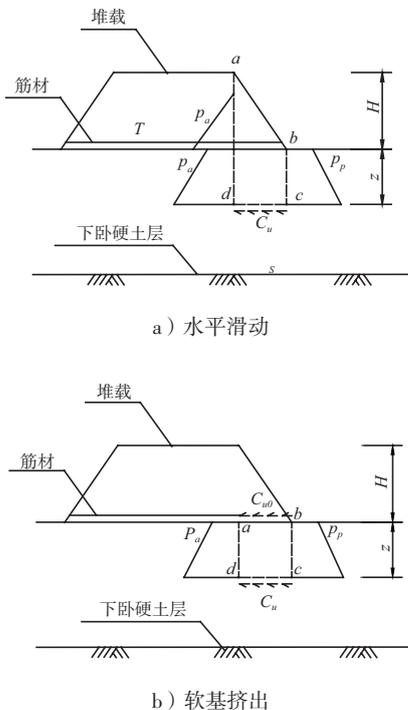


图2 现有方法中水平滑动、软基挤出界面位置

针对上述问题开展研究, 以分析非加筋地基进行水平滑动、软基挤出验算的必要性并寻求合

适的分析方法。

1 水平滑动、软基挤出稳定分析方法

为分析方便, 假设地基中下卧硬土层之上均为饱和黏性土。硬壳层厚度为 h_c , 硬壳层不排水抗剪强度为 C_{uc} , 硬壳层、软黏土层不排水剪切内摩擦角均为零, 水平土压力系数均等于1。软黏土层顶面不排水抗剪强度为 C_{u0} , 地表以下软黏土不排水抗剪强度随深度 z (自地表面起算)线性增加, 即

$$C_{uz} = C_{u0} + \alpha(z - h_c) \quad (1)$$

式中: α 为抗剪强度增加率。

1.1 填土中水平土压力

填土坡肩处水平土压力 T_f 和自立高度 H_V 分别为:

$$T_f = p_v K_{af} (H - H_V) + 0.5 \rho_f g (H^2 - H_V^2) K_{af} + 2C_f \sqrt{K_{af}} (H - H_V) \quad (2)$$

$$H_V = \frac{2c_f \sqrt{K_{af}} - p_v K_{af}}{\rho_f g K_{af}} \quad (3)$$

式中: p_v 为填土表面荷载; K_{af} 为填土主动土压力系数; H 为填土高度; H_V 为自立高度; ρ_f 为填土密度; c_f 为填土粘聚力。

由于土体抗拉能力很小, 可假设土体不能承受拉力, 当 $T_f < 0$ 时, 取 $T_f = 0$ 。

1.2 地基中附加水平土压力

当地表面作用竖直线荷载 $P_s = P_v + H \rho_f g$ 时, p_s 在 (x, z) 处产生的竖向附加应力Flamant解为^[10]

$$\sigma_z = \frac{2p_s z^3}{\pi(x^2 + z^2)^2} \quad (4)$$

式中: σ_z 为竖向附加应力。

由式(4)积分可得到竖向均布荷载在地基中产生的竖向附加应力

$$\sigma_{zr}(x) = \frac{2p_s z^3}{\pi} \int_0^{w_r} \frac{d\xi}{[(x - \xi)^2 + z^2]^2} = \frac{p_s}{\pi} \left[\arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x - w_r}{z} + \frac{xz}{x^2 + z^2} - \frac{(x - w_r)z}{(x - w_r)^2 + z^2} \right] \quad (5)$$

式中: $\sigma_{zr}(x)$ 为竖向均布荷载在地基中 (x, z) 处产生的竖向附加应力; w_r 为填土顶面宽度; ξ 为积分荷载与 x 零点的距离。

式(5)中 z 以竖直均布荷载作用面为原点, 向下为正; x 以竖直均布荷载一侧为原点, 向另一侧

为正。

由式(4)积分可得竖向三角形分布荷载作用下竖向附加应力

$$\sigma_{zi}(x) = \frac{2p_s z^3}{\pi w_l} \int_0^{w_r} \frac{\xi d\xi}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} = \frac{p_s}{\pi} \left[\frac{x}{w_l} \left(\arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x-w_l}{z} \right) - \frac{(x-w_l)z}{(x-w_l)^2 + z^2} \right] \quad (6)$$

式中： $\sigma_{zi}(x)$ 为竖向三角形荷载在地基中 (x, z) 处产生的竖向附加应力； w_l 为边坡宽度； z 以竖直均布荷载作用面为原点，向下为正； x 以三角形角点为原点，向另一侧为正。

由于水平土压力系数等于1，因此路肩附近地基 z 深度处水平土压力为

$$\sigma_{xs}(z) = \sigma_{zi}(w_l + \zeta) + \sigma_{zr}(\zeta) + \sigma_{zi}(w_l + w_r - \zeta) + z\rho_c g - 2C_{uc} \quad z \leq h_c \quad (7a)$$

$$\sigma_{xs}(z) = \sigma_{zi}(w_l + \zeta) + \sigma_{zr}(\zeta) + \sigma_{zi}(w_l + w_r - \zeta) + h_c \rho_c g + (z - h_c) \rho_s g - 2C_{u0} - 2\alpha(z - h_c) \quad z > h_c \quad (7b)$$

式中： $\sigma_{xs}(z)$ 为路肩附近地基 z 深度处水平土压力； ρ_c 为硬壳层密度； ρ_s 为软黏土密度； ζ 见图3。

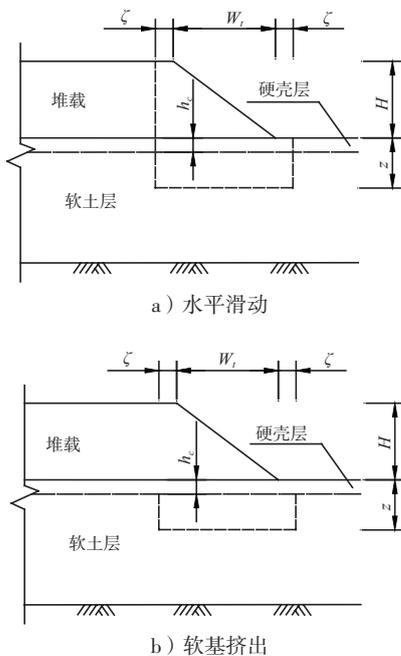


图3 本文方法中水平滑动、软基挤出界面位置

由于土体不能承受拉力，当 $\sigma_{xs}(z) < 0$ 时，取 $\sigma_{xs}(z) = 0$ 。

$p_s=78$ kPa, $w_r=33.5$ m, 边坡值为1.5时, 利用不同方法求得的坡肩、坡脚处竖向附加应力见图4。

由图4可知, 按照现有方法, 坡肩地基中竖向附加应力在深度方向不变化, 坡脚地基中竖向附加应力为零; 按照本文建议的Flamant解计算填土产生的附加应力, 坡肩地基中竖向附加应力随深度增加而减小, 坡脚处竖向附加应力随深度增加而增大, 深度越大, 两者越接近, 显然关于水平滑动或软基挤出稳定验算的现有方法对附加应力分析存在不合理之处。

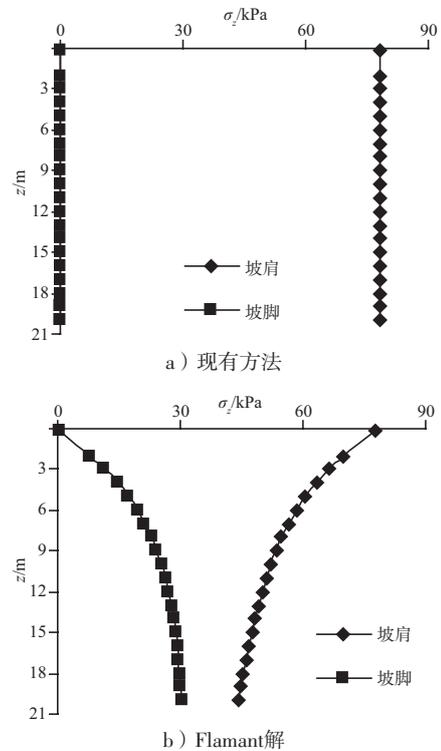


图4 不同方法计算的竖向附加应力

由式(5)积分可得到竖向均布荷载在地基中 z 深度范围内产生的竖向附加应力面积

$$p_{zr}(x) = \int_0^z \sigma_{zr} dz = \frac{p_s}{\pi} \left[z \arctan \frac{x}{z} - z \arctan \frac{x-w_r}{z} + x \ln \frac{x^2 + z^2}{x^2} - (x-w_r) \ln \frac{(x-w_r)^2 + z^2}{(x-w_r)^2} \right] \quad (8)$$

式中： $p_{zr}(x)$ 为竖向均布荷载在 x 处的地基中 z 深度范围内产生的竖向附加应力面积。

由式(6)积分可得到竖向三角形分布荷载在地基中 z 深度范围内产生的竖向附加应力面积

$$p_{zi}(x) = \int_0^z \sigma_{zi} dz = \frac{p_s x}{\pi w_i} \left[z \arctan \frac{x}{z} - z \arctan \frac{x-w_i}{z} + \frac{x}{2} \ln \frac{x^2+z^2}{x^2} - \frac{x-w_i}{2} \ln \frac{(x-w_i)^2+z^2}{(x-w_i)^2} \right] - \frac{p_s(x-w_i)}{2\pi} \ln \frac{(x-w_i)^2+z^2}{(x-w_i)^2} \quad (9)$$

式中: $p_{zi}(x)$ 为竖向三角形分布荷载在 x 处的地基中 z 深度范围内产生的竖向附加应力面积。

堆载在坡脚附近地基 z 深度内产生的水平土压力为

$$R_s(z) = p_{zi}(-\xi) + p_{zi}(-w_i-\xi) + p_{zi}(w_r+2w_i+\xi) \quad (10)$$

式中: $R_s(z)$ 为堆载在坡脚附近地基 z 深度内产生的水平土压力之和, ξ 见图3。

1.3 水平滑动稳定验算

$p_{zi}(x), p_{zi}(x)$ 分别对 x 求导得

$$p'_{zi}(x) = \frac{p_s}{\pi} \left[\frac{x^2}{x^2+z^2} - \frac{(x-w_i)^2}{(x-w_i)^2+z^2} - \ln \frac{x^2}{x^2+z^2} + \ln \frac{(x-w_i)^2}{(x-w_i)^2+z^2} \right] \quad (11)$$

$$p'_{zi}(x) = \frac{p_s}{\pi} \left\{ \frac{z}{w_i} \left(\arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x-w_i}{z} \right) - \frac{x}{w_i} \left[\ln \frac{x^2}{x^2+z^2} - \ln \frac{(x-w_i)^2}{(x-w_i)^2+z^2} \right] + \frac{z^2}{(x-w_i)^2+z^2} \right\} \quad (12)$$

式中: $p'_{zi}(x)$ 为 $p_{zi}(x)$ 的导数; $p'_{zi}(x)$ 为 $p_{zi}(x)$ 的导数。

由式(13)可求得 z 对应的最危险水平滑动体对应的 ξ 和 ζ 。

$$p'_{zi}(-w_i-\xi) + p'_{zi}(-\xi) - p'_{zi}(2w_i+w_r+\xi) = C_{uz} \quad (13a)$$

$$p'_{zi}(\zeta) + p'_{zi}(w_i+\zeta) - p'_{zi}(w_i+w_r-\zeta) = C_{uz} \quad (13b)$$

促进水平滑动的水平推力为

$$T = T_f + \sum_{i=1}^n \sigma_{xsi}(z) \Delta z_i \quad (14)$$

式中: T 为水平推力; n 为 z 内层数; Δz_i 为第 i 层土的厚度。

阻滑力为:

$$R = R_s(z) + 0.5\rho_c g z^2 + 2C_{uc} z + C_{uc}(w_i + \xi + \zeta) \quad z \leq h_c \quad (15a)$$

$$R = R_s(z) + 0.5\rho_c g h_c^2 + \rho_c g h_c(z - h_c) + 0.5\rho_s g(z - h_c)^2 + 2C_{uc} h_c + 2C_{u0}(z - h_c) + \alpha(z - h_c)^2 + [C_{u0} + \alpha(z - h_c)](w_i + \xi + \zeta) \quad z > h_c \quad (15b)$$

式中: R 为阻滑力。

水平滑动稳定安全系数为

$$K = \frac{R}{T} \quad (16)$$

式中: K 为稳定安全系数。调整 z 使 K 最小为止。

1.4 软基挤出稳定验算

由式(17)可求得 z 对应的最危险软基挤出体对应的 ξ 和 ζ 。

$$p'_{zi}(-w_i-\xi) + p'_{zi}(-\xi) - p'_{zi}(2w_i+w_r+\xi) = C_{u0} + C_{uz} \quad (17a)$$

$$p'_{zi}(\zeta) + p'_{zi}(w_i+\zeta) - p'_{zi}(w_i+w_r-\zeta) = C_{u0} + C_{uz} \quad (17b)$$

促使软基挤出的推力为

$$T = \sum_{i=n_1}^n \sigma_{xsi}(z) \Delta z_i \quad (18)$$

式中: n_1 为 h_c 内土层数。

阻止软基挤出的阻力为

$$R = R_s(z) - R_s(h_c) + \rho_c g h_c(z - h_c) + 0.5\rho_s g(z - h_c)^2 + 2C_{u0} z + \alpha(z - h_c)^2 + [2C_{u0} + \alpha(z - h_c)](w_i + \xi + \zeta) \quad (19)$$

软基挤出稳定安全系数计算采用式(16), 调整 z 使 K 最小为止。

2 工程算例

2.1 算例1

软基中淤泥 $\rho_s=1.65 \text{ t/m}^3$, $C_u=15 \text{ kPa}$, 厚 20 m 。
 $w_r=33.5 \text{ m}$, 边坡值为 1.5 , 填料 $\rho_f=1.95 \text{ t/m}^3$, $c_f=10 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\phi_f=30^\circ$ 。下卧层黏性土厚 6 m , 密度为 1.75 t/m^3 , $C_u=30 \text{ kPa}$, 地下水位埋深 1 m 。采用理正软件计算圆弧滑动稳定安全系数, 分别采用本文方法和现有方法计算水平滑动、软基挤出稳定安全系数。计算结果见表1、表2和图5。

由表1、表2、图5可见:

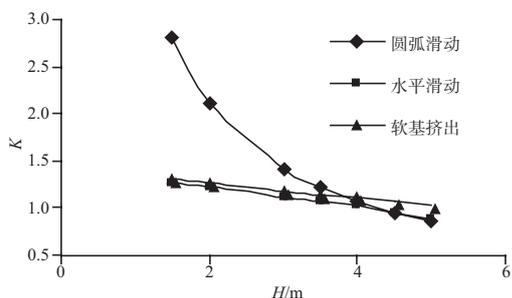
1) 水平滑动安全系数小于软基挤出安全系数。

表1 本文方法得到的最危险滑动体尺寸 m

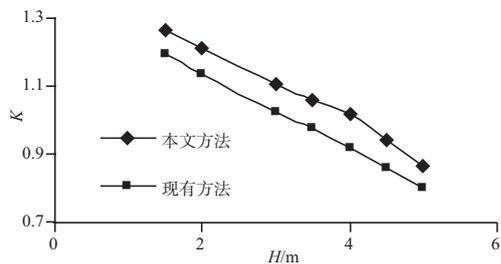
H	水平滑动			软基挤出		
	z	ζ	ξ	z	ζ	ξ
1.5	19	4.349	4.455	19	1.239	1.255
2.0	19	5.495	5.674	19	2.105	2.139
3.0	19	7.015	7.362	19	3.402	3.486
3.5	19	7.542	7.972	19	3.887	3.996
4.0	15	6.074	6.222	19	4.288	4.424
4.5	6	1.397	1.398	19	4.627	4.787
5.0	5	0.935	0.936	19	4.913	5.099

表2 最危险滑动体深度 m

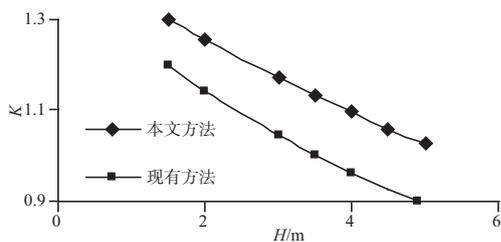
H	本文方法		现有方法		圆弧滑动
	水平滑动	软基挤出	水平滑动	软基挤出	
1.5	19	19	20	20	5.843
2.0	19	19	20	20	10.005
3.0	19	19	20	20	15.057
3.5	19	19	19	20	19.867
4.0	15	19	11	20	19.936
4.5	6	19	8	19	20.000
5.0	5	19	7	17	19.998



a) 不同破坏模式对应的安全系数



b) 水平滑动



c) 软基挤出

图5 稳定安全系数

2) 填土高度小于5 m时, 水平滑动安全系数小于圆弧滑动安全系数; 填土高度大于5 m时, 水平滑动安全系数大于圆弧滑动安全系数。

3) 填土高度小于4 m时, 软基挤出安全系数小于圆弧滑动安全系数; 填土高度大于4 m时, 软基挤出安全系数大于圆弧滑动安全系数。

4) 水平滑动、软基挤出最危险滑动体的竖向界面均不位于坡肩和坡脚处, 底面深度较大。

5) 本文方法计算的水平滑动、软基挤出安全系数大于现有方法大计算的安全系数。

2.2 算例2

软基中硬壳层厚1.0 m, $\rho_c=1.75 \text{ t/m}^3$, $C_{uc}=30 \text{ kPa}$ 。淤泥厚19 m, $\rho_s=1.65 \text{ t/m}^3$, $C_{u0}=1.87 \text{ kPa}$, $\alpha=1.62 \text{ kPa/m}$ 。 $w_f=33.5\text{m}$, 边坡值为1.5, 填料 $\rho_f=1.95 \text{ t/m}^3$, $c_f=10 \text{ kPa}$, $\varphi_f=30^\circ$, 地下水位埋深1 m。采用理正软件计算圆弧滑动稳定安全系数, 分别采用本文方法和现有方法计算水平滑动、软基挤出稳定安全系数。计算结果见表3、表4和图6。

由表3、表4、图6可见:

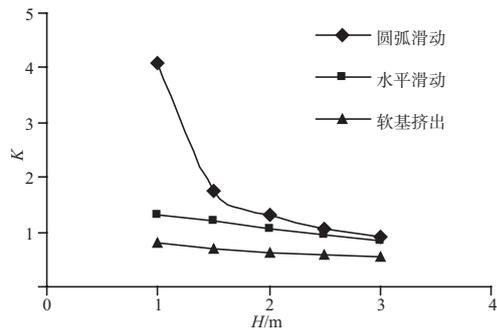
- 1) 水平滑动安全系数大于软基挤出安全系数。
- 2) 水平滑动安全系数小于圆弧滑动安全系数。
- 3) 软基挤出安全系数小于圆弧滑动安全系数。
- 4) 水平滑动最危险滑动体的竖向界面不位于

表3 本文方法得到的最危险滑动体尺寸 m

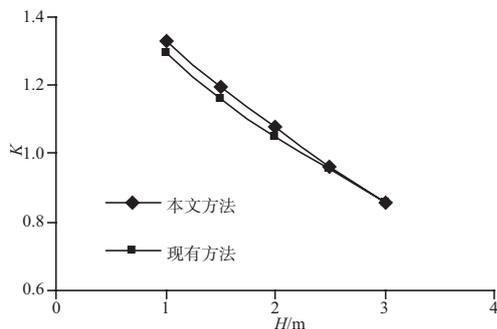
H	水平滑动			软基挤出		
	z	ζ	ξ	z	ζ	ξ
1.0	6	1.089	1.089	2	0	0
1.5	5	1.366	1.366	2	0	0
2.0	4	1.325	1.325	2	0	0
2.5	4	1.399	1.399	2	0	0
3.0	4	1.446	1.445	2	0	0

表4 最危险滑动体深度 m

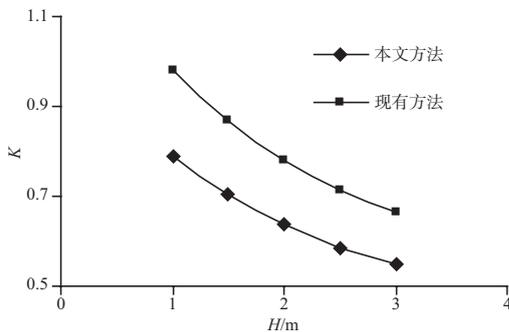
H	本文方法		现有方法		圆弧滑动
	水平滑动	软基挤出	水平滑动	软基挤出	
1.0	6	2	8	3	1.813
1.5	5	2	7	3	3.995
2.0	4	2	6	3	3.996
2.5	4	2	6	3	3.998
3.0	4	2	5	3	4.997



a) 不同破坏模式对应的安全系数



b) 水平滑动



c) 软基挤出

图6 稳定安全系数

坡肩和坡脚处,水平滑动、软基挤出最危险滑动体的底面深度较小。

5) 本文方法计算的水平滑动安全系数大于现有方法计算的水平滑动安全系数。本文方法计算的软基挤出安全系数小于现有方法计算的软基挤出安全系数。

由两个算例可知,对不同的地质条件,水平滑动、软基挤出、圆弧滑动3种破坏模式均可能出

现;地基浅部土层较差时,易发生水平滑动或软土挤出破坏;滑动体竖向界面不一定位于坡肩和坡脚处;水平滑动、软基挤出破坏模式不一定局限在浅层。

3 结论

1) 本文方法采用Flamant解计算附加应力产生的水平土压力,可以考虑附加应力扩散的影响,更加符合实际情况。

2) 不同参数下,水平滑动、软基挤出、圆弧滑动3种破坏模式对应的稳定安全系数均可能最小,应同时进行圆弧滑动、水平滑动、软基挤出稳定分析。

3) 水平滑动、软基挤出最危险滑动体竖向界面不一定位于坡肩和坡脚,底面深度可能较大。

参考文献:

- [1] BS 8006:1995 Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills[S].
- [2] Yvonne Rogbeck, Claes Alén, Gunilla Franzén, et al. Nordic Guideline for Reinforced Soils and Fills[S].
- [3] JTJ/T 019—1998 公路工程土工合成材料应用技术规范[S].
- [4] TB 10106—2010, J1078—2010 铁路工程地基处理技术规范[S].
- [5] JTG D30—2004 公路路基设计规范[S].
- [6] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [7] GDJTG/T E01—2011 广东省公路软土地基设计与施工技术规定[S].
- [8] 林壮宏,李根存,林文强.某高速公路填石路基滑塌分析及处理方案[G]//龚晓南.高速公路地基处理理论与实践.北京:人民交通出版社,2005:559-566.
- [9] 庞奇德,刘吉福.鱼塘段软基路堤施工前期滑塌原因与对策[J].水运工程,2006(6):78-80.
- [10] 钱家欢.土力学[M].南京:河海大学出版社,1999.

(本文编辑 武亚庆)