

某机场高填方边坡稳定性数值法和 极限平衡法对比分析

王萌

(华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011)

摘要: 云南某机场高填方边坡具有原地基及基岩地形起伏大、红黏土软弱层分布广、填筑体厚度大等特点, 其最大填方厚度约为 70 m, 最大垂直高差约为 46 m。本文采用不同的数值法对高填方边坡稳定性进行计算分析, 并与传统极限平衡法计算结果进行对比, 结果表明: 原地基初始地应力和填筑等施工工序对数值法稳定性分析结果影响显著, 对于高填方边坡采用数值法分析更能反映边坡实际应力场特征, 对于复杂高填方边坡采取数值方法进行稳定性验算是非常必要的。针对本工程的极限平衡法分析中, 不同算法之间存在较为一致的相对安全系数大小关系: 瑞典条分法 < 简化 Janbu 法 < 简化 Bishop 法 \approx Morgenstern-Price 法 \approx Sarma 法。极限平衡法 (简化 Bishop 法) 所得安全系数结果与应力分析法 (SAM) 较为接近, 相差小于 5%; 但明显大于强度折减法 (SRM), 约为前者的 1.08~1.22 倍, 数值法稳定性分析结果相比极限平衡法有一定的安全储备。通过强度折减法中剪应变增量云图得到的滑动面与极限平衡法、应力分析法搜索得到的临界圆弧滑动面位置基本吻合。

关键词: 高填方边坡; 稳定性分析; 数值法; 应力分析法; 强度折减法; 极限平衡法

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0065-07

Comparative analysis of numerical method and limit equilibrium method for stability of high fill slope in an airport

WANG Meng

(East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China)

Abstract: The high fill slope of an airport in Yunnan has the characteristics of large topographic fluctuation of in-situ foundation and bedrock, wide distribution of red clay layer and large thickness. The maximum filling thickness is about 70 m and the maximum in difference vertical height is about 46 m. In this paper, the stability of high fill slope was calculated and analyzed by different numerical methods, and compared with the calculation results of traditional limit equilibrium method. The results show that the initial in-situ stress of in-situ foundation and filling and other construction processes have a significant impact on the stability analysis results of numerical method. For the high fill slope, the numerical method can better reflect the actual stress field characteristics of the slope, which proves that it is very necessary to adopt the numerical method for the stability check of the complex high fill slope. In the limit equilibrium method, there is a relatively consistent relationship between the relative safety factors of each algorithm: Fellenious method < simplified Janbu method < simplified Bishop method \approx Morgenstern-Price method \approx Sarma method. The safety factor obtained by the limit equilibrium method is close to the stress analysis method (SAM), and the difference is less than 5%. But it is significantly greater than the strength reduction method (SRM), about 1.08-1.22 times of the former. The sliding surface obtained from the incremental cloud map of shear strain in the strength reduction method is basically consistent with the position of the critical circular sliding surface obtained by the limit equilibrium method and the stress limit equilibrium method.

Key words: high fill slope; stability analysis; numerical method; stress analysis method; strength reduction method; limit equilibrium method

0 引言

在云南机场建设中, 由于我国西南地形地貌约束, 高填方工程一般兼具地形起伏大、地质条件差、工程量大等特点, 由此也带来了一系列特殊工程地质难题, 尤其是高填方边坡的稳定性是目前研究的热点和难点问题^[1], 类似的工程失稳案例也时有发生: 三峡机场高填方边坡填筑过程中发生了 2 次填筑体滑坡^[2]; 贵阳龙洞堡机场二期扩建填筑过程中发生滑塌, 垂直下错达 8 m, 而此时距离填筑设计标高还有近 10 m^[3]; 攀枝花机场由于地处缓倾向坡地带加上施工填筑扰动和降雨影响, 造成填筑滑坡, 并激活了高填方下部的老滑坡, 严重危及高填方边坡的稳定和机场的正常运营^[4-5]。

在土质边坡稳定分析中, 往往习惯采用基于极限平衡理论的极限平衡法 (LEM), 包括 Bishop 法、Janbu 法和 Spencer 法等, 来计算边坡稳定性安全系数以评价其稳定性, 应用效果和工程实践证明土坡稳定分析的极限平衡法是相对可靠的^[6]。但对于高填方边坡, 场地应力水平随填筑过程发生明显改变, 这与天然边坡有着显著差别, 依靠一系列简化和假定求解力平衡下的安全系数存在较大争议^[7]。实际应用中, 相关规范对极限平衡法稳定性分析做出了不同的计算规定, 对于某些特殊的复杂情况, 建议采用数值方法进行稳定性验算^[8-12]。

考虑到目前高填方稳定性数值法应用研究多集中于降雨和地震作用下边坡稳定性分析, 与传统极限平衡法计算结果的差异性研究较少, 同时根据数值法分析结果如何判定边坡稳定性尚未形成完善且广为接受方法的现状^[7], 本文以云南某机场高填方边坡为研究对象, 针对不同假设条件下极限平衡条分法予以对比分析, 同时基于应力分析法 (SAM) 分析了高填方边坡填筑产生的应力场变化对安全系数计算结果的影响, 最后对比了极限平衡法 (LEM)、应力分析法 (SAM) 与强度折减法 (SRM) 的安全系数计算结果, 以期为类似工程的设计和施工提供一定的借鉴与参考。

1 计算模型建立

1.1 工程概况

云南某机场航站区高填方边坡约 2 700 延长

米, 填土方量约 $1\ 530 \times 10^4 \text{ m}^3$, 最大边坡垂直高差约 47 m, 最大填方厚度约 70 m。土方填筑前, 对高填方区域及高填方边坡稳定影响区原地基的红黏土、次生红黏土等特殊岩土及软弱土进行强夯或碎石桩处理。根据填筑区域及不同填料的特性, 分别采用强夯、振动碾压、冲击碾压等工艺对填筑体进行处理。边坡设计采用自然放坡的形式, 采用较缓的坡率确保边坡稳定性, 单级坡率不大于 1:2.0, 最大综合坡率接近 1:3.0。

1.2 典型分析剖面

结合本工程地质条件和边坡设计特点, 中部区域边坡上方有航站楼、高架、地铁等建构筑物, 相对空间关系复杂, 选取 5 个典型剖面, 分别为 M1、M2、M3、M4 和 M5; 东侧区域边坡上方有高架道路, 为顺层边坡, 选取典型剖面 E1; 西侧区域边坡上方有高架道路、停车场等, 原状地形相对平缓, 填筑体深厚, 选取 2 个典型剖面 W1 和 W2。其中, 典型剖面的平面分布和 M3 剖面地层分布如图 1 中所示。

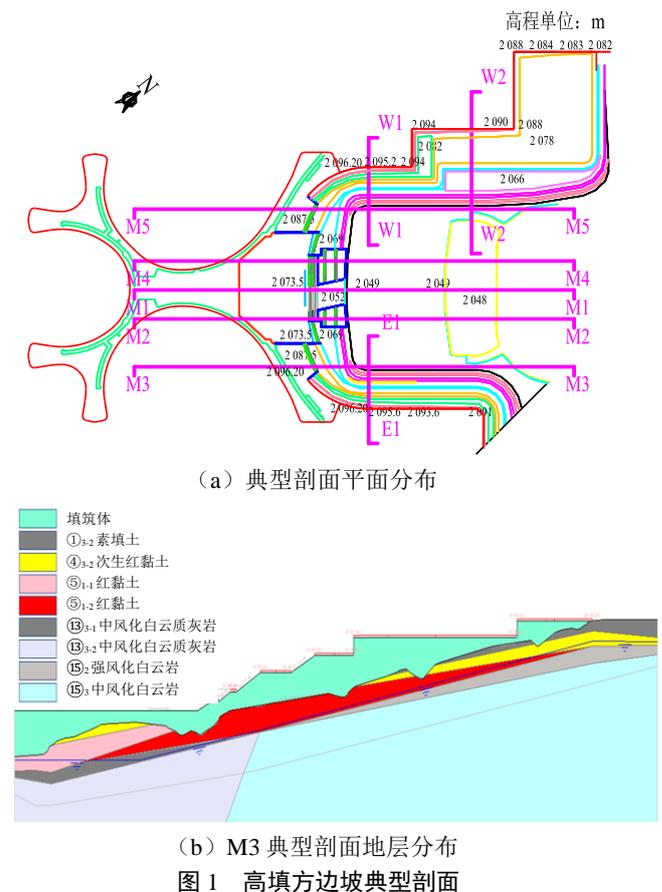


Fig. 1 Typical section of high fill slope

1.3 土层参数

根据勘察资料, 本工程主要土层参数取值见表 1 所示。本工程中软弱土以③₁ 淤泥、④_{3.3} 次生

红黏土为主, 平面分布总面积约为 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$, 软弱土厚度 $1.8 \sim 8.9 \text{ m}$, 平均厚度 6.48 m 。为满足边坡稳定性和沉降变形要求, 边坡填筑前, 需对原地基软弱土进行地基处理, 根据边坡稳定性影响区域的不同, 处理方式包括强夯、地基处理、换填等。为简化计算剖面, 对地基处理范围内的软弱土区域按照碎石桩复合地基参数进行取值, 坡顶和坡上建构筑物假设为均布荷载。

1.4 数值分析方法

目前数值分析方法种类较多, 用于指导工程设计的主要有应力分析法 (SAM) 和强度折减法 (SRM) 两类方法。本文将结合这两类方法, 对高填方边坡稳定性展开分析。

应力分析法 (SAM) 是以有限元应力分析为基础, 通过划分网格单元, 对各节点上应力应变状况进行综合计算, 进而得到潜在滑动面上土体整体或局部应力分布情况, 结合不同优化方法确定出最危险滑动面^[13]。与极限平衡法相比, 有限元法能更详细地反映出边坡岩土体内应力-应变分布情况, 且计算过程不受边坡几何形状和土体不均匀性限制, 因而是边坡稳定性分析中一种较为理想方法。该法避免了传统极限平衡法中条间力的简化和假设条件, 同时可以模拟填筑施工工序, 得到高填方边坡真实的应力场分布, 其稳定性分析结果更合理。

通过有限元分析将边坡划分网格单元并计算各单元节点处的应力, 在此基础上进行最危险滑动面检索, 针对任意滑动面进行条块划分, 结合有限元应力场计算结果, 计算条块底部法向和切向应力, 得出可能的抗剪强度, 最终计算出滑坡潜在滑动面和安全系数^[13]。边坡安全系数定义为:

$$FS = \frac{\sum S_r}{\sum S_m} \quad (1)$$

式中: S_r 是沿整个滑面总的抗剪力; S_m 是沿整个滑面总的下滑力。

强度折减法 (SRM) 不需要指定滑动面搜索范围, 也不需要作圆弧滑动面的假定, 通过不断降低边坡岩土体的抗剪切强度参数, 使其达到极限破坏状态为止, 从而得到边坡的强度储备安全系数, 并以剪应变增量集中分布区域作为潜在滑动面位置^[7]。该法已经得到了大量研究学者的深入探讨, 并在工程应用中被证明能够作为边坡稳定性验算的方法之一。但该法计算过程中需人为折减强度参数, 折减参数后的模型应力水平和位移变形等并没有实际工程意义^[14]。

在本文中, 基于这两种数值分析方法, 分别采用 Geostudio 和 Plaxis 2D 软件, 对本工程中典型剖面进行稳定性计算分析, 并与传统的极限平衡法计算结果进行对比。

表 1 土层力学参数

Table 1 Soil mechanical parameters

土层	压缩模量/ MPa	泊松比	天然重度/ (kN/m ³)	饱和重度/ (kN/m ³)	天然状态		浸水状态	
					黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
填筑体	10	0.30	22.0	23.0	5	35	4	33.0
① ₃₋₁ 素填土	3	0.30	19.0	19.5	20	10	15	8.0
① ₃₋₂ 素填土	4	0.30	19.5	20.0	15	20	12	16.0
④ ₂₋₂ 粉质黏土	6	0.40	18.5	19.0	35	12	28	9.0
④ ₃₋₁ 次生红黏土	7	0.40	18.5	19.0	45	13	40	12.0
④ ₃₋₂ 次生红黏土	6	0.40	18.5	19.0	35	15	28	12.0
④ ₃₋₃ 次生红黏土	3	0.40	18.0	18.5	15	7	12	5.5
⑤ ₁₋₁ 红黏土	8	0.40	18.5	19.0	45	15	36	12.0
⑤ ₁₋₂ 红黏土	8	0.40	18.0	18.5	40	12	31	10.0
⑥ ₂₋₂ 粉质黏土	6	0.40	19.0	19.5	35	15	28	12.0
⑬ ₂ 强风化白云质灰岩	—	0.25	21.5	—	45	25	—	—
⑬ ₃₋₁ 中风化白云质灰岩	—	0.20	25.0	—	165	35	—	—
⑬ ₃₋₂ 中风化白云质灰岩	—	0.20	25.5	—	200	39	—	—
⑮ ₂ 强风化白云岩	—	0.25	21.5	—	45	25	—	—
⑮ ₃ 中风化白云岩	—	0.20	26.0	—	210	41	—	—
碎石桩复合地基	10	0.30	18.5	19.0	20	20	16	16.0

2 不同极限平衡法计算结果对比

针对各典型剖面, 分别采用瑞典圆弧法、简化 Bishop 法、简化 Janbu 法、Morgenstern-Price 法和 Sarma 法进行稳定性计算分析。由图 2 中可以看出, 各算法所得安全系数具有较好的规律性, 最小安全系数均出现在 E1 剖面, 仍大于本工程边坡稳定性设计控制指标 (安全系数 ≥ 1.35)。采用任一算法, 各剖面之间安全系数的相对大小关系基本一致, 但在具体安全系数数值上存在一定程度的差异。

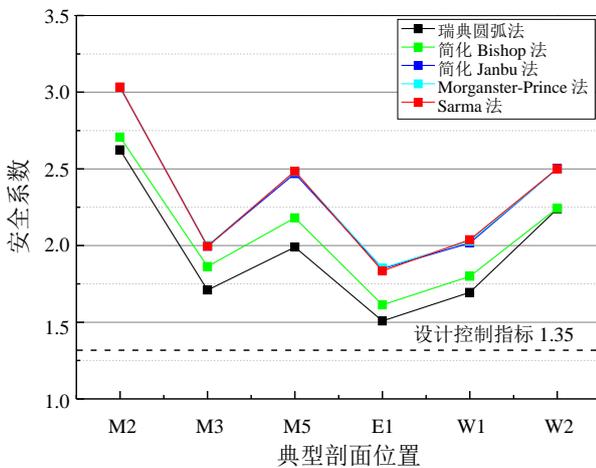


图 2 各剖面极限平衡法计算结果

Fig. 2 Results of limit equilibrium method for each section

以 M3 剖面为例, 各算法得到的最小安全系数及对应圆弧面并不相同, 这与极限平衡法的假设条件直接相关。具体计算结果见表 2 中所示。瑞典条分法得到的安全系数最小, Sarma 法得到的安全系数最大: 瑞典条分法 (1.411) < 简化 Janbu 法 (1.529) < 简化 Bishop 法 (1.631) \approx Morgenstern-Price 法 (1.633) \approx Sarma 法 (1.638), 各算法所得安全系数之间存在最大 16% 的差异。

瑞典条分法完全忽略了条间力的作用, 得出的安全系数明显偏低, 我国《铁路路基设计规范》^[12] 中建议采用该法, 其计算结果偏于保守。Morgenstern-Price 法对条块间力假设较为复杂, 计算过程复杂, 而 Sarma 法需要依靠丰富的设计经验给定条块间的摩擦角和黏聚力, 这都对国内设计人员提出了更高的要求。简化 Bishop 法相对更为简便实用, 且计算结果较为合理, 大部分规范中都沿用了该法^[8-11]。但需要指出的是, 简化 Bishop 法中忽略了条块间的剪应力, 且仅考虑力

矩平衡, 这种假设条件的安全性虽然已得到了一定程度的实践与验证, 但用于评价高填方边坡稳定性仍存在经验因素^[14]。

表 2 M3 剖面极限平衡法结果

典型剖面	瑞典条分法	简化 Bishop 法	简化 Janbu 法	Morgenstern-Price 法	Sarma 法
M3	1.710	1.995	1.863	1.996	2.000

图 3 为 M3 剖面不同假设条件下临界滑动面位置。通过对比滑动面位置可以发现, 简化 Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Sarma 法的临界滑动面一致, 且滑面范围最大, 瑞典条分法所得临界滑动面范围最小, 简化 Janbu 法介于两者之间, 这与前文分析各算法得到的安全系数有直接相关性。同时也发现, 不同算法得到的临界滑动面, 均穿越了地基处理后的软弱土层。

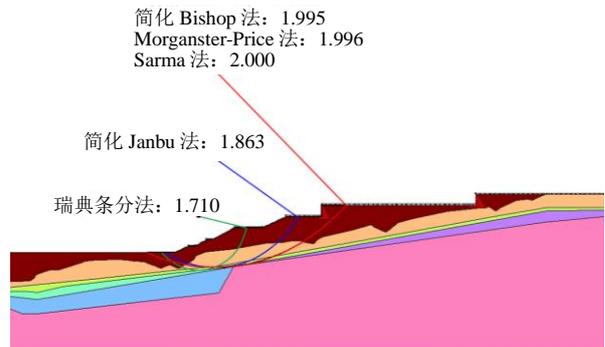


图 3 不同算法得到的临界滑动面位置

Fig. 3 Critical sliding surface obtained from different methods

3 高填方施工过程中对应力分析的影响分析

采用应力分析法进行稳定性分析时, 对比了 K_0 法 (对填筑完成后的边坡形态直接建模, 采用 K_0 法求解应力场, 不考虑挖填过程) 和弹塑性荷载变形法 (首先对原地基形态建模, 采用荷载变形法计算初始地应力场, 并模拟填筑体施工带来的地应力场变化, 考虑挖填过程) 两种分析应力场方法对稳定性分析结果的影响, 计算分析过程如图 4 所示。

由图 5 中可以看出, 两种初始应力场分析方法对最后稳定性计算结果影响显著, 存在约 22% 偏差。同时, 利用弹塑性荷载变形法, 考虑堆填过程应力场变化所得到的安全系数与简化 Bishop 法结果非常接近, 但除 W2 剖面外, 其余剖面下应

力分析法安全系数结果均比简化 Bishop 法稍小。

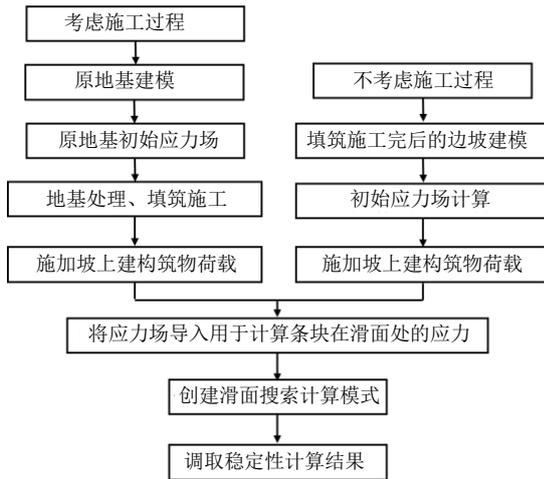


图 4 数值法中不同应力场分析方法计算流程

Fig. 4 Calculation flow of different stress field analysis methods in numerical method

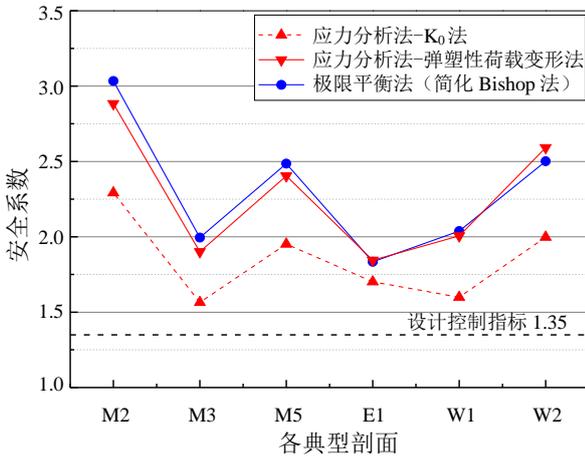
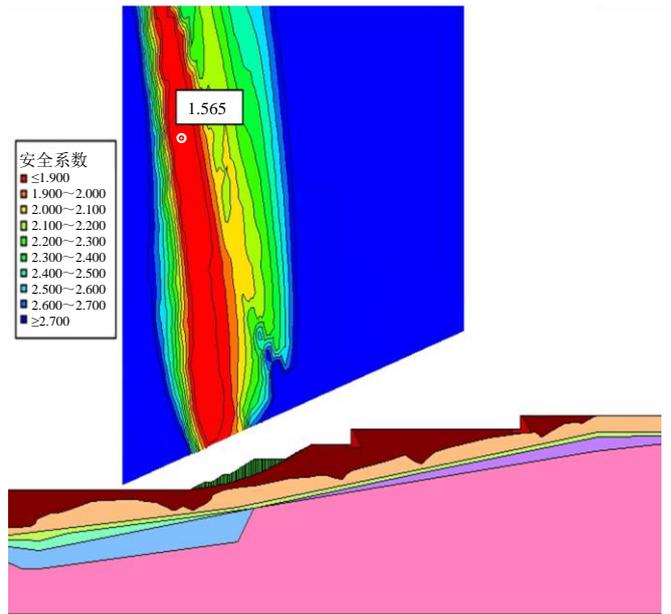


图 5 应力分析法中不同应力场分析方法对结果影响对比

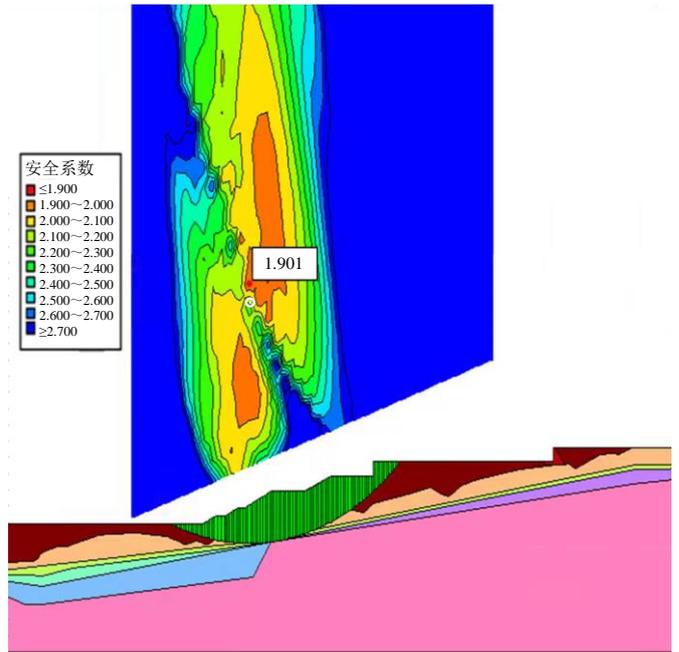
Fig. 5 Comparison of different stress field analysis methods in numerical method

图 6 为 M3 剖面分别采用 K₀法和弹塑性荷载变形法分析应力场下应力分析法所得到的临界滑动面位置和安全系数结果。可以看出，采用 K₀法和弹塑性荷载变形法所得安全系数分别为 1.565 和 1.901，在滑面搜索位置、数量、矢高完全相同的前提下，采用 K₀法所得临界滑动面非常浅，而采用弹塑性荷载变形法所得临界滑动面与简化 Bishop 法结果一致，更符合工程经验。

可以看出，应力场计算对于数值法分析边坡稳定性结果影响显著，需考虑工程实际施工工序，在有限元分析中模拟原地基地应力场分布、地基处理和挖填施工等施工工况，反映真实应力场变化，基于此得到的临界滑动面位置和安全系数才合理、可靠。



(a) K₀法



(b) 弹塑性荷载变形法

图 6 M3 剖面不同应力场分析方法下计算结果

Fig. 6 Calculation results of M3 section under different stress field analysis methods

此处分析，采用 K₀法进行地应力求解，是利用填筑施工完成后的边坡形态直接建模和应力场分析，并没有反应真实的填筑过程，深层土体应力水平较高，土体抗剪强度也高，导致更易发生浅层滑动面。而采用弹塑性荷载变形法是在建立原始地形的基础上，生成初始地应力场，并依次模拟地基处理和挖填施工过程，深部软弱土层的应力状态更符合工程实际，更易出现穿越深部软弱土层的临界滑动面。

4 数值法与极限平衡法对比分析

图 7 为数值法和极限平衡法安全系数对比。可以看出,对于正常条件下高填方边坡稳定性,其安全系数有如下规律:强度折减法<应力分析法<极限平衡法(简化 Bishop 法)。极限平衡法所得安全系数往往是最大的,强度折减法所得安全系数最小,可见数值法(应力分析法和强度折减法)稳定性分析结果相比极限平衡法有一定的安全储备^[14]。

同时可以发现,极限平衡法所得安全系数结果与应力分析法(SAM)相比较为接近,相差小于 5%;但明显大于强度折减法(SRM),约为其 1.08~1.22 倍。随着边坡稳定性安全系数越小,数值法和极限平衡法安全系数计算结果的差异越来越小,相反对于稳定性越好、安全系数越大的高填方边坡,数值法计算结果与极限平衡法之间的误差越大。

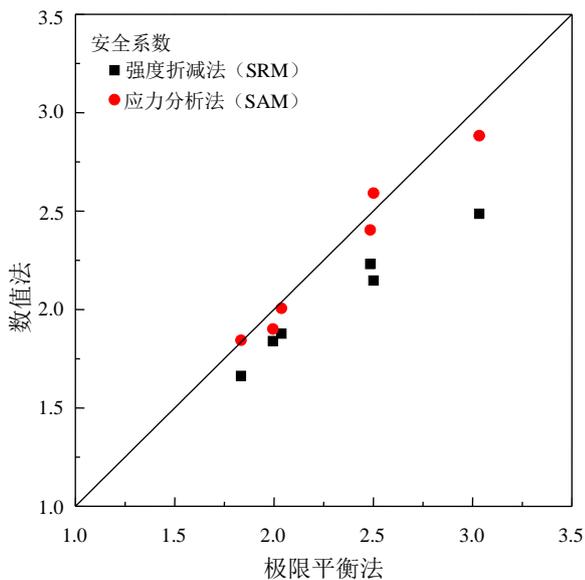


图 7 数值法和极限平衡法安全系数对比

Fig. 7 Comparison of safety factor between numerical method and limit equilibrium method

图 8 为强度折减法计算结果剪应变增量云图。为方便对比,极限平衡法和应力分析法所得到的临界滑动面位置也在图中标示。由图中可以看出,通过强度折减法中剪应变增量云图得到的临界滑动面与极限平衡法(简化 Bishop 法)、应力分析法搜索得到的临界圆弧滑动面位置基本吻合。

强度折减法所得滑动面为非理想圆弧面,该

方法更能体现可能出现的真实滑动面形态,避免圆弧滑动面假定的弊端。应力分析法的优势在于相比极限平衡法考虑了边坡应力场分布,避免了条块间的作用力假设,更能反映真实受力情况,体现高填方边坡的工程特点。

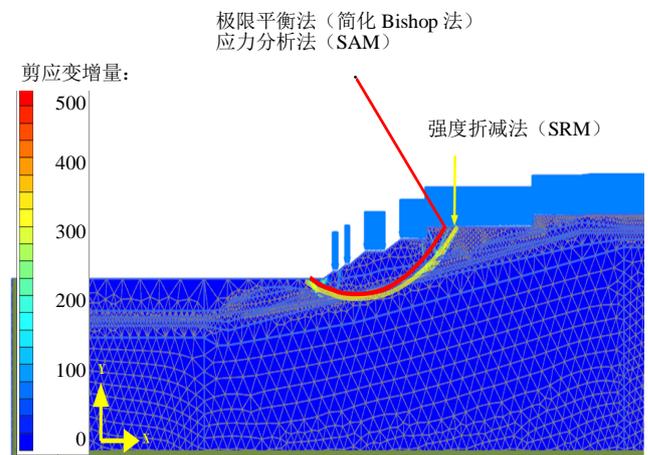


图 8 强度折减法计算结果剪应变增量云图

Fig. 8 Nephogram of shear strain increment calculated by strength reduction method

5 结论

(1) 山区机场高填方边坡稳定性分析中,不同极限平衡分析方法各有不同,在本文依托项目中各算法之间存在较为一致的相对安全系数大小关系:瑞典条分法<简化 Janbu 法<简化 Bishop 法 \approx Morgenstern-Price 法 \approx Sarma 法,这与不同算法得到的临界滑动面位置差异有直接相关性。

(2) 应力场分析结果对于数值法分析高填方边坡稳定性结果影响显著,需考虑初始地应力场分布、地基处理和挖填施工等施工工况,得到真实应力场变化,基于此得到的临界滑动面位置和安全系数才合理、可靠。

(3) 对比数值法和极限平衡法高填方边坡安全系数,有如下规律:强度折减法<应力分析法<极限平衡法(简化 Bishop 法)。数值法安全系数计算结果与极限平衡法之间的误差大小与高填方边坡稳定性状态有一定相关性,随着边坡稳定性安全系数越小,数值法和极限平衡法安全系数计算结果的差异越来越小。

(4) 通过强度折减法中剪应变增量云图得到的临界滑动面与极限平衡法(简化 Bishop 法)、应力分析法搜索得到的临界圆弧滑动面位置基本吻合。

参考文献

- [1] 吴红刚, 冯文强, 艾挥, 等. 山区机场高填方边坡工程实践与研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 385-400.
WU Hong-gang, FENG Wen-qiang, AI Hui, et al. Engineering practice and research on high fill slope of mountainous airport[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(2): 385-400.
- [2] 林肖荣, 庞昌全. 宜昌三峡机场灯光带滑坡特征及治理[J]. 湖北地质, 1997(1): 66-72.
LIN Xiao-rong, PANG Chang-quan. Characteristics and treatment of landslide in lighting belt of Yichang Three Gorges Airport[J]. Hubei Geology, 1997(1): 66-72.
- [3] 刘桂琴, 刘宏, 王睿. 某机场高填方边坡变形破坏机制分析[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(2): 26-28.
LIU Gui-qin, LIU Hong, WANG Rui. Analysis on deformation and failure mechanisms of high fill slope in a certain aerodrome[J]. Mining Research and Development, 2008, 28(2): 26-28.
- [4] 陈涛. 山区机场高填方地基变形及稳定性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
CHEN Tao. Study on the characters of deformation and stability of high-fill airport or embankment in mountainous areas[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [5] 唐军. 高填方边坡在强降雨条件下稳定性分析—以攀枝花机场为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
TANG Jun. In high fill slope stability analysis under the condition of heavy rainfall by panzhihua airport as an example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [6] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理、方法、程序[M]. 北京: 水利水电出版社, 2003.
CHEN Zu-yu. Soil Slope Stability Analysis: Theory Methods and Programs[M]. Beijing: WaterPower Press, 2003.
- [7] 夏井泉, 唐翊, 陈志. 高填方路基边坡稳定性分析的方法比较[J]. 水利规划与设计, 2015(6): 110-112.
XIA Jing-quan, TANG Yi, CHEN Zhi. Comparison of methods for slope stability analysis of high fill subgrade[J]. Water Resources Planning and Design, 2015(6): 110-112.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
Ministry of Housing and Urban-rural Development, PRC. Technical Code for Building Slope Engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高填方地基技术规范: GB 51254—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-rural Development, PRC. Technical Code for Deep Filled Ground: GB 51254—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [10] 中国民航机场建设集团公司. 民用机场岩土工程设计规范: MH/T 5027—2013[S]. 北京: 中国民航出版社, 2013.
CAAC Airport Construction Group Corporation. Code for Geotechnical Engineering Design of Airport: MH/T 5027—2013[S]. Beijing: CAAC Press, 2013.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程抗震设计规范: JTG B02—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification of Seismic Design for Highway Engineering: JTG B02—2013[S]. Beijing: People's Transportation Press, 2013.
- [12] 国家铁路局. 铁路路基设计规范: TB10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2016.
National Railway Administration. Code for Design of Railway Earth Structure: TB10001—2016[S]. Beijing: China Railway Press Co., Ltd., 2016.
- [13] GEO-SLOPE international Co., Ltd. Geo-Slope User's Manual[Z]. Calgary: Alberta, 2001.
- [14] 陈金锋, 宋二祥, 徐明. 强度折减有限元法在昆明新机场高填方边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 636-641, 703.
CHEN Jin-feng, SONG Er-xiang, XU Ming. Application of strength reduction FEM to stability analysis of high fill slope in Kunming new airport[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 636-641, 703.