



引文格式: 王振华, 邓辉, 张永军. 基于极限抗剪强度改进的压实填方边坡稳定性评价方法研究[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 262-270. DOI: 10.12401/j.nwg.2024046

Citation: WANG Zhenhua, DENG Hui, ZHANG Yongjun. Stability Evaluation Method and Protection Countermeasure of Compacted Fill Slope Based on Improvement of Ultimate Shear Strength[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 262-270. DOI: 10.12401/j.nwg.2024046

基于极限抗剪强度改进的压实填方边坡 稳定性评价方法研究

王振华¹, 邓辉², 张永军³

(1. 甘肃省自然资源规划研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 成都理工大学, 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 压实度是影响填方边坡稳定性的重要因素, 为了分析不同压实度下填方边坡的稳定性, 设计了不同压实度下填方边坡工况, 分析并建立了压实土体本构关系模型, 基于有限元强度折减理论, 分析了变形破坏趋势, 确定极限抗剪强度。采用 Bishop 方法计算土条两侧的作用力, 在不考虑土体侧向变形的情况下, 计算得出边坡稳定性系数和填土外加应力作用下导致的沉降变形值, 根据计算结果提出了填方边坡稳定性防护对策。结果表明: 所提出的分析方法能够准确分析出填方边坡变形情况, 有效降低了稳定性分析误差, 并且将其应用于实际填方边坡稳定性分析中, 具有实际应用意义。

关键词: 压实度; 填方边坡; 稳定性; 防护对策; 抗剪强度; 沉降变形

中图分类号: P55; TU4

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)04-0262-09

Stability Evaluation Method and Protection Countermeasure of Compacted Fill Slope Based on Improvement of Ultimate Shear Strength

WANG Zhenhua¹, DENG Hui², ZHANG Yongjun³

(1. Gansu Institute of Natural Resources Planning and Research, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Compaction degree is an important factor affecting the stability of the fill slope. In order to analyze the stability of the fill slope under different compaction degree, the working conditions of the fill slope under different compaction degree were designed, and the constitutive relationship model of the compacted soil was analyzed and established. Based on the finite element strength reduction theory, the deformation and failure trend were analyzed and the ultimate shear strength was determined. Using the Bishop method to calculate the forces on both sides of the soil strip, without considering the lateral deformation of the soil, the stability coeffi-

收稿日期: 2023-02-07; 修回日期: 2024-04-11; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 2020 年度中央财政自然灾害防治体系建设项目“兰州市黄土斜坡变形破坏机理及风险管控措施研究”(甘资财发[2020]16 号)资助成果。

作者简介: 王振华(1984-), 男, 高级工程师, 长期从事工程地质、地质灾害防治研究。E-mail: 956711249@qq.com。

cient of the slope and the settlement deformation value caused by the external stress of the fill soil were calculated. Based on the calculation results, stability protection measures for the fill slope were proposed. The results show that the proposed analysis method can accurately analyze the deformation of fill slopes, effectively reduce stability analysis errors, and apply it to the stability analysis of actual fill slopes, which has practical application significance.

Keywords: compaction; fill slope; stability; protection countermeasures; shear strength; settlement deformation

压实度是影响填方边坡稳定性的重要因素, 土壤固结压缩规律不仅与土壤类型、形态有关, 而且与边界条件、荷载形式有关。根据土壤固结压缩规律可知, 如果土壤发生应力改变, 土体体积就会随之改变, 影响填方边坡的稳定性, 从而引发的边坡失稳等灾害, 将对周边人民的生命财产安全造成一定威胁。因此, 分析不同压实度下填方边坡稳定性有着重要意义。

为了提高填方边坡稳定性分析结果的准确性, 诸多学者从不同角度出发提出了填方边坡稳定性评价的不同方法。唐亚明(2008)利用野外详细调查分析资料确定了斜坡可靠度的随机变量, 并通过统计矩法、几何法、一次二阶矩法、和蒙特卡洛模拟法计算了斜坡的可靠度和破坏概率。蒋辽等(2017)利用蒙特卡罗模拟法对填方边坡进行了可靠度评价和敏感性分析。陈东(2020)采用瑞典条分发和有限元仿真计算方法分析了高速公路下填方边坡的稳定性。代雪等(2021)采用 M-P 法、Bishop 法、强度折减法对填方边坡和直立边坡的稳定性进行分析研究。赵建祥等(2021)利用有限元计算和梯度回归树模型对仁遵高速填方边坡进行了稳定系数长期拟合预测。叶帅华等(2021)利用 PLAXIS 3D 建立了多级高填方边坡三维有限元模型, 研究了填料、坡度、填土边界、卸荷平台的改变对边坡稳定性的影响。叶志程等(2021)利用有限元强度折减法和非线性时程法, 分别对云南某边坡自然状态、地震工况、降雨工况下的填方边坡稳定性进行了分析。向文贤等(2022)考虑降雨入渗对填方边坡稳定性影响, 利用有限元软件分析了降雨入渗过程中填方边坡结构应力变化规律和稳定性变化规律。贺林林等(2023)利用不平衡推力法、简化 Bishop 条分发、有限元强度折减法对巫山神女峰机场填方边坡进行稳定性分析。

综上所述, 当前学者们关于填方边坡稳定性的已有研究方法较为单一且准确性欠佳, 鉴于此提出考虑不同压实度的填方边坡稳定性分析方法, 并建立应力应变曲线方程, 引用 Bishop 计算方法计算土条两侧的

作用力, 得到边坡稳定系数, 并计算沉降变形值, 用以分析填方边坡变形情况, 以期对不同压实度下填方边坡失稳做出解释, 为填方边坡防治提供理论依据。

1 基于极限抗剪强度改进的压实填方边坡稳定性计算方法

1.1 压实土体本构模型构建

传统的本构模型往往假设土体是无限可压缩的可塑性材料, 忽略了土体在压实过程中的变形和非线性, 导致计算结果与实际情况存在较大误差(高彦斌等, 2021; 吕江等, 2021; 周中等, 2022; 周亚东等, 2023)。因此, 笔者利用基于土力学原理的粘塑性应力应变模型, 充分考虑土体在高应力状态下的粘塑应变非线性特性, 通过土体在压实过程中的变形特性来描述压实土体的本构关系, 使得模型拟合结果更加真实和准确(Li et al., 2024; Peng et al., 2024; Xiao et al., 2024)。天然土壤主要由矿物微粒、土壤骨架和空气构成, 当土壤受到外力时, 可以将其视为孔隙内液体容积的改变, 在此计算中, 假定将单元土从饱和土中移出, 不考虑土的进入或进出; 但由于非饱和土的力学性质较为复杂, 依据土三相组分的关联关系, 结合状态面的计算方法, 建立应力应变曲线方程, 具体表达式为:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_1 (a + c\varepsilon_1)}{(a + c\varepsilon_1)^2} \quad (1)$$

式中: a 、 c 分别为曲线的常数、参数; ε_1 为原始的切线斜率。

在上述应力应变关系计算的基础上, 考虑粘塑性问题, 应力、应变关系是与时间相关的, 为此在基本变量中需要将时间变量考虑在其中, 在计算中将时间离散化方法求解, 计算填方边坡上的各种力学量(赵洪等, 2022; Parvaneh et al., 2022; Mohammad et al., 2023)。在求解过程中, 需要考虑粘塑性的应变正则能量, 采用粘塑性流动法则计算, 公式如下:

$$\varepsilon^{vp} = \gamma \Phi \left(\frac{f}{f_0} \right) \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (2)$$

式中： γ 为控制流动速率参数； f 、 f_0 分别为正常参考值、初始值； $\partial \sigma$ 、 ∂f 分别为分段函数。

通过上述过程构建了压实土体本构关系模型，为后续填方边坡稳定性分析提供基础依据。

1.2 极限抗剪强度的确定

在对极限抗剪强度计算前，需要考虑填方边坡土体的压实度。采用有限元强度折减理论，假定填方边坡不稳定滑动面为圆弧滑动面，考虑土条之间的相互作用力，以整个滑动面上的平均抗剪强度与平均剪应力之比来定义稳定安全系数衡量填方边坡稳定性(贾俊等, 2019; 王斌等, 2020; 刘畅等, 2020)。

先不假定滑动面和条间力的简化，对土体的屈服法则模拟分析，基于压实土体本构关系模型，进一步分析变形破坏趋势。将破坏准则表示为：

$$\tau_f = \varepsilon^{vp} + K \sigma_n \tan \varphi \quad (3)$$

式中： σ_n 为受力面上的法向应力值； φ 为土体的内摩擦角； K 为填方边坡土体的压实度。

在剪切面上，基于压实土体的应力应变曲线，此点土的安全系数是：

$$F = \frac{K \tau_f}{\tau} = \frac{K(c + \tan \varphi)}{\tau} \quad (4)$$

式中： τ_f 为土的抗剪强度； τ 为剪应力值。

假定在目前的时间内，不存在剪切破坏，而在土中的真实剪应力与作用强度是一样的，公式如下：

$$\tau = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{F} - c_m + \sigma \tan \varphi_m \quad (5)$$

式中： c_m 为消减后土的粘性； φ_m 为折减后土的内摩擦角。

根据以上可计算折减后抗剪强度指标，如下所示：

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi / F) \quad (6)$$

笔者主要研究的是黄土土体的填方边坡稳定性分析，黄土土体的折减系数的取值依据如表1所示：

表1 土层折减系数取值表

Tab. 1 Values of soil layer reduction coefficient

土层液化指数	液化土层深度(m)	折减系数
≤0.6	≤10	0
	10~20	1/3
0.6~0.8	≤10	1/3
	10~20	2/3
0.8~1.0	≤10	2/3
	10~20	1.0

在土层折减系数取值范围(表1)内，通过上述迭代计算，将土的强度参数逐渐降低，使结构达到极限状态，以确定极限状态下的参数值。

1.3 填方边坡稳定性评价方法的提出

在上述极限状态下参数值计算的基础上，分析填方边坡稳定性，在稳定性分析中，结构面力学参数是一个非常重要的参数，基于滑带土的内摩擦力与抗剪强度指标的关系，在对岩体及土壤进行稳定性分析时，假设破坏面中的土壤为破坏面，得到稳定安全系数，计算公式如下所示：

$$K_s = \frac{\sum R_i}{\sum T_i} \quad (7)$$

式中： K_s 为填方边坡稳定性系数(张文生等, 2019)； T_i 为第*i*个条块在切线上的反力参数； R_i 为第*i*个面上的抗滑力。

对上述参数进一步计算，表示为：

$$\begin{aligned} R_i &= (G_i + G_{bi}) \cos \theta_i + P_{wi} \sin(a_i - \theta_i) \\ T_i &= (G_i + G_{bi}) \sin \theta_i + P_{wi} \cos(a_i - \theta_i) \end{aligned} \quad (8)$$

式中： G_i 为第*i*个条块滑动面上岩土体的粘结强度标准值； G_{bi} 为第*i*计算条块滑动面的长度； θ_i 为第*i*个条块底面倾角，反倾时取负值； P_{wi} 为第*i*计算条块的动水压力值； a_i 为第*i*个条块地下反流线平均倾角。

在此基础上，对压缩沉降计算，在这一节中，先忽略土的横向变形，假设压缩层的厚度为*H*，土层的自重压力为*p*，沉降情况如下所示：

$$S = m_v \cdot \Delta p \cdot H \quad (9)$$

式中： m_v 为土的体积压缩系数。

采用 Bishop 计算方法计算土条两侧的作用力，使计算过程更加贴近实际情况。在计算过程中，对填方边坡条分处理，对每个条块的受力分析，通过力矩与力平衡计算，得到边坡稳定性系数的迭代公式：

$$F_s = \frac{K_s [G_i G_{bi} + N_i \tan \varphi_i]}{\sum G_i \sin a_i + \sin \theta_i} \quad (10)$$

式中： φ_i 为第*i*条块滑带土的内摩擦角标准值。

随着边坡稳定系数的下降，边坡稳定性也随之减弱，当稳定系数下降到一定值时，边坡就会发生破坏并产生位移(杨智勇等, 2019)。因此，确定边坡稳定系数后，明确边坡稳定系数的临界时，根据历史数据、现场监测资料等对现场进行实时监测，即可以在产生位移的时刻，计算边坡水平位移。但在工程实践中，由于地基土的自重和地基表面的外力共同作用，使地基产生附加应力，其强度随土体本身的性质而变化，

其本身的应力值已在上文中进行了计算, 因未考虑外加应力, 获得的稳定性分析结果不够准确, 因此还要考虑外加应力作用下导致的沉降变形情况, 受降雨和不同压实度的夯土工作影响, 填方边坡稳定性也产生了变化(韩文喜等, 2019; 薛强等, 2019; 任东兴等, 2022; 李海涛等, 2023)。考虑外加应力作用下导致的沉降变形情况, 将计算公式表示为:

$$S_{\infty} = S_d + S_c + S_s \quad (11)$$

式中: S_d 、 S_c 、 S_s 分别为瞬间沉降、主固结沉降、次固结沉降。瞬时沉降是指在加载后很短的一段时间内所发生的沉降, 而主固结沉降是指在地基受压后, 由于土壤中的孔隙水被清除而引起的。考虑上述因素后, 计算填土的压密下沉量, 公式如下所示:

$$s = \frac{h^2}{C} \quad (12)$$

式中: h^2 为填土的高度; C 为初始高度值。

此外, 还需要考虑在车辆荷载下, 产生的累积沉降值, 公式如下所示:

$$s = N_i \int_{\sigma_o}^{\sigma_v} i(\sigma) p(\sigma) d\sigma \quad (13)$$

式中: σ_v 、 σ_o 分别为累积应力变动的极限值; $i(\sigma)$ 、 $p(\sigma)$ 分别为平均累积应变参数; N_i 为某一应力水平的重复加载次数。

通过上述过程考虑多种情况下影响填方边坡稳定性的因素, 以此完成填方边坡稳定性分析。

2 不同压实度填方边坡稳定性分析评价

为验证所提出的不同压实度下填方边坡稳定性分析方法的有效性, 以兰州市青白石片区东北部某建设场地为例进行填方边坡稳定性分析, 并将基于 Midas-GTS/NX 的方法、某高速公路下填方边坡稳定性分析方法和文中所提出的方法计算结果与实际值进行对比分析。

(1) 基于 Midas-GTS/NX 的方法是一种常用的填方边坡稳定性分析方法, 它可以通过有限元软件 Midas-GTS/NX 对边坡稳定性进行分析和评估。该方法的优点包括可以考虑材料本构关系、土-结构相互作用、多种边界条件、非线性分析等因素, 因此可以提高边坡分析的精度和准确性。其缺点主要在于需要掌握 Midas-GTS/NX 软件的使用技巧, 对于不熟悉该软件的使用者来说可能会存在操作难度大的问题。

(2) 某高速公路下填方边坡稳定性分析方法是一种经验性分析方法, 主要依据填方边坡所处的地质条件、土质特性、填方边坡高度等因素, 通过经验公式和实测资料进行评估。该方法的优点是简单易用, 不需要过多的技术支持和软件系统, 因此在实际中比较常用。其缺点在于边坡分析结果较为粗略, 对于复杂地质条件和土质特性的填方边坡可能存在较大误差。

(3) 笔者所提出的方法主要是一个针对压实度不同条件下的填方边坡稳定性分析, 通过对压实度不同条件下的填方边坡进行有限元分析和计算, 得到填方边坡在不同压实度下的稳定性指标和变化规律。该方法的优点在于可以对比分析填方边坡在不同压实度下的稳定性差异, 更为细致和全面地了解填方边坡在现实工程中的稳定性。其缺点主要在于需要精密的计算资源, 对软硬件条件有较高要求。

总体而言, 基于 Midas-GTS/NX 的方法具有较高的分析精度和准确性, 但操作难度较大。而某高速公路下填方边坡稳定性分析方法简单易用, 但精度相对较低。本研究所提出的方法可以更加全面地了解填方边坡在现实工程中的稳定性差异, 且较某高速公路下填方边坡稳定性分析方法的精度、准确度要高, 较基于 Midas-GTS/NX 的方法操作方式更简便, 但存在对计算资源要求较高的问题。

2.1 工程概况

此次研究以兰州市青白石片区东北部某建设场地为例, 该场地属于兰州市低丘缓坡区“削山造地”项目。目前一期填方工程已全部施工完成, 面积 4.8 km², 场地由上部削方区和下部填方区组成, 填方边坡主要分布于场地下部大浪沟左侧沟坡支沟中(图 1)。假定填方土体为均质马兰黄土, 受时间所限, 只考虑该场地压实黄土。

填方边坡坡形因素的变化范围为坡高 30~150 m, 坡率 1/0.5~1/1.20, 填方边坡原始沟坡坡度变化范围以现场调查的 45°~70°设定。该填方边坡水平距离较短, I、III、V 号剖面线(图 2)分布较密, 地质条件简单, 地质特征较单一。

填方边坡计算参数(表 2)采取现场土工试验值, 将其作为 FEFLOW 2023 v8.0 数值模拟工况的基础对象, 分别采用 3 种方法对填方边坡稳定性分析。

2.2 不同压实度下最大竖向沉降分析

基于 I 号剖面, 分别用 3 种方法分析不同压实度下的填方边坡稳定性, 该填方边坡最大竖向沉降情况

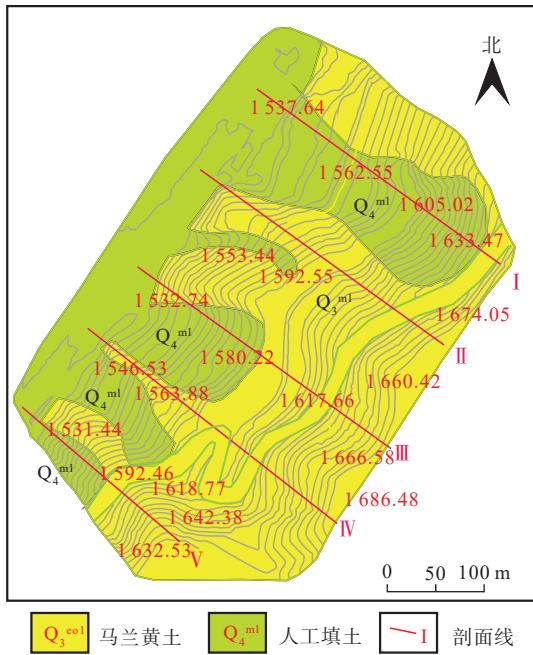


图1 建设场地填方边坡工程地质平面图
Fig. 1 Geological plan of construction site filling slope engineering

(图3)显示,实际的沉降值最高1400 mm。其中某高速公路下边坡稳定性分析方法结果曲线呈现结果为,压实度在94%~96.5%范围内,最大竖向沉降值随着压实度的增长急剧减少,最大沉降值约减少360 mm,压实度在96.5%~98%范围内,最大竖向位移随着压实度增大而稳定减少,最大沉降值约减少100 mm,压实度在98%~99%范围内,最大竖向沉降值随着压实度的增长而趋于稳定,最大沉降值约减少70 mm,与实际值的最大误差达到220 mm。基于Midas-GTS/NS方法的结果曲线和实际误差较大,在压实度为99%时,误差达到最大值,为180 mm,本研究计算结果显示,最大竖向位移值与实际值基本保持一致,误差小于20 mm,误差较小,在精度和稳定性分析中,笔者所研究的计算方法均优于对比的两种计算方法。

同时通过上述分析发现,在不同压实度下,压实度越大,填方边坡的沉降值越小,所提出方法能够准确分析出这种趋势,具有较好的应用效果。

2.3 不同压实度下填方边坡水平最大负位移对比

基于Ⅲ号剖面,分析3种方法在不同压实度下填方边坡水平最大负位移上的分析结果(图4)表明,其中某高速公路下边坡稳定性分析方法曲线呈现结果为:压实度在94.5%时,开始出现误差,压实度在94.5%~97%范围内,最大负位移值随着压实度的增长而减少,最大负位移值达到100 mm,相较于真实值

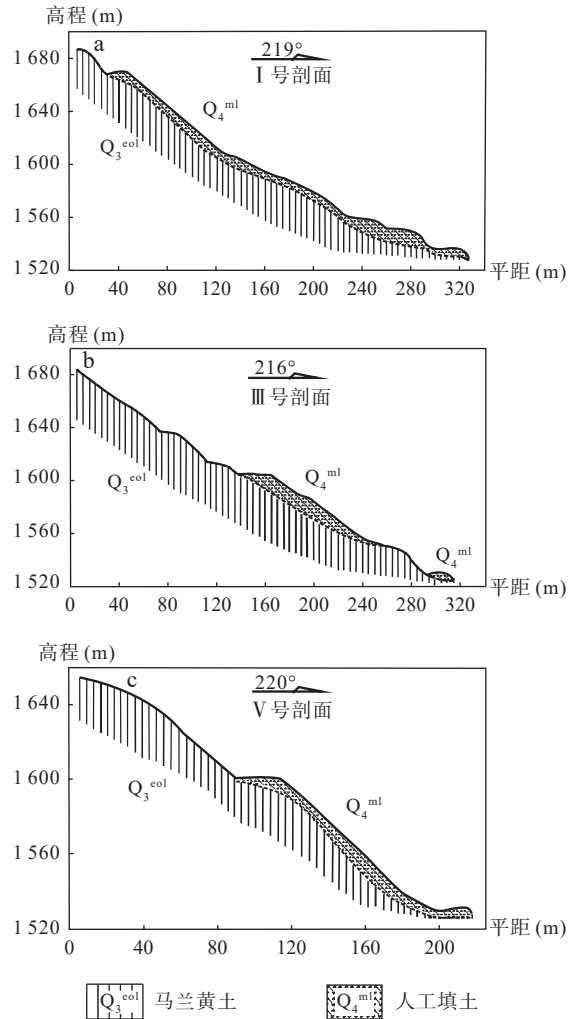


图2 场地填方边坡工程地质剖面图
Fig. 2 Engineering geological profile of site fill slope section

表2 兰州市某建设场地填方边坡参数

Tab. 2 Filling slope parameters of a construction site in Lanzhou

序号	指标	参数
1	饱和渗透系数 (m/h)	0.108
2	饱和含水率 (%)	5.21
3	残余含水率 (%)	0.084
4	土体粘结强度标准值 (kPa)	45
5	暴雨入渗后内聚力 (kPa)	26
6	暴雨入渗后内摩擦角 (°)	25.3
7	暴雨入渗后容重 (KN/m ³)	17.6
8	天然容重 (KN/m ³)	13.5
9	土体底面倾角 (°)	45
10	地下水反流线平均倾角 (°)	32
11	填土高度 (m)	0~120
12	条块滑动面的长度 (m)	315

误差达到65 mm,压实度在97%~99%范围内,最大负位移值随着压实度增大而稳定减少。基于Midas-

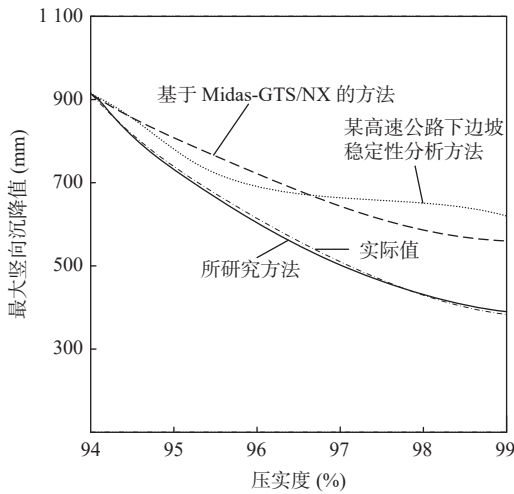


图3 不同压实度下最大竖向沉降值对比

Fig. 3 Comparison of maximum vertical settlement values under different compaction degrees

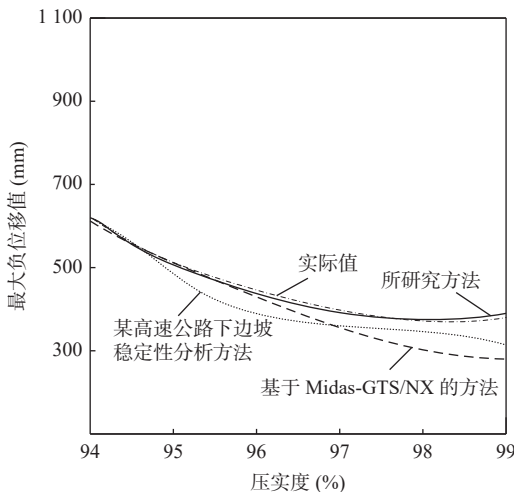


图4 不同压实度下填方边坡水平最大负位移值对比

Fig. 4 Comparison of maximum horizontal negative displacement of fill slope under different compaction degrees

GTS/NS 方法结果曲线呈现为, 在压实度为 95.8% 时计算结果和实际值开始出现明显误差, 随着压实度的增大计算结果和实际误差也随之增大, 在压实度为 99% 时, 误差达到最大值 175 mm。本研究方法结果显示, 最大负位移与实际值基本保持一致, 误差小于 20 mm, 在精度和稳定性分析中, 本研究方法都优于对比的两种计算方法。

2.4 不同压实度下填方边坡水平最大正位移对比

基于 V 号剖面, 将所提出的方法和另两种方法与实际的最大正位移值对比, 对比结果 (图 5) 显示水平位移变化趋势与沉降值趋势相同, 但是小于沉降值,

所以通过上述分析发现, 相对于水平位移来说, 变形主要以竖向沉降为主。将所研究方法与实际值对比能够发现, 所研究方法分析出的最大正位移值与实际值的误差小于 30 mm, 能够较为准确地分析出变化情况, 而另外两种方法的误差值大于 100 mm。

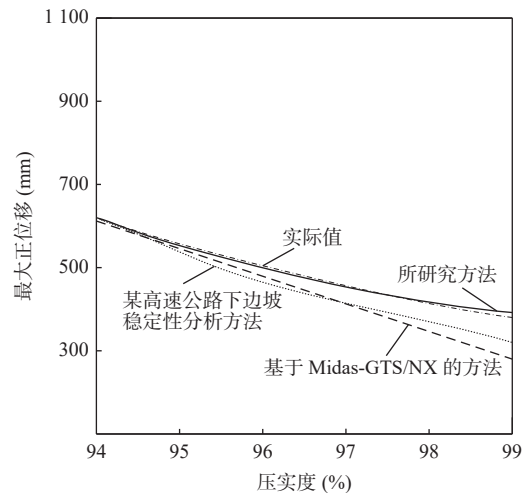


图5 不同压实度下填方边坡水平最大正位移对比

Fig. 5 Comparison of maximum horizontal positive displacement of fill slope under different compaction degrees

3 实例分析

为验证所提出的不同压实度下填方边坡稳定性分析方法的有效性, 将兰州市青白石片区东北部某建设场地作为研究对象, 进行不同压实度下的填方边坡稳定性分析。尽管中国现行规范要求填方土体压实度不小于 90%, 但现场取样测定, 该场地填方黄土压实度 82%, 故填方黄土压实度设定为 80%、90% 和 95% 等 3 个量级。

压实度 80% 的黄土填方边坡模型计算结果 (图 6) 显示, 不同工况下的不稳定和欠稳定填方边坡的最危险滑面均贯穿整个填方边坡, 均从坡脚剪出, 滑体厚约 4~10 m。较大坡率或马道宽度较小时, 易滑面在填土层内发育; 反之, 易滑面中段沿填土与沟坡接触面发育。

压实度增大至 90% 后, 填方边坡的破坏形式 (图 7) 与压实度 80% 的填方边坡明显不同, 尽管不稳定和欠稳定填方边坡的易滑面也均为贯穿整个填方边坡、从坡脚剪出, 但是滑面后部穿过原状黄土, 前部从填土中切出, 失稳填方边坡规模明显增大。

压实度增大至 95% 后, 填方黄土的强度显著高于原状黄土 (图 8), 尽管不稳定和欠稳定填方边坡的易

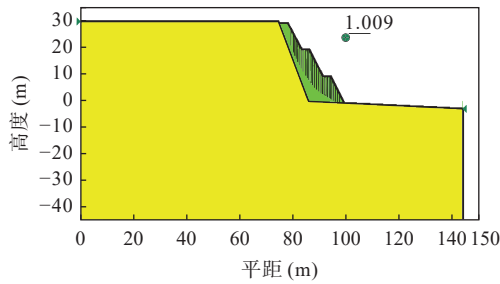


图6 压实度80%黄土填方边坡

Fig. 6 Loess fill slope with 80% compaction

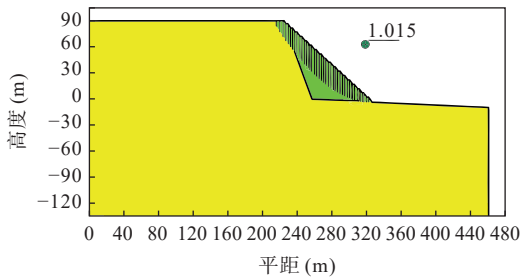


图7 压实度90%黄土填方边坡

Fig. 7 Loess fill slope with a compaction degree of 90%

滑面也均贯穿整个填方边坡、从坡脚剪出,但是易滑面延伸至黄土层内可能性更大,甚至完全在黄土层内发育,失稳填方边坡规模可能进一步增大。

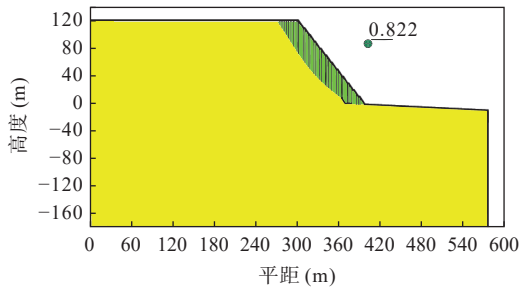


图8 压实度95%黄土填方边坡

Fig. 8 Loess fill slope with a compaction degree of 95%

当黄土压实度不同时,稳定和欠稳定填方边坡坡形区别明显。相同坡高条件下,黄土压实度越高,在较大沟坡坡度、较大坡率、较高台阶和较窄马道范围内,稳定边坡较多、欠稳定边坡较少,这与较高压实度黄土具有较大密度与较高抗剪强度参数有关。但是基于兰州市青白石片区东北部某建设场地压实黄土填方边坡的稳定性评价结果显示,当压实度90%时,填方黄土边坡稳定性受原坡马兰黄土控制。所以进行黄土边坡填方设计时,还需考虑压实黄土与原状黄土性质的差异,及时采用相应的失稳防护对策。

4 结论

(1)基于极限抗剪强度改进的压实填方边坡稳定性评价方法,所计算出的最大竖向沉降值与实际值(1400 mm)相差较小,误差小于20 mm;基于Midas-GTS/NS方法的结果曲线和实际误差较大,在压实度为99%时,误差达到最大值为180 mm;计算结果验证了所提出的改进计算方法的有效性和准确性。

(2)随着填方土体压实度的提高,最大竖向沉降值、最大负位移值、最大正位移值均逐渐减小,说明填方土体压实度的提高能够有效降低自重引起的压缩沉降变形,提升填方边坡的稳定性。

(3)不同压实度下,填方边坡的破坏形式和失稳规模存在显著差异。随着压实度的增加,填方边坡失稳规模逐渐增大,且易滑面延伸至黄土层内的可能性也增大。

(4)黄土填方边坡的稳定性与原状黄土的性质有关,进行设计时需要综合考虑压实黄土与原状黄土性质的差异,制定合理的防护对策。实际工程中,填方边坡的变形和失稳是一个动态过程,可以结合实时监测技术对填方边坡的稳定性进行动态分析和预测。

参考文献(References):

- 陈东. 某高速公路下填方边坡稳定性分析及支护方案研究[J]. 公路工程, 2020, 45(1): 114-116.
- CHEN Dong. Study on Stability Analysis and Support Scheme of Lower Slope of a Highway[J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 114-116.
- 代雪, 张家明. 某场地边坡稳定分析方法的比较研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 119-124.
- DAI Xue, ZHANG Jiaming. Comparative study on slope stability analysis methods at a site[J]. China Safety Science and Technology, 2021, 17(11): 119-124.
- 高彦斌, 罗文康, 骆佳樑, 等. 两种固结状态下软土的三轴不排水剪切模量非线性及对比[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 64-67.
- GAO Yanbin, LUO Wenkang, LUO Jialiang, et al. Nonlinearity and comparison of triaxial undrained shear modulus of soft soil under two consolidation states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 64-67.
- 韩文喜, 张日华, 王昊. 降雨和地震对高填方边坡稳定性的影响研究[J]. 水力发电, 2019, 45(12): 31-36.

- HAN Wenxi, ZHANG Rihua, WANG Hao. Study on the Influences of Rainfall and Earthquake on the Stability of High Fill Slope[J]. *Water Power*, 2019, 45(12): 31–36.
- 贺林林, 钱进, 赵陈雨, 等. 巫山神女峰机场高填方边坡稳定性分析方法研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(5): 646–651+703.
- HE Linlin, QIAN Jin, ZHAO Chenyu, et al. Study on stability analysis method of high fill slope of Wushan Shennufeng Airport[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 46(5): 646–651+703.
- 贾俊, 张茂省, 冯立, 等. 流态破坏型黄土滑坡滑带土临界特征[J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 136–147.
- JIA Jun, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Critical characteristics of soil in sliding zone of fluid destructive loess landslide[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 136–147.
- 蒋辽, 喻兴, 刘林洁, 等. 基于蒙特卡罗模拟的填方边坡可靠度分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(S2): 693–697.
- JIANG Liao, YU Xing, LIU Linjie, et al. Reliability analysis of fill slope based on Monte Carlo simulation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(S2): 693–697.
- 李海涛, 任光明, 范荣全, 等. 川北某变电站堆积体边坡稳定性及加固措施分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(4): 454–464.
- LI Haitao, REN Guangming, FAN Rongjin, et al. Analysis on stability and reinforcement measures of accumulation body slope in a substation in north Sichuan[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50(4): 454–464.
- 刘畅, 张平松, 杨为民, 等. 税湾地震黄土滑坡的岩土动力特性及其稳定性评价[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 176–185.
- LIU Chang, ZHANG Pingsong, YANG Weimin, et al. Geotechnical dynamic characteristics and stability evaluation of loess landslide in Shiwan earthquake[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 176–185.
- 吕江, 赵晖, 杨杓, 等. 山区水下填方路堤边坡的稳定性分析[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2021, 38(2): 151–156.
- LV Jiang, ZHAO Hui, YANG Shao, et al. Slope stability of underwater fill embankment in mountainous area[J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2021, 38(2): 151–156.
- 任东兴, 薛鹏, 叶飞, 等. 降雨入渗条件下黏性土基坑浅层边坡稳定性分析[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(2): 204–212.
- REN Dongxing, XUE Peng, YE fei, et al. Shallow slope stability analysis of cohesive soil foundation pit under rainfall infiltration [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2022, 49(2): 204–212.
- 唐亚明. 基于可靠度的黄土斜坡稳定性分析[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1217–1222.
- TANG Yaming. Loess slope stability analysis based on reliability[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1217–1222.
- 王斌, 熊宗瑜. 黄土高填方路堤沉降观测及有限元分析[J]. *港口技术与工程*, 2020(5): 17–22.
- WANG Bin, XIONG Zongyu. Settlement Observation and Finite Element Analysis of Loess High Fill Embankment[J]. *Technology & Management Of Port & Harbor Engineering*, 2020(5): 17–22.
- 薛强, 张茂省, 毕俊攀, 等. 开挖型黄土边坡剥落侵蚀作用及变形破坏研究[J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 158–166.
- XUE Qiang, ZHANG Maoxing, BI Junbo, et al. Exfoliation Erosion and Deformation Failure of Excavated Loess Slope[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 158–166.
- 向文贤, 黎应书, 许万忠, 等. 降雨入渗条件下预应力锚索加固填方边坡稳定性分析[J]. *中国煤炭地质*, 2022, 34(1): 69–74.
- XIANG Wenxian, LI Yingshu, XU Wanzhong, et al. Prestressed Cable Anchor Reinforced Slope Stability Analysis under Rainfall Penetration Condition[J]. *Coal Geology of China*, 2022, 34(1): 69–74.
- 杨智勇, 李典庆, 曹子君, 等. 考虑土质边坡多失效模式的区域概率风险分析方法[J]. *工程力学*, 2019, 36(5): 216–225.
- YANG Zhiyong, LI Dianqing, CAO Zijun, et al. Region probability method for soil slope risk assessment involving multiple failure modes[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(5): 216–225.
- 叶帅华, 张玉巧, 房光文. 黄土高填方边坡的稳定性影响因素及其变形规律[J]. *兰州理工大学学报*, 2021, 47(3): 120–126.
- YE Shuaihua, ZHANG Yuqiao, FANG Guangwen. Influencing factors and deformation law of stability of loess high fill slope[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2021, 47(3): 120–126.
- 叶志程, 杨溢, 左晓欢, 等. 基于 Midas-GTS/NX 的不同工况下某填方边坡稳定性分析及加固措施[J]. *化工矿物与加工*, 2021, 50(5): 16–19.
- YE Zhicheng, YANG Yi, ZUO Xiaohuan, et al. Stability analysis of a slope with reinforcement based on Midas-GTS/NX under different working conditions[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2021, 50(5): 16–19.
- 赵洪, 谢友均, 龙广成, 等. 冲击荷载作用下含黏结界面的混凝土破坏特征与应力应变分析[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 59(9): 1208–1217.
- ZHAO Hong, XIE Youjun, LONG Guangcheng, et al. Mechanical Characteristics and Stress and Strain Analysis of Concrete with Bonding Interface Under Impact Load[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2022, 59(9): 1208–1217.

- 赵建祥, 毕鹏飞, 惠亚强. 降雨作用下高填方边坡失稳机制研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(S2): 421-429.
- ZHAO Jianxiang, BI Pengfei, HUI Yaqiang. Study on instability mechanism of high fill slope under rainfall[J]. Water Resources and Hydropower Technology (Chinese and English), 2021, 52(S2): 421-429.
- 张文生, 罗强, 蒋良滩, 等. 小样本岩土参数下考虑矩估计偏差的土质边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 315-324.
- ZHANG Wensheng, LUO Qiang, JIANG Liangwei, et al. Reliability analysis of soil slope considering moment estimation bias using small sample geotechnical param[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 315-324.
- 周中, 李繁, 鲁四平. 轻质土换填路堤地基侧向变形非线性算法研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(11): 12-18.
- ZHOU Zhong, LI Fan, LU Siping. Research on nonlinear Algorithm of lateral deformation of lightweight soil replacement embankment[J]. Journal of Railway Engineering, 2022, 39(11): 12-18.
- 周亚东, 李龙辉, 陈思源. 饱和土一维大变形非线性热固结模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2306-2314.
- ZHOU Yadong, LI Longhui, CHEN Siyuan. One-dimensional non-linear thermal consolidation model of saturated soil with large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2306-2314.
- Li Kaiqi, Yin Zhenyu, Zhang Ning, et al. A PINN-based modelling approach for hydromechanical behaviour of unsaturated expansive soils[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 169: 106174.
- Mohammad Hashem Bathayian Seyed, Maleki Mohammad. Kinematic hardening based coupled elastoplastic-viscoplastic model for describing time-dependent behavior of soils subjected to non-monotonic loadings[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 105602.
- Parvaneh Seyed Milad, Foster Craig D, Chi Shengwei. A hardening/softening viscoplastic model for large deformation of soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2022, 46(10): 1895-1918.
- Xiao Yang, Liu Shuang, Shi Jinquan, et al. Temperature-Dependent SWCC Model for Unsaturated Soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(5): 04024071.
- Peng Yu, Yin Zhenyu, Gao Fuping. Micromechanical analysis of pipeline-soil interaction in unsaturated granular soil undergoing lateral ground movement[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 169: 106181.