

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221024001

文章编号: 1672-9331(2023)03-0079-12

引用格式: 马云峰, 田永辉, 刘安龙, 等. 黄土沟壑区填方地基工后沉降控制因素敏感性分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(3): 79-90.

Citation: MA Yunfeng, TIAN Yonghui, LIU Anlong, et al. Sensitivity analysis of control factors on post construction settlement of high fill embankment in loess gully region [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(3): 79-90.

黄土沟壑区高填方地基工后沉降控制因素 敏感性分析

马云峰¹, 田永辉², 刘安龙¹, 逯金文², 朱才辉^{2,3}

(1. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;
3. 陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心, 陕西 西安 710068)

摘要:【目的】研究不同控制因素对黄土沟壑区高填方地基工后沉降的敏感性, 为高填方工程的设计施工提供科学依据。【方法】通过室内试验研究第四纪晚更新世(Q_3)黄土的修正剑桥模型参数随竖向荷载、含水率、压实度的变化规律, 并采用 PLAXIS 数值分析方法对影响高填方地基工后沉降的因素的敏感性进行对比分析。【结果】 Q_3 黄土的修正压缩指数、修正回弹系数和修正蠕变指数均随竖向荷载和含水率的增大呈先增大后减小的趋势, 随压实度的增大呈线性增长趋势; 填料的含水率、压实度与填方高度对高填方地基的工后沉降影响较大, 沟谷底部宽度、坡度、原地基厚度、填土速率、桩长、桩间距及桩径等因素对其影响较小。【结论】黄土沟壑区高填方工程应尽量降低填方设计高度, 控制填料含水率, 使其接近最优含水率, 且宜选在黄土层厚度不大、沟谷坡度大于 75° 、沟谷底部宽度小于 100 m 的区域。

关键词: 黄土沟壑区; 高填方地基; 工后沉降; 敏感性分析; 控制因素; Q_3 黄土

中图分类号: TU444

文献标志码: A

0 引言

近年来, 西北黄土沟壑区的高填方工程建设及其带来的岩土工程问题已成为研究的热点。如何减小黄土高填方的工后沉降, 提高填挖方边坡的整体稳定性, 避免高填方地基工程沉降带来的环境灾害尤为重要, 这对高填方工程的设计施工及解决特殊土工程的长期变形及稳定性问题带来了前所未有的挑战。

为了深入探讨黄土沟壑区高填方的长期变形问题, 诸多学者结合工程实际, 采用原位测试、经验公式、模型试验等方法对高填方地基工程沉降进行了预测研究^[1-3]。王鹏等^[4]将两种曲线模型组合形成 Logistic-双曲线预测组合模型, 结合工程

监测试验较精准地预测了高填方的最终沉降。梁忠豪等^[5]通过 PSO-BP 神经网络算法系统地分析了高温损伤、轴压对黄砂岩蠕变变形特征、蠕变强度、蠕变速率的影响, 研究了在高温作用后黄砂岩的蠕变强度及变形特征。朱建民等^[1]建立了黄土高填方工程 GA-BP 神经网络预测模型, 分别对曲线形态呈“J”形和“S”形的黄土高填方场地的工后沉降进行预测。郑建国等^[2]使用复合型岩土离心试验机开展黄土高填方地基沉降模型试验, 模拟沟谷地形中填筑体施工期和工后沉降过程, 认为提高压实度、降低施工速率、控制填方高度均可显著减小填筑体的工后沉降。于永堂等^[3]对陕北某沟谷状黄土高填方工程进行孔隙水压力监测和分析, 认为孔隙水压力的增长和消散主要受地下水位和填土荷载的影响, 且施工期的孔隙水压力与

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2022-11-07; 接受日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52279110); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-197、2021SF2-02); 陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心开放性课题(2022KT-01)

通信作者: 朱才辉(1983—)(ORCID: 0000-0002-2601-094X), 男, 教授, 主要从事黄土力学与工程等方面的研究工作。

E-mail: anderth123@163.com

填土荷载成近似线性关系。吴开健^[6]以石化产业园区某软土地基处理工程为实例,基于地基工后沉降实测数据,认为 Asaoka 法适用于大型软基处理工程的工后沉降预测。陈伟航等^[7]基于双向长短期记忆网络(Bi-LSTM)的路基沉降预测技术,采用 Akima 法对路基工后沉降进行预测并将其与观测数据对比分析,发现该方法可将预测的误差控制在 1.04% 以内。上述方法均对实际工程的设计施工提出了宝贵的参考经验。

此外,也有相关学者采用室内试验、数值分析、理论分析等方法探索了黄土高填方地基工程沉降^[8-15]。高英等^[8]通过采用单线法和扫描电子显微镜、压汞仪分别对黄土外部变形和内部结构特征进行研究,分析了黄土内部结构与宏观湿陷变形的相关性。ZHU 等^[9]以某高填方机场试验段为例,提出了黄土的 Mod-Burgers 蠕变模型来反映原状和重塑黄土的长期变形特征,基于数值分析法探讨了高填方地基工程沉降的影响因素,并提出了相应的控制措施。DING 等^[10]基于室内试验建立了高围压和增湿条件下黄土的四元件非线性黏塑性蠕变模型,并将其应用于某黄土边坡的长期变形问题的研究中。王保林等^[11]、何忠明等^[12]采用饱和-非饱和渗流和稳定性分析理论,建立了多层顺层软弱夹层边坡数值分析模型,对该类黄土边坡在降雨入渗条件下的渗流特性、稳定性以及影响因素敏感性进行了分析。朱文波等^[13]通过对不同围压条件下的软黏土进行卸荷蠕变试验以及吸力式沉箱基础长期抗拔试验,分析了沉箱底部土体卸荷蠕变特性以及吸力式沉箱基础长期抗拔承载特性。HUANG 等^[14]、黄盛锋等^[15]采用灰色关联分析法,分析了填方区卸载平台宽度、土体内摩擦角、黏聚力、弹性模量、泊松比、剪胀角等因素对高填方边坡稳定性的敏感性,为高填方边坡的设计提供了科学参考。

综上所述,关于黄土沟壑区高填方地基长期变形预测方法及高填方边坡长期稳定影响因素方面的研究,已取得了丰富的成果。目前,对于黄土高填方地基长期变形的各影响因素及其敏感性分析并不全面且缺乏系统的研究,仅单纯对黄土高填方地基工程沉降的影响因素或敏感性进行了研究分析,且没有针对具体的地形地貌(如坡度、沟谷底部宽度等因素)进行系统性的研究。本文以陕北某煤油气资源综合利用项目为背景,针对该

项目存在的高填方地基工后沉降影响因素及控制措施问题展开研究。根据室内试验,进一步探讨不同初始条件下原状及重塑黄土在单轴压缩试验下的长期变形特征,并采用数值分析方法对影响黄土高填方地基工后沉降的因素进行敏感性分析,得出各因素对黄土高填方地基工程沉降的影响程度。该研究对于高填方工程在设计施工中合理控制各影响因素具有重要的工程实践意义。

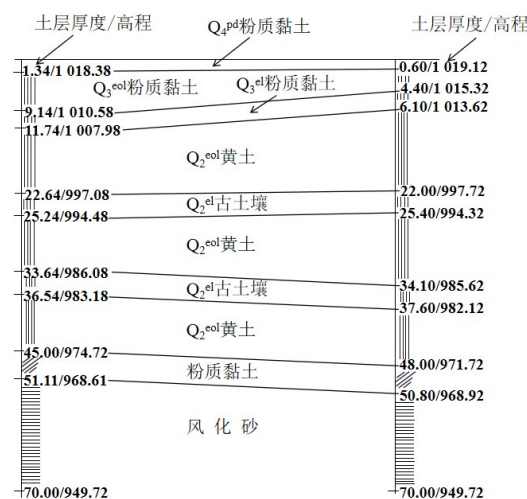
1 试验段 Q_3 黄土的力学特性试验

1.1 工程背景

本文研究对象为拟建的陕北某煤油气资源综合利用项目,其工程地质条件如图 1 所示。该项目所处位置地貌单元属黄土高原区斜坡沟壑地带前缘,如图 1(a)所示。据勘探揭露,该场地地层自上而下依次为:耕植土、 Q_3 黄土、第四纪中更新世(Q_2)古土壤、粉质黏土、风化砂,其地质剖面如



(a) 典型地形地貌



注: Q_4^{pd} 为第四系耕土, Q_3^{col} 为第三系风积土, Q_3^{el} 为第三系残坡积层土, Q_2^{col} 为第二系风积土, Q_2^{el} 为第二系残坡积层土。

(b) 典型地质剖面图(单位: m)

图 1 工程地质条件

Fig. 1 Engineering geological condition

图1(b)所示。拟建场地平整后形成挖方区和填方区,因填土体和原地基土工程性质差异明显,高填方工程结束后,该场地工后沉降及差异沉降将较为明显。因此有必要开展不同设计方案下黄土高填方地基的工后沉降规律,为制定控制措施提供科学参考。

表1 Q₃黄土物理指标
Table 1 Typical physical properties of the Q₃ loess

天然含水率 $w/\%$	最优含水率 $w_{op}/\%$	天然密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最大干密度 $\rho_{d,max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	土粒比重 G_s
10.7	19.5	1.26	1.68	1.14	25.2	30.7	21.5	2.71

1.3 试验方案

为了研究Q₃黄土在不同压实度和含水率下原状土和重塑土的长期变形规律,本试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的相关要求进行制备试样,具体试验方案如下:对原状和重塑Q₃黄土在不同轴向荷载、压实度和含水率下开展一维长期压缩试验。其中,轴向荷载*P*分别设置为50、100、200、400、800、1 200、1 600、2 000 kPa(最大荷载设计与本次数值分析法需要的填方厚度120 m下的竖向荷载量有关);压实度*k*分别设置为80%、83%、85%、90%、93%、96%(填土压实度的试验方案设计参数与填土压实度的设计指标及工程实际中填土不均匀性有关);含水率主要包括:干燥条件下含水率*w_d*、塑限含水率*w_p*、最优含水率*w_{op}*、液限含水率*w_L*和饱和含水率*w_s*等(含水率方案主要以上述5种含水率为目标进行配置),试验方案见表2。

表2 Q₃黄土一维压缩试验方案
Table 2 The 1-D compression test schemes of the Q₃ loess

黄土类型	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$k/\%$	含水率/%				
			w_d	w_p	w_{op}	w_L	w_s
原状	1.26		10、13、16、19.5、25、28、32				
重塑	1.34	80	10	15	19.5	25	37.5
	1.39	83	10	15	19.5	25	34.8
	1.43	85	10	15	19.5	25	33.1
	1.51	90	10	15	19.5	25	29.2
	1.56	93	10	15	19.5	25	27.1
	1.61	96	10	15	19.5	25	25.1

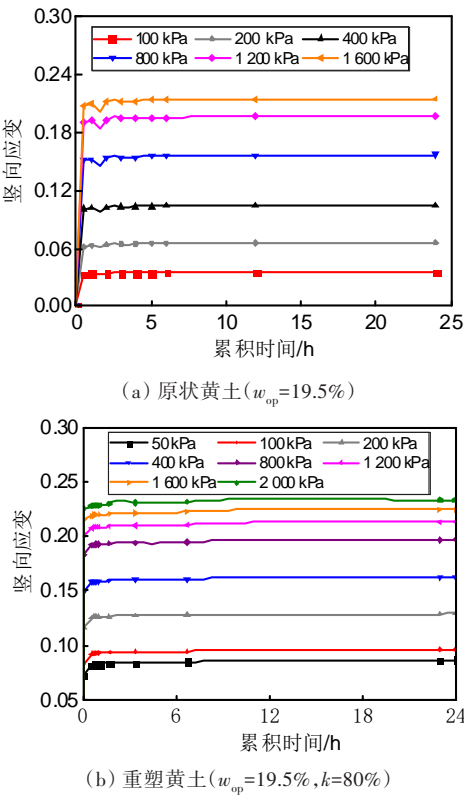
1.2 试验材料

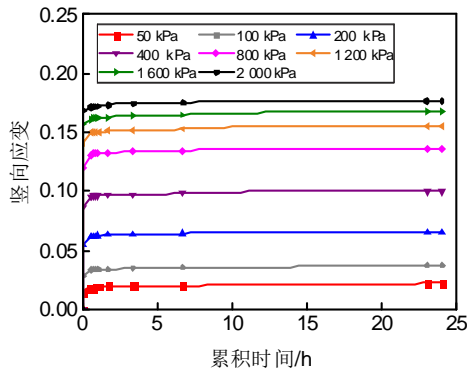
本高填方工程中填筑体填料及原地基表层地基土主要是Q₃黄土,Q₂黄土是主要的持力层,填筑体及原地基的长期变形主要与Q₃黄土的力学性质有关。本试验土样取土深度为地表以下3~4 m,通过室内试验得到原状Q₃黄土的物理指标,见表1。

2 试验结果分析

2.1 试验段Q₃黄土的长期压缩变形特性

由于试验方案较多,在此仅展示最优含水率为19.5%及压实度为80%、90%情况下的原状黄土和重塑压实黄土的轴向应变-时间曲线,如图2所示。由图2可知,原状及重塑黄土的应变-时间曲线均呈倒“L”形,即加载瞬间应变快速增长,随后进入长期变形阶段。在最优含水率状态下,压实度为80%的Q₃黄土压缩稳定后总轴向应变比压实度为90%下的略大;重塑黄土稳定轴向应变与原状黄土稳定轴向应变规律一致。



(c) 重塑黄土($w_{op}=19.5\%$, $k=90\%$)图2 Q_3 黄土应变-时间曲线Fig. 2 Strain-time curves of the Q_3 loess

2.2 蠕变参数的获取

在堆载地基工程中,常采用考虑时间效应的黏弹塑性模型来描述土体在压缩状态下的长期变形效应,已有研究表明,在修正剑桥模型中引入蠕变指数也可实现这一过程。修正剑桥模型的基本参数为:修正压缩指数 λ^* 、修正回弹系数 κ^* 、修正蠕变指数 μ^* 。以往的经验表明, λ^* 主要与土体在单轴压缩状态下的压缩模量 E_s 、压缩指数 C_c 存在直接关系^[16],可采用下式表示:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1 + e_0} = \frac{C_c}{2.3(1 + e_0)} = \frac{P}{E_s} \quad (1)$$

式中: λ 为压缩指数; P 为轴向荷载,kPa。

κ^* 、 μ^* 与 λ^* 存在一定的经验关系,与压缩指数 C_c 、次固结系数 C_α 也存在函数关系,具体见式(2)、(3)所示。

$$\begin{cases} \kappa^* \approx \frac{\lambda^*}{5 \sim 10} \\ \mu^* = \frac{C_\alpha}{2.3(1 + e_0)} \approx \frac{\lambda^*}{15 \sim 30} \end{cases} \quad (2)$$

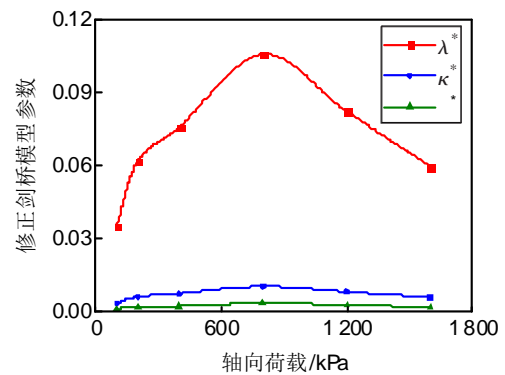
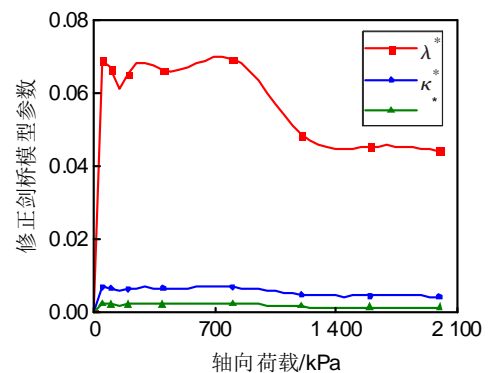
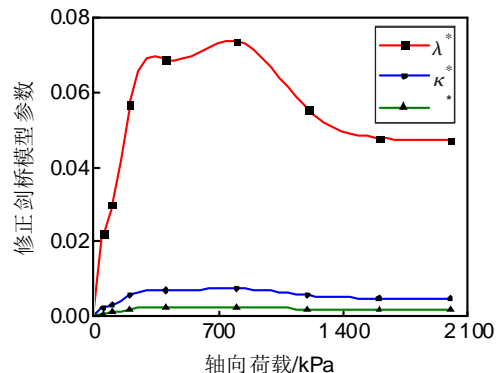
$$\begin{cases} C_c = \frac{2.3(1 + e_0)P}{E_s} \\ C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \lg t} \end{cases} \quad (3)$$

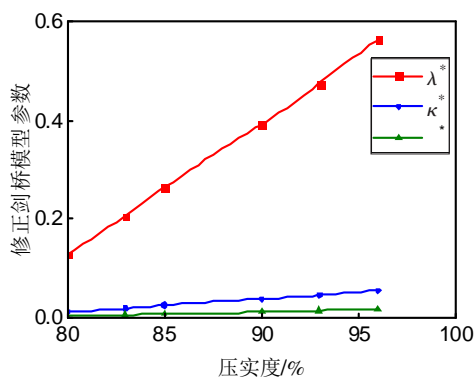
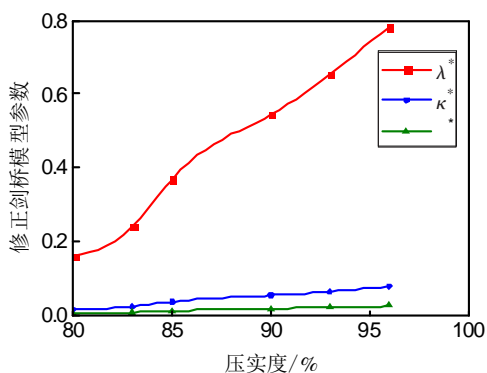
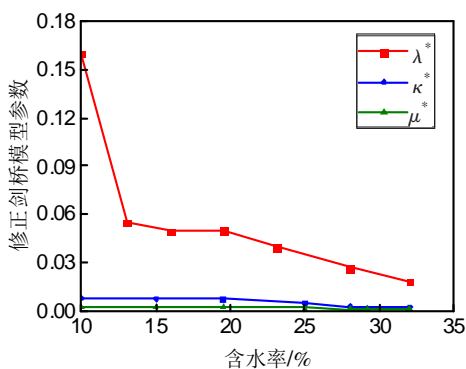
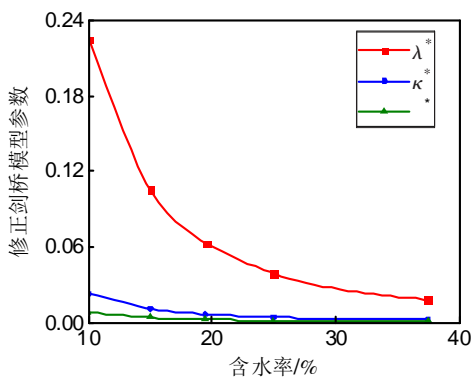
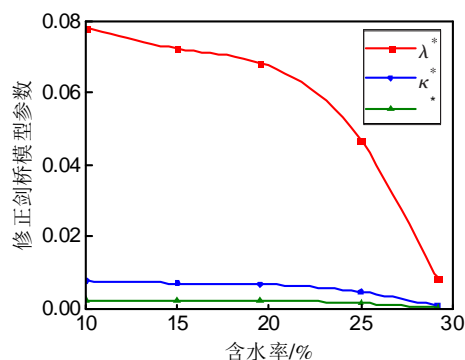
式中: e_0 为初始孔隙比; P 为轴向荷载,kPa; E_s 为轴向荷载为 P 时的压缩模量,MPa; Δe 为压缩稳定后孔隙比变化量; t 为固结时间,s。

基于表2试验方案得到的不同轴向荷载、压实度和含水率下的黄土应变-时间关系曲线,可以通过式(1)~(3)得到不同荷载、压实度和含水率条件下的原状及重塑黄土的修正剑桥模型参数 λ^* 、 κ^* 、 μ^* 的变化曲线。现以最优含水率 $w_{op}=19.5\%$ 原状黄土和轴向荷载 $P=800$ kPa的原状黄土,以及压实

度 k 分别为80%、90%,且 $w_{op}=19.5\%$;压实度 k 分别为80%、90%,且 $P=800$ kPa;轴向荷载 P 分别为800、1 200 kPa,且 $w_{op}=19.5\%$ 的重塑压实黄土为例,分析修正剑桥模型参数的变化规律,如图3所示。

从图3(a)、3(b)、3(c)可以看出:在最优含水率 $w_{op}=19.5\%$ 条件下,当 $P \leq 800$ kPa时,原状黄土和重塑黄土的修正剑桥模型参数 λ^* 、 κ^* 、 μ^* 均随 P 的增大而增大;当 $P > 800$ kPa后, λ^* 、 κ^* 、 μ^* 均随 P 的增大而缓慢减小并最终趋于稳定。这表明该模型的参数受轴向荷载条件的影响较大,且存在一个阈值,这可能与黄土的先期固结压力存在一定关系。

(a) 原状黄土($w_{op}=19.5\%$)(b) 重塑黄土($w_{op}=19.5\%$, $k=80\%$)(c) 重塑黄土($w_{op}=19.5\%$, $k=90\%$)

(d) 重塑黄土($w_{op}=19.5\%$, $P=800$ kPa)(e) 重塑黄土($w_{op}=19.5\%$, $P=1200$ kPa)(f) 原状黄土($P=800$ kPa)(g) 重塑黄土($k=80\%$, $P=800$ kPa)(h) 重塑黄土($k=90\%$, $P=800$ kPa)图3 Q_3 黄土修正剑桥模型参数变化规律Fig. 3 Variation of the modified Cambridge model parameters of the Q_3 loess

从图3(d)、3(e)可以看出,在最优含水率 $w_{op}=19.5\%$ 和轴向荷载分别为800、1200 kPa条件下,重塑黄土的修正剑桥模型参数 λ^* 、 κ^* 、 μ^* 均随着压实度的增大而呈线性增长趋势,且 λ^* 的增速最为显著。当压实度从80%增大到96%时, λ^* 参数的增大倍数为4.3~4.9倍。

从图3(f)、3(g)、3(h)可以看出,在轴向荷载 $P=800$ kPa条件下,原状黄土和压实度分别为80%、90%的重塑黄土的修正剑桥模型参数 λ^* 、 κ^* 、 μ^* 均随着含水率的增大而逐渐减小并最终趋于稳定。在低含水率状态下的原状黄土与低压实度($k=80\%$)重塑黄土的模型参数 λ^* 随含水率的增大呈急速下降趋势,当含水率大于最优含水率时, λ^* 下降趋势趋于平稳,而高压实度($k=90\%$)的重塑黄土的模型参数 λ^* 的变化规律与之相反,其随着含水率的增大先缓慢下降,当含水率大于最优含水率时,模型参数 λ^* 急剧下降。当含水率从10%增大到30%时,原状黄土与压实度分别为80%、90%的重塑黄土的 λ^* 参数分别减小约89%、92%、89%。

根据上述参数的变化规律,可以预估各影响因素(密度、压实度、含水率、荷载)在任意初始状态下黄土的修正剑桥模型参数,以便在后文中对黄土高填方地基工后长期沉降进行分析,但对其变化规律的内在原因,后期尚需开展深入研究。

3 数值分析方案

3.1 试验方案

根据以往黄土高填方工程案例可知,除了其他环境因素外,影响高填方顶部最终工后沉降的

影响因素主要包括工程地质条件、填方体设计参数、原地基处理措施三大类。根据以往的工程经验,确定本研究的数值分析方案(表3)。

表3 数值分析方案
Table 3 Numerical analysis schemes

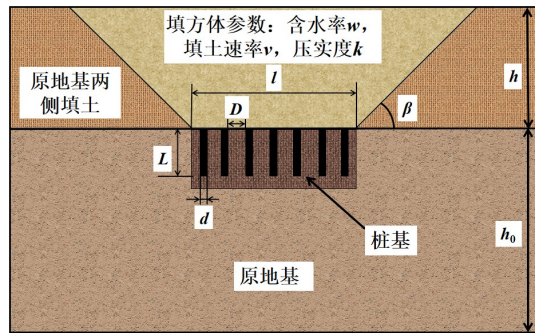
影响因素种类	变化因素及其取值		不变因素及其取值	
工程地质条件	原地基厚 h_0/m	0.5、10、15、20	$w=19.5\%, k=90\%, h=60\text{ m}, v=0.5\text{ m/d}, \beta=45^\circ, l=150\text{ m}$	
	沟谷坡度 $\beta/(^\circ)$	30、45、60、75、90	$w=19.5\%, k=90\%, h=60\text{ m}, v=0.5\text{ m/d}, h_0=0\text{ m}, l=150\text{ m}$	
	沟谷底部宽度 l/m	50、100、150、200、250、300	$w=19.5\%, k=90\%, h=60\text{ m}, v=0.5\text{ m/d}, h_0=0\text{ m}, \beta=45^\circ$	
填方体设计参数	填方体含水率 $w'/\%$	10.0、15.0、19.5、25.0	$k=90\%, h=60\text{ m}, v=0.5\text{ m/d}, \beta=45^\circ, h_0=0\text{ m}, l=150\text{ m}$	
	填方体压实度 $k/\%$	80、83、85、90、93、96	$w=19.5\%, h=60\text{ m}, v=0.5\text{ m/d}, \beta=45^\circ, h_0=0\text{ m}, l=150\text{ m}$	
	填方高度 h/m	30、60、90、120	$w=19.5\%, k=90\%, v=0.5\text{ m/d}, \beta=45^\circ, h_0=0\text{ m}, l=150\text{ m}$	
	填土速率 $v/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	0.2、0.5、0.8、1.0、1.5	$w=19.5\%, h=60\text{ m}, k=90\%, \beta=45^\circ, h_0=0\text{ m}, l=150\text{ m}$	
原地基处理措施	桩材料	素土、灰土、碎石、CFG、素混凝土	$L=10\text{ m}, d=0.5\text{ m}, D=1.5\text{ m}$	$w=19.5\%, k=90\%, h=60\text{ m}, v=0.5\text{ m/d}, \beta=45^\circ, l=150\text{ m}, h_0=10\text{ m}$
	桩长 L/m	0.5、10、15、20	$d=0.5\text{ m}, \text{CFG桩}, D=1.5\text{ m}$	
	桩径 d/m	0.2、0.5、0.7、1.0	$L=20\text{ m}, \text{CFG桩}, D=1.5\text{ m}$	
	桩间距 D/m	0.5、1.0、1.5、12.0、3.0	$L=20\text{ m}, \text{CFG桩}, d=0.5\text{ m}$	

注:CFG代表水泥粉煤灰碎石(cement fly-ash grave)。

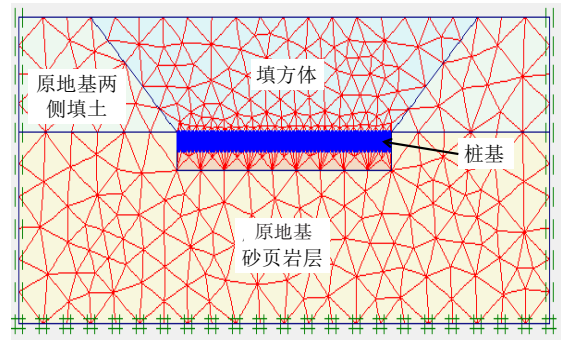
由表3可知,本研究总计11种方案,分别分析工程地质条件(原地基厚度 $h_0=0\sim 20\text{ m}$ 、沟谷坡度 $\beta=30^\circ\sim 90^\circ$ 、沟谷底部宽度 $l=50\sim 300\text{ m}$)、填方体设计参数(填方高度 $h=30\sim 120\text{ m}$ 、填方含水率 $w=10.0\%\sim 25.0\%$ 、填方压实度为 $80\%\sim 96\%$ 、填土速率 $v=0.2\sim 1.5\text{ m/d}$)、原地基处理措施(如桩材料:素土、灰土、碎石、CFG、素混凝土;桩长 $L=0\sim 20\text{ m}$ 、桩径 $d=0.2\sim 1.0\text{ m}$ 、桩间距 $D=0.5\sim 3.0\text{ m}$)三种影响因素对高填方顶部工后总沉降的影响规律。

3.2 模型建立及参数取值

为了分析不同影响因素对黄土高填方地基工程沉降的影响规律,结合上述试验结果及PLAXIS程序进行数值分析。建立的几何模型及其单元网格如图4所示。



(a) 几何模型及影响因素



(b) 有限元模型单元网格图

图4 数值分析模型

Fig. 4 Numerical analysis model

数值分析具体过程如下:

1) 初始应力场平衡计算。本过程不考虑土体及基岩的时效变形特性,原地基 Q_3 黄土、砂页岩层采用理想弹塑性模型模拟,按摩尔-库伦强度准则来描述其力学行为。

2) 分级填筑施工计算。在分级填筑施工过程中采用固结蠕变分析,填方体压实黄土及原地基黄土的长期变形特性均采用修正剑桥模型进行计算,压实土的修正剑桥模型参数 κ^* 、 λ^* 和 μ^* 可根据其在室内试验中不同压实度、含水率及荷载条件下的试验曲线来确定,压实土的抗剪强度指标——黏聚力 c 、摩擦角 φ 由本工程的地质勘察报

告提供。以原状土及压实度为 90% 的重塑土计算参数为例,具体计算参数见表 4。

3) Q_3 压实黄土的渗透系数 k_s 按各向同性考虑,即 $k_x=k_y=k_z$ (k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 方向的渗透系数)。由于 Q_3 黄土的颗粒组成与邻近地区土体的相近,其在不同含水率、压实度下的渗透系数可参考相关文献[17-18],也可参照本工程地质勘察报告的建议值进行取值。

4) 在数值分析中,当填方顶部的最大沉降速率低于 0.02 mm/d 时,则认为高填方顶部工后沉降趋于稳定。根据计算经验,高填方地基工程沉降的计算时间最长设定为 30 a。

5) 通过控制单一变量来分析各影响因素的敏感系数,在考虑填方体参数的变化时,原地基并未进行桩基处理。

表 4 数值分析计算参数
Table 4 Calculation parameters of numerical analysis

土样	含水率/%	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$k_s/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	λ^*	κ^*	μ^*	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa	μ
原状土	19.5	13.95	0.000 06	0.210~0.330	0.020~0.030	0.007~0.010	35.4	30.1	39.1~101.9	0.30
重塑土	10.0	16.93	0.000 22	0.160 2	0.016 0	0.005 3	51.6	31.7	154.0	0.30
	15.0	17.70	0.000 29	0.049 7	0.005 0	0.001 7	40.7	30.3	55.2	0.30
	19.5	18.39	0.000 87	0.050 0	0.005 0	0.001 7	32.6	25.1	39.0	0.30
	25.0	19.24	0.001 45	0.039 8	0.004 0	0.001 3	22.1	20.1	30.4	0.30
	29.2	19.71	0.004 36	0.026 6	0.002 7	0.000 9	16.3	18.3	27.1	0.30
砂岩		22.00	0.004 87				200.0	35.0	2 000.0	0.28

注: γ 为土体的容重, E 为弹性模量, μ 为泊松比。

4 结果分析

4.1 地质条件对工后总沉降影响分析

黄土沟壑区高填方工程的工后沉降与工程选址有较大关系,主要体现在地质条件不同。根据表 3 的数值分析方案,本文分别探索原地基黄土层厚度、沟谷坡度及底部宽度对高填方地基工后总沉降的影响。现以原地基土层厚度对高填方地基工后总沉降影响的数值计算结果为例,展示其工后沉降云图(图 5),其他影响因素的计算结果从略。各因素对高填方地基工后总沉降的影响规律如图 6 所示(图中 S 为工后总沉降)。

从图 5~6 可以看出:在其他地质因素及地基处理措施不变的情况下,原地基厚度越大,高填方地基的工后压缩变形越大,则地基沉降稳定后的总沉降也越大;沟谷坡度越大,土拱效应越明显,工后总沉降越小。随着沟谷底部宽度的增大,工后总沉降呈对数增长趋势,当沟谷底部宽度超过 100 m 后,工后总沉降增长缓慢,这表明边界拱效应逐渐消失,对工后总沉降的影响不大。可见,在黄土沟壑区进行高填方工程选址期间,应尽量考虑原地基为基岩、沟谷底部宽度较狭窄、沟谷坡度较陡的区域,这样可以大大降低高填方地基的工后总沉降。

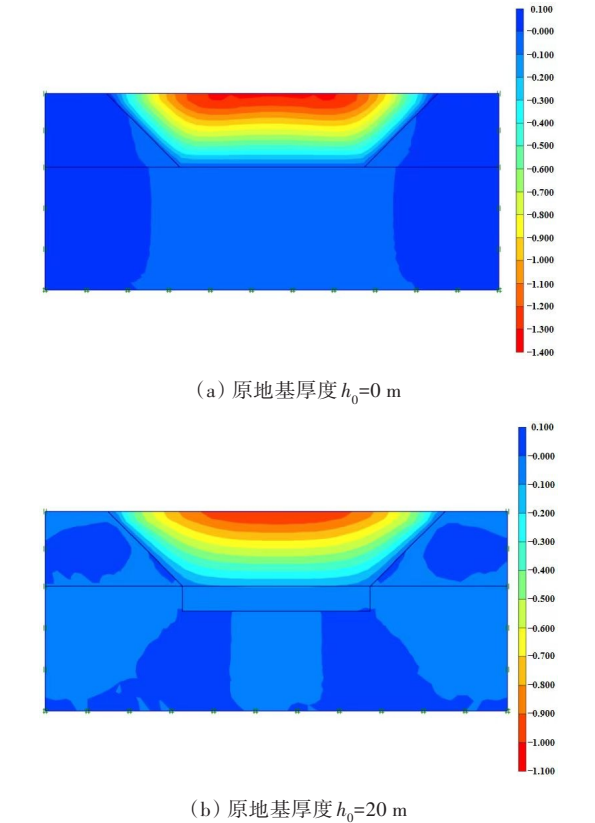
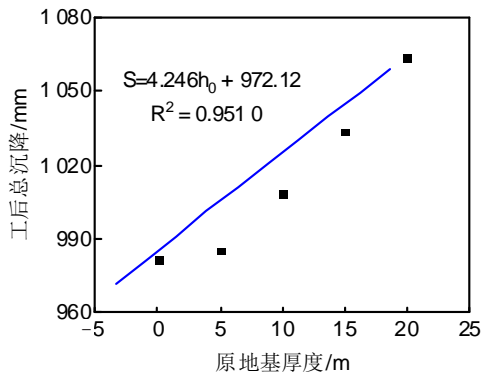
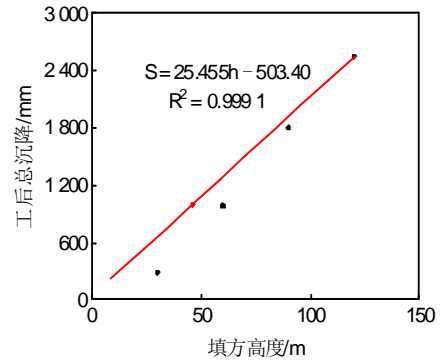


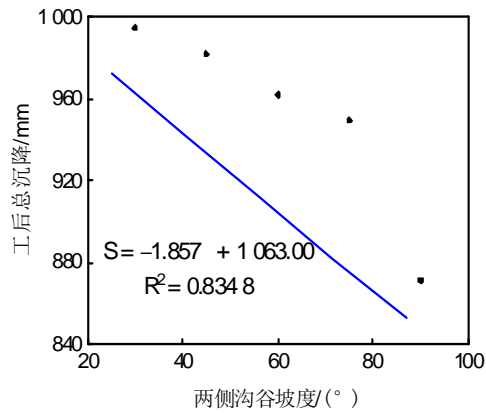
图 5 原地基土层厚度对高填方地基工后总沉降的影响(单位:m)
Fig. 5 Influence of original foundation thickness on the post construction settlement(unit:m)



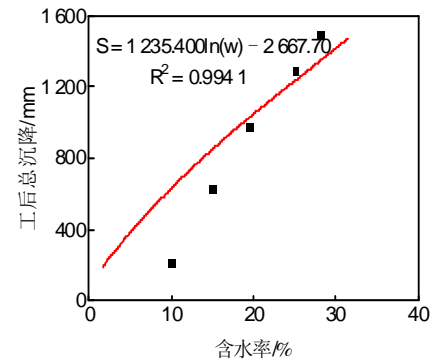
(a) 原地基土层厚度



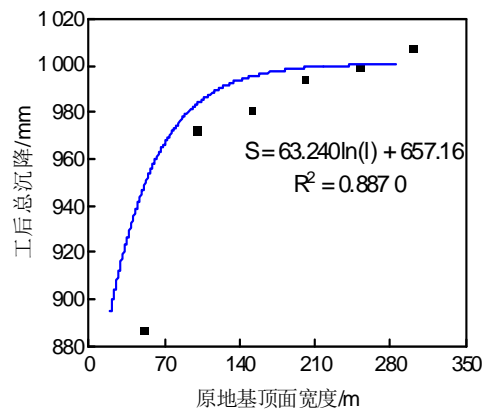
(a) 填方高度



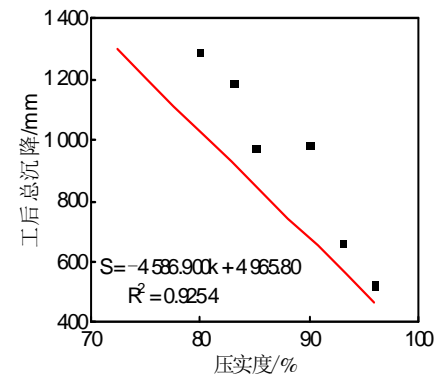
(b) 原地基沟谷坡度



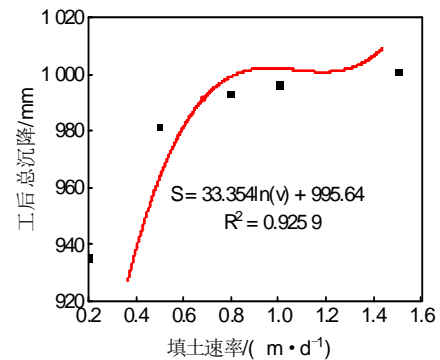
(b) 填料含水率



(c) 沟谷底部宽度



(c) 填方体压实度



(d) 填土速率

图6 工程地质条件对工后沉降的影响

Fig. 6 Influence of engineering geological conditions on the post construction settlement

4.2 填方体设计参数对工后总沉降的影响分析

除高填方选址对工后沉降产生较大影响外,填方体的设计施工参数对填方体本身的长期沉降也产生较大影响。本研究仅考虑填方高度、填料的含水率、压实度、填土速率对工后总沉降的影响。图7为各影响因素对高填方地基工后总沉降的影响曲线。

图7 填方体设计参数对工后总沉降的影响

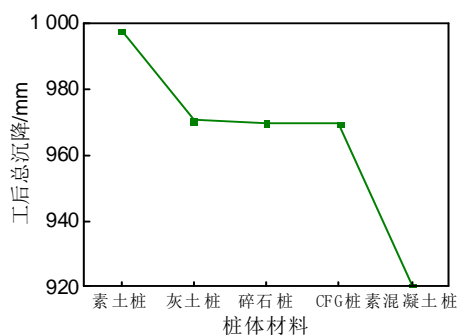
Fig. 7 Influence of design parameters of filling body on the post construction settlement

从图7可以看出:填方高度越大,填方体在自重压缩作用下的累积沉降越大,高填方顶部的工后总沉降呈线性增大趋势;填料含水率越大,填方体整体表现就越软弱,其蠕变特性更为显著,导致其工后总沉降呈对数增大趋势;填料压实度越大,填方体整体表现就越坚硬,其工后总沉降呈线性减小趋势;当填土速率由0.2 m/d增大到1.5 m/d时,高填方地基工后总沉降呈对数增长趋势,且当填土速率低于0.5 m/d时,高填方地基的工后总沉降迅速降低,这表明减小填土速率,可有效降低工后总沉降。

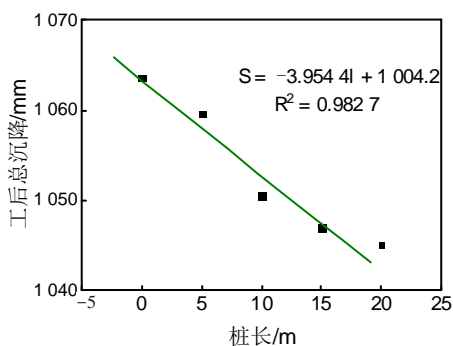
可见,对高填方进行设计与施工时,在满足设计参数的前提条件下,应尽量降低填方高度,提高压实度,降低填料的含水率,并减小填土速率,这样可以大大降低高填方的工后总沉降。

4.3 原地基处理措施对工后总沉降的影响分析

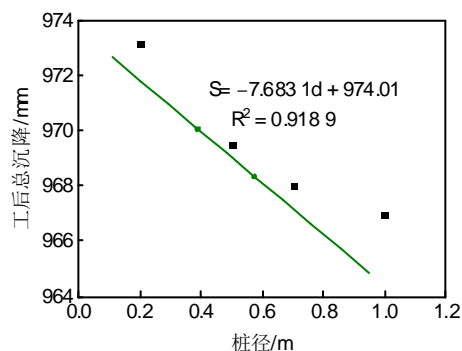
当高填方地基处在深厚黄土层时,对原地基的湿陷性黄土必须采取适当的处理措施。工程实际中多采用强夯法处理,但由于强夯法处理深度有限,必要时需要采取桩基处理方法。本文根据不同的桩基处理措施(不同的桩材料、桩长、桩径、桩间距等),研究地基处置方案对高填方地基工后总沉降的影响,计算结果如图8所示。



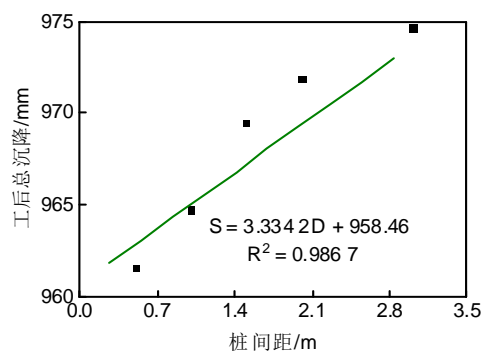
(a) 桩材料



(b) 桩长



(c) 桩径



(d) 桩间距

图8 原地基处理措施对工后总沉降的影响

Fig. 8 Influence of original foundation treatment measures on the post construction settlement

由图8可以看出,采用不同的桩体材料来处理原地基时,灰土桩、碎石桩、CFG桩对工后总沉降的影响不大,素土桩处理效果一般,素混凝土桩处理效果相对较好;高填方地基工后总沉降随着桩长、桩径的增大呈线性减小趋势,随桩间距的增大呈增大趋势,这与以往的研究结论基本一致。

可见,相对于未采取桩基处理措施的原地基,对原地基采取桩基挤密处置措施能够显著降低高填方地基的工后总沉降,但增加桩径或减小桩间距效果一般,适当增大桩长可降低原地基湿陷性黄土层的压缩量,从而相对有效地减小地基的工后沉降。

4.4 敏感性分析及工后沉降控制措施建议

根据以往经验,采用敏感系数 M_a 来定量描述各影响因素对黄土高填方地基工后沉降的影响程度。敏感系数如式(4)所示。

$$M_a = (\Delta S/S) / (\Delta a/a) \quad (4)$$

式中: a 可以为含水率 w 、压实度 k 、填方体厚度 h 、填筑速率 v 、原地基厚度 h_0 、沟谷坡度 β 、沟谷底部宽度 l 、桩长 L 、桩间距 D 及桩径 d 。则 M_w 、 M_k 、 M_h 、

M_v 、 M_{h_0} 、 M_β 、 M_l 、 M_L 、 M_D 、 M_d 分别代表各影响因素对黄土高填方地基工后沉降的敏感系数。 ΔS 为某影响因子在任意取值下的工后沉降量与其参考值对应的工后沉降量的差值。比如 Δw 为填料含水率的变化量,可表示为 $\Delta w = w_i - w_0$,其中, w_i 为表3中含水率的任意值, w_0 为初始值。同理, Δk 、 Δh 、 Δv 、 Δh_0 、 $\Delta \beta$ 、 Δl 、 ΔL 、 ΔD 、 Δd 分别为填方压实度、填方高度、填土速率、原地基黄土层厚度、沟谷坡度、沟谷底部宽度、桩长、桩径、桩间距与其对应参考值的差值。本研究各影响因素的参考值均取其范围的最小值(表3),即 $k_0=80\%$ 、 $h_0=30\text{ m}$ 、 $v_0=0.2\text{ m/d}$ 、 $h_0=0\text{ m}$ 、 $\beta_0=30^\circ$ 、 $l_0=50\text{ m}$ 、 $L_0=0\text{ m}$ 、 $D_0=0.5\text{ m}$ 、 $d_0=0.2\text{ m}$ 。

根据式(4),可得到上述各影响因素对工后沉降的敏感系数,敏感系数有正值与负值,为了便于比较分析取其绝对值,如图9所示。由图9可知,黄土沟壑区高填方地基工程沉降的各影响因素按其敏感系数的绝对值由高到低排序依次为:含水率($M_w=3.2810$)、压实度($M_k=2.8497$)、填方高度($M_h=2.7099$)、沟谷坡度($M_\beta=0.0560$)、沟谷底部宽度($M_l=0.0225$)、原地基黄土厚度($M_{h_0}=0.0140$)、填土速率($M_v=0.0097$)、桩长($M_L=0.0046$)、桩间距($M_D=0.0028$)、桩径($M_d=0.0016$)。由此可见,填料的含水率 w 、压实度 k 和填方高度 h 的敏感系数远高于其他影响因素的敏感系数,表明这三者对高填方地基工后沉降的影响较为显著。

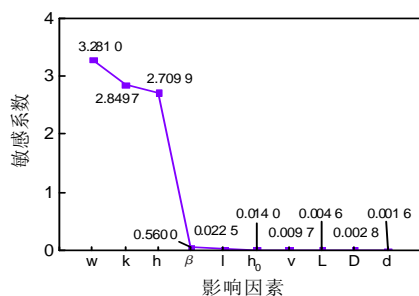


图9 各影响因素敏感系数

Fig. 9 Sensitivity coefficients of various influencing factors

通过对各影响因素敏感系数的对比分析,并结合以往的工程实践经验,为了大大降低高填方地基工后沉降,在其设计和施工期间,针对黄土沟壑区高填方地基工后沉降的控制措施建议如下:

1) 选址建议:黄土沟壑区高填方工程尽量选取在沟谷底部有基岩出露地段,且沟谷坡度超过 75° 、沟谷底部宽度小于 100 m 的区域。

2) 填筑体设计施工参数建议:在设计允许的情况下,尽量降低填方高度,填料含水率宜控制在

最优含水率附近,填料压实度不宜低于 90% ,填土速率低于 0.5 m/d 。

3) 原地基处理建议:原地基为深厚黄土层时,宜优先采用强夯法处理,当采用强夯法处理不能满足地基承载力要求时,再考虑采用挤密桩法加固原地基。选用刚度大的桩体材料时,可合理增加桩长,不宜盲目增大桩径或减小桩间距。

5 结论

1) 原状黄土的修正剑桥模型参数均随轴向荷载的增大先增大后逐渐减小,重塑黄土的修正剑桥模型参数均随轴向荷载的增大先增大后逐渐减小并最终趋于稳定,其变化特征可能与其先期固结压力有关。压实黄土的模型参数与压实度成正比,与含水率成反相关;原状黄土在含水率低于塑限时,其修正剑桥模型参数随含水率的增大呈急速下降趋势,在含水率大于塑限后其修正剑桥模型参数基本不变。而重塑黄土的修正剑桥模型参数的变化趋势则完全相反,这可能是二者的结构性差异所致。

2) 不同影响因素对黄土高填方地基工后沉降的影响程度由高到低排序依次为:含水率、压实度、填方高度、沟谷坡度、沟谷底部宽度、原地基黄土厚度、填土速率、桩长、桩间距、桩径。其中,填料的含水率、压实度、填方高度对工后沉降的影响较大,其余因素对工后沉降的影响相对较小。

3) 黄土沟壑区高填方工程选址应尽量避免选在大厚度湿陷性黄土地基上,应选在沟谷坡度较陡、沟谷底部宽度较小的区域;尽量降低填方设计高度,填料含水率宜接近最优含水率,压实度宜超过 90% ,且日填土厚度不宜超过 0.5 m ;当选址无法避免原地基的深厚黄土层时,可考虑采用桩体材料刚度较大的长桩来挤密加固原地基,不宜盲目增大桩径或减小桩间距,避免浪费。

[参考文献]

- [1] 朱建民,于永堂,郑建国,等.基于GA-BP神经网络的黄土高填方工后沉降预测[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1):382-386,418.
ZHU Jianmin, YU Yongtang, ZHENG Jianguo, et al. Prediction of post-construction settlement of high loess-filled based on GA-BP neural network [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 382-386, 418.

- [2] 郑建国, 曹杰, 张继文, 等. 基于离心模型试验的黄土高填方沉降影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 560-571. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0752.
- ZHENG Jianguo, CAO Jie, ZHANG Jiwen, et al. Analysis of influencing factors of high loess-filled foundations based on centrifugal model tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 560-571. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0752.
- [3] 于永堂, 郑建国, 张继文, 等. 黄土高填方场地孔隙水压力的变化规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(6): 10-16. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.051.
- YU Yongtang, ZHENG Jianguo, ZHANG Jiwen, et al. Variation behavior of pore water pressure in loess deep filled ground [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(6): 10-16. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.051.
- [4] 王鹏, 巨玉文. Logistic-双曲线组合模型用于黄土高填方路堤沉降预测的研究[J]. 公路, 2018, 63(4): 12-17.
- WANG Peng, JU Yuwen. Application of logistic-hyperbolic combination model in settlement prediction of loess high fill embankment [J]. Highway, 2018, 63(4): 12-17.
- [5] 梁忠豪, 秦楠, 纪沛志, 等. 高温作用后砂岩蠕变试验及 PSO-BP 神经网络单轴蠕变长期强度预测研究[J]. 实验力学, 2022, 37(4): 573-584. DOI: 10.7520/1001-4888-21-126.
- LIANG Zhonghao, QIN Nan, JI Peizhi, et al. Research on sandstone creep test after high temperature and PSO-BP neural network uniaxial creep long-term strength prediction [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(4): 573-584. DOI: 10.7520/1001-4888-21-126.
- [6] 吴开健. 软土地基工后沉降预测方法的应用分析[J]. 珠江水运, 2022(12): 68-71. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2022.12.034.
- WU Kaijian. Application analysis of prediction method for post-construction settlement of soft soil foundation [J]. Pearl River Water Transport, 2022(12): 68-71. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2022.12.034.
- [7] 陈伟航, 罗强, 王腾飞, 等. 基于 Bi-LSTM 的非等时距路基工后沉降滚动预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(4): 683-691.
- CHEN Weihang, LUO Qiang, WANG Tengfei, et al. Bi-LSTM based rolling forecast of subgrade post-construction settlement with unevenly spaced time series [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(4): 683-691.
- [8] 高英, 马艳霞, 张吾渝, 等. 西宁地区不同湿陷程度黄土的微观结构分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 65-73.
- GAO Ying, MA Yanxia, ZHANG Wuyu, et al. Microstructure analysis of loess with different collapsibility in Xining area [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 17(1): 65-73.
- [9] ZHU C H, LI N. Ranking of influence factors and control technologies for the post-construction settlement of loess high-filling embankments [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118: 103320. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103320.
- [10] DING R H, TANG H, DUAN Z, et al. Analysis on creep properties of aquiferous loess under a high confining pressure [J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2021, 14(3): 59-68. DOI: 10.25103/jestr.143.07.
- [11] 王保林, 何忠明. 降雨入渗条件下多层顺层软弱夹层土坡稳定性分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 8-13, 29. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.01.003.
- WANG Baolin, HE Zhongming. Stability analysis of multi-strata weak intercalation layer under rainfall infiltration condition [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 15(1): 8-13, 29. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2018.01.003.
- [12] 何忠明, 王保林, 胡庆国, 等. 强降雨条件下含软弱夹层土坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(3): 21-28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.03.004.
- HE Zhongming, WANG Baolin, HU Qingguo, et al. Sensitivity analysis of factors influencing stability of soil slope with soft interlayer under heavy rainfall conditions [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(3): 21-28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.03.004.
- [13] 朱文波, 戴国亮, 王博臣, 等. 吸力式沉箱基础底部土体卸荷蠕变及其长期抗拔承载特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 669-678. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0950.
- ZHU Wenbo, DAI Guoliang, WANG Bochen, et al. Unloading creep of soft clay and long-term uplift bearing characteristics of suction caisson foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 669-678. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0950.
- [14] HUANG A P, YE S H. Sensitivity of high fill slope stability factors under seismic conditions [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, 57(5): 356-363. DOI: 10.1007/s11204-020-09678-9.
- [15] 黄盛锋, 陈志波, 郑道哲. 基于灰色关联度法和强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 35-40. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.05.
- HUANG Shengfeng, CHEN Zhibo, ZHENG Daozhe. Sensitivity analysis of factors influencing slope stability

- based on grey correlation and strength reduction method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 35-40. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.05.
- [16] 周远强, 吴宏, 朱才辉, 等. 黄土高填方工后沉降影响因素敏感性分析[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(1): 92-98. DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.015.
- ZHOU Yuanqiang, WU Hong, ZHU Caihui, et al. Sensitivity analysis of influence factors of post-construction settlement on loess high fill embankment [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(1): 92-98. DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.015.
- [17] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- LIU Zudian. Loess mechanics and engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1997.
- [18] 王丽琴, 杨有海, 苏在朝, 等. 重塑黄土的渗透性及影响因素的研究[J]. 兰州铁道学院学报, 2003, 22(4): 95-97.
- WANG Liqin, YANG Youhai, SU Zaichao, et al. The study about infiltration characteristic and influence factors of remolded loess [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2003, 22(4): 95-97.

Sensitivity analysis of control factors on post construction settlement of high fill embankment in loess gully region

MA Yunfeng¹, TIAN Yonghui², LIU Anlong¹, LU Jinwen², ZHU Caihui^{2,3}

(1. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Engineering Technology Research Center for Urban Geology and Underground Space, Xi'an 710068, China)

Abstract: [Purposes] To provide the scientific basis of suitable control scheme for high fill engineering design, the sensitivity of different control factors for post-construction settlement of high fill foundation in loess gully region were studied by this paper. [Methods] The modified Cambridge model parameters of Quaternary Late Pleistocene (Q_3) loess under different vertical loads, water content and compactness are studied by laboratory experiments. The sensitivity of the factors affecting the post-construction settlement of high fill foundation is compared and analyzed by the numerical software PLAXIS. [Findings] The modified compression index, modified rebound coefficient and modified creep index of the Quaternary Late Pleistocene (Q_3) loess firstly increase and then decrease with the vertical load and water content, and linearly increase with the compaction degree. The water content, compaction degree and fill height of the filler have significant influence on the post-construction settlement of high-fill foundation, while the width of the bottom of the gully, slope, thickness of the original foundation, fill rate, pile length, pile spacing and pile diameter have little influence on it. [Conclusions] The design height of high fill projects in loess gully region should be reduced as far as possible, and the water content of fill should be controlled to make it close to the optimal water content. Furthermore, location of fill should be selected in the region with little loess thickness, gully slope greater than 75° and gully bottom width less than 100 m.

Key words: loess gully region; high fill embankment; post construction settlement (PCS); sensitivity analysis; control factor; Q_3 loess

Manuscript received: 2022-10-24; **revised:** 2022-11-07; **accepted:** 2022-11-14

Foundation item: Project (52279110) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022SF-197, 2021SF2-02) supported by Key Research and Development Project of Shaanxi Province; Project (2022KT-01) supported by open subject of Urban Geology and Underground Space Engineering Technology Research Center of Shaanxi Province

Corresponding author: ZHU Caihui (1983—) (ORCID: 0000-0002-2601-094X), male, professor, research interest: loess mechanics and engineering. E-mail: anderth123@163.com

(责任编辑: 刘平; 校对: 石月珍; 英文编辑: 陈璐)