

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.015

黄土高填方工后沉降影响因素敏感性分析

周远强^{1,2}, 吴宏³, 朱才辉¹, 李宁¹(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043;
3. 中国有色金属长沙勘察设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410011)

摘要: 以吕梁机场黄土高填方为工程背景,通过室内重塑黄土单轴固结蠕变试验获得变形时效参数。采用有限元方法,研究了黄土高填方的工后沉降敏感性问题。量化分析了填方体因素:填土高度、填土速率、填料压实度、含水率,原地基因素:强夯法的强夯深度、碎石桩法的桩长、桩间距、桩径等因素对高填方工后沉降的影响,提出了基于上述因素的工后沉降敏感度系数。结果表明:黄土高填方工后沉降随填土高度的增加呈指数增长;随填土速率、含水率的增加呈线性增加;随填料压实度、强夯深度、桩径、桩长的增加呈线性衰减;随桩间距的增大呈对数增长。其中黄土高填方工后沉降对填料压实度最为敏感。

关键词: 黄土高填方; 有限元; 工后沉降; 敏感度系数

中图分类号: TV732.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2018)01-0092-07

Sensitivity analysis of influence factors of post-construction settlement on loess high fill embankment

ZHOU Yuanqiang^{1,2}, WU Hong³, ZHU Caihui¹, LI Ning¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co. Ltd., Xi'an 710043, China;

3. Chinese Nonferrous Metal Survey and Design Institute of Changsha Co. Ltd., Changsha 410011, China)

Abstract: Under the background of loess high fill engineering in Lüliang Airport, the deformation and aging parameters are obtained by means of the uniaxial consolidation creep test indoors. The sensitivity to settlement of loess high embankment post-construction is studied by the finite element method. The factors of embankment—height of fill, filling rate, degree of compaction and moisture content and the original foundation factors—influence depth of dynamic compaction, pile length, pile spacing and pile diameter of gravel pile method on the post-construction settlement are quantitatively analyzed. The sensitivity coefficient of post-construction settlement is presented based on the factors. Results show that the loess high fill settlement increases exponentially with filling height, increases linearly with filling rate with moisture content decreasing linearly with degree of compaction, influence depth of dynamic compaction, pile diameter and pile length, and increases logarithmically with pile spacing. The loess high embankment settlement of post-construction is the most sensitive to the degree of compaction.

Key words: loess high fill embankment; finite element method; post-construction settlement; sensitivity coefficient

随着中西部支线机场的大力开发,结合中西部地区沟壑纵横的地形条件,黄土高填方沉降问题日渐突出。国内外有大量关于高填方研究,其中文献[1-2]分别研究了英国某砂卵石填料的露天煤矿填方沉降规律,及水位变化时砂岩和泥岩填料的公路

路基沉降规律。文献[3]利用砂砾石填料压缩蠕变试验研究了高填方沉降规律。文献[4]研究了砂泥岩碎块石土为填料的顺坡山区高填方边坡工程的稳定性。文献[5-6]等以九寨——黄龙机场为工程背景,采用数值方法模拟实际施工过程,分别研究了山

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308456, 51678484); 陕西省自然科学基金面上项目(2015JM5175); 陕西省黄土力学与工程重点实验室科研计划资助项目(16JS073)

作者简介: 周远强,男,硕士生,研究方向为黄土隧道工程、黄土高填方数值仿真分析。E-mail: 1392882517@qq.com

通讯作者: 李宁,男,教授,博导,研究方向为岩体动力学、冻土力学及隧洞边坡稳定性分析。E-mail: ningli@xaut.edu.cn

区复杂地质高填方地基沉降规律及其变形稳定性规律。文献[7]研究了山区机场工程高填方碎石土压缩蠕变规律。而黄土类型高填方的研究比较少。在已有的黄土高填方研究中,文献[8-9]研究了深厚黄土地基上机场高填方沉降规律。文献[10]采用4种不同计算方法分析了黄土高填方路堤沉降。文献[11-12]研究了基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律,以及考虑黄土时效变形特性的高填方工后沉降预测。文献[13]研究了黄土高填方地基沉降反演和预测。以上研究成果整体上是采用多种方法和手段研究不同类型高填方沉降等问题,具有较强的实用和理论价值,但针对黄土高填方工后沉降影响因素的敏感性研究很少。

本文以山西吕梁机场试验段为背景,依据固结蠕变试验获得试验参数,采用 PLAXIS 有限元软件分别对填方体影响沉降因素及原地基影响工后沉降因素作分析。得出各因素影响黄土高填方工后沉降规律,确定出工后沉降对不同因素的敏感性大小。

1 工程概况

吕梁机场位于吕梁市方山县境内,距吕梁市区约 20.5 km,是国内支线机场。工程试验区位于机场场地中部西侧的火烧沟及其两侧,地形总体呈东西两侧高中间低,南低北高。吕梁机场挖填方工程概况如图 1 所示。

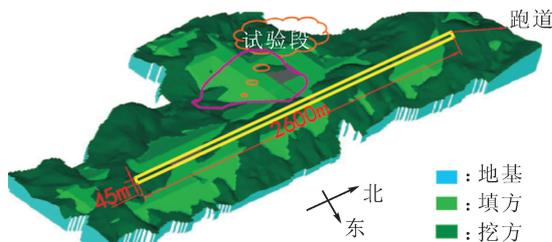


图 1 挖填方三维效果图

Fig. 1 3D-diagram of the loess high embankment

试验区海拔 1 050~1 198 m,相对高差高达 148 m,最大填方高度为 82 m。试验区内冲沟发育,地形起伏大,切割深度为 50~100 m,沟谷横断面:上游是“V”形,下游是“U”形。沟谷全长 700 m 左右,沟谷纵坡降约 7%,沟谷宽度介于 10~50 m 之间,沟谷两侧黄土体坡度在 40°~60°之间。该机场地基工程目前是国内湿陷性黄土地区机场建设中遇到的填方高度最高、土方量最大的机场工程。场区地层主要为自重湿陷性黄土、湿陷等级 II 级,这在国内外尚属首次;高填方的设计与施工难度极大,这在国内外机场建设历史中也是极为罕见的^[14]。

2 SSC 软土蠕变模型及研究方案

2.1 SSC 软土蠕变模型及参数确定方法

SSC(Soft Soil Creep)模型是 PLAXIS 软件自带软土蠕变模型,包括以下材料参数^[9]。

类似于摩尔库仑模型中的破坏参数:粘聚力 $C(\text{kN/m}^2)$;摩擦角 $\varphi(^{\circ})$;剪胀角 $\psi(^{\circ})$ 。

模型基本刚度参数:修正回弹系数 κ^* ;修正压缩指数 λ^* ;修正蠕变指数 μ^* 。以上三个变形参数主要与压缩模量 E_s 存在直接关系,有以下经验公式:

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

$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e_0} \approx \frac{\lambda^*}{5 \sim 10} \quad (1)$$

$$\mu^* \approx \frac{C_a}{2.3(1+e_0)} \approx \frac{\lambda^*}{15 \sim 25}$$

$$C_c = \frac{2.3(1+e_0)p}{E_s}, C_a = \frac{\Delta e}{\Delta \lg t} \quad (2)$$

其中, λ, κ 分别为原始各向等压曲线中与加荷有关的试验常数和与卸荷有关的试验常数, C_c, C_a 分别为压缩指数和次固结系数, E_s 为荷载为 P 时的压缩模量, e_0 为初始孔隙比。若对模型参数进行估算,则有 $\lambda^* \approx I_p(\%) / 500$,通过这个关系式能够得到 λ^* 值,由此可得到 μ^* 与 κ^* 值。

模型其他参数: $v_{ur} \approx 0.2, \mu$ 为卸载-再加载的泊松比(软件默认值为 0.15); $\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}$ 为正应力(正常固结状态下); M 与 K_0^{NC} 为相关参数。

2.2 单因素数值研究方案

本文采用控制单一变量法分别对填方体影响沉降因素:填土高度、填土速率、压实度、含水率,及原地基影响工后沉降因素:强夯法的强夯深度、碎石桩法的碎石桩长、桩间距、桩径作一一分析。当研究某个因素时,其他因素统一取其数学平均值。研究方案如表 1 所示。

表 1 单因素数值研究方案

Tab. 1 Schemes of single factor numerical research

因素	35.0	50.0	65.0	80.0	100.0
填土高度/m	35.0	50.0	65.0	80.0	100.0
填土速率/(m/d)	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5
压实度	0.80	0.85	0.90	0.95	0.98
含水率/%	13.5	14.5	17.0	19.0	21.0
强夯处理深度/m	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
桩间距/m	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
桩径/m	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0
桩长/m	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0

3 数值模拟及结果分析

3.1 计算模型及物理力学参数

根据吕梁机场的典型断面图以及地层条件,采用 PLAXIS 软件建立有限元模型,并做了如下简化:①多层填土加载简化为一层填土加载,不考虑多层填土之间的稳定期;②填土层的参数由室内单轴固结蠕变试验得到^[10]。其地层分布示意图以及有限元模型如图 2 所示,土层物理力学参数如表 2 所示。

计算过程中,PLAXIS 模型原地基的左右两侧为水平约束,底面为固端约束。水位线为原地基的地表线,左右两侧及底面都视为排水截面。通过改变 SSC 模型的参数来实现各个因素的模拟,表 1 中每一个研究方案对应着一组物理力学参数取值,其

中研究不同填土高度方案的物理力学参数如表 2 所示。由于其他方案中的参数取值类似,在此不一一列出。

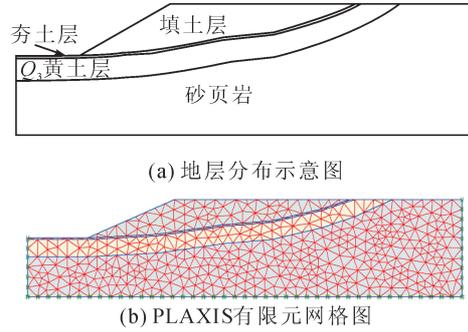


图 2 地层分布示意图及 PLAXIS 有限元网格图
Fig. 2 Stratigraphic distribution diagram and FEM mesh of PLAXIS

表 2 土层的物理力学参数
Tab. 2 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	弹性模量 E_0 / MPa	泊松比 μ	粘聚力 C / kPa	内摩擦角 φ / (°)	非饱和容重 γ_{un} / (kN/m ³)	饱和容重 γ_{sat} / (kN/m ³)	水平渗透系数 k_x / (mm/d)	竖直渗透系数 k_y / (mm/d)	修正压缩指数 λ^*	修正回弹系数 k^*	修正蠕变指数 μ^*
夯土层	39.0	0.3	72.4	28.8	20.70	21.50	0.01	0.01	0.007	0.00065	0.00022
Q ₃ 黄土层	36.8	0.3	30.0	25.0	16.90	17.80	2.50	2.50	0.018	0.00180	0.00060
砂页岩层	20 000.0	0.3	200.0	35.0	22.00	24.50	—	—	—	—	—
填土层(35 m)	17.5	0.3	43.0	26.2	18.64	20.03	1.80	1.80	0.019	0.00190	0.00063
填土层(50 m)	25.5	0.3	43.0	26.2	18.64	20.03	1.80	1.80	0.023	0.00230	0.00077
填土层(65 m)	30.0	0.3	43.0	26.2	18.64	20.03	1.80	1.80	0.026	0.00260	0.00087
填土层(80 m)	31.0	0.3	43.0	26.2	18.64	20.03	1.80	1.80	0.030	0.00300	0.00100
填土层(100 m)	33.0	0.3	43.0	26.2	18.64	20.03	1.80	1.80	0.035	0.00350	0.00116

3.2 计算结果分析

根据实际工程经验^[9],当工后沉降速率达到 0.02 mm/d 时,认为工后沉降达到稳定。

3.2.1 填方体因素影响下的工后沉降规律分析

通过数值计算得到了填方体因素(填土高度 H 、填土速率 v 、压实度 k 、含水率 w)的工后沉降历时曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,200 天左右以前黄土高填方的工后沉降速率相对较大,之后工后沉降速率相对较小。随着时间的增加,工后沉降速率逐渐减小,黄土高填方工后沉降相对趋于稳定。依据稳定工后沉降的判断得出影响因素与稳定工后沉降量的关系如表 3 所示。

由表 3 建立各个因素与稳定工后沉降的拟合曲

线,如图 4 所示。

表 3 填方体因素稳定工后沉降量
Tab. 3 Stable post-construction settlement of embankment factors

填土高度/m	35	50	65	80	100
工后沉降量/m	0.159	0.240	0.286	0.519	0.832
填土速率/(m/d)	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5
工后沉降量/m	0.263	0.304	0.363	0.388	0.480
压实度	0.80	0.85	0.90	0.95	0.98
工后沉降量/m	0.389	0.368	0.307	0.280	0.254
含水率/%	13.5	14.5	17.0	19.0	21.0
工后沉降量/m	0.262	0.304	0.312	0.341	0.325

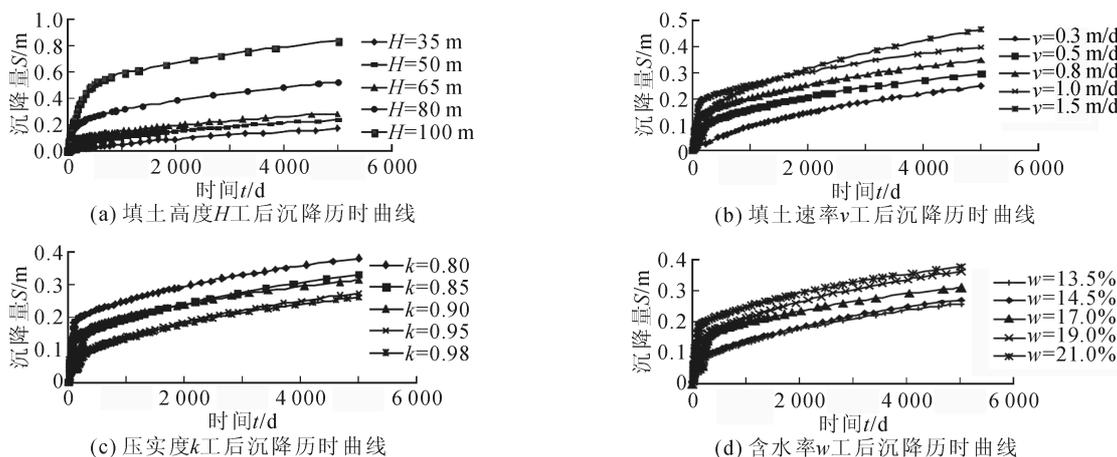


图3 填方体因素影响工后沉降与时间关系曲线

Fig. 3 Relationship between post-construction settlements of embankment factors and time

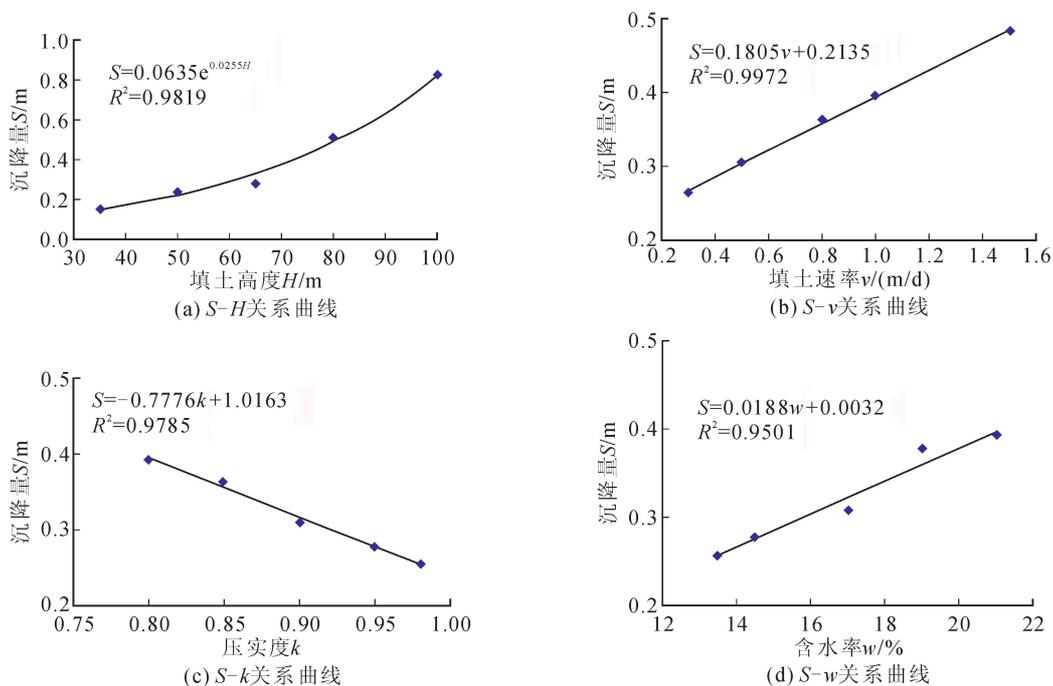


图4 填方体因素的稳定工后沉降曲线

Fig. 4 Stable settlement curves of embankment factors of post-construction

根据图3、图4可得如下结论。

1) 填土高度从35 m到100 m逐渐增大的过程中,工后沉降量从0.159 m增大到0.832 m。随着填土高度的增大,工后沉降量呈指数增长,符合填土高度对黄土高填方影响的规律。

2) 填土高度增加,使土体所受的荷载增大。从蠕变试验数据可看出,修正压缩指数随着荷载的增加而增大,导致土体的蠕变效应增强。荷载越大土体克服土体之间的摩擦力的能力越强,土的工后沉降会随填土高度的增加而变大。即使土体应变不变,填方高度变大也会使工后沉降变大。工后沉降与填土高度呈指数变化,表明填土高度对工后沉降

有着强有力的影响。

3) 填土速率从0.3 m/d逐渐增大到1.5 m/d的过程中,工后沉降量从0.263 m增大到0.480 m。随着填土速率的增大,工后沉降量呈直线增长,符合填土速率影响的规律。

4) 填土速率越大,饱和土体来不及发生排水变形,将大部分施工期未完成的变形累积到工后沉降中,造成工后沉降增大,并且这种变化趋势是随着填土速率呈线性变化。填土速率对工后沉降的影响是较大的,而这在工后沉降的计算的影响因素中经常被设计者所忽略。

5) 压实度从0.80逐渐增大到0.98的过程中,

工后沉降量从 0.389 m 减小到 0.254 m,随着压实度的增大,工后沉降量呈直线减小,符合压实度对黄土高填方影响的规律。

6) 填料压实度增大,压缩模量变大,土体更难被再挤密。在其他条件不变的情况下,工后沉降会随之减小。

7) 含水率从 13.5% 逐渐增大到 21.0% 的过程中,工后沉降量从 0.262 m 增长到 0.325 m。随着含水率的增大,工后沉降量呈直线增长,符合含水率对黄土高填方影响的规律。

8) 含水率增加,土中的孔隙水的比例增大。由固结理论,含水量变大,土体的体积变化大,导致高填方的工后沉降会变大;另根据次固结理论:在应力

不变的情况,土颗粒与土颗粒之间位置不断调整从而使土体发生变形。含水率的变大使土颗粒与土颗粒之间的接触面变得更光滑(摩擦系数变小),土颗粒更容易压密实,致使沉降量变大。

3.2.2 原地基因素影响下的工后沉降规律分析

原地基的处理方法有很多种,限于篇幅,本文只分析了两种地基处理方法,一种是强夯法处理地基,其原地基因素是强夯深度 h ;另一种是碎石桩法处理地基,其原地基因素桩间距 D 、桩径 d 、桩长 l ,碎石桩的地层参数采用复合地基的等效法计算。

通过数值计算得到两种地基处理方式下不同因素工后沉降历时曲线(见图 5)。

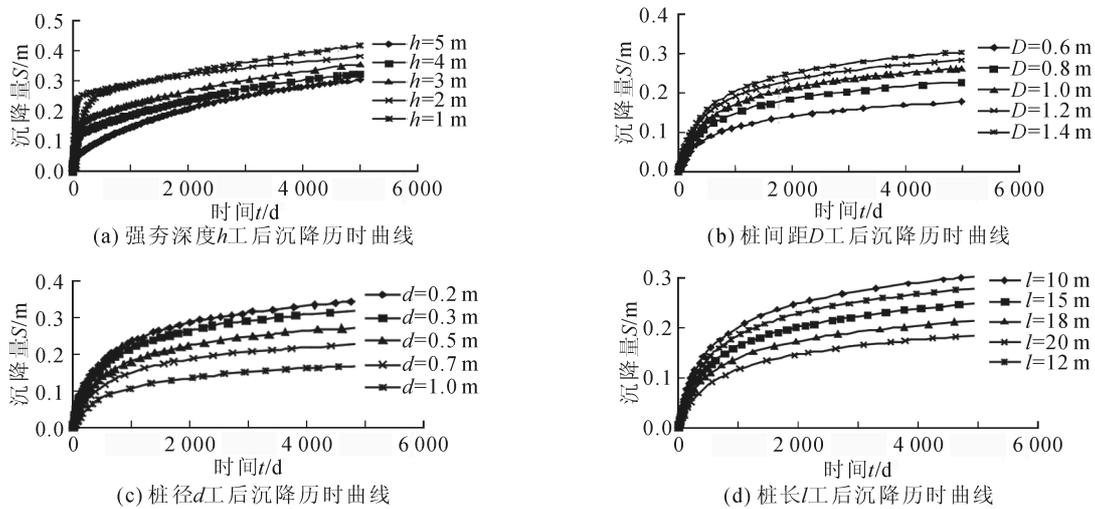


图 5 原地基不同因素工后沉降与时间关系曲线

Fig. 5 Relationship between post-construction settlements of original ground factors and time

由图 5 可知,200 天左右以前黄土高填方的工后沉降速率相对较大,之后工后沉降速率相对较小。随着时间的增加,工后沉降速率逐渐减小,黄土高填方工后沉降相对趋于稳定。依据稳定工后沉降的判断得出影响因素与稳定工后沉降量的关系(表 4)。

表 4 原地基因素稳定工后沉降

Tab. 4 Stable post-construction settlement of original ground factors

强夯深度/m	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
工后沉降量/m	0.417	0.381	0.355	0.325	0.304
桩间距/m	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
工后沉降量/m	0.145	0.197	0.231	0.256	0.280
桩径/m	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0
工后沉降量/m	0.325	0.298	0.248	0.200	0.136
桩长/m	10.0	12.0	15.0	18.0	20.0
工后沉降量/m	0.277	0.250	0.217	0.181	0.151

由上表影响因素与稳定工后沉降量的关系建立各个因素与稳定工后沉降的拟合曲线,如图 6 所示。

根据图 5、图 6 及表 4 可得到如下结论。

1) 强夯深度从 1.0 m 逐渐增大到 5.0 m 的过程中,工后沉降量从 0.417 m 减小至 0.304 m。工后沉降量随压实深度的增大而直线减小,符合强夯深度对黄土高填方影响的规律。

2) 强夯法主要是减小土层的孔隙率,减小土颗粒的次固结。强夯深度越深,土层难压缩厚度就愈大,沉降量会减小。

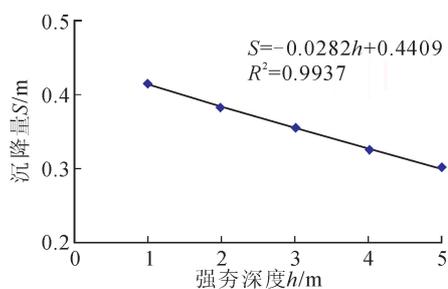
3) 桩间距从 0.6 m 逐渐增大到 1.4 m 的过程中,工后沉降量从 0.145 m 增长到 0.280 m。工后沉降量随桩间距的增大呈对数增长,符合桩间距对黄土高填方影响的规律。

4) 桩的压缩模量比土的压缩模量大,并对周围土体有挤密效果。减小桩间距,增大土体的压缩系数,土层加固效果越明显。但不能过分的减小桩间

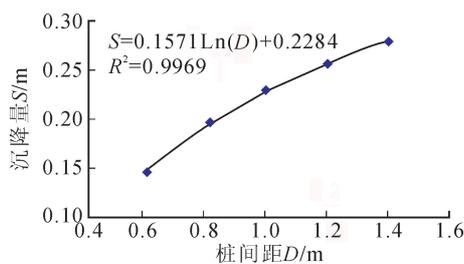
距,因为经济效应不显著。

5) 桩径从 0.2 m 逐渐增大到 1.0 m 的过程中,工后沉降量从 0.325 m 减小到 0.136 m。随着桩径的增大,工后沉降量呈直线衰减,符合桩径对黄土高填方影响的规律。

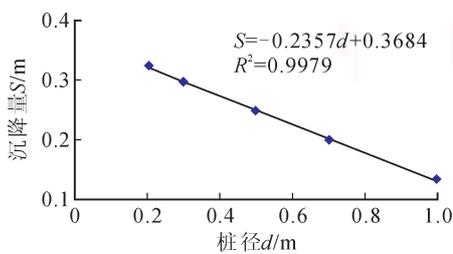
6) 桩的压缩模量比土体的压缩模量大得多,增大桩径,增加加固的面积,同时增大周围土体的压缩模量,工后沉降量变小。



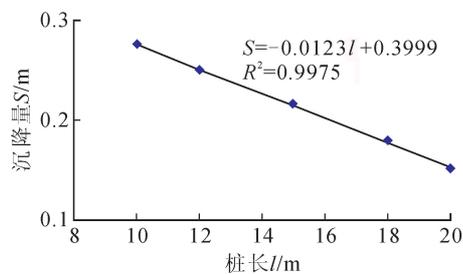
(a) S-h 关系曲线



(b) S-D 关系曲线



(c) S-d 关系曲线



(d) S-l 关系曲线

图 6 原地基因素的稳定工后沉降曲线

Fig. 6 Stable settlement curves of original ground factors of post-construction

3.3 影响因素对工后沉降的敏感性分析及论证

本文运用敏感度系数 M 定量描述影响因素对工后沉降的敏感度。公式如下:

$$M = (\Delta S/S)/(\Delta X/X) \quad (3)$$

式中, $\Delta S/S$ 为稳定工后沉降的变动比率; $\Delta X/X$ 为填土高度的变化率;

$M > 0$ 表示稳定工后沉降与影响因素同方向变化, $M < 0$ 表示稳定工后沉降与影响因素反方向变化。

根据式(3)求得各个影响因素对黄土高填方工后沉降的敏感度系数见表 5。

表 5 黄土高填方工后沉降各因素的敏感度系数
Tab. 5 Sensitivity coefficient of loess high embankment factors of post-construction settlement

填方体因素	压实度	填土高度	含水率	填土速率
	2.316	1.942	1.023	0.338
原地基因素	桩长	桩间距	桩径	强夯深度
	0.836	0.715	0.412	0.184

由表 5 可见,填方体因素的敏感度系数整体都大于原地基因素的敏感度系数。填料压实度对工后

7) 桩长从 10.0 m 逐渐增大到 20.0 m 的过程中,工后沉降量从 0.277 m 减小到 0.151 m。随着桩长的增大,工后沉降量呈直线衰减,符合桩长对黄土高填方影响的规律。

8) 桩的压缩模量比土体的压缩模量大得多,增加桩长,增加加固深度,同时增加整体土体的压缩模量,工后沉降量变小。

沉降的影响最大,施工中可以通过控制填料压实度来控制黄土高填方工后沉降;另外在填方工程中,应特别注意填方体的高度,填方体过高会使得工后沉降急速增加。相对于填料压实度和填方体高度含水率、桩长、桩间距、桩径、填土速率、强夯深度这些因素对工后沉降量影响要小得多。

葛苗苗等^[11,15]进行基于固结蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律研究时,发现填料压实度相对于含水率而言,对黄土高填方工后沉降更为敏感。在黄土高填方沉降规律及工后沉降预测研究中,认为黄土高填方沉降的主体为填方体的自身沉降,减小工后沉降的最有效办法是保证填料压实度。朱才辉^[9]研究了深厚黄土地基上机场高填方沉降规律,其中分别讨论了填土高度和填料压实度对高填方工后沉降影响,且这两者因素对工后沉降影响显著。以上与通过敏感度系数分析的结果相吻合。

4 结论

1) 根据数值实验的结果,黄土高填方工后沉降

随填土高度的增大呈指数增长;随填土速率、含水率的增加呈线性增加;随填料压实度、强夯深度、桩径、桩长的增加呈线性衰减;随桩间距的增大呈对数增长。

2) 从敏感度系数角度:填方体因素的敏感度系数大于原地基因素敏感度系数。其中:填料压实度对工后沉降的影响最大;填方体高度对工后沉降影响次之;其他因素也会影响工后沉降量,但相对与填料压实度和填方体高度小得多。

3) 在实际施工中,可以通过控制填料压实度来控制黄土高填方工后沉降;另外应特别注意填方体的高度,填方体过高会使得工后沉降急速增加。

参考文献:

- [1] CHARLES J A, WATTS K S. The assessment of the collapse potential of fills and its significance for building on fill [J]. Proceedings-ICE: Geotechnical Engineering, 1996, 119(1): 15-28.
- [2] CHARLES J A, SKINNER H D. Compressibility of foundation fills [J]. Proceedings-ICE: Geotechnical Engineering, 2001, 149(3): 145-157.
- [3] 刘宏, 李攀峰, 张倬元. 用压缩蠕变试验研究高填方体沉降变形 [J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(6): 749-753.
LIU Hong, LI Panfeng, ZHANG Zhuoyuan. Compression creep test of high embankment settlement [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(6): 749-753.
- [4] 侯俊伟, 唐秋元, 李杨秋, 等. 西南某山区机场高填方边坡稳定性研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 82-88.
HOU Junwei, TANG Qiuyuan, LI Yangqiu, et al. Stability of high fill slope of an airport in southwest mountainous area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2016, 35(3): 82-88.
- [5] 李秀珍, 徐强, 孔纪名, 等. 九寨黄龙机场高填方地基沉降的数值模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2188-2192.
LI Xiuzhen, XU Qiang, KONG Jiming, et al. Numerical modeling analysis of settlement of high fill foundation for Jiuzhai-huanglong airport [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2188-2192.
- [6] 许强, 黄润秋, 张倬元, 等. 四川九寨黄龙机场高填方变形及稳定性的 FLAC3D 分析 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(增刊1): 333-338.
XU Qiang, HUANG Runqiu, ZHANG Zhuoyuan. Study on deformation and stability of high fill at Jiuzhai-huanglong airport by FLAC3D modeling [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(S1): 333-338.
- [7] 孟莉敏, 周宏益, 刘宏. 山区机场工程高填方碎石土压缩蠕变试验研究 [J]. 铁道勘察, 2008(5): 46-49.
MENG Limin, ZHOU Hongyi, LIU Hong. A study on compression creep tests of high embankment crashed for construction of airports in mountainous areas [J]. Railway Investigation and Surveying, 2008(5): 46-49.
- [8] 朱才辉, 李宁, 刘俊平. 压实 Q3 马兰黄土蠕变规律研究 [J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 392-399.
ZHU Caihui, LI Ning, LIU Junping. Research on the creep behavior of compacted Q3 Ma-Lan loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 392-399.
- [9] 朱才辉. 深厚黄土地基上机场高填方沉降规律研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
ZHU Caihui. Settlement regularity study of loess-high filled airport foundation with large thickness [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [10] 刘奉银, 赵然, 谢定义, 等. 黄土高填方路堤沉降分析 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(6): 23-28.
LIU Fengying, ZHAO Ran, XIE Dingyi, et al. Settlement of loess-filled highway embankment [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2003, 23(6): 23-28.
- [11] 葛苗苗, 李宁, 郑建国, 等. 基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律数值研究 [J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 295-300.
GE Miaomiao, LI Ning, ZHENG Jianguo, et al. Numerical analysis of the post-construction settlement regularity of loess-high filled embankment based on creep test [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 295-300.
- [12] 葛苗苗, 李宁, 郑建国, 等. 考虑黄土时效变形特性的高填方工后沉降预测 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 263-267.
GE Miaomiao, LI Ning, ZHENG Jianguo, et al. Prediction of the post-construction settlement of high filled embankment with considering the time depending deformation of compacted loess [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 263-267.
- [13] 刘媛. 吕梁机场黄土高填方地基沉降的反演与预测研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2011.
LIU Yuan. Inversion and prediction research of loess settlement of high fill foundation for Lüliang airport [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011.
- [14] 山西吕梁机场高填方地基处理及土方填筑试验区试验研究报告 [R]. 北京: 北京中企卓创科技发展有限公司, 2009.
- [15] 葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 745-753.
GE Miaomiao, LI Ning, ZHENG Wei, et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 745-753.

(责任编辑 王卫勋)