

引文格式:朱彦鹏,董怀堂,韦杰强,等.改进的分层总和法在黄土地区高填方地基沉降变形中的应用研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(3):159-168.

ZHU Yanpeng, DONG Huaitang, WEI Jieqiang, et al. Research on application of improved layered summation method in settlement and deformation of high fill foundation in loess area[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 159-168.

DOI:10.19815/j.jace.2022.07003

改进的分层总和法在黄土地区高填方地基沉降变形中的应用研究

朱彦鹏^{1,2}, 董怀堂^{1,2}, 韦杰强², 赵 骏², 王怡轩²

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 中建科工集团有限公司, 广东 深圳 518107)

摘要:黄土高填方沉降变形控制是工程建设的重点和难点。通过室内侧限压缩试验和加湿试验,总结了重塑黄土在自重应力和含水率变化下的变形特征。基于分层总和法的思想,引入了 Gunary 模型和割线模量法,将黄土高填方地基的沉降分为荷载引起的施工沉降和含水率变化引起的施工后沉降,并提出了黄土高填方地基沉降变形的计算方法。结合实际工程背景,预测了高填方工程的沉降变形。结果表明:黄土高填方沉降的主要来源是施工期荷载引起的沉降;随着填土高度的增加,工后沉降占总沉降的比例逐渐增大;在最优含水率条件下,当施工期压实度达到 95% 以上时即可完成土的排气固结,施工后期为土的排水固结;压实度的控制对高填方工程至关重要;该研究成果丰富了黄土高填方地基沉降变形的计算理论,为黄土高填方工后沉降和湿陷性沉降的研究提供了理论依据,并对黄土高填方工程的施工及工后沉降控制具有一定的参考价值。

关键词:分层总和法;黄土地区;地基沉降;Gunary 模型;割线模量法

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)03-0159-10

Research on application of improved layered summation method in settlement and deformation of high fill foundation in loess area

ZHU Yanpeng¹, DONG Huaitang^{1,2}, WEI Jieqiang², ZHAO Jun², WANG Yixuan²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. China Construction Science and Industry Corporation Ltd., Shenzhen 518107, Guangdong, China)

Abstract: The settlement deformation control of loess high fill is the key and difficult point of engineering construction. The deformation characteristics of remolded loess under the variation of self-weight stress and moisture content were summarized through laboratory confined compression test and humidification test. Based on the idea of layered summation method, the Gunary model and secant modulus method were introduced, the settlement of loess high fill foundation was divided into construction settlement caused by load and post-construction settlement caused by water content change, and the calculation method of settlement deformation of loess high fill foundation was put forward. Combined with the practical engineering background, the settlement deformation of high fill engineering was predicted. The results show

that the main source of loess high fill settlement is the settlement caused by construction load. With the increase of fill height, the proportion of post-construction settlement to total settlement increases gradually. Under the optimum water content, when the compactness is over 95% during the construction period, the exhaust consolidation of soil can be completed, and the drainage consolidation of soil can be completed in the later construction period. The control of compaction degree is very important for high fill engineering. The research results enrich the calculation theory of settlement deformation of loess high fill foundation, and provide theoretical basis for the study of post-construction settlement and collapsible settlement of loess high fill foundation. It is of certain reference value to the construction and post-construction settlement control of loess high fill project.

Key words: layered summation method; loess area; foundation settlement; Gunary model; secant modulus method

Author resume: ZHU Yanpeng(1960-), male, professor, E-mail: zhuyp@lut. cn.

0 引 言

随着城镇化建设的加快和“一带一路”倡议的深入实施,城市用地紧张,建筑选址逐渐向城市四周扩张。建设用地需求量大与土地资源短缺的矛盾日益突出,“削山填沟造地”战略应用而生。大量的黄土高填方工程带来了高填方技术、黄土湿陷性沉降及工后沉降控制、高填方边坡稳定性、生态环境保护等诸多问题。从时间方面讲,地基沉降分为瞬时沉降、固结沉降和蠕变沉降三部分^[1]。对于三者的关系主要有两种观点:一种观点认为地基沉降过程可以分为3个阶段,即瞬时沉降阶段、固结沉降阶段以及次固结(蠕变)沉降阶段^[2-5];另一种观点认为瞬时沉降完成之后,固结和蠕变同时发生,只是在前期以固结沉降为主,在固结沉降完成之后以蠕变为主^[6-9],这两种观点对于高填方沉降都会产生较大的影响。从空间上看,高填方地基的沉降包括上部填土的沉降和下部地基的沉降。从时间上看,地基沉降包括瞬时沉降、主要固结沉降和蠕变沉降^[10],蠕变固结也称为次固结。严格来说,一次固结沉降与二次固结沉降没有明显差异,但在填筑施工阶段,一次固结沉降占主导地位,而二次固结沉降在填筑后期占主导地位。通常情况下,主固结沉降指土体中的排气固结和排水固结,排气固结发生在排水固结之前。就土壤压缩变形而言,主要由土壤的排气固结引起^[11]。次固结沉降是一种与时间有关的缓慢沉降变形,通常伴随着土壤颗粒结构的重新排列,以实现新的平衡^[12-13]。

关于高填方地基沉降变形的问题,很多学者做

了大量研究,研究内容主要包括工后沉降发展规律、不同压实度、不同含水率对工后沉降的影响、具体工程中填方高度与工后沉降的相关性、数值模拟分析以及工后沉降的反演预测等^[7,14-17]。魏汝龙^[18]认为软黏土的压缩曲线更符合双曲线特征。黄雪峰等^[19]通过大量实验室试验证明,双曲线模型和幂函数不适合压实黄土,提出可以用 Gunary 模型描述压实黄土在侧向压缩下的竖向压缩应力-应变关系。然而,对压实黄土应力-应变关系的研究还相对不足。考虑到黄土的湿陷性,当土壤含水率发生变化时,会产生增湿或除湿变形^[20]。近年来,黄土含水率变化引起的变形经历了从狭义浸没饱和湿陷性到广义浸没增湿湿陷性,从单调增湿变形到增湿除湿、间歇增湿变形,从加湿(除湿)路径到加载(卸载)路径的耦合,极大地丰富了相关理论。然而,从目前的研究成果来看,对于自重应力和含水率变化下高填方黄土的沉降计算方法研究较少。黄土的特殊结构和水敏性使黄土高填方地基沉降计算更加复杂。因此,有必要对其进行更深入的研究。

本文通过室内侧限压缩试验和加湿试验,总结了重塑黄土在自重应力作用下的变形特征和含水率变化。将充填体的变形视为后一次充填对前一次充填影响的结果,分别分析了充填载荷引起的变形和含水率变化引起的变形。基于分层总和法的思想,提出了黄土高填方地基沉降计算方法;结合实际工程背景,对高填方工程的沉降变形进行了预测。本文研究成果丰富了黄土高填方地基沉降变形的计算理论,为黄土高填方工后沉降和湿陷性沉降的研究提供了理论依据。

1 黄土高填方岩土工程问题

高填方黄土施工中所涉及的问题可概括为“四面、二体、二水”控制,其中“四面”包括原始基础面、开挖与填土界面(挖填界面)、基岩与黄土界面(岩黄界面)和自由面,“两体”是原始地基土体和填土体,“两水”包括地下水和地表水。黄土高填方的岩土工程问题是在分析高填方的强度、变形和持水特性的基础上,针对“四面、两体、两水”采取措施,有效平衡生态环境保护和工程建设的需要,对高填方地基的变形和高填方边坡的稳定性进行合理的预测和评估(图1)。

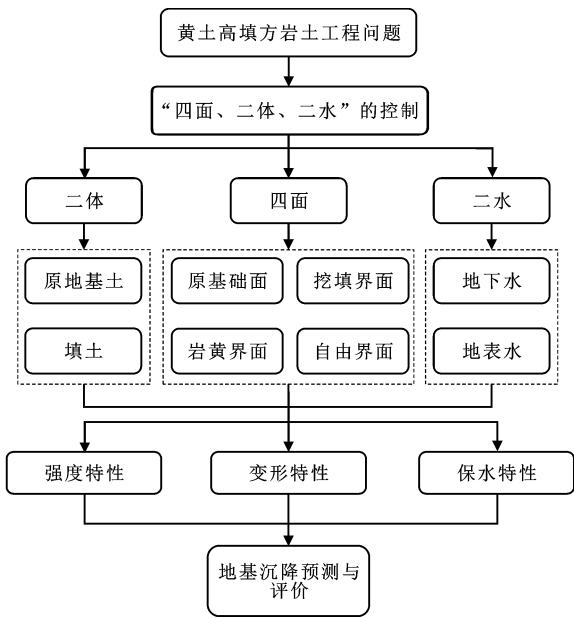


图1 黄土高填方岩土工程问题

Fig.1 Geotechnical engineering problems of loess high fill

影响高填方地基变形的因素很多,涉及填料的选择和配合比设计、填料的变形特性、强度特性和保水特性等诸多方面,可分为内部因素和外部因素。内部因素包括填料的物理和机械性能,如内聚力、内摩擦角、重量和含水率。外部因素主要包括原地基处理方法、充填方法、开挖充填界面重叠方式、充填速度、地下水和地表水处理^[6]。

填料通常由当地材料制成,其配合比根据填料所在地的当地条件进行设计。最佳湿度、填料的含量、最大干密度和其他物理机械参数通过实验室试验确定。根据设计要求合理选择填筑试验段。通过试验选择了地基处理方法、充填方法和充填速度。在充填过程中,控制压实度和空隙率,实现对填土地基沉降的有效控制。此外,大面积填充将改变原地基中水的状态,因此必须考虑工程的防排水措施^[21]。

2 高填方地基沉降变形与计算

2.1 黄土高填方地基沉降变形特性研究

土体变形可分为体积变形和形状变形。实际工程中的沉降变形主要与体积变形有关,体积变形涉及土壤的压缩和固结^[22]。土壤变形是孔隙水、孔隙气和土壤骨架共同作用的结果^[19]。对于湿陷性黄土,沉降和变形的原因可归结为两个方面:内因是黄土本身的性质,包括黄土的物质组成、结构和湿陷性;外因主要是水和力的作用。压缩的根源是土壤中孔隙水和孔隙气的排放。图2为黏性土典型压实曲线,其中 ρ_{dmax} 、 w_{op} 分别为黏土的最优含水率和最大干密度。可以看出,仅通过压实无法达到土壤饱和,这意味着对于湿陷性黄土高填方项目,研究对象是非饱和土^[11]。

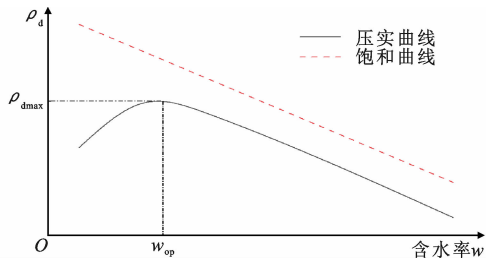


图2 黏性土典型压实曲线

Fig.2 Typical compaction curve of cohesive soil

当压实黄土受到垂直应力时,应力的增加会在土壤中产生一定的孔隙空气压力和孔隙水压力,随着应力的增加,土壤中的孔隙空气将首先排出,并完成排气固结,这一过程伴随着土壤的初始变形。之后,土体中的孔隙水在竖向应力的作用下逐渐排出,土体从非饱和状态趋于饱和状态,直至土体中的压力达到新的平衡,排水固结完成。排水后,土壤在有效应力的调整下继续经历二次固结蠕变变形,最终达到稳定状态^[23]。

一定压力下,当湿陷性黄土的湿度达到一定程度时,就会发生湿陷变形。黄土的湿陷变形是由于土的结构在力和水的共同作用下发生破坏而引起的,是黄土水敏性在变形中的体现。在实际工程中,为了保证土壤的密实度,土壤在最优含水率下压实。当土壤含水率发生变化时,会发生相应的变形。以最优含水率为边界,当填土的含水率因雨水、地表水或地下水的渗透而增加时,即产生增湿效应,增加的含水率将破坏黄土颗粒之间的连接,导致高架结构体系失去稳定性和坍塌。然而,当填充土的含水率因空气干燥和蒸发而减少时,即发生减水作用,水分

的减少使土壤的孔隙变大,土壤的压缩性增加。从图 3 的压实曲线可以看出,在低含水率条件下,土壤的压实度降低,此时土壤在垂直应力作用下发生压缩变形。当含水率发生变化时,黄土的压缩变形和湿陷变形在一定的约束条件下相互转化^[24]。

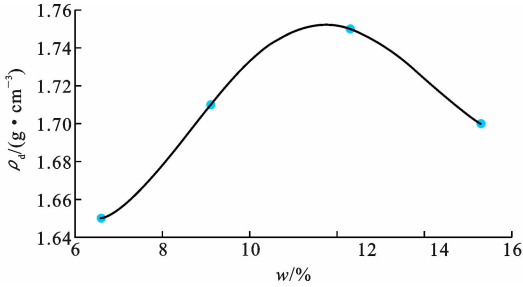


图 3 黏性土压实曲线

Fig. 3 Compaction curve of cohesive soil

2.2 高填方地基沉降计算

对于高填方地基的沉降变形,大量学者根据压缩试验和现场实测计算并预测了地基沉降量^[25]。黄土高填方地基的沉降是由自重应力和水作用下土体压缩变形和湿陷变形引起的。因此,高填方地基的沉降分为荷载引起的变形 s_p 和含水率变化引起的变形 s_w 。

高填方地基的变形可以看作是回填土对填土前的压力,土体的压缩可以用分层总和法计算。土的总沉降是各层压缩量之和,各层压缩变形是由上层土的填充引起的。因此,每层的上部土壤可视作该层的荷载,土壤产生的总沉降可视作每层叠加荷载的结果。

刘政^[26]将某填方工程的土壤自下而上分为 n 层,第 i 层土壤的厚度为 h_i ,第 i 层土壤的上部附加荷载 Δp_i 见式(1),第 n 层土上部无填土,不考虑上部荷载。

$$\Delta p_i = \sum_{j=i+1}^n \gamma_j h_j \quad i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (1)$$

式中: γ_j 为第 j 层土体重度。

2.2.1 考虑荷载作用的变形

假定填土的含水率保持不变,仅考虑由荷载引起的地基沉降,在一定的初始压实系数下,上覆荷载从 p_{ia} 变化为 p_{ib} ($p_{ia} < p_{ib}$),孔隙比由 e_{ia} 变化为 e_{ib} ,初始含水率为 w_1 。对于每层土壤,上部土壤的重力被视为大面积连续均布荷载。

对于第 i 个充填体,上覆荷载 p_i 为

$$\left. \begin{aligned} p_i &= p_{i2} - p_{i1} \\ p_{i1} &= 0 \\ p_{i2} &= p_{i1} + \Delta p_i = \sum_{j=i+1}^n \gamma_j h_j \\ i &= 1, 2, 3, \dots, n-1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: p_{i1} 为初始压力; p_{i2} 为加载后的压力。

根据土层一维压缩变形的基本公式,在已知孔隙比-压力($e-p$)曲线的情况下,利用有限元方法计算土层的一维压缩变形 s_{pi} ,如式(3)所示。

$$s_{pi} = \epsilon_{ia,b} h_i \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{ia,b}$ 为上覆荷载从 p_{ia} 变化为 p_{ib} 时的变形系数。

假设试样初始高度为 h_0 ,在荷载 p_{ia} 、 p_{ib} 作用下的压缩变形量 Δh_{ia} 、 Δh_{ib} 为

$$\Delta h_{ia} = \epsilon_{ia1} h_0, \quad \Delta h_{ib} = \epsilon_{ib1} h_0 \quad (4)$$

式中: ϵ_{ia1} 、 ϵ_{ib1} 分别为 p_{ia} 、 p_{ib} 作用下的累积应变。

魏汝龙^[18]通过大量试验,提出割线模量法。该方法不受试样孔隙率的影响,能较好地反映土的压缩变形特性。 p_{ia} 、 p_{ib} 作用下侧限压缩固结的变形模量 E_{soial} 、 E_{soibl} 为

$$E_{soial} = \frac{p_{ia}}{\epsilon_{ia1}}, \quad E_{soibl} = \frac{p_{ib}}{\epsilon_{ib1}} \quad (5)$$

黄雪峰等^[19]通过研究发现,Gunary 模型能够反映压实黄土在高压和低压条件下的应力-应变关系,拟合精度高,稳定性好。因此,本文引入了 Gunary 模型来反映压实黄土的垂直压应力与垂直压应变的关系,如式(6)、(7)所示。

$$E_{soial} = d + f p_{ia} + g \sqrt{p_{ia}} \quad (6)$$

$$E_{soibl} = d + f p_{ib} + g \sqrt{p_{ib}} \quad (7)$$

式中: d 、 f 和 g 为试验中在含水率和密实度下的拟合参数, d 代表物理意义上应力趋于 0 时的初始切割模量,详细的参数描述见参考文献[19],这里不再赘述。

根据式(4)~(7)可知,试样由荷载 p_{ia} 增加到 p_{ib} 时的加压变形量 Δs 为

$$\Delta s = \Delta h_{ib} - \Delta h_{ia} = (\epsilon_{ib1} - \epsilon_{ia1}) h_0 = \left(\frac{p_{ib}}{E_{soibl}} - \frac{p_{ia}}{E_{soial}} \right) h_0 \quad (8)$$

上覆荷载从 p_{ia} 变化为 p_{ib} 时的变形系数 $\epsilon_{ia,b}$ 为

$$\epsilon_{ia,b} = \frac{\Delta s}{h_0} = \frac{p_{ib}}{E_{soibl}} - \frac{p_{ia}}{E_{soial}} = \frac{p_{ib}}{d + f p_{ib} + g \sqrt{p_{ib}}} - \frac{p_{ia}}{d + f p_{ia} + g \sqrt{p_{ia}}} \quad (9)$$

根据式(3)、(9)可知,第 i 层土壤的压缩变形

s_{pi} 为

$$s_{pi} = \epsilon_{ia,b} h_i = \left(\frac{p_{ib}}{E_{soib1}} - \frac{p_{ia}}{E_{soia1}} \right) h_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (10)$$

因此,只考虑荷载作用的总变形量 s_p 为

$$s_p = \sum_{i=1}^{n-1} s_{pi} = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{p_{ib}}{E_{soib1}} - \frac{p_{ia}}{E_{soia1}} \right) h_i \quad (11)$$

2.2.2 含水率变化引起的变形

在恒力条件下,仅由浸水引起的黄土变形称为湿陷性。在狭义饱和湿陷中,含水率为 W_j 的土样在一定压力 p_i 下的湿陷系数 δ 为

$$\delta = \frac{h_j - h_k}{h_0} \quad (12)$$

式中: h_j 为在 p_i 作用下压缩变形达到稳定后的土样高度; h_k 为压缩变形稳定、含水饱和后的土样高度。

推广到因含水率变化引起的广义变形,假定土样的初始含水率从 w_1 增湿到 w_2 ,在一定压力 p_{ib} 作用下的湿陷变形系数 $\Delta\delta_{ib1,2}$ 为^[18]

$$\Delta\delta_{ib1,2} = \frac{|h_{ib1} - h_{ib2}|}{h_0} \quad (13)$$

$$\Delta\delta_{ib1} = h_0 - \Delta h_{ib1}, h_{ib2} = h_0 - \Delta h_{ib2} \quad (14)$$

式中: h_{ib1} 为 p_{ib} 作用下含水率变化前的土体高度; h_{ib2} 为含水率变化后的土体高度; Δh_{ib1} 和 Δh_{ib2} 分别为 h_{ib1} 和 h_{ib2} 作用下的压缩变形。

因此式(13)可以重写为

$$\Delta\delta_{ib1,2} = \frac{|\Delta h_{ib1} - \Delta h_{ib2}|}{h_0} \quad (15)$$

根据式(4)、(5),可以得到

$$\Delta h_{ib1} = \epsilon_{ib1} h_0 = \frac{p_{ib}}{E_{soib1}} h_0 \quad (16)$$

$$\Delta h_{ib2} = \epsilon_{ib2} h_0 = \frac{p_{ib}}{E_{soib2}} h_0 \quad (17)$$

因此,在 p_{ib} 作用下从 w_1 增湿到 w_2 的湿陷系数 $\Delta\delta_{ib1,2}$ 为

$$\Delta\delta_{ib1,2} = |\epsilon_{ib1} - \epsilon_{ib2}| = |p_{ib} \left(\frac{1}{E_{soib1}} - \frac{1}{E_{soib2}} \right)| = \frac{p_{ib} \Delta E_{soi}}{E_{soib1} E_{soib2}} \quad (18)$$

式中: ΔE_{soi} 为 $E_{soib} - p_{ib}$ 曲线在含水率变化前与含水率变化后两直线方程截距的差。

所以,含水率变化引起的变形 $\Delta s_{ib1,2}$ 为

$$\Delta s_{ib1,2} = \Delta\delta_{ib1,2} h_0 \quad (19)$$

将式(18)代入到式(19),可以得到

$$\Delta s_{ib1,2} = \frac{p_{ib} \Delta E_{soi}}{E_{soib1} E_{soib2}} h_0 \quad (20)$$

对于实际工程, h_0 为每层填土的厚度,也就是

之前提到的 h_i ,所以考虑含水率变化的总变形 s_w 为

$$s_w = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta s_{ib1,2} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{p_{ib} \Delta E_{soi}}{E_{soib1} E_{soib2}} h_i \quad (21)$$

因此,高填方地基沉降总的变形量为

$$s = s_p + s_w = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{p_{ib}}{E_{soib1}} - \frac{p_{ia}}{E_{soia1}} \right) h_i + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{p_{ib} \Delta E_{soi}}{E_{soib1} E_{soib2}} h_i \quad (22)$$

3 工程验证

3.1 试验测试

黄土取自中国甘肃省兰州市的一个高填方项目。根据室内试验,土壤的平均天然含水率为 7.1%,土壤的相对密度 G_s 为 2.7。通过击实试验得出土的击实曲线,选择的击实参数为:试验筒内径 15.2 cm,高度 11.6 cm,落锤高度 45.7 cm,锤重 4.5 kg,锤击次数 135 次,单位击实动能为 1 293.2 kJ · m⁻³。通过压实试验得到场地内黄土的最优含水率为 11.9%,相应的最大干密度为 1.75 g · cm⁻³。

高应力下压实黄土的侧向约束压缩试验是在实验室进行的,设备是 WG 高压固结仪。为了得到黄土增湿(减湿)变形规律,土样含水率分别为 7.1%、9.5%、11.9%、13.4%和 15.7%。土壤的干密度为 1.6、1.7、1.8、1.9 g · cm⁻³,相应的压实度为 80%、85%、90%和 95%。试验在 25、50、100、200、400、800、1 000、1 200、1 600、2 000 kPa 的高压固结仪上进行,为了防止水分流失,在试验过程中,通过调整透水石的含水率来平衡土样的含水率,并在样品容器的上部铺上相同含水率的湿布,使样品的含水率基本保持在目标含水率附近。试验荷载的稳定条件为每个压力阶段下的固结时间为 24 h,或试样变形变化不大于 0.01 mm · h⁻¹。测量稳定性读数后,施加下一阶段的压力,逐渐加压,直到试验结束。

从试验中获得的应变-应力($\epsilon_{si} - p_i$)曲线如图 4 所示,图中 K 代表压实度。可以看出,在相同含水率下,土壤压实度越大,压缩应变越小。在相同的竖向应力下,土体的压实度越大,压缩应变越小。采用 Gunary 模型拟合压实黄土的侧向约束应力-应变关系,可以看出 $\epsilon_{si} - p_i$ 曲线的拟合良好,拟合判定系数大于 0.99。之前的研究表明压实黄土的 $\epsilon_{si} - p_i$ 曲线也符合双曲线和幂函数分布^[27]。因此,根据试验结果分别对双曲线模型和幂函数模型进行拟合,拟合结果如表 1 所示。从表 1 可以看出:Gunary 模型的拟合结果最好,平均判定系数为 0.998 6;其次为双

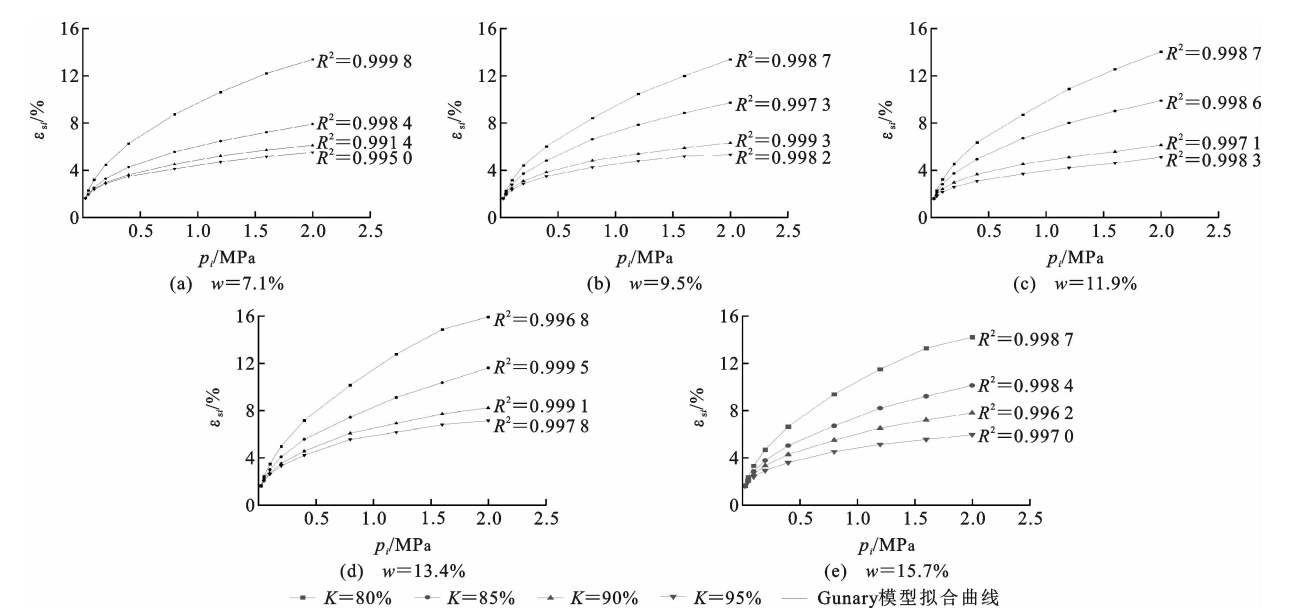


图 4 不同含水率的 $\varepsilon_{\text{v}}-p_i$ 曲线

Fig. 4 $\varepsilon_{\text{v}}-p_i$ curve of different moisture content

表 1 不同模型 ε_i-p_i 拟合结果

Table 1 ε_i-p_i fitting results of different model

$K/\%$	$w/\%$	Gunary 模型 $\varepsilon_i = p_i / (d + f p_i + g \sqrt{p_i})$				双曲线模型 $\varepsilon_i = p_i / (d + f p_i)$			幂函数模型 $\varepsilon_i = k p_i^n$		
		d	f	g	R^2	d	f	R^2	k	n	R^2
80	7.1	11.232 4	0.010 3	2.254 9	0.999 8	4 533.80	3.65	0.965 2	0.000 4	-1.987	0.804 3
	9.5	12.988 7	0.006 9	3.102 5	0.999 7	5 768.50	4.35	0.911 9	0.000 3	-0.141	0.596 4
	11.9	8.621 5	0.008 5	2.754 6	0.999 7	5 602.30	4.43	0.876 5	0.000 3	-0.147	0.576 5
	13.4	7.853 1	0.023 7	1.589 1	0.996 8	2 918.20	4.91	0.962 2	0.000 9	-0.269	0.758 9
	15.7	7.201 5	0.023 5	2.036 5	0.998 7	4 387.70	4.89	0.915 4	0.000 4	-0.187	0.506 2
85	7.1	-6.589 7	0.008 7	6.542 3	0.998 4	5 745.23	8.95	0.935 2	0.000 7	-0.312	0.890 1
	9.5	-7.956 4	0.059 8	7.877 9	0.997 3	5 756.24	7.33	0.872 8	0.000 9	-0.421	0.938 7
	11.9	-2.758 9	0.035 7	6.025 3	0.998 6	7 498.40	6.54	0.940 1	0.000 4	-0.212	0.912 3
	13.4	-2.227 1	0.023 5	5.871 4	0.999 5	4 089.30	6.89	0.935 6	0.001 4	-0.387	0.958 7
	15.7	-2.156 3	0.025 7	5.690 0	0.998 4	5 478.20	7.94	0.895 6	0.001 0	-0.289	0.905 3
90	7.1	-4.886 5	0.042 1	5.231 5	0.991 4	6 500.23	11.54	0.945 6	0.000 7	-0.401	0.891 2
	9.5	2.123 5	0.054 2	5.213 5	0.999 3	5 879.23	13.54	0.956 9	0.001 1	0.421	0.935 4
	11.9	-5.177 9	0.056 4	6.059 8	0.997 1	5 692.60	12.38	0.944 5	0.001 0	-0.345	0.901 2
	13.4	-5.684 8	0.078 9	3.375 1	0.999 1	3 200.90	10.47	0.958 9	0.002 8	-0.423	0.949 2
	15.7	-2.456 1	0.032 3	4.612 5	0.996 2	4 657.00	11.39	0.955 6	0.125 6	-0.414	0.947 8
95	7.1	-7.652 3	0.025 4	6.845 6	0.995 0	6 543.54	11.65	0.946 8	0.005 8	-0.301	0.714 5
	9.5	-6.874 5	0.002 3	8.120 1	0.998 2	4 562.32	14.21	0.965 8	0.001 0	-0.452	0.845 6
	11.9	-7.489 5	0.021 5	7.748 9	0.989 3	9 789.40	14.93	0.954 8	0.000 5	-0.281	0.847 9
	13.4	-5.456 8	0.067 8	5.148 7	0.997 8	3 167.50	12.59	0.912 3	0.004 5	-0.499	0.943 6
	15.7	-5.897 4	0.087 4	4.877 4	0.997 0	6 401.20	10.25	0.958 7	0.000 7	-0.412	0.875 5

曲线模型,平均判定系数为 0.935 5;幂函数拟合效果差,平均判定系数为 0.835 0。因此,该地区压实黄土的应力-应变关系更符合 Gunary 模型。

根据式(5),给出了最优含水率 $w=11.9\%$ 和压实度 $K=95\%$ 条件下的 $E_{\text{soi}}-p_i$ 曲线,分别如图 5 和

图 6 所示。可以看出,式(5)可以很好地拟合 $E-p$ 曲线,拟合判定系数在 0.99 以上。在最优含水率条件下,割线模量随压实度的增加而增加,且 $E_{\text{soi}}-p_i$ 的斜率随压实度的增加而增大,随着压实度的降低, $E_{\text{soi}}-p_i$ 曲线逐渐趋于线性。

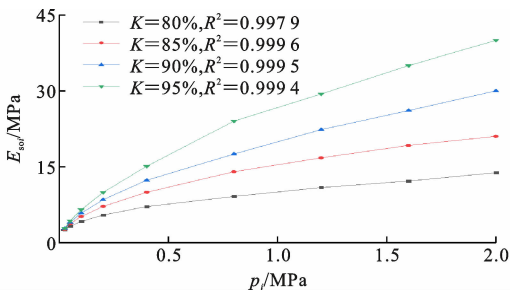


图 5 含水率为 11.9% 的 E_{soi} - p_i 曲线
Fig. 5 E_{soi} - p_i curve with 11.9% water content

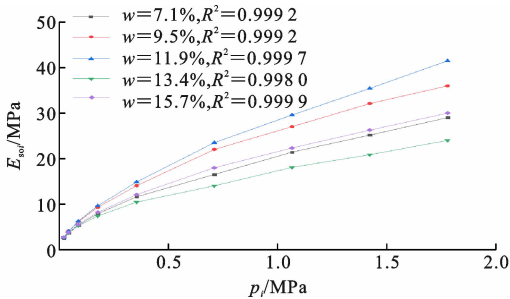


图 6 压实度为 95% 的 E_{soi} - p_i 曲线
Fig. 6 E_{soi} - p_i curve with 95% compaction

3.2 沉降计算

为保证压实质量,本工程采用最优含水率填筑,根据图 5 的 E_{soi} - p_i 曲线,在“考虑荷载作用的变形”的最优含水率下,可获得式(9)所需的模型参数,如表 2 所示。根据本文的算法,对不同高度和压实度的高填方工程的沉降变形进行了预测,结果如表 3 所示,其中 H 为填筑高度, s 为沉降。可以看出,随着填筑高度的增加,地基沉降增大,压实度对充填体沉降变形有显著影响。高度为 60 m 的填筑体在不同压实度下的沉降分别为 3.16 m($K=80\%$)、1.94 m($K=85\%$)、1.41 m($K=90\%$)和 1.34 m($K=95\%$),这意味着当压实度从 80% 增加到 95% 时,地面沉降减少 58%,表明高填方工程对压实度的控制至关重要。

表 2 Gunary 模型参数
Table 2 Gunary model parameters

$K/\%$	模型参数		
	d	f	g
80	749.35	0.78	271.49
85	-434.58	1.94	587.21
90	-356.67	1.89	587.43
95	-1 400.82	2.43	791.59

3.3 沉降验证

方焘等^[28]在高填方沉降计算中,根据工程经验,得出了一些经验公式,如德国和日本常用的经验

表 3 施工期沉降
Table 3 Settlement during construction

$K/\%$	H/m	s/m	$K/\%$	H/m	s/m
80	10	0.71	90	10	0.37
	20	0.89		20	0.63
	40	1.77		40	1.04
	60	3.16		60	1.41
85	10	0.58	95	10	0.19
	20	0.71		20	0.32
	40	1.17		40	0.78
	60	1.94		60	1.34

公式为

$$s=H^2/3\ 000 \tag{23}$$

顾慰慈^[29]研究了土石坝高填方工程,给出了施工期间沉降的经验公式,即

$$s=0.001\ 496H^{1.646} \tag{24}$$

根据式(23)和式(24)计算沉降变形,结果如图 7 所示。可以看出,这两个公式计算的高度为 60 m 的填筑体沉降分别为 1.20 m[式(23)]和 1.26 m[式(24)],这与本文的计算结果相似,表明本文的计算方法在考虑荷载作用下是可行的。

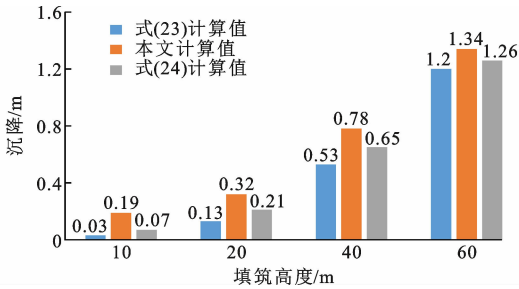


图 7 施工期沉降对比
Fig. 7 Comparison of settlement during construction

考虑含水率变化的地基沉降主要针对高填方地基在降雨入渗引起的含水率增加或填筑后期风干蒸发引起的含水率降低的条件下的变形,这是由恒定力假定下含水率变化引起的。试验区黄土天然含水率为 7.1%,低于最优含水率 11.9%。在填筑高填方地基时,有必要通过加湿使土壤达到最优含水率。兰州市地处温带大陆性(干旱)气候区,年干燥度(最大可能蒸发量与降水量之比)大于 1.0,蒸发量一般大于降水量。如果不考虑人为因素造成的新供水,在正常气候条件下,高填方体含水率的总体趋势主要是含水率减少,并假设土壤最终含水率趋于自然含水率。

当压实度为 95% 时,通过图 5 中天然含水率为 7.1% 和最优含水率为 11.9% 的 E_{soi} - p_i 曲线,来获

得式(6)、(7)所需的参数。根据式(20)、(21),可以得到高填方在施工后减湿作用下的沉降变形,结果如表4所示。

表 4 工后沉降

Table 4 Post-construction settlement

高度/m	10	20	40	60
沉降/m	0.04	0.09	0.26	0.50

通过式(24)得到压实度为95%的高填方的总沉降,以及填方施工过程中荷载引起的变形和施工后含水率变化引起的变形的沉降率,如表5所示。后期含水率变化引起的沉降占总沉降的18%~27%,且沉降量随填筑高度的增加而逐渐增加,说明后期含水率变化引起的沉降不容低估。

表 5 高填方沉降量

Table 5 Settlement of high fill

高度/m	总沉降量 S/m	施工中沉降量 S _p /m	后期沉降量 S _w /m	施工沉降与总沉降量比值/%	后期沉降与总沉降量比值/%
10	0.23	0.19	0.04	82	18
20	0.41	0.32	0.09	77	23
40	1.04	0.78	0.26	75	25
60	1.84	1.34	0.50	73	27

4 讨 论

假设土颗粒不可压缩,土的变形是由于孔隙比的减小,则土的沉降变形值为

$$s=\frac{H(e_1-e_2)}{1+e_1} \tag{25}$$

式中: e_1 和 e_2 为变形前后的孔隙率,对于高填方地基的压实黄土,填土的孔隙率应为填土后的孔隙率,以满足压实要求。

孔隙比 e' 的定义为

$$e'=\frac{V_a+V_w}{V_s} \tag{26}$$

式中: V_a 、 V_w 和 V_s 分别为孔隙空气体积、孔隙水体积和土壤颗粒体积。

填料体的压实过程主要是土壤的排气固结过程,假设排气固结通过该过程完成,即 $V_a=0$,则压实土壤的孔隙比 e'' 为

$$e''=\frac{V_w}{V_s} \tag{27}$$

根据土壤含水率和相对密度的定义,式(27)可写为

$$e''=\frac{w}{G_s} \tag{28}$$

因此,充填体的孔隙率可以写为

$$e=e''=\frac{w}{G_s} \tag{29}$$

在这种情况下,充填体按照11.9%的最佳含量填充,相对密度 G_s 为2.6。通过式(28)可得11.9%含水率下的孔隙比 $e_{11.9\%}=0.05$ 。综上所述,该地区高填方土体含水率变化主要受减湿作用的影响,最终含水率将趋于天然含水率(7.1%)。通过式(28)可得 $e_{7.1\%}=0.03$,将其代入式(26),设 $e_1=e_{11.9\%}$, $e_2=e_{7.1\%}$,取山基高度为60 m,可计算得到 $s_{60}=1.43$ m。根据“含水率变化引起变形”的计算方法得到,在压实度为95%的情况下,60 m高填方基础在施工期间的沉降量为1.34 m,与1.43 m的计算结果相近,说明该计算方法在考虑含水率变化情况下也是可行的。当施工期压实度大于95%时,可以完成排气固结,即 $V_a=0$,后期为排水固结,证实了高填方土体压实度控制的重要性。

5 结 语

(1)压实度的控制对高填方工程至关重要,压实度越高,总沉降越小;Gunary模型能较好地描述压实黄土的非线性应力-应变关系,其拟合优度优于双曲线模型和幂函数模型。

(2)黄土高填方沉降的主要来源是施工过程中荷载引起的沉降。随着填土高度的增加,含水率变化引起的沉降在总沉降中所占的比例逐渐增大。

(3)在最优含水率条件下,当施工期压实度达到95%以上时即可完成土体的排气固结,后期主要为土体的排水固结。

(4)本文提出的计算方法丰富了黄土高填方地基沉降变形的计算理论,对黄土高填方工程的施工和沉降控制有一定的参考价值。

参考文献:

References:

[1] 杜伟飞,郑建国,刘争宏,等.黄土高填方地基沉降规律及排气条件影响[J].岩土力学,2019,40(1):325-331.
DU Weifei, ZHENG Jianguo, LIU Zhenghong, et al. Settlement behavior of high loess-filled foundation and impact from exhaust conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 325-331.

[2] 孔 洋,阮怀宁,黄雪峰.黄土丘陵沟壑区压实回填土地基沉降计算方法[J].岩土工程学报,2018,40(增1): 218-223.

- KONG Yang, RUAN Huaining, HUANG Xuefeng. Calculation method of foundation settlement of compacted backfill soil in loess hilly and gully region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1):218-223.
- [3] 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.
- 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.
- [4] 于永堂,郑建国. 黄土高填方场地工后沉降预测新模型[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6):1268-1276, 1292.
- YU Yongtang, ZHENG Jianguo. New prediction model for post-construction settlement of loess high fill site[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6):1268-1276, 1292.
- [5] 安鹏,张杰,倪万魁,等. 安康机场罗家河膨胀土高填方沉降变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4):833-839.
- AN Peng, ZHANG Jie, NI Wankui, et al. Settlement and deformation characteristics of high fill of Luoiahe expansive soil in Ankang airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4):833-839.
- [6] 杨校辉. 山区机场高填方地基变形和稳定性分析[D]. 兰州:兰州理工大学, 2017.
- YANG Xiaohui. Analysis of foundation deformation and stability of high fill of airport in mountainous area [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [7] 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, ZHANG 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.
- [8] 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(增1):382-386, 418.
- ZHU Jianmin, YU Yongtang, ZHENG Jianguo, et al. Prediction of post-construction settlement of loess high fill based on GA-BP neural network[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1):382-386, 418.
- [9] 张国龙. 山区高填方地基沉降变形特性研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019.
- ZHANG Guolong. Study on settlement and deformation characteristics of high-fill foundation in mountain area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [10] YAO Y P, QI S J, CHE L W, et al. Postconstruction settlement prediction of high embankment of silty clay at Chengde airport based on one-dimensional creep analytical method: case study[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(7):05018004.
- [11] 邵生俊,李骏,李国良,等. 大厚度自重湿陷黄土湿陷变形评价方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6):965-978.
- SHAO Shengjun, LI Jun, LI Guoliang, et al. Evaluation method for self-weight collapsible deformation of large thickness loess foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6):965-978.
- [12] JIANG M J, ZHANG F G, HU H J, et al. Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology, 2014, 181:249-260.
- [13] JIANG M J, LI T, HU H J, et al. DEM analyses of one-dimensional compression and collapse behaviour of unsaturated structural loess[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 60:47-60.
- [14] 陈琼,崔德山,王菁莪,等. 不同固结状态下黄土坡滑坡滑带土的蠕变试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5):1635-1642.
- CHEN Qiong, CUI Deshan, WANG Jing, et al. An experimental study of creep characteristics of sliding zone soil of Huangtupo landslide under different consolidation stresses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5):1635-1642.
- [15] 张豫川,高飞,吕国顺,等. 基于黄土蠕变试验的高填方地基沉降的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(30):220-227.
- ZHANG Yuchuan, GAO Fei, LÜ Guoshun, et al. Numerical simulation of high fill foundation settlement based on creep test of loess[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30):220-227.
- [16] 郑文诗. 高填方路堤沉降预测研究及数值模拟分析[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.
- ZHENG Wenshi. Study on settlement prediction and numerical simulation analysis of high fill embankment [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.

- [17] 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.
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.
- [18] 魏汝龙.整理压缩试验资料的一种新方法[J].水利水运科学研究,1980(3):90-93.
WEI Rulong. A new method of collating compression test data [J]. Hydro-Science and Engineering, 1980(3):90-93.
- [19] 黄雪峰,孔 洋,李旭东,等.压实黄土变形特性研究与应用[J].岩土力学,2014,35(增2):37-44.
HUANG Xuefeng, KONG Yang, LI Xudong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2):37-44.
- [20] XIE W L, LI P, ZHANG M S, et al. Collapse behavior and microstructural evolution of loess soils from the loess plateau of China[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(8):1642-1657.
- [21] 刘保健,谢定义,郭增玉.黄土地基增湿变形的实用算法[J].岩土力学,2004,25(2):270-274.
LIU Baojian, XIE Dingyi, GUO Zengyu. A practical method for moistening deformation of loess foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2):270-274.
- [22] 沈 扬.土力学原理十记[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
SHEN Yang. Ten notes on principles of soil mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [23] REZANIA M, BAGHERI M, MOUSAVI NEZHAD M, et al. Creep analysis of an earth embankment on soft soil deposit with and without PVD improvement [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(5):537-547.
- [24] 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.
- [25] 张文斌,丁 岩,韩文喜.高填方地基沉降预测及方法研究[J].土工基础,2012,26(5):43-45.
ZHANG Wenbin, DING Yan, HAN Wenxi. Study of settlement prediction methods for an airport on high fills [J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(5):43-45.
- [26] 刘 政.山区黄土高填方工后沉降控制研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
LIU Zheng. Study on post-construction settlement control of loess high fill in mountainous area [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [27] 刘 宏,李攀峰,张倬元.九寨黄龙机场高填方地基工后沉降预测[J].岩土工程学报,2005,27(1):90-93.
LIU Hong, LI Panfeng, ZHANG Zhuoyuan. Prediction of post-construction settlement of high fill foundation in Jiuzhai Huanglong airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1):90-93.
- [28] 方 焘,刁心宏.填方路堤沉降计算方法探讨[J].铁道建筑,2009,49(6):77-80.
FANG Tao, DIAO Xinhong. Discussion on settlement calculation method of fill embankment [J]. Railway Engineering, 2009, 49(6):77-80.
- [29] 顾慰慈.堆石坝的沉降和位移计算[J].水利水电技术,1983,14(1):24-30.
GU Weici. Settlement and displacement calculation of rockfill dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1983, 14(1):24-30.