

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.002

块石压填法处置软土路基的敏感性参数分析

罗光财¹, 王智超², 危春华¹, 张强², 雍邦¹

(1. 中建五局土木工程有限公司, 湖南长沙 410000; 2. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湖南湘潭 411105)

摘要: 为了更好地评价天然软土路基加固处理效果, 采用基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型, 表征天然软土地基的力学特性, 利用大型有限元软件 ABAQUS 建立模型, 模拟路堤分层填筑过程, 获取采用块石压填法处置后的软土路基承载力和变形特征。分析了不同块石换填层厚度、变形模量、不同堆载荷载及填筑时长对软土路基的承载力以及工后沉降变形的影响特征。结果表明: 基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型能够有效地模拟软土路基的变形特征, 能用于复杂路基的工后沉降分析; 块石压填层的厚度以及变形模量均对地基承载力有显著影响, 块石压填层的厚度、填筑时长以及堆载均对工后沉降有显著影响, 而块石压填层变形模量并不对工后沉降产生明显影响。

关键词: 软基处理; 块石压填法; 弹黏塑性; 路基沉降

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)06-0007-07

Sensitivity Parameter Analysis of Soft Soil Foundation Treated by Block-Stone Filling Method

LUO Guangcai¹, WANG Zhichao², WEI Chunhua¹, ZHANG Qiang², YONG Bang¹

(1. CCFEB Civil Engineering CO., LTD., Changsha 410000, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: In order to better evaluate the treatment effect of the natural soft soil reinforcement, an elasto-viscoplastic constitutive model based on super-subloading surface has been used to describe the mechanical characteristics of the natural soft soil foundation. By using finite element method software ABAQUS, a simulation can be achieved of the layer-filled process of embankment, thus obtaining the bearing capacity and deformation characteristics of the soft soil foundation treated by block-rock compaction method. An analysis has been made of the influence of different thickness, modulus of deformation, different loading and filling time on the bearing capacity of soft soil roadbed and post-construction settlement and deformation. The results show that the elasto-viscoplastic constitutive model based on super-subloading surface can effectively simulate the deformation characteristics of the soft soil foundation, which can be used for post-construction settlement analysis of complex subgrade. Thickness and modulus of deformation of rock fill have significant effects on the bearing capacity of foundation. Moreover, thickness, length of filling and surcharge of rock fill have significant effects on post-construction settlement, while modulus of deformation of rock fill has no significant effect on post-construction settlement.

Keywords: soft foundation treatment; block-stone filling method; elasto-viscoplasticity; subgrade settlement

收稿日期: 2017-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308485), 湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ2133), 湖南省教育厅优秀青年基金资助项目(17B260)

作者简介: 罗光财(1979-), 男, 湖南长沙人, 中建五局土木工程有限公司高级工程师, 主要研究方向为土木工程施工管理, E-mail: cqbcfeb@163.com

1 研究背景

软土是一种近代水下沉积的饱和松软黏性土，主要分布在我国沿海地带，具有天然含水率高、孔隙比大、抗剪强度低、压缩性高和渗透性差等特点^[1]。因此，在软土地基上修建铁路和公路路堤，极易产生地基失稳和沉降过大等工程问题。近年来，大量的科学研究和工程实践已逐步积累了多种行之有效的软土加固措施，基本解决了地基稳定和工后沉降问题^[2]。然而，随着高速铁路与高速公路建设等级与设计车速度的不断提高，对路基工后沉降的要求也愈加严格，甚至达到毫米级。因此，如何合理地选择软基处理方法、有效地计算和预测软土路基工后沉降，消除路基沉降所带来的危害仍然是道路工程建设科技领域的一个重要课题。

目前，常规的软基处理方法包括排水固结法^[3]、复合地基法^[4]、轻质路堤法^[5]以及抛石挤淤法^[6]等。不同的软基处理技术，均具有一定的适用范围和各自的优劣势。韩尚宇等^[7]认为排水固结法处理软基过程中，由于扰动了原土层的结构，将导致设计结论与实际偏差较大。复合地基法虽然对路基沉降以及路基稳定控制效果较好，但其工程造价较高^[8-9]。轻质路堤法通过减小路堤荷载来减小地基沉降，其施工周期方便控制，且效果较为明显，但易引起附加沉降^[10]。抛石挤淤法在处理表层淤泥上具有独特技术价值，是软土地基处理中常用方法，但该方法在公路深厚软基加固工程中并不多见^[11]。对于浅层软基而言，块石压填挤淤方法相对于其他几种软基处置方法而言，具有施工难度小、处理效果明显、工程造价低等优势，但采用块石压填法进行软土地基处理时，施工流程和速率都对地基的稳定性和施工安全有着十分重要的影响^[12]。目前针对该类方法的研究成果较多：张明鸣等^[13]通过颗粒流理论模拟抛石挤淤施工过程，发现挤淤深度与抛填强度、块石直径以及一次性抛石量均有关联；杨光煦^[14]提出了以下卧淤泥极限承载力计算极限挤淤深度的方法；闫澍旺等^[15]利用土体极限平衡理论，推导出抛石挤淤深度与抛石高度的关系。上述研究侧重于抛石挤淤过程机理以及挤淤深度，而对于在大面积抛填时的加载速率、变形、固结度增长以及土体强度和变形的变化规律没有较为深入的研究。

本研究采用已提出的基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型表征天然软土地基和路堤回填土的变形特征，利用大型有限元软件 ABAQUS 建立模型，模拟了块石压填方法处理后的软土路基的路堤分层填

筑过程，分析了不同块石换填厚度、变形模量、不同堆载荷载及填筑时长对软土路基的承载力以及工后沉降变形的影响特征，以期块石压填法处置软土地基的设计施工提供参考。

2 天然软土地基的力学表征

2.1 天然软土基本力学特征

天然软土具有明显的结构性特征，通常表现为大孔隙、胶结以及组构等物理特性^[16]。考虑组构效应的解构示意图如图 1 所示。图中 e 为孔隙比， p 为竖向有效应力。

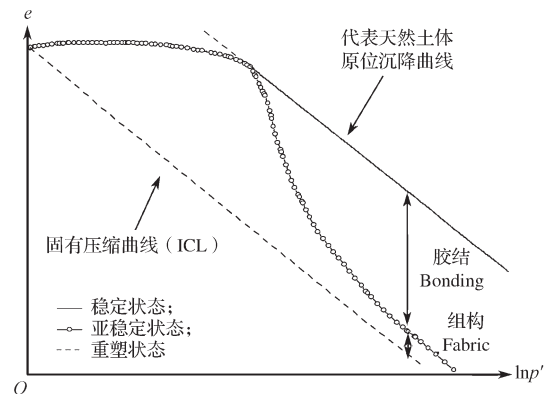


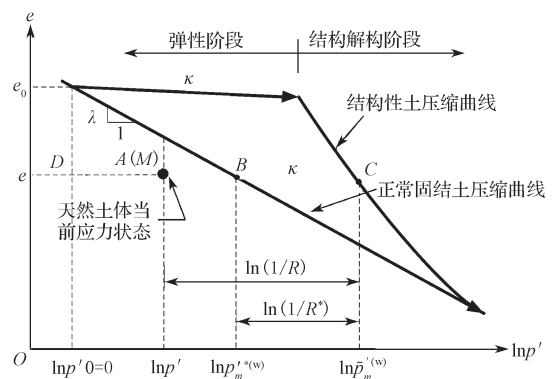
图 1 考虑组构效应的解构示意图

Fig. 1 Deconstruction diagram with the constructional effect taken into consideration

这些物理特性不仅使天然软土表现出蠕变和应力松弛等特性，而且也使其具有明显的加载速率效应^[17]。结构性原状土与重塑土相比具有明显的结构屈服应力，且在相同竖向有效应力作用下前者具有更大的孔隙比，随着变形的发展原状土的结构性将逐渐丧失，最终两者的性状趋于相同。

2.2 天然软土的弹黏塑性本构模型

本文为了描述天然结构性软土的变形特征，采用了王智超等^[18]提出的基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型，如图 2 所示。



a) 一维压缩曲线

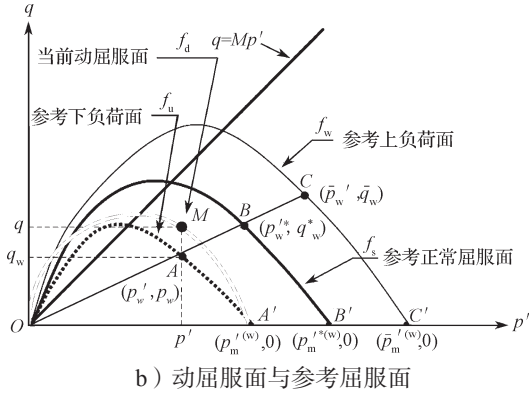


图 2 基于上下负荷面的相对过应力关系

Fig. 2 Relative overstress relation based on load surface

为了正确描述土的超固结特性（任何土只要承受卸载就进入超固结状态）、结构性（天然原状土必然有结构性）及率敏性（土体随着应变速率的增加而产生过应力），分别引入了当前动屈服面 f_d 、参考下负荷面 f_u ，参考正常固结屈服面 f_s 及参考上负荷面 f_w 。点 $M(p', q)$ 代表当前的过应力状态，点 $A(p_w', q_w)$ 、 $B(p_w^*, q_w^*)$ 和 $C(\bar{p}_w', \bar{q}_w)$ 分别为任意一通过原点 O 的射线与相应的参考下负荷面、正常固结屈服面以及上负荷面的交点。

令通过 A 、 B 、 C 点的 3 个参考屈服面几何相似，则有

$$\frac{q_w}{p_w'} = \frac{q_w^*}{p_w^{rs}} = \frac{\bar{q}_w}{\bar{p}_w'}, \quad \frac{p_w'}{p_m^{(w)}} = \frac{p_w^{rs}}{p_m^{rs(w)}} = \frac{\bar{p}_w'}{\bar{p}_m^{(w)}}, \quad (1)$$

其中，参考正常固结屈服面上到上负荷面的相似比 R^* ($0 < R^* \leq 1$) 以及参考下负荷面上到上负荷面的相似比 R ($0 < R \leq 1$)，分别定义为

$$\frac{\bar{p}_m^{(w)}}{p_m^{(w)}} = \frac{1}{R}, \quad \frac{\bar{p}_m^{rs(w)}}{p_m^{rs(w)}} = \frac{1}{R^*}, \quad (2)$$

式中：初始 R 的倒数定义为超固结比，记为 ω ($\omega \geq 1$)；初始 R^* 定义为结构性参数（或称灵敏系数），记为 ζ ($0 < \zeta \leq 1$)。当 $\zeta=1$ 时，表明土体无结构性，并随着 ζ 的减小，土体的结构性逐步增强。

按照相对过应力思路，以上下负荷面为参考屈服面，则可得到结构性软土的动屈服准则函数为：

$$g_3(\sigma_{ij}, \varepsilon_v^{vp}, \dot{\varepsilon}_d^{vp}) = \frac{c_0}{M} \left(\frac{\sigma'_m}{\omega \zeta \sigma'_{myi}} \right)^{m'} \exp \left[m' \left(\frac{\eta}{M} + \ln \frac{R^*}{R} - \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^{vp} \right) \right] - \dot{\varepsilon}_d^{vp} = 0. \quad (3)$$

式中： ε_v^{vp} 为黏塑性体积应变率和 $\dot{\varepsilon}_d^{vp}$ 为黏塑性偏应变率； M 为在临界状态时有效应力比； η 为偏应力比； σ'_m 为有效平均应力； λ 为压缩指数； κ 为回弹指数； e_0 为初始孔隙比； c_0 和 m' 为材料时间相依性质相关的参数。

R 和 R^* 的演化规律为：

$$\begin{cases} dR = -\alpha \ln R \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} Md\varepsilon_d^p, \\ dR^* = R^*(1-R^{*\beta}) \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} Md\varepsilon_d^p. \end{cases} \quad (4)$$

式中 α 和 β 分别为控制 R 和 R^* 的演化速率参数。

3 有限元模型及参数

3.1 有限元模型的建立

考虑到路幅的对称性，所建立的有限元模型为完整路幅的一半。模型详细尺寸如图 3a 所示，左右边界固定水平位移且不排水，底部边界固定水平和竖向位移且不排水；地基表面为排水边界。此外，为分析块石压填路基的承载力特征和变形特征，采用有限元模型模拟了荷载板试验和路堤填筑过程，分析模型分别如图 3b 和 3c 所示。

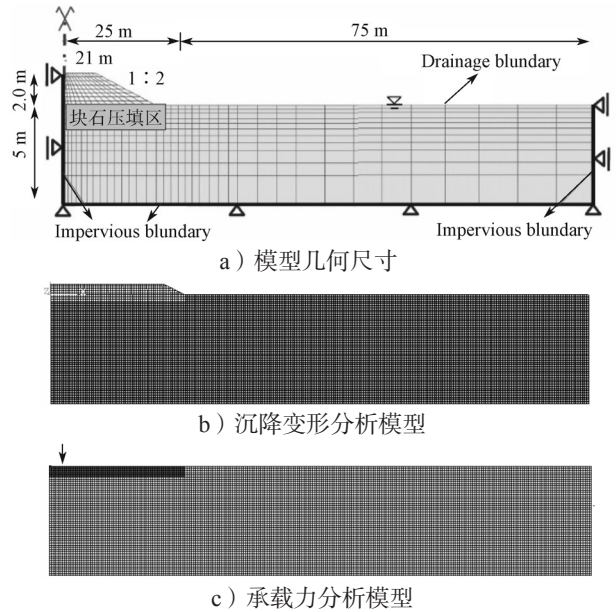


图 3 块石压填路基的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of rockfill subgrade

3.2 弹黏塑性本构模型的参数

利用提出的基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型，分析块石压填路段的承载力学以及变形特征，相关模型输入参数如表 1~2 所示。

表 1 天然软土地基输入参数

Table 1 Input parameters of natural soft soil subgrade

参数	参数值	参数	参数值
类型	结构性软土	m'	28.2
μ	0.30	α	10
e_0	1.61	β	15
M	1.18	ζ	0.67
λ	0.593	OCR	1.1
κ	0.027	k_v/s^{-1}	3.85×10^{-10}
c_0/s^{-1}	1.85×10^{-11}	P_c/kPa	88

表2 块石压填层及路堤回填土的输入参数

Table 2 Input parameters of rockfill and embankment backfill

类型	μ	E_0/kPa	k_0/s^{-1}
块石压填层	0.25	22 000	5×10^{-7}
路堤回填土	0.25	12 000	1×10^{-7}

注： μ 为泊松比， E_0 为变形模量， k_0 为渗透系数。

同时，给出了按表1参数输入不同深度的天然软土，按加载速率0.1 mm/min的三轴不排水剪切试验的结果，如图4所示。

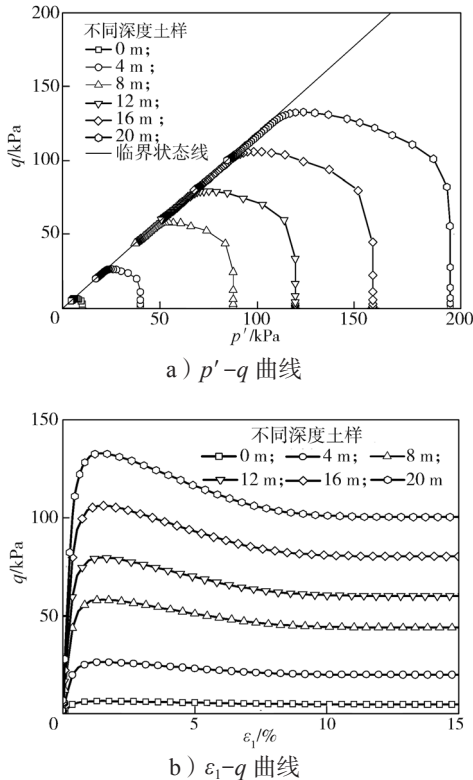


图4 不同深度天然软土地基的不排水三轴压缩试验
Fig. 4 Undrained triaxial test results of natural soft soil foundation of different depths

从图4可以看出，利用基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型能较好地表征天然软土应变软化的特征。

4 数值计算方案

为了分析块石压填路基的承载力特征，采用有限元方法，重点针对块石压填层的变形模量以及厚度2个变量，数值模拟了荷载板试验。其中，荷载板宽30 cm，弹性模量取为210 GPa，泊松比取为0.31，将其置于路堤中心，沿竖向压入地基中，累积25 mm对应的应力代表了地基的承载力特征值。由于常规荷载板试验中每级荷载稳定标准为0.1 mm/h，可据此设定加载速率，即加载速率一般应不低于0.1 mm/h即可。在有限元模拟中，累积加载量设为30 mm，加载时长设为30 h。具体计算方案如表3所示。

表3 承载力特征值试验方案

Table 3 Scheme of bearing tests

厚度/m	变形模量/MPa			
	12	20	30	40
2.0	✓	✓	✓	✓
1.6	✓	✓	✓	✓
1.2	✓	✓	✓	✓
0.8		✓		

此外，为了分析块石压填路基沉降变形的控制指标，借助有限元方法，重点模拟了不同的填筑时长、块石压填模量、块石压填厚度以及堆载等因素对路基工后沉降的影响，为确定最优施工方案提供参考。具体计算方案如表4所示。其中填筑时长有如下4种方式，方式①：每层填筑时长为10 d。方式②：每层填筑时长为60 d。方式③：前4层填筑时长为60 d，最后一层稳定365 d。方式④：前3层和最后一层填筑时长为60 d，第4层稳定365 d。

表4 变形特征试验方案

Table 4 Scheme of deformation tests

方案	厚度/m	填充方式	堆载/kPa	变形模量/MPa	方案	厚度/m	填充方式	堆载/kPa	变形模量/MPa
1	1.6	①	0	12	9	1.6	④	10	20
2	1.6	①	0	20	10	1.6	④	20	20
3	1.6	①	0	30	11	1.6	④	30	20
4	1.6	①	0	40	12	1.2	④	30	20
5	1.6	①	0	50	13	1.2	④	0	40
6	1.6	②	0	20	14	1.2	④	20	40
7	1.6	③	0	20	15	1.2	④	30	40
8	1.6	④	0	20	16	1.2	④	50	40

5 块石压填法影响因素分析

5.1 块石压填层变形模量对承载力的影响

取块石压填层厚度为1.2 m，其变形模量分别取

为12, 20, 30, 40 MPa；取块石压填层厚度为1.6 m，其变形模量分别取为12, 20, 30, 40 MPa，对比地基的承载力特征值，如图5所示。

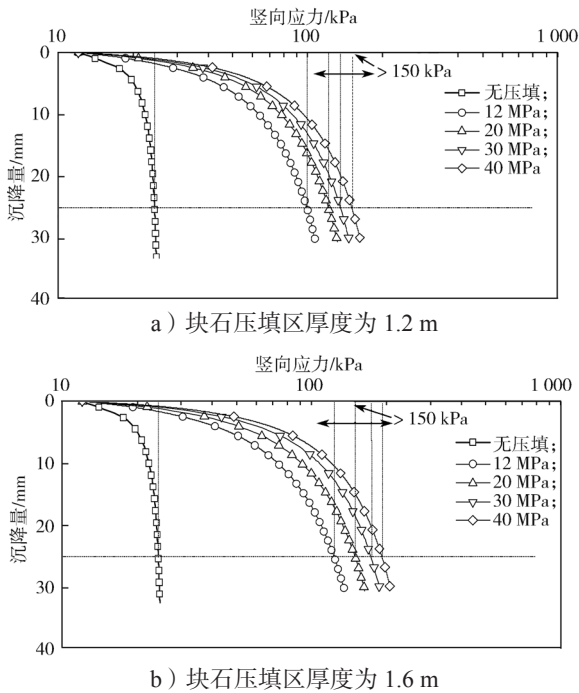


图 5 块石压填层的变形模量对承载力特征影响

Fig. 5 The influence of rock fill deformation modulus on bearing capacity

从图中可以看出, 块石压填层厚度不同时, 地基承载力特征值均随着变形模量的增大而增大。根据路基规范, 路基的承载力特征值需在 150 kPa 以上, 因此, 对于 1.2 m 厚块石压填层, 变形模量应不低于 40 MPa; 对于 1.6 m 厚块石压填层, 变形模量应不低于 20 MPa。

5.2 块石压填层厚度对承载力的影响

取块石压填层的变形模量为 20 MPa, 其厚度分别取为 2.0, 1.6, 1.2, 0.8 m, 对比地基的承载力值, 如图 6 所示。从图中知, 随着压填层厚度的增大, 地基承载力特征值逐渐增大, 块石压填层的厚度对其承载力特性敏感, 对于深度为 5 m 的软土地基, 其块石压填的厚度应在 1.6 m 左右, 能将块石压填的变形模量减少为 20 MPa 以内, 使得地基承载力特征值大于 150 kPa, 才有可靠在施工中得以实现。

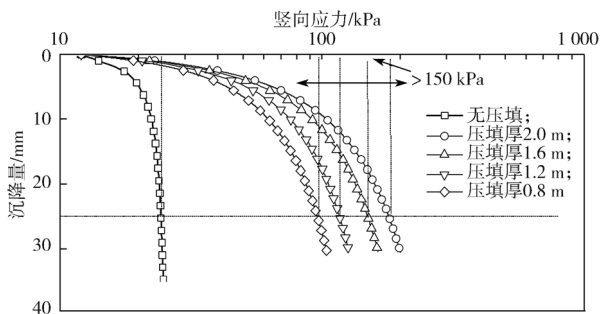


图 6 块石压填层的厚度对承载力特征影响

Fig. 6 The influence of the thickness of rock fill on the bearing capacity characteristics

5.3 块石压填层变形模量对路基沉降变形的影响

填筑按 40 cm 一层, 共分 5 层填筑, 每层填筑时间取 10 d, 在路基下填筑 1.6 m 厚的块石压填层, 压填层的变形模量分别取 12, 20, 30, 40, 50 MPa, 对比它们的最终沉降特征如图 7 所示。从图中可以看出, 通过增强块石压填层的变形模量并不能有效改善路基的工后沉降, 仅能抑制施工中的变形量, 但并不能减少工后长期沉降, 因此通过强夯等措施增加块石压填层的变形模量的方式并不可取。

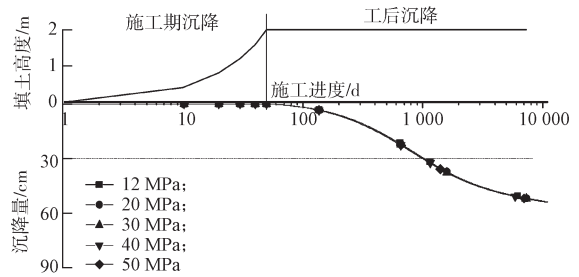


图 7 块石压填层不同变形模量对工后沉降影响

Fig. 7 The influence of rock fill deformation modulus on post-construction settlement

5.4 块石压填层厚度对路基沉降变形的影响

块石压填层的变形模量取为 20 MPa, 按照 40 cm 一层, 前 3 层和最后 1 层填筑时长 60 d、第 4 层稳定 365 d, 堆载取为 30 kPa, 块石压填层厚度分别取为 1.6 m 和 1.2 m, 对比它们的最终沉降特征如图 8 所示。

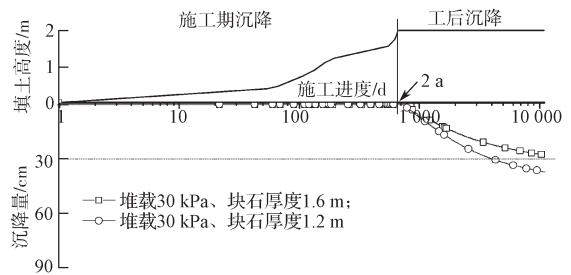


图 8 块石压填层厚度对工后沉降影响

Fig. 8 The influence of rock fill thickness on post-construction settlement

从图 8 可知, 块石压填层的厚度对路基工后沉降有显著影响, 随着块石压填层厚度的增大, 路基工后沉降量显著减小。对于 5 m 厚的软土地基、堆载 30 kPa, 块石压填厚度需为 1.6 m, 才能将工后总沉降控制在 30 cm 以内, 约为 28.2 cm。若软土地基厚度稍薄, 则块石压填的厚度也可适当减少。

5.5 填筑时长对路基沉降变形的影响

在路堤下填筑 1.6 m 厚的块石压填层, 压填层的变形模量取为 20 MPa, 按照 40 cm 一层, 每层填筑时间按 10 d (方式①)、60 d (方式②) 以及前 4 层

60 d 最后一层稳定 365 d (方式③) 3 种填筑时长, 对比它们的最终沉降特征如图 9 所示。

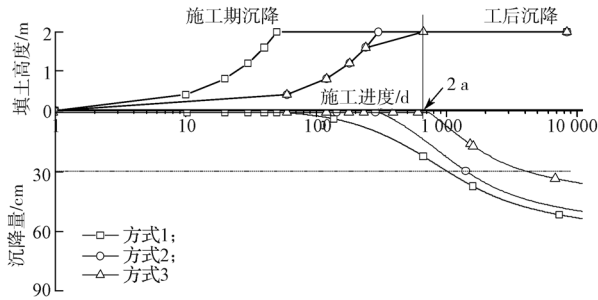


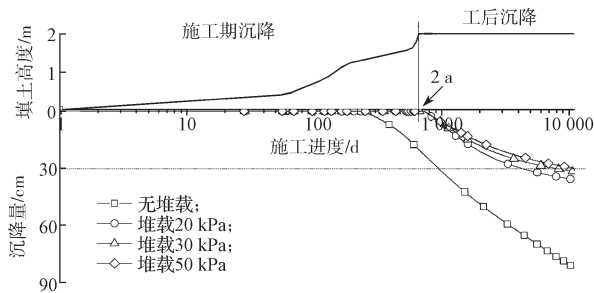
图 9 路堤填筑时长对工后沉降影响

Fig. 9 The influence of embankment filling time on post-construction settlement

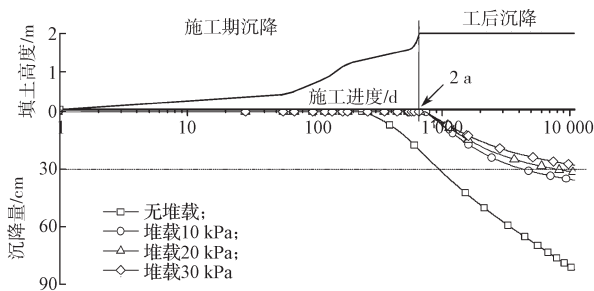
从图中可以看出, 随着填筑时长的增大, 工后沉降量显著降低。由此可知, 通过在施工期内适当增长填筑时长可以减少路基的工后沉降, 但还不能将总沉降控制在 30 cm 内。因此, 还必须寻找其他途径来抑制路基的工后沉降。

5.6 堆载对路基沉降变形的影响

当路堤下填筑 1.2 m 厚的块石压填层, 压填层的变形模量取为 40 MPa, 按照 40 cm 一层, 前 3 层和最后 1 层填筑时长 60 d、第 4 层稳定 365 d (方式④), 堆载分别取为 20, 30, 50 kPa; 当路堤下填筑 1.6m 厚的块石压填层, 压填层的变形模量取为 20 MPa, 按照 40 cm 一层, 前 3 层和最后 1 层填筑时长 60 d、第 4 层稳定 365 d, 堆载分别取为 10, 20, 30 kPa, 对比它们的最终沉降特征如图 10 所示。



a) 块石压填层厚为 1.2 m



b) 块石压填层厚为 1.6 m

图 10 堆载对工后沉降影响

Fig. 10 The influence of surcharge on post-construction settlement

从图 10a 可知, 对于 1.2 m 厚的块石压填层, 通过在施工期内适当堆载 50 kPa 左右才能将工后总沉降控制在 30 cm 内, 约为 29.5 cm。从图 10b 可知, 对于 1.6 m 厚的块石压填层, 通过在施工期内适当堆载 30 kPa 左右能将工后总沉降控制在 30 cm 内, 约为 27.5 cm。

6 结论

本研究采用基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型对天然软土路基进行表征, 并构建了天然软土地基有限元模型, 针对块石压填法处置软土路基这一实际工程问题, 分析了块石压填层厚度、变形模量、堆载和填筑时长对天然软土路基承载力和变形特征的影响, 主要结论如下:

- 1) 压填块石的变形模量及厚度是影响路基承载力特征值大小的主要因素, 随着块石压填层变形模量以及厚度的增大, 地基承载力特征值增大。建议施工中针对具体工况调整块石厚度和变形模量, 选取最佳配比方案。
- 2) 块石压填层变形模量仅影响施工过程中的变形量, 并不能影响工后沉降。因此, 通过增强块石压填层的变形模量并不能有效改善路基的工后沉降。
- 3) 块石压填层的厚度、填筑时长以及堆载等因素都会对路基的工后沉降产生显著影响。通过增加块石压填层的厚度、增加填筑时长以及在施工期内适当堆载, 能有效地减小工后沉降。

参考文献:

[1] 常士骝. 工程地质手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992: 475-478.
CHANG Shibiao. Engineering Geologic Manuals[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992: 475-478.

[2] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1987: 5-24.
WEI Rulong. Strength and Deformation of Soft Clay[M]. Beijing: China Communications Press, 1987: 5-24.

[3] 邓礼久, 金亮星, 罗嘉金. 塑料排水板堆载预压法处理软基的固结效果 [J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(3): 68-72.
DENG Lijiu, JIN Liangxing, LUO Jiabin. Consolidation Effect of Reinforcing Soft Soil Foundation by Preloading Accumulating Load Method with Plastic Drainage Plate[J]. Journal of Railway Science & Engineering, 2013, 10(3): 68-72.

[4] 雷胜友, 李肖伦, 李洋, 等. 高速铁路路基下复合

- 地基沉降计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 9-15.
- LEI Shengyou, LI Xiaolun, LI Yang, et al. Calculation Method of Composite Foundation Settlement Under High-Speed Railway Subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 9-15.
- [5] 马时冬. SLS路堤的稳定性和沉降分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 331-334.
- MA Shidong. Stability and Settlement of Embankment Filled with Stabilized Light Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 331-334.
- [6] 闫澍旺, 陈静, 孙立强, 等. 深厚软土地基上充灌袋围埝下沉计算研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3537-3544.
- YAN Shuwang, CHEN Jing, SUN Liqiang, et al. A Method for Calculating Penetration of Geo-Tubes Dike Resting on Deep Soft Foundation Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3537-3544.
- [7] 韩尚宇, 洪宝宁, 李红. 排水固结法处理软土路基的质量改善措施优选分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(2): 223-226.
- HAN Shangyu, HONG Baoning, LI Hong. Improvement Measures' Optimal Analysis of Soft Ground Consolidation Method Treatment[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2009, 33(2): 223-226.
- [8] 王鹏, 张军辉, 黄晓明. 加宽工程路面开裂影响因素的数值分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(4): 671-675.
- WANG Peng, ZHANG Junhui, HUANG Xiaoming. Analysis of Influence Factors of Widening Pavement Cracking[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2007, 37(4): 671-675.
- [9] 王宁, 刘杰, 王威, 等. 土工格室+阶梯型变截面及等截面桩复合地基承载性状对比研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(5): 15-18.
- WANG Ning, LIU Jie, WANG Wei, et al. Comparative Study on Bearing Behaviors of Composite Foundations with Geocell+Step Variable Section Pile and Geocell + Constant Section Pile[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(5): 15-18.
- [10] 陈磊, 刘汉龙. 原有路基稳定性对高速公路加宽工程的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(4): 407-413.
- CHEN Lei, LIU Hanlong. Analysis on the Impact of Old Road Stability to Expressway Widening Project[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(4): 407-413.
- [11] 单颖涛, 张明义, 高存贵. 抛石挤淤在吹填淤泥区地基处理中的应用[J]. 青岛理工大学学报, 2010, 31(5): 23-26.
- SHAN Yingtao, ZHANG Mingyi, GAO Cungui. The Application of Riprapping for Sludge Extrusion in Foundation Treatment in Reclamation and Sludge Areas[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2010, 31(5): 23-26.
- [12] 王艳芳, 俞缙, 周治刚, 等. 深厚软基抛石挤淤技术应用研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 24-30.
- WANG Yanfang, YU Jin, ZHOU Zhigang, et al. Application Research on Technology of Dumping Rockfill for Extruding Silt in Deep Soft Subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 24-30.
- [13] 张明鸣, 徐卫亚, 夏玉斌, 等. 抛石挤淤机理及其颗粒流数值模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 310-315.
- ZHANG Mingming, XU Weiya, XIA Yubin, et al. Mechanism of Backfilling Rocks to Squeeze Out Ooze and Simulated by Particle Flow Code[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(1): 310-315.
- [14] 杨光煦. 压载挤淤研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(2): 72-76.
- YANG Guangxu. Research of Ballasted Silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(2): 72-76.
- [15] 闫澍旺, 陈静, 孙立强, 等. 抛石挤淤深度的计算方法和模型试验[J]. 岩土力学, 2015(增刊1): 43-48.
- YAN Shuwang, CHEN Jing, SUN Liqiang, et al. Calculation Method and Model Test on Penetration Depth of Squeezing Soft Clay(with Stone) Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(S1): 43-48.
- [16] BURLAND J B. On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 329-378.
- [17] 朱启银, 尹振宇, 朱俊高, 等. 软黏土加载速率效应特性试验研究: 进展与趋势[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 7-24.
- ZHU Qiyin, YIN Zhenyu, ZHU Jungao, et al. Progress and Trend of Experimental Investigation on Rate-Dependent Behavior of Soft Clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 7-24.
- [18] 王智超, 蒋明镜, 陈双林, 等. 基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型及应力积分算法实现[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 357-366.
- WANG Zhichao, JIANG Mingjing, CHEN Shuanglin, et al. An Elastic-Visco-Plastic Constitutive Model and Its Stress Integration Algorithm Based on Superlo-Ading and Subloading Yield Surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 357-366.