朱美宣. 基于 ABAQUS 的高填方边坡沉降数值模拟分析[J]. 智能计算机与应用,2025,15(3):106-113. DOI:10.20169/ j. issn. 2095-2163. 250315

基于 ABAQUS 的高填方边坡沉降数值模拟分析

朱美宣

(上海市浦东新区建设(集团)有限公司,上海 201206)

摘 要:针对国内机场高填方边坡工程沉降问题,选取某新建机场高填方边坡工程作为研究对象,利用 ABAQUS 有限元计算 软件,基于生死单元法、岩土体本构关系、土体固结理论及现场监测试验,构建并验证了高填方边坡沉降数值分析模型。研究 结果表明:对于分级填筑的高填方边坡,最大沉降量并不是发生在填土层表面,而是在回填土体中部;随着时间的推进,边坡 顶面工后沉降逐渐趋于一条平滑的曲线;随着顶面计算点距坡顶距离越来越远,工后沉降值越来越大;随着马道级别越来越 高,马道计算点沉降值越来越大;随着地基表面计算点距离坡脚越远,地基表面隆起值越小。

关键词:机场工程;高填方边坡;数值模拟;生死单元;沉降分析

中图分类号: U416 文献标志码: A 文章编号: 2095-2163(2025)03-0106-08

Numerical simulation analysis of high fill slope settlement based on ABAQUS

ZHU Meixuan

(Shanghai Pudong New Area Construction (Group) Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: Aiming at the settlement problem of high fill slope engineering in China 's airport, a high fill slope engineering of a new airport is selected as the research object. Using ABAQUS finite element calculation software, based on the birth and death element method, the constitutive relationship of rock and soil, the consolidation theory of soil and the field monitoring test, the numerical analysis model of high fill slope settlement is constructed and verified. The calculation results of the model show that for the high fill slope with graded filling, the maximum settlement does not occur on the surface of the fill soil, but in the middle of the backfill soil. With the advancement of time, the post-construction settlement of the top surface of the slope becomes farther and farther, the post-construction settlement value becomes larger and larger ; as the level of the horse road is getting higher and higher, the settlement value of the horse road calculation point is getting larger and larger ; as the calculation point of the foundation surface is farther away from the foot of the slope, the uplift value of the foundation surface is smaller.

Key words: airport engineering; high fill slope; numerical simulation; life and death unit; settlement analysis

0 引 言

随着国内新建与改扩建的民用机场越来越多, 可用的土地资源日益紧张,更多的机场选择修建在 山川河谷、纵横交错等地理环境恶劣的地带,出现了 大量的高填方边坡工程^[1]。而高填方边坡工程在 工程竣工后会出现沉降、不均匀沉降等现象,严重影 响人民群众的生命财产安全。因此,国内外诸多学 者展开对高填方边坡工程沉降问题的研究,常使用 的计算方法多集中于分层总和法、模型预测法、数值 计算法等^[2-3]。冯彦铭^[4]通过工程实地调研,获取 了土体的物理力学参数,采用分层总和法计算得出 了边坡工程沉降量。严栋^[5]基于分层总和法的基 本原理,提出割线模量法作为新的沉降计算方法。 杨光华等学者^[6]针对硬土边坡的沉降计算,提出直 接用变形模量带入分层总和法计算,取消代入经验 系数计算的方法。模型预测法^[7]以现场监测沉降 数据为依托,再选择适当的数学模型用以预测高填 方场地的沉降变形规律及发展趋势。曲线拟合法、 Asaoka 法和人工神经网络法是目前较为常用的沉 降预测方法^[8-10]。李慧洁等学者^[11]以黄土的沉降 监测数据为依托,采用曲线拟合法进行沉降数据拟

作者简介:朱美宣(1998—),男,助理工程师,主要研究方向:道路与机场工程,市政工程。Email:2426901445@ qq. com。

107

合,发现前期数据拟合效果好,后期拟合效果较差, 建议以组合模型来预测黄土的沉降变形的发展。数 值计算法中以有限单元法最为常用,潘凯等学者^[12] 以西部某高原机场为依托,利用有限元分析软件,开 展高填方边坡变形特征有限元数值模拟分析,发现 坡顶沉降量最大,坡脚次之。刘准^[13]通过有限元数 值分析手段,揭示了路堤变形破坏现象及机理,进行 了软土路堤边坡综合治理工程方案设计。

综上所述,高填方边坡沉降研究多集中于总体 沉降变形特征,鲜少有学者研究高填方边坡在填筑 过程的分层填筑规律、时空变化规律,因此,本文从 生死单元法、岩土体本构关系及固结理论展开介绍, 通过对几何尺寸、材料模型、边界条件和网格划分进 行研究与分析,构建了机场高填方边坡沉降分析模 型,再以现场监测结果验证模型的有效性,进一步研 究分析边坡分层填筑变化规律、顶面计算点沉降值 时空变化规律、地基及马道计算点沉降值时空变化 规律。

1 基于 ABAQUS 的沉降计算理论

1.1 生死单元法理论模型

1.1.1 生死单元基本理论

生死单元法是有限元计算中常用的一种技术, 广泛应用于大坝浇注、岩土体回填等场合的模拟。 基本思想是通过单元的"生"或"死"来模拟一些特 殊条件,其中,简单的"生"意味着单元存在并运行, "死"意味着该单元在分析过程中不运行。在刚度矩 阵[D]中,如需要单元进行生死作用,只需设置一个 衰减因子 A 相乘即可,得到的计算公式为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{g}} D_1 & & 0 \dot{\mathbf{y}}^{-1} \\ \hat{\mathbf{e}} & \ddots & & \dot{\mathbf{u}} \\ \hat{\mathbf{e}} & & \hat{\mathbf{e}} \\ \hat{\mathbf{e}} & & A \times D_k & & \dot{\mathbf{u}} \\ \hat{\mathbf{e}} & & \ddots & \dot{\mathbf{u}} \\ \hat{\mathbf{g}} 0 & & & D_n \dot{\mathbf{u}} \end{cases}$$
(1)

其中, [D]表示那些需要"生死"的单元。研究中, 当 A取一个接近零的数值, 这些单元被"杀死"。比如 $A = 10^{-6}$ 时, 在计算过程中, 基本不提供任何刚度, 而当 A = 1时, 这些被"杀死"的单元被 "激活", 单元参与计算。

1.1.2 生死单元法在 ABAQUS 中的实现

在利用 ABAQUS 有限元分析软件,构建机场高 填方边坡沉降分析模型时,针对边坡回填土层,可在 相互作用选项里定义要杀死的单元,一般情况下,边 坡回填之前把边坡单元先"杀死",随着边坡层层回 填这些死单元再逐步被"激活"。这就意味着,在构 建模型的一开始,就将所有的边坡单元在建模过程 中生成,只是认为单元不参与计算或者就是单元的 节点位移、应变、应力等都默认为零,随着高填方边 坡层层回填,边坡单元层层被激活,这些被层层激活 的边坡单元再跟随分析步参与到模型计算中。

1.2 本构关系与固结理论

1.2.1 岩土体本构关系

ABAQUS 有限元计算软件中内嵌了多种本构关 系,摩尔-库伦模型能很好地考虑材料的各向同性 硬化和软化,并且能与线弹性模型结合使用。在岩 土工程应用中,还可以很好地模拟单调荷载作用下 材料的力学性状,其屈服准则认为:作用点的剪应力 与剪切强度相等时,就会发生破坏,此时,剪切强度 与作用在该面的正应力呈线性关系,与莫尔圆相切 的线即为破坏线,破坏模型如图 1 所示,强度准则 为:

$$\tau = c - \sigma \tan \varphi \tag{2}$$

其中, τ 表示剪切强度,单位为 kPa; σ 表示正 应力,单位为 kPa; c 表示材料的黏聚力,单位为 kPa; q 表示材料的内摩擦角,单位为"。"。



图 1 摩尔-库伦破坏模型 Fig. 1 Moore-Coulomb breakdown model

根据图1破坏摩尔圆,可得以下关系:

$$\tau = s\cos\varphi, \sigma = \sigma_m + s\sin\varphi \tag{3}$$

把式(3)再带入式(2),则 Mohr-Coulomb 准则 可为:

$$s = \sigma_m \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 \tag{4}$$

其中,
$$s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$
表示最大的剪切应力,是大

小主应力差的一半,单位为 kPa; $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 表示 大小主应力的平均值,单位为 kPa。

1.2.2 土体固结理论

土体固结理论涉及到2个方面:水的渗流和土

的变形。Biot 固结理论能够将两者很好地耦合,是 目前比较完善的多维固结耦合理论。平衡微分方程 和连续性微分方程是该理论的基本计算公式。就平 面问题而言,岩土体中任一点平衡微分方程为:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} + \gamma = 0$$
(5)

其中, σ_{τ} 表示有效应力,单位为 kPa; p表示 孔隙水应力,单位为 kPa; γ 表示土体容重,单位为 g/cm³。

根据土体骨架的本构关系,可推得如下公式:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}$$
(6)

其中, [D] 表示刚度矩阵,展开为:

在土力学中,通常规定将应变和应力取压为正, 那么几何方程的符号规定便与弹性力学相反,具体 如下:

$$\varepsilon_{y} = -\frac{\partial v}{\partial y} \gamma_{xy} = -\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \varepsilon_{x} = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad (8)$$

联立式(6)、(7)和(8),得到微分方程:

$$\dot{\tilde{f}} = -\frac{\partial}{\partial x} \dot{\tilde{g}} D_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{13} (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) \dot{\tilde{g}}$$

$$\ddot{\tilde{f}} = -\frac{\partial}{\partial y} \dot{\tilde{g}} D_{31} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{32} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{33} (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) \dot{\tilde{g}} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\ddot{\tilde{f}} = -\frac{\partial}{\partial x} \dot{\tilde{g}} D_{31} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{32} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{33} (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) \dot{\tilde{g}} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\ddot{\tilde{f}} = -\frac{\partial}{\partial y} \dot{\tilde{g}} D_{21} \frac{\partial u}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial v}{\partial y} + D_{23} (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) \dot{\tilde{g}} + \frac{\partial p}{\partial y} + \gamma = 0$$
(9)

此外,由饱和土体中水的连续条件可推得:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{1}{\gamma_w}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}k_x + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}k_y\right) = 0 \qquad (10)$$

其中, γ_w 表示水的容重,单位为 g/cm³; k_x 、 k_y 分别表示 x 和 y 方向的渗透系数,单位为 cm/s。

将式(9)、式(10)联立,即为 Biot 固结微分方程。

2 边坡沉降分析模型的构建与验证

2.1 基本假设、尺寸及参数

考虑到边坡沉降问题的影响因素比较复杂,为 计算简化,特做如下假定:按照平面应变问题进行考 虑,进行二维有限元分析;回填土体为弹塑性材料, 采用摩尔-库伦本构关系进行模拟;高边坡回填高 度 40 m,回填过程中形成 3 级马道,宽 3 m,每级坡 高 10 m,1~3 级边坡坡比 1.0:2.5,第 4 级边坡坡 比 1:2;同时,考虑到在进行 ABAQUS 建模时,边界 尺寸会对计算结果造成比较大的影响,参考郑颖人 等学者^[14]的研究,边坡的坡脚到边界的尺寸不应小 于边坡坡高的 1.5 倍,坡顶至边界的距离不应小于 边坡坡高的 2.5 倍,上下边界之间的距离不应小于 2 倍的边坡高度,即可消除边界效应对计算精度造 成的影响。基于以上的研究结果,建立的几何模型 如图 2 所示。



Fig. 2 Geometry dimensions of fill slope model

根据勘察设计资料及相关文献,选取的各土层 材料参数见表1。回填土层选取摩尔-库伦弹塑性 本构模型,基岩层与底基层(碎石夹黏性土层)选择 线弹性本构模型。

表 1 土层参数 Table 1 Soil layer parameters

地层岩性	干密度(g・cm ⁻³)	压缩模量 E _s /MPa	泊松比	黏聚力 c/ kPa	内摩擦角 φ/(°)	渗透系数 K/ (10 ⁻¹⁰ m ⋅ s ⁻¹)
回填土	≥2.15	40	0.3	8.7	27.5	13 800
碎石夹黏性土	≥2.15	25	0.3	26.0	16.0	3 80
基岩层	≥2.50	3 000~5 000	0.2	500.0~700.0	36.0~38.0	2

2.2 分析步、荷载与边界条件

使用生死单元法将高填方边坡回填土层均"杀 死"为空单元,对碎石夹黏性土层及基岩层的部分 施加重力,实现仅在自身重力作用下的地压平衡。

研究对于边坡填筑施工过程采用 ABAQUS 特 有的生死单元功能进行数值模拟,考虑到每一级是 10 m,每级可以分 2 层堆填,每层 5 m,则 1~4 级边 坡共分成 8 层,回填顺序如图 3 所示。每层回填设 置回填分析步,固结分析步各 7 天(最后一层固结 分析步 200 天),模型计算过程中回填分析步回填 至某一层时,该单元转化为实单元并施加重力,接着 固结分析进行施工间歇内的固结沉降计算,每一分 析步按照增量迭代法计算,这样即完成了填筑-暴 露的单次计算,重复以上过程直到第 8 层土填筑完 成,即完成了对边坡回填层层加载过程的计算,得到 了每一层施工期间及工后沉降数据。



图 3 回填顺序

Fig. 3 Backfilling sequence

模型的边界条件采用静力边界条件,在初始分 析步中,限定模型两侧的水平位移和模型底部两个 方向的位移,如图4所示。为了使孔隙水压力消散, 土体正常固结,能够进行固结计算,将基岩层表面的 孔压边界设置为零。



图 4 土体受力示意图 Fig. 4 Soil stress diagram

2.3 网格划分与单元类型

本文回填土层选用 CPE4 单元,碎石夹黏性土 及基岩采用 CPE4P 单元,经过调整,将模型最终划 分为4550个网格,4722个结点。为了后续进行计 算,针对40m边坡回填模型设置3组计算点,分别 是地基表面据坡脚处距离为10、20、30、40、50m的 计算点,各级马道各一个计算点,边坡顶面距坡顶处 距离为10、20、30、40、50、60、70、80、90m的计算点, 如图5 所示。



图 5 网格示意图 Fig. 5 Grid diagram

3 边坡沉降数值模型计算结果分析

3.1 数值模型验证分析

对填方边坡模型进行有限元计算,边坡侧向位 移及沉降云图计算分析结果如图6所示。

从40m填方边坡竣工后的侧向位移及沉降云图 中可以看出,对于分层填筑的边坡,最大沉降量并不 是发生在回填土层表面,而是在回填土层的中部,整 体位移与竖直方向沉降主要发生在第二级和第三级 交界处,施工结束后整体正向最大位移为31.48 cm, 固结后整体最大位移33.21 cm;施工结束后最大沉降 值为31.34 cm,固结后最大沉降33.14 cm。在回填土 的重力作用下,高填方边坡水平方向的最大位移发生 在第一级和第二级靠近边坡坡脚处,整体向外侧移 动,施工结束后正向最大位移7.515 cm,负向最大位 移约0.506 cm,固结后正向最大位移7.310 cm,负向 最大位移约1.07 cm。

模型顶面各计算点随坡顶距离变化的施工期沉降、总沉降及工后沉降数值统计见表 2。

本文在研究过程中,自 2022 年 3 月 25 日对某 机场高填方 40 m 边坡顶面进行监测,监测点坐标 分别是 A 点: P107 + 16. 954/H108 + 33. 724; B 点: P107 + 14. 82/H109 + 10. 078,顶面沉降值监测值见 表 3。



图 6 填方 40 m 边坡位移及沉降云图

Fig. 6 Displacement and settlement contour map of 40 m fill slope

表 2 顶面计算点沉降统计结果 Table 2 Statistical results of settlement at top calculation points

表 3 顶面沉降值监测值 Table 3 Monitoring values of top surface settlement

顶面计算点距 坡顶距离/m	施工期 沉降/cm	总沉降/	工后沉降/ cm	-	日期	时间/ 天	A∕ cm	<i>B</i> ∕ cm	日期	时间/ 天	A∕ cm	<i>B</i> ∕ cm
		cm		-	2022/03/05	0	0	0	2022/06/07	95	-1.50	-1.40
10	-9.30	-10.98	-1.68		2022/03/12	7	-0.2	-0.2	2022/06/16	104	-1.70	-1.50
20	-10.00	-11.90	-1.90		2022/03/19	14	-0.4	-0.3	2022/07/10	128	-1.90	-1.55
30	-10.30	-12 20	-1.99		2022/03/25	21	-0.5	-0.4	2022/07/17	135	-2.00	-1.60
	10.50	12.27			2022/04/02	28	-0.6	-0.5	2022/07/23	142	-2.10	-1.70
40	-10.30	-12.35	-2.05		2022/04/09	35	-0.6	-0.6	2022/07/30	149	-2.10	-1.80
50	-10.20	-12.33	-2.13		2022/04/16	42	-0.7	-0.7	2022/08/07	157	-2.15	-1.90
60	-10.12	-12.27	-2.15		2022/04/23	49	-0.8	-0.8	2022/08/13	163	-2.20	-2.10
70	10.06	12 21	2 15		2022/05/02	58	-0.9	-0.9	2022/08/20	170	-2.20	-2.10
70	-10.00	-12.21	-2.13		2022/05/09	65	-1.0	-1.0	2022/08/28	178	-2.20	-2.10
80	-10.02	-12.18	-2.16		2022/05/16	72	-1.1	-1.1	2022/09/11	192	-2.20	-2.10
90	-9.99	-12.15	-2.16		2022/05/24	80	-1.2	-1.2	2022/09/19	200	-2.20	-2.10
				-	2022/05/31	88	-1.3	-1.3				

则实际工程顶面沉降监测值与模型顶面计算点 在距离坡顶 80 m 处工后沉降值比较如图 7 所示。



图 7 理论计算与实测对比图

Fig. 7 Comparison between theoretical calculations and actual measurements

根据图 7 可以看出,对于高填方 40 m 边坡工后 沉降而言,理论计算工后沉降值2.16 cm与实际监 测工后沉降值 2.1 cm 与 2.2 cm 基本相近。因此, 采用 ABAQUS 有限元软件能很好地计算高填方边 坡的工后沉降数值,通过理论计算与实测数据对比, 模型的有效性和真实性也得到了进一步的验证。

3.2 分层填筑计算结果分析

填方边坡分层填筑 10 m、20 m、30 m、40 m 施工 结束后、固结结束后云图如图 8 所示。

从填方 40 m 边坡分层填筑沉降云图中可以看 出,对于分层填筑的边坡,最大沉降量总是出现在回 填边坡的中部。随着边坡填筑层一层一层的增加, 沉降值也越来越大。回填 10 m 施工结束后,最大沉 降值为 3.407 cm;回填 40 m 施工结束后,最大沉降 值为 31.34 cm;回填 10 m 固结结束后,最大沉降值 3.852 cm;回填 40 m 固结结束后,最大沉降值 33.14 cm。





3.3 顶面计算点时空变化规律分析

40 m 填方边坡顶面施工总沉降、工后沉降、施 工期间沉降值随时间变化曲线,如图 9 所示。顶面 计算点距坡顶距离 10 m、20 m、…、90 m 工后沉降随时间变化曲线如图 10 所示。





Fig. 10 Settlement curve chart after construction for various points

由图9、图10可以看出,填方40m边坡顶面计算 点沉降值随着距坡顶越来越远,工后沉降值越来越 大,且趋于稳定。对40m填方边坡而言,顶面施工期 间沉降值约在9.30~10.30 cm,施工总沉降值约在 10.98~12.35 cm,工后沉降值在1.68~2.16 cm。在 施工期结束以后,工后沉降值随着时间的增长,沉降 速率逐渐变小,沉降变形缓慢,最终趋于稳定。

3.4 地基及马道计算点时空变化规律分析

各马道上计算点随时间变化如图 11 所示,地基 表面各计算点随时间变化如图 12 所示。



Fig. 11 Calculation points for various roadway levels



Fig. 12 Distance from foundation surface calculation points to slope toe

由图 11 各级马道计算点变化图可以看出,随着 马道级别越来越大、沉降值越来越高。第一级马道 总沉降值约在 3.90 cm,第二级马道总沉降值约在 7.19 cm,第三级马道总沉降值约在 10.86 cm,这比 较符合理想结果,模型在回填的过程中,随着回填高 度越来越高,级别越高的马道沉降值也会越来越大; 由图 12 地基表面计算点距坡脚距离变化图可以看 出,随着距坡脚距离越来越近,地基表面计算点隆起 值越来越大,基本呈现"阶梯状"上升隆起,施工期 上升,固结期下降,在距离坡脚 10 m 处,施工期隆起 值约 1.38 mm,最终隆起值约在 1.26 mm;距离坡脚 50 m 处,施工期隆起值约 0.87 mm,最终隆起值约 在 0.81 mm。

4 结束语

(1)本文基于生死单元法、本构关系以及固结 理论,通过几何尺寸、材料模型、边界条件及网格划 分,构建了机场高填方边坡的沉降分析模型。在 ABAQUS 中实现了高填方边坡的层层回填模拟,能 够准确描述实际工程中的回填方式。

(2)对于高填方边坡分级填筑的情况,最大沉降量并不是发生在填土层表面,而是在回填土体中部,施工结束后最大沉降值为31.34 cm,固结后最大沉降33.14 cm。对于工后沉降而言,理论计算沉降值2.16 cm与实际沉降监测值2.1 cm与2.2 cm基本相近,模型的有效性和真实性也得到了进一步的验证。

(3)高填方边坡顶面工后沉降随着时间的推进,逐渐趋于一条平滑的曲线,且随着顶面计算点距坡顶距离越来越远,工后沉降值越来越大。随着马道级别越来越高,马道计算点沉降值越来越大。随着地基表面计算点距离坡脚越远,隆起值越小。

参考文献

- [1] 中国民用航空局."十四五"民用航空发展规划[EB/OL].
 (2021-12-14) [2021-12-14]. http://www.caac.gov.cn/ XWZX/MHYW/202201/t20220107_210799.html.
- [2] JIE Yuxin, WEI Yingjie, WANG Duli, et al. Numerical study on the settlement of high – fill airports in collapsible loess geomaterials: a case study of Lvliang Airport in Shanxi Province, China[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(3): 939–953.
- [3] ZHANG H J, SONG Y, XU S L, et al. Combining a class weighted algorithm and machine learning models in landslide susceptibility mapping: A case study of Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Computers & Geosciences, 2022, 158: 104966.
- [4] 冯彦铭. 深厚软土地基运营公路桥头跳车非开挖处治技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- [5] 严栋. 改进的分层总和法在铁路地基沉降中的应用[J]. 铁道 工程学报, 2010, 27(10): 26-29.
- [6] 杨光华,李俊,贾恺,等.改进的地基沉降计算的工程方法[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S2):4229-4234.

- [7] 范广,肖衡林,张建桥. 某高速公路软基沉降模型预测效果评估[J]. 公路交通技术, 2023, 39(1): 34-40.
- [8] 朱彦鹏, 蔡文霄, 杨校辉. 高填方路堤沉降模型现场试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 84-90.
- [9] PHAM Q D, NGO V L, TRAN T V, et al. Evaluation of asaoka and hyperbolic methods for settlement prediction of vacuum preloading combined with prefabricated vertical drains in soft ground treatment [J]. Journal of Endineering and Technological Sciences, 2022, 54(5): 859–872.
- [10] YIN Lihua, SUN Xudong, YANG Ping, et al. Stability analysis for subgrade settlement prediction by curve fitting methods [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 170(3): 032050.
- [11]李慧洁, 巨玉文, 王文正, 等. 几种黄土高填方路堤沉降预测 模型的对比研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(1): 82-86.
- [12]潘凯,谢春庆,赵新杰.高填方边坡动力响应变形特征数值模 拟分析[J].路基工程,2022(4):13-18.
- [13] 刘准. 山区高速公路软土地基路堤稳定性数值模拟研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018.
- [14]郑颖人,阿比尔的. 岩质隧道围岩稳定分析与分级研讨[J]. 现 代隧道技术, 2022, 59(1): 1-13.