

DOI: 10.11779/CJGE2021S1026

# 延安新区高填方工程的变形与水分迁移耦合分析

郭剑峰<sup>1,2</sup>, 陈正汉<sup>1</sup>, 郭楠<sup>3</sup>

(1. 陆军勤务学院, 重庆 401311; 2. 重庆工程学院, 重庆 400056; 3. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**以非饱和土增量非线性固结理论为基础, 考虑干密度在固结过程中的变化, 对延安新区高填方工程进行了土体变形和土体内水分迁移的耦合分析, 预测了填筑体的工后沉降、降雨入渗等对填筑体沉降与水分分布的影响。分析表明: 与传统的双线法比较, 非饱和土增量非线性固结理论不仅能较好地模拟施工、降雨等过程, 而且能同时考虑土体变形和土体内水分迁移, 尤其是能较好地考虑两者间的耦合效应, 计算结果更为合理。

**关键词:**非饱和土; 固结理论; 增量非线性; 重塑黄土; 高填方

**中图分类号:** TU433

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2021)S1-0143-06

**作者简介:**郭剑峰(1970—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事岩土力学与数值模拟等方面的教学和科研工作。E-mail: gjf\_sohu@sohu.com。

## Application of incremental nonlinear consolidation theory for unsaturated soil in high fill projects

GUO Jian-feng<sup>1,2</sup>, CHEN Zheng-han<sup>1</sup>, GUO Nan<sup>3</sup>

(1. Army Logistics University, Chongqing 401311, China; 2. Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056, China; 3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the incremental nonlinear consolidation theory for unsaturated soil and the relative dry density as the internal variable, the bidirectional coupling analysis of soil deformation and water transfer of a high fill project in Yan'an New District of northern Shaanxi is carried out. The influences of the post-construction settlement of the fill and rainfall infiltration on its settlement and water distribution are predicted. The results show that compared with the traditional double-line method, the incremental nonlinear consolidation theory for unsaturated soil can simulate the process of construction and rainfall and the deformation of soil and the movement of water in soil at the same time. Especially it can make the calculated results be more reasonable by considering the bidirectional coupling effect between the soil deformation and water transfer.

**Key words:** unsaturated soil; consolidation theory; incremental nonlinearity; remolded loess; high fill

## 0 引言

随着中国经济的飞速发展, 城镇化步伐加快, 城市规模迅速扩大, 但在西北黄土丘陵沟壑区, 地貌梁峁起伏, 沟谷深切, 城市的发展也受到较大影响, 因此“平山造地, 上山建城”就成为拓展城市空间的重要途径。这些地区的填方工程建设具有填方高度大(最高达100 m以上)、工程场址地质环境复杂、地下水变化较大、黄土湿陷性等特点, 这不仅给工程的设计与施工带来巨大困难, 而且提出了许多挑战性的岩土力学与工程问题<sup>[1]</sup>。其中黄土高填方体的沉降量计算及稳定时间预测、黄土高填方体水分迁移变化等问题是被关注的重点<sup>[2-6]</sup>。

填土的变形与其内水分迁移关系密切。填筑体内的水分迁移会对其沉降、湿化变形产生较大的影响, 而填土内应力、孔隙率等的变化也会对土体的渗透性等

产生影响。通常在填方高度不大的情况下, 往往可以忽略填土应力变化对水分迁移的影响, 但是高填方情况下, 随着填方厚度的增加, 固结压力增大, 两者间双向耦合的现象尤为突出, 必须给予考虑。本文以非饱和土增量非线性固结理论为基础, 考虑干密度变化对土水特征曲线和土体强度、变形等参数的影响, 对延安新区高填方工程的沉降和水分迁移进行了双向耦合分析, 预测了填方体的工后沉降量及降雨入渗等对填筑体沉降、水分分布的影响。

## 1 非饱和土非线性固结理论

### 1.1 基本假设

非饱和土非线性固结理论是由陈正汉等人提出的

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672330)

收稿日期: 2020-12-15

非饱和土增量非线性本构模型<sup>[7]</sup>引入非饱和土固结理论<sup>[8]</sup>发展而来的<sup>[9]</sup>,经过多年的发展完善,该理论各方面已相对较为成熟。其基本假设如下:①土中水、气各自连通,且均不承受剪应力;②土是均质各向同性的,小应变,准静态;③不考虑相变和气在水中的溶解;④组分应力是对称的;⑤土颗粒与水不可压缩;⑥等温过程,不计热效应,气相服从理想气体的状态方程。

## 1.2 基本方程

$$\frac{\partial(1-n)}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-n) \dot{X}_s] = 0 \quad , \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot [\theta \dot{X}_w] = 0 \quad , \quad (2)$$

$$\frac{\partial[(n-\theta)(u_a + p_{\text{atm}})]}{\partial t} +$$

$$\nabla \cdot [(n-\theta)(u_a + p_{\text{atm}}) \dot{X}_a] = 0 \quad , \quad (3)$$

$$\theta(\dot{X}_w - \dot{X}_s) = -k_w \nabla \frac{u_w}{\gamma_w} + \gamma \quad , \quad (4)$$

$$(n-\theta)(\dot{X}_a - \dot{X}_s) = -k_a \nabla \frac{u_a}{\gamma_w} \quad , \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\sigma - u_a I) + \nabla(u_a - u_w) + \nabla u_w + f = \nabla \cdot \sigma^* + \nabla u_a + f = 0 \quad , \quad (6)$$

$$\varepsilon = -\frac{1}{2}[\nabla X_s + (\nabla X_s)^T] \quad , \quad (7)$$

$$d\varepsilon = \frac{1+\mu_t}{E_t} d\sigma^* - \frac{3\mu_t}{E_t} dp^* I + \frac{du_a - du_w}{H_t} I \quad , \quad (8)$$

$$d\varepsilon_w = \frac{dp^*}{K_{wt}} + \frac{ds}{H_{wt}} = \frac{dp^*}{K_{wt}} + \frac{du_a - du_w}{H_{wt}} \quad , \quad (9)$$

式中,  $n, \theta, \sigma, u_a, u_w, p_{\text{atm}}, \dot{X}_s, \dot{X}_w, \dot{X}_a, f, k_w, k_a$  和  $\gamma_w$  依次代表土的孔隙率、体积含水率、总应力张量、孔隙气压力、孔隙水压力、大气压、土骨架的速度矢量、水的速度矢量、气的速度矢量、土体的体力、渗水系数、渗气系数和水的重度,  $\sigma$  为净总应力,  $\sigma^* = \sigma - u_a I$ ,  $dp^*$  为净平均应力增量,  $ds$  为基质吸力增量,  $ds = du_a - du_w$ 。

式(8)中的  $E_t, \mu_t$  分别是切线杨氏模量和切线泊松比,  $H_t$  是与吸力相关的土骨架的切线体积模量。这些参数随应力状态和应力水平变化,

$$E_t = k_1 + m_1 \frac{s}{p_{\text{atm}}} \left[ \frac{\sigma_3 - \mu_a}{p_{\text{atm}}} \right]^{n_1} \cdot \left[ 1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi')(\sigma_1 - \sigma_3)}{2(c' + s_f \tan \varphi') \cos \varphi' + 2(\sigma_3 - \mu_a) \sin \varphi'} \right]^2 \quad , \quad (10)$$

$\mu_t$  可通过体积模量  $K_t$  换算,  $K_t = \frac{E_t}{3(1 - 2\mu_t)}$ 。其中,

$$K_t = k_2 + m_2 \frac{s}{p_{\text{atm}}} \left[ \frac{\sigma_3 - u_a}{p_{\text{atm}}} \right]^{n_2} \quad , \quad (11)$$

$$H_t = \frac{3(s + p_{\text{atm}})}{k_3 + m_3 \ln \frac{p^* + p_{\text{atm}}}{p_{\text{atm}}}} \quad . \quad (12)$$

式(10)~(12)中  $p^*$  为净平均应力,  $s$  为基质吸力,  $s = u_a - u_w$ ,  $R_f$  为破坏比,  $c', \varphi', \varphi^b$  是与强度相关的参数,  $k_1, m_1, n_1, k_2, m_2, n_2, k_3, m_3$  为无因次量。

式(9)中的  $K_{wt}$  是与净平均应力有关的水的切线体积模量,  $H_{wt}$  是与吸力有关的水的切线体积模量, 可以通过试验测出<sup>[7,9]</sup>。实际计算时也可以采用相应的土-水特征曲线替代(9)式进行分析。对于填方工程可采用下述形式的土-水特征曲线<sup>[9]</sup>:

$$w = k_4 \ln \frac{(s + P_{\text{atm}})}{P_{\text{atm}}} + m_4 \quad , \quad (13)$$

式中,  $k_4, m_4$  为无因次量。

上述模型中共有 16 个参数。其中  $c', \varphi', \varphi^b, R_f, k_1, m_1, n_1, k_2, m_2, n_2, k_3, m_3$  与土的变形有关, 可通过非饱和土三轴试验测定<sup>[7,10]</sup>;  $k_4, m_4$  与水量变化(即土-水特征曲线)有关, 可通过压力板试验测定<sup>[9]</sup>;  $k_w, k_a$  与土的渗水性和渗气性有关, 可通过渗水和渗气试验测定<sup>[11-12]</sup>, 试验不足时也可利用土-水特征曲线结合相应的经验公式估算<sup>[13]</sup>。

## 2 延安新区黄土高填方的变形-水分运移耦合分析

利用上述非饱和土非线性固结理论分析了延安新区高填方沉降和水分迁移进行, 并对填筑体工后沉降预测、降雨入渗等对填筑体沉降与水分分布的影响等问题进行了模拟。

### 2.1 计算区域与计算模型

计算选取了延安新区一标锁口坝观测点 JCS25—JCS29 所在的 8—8' 截面附近的狭长区域进行分析, 该区域最大填方高度达 103 m(测点 JCS26 附近), 是该标段填筑体最大填筑厚度所在区域。计算区域如图 1 所示。图 2 为计算区域填筑体有限元模型。表 1 是填土基本物性参数。观测资料见文献[14]。

### 2.2 干密度对模型参数影响的考虑

填方工程中, 如路堤、大坝、填方机场等工程的填料都是非饱和土。高填方工程中填土的干密度随着施工和固结过程的进行有较大的变化, 因此高填方工程的计算需考虑土体干密度的变化。而土体干密度的变化也可以综合反映土骨架的应力、土的孔隙率的变化。此外, 填方施工质量是通过控制填土的干密度实现的, 故而在高填方计算中采用干密度或相对干密度(土的干密度与水密度的比值)作为影响因素考虑填土变形与填土内水分迁移的相互影响, 不仅合适而且方便。

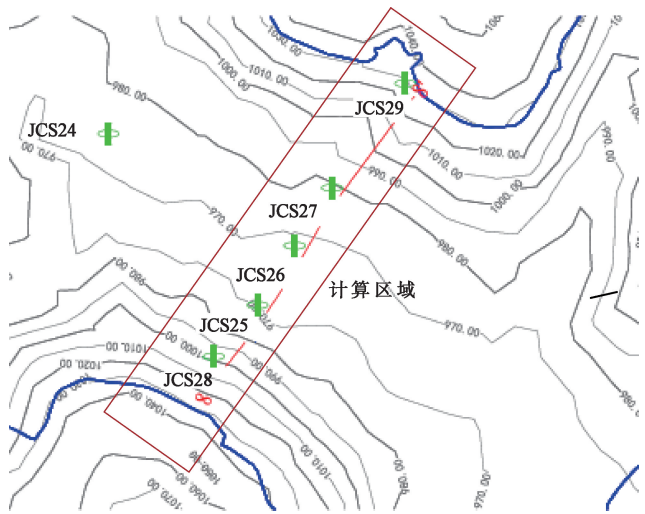


图1 计算区域  
Fig.1 Area of analysis

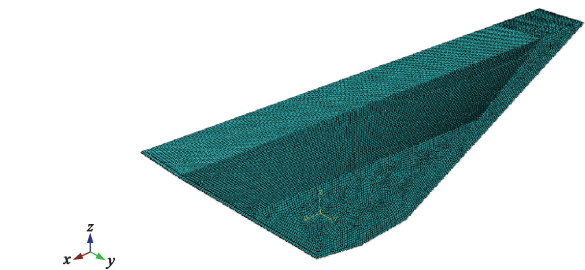


图2 填筑体有限元计算模型  
Fig.2 FEM model for fill

表1 填土基本物理参数

Table 1 Basic parameters of fill

土粒相对密度	塑限 / %	液限 / %	初始干密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	初始吸力 / kPa
2.71	17.3	31.1	1.51	100

对于延安新区重塑黄土,上述模型中除了 $R_f, n_2$ 外,其余参数受填土干密度影响较大,其中 $c', \varphi', \varphi^b, k_1, m_1, n_1, k_2, m_2, k_3, m_3$ 随干密度变化关系可用线性函数表示<sup>[10-11]</sup>,如表2所示。

2.3 计算参数取值

根据计算区域填方的实测资料<sup>[14]</sup>,填土按干密度 $1.51\text{ g/cm}^3$ 考虑,计算同时考虑填土的变形和填土内的水分迁移及其相互作用。表1是填土的基本物理参数,表2是填土的力学参数。其中强度参数和切线模量、体积模量等来源于相关试验资料<sup>[10]</sup>,吸力相关模量参考了文献[7]。初始吸力取值主要参考了实测体积含水率数据,按体积含水率30%并结合计算用的土-水特征曲线进行估算,取值为100 kPa。

2.4 分析与结果

(1) 工后沉降预测

为了预测工后沉降,先按照实际施工进度与场地降雨情况<sup>[14]</sup>计算了施工期沉降,然后在荷载、入渗条

件等不变的情况下进行固结计算,从而预测工后沉降。固结时间为10 a。施工进度情况如图3所示。

表2 填土力学参数

Table 2 Mechanical parameters of fill

参数 类型	参数	表达式
与强度相关	$c'/\text{kPa}$	$c' = 16.2\gamma_{\text{dw}} - 12.3$
	$\varphi'/(^{\circ})$	$\varphi = 16.0\gamma_{\text{dw}} + 6.3$
	$\varphi^b/(^{\circ})$	$\varphi^b = 65.1\gamma_{\text{dw}} - 82.7$
与 $E_t$ 相关	$k_1$	$k_1 = 1862.6\gamma_{\text{dw}} - 2670.4$
	$m_1$	65.0
	$n_1$	$n_1 = 1.28\gamma_{\text{dw}} - 1.89$
	$R_f$	0.82
与 $K_t$ 相关	$k_2$	$k_2 = 643.8\gamma_{\text{dw}} - 928.5$
	$m_2$	57.0
	$n_2$	0.0
与 $H_t$ 相关 与SWCC相关	$k_3$	0.011
	$m_3$	0.017
	$k_4$	$k_4 = 0.137\gamma_{\text{dw}} - 0.293$
	$m_4$	$m_4 = -0.365\gamma_{\text{dw}} + 0.818$

注: $\gamma_{\text{dw}}$ 为干密度与水密度比值,  $\gamma_{\text{dw}} = \rho_{\text{d}}/\rho_{\text{w}}$ 。

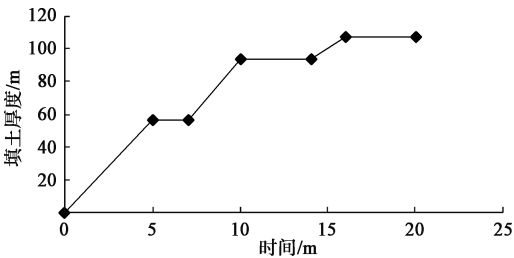


图3 填筑进度曲线

Fig.3 Curve of filling progress

原地基采用一定厚度的弹性地基来模拟,其弹性模量和厚度按实测值反演确定,泊松比和渗透系数取值参考了相关黄土的工程数据<sup>[15]</sup>,并设原地基底部为不透水边界,以此模拟底部排水不畅的情况。计算中未考虑蒸发对填土沉降的影响。

表3列出了观测点JCS26处施工期原地基顶面沉降和填土顶面沉降(即总沉降量)随施工进度变化的情况。与实测数据对比,原地基沉降估算偏小约20%。施工期总沉降量比实测均偏大,施工完成时,计算沉降量比实测值偏大约0.98 m,约25%;停工期沉降量比实测均偏小,如填筑到93 m时,停工期沉降5.0 cm,只有实测的25%左右。总沉降量偏大和停工期沉降偏小的原因主要是对填土干密度初值取值偏小,对渗透性估计偏大(土-水特征曲线和渗透系数估算主要来源是陕甘地区的压实黄土资料<sup>[7,12]</sup>)。这样就造成了计算的固结过程较实际快,计算的施工期沉降量包含了部分工后实际沉降,故而计算出的施工期沉降偏大。

表3 观测点 JCS26 处沉降  
Table 3 Settlements at Point JCS26 (m)

施工时间	填土厚度	原地基顶面沉降量		总沉降量	
		计算值	实测值	计算值	实测值
5	56.0	0.10		2.10	
7	56.0	0.10	0.18	2.20	1.22
10	93.0	0.16	0.21	4.32	3.19
14	93.0	0.16	0.22	4.37	3.38
16	103.0	0.18		4.81	

图4所示为工后5 a 填方最大处(测点 JCS26)吸力、竖向应力、饱和度和土体干密度随深度分布图。显示随着固结的进行,土体内水向下部迁移;若排水不畅将导致填筑体底部积水,底部土体逐渐饱和,这将会导致一系列的工程隐患。

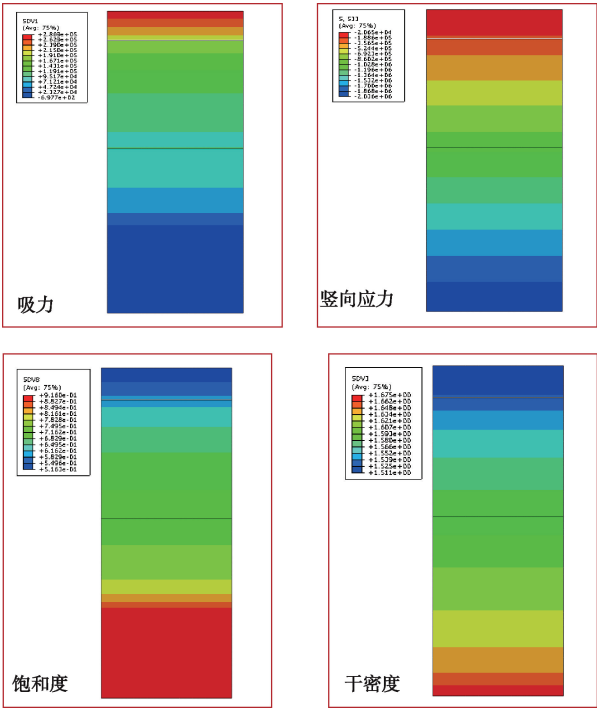


图4 工后5 a 测点 JCS26 处吸力、竖向应力、饱和度和干密度随深度变化图

Fig. 4 Variation of suction, vertical stress, saturation and dry density along with depth at Point JCS26 after completion of filling for 5 years

图5显示了固结10 a 后,填土地表工后最终沉降沿水平方向变化曲线。图中横坐标原点为测点 JCS26 处。计算出的最大沉降量为 1.50 m,出现在距离测点 JCS26 往测点 JCS27 方向约 10 m 处。传统双线法<sup>[16]</sup>估算出的工后最大沉降为 2.35 m,该方法不考虑土体中的水分迁移和固结,只将土体按“干”、“湿”两种非线性弹性体进行计算,结果偏大。因此用非饱和土增量非线性固结理论计算结果更为合理。

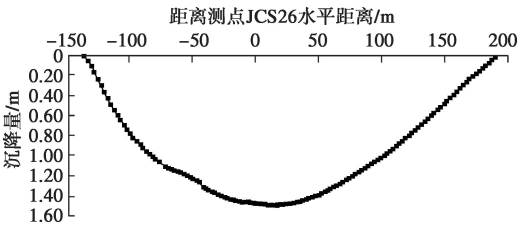


图5 填土地面沉降沿水平线变化曲线

Fig. 5 Variation of ground settlement in horizontal direction

(2) 降雨入渗对填筑体沉降和水分分布的影响

该计算主要是分析工后沉降基本完成后,地表降雨入渗对填筑体的影响。计算以施工结束 10 a 后的状态为初始状态,模拟在暴雨条件下,水分由地面入渗引起的填土沉降。降雨入渗量可根据地勘资料估算:延安地区 7 月—10 月以 8 ~ 15 d 的中期降雨为主,连续降水量可高达 152.9 mm<sup>[17]</sup>,因此计算中降雨按 300 mm/mon 计算,降雨时长为 15 d。地表入渗量按降雨量的 70% 考虑。计算时长为 3 m,并且不考虑蒸发的影响。基础底部依然设为不透水边界。图6所示为测点 JCS26 处由于降雨引起的填土表面水分入渗量随时间变化曲线。

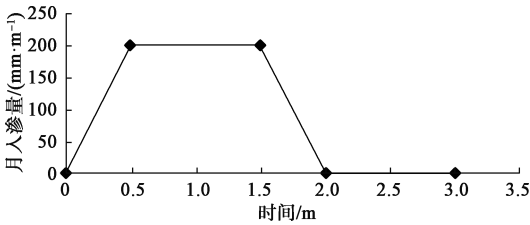


图6 测点 JCS26 处降雨引起的填土表面水分入渗量随时间变化曲线

Fig. 6 Curve of water infiltration on filling surface caused by rainfall at Point JCS26

图7所示为测点 JCS26 处距地表不同深度的总水头变化曲线。由图中可以看到,地表以下 10 m 深度总水头变化很小,降雨期间基本未发生变化,降雨期结束 1 mon 后总水头约上升 0.56 m,故计算所设的降雨条件下,降雨影响深度不到 10 m。

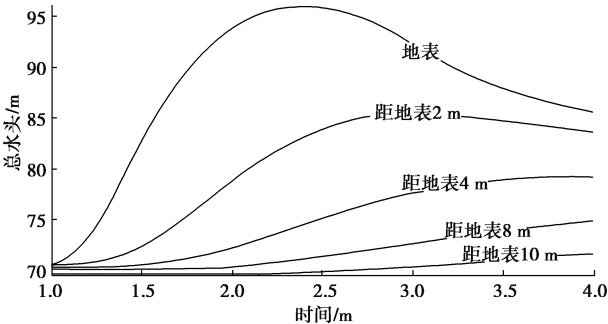


图7 JCS26 处距地表不同深度总水头随时间变化曲线

Fig. 7 Time-dependent variation curves of total water head at different depths below Point JCS26



图 8 所示为填土地表沉降量随时间变化曲线,由图可知地表沉降量最大值约 22 mm。由上述结果可知,在固结沉降基本稳定后,降雨入渗对地面沉降影响不大。

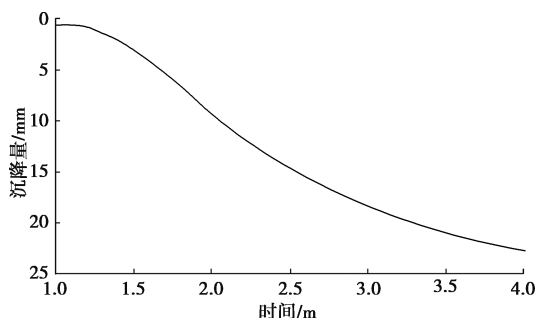


图 8 测点 JCS26 处地表沉降随时间变化曲线

Fig. 8 Time-dependent variation curve of ground settlement at Point JCS26

### 3 结 论

(1) 用非饱和土增量非线性固结理论预测延安新区黄土高填方工程沉降量,不仅能较好地模拟施工、降雨等过程,而且能同时考虑土体变形和土体内水分迁移,尤其是能较好地考虑两者间的耦合效应,计算结果比传统的双线法更为合理。

(2) 高填方工程分析中,应考虑土的干密度在固结过程中的变化。

(3) 在利用非饱和土增量非线性固结理论计算中,土体的初始参数对分析结果影响较大,需要慎重选取。

(4) 高填方工程中随着固结的进行,土体内水向下部迁移,若排水不畅将导致填筑体底部积水,底部土体逐渐饱和,将会导致工程隐患。

(5) 延安地区,高填方工程固结沉降基本稳定后,降雨入渗对地面沉降影响不大。

### 参考文献:

[1] 张 炜, 张继文, 于永堂. 第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告: 黄土高填方关键技术问题与工程实践[J]. 岩土工程技术, 2016, **30**(1): 12–19, 38. (ZHANG Wei, ZHANG Ji-wen, YU Yong-tang. Key technical issues and engineering practices in project construction of loess deep filled foundation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2016, **30**(1): 12–19, 38. (in Chinese))

[2] 姚仰平, 刘 林, 王 琳, 等. 高填方地基的蠕变沉降计算方法[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 154–158. (YAO Yang-ping, LIU Lin, WANG Lin, et al. Method of calculating creep deformation of high filled embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 154–158. (in Chinese))

[3] 张沛然, 黄雪峰, 扈胜霞, 等. 非饱和填土侧限压缩变形特

性试验研究及应用初探[J]. 岩土力学, 2018, **39**(2): 437–444. (ZHANG Pei-ran, HUANG Xue-feng, HU Sheng-xia, et al. Experimental study and preliminary application on the confined compressive deformation characteristics of unsaturated filling soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(2): 437–444. (in Chinese))

[4] 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**(S2): 37–44. (HUANG Xue-feng, KONG Yang, LI Xu-dong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 37–44. (in Chinese))

[5] 朱才辉, 李 宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 293–301. (ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Ming-zhen, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of Lüliang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 293–301. (in Chinese))

[6] 段 旭, 董 琪, 门玉明, 等. 黄土沟壑高填方工后地下水与土体含水率变化研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1753–1758. (DUAN Xu, DONG Qi, MEN Yu-ming, et al. Change of groundwater and water content of loess high fill in gully regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1753–1758. (in Chinese))

[7] 陈正汉, 周海清, DGFredlund. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(5): 603–608. (CHEN Zheng-han, ZHOU Hai-qing, DGFREDLUND. Nonlinear model for unsaturated soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(5): 603–608. (in Chinese))

[8] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论(II)[J]. 应用数学和力学, 1993, **14**(8): 687–698. (CHEN Zheng-han. Consolidation theory of unsaturated soil based on the theory of mixture (II)[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1993, **14**(8): 687–698. (in Chinese))

[9] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201–272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201–272. (in Chinese))

[10] 高登辉, 陈正汉, 郭 楠, 等. 干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(3): 736–744. (GAO Deng-hui, CHEN Zheng-han, GUO Nan, et al. The influence of dry density and matric suction on the deformation and the strength characteristics of the remolded unsaturated loess soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(3): 736–744. (in Chinese))

[11] 郭 楠. 非饱和土的增量非线性横观各向同性本构模型研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018. (GUO Nan. Study on Incremental Nonlinear Transverse Isotropic Constitutive

- Model of Unsaturated Soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] 姚志华. 大厚度自重湿陷性黄土的水气运移和力学特性及地基湿陷变形规律研究[D]. 重庆: 后勤工程学院. 2012. (YAO Zhi-hua. Water-air Migration, Mechanical Characteristics and Foundation Collapse Deformation of Self-weight Collapse Loess with Heavy Section[D]. Chongqing: Logistic Engineering University of PLA. 2012.)
- [13] FRUHLUND D G, RAHARDJO H. Soils Mechanics for Unsaturated Soils[M]. John Wiley & Sons, Inc. 1993.
- [14] 本书编委会. 延安新区黄土丘陵沟壑区域工程造地实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Editorial Board of This Book. Engineering Practice of Land Reclamation in Loess Hilly Gully Areas in Yan'an New District [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese))
- [15] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Loess Mechanics And Engineering [M]. Xi'an: Shanxi Science & Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [16] 关亮, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和填土(黄土)的湿化变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1698 – 1704. (GUAN Liang, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Study of wetting deformation of unsaturated remolded loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1698 – 1704. (in Chinese))
- [17] 延安市新区管委会. 延安市新区一期综合开发工程地质勘察资料[M]. 2012. (Yan'an New District Management Committee. Engineering Geological Survey Data of Phase I Comprehensive Development Project of Yan'an New District[M]. 2012. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)