

Settle3D 软件在黄土公路路基变形分析中的应用

张志军¹, 张俊然², 何芳婵³, 赵金玟², 严天岗², 李世伟³, 田明磊⁴

(1. 河南省白龟山水库管理局, 河南 平顶山, 467031;

2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046;

3. 河南省水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

4. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053)

摘要: 公路填筑过程路基沉降和工后沉降, 将直接影响公路建设质量和后期的维护费用。为了探明黄土路基的变形机理, 运用 Settle3D 软件, 模拟天然和降雨情况下, 对黄土路基不同填筑阶段的沉降进行数值分析, 以便获得黄土公路路基填筑时期的变形规律。研究结果表明: 沉降整体呈“浴缸”状, 路基中心位置沉降量最大, 沿中心线向两边沉降逐渐减小; 沉降量随着深度的增加而减小, 持力层表面的沉降量最大。各填筑阶段之间的沉降量呈非线性减小并最终趋于稳定; 同一阶段下原状黄土的沉降量大于压实黄土的沉降量。降雨能够明显增加原状黄土路基的沉降量, 而对压实黄土沉降量的增大效果不明显, 因此施工过程中控制路基压实质量和采取合理的路基防水排水措施显得非常重要。

关键词: Settle3D; 黄土; 路基; 变形分析; 降雨

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)02-0089-05

Application of Settle3D Software in Deformation Analysis of Loess Highway Subgrade

ZHANG Zhijun¹, ZHANG Junran², HE Fangchan³, ZHAO Jindi², YAN Tiangang², LI Shiwei³, Tian Minglei⁴

(1. He'nan Province Baigui Mountains Reservoir Administration Bureau, Pingdingshan, He'nan 467031, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China;

3. He'nan Provincial Water Conservancy Research Institute, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

4. No. 2 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of He'nan, Zhengzhou, He'nan 450053, China)

Abstract: The settlement of subgrade during highway filling period and after construction directly affects the quality of highway construction and the maintenance costs during the run time. The settlement of loess roadbed at different filling stages is analyzed by using Settle3D software to simulate natural and rainfall conditions, so as to obtain the deformation rule of loess highway subgrade during filling period. The results show that the settlement is in the shape of the "bathtub" as a whole. The settlement in the center of the subgrade is the largest, and the settlement decreases gradually along the centerline. The settlement decreases with the increase of depth, and the settlement on the bearing layer surface is the largest. The settlement difference between different construction stages has a nonlinear decreasing trend. At the last stage of construction, the settlement deformation of loess tends to be stable. The settlement of undisturbed loess is higher than that of compacted loess at the same stage. Rainfall increases the settlement of undisturbed loess subgrade, but the effect on the settlement of compacted loess is not apparent. Therefore, it is vital to control the compaction quality of the subgrade and to take the waterproof and drainage measures.

Keywords: Settle3D; loess; subgrade; deformation analysis; rainfall

收稿日期: 2020-10-17

修稿日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602295); 河南省高等学校重点科研项目(21A410002); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2020GGJS-094)

作者简介: 张志军(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事工程建设管理等方面的工作。E-mail: 942616182@qq.com

通讯作者: 张俊然(1984—), 男, 副教授, 主要从事岩土工程性质方面的科研与教学工作。E-mail: zhangjunran@ncwu.edu.cn

黄土在我国分布非常广泛,常作为天然建筑材料用于在路基的填方工程中。具有结构强度的天然黄土属于欠压密土,其结构性和多孔隙性导致的压缩及湿陷特性对工程的影响非常大。黄土地区路基容易受到降雨等恶劣气候的影响,从而产生不均匀沉降、泥石流、滑坡、坍塌等工程问题^[1-5]。与原状黄土相比,黄土路基填筑工程中所用压实黄土结构性消失,孔隙减少,能够有效消除黄土的湿陷性,改善压缩性^[6-9]。公路填筑过程中的路基沉降和工后沉降,直接影响公路建设质量和运行期的维护费用,路基变形问题受到工程界的广泛关注。因此探究黄土公路路基,在天然和降雨情况下变形规律具有重要的工程指导意义^[10]。

原状黄土与压实黄土的结构性明显不同,因此其变形特性的表现有所不同。陈存礼等^[11]指出黄土的结构性参数和压缩指标具有相互关联性。黄雪峰等^[12]指出垂直压力影响压实黄土的变形量,且压实度越大的黄土总变形量越小。杨玉生等^[13]对压实黄土的变形性质进行了一系列的试验研究。

关于数值分析研究方面,蒋正舜等^[14]用FLAC^{3D}对陡坡路基不均匀沉降建立模型,指出路堤高度、坡度、填土高度的增大都会引起总体沉降与不均匀沉降的增大;刘永贵等^[15]运用SEEP/W软件建立半填半挖路基模型,指出在降雨初期路基土体出现压缩变形,在后期则表现为体积膨胀而发生回弹;宋晶等^[16]用数值计算指出土体结构性破坏越严重,土层压缩量越大,对应路基沉降量越大。

国道 G310 三门峡至豫陕界段新建工程施工路段包含黄土路基填筑工程。黄土路基常因遇水湿陷而产生不均匀沉降,存在安全隐患。为此选取 K142 + 824—K143 + 089 段和 K154 + 935—K155 + 229 段高填路堤为研究对象,运用 Settle3D 软件,模拟天然和降雨情况下,对黄土路基不同填筑阶段的沉降进行数值分析,以便获得黄土公路路基填筑时期的变形规律。

1 工程概况和模拟参数

1.1 工程概况

三门峡路基施工段起始桩号 K134 + 300,终止桩号 K173 + 193,全长约 38 km。详细的工程概况可见参考文献[17]。选取典型的 K142 + 824—K143 + 089(A 段)和 K154 + 935—K155 + 229(B 段)两个填方路段进行数值分析,其中 A 段的填筑高度 $H = 40$ m,填筑共 20 个阶段,模拟选取第 1、5、10、15、20 阶段;B 段的填筑高度 $H = 24$ m,填筑共 12 个阶段,模拟选取第 1、4、8、12 阶段。典型黄土路基段的位置示意图如图 1 所示。

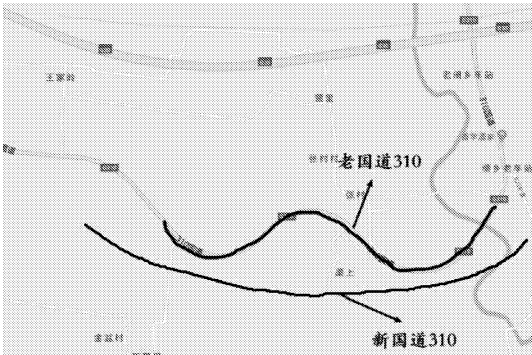


图 1 典型黄土路基段的位置示意图

1.2 模拟参数

通过室内试验获得 A、B 两处黄土公路路基的基本物理特性参数如表 1 所示,颗粒级配曲线如图 2 所示。由此可判别两处路基黄土均为级配良好的粉质砂黄土。制备原状黄土和压实黄土试样(其中压实度为 95%)进行固结压缩试验,得到原状和压实黄土的变形模拟参数,以此评价压实黄土的变形特性,并为数值模拟分析高填路基填筑不同阶段沉降提供试验数据。具体模拟参数如表 2、表 3 所示。由此可判断,原状黄土为高压缩性土,击实黄土为低压缩性土。

表 1 黄土的基本物理性质参数

标段	塑性指数 I_{p10}	比重	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	原状干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	原状含水量 $w / \%$	压实干密度 $\rho_{d0} / (g \cdot cm^{-3})$	压实含水量 $w_0 / \%$
A	7.56	2.70	5.71	2.13	1.43	4.0	1.5	12.5
B	8.77	2.70	5.71	1.61	1.40	6.6	1.5	12.5

2 数值模拟

运用 Settle3D 数值计算软件建立典型断面三维

计算模型,实现分层填筑路基全过程的沉降模拟,A 路段的设计示意图如图 3 所示。

表 2 A 路段材料参数

土体种类	土的类型	e_0	C_c	C_r	a_e	E_s/MPa	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
原状	未浸水	0.870	0.0332	0.0031	0.0710	26.3158	18	21
	浸水	0.870	0.1636	0.0141	0.4132	4.5249	18	21
压实	未浸水	0.545	0.0264	0.0064	0.0742	20.8333	18	21
	浸水	0.545	0.0341	0.0059	0.0803	19.2308	18	21

表 3 B 路段材料参数

土体种类	土的类型	e_0	C_c	C_r	a_e	E_s/MPa	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
原状	未浸水	1.026	0.0363	0.0059	0.0709	28.5714	18	21
	浸水	1.026	0.2647	0.0175	0.7525	2.6918	18	21
压实	未浸水	0.573	0.0279	0.0810	0.0810	19.4175	18	21
	浸水	0.573	0.0347	0.0068	0.1030	15.2672	18	21

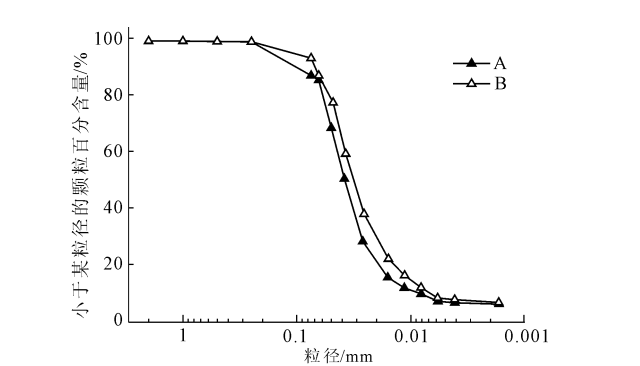


图 2 公路路基黄土的粒径分配曲线

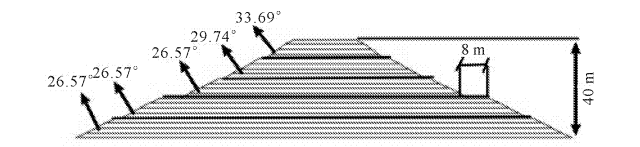


图 3 A 路段的设计示意图

降雨条件用黄土浸水饱和后的参数进行模拟,设置天然和降雨情况,设置路基填土分别为原状和压实情况,以便分析典型黄土路基 A、B 断面的沉降变化规律。取断面的一面一线一点为分析对象,具体也可参考文献[17],即路基横截面、路基中心线、中心线的点,具体分布如图 4 所示。

3 计算结果与分析讨论

根据各填方路基情况绘制平面和三维计算模拟图,其三维模型图如图 5 所示。

根据所得数据绘制地表横截面沉降变形模拟图和中心点的沉降变形图分别如图 6、图 7 所示(只列出 A 段)。从整体观察,沉降形态呈凹陷的“浴缸”状,凹陷程度随填方阶段的增加而逐渐加深。即从外侧路基沉降量较小,越靠近中心,沉降越大。这是因为路堤呈堤坝形,内侧受荷最大,变形量也最大,

填方土体的增多会使这种现象更加明显。从沉降量随距路基外边缘距离变化曲线分析,路基中心位置沉降量最大,沿中心线向两边沉降逐渐减小。从选取路基中心线的某点,分析随地基持力层深度变化时沉降量的变化,发现最大沉降量出现在持力层土表面,填方深度越大,总沉降量越小,其减小程度随深度的增加而逐渐增大。

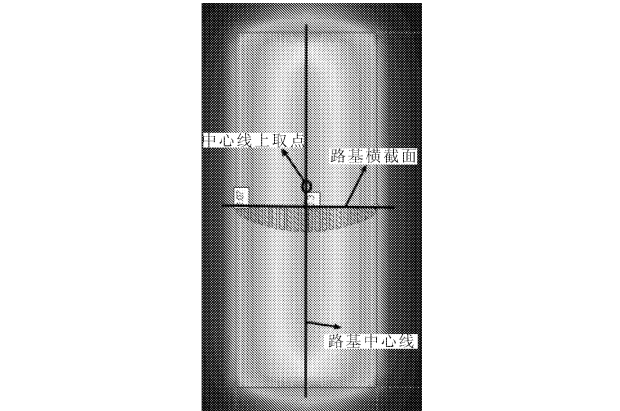


图 4 断面三处位置示意图

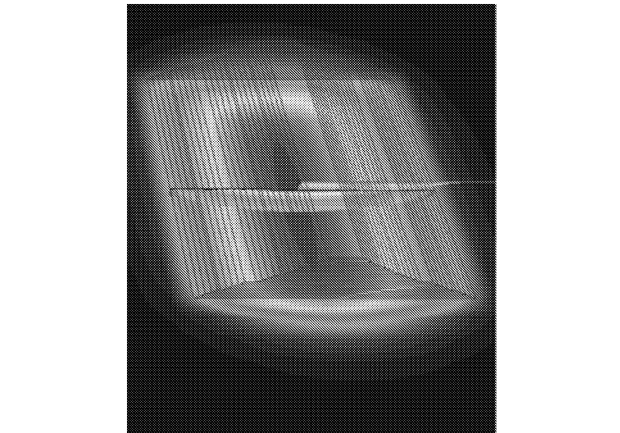
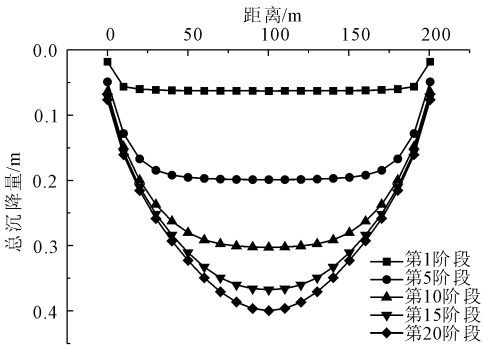
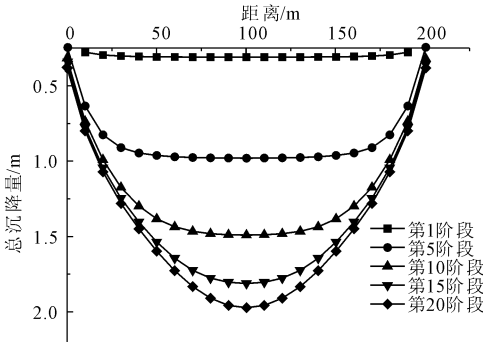


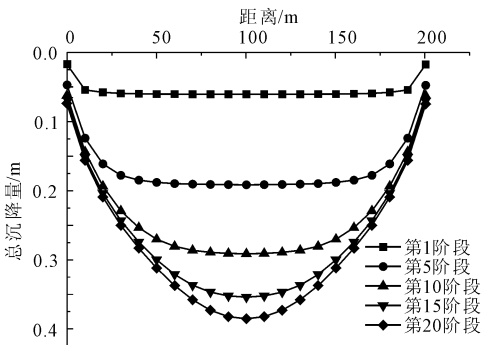
图 5 三维模拟结果示意图



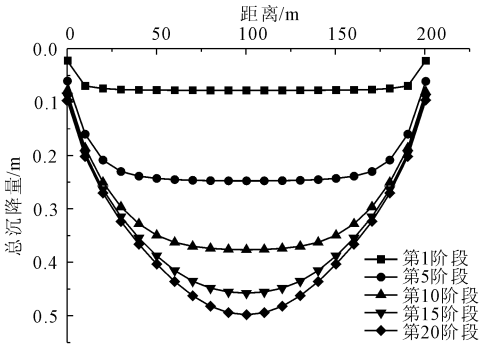
(a) 天然情况下A段原状土路基



(b) 降雨情况下A段原状土路基



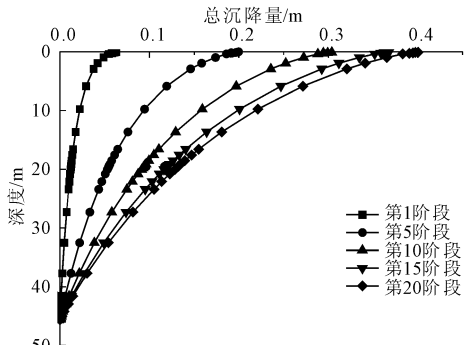
(c) 天然情况下A段压实黄土路基



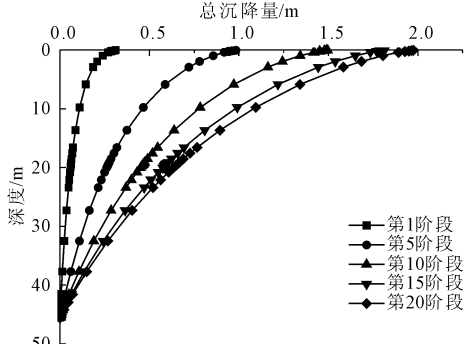
(d) 降雨情况下A段压实黄土路基

图 6 地表横截面沉降变形数值分析结果

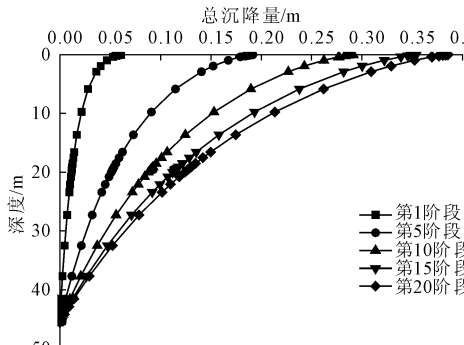
取地表横截面沉降变形模拟图的峰值点,也即中心点沉降模拟图与Y轴的交点作为各阶段的沉降量,具体的数据如表4、表5所示。从施工阶段分析,天然情况和降雨情况下,相同阶段下原状黄土路基的沉降量均大于压实黄土路基的沉降量。这是因



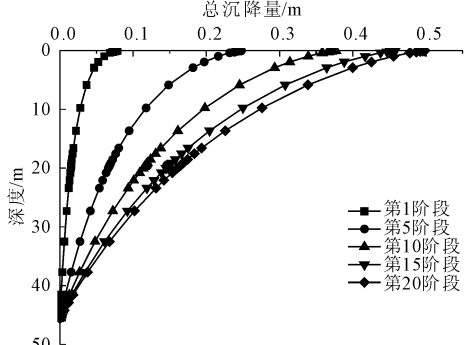
(a) 天然情况下A段原状土路基



(b) 降雨情况下A段原状土路基



(c) 天然情况下A段压实黄土路基



(D) 降雨情况下A段压实黄土路基

图 7 取中心点的沉降变形模拟图

为原状黄土多为粒间大孔隙,受压容易沉降,遇水容易湿陷。从A段第1、5、10、15、20阶段沉降看,地基土固结速率在逐渐减小,呈非线性减小。即1~5、5~10、10~15、15~20各个施工阶段间沉降量差值在逐渐减小。从工况条件分析,降雨情况下的原状黄土和压实黄土路基的沉降量均比天然情况下的沉

降量大,原状黄土路基沉降量的增大程度比压实黄土的高。这是因为黄土具有湿陷性,浸水使得土体内部的孔隙结构发生变化,从而产生不均匀沉降,原状黄土的湿陷性更强,因此沉降量的增大程度更大。因此,在填筑过程中务必要注重防、排水措施。表中的数据同样说明现场的压实地基在浸水后结构强度的减弱不明显,证明了现场设计施工数据的可行性。

表 4 A 路段在不同阶段的沉降量

标段	土体状态	工况	沉降量/m				
			第 1 阶段	第 5 阶段	第 10 阶段	第 15 阶段	第 20 阶段
A	原状	天然	0.063	0.199	0.303	0.368	0.400
		降水	0.310	0.980	1.490	1.810	1.970
	压实	天然	0.062	0.191	0.291	0.354	0.385
		降水	0.078	0.248	0.377	0.458	0.498

表 5 B 路段在不同阶段的沉降量

标段	土体状态	工况	沉降量/m			
			第 1 阶段	第 4 阶段	第 8 阶段	第 12 阶段
B	原状	自然	0.063	0.170	0.256	0.301
		降水	0.459	1.240	1.870	2.190
	压实	自然	0.062	0.168	0.253	0.298
		降水	0.077	0.209	0.315	0.370

4 结 语

本文运用 Settle3D 软件,模拟自然条件和极端降雨条件下,对典型的黄土路基不同阶段的变形进行研究,主要结论如下:

- (1) 沉降形态整体呈现“浴缸”状,路基中心位置沉降量最大,沿中心线向两边沉降逐渐减小。最大沉降量出现在持力层土层表面,填方深度越大,总沉降量越小,其减小程度随深度的增加而逐渐增大。建议在施工开始阶段,要把表面及地面下一定深度的原状地基土夯实,从而达到减小沉降量的效果。
- (2) 从施工阶段分析,无论天然情况还是降雨情况下,各填筑阶段之间的沉降量呈非线性减小并最终趋于稳定。相同阶段下原状黄土路基的沉降量大于压实黄土路基的沉降量。
- (3) 降雨能够明显增加原状黄土路基的沉降量,而对压实黄土沉降量的增大效果不明显,因此施工过程中控制路基压实质量和采取合理的路基防水

排水措施显得非常重要。

参考文献:

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.

[2] 陈正汉,许镇鸿,刘祖典. 关于黄土湿陷的若干问题[J]. 土木工程学报,1986,19(3):86-94.

[3] 王丽琴,邵生俊,王 帅,等. 原状黄土的压缩曲线特性[J]. 岩土力学,2019,40(3):1076-1084,1139.

[4] 邵显显,张虎元,何东进,等. 压实黄土非饱和增湿变形过程及其微观机制[J]. 长江科学院院报,2019,36(4):82-87,92.

[5] 李 宁,杨 卿. 西部水利与土木建设中的岩土工程问题[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):1-8.

[6] 魏景新. 压实黄土湿陷变形影响因素分析[J]. 交通科技,2016(5):94-97.

[7] 张立新,丁 晔,任永忠. 干密度对 Q2 重塑黄土强度与变形特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):87-91.

[8] 郑翔友. 湿陷性黄土路基处理措施[J]. 交通世界,2019(26):39-40.

[9] 寇甄涛,杨 旭,刘 魁. 黄土半填半挖地基破坏形式及机理研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):175-181.

[10] 陈正汉,郭 楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学,2019,40(1):1-54.

[11] 陈存礼,蒋 雪,苏铁志,等. 结构性对压实黄土无侧限压缩特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(12):2539-2545.

[12] 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.

[13] 杨玉生,李 靖,邢义川,等. 压实黄土增湿变形性质及其影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(4):626-635.

[14] 蒋正舜,苟志龙. 内马铁路陡坡路基不均匀沉降及影响因素分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(S1):25-29.

[15] 刘永贵,王有昌,廖春芳. 降雨引起半填半挖路基水分场与差异沉降变化的数值模拟[J]. 中外公路,2010,30(4):57-61.

[16] 宋 晶,叶冠林,徐永福,等. 考虑固结历史的结构性软土路基沉降数值模拟[J]. 岩土力学,2018,39(3):1037-1046.

[17] 史颜玲,霍继炜,张俊然,等. Settle3D 软件在半填半挖黄土路基变形分析中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(11):89-95.