

文章编号: 1008 - 2786 - (2012) 4 - 491 - 06

高填方填筑层数对填筑体沉降影响的数值模拟

曾锦秀¹ 胡卸文^{1,2} 罗刚¹ 顾成壮¹ 张耀¹

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 抗震工程技术四川省重点实验室 四川 成都 610031)

摘 要: 以贵州六盘水月照机场东北端边坡为例,采用 FLAC3D 软件对不同填筑层数下机场高边坡填筑竣工期填筑体沉降进行了模拟,系统分析填筑层数对平均填筑高度达 63 m 的高填方边坡沉降的影响。结果表明,当模拟层数 < 7 时,随着模拟填筑层数的增加最大沉降量呈现上下波动的现象,沉降云图中等值线表现为层间不连续;模拟填筑层数继续增加时,最大沉降量趋于某一稳定值,只在其上下做微小波动,沉降云图中等值线逐渐趋于光滑连续;当模拟层数 ≥ 7 时,最大沉降量趋于稳定,沉降的计算精度满足工程需要。对于平均填筑高度为 63 m 高填方边坡,建议模拟填筑层数 7 ~ 9 层最为适宜。

关键词: 高填方边坡; 分层填筑; 沉降量; 数值模拟

中图分类号: P642, TU43

文献标识码: A

随着数值模拟技术日趋成熟,应用数值模型来模拟填筑体的填筑过程已成为计算填筑体竣工期最大沉降量的重要手段。

纵观国内外资料,许多工程中都存在计算沉降量大于实际观测沉降量的情况^[1-2]。在模拟岩土体填筑过程中,分层数对应力计算不敏感,而对变形比较敏感^[3]。因此为提高沉降量的计算精度,填筑分层厚度无疑是越薄越好,然而在数值模拟过程中不可能完全按照实际工程施工(每层 30 ~ 50 cm)来实现,如最大坝高 48.6 m 的横山水库拦石坝整个填筑过程分 12 级模拟^[4],最大坝高 186 m 的瀑布沟高土石坝从坝基到坝顶分 9 层分期填筑^[5]。另一方面,根据经验,数值模拟前处理阶段所用时间占整个模拟分析的一半以上,有的甚至达 80% 以上^[6],试想若按每层 0.3 ~ 0.5 m 进行分层模拟填筑,模型分层数将高达 126 ~ 210 层,这个工作量是何其庞大,严

重降低了数值模拟的效率。

因此,如何在数值模拟过程中确定最佳分层数,以解决模拟精度与建模时间之间的矛盾(前者要求建模时填筑层数尽量多,后者要求分层尽量少),在满足计算精度要求的前提下,提高数值模拟的效率成为一个极为关键的问题。

研究沉降的方法很多^[7-10]。已有学者通过有限元软件模拟土石坝分层填筑的沉降以及路基沉降的数值模拟^[11-12],而通过有限差分软件对机场填土填筑进行模拟并确定最佳分层填筑层数却少见报道。本文以位于云贵高原的贵州六盘水机场高填方边坡为例,采用有限元分析软件 ANSYS 建模(前处理)通过 FLAC3D 有限差分数值模拟软件对此进行了研究,最终确定了模拟的最佳层数,对相关人员在处理类似问题时具有借鉴和指导意义。

收稿日期(Received date): 2011 - 12 - 14; 改回日期(Accepted): 2012 - 05 - 03。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(40972175), NSFC - 云南联合基金重点项目(U1033601)和中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU11ZT14)资助。[Supported by National Natural Science foundation of China (40972175); the National Natural Science Foundation Project-mutual fund of Yunnan Province (U1033601) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (SWJTU11ZT14).]

作者简介(Biography): 曾锦秀(1986 -),男,福建福州人,在读硕士研究生,主要从事工程地质、环境地质方面的研究工作。[Zeng Jinxiu(1986 -), male, enrolled postgraduate, mainly engaged in the researching work of engineering geology, environmental geology.] E-mail: zengjinx-
iu20075084@163.com

1 工程概况

六盘水机场是全国乃至全世界最为复杂的拟建机场之一。机场跑道长 2 800 m,两端安全道各长 300 m,飞行区长 3 400 m,跑道道槽宽 45 m,道肩 1.5 m,总宽度 48 m。区域出露地层主要为石炭系上统(C_3)、二叠系(P)、第三系(E)、第四系(Q)。结合工程实际,该场地可划分为两个工程地质区域:Ⅰ区为填方区,Ⅱ区为挖方区。综合考虑场区工程地质条件及场地使用特点等情况将Ⅰ区分成 7 个亚区(图 1)。以场区东北端Ⅰ-1 区 41-41 剖面(图 2)为例进行填筑层数对沉降量的影响研究。

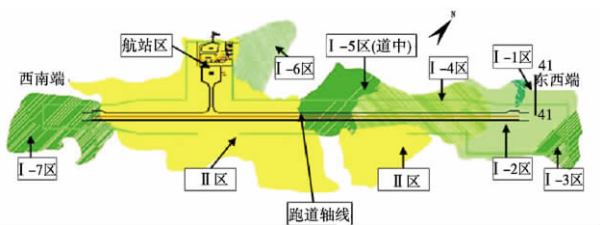


图 1 场区工程地质分区示意图

Fig. 1 Engineering geological sketch map of field

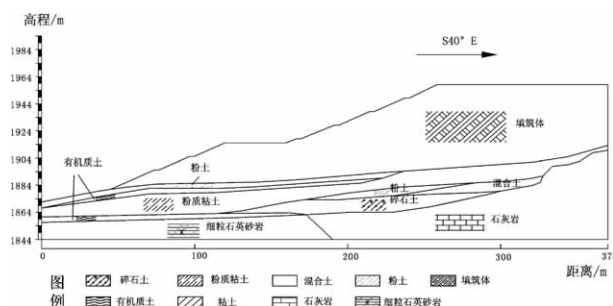


图 2 41-41 剖面工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological longitudinal section of 41-41

2 计算模型及方案

2.1 模型建立

采用 ANSYS 有限元软件建立三维模型,计算模

型以图 2 中的左下角为原点,向坡内为 y 轴正向,以垂直于剖面向外为 x 正向,以竖直向上为 z 轴正方向。模型 x 向长度 10 m, y 向长度 370 m, z 向长度 114 m,平均填筑高度 63 m。

2.2 网格划分以及模型导入

由于三维六面体网格在计算精度、变形特性、划分网格数量、抗畸变程度及再划分次数等方面比三维四面体网格具有明显的优势^[13]。

为了提高模型的计算速度与精度,综合考虑各种网格划分方法的优缺点^[6]以及模型的几何形状,采用六面体单元扫略划分,网格划分情况见表 1。

将划分后的网格导入 FLAC3D 中,导入 FLAC3D 后的模型图见图 3。

2.3 边界条件

模型的边界条件^[14]采用固定模型底部的 z 方向的位移,固定模型 y 方向两侧的 y 方向的位移,固定 x 方向两侧的 x 方向的位移。计算时主要考虑填筑的施工步骤,认为地基变形已经完成,以地基自重产生的应力场为初始应力场。

2.4 计算方案

将模型导入 FLAC3D 中,对填筑体工程竣工期的沉降进行分析。填筑体采用分层填筑,分别进行了 1 层、2 层、3 层、4 层、5 层、6 层、7 层、8 层、9 层、14 层、15 层的模拟计算。在此基础上研究填筑层数对模型最终沉降量的影响,确定数值模拟计算的最佳分层数。

2.5 本构模型及参数取值

本次模型采用摩尔-库伦塑性模型,它适用于松散或胶结的粒状材料,如土体和岩石等,与土体工程的契合度高,且所需参数易于获取,是最通用的岩土本构模型^[15-16]。模型的计算参数如表 2 所示。

3 模拟成果及分析

不同填筑层数下得到的模拟图见图 4~9。当填筑层数为 2~6 层时,沉降云图的层间界限非常明显,由于填筑层的厚度较厚,每一填筑层都形成一个

表 1 不同模拟层数划分的网格点与单元数(部分)

Table 1 Numbers of grid points and elements meshed under different numbers of simulation layers(part)

项目	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	9 层	14 层	15 层
网格点数	26 685	24 900	27 080	25 605	25 915	26 495	25 580	25 745	25 410
单元数	20 652	19 216	20 968	19 788	20 048	20 516	19 784	19 924	19 672

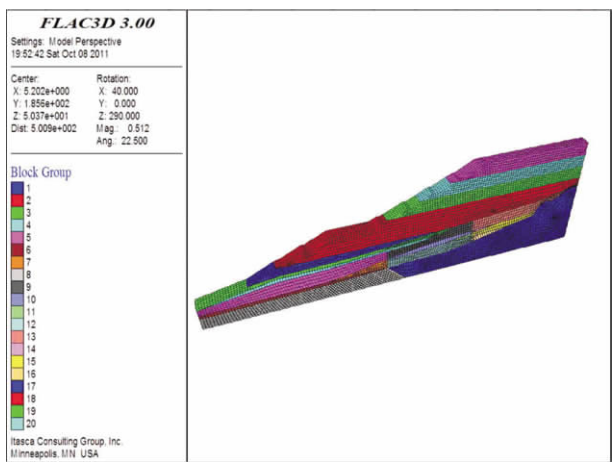


图3 导入FLAC3D后的模型图(填筑层数为6层)

Fig. 3 Model picture after importing FLAC3D

相对最大沉降晕圈,此最大沉降量出现在各层中部偏上的位置。随着填筑层数的增加,各层相对最大沉降晕圈逐渐融合成一个,沉降云图等值线呈现出由齿状逐渐过渡为光滑的曲线,相邻网格的位移等值线由不连续过渡为连续。

最大沉降量与填筑层数关系折线图见图10。可见,随着填筑层数的增加,最大沉降量开始(1~6层)时呈现上下波动,最大波动率达到11.86%;当填筑层数>7层时,最大沉降量只在很小的范围内上下波动,最大波动率<2%。

当填筑层数为3层时的沉降量相对与填筑层数为2和4比较,其值相对偏小,分析表明,当分层填筑按3层时,中部第2层填筑体左侧边坡相对处于缓斜坡,这种边坡类似于在斜坡表层进行了卸载处理,也相当于第2层填筑体自重应力减小、相应沉降量出现偏小的现象。加之由于填筑体的不规则性,FLAC3D在加载计算时,沉降量受几何尺寸的影响较大,分层填筑按3层时受网格剖分影响,也在一定程度上出现分层层数为3时沉降出现突降的现象。但总体上看,分3层填筑时(每层填筑体厚度约26m),最大沉降量与分2层填筑和4层填筑时相比较,差值分别为15cm和24cm,与综合考虑从按1~15层分别填筑得到的总平均沉降3.86m相比,沉降差很小,误差在2.6%,因此分层填筑3层出现的沉降突然减小这种现象是正常的。

若以模拟层数为15层时的最大沉降量为基准(因为当模拟的层数达到7层以上时沉降量就已经趋于一相对稳定值,为了确定一个评价沉降量是否达到一个相对稳定值,选取模拟层数15层时的沉降量作为评价标准是符合要求的),得到其他填筑层数模拟所得到的最大沉降量与基准值差值的百分比(见表3),从表中可知,当填筑层数为1~6层时,差值百分比最大达到11.86%,其中当层数为2~5层时,分层数对沉降量(变形)的影响相当大,这也正验

表2 六盘水月照机场东北端边坡及填筑体物理力学参数

Table 2 Physical mechanics parameter of the northeast slope and filling body

岩土类型	饱水状态		弹性模量		泊松比 ν	体积模量	剪切模量
	c/kPa	$\Phi/^\circ$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	E/Mpa		K/Mpa	G/Mpa
机场填土	3	27	22.5	30	0.28	22.73	11.72
粉质粘土	18	5	19.2	5.85	0.38	8.13	2.12
有机质土	18	4	17	2.8	0.4	4.67	1
粉土	12	6	19	11.3	0.35	12.56	4.19
碎石土	30	12	21.2	10.08	0.35	12	4
混合土	23	10	19.5	6	0.3	5	2.31
强风化细粒石英砂岩	1 500	20	26.8	600	0.25	400	240
中风化灰岩	5 000	30	27.1	2 500	0.2	1 388.89	1 041.67
碎石桩换填40%粉质粘土	12	17.2	20.52	15.51	0.35	17.23	5.74
碎石桩换填40%粘土	14.4	18.1	20.94	14.8	0.35	16.44	5.48
碎石桩换填40%粉土	8.4	17.8	20.4	18.78	0.35	20.87	6.96
碎石桩换填40%有机质土	12	16.6	19.2	13.68	0.34	14	4.96
碎石桩换填40%混合土	15	20.2	20.7	15.6	0.3	13	6

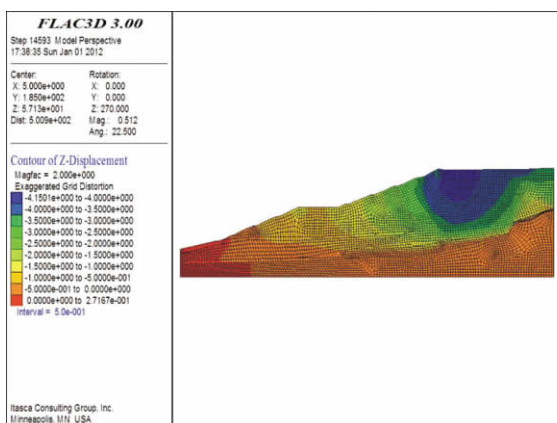


图 4 1 层填筑时的沉降云图

Fig. 4 Settlement nephogram when filled by 1 layer

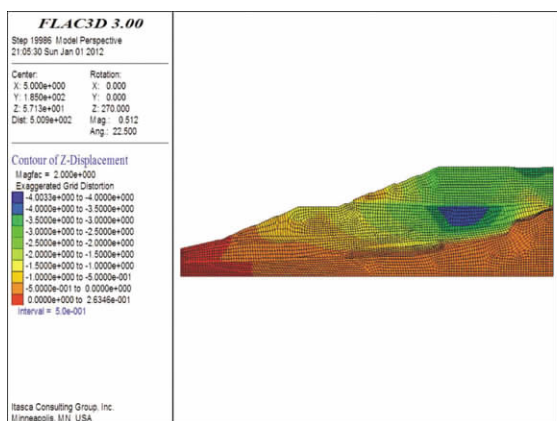


图 5 2 层填筑时的沉降云图

Fig. 5 Settlement nephogram when filled by 2 layers

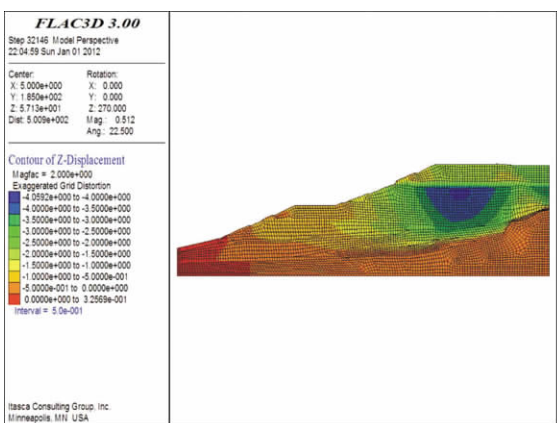


图 6 4 层填筑时的沉降云图

Fig. 6 Settlement nephogram when filled by 4 layers

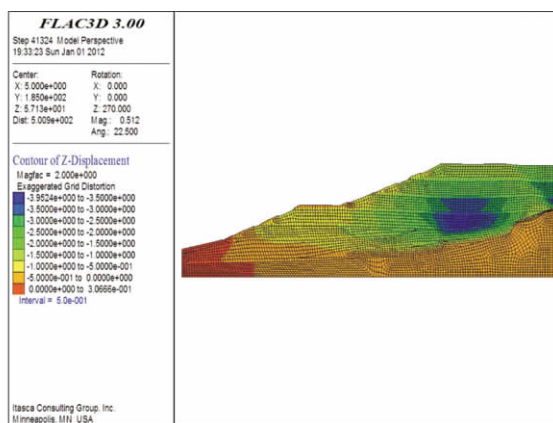


图 7 5 层填筑时的沉降云图

Fig. 7 Settlement nephogram when filled by 5 layers

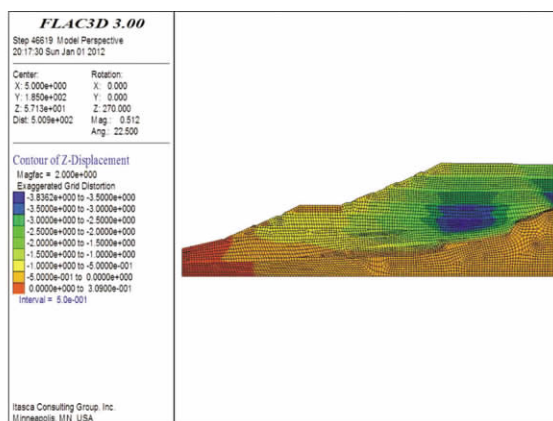


图 8 6 层填筑时的沉降云图

Fig. 8 Settlement nephogram when filled by 6 layers

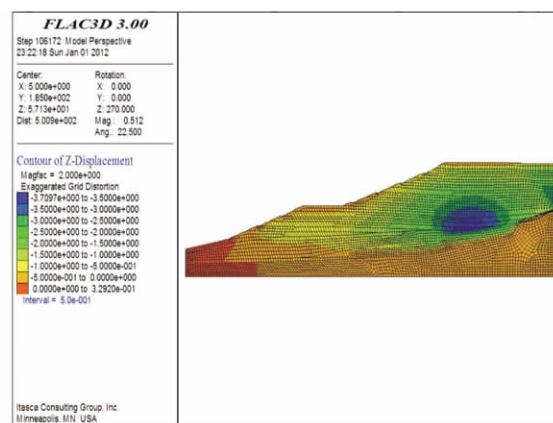


图 9 15 层填筑时的沉降云图

Fig. 9 Settlement nephogram when filled by 15 layers

证了分层数对变形比较敏感^[3]。

而当填筑层数 ≥ 7 时,其差值百分比最大只有 1.9% 左右,最小还不到 0.6%。

上述模拟计算结果显示,在建模时如何确定最佳网格参数使得模拟精度和效率达到最优,是一个

值得关注的问题。同时对于相同填筑高度、不同填筑介质;以及相同填筑介质、不同填筑高度这两种条件下分层数对沉降量的影响是否具有共性亦是值得关注 and 探讨。

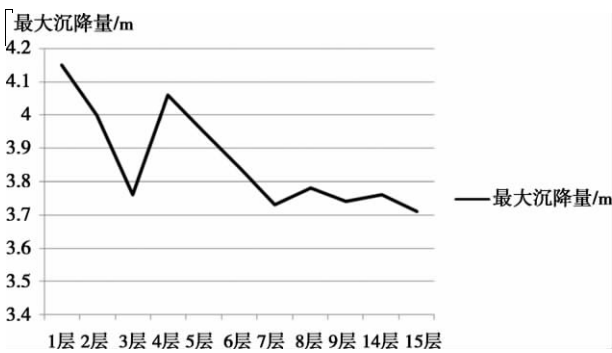


图 10 最大沉降量与填筑层数关系折线图

Fig. 10 Line chart between maximum settlement & filling layers

4 结论

1. 填筑层数对沉降云图的光滑连续性具有一定影响。当填筑层数较少时,模拟得到的沉降云图会呈现层与层之间的相对独立性,表现为层间相对最

大沉降晕圈,且相对最大沉降量出现在各层中部偏上的位置。随着填筑层数的增加,这种层间相对独立性逐渐消失,呈现出各相对最大沉降晕圈逐渐融合,沉降云图等值线整体上逐渐光滑,愈加接近真实情况。

2. 填筑层数与填筑体最大沉降量之间的关系,总体趋势是最大沉降量开始时随着填筑层数的增加而上下波动,且当填筑层数大于某一临界层数时,最大沉降量趋于稳定值,只在其上下做微小波动。若以波动率最先满足小于 2% 作为临界层数,则本次模拟的临界层数为 7 层。综合考虑最大沉降量的模拟计算精度与模拟所需的建模时间等因素,建议本次数值模拟计算时的分层填筑层数以 7~9 层,即每层厚 7~9 m 为宜。

3. 采用数值模拟软件计算沉降量时确定最佳分层填筑层数,对提高模拟效率具有指导借鉴意义。

表 3 不同填筑层数下的最大沉降量

Table 1 Maximum settlement under different filling layers

项目	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层
最大沉降量/m	4.15	4.00	3.76	4.06	3.95	3.84
与层数为 15 时的沉降差的百分比	11.86%	7.82%	1.35%	9.43%	6.47%	3.50%
项目	7 层	8 层	9 层	14 层	15 层	
最大沉降量/m	3.73	3.78	3.74	3.76	3.71	
与层数为 15 时的沉降差的百分比	0.54%	1.89%	0.81%	1.35%	0	

参考文献(References)

[1] Yin Zongze ,Zeng Yishan. Stress-strain analysis for Hua Liang Ting earth dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1982 , (4) : 135 [殷宗泽,曾益山.花凉亭土坝应力应变分析[J].岩土工程学报,1982,(4):128-145]

[2] Qian Yajun ,Chen Shengshui. Verification of numerical simulation results of stress and deformation of core-wall dams[J]. Hydro - Science and Engineering ,2005 ,(4) : 12 [钱亚俊,陈生水.心墙坝应力变形数值模拟结果验证[J].水利水运工程学报,2005,(4):11-18]

[3] Huang Dashou ,Li Chuanjia. Nonlinear Stress - Strain Analysis for Earth-rock Dam[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition ,1985 ,(1) :57 - 65 [黄大寿,李传家.土石坝的应力应变非线性分析[J].四川大学学报:工程科学版,1985,(1):57-65]

[4] Shen Zhujiang ,Wang Jianping. Analysis of effective stress and strain in the earth dam of Hengshan reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1990 ,(4) : 61 [沈珠江,王剑平.横山水库土石坝有效应力应变分析[J].水利学报,1990,(4):61]

[5] Yang Rong. The 3 - D Nonlinear Stress-strain analysis of Pubugou

high rockfill dam [J]. Journal of Basic Science and Engineering , 1995 ,3(3) :260 -267 [杨荣.瀑布沟高土石坝三维非线性分析[J].应用基础与工程科学学报,1995,3(3):260-267]

[6] Gu Chengzhong ,Wu Xinyue. A review of FEM and trend of development [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology ,2008 ,2(3) : 248 -259 [古成中,吴新跃.有限元网格划分及发展趋势[J].计算机科学与探索,2008,2(3):248-259]

[7] Yuan Juyun ,Qian Jiangu ,Zhang Hongming ,et al. Soil properties and the soil mechanics [M]. Beijing: China Communication Press , 2009:97 -108 [袁聚云,钱建国,张宏鸣,等.土质学与土力学[M].北京:人民交通出版社,2009:97-108]

[8] Zhao Minghua ,Yang Minghui ,Liu Yu ,et al. Study on the developing and forecasting of the settlement in soft clay roadbed [J]. Journal of Railway Science and Engineering ,2005 ,2(4) : 16 -20 [赵明华,杨明辉,刘煜,等.软土路基固结沉降机理及其预测方法研究[J].铁道科学与工程学报,2005,2(4):16-20]

[9] Li Tao ,Zhang Yiping ,Zhang Tuqiao. Superior combination forecasting settlement of soft clay embankments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2005 ,24(18) : 3283 - 3285 [李涛,张仪萍,张士乔.软土路基沉降的优性组合预测[J].

- 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3283–3285]
- [10] Kong Xiangxing, Wang Guiyao, Xiao Shixiao, et al. Study on settlement rules and prediction method of high backfill subgrade[J]. Technology of Highway and Transport, 2006, 4(2): 1–4 [孔祥兴, 王桂尧, 肖世校, 等. 高填方路基的沉降变化规律及其预测方法研究[J]. 公路交通技术, 2006, 4(2): 1–4]
- [11] Tang Min, Chen Qun. Influence of Simulated Fill Layer Number on Settlement of 300 m High Embankment Dams[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2008, 24(4): 15–18 [唐岷, 陈群. 分层填筑模拟的层数对 300m 级高土石坝沉降量的影响[J]. 水电站设计, 2008, 24(4): 15–18]
- [12] Xiong Jian-min, Jin Sheng-ji, Yu Tian-qing. Numerical Simulation on roadbed settlement of highway[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(4): 54–56 [熊健民, 金生吉, 余天庆. 路基沉降试验研究及数值模拟[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(4): 54–56]
- [13] Li Dan, Jin Can, Liu Xiaoping. Present situation of research on Finite Element All-hex Mesh Generation Methods[J]. Microcomputer Application Technology, 2010, 1(1): 1–6 [李丹, 金灿, 刘晓平. 六面体网格剖分算法的研究现状[J]. 电脑应用技术, 2010, 1(1): 1–6]
- [14] Peng Wenbin. Practical tutorial of FLAC3D[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 113–132 [彭文斌. FLAC3D 实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 113–132]
- [15] Zhang Yuxu. FLAC3D numerical simulation study on deformation of subgrade construction process[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(6): 72–75 [张宇旭. 路基施工过程变形研究的 FLAC3D 数值模拟[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(6): 72–75]
- [16] Chen Yumin, Xu Dingping. FLAC/FLAC3D foundation and engineering example. Beijing: China WaterPower Press, 2009: 51–52 [陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 51–52]

Numerical Simulation of Influence of High Fill Filling Layer Number on Settlement of Filling Body

ZENG Jinxiu^{1,2}, HU Xiewen^{1,2}, LUO Gang¹, GU Chengzhuang¹, ZHANG Yao¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Aseismic Engineering Technology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking the shuiyuezhao airport on the northeast liupanshui slope for example. The aim of this paper is using the software of FLAC3D to simulate the settlement of the filling body of high filled slope of airport during the completion period under different filling layer numbers to analysis the influence of simulated filling layer number on settlement of high slope filling body systematically, and the filling height of which is up to 63 m. The results show that the biggest settlements fluctuate up and down with the increase of simulated filling layer number, and Contour of z-displacement presents discontinuity between layers when the numbers of simulated filling layer less than equal to 7, and the biggest settlements tends to a stable value and do small fluctuations around it when the simulated filling layer number continue to increase; also contour of z-displacement tends smooth and continuous gradually. The biggest settlements tend to a stable value when the numbers of simulated filling layer more than equal to 7, which's calculation precision of the settlement satisfies the project need. For the high filled slope which's average height is 63m, 7~9 simulated filling layer number was best recommended.

Key words: high filled slope; layered filling; settlement; numerical simulation