九寨黄龙机场高填方地基沉降的数值模拟分析

李秀珍¹,许强²,孔纪名¹,丁秀美²

(1. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所,四川 成都 610041; 2. 成都理工大学 环境与土木工程学院,四川 成都 610059)

摘要:通过运用 FLAC^{3D} 作为基本的数值模拟分析工具,选取对九寨黄龙机场影响最大的元山子沟高填方工程作 为主要研究对象,模拟实际施工过程,对高填方地基的沉降进行了定量分析和评价。分析结果表明,数值模拟结 果与监测结果吻合很好。高填方地基沉降大,压缩快,差异沉降明显,沉降中心出现在坡肩部位(跑道西侧),最大 沉降值为 2.8 m,道槽区和坡脚部位沉降逐渐减小。高填方地基的沉降与填筑体的厚度和原地基中软弱土层的厚度 有着密切的关系,即最大沉降量往往出现在填体厚度较大或填体厚度和原地基软弱土层厚度均较大的部位。 关键词:岩土力学;机场;高填方地基;沉降;FLAC^{3D}

中图分类号:TU 47 **文献标识码:**A **文章编号:**1000 - 6915(2005)12 - 2188 - 06

NUMERICAL MODELING ANALYSIS OF SETTLEMENTS OF HIGH FILL FOUNDATION FOR JIUZAI—HUANGLONG AIRPORT

LI Xiu-zhen¹, XU Qiang², KONG Ji-ming¹, DING Xiu-mei²

Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
 College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Jiuzai—Huanglong airport is located on the eastward slope of Zhangla basin in Songpan County in the northwest of Sichuan. By using FLAC^{3D} program to simulate real construction process, the settlement of the high fill foundation especially differential settlement, which has the most powerful influence on Jiuzai-Huanglong airport is quantitatively analyzed and evaluated. The results indicate: (1) The calculation results coincide with the monitoring results. (2) The settlement center lies in the place of slope shoulder with the maximum settlement amounting to 2.8 m; and the settlement gradually decreases on the runway and the base of slope. (3) The total after-construction settlements have close relations with thickness of the fill and soft layer, i.e. the bigger settlement often presents at the places with thicker fill or thicker fill and soft layer.

Key words: rock and soil mechanics; airport; high fill foundation; settlement; FLAC^{3D}

1 引 言

九寨—黄龙机场位于四川省西北部阿坝藏族自 治州松潘县境内,中心参考地理坐标:东经 103° 40′59″,北纬 32°51′25″。航站区处于九寨黄龙旅游 环线的枢纽位置。机场跑道轴线 NE16°~SW196°, 长 3 200 m,宽 45 m。场区地形及地质条件复杂, 机场处于高海拔(3 440 m)、高地震烈度区(基本地震 烈度 8.1 度)。机场所在山坡上自南而北依次发育有 山巴沟、设计沟、雷公沟、元山子沟、麻依沟和扎 海沟,对机场影响最大的是元山子沟。场道工程具 有高土石方量施工(挖方 3 093×10⁴ m³,填方 2 763× 10⁴ m³)、高填方(最大填方高度 104 m)和快速加载(主 体工程加载期仅为 14 个月)以及高填方体底部分布有 较厚(最大厚度>10 m)软弱土层的特点。在这样特 殊的环境中进行如此复杂的高填方工程,能否正确 评价高填方地基的沉降,特别是差异沉降,便成为

收稿日期: 2004 - 01 - 08; 修回日期: 2004 - 02 - 19

作者简介:李秀珍(1975 -),女,硕士,2001 年于成都理工大学地质工程专业获硕士学位,现任实习研究员,主要从事高边坡稳定性和地质灾害预测预报等方面的研究工作。E-mail: lixiuzhen6688@163.com。

决定机场工程造价以及今后安全运营的关键问题。

FLAC 程序^[1]于 20 世纪 90 年代引入我国,它 能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限 时发生的破坏或塑性流动的力学行为,分析渐进破 坏和失稳,特别适用于模拟大变形,目前已在岩土 工程领域得到了广泛的应用^[2~11]。但在高填方地基 的沉降分析中并不多见,本文利用数值模拟计算工 具 FLAC^{3D}软件,模拟九寨一黄龙机场高填方地基 的实际施工过程,通过跟踪关键监测点的位移并与 实际监测值进行比较从而对所建模型和参数取值进 行多次修正的基础上,对该机场高填方地基的沉降 进行了定量分析和评价,得出的结论与实际相符。

2 模型建立及参数取值

本次研究选取范围最大,填筑体深度最深,对 机场影响最大的元山子沟作为主要研究对象。元山 子沟位于机场跑道的中部,该沟长度大,切割深, 填筑体最大厚度 104 m,填方工程量大且沉降变形 问题尤为突出,是整个机场工程的重中之重。

2.1 计算模型

计算模型范围以元山子沟为中心,SN 向宽 765 m, EW 向长 1 025 m,底面高程 3 180 m。模型 底部边界及前后左右边界均为约束边界,顶部边界 为自由边界。在建立 FLAC 计算模型时,根据元山 子沟地质结构和岩土体物理力学特性,将元山子沟 基本地层概化为 5 层:上更新统元山子组(Q_{3y})、中 更新统观音山组(Q_{2g})、下更新统文家祠组(Q_{1w})和石 炭系下统益畦组(C_{1y1})及其古风化层(C_{1y2})。建模时假 定古分化层 C_{1y2}的厚度均为 2 m。对于沟谷底部的 软弱土层,在道槽区较厚部位进行换填,其余部位 则按强夯地基土进行模拟。

元山子沟高填方体填筑过程是一个复杂的快速 加载过程。从 2001 年 4 月开始到 2002 年 11 月底结 束,除去冬季停工期后,高填方主体工程加载历时 仅为14个月。整个加载过程分6步完成(如图1所 示): 第1步为坡脚部位及坡体中后部独立加载, 第 2 步至第 5 步呈台阶状加载, 第 6 步为道槽区堆载 预压。为模拟实际施工过程,计算模型也相应地分 6 步完成,最后建立的计算模型如图 2 所示。具体 计算方案为:首先,计算软弱土层处理后原地基的 沉降变形;然后,将整个系统所有方向的位移置为 零(为了只考虑由填料引起的填筑体和地基的沉 降)。再按照施工设计分6步逐步加载。为了考虑加 载的时间效应,通过每步加载时间的长短来控制计 算的步长(step)。应该指出,由于 FLAC 是时间渐进 的,相应的计算次数隐含了时间因素,与物理时间 具有一定的对应关系。因此,一般而言计算步数越 多,对应的时间越长,模型发生的变形也越大,这 一特性有别于其他种类的数值计算程序。为真实地 模拟加载的时间效应,本文在计算时,特别注意模 拟每层填筑体的推进度,根据堆填每层填筑体所需 要的时间来确定计算步数,并通过对关键监测点的 位移跟踪且与实际监测值进行比较而对每层填筑体 的计算步长做了多次修正。

2.2 计算参数

高填方地基由填筑体和原地基两部分组成,相 应的计算参数也分为填筑体参数和原地基参数两大 类。

原地基参数取值以土工试验成果表为主要依据,根据实际施工过程取值。如对软弱地基换填处理后,由于换填料就是上部填筑体,因而取与填料一致的计算参数;对于强夯地基,则按地基处理设计要求取,c = 35 kPa, $\varphi = 21^\circ$ 。

对于1 区和2 区(见图1)填筑体,因填料类型不同在计算中按不同参数取值。由于高填方地基高度大,需对不同压力条件下土体取不同参数值。试验结果表明,不同压力条件下岩土体的压缩模量 *E*。差别很大。低压条件下的压缩模量 *E*。往往非常低,但随着压力增大,压缩模量 *E*。逐渐增大,且当压力



Fig.1 Loading process of high fill foundation in Yuanshanzi valley



Fig.2 FLAC^{3D} model of Yuanshanzi valley after filling

达到一定量值后,压缩模量 *E*。随压力的增幅变缓, 即岩土体变形参数具非线性特征。为了切合实际地 模拟岩土体这一变形特性,Q_{1w},Q_{2g}和 Q_{3y}地层及1 区和2区填料的压缩模量 *E*。和相应的剪切模量 *G* 及 体积模量 *K* 的取值都随所处深度不同而变化(表 1)。 对于基底 *C*_{1y1},因其强度较高,变形状况随压力变 化不明显,故变形参数取固定值。C_{1y2}因其厚度小, 变形参数也取固定值。表 1 中,压缩模量 *E*。是通过 实验得到,剪切模量 *G* 及体积模量 *K* 是通过 *E*。计 算得到,各地层物理力学参数的具体取值见表 2。

地目	亦亚乡粉小四	平均压力/MPa									
地层	变形参数/MPa -	0	0.2	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4
Q_{1w}	$E_{ m s}$	4.40	47.00	55.00	65.00	70.55	70.55	70.55	70.55	70.55	70.55
	G	1.20	12.40	14.60	17.20	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70
	Κ	2.85	30.40	35.60	42.00	45.70	45.70	45.70	45.70	45.70	45.70
Q _{2g}	$E_{ m s}$	2.00	15.50	25.00	40.00	51.50	52.00	77.00	77.00	77.00	77.00
	G	0.50	3.90	6.34	10.20	13.10	13.20	19.50	19.50	19.50	19.50
	Κ	1.32	10.26	16.54	26.47	34.10	34.40	51.00	51.00	51.00	51.00
Q _{3y}	$E_{ m s}$	2.48	18.70	24.00	33.50	33.50	42.00	42.00	55.00	55.00	55.00
	G	0.60	4.50	5.80	8.10	8.10	10.20	10.20	13.30	13.30	13.30
	Κ	1.70	12.70	16.20	22.70	22.70	28.40	28.40	37.20	37.20	37.20
1区	$E_{ m s}$	10.00	15.00	30.00	45.00	60.00	65.00	70.00	75.00	80.00	85.00
填料	G	3.30	5.00	10.00	15.00	20.00	21.70	23.30	25.00	26.70	28.30
	Κ	5.60	8.30	16.70	25.00	33.30	36.10	38.90	41.70	44.40	47.20
2 🗵	$E_{ m s}$	30.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00	170.00	170.00
填料	G	10.00	13.30	20.00	26.70	33.30	40.00	46.70	53.30	56.70	56.70
	Κ	16.70	22.20	33.40	44.40	55.60	66.70	77.80	88.90	94.40	94.40
	$E_{ m s}$	2 000.0									
C _{1y1}	G	7 200.0									
	Κ	11 000.0									
C _{1y2}	$E_{ m s}$	56.5									
	G	16.2									
	Κ	35.0									

表 1 岩土体变形参数取值 Table 1 Deformation parameter values of rock and soil masses

表 2 岩土体物理力学参数取值

Table 2	Physico-mechanical	parameter values	of rock and soil masses
		I	

地层名称	泊松比	容重/(kN•m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
C _{1y1}	0.22	27.0	5 000	55	1.0
C_{1y2}	0.30	22.5	22	33	0.0
Q_{1w}	0.32	21.0	90	25	0.0
Q_{2g}	0.33	21.0	20	32	0.0
Q _{3y}	0.34	18.5	35	21	0.0
填料	0.25	20.0	10	33	0.0

3 计算结果的对比分析

元山子沟的监测工作从 2001 年 7 月初开始,至 2003 年 4 月历时 21 个月,整个监测工作与高填方 填筑工程同步进行,监测资料全面,监测点布置如 图 3 所示。下面将 FLAC^{3D}计算结果与监测结果对 比进行分析。

3.1 高填方地基总沉降模拟结果

元山子沟共埋设9个分层沉降监测点,其沉降 值是随着工程施工从下往上不断埋设沉降环并进行 观测的,即各点总沉降量是由各沉降环观测值按时 间搭接关系累加起来。FLAC模拟计算时,在施加 每一步荷载前均把填筑体位移初始化为零,因此, 把各步荷载的模拟计算沉降值按时间累加起来即相 当于监测中的总沉降值,亦即施工期(土方工程填筑 施工期间)与工后(土方工程完工之后)的沉降值之和, 模拟结果见表 3 和图 4(以 Y13 和 Y22 监测点为例)。

从图 5 可知,各监测点的模拟总沉降与监测总 沉降随时间的发展过程十分相似,均表现出快速加 载产生快速沉降的特性,即加载后曲线即刻变陡, 停止加载,曲线随之变缓,具有明显拐点。由表 3 可知,除 Y21 监测点模拟计算结果偏小外(实际工程 中,Y21 局部层位填料质量较差导致监测值较大), 其余 8 个监测点的模拟计算总沉降量与监测值都比 较接近。而且,高填方地基的总沉降与填筑体的厚 度关系密切,填筑体的厚度越大,地基的沉降量也 相应越大。

表 3 元山子沟各监测点的总沉降量

Table 3Total settlements at the monitoring points of
Yuanshanzi valley

		•	
监测点编号	填筑体厚度/m	模拟计算值/m	监测值/m
Y11	39.23	0.983	1.048
Y12	50.92	1.189	1.191
Y13	70.58	1.749	1.718
Y15	67.15	1.715	1.529
Y21	40.76	0.859	1.590
Y22	75.71	1.922	2.257
Y24	80.32	1.834	1.696
Y32	75.46	1.963	1.928
Y41	68.40	2.005	2.232



monitoring points







另外,根据 FLAC^{3D} 计算结果,用 SURFER 软件可绘出总沉降量等值线图(见图 5)。由图 5 可知,高填方地基沉降量大,差异沉降显著。至 2003 年 4月,沉降中心出现在坡肩部位(跑道偏西),最大沉降值为 2.8 m。道槽区和坡脚部位沉降逐渐减小。

3.2 高填方地基工后沉降模拟结果

元山子沟道面沉降监测工作从 2002 年 10 月开 始,相当于在第 5 步荷载施加结束后就开始监测。 因此,在施加第 6 步荷载前,把前面各步荷载产生 的位移置零,再施加第 6 步荷载,所得结果即为工 后沉降。监测时,沿跑道中心线方向布置了 5 条观 测线路(见图 3),从 2002 年 10 月到 2003 年 4 月对 各线路的沉降进行追踪模拟。以 L4 线路和 L5 线路 为例,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,观测线路的数值模拟与监测沉降 曲线形状基本相同,各监测点的沉降量也较接近。 而且数值模拟和监测的沉降曲线均表明,地基的工 后沉降与填筑体的厚度和原地基中软弱土层的厚度 有着密切的关系,即最大沉降量往往出现在填体厚 度较大或填体厚度和原地基软弱土层厚度均较大的 部位。这进一步表明,地基的工后沉降包括原地基 土体的固结变形和填筑土体的压缩变形两部分。

3 结 论

通过利用 FLAC^{3D} 数值模拟方法对四川九寨黄



Fig.6 Settlement curves after construction at the monitoring points on the runway surface of Yuanshanzi Valley

龙机场高填方地基沉降进行分析,结果表明:

(1)数值模拟结果与监测结果吻合较好。分层 沉降监测点的数值模拟与监测总沉降量历时曲线发 展过程十分相近,均表现出快速加载产生快速沉降 的特性,加载后曲线即刻变陡,停止加载,曲线随 之变缓,具有明显拐点;除Y21监测点外,其余8 个监测点的数值模拟总沉降与监测总沉降值均比较 接近。道面监测点的数值模拟工后沉降曲线和监测 曲线形状也基本相同,各监测点的沉降量也较接近。

(2) 高填方地基沉降大,压缩快,差异沉降明 显。沉降中心出现在坡肩部位(跑道偏西),最大沉 降值为 2.8 m,道槽区和坡脚部位沉降逐渐减小。 不论是高填方地基的总沉降还是工后沉降均与填筑 体的厚度和原地基中软弱土层的厚度有着密切的关 系,即最大沉降量往往出现在填体厚度较大或填体 厚度和原地基软弱土层厚度均较大的部位;进而说 明地基的沉降包括原地基土体的固结变形和填筑土 体的压缩变形两部分。

参考文献(References):

- Itasca Consulting Group Inc., FLAC^{3D} user's manual version 2.0[R].
 USA: Itasca Consulting Group Inc., 1997.
- [2] 谢和平,周宏伟,王金安,等.FLAC 在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报,1998,18(4),397-401.(Xie Heping, Zhou Hongwei, Wang Jin'an, et al. Application of FLAC to predict ground surface displacements due to coal extraction and its comparative analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 18(4), 397-401.(in Chinese))
- [3] 潘建平,黄润秋,许强.攀枝花露天矿排土场边坡稳定性的三维数值模拟研究[J].成都理工学院学报,2002,29(3):329-333.
 (Pan Jianping, Huang Runqiu, Xu Qiang. Research on three-dimension simulation of openpit mine tailing dam slope stability in Panzhihua[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(3), 329-333.(in Chinese))
- [4] 陈帅宇,周维垣,杨 强,等.三维快速拉格朗日法进行水布垭 地下厂房的稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(7): 1 047 - 1 053.(Chen Shuaiyu, Zhou Weiyuan, Yang Qiang, et al. Analysis of stability of surrounding rocks of Shuibuya Underground Plant by three-dimensional fast Lagrangian method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 047 -1 053.(in Chinese))

- [5] 吴洪词.长江三峡水利枢纽船闸陡高边坡稳定性的拉格朗日元分析[J].贵州工业大学学报,1998,27(2):32-38.(Wu Hongci. Stability analysis of high slope at permanent ship locks in the Three Gorges Project on Yangtze River by the method of FLAC[J]. Journal of Guizhou University of Technology, 1998, 27(2):32-38.(in Chinese))
- [6] 徐卫亚,宋晓晨,周维垣.水电站进水口岩石高边坡及坝坡与洞室相互作用的三维数值分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(16):2712-2717.(Xu Weiya, Song Xiaochen, Zhou Weiyuan. Numerical analysis of deformation and stress of high slope of intake and interaction of dam-slope and tunnel at huge hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16):2712-2717.(in Chinese))
- [7] 李术才,李树忱,朱维申,等.泰安抽水蓄能电站围堰稳定性的流-固耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(8):1275-1279. (Li Shucai, Li Shuchen, Zhu Weishen et al. Hydro-mechanical coupling analysis of stability of cofferdam of Tai'an Pumped-storage Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1275-1279.(in Chinese))
- [8] 丁秀丽,盛 谦. 三峡大坝左厂房 3[#]坝段坝基渗流场与应力场耦 合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增1): 1 001 - 1 005.
 (Ding Xiuli, Sheng Qian. Seepage-stress coupled analysis of the dam foundation of section No.3 in left bank powers station of the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp. l): 1 001 - 1 005.(in Chinese))
- [9] 杨小聪,陈忠辉.安庆铜矿开采过程的数值模拟[J].有色金属,2000,19(增1):1001-1005.(Yang Xiaocong, Chen Zhonghui. Numerical simulation of Mining process in Anqing copper mine[J].
 Nonferrous Metals, 2000, 19(Supp. l):1001-1005.(in Chinese))
- [10] 高明中,余忠林. 煤矿开采沉陷预测的数值模拟[J]. 安徽理工大 学学报(自然科学版), 2003, 23(1): 11 - 17.(Gao Mingzhong, Yu Zhonglin. Numerical simulation of the prediction of surface subsidence behavior[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2003, 23(1): 11 - 17.(in Chinese))
- [11] 徐帮树,李术才,白世伟,等.东深供水隧洞风岗段开挖与支护数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(增1):2061-2064. (Xu Bangshu, Li Shucai, Bai Shiwei, et al. Numerical simulation on excavation and support effect for Fenggang segment of Dongshen water supply tunne[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp. l): 2061-2064.(in Chinese)