

高填方块碎石夯实地基变形的研究

Study on deformation of ground under high fill of block and detritus

谢春庆^{1,2}, 刘汉超³, 甘厚义⁴

(1. 西南交通大学 土木学院, 四川 成都 610031; 2. 成都军区空军勘察设计院, 四川 成都 610041;
3. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 4. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要: 依据贵州 X 机场、云南 Y 机场变形监测的数据, 采用公式试算、沉降数理统计、二维和三维模型的数值模拟方法进行了高填方块碎石夯实地基变形分析, 并提出了实用的估算公式。

关键词: 高填方; 块碎石; 夯实地基; 变形; 数值模拟

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)01-0038-04

作者简介: 谢春庆(1969-), 男, 四川大邑人, 2001 年于成都理工大学获地质工程专业博士学位, 同年进入西南交大博士后流动站, 主要从事岩土工程方面的工作。

XIE Chun-qing^{1,2}, LIU Han-chao³, GAN Hou-yi⁴

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Prospect and Design Institute of Chengdu Military Command Air Force, Chengdu 610041, China; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Chinese Architectural Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Deformation analysis are carried out by use of theoretical formula, subsidence statistics, 2-D and 3-D numerical simulation based on monitored data of Guizhou X and Yunnan Y airport.

Key words: high fill; block and detritus; packing ground; deformation; numerical simulation

1 前 言*

随着国家经济的发展, 在山区的机场、公路、铁路等重点建设突飞猛进, 牵涉的深挖高填工程越来越多, 其中填方区地基大多是块碎石填筑, 一般采用强夯击实。这些项目对地基的变形要求很高, 尤其是机场, 其工后沉降要求 < 5 cm, 不均匀沉降 < 1.5‰。但由于各种原因对块碎石填筑地基研究很少, 开展此类地基的研究具有重要的意义。

2 现行公式试算

对高填方块碎石夯实地基的变形计算, 还未见报道, 用国内外现行的公式对贵州 X 机场、云南 Y 机场块碎石夯实地基变形试算, 其中主要的几个公式计算结果列于表 1。

表 1 中计算采用的变形模量: 云南 Y 机场为 25 MPa^[1], 贵州 X 机场为 572 MPa。建筑规范法计算结果未作修正, 因为规范中给出的校正表中最大的变形模量为 20 MPa, 而实际模量大于 20 MPa。若按计算值乘以 0.2 的系数, 则规范法计算值多小于实测值, 这与细粒土在模量较大时, 实测值小于计算值的规律相反, 所以规范公式不能简单地用来计算块碎石地基的沉降。工程地手册、劳顿和列斯特公式、顾尉慈公式、铁路工程法计算结果与实测值相差都很远, 都满足不了生产要求。

3 实用的估算公式

根据上述两机场的监测数据, 作沉降 S 、填高 h 、变形模量 E 的多种曲线回归方程。其中, $S-h$, $S-h^2$, $S-h^2/E$, $S-h^2/\sqrt[3]{E^2}$ 曲线较理想, $S-h^2/\sqrt[3]{E^2}$ 曲线相对最理想, 图 1 为其统计曲线。根据回归方程, 结合其它的经验公式, 提出如下的块碎石工后沉降估算公式:

$$S_{\pm} = \frac{h^2}{3\sqrt[3]{E^2}}$$

式中 $S_{\pm}$ 为机场高填方夯实地基工后沉降, mm; h 为填筑高度, m; E 为填筑体变形模量, MPa。

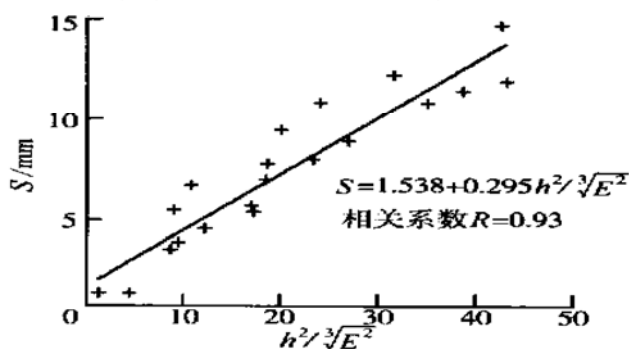


图 1 贵州 X、云南 Y 机场填筑体变形曲线及方程
Fig. 1 Statistical curve and formula on deformation of filling in Guizhou X and Yunnan Y airport

表 1 国内外主要计算公式对块碎石填筑体变形计算表
Table 1 Calculated deformation of high fill of block and detritus by theoretical formula

工程名称及填高		$S_{工实}/mm$	$S_{工计}/mm$				
			建筑规范法	工程地质手册法	劳顿和列斯特公式	顾尉慈公式	铁路工程法
云南 Y 机场	$H = 10.9\text{ m}$	3.4	43.1	10.9	36.0	22.1	39.6
	$H = 15.1\text{ m}$	8.8	58.7	14.8	58.7	30.8	76.0
	$H = 17.3\text{ m}$	10.7	62.4	17.1	72.0	35.4	99.8
	$H = 19.1\text{ m}$	14.6	66.9	18.9	83.5	39.1	121.6
贵州 X 机场	$H = 9.5\text{ m}$	1.3	1.7	0.8	30.0	42.5	30.8
	$H = 17.5\text{ m}$	1.3	3.0	1.2	73.2	79.0	102.8
	$H = 25.5\text{ m}$	3.8	4.4	1.2	128.8	115.8	216.8
	$H = 34.2\text{ m}$	5.6	5.5	1.2	200.0	156.0	389.9
	$H = 40.5\text{ m}$	7.9	5.9	1.2	257.7	185.2	546.8
	$H = 54.5\text{ m}$	11.8	7.0	1.2	402.9	250.3	990.0

注:表中 $S_{工实}$ 为工后实测沉降。建筑规范法见 GBJ 7- 89 规范 5.2.5 式;工程地质手册法为 $S = P \cdot b \cdot M \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_{0i}}$, 符号意义见《工程地质手册》4- 3- 10 式;劳顿和列斯特公式为 $S_{\infty} = 0.001H^{\frac{3}{2}}$, S_{∞} 为最终沉降; H 为坝高;顾尉慈公式为 $S_t = kH^n e^{-m\frac{t}{T}}$, H 为坝高, S_t 为运行 t 年后的沉降, k, n, m 为参数;铁路工程法为 $S_{工} = \frac{H^2}{3000}$, H 为填高, $S_{工}$ 为工后沉降, mm。

表 2 是该式工后沉降的计算值及误差值表。
表 2 云南 Y 机场和贵州 X 机场工后沉降计算结果

Table 2 Calculated deformation after construction					
工程名称	填筑高度 /m	实测沉降 $S_{工实}/mm$	计算沉降 $S_{工计}/mm$	$ S_{工实} - S_{工计} /mm$	$ S_{工实} - S_{工计} /S_{工实} /%$
云南 Y 机场	10.9	3.4	2.8	0.6	16.2
	15.1	8.8	8.9	0.1	1.1
	17.3	10.7	11.6	0.9	9.0
	19.1	14.6	14.2	0.4	2.5
贵州 X 机场	9.5	1.3	0.4	0.9	66.7
	17.5	1.3	1.5	0.2	12.8
	25.0	5.4	3.0	2.4	44.4
	25.5	3.8	3.1	0.7	17.5
	26.0	6.7	3.1	3.5	52.2
	27.2	6.6	3.6	3.0	45.4
	29.0	4.5	4.1	0.4	9.6
	34.2	5.6	5.7	0.1	1.7
	34.3	5.3	5.7	0.4	7.5
	35.5	6.9	6.1	0.8	11.6
	35.7	7.7	6.1	1.5	20.0
	37.0	9.3	6.6	2.7	28.3
	40.0	7.9	7.7	0.2	2.1
	42.0	3.4	8.5	5.1	150.0
	42.1	4.3	8.6	4.3	100.0
	46.5	12.1	10.4	1.7	13.8
	51.6	11.3	12.8	1.6	13.8
	54.0	8.6	14.1	5.5	63.9
	54.5	11.8	14.4	2.6	21.8

从表 2 可得:

a) 两机场实测工后沉降值与计算工后沉降值之差绝对值 $\leq 5.5\text{ mm}$ 。

b) 云南 Y 机场的 $|S_{工实} - S_{工计}|$ 比贵州 X 机场的小, 相对误差也比贵州 X 机场的小, 可能的主要原因: ①云南 Y 机场填筑体变形模量小, 变形大, 计算的相对误差要小一些; ②贵州 X 机场变形模量大, 变形小, 测量误差对观测成果的相对影响要大一些。

c) 贵州 X 机场相对误差 $\leq 20\%$ 的, 占 42.3%; $\geq 50\%$ 的, 占 28.6%, 个别点相对误差大于 100%。但這些点的工后沉降实测值为 1.2~ 11.8 mm, $|S_{工实} - S_{工计}| \leq 5.5\text{ mm}$, 对于生产要求($\leq 40\text{ mm}$) 的影响不大。相对误差大的原因主要是计算公式中分母 $S_{工实}$ 小。

4 二维模型研究

山区机场高填方原地面地基有以下几种情况: 一是全是基岩; 二是原地面土层很薄, 经过处理后, 力学性质很好, 变形模量很大, 变形很小, 可以忽略; 三是原地面土层很厚, 在上覆填筑体的作用下, 变形很大。前两种情况, 基岩和薄土层的变形微小, 填筑地基的变形主要为填筑体的变形。根据有限元位移法的原理, 编制了分析自重荷载作用下的填筑体的应力、应变及位移的有限元分析程序^[2], 并对贵州 X 机场块碎石填筑体夯实地基沉降进行计算。图 2 为场道地基概化的地基地质模型, 图 3 为边界条件。考虑对称性, 采取半幅机场跑道的填筑体, 因此中轴线上水平位移为零。原地面灰岩及处理后的薄层土层变形忽略, 可假定原地面地基与填筑体接触面上的垂向位移为零。故边界条件可假设为图 3 形式, 即在中心线上, x 方向受约束; 在高填方底面, y 方向受约束, 其它为自由。采用正方形和三角形单元, 共 112 个单元, 381 个节点。图 4 为数值模型。



图2 场道地基概化地质模型

Fig. 2 Geological model in Guizhou X airport

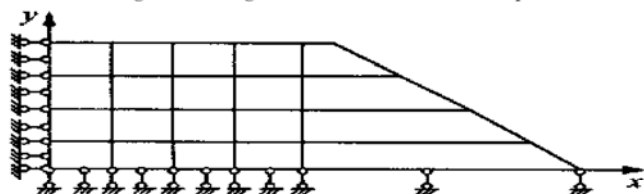


图3 贵州X机场二维弹性有限元计算的边界条件

Fig. 3 Boundary condition for calculation

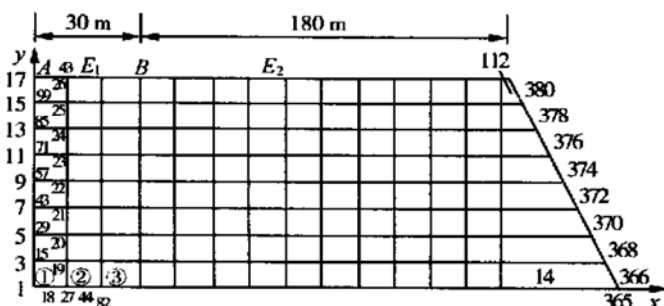


图4 贵州X机场二维弹性有限元数值模型

Fig. 4 Numerical model for computation

假定土面区填筑体、道槽区填筑体、灰岩各为各向同性的连续介质。填筑体的变形主要由自重引起的。由于作用的瞬时性,飞机的荷载忽略。假定填筑体为弹性,材料性质用变形模量代替弹性模量(这与计算附加应力作用下地基沉降相一致)。填筑体变形计算参数、计算结果(填筑体总沉降)列于表3、4。工后沉降主要是在自重应力作用下的蠕变塑性变形。通常情况下,蠕变变形约为填筑体总变形的10%,即

$$S = 0.1S_0 \quad (1)$$

式中 S 为填筑体的蠕变变形; S_0 为填筑体的总变形。表5列出了贵州X、云南Y机场实测的工后沉降与计算沉降。

表3 填筑体变形计算参数

Table 3 Parameters of material

位置	变形模量/MPa	泊松比	容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	宽度/m
道槽区	572	0.25	2.20	30
土面区	372	0.25	2.20	180

表4 跑道中心线沉降计算结果

Table 4 Calculated settlement

填高/m	14	20	33	42
计算沉降值/mm	3.5	7.2	19.7	26.1

表5 贵州X、云南Y机场实测的工后沉降与计算沉降

Table 5 Comparison of measured and calculated settlement

工程名称	填筑高度/m	实测值/mm	计算值/mm
云南Y机场	10.9	3.4	4.9
	15.1	8.8	9.4
	17.3	10.7	12.4
	19.1	14.6	15.1
贵州X机场	14.0	0.4	3.5
	20.0	1.3	7.2
	33.0	2.4	19.7
	42.0	3.4	26.1

分析表5,填筑体的工后变形与实测值基本一致,由此说明,块碎石夯实填筑体可近似地按弹性模型考虑,用总沉降的10%来估计工后沉降可满足生产要求。

5 三维模型研究

填方高度大、填筑周期长、填筑体不同横断面上的边界条件差异大是高填方地基的一般特点。三维模型能考虑边界的多样性、原地面地基与填筑体之间的耦合变形等,能比较客观地反映填筑地基变形的实际。文中采用对岩土体变形和稳定性有充分可靠性的3-D FLAC程序对贵州X机场试验段进行三维数值分析^[3]。

5.1 计算模型

计算模型选定在贵州X机场高填方强夯试验区。模型中第1层为灰岩,第2层为处理后的红粘土层,第3层为块碎石填筑体,其中3-1层为土面区的填筑体,3-2层为道槽区的填筑体。

根据地基处理试验报告,道槽区坡比1:1,土面区为1:1.75。本次计算所采用的参数如表6,计算模型如图5所示。

表6 FLAC模型计算所采用参数

Table 6 Parameters of FLAC model

土的类型	容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	变形(压缩)模量/MPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	粘聚力/kPa
灰岩	2.70	59000(变形)	0.22	55.0	15.0
红粘土	1.78	12	0.32	10.2	51.5
土面区填筑体	2.00	372	0.25	35.0	45.0
道槽区填筑体	2.20	572	0.25	39.0	60.0

本次计算划分出4000个单元,节点4935个,模型计算大约需要10h。

5.2 地基及填筑体的变形特征

图6、7是模拟飞行区在飞机荷载(72 kPa)作用下的变形等值线图。从图6、7可以看出,在填方过程中或填方完成后,在填筑体中,总位移(指 x, y, z 三个方向的合位移)最大出现在土面区填方最大,且邻近坡面的部位

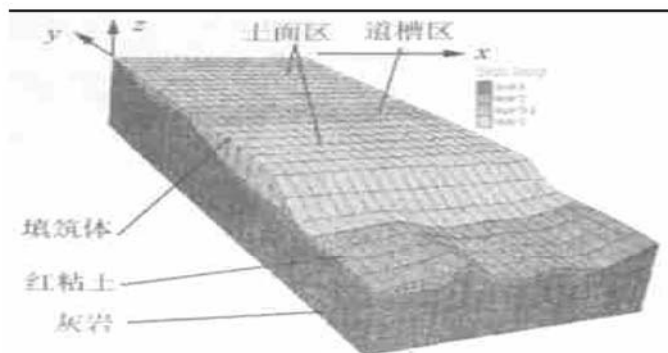


图5 贵州X机场高填方块碎石夯实地基的FLAC模型
Fig. 5 FLAC model of ground under high fill of block and detritus in Guizhou X airport

(道槽区东侧),其值为26.83 cm;道槽区总位移0~7.5 cm; z 方向(即竖直方向的位移或沉降变形)的位移主要发生在土面区,最大位移区域与总位移最大值基本一致,其值为26.3 cm,这表明试验区填筑体的总位移主要受沉降变形的控制。道槽区填筑体的沉降变形值为7.5 cm,反沉降(即填筑体隆起,另文专述)最大值为0.9 cm。

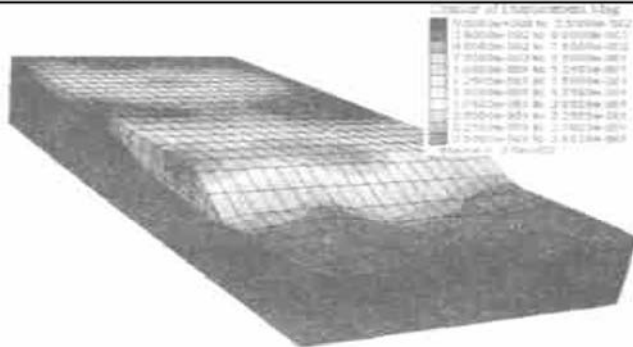


图6 贵州X机场高填方块碎石夯实地基变形稳定后总的位移等值线
Fig. 6 Final contour of displacement

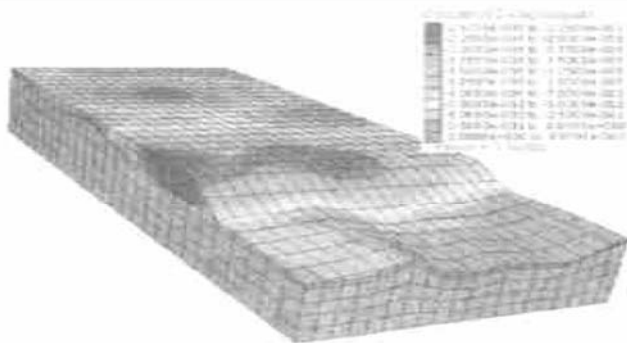


图7 贵州X机场高填方块碎石夯实地基变形稳定后 z 方向的位移等值线图
Fig. 7 Final contour of z -displacement

根据填筑体工后沉降一般约等于总沉降的10%,可以估算出土面区最大工后沉降约2.63 cm,道槽区最大工后沉降约7.5 mm,反沉降约0.9 mm。这与实测值十分接近。

通过分析贵州X机场高填方块碎石夯实地基的

变形等值线图,可以得出:

(1) 机场高填方块碎石夯实地基的变形与填筑的高度、变形模量有关。填筑高度越大,变形越大;填筑体变形模量越大,其变形就越小。

(2) 块碎石填筑体的变形与所处的部位有关,在同等条件下,越靠近中心部位,变形越小,反应了内侧填筑体变形受外侧填筑体的约束。

(3) 填筑体总的位移方向是向填筑体的两侧,优势方向为填方高度大、具临空面的一侧。

5.3 地基及填筑体的稳定性特征和潜在滑面的分析

大量理论分析,实践结果表明,岩土体失稳(特别是滑动失稳),都是沿剪应变最大的部位发生。图8是剪应变增量图。从图8可以看出,填方后剪应变增量较大的部位主要沿硬的基座(灰岩)和其上相对较软的土体两者的接触面分布,也即灰岩与红粘土的接触界面分布。其中,在填筑体的西侧坡脚部位,其与原地地面地基交界面附近剪应变增量较高。因此,可以得出如下结论:填筑体和原地地面地基所构成的系统,在底部基岩与上部土体的接触面上,特别是在该面西侧的中下段,成为薄弱部位的可能性较大。这与工程实践常出现的问题的部位相同。

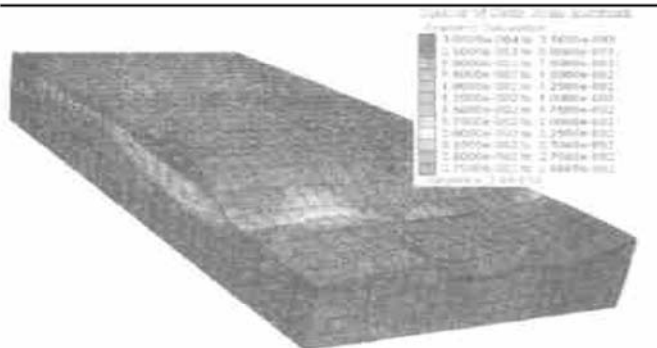


图8 贵州X机场高填方块碎石夯实地基剪应变增量图
Fig. 8 Contour of shear strain increment

6 结 语

现行的变形计算公式不适宜高填方块碎夯实地基的变形计算,实践证明考虑模量的经验公式和数值分析法是计算块碎石夯实地基的有效手段,具有较强的推广价值。

参考文献:

- [1] 周虎鑫,陈荣生.机场高填方填筑体变形有限元分析[J].地基处理,1997,8(1):27-33.
- [2] 谢贻全,等.弹性和塑性力学中的有限单元法[M].北京:机械工业出版社,1983.
- [3] 谢春庆.山区机场高填方块碎石夯实地基性状及变形的研究[D].成都:成都理工大学,2001.