

# 山区高填方机场的智能建造与安全运营

姚仰平, 丛易敏行, 罗汀, 张星, 王俊博, 耿轶

北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100083

**摘要** 现阶段中国正在大力兴建山区机场以改善当地的交通条件, 而通过“削山平谷”形成的山区高填方机场在建造和运营中还面临许多难题。针对山区高填方机场建造过程中施工质量难以控制的问题, 利用“互联网+”系列技术开发了机场高填方压实质量实时监控系统, 可实现对施工压实质量的全面控制和管理, 并结合无人驾驶技术能够实现自动化智能建造; 针对高填方施工完成后填筑体变形沉降的问题, 建立了全生命周期的安全监测系统, 可对长期变形进行预测, 起到灾害预警作用; 针对机场道面下土层含水量增加的锅盖效应现象, 通过试验模拟验证了其内在机制, 提出了在冻结锋面以下铺设隔气层的有效解决方案。

**关键词** 高填方机场; 压实质量监控; 变形监测; 锅盖效应

自从1903年莱特兄弟发明了可操控飞机, 航空技术得到了迅速的发展, 使飞行很快地成为一种新型出行方式。伴随着新时代, 人们对于美好生活的向往, 对出行的舒适性和便捷性提出了新的要求, 因而乘飞机出行得到了更为广泛的普及, 相应的机场建设也如火如荼地在中国大地上全面展开。然而, 为了保证飞机的安全起降, 机场的建造往往需要一片开阔的平地, 飞机喷射器产生的巨大噪音更是要求机场远离居民区, 这对于重峦叠嶂、群山环绕的山区城市而言, 想要直接找到一个开阔的平地几乎不可能, 而这部分地区又往往是偏远地区或地面交通极其不便的地区, 亟需通过建造机场改善其与外界的联系条件。为此, “高填方机场”应运而生, 再次更新了人们对超级工程的认识。

高填方机场, 是通过“削山平谷”方式建造的机场, 即将山头的土石搬运填筑到山谷以此形成一个开阔的机场平面(图1)。而由于山峰山谷间的巨大落差, 加上



图1 “削山平谷”建造的广西河池高填方机场  
Fig. 1 Hechi high filling airport in Guangxi Province by "cutting the mountains to fill the valleys"

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-07-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB047000)

作者简介: 姚仰平, 教授, 研究方向为土的本构关系, 电子信箱: ypyao@buaa.edu.cn

引用格式: 姚仰平, 丛易敏行, 罗汀, 等. 山区高填方机场的智能建造与安全运营[J]. 科技导报, 2018, 36(17): 106-110; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.17.014

机场对于周围环境的“净空”要求,填筑土石方的高度与土石方量常常超乎想象,因而区别于普通机场称之为“高填方机场”。例如承德普宁机场,最高填筑高度达141 m,若每层高2.82 m,则填筑高度相当于50层楼的高度;昆明长水机场,海拔高度2100 m,填筑的土石方总量达到1亿 $\text{m}^3$ ,如果将这些土石平铺在相当于100个世界杯标准足球场的平地上,仍然能够堆填50层楼高,是名副其实的“巨无霸”超级工程。这种“愚公移山”的方式看似简单,可想要在山海中建造一座“不沉的航空母舰”难度非常之大。

由于高填方工程本身具有跨越地形起伏多变、地质条件复杂、土石方材料多样、工程土石方量巨大等特点,将导致在建造过程及完工后面临许多问题。一方面,土是种非均质的散体材料,与均质的金属材料的性质有很大的差异,如压硬性,类似于松散的雪经过挤压后可以变成更坚硬的雪球,土体只有经过压实夯实时才有足够抵抗变形的能力,不同于天然情况下土体靠自重经过成千上万年的沉淀形成的稳定密实土层,工程上的填筑体一般通过强夯或碾压的方式快速压实,但由于施工压实质量往往难以保证,由此引发施工后较大的整体变形、差异沉降甚至滑坡等问题,严重影响机场的安全运营。因此,高填方工程施工过程中的压实质量控制就成为整个工程的重中之重。而因为工程体量巨大不可避免地产生难以预测的变形,当变形过大时应当采取工程措施防止危险发生,但是目前仅仅通过监测沉降量很难起到预警的作用。另一方面,纵然机场已经有百余年的发展历史,但在长期使用过程中,仍然会有新的问题逐渐暴露出来,从工程实践的偶然发现到被科学研究者重视,通过试验研究揭示了隐藏在工程现象背后的科学本质,“锅盖效应”就是其中之一。

本研究组针对以上问题,开发机场高填方压实质量实时监控系统;建立全生命周期的安全监测系统;探索锅盖效应的内在机理,并提出解决方案,为山区高填方机场的智能建造与安全运营提供理论基础和技术支持。

## 1 机场高填方压实质量实时监控系统

在高填方工程施工过程中,需通过压实机械反复碾压填筑体达到压实的效果,要想使土体均匀密实、整

体变形小,且要避免产生差异沉降,就需要压实机械以特定的速度、规定的路线每层碾压近20遍,这看似简单重复的过程却是保证整个高填方工程质量的关键。但由此却会引发一个实际问题,在如此多的碾压遍数下,很难保证驾驶员以规定的速度、按照设计遍数将场地均匀压实,不过碾也不漏碾。目前,工程上主要的控制方法是在每一层土体碾压完成后,按场地大小随机挑选几个位置,检测其土样的压实质量,满足设计指标才可以开始填筑下一层。虽然检测的质量标准十分严格,但这种事后的抽样调查方法以点带面,依然无法解决上述问题,实质上仍依赖着驾驶员的技术与记忆,但是当面对如此大的施工场地时,难免出现过碾和漏碾的现象,这对填筑体的均匀性是十分不利的。如果能够控制并记录下整个碾压全过程,就可以解决此问题。对此,基于北斗定位、物联网、云计算、大数据、无人驾驶和虚拟现实等先进的科学信息技术,开发了一套机场高填方压实质量实时监控系统<sup>[1-2]</sup>(图2)。通过北斗卫星获取压实机械实时定位数据,然后采用4G网络实时将定位数据传输到云服务器,再由云服务器对数据进行分析得到实时压实质量结果。在该系统中,不但可以监控实时压实遍数、压实机械实时轨迹和速度,还可以随时查看碾压的历史轨迹、速度、遍数,并基于当前压实进度实时计算得出压实机械碾压的最佳路径,这样就可以避免过碾与漏碾的现象发生<sup>[3-4]</sup>。同时,开发了进度计划子系统,在保证施工质量的前提下能够及时方便地配置施工计划,调整工期,让管理人员对工程有着更加全面的控制。还结合了无人驾驶技术,将实时计算出的最佳路径指令通过物联网直接传输给压实机械,实现机械的自动化施工,并现场试验成功。

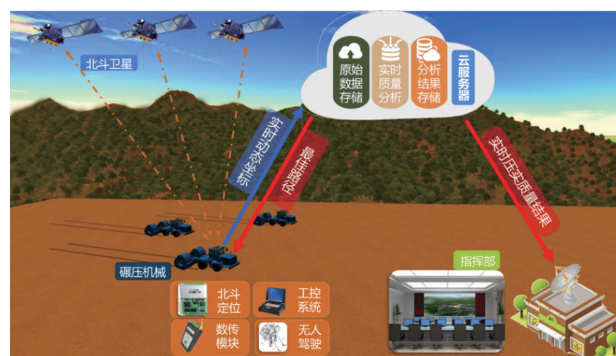


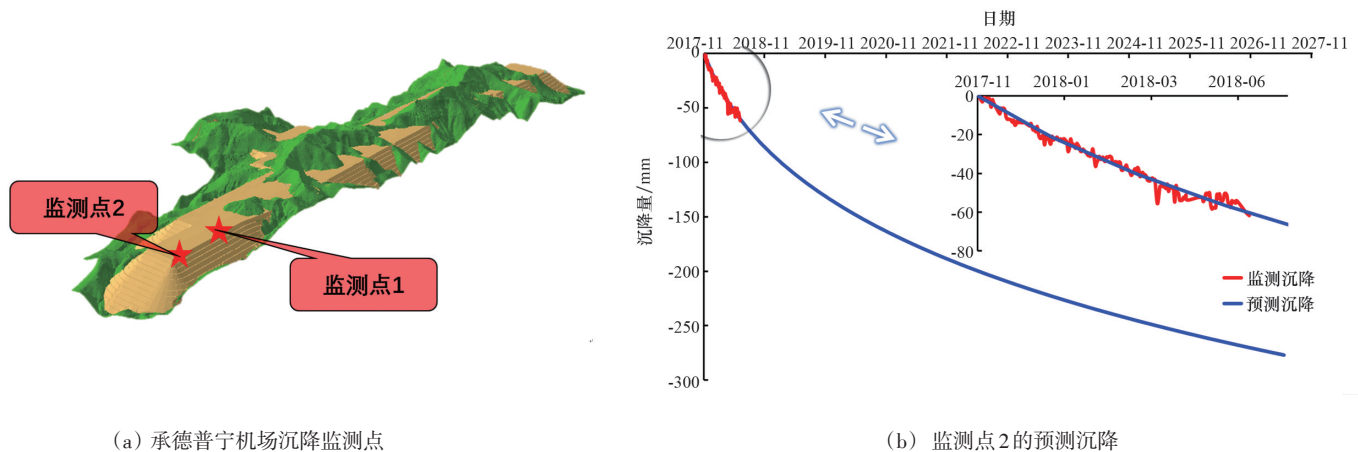
图2 高填方机场压实质量实时监控系统逻辑关系  
Fig. 2 The compaction real-time monitoring system for high filling airport system

除此之外,结合虚拟现实技术对施工现场情况进行同步展示,这样管理人员无须亲临现场就可以实时监控所有场地的整个碾压过程。这套系统对于高填方工程的施工质量有着重要的实际意义,如今无人驾驶、人工智能技术正在迅猛发展,结合此套系统,未来的高填方机场的建造将更加自动化、智能化。

## 2 全生命周期的安全监测系统

高填方工程施工完成后,如果要知道填筑体目前甚至是未来的质量状况,监测填筑体的变形是最有效的手段,所以除了对施工质量进行监控外,还应对填筑体的变形进行有效监测。通过中国的北斗卫星定位系

统与4G无线传输技术对填筑体表面多个测量点的沉降量和沉降速率进行远程实时监控,得到较为精准的监测数据,为预测的准确性打下坚实的基础,然后利用姚仰平等提出的UH系列模型<sup>[5-8]</sup>对监测数据进行整理分析,预测未来的沉降量与差异沉降量,而且随着监测数据的增多,预测会越来越精确,进而建立起全生命周期的监测并进行稳定性、适航性等安全评价,使技术人员能够了解整个高填方工程在全过程中的变形及稳定情况。当预测数据发生突变或产生较大变形时,监测系统可以智能地发出预警,保障人员安全,同时也便于及时采取有效的工程措施。研究组将该系统应用于承德普宁机场的边坡变形监测,得到了较好的反馈,验证了其有效性与实用性(图3)。



(a) 承德普宁机场沉降监测点

(b) 监测点2的预测沉降

图3 承德普宁机场沉降监测点分布及监测点2的预测沉降

Fig. 3 Monitoring point at Chengde Puning Airport and predicted settlement at monitoring point 2

## 3 锅盖效应的探索

锅盖效应现象最初是在20世纪90年代发现于兰州中川机场<sup>[9]</sup>,在维修机场跑道时,扒开道面偶然发现道基土层的含水量很大,几近饱和状态,而道面两侧以外的土层却保持着正常的含水量。更令人惊奇的是,该机场地处半干旱地区,水资源稀缺,地下水位很低,几乎不可能通过毛细作用将水分吸入道基,因此不明白道基土层中如此多的水分究竟是从哪里来。在该现象还没能得到合理的解释时,又发现另一处位于干旱地区的敦煌机场,道面产生多处变形,经过开挖变形处道面同样发现道基土层含水量很大,像中川机场一样也无法解释道基中水分的来源。而土中含水量的增加会很大程度地削弱土体作为道基的性能,引发道面不

均匀沉降、开裂等工程灾害,进而影响飞机的安全起降,所以更加需要对该现象进行深入研究。本研究组在充分分析后设计试验方案,在实验室中通过调整试验装置模拟道面下的土体环境,同时埋设含水率传感器探究水分的迁移规律<sup>[10]</sup>,揭开了这“无源”之水的由来。原来,由于干寒地区冬季道面温度低而深层土体温度较高,二者形成较大的温差,在温差的驱动下,深层的水气向上迁移,直到遇到温度低的道面冷凝成水或者凝华成冰,年复一年地积累,道基土层的含水量变得越来越高。此过程好像平时做饭时锅盖上挂着的水珠,也是由于水汽从底部迁移上升遇锅盖冷凝而形成的(图4)。由此及彼,机场跑道就像是锅盖,盖住了锅盖,水汽就会在锅盖下汇集。为了更加形象地说明该现象,就称其为“锅盖效应”。为了避免该现象的发生,

研究组又经过反复地探索与试验<sup>[11-12]</sup>,发现在冻结锋面(图4)以下铺设隔气层堵住水汽上移,再对这部分水汽进行疏导,如此一来,隔气层以上土层的含水量不会再增加,对土体性能的影响也就微乎其微;而隔气层以下土层中的水气由于温度条件不足无法产生锅盖效应。通过这种疏堵结合方法,有效地防治这种由冷凝或凝华产生的锅盖效应。为了验证这一方法的切实有效性,研究组还在机场做了现场对比试验,结果与预期吻合。至此,可以更加科学地解释20多年前兰州机场和敦煌机场的病害原因,同时切中要害地提出简单易行的解决方案并应用到机场的工程建造中。



图4 “锅盖效应”下的水气迁移

Fig. 4 Water vapor transfer caused by "pot effect" at Chengde Puning Airport

## 4 结论

研究组针对目前山区高填方机场建设中的主要问题,创新性地“互联网+”的系列技术融合进了山区高填方机场的智能建造与安全运营中,结合相关理论模型,能够实现施工压实质量的实时监控与全生命周期的安全监测;通过对实际工程问题的不断探索与深入研究,探明了锅盖效应内在机制并提出了解决方案。当下,中国正在大力推进机场建设,新建机场中有很多是山区高填方机场,从中不难预见其广阔的发展空间与应用前景。

### 参考文献(References)

- [1] 姚仰平, 阮杨志, 刘冰阳, 等. 基于北斗的机场高填方施工质量监控技术研发[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊2): 6-10.  
Yao Yangping, Ruan Yangzhi, Liu Bingyang, et al. Control technology of construction quality for high filled airport based on Beidou satellite navigation system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Suppl 2): 6-10.
- [2] Yao Y, Ruan Y, Chen J, et al. Research on a real-time monitoring platform for compaction of high embankment in airport engineering[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2018, 144(1): 1-13.
- [3] Thompson M J, White D J. Estimating compaction of cohesive soils from machine drive power[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(12): 1771-1777.
- [4] Sandström Å J, Pettersson C B. Intelligent systems for QA/QC in soil compaction[J/OL]. [2018-07-17]. Proc Annual Transportation Research Board Meeting, [http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/GeoDynamik\\_Sandstrom\\_Intelligent%20Systems%20for%20QAQC%20in%20Soil%20Compaction\\_2004.pdf](http://www.intelligentcompaction.com/downloads/PapersReports/GeoDynamik_Sandstrom_Intelligent%20Systems%20for%20QAQC%20in%20Soil%20Compaction_2004.pdf).
- [5] 姚仰平. UH模型系列研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 193-217.  
Yao Yangping. Advanced UH models for soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 193-217.
- [6] Yao Y P, Liu L, Luo T. A constitutive model for granular soils[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61: 1-10.
- [7] Yao Y P, Hou W, Zhou A N. UH model: Three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. Géotechnique, 2009, 59(5): 451-469.
- [8] Yao Y P, Niu L, Cui W J. Unified hardening (UH) model for overconsolidated unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(7): 810-821.
- [9] 李强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69-71.  
Li Qiang, Yao Yangping, Han Liming, et al. Pot-cover effect of soil[J]. Industrial Construction, 2014, 44(2): 69-71.
- [10] 罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 6-9.  
Luo Ting, Chen Han, Yao Yangping, et al. Analysis of water migration characteristics of pot-cover effect[J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 6-9.
- [11] 姚仰平, 王琳. 影响锅盖效应因素的研究[J/OL]. [2018-07-17]. 岩土工程学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20171212.1545.020.html>.  
Yao Yangping, Wang Lin. Research on the influence factors on the "Pot-cover effect"[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. [2018-07-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20171212.1545.020.html>.
- [12] 罗汀, 曲啸, 王乃东, 等. 北京大兴国际机场冬季地温变化分析研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 17-20.  
Luo Ting, Qu Xiao, Wang Naidong, et al. Geothermal temperature characteristics of Beijing Daxing International Airport in winter[J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 17-20.

## Intelligent construction and safe management of high filling airports in mountains

YAO Yangping, CONGYI Minxing, LUO Ting, ZHANG Xing, WANG Junbo, GENG Yi

School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

**Abstract** A large number of airports are under construction in mountainous areas in China, to improve the local traffic conditions. However, the construction and the management of the high filling airports, built by “cutting the mountains to fill the valleys”, still face many difficulties. In order to control the quality of the high filling project, a real-time monitoring system for high filling compaction is developed by using the "Internet Plus" technology. The driverless technology makes the automated intelligent construction become a reality; In order to control the settlement after the construction, a safety monitoring system in the whole life cycle is established, which can predict the long-term deformation and issue disaster warnings in advance. In order to deal with the increased water content of the shallow soils under the airport runway, known as the pot effect, both laboratory and field experiments are conducted to trace the causes. Meanwhile, an effective engineering measure is proposed to reduce the pot effect by laying the insulating layer below the position where the soil temperature is around 0 °C.

**Keywords** high filling airports; compaction monitoring; deformation monitoring; pot effect ●



(责任编辑 傅雪)