

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.04.023

软土地区机场跑道不均匀沉降分析

苏尔好¹ 黄崇伟^{2,3} 徐超³

(1. 上海华东民航机场建设监理有限公司, 上海, 200335; 2. 上海市城市建设设计研究总院, 上海, 200125;
3. 同济大学土木工程学院, 上海, 200092)

摘要:结合浦东机场五跑道工程的勘察及监测资料, 论证了深厚软基塑料排水板超载预压的效果, 分析了跨古河道机场跑道软基工后不均匀沉降分布特征。结果表明: 古河道区域沉降特征不同于正常区域, 采用塑料排水板堆载预压对跑道软基深层处理, 工后沉降量及差异沉降率基本满足规范要求; 但受古河道分布影响, 沉降及不均匀沉降加大, 应按压缩层厚度分布变化情况, 适当增加超载、塑料排水板布设深度或加密布置间距。

关键词:机场跑道; 超载预压; 深厚软基; 不均匀沉降

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2016)04-0598-08

Differential Settlement Analysis for Airport Runway Foundation on Soft Area

Su Erhao¹, Huang Chongwei^{2,3}, Xu Chao³

(1. Shanghai East China Civil Aviation Airport Construction Supervision Co. Ltd., Shanghai, 200335, China;
2. Shanghai Urban Construct on Design & Research Institute, Shanghai, 200125, China;
3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: Combined with site investigation and monitoring data of the fifth runway in Pudong airport project, this paper demonstrates the validity of surcharge preloading with prefabricated vertical drains (PVDs) in deep soft foundation treatment, and analyzes the distribution characteristics of the differential settlement for airport runway foundation across old channel after construction. The results indicate that the settlement law of the old river region is different from the law of the normal region. And the settlement and differential settlement ratio after construction can meet the specification requirement basically. But the settlement and differential settlement in old channel area increase due to the development of thicker layer of clay. Therefore, the appropriately increased overload, PVD layout depth or cryptographic layout spacing is needed according to the distribution of the thickness of compression layer.

Key words: airport runway; surcharge preloading; deep soft foundation; differential settlement

近年来, 鉴于建设用地紧张及民用机场运输业迅速发展的局面, 一些沿海城市在深厚软土吹填陆域区修建机场^[1-2]。由于目前中国机场跑道多为刚性混凝土道面, 与沥青道面相比其刚度大、强度高、

耐久性好, 但对地基的不均匀沉降适应能力较差, 所以一般道槽区地基差异沉降及最终沉降量控制标准较为严格^[3], 以保证在填土荷载和道面结构荷载等作用下不会产生过大的工后沉降和不均匀沉

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2016-04-19

通信作者: 黄崇伟, 男, 高级工程师, E-mail: hcwei@126.com。

引用格式: 苏尔好, 黄崇伟, 徐超. 软土地区机场跑道不均匀沉降分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(4): 598-605. Su Erhao, Huang Chongwei, Xu Chao. Differential settlement analysis for airport runway foundation on soft area [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(4): 598-605.

降,导致道面积水和结构性破坏^[4]。因此,科学、经济、合理地选择地基处理方法,是在软土地基上成功修建机场跑道的一个重要因素。工程和实践表明,对软基及吹填土的处置较为成熟的方法有3类:垫层与浅层置换法、排水固结法和复合地基加固法。其中塑料排水板堆载预压法因其加固深度大、经济等因素而被广泛运用^[1,5-7]。

日本东京机场由围海造陆修建,其地基软土层深厚,采用塑料排水板堆载预压方法取得良好的效果。香港新机场和澳门国际机场为了选择合理的地基处理方案,进行了排水固结法的现场试验研究,结果表明采用塑料排水板堆载超载预压,地基的固结沉降主要发生在加荷期,其工后残余沉降可以满足机场的正常营运要求,并建议采用排水固结法加固机场深厚软基^[8-10]。周红波等^[11]对浦东机场促淤场地加固的试验研究发现,采用动力排水固结法对处理该地区深厚软基效果明显。可见排水固结法是处置深厚软土地基的合理方法。

上海浦东国际机场濒临东海,地貌类型属于潮坪地貌,发育深厚第四纪沉积层,中浅部层组土质松软。浦东机场五跑道除部分在水域外,还横跨古河道,而古河道区域软土发育厚度明显大于正常区域,处置不当易引起工后道槽过大差异变形,影响跑道的正常使用。

针对浦东机场五跑道软土地基的特点,在软基处理设计和施工中,在正常区域和古河道分布区采用不同的排水板插入深度,以期将工后沉降及差异沉降控制在合理范围内。本文基于浦东机场第五跑道工程地质条件和塑料排水板超载预压监测资料,对比分析五跑道古河道区和正常区域地表沉降、工后沉降和差异沉降分布规律,借以评价塑料排水板超载预压对有古河道分布的深厚软基机场跑道工后沉降及不均匀沉降的控制效果,并分析相关施工参数对处置效果的影响。

1 工程背景

1.1 工程概况

浦东机场新建五跑道位于浦东机场规划四跑道东侧1750 m处,结合机场已建二跑道的使用情况和浦东机场运行机型的使用需求,五跑道长度拟定为3400 m。考虑到试飞飞机的最大机型为双通道飞机,以及机场未来可能在某时段使用五跑道作为降落跑道之用,五跑道道面宽度按45 m设置,两侧道肩均为7.5 m,跑道总宽60 m。

根据上海海陆变迁史料和已有勘探资料,拟建

五跑道场地约有2/3位于现有海堤之外,是水域;约有1/3位于现有海堤之内,是新近围海形成的陆域。

1.2 工程地质条件和问题

本场地深度60.30 m范围内的地基土主要由粘性土、粉性土和砂土组成,一般具有水平层理。按其沉积时代、成因类型及其物理力学性质的差异,勘探深度范围内划分为6个主要层次。

勘察揭示场区北侧有1条古河道分布,古河道最深约58 m,宽度大于1200 m。古河道分布区第⑤层厚度较大,第⑦₁层缺失,第⑦₂层埋深一般大于35 m。陆域正常区域及古河道区域工程地质剖面见图1。

根据场地地层土性的宏观特征、成因类型等将勘察深度范围内的地层归纳为4大主要层组:浅、表部层组受新近吹填或沉积环境影响,粘性土和粉性土呈层状交叉分布,土质不均匀,土性差,强度较低;中部土层(地层深度:正常区域10~35 m以内;古河道区域10~58 m以内)地基土以粘性土为主,土层较均匀,强度低,地基土层含水量高,孔隙比大,强度低,具有高压缩性,长期荷载作用下是产生压缩沉降的主要土层,并且由于古河道的存在,同等结构荷载作用下易产生较大的沉降量,甚至不均匀沉降。

1.3 地基处理及监测方案

针对以上存在的问题,本工程采用塑料排水板法超载预压对深层地基进行处理。限于篇幅,本文仅对现有海堤之内陆域区进行研究,着重分析陆域正常区域和古河道区域沉降规律及其差异。

由于工程荷载较大,根据相关工程经验和理论分析,五跑道的堆载预压地基处理范围确定为道肩边线向外15 m。考虑到填土荷载、道面结构荷载及补土荷载等,工程荷载为70.4 kPa,超载30%,实际堆载预压荷载为91.5 kPa,平均堆载标高为7.8 m。采用C型塑料排水板,正常区域入土深度为20 m,古河道分布区域入土深度为28 m,呈等边三角形平面布置,间距为1.5 m。堆载预压时间共360 d(含加载过程180 d),堆载预压区处理深度范围内土体的平均固结度达到80%以上,沉降速率连续5 d小于0.6 mm/d,可进行卸载。

根据监测技术要求,工程对陆域原地表沉降、分层沉降、孔隙水压力及深层土体水平位移等进行了监测。其中陆域原地表沉降监测点为54个,深层土体分层沉降监测孔7个,孔隙水压力监测孔7个,深层土体水平位移测斜孔9个(图2)。

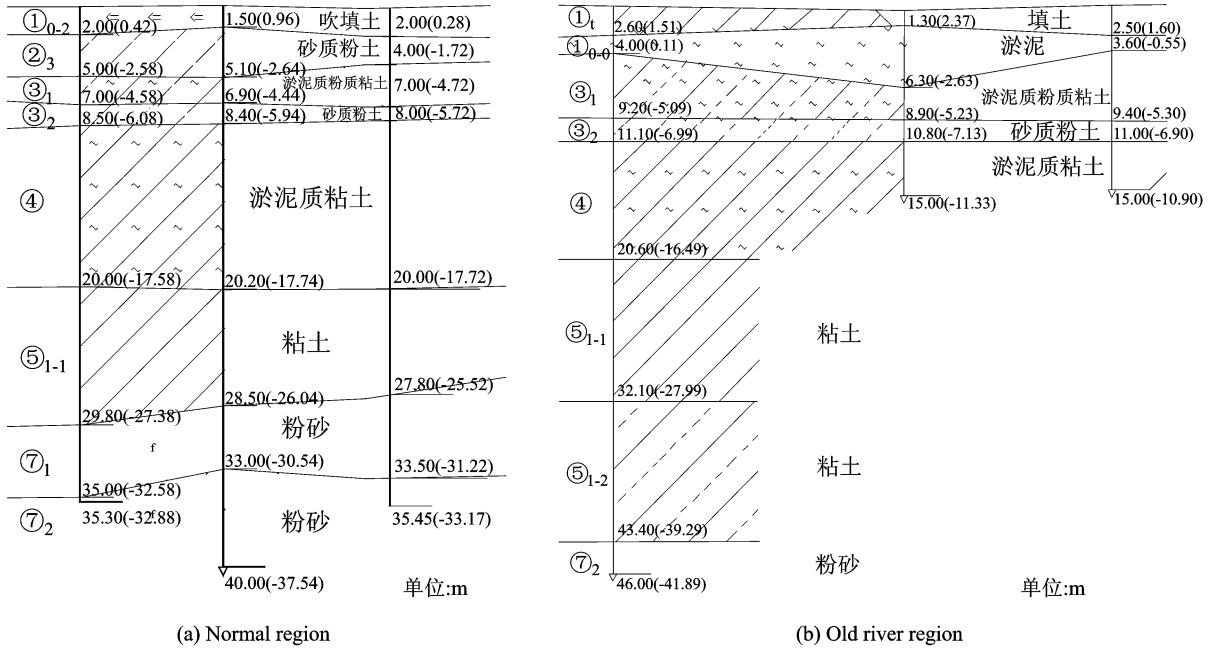


图1 陆域场地工程地质剖面图

Fig.1 Engineering geological profile of land area site

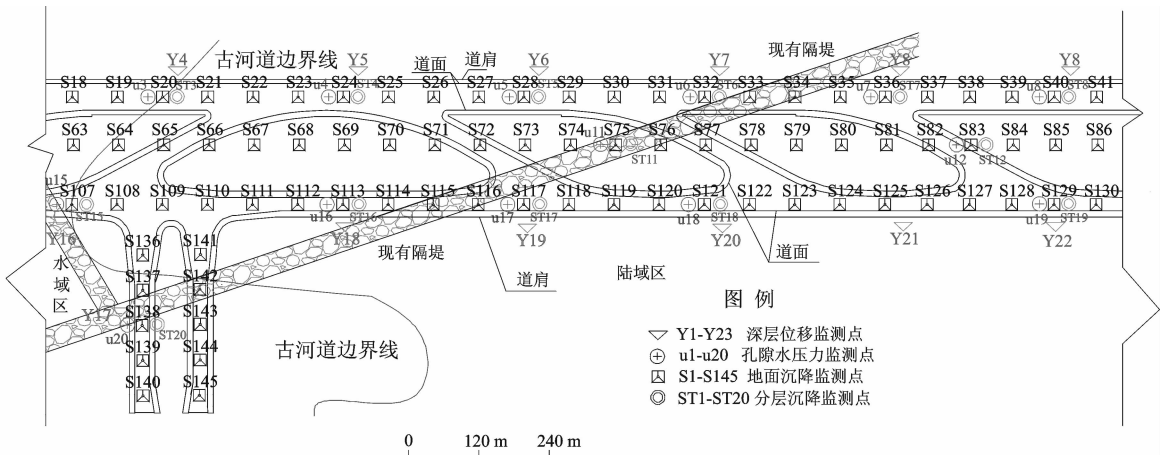


图2 原位监测布置平面图

Fig.2 In-site monitoring scheme of engineering site

2 沉降时空分布规律

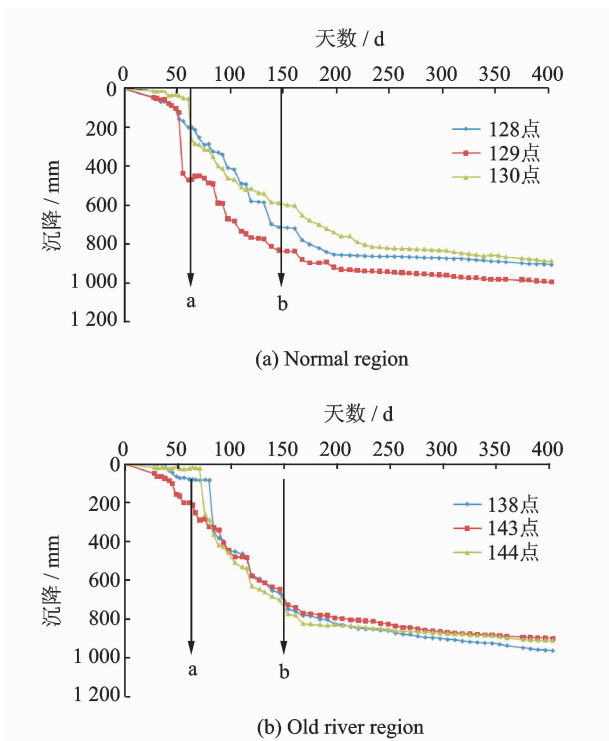
2.1 地表沉降时间变化规律

在正常区域和古河道分布区采用不同的排水板插入深度,以期将工后沉降及差异沉降控制在合理范围内。图3为正常区域与古河道区域地表沉降随时间变化曲线,其中图3(a)为正常区域沉降曲线,图3(b)为古河道区域沉降曲线。对比分析五跑道古河道区和正常区域地表沉降、工后沉降和差异沉降分布规律,以评价塑料排水板超载预压对有古河道分布的深厚软基机场跑道工后沉降及不均匀沉降的控制效果,并分析相关施工参数对处置

效果的影响。

由图3可以看出,正常区域与古河道区域各监测点在插板施工开始,随着软基排水通道增加,开始发生缓慢沉降;堆载开始后,中、浅部欠压密吹填土及软粘土迅速发生固结沉降,沉降速率显著增大;超载结束,沉降速率降低,表明深部淤泥质粘土及粘土层排水固结较为缓慢,最终沉降曲线趋于平稳。根据三点曲线法^[12],到360 d时,各处固结度达到86.6%以上,完成大部分固结沉降,符合规范^[13]要求。

根据沉降监测总体结果,一方面,在正常区域,沉降急剧增加时间为开始堆载时间段里;另一方



注:a之前:插入排水板,a:开始堆载,b:堆载结束

图3 不同位置地表沉降历时曲线

Fig. 3 Settlement curves of surface at different positions

面,在古河道区域则在塑料排水板打入时即有沉降发生,在堆载开始时间伴随沉降进一步加大,这是由于在古河道区域排水板打入较深、且中部土层较厚的原因所致。因此,在速率分析时,选择堆载开始时沉降速率较大、堆载结束后沉降值较大点为正常区域监测典型点;选择排水板打入时沉降速率发生较大、且排水板打入后沉降值相对较大点位古河道区域监测典型点。

以正常区域129监测点及古河道区域143监测点为例,基于其沉降监测资料,获得其沉降速率随时间变化关系曲线(图4)。由图4可知,开始由于插设塑料排水板及堆载,正常区域与古河道区域地表沉降速率均迅速增加;堆载过程中沉降速率虽呈波动变化,但维持在较高水平;堆载结束,沉降速率迅速降低;360 d时,古河道区域与正常区域其沉降速率均小于规范^[13]要求的0.5~1.0 mm/d,且随着时间的继续推移,古河道区域沉降速率与正常区域沉降速率逐渐接近。

通过沉降时间曲线及沉降速率时间曲线分析,不难发现,古河道软基沉降速率整体小于正常区域软基;且堆载结束后,古河道软基沉降速率衰减滞后于正常区域软基。产生以上现象的原因是,古河道区域软基粘土层(第⑤层)发育厚度大,其渗透性

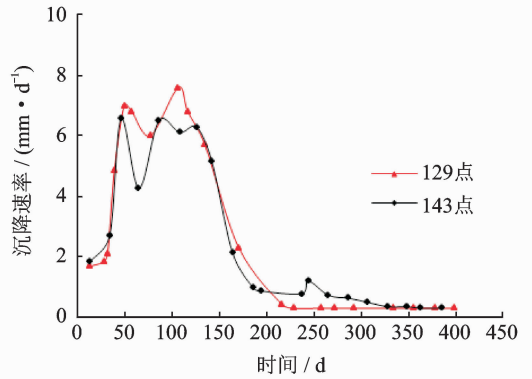


图4 不同位置监测点沉降速率曲线

Fig. 4 Settlement velocity curves at different positions

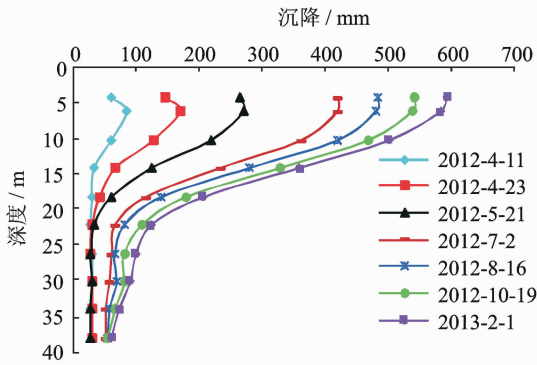
较低,因此排水固结周期长。

2.2 分层沉降时空变化规律

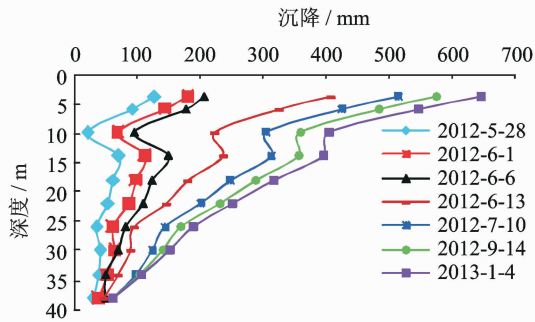
图5为正常区域ST18点和古河道区域ST20点(图2)不同时间地基分层沉降沿深度变化曲线。由图5可知,在塑料排水板超载预压下,陆域深厚软基沉降主要由中、浅部插设塑料排水板的土层组成,其中正常区域25 m以内地层沉降较为明显,而古河道区域沉降明显区域扩展到深度35 m处的地基土层,这主要因古河道区域分布有厚度较大的高压缩性中部层组土层,且古河道区域塑料排水板入土深度大,具有较大固结排水加固影响范围;同一时间,随深度增加,土层压缩量逐渐降低;对中浅部而言,同一深度处,地基土随时间压缩量逐渐增大,但沉降速率逐渐降低。

由图5可知,两区域在堆载荷载作用下,沉降值均较大,且古河道区域中浅部层组在同一深度相同时间,沉降值比正常区域大;由地基分层沉降沿深度分布曲线随时间的发展趋势可以看出,古河道区域沉降稳定,且相对正常区域滞后,这表明对陆域古河道区域应适当加大超载或加密排水板布置,以实现正常区域与古河道区域软基沉降的协调性。

从地表沉降时间变化特征及土层分层沉降时空变化特征可知,塑料排水板超载预压处理后的跑道软基存在不均匀沉降,其依据主要有:(1)通过对比同一区域跑道中心线监测点的沉降时间曲线发现,正常区域与古河道区域连续监测点的沉降随时间变化整体规律虽然一致,然而各点在堆载期的沉降速率及其沉降值各不同,这必然导致其工后沉降量的差异,进而导致跑道或联络道出现不均匀沉降;(2)从地基分层沉降时空变化规律可以看出,古河道区域与陆域正常区域软基随着时间的增加,其土层变形速率不同,这意味着某些土层完成固结



(a) Normal region



(b) Old river region

图5 不同时间地基分层沉降沿深度的分布曲线

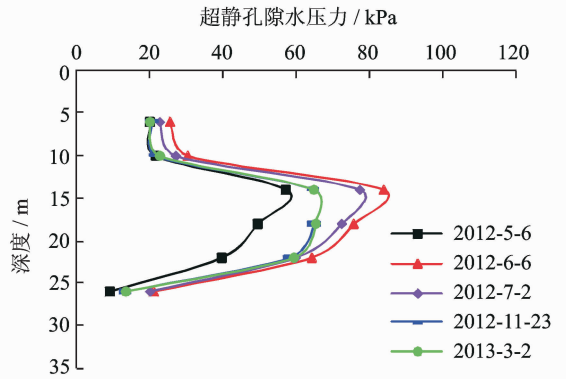
Fig. 5 Layered ground settlement curves along depth at different time

时,其他土层仍在发生压缩变形,由于不同位置相应土层厚度的差异,相同时间,工后地表沉降量各不相同。

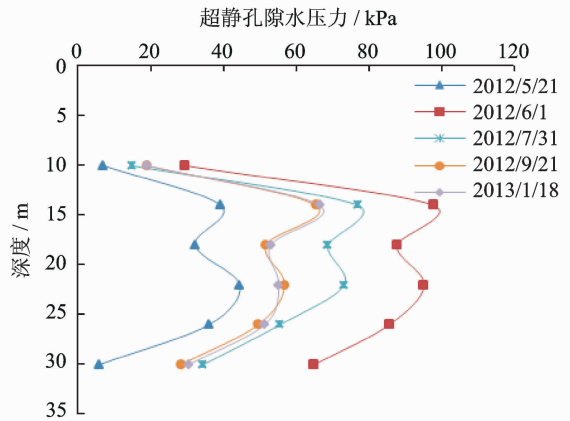
2.3 孔隙水压力时空变化规律

超载预压势必引起土体中孔隙水压力的变化,超静孔隙水压力的消散规律可为控制施工进度、了解加固深度以及评价加固效果提供有效依据,并对施工及堆载过程控制具有重要的指导作用^[14]。试验中集中在③,④,⑤主要压缩层中各分层布置孔压计,一孔多点,每4~5 m设置1个测点。图6为正常区域 u19 点和古河道区域 u20 点(图2)不同时间超静孔隙水压力沿深度分布曲线。

图6表明,堆载导致正常区域超静孔隙水压力在深度10 m以下迅速增大,22 m后迅速降低,10~25 m范围形成超静孔隙水压力聚集,说明该范围为正常区域固结沉降的主要土层,由图1可知该范围分布土层为透水性较差的淤泥质粘土层及粘土层,25 m以下因分布有粉砂土,超静孔隙水压力相对易消散;古河道区超静孔隙水压力大约在10~35 m范围形成聚集区,且超静孔隙水压力比



(a) Normal region



(b) Old river region

图6 不同时间孔隙水压力沉降沿深度分布曲线

Fig. 6 Pore water pressure curves along depth at different time

正常区域数值大,由图1可知该范围分布土层为透水性较差的淤泥质粘土层及粘土层,表明中部层组厚度明显影响古河道区固结沉降量。由上分析可知,正常堆载区域的明显影响深度约为25 m,古河道区则大于35 m,这与土层分层沉降分析结果一致。

超静孔隙水压力大小与堆载体增量及作用时间密切相关,由图6可知随堆载两区域各土层超静孔隙水压力迅速增大,并于完成堆载时达到峰值,此后逐渐消散,与地表沉降随规律较为一致。此外,超静孔隙水压力前期消散较快,后期消散缓慢,原因是前期土体孔隙相对较大,积聚的超静孔隙水压力可以借助排水板迅速消散,随着孔压消散,土体固结,孔隙逐渐变小,孔压消散变困难,这与地表沉降后期沉降速率较为缓慢结果一致。超静孔隙水压力峰值一般发生在透水性差的淤泥质粘土及粘土层,较浅部土层由于土层渗透性相对较大,且因布设塑料排水板,超静孔隙水压力相对消散较快。

3 工后差异沉降分布规律

3.1 工后沉降预测模型

过大的工后差异沉降必将破坏跑道结构,影响其正常运营,因此有必要基于沉降监测结果对深厚软基的工后沉降进行预测,从而确定跑道软基差异沉降及差异沉降率分布特征。

工后沉降预测是一个比较复杂的高度非线性土体变形问题,常采用显式函数对工后沉降进行回归分析,提取函数的拟合参数预测工后总沉降^[15]。为此本文选用工程实践中常用的双曲线法、指数曲线法、Peal 曲线法和 Gompertz 曲线法等来探讨五跑道陆域工后沉降合理预测模型。

现以陆域正常区域 128 点为例,介绍上述预测方法的有效性及其工后沉降求解过程,预测模型及其回归参数见表 1 和图 7。

表 1 回归模型及参数

Tab. 1 Regressive models and parameters

模型	数学表达式	回归参数
双曲线	$S_t = t / (\alpha + \beta t)$	$\alpha = 1.63 \times 10^{-1}$ $\beta = 5.89 \times 10^{-4}$
指数曲线	$S_t = S_\infty - \alpha \exp(-\beta t)$	$S_\infty = 9.86 \times 10^2$ $\alpha = 1.23 \times 10^3$ $\beta = 8.44 \times 10^{-3}$
Peal 曲线	$S_t = L / (1 + A * e^{-Bt})$	$L = 8.76 \times 10^2$ $A = 2.66 \times 10^1$ $B = 3.18 \times 10^{-2}$
Gompertz 曲线	$S_t = e^{k+a * b^t}$	$k = 6.83$ $a = -5.69$ $b = 0.98$

由沉降拟合曲线及拟合相对误差分析可知,Gompertz 曲线拟合效果最为理想,到监测数据后期,Gompertz 函数计算误差小于 1.4%。另据验证,Gompertz 函数曲线同样适合拟合陆域正常区域其他监测点及古河道区域监测点的沉降时间关系,因此可以借助 Gompertz 函数预测处理后软基的工后沉降量。

3.2 工后沉降及不均匀沉降分析

差异沉降率指两沉降观测点之间的差异沉降与两点间距离的比值。《民用机场岩土工程设计规范》规定跑道在设计使用年限内,工后沉降应控制在 0.2~0.3 m,沿纵向工后差异沉降率应控制在 1.0‰~1.5‰^[16]。由于测数据时间有限,无法持续观测整个使用年限内的沉降量,因此借助 Gompertz 函数预测陆域跑道或联络道沿纵向工后沉降值及工后差异沉降率分布特征,如图 8,9 所示。

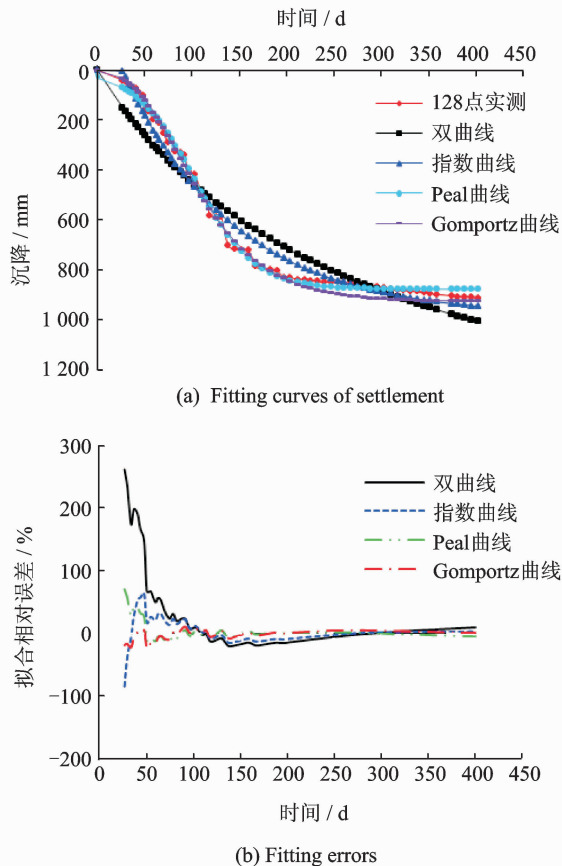


图 7 工后沉降拟合函数及拟合误差

Fig. 7 Fitting curves and errors of post-construction settlement

由图 8 可以看出,采用塑料排水板超载预压处置后的深厚软基,正常区域工后沉降均小于规范要求的 0.2~0.3 m。具体表现为,沿跑道中心线随距离增大工后沉降量呈波动变化,稳定在 40~80 mm 范围,波动变化主要受软基地层起伏的影响。而陆域古河道区域的联络道,其中间部分工后沉降小于两侧,形成“波谷”,这可能是联络道两侧地层有较厚粘土层发育,而设计超载或塑料排水板长度不足,导致其加固程度有限;整体而言,古河道区域工后沉降均小于 0.3 m,但受施工工艺及主要压缩层厚度分布差异的影响,出现小部分地段工后沉降大于 0.3 m;联络道工后沉降量分布变化规律基本一致。

图 9 表明,采用该施工工艺对深层地基进行处置,陆域正常区域跑道中心线差异沉降率集中分布于 -0.5‰~0.5‰ 范围,稳定控制在 1.5‰ 以内。为统计方便,差异沉降率是从较小数值监测点开始,总是以某测点相邻较大数值监测点沉降减去该测点的沉降,因此会出现负值。古河道区域由于中间工后沉降量明显小于两侧,导致部分区域工后差

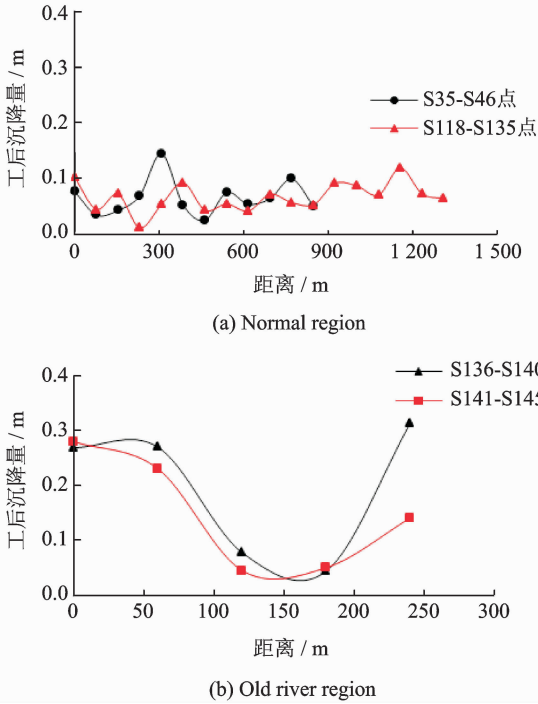


图8 陆域工后沉降分布曲线

Fig. 8 Distribution curves of post-construction settlement

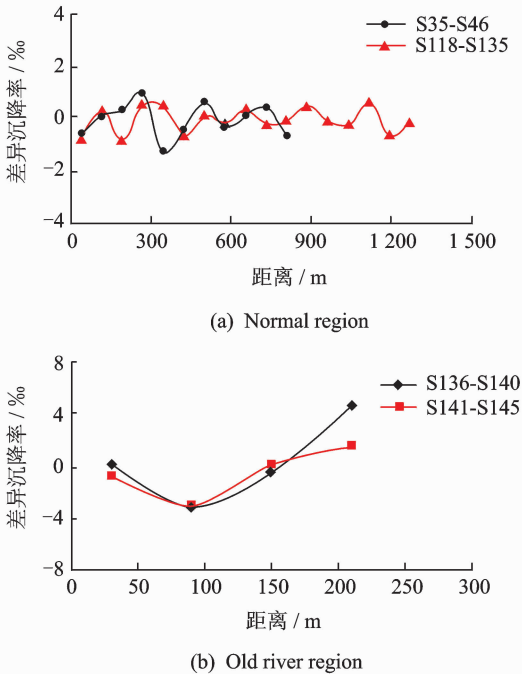


图9 陆域工后差异沉降率分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of differential settlement ratio

异沉降率高于 1.5% ,但联络道大部分区域中心线差异沉降率分布在 1.5% 以内。

通过上面分析发现,采用塑料排水板超载预压对陆域深厚软基进行处理,工后沉降及差异沉降率可以满足规范要求,但同时对于古河道分布区域也

存在工后沉降及差异沉降偏大的情况,因此,对有古河道分布区域,应按中部层组厚度分布变化情况,适当增加超载、塑料排水板布设深度或布置间距。

4 结 论

本文通过对浦东机场跨古河道陆域第五跑道深厚软基沉降分布变化规律分析,得到以下结论:

(1) 古河道区沉降规律不同于正常区;受古河道分布影响,陆域深厚软基工后沉降量增大,软基沉降速率及分层沉降分析表明,古河道区域沉降稳定相对正常区域滞后。

(2) 地表沉降随时间变化规律及土层分层沉降时空变化规律表明,塑料排水板超载预压处理后的跑道软基工后存在不均匀沉降,深厚软基沉降量及沉降速率的差异,是产生不均匀沉降的主要原因。

(3) 超静孔隙水压力变化规律与地表沉降及分层沉降变化规律一致,揭示中部层组土层是固结沉降的主要土层,古河道区因厚度较大粘土层发育,导致沉降量增大。

(4) 工后沉降及差异沉降分析表明,采用塑料排水板堆载预压对跑道软基深层处理,工后沉降量及差异沉降率基本满足规范要求;但对古河道分布区域,应按压缩层厚度分布变化情况,适当增加超载、塑料排水板布设深度或布置间距。

参考文献:

- [1] 吕子鑫,张福海,王保田,等. 塑料排水板在吹填土地基沉降控制中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2012,10(5):116-119.
Lü Zixin, Zhang Fuhai, Wang Baotian, et al. Application of plastic drain in controlling for dredgerfill foundation settlement [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012,10(5):116-119.
- [2] 谢新宇,朱向荣,潘秋元,等. 舟山机场跑道软基超载预压加固效果分析[J]. 土木工程学报, 2000, 3(6): 60-65.
Xie Xinyu, Zhu Xiangrong, Pan Qiuyuan, et al. Effects of Zhoushan airport runway improved by surcharge precompression combined with vertical drains [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 3(6): 60-65.
- [3] 甘厚义,周虎鑫,林本銮. 关于山区高填方工程地基处理问题[J]. 建筑科学, 1998, 14(6): 16-22.
Gan Houyi, Zhou Huxin, Lin Benlun. Research into the treatment of high filled-up ground with large

- stones in mountain areas[J]. *Building Science*, 1998, 14(6):16-22.
- [4] 顾强康, 李宁, 黄文广. 机场高填土地基工后不均匀沉降指标研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3865-3870.
Gu Qiangkang, Li Ning, Huang Wenguang. Research on differential settlement index of high-filled subgrade after construction in mountainous airport[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3865-3870.
- [5] Liu G B, Ng C W W, Wang Z W. Observed performance of a deep multi-strutted excavation in Shanghai soft clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2005, 131(8): 1004-1013.
- [6] Ou C Y, Liao J T, Lin H D. Performance of diaphragm wall constructed using the top-down method[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1998, 124(9): 798-808.
- [7] 杨阳, 徐超, 徐兴华, 等. 塑料排水板堆载预压处理道路软基的数值模拟[J]. *勘察科学技术*, 2012(1): 1-4.
Yang Yang, Xu Chao, Xu Xinghua, et al. Numerical simulation on soft foundation treated by heaped-preloading with plastic drainage plate[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2012(1): 1-4.
- [8] Wang J H, Xu Z H, Wang W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2010, 136(7): 985-995.
- [9] Koutsofas D C. Geotechnical investigations offshore Hongkong[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1987, 113(2): 87-105.
- [10] 谢永利, 顾安全. 澳门机场跑道软基沉降的有限元分析[C]//第四届全国地基处理学术讨论会论文集. 龚晓南等主编. 杭州: 浙江大学出版社, 1995: 134-139.
Xie Yongli, Gu Anquan. Finite element analysis of the soft foundation subsidence of the Macao airport runway[C]// Proc of the 4th National Ground Improvement Academic Seminar. Gong Xiaonan, et al Ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1995: 134-139.
- [11] 周红波, 卢剑华, 蒋建军. 动力排水固结法加固浦东机场促淤地基试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(11): 1779-1784.
Zhou Hongbo, Lu Jianhua, Jiang Jianjun. Test study on reclaimed land of Pudong airport improved with dynamic and drain consolidation method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(11): 1779-1784.
- [12] 叶观宝, 高彦斌. 地基处理[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ye Guanbao, Gao Yanbin. Ground improvement [M]. The third edition. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [13] 中华人民共和国行业标准. JGJ 79—2012. 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
The Professional Standards of People's Republic of China. JGJ 79—2012. Technical code for building foundation improvement[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.
- [14] 刘勇健, 李彰明, 张丽娟. 动力排水固结法在大面积深厚淤泥软基加固处理中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 4000-4007.
Liu Yongjian, Li Zhangming, Zhang Lijuan. Application of dynamic drainage consolidation method to reinforcement and treatment of deep and thick silt foundation of large area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 4000-4007.
- [15] Chen Yuanzhao, Cao Henghui, Li Zhenxia. Prediction of post-construction settlement based on parameter inversion of soft soil foundation[C]// ICCTP 2010. Beijing, China: ASCE, 2010: 3423-3428.
- [16] 中国民航机场建设集团公司. MH/T 5027—2013. 民用机场岩土工程设计规范[S]. 北京: 中国民航出版社, 2013.
China Airport Construction Group Corporation. MH/T 5027—2013. Code for geotechnical engineering design of airport[S]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2013.

