

文章编号: 1007-2993(2021)06-0365-08

# 某工程厚层红黏土素填土处理方案优化设计

薛 祥 侯东利 马秉务  
(北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

**【摘要】** 近年来,在场地形成后平台上进行工程建设的项目越来越多,因设计施工考虑不周导致的工程问题常有发生。结合工程实际情况及施工作业条件,对常用地基处理方法、施工工艺、造价及工期等进行综合对比研究和优化后,最终采用换填羊矸石及水稳料等处理方法,解决了某工程厚层红黏土素填土处理难题。换填处理设计时,采用了  $e-p$  曲线法、考虑应力历史的  $e-lgp$  曲线法,同时结合工程实际工况采用基于三轴  $K_0$  固结变形曲线法等估算换填处理后地基变形,解决了欠固结土、超固结土及非饱和土固结度估算等复杂条件下沉降和工后沉降估算困难的问题,为设计方案提供了理论和经验支持。设计方案成功实施后,节约直接成本 300 余万元,缩短了工期,该红黏土素填土处理设计思路和变形估算方法,具有较强的实践参考价值。

**【关键词】** 红黏土素填土;地基处理;优化设计;场地形成;沉降;工后沉降

**【中图分类号】** TU 433

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2021.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Ground Treatment Optimization Design of Thick Red Clay Fill in a Project

Xue Xiang Hou Dongli Ma Bingwu  
(BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

**【Abstract】** In recent years, more and more projects are carried out on the platform after the formation of the site. Engineering problems often occur due to improper design and construction. Combined with the actual situation and construction conditions of the project, after comprehensive comparative study and optimization of common foundation treatment methods, construction technology, cost and construction period, the treatment methods such as replacement of sheep gangue and water stabilized materials were finally adopted to solve the problem of thick red clay plain fill treatment of a project. In the design of replacement treatment,  $e-p$  curve method and  $e-lgp$  curve method considering stress history were adopted. At the same time, combined with the actual working conditions of the project, the foundation deformation after replacement treatment was estimated based on triaxial  $K_0$  consolidation deformation curve method, which solves the difficult problems of settlement and post construction settlement estimation under complex conditions such as consolidation degree estimation of under-consolidated soil, over-consolidated soil and unsaturated soil. It provides theoretical and empirical support for the design scheme. After the successful implementation of the design scheme, the direct cost of more than 3 million Yuan was saved and the construction period was shortened. The design idea and deformation estimation method of red clay plain fill treatment have strong practical reference value.

**【Key words】** red clay fill; foundation treatment; optimization design; site formation; settlement; post-construction settlement

### 0 引言

近年来,在工程建设过程中,屡屡出现工程建成后室内地坪下沉、开裂及墙体裂缝等现象。此外,为充分利用有限土地资源,在工程建设前进行场地形成(地形改造、堆填整平)后开展工程建设的项目越来越多,由于前期设计施工考虑不当,导致后期处理困难及投资增加,甚至因回填土局部或大面积下沉造成地坪面层空鼓、开裂及塌陷破坏,导致后期墙体开裂、

管线系统破坏、设备无法运行等众多工程事故,给建筑运营阶段造成了重大经济损失。如宁波市宁海县宁东区某 2012 年建成厂房<sup>[1]</sup>, 框架结构, 桩基础, 厂房地坪没有采取处理措施, 因建筑场地整体回填杂填土厚约 2.5 m, 外加下部为软弱地基, 导致设备尚未安装就位, 厂房室内素混凝土地坪便产生了明显的盆形沉降, 严重处室内混凝土地坪已同地基脱开; 2014 年国家某 I 级铁路近 4000 m<sup>2</sup> 的某站房<sup>[2]</sup>, 房心土回

**作者简介:** 薛 祥, 男, 1979 年生, 白族, 贵州大方人, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土)、一级结构注册工程师, 主要从事岩土工程设计、勘察及相关研究工作。E-mail: snowmatic@126.com

填(最厚约6 m)完工6个月后观测到站房地面基层混凝土局部开裂并下沉,沉陷深度最大达12 cm左右;上海某仓库软土上厚层新近填土出现较大的地面沉降以及差异沉降的问题而不得不采用预制方桩对结构加固<sup>[3]</sup>。2019年辽宁东港市某医院(房心填土厚度约2 m)正在使用的门诊大厅等室内地坪出现大面积下沉且越来越严重,严重影响医院正常运营。此类事件不胜枚举,因此应在勘察设计施工阶段应进行合理的处置,避免后期出现工程及运营问题。

根据地基处理的加固原理,地基处理方法主要有置换、排水固结、灌入固化物、振密挤密、加筋和冷热处理等六类<sup>[4-5]</sup>。随着新型城镇化建设的进展,将开展更多的挖山造地项目,而地基处理理论研究落后于工程实践<sup>[6]</sup>,特殊性岩土的地基处理理论更是缺乏。山区半挖半填工程、大面积深厚填土工程地基处理方法日趋复杂<sup>[7-9]</sup>。由于处理对象的复杂化,近年来也出现了较多的组合地基处理方案,如陈建民等<sup>[10]</sup>将强夯与CFG桩复合地基组合处理超深回填砂石坑,豆红强等<sup>[11]</sup>采用刚柔组合桩复合地基处理基底为厚层淤泥质土的高21.6 m填方路基,并进行了优化设计,将其较高抗弯及抗剪强度的刚性桩布设在超高填方路堤潜在的滑裂面剪入口或剪出口位置,其余位置布置造价较低的柔性桩,增加了路堤的稳定性及安全性,同时又兼顾工程造价经济合理。地基处理不仅要解决好地基承载力问题,地基沉降和差异沉降问题往往是导致工程后期运营阶段出现问题的关键,尤其是工后沉降。韩乾坤等<sup>[12]</sup>对采用碎石桩处理的复合地基的沉降规律和应力变化进行了现场监测,得到了路堤施工过程中及施工完成后的地基沉降,研究了路堤在施工过程中与工后的地基沉降规律和现场施工条件下复合地基沉降变形影响因素。卢谅<sup>[13]</sup>采用置换减载与加筋复合处理方法对路基不均匀沉降控制效果进行了研究,针对不同的处理对象取得了较好的效果。除了地基承载力和沉降,地基的稳定性也相当重要。来春景<sup>[14]</sup>研究了黄土丘陵沟壑区高填方建设场地变形与稳定性。由于地基处理理论发展的相对滞后,近年来有限元分析方法也在地基处理沉降、差异沉降和稳定性分析等方面获得了一定的应用,定性地指导了工程设计中的工程判断。王发玲等<sup>[15]</sup>利用Midas GTS有限元软件分别对采用分能级强夯+DJP桩+注浆的变刚度复合地基处理和采用强夯进行同刚度地基处理的效果进行数值分析对比研究,较好地指导了工程设计。

岩土工程的独特性要求相应处理措施具有很高

的针对性,且往往是工程实践先行而理论研究才逐步完善。本文基于某工程大面积厚层房心红黏土素填土案例,结合地方工程经验、现场实际情况、地层地下水、沉降及工后沉降估算、施工工艺及检测因素等对其地基处理进行优化设计,为类似工程实践或理论研究提供参考。

## 1 某工程房心土问题及处理方案优化

### 1.1 工程问题

某地上1F医药厂房工程位于云南省昆明市,总建筑面积约 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,采用桩基础。项目位于浅山区,地势高低不平,详细勘察前已进行了场地形成工作(挖填整平至设计正负零标高),一般填筑厚度2.0~6.4 m,局部厚度7.9 m,典型填筑厚度等值线图见图1(局部)。由于房心填土较厚且厚薄不均,且填筑时间短(约1年),填筑质量不可控,欠固结,在自重固结、地下管道渗漏或地表水下渗时易发生沉陷,需处理。建设单位发现需进行房心土处理时,拟建场地桩基及承台梁工程已基本完成,承台底埋深-2.0~-2.5 m。

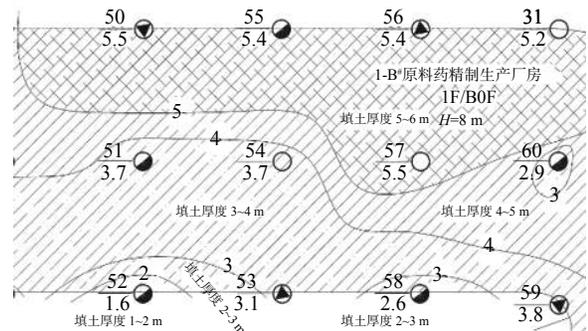


图1 典型填筑厚度等值线图

### 1.2 地基处理方案优化及存在的问题

类似工程常采用挤密桩和非挤密桩复合地基、微型桩或迷你桩(Minipiles)复合地基、注浆加固及换填处理等方案。结合工程实际情况,经反复研究和对比分析,形成方案比选分析成果(见表1)。综合表1中各处理方案的适宜性及优缺点、施工可行性、工期及造价等因素,最终确定了换填处理方案。采用换填处理方案时,结合填土厚度空间分布及桩基工程承台埋深等情况,拟采用换填部分厚度方案,即换填厚度一般为1.6~2.1 m,一方面消除换填部分原填土本身的固结沉降,另一方面换填后形成2.1 m厚刚性硬层(换填1.6 m厚部分已换填至老土层),以调节不均匀沉降。换填材料根据既有承台梁及承台疏密情况、施工设备及工艺保证等选择羊研石或水稳料,施工作业面小的区域采用水稳料换填至承台顶标高,施工作

业面具备的区域采用羊矸石换填至承台顶标高, 然后统一采用羊矸石换填至设计标高。根据已有勘察、补充勘察及上述设计方案分析, 换填后场地内仍存在大面积填筑厚度不均匀的未换填掉的填土(如 1#楼一般剩余厚度 0.0~3.0 m, 局部 3.1~3.9 m), 且原地面下分布约 5~10 m 厚的压缩性较高的黏土, 因此仍会产生沉降和不均匀沉降, 主要有两个方面: 一是人工填土(高填方区最大厚度约 6.4 m, 相当于压力

$P$  约 115 kPa) 作为荷载对其下原状红黏土②、黏土③层甚至黏土混碎石④层土产生压缩, 由于土层厚度的不均, 虽已预压近一年, 但仍存在一定的后期沉降和差异沉降。二是虽经换填的 1.6~2.1 m 人工填土可不考虑其本身沉降, 但其下未进行换填的部分仍会产生一定的沉降和差异沉降。需充分考虑上述两部分主固结沉降和工后沉降, 以评估换填处理效果和指导其它相关设计(地坪或管道等)。

表 1 地基处理方案优选分析

处理方案	处理方法	适宜性	施工可行性	优点	缺点	工期	预估造价
挤密桩复合地基	碎石挤密桩、沉管砂石桩、土或灰土挤密桩		受桩基及承台梁的影响, 设备选型困难, 施工难度大、施工辅助费用高	有效挤密房心土, 改善不均匀性, 降低固结沉降量	设备选型困难, 施工难度大, 辅助费用高; 挤土效应对既有桩基承台及基桩影响较大, 严重可能引起断桩, 后期检测、评估费用较高	45~60 d, 较长, 不满足建设单位需求	600~700万
非挤密桩复合地基	水泥土搅拌桩、旋喷桩、CFG桩		水泥土搅拌桩及 CFG 桩受桩基及承台梁的影响, 设备选型困难, 施工难度大、施工辅助费用高; 旋喷桩基本可行	承载力高, 地坪与桩共同作用后工后变形小	施工设备占地面积大、占地空间高、辅助措施费用较高; 施工周期较长, 检测费用较高; 不能解决桩间填土后期的沉降问题, 导致地板与桩间土或褥垫层脱空, 需预留注浆管等后期进行注浆加固辅助措施	水泥土搅拌桩及 CFG 桩较长, 不满足建设单位需求; 旋喷桩基本可满足	旋喷桩 800 万以上, 其它 500 万以上
微型桩复合地基	微型素混凝土桩、树根桩、预制桩、注浆钢管桩	仅从场区工程与水文地质条件来看, 适宜可行	设备轻便简单, 施工可行	作业空间灵活, 受限小, 对基桩工程影响较小	工程量极大, 工期和成本较高; 不能解决桩间填土后期的沉降问题, 导致地板与桩间土或褥垫层脱空, 需预留注浆管、后期进行注浆加固辅助措施; 检测费用较高	工期较长, 但能满足作业空间受限问题	600~800万
注浆加固	水泥浆液、硅化浆液和碱液		设备轻便简单, 施工可行	基本可行, 作业空间灵活, 不受限, 对基桩工程有利	对本工程大面积处理情况, 工程量极大, 成本较高; 注浆加固效果(均匀性)难以控制; 需多次注浆; 加固后存在的隐患难以发现; 费用较高且难以控制。需预留注浆管、后期进行注浆加固辅助措施	工期长, 但能满足作业空间受限问题	600 万以上(不可控)
换填处理	分层换填夯实级配、水泥土、羊矸石等		设备轻便, 施工可行, 作业空间灵活, 不受限, 对已施工基桩工程影响较小	质量及检测可控, 就地取材, 费用低	预估后期沉降困难; 不能采用大型碾压设备, 施工稍受限制; 对未换填部分需进行夯实, 影响深度小	不影响上部结构的施工, 工期有保证	300~400万

## 2 高填方区地基沉降估算

预压荷载下地基的变形包括瞬时变形、主固结变形和次固结变形三部分。次固结变形大小和土的性质有关。该工程房心土填垫已经完成、原自然地面下天然土层部分瞬时变形已经发生, 若忽略次固结变形, 则只剩余主固结变形。

对大面积荷载下的主固结变形, 工程上通常采用单向压缩分层总和法计算, 只有当荷载面积的宽度或直径大于受压土层的厚度时才较符合计算条件, 否则应对变形计算值进行修正以考虑三向压缩的效应。

但研究结果表明, 对于正常固结或稍超固结土(本工程填土下的天然地基土)地基, 三向修正是不重要的, 因此, 仍按单向压缩计算。沉降估算主要是考虑人工填土作为荷载对其下原状黏性土产生压缩及其下未进行换填的部分(平均约 3.0 m)产生压缩的总和, 并考虑土的欠固结、超固结及非饱和土的固结度等问题。由于计算较为复杂且无成熟经验及公式, 为使得计算结果更为可靠, 拟现采用  $e-p$  曲线法<sup>[16]</sup>、考虑应力历史的  $e-lgp$  曲线法<sup>[4]</sup> 及基于三轴  $K_0$  固结沉降曲线估算的方法对场区的典型不利位置沉降进行估算。

2.1 红黏土素填土物理力学性质

场地勘察揭示房心土为红黏土素填土①层,褐红、褐黄色,稍湿,松散—稍密状,以黏性土为主,局部含少许植物根系,土体结构松散,土质不均匀,欠固结,强度低。该土为场区地面整平时人工填筑而成,属新近填土。所有钻孔均有揭露,揭露层厚0.3~8.2 m,平均层厚3.35 m。换填处理后典型地层见图2。

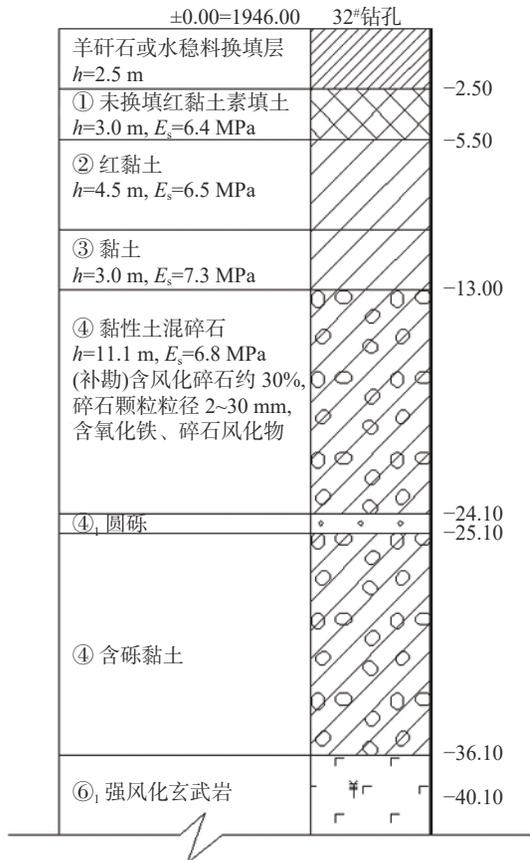


图2 典型地层

2.2 e-p 曲线法

预压荷载下地基最终竖向变形量的计算可取附加应力与土自重应力的比值为0.2的深度作为压缩层的计算深度,总变形可按式(1)计算:

$$s_f = \xi \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i = \xi \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{si}} h_i \quad (1)$$

式中:  $s_f$  为最终竖向变形量, m;  $e_{0i}$  为第  $i$  层中点土自重应力所对应的孔隙比, 由室内固结试验  $e-p$  曲线查得;  $e_{1i}$  为第  $i$  层中点土自重应力与附加应力之和所对应的孔隙比, 由室内固结试验  $e-p$  曲线查得;  $h_i$  为第  $i$  层土层厚度, m;  $\xi$  为经验系数, 可按地区经验确定, 无经验时正常固结饱和黏性土地基可取  $\xi=1.1 \sim 1.4$ ; 荷载较大或地基软弱土层厚度大时应取较大值。

根据上述方法, 1#楼(最大换填厚度 2.5 m)及 4#楼(最大换填厚度 1.2 m)过程及成果见表 2。表中红黏土②、黏土③层沉降计算经验系数( $\xi$ )为经验值。

根据表 2, 1#楼从堆载至最终的最大总沉降  $s_f = \sum s_i = 47.3 + 48.0 + 28.5 = 123.8$  mm。4#楼的最大总沉降  $s_f = \sum s_i = 146.2 + 35.4 + 65.5 = 247.1$  mm。

2.3 考虑应力历史的 e-lgp 曲线法

根据勘察成果, 场地红黏土②层及黏土③层均为超固结土, 红黏土素填土①层为欠固结土。对于超固结土, 其沉降计算应考虑应力历史, 分两个阶段进行: 第一阶段为当压力  $P$  小于先期固结压力  $P_c$  时, 按再压缩段(或回弹段)线性直线段计算, 其斜率为  $C_s$ ; 第二阶段为当压力  $P$  大于先期固结压力  $P_c$  时, 按正常固结的原始压缩段直线段计算。

(1) 当超固结土层中的  $p_{0i} + p_{zi} \leq p_{ci}$  时, 该土层的固结沉降量可按式(2)估算:

$$s_i = \frac{h_i}{1 + e_{0i}} C_{si} \log \left( \frac{p_{zi} + p_{0i}}{p_{zi}} \right) \quad (2)$$

式中:  $s_i$  为第  $i$  层土的固结沉降量, mm;  $h_i$  为第  $i$  层土的平均厚度, mm;  $e_{0i}$  为第  $i$  层土的初始孔隙比平均值;  $C_{si}$  为第  $i$  层土的回弹再压缩指数(回弹指数)平均值;  $p_{zi}$  为第  $i$  层土的有效自重压力平均值, kPa;  $p_{0i}$  为对应于荷载效应准永久组合时, 第  $i$  层土的有效附近压力平均值, kPa;  $p_{ci}$  为第  $i$  层土的先期固结压力平均值, kPa。

表 2 e-p 曲线法沉降计算

楼座	土层层号	土层厚度 $h_i$ /mm	压缩模量 $E_{s100-200}$ /MPa	$\Delta p_i$ , kPa	$\frac{(p_i)}{E_{si}} h_i$ /mm	经验系数 $\xi$	$s_i$ /mm
1#楼	①红黏土素填土	3.0	5.6	88.3	33.8	1.4	47.3
	②红黏土	4.5	6.5	115.3	80.0	0.6	48.0
	③黏土	3.0	7.3	115.3	47.5	(非饱和土)	28.5
4#楼	①红黏土素填土	6.7	5.6	87.3	104.4	1.4	146.2
	②红黏土	2.6	6.5	147.6	59.0	0.6	35.4
	③黏土	5.4	7.3	147.6	109.2	(非饱和土)	65.5

(2)当超固结土层中的  $p_{0i}+p_{zi}>p_{ci}$  时,该土层的固结沉降量可按式(3)估算:

$$s_i = \frac{h_i}{1+e_{0i}} \left[ C_{si} \log \left( \frac{p_{ci}}{p_{zi}} \right) + C_{ci} \log \left( \frac{p_{zi}+p_{0i}}{p_{ci}} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $C_{ci}$  为第  $i$  层土的压缩指数平均值。

对于超固结土,沉降计算采用上述方法,参数见表3,对欠固结土红黏土素填土①层,采用2.2节估算方法。综合计算成果见表4。1#楼从堆载至最终的总沉降  $s_f = \sum s_i = 47.3+18.7+13.3=79.3$  mm; 4#楼从堆载至最终的最大总沉降

$$s_f = \sum s_i = 146.2+15.6+30.1=191.9 \text{ mm}$$

表3 超固结土沉降计算相关参数

土层号	先期固结压力 $P_c$ /MPa	压缩指数 $C_c$	回弹指数 $C_s$	超固结比OCR	固结系数 $C_v$ /( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )	初始孔隙比 $e_{0i}$
②红黏土	214.0	0.300	0.016	2.030	$5.08 \times 10^{-3}$	1.26
③黏土	240.4	0.488	0.033	1.924	$4.58 \times 10^{-3}$	1.35
④含碎石黏土	282.4	0.319		1.769		1.07

表4 e-lgp 曲线法沉降计算

楼座	土层号	土层厚度 $h_i$ /m	初始孔隙比平均值 $e_{0i}$	$p_{0i}$ /kPa	$p_{zi}$ /kPa	回弹指数 $C_s$	$s_i$ /mm
	①红黏土素填土						47.3(表2)
1#楼	②红黏土	4.5	1.26	115.3	40.5	0.016	18.7
	③黏土	3.0	1.35	115.3	108	0.033	13.3
	①红黏土素填土						146.2(表2)
4#楼	②红黏土	2.6	1.26	142.2	23.4	0.016	15.6
	③黏土	5.4	1.35	142.2	95.4	0.033	30.1

## 2.4 基于三轴 $K_0$ 固结变形曲线估算的方法

本工程采用换填地基处理时,原天然土层上已进行了填筑,填筑时间约1年,详勘与补勘均在场平后进行,即沉降计算不是从加载(填筑)时间零点计算,详勘与补勘阶段获得的计算参数与沉降计算工况不一致,这将带来沉降估算误差。为了更好地估算沉降、沉降随时间的发展关系及工后沉降,本工程采用室内三轴压缩试验,模拟现场实际填筑堆载过程及工况,获得围压状态下的土样固结随时间变化的关系,由此来估算红黏土②层及黏土③层的最终沉降及工后沉降。

### 2.4.1 三轴 $K_0$ 固结变形曲线

试验通过常规固结仪和三轴固结仪两种方法求取试样的静止侧压力系数( $K_0$ ),以确定三轴固结压缩试验的围压。经试验及对比分析,本工程沉降变形估算采用三轴固结仪确定静止侧压力系数的固结压缩的方法进行。三轴  $K_0$  固结变形部分典型时间对数曲线见图3。

由图3,施加围压后及轴压后,土样在短时间(1~2 min)内基本完成了瞬时变形,因为加载相当于现状土样自重压力,这个变形主要为取样卸载引起的弹性变形。根据试验成果,这个瞬时变形约0.42~

4.85 mm,与土样扰动情况、密实度、含水率等有关。瞬时变形发生后,土样在现状荷载下(大面积堆载)的固结开始进行,直至变形稳定。

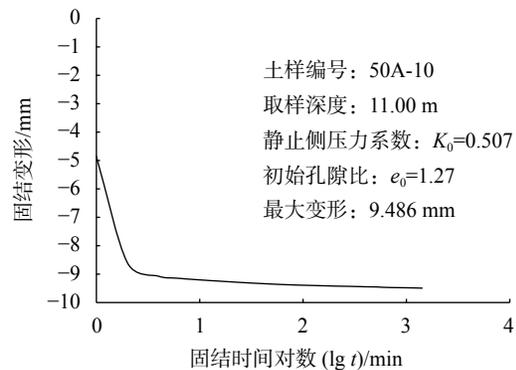


图3 典型  $K_0$  固结变形曲线

### 2.4.2 变形估算

根据固结原理,计算公式如下:

$$e_i = e_0 - \frac{1+e_0}{h_0} \Delta h_i \quad (4)$$

$$s_f = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1+e_{0i}} h_i \quad (5)$$

根据土样三轴固结变形曲线,剔除异常曲线成果,扣除瞬时变形后,相关地层沉降的计算过程及结

果见表5。结合工程经验分析,②红黏土沉降取大值,则有1#楼从堆载至最终的总沉降为  $s_f = \sum s_i = 47.3 + 47.2 + 35.9 = 130.4 \text{ mm}$ ;

4#楼从堆载至最终的最大总沉降:  
 $s_f = \sum s_i = 146.2 + 27.3 + 64.0 = 237.5 \text{ mm}$

表5  $K_0$  固结曲线法沉降计算过程及成果

楼座	土层号	土样编号	土层厚度 $h/m$	卸荷状态下孔隙比 $e_0$	自重压力下初始孔隙比 $e_0$	固结稳定后的孔隙比 $e_1$	$s/mm$
	①红黏土素填土		3.0				47.3(表2)
1#楼	②红黏土	32A-7	4.5	1.30	1.094	1.072	47.2
		50A-8		1.26	1.185	1.175	21.5
	③黏土	50A-10	3.0	1.27	1.026	1.002	35.9
	①红黏土素填土		6.7				146.2(表2)
4#楼	②红黏土	32A-7	2.6	1.30	1.094	1.072	27.3
	③黏土	50A-10	5.4	1.27	1.026	1.002	64.0

### 3 工后沉降

由于本工程房心土采用换填处理时,原天然土层已进行了填筑,填筑时间约1年,实际现场土体(原天然土及新近填筑红黏土素填土①层)已发生了部分沉降,为了建设、设计及施工单位更可靠地评估房心土换填处理后的工后沉降,指导后期设计和施工,需估算工后沉降。

#### 3.1 非饱和土固结度估算

由于场地土为非饱和土,其固结度计算相当复杂,且理论尚不成熟,本工程结合  $K_0$  固结变形曲线、类似工程实测沉降曲线及工程经验进行综合分析估计。一般来说,大面积荷载施加后,土体孔隙中的气体可立即压缩或溶解于水,水渗流和土骨架变形,产生瞬时沉降。随着孔隙气的排除和孔隙水的渗流,土骨架进一步压缩,非饱和土较饱和土相对较快地进行固结沉降至稳定状态。由于试验室进行的是饱和后

的土的  $K_0$  固结,因此,对现场土体采用饱和状态的物理指标来估算固结度,是偏于安全保守的。相同固结度的情况下,现场土固结1年(365 d)的固结状态(固结度),相当于试验室固结的时间  $t(\text{min})$  可按式(6)估算:

$$T_v = \frac{C_v t_1}{H_1^2} = \frac{C_v t_2}{H_2^2} \quad (6)$$

式中:  $H_1$  为室内试验土样的试验高度,80 mm,双面排水;  $H_2$  为现场土层厚度,mm,按单面排水考虑;  $t_1$  为室内试验在与现场土层相同固结度的固结时间, min;  $t_2$  为现场土层已固结时间,本工程已固结时间1年,按  $365 \times 24 \times 60 \text{ min}$  考虑。

由式(6),对红黏土②层及黏土③层,现场固结1年相当于室内固结的时间、固结度情况见表6。表中固结度系室内试验获得某一时间点的变形与最终稳定变形的比值。

表6 室内  $K_0$  固结压缩试验估算的土层固结度

土层号	土样编号	土层厚度 $h/mm$	与现场固结1年相同固结度的室内固结时间/min	固结度 $U$	
①红黏土素填土		3000			
		32A-5		0.52	
	②红黏土	32A-7	4500	42	0.96
		50A-7			0.63
	50A-8			0.76	
③黏土	50A-10	3000	93	0.97	

虽三轴  $K_0$  固结试验力求模拟与现场受力状态相一致的固结压缩成果,但由于土样扰动、侧限状态、饱和与排水条件的差异、计算分析模型等因素影响,使得上述分析结果与实际仍有一定的差异。结合已有非饱和土层上与上述填土荷载相当的大面积填土

荷载作用下土层沉降观测及固结度估算成果经验,建议红黏土②层及黏土③层固结1年后的固结度  $U$  取值为0.60。

#### 3.2 场地工后沉降估算

根据2.2—2.4节对场地变形的估算及上述固结

度估算成果,对场地工后沉降估算见表7。

针对1#楼,根据估算成果,拟建场地在场地形成填筑厚度约5.5 m,对浅层(约3.0 m)房心土采用羊矸石、水稳料等进行换填,不考虑深部含碎石黏土的变形,场地工后沉降约41~62 mm。针对4#楼,在场

地形成填筑厚度约7.8 m,对浅层(约1.2 m)房心土采用水稳料进行换填,不考虑深部含碎石黏土及圆砾的变形,场地固结时间1年后的工后沉降约106~124 mm。根据上述估算成果,为设计对管道、设备基础、上部结构及地基基础设计提供了关键依据。

表7 场地工后沉降估算

楼座	计算方法	土层	分层沉降/mm	总沉降/mm	固结度	工后分层沉降/mm	工后总沉降/mm
1#楼	$e-p$ 曲线法	①红黏土素填土	47.3	123.8	0.40	28.4	59.0
		②红黏土	48.0		0.60	19.2	
		③黏土	28.5			11.4	
	$e-lgp$ 曲线法	①红黏土素填土	47.3	79.3	0.40	28.4	41.2
		②红黏土	18.7		0.60	7.5	
		③黏土	13.3			5.3	
	$K_0$ 固结变形估算法	①红黏土素填土	47.3	130.4	0.40	28.4	61.7
		②红黏土	47.2		0.60	18.9	
		③黏土	35.9			14.4	
4#楼	$e-p$ 曲线法	①红黏土素填土	146.2	247.1	0.40	87.7	128.1
		②红黏土	35.4		0.60	14.2	
		③黏土	65.5			26.2	
	$e-lgp$ 曲线法	①红黏土素填土	146.2	191.9	0.40	87.7	105.9
		②红黏土	15.6		0.60	6.2	
		③黏土	30.1			12.0	
	$K_0$ 固结变形估算法	①红黏土素填土	146.2	237.5	0.40	87.7	124.2
		②红黏土	27.3		0.60	10.9	
		③黏土	64.0			25.6	

注:表中①红黏土素填土固结度为经验值,②红黏土、③黏土固结度为估算值。

#### 4 结论

(1)地基处理需结合丰富的工程经验和判断,根据处理方案的适宜性、施工可行性、处理方案的优缺点、工期及预估造价等进行优选,以确定技术可行、经济合理的处理方案。

(2)场地形成地基处理方案需考虑形成部分、原状地基及处理部分的变形,并应考虑土的应力历史、固结状态,采用适宜的变形计算方法,并宜采用多种方法估算成果进行对比,尤其是经验不足或计算方法缺乏情况(如本案例红黏土素填土),以验证估算成果的可靠性。案例采用 $e-p$ 曲线法、考虑应力历史的 $e-lgp$ 曲线法和基于三轴 $K_0$ 固结变形曲线法估算、对比换填处理后的总沉降和工后沉降,获得了较好的成果。

(3)本文提出的基于三轴 $K_0$ 固结变形曲线估算沉降的方法用于模拟工程实际受力状态(工况),并可

用于估算非饱和土的固结度,以方便估算工后沉降,计算结果与 $e-p$ 曲线法、考虑应力历史的 $e-lgp$ 曲线法相近,对沉降估算结果进行了相互验证,提高了沉降估算成果的可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] 李 钢. 宁波某厂房室内地坪沉降原因分析及处理措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(3): 65-68.
- [2] 石秋丽. 铁路站房室内房心土下沉处置探析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2014, 27(S1): 215-216, 220.
- [3] 蔡永生. 某仓库地面沉降病害分析[J]. 工程质量, 2019, 37(6): 71-74.
- [4] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 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, 2012.

- [6] 化建新, 闫德刚, 赵杰伟, 等. 第七届全国岩土工程实录交流会特邀报告——地基处理综述及新进展[J]. [岩土工程技术](#), 2015, 29(6): 285-300.
- [7] 韩绍英, 赵在立. 大面积软土地基固结处理实例[J]. [岩土工程技术](#), 2016, 30(3): 124-128.
- [8] 魏建华. 大面积软土地基处理技术实践[J]. [岩土工程技术](#), 2015, 29(1): 33-37.
- [9] 刘 渤, 魏海涛, 黎良杰. 北京山区地基处理方法及工程实例[J]. [岩土工程技术](#), 2016, 30(2): 94-99.
- [10] 陈建民. 高层建筑大范围超深回填地基处理技术[J]. [岩土工程技术](#), 2014, 28(5): 237-242.
- [11] 豆红强, 俞仰航, 聂文峰, 等. 超高填方荷载下刚柔组合桩复合地基的加固机理及其优化设计[J]. [中南大学学报\(自然科学版\)](#), 2019, 50(10): 2552-2562.
- [12] 韩乾坤, 李小江, 刘俊新. 碎石桩复合地基沉降及应力现场监测研究[J]. [岩土工程技术](#), 2016, 30(3): 118-123, 139.
- [13] 卢 谅, 石通辉, 杨 东. 置换减载与加筋复合处理方法对路基不均匀沉降控制效果研究[J]. [岩土力学](#), 2019, 40(9): 3474-3482.
- [14] 来春景. 黄土丘陵沟壑区高填方建设场地变形与稳定性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [15] 王发玲, 刘佑祥, 刘忠富, 等. 削山填谷区域复合地基处理技术有限元研究[J]. [勘察科学技术](#), 2019, (6): 14-18.
- [16] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

收稿日期: 2020-12-02

(上接第 364 页)

系统界面友好、操作方便, 用户可快速获得计算数据, 直观展示实际土体情况, 且交互性强、易于扩展, 通过添加、修改控件便可以得到更丰富的操作。可为建设场地土体基本参数的获取提供便利。

## 参 考 文 献

- [1] 刘开富, 谢新宇, 张继发, 等. 软土地基上路堤填筑的破坏性状分析[J]. [岩土力学](#), 2009, 30(7): 2075-2080.
- [2] 梁素华. 浅谈库伦理论在施工中的应用[J]. [山西建筑](#), 2002, (3): 52-53.
- [3] 钱 勇, 杨振花. 水利工程建筑物不良地基的危害与处理技术分析[J]. [建筑技术开发](#), 2019, 46(12): 163-164.
- [4] 李义方. 岩土工程中基于水利工程施工技术的研究[J]. [工程技术研究](#), 2019, 4(16): 125-127.
- [5] 刘金砺. 高层建筑地基基础概念设计的思考[J]. [土木工程学报](#), 2006, (6): 100-105.
- [6] 刘国涛. 软土地基对桥梁隧道施工产生的危害及处理措施[J]. [建筑技术开发](#), 2019, 46(10): 159-161.
- [7] 李小勇, 王海东, 胡雅琪. 基于MATLAB的土力学计算系统开发[J]. [中国高新科技](#), 2017, 11(4): 19-21.
- [8] 王 俭, 孙秀丽, 周太全, 等. 基于MATLAB的土力学试验数据处理新方法[J]. [建筑科学](#), 2012, 28(9): 84-86.
- [9] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005.
- [10] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2001.
- [11] 马海龙. 土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007.

收稿日期: 2020-05-26