

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220718005

黄土高填方地基上部建筑施建控制标准研究*

马云峰^{1,2}, 彭森², 葛苗苗², 朱才辉²

(1. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:黄土高填方地基上部建筑的工后沉降及施建时间问题是目前研究的热点。以某黄土沟壑区新区建设中的高填方工程为背景,基于试验段工后沉降监测结果,运用MIDAS/GTS-NX数值反演分析方法来获取填方土体蠕变力学参数,并针对不同偏心距及施建时间下高层和低层建筑物地基的工后沉降特征开展了系统研究。结果表明:(1)基于实测资料的分层迭代反演分析方法所得填土体参数较准确反应黄土高填方土体的实际受荷状态及上部建筑基础的工后沉降特征。(2)当低层或高层建筑偏心距 $w=0$ m或 $w=221$ m时,局部倾斜最小且均满足局部倾斜 $f<0.002$ 要求,建议低层建筑施建偏心距 $w\geq 157$ m,工后施建时间 $t\geq 1.21$ 年;高层建筑施建偏心距 $w\geq 155$ m,工后施建时间 $t\geq 1.5$ 年。通过本文的研究,可为类似“上山建城”高填方顶部建筑的施建位置及工后施建时间提供科学参考。

关键词:黄土高填方;工后沉降;上部建筑;施建时间;反演分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1415-10

Study on Construction Control Standard of upper Buildings on Loess High Fill Foundation

MA Yunfeng^{1,2}, PENG Sen², GE Miaomiao², ZHU Caihui²

(1. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The post-construction settlement and construction time of the superstructure on the loess high-fill foundation are the focus of current research. Based on the monitoring results of the post-construction settlement of the test section, the MIDAS/GTS-NX numerical inversion analysis method was used to obtain the creep mechanical parameters of the filled soil, and the post-construction settlement characteristics of the high-rise and low-rise buildings under different eccentricities and construction time were systematically studied. The results show that: (1) The parameters of fill material obtained by layered iterative inversion analysis based on measured data reflect the actual loading state of loess high fill and post-construction settlement behaviour of the upper buildings accurately. (2) For low-rise or high-rise building with eccentricity $w=0$ m or $w=221$ m, the local tilt is minimal and all

* 收稿日期:2022-07-18;修回日期:2022-08-20

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2021SF2-02;2022SF-197)、陕西省城市地质与地下空间工程技术研究中心开放性课题(2022KT-01)资助

作者简介:马云峰(1982—),男,高级工程师,硕士。主要从事岩土工程设计与施工等方面研究。E-mail:19793908@qq.com

通讯简介:朱才辉(1983—),男,教授,博士。主要从事黄土力学与工程、地下洞室稳定性分析等方面的研究。

E-mail:zhucaihui123@163.com

meet the requirements of local tilt $f < 0.002$. It is recommended that for low-rise building construction, the eccentricity $w \geq 157$ m and construction time $t \geq 1.21$ years. For high-rise building construction, the eccentricity $w \geq 155$ m, construction time $t \geq 1.5$ years after construction. Through the research of this paper, it can provide scientific reference for the construction location and construction time of high fill top buildings similar to "building a city up the hill".

Keywords: loess high fill; post-construction settlement; upper building; construction time; inversion analysis

0 引言

随着西部大开发战略的快速实施,“中疏外扩、上山建城”的发展战略得到西部地区的大力支持。然而,黄土沟壑区地形复杂,填方高度大多超过100 m,工后沉降量及差异沉降较为显著,在黄土高填方顶部修建的建筑物附加荷载进一步引起填挖方地基产生差异沉降,自陕北某黄土高填方工程自实施以来,引起工程界各方的关注,尤其针对其工后沉降稳定规律及上部建筑物施建时间的探索成为热门课题。关于黄土高填挖方工后沉降规律的研究目前已取得了不少进展。

朱才辉^[1]以山西吕梁机场黄土高填方工程为研究背景,通过对现场监测(施工期、工后期)数据的分析,以现场监测数据、工程勘察报告、室内蠕变试验为手段,应用数值仿真技术建立数值计算模型对工后期填方体沉降稳定进行评价。王现中^[2]通过对贵州双龙航空经济区外环高填方进行原位测试和有限元分析,研究管道-高填方相互作用机理,分析高填方下穿管道的应力,应变及临界失稳预警值,发现管道最大沉降量可达17.3 mm,不均匀差异沉降最大4 mm,内部偏移量最大16.1 mm,均在许可范围以下,管道处于安全状态;陈增^[3]依托西南某水厂水池建设工程,通过室内振动台缩尺模型试验,建立三维数值模型分析不同工况下土体的震动力学响应,研究表明填挖交界面附近为墙体受拉应力最大,可通过设置桩基及换填垫层法减少水池结构位移过大现象,对高填方场地水池结构位移过大地基处理提供了优化改进设计方案。安鹏^[4]依托安康机场罗家河高填方工程,通过对地表与底部涵洞沉降监测建立了考虑填方厚度与沉降时间的膨胀土高填方工后沉降预测模型,研究表明:模型计算值与实测值误差较小仅在12.17%,其中缓升段降雨量

为644 mm,对应膨胀量可达44 mm,为膨胀土工后沉降预测提供了参考。

上述针对高填方的工后沉降规律研究,为进一步探索高填方上部建筑物的变形特征、稳定性评价及控制标准方面的探索提供了宝贵的研究基础。以往的研究中,对于地基上建(构)筑物的变形控制标准,常用最终的沉降量、差异变形、局部倾斜、沉降速率来描述。张永清等^[5]根据路面的结构性和功能性对差异沉降进行控制,根据正交试验设计土体物理参数,依托工程实测数据采用ANSYS有限元分析计算样本,构建BP神经网络模型,结果表明通过灰色关联分析计算与实测值吻合较高,模拟计算精度可靠。文献[6-7]中较多学者认为当挖方与填方路基土的固结沉降差达1.8 cm时,在沥青路面填挖交界处1 m范围内出现贯穿整个路面的破坏区,定义了此沉降差为临界沉降差,提出差异沉降超过2 cm,即坡差大于0.35%时,半刚性基层底面就被拉裂而破坏。

傅珍等^[8]为研究差异沉降对公路稳定性影响,建立有限元差异沉降计算模型,分析不同路基高度,压缩模量拓宽方式及宽度对公路差异沉降影响,最终得出压缩模量从2~10 MPa时,最大差异沉降从20.58 cm降低到5.46 cm,公路路基高度越小,拓宽路基顶面沉降曲线接近“~”形;杨春华等^[9]按连续3个月沉降速率小于3 cm/月的标准控制桥头搭板或一般路基的路面施工,满足工后沉降小于2 cm的高标准要求,张军辉^[10]路基差异沉降控制标准应以路面的功能性指标和结构性指标最低值为准,确定路基加宽工程差异沉降控制标准为:施工期老路差异沉降控制标准为0.25%,加宽后新路差异沉降控制标准为0.20%。刘金亮^[11]提出黄土地区高速公路改扩建工程由于路堤荷载和车辆荷载的作用,地基土的工程性质发生了较大的变化,导致新老路基不可避免的发生差异沉降。

对差异沉降的过渡应满足其渐变率小于0.5%。对超载预压的路段,当有效应力面积比不大于0.75并且预压期超过6个月以上时,按连续两个月的月沉降速率不大于7 mm进行控制。软土及其他类型松软地基上的路基应进行工后沉降分析,路基的工后沉降量应满足要求:Ⅰ级铁路不应大于20 cm,路桥过渡段不应大于10 cm,沉降速率均不应大于5 cm/年;Ⅱ级铁路不应大于30 cm。一般多层建筑物在施工期间完成的沉降量,对于碎石或砂土可以认为其最终沉降量已完成80%以上。《建筑地基基础设计规范》中建筑物的沉降量一般是指建筑地基下的平均沉降量,对于低层建筑结构,其地基变形不得超过 $[S]=120$ mm,对于高层建筑结构,其地基变形不得超过 $[S]=200$ mm,对于低层建筑结构,按照局部倾斜的许可值 $[f]=0.002$ 进行评价,多按照相邻柱基之间的相对倾斜值进行评价,而高层建筑结构按照建筑物整体倾斜的许可值 $[f]=0.003$ 进行评价^[12-15]。

上述不同行业部门对建筑物本身的变形控制标准提出了各自的评价标准,但对于黄土高填-挖方上部建筑物的施建位置与施建时间的控制标准的研究较少报道。针对西北某地区黄土高填方地基工后沉降稳定评价问题,以某黄土高填方工程为背景,基于其试验段典型断面的工后沉降原位监测数据,采用数值反演分析分析方法对该高填方土层参数进行分层迭代法反演,在此基础上通过研究不同建筑作用下的建筑基础的工后变形规律,进而提出不同类型、不同空间位置处建筑的施建时间,为黄土高填方工程基础设施的设计提供科学参考。

1 高填方工程概况及工后沉降监测

1.1 工程背景

以西北某黄土高填方工后沉降的实测断面研究对象,根据该区域的地形、地貌,建立二维计算模型。由于该区域谷底下覆软弱土层仅仅只有5~9 m,其余下部全为岩基,谷底两侧山体覆盖有较厚的 Q_2 、 Q_3 黄土。该计算断面沟谷横向宽度约450 m,最大填方高度约103 m。

1.2 地层特性

根据勘察资料,该区域黄土梁峁区主要地层结

构为 Q_3 黄土、 Q_2 黄土、红粘土(N_2)和砂泥岩(J),上更新统黄土及古土壤以粉土或粉质粘土为主,一般厚度在10~20 m,最大厚度接近30 m,填料一般采用 Q_3 黄土,施工中填料的控制压实度一般0.90以上,含水率控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 左右,沟壑区填方及原地基的典型剖面见图1。原地基物理参数和力学参数统计结果的平均值,见表1。

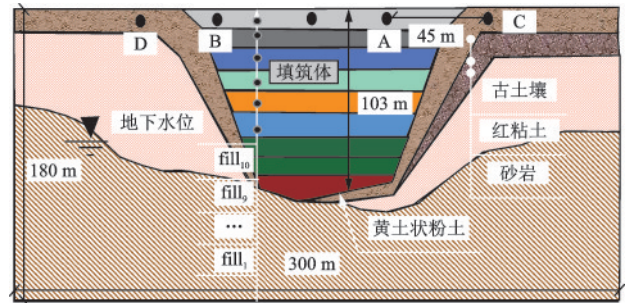


图1 试验段典型剖面示意

Fig.1 Typical section diagram of the test section

表1 地基土层计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil layers

土层	E_i / MPa	μ	c / kPa	$\varphi/(^\circ)$	γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	γ_{sat} / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
Q_3	13	0.3	30	25	15	18.3
Q_2	17	0.3	35	24	18.2	19.7
N_2	22	0.3	90	20.2	19.8	20.4
J	20 000	0.3	200	35	22.0	24.5

注: c 为粘聚力, φ 为内摩擦角, γ 为土体容重, γ_{sat} 为饱和土容重, E_i 为土体弹性模量, μ 为土体泊松比

1.3 工后沉降监测结果分析

为了监控场区关键断面的工后沉降量,在某典型沟谷剖面的填方顶部布设了A、B、C、D四个监测点^[16-18],监测关键点具体位置见图1。A、D监测点临近于填方中部,A点距离填方中心20 m,B点距离填方中心20 m,C点位于填方中心65 m处,D点距填方中心55 m处。填方体103 m高度,工后沉降监测历时21个月,监测结果见图2。从高填方顶部的工后沉降量历时曲线可见,工后沉降在不到1年内,填方中部测点A、B的沉降量最大达270 mm,沉降速率从开始的1.7~3.0 mm/d下降至0.4~0.9 mm/d,沉降速率略有下降趋势,但曲线的走势并未呈现稳定迹象,工后沉降还有继续进一步增大的趋势。其中,在 $t=150$ d时,沉降速率出现突增。其产生的原

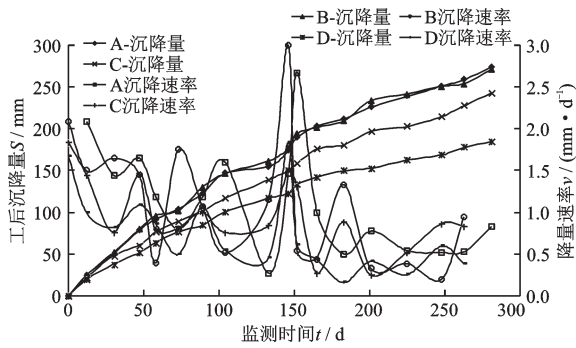


图2 试验段监测点沉降量及速率曲线

Fig.2 Settlement and rate curves of monitoring points

因可能是在填挖交界处由于降雨入渗引起的增湿变形或填挖交界处由于填筑压实控制的质量问题,引起的填挖交界开裂变形等从而引起沉降速率突然增加。

2 黄土高填方地基蠕变参数反演分析

2.1 分层迭代法参数反演分析原理

高填方在施工期间,下层土体在上层填土荷载作用下,下层土体的力学特性是在逐渐发生变化的,各土层的沉降量除了受该层土的物理、力学性质影响,还受到其下土层参数影响,采用“分层迭代”反演法对高填方施工加载过程土体的变形参数进行反演分析较为符合工程实际^[19],分析步骤简述如下:

(1)参数初始化:基于填方体压实黄土在不同荷载下的初始力学参数,将计算域内填方体进行分层,根据已有的单轴压缩试验结果确定各土层的初始计算参数。依据现场施工过程将填方体概化为10层,编号依次由低到高为fill₁-fill₁₀,原地基底部通过去除表层土、机械压实处理后,概化为一层计算,两侧底层分布按照勘察资料及该区域地形图建立,图3为各级土层分层的剖面有限元网格图。

高填方工后后期,不考虑Q₂黄土、红粘土(N₂)和砂泥岩(J)的长期变形,均按M-C屈服准则来考虑,填方体的压实黄土及原地基中经过夯实处理的Q₃黄土属于新近堆积土,其固结变形尚未完成,采用考虑时间效应的修正剑桥模型来反映其材料长期变形特性。

(2)分层反演:从fill₁土层开始,在假定其它土层计算参数不变的前提下,利用该土层的观测信息

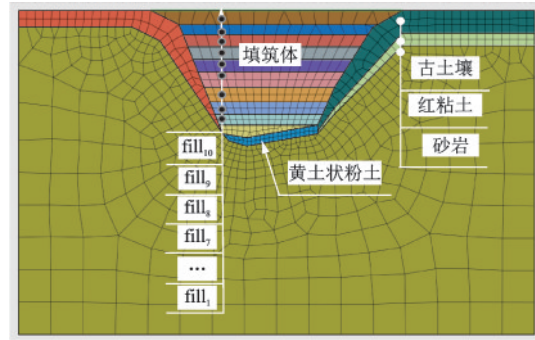


图3 高填方有限元模型单元网格示意

Fig.3 Mesh of loess high fill foundation using FEM

反演确定该土层的参数,每层分层厚度按取10 m,依据:根据现场施工中fill₁填筑到10 m进行一次强夯压实,fill₁填筑完成后放置一段时间后fill₂再进行强夯压实至10 m,强夯压实10次总填方体厚度103 m,以此类推直至反演得到fill₁₀土层参数为止。

(3)循环迭代:以上一级分层反演所得参数再作为初值,进行下一层参数的反演,即重复第(2)步。同时设定上下两轮反演所得参数的最大差值小于某一容许值作为迭代收敛标准。

2.2 初始参数的确定方法

压实黄土在高压条件下的长期变形问题较为复杂,本文采用考虑时间效应修正剑桥模型来描述土体的长期变形特性,但对其参数的确定难度较大。为了近似快速获取其蠕变参数,根据以往室内单轴固结压缩试验及渗透试验^[20-23],来预估压实黄土的修正剑桥模型参数,在堆载地基工程中,一般采用考虑时间效应的粘弹塑性模型来描述土体在压缩状态下的长期变形效应,其中将修正剑桥模型中引入蠕变指数即可实现这一过程。修正剑桥模型的基本参数为:修正压缩指数 λ^* ,修正回弹系数 κ^* ,修正蠕变指数 μ^* 。根据以往的经验表明: λ^* 主要与土体在单轴压缩状态下蠕变试验的压缩模量 E_c 、压缩指数 C_c 和次固结系数 C_α 存在直接关系。而 κ^* 、 μ^* 与 λ^* 存在一定的经验关系,且与压缩指数 C_c 、次固结系数 C_α 也存在公式(1)函数关系,通过单轴压缩蠕变试验和公式推导可初步确定不同填方高度(竖向荷载)下黄土的压缩参数 λ^* 、 κ^* 、蠕变参数 μ^* 及渗透系数;黄土的渗透系数变化幅度大,垂直与水平向也有很大差异,二者的比值约在4.7~37.5倍^[24],本文取 $k_v/k_h=10$ 计算,其具体确定方法可参

考如下公式：

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1 + e_0} = \frac{C_c}{2.3(1 + e_0)}$$

$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1 + e_0} \approx \frac{\lambda^*}{5 \sim 10} \quad (1)$$

$$\mu^* \approx \frac{C_a}{2.3(1 + e_0)} \approx \frac{\lambda^*}{15 \sim 30}$$

式中， λ^* 为修正剑桥模型压缩系数， λ 为剑桥模型压缩系数； κ^* 为修正回弹系数； κ 为剑桥模型回弹系数； μ^* 为修正蠕变系数。上式中的压缩参数、回弹参数与蠕变参数在无三轴试验情况下，可采用单轴固结

压缩试验中的压缩指数、次固结系数、压缩模量来获取，其表述公式如下：

$$C_c = \frac{2.3(1 + e_0)p}{E_s} \quad (2)$$

$$C_a = \frac{\Delta e}{\Delta \log t}$$

式中， C_c 为压缩指数； C_a 为次固结系数； p 为上覆荷载； E_s 为荷载为 p 时的压缩模量； e_0 为初始孔隙比； μ 为泊松比； t 为固结时间。

根据上述方法，初步确定高填方及地基的相关修正剑桥模型参数，得到初始计算参数见表2。

表2 工后沉降反演初始计算参数

Table 2 Initial calculation parameters of post-construction settlement inversion

填方分层	E/MPa	λ^*	κ^*	μ^*	$k_y/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$
fill-1	78.0~117.0	0.018 80~0.028 20	0.002 50~0.003 76	0.000 84~0.001 25	0.003 44~0.005 16
fill-2	70.0~104.8	0.018 96~0.028 44	0.002 53~0.003 79	0.000 84~0.001 26	0.003 60~0.005 40
fill-3	60.8~91.3	0.019 36~0.029 04	0.002 58~0.003 86	0.000 86~0.001 29	0.003 84~0.005 76
fill-4	50.3~75.4	0.019 56~0.029 24	0.002 58~0.003 86	0.000 86~0.001 29	0.004 00~0.006 00
fill-5	40.0~60.0	0.019 60~0.029 40	0.002 61~0.003 91	0.000 87~0.001 31	0.004 08~0.006 12
fill-6	31.8~47.8	0.019 84~0.029 76	0.002 64~0.003 96	0.000 88~0.001 32	0.004 08~0.006 12
fill-7	23.4~35.1	0.020 08~0.030 12	0.002 67~0.004 01	0.000 89~0.001 34	0.004 24~0.006 36
fill-8	15.6~23.0	0.020 16~0.030 24	0.002 69~0.004 03	0.000 90~0.001 34	0.004 00~0.006 60
fill-9	9.0~14.0	0.020 48~0.030 72	0.002 73~0.004 09	0.000 91~0.001 37	0.004 48~0.006 72
fill-10	4.0~6.0	0.020 80~0.031 20	0.002 77~0.004 15	0.000 92~0.001 39	0.004 40~0.006 60

2.3 沉降预测及参数反演结果

利用反演参数对高填方工后沉降分析，对比工后沉降预测值与实测沉降之间的差异，选取该断面填筑体顶部四个监测点，采用反演所得参数计算工后281天的工后沉降，将其和现场监测数据进行对比分析。各监测点计算工后沉降值与实测值对比如图4所示。通过反演分析所得填土体参数计算的高填方工后沉降预测值与填方体顶部监测结果吻

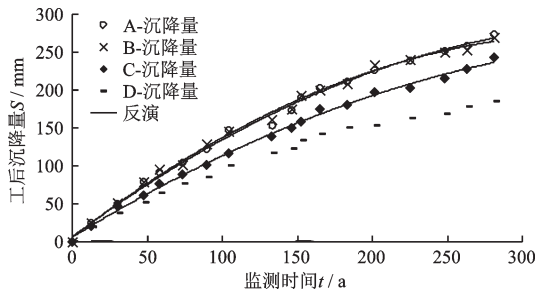


图4 反演结果与实测值对比

Fig.4 Comparison between inversion results and measured values

合度高达97.92%，可以准确反应黄土高填方工程的工后沉降，因此后期数值模拟采用此反演参数对高填方工后的沉降进行分析计算。

由图5可见：高填方填土层的修正压缩系数 λ^* ，修正回弹系数 κ^* ，修正蠕变参数 μ^* ，从底部到顶部有逐渐增大趋势，渗透系数随着填土层由下至上逐渐增大，表明底层填土在上覆土层自重荷载作用下有逐渐压密趋势，能够真实反映填方在分层填筑期间，土体在垂直方向上的非均匀性特征。

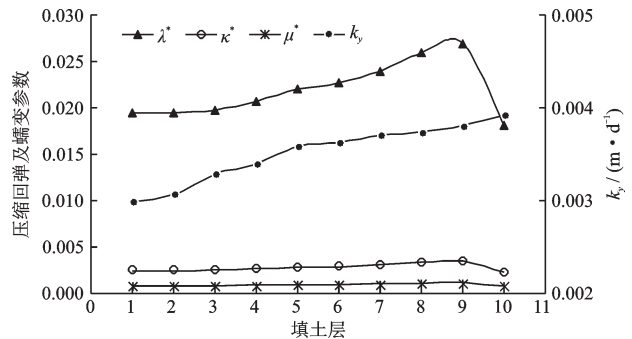


图5 反演参数随填土层变化曲线

Fig.5 Variation curve of inversion parameters with filling layer

3 黄土高填方上部建筑施建时间研究

3.1 计算模型

上部建筑结构模型参考规范结合常见的民用建筑尺寸确定。根据《砌体结构设计规范》^[25]与《高层建筑混凝土结构技术规程》^[26],低层建筑结构宽取 21 m、高取 9 m,高层建筑结构宽取 40 m、高取 45 m。柱子的尺寸为 0.55 m×0.55 m,楼面梁的尺寸为 0.45 m×0.3 m,低层建筑柱间距取 7 m,高层建筑柱间距取 6.65 m。基于 MIDAS/GTS-NX 数值模拟软件,构建上部建筑-黄土沟壑区高填方耦合作用模型如图 6 所示。数值分析具体步骤如下:

(1)自重应力模拟:模拟原地基自重应力场,并进一步模拟填方分层填筑,进行第二次初始地应力平衡,期间原地基土体遵从摩尔-库伦屈服准则,填方土层采用修正剑桥模型来模拟,此时不考虑时效效应,模拟施工期间的填筑荷载及初始位移场,然后进行初始位移场清零。

(2)上部建筑模拟:高层建筑基础材料按 15 m 的桩基与桩间土的复合地基材料进行等效模拟,建

筑基础与地基之间的作用采用桩土界面模型模拟,上部结构及其等效的基础采用线弹性模型模拟。

(3)边界条件模拟:假设各材料各向同性,模型前后左右及底部边界分别法向约束,顶部为自由面,由于为考虑地下水作用,模型的四周各面以及底部均采用不透水边界状态。在建筑基础两侧设置关键监测点 M,N,用于析两点在高填方工后沉降期间的沉降及局部倾斜变形规律。

3.2 参数取值

本研究以填土高度为 100 m 的黄土高填方模型为研究对象,高填方原地基的计算参数见表 1。填土层的粘聚力和内摩擦角统一取 50.5 kPa 和 27.2°。建筑物上部结构荷载参考《建筑结构荷载规范》取 2 kN/m²,且将活荷载按比例等效成梁的自重荷载。由此可得到上部建筑结构参数见表 3。参数按钢筋混凝土的参数确定,高、低层建筑地基的等效参数见表 4。

表 3 上部建筑结构参数

材料	E_1/GPa	μ_1	$\gamma_{un}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
素混凝土	30	0.2	24
钢筋混凝土	25	0.2	25
低层建筑	25	0.2	8.0
高层建筑	25	0.2	7.6

注: E_1 为弹性模量; μ_1 为混凝土泊松比; γ_{un} 为上部建筑结构等效天然容重

表 4 建筑物基础等效参数

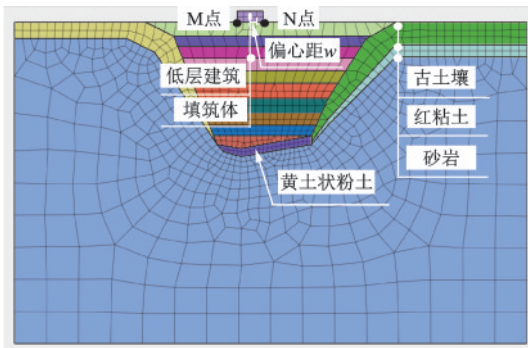
建筑	E_u/GPa	$\gamma_{un1}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma_{rat1}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
高层	1 200	21.3	21.3	50.5	27.2
低层	35	21.1	21.5	50.5	27.2

注: E_u 为等效变形模量; γ_{un1} 为等效天然重度; γ_{rat1} 为等效饱和重度; c 为黏聚力; φ 为摩擦角

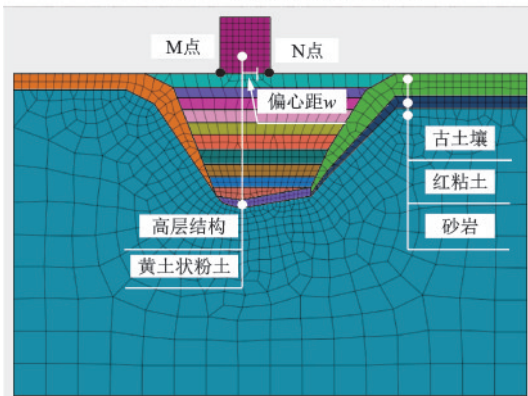
3.3 数值分析方案

根据工程实际情况,黄土沟壑区高填-挖方区的上部建筑建设位置及施建时间一直是困扰工程界的瓶颈问题,为此本研究针对上部建筑的施建位置(偏心距)及施建时间开展以下数值模拟方案:

(1)建筑物类型。分别选择高层,低层两种建筑物类型研究;



(a) 填方中部低层建筑-高填方耦合作用



(b) 填方中部高层建筑-高填方耦合作用模型

图 6 黄土高填方-建筑物耦合模型

Fig.6 Coupling model of loess high fill foundation- building

(2) 施建位置。建筑物中轴线距沉降中心的水平距离5(偏心距)。分别取偏心距为 $w=0、75、125、211、221$ m 五种工况进行研究;

(3) 施建时间。分别研究高填方竣工后不同施建时间 $t=0.5、1、2、3、5$ a 等5个工况下建筑物基础关键测点的变形规律。

为了便于探索不同类型建筑物的施建位置、施建时间,依据《建筑地基基础设计规范》对建筑物基础的变形控制标准(沉降量 S 、局部倾斜 i),提出建筑物临界施建位置、施建时间。其中,沉降量 S 选取建筑物基础 M 点计算结果为分析依据,局部倾斜 $i=(S_M-S_N)/L_{MN}$,其中 S_M 为建筑物基础 M 点在高填方地基工后沉降稳定后的沉降量; S_N 为建筑物基础 N 点在高填方地基工后沉降稳定后的沉降量 L_{MN} 为建筑物基础 M 至 N 点的水平距离。

3.4 不同位置处低层建筑施建时间研究

对低层建筑结构在不同偏心距下,高填方地基工后沉降规律进行模拟,分析上部建筑不同施建时间 t 时建筑物基础最终稳定后的沉降量 S 及局部倾斜 i ,计算结果如图 7 所示。由上述计算结果可得:

(1) 图 7(a)~(d) 可知,当 $w=0$ m 且上部建筑施建时间 $t \leq 1$ a 时,低层建筑基础工后沉降量 $S \geq [S]=120$ mm,但最终稳定后的局部倾斜 $i < [i]=0.002$,建议低层建筑开始施建的时间为 $t > 1$ a 较好;当 $w \leq 125$ m 时建筑基础的最大沉降量

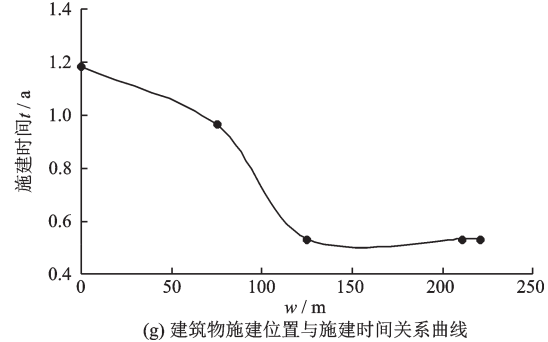
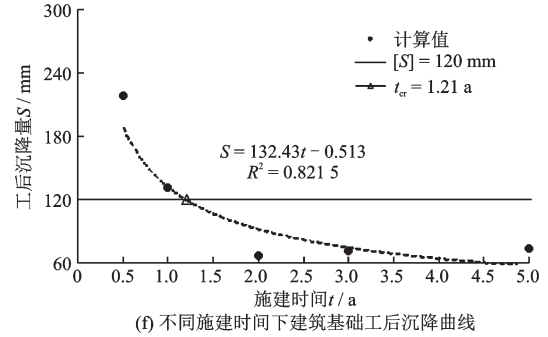
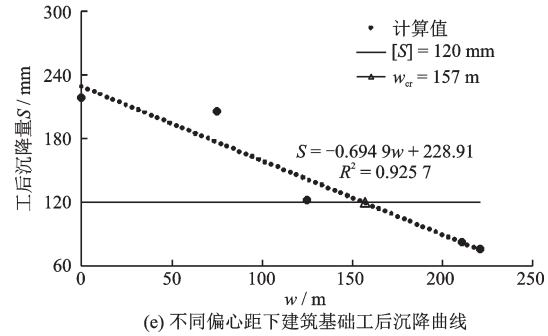
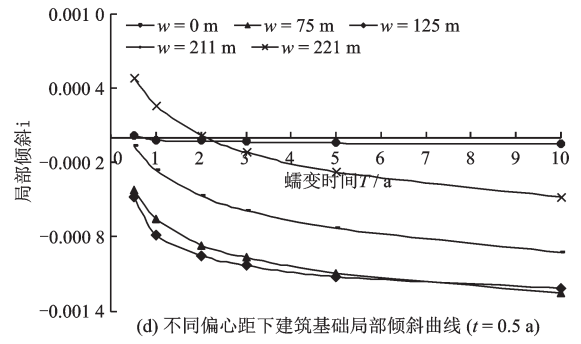
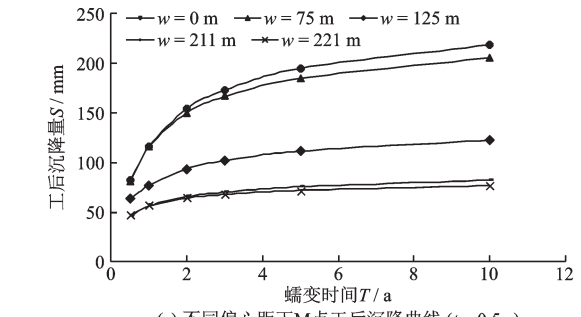
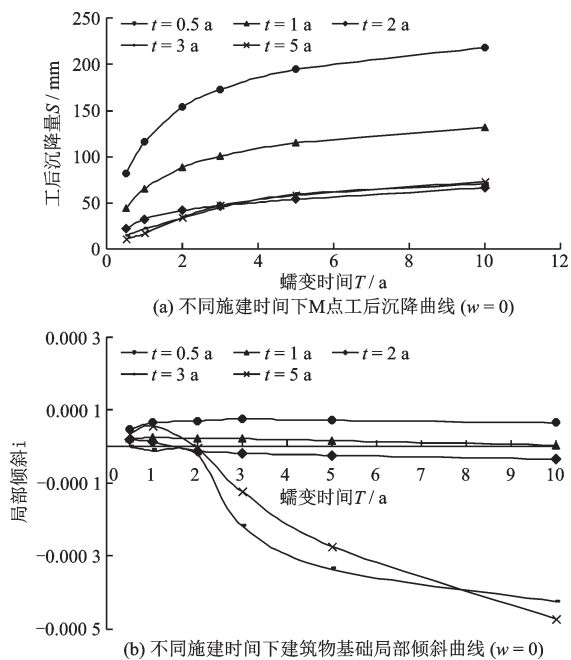


图 7 高填方地基上低层建筑施建位置与时间关系
Fig.7 Relationship between construction position and time of low-rise building on high fill foundation

122.08 mm \geq $[S] = 120$ mm, 当 $w \geq 211$ m 时, 建筑基础的最大沉降量 82.6 mm \leq $[S] = 120$ mm, 且局部倾斜 $i < [f] = 0.002$, 建议低层建筑偏心距在 $w \geq 125$ m。

(2) 图 7(e)~(f) 可知, 建筑物偏心距 w 越大, 施建时间 t 越晚时, 沉降量 S 越小; 根据低层建筑物的变形控制标准 $[S]$ 和 $[f]$, 低层建筑的施建临界偏心距 w_{cr} 及临界施建时间 t_{cr} , 可取为: $w_{cr} = 157$ m, $t_{cr} = 1.21$ a。对于不同偏心距 w 下低层建筑的施建时间 t 满足如图 7(g) 所示的曲线, $w = 0$ m 时, $t_{cr} \geq 1.2$ a; $w = 75$ m 时, $t_{cr} \geq 1.0$ a; $w \geq 125$ m 时, $t_{cr} \geq 0.5$ a。

3.5 不同位置处高层建筑施建时间研究

对高层建筑结构在不同偏心距下, 高填方地基工后沉降规律进行模拟, 分析上部建筑不同施建时间 t 时建筑物基础最终稳定后的的变形特征, 计算结果如图 8 所示。由图 8 可知:

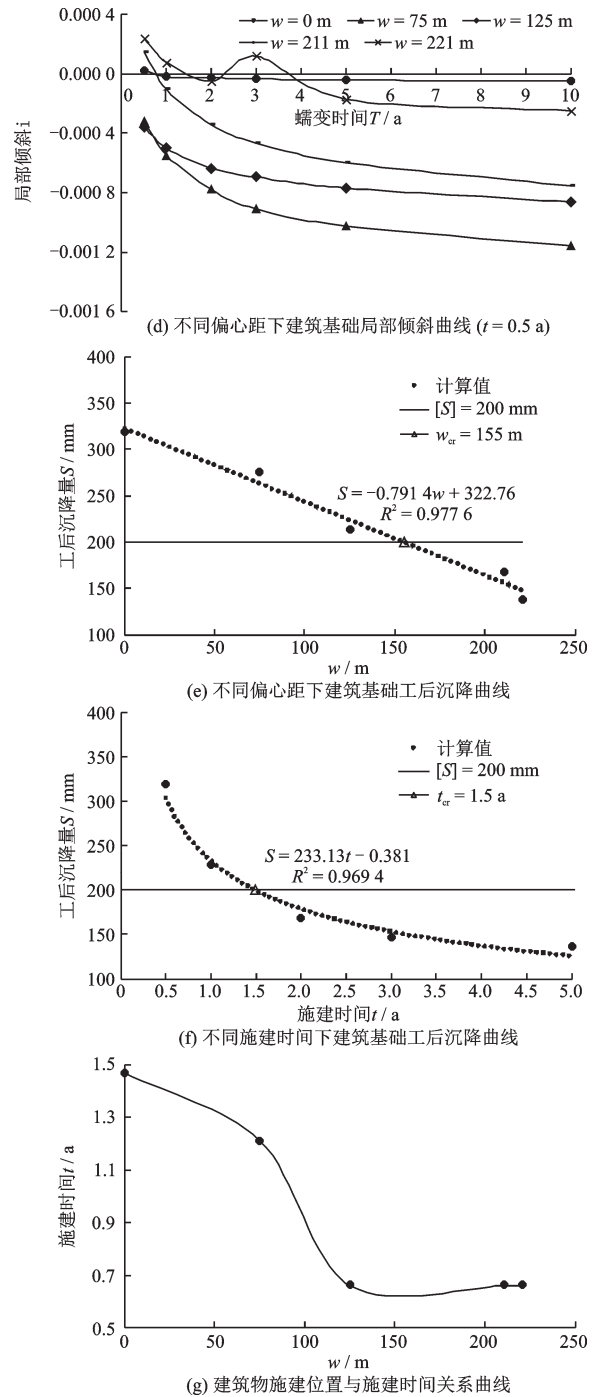
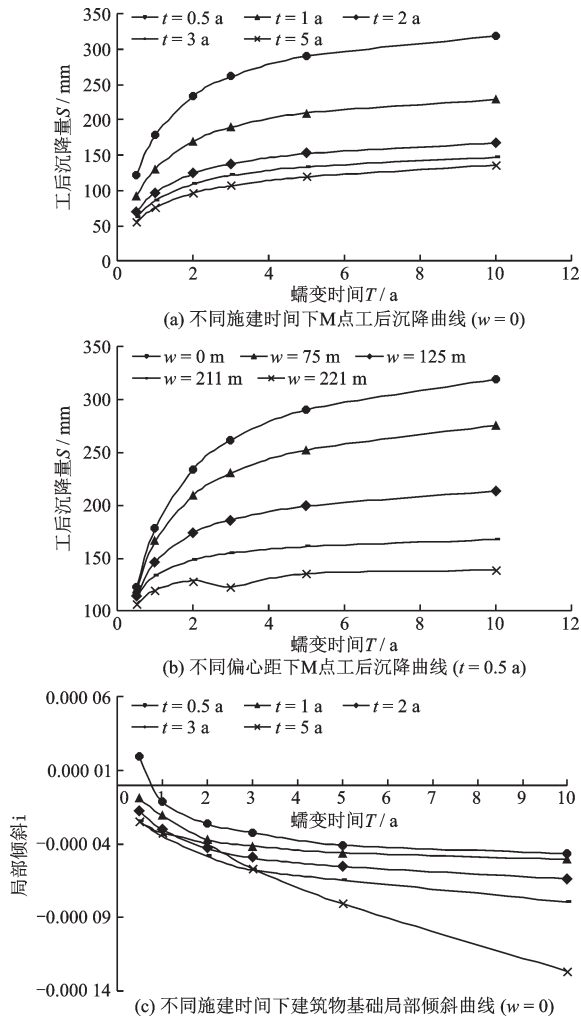


图 8 高填方地基上高层建筑施建位置与时间关系
Fig.8 Relationship between construction position and time of high-rise building on high fill foundation

(1) 图 8(a)~(d) 可知, 当 $w = 0$ m 且上部建筑施建时间 $t \leq 1$ a 时, 低层建筑基础工后沉降量最 $S = 318.8$ mm $\geq [S] = 200$ mm, 但最终稳定后的局部倾斜 $i < [f] = 0.003$, 建议低层建筑开始施建的时间为 $t > 2$ a 较好, 建议高层建筑偏心距在 $w \geq 125$ m。

(2) 根据高层建筑物的变形控制标准 $[S] =$

200 mm 和 $[f]=0.003$, 结合图 8(e)~(f), 可得到高层建筑的施建临界偏心距及临界施建时间分别为: $w_{cr}=155.0$ m, $t_{cr}=1.5$ a。从图 8(g)可知, 不同偏心距下高层建筑的临界施建时间变化规律如下: $w=0$ m 时, $t_{cr} \geq 1.5$ a; $w=75$ m 时, $t_{cr} \geq 1.2$ a; $w \geq 125$ m 时, $t_{cr} \geq 0.7$ a。

4 结 论

(1) 基于实测资料的分层迭代反演分析方法所得填土体参数, 能较准确反应黄土高填方土体的实际受荷状态, 对于黄土高填方工后沉降的预测可信度更高。

(2) 填土厚度约为 100 m 的高填方地基上部在建筑物作用下, 工后 0.5 年以后施建, 建筑基础的局部倾斜均满足局部倾斜许可值要求, 不受偏心距限制; 低层建筑施建偏心距建议为 $w \geq 157$ m, 工后施建时间 $t \geq 1.21$ 年; 高层建筑施建偏心距建议为 $w \geq 155$ m, 工后施建时间 $t \geq 1.5$ 年。

(3) 本文仅开展了试验段填土厚度约为 100 m 的黄土高填方上部建筑物工后施建控制标准的研究, 实际上工后施建控制标准不仅与填方厚度有关, 还与填方体施工工艺、原地基特性及黄土沟壑区局部水环境密切相关, 这将是下一步重点研究内容。

参考文献:

- [1] 朱才辉, 深厚黄土地基上机场高填方沉降规律研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
Zhu C H. Study on settlement law of airport high fill on deep loess foundation [J]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [2] 王现中, 谢成, 邵其其, 等. 基于原位监测的高填方下穿管道有限元分析[J]. 油气储运, 2022, 41(10): 1150-1158.
Wang X Z, Xie C, Shao Q Q, et al. Finite element analysis of pipeline underpassing high fill based on in-situ monitoring[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2022, 41(10): 1150-1158. (in Chinese)
- [3] 陈增, 周立业, 赵国强, 等. 高填方场地水池结构振动台试验设计与数值分析[J]. 中国农村水利水电, 2022(9): 49-54.
Chen Z, Zhou L Y, Zhao G Q, et al. Shaking table test design and numerical analysis of pool structure in high filled site[J]. China Rural Water Resources and Hydro-power, 2022(9): 49-54. (in Chinese)
- [4] 安鹏, 张杰, 倪万魁, 等. 安康机场罗家河膨胀土高填方沉降变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 833-839.
An P, Zhang J, Ni W K, et al. Settlement and deformation characteristics of high fill of Luojahe expansive soil in Ankang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 833-839. (in Chinese)
- [5] 张永清, 王选仓, 王朝辉. 拓宽路基差异沉降计算参数的确定[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(2): 13-18.
Zhang Y Q, Wang X C, Wang Z H. Calculation parameter determination of widened subgrade difference settlement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(2): 13-18. (in Chinese)
- [6] 钱军, 王惠勇, 林琳, 等. 高速公路拓宽改造工程路基拼接技术应用综述[J]. 现代交通技术, 2005(6): 16-20.
Qian J, Wang H Y, Lin L, et al. Review of subgrade connecting technology application of freeway extension engineering [J]. Modern Transportation Technology, 2005(6): 16-20. (in Chinese)
- [7] 秦仁杰, 刘朝晖, 周科峰, 等. 郑洛高速公路旧路状况评价及加铺方案优化研究[J]. 中外公路, 2007(4): 79-82.
Qin R J, Liu C H, Zhou K F, et al. Study on old road condition evaluation and overlay scheme optimization of Zheng-Luo expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007(4): 79-82. (in Chinese)
- [8] 傅珍, 王选仓, 陈星光, 等. 拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2007(1): 54-57.
Fu Z, Wang X C, Chen X G, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007(1): 54-57. (in Chinese)
- [9] 杨春华, 李端峰. 台背路基工后沉降取值标准及应用研究[J]. 中外公路, 2007(4): 33-35.
Yang C H, Li D F. Study on the value standard and application of post-construction settlement of abutment subgrade [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007(4): 33-35. (in Chinese)
- [10] 张军辉. 软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
Zhang J H. Research on deformation behavior and differential settlement limitation of expressway widening on soft soil foundation [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)

- [11] 刘金亮. 高速公路改扩建新旧路基差异沉降可靠性分析[D]. 西安: 长安大学, 2010.
Liu J L. Reliability analysis of differential settlement in express highway widening projects[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [12] 公路软土地基路堤设计规范: DB33/T 904—2013[S]. 杭州: 浙江省质量技术监督局, 2013.
- [13] 公路路基设计规范: JTGD 30—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] 铁路路基设计规范: TB 10001—2005[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [15] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] 杜伟飞, 郑建国, 刘争宏, 等. 黄土高填方地基沉降规律及排气条件影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 325-331.
Du W F, Zheng J G, Liu Z H, et al. Settlement behavior of high loess-filled foundation and impact from exhaust conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 325-331. (in Chinese)
- [17] 于永堂, 郑建国. 黄土高填方场地工后沉降预测新模型[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1268-1276, 1292.
Yu Y T, Zheng J G. New prediction model for post-construction settlement of loess high fill site[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1268-1276, 1292. (in Chinese)
- [18] 葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 745-753.
Ge M M, Li N, Zhang W, et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 745-753. (in Chinese)
- [19] 谭昌明, 周建, 黄广龙. 多层软土地基沉降的分层迭代反演综合预测法[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 29-33.
Tan C M, Zhou J, Huang G L. Iterative back-analysis layer by layer method to predict settlement of several layers soft clay ground [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 29-33. (in Chinese)
- [20] 朱才辉, 李宁. 降雨对沟谷状黄土高填方地基增湿影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 845-854.
Zhu C H, Li N. Moistening effects of high-fill embankment due to rainfall infiltration in loess gully region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 845-854. (in Chinese)
- [21] 朱才辉, 张世斌. 降雨条件下压实黄土水分入渗规律模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 1117-1124.
Zhu C H, Zhang S B. Rainfall infiltration laws of compacted loess based on laboratory model tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(6): 1117-1124. (in Chinese)
- [22] 朱才辉, 李宁. 基于黄土变形时效试验的高填方工后沉降研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 3023-3031.
Zhu C H, Li N. Post-construction settlement analysis of loess-high filling based on time-dependent deformation experiments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 3023-3031. (in Chinese)
- [23] 朱才辉, 李宁. 压实 Q_3 马兰黄土蠕变规律研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 392-399.
Zhu C H, Li N. Research on the creep behavior of compacted Q_3 Ma-Lan Loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 392-399. (in Chinese)
- [24] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996.
Liu Z D. Mechanics and engineering of loess [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [25] 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [26] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(本文编辑: 苏泽云)