

文章编号: 1001-1986(2018)04-0122-07

大荷载原煤仓天然地基沉降监测及分析

吕远强^{1,2}, 赵金刚², 冯伟², 董转运²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了真实反映大荷载原煤仓天然地基沉降变形随上覆荷载的变化特征及规律, 确保工程安全, 在研究区场地建立了一套沉降监测系统, 跟踪测试了建设施工及运营期间荷载作用下原煤仓地基土的沉降变形, 并依据实际监测结果, 通过“规范方法”及“三维数值分析方法”进行了验证。结果表明: 原煤仓地基实际变形满足规范要求的允许值, 证明采用第四系湖积砂层作为天然地基方案是可行的; 地基土实际沉降主要集中在运营期间, 建设及施工阶段所占比例较小(10%~27%), 而规范计算该阶段沉降所占比例在 40%以上; 在沉降计算及预测过程中考虑基础刚度的影响, 所得基底土压力分布及沉降计算结果更符合现场实际。研究结果可为类似工程场地设计、建设及安全施工提供理论依据及参考。

关键词: 天然地基; 沉降监测; 演化规律; 三维数值分析

中图分类号: TU196.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2018.04.020

Monitoring and analysis of natural foundation subsidence of raw coal bunker with big load

LYU Yuanqiang^{1,2}, ZHAO Jingang², FENG Wei², DONG Zhuanyun²

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. China Coal Xi'an Design Engineering Co. Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to reflect the characteristics and regularity of natural foundation subsidence of raw coal bunker with big load and to ensure the safety of the project, a set of subsidence monitoring system was built at the study site, after tracking ground subsidence of raw coal bunker with big load during construction and operation, we verified the “standard method” and “three dimensional numerical analysis method” according to the actual monitoring results. The results show that the actual deformation of the foundation of raw coal bunker met the allowable value required in norms and it was proved that the scheme using the Quaternary lacustrine sand layer as natural foundation was feasible; the actual subsidence of the foundation soil is mainly concentrated in the operation period, the proportion of the subsidence during construction stage is small(10% to 27%), while the proportion of subsidence during the construction stage, calculated in the norms is more than 40%. The influence of foundation stiffness during the calculation and prediction process was considered, the calculation results of the pressure distribution and the subsidence of the foundation soil were more consistent with actual situation. The research results can provide theoretical basis and reference for site design, construction and safe operation of similar project.

Keywords: natural foundation; subsidence monitoring; evolution law; three-dimensional numerical analysis

随着煤炭工业的进步及发展, 高耸构筑物越来越多。高耸构筑物在施工及运营期间, 随着上覆荷载的逐步增加, 势必导致下部土体的压缩而产生沉降, 沉降过大或不均匀沉降可能导致建筑物发生质

量事故^[1-3]。而原位监测的位移序列不仅包含地基演化的综合信息, 还蕴含着参与沉降变形整个过程其他变量的痕迹^[4-5]。鉴于此, 许多学者基于沉降监测数据进行了大量的相关研究。钱思众等^[6]、张建雄

收稿日期: 2018-03-02

第一作者简介: 吕远强, 1977 年生, 男, 贵州遵义人, 博士研究生, 高级工程师, 从事地质工程研究工作. E-mail: 4109914@qq.com

通信作者: 赵金刚, 1985 年生, 男, 河南新密人, 博士, 工程师, 从事地质工程研究工作. E-mail: 276071760@qq.com

引用格式: 吕远强, 赵金刚, 冯伟, 等. 大荷载原煤仓天然地基沉降监测及分析[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 122-128.

LYU Yuanqiang, ZHAO Jingang, FENG Wei, et al. Monitoring and analysis of natural foundation subsidence of raw coal bunker with big load[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 122-128.

等^[7]分别对高层建筑沉降监测结果进行分析,并对沉降趋势进行预测,为工程的安全施工及管理提供了重要依据;罗红明等^[8]对210 m电厂烟囱的实际监测沉降值、有限差分数值分析结果及灰色模型预测值进行了对比分析,得出灰色预测模型精度较好,可以运用到实际工程中;朱才辉等^[9]、董琦等^[10]、经继等^[11]分别对填方场地沉降变形进行了监测,得出了沉降变形特征或时空分布规律,为场地的进一步研究提供了参考。魏纲等^[12]收集国内外19处风管隧道沉降实测数据,分析了施工期间沉降、工后沉降、总沉降及沉降差之间的变化规律,为下一步工作指明了方向;朱才辉等^[13]基于原位沉降监测数据,探究了变形时效性参数与高填方概化层参数之间的差异,并指出其差异的根源和解决方法。

从相关研究文献来看,对建(构)筑物进行沉降监测,获取沉降变形的第一手资料,可为工程的安全施工及管理提供重要依据;并且,作为一项重要的研究基础数据,通过分析沉降变形的特征及时空分布规律,可为下一步研究工作提供参考;此外,沉降观测是检验实际工程处理措施成效的重要手段。因此,为了确保建(构)筑物的正常施工及安全

使用,并为相关研究工作提供必要的基础数据,进行沉降监测是非常必要的。

在陕西北部、内蒙古鄂尔多斯地区,某建设场地煤储运系统原煤仓基础直接持力层为第四系上更新统湖积粉细砂,高、重、大的原煤仓采用天然地基方案在该地区尚属首例,该方案的实施不仅可极大地缩短工期,并且具有直接的经济效应。本文以大荷载原煤仓天然地基为研究对象,首先,对建设施工及运营期间的沉降演化规律进行分析,意图掌握该地区第四系湖积砂层的变形特性,在此基础上,以现场监测结果为基础,对不同计算方法所得沉降结果进行验证,其间考虑了基础刚度对沉降计算结果的影响。本次研究旨在为该地区类似工程场地地基处理方案的选择与设计、工程建设及施工提供科学的参考。

1 工程概况

原煤仓场地占地面积约1.68 hm²,共布置3个筒仓(图1),筒仓直径37.0 m,高度73.5 m,仓壁间距7.0 m,为钢筋砼圆形筒仓,基础类型为箱型基础,对差异沉降要求敏感,基础砌置深度-7.5 m,设计基底压力630 kPa。

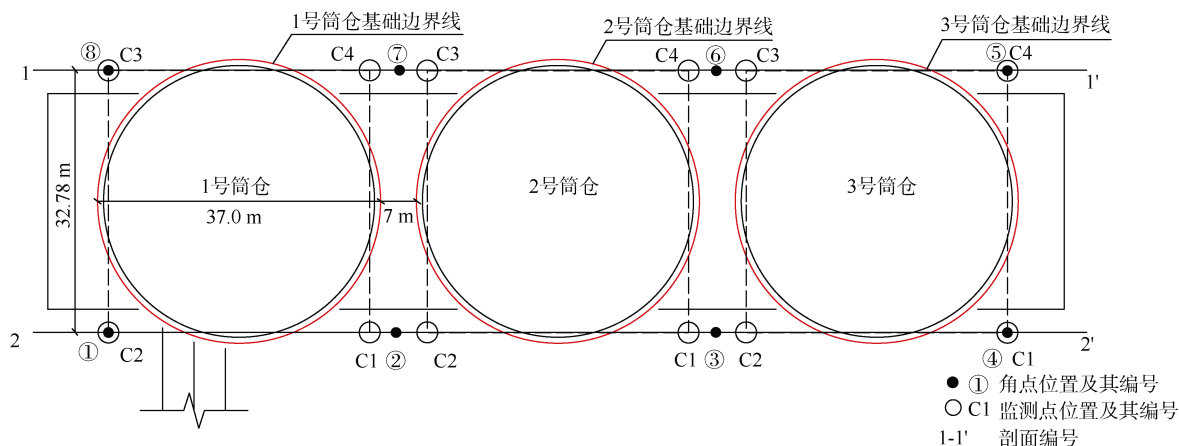


图1 沉降监测及分析方案平面示意图

Fig.1 Plan sketch of subsidence monitoring and analysis scheme

拟建场地地处毛乌素沙漠东南缘与陕北黄土高原过渡地段,场地地貌单元属风积沙丘。场地地层岩性自上而下主要为第四系全新统素填土(Q_4^{ml})、粉细砂(Q_4^{col})、上更新统粉细砂(Q_3^1 ,基础直接持力层)、粉细砂(Q_3^1)、粉土(Q_3^1)、粉细砂(Q_3^1)、粉土(Q_3^1)以及侏罗系砂泥岩互层(J)。场地地层总体平稳,分布连续且起伏不大,层位稳定,属于均匀地基,且无软弱土层;各地基土层厚度变化及主要物理力学指标详见表1。

2 沉降监测及分析方案

沉降监测使用 Zeiss Ni002 高精度水准仪和3 m

钢钢水准尺进行。3个沉降监测基准点埋设在远离基坑100 m以外的稳定区域内,4个工作基点埋设在煤仓监测区域中间方便观测监测点的位置,具有相对稳定的地质条件,以确保沉降位移基准网达到国家二等水准测量的监测精度。根据相关规范要求,本次沉降观测点均匀对称布置于每个筒仓四周,共布置12个观测点(每个筒仓4个,监测点编号均为C1—C4,图1)。

沉降监测均在各筒仓基础顶板施工完成后开始,建设施工过程中每月监测1次,共计8次。建设完毕至加煤运营期间,每3个月监测1次,直至

表 1 地基土主要物理力学指标及计算参数取值表
Table 1 Main physical and mechanical indexes and calculation parameters

层号及岩土名称	厚度/m	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	变形模量 E_0/MPa	弹性模量 E/MPa	泊松比
粉细砂	0.43~7.77	15.9	17.5	20.0	48.0	0.34
粉细砂	4.89~8.66	16.7	32.5	36.0	84.0	0.32
粉细砂	8.50~13.33	18.1	39.3	40.0	90.0	0.30
粉土	1.70~4.01	20.3	33.3	30.0	50.0	0.28
粉细砂	2.00~9.00	19.3	35.5	45.0	120.0	0.29
粉土		19.7	15.0	25.0	60.0	0.28
砂泥岩		24.3			20 000	0.25

注：a. 粉细砂及 粉细砂层的变形模量 E_0 依据平板载荷试验得出，其下各地基土层变形模量 E_0 利用标贯击数平均值与平板载荷试验确定的变形模量，采用线性拟合得出；b. 粉土及 粉土的压缩模量 E_s 依据室内土工试验得出，砂层因现场采取原状砂样较为困难，其压缩模量 E_s 利用《工程地质手册》(第四版)表 3-3-16 中的数值进行线性回归，进而利用标贯击数平均值计算得出；c. 砂、土层的弹性模量 E 依据变形模量 E_0 ，按 2~3 倍关系进行经验取值，砂泥岩的弹性模量依据《工程地质手册》(第四版)确定；d. 泊松比依据《工程地质手册》(第四版)确定。

沉降稳定。运营期前 3 个月每 2 周 1 次，后 23 个月平均每月 1 次，如果监测点变形较大，则缩短监测点的监测周期，反之则增大监测周期，共计 29 次。

本次沉降监测自 2013 年 3 月 18 日起，至 2016 年 11 月 30 日止，共计 3 年 8 个月，约 1 350 d，监测次数共计 37 次。

3 监测结果分析

3.1 建设及施工期沉降变形分析

3.1.1 上覆荷载

通过对 3 个筒仓建设及施工期间混凝土方量进行叠加统计，并结合运营期间装煤高度实测记录，对建设施工及运营期间的场地上覆荷载进行了换算(图 2)。图中分别为 3 个筒仓自基础顶板施工、仓壁滑膜施工、仓体完工、第一次加煤至满仓状态各阶段上覆荷载变化情况(2013-03-18—2014-10-25)。

3.1.2 沉降变形分析

各阶段监测点沉降历时变化曲线及其与上覆荷载的关系详见图 3。

从图 3 中可以看出：

a. 总体上来说，建设与施工期间各筒仓平均沉

降量(4 个测点的沉降量平均值)随着基底压力的不断增长呈增加趋势，这说明土层总体上是压缩的。

b. 在正负零施工期间(基底压力介于 81~87 kPa)，因荷载较小，地基土的沉降并没有较大变化，在仓壁滑膜施工至 22.7 m 期间(基底压力增至 169~193 kPa)，1 号及 2 号筒仓出现一次较大沉降，但 3 号筒仓呈缓慢增长趋势；在后续筒仓建设施工直至第一次满仓荷载作用下(基底压力介于 569~592 kPa)，3 个筒仓沉降均呈快速增长趋势。

c. 压缩过程并不是一直单调进行，在仓壁滑膜施工 22.7 m 至 52 m 阶段各监测点均出现了回弹，究其原因，认为：

实际工程沉降监测为建设施工期间的累计沉降，其中包含基坑开挖后由卸荷作用引起的回弹再压缩沉降量，以及上覆叠加荷载作用下的土层压缩变形。

在正负零施工期间，上覆荷载由箱型基础提供，荷载形式为圆形均布荷载，此阶段沉降主要为卸荷回弹再压缩沉降，该阶段荷载(81~87 kPa)小于挖除土柱自重(136 kPa)荷载，因此，沉降变化值较小。

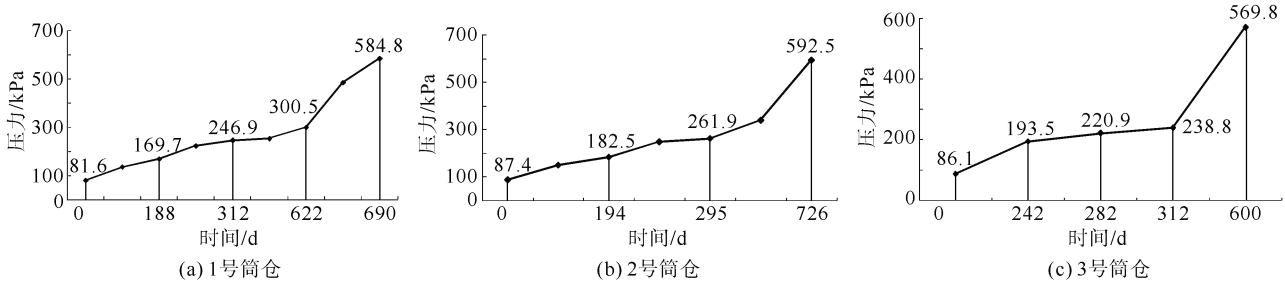


图 2 各筒仓上覆荷载历时变化曲线
Fig.2 Diachronic changes of overlying load of different coal bunkers

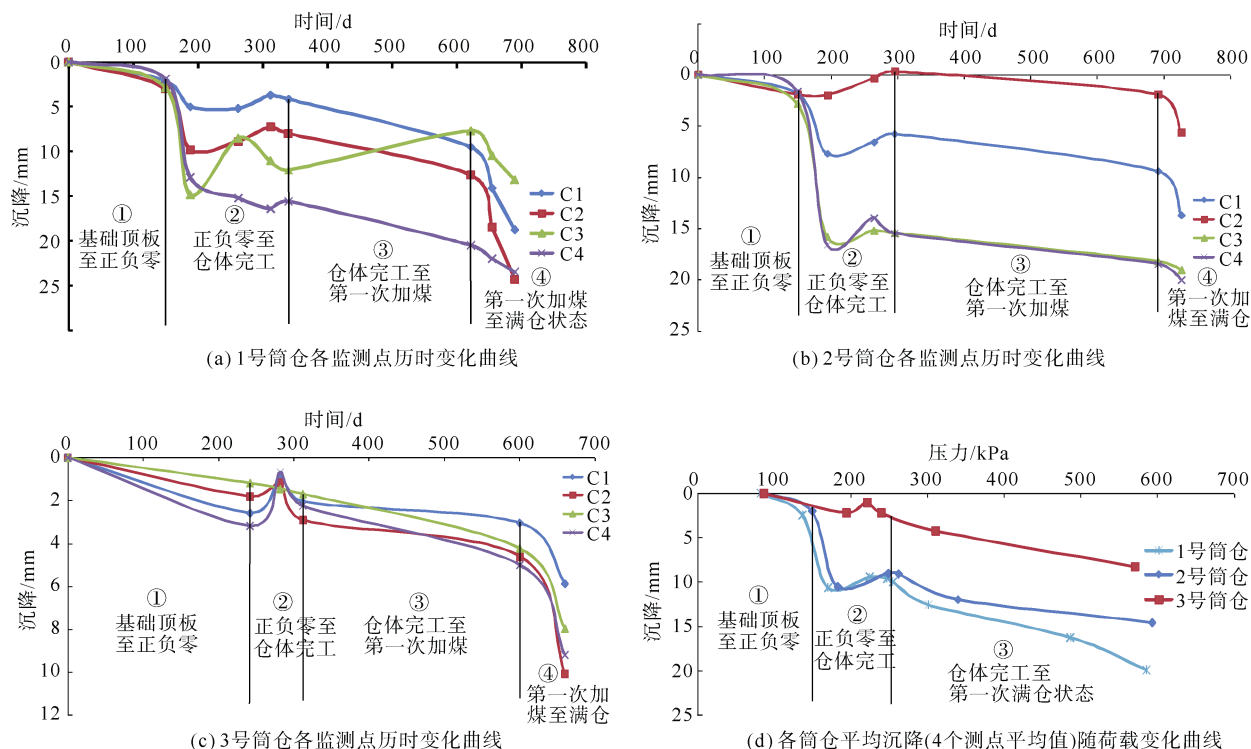


图3 建设及施工期各筒仓沉降变形特征

Fig.3 The characteristics of subsidence during construction of coal bunkers

在仓壁滑膜施工至 22.7 m 期间,荷载形式为圆形均布荷载叠加上部环形荷载(总荷载 169~193 kPa),上覆荷载大于挖除土柱自重,该阶段沉降既包含卸荷回弹再压缩量又包含土体在上覆荷载作用下的压缩沉降,此时地基土层尚未完成卸荷回弹再压缩过程,在上部环形荷载的作用下,因叠加荷载较为集中且荷载变化幅度相对较大(荷载变幅 87~106 kPa)而导致了过度变形。

在仓壁滑膜施工至 52 m 阶段,荷载形式不再发生改变(总荷载 224~248 kPa,变幅 55~56 kPa),由前一阶段所导致的过度变形发生回弹,但在本阶段叠加荷载的作用下,回弹量较小(1.09~1.50 mm)。

d. 3 个筒仓各监测点最终沉降值存在差异,说明各筒仓均产生了不同程度的倾斜变形,相较而言,1 号筒仓倾斜变形最大,3 号筒仓最小。

e. 建设施工期间(仓体完工之前)3 个筒仓地基土平均沉降最大值约为 9.96 mm。

3.2 运营期间沉降变形分析

运营期间(2014 年 10 月至 2016 年 11 月)随着原煤仓仓体加煤、卸煤活动的不断反复进行,上覆荷载呈循环加、卸荷的波动状态,在上覆荷载的作用下,各筒仓平均沉降、变形速率随时间的变化曲线见图 4。

从图中可以看出:

运营期间各筒仓平均沉降量在加、卸荷的循环作用下总体上是呈增长趋势的。

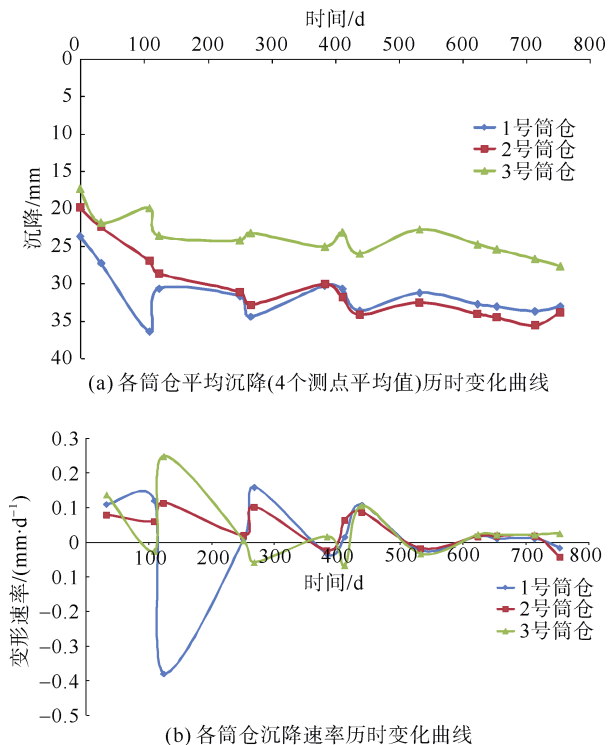


图4 运营期各筒仓沉降变形特征

Fig.4 Characteristics of subsidence and deformation during operation of coal bunkers

在运营初期(2014 年 10 月至 2015 年 1 月),3 个筒仓均出现一次较大沉降(最大约 11.3 mm),变形速率最大约 0.38 mm/d;在后续运营过程中(2015 年 1 月至 2016 年 7 月)3 个筒仓在反复加荷至满仓

状态下的沉降,均呈回弹—压缩的波动趋势,变形速率逐步减小,此点与上覆加、卸荷的循环作用是一致的。

在沉降观测后期(2016 年 7 月至 2016 年 11 月),3 个筒仓沉降速率均较小(小于 2 mm/月),说明三者均进入稳定变形阶段。通过最终的数据可以知道,3 个筒仓在运营期间土层压缩量最大值约为 15.0 mm。

3.3 不均匀沉降

根据 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[15]第 5.3.4 条规定,高层建筑整体倾斜不得大于 0.002 5,利用各筒仓监测点总沉降量及测点间的距离,对原煤仓倾斜值进行了计算(表 2)。

表 2 原煤仓倾斜值计算结果

Table 2 Computation results of tilt of raw coal bunkers

	1号筒仓	2号筒仓	3号筒仓
沉降最大值/mm	41.09	41.09	32.62
沉降最小值/mm	26.30	26.30	28.48
倾斜	0.000 5	0.000 5	0.000 1

从表中可以看出,由不均匀沉降引起的倾斜值最大为 0.000 5,远小于 0.002 5,满足规范要求的允许值。

4 沉降计算结果对比分析

选取 1-1、2-2 剖面(图 1),分别采用三维数值分析、JGJ 72-2004《高层建筑岩土工程勘察规程》^[14]、GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[15],对 3 个筒仓角点沉降进行了计算,上部荷载分别采用仓壁完工、满仓状态及设计荷载(图 2),在此基础上,与现场沉降监测结果进行了对比分析。

4.1 三维数值分析

随着计算机技术的发展,采用有限元分析法计算地基沉降成为可能^[16]。计算模型根据原煤仓设计参数及地质勘察实际地层结构建立而成(图 5),为避免边界效应影响数值计算结果,将模型向周边外扩,

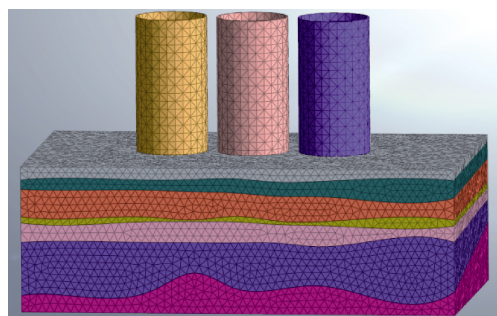


图 5 原煤仓三维模型示意图

Fig.5 The three-dimensional model of raw coal bunker

最终确定模型尺寸:214 m(长)×133 m(宽)×71.5 m(高),各土层计算参数见表 1。

三维数值分析采用 madas/GTS 软件完成,岩土材料类型选取 mohr-coulomb 模型类型,边界条件根据整体坐标系方向在模型左/右/前/后以及底部设置位移约束。在计算过程中,将上部建筑物简化为均布荷载(满仓状态,2014-10-25,上覆荷载介于 569~592 kPa),并采用增大基础模量的方法,考虑了基础刚度对沉降变形的影响。

满仓状态荷载作用下原煤仓平面沉降结果见图 6, 1-1 及 2-2 剖面沉降计算结果见图 7。因数值分析计算时,各地基土层弹性模量 E 参数取值均为经验值,在此,仅对各筒仓沉降变形特征进行趋势及规律分析。

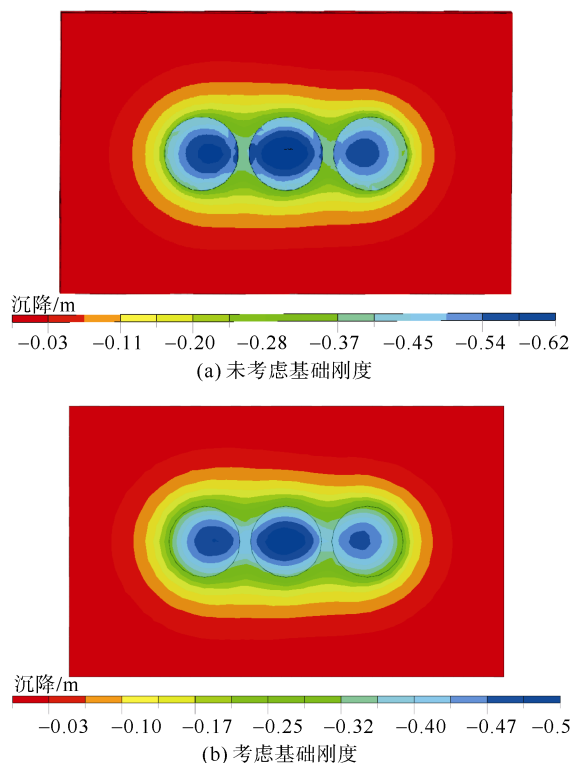


图 6 平面沉降计算结果分布图(满仓状态荷载)

Fig.6 Distribution of calculated plane subsidence (full load state)

从图 6 和图 7 中可以看出:

从平面上来看,原煤仓沉降特征与建筑物平面形态相关,整体上呈椭圆形;受荷载分布的影响,东西两侧筒仓最大沉降均向中间仓(2 号仓)偏移。此点与现场实际监测相符。

从 1-1、2-2 剖面沉降分布图来看,受上部荷载大小的影响,1 号仓及 2 号仓沉降值及影响深度较大,而 3 号仓相对较小。

考虑基础刚度的条件下,原煤仓 3 个筒仓基底土压力的分布形式产生了变化(由抛物线形转化

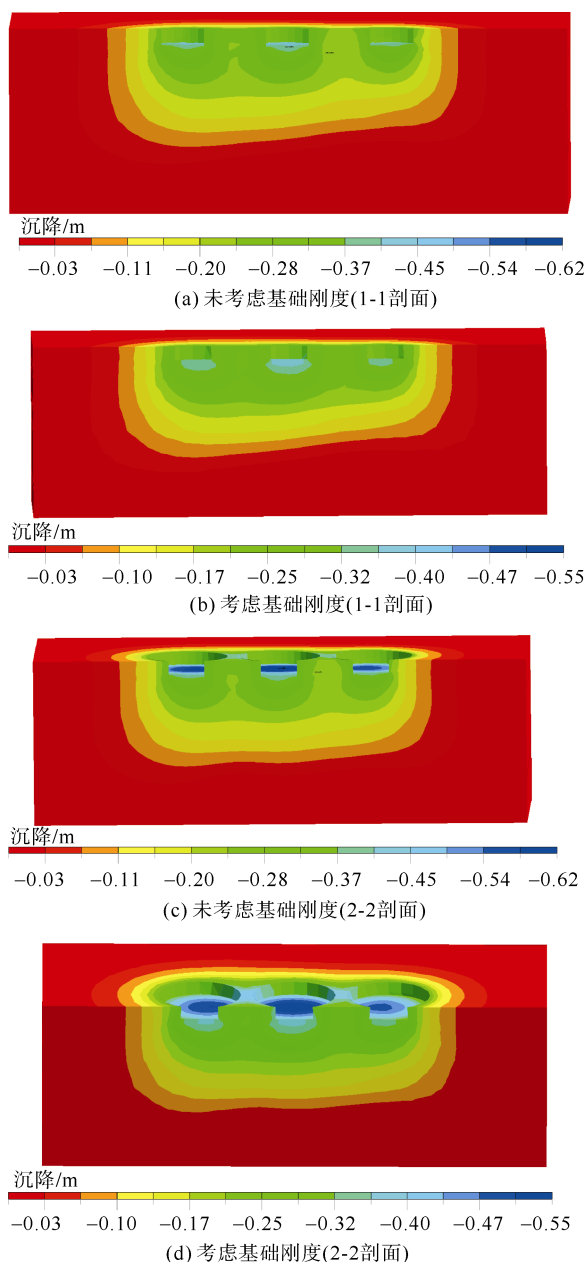


图7 各剖面沉降计算结果图

Fig.7 Calculation results of subsidence in different sections

为马鞍形),受其影响,平面沉降范围、剖面影响深度相较之下较高,而沉降值相较之下降低。

通过现场监测结果反馈,在计算中考虑基础刚度的影响,所得基底压力的分布形式及沉降计算结果更符合现场实际。

4.2 依据规范计算

采用规范方法计算沉降时,将原煤仓圆形基础(直径 37 m)等面积代换为正方形基础,边长 32.78 m,各计算点位置及编号见图 1。各筒仓角点沉降计算及监测结果见图 8。

4.3 沉降变形特征对比分析

从图 8 可以看出:

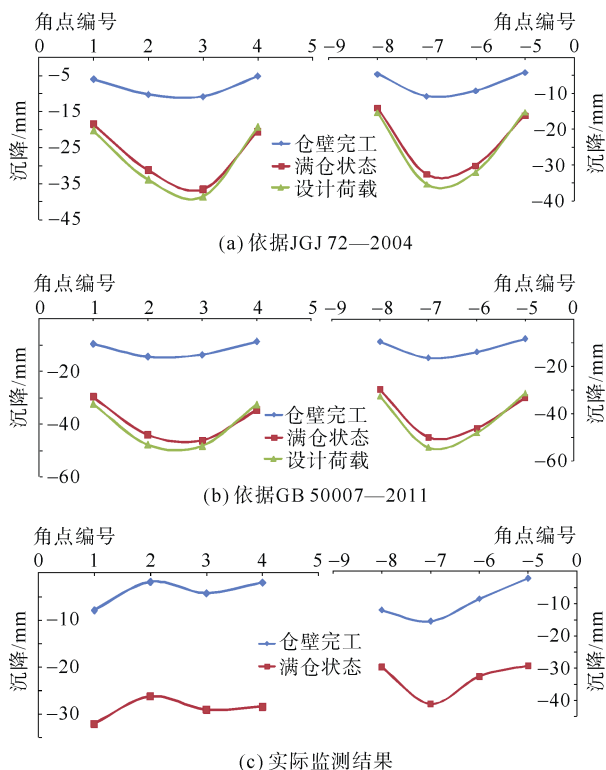


图8 各角点沉降计算及实际监测结果对比

Fig.8 Comparison of calculated and monitored subsidence at each angular point

同等条件下,采用《高层建筑岩土工程勘察规程》计算所得沉降值,低于《建筑地基基础设计规范》计算所得;相较而言,实际监测所得最终沉降与《高层建筑岩土工程勘察规程》计算结果较为接近。

实际监测结果表明,满仓状态时,各角点总沉降量为 26.3~41.1 mm,而仓壁完工之前各角点沉降量为 1.9~15.5 mm。由此可知,地基土层主要沉降量集中在运营期间,建设施工期沉降所占比例较小(多集中于 10%~27%),而规范计算该阶段沉降(6.0~16.5 mm)与满仓状态荷载沉降(18.6~46.4 mm)比值多在 40%以上。

从各角点计算沉降曲线可以看出,依据规范计算得出的沉降均呈抛物线形分布(中间仓较大,而两侧较小);而实际监测结果受基础刚度、地层条件的影响,土压力分布形式与规范计算相比产生了改变,因此,其沉降变形并未呈典型抛物线形分布。

实际监测及依据规范计算得出的结果均表现出整体继承性的规律,即随着上部荷载的不断增大,各计算点的沉降亦随之增大,且整体分布形式与上一级荷载相比变化不大。

5 结论

a. 建设施工阶段各筒仓平均沉降量随基底压

力的不断增长呈增加趋势；在运营期间，随着反复加、卸荷的循环作用，沉降呈回弹—压缩的波动趋势，但变形速率逐步减小，最终，3 个筒仓进入稳定变形阶段。

b. 实际监测结果表明，地基土层主要沉降量集中在运营期间(满仓状态)，建设及施工阶段(仓壁完工)沉降量所占比例较小(10%~27%)，而规范计算该阶段沉降所占比例多在 40%以上。

c. 通过数值分析计算可知，在沉降计算及预测过程中，考虑基础刚度的影响，所得基底土压力的分布及沉降计算结果更符合现场实际。

d. 通过原煤仓建设施工及运营期间 3 年多的沉降监测实际验证，地基变形满足规范要求的允许值，证明在陕北、鄂尔多斯地区，采用第四系上更新统湖积粉细砂作为天然地基的方案是可行的。为类似场地高层建筑提供了参考依据。

参考文献

- [1] 陈永奇, 吴子安, 吴中如, 等. 变形监测分析与预报[M]. 北京: 测绘出版社, 2003
- [2] 姚顽强, 马飞, 龚云, 等. 基于 D-InSAR 的彬长矿区沉陷变形监测[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(5): 563-568.
YAO Wanqiang, MA Fei, GONG Yun, et al. Binchang mining subsidence deformation based on D-InSAR[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(5): 563-568.
- [3] 靳猛. 郑西客专新临潼车站路基板结构沉降控制技术研究[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(3): 371-375.
JIN Meng. Subground pile slab structure settlement control technology for new Lintong station of Zhengzhou-Xi'an passenger railway[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2012, 32(3): 371-375.
- [4] 刘宏, 李攀峰, 张俅元. 九寨黄龙机场高填方地基工后沉降预测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 90-93.
LIU Hong, LI Panfeng, ZHANG Zhuoyuan. Prediction of the post-construction settlement of the high embankment of Jiuzhai-Huanglong airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 90-93.
- [5] 黄润秋, 许强. 工程地质广义系统科学分析原理及应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 96-97.
- [6] 钱思众, 樊育豪. 高层建筑物地基沉降监测与分析[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(3): 284-289.
QIAN Sizhong, FAN Yuhao. Monitor and analysis of ground subsidence for high-rise building[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, 34(3): 284-289.
- [7] 张健雄, 蒋金豹, 张建霞. 高层建筑沉降监测与灰色预测[J]. 测绘科学, 2007, 32(4): 56-59.
ZHANG Jianxiong, JIANG Jinbao, ZHANG Jianxia. Subsidence monitoring and grey forecasting for high-layers buildings[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(4): 56-59.
- [8] 罗红明, 唐辉明, 晏鄂川. 武汉阳逻电厂烟囱基础沉降预测研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 2): 844-848.
LUO Hongming, TANG Huiming, YAN Echuan. Study on prediction of chimney foundation settlement of Yangluo power plant in Wuhan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 844-848.
- [9] 朱才辉, 李宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 293-301.
ZHU Caihui, LI Ning, LIU Mingzhen, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of Lüliang airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 293-301.
- [10] 董琪, 段旭, 李阳, 等. 黄土沟壑高填方工后 12 个月沉降变形规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(2): 89-95.
DONG Qi, DUAN Xu, LI Yang, et al. Subsidence deformation law of high embankment after 12 months in loess ravine[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(2): 89-95.
- [11] 经绯, 刘松玉, 邵光辉. 软土地基上路堤沉降变形特征分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 728-730.
JING Fei, LIU Songyu, SHAO Guanghui. The settlement of embankment on soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 728-730.
- [12] 魏纲, 袁慧杰, 魏新江. 沉管隧道施工期间与工后长期沉降的数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3413-3420.
WEI Gang, QIU Huijie, WEI Xinjiang. Analysis of construction and post-construction settlement data caused by immersed tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3413-3420.
- [13] 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 Caihui, LI Ning. Post-construction settlement analysis of loess high filling based on time-dependent deformation experiments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 3023-3031.
- [14] 高层建筑岩土工程勘察规程: JGJ 72—2004 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [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] 章广成, 艾传井. 地基沉降预测模型和方法研究[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(6): 44-47.
ZHANG Guangcheng, AI Chuanjing. Foundation settlement prediction model and method[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(6): 44-47.

(责任编辑 聂爱兰)