

超厚湿陷黄土区 SHR-SRC 结构 施工过程沉降监测与分析

宋彧, 罗小博[†]

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 为真实反映超厚湿陷性黄土区超高层型钢混凝土 (Super High Rise-Steel Reinforced Concrete, 简称 SHR-SRC) 结构在施工过程中沉降特征随上部载荷的变化规律, 并指导安全施工, 在试验场区建立了一套完整的沉降监测体系, 动态追踪测试了超高层结构在整个施工周期 2 年 6 个月内的沉降变形等原始数据. 利用实际监测结果, 结合 ABAQUS 有限元分析, 对 SRC 结构沉降特性进行了系统分析. 结果表明: 施工过程中, SHR-SRC 结构整体沉降较为均匀, 最大沉降速率为 0.28 mm/d. 距离核心筒附近的地下试桩点位正、负应变值小, 远处则相反; 土体在施工强度平缓状况下, 局部会出现短暂的“回弹”现象. 模拟显示筏板底中心桩顶位移最大, 边桩次之, 角桩最小, 同一桩产生沉降差说明桩本身存在轴向压缩. 但由于黄土地基及结构受力的复杂性, 相关规律需进一步分析与探讨.

关键词: 超厚湿陷性黄土; SHR-SRC 结构; 施工; 沉降监测; 原始数据

中图分类号: TU196.2

文献标志码: A

Settlement Monitoring and Analysis on Construction Process of SHR-SRC Structure in Ultra-thick Collapsible Loess Area

SONG Yu, LUO Xiaobo[†]

(College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To truly reflect the variation law of settlement characteristics of Super High Rise-Steel Reinforced Concrete (SHR-SRC) structure with the upper load during the construction process in the ultra-thick collapsible loess area and guide the safe construction, a complete set of monitoring system was established to dynamically track testing settlement and deformation of SHR structure in the whole construction period (2.5 a) by the original data in the test area. The settlement characteristics of a SRC structure were analyzed systematically by actual monitoring results and ABAQUS finite element analysis. The results showed that the overall settlement of the SHR-SRC structure was relatively uniform, and the maximum settlement rate was 0.28 mm/d in the construction process. The positive and negative strain values of the underground test pile near the core tube were small, but far away the core they went by contrary. Under the condition of gentle construction intensity, local "rebound" phenomenon occurred briefly. The simulation showed that the largest displacement occurred at the top of the center pile at the bottom of raft, followed by the side pile, and the smallest displacement occurred at the angle pile. The settlement difference of the same pile indicated that the pile itself had axial compression. However, due to the complex mechanism of the loess and the structure, the related law is still needed to be further investigated and discussed.

Key words: ultra-thick collapsible loess; Super High Rise-Steel Reinforced Concrete (SHR-SRC) structure; construction; settlement monitoring; original data

* 收稿日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51468040), National Natural Science Foundation of China (51468040)

作者简介: 宋彧 (1963—), 男, 甘肃定西人, 兰州理工大学教授, 博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: lutlxb123@163.com

近年来,从我国国情出发,SHR 结构得到了快速发展,其结构形式复杂多样。然而 SRC 结构以受力合理、稳定性好、强度高、刚度大,延性、耗能性及抗震性能好等诸多力学优点被广泛应用到大跨度、高层及 SHR 结构中。此外,它以减小构件截面面积并充分利用材料、施工便捷、建造速度快、社会效益好、防火防锈耐久性大大提高等突出特点在土木工程界深受“青睐”。众所周知,SHR 结构因高、重特点,建造在良好地基上并非易事,然而在超厚黄土湿陷性地基中修建 SHR-SRC 结构,因地下土体物理、力学性能存在巨大差异及桩土的复杂受力等因素影响,使其安全性在施工过程中显得尤为重要,全方位沉降监测是保证安全的重要举措。

目前,众多国内外学者基于大量沉降监测数据对 SHR 结构的沉降特性及规律进行了研究。在国内,主要集中在沿海软土地带,姜晨光等^[1]早先根据大量资料,得出了沉降时效基本规律及相应的经验公式;钱思众等^[2]对高层建筑地基沉降监测表明,施工速度与场地条件都会影响沉降速率。刘射洪等^[3-4]以工程实例与模型相结合,证明黏土地基沉降具有时变性,其效应对 SHR 结构内力有重要影响。马思文^[5]以 632.0 m 上海中心大厦为工程背景,对施工过程中沉降量进行了监测。兰泽英等^[6]通过自主研发的新型摆动监测系统 (CCD) 对 SHR 等结构进行了精准测量。袁长丰等^[7]利用 4 年的沉降实测数据,得出沉降量不随时间、荷载的增大呈线性变化,并引出了沉降曲线函数。文献[8-9]对高层结构的沉降监测、预测等方面进行了叙述。除此之外,吕远强等^[10-14]对大荷载煤仓等其他工程结构进行了沉降监测与分析。在国外,许多学者^[15-20]对高层结构沉降计算、控制及监测方面也做了大量的分析与研究。

超厚湿陷性黄土区结构的研究主要是有别于相对成熟的沿海软、黏土地区,其最显著的特征是,浸水后的原状黄土矿物成分及微观颗粒就会发生物理与化学反应,原稳定结构受到破坏,土体强度急剧下降,在应力作用下产生湿陷性变形,结构不均匀沉降,影响其安全与稳定。因场地位置的特殊性,本文以超厚湿陷性黄土区首栋 SHR-SRC 结构为研究对象,对施工过程中的沉降及变形等进行系统分析,旨在为今后类似场地同类型结构的设计、施工及监测提供参考。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

庆阳市某大厦目前作为超厚黄土区最高建筑,占地面积约 3 640.0 m²,结构高度 164.0 m,采用 SRC 框架-核心筒体系,0.000 m 以上 38 层,其以下 4 层,基坑深度-21.1 m,摩擦型桩长 40.0 m,桩间距 3.3 m,桩径 1.0 m,总桩数为 143 根,筏板厚 3.0 m,外观效果如图 1。



图 1 建成后外观图

Fig.1 Appearance of completion

1.2 地质条件

建筑场地地处素有“陇东粮仓”之称的全国最大黄土高原区——董志塬,下部由距今约 200~300 万年的第四纪早更新世 (Q) 至中更新世 (Q) 组成,巨厚原生黄土达 200.0~300.0 m 左右。到了晚更新世末期,地层剥蚀作用较严重,黄土塬周边形成冲沟,地形破碎,其上部 100.0 m 以内由黑垆土 (Q₄^{eo})、马兰黄土 (Q₃^{eo})、离石黄土 (Q₂^{eo}) 及午城黄土组成 (Q₁^{eo}),土层之间夹杂古土壤 (粉质黏土)^[21],其厚度变化及部分物理力学指标见表 1。

表 1 地层主要物理力学参数取值

Tab.1 Physical and mechanical parameters of formation

时代	厚度 /m	孔隙比	塑限 /%	液限 /%	容重 / (kN·m ⁻³)	弹性模量 E/Pa	压缩模量 E _s /MPa	泊松比
Q ₄	2~3	—	—	—	—	—	—	—
Q ₃	10~12	0.964	17.9	30.2	18.3	3.9×10 ⁸	13.7	0.41
Q ₂	40~42	0.825	18.2	31.2	18.6	5.0×10 ⁸	16.8	0.40
Q ₁	>200	0.725	18.4	32.1	18.8	6.6×10 ⁸	17.1	0.42

2 沉降监测方案、仪器布设及数据采集

利用传统的外部沉降监测(宏观)与新型的地下试桩自动监测(微观)相结合,通过控制高程、应变、电阻及温度等参数,对 SHR-SRC 结构进行长期健康监测(包括施工的全过程及工后监测),为及时纠倾、局部加固维修及后期沉降预测奠定基础。

2.1 外部沉降观测

外部沉降采用 DSZ2 自动安平水准仪配合水准尺观测.在远离建筑 100.0 m 以外稳定区域设置 6 个基准点;根据结构布置形式,为确保精准监测,在核心筒四周布置 2#、3#、4#、10# 共 4 个观测点,外围框架柱上分别布置 1#、5#、8# 及 11# 观测点;裙楼布置 6#、7# 和 9# 观测点仅作为安全监测,不深入研究,方案中总共布置 11 个观测点(如图 2),主体结构新建一层,现场沉降观测一次,记录数据并及时分析。

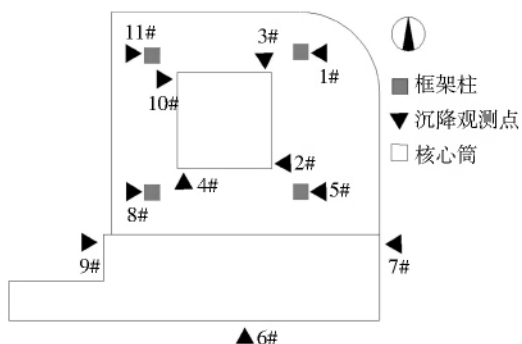


图 2 外部沉降观测平面示意图

Fig.2 Diagram of external settlement observation

2.2 地下沉降监测

为了更加精确地获得结构的沉降变形特征并获得一些原始数据,结合外部沉降观测制定具体监测方案(如图 3)。

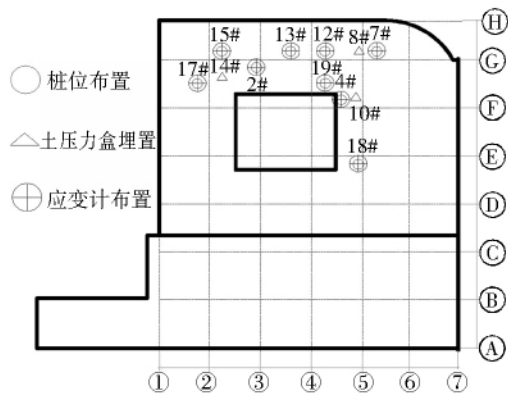


图 3 地下沉降监测方案及仪器埋设图

Fig.3 Underground settlement monitoring scheme and buried instruments

在桩顶与桩间土相应位置分别安装 JMZX-215A 型应变计(图 4(a))、JMZX-50XX 型土压力盒(图 4 (b)),将导线通过 PVC 保护管从地下引到地面,与 32 通道 JMZX-32A 数据采集仪(图 4(c))相连,调试完毕后定期采集动态数据,实现各参数自动化测量并长期健康监测^[22]。



(a)应变计

(b)土压力盒



(c)数据采集仪

图 4 仪器布设图

Fig.4 Layout of instruments

3 试验结果与分析

3.1 施工过程沉降分析

图 5(a)给出了核心筒上观测点高程随施工推进的变化曲线.由于前期施工强度较大、且 2# 及 3# 附近堆积大量建材、机械等,故在外界施工速度及外荷载等综合因素作用下,其剪应力大于土体抗剪强度,局部发生剪切破坏,在 150 d 左右,瞬时沉降明显;由图 2 看出与之对称的 4#、10# 点在对应时刻出现抬升,整体倾斜满足规范^[23],持续 30 d 后,这种“跷跷板”效应减弱,各测点开始逐渐保持同步沉降;到中期,由于资金、技术等问题迫使结构施工进度减缓,各点高程同等变化,沉降均匀;一直持续到 500 d 左右,工程如期正常进行,应力逐渐增加,土颗粒间密实度增强,沉降量呈减小趋势,以整体结构高程曲线为参考,全周期内(915 d),核心筒各点高程同步减小,沉降均匀,平均沉降量为 217.5 mm。

相对于图 5(b)所示框架而言,与核心筒相比,外围框架受力分散且较小,1#、5#、8# 及 11# 各点自始至终保持同步下降,沉降均匀,平均沉降量 212.7 mm,略小于核心筒;裙楼此处仅作为安全监测,各点

沉降变化如图 5(c)所示,其变化规律与框架及核心筒保持一致,平均沉降量为 211.3 mm,均小于前两者,符合高耸结构沉降量允许值^[23],从侧面反映出各结构组成的整体均匀沉降,工程建建后的沉降由课题组成员在此基础上继续追踪监测,对其整体结构的沉降、变形等做进一步的分析与深究,最终形成一套完整体系。

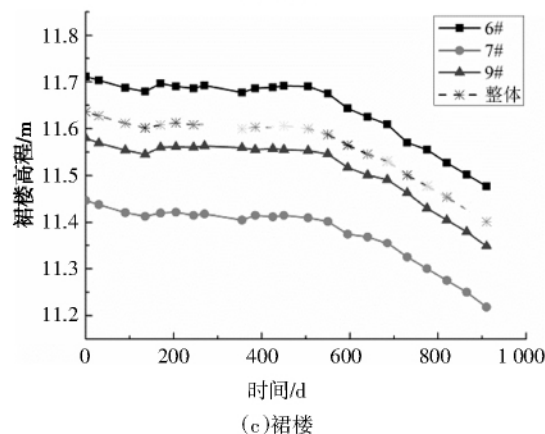
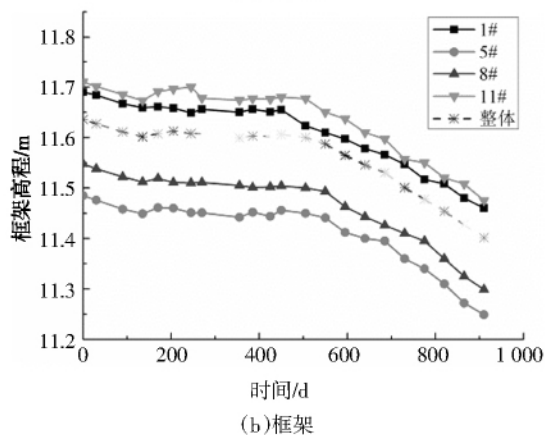
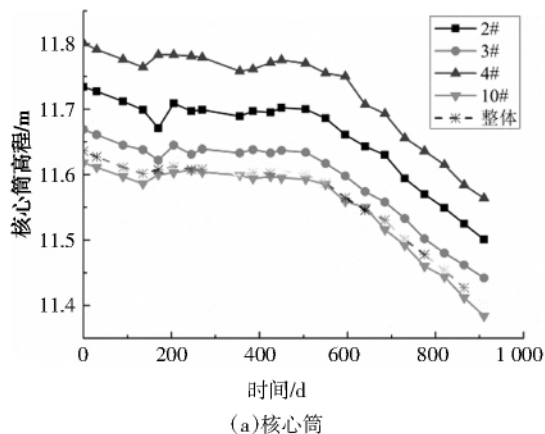


图 5 各结构高程历时变化曲线

Fig.5 Diachronic variation curves of the elevation of each structure

图 5 精确地给出了各结构上每个测点随时间的变化曲线,但个别点还是存在微小差异,图 6 更加直

观地描述了核心筒、框架及裙楼在施工过程中的高程变化曲线,各结构随整体同步沉降,为后期沉降监测及进一步沉降预测提供依据。

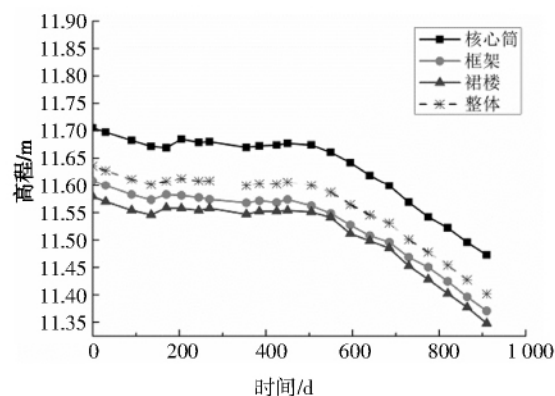


图 6 各结构与整体沉降对比曲线

Fig.6 Comparison between the structure and the overall settlement

整体结构在施工全周期内的速率变化如图 7 所示,伴随着施工的不断进行,沉降速率在 30 d 达到最大值 0.28 mm/d,其后随着施工动态的变化呈波浪形变化,450 d 与 505 d 之间趋于最小值 0.066 mm/d,后期呈线性增长,平均沉降速率为 0.23 mm/d,符合规范要求。

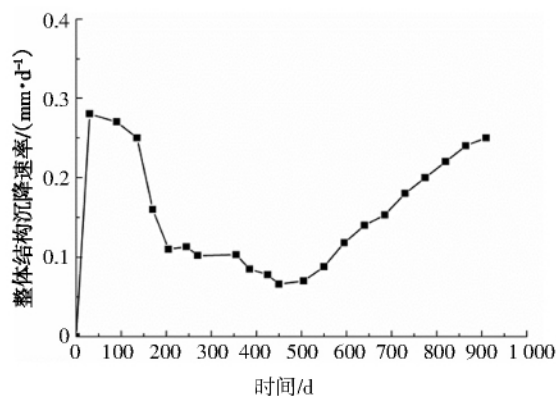


图 7 结构整体平均沉降速率与时间曲线

Fig.7 Relation of overall average settlement rate and time of structure

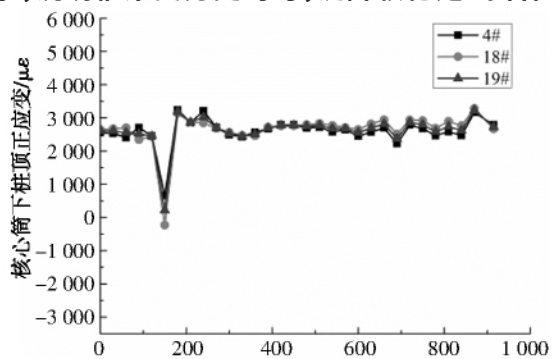
利用健康监测数据所得曲线图,可及时调整施工工况(施工强度、施工顺序等),以及对材料堆放及机械安装位置进行合理布置,为安全施工提供了基本保障。

3.2 结构变形特征分析

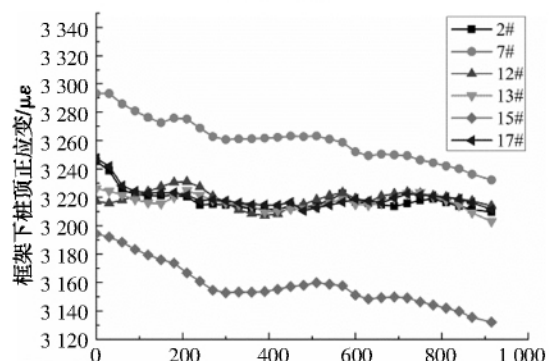
3.2.1 桩身应变

图 8(a)反映了核心筒下桩顶正应变曲线关系,施工初期,各监测点数值近乎为同一值 2 500 $\mu\epsilon$,将

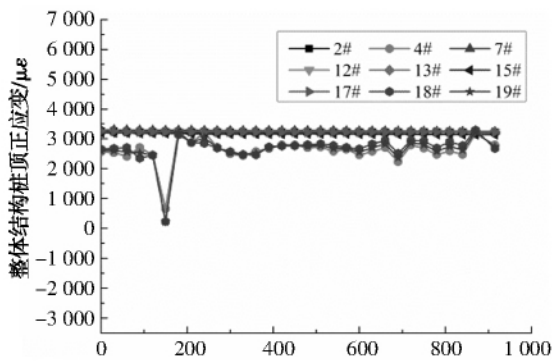
其作为各自的标定值,与图 5 沉降观测相对应,到了 150 d 左右时,荷载急剧增大,对湿陷性黄土来讲,由土骨架、水分与气体共同承担,随着骨架进一步被压缩,直到气体与水分排出,其应力转移到骨架上,突变为负应变,其中 18# 点反向互补后实际为 $-229.1 \mu\epsilon$,中后期一直呈波浪形变化 还可发现,在整个监测过程中,靠近核心筒最近处 4# 数值最小,较远处 19# 次之,最远处 18# 正应变值最大.从图 8 (b) 框架正应变曲线来看,其变化规律较核心筒平缓,无突变现象,说明框架受力更均匀,沉降较稳定.综合图 8



(a) 核心筒



(b) 框架



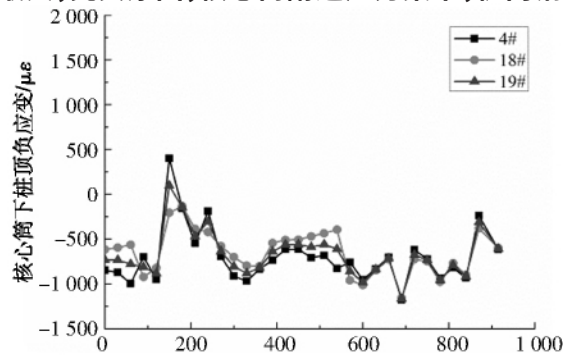
(c) 核心筒框架

图 8 各结构试桩正应变与时间曲线

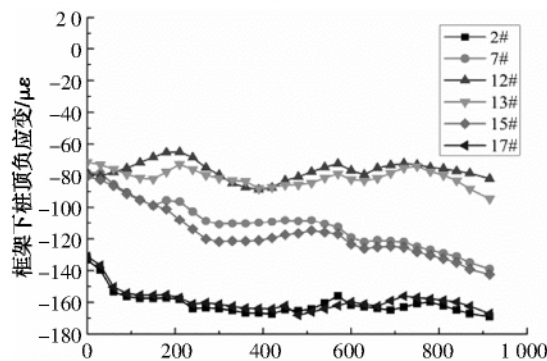
Fig.8 Relation of positive strain and time of each structure on test pile

(a) 与 8 (b) 精确到各点变化关系,图 8 (c) 在同一坐标系下直观地给出了两者的正应变变化曲线,由于纵坐标相差较大,框架上各点变化近似为一条直线.在外部沉降监测基础上,内部试桩监测会获取更加精确的试验数据,两者相互补充,为施工与科研提供了依据.

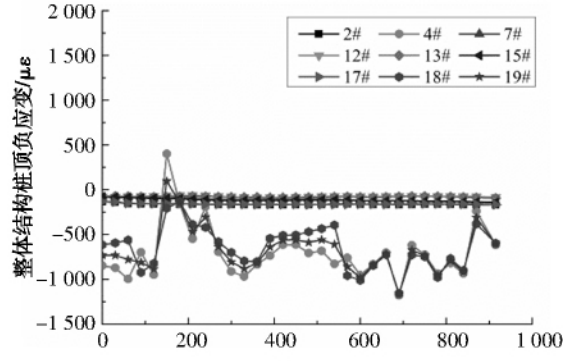
为了进一步验证图 8 所得结论,图 9 分别给出了核心筒、框架及两者整合结构负应变历时曲线,由图看出,核心筒 4# 负应变值均小于 18# 及 19#,18# 值最大,究其原因,核心筒附近应力集中,桩内钢筋



(a) 核心筒



(b) 框架



(c) 核心筒 框架

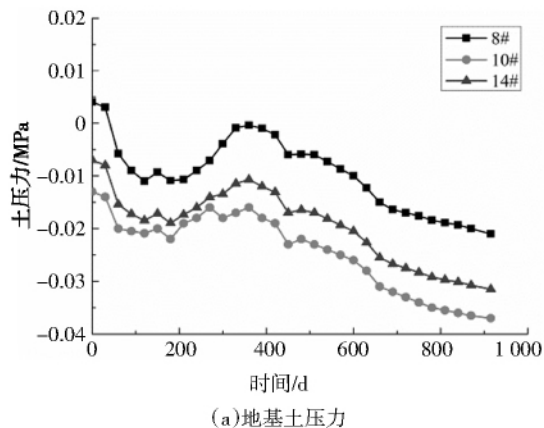
图 9 各结构试桩负应变与时间曲线

Fig.9 Relation of negative strain and time of each structure on test pile

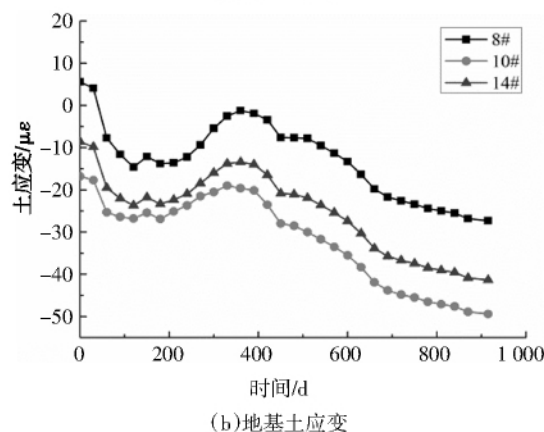
压应力大,在较远地带,施工强度较弱,再加上初期快速施工条件下产生的地基变形在短时间内亦呈恢复趋势,由“重叠效应”导致钢筋受拉,故远处影响较小,与现场施工状态相吻合;框架及整体结构变化规律与正应变相似。

3.2.2 土体变形

测定土体相关参数,不但可以实时监测地基的不均匀下沉,还能与试桩的部分参数紧密结合起来,为复杂的桩-土受力分析提供参数。图 10(a)为场地地基土压力历时变化曲线,在施工初期,湿陷性黄土在各级荷载作用下,土粒孔隙中气体逐渐受压,土骨架变形,产生瞬时沉降,土压力增加;200~360 d 后施工强度逐渐减缓,此阶段内,土体较前期比,出现类似于卸载回弹现象;中后期受结构自重增加、施工扰动增强等因素影响,土压力大体呈增大趋势,局部也会出现微小回弹;在靠近核心筒,应力相对集中,土压力也相应增大,对应在上图 10# 位置,最远处 8# 最小,但各点变化步调相一致。地基土应变曲线如图 10(b)所示,曲线变化形式与图 10(a)接近,初期也是 10# 数值最大为 $-16.8 \mu\epsilon$,处于受压状态,14# 和 8# 分别为 $-8.6 \mu\epsilon$ 、 $5.6 \mu\epsilon$ 。



(a)地基土压力



(b)地基土应变

图 10 地基土压力、应变历时变化曲线

Fig.10 Curve of pressure and strain duration of foundation soil

为进一步考察土体的变形,图 11 给出了土压力与应变之间的关系,考虑到篇幅原因,仅以 8# 为例,从散点图中获悉图形变化呈线性,地基土处于弹性状态;14# 近似于一条直线,相反,距离核心筒较近的 10# 线性规律不明显,说明土体产生塑性变形。

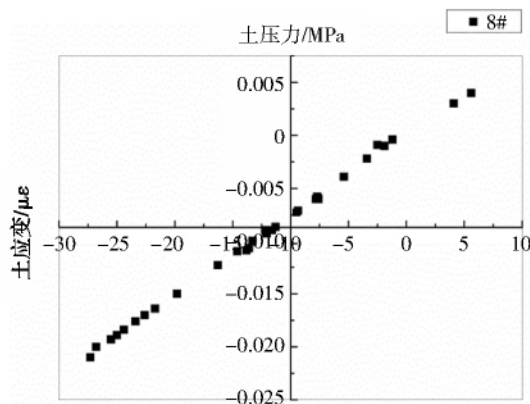


图 11 土压力与土应变之间关系

Fig.11 Relation of soil pressure and strain

4 有限元模拟分析

现场试验利用各监测技术手段,控制桩-筏及地基沉降量、沉降速率等,主要用于指导施工,为后期沉降预测做准备;在此基础上,为了更加形象、直观地反映桩-筏基础与持力土层的沉降、变形等,采用非线性有限元法建立三维模型,一则为与实际监测数据作比较,验证有限元分析的可行性,二则为桩-筏结构优化设计提供思路,三则为基础局部加固提供方案。

ABAQUS 以其较强的实用性被广泛地应用到工程案例中^[24],原模型根据 SHR 设计参数及实际地质勘察资料建立,参考相关文献^[25],平面布置如图 12 所示。最终筏板尺寸:10.0 m×10.0 m×3.0 m,选用 9 根对称的直径为 1.0 m 且长度为 40.0 m 的桩,土体模型尺寸:50.0 m×50.0 m×80.0 m。

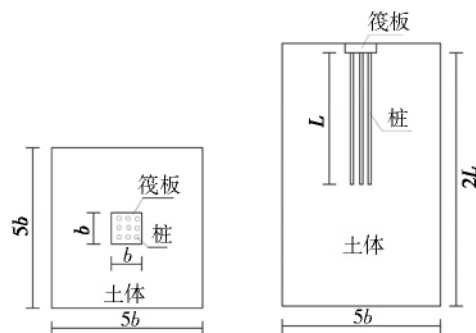


图 12 平面布置简图

Fig.12 Diagram of layout

采用 Drucker-Prager 本构模型, 钢筋与混凝土分别采用 T3D2 与 C3D8R 单元进行分离式建模, 并采用 embedded 技术进行自由度耦合; 考虑到黄土的湿陷性及模拟的精准性, 在筏板-土、筏板底-土及桩-土间切向(垂直向)采用摩擦型接触, 系数选用 0.5, 法向(水平向)均采用“硬”接触; 筏板-桩顶及桩底-土体间采用 tie 接触. 在整体坐标系下的模型周围及底部设置位移约束边界条件, 上部结构简化为均布荷载(介于 3 000~3 500 kPa), 模型如图 13 所示.

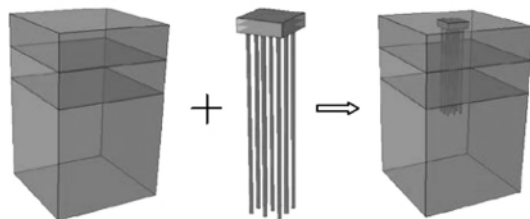
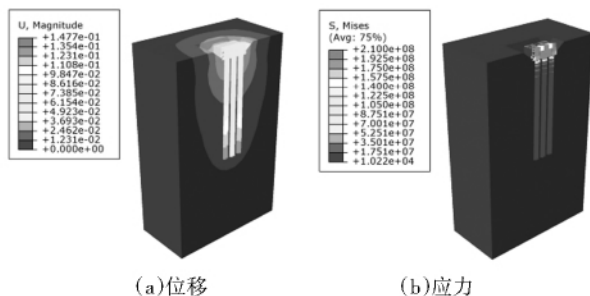


图 13 模型示意图

Fig.13 Diagram of model

4.1 桩-土位移、应力变化

图 14(a)为桩-土整体位移剖面云图, 可以看出, 在上部荷载作用下筏板周围土体下陷形成“凹形”槽, 桩位移明显大于土体位移, 随着深度的增加, 桩身位移逐渐增大, 土体位移逐渐减小, 整体位移最大值为 147.7 mm, 小于实测值, 原因是相比复杂的实际工况, 建模一方面是在相对理想条件下进行的, 影响因素较少, 另一方面与模型的约束程度、接触类型及参数等选取有关, 计算结果偏于保守; 在同一平面处, 由中心位置向四周减小. 桩-土应力云图如图 14(b)所示, 在筏板处应力相对集中, 其次, 桩身应力大于土体应力. 主要原因是上部荷载凭借筏板沿桩身传递, 最后扩散到桩间土及桩底土层中, 因此对筏板的设计(承载力、节约材料等)提出了更高的要求.



(a)位移 (b)应力

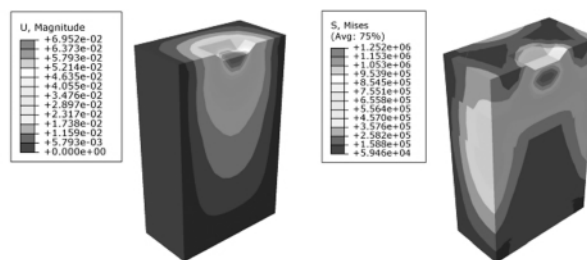
图 14 桩-土整体位移、应力云图

Fig.14 Cloud diagram of pile-soil integral displacement and stress

4.2 地基土体位移、应力变化

为了更加清晰地分析土体的位移与应力, 图 15

给出了相应云图. 图 15(a)显示土体位移小于图 14(a)中位移, 最大沉降值位于顶部中心, 原因是地基土中附加应力产生叠加, 取值为 69.52 mm, 沿着垂直面和水平面由于出现应力扩散, 此外, 随着施工荷载的增加, 下部土体密实度增强, 变形也随之减小, 从而导致位移减小. 由图 15(b)看出, 应力也主要集中在土体上部, 逐渐向周围扩散, 符合图 10(a)实测数据变化规律, 其范围远大于位移扩散范围, 这也对地基加固(注浆加固、桩基加固等)研究开辟了新领域.



(a)地基土位移

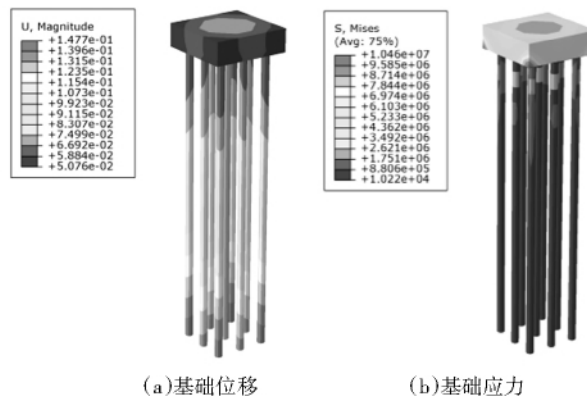
(b)地基土应力

图 15 地基土位移、应力云图

Fig.15 Cloud diagram of displacement and stress of foundation soil

4.3 桩-筏基础位移及应力变化

图 16(a)给出了桩-筏基础位移云图, 筏板位移均匀分布且由中心向外围逐渐减小, 中心处最大位移为 66.92 mm, 其边缘角处最小位移为 50.76 mm, 筏板在荷载作用下变形量小, 说明其刚度设计合理. 中心桩顶位移 70.95 mm, 边桩及角桩顶部位移分别为 64.03 mm、58.41 mm, 沉降差异较小. 对同一试桩而言, 桩底位移大于桩顶位移, 存在位移差说明桩本身被轴向压缩, 这对桩身设计(强度、变形)也提出了考验; 图 16(b)应力云图显示, 筏板顶部应力小, 下部应力大, 其原因是筏板底面与桩顶接触部位产生挤



(a)基础位移

(b)基础应力

图 16 桩-筏基础位移、应力云图

Fig.16 Cloud diagram of pile-raft foundation displacement and stress

压 在同一平面处,筏板边缘处应力大于中心处 桩 身上部应力普遍大于下部,原因是上部所受集中力大,导致钢筋与混凝土之间摩擦力增大,变形亦较大,且各桩应力同步变化,受力均匀。

5 结 论

1) 施工期 (915 d) SHR-SRC 结构核心筒部分沉降略大于框架与裙楼部分,建筑沉降 ($<250\text{ mm}$) 及倾斜值均满足规范要求 ($\leq 2\%e \sim 3\%eL$, L 即相邻两测点距离),结构整体沉降均匀。

2) 试桩监测初期,核心筒下正、负应变值最小,150 d 左右时上部荷载波动幅度大,其曲线变化亦较框架明显,到中后期,呈波浪形平稳变化但数值仍然整体小于框架 此外,各测点参数值与距离核心筒位置也有关,近处正、负应变值小,远处则相反,对及时调整施工具有重大意义。

3) 地基土压力、土应变也随着动态施工呈规律性变化,局部时间段出现“回弹”现象,荷载集中部位土体产生塑性变形,相对分散区域弹性变形明显。

4) 模型直观显示了桩、土体的位移及应力大小分布,筏板受力均匀,中心桩顶部位移最大,边桩次之,角桩最小的规律 土体应力由上部中心向周围扩散,位移随之减小。

5) 对设计阶段桩-筏计算、配筋等提供参考,在施工阶段指导安全性施工,并对后期沉降预测及结构加固奠定基础。

参考文献

- [1] 姜晨光,钟建民,黄家兴,等. 建筑沉降时效的监测与分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2004,23 (3): 505—509.
JIANG C G,ZHONG J M,HUANG J X,*et al.* Observation and analysis on time-dependency of building subsidence [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23 (3): 505—509. (In Chinese)
- [2] 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 S Z,FAN Y H. 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. (In Chinese)
- [3] 刘射洪,袁聚云,赵昕. 软黏土地区超高层建筑沉降变形的时变性研究 [J]. 地下空间与工程学报,2014,10 (S2): 1910—1916.
LIU S H,YUAN J Y,ZHAO X. Time-dependent pile reaction force analysis for pile-raft foundation of super high-rise buildings [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10 (S2): 1910—1916. (In Chinese)
- [4] 刘射洪,袁聚云,赵昕. 软黏土地基沉降的时变效应对超高层建筑结构内力的影响 [J]. 建筑结构学报,2015,36 (3): 150—157.
LIU S H,YUAN J Y,ZHAO X. Effect of time-dependent settlement of soft clay soil on internal forces in super tall buildings [J]. Journal of Building Structures,2015,36 (3): 150—157. (In Chinese)
- [5] 马思文. 上海中心大厦施工过程中的沉降观测 [J]. 建筑施工,2015,37 (3): 991—993.
MA S W. Settlement observation in Shanghai Tower construction process [J]. Building Construction, 2015, 37 (3): 991—993. (In Chinese)
- [6] 兰泽英,刘洋. 超高层建筑施工监测内容及技术体系研究 [J]. 测绘工程,2016,25 (7): 40—45.
LAN Z Y,LIU Y. Research on the content and technology system of super-high-rise building construction monitoring [J]. Engineering of Surveying and Mapping,2016,25 (7): 40—45. (In Chinese)
- [7] 袁长丰,刘颖,李聪明,等. 超高层建筑施工过程沉降特征分析 [J]. 测绘科学,2018,42 (7): 172—177.
YUAN C F,LIU Y,LI C M,*et al.* Analysis of settlement characteristics of an ultrahigh-rise building in the construction process [J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 42 (7): 172—177. (In Chinese)
- [8] 宰金珉. 复合桩基理论与应用 [M]. 北京: 水利水电出版社,2004: 138—169.
ZAI J M. Theory and application of composite pile foundation [M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press,2004: 138—169. (In Chinese)
- [9] TIAN L Y,HUA X S. Settlement prediction for buildings surrounding foundation pits based on stationary auto-regression model [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2007,17 (1): 78—81.
- [10] 吕远强,赵金刚,冯伟,等. 大荷载原煤仓天然地基沉降监测分析 [J]. 煤田地质与勘探,2018,46 (4): 122—128.
LÜ Y Q,ZHAO J G,FENG W,*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. (In Chinese)
- [11] 尚艳亮,师文君,杜守继,等. 盾构近距离下穿桥梁数值分析与监测 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版),2018,34 (2): 247—256.
SHANG Y L,SHI W J,DU S J,*et al.* Numerical analysis and monitoring research on shield passing through bridge at close range [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018,34 (2): 247—256. (In Chinese)
- [12] 徐江,龚维明,穆保岗,等. 软土区某地铁深基坑施工过程数值模拟及现场监测 [J]. 东南大学学报 (自然科学版),2017,47 (3): 590—598.
XU J,GONG W M,MU B G,*et al.* Numerical simulation and monitoring on construction process of deep pit of subway station in soft

- cay [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47 (3): 590—598. (In Chinese)
- [13] 马兰, 赵永虎, 米维军, 等. 灰土挤密桩控制高等级公路涵洞地基沉降效果研究 [J]. 水利水电技术, 2018, 49 (8): 47—54.
MA L, ZHAO Y H, MI W J, *et al.* Study on settlement control effect from lime-loess compaction pile on culvert foundation of high-grade highway [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (8): 47—54. (In Chinese)
- [14] 赵梦雪, 刘国林, 王志伟. 济宁地区高速公路沉降监测与分析 [J]. 测绘科学, 2017, 42 (11): 135—140.
ZHAO M X, LIU G L, WANG Z W. Monitoring and analysis of highway subsidence in Jining [J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42 (11): 135—140. (In Chinese)
- [15] 张玲, 赵明华. 考虑鼓胀变形的散体材料桩复合地基沉降计算 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43 (5): 120—124.
ZHANG L, ZHAO M H. Settlement calculation of granular material pile composite foundation with consideration of lateral bulging [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43 (5): 120—124. (In Chinese)
- [16] SUZUKI N, FUKUMOTO Y, SUDO T, *et al.* Vertical load tests of cast-in-place concrete nodular piles and settlement analysis for the pile foundation supporting high-rise building under dead load and seismic load [J]. AII Journal of Technology and Design, 2009, 15 (30): 399—404.
- [17] SUZUKI N, SEKI T. Vertical load test and settlement analysis of cast-in-place concrete nodular piles supporting a high-rise building [J]. Geotechnical Engineering, 2011, 42 (2): 20—28.
- [18] AMR S M, SUHEIL J E. Settlement-control piles to optimize the mat foundation of a high-rise building in Downtown Orlando [C] // HUSEIN M H, ANDERSON J B, CAMP W M. Art of foundation engineering practice Proceedings of the art of foundation engineering practice congress 2010. Washington D C: American Society of Civil Engineers, 2010: 605—619.
- [19] MIRSAYAPOV I, KOROLEVA I. Long-term settlements assessment of high-rise building groundbase based on analytical ground deformation diagram [J]. Procedia Engineering, 2016, 165: 519—527.
- [20] 罗如平, 杨敏, 杨军. 刚性筏板下群桩基础共同作用实用分析方法 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45 (11): 54—61.
LUO R P, YANG M, YANG J. Practical analysis method on interaction of rigid piled raft foundation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45 (11): 54—61. (In Chinese)
- [21] 宋彧, 罗小博, 路承功, 等. 庆阳地区超高层巨厚层黄土地基工程地质特征 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48 (6): 1756—1766.
SONG Y, LUO X B, LU C G, *et al.* Engineering geological characteristics of super high rise and thick loess foundation in Qingyang area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48 (6): 1756—1766. (In Chinese)
- [22] 罗小博. 陇东大厚度黄土区超高层结构桩筏基础沉降规律研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学土木工程学院, 2018: 26—31.
LUO X B. Research on settlement law of super-high-rise pile-raft structure foundation in Longdong Region [D]. Lanzhou: College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, 2018: 26—31. (In Chinese)
- [23] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 28—30.
JGJ 94—2008 Technical specification for pile foundation [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 28—30. (In Chinese)
- [24] 费康, 彭结. ABAQUS 岩土工程实例详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 221—239.
FEI K, PENG J. Detailed explanation of ABAQUS geotechnical engineering example [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2017: 221—239. (In Chinese)
- [25] 周琴玲. 黄土地区长短桩复合地基承载和沉降性状分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2012: 28—35.
ZHOU Q L. The bearing capacity and settlement of long-short pile composite foundation in loess area [D]. Xi'an: College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2012: 28—35. (In Chinese)